

M 融会贯通·工程软件
Master Engineering Software



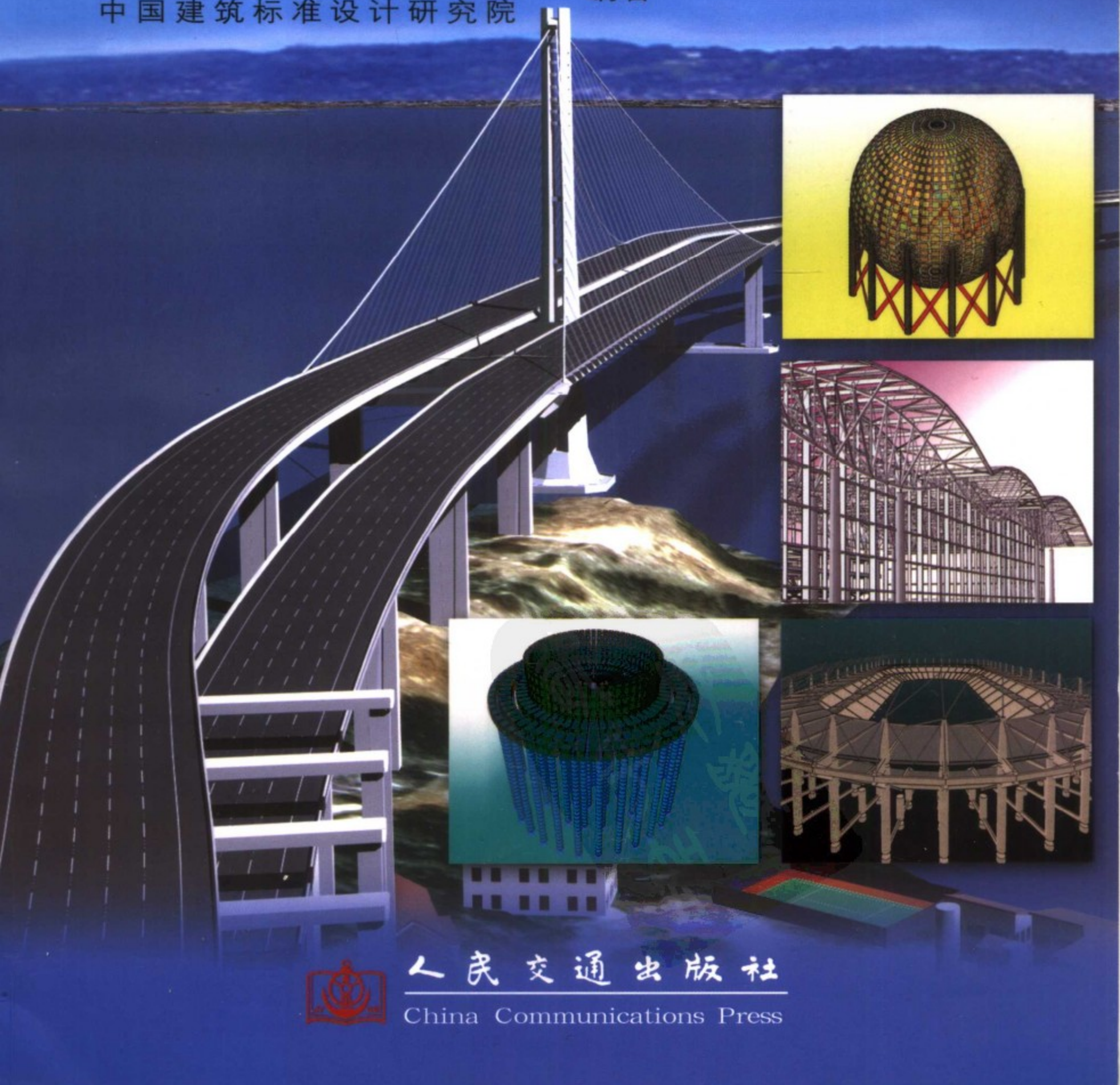
通用结构分析与设计软件的常青树

SAP2000

中文版使用指南

北京金土木软件技术有限公司
中国建筑标准设计研究院

编著



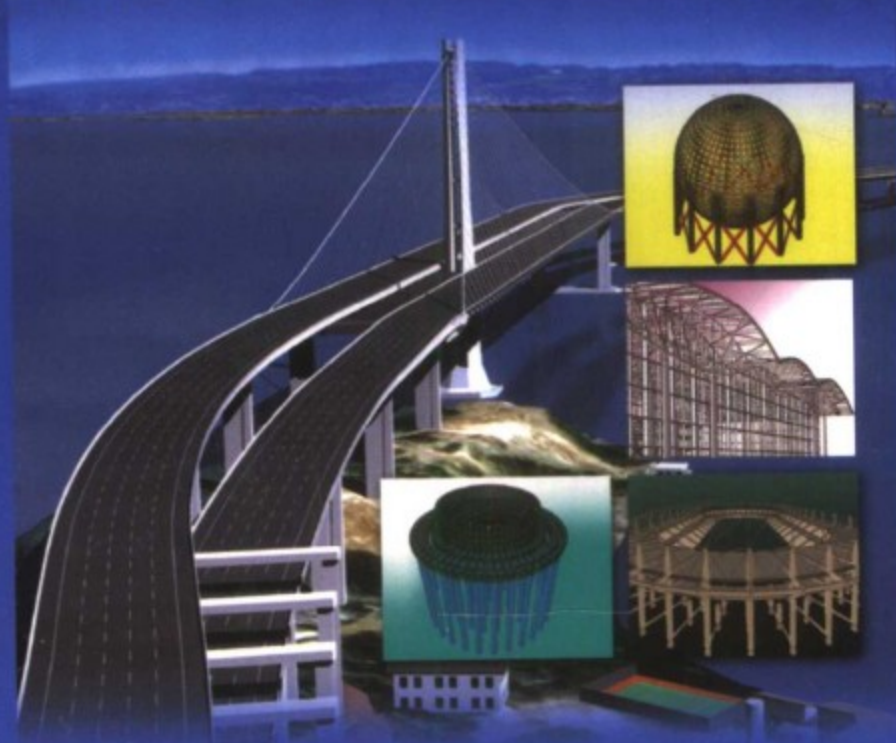
人民交通出版社

China Communications Press

责任编辑：陈志敏 (czm@ccpress.com.cn / 010-85285928)

文字编辑：高 培 刘彩云 王利恒

美术编辑：彭小秋



人民交通出版社网址：

<http://www.ccpress.com.cn>

指定图书信息发布和销售网站

工成网：<http://www.buildbook.com.cn>

图书分类建议：建筑结构 工程软件

ISBN 7-114-06156-0



9 787114 061561 >

ISBN 7-114-06156-0

定价：86.00元

M 融会贯通·工程软件
Master Engineering Software

通用结构分析与设计软件的常青树

SAP2000

中文版使用指南

北京金土木软件技术有限公司
中国建筑标准设计研究院

编著



人民交通出版社

China Communications Press

内 容 提 要

SAP2000 中文版是专门为中国工程设计人员和科研人员开发的具有中文界面和中国最新规范的通用结构分析与设计软件系统。本书配合 SAP2000 中文版的使用而编写,其内容涵盖了 SAP2000 基本概念、建模功能、分析功能和设计功能,并且针对 SAP2000 的高级分析技术和各种类型的结构形式,阐述了 SAP2000 在工程中的具体应用并进行了相关讨论。

本书可供从事结构工程设计的工程师和科研人员、高等学校的本科生及研究生参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

SAP2000 中文版使用指南 / 北京金土木软件技术有限公司等编著. —北京: 人民交通出版社, 2006.9
ISBN 7-114-06156-0

I.S… II.北… III.企业管理—应用软件, SAP
2000 IV.F270.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 107305 号

书 名: SAP2000 中文版使用指南
著 作 者: 北京金土木软件技术有限公司
中国建筑标准设计研究院
责任编辑: 陈志敏
出版发行: 人民交通出版社
地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号
网 址: <http://www.ccpress.com.cn>
销售电话: (010) 85285656, 85285838, 85285995
总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司
经 销: 各地新华书店
印 刷: 北京宝莲鸿图科技有限公司
开 本: 787×1092 1/16
印 张: 46.25
字 数: 1085 千
版 次: 2006 年 9 月 第 1 版
印 次: 2006 年 9 月 第 1 次印刷
书 号: ISBN7-114-06156-0
印 数: 0001~4000 册
定 价: 86.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)



SAP2000 最原始的结构分析软件是 SAP,它是 Structural Analysis Program 三个字的简称。SAP 是 30 多年以前在加州大学 Berkeley 分校,由 Edward Wilson 教授领导开发出来的结构分析软件,当时主要用于结构及土木工程(包括土壤、大坝等有关工程)的研究及教学工作。在过去的 30 多年里,SAP 随着有限元方法的发展不断地改进及提高,在演变过程中有好几个版本出现,如最早期的 SAP-I、SAP-II 到 SAPV、SAPVI,早在 1980 年,就已经发行了第一个被称为商用版本的软件,随后又有 SAP90,一直到目前的 SAP2000 版本。

本人在 1979 年 7 月初次从美国引入了 SAP-V 到国内。当年,由北京工学院的张相霖教授先后在北京及上海主办了两个有限元法讲习班,麻省理工的卞学璜、董平教授及本人被邀请开讲在有限元领域不同的专业题目。当时,每个讲习班有不少于 250 位专业人士从全国各地来参加,包括各大学的老师、工程部门的研究人员和工程师。当时在课堂里所有的听众都聚精会神,认真学习这个当时公认的新技术学科,使得授课人非常感动并兴奋不已(直到今天,我还仍然万分感激卞教授将我引进这个讲习班)。在没有回中国之前,我从加大 Berkeley 分校花 250 美金买了一套 SAP-V(原代码)写在磁带上,这套软件也是我在美国用于结构力学及有限元教学的工具。在北京,我将 SAP-V 磁带交给了张相霖教授,出乎意料的是,SAP-V 被传遍了全国各大学,以及各个设计和研究单位,在中国的教学、研究及工程中运用。后来根据原来的 SAP-V,相继产生了不同功能的 SAP-V 延伸版本。做梦都没有想到 SAP-V 能在国内引起大家如此浓厚的兴趣,究其原因,我以为有三个:

1. 虽然国内也有自己开发的有限元软件及向德国购买的 ASKA,但 SAP-V 是当时唯一用 Fortran 语言写的源程序。

2. 程序用多块子结构结合成,非常有条理及透明化,极容易让工程软件专家去了解程序的状况,并作进一步的有限元开发。

3. 可免费取获得源程序。

自此以后,SAP-V 的模仿版本在全国如雨后春笋般出现。由于这个软件在 80 年代对工业界产生了极大的影响,该软件于 1986 年得到中央政府颁发的二等工业奖。当年我在中国参加在承德举办的有限元讨论会并赴峨嵋参加西南交大的校庆,匆忙中我被钱学森教授召回北京人民大会堂的湖北厅参加盛大晚宴招待,以感谢我带回 SAP-V 的功劳,时至今日我仍不能忘怀。

我很高兴了解到 SAP 被美国软件公司 CSI 在 Wilson 指导下一直不断地发展,使它演变成为今日具有强大功能的 SAP2000。这套软件不仅可以为一般性结构分析及操作设计项目,同时它也具备了桥梁分析及施工模拟的功能。的确,SAP2000 在结构分析、设计及有限元计算中具有极其完备和可靠的多种功能,详细功能的内容已在本书中列举,就不再重复讨论。虽然 SAP2000 也像其他许多类似软件一样,具有通用有限元程序的功能,但根据我个人的了解和经验,它是一套特别适合作为土建分析及设计的软件,因为它具有特别功能,例如地震分析,混凝土及钢结构的设计,中、美及其他国家的设计规范,不同国家的钢结构数据库等,这些功能强化了 SAP2000 在土建领域应用的优势。

SAP2000 在北美、欧洲、日本、中国台湾、中国香港以及新加坡等国家和地区被设计单位广泛的采用,著名的工程项目已采纳 SAP2000 做结构分析的包括马来西亚的 Petronic Twin Towers,香港的中国银行及 IFC 金融中心,上海的金茂大厦等等。

我也很高兴得知中国建筑标准设计研究院旗下的北京金土木软件技术有限公司将 SAP2000 本地化成中文版,并添加了中国的建筑及桥梁设计规范,这将会极大地推动中国工程领域的发展。我对 SAP2000 会逐渐地被中国工程界广泛运用充满了信心,同时 SAP2000 中文版的出现也将对中国市场带来两个正面的影响:

1. 它提供给工程界一个独立、高档次的结构分析及有限元软件;

2. 它的出现,会促进有限元软件的竞争,进而会提高软件的质

量及用户的服务效能。

最后,我深感金土木软件公司开发的 SAP2000 中文版将会受到国内土建行业无比的欢迎,在此祝福金土木软件一帆风顺。

张 勇

香港科技大学荣誉退休教授
上海交大、同济大学客座教授
2006.05.29 于上海

前言

QIANYAN

SAP2000 中文版是继 ETABS 中文版之后,由北京金土木软件技术有限公司、中国建筑标准设计研究院与美国 CSI 公司共同研制开发的通用结构分析与设计软件,2004 年 11 月正式发布。在不到两年的时间里,SAP2000 中文版的用户已经遍及全国各个省市及香港、台湾地区,数量达到 200 多家,包括大型设计院、外资设计事务所、大专院校及科研机构,而且这一数目还在不断增长中。SAP2000 中文版软件正在中国基础设施建设中发挥着越来越重要的作用,SAP2000 为各地的标志性建筑提供了强大的分析技术。

SAP2000 来源于 SAP,SAP 程序是历史最悠久,也是最负盛名的结构分析软件,已经有近 40 年的历史,SAP 程序最早源于加州大学 Berkeley 分校的 Wilson 教授的研究开发工作,它已是结构分析程序的代名词。改革开放后不久,由张之勇教授带回国内的 SAP 程序使得我国的工程设计人员和教学科研人员有机会接触到世界一流的有限元分析软件;现在我们与 CSI 合作,将现行的中国结构设计规范纳入其中,推出了 SAP2000 中文版本。由于 SAP2000 强大的功能,要熟练地掌握软件,做到融会贯通往往需要花费很多时间。因此,我们总结了 SAP2000 中文版的开发技术环节、培训的教学经验以及在技术支持中遇到的来自设计院的一些实际问题,精心编写了这本《SAP2000 中文版使用指南》,以此献给我国广大的结构工程师、从事结构专业的科研人员及在校的大学生、研究生,以进一步推动 SAP2000 中文版在全国的深入应用。

本书是继《ETABS 中文版使用指南》之后系列教程的第二篇,本书较前一篇有较大的改进,不论是内容的编排,还是工程应用,都力求对实际工程设计有指导意义,同时由于 SAP2000 的应用面实在太广,我们也只能是选取常用的结构类型来介绍,尽可能

地压缩软件基本操作层面的内容。即便如此,由于篇幅的限制,有些内容还是不得不忍痛割爱,有关软件本身的操作和技术文档,建议读者参阅软件附带的相关技术资料。

本书共分6个部分,总共由30章组成。第一部分是SAP2000的基本概念,共2章:第1章概括性地介绍了SAP2000中文版的历史由来和基本功能;第2章介绍程序的集成化图形用户界面及建模、分析、设计的基本过程。第二部分为SAP2000中文版的建模功能,共分8章,章节按照建模的操作顺序安排:第3章介绍坐标系与轴网;第4章介绍单元库类型;第5章介绍材料与截面的定义方法;第6章介绍对象的绘制及修改方法;第7章介绍如何施加荷载工况;第8章介绍结构特殊功能的指定方法;第9章介绍各种视图功能;第10章介绍快速建模及导入导出功能。第三部分详细阐述了SAP2000中文版的分析功能,共分4章:第11章介绍分析工况及其设置方法;第12章介绍模态分析与反应谱分析;第13章介绍线性时程分析方法;第14章介绍分析结果的输出及查看。第四部分是SAP2000中文版的设计功能,特别是中国规范的应用,共分3章:第15章介绍荷载组合有关的内容;第16章介绍混凝土框架及壳设计;第17章介绍钢框架设计及优化。第五部分是SAP2000中文版的高级分析功能,共5章:第18章介绍屈曲分析;第19章介绍Pushover分析和阶段施工分析;第20章的内容是非线性时程分析;第21章是频域分析的内容;第22章介绍了桥梁模块的应用。第六部分是SAP2000中文版的工程应用,共8章:第23章介绍了索结构和玻璃幕墙的应用;第24章介绍了预应力钢结构的应用;第25章介绍了复杂高层钢结构的应用;第26章介绍了复杂高层混合结构的应用;第27章介绍体育场馆的工程应用;第28章介绍工业建筑应用;第29章介绍桥梁工程(斜拉桥)应用;第30章介绍混凝土重力坝工程应用。

本书在编写上兼顾SAP2000中文版的初学者及使用SAP2000中文版进行过实际工程结构分析和设计的高级用户,力求全面、正确和实用。对于初学者,按照章节顺序,学习完第2章后,可以进行简单的结构工程的分析与设计,然后,按顺序学习完第二~四部分之后,就可以进行一般实际结构工程的分析与设计,可以处理结构工程中遇到的普遍问题。第五部分可以根据需要有针对性地学习,了解SAP2000强大的分析功能。第六部分是各种结

构体系的实际应用问题,读者既可根据自己的工作需要有选择地阅读和钻研,也可以通读以达到举一反三自如应用软件的目的。

本书附光盘一张,包括 SAP2000 中文版最新的试用版(用户亦可以向金土木公司索取),以及本书所介绍的实例文件,供读者使用。

参加本书的编写人员及具体分工为:李楚舒编写第 1 章;沈万湘编写第 2、3、5、14 章;李胜林编写第 4、22、29 章;常弘编写第 6、7、15 章;郑毅编写第 8、9、10、17 章;李立编写第 11、16、18、30 章;李永双编写第 12、13、20、27 章;刘春明编写第 19 章;李文峰编写第 21、28 章;邓映捷编写第 23 章;刘威编写第 24 章;林海编写第 25 章;肖从真、许自国编写第 26 章,附录由林述涛编写。北京金土木软件技术有限公司负责全书的校对工作,刘春明、李楚舒负责全书的组织编排与统稿工作。

北京金土木软件技术有限公司高级技术顾问、香港科技大学荣誉退休教授、结构工程著名学者张之勇教授欣然为本书作序。在 SAP2000 中文版的开发和本书的编写过程中得到了美国 CSI 公司 Ashraf 总裁、Syed 副总裁、Iqbal 博士等人的全力支持和密切协助。在本书的编写过程中,得到了人民交通出版社陈志敏编辑的大力支持。在此一并表示诚挚的谢意。

由于时间和编者水平的局限,书中难免存在缺点和错误,恳请广大读者批评指正。也欢迎业内人士来信来函、登陆网站进行讨论。我们的通讯地址是:北京车公庄大街 19 号中国建筑标准设计研究院北京金土木软件技术有限公司,邮编:100044,电话:010—88383866,传真:010—88381056,网址:www.bjcks.com, Email: info@bjcks.com。

北京金土木软件技术有限公司
中国建筑标准设计研究院
2006 年 6 月

第一部分 SAP2000 基本概念

| | | |
|-------|---------------------|----|
| 第 1 章 | SAP2000 中文版概述 | 3 |
| 1.1 | 集成化的环境 | 5 |
| 1.2 | 强大的分析功能 | 6 |
| 1.3 | 一体化的设计功能 | 7 |
| 第 2 章 | 集成化用户界面及基本概念 | 9 |
| 2.1 | 集成化用户界面组成 | 9 |
| 2.2 | 菜单命令 | 10 |
| 2.3 | 工具栏 | 13 |
| 2.4 | 显示窗 | 14 |
| 2.5 | 状态条 | 14 |
| 2.6 | 鼠标的使用 | 15 |
| 2.7 | 基本概念 | 16 |
| 2.7.1 | 对象 | 16 |
| 2.7.2 | 对象模型和分析模型 | 17 |
| 2.8 | 基本过程 | 17 |
| 2.9 | 例题 | 18 |

第二部分 建模功能

| | | |
|-------|-------------------|----|
| 第 3 章 | 坐标系与轴网 | 33 |
| 3.1 | 轴网 | 33 |
| 3.1.1 | 新建轴网 | 33 |
| 3.1.2 | 整体坐标系和附加坐标系 | 36 |
| 3.1.3 | 一般轴网系统 | 38 |
| 3.2 | 参考线 | 42 |
| 第 4 章 | 单元库 | 44 |

| | | |
|--------------|-------------------------|-----------|
| 4.1 | SAP2000 中的自动边束缚功能 | 44 |
| 4.2 | SAP2000 的单元特点及其分类 | 45 |
| 4.3 | 线单元 | 46 |
| 4.3.1 | 框架单元 | 46 |
| 4.3.2 | 预应力筋/束单元 | 49 |
| 4.4 | 面单元 | 50 |
| 4.4.1 | 板壳对象 | 50 |
| 4.4.2 | 平面单元 | 53 |
| 4.4.3 | 轴对称实体单元 | 55 |
| 4.5 | 体单元 | 56 |
| 4.6 | 连接单元 | 56 |
| 4.6.1 | 线性连接 | 57 |
| 4.6.2 | 多段线弹性连接单元 | 57 |
| 4.6.3 | 多段线塑性连接单元 | 57 |
| 4.6.4 | 粘滞阻尼单元 | 60 |
| 4.6.5 | 缝单元 | 61 |
| 4.6.6 | 钩单元 | 61 |
| 4.6.7 | Wen 塑性单元 | 61 |
| 4.6.8 | 橡胶隔振单元 | 62 |
| 4.6.9 | 摩擦摆隔振单元 | 62 |
| 4.6.10 | 拉/压限制隔振单元 | 64 |
| 4.7 | 不同单元类型之间的连接 | 64 |
| 第 5 章 | 材料与截面 | 66 |
| 5.1 | 材料定义 | 66 |
| 5.1.1 | 一般材料定义 | 66 |
| 5.1.2 | 材料高级属性定义 | 71 |
| 5.2 | 框架截面定义 | 74 |
| 5.2.1 | 导入截面 | 75 |
| 5.2.2 | 一般截面定义 | 77 |
| 5.2.3 | 变截面定义 | 81 |
| 5.2.4 | 自动截面选择列表定义 | 83 |
| 5.2.5 | 截面设计器定义截面 | 85 |
| 5.3 | 面截面定义 | 95 |
| 5.3.1 | 壳截面定义 | 96 |
| 5.3.2 | 平面截面定义 | 99 |
| 5.3.3 | 轴对称实体单元定义 | 100 |

| | |
|---------------------------------|------------|
| 5.4 实体单元截面定义 | 101 |
| 第6章 对象绘制与修改 | 104 |
| 6.1 捕捉功能 | 104 |
| 6.2 点对象(节点)的绘制 | 105 |
| 6.3 线对象的绘制 | 106 |
| 6.3.1 绘制直线框架 | 106 |
| 6.3.2 绘制曲线框架 | 107 |
| 6.3.3 绘制钢束 | 108 |
| 6.3.4 绘制索 | 109 |
| 6.3.5 绘制次梁 | 110 |
| 6.3.6 绘制支撑 | 111 |
| 6.3.7 绘制线对象的辅助功能 | 112 |
| 6.4 面对象的绘制 | 116 |
| 6.4.1 绘制壳面 | 116 |
| 6.4.2 绘制斜面 | 118 |
| 6.5 实体单元的绘制 | 121 |
| 6.6 重定形命令 | 122 |
| 6.7 组的操作 | 122 |
| 6.8 选择功能 | 124 |
| 6.8.1 基本选择操作(点选、窗选、相交线选择) | 124 |
| 6.8.2 按照性质选择 | 124 |
| 6.8.3 按照编号选择 | 124 |
| 6.8.4 辅助选择功能(全选、清除选择、反选) | 125 |
| 6.9 对象信息查看 | 126 |
| 6.9.1 点信息 | 126 |
| 6.9.2 线信息 | 128 |
| 6.9.3 面信息 | 130 |
| 6.9.4 实体信息 | 132 |
| 第7章 荷载工况和施加 | 134 |
| 7.1 定义静力荷载工况 | 134 |
| 7.2 自动地震荷载工况 | 135 |
| 7.3 反应谱工况 | 137 |
| 7.4 自动风荷载工况 | 141 |
| 7.5 波浪荷载 | 143 |
| 7.6 车道荷载 | 145 |
| 7.7 节点样式 | 146 |

| | |
|----------------------------|------------|
| 7.8 集中荷载 | 147 |
| 7.8.1 给点对象施加集中荷载 | 148 |
| 7.8.2 给线对象施加集中荷载 | 148 |
| 7.9 分布荷载 | 149 |
| 7.9.1 面均布荷载 | 150 |
| 7.9.2 线均布荷载 | 151 |
| 7.10 风荷载 | 152 |
| 7.11 温度荷载 | 153 |
| 7.12 地面位移荷载 | 155 |
| 7.13 应变荷载 | 156 |
| 7.14 表面压力荷载 | 156 |
| 7.15 孔隙压力荷载 | 157 |
| 7.16 预应力荷载 | 158 |
| 7.17 荷载的显示 | 159 |
| 第8章 特殊功能指定 | 163 |
| 8.1 节点约束(restraint) | 163 |
| 8.2 节点束缚(constraint) | 165 |
| 8.3 节点区 | 173 |
| 8.3.1 节点区的指定 | 173 |
| 8.3.2 节点区输出约定 | 176 |
| 8.3.3 节点区变形和内力输出 | 176 |
| 8.4 插入点(线单元、面单元偏心) | 178 |
| 8.4.1 线单元插入点的指定 | 178 |
| 8.4.2 面单元插入点的指定 | 179 |
| 8.5 线对象端部偏移(刚域) | 181 |
| 8.5.1 端部偏移的作用 | 181 |
| 8.5.2 线对象端部偏移的指定 | 181 |
| 8.5.3 端部偏移的显示输出 | 182 |
| 8.6 线对象端部释放 | 184 |
| 8.7 对象的局部坐标轴 | 185 |
| 8.7.1 默认局部坐标轴方向 | 185 |
| 8.7.2 局部坐标轴的显示 | 187 |
| 8.7.3 局部坐标轴的修改 | 189 |
| 8.8 拉压比限定(单拉单压构件) | 197 |
| 8.9 单元剖分 | 199 |
| 8.9.1 线对象自动框架细分 | 199 |

| | | |
|-------------|-------------------------------|------------|
| 8.9.2 | 面对象自动网格剖分 | 199 |
| 8.9.3 | 实体对象自动网格剖分 | 201 |
| 第9章 | 视图功能 | 203 |
| 9.1 | 显示窗口的设定 | 203 |
| 9.2 | 三维、二维视图定义及控制 | 205 |
| 9.2.1 | 三维视图的定义及显示 | 205 |
| 9.2.2 | 二维视图的定义及显示 | 205 |
| 9.2.3 | 定义新视图 | 206 |
| 9.2.4 | 显示定义的新视图 | 208 |
| 9.3 | 视图显示控制 | 208 |
| 9.3.1 | 显示内容控制 | 208 |
| 9.3.2 | 显示范围控制 | 216 |
| 9.3.3 | 视图缩放控制 | 216 |
| 9.4 | 颜色显示控制 | 217 |
| 9.4.1 | 显示颜色控制 | 217 |
| 9.4.2 | 输出颜色控制 | 218 |
| 9.5 | Open GL 视图功能 | 219 |
| 9.6 | 生成 AVI 视频功能 | 222 |
| 9.6.1 | 多步动画视频 | 222 |
| 9.6.2 | 循环动画视频 | 223 |
| 9.7 | 其他基本视图设置功能 | 223 |
| 9.8 | SAP2000 中的 OpenGL 视图 | 227 |
| 第10章 | 快速建模及导入导出 | 229 |
| 10.1 | 模板建模功能 | 229 |
| 10.1.1 | 新模型初始化模板 | 229 |
| 10.1.2 | 用模板添加结构到现有模型 | 249 |
| 10.2 | AutoCAD 导入导出 | 251 |
| 10.2.1 | 导入 AutoCAD. dxf 文件 | 251 |
| 10.2.2 | 导出 AutoCAD. dxf 文件 | 253 |
| 10.3 | 模型组装及 Access、Excel 辅助功能 | 253 |
| 10.3.1 | 模型组装 | 254 |
| 10.3.2 | Access、Excel 辅助功能 | 254 |
| 10.4 | SAP2000 交互式数据库编辑功能 | 256 |
| 10.5 | \$2K 文本文件及从 ETABS 中导入模型 | 260 |
| 10.5.1 | \$2K、S2K 文本文件 | 261 |
| 10.5.2 | 从 ETABS 中导入模型 | 261 |

| | |
|----------------------------------|-----|
| 10.6 与其他程序软件数据接口 | 262 |
| 10.6.1 由 SAP2000 导入其他软件的模型 | 263 |
| 10.6.2 由 SAP2000 导出到其他软件 | 264 |

第三部分 分析功能

| | |
|--|-----|
| 第 11 章 分析工况 | 267 |
| 11.1 定义分析工况 | 267 |
| 11.2 分析类型简介 | 269 |
| 11.2.1 线性分析 | 269 |
| 11.2.2 非线性分析 | 269 |
| 11.3 几何非线性 | 271 |
| 11.3.1 几何刚度 | 271 |
| 11.3.2 重力 $P-\Delta$ 效应 | 273 |
| 11.3.3 大位移 | 274 |
| 11.3.4 初始静力非线性工况 | 275 |
| 11.4 施加荷载 | 275 |
| 11.5 工况组合 | 276 |
| 11.6 分析顺序 | 278 |
| 11.7 运行分析工况 | 279 |
| 11.7.1 设置分析选项 | 279 |
| 11.7.2 运行分析 | 280 |
| 第 12 章 模态分析及反应谱分析 | 283 |
| 12.1 模态分析 | 284 |
| 12.1.1 模态分析的基本理论 | 284 |
| 12.1.2 SAP2000 模态分析中质量源定义 | 286 |
| 12.1.3 特征向量法和 Ritz 向量法 | 287 |
| 12.1.4 质量参与系数和荷载参与系数 | 289 |
| 12.1.5 算例 | 293 |
| 12.2 反应谱分析 | 299 |
| 12.2.1 反应谱分析的基本理论与方法 | 299 |
| 12.2.2 振型组合的基本理论与方法 | 300 |
| 12.2.3 方向组合基本方法 | 303 |
| 12.2.4 中国规范反应谱分析在 SAP2000 中的 实现 | 303 |
| 第 13 章 线性动力分析 | 306 |

| | | |
|---------------|----------------------|------------|
| 13.1 | 线性时程分析的基本理论 | 306 |
| 13.1.1 | 时间积分方式 | 307 |
| 13.1.2 | 阻尼参数设置 | 309 |
| 13.2 | 时程曲线的输入 | 310 |
| 13.2.1 | 地震时程曲线的选取 | 311 |
| 13.2.2 | 任意动荷载时程曲线的输入 | 312 |
| 13.3 | 线性时程分析工况的定义 | 313 |
| 13.3.1 | 时程类型 | 313 |
| 13.3.2 | 时程运动类型 | 314 |
| 13.3.3 | 初始条件 | 314 |
| 13.3.4 | 荷载作用施加 | 315 |
| 13.3.5 | 时间步数据 | 316 |
| 13.3.6 | 阻尼参数 | 316 |
| 13.4 | 线性时程分析结果的读取与输出 | 320 |
| 13.4.1 | 时程轨迹的显示 | 320 |
| 13.4.2 | 反应谱曲线的输出 | 324 |
| 第 14 章 | 结果与输出 | 327 |
| 14.1 | 分析结果图形输出 | 327 |
| 14.1.1 | 显示变形形状 | 327 |
| 14.1.2 | 显示力/应力 | 329 |
| 14.2 | 分析、设计结果数据表格显示 | 344 |
| 14.2.1 | 表格显示内容 | 344 |
| 14.2.2 | 设置表格格式(*.fmt)及过滤器的使用 | 355 |
| 14.3 | 分析、设计结果数据文件输出 | 359 |
| 14.3.1 | 打印表格输出 | 359 |
| 14.3.2 | 导出数据文件 | 360 |
| 14.3.3 | 定义命名集 | 362 |
| 14.4 | 特殊输出 | 365 |
| 14.4.1 | 截面切割与广义位移 | 365 |
| 14.4.2 | 定制书写报告器 | 375 |

第四部分 设计功能

| | | |
|---------------|----------------|------------|
| 第 15 章 | 荷载组合 | 383 |
| 15.1 | 默认荷载组合与荷载组合的定义 | 383 |
| 15.2 | 用户自定义组合 | 386 |

| | |
|-----------------------------------|------------|
| 第 16 章 混凝土框架结构设计及壳设计 | 388 |
| 16.1 混凝土框架结构设计的一般过程..... | 388 |
| 16.2 设计首选项及设计组合..... | 389 |
| 16.3 交互式设计..... | 391 |
| 16.4 中国规范相关信息..... | 394 |
| 16.4.1 刚度调整系数..... | 394 |
| 16.4.2 竖向荷载作用下梁弯矩调整..... | 395 |
| 16.4.3 结构周期比验算..... | 395 |
| 16.4.4 框架构件的抗震等级..... | 395 |
| 16.4.5 框架构件的内力调整..... | 395 |
| 16.5 设计结果输出..... | 396 |
| 16.5.1 图形输出..... | 396 |
| 16.5.2 各荷载组合工况设计结果及细节输出..... | 400 |
| 16.5.3 表格输出..... | 404 |
| 16.5.4 文本输出..... | 407 |
| 16.6 壳设计..... | 408 |
| 第 17 章 钢结构设计和优化过程 | 411 |
| 17.1 钢结构设计过程..... | 411 |
| 17.2 自动选择截面列表的设置..... | 412 |
| 17.3 钢结构设计首选项..... | 414 |
| 17.4 钢结构设计条件设定..... | 416 |
| 17.4.1 设定设计组..... | 416 |
| 17.4.2 选择设计组合..... | 417 |
| 17.4.3 查看/修改钢构件的覆盖项 | 417 |
| 17.4.4 设定自动优化目标..... | 421 |
| 17.5 钢结构自动优化设计及交互式设计..... | 423 |
| 17.5.1 自动优化设计..... | 423 |
| 17.5.2 交互式钢框架设计..... | 424 |
| 17.6 设计结果显示输出..... | 425 |
| 17.6.1 设计结果屏幕图形显示输出..... | 425 |
| 17.6.2 设计结果屏幕表格显示输出..... | 426 |
| 17.6.3 设计结果的其他输出方式..... | 429 |

第五部分 高级分析功能

| | |
|--------------------------|------------|
| 第 18 章 屈曲分析 | 439 |
|--------------------------|------------|

| | | |
|---------------|------------------------------------|------------|
| 18.1 | 概述 | 439 |
| 18.2 | 线性屈曲 | 439 |
| 18.2.1 | 技术背景 | 439 |
| 18.2.2 | 定义屈曲分析工况 | 440 |
| 18.2.3 | 屈曲分析结果显示 | 441 |
| 18.2.4 | 例题 | 442 |
| 18.3 | 非线性屈曲 | 445 |
| 18.3.1 | 技术背景 | 445 |
| 18.3.2 | 三铰拱非线性屈曲分析算例 | 445 |
| 第 19 章 | Pushover 分析及阶段施工分析 | 450 |
| 19.1 | Pushover 分析 | 450 |
| 19.1.1 | Pushover 与 FEMA 356 及 ATC-40 概述 | 451 |
| 19.1.2 | UBC 规范反应谱与中国规范反应谱 参数转换 | 459 |
| 19.1.3 | Pushover 分析方法的一般过程 | 459 |
| 19.1.4 | 框架非线性铰的定义 | 460 |
| 19.1.5 | 默认的、自定义和生成的铰 | 464 |
| 19.1.6 | 非线性铰的指定 | 470 |
| 19.1.7 | Pushover 工况的定义 | 475 |
| 19.1.8 | 查看 Pushover 结果 | 480 |
| 19.1.9 | Pushover 分析时注意事项 | 486 |
| 19.2 | 阶段施工分析 | 488 |
| 19.2.1 | 阶段施工分析工况定义 | 490 |
| 19.2.2 | 阶段施工分析结果查看 | 491 |
| 19.3 | 例题 | 492 |
| 19.3.1 | Pushover 分析例题 | 492 |
| 19.3.2 | 阶段施工分析例题 | 496 |
| 第 20 章 | 非线性动力分析 | 500 |
| 20.1 | 非线性时程分析工况的定义及相关概念 | 500 |
| 20.1.1 | 时程函数的定义 | 501 |
| 20.1.2 | 时程工况的定义 | 501 |
| 20.1.3 | 积分方式和阻尼设置 | 502 |
| 20.1.4 | SAP2000 非线性类型 | 502 |
| 20.2 | 快速非线性分析(FNA)方法 | 503 |
| 20.2.1 | 基本平衡方程 | 503 |

| | | |
|---------------|-----------------------|------------|
| 20.2.2 | 非线性模态方程的形成····· | 504 |
| 20.2.3 | 非线性模态方程的求解····· | 505 |
| 20.2.4 | FNA 法小结及应用 ····· | 506 |
| 20.3 | 结构动力弹塑性分析····· | 507 |
| 20.3.1 | 动力弹塑性分析的应用范围····· | 507 |
| 20.3.2 | 动力弹塑性分析基本过程····· | 508 |
| 20.3.3 | 动力弹塑性分析需要说明的几个问题····· | 508 |
| 20.3.4 | 动力弹塑性分析算例····· | 509 |
| 20.4 | 结构耗能减震装置的模拟····· | 513 |
| 20.4.1 | 阻尼单元和隔振单元····· | 513 |
| 20.4.2 | 非线性连接单元需要明确的几个概念····· | 515 |
| 20.4.2 | 阻尼单元的相关参数····· | 518 |
| 20.4.3 | 隔振单元的相关参数····· | 519 |
| 20.4.4 | 阻尼隔振单元应用算例····· | 525 |
| 20.5 | 撞击、爆炸问题的模拟 ····· | 528 |
| 20.5.1 | 撞击、爆炸荷载函数形成 ····· | 528 |
| 20.5.2 | 撞击、爆炸荷载的施加 ····· | 529 |
| 20.5.3 | 时程工况的定义及积分方式的选择····· | 529 |
| 20.5.4 | 冲击问题应用算例····· | 530 |
| 第 21 章 | 频域分析 ····· | 534 |
| 21.1 | 稳态分析····· | 534 |
| 21.1.1 | 建立模型····· | 535 |
| 21.1.2 | 定义稳态函数····· | 535 |
| 21.1.3 | 定义稳态分析工况····· | 536 |
| 21.1.4 | 分析结果查看····· | 539 |
| 21.2 | 功率谱密度分析····· | 543 |
| 21.2.1 | 建立模型····· | 543 |
| 21.2.2 | 定义功率谱密度函数····· | 544 |
| 21.2.3 | 定义功率谱密度分析工况····· | 544 |
| 21.2.4 | 分析结果查看····· | 545 |
| 第 22 章 | 桥梁模块 ····· | 548 |
| 22.1 | 桥梁 BAG 模板 ····· | 548 |
| 22.2 | 桥梁模块····· | 550 |
| 22.2.1 | 桥梁向导····· | 550 |
| 22.2.2 | 定义桥轴线····· | 551 |
| 22.2.3 | 定义下部结构····· | 551 |

| | | |
|---------|-------------------------------|-----|
| 22.2.4 | 定义上部结构····· | 553 |
| 22.2.5 | 桥对象····· | 555 |
| 22.2.6 | 定义预应力····· | 556 |
| 22.2.7 | 桥梁 FEM ····· | 557 |
| 22.2.8 | 定义车辆荷载····· | 557 |
| 22.2.9 | 定义移动荷载分析工况····· | 559 |
| 22.2.10 | 定义桥梁反应 ····· | 560 |
| 22.2.11 | 显示桥梁反应 ····· | 560 |
| 22.3 | 实例:三跨预应力混凝土变截面连续梁桥 分析····· | 562 |
| 22.3.1 | 基本资料····· | 562 |
| 22.3.2 | 建立模型····· | 563 |
| 22.3.3 | 全桥分析····· | 566 |
| 22.3.4 | 施工阶段分析····· | 568 |

第六部分 工程应用

| | | |
|--------|-------------------|-----|
| 第 23 章 | 索结构及玻璃幕墙应用 ····· | 573 |
| 23.1 | 原理概述····· | 573 |
| 23.1.1 | 预应力拉索体系与特点····· | 573 |
| 23.1.2 | 索的模拟····· | 574 |
| 23.1.3 | 预拉力施加····· | 574 |
| 23.1.4 | 非线性分析····· | 574 |
| 23.1.5 | 荷载和作用····· | 575 |
| 23.1.6 | 主要控制指标和因素····· | 575 |
| 23.2 | 单拉索点支式幕墙····· | 575 |
| 23.2.1 | 模型描述、建模基本过程 ····· | 575 |
| 23.2.2 | 结果查看····· | 576 |
| 23.3 | 鱼腹式点支幕墙····· | 578 |
| 23.3.1 | 模型描述、建模基本过程 ····· | 578 |
| 23.3.2 | 结果查看····· | 581 |
| 第 24 章 | 预应力钢结构应用 ····· | 584 |
| 24.1 | 结构受力原理概述····· | 584 |
| 24.2 | 建模分析····· | 586 |
| 24.2.1 | 工程概况····· | 586 |
| 24.2.2 | 计算模型····· | 586 |

| | | |
|---------------|-------------------|------------|
| 24.3 | 结果分析 | 593 |
| 第 25 章 | 复杂高层钢结构分析 | 595 |
| 25.1 | 概述 | 595 |
| 25.2 | 复杂高层结构分析的基本内容 | 595 |
| 25.2.1 | 模态分析 | 595 |
| 25.2.2 | 竖向荷载 | 596 |
| 25.2.3 | 风荷载 | 596 |
| 25.2.4 | 地震作用 | 597 |
| 25.2.5 | 温度应力 | 597 |
| 25.2.6 | 侧向位移限值 | 597 |
| 25.2.7 | 结构稳定 | 598 |
| 25.3 | 复杂高层钢结构有限元分析的关键问题 | 598 |
| 25.3.1 | 建立合理的计算模型 | 598 |
| 25.3.2 | 结构分析工况中需注意的问题 | 600 |
| 25.4 | 工程实例 | 601 |
| 25.4.1 | 结构模型概况 | 601 |
| 25.4.2 | 荷载工况的设置及说明 | 603 |
| 25.4.3 | 分析工况的设置及说明 | 604 |
| 25.4.4 | 结构分析计算结果 | 608 |
| 25.4.5 | 小结 | 616 |
| 25.5 | 本章小结 | 616 |
| 第 26 章 | 复杂高层混合结构 | 617 |
| 26.1 | 转换层结构 | 617 |
| 26.2 | 连体结构 | 618 |
| 26.3 | 体型收进结构 | 619 |
| 26.4 | 悬挑结构 | 620 |
| 26.5 | 钢-混凝土混合结构 | 621 |
| 26.5.1 | 阻尼问题 | 621 |
| 26.5.2 | 25%剪力调整问题 | 623 |
| 26.5.3 | 组合构件的输入问题 | 623 |
| 26.6 | 复杂高层结构算例分析 | 624 |
| 26.6.1 | 工程概况 | 624 |
| 26.6.2 | 悬挑及体型收进部分的设计 | 624 |
| 26.6.3 | 连体部分的设计 | 625 |
| 26.6.4 | 计算分析结果的讨论 | 627 |
| 第 27 章 | 体育场馆 | 632 |

| | | |
|---------------|-------------------------|------------|
| 27.1 | 体育场馆结构的计算 | 632 |
| 27.1.1 | 计算模型的建立 | 632 |
| 27.1.2 | 结构模型的分析 | 635 |
| 27.1.3 | 结构构件的设计 | 637 |
| 27.2 | 体育场馆模型示例 | 638 |
| 27.2.1 | 工程概况 | 638 |
| 27.2.2 | 创建计算模型 | 638 |
| 27.2.3 | 定义分析工况 | 639 |
| 27.2.4 | 查看分析结果 | 640 |
| 27.2.5 | 构件设计与加固 | 643 |
| 第 28 章 | 工业建筑 | 644 |
| 28.1 | 概念阐述 | 644 |
| 28.1.1 | 厂房类结构 | 644 |
| 28.1.2 | 筒仓类结构 | 645 |
| 28.1.3 | 高炉类结构 | 645 |
| 28.1.4 | 水池类结构 | 645 |
| 28.1.5 | 石油化工类结构 | 646 |
| 28.1.6 | 核工业类结构 | 646 |
| 28.1.7 | 复杂结构 | 646 |
| 28.2 | 工业建筑结构分析中的几个关键问题 | 648 |
| 28.2.1 | 吊车荷载的施加 | 648 |
| 28.2.2 | 筒仓及高炉类结构建模技巧 | 651 |
| 28.2.3 | 水池类结构中压力荷载及土体约束作用的定义 | 653 |
| 28.2.4 | 石化类结构建模技巧和细部处理 | 656 |
| 28.2.5 | 工业设备上常见荷载的施加 | 658 |
| 28.2.6 | 系统总体分析及结果评价 | 660 |
| 28.3 | 工业结构算例分析 | 660 |
| 28.3.1 | 筒仓类结构算例 | 661 |
| 28.3.2 | 石化类结构算例 | 668 |
| 第 29 章 | 斜拉桥的分析应用 | 675 |
| 29.1 | 斜拉桥主要组成部分在 SAP2000 中的模拟 | 675 |
| 29.1.1 | 主梁模型 | 675 |
| 29.1.2 | 拉索的模拟 | 678 |
| 29.1.3 | 边界条件的模拟 | 679 |
| 29.1.4 | 关于地基与结构的相互作用 | 679 |

| | | |
|---------------|-------------------------------|------------|
| 29.1.5 | 拉索等部件在 SAP2000 中的处理方法 | 681 |
| 29.2 | 斜拉桥分析中的计算问题 | 681 |
| 29.3 | 斜拉桥合理索力的确定方法 | 682 |
| 29.3.1 | 简单算例:某斜拉桥全桥状态下的索力调整 | 683 |
| 29.4 | 斜拉桥的模态分析 | 685 |
| 29.4.1 | 简单算例 | 685 |
| 第 30 章 | 混凝土重力坝 | 689 |
| 30.1 | 概述 | 689 |
| 30.1.1 | 重力坝的工作原理 | 689 |
| 30.1.2 | 重力坝的荷载 | 689 |
| 30.2 | SAP2000 相关技术的应用 | 690 |
| 30.2.1 | 平面单元 | 690 |
| 30.2.2 | 实体单元 | 691 |
| 30.2.3 | 节点样式 | 691 |
| 30.2.4 | 反应谱分析 | 692 |
| 30.3 | 算例分析 | 692 |
| 30.3.1 | 问题描述 | 692 |
| 30.3.2 | 建模及求解分析 | 693 |
| 30.3.3 | 计算结果分析 | 698 |
| 附录 A | SAP2000 V10 安装指南 | 702 |
| A.1 | SAP2000 安装 | 702 |
| A.1.1 | 系统要求 | 702 |
| A.1.2 | 安装前注意事项 | 702 |
| A.1.3 | 程序安装 | 703 |
| A.1.4 | 加密锁驱动安装 | 704 |
| A.1.5 | License 认证 | 706 |
| A.2 | License 的工作方式 | 708 |
| A.2.1 | License 类型 | 708 |
| A.2.2 | License 使用 | 709 |
| A.2.3 | License 合法性判别 | 709 |
| A.3 | 常见问题处理 | 711 |
| A.3.1 | License Not Found | 711 |
| A.3.2 | 不显示中文界面 | 711 |
| | 参考文献 | 713 |

第一部分

SAP2000基本概念

SAP2000 中文版是一个集成化的通用结构分析与设计软件,它可以对建筑结构、工业建筑、桥梁、管道、大坝等不同体系类型的结构进行分析和设计,也可以根据需要完成世界大多数国家和地区的结构规范设计。作为国际化的结构分析设计软件,它与国内软件的概念和体系存在着一定的区别,因此本书的第一部分对 SAP2000 的基本概念进行了简要介绍,建议读者在使用 SAP2000 中文版软件和阅读本书前首先通读这一部分内容。

这一部分首先从总体出发对 SAP2000 功能进行了综合介绍,包括 SAP2000 中文版的建模功能、分析功能和设计功能等内容。通过这些介绍,可以对 SAP2000 中文版的整体功能有概括性的了解,有助于我们对 SAP2000 中文版的整体把握。

SAP2000 中文版软件集成化的特性还体现在集成化的软件环境,也就是结构建模、分析和设计的所有工作都是在同一界面中完成的,并且所有的数据都是在同一数据库中进行的,不需要数据的相互传输。SAP2000 中文版的界面是一个标准的 Windows 界面系统,在第 2 章中对于这一集成环境进行了详细的介绍,其中包括菜单、工具栏、显示窗及状态栏等的内容和意义,还包括鼠标的使用功能等细节。为了迅速掌握 SAP2000 应用的基本过程,第 2 章中对 SAP2000 中文版的基本概念和基本过程进行了简要的说明,并通过一个简单算例展示了 SAP2000 中文版建模、分析与设计及结果输出的整个过程。建议在阅读本书其他章节之前,先通过这一算例对 SAP2000 中文版建模、分析和设计的基本过程进行熟悉和理解。

第1章

SAP2000中文版概述

SAP2000 是由美国 Computers and Structures Inc. (CSI) 公司开发研制的通用结构分析与设计软件。SAP2000 已有近四十年的发展历史，是美国乃至全球公认的结构分析计算程序，在世界范围内广泛应用。

美国 CSI 公司是由 Wilson 教授的学生 Ashraf 总裁于 1978 年创建的，CSI 公司的大部分技术开发人员都是 Wilson 教授的学生，并且 Wilson 教授也是 CSI 公司的高级技术发展顾问，CSI 公司的产品都是源于 Wilson 教授及其学生在四十多年来对结构工程有限元分析领域内的研究，并且得到了来自全球数十万工程师用户持续不断的使用和建议。凭借 SAP2000、ETABS、SAFE 等高质量的软件产品，现在 CSI 公司已经成为这个领域的业界翘楚，其行业优势地位得到了全球的公认。

SAP2000 是由 SAP5、SAP80、SAP90 发展而来的。1969 年美国加州大学 Berkeley 分校的 Wilson 教授发布了第一个 SAP 程序，这是基于小型机的，SAP 是“Structural Analysis Program”首字母的缩写。从此，SAP 就成为了结构有限元分析的代名词。

1963 年在加州大学 Berkeley 分校，Wilson 教授和 Clough 教授为了教授结构静力与动力分析而开发了 SMIS (Symbolic Matrix Interpretive System)，其目的是为了消除在传统手工计算方法和结构分析矩阵法之间的隔阂，这个 FORTRAN 程序是免费分发的，被许多大学采用，其最终版本是 CAL91，直至今日，它仍在许多大学被用来教授现代结构分析课程。

1969 年，Wilson 教授原创性地开发了静力与动力分析的 SAP (Structural Analysis Program) 程序。在此之前，大学里开发的有限元程序都是针对特定结构问题的，而且几乎只能由开发者来使用，如不经过大量的开发工作，工程实践人员不可能使用这些研究成果。

SAP 程序应用了当时的许多技术，每个节点可以具有从 0~6 个的自由度，SAP 创建了一个整数指针数组，是节点数量的六倍，这个数组允许每个节点具有不同的位移数目。因此，在单元刚度组装的时候，只形成具有未知位移的平衡方程。所以，SAP 程序与那些每节点具有固定位移数目的特定用途程序一样高效。

在不到一年的时间里，Wilson 教授和他的三位学生就开发出了第一个 SAP 程序。它成

.....

为许多有限元工程的基本初始程序。1973年, Bathe 博士更新了动力响应选项, 发展成为 SAP IV; 那时, SAP IV 是世界上最快和最强大的结构分析程序。SAP 程序的免费分发, 使得起源于 Berkeley 的有限元研究很快传递到工程界和其他大学。

从 1979 年开始, 来自美国的张之勇教授、董平教授等在国内开办了一系列的有限元讲座, 来自全国各地的高校和科研机构的专家学者和研究人员从中得到了最新的有限元知识, 可以说是改革开放后的中国有限元研究领域的“黄埔军校”, 培养了一大批有限元的科研开发应用人才。国内广泛应用的第一个有限元程序就是张之勇教授带回国内的 SAP V 程序, 在当时产生了极大的影响, 还获得了第三届中国工业大奖。

SAP2000 是 SAP 系列程序功能最为强大的版本, 它同时具有友好的用户界面。在 1996 年刚发布的时候, SAP2000 是 SAP 的第一个完全集成到 Microsoft Windows 中的版本。强大的图形界面在易用性和高效性上无可比拟。模型的创建和修改、执行分析、校核、设计优化和输出结果都在一个环境中实现。可以在一个模型中进行多种不同类型的分析和设计。

SAP2000 采用基于对象的非线性有限元技术, 成为集成化的结构工程软件, 重新定义有限元技术发展水平。SAP2000 可以模拟能量耗散装置、管道系统、逐步倒塌分析、材料非线性等一系列的特性, 基于对象的有限元技术可以采用复杂的自动网格划分功能; SAP2000 强大的分析功能包括: 顺序施工、Pushover 分析、混凝土徐变与收缩、冲击分析、多基激励、基础隔震与阻尼器、大位移分析、土壤结构相互作用、屈曲分析、频域分析等, 几乎覆盖结构工程中的所有计算分析问题。

自从 SAP 于四十多年前诞生以来, 它已经成为结构工程分析方法发展技术水平的代名词, SAP2000 延续着这个传统, 针对交通设施、工业建筑、公共建筑、体育场馆以及其他的基础设施, 提供了精妙的用户界面, 无可匹敌的分析引擎和全面完善的设计工具。

直观的界面使得用户可以快速生成结构模型, 而无需长时间学习。用户可以驾轻就熟地利用 SAP2000 的强大功能来处理所有的分析与设计任务, 包括一两天的小问题。可以通过程序内建的模板来生成复杂模型和进行剖分。

先进的分析技术可以用于逐步大变形分析, $P-\Delta$ 分析, 特征向量和 Ritz 向量分析, 索分析, 仅拉或仅压分析, 屈曲分析, 爆炸分析, 阻尼器、基础隔震和支座塑性的快速非线性分析, 位移控制的能量方法, 顺序施工分析等。

桥梁设计人员可以使用 SAP2000 桥梁模板来生成桥梁的结构模型、自动进行桥梁活荷载分析与设计、桥梁的基础隔震, 桥梁的施工顺序分析, 斜拉桥和悬索桥的大变形分析, 以及 Pushover 分析。

从强大的三维基于对象的图形化模拟环境, 到各种集成化的分析与设计选项, SAP2000 持续地证明了它是土木工程最有效和最实用的软件。

从 2003 年开始, 北京金土木软件技术有限公司、中国建筑标准设计研究院同美国 CSI 公司展开全面合作, 已将中国设计规范全面地贯入到 SAP2000 中。2005 年 11 月 3 日 SAP2000 中文版通过建设部评估鉴定, 鉴定委员会一致认为: SAP2000 中文版软件达到了国际领先水平。该软件符合中国建筑结构设计新规范的要求, 能够处理各种复杂的结构体系, 可以更好地提升我国结构设计的效率和水平, 提高我国设计行业整体的竞争力, 具有很大的推广使用价值。

SAP2000 中文版包含的中国规范主要涉及到：《建筑荷载规范》（GB 50009—2001）、《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2001）、《混凝土结构设计规范》（GB 50010—2002）、《钢结构设计规范》（GB 50017—2003）。SAP2000 中文版正在加入我国的桥梁设计规范、水工港口设计规范，以及其他的相关规范内容。

SAP2000 既可以用来进行结构分析的教学指导，又可以用在大型项目的非线性有限元分析；无论你是大学的研究生、教师，还是从事工程设计的工程师，SAP2000 都可以成为你的日常分析与设计辅助工具。

从 CCTV 新楼，到奥运工程的“水立方”、“鸟巢”等一大批国家重点项目都凝聚和体现了 SAP2000 的强大分析技术，SAP2000 中文版将继续为我国的建设事业发挥重要作用。

1.1 集成化的环境

SAP2000 所提供给工程师的是一个集成化的视图环境，这个视图环境可以设置所要展现的视图数目及布局，可以在任意一个视图窗口中进行所需要的任何操作。任意窗口都可以显示结构模型的平面图、立面图和三维空间图，平面、立面视图可以方便快捷的进行切换，三维视图可以选择任意的观察角度，所有视图窗口中都有显示视图之间相互关系的信息。结构模型可以按用户需求进行特效显示，包括填充图、拉伸图或对象收缩图等。除此以外，SAP2000 具有丰富的模型颜色显示选择和结果输出，工程师还可以选择结构模型按何种属性进行颜色显示，工程师可以在这些显示选项和输出选项的帮助下，对结构的对象形式、材料分布、截面形式分布、钢构件的应力比或混凝土构件的配筋率进行全面直接的了解。

SAP2000 是一个集成化的工作环境，工程师可以在同一个界面中完成建模、分析和设计，可以通过不同的视图窗口将结构的模型信息、分析结果和设计结果同时展现给用户，而且可以在不同显示含义的视图中直接进行与该显示状态相关的操作，比如，在模型信息中查看修改模型信息、在分析结果显示视图中选择显示构件的内力详细输出、在设计结果中进行构件的交互式设计等。

- 完全集成的环境，创建模型、修改、分析、设计优化、显示结果均在一个图形界面
- 强大的功能，在平面视图、立面视图和展开面内建立三维模型
- 一系列自动模板快速建立任意模型
- 采用面向对象的单元建模，允许采用较大的单元而不需要在每个节点都进行划分
- 半刚度隔板模型，增强的自动网格划分
- 广泛的电子表格交互编辑
- 完全集成的截面编辑器容许定义复杂截面
- 对楼面和墙的不匹配单元自动进行网格匹配（自动线束缚）
- 任意形状立面的风荷载加载和刚性隔板风荷载加载
- 代表最新静力、动力、线性、非线性分析选项
- 完全交互式钢、混凝土、铝框架构件设计。包含中国、美国、加拿大和欧洲规范
- 屏幕结果显示，动画显示变形、振形、应力轮廓和时程结果
- 用户定制表格可以屏幕显示或输出到多种格式、交互生成定制报告

- 模型可以对常见格式导入和导出
- 联机帮助, 电子文档, 入门, 多媒体演示
- 图形和表格显示节点和单元时程记录等

1.2 强大的分析功能

SAP2000 分析计算功能十分强大, 这是国际上业界的公认事实, 它几乎了囊括所有结构工程领域内的最新结构分析功能, 四十多年的发展, 使得 SAP2000 积累了丰富的结构计算分析经验, 从静力动力计算, 到线性非线性分析, 从 $P-\Delta$ 效应到施工顺序加载, 从结构阻尼器到基础隔振, 都能运用自如, 为工程师提供最可靠的计算分析结果。

SAP2000 的单元库和荷载类型十分丰富:

- 框架、索、钢束 (线性、非线性)
- 内置钢构件截面、变截面、截面设计器
- 膜、壳、平面应力、平面应变、实体
- 阻尼、隔振单元 (粘滞型与速度型)
- 塑性铰、纤维铰 (应力应变关系体现)
- 沿任何方向的点荷载、均布和阶梯荷载 (节点样式)
- 应变荷载、温度变化和温度阶梯荷载
- 预应力加载
- 自动端部偏移估算
- 弯矩和剪力释放
- 节点偏移, 截面映射
- 单拉或单压单元
- 自动风荷载体型系数

SAP2000 涉及到的分析功能包括:

- 静力线性分析
- 模态分析
- 反应谱分析
- 屈曲分析
- 多步静力分析
- 静力非线性分析
- 动力线性和非线性时程分析
- 稳态分析

➤ 功率谱密度

分析功能的特点:

- 力或位移控制
- 阶段施工 (施工顺序加载), 包括多阶段
- 可以进行包含有效阻尼、能量谱计算和需求谱对比的 pushover 分析

- 几何非线性、 $P-\Delta$ 分析、大变形分析
- 具有子空间迭代法的特征值分析
- 基于优化叠加 Ritz 向量分析
- 振型可以包含 $P-\Delta$ 、大变形和施工效应
- 用 SRSS、GMC (Gupta)、CQC 进行振型组合
- 用 SRSS 方法直接组合或因子绝对叠加方法进行方向组合
- 使用 Wilson FNA 或直接积分法
- 地动加速度放大
- 加速度任意分量合成以生成反应谱曲线等
- 多基激励
- 瞬态或稳态
- 图形和表格显示节点和单元时程记录
- 函数对时间或函数对函数显示
- 对任何点加速度分量产生反应谱曲线

SAP2000 的桥梁功能包括：

- 桥梁建模向导
- 轴线、桥台、桥柱支座、桥墩
- 桥截面（各种多室箱形、板式、混凝土板与钢梁）
- 伸缩缝、横隔板（梁）
- 参数变化（弯梁桥，桥截面变化）
- 桥梁对象、预应力钢束自动随截面变化
- 自动生成桥梁模型、壳模型、实体模型
- 桥梁分析（移动荷载分析）
- 影响线、影响面和包络图
- AASHTO 车辆荷载，用户自定义汽车、履带和火车荷载
- 最大最小位移和反应的确定
- 能处理复杂车道几何布置
- 自动计算所有交通荷载的可能排列
- 提供反应分量的相互作用
- 桥梁施工、收缩徐变（CEB-FIP）
- 预应力损失

1.3

在设计能力方面，SAP2000 是一个一体化的设计程序，钢框架设计、混凝土框架设计、壳体设计都是在同一软件中完成。SAP2000 可以完成各种结构体系的设计，全面输出结构体系分析和设计整体结果和构件设计详细信息。

在设计方式方面，SAP2000 采用传统设计方式与交互式图形方式相结合进行结构设计，

这种设计方式可以大大提高工程师的效率。除此以外,运用多种国际结构设计规范,使得 SAP2000 的结构设计功能更加强大和有效,同时可以采用多个国家和地区的设计规范进行设计结果的研究和对比。

SAP2000 可以完成钢框架设计及钢框架截面的自动优化设计,还可以对钢框架结构指定位移或周期目标,进而通过钢框架截面的自动优化达到所设定的目标。SAP2000 可以进行钢结构设计应力比设计结果全面的颜色编码图形显示。

SAP2000 已经发展成为一个集成化的建筑结构分析与设计软件,它采用独特的图形操作界面系统 (GUI),利用面向对象的操作方法来建模,编辑方式与 AutoCAD 类似,可以方便地建立各种复杂的结构模型,同时辅以大量的工程模板,大大提高了用户建模的效率,并且可以导入导出包括 AutoCAD 在内的常用格式的数据文件,极大方便了用户的使用。

SAP2000 集荷载计算、静动力分析、线性和非线性计算等所有计算分析于一体,容纳了最新的静力、动力、线性和非线性分析技术,计算快捷,分析结果合理可靠,其权威性和可靠性得到了国际上业界的一致肯定。SAP2000 汇集了大部分国家和地区的现有结构设计规范,并已将中国、美国、加拿大和欧洲规范纳入其中,可以完成绝大部分国家和地区的结构工程设计工作。SAP2000 软件特色可以归纳为以下几个方面:

- 在一个统一的集成环境中进行建模、修改、分析、设计优化,并查看结果
- 采用平面、立面和自定义视平面进行功能强大的 3D 建模
- 开始时有多种自动模板来适应不同类型的结构
- 面向对象的实体单元建模,允许采用较大的单元而不需要在每个节点都进行划分
- 强大的类似 CAD 的编辑特点
- 完全集成的截面设计工具允许定义复杂的截面
- 具有最新的静力、动力、线性和非线性分析技术水平
- 采用中国、美国、加拿大和欧洲规范进行完全交互式钢结构设计、混凝土框架设计和壳体设计
- 动画显示变形、振型、应力轮廓、时间关系曲线等结果
- 导入、导出模型到通用文件格式如 DXF 文件
- 全面的上下文相关的联机帮助信息及上百万字的随机技术文档
- 中英文用户界面自由切换,所有技术文档也随之切换中英文

SAP2000 除了有以上的功能及特点外,值得一提的是在 SAP2000 的背后有一批经验丰富且具有卓越成就的工程师在不断的为之而奋斗,具有 Wilson 教授等结构计算理论的权威作为支持。在这样的基础上,SAP2000 将一直站在结构有限元分析程序发展的最前沿,我们的工程师将不断发现,结构分析理论的最新成果将在 SAP2000 程序中得到最早最完整的体现。因此熟练掌握 SAP2000 程序并不断跟随 SAP2000 进行升级,您将一直占据理论发展与实践应用的最前沿。

第2章

集成化用户界面及基本概念

SAP2000 具有集成化的用户界面。模型的建立、运行、设计以及分析结果的显示都在同一个界面下进行。SAP2000 的操作界面是完全的三维环境，在多视图环境下可以进行平面、立面、三维建模以及实时动态显示，配合功能强大的视图管理功能，是真正意义上的空间有限元分析软件。本章主要介绍集成化图形用户界面的各个组成部分及其功能、使用方法。

2.1 集成化用户界面组成

图 2-1 为 SAP2000 图形界面。

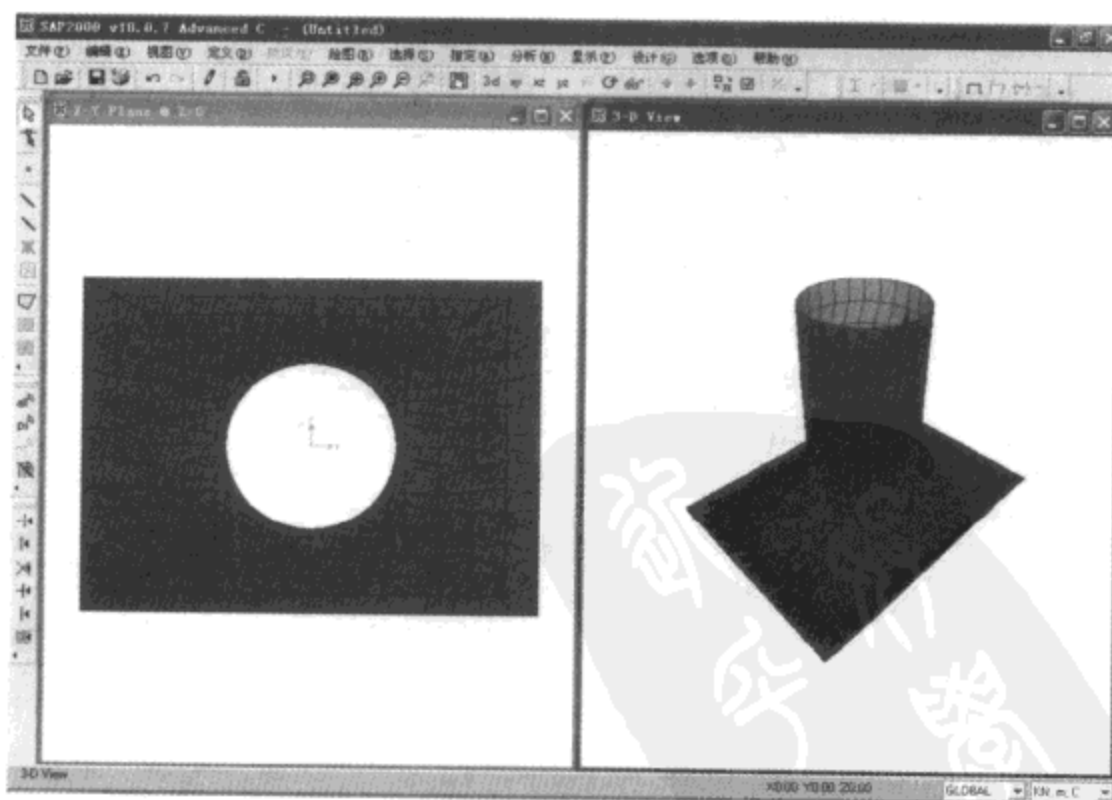


图 2-1 SAP2000 图形界面

SAP2000 是标准的 Windows 操作界面，可以用鼠标直接进行对视窗的移动、缩放、最大化、最小化或关闭等操作。图形用户界面分为主标题条、菜单条、主工具栏、侧工具栏、状态条、显示窗口。

主标题条位于界面顶部，显示程序名称、版本号以及当前模型文件的名称。当界面最小化显示状态时，将光标移动至主标题条按住鼠标左键可以拖动界面在屏幕上移动。

菜单条位于主标题条下方。所有的命令菜单都位于菜单条内。包括文件、编辑、视图、定义、绘图、选择、指定、分析、显示、设计、选项、帮助菜单。

在主窗口的菜单条下面是主工具栏，主工具栏提供了菜单命令的快捷按钮。

界面左侧竖向放置的是侧工具栏，侧工具栏提供了绘制命令快捷按钮。

界面中间部分为主显示窗口，默认状态下主显示窗口以左右排列显示。界面可以显示的窗口数量为 1~4 个。

界面下方为状态条。状态条包括状态文本、光标位置、当前坐标系和当前单位制状态。

2.2 菜单命令

在菜单条中包括 12 个菜单项，所有的操作命令都分类集成在这 12 个菜单项中（见图 2-2~图 2-4）。

| 文件菜单 | 编辑菜单 | 视图菜单 | 定义菜单 |
|---|---|--|---|
| <div>新模型(N)...</div> <div>打开(O)...</div> <div>保存(S)...</div> <div>另存为(A)...</div> <div>导入(I)</div> <div>导出(E)</div> <div>设置默认文件路径(O)...</div> <div>批处理文件控制(O)...</div> <div>生成视频(V)...</div> <div>图形打印设置(S)...</div> <div>打印图形(P)...</div> <div>打印表格(T)...</div> <div>获取增强型图元文件(E)...</div> <div>获取图片(I)</div> <div>定制报告书写器(O)...</div> <div>修改/显示项目信息(I)...</div> <div>修改/显示注释和日志(C)...</div> <div>显示输入/输出文本文件(T)</div> <div>1 D:\modeltest\1.SDB</div> <div>2 D:\modelcheck\sap\...\1.SDB</div> <div>3 D:\modelcheck\sap\...\end.SDB</div> <div>4 D:\modelcheck\sap\...\pj.SDB</div> <div>退出(X)</div> | <div>撤消 Frame Add</div> <div>重做</div> <div>剪切(C)</div> <div>复制(C)</div> <div>粘贴(P)</div> <div>删除(D)</div> <div>从模板中添加到模型(T)</div> <div>交互式数据库编辑(E)...</div> <div>在选择点添加轴网(A)</div> <div>带属性复制(E)...</div> <div>拉伸</div> <div>移动(M)...</div> <div>合并点(N)...</div> <div>对齐点(A)...</div> <div>分割框架(S)...</div> <div>合并框架(M)...</div> <div>剪短/延长框架(E)...</div> <div>编辑曲线框架/索(E)...</div> <div>编辑钢束轮廓(E)</div> <div>分割面(S)...</div> <div>分割实体(E)</div> <div>断开连接(S)...</div> <div>连接(C)</div> <div>显示重复(R)</div> <div>合并重复(R)...</div> <div>Change Labels...</div> | <div>设置三维视图(V)...</div> <div>设置二维视图(V)...</div> <div>设置命名视图(N)...</div> <div>设置界限(B)...</div> <div>设置显示选项(O)...</div> <div>窗选放大(Z)</div> <div>恢复全视图(F)</div> <div>上一次缩放(U)</div> <div>单步放大(A)</div> <div>单步缩小(S)</div> <div>Zoom Realtime</div> <div>平移(T)</div> <div>显示轴网(A)...</div> <div>显示坐标轴(X)</div> <div>只显示选择对象(S)</div> <div>反转视图选择(T)</div> <div>从视图中移除选择(R)</div> <div>恢复前次选择(U)</div> <div>显示全部(A)</div> <div>刷新窗口(W)</div> <div>刷新视图(V)</div> <div>生成 OpenGL 视图(G)...</div> | <div>材料(M)...</div> <div>框架截面(F)...</div> <div>钢束截面(B)...</div> <div>索截面(C)...</div> <div>面截面(A)...</div> <div>实体属性(S)...</div> <div>连接/支座属性(L)...</div> <div>频率相关连接属性(O)...</div> <div>板属性(T)...</div> <div>质量源(A)...</div> <div>坐标系/轴网(O)...</div> <div>节点束缚(B)...</div> <div>节点样式(T)...</div> <div>组(G)...</div> <div>截面切割(C)...</div> <div>广义位移(D)...</div> <div>荷载工况(W)...</div> <div>桥梁荷载(B)...</div> <div>函数(F)...</div> <div>分析工况(A)...</div> <div>组合(C)...</div> <div>添加默认设计组合(O)</div> <div>命名视图(V)...</div> <div>Pushover 参数集(T)...</div> <div>命名集(N)...</div> |

图 2-2 文件、编辑、视图、定义菜单

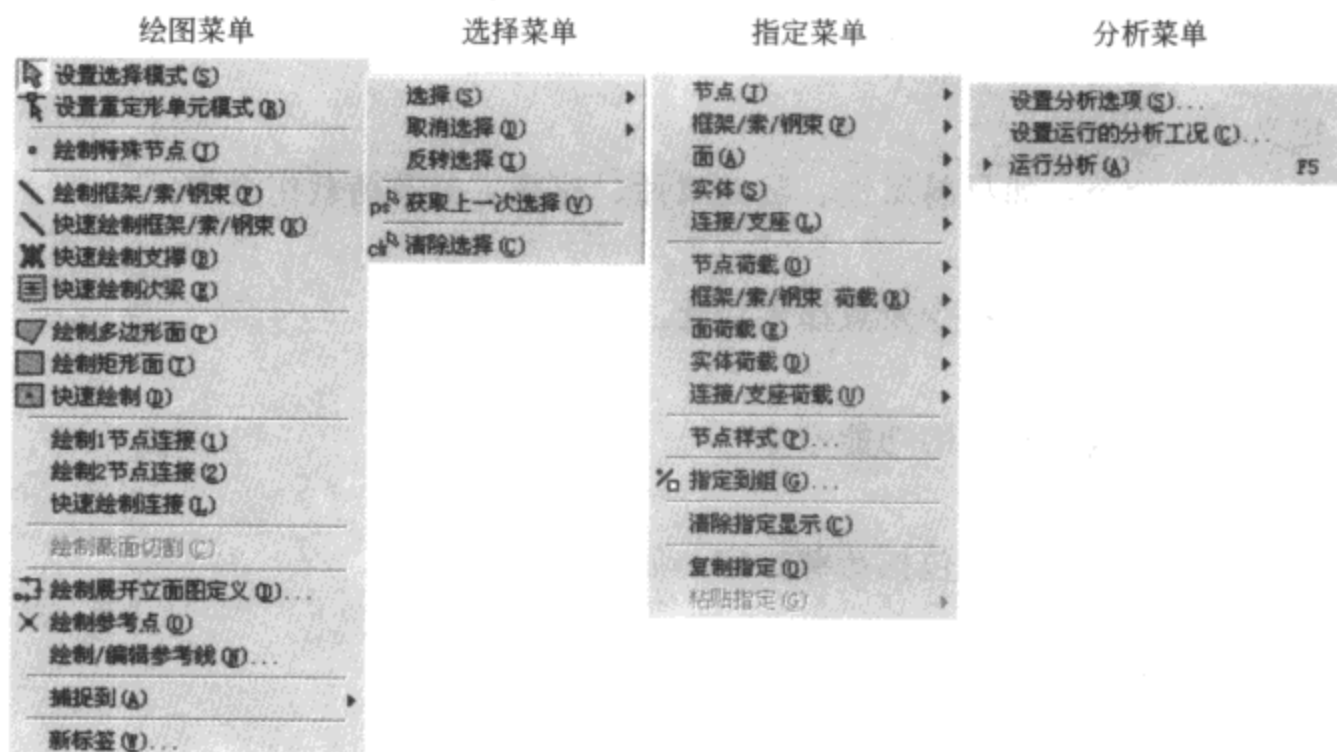


图 2-3 绘图、选择、指定、分析菜单

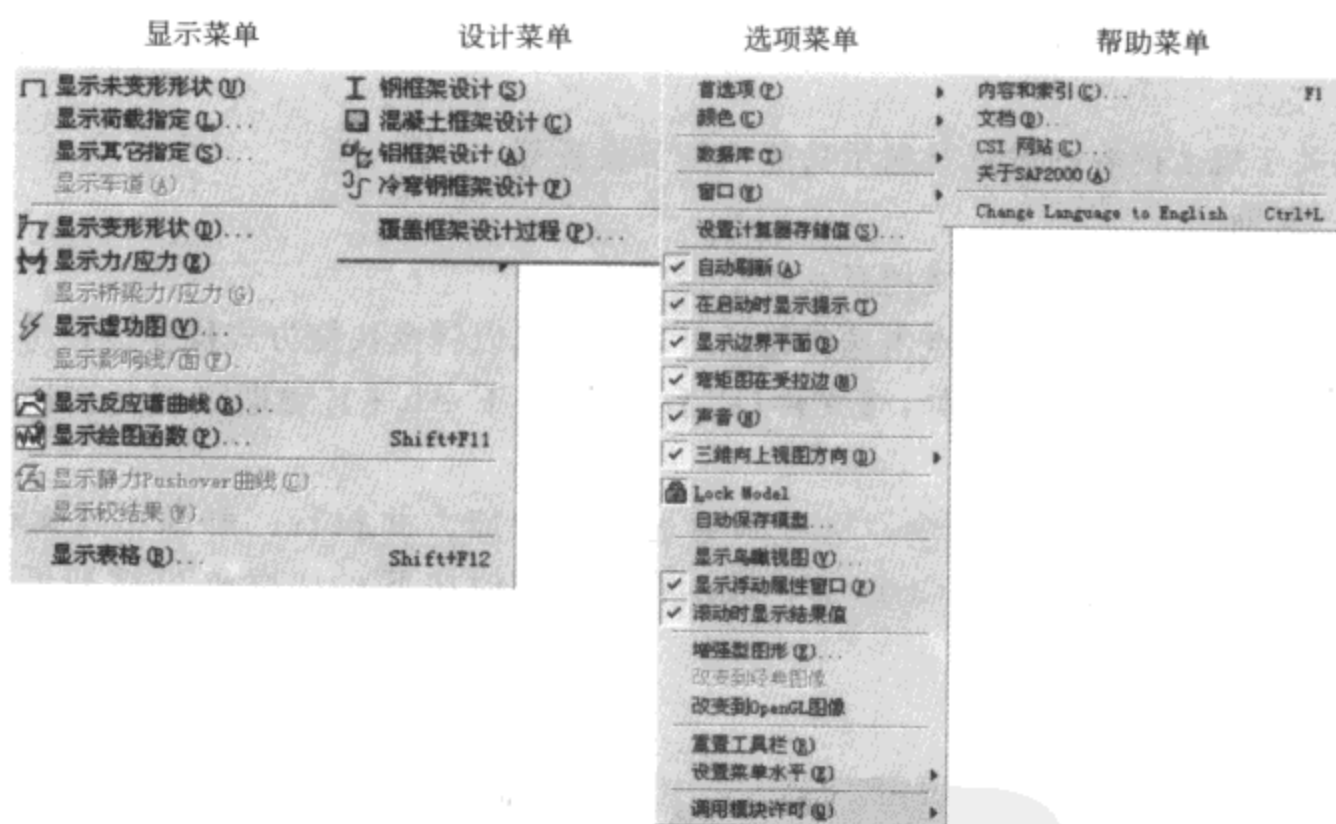


图 2-4 显示、设计、选项、帮助菜单

各菜单的主要功能如下:

(1) 文件菜单

提供基本文件操作, 如新建模型、保存模型、模型的导入导出、结果的打印输出等。

(2) 编辑菜单

提供对模型进行几何图形编辑的命令, 如剪切、复制、粘贴等。

(3) 视图菜单

用于模型视图控制和对象显示。

(4) 定义

提供各种定义命令，如材料属性、截面属性、荷载工况及荷载组合等。

(5) 绘图

提供建模所用到的绘制命令及点捕捉功能。

(6) 选择

提供多种按类型选择对象的功能命令。

(7) 指定

提供各种对象指定功能，包括荷载指定、属性指定等。

(8) 分析

对模型进行动力分析参数指定、运行分析设定等。

(9) 显示

用于显示对象属性及分析结果的信息等。

(10) 设计

用于对各种类型结构设计的相关操作命令。

(11) 选项

提供关于规范内容的设置及显示功能的细节设置等。

(12) 帮助

提供教学文档、联机帮助文档及版本信息等。

菜单命令除了以光标直接点击选择激活外，还可以以键盘快捷方式操作。在每个菜单名称右侧括弧内有按键字母，例如：**【文件(F)】**，表示按下 Alt+F 键即可打开文件菜单，然后在菜单中选择命令行。

对于菜单中的某些执行命令，也可以通过键盘快捷方式执行。例如在**【文件】**菜单**【新模型】**命令行的右侧标有 Ctrl+N，表示在键盘同时按下 Ctrl 键和 N 键即可运行**【新文件】**命令（图 2-5）。

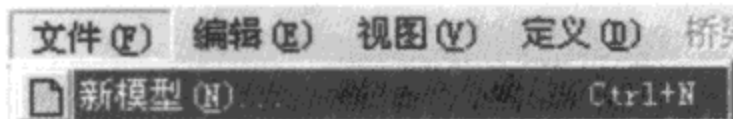


图 2-5

对于一些常用命令，SAP2000 提供了快捷按钮，这些按钮按功能分布于工具条当中。凡是具有快捷按钮的执行命令，在菜单项中命令条左侧会以图标显示（图 2-6）。

菜单命令黑色显示为激活状态，可以直接执行；菜单命令灰色显示为非激活状态，表示不可执行。某些显示为非激活状态的命令，表示需要先决条件或切换到相应视图状态才能使用。在后面章节介绍到具体命令操作时会加以说明。

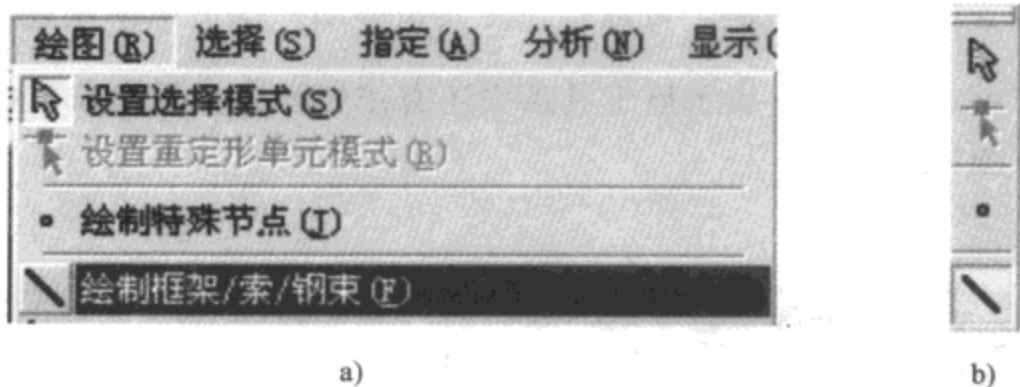


图 2-6

2.3 工具栏

菜单命令的快捷按钮集成在工具栏中。位于 SAP2000 界面顶部的工具栏称为主工具栏，位于界面左侧的工具栏称为侧工具栏。主工具栏主要包括文件操作命令、视图控制命令、定义命令、视图显示命令等。侧工具条包括视图绘制命令、视图选择命令、各种捕捉命令等。

用光标在工具条按钮上点击即可执行命令操作。当需要知道某个按钮的功能时，只需要将光标移动至该按钮上停留数秒，就会弹出该按钮功能的简要描述以及键盘快捷操作方法。所有工具条按钮都有相对应的菜单命令。

对于工具条及按钮，用户可以根据需要进行添加或者隐藏。将光标移动至工具条位置点击鼠标右键，弹出工具栏设置菜单（图 2-7）。

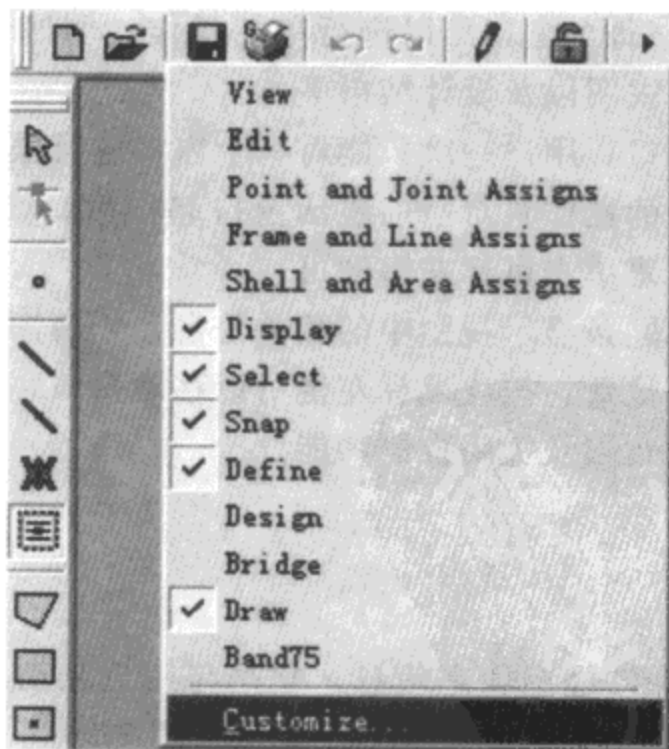



图 2-7 工具栏设置菜单

在菜单中有所有工具条名称的勾选项，勾选的工具栏为显示状态。光标在命令行位置点

击勾选项可以使工具栏在显示与隐藏两种状态切换。每勾选一项在视图工具条位置都会增加一个工具条。每个工具条的一侧都有双线图案，表示该工具条的开始，同时也有一定控制功能。光标在双线位置按住鼠标左键，可以拖住工具条移动；双击鼠标左键，工具条隐藏。

有的工具条末端有  符号，表示该工具条中还有按钮没有显示出来，按下该符号会弹出按钮添加子菜单（图 2-8）。

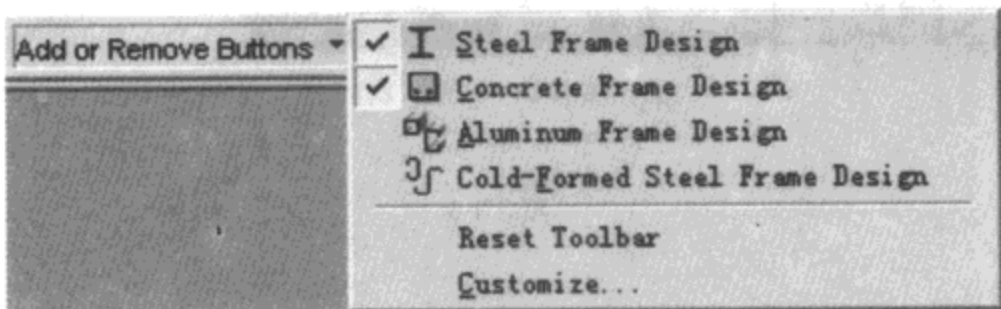


图 2-8 按钮添加子菜单

在该菜单中是所有工具条按钮勾选项，勾选状态的按钮为显示状态。如果希望显示按钮，则在该图标命令行点击勾选即可。隐藏按钮即在勾选状态命令行即可。

如果希望将编辑过的工具条恢复至默认状态，点击【选项】>【重置工具栏】命令即可。

2.4 显示窗

显示窗占据了界面的主要部分，用于显示模型的几何形状、分析结果、设计结果等。显示窗可以显示 1~4 个窗口，每个窗口可以进行单独操作。例如，可以让四个显示窗口分别显示平面图、立面图、三位视图以及设计结果等。

无论界面上显示多少窗口，用户一次只能对一个窗口进行操作，即当前激活窗口。当前激活窗口为高亮显示。所有的操作只对当前激活窗口起作用。如果用户希望切换当前窗口，只需将光标移到相应窗口位置单击鼠标左键即可。

窗口上部为标题条，标题条显示视图中的相关信息，如视图状态、楼层位置以及分析结果等。将光标移动到标题条位置，按住鼠标左键可以移动窗口，标题条右侧的三个按钮分别对应视图最小化显示、最大化以及关闭控制功能。

2.5 状态条

状态条用于显示 SAP2000 模型状态信息，它是与用户互动、信息反馈的窗口。用户往往可以从这里读取重要的信息以及指导操作的提示（图 2-9）。在一般视图状态下，状态条从左至右给出的信息包括：视图位置状态、光标坐标值、当前坐标系、单位制。

又如图 2-10 所示，当视图中模型处于变形状态时，状态条会提示在节点右击鼠标显示位移值以及【动画显示】按钮。



图 2-9 状态信息



图 2-10 状态信息

由此看出，用户需要随时留意状态条的信息。

在坐标系下拉列表中，用户可以切换当前坐标系（如果定义了多个坐标系）。SAP2000 视图中一次只能显示一个坐标系，即当前坐标系。光标坐标原点位置以及坐标值显示方式也会随着当前坐标系变动或者坐标系类型的不同而变化。例如，当坐标系切换为柱坐标系时，光标坐标值显示方式会随之改变（图 2-11）。



图 2-11 状态信息

单位制下拉列表中提供了多种英制、国际单位制，用户可以根据习惯设置当前单位制（图 2-12）。在默认状态下，SAP2000 始终以初始单位制显示数据，用户切换当前单位制后数据自动换算为当前单位制显示，而数值大小不会发生改变。列表中单位排列顺序依次代表：力、长度、温度。例如：KN, m, C 表示模型中所有与力值相关单位制为千牛；所有与几何相关数据单位制为米，包括长度、面积、体积等；所有与温度相关值单位制为摄氏度。

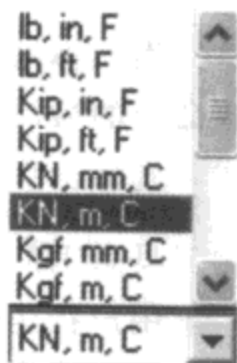


表 2-1 显示了 SAP2000 单位制列表所包含的所有单位制：

图 2-12

单位制列表中的单元制名称

表 2-1

| | | | |
|-----|-----|----|-----|
| lb | 磅 | ft | 英寸 |
| Kip | 千磅 | mm | 毫米 |
| KN | 千牛 | m | 米 |
| Kgf | 千克力 | cm | 厘米 |
| N | 牛顿 | F | 华氏度 |
| Ton | 美吨 | C | 摄氏度 |
| in | 英寸 | | |



2.6 鼠标的使用

SAP2000 提供了 7 种鼠标操作方式：单击鼠标左键、单击鼠标右键、按 Ctrl 键同时单击鼠标左键、按 Ctrl 键同时单击鼠标右键、按 Shift 键同时单击鼠标右键、快速双击鼠标左键、按住鼠标左键拖动。鼠标各种操作功能见表 2-2。

鼠标各种操作功能

表 2-2

| 鼠标操作 | 功能 |
|-------------------|---|
| 单击鼠标左键 | 选择菜单项、激活命令、点击按钮和选择视图对象 |
| 单击鼠标右键 | 应用在模型对象上：弹出对象信息；应用在绘图区：弹出快捷菜单；应用在工具条：弹出添加工具条菜单 |
| 按 Ctrl 键同时单击鼠标左键 | 应用在模型重叠位置对象上：弹出对象列表，从中选择所需选择的对象；应用在对话框中有列表的情况：列表项可以进行多选，列表项可以是相邻或不相邻的 |
| 按 Ctrl 键同时单击鼠标右键 | 应用在模型重叠位置对象上：弹出对象列表，从中选择所需选择的对象后弹出所选对象属性信息 |
| 按 Shift 键同时单击鼠标左键 | 应用在对话框中有列表的情况：对相邻列表项可以进行多选 |
| 快速双击鼠标左键 | 应用于绘制过程：结束某个绘制操作；应用于工具条：隐藏工具条 |
| 按住鼠标左键拖动 | 应用于视图控制：窗选放大视图；应用于选择：窗选模型对象；应用于重定形命令：改变对象形状 |

当光标处于斜箭头状态时，为选择模式。这时鼠标的操作用于选择模型对象以及所有命令的激活操作。当激活绘制命令后，光标会变为竖向箭头“↑”，这时光标处于绘图模式，光标操作用于绘制对象，而不能进行正常的选择操作。如需结束绘图模式，则可以点击侧工具条上的按钮，或者按键盘 Esc 键，或者执行【选择菜单】中的命令。

用户在建模过程中要注意光标所处的模式状态，避免出现误操作。绘图模式一般不会自动切换到选择模式，当绘制完对象需要选择时，要进行光标状态切换。

2.7 基本概念

SAP2000 作为通用有限元分析软件，对不同结构类型的所有构件按照几何形状或受力特点用“对象”进行模拟。所以可以说 SAP2000 的模型是各种对象的集合体。用户在图形界面上绘制的是“对象模型”，在 SAP2000 内部将“对象模型”自动转换为“分析模型”进行分析，分析结果以“对象模型”的形式显示，便于用户直观的读取。以下分别介绍 SAP2000 中对象的概念、对象模型、分析模型。

2.7.1 对象

对于所有实际模型，当用户把它以一种图形的形式输入到计算机中时，都需要将它拆散为若干个构件，根据它们的形状和受力特点用相应的对象加以模拟，然后再将它们以一定的方式拼装在一起，从而建立起图像模型，再由程序自动将其转化为分析模型。对于任意一个结构而言，组成它的构件无外乎以下几种形式：节点、杆、板、块体。在 SAP2000 中这些构件体现为点对象、线对象、面对象和实体对象。因此，对象是将模型中真实构件及作用在构件上的荷载等属性，在空间角度上的抽象表达。它是 SAP2000 中的基本概念，也是 SAP2000 模型中最基本的组成。对象的概念很容易理解，但对于其应用却是一个值得不断

探究的过程。这也是有限元理论解决实际问题的关键。

点对象一般在绘制线对象、面对象或实体对象时自动生成,作为节点出现,它是组成其他单元的基本对象。点对象也可以独立出现,例如模拟单个质点。用户可以对点对象指定约束、弹簧、连接属性、质量、荷载、温度等属性。

线对象一般用来模拟柱、梁、支撑等框架构件。不同类型的框架构件在 SAP2000 中都以线条的形式绘制。用户可以对线对象指定截面类型、端部约束释放、端部偏移、轴线偏移、局部坐标轴、刚度修正、连接属性、附加质量、集中荷载、线荷载以及温度作用等属性。

面对象一般可以用来模拟板、壁、坡面等表现为面几何属性的构件。不同类型的面类型构件都以三角形或四边形绘制。用户可以对面对象指定截面类型、刚性隔板、局部坐标轴、刚度修正、附加质量、面弹簧、面对象剖分、自动线约束、均布荷载、孔隙压力、应变荷载、温度作用、风荷载等属性。

实体一般可以模拟水坝等大型砌筑体或厚壁等结构。用户可以对实体指定截面属性、局部坐标轴、表面弹簧、实体网格剖分、实体边约束、表面压力、孔隙压力、温度作用等属性。

对于一些特殊构件用何种对象去模拟,一方面要根据其几何属性和受力特点,一方面还要根据各种对象的分析模型特点、原理。这在一定程度上取决于工程师的判断以及对有限元理论的理解。

2.7.2 对象模型和分析模型

对用户来说, SAP2000 的建模过程是绘制对象的过程。这些代表实际构件的对象组合在一起,即为视图中显示的模型,称为“对象模型”。例如,对于一根 6m 长的梁,在建模时用一根 6m 长的线条绘制出来,并且为它指定线荷载或者弯矩释放等属性;如果模拟的是一根 2 跨共 6m 的连续梁,则需要将整根 6m 的线条断为两根 3m 的线条。也就是说模型对象尽量要与实际模型构件一致,用户建模时要尽量按照实际情况输入。

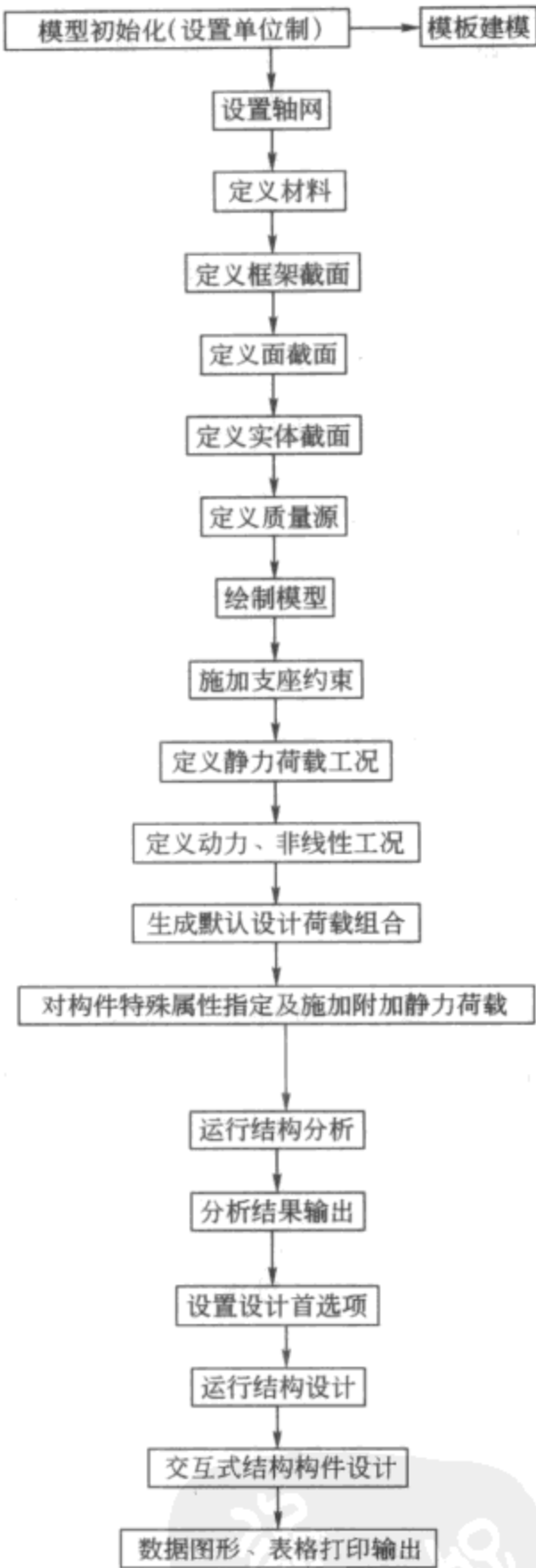
进行分析时, SAP2000 会自动将对象模型转换为以单元为基础的有限元分析数据。这时的模型即为分析模型。对象模型中的点对象、线对象、面对象、实体对象将转换为分析模型中的节点单元、框架单元、壳单元、实体单元。对于线对象,指定了框架单元细分,则会在线对象内部增加了节点和细分单元,并生成与其他单元的连接关系。对于面对象、实体对象也同样如此。而对象模型中的连接单元转换为分析模型是不剖分的,也就是说分析模型中的连接单元与对象模型的连接单元是一一对应的。作用于对象模型上的荷载将转换到分析模型中相关单元和节点上。

SAP2000 的分析结果与设计结果的显示都是以对象模型显示的。

2.8 基本过程

在 SAP2000 中生成一个完整的模型的过程主要分为建立模型、模型分析、模型设计三个步骤。下面以一个流程图 (2-13) 表示生成典型模型的基本过程。

建立模型：



模型分析：

模型设计：

图 2-13 生成典型模型基本过程流程图

2.9 例题

本节以一个简单模型为例（图 2-14），详细介绍 SAP2000 模型建立、运行分析、运行设计的过程。使初学者对在 SAP2000 建模步骤有一个初步的认识。

例题概况：模型为一个钢框架结构（图 2-14）。X 向为 4 跨，轴间距 6m；Y 向为 3 跨，轴间距 8m。结构共 3 层，层高均为 4m，屋脊处层高 5m。型钢柱截面 $H500 \times 300 \times 12 \times 20$ ，型钢梁截面为 $H400 \times 300 \times 10 \times 16$ ，均采用 Q235 钢。楼板面层荷载 3kN/m^2 ，边梁线荷载 6kN/m 。地震烈度 8 度，仅考虑 Y 向地震。不考虑风荷载。

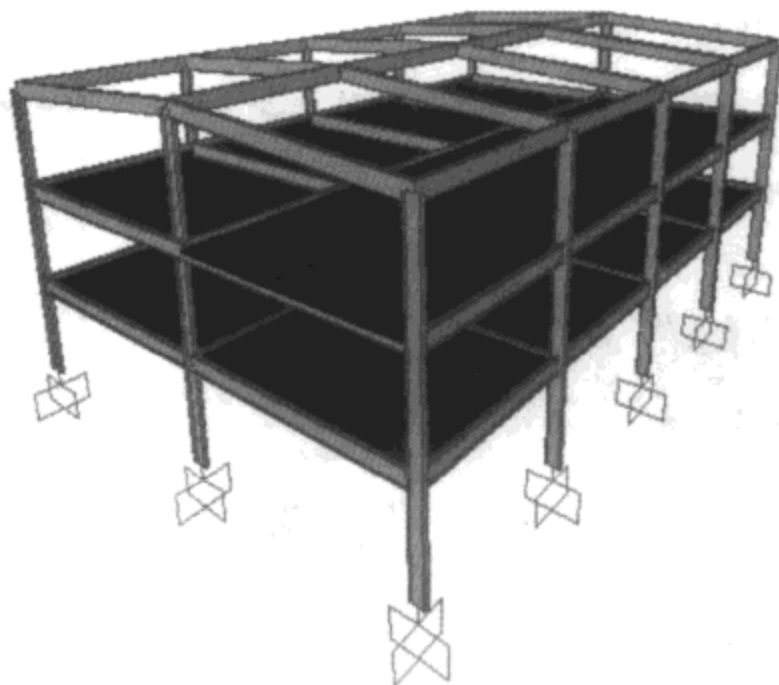


图 2-14 简单模型

步骤一：运行 SAP2000，进行初始化设置

首先，运行 SAP2000 程序，打开程序界面（图 2-15）。

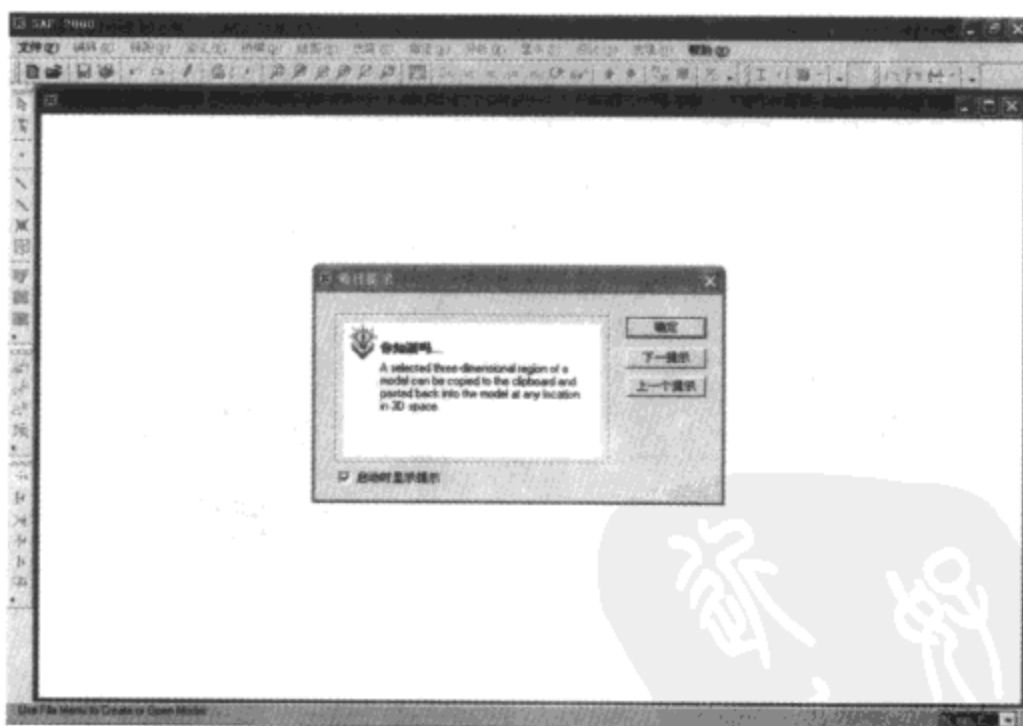



图 2-15

与界面一同弹出的是每日提示对话框。对话框中会随机给出一些操作说明或者使用技巧，供用户学习、了解。点击【下一提示】按钮或【上一个提示】按钮可以切换其他显示内容。点击【确定】按钮，关闭该对话框。

点击界面左上角工具条中新建模型按钮，弹出新模型对话框，将单位制下拉列表的初始化单位制设置为“KN，m，C”，如图 2-16 所示。

步骤二：定义轴网数据

在新模型对话框选择模板区域中，点击【轴网】按钮，弹出新坐标系/轴网 系对话框（图 2-17），设置轴网线数量、轴网线间距。

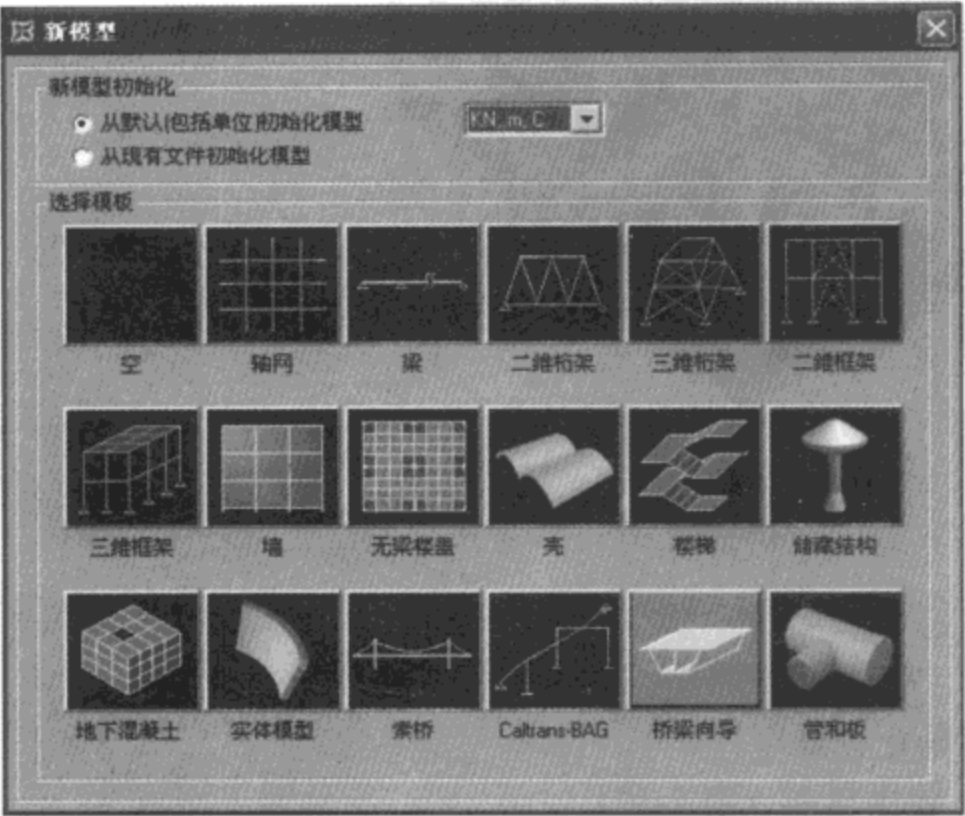


图 2-16

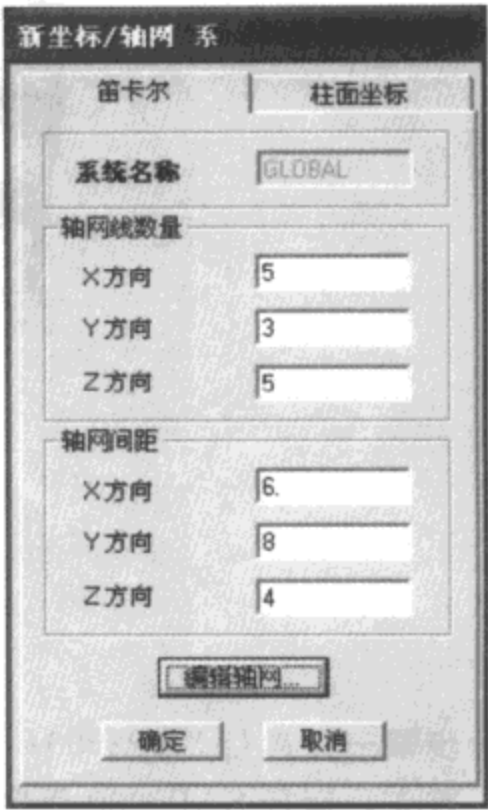


图 2-17

点击【编辑轴网】按钮，弹出定义轴网数据对话框，对话框中将 Z 轴网数据区域中 Z5 轴线的坐标修改为“13”（图 2-18）。

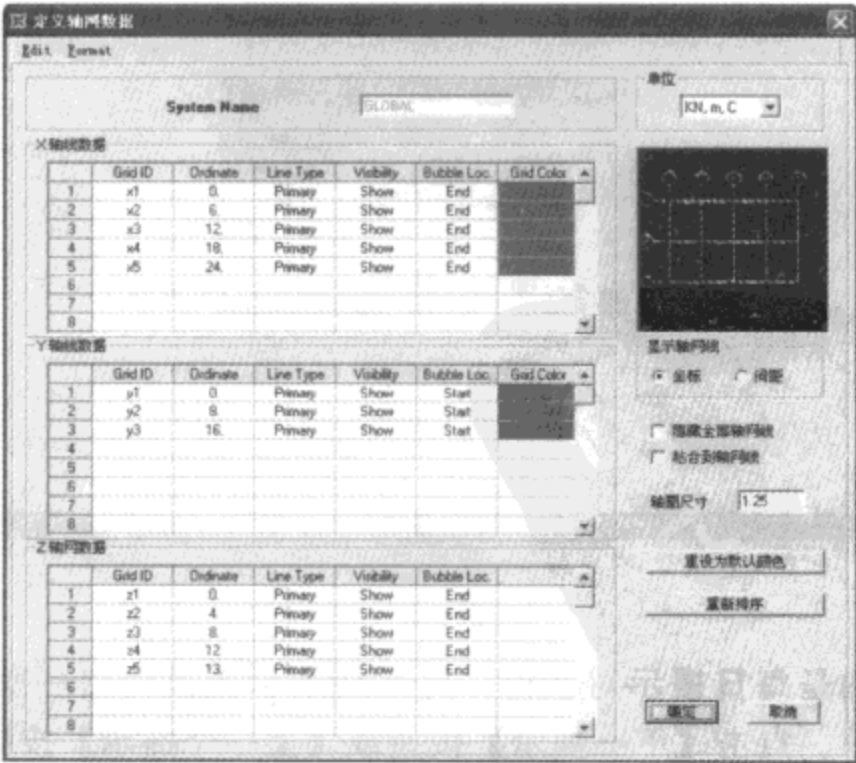


图 2-18

两次点击【确定】按钮，退出对话框。轴网定义完毕（图 2-19）。

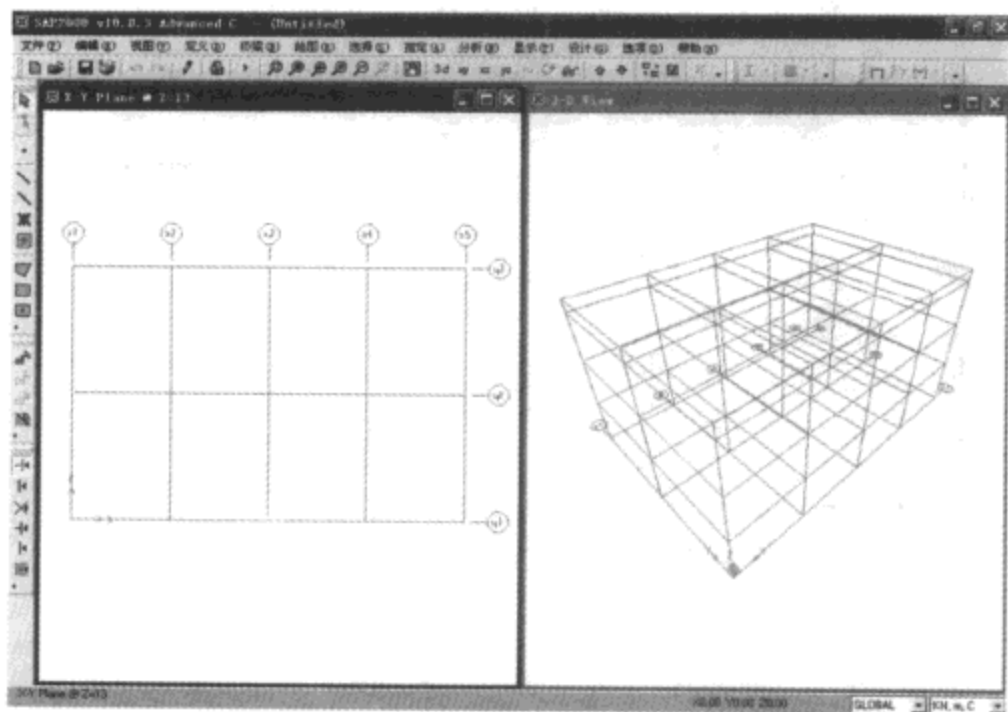


图 2-19

步骤三：定义材料属性

点击【定义】>【材料属性】命令，弹出定义材料对话框（图 2-20）。

在材料列表中选择 STEEL，点击【添加新材料】按钮，弹出材料属性数据对话框。在这里定义 Q235 钢，首先在材料名称输入域中键入“Q235”。用户需要输入材料的分析属性，如密度、重度、弹性模量等，以及材料的设计属性，如屈服应力、屈服拉应力等数据。根据规范输入 Q235 钢材料属性（图 2-21）。

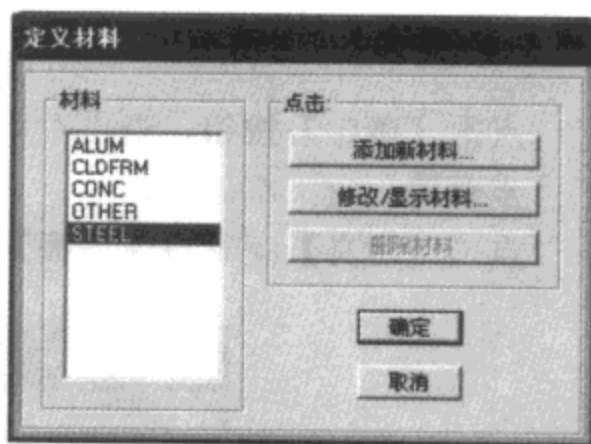


图 2-20

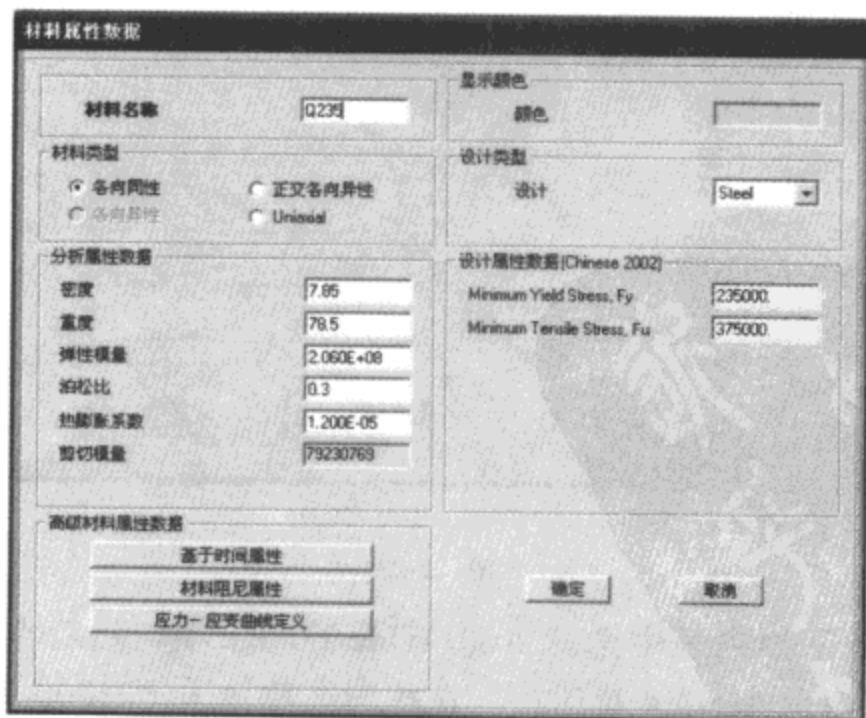


图 2-21

点击【确定】按钮，回到定义材料对话框。选择 CONC，点击【添加新材料】按钮再次弹出材料属性数据对话框，输入 C30 混凝土材料属性数据（图 2-22）。

图 2-22

点击【确定】按钮，退出对话框，材料定义完成。

步骤四：定义框架截面

点击【定义】>【框架截面】命令，弹出框架属性对话框（图 2-23）。

图 2-23

在对话框右侧添加下拉列表中选择 Add/Wide Flange 项，然后点击【添加新属性】按钮，弹出 Add/Wide Flange Section 对话框。在截面名称输入“H500×300×12×20”，在材料下拉列表选择 Q235，随后再输入相应数据（图 2-24）。

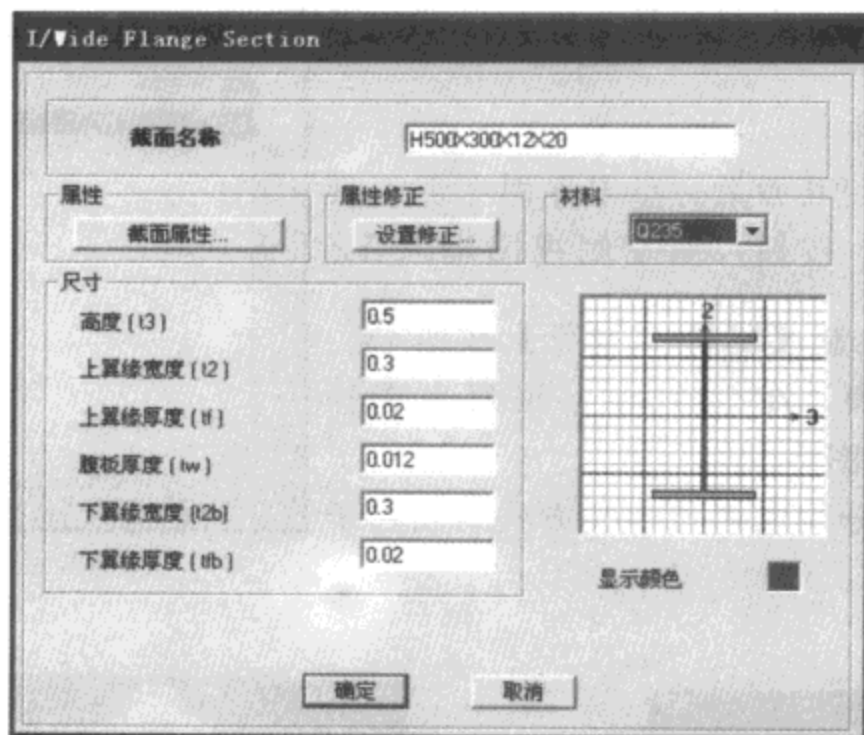


图 2-24

按【确定】键退出此对话框。再次在框架属性对话框右侧添加下拉列表中选择 Add/Wide Flange 项，同法定义 $H400 \times 300 \times 10 \times 16$ 截面（图 2-25）。

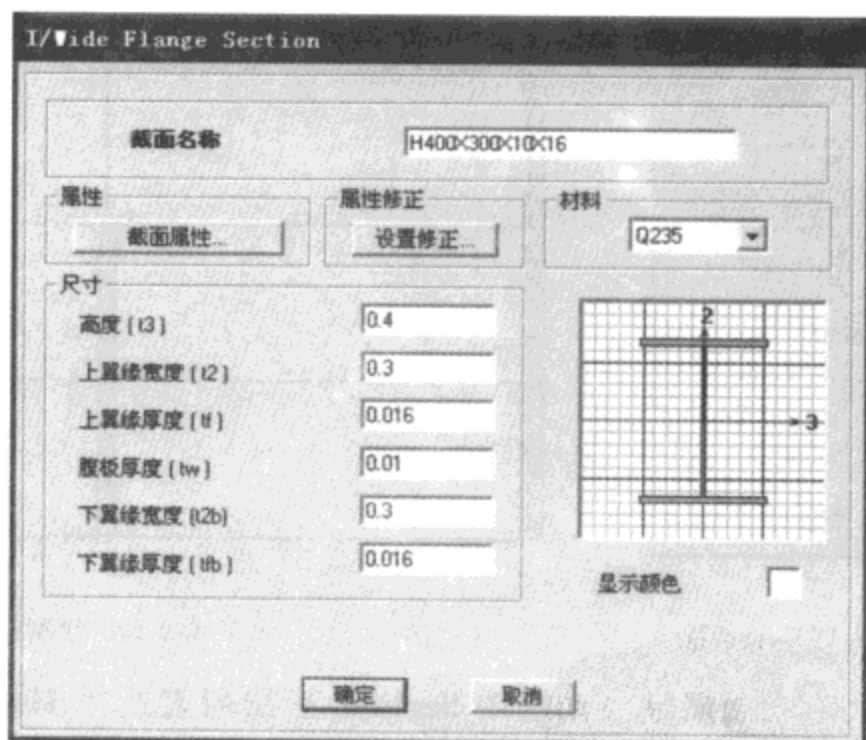


图 2-25

按【确定】按钮，退出对话框，框架截面定义完成。


步骤五：定义板截面属性

点击【定义】>【面截面】命令，弹出面截面对话框（图 2-26）。

在截面列表中选择 ASEC1，点击【修改/显示截面】按钮，弹出 Shell Section Data 对话框，在厚度区域的膜厚度和弯曲厚度输入域中输入板厚 0.1m（图 2-27）。

按【确定】按钮，退出对话框，定义板截面完成。

步骤六：绘制构件

点击左侧窗口，使其激活。点击界面上部工具条中设置【YZ 视图】按钮，使左侧视图进入 YZ (X=0) 立面。点击绘制【框架/索单元】按钮，弹出对象属性浮动窗，在 Section 下拉列表选择 H500×300×12×20 (图 2-28)。

分别在竖向轴线分层以两点连线方式绘制柱子 (图 2-29)。

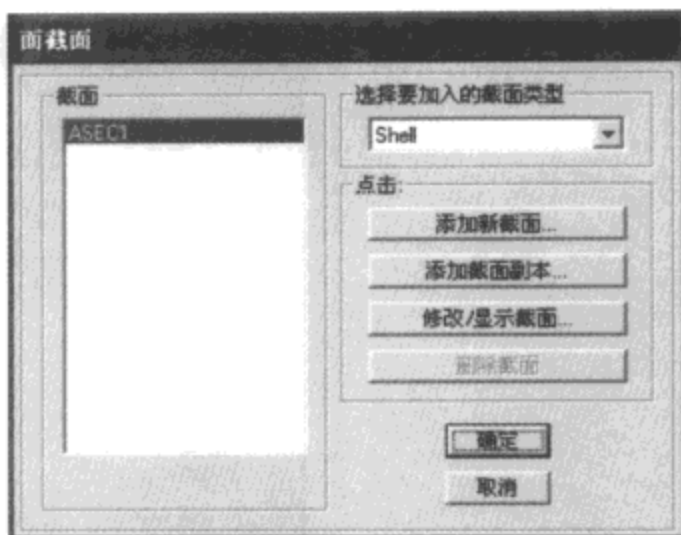


图 2-26 面截面对话框



图 2-27 Shell Section Data 对话框

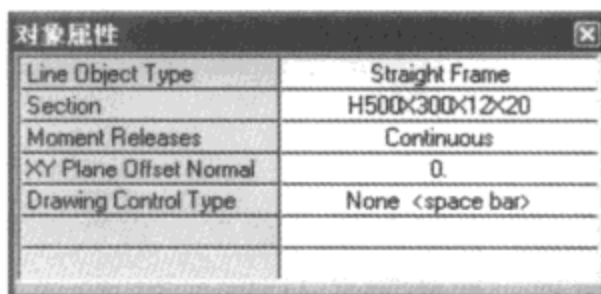


图 2-28 对象属性浮动窗

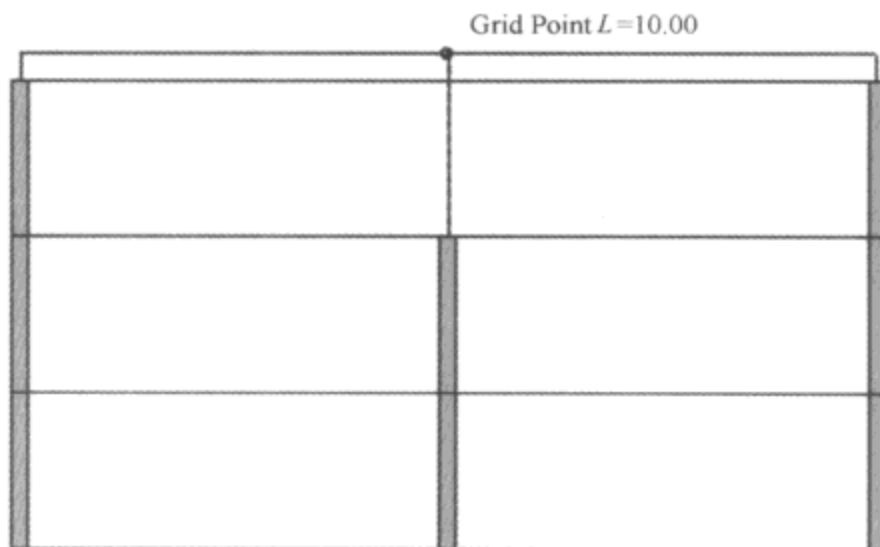



图 2-29 绘制柱

柱子绘制完成后，在绘制属性浮动窗中 Section 下拉列表选择 H400×300×10×16，将一、二层的梁以及屋面梁绘制上去 (图 2-30)。

单击鼠标右键结束绘制状态。在界面左侧工具条中点击【选择全部】按钮，选中所有构件，点击【编辑】>【带属性复制】命令，弹出复制对话框，在增量区域 dx 输入域中键入“6”(m)，

在下方增量数据中输入“4”，按【确定】按钮，回到立面视图中。选择当前立面中的所有梁柱节点 (图 2-31)。

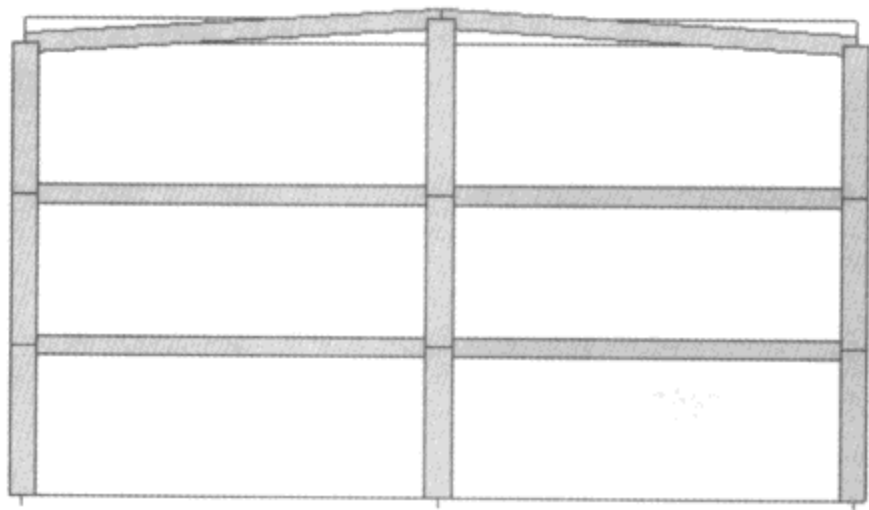


图 2-30 绘制梁

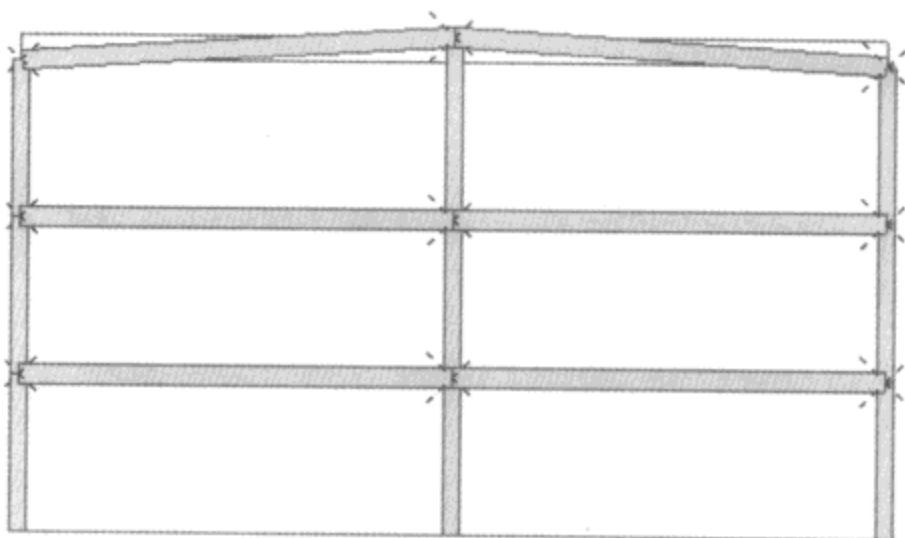







图 2-31 选择节点

点击【编辑】>【拉伸】>【拉伸点成框架/索】命令，弹出拉伸点成线对话框。在增量数据的 dx 中键入“6”（m），在下方数中输入“4”，如图 2-32 所示。按【确定】按钮，框架构件绘制完成。

点击界面上部工具条中【设置 XY 视图】按钮 ，使左侧视图进入 XY 平面。点击工具条中【表单中下移】按钮 ，使平面视图进入 8m 标高位置。按下左侧工具条【快速绘制面单元】按钮 ，视图中在楼板区域单击鼠标左键生成楼板（图 2-33）。

点击界面上部工具条中点击【表单中下移】按钮 ，进入 4m 标高平面，绘制该层楼板方法同上。

步骤七：设置柱低端支座

点击界面上部工具条中【表单中下移】按钮 ，进入 0 标高平面。将光标移到视图左上角，按住左键向右下角托拽，窗选轴线范围所有节点（左下角状态栏显示 15 个），点击【指

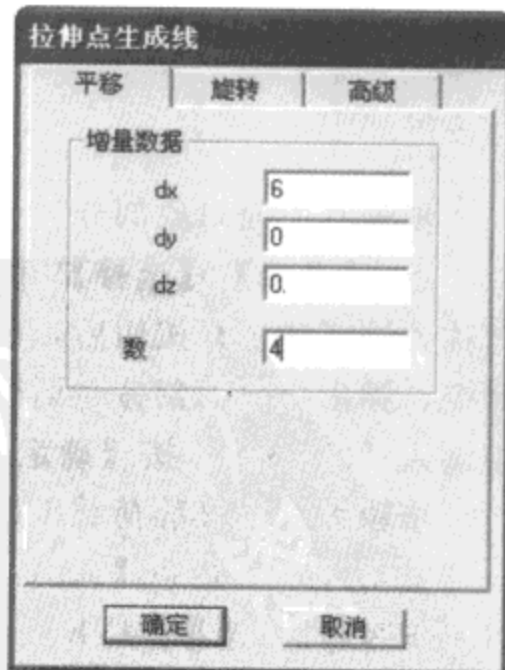


图 2-32 拉伸点成线对话框

定】>【节点】>【束缚】命令，弹出节点支座对话框，勾选所有自由度束缚(图 2-34)。

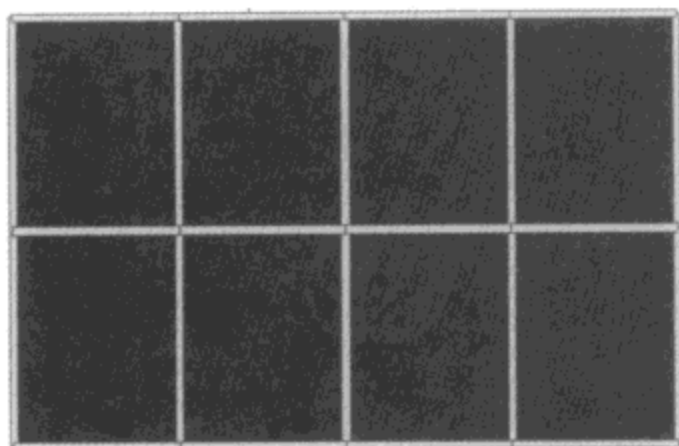


图 2-33 绘制楼板

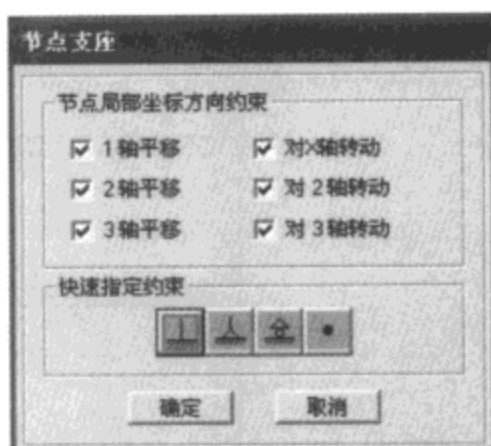


图 2-34 节点支座对话框

按【确定】按钮，退出对话框。支座束缚指定完成。
至此，模型部分绘制完成(图 2-35)。

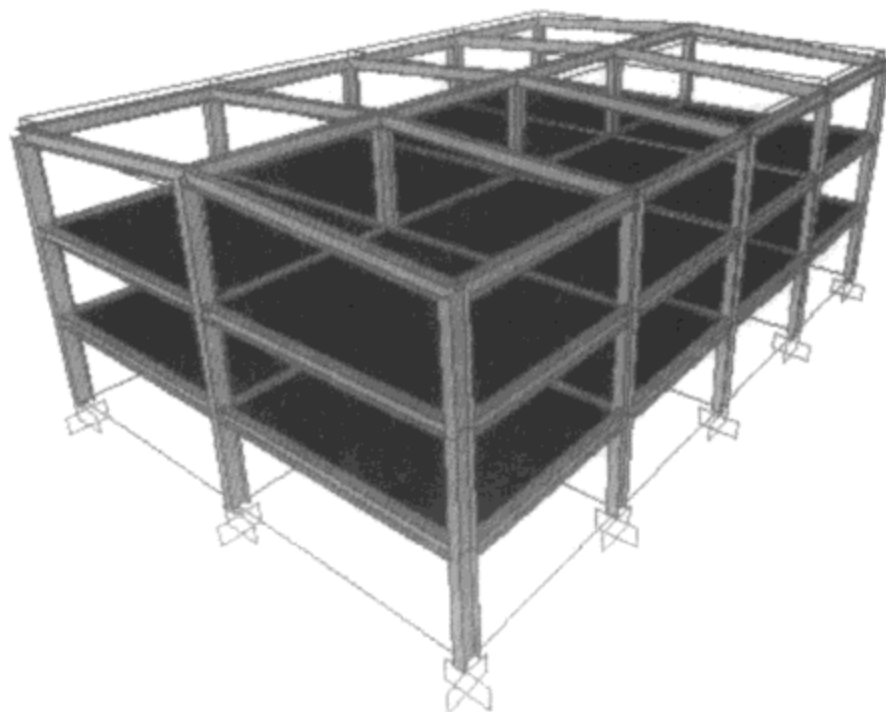


图 2-35 模型完成

步骤八：面对象剖分

点击【选择】>【选择】>【面截面】命令，弹出选择截面对话框，在列表中选择唯一的截面名称，按【确定】按钮后，所有楼板被选中。点击【指定】>【面】>【自动面网格剖分】命令，弹出指定面剖分对话框，选择以最大尺寸自动剖分面为单元项，在后面的两个输入域中键入“2”(m)。按【确定】按钮。

步骤九：定义静荷载工况

点击【定义】>【荷载工况】命令，弹出定义荷载对话框。在荷载名称输入域中键入“LIVE”，类型选择 LIVE，点击右侧【添加】按钮；再在荷载名称输入域键入“QY”，类型选择 QUAKE，在自动测向荷载下拉列表中选择 Chinese2002，点击右侧【添加】按钮(图 2-36)。

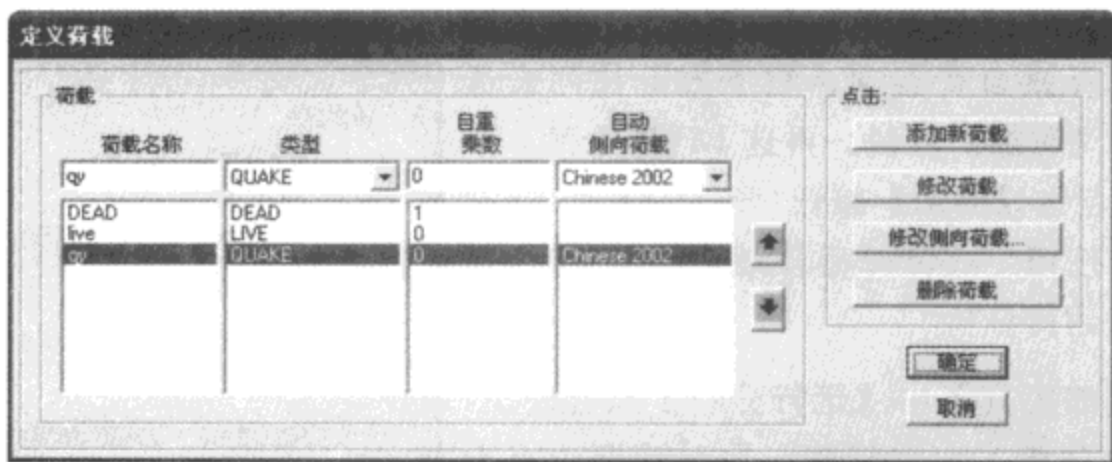


图 2-36 定义荷载对话框

点击右侧【修改侧向荷载】按钮，弹出中国 2002 地震荷载对话框，将荷载方向改为 Y 向（图 2-37）。

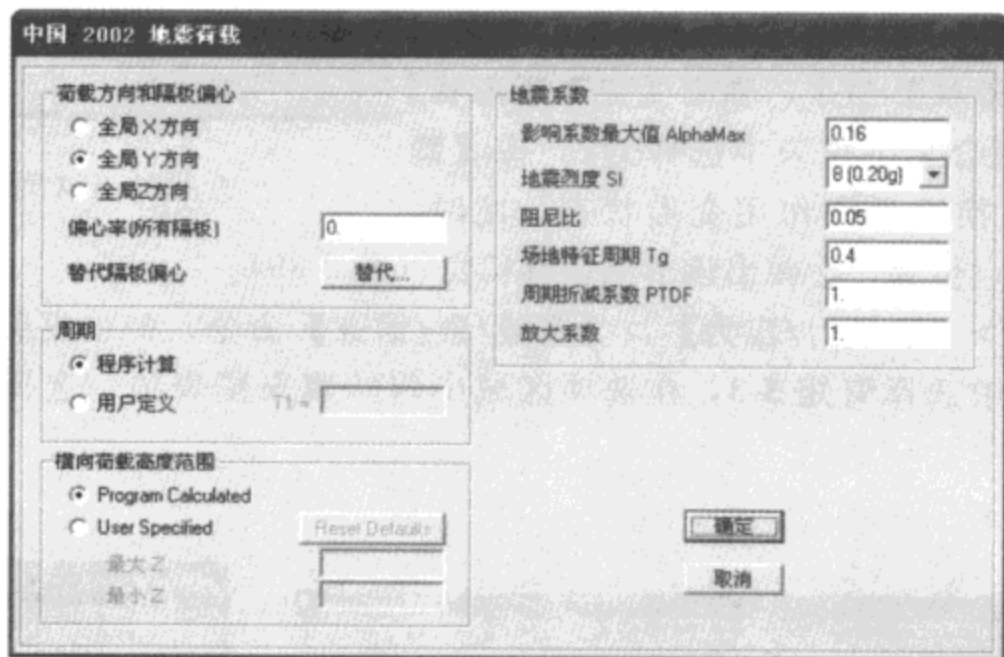



图 2-37 中国 2002 地震荷载对话框

按【确定】按钮退出对话框，荷载工况定义完成。

注意：此处所定义的地震工况计算方法为底部剪力法。

步骤十：梁构件指定附加荷载和活荷载

在平面视图中，选择所有边梁，点击【指定】>【框架/索/钢束荷载】>【分布】命令，弹出框架分布荷载对话框，在下方均布荷载输入域键入“6”，按【确定】按钮。点击【选择】>【选择】>【面截面】命令，弹出选择截面对话框，在列表中选择唯一的截面名称，按【确定】按钮后，所有楼板被选中。点击【指定】>【面荷载】>【均匀】命令，弹出面均布荷载对话框，均布荷载输入域键入“3”，按【确定】按钮。

点击左侧工具条中【获取上一次选择】按钮 ，所有楼板被选中。再次点击【选择】>【选择】>【面截面】命令，在面均布荷载对话框荷载名称下拉表中选择 LIVE，均布荷载输入域键入“2”。按【确定】按钮。

步骤十一：定义质量源

点击【定义】>【质量源】命令，弹出定义质量源对话框。选择来自荷载项，在下方下拉列表选择 DEAD，点击【添加】按钮。再选 LIVE 工况，系数修改为 0.5，点击【添加】按钮(图 2-38)。

按【确定】按钮，质量源定义完成。

步骤十二：运行分析

点击界面上部工具条中【运行分析】按钮，弹出设置运行的分析工况对话框，在对话框中点击【现在运行】按钮。SAP2000 在运行分析时弹出分析信息滚动窗，当显示分析完成时按【确定】按钮。

步骤十三：查看分析结果

在分析完成后，三维视图会自动切换到恒荷载变形状态下。点击右侧视图，使其激活。点击【显示】>【显示变形形状】命令，弹出【变形后形状】对话框，在工况/组合名下拉表中选择 QY，按【确定】按钮，模型切换至地震作用变形状态。此时，将光标移至梁柱节点位置，会弹出该节点位移信息(图 2-39)。

点击【显示】>【显示力/应力】>【框架/索/钢束】命令，弹出框架的构件受力图对话框。在分量区域中选择弯矩 3-3，在选项区域中勾选填充图表项，选择在图表上显示值(图 2-40)。

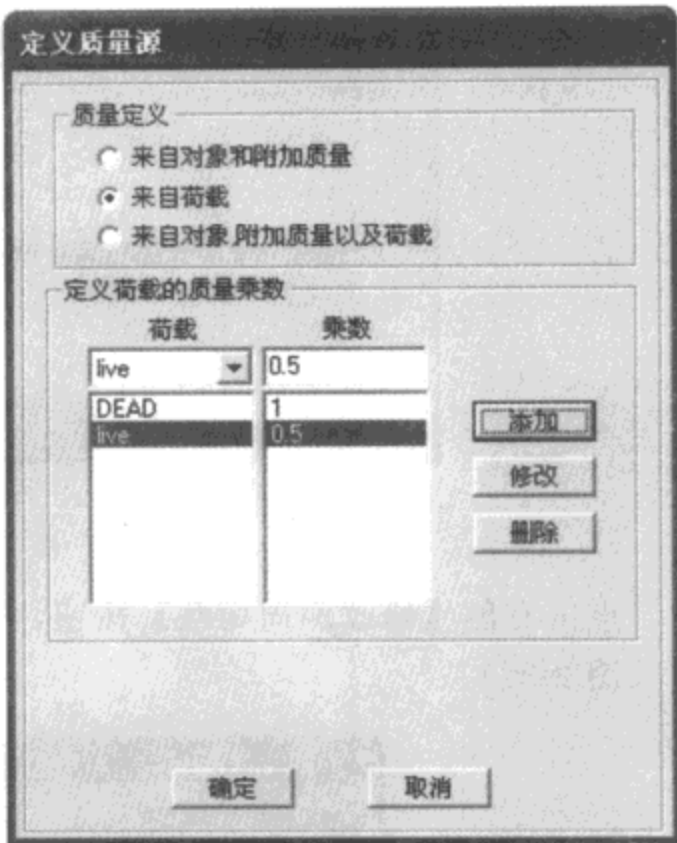


图 2-38 定义质量源对话框

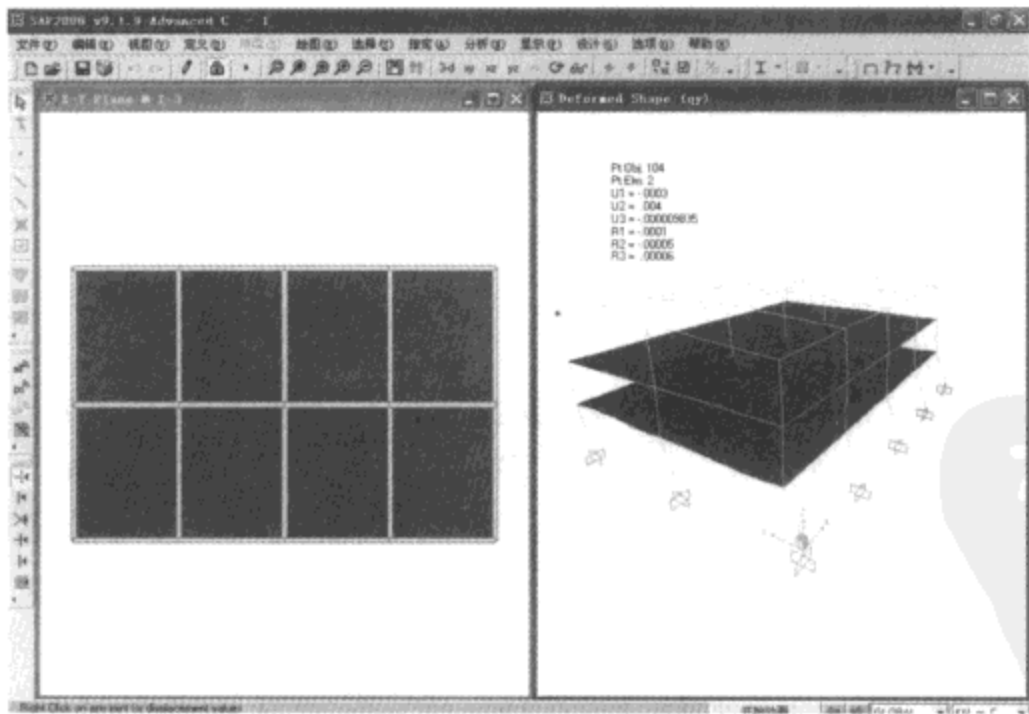


图 2-39 节点位移信息

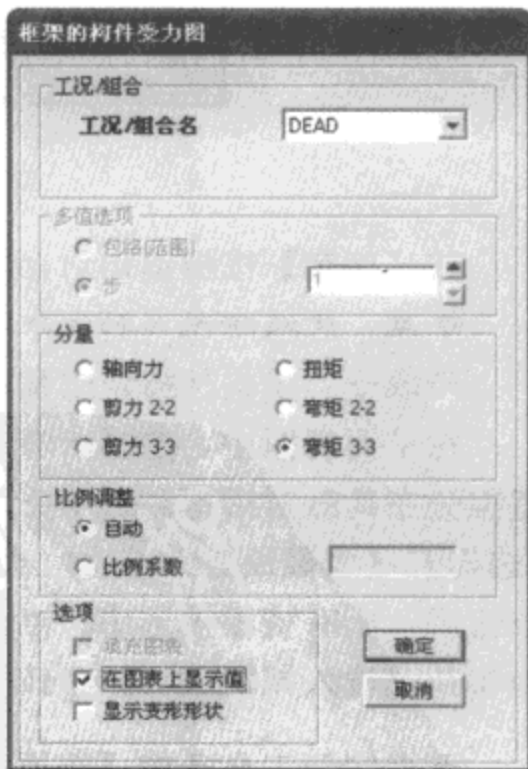


图 2-40 框架的构件受力图对话框

按【确定】按钮，将当前视图切换至立面视图。视图显示框架构件弯矩图（图 2-41）。

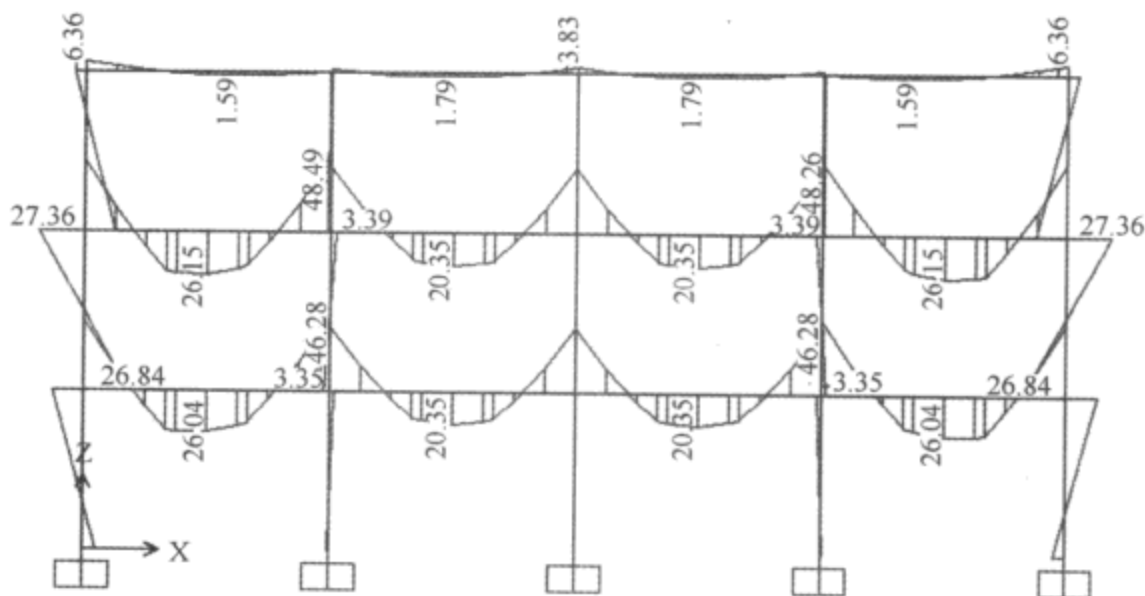


图 2-41 框架弯矩图

步骤十四：运行交互式设计

点击界面上部工具条中【开始钢结构设计/检查】按钮，运行设计。设计完成后，在激活窗口的模型视图中显示出构件设计截面信息（图 2-42）。

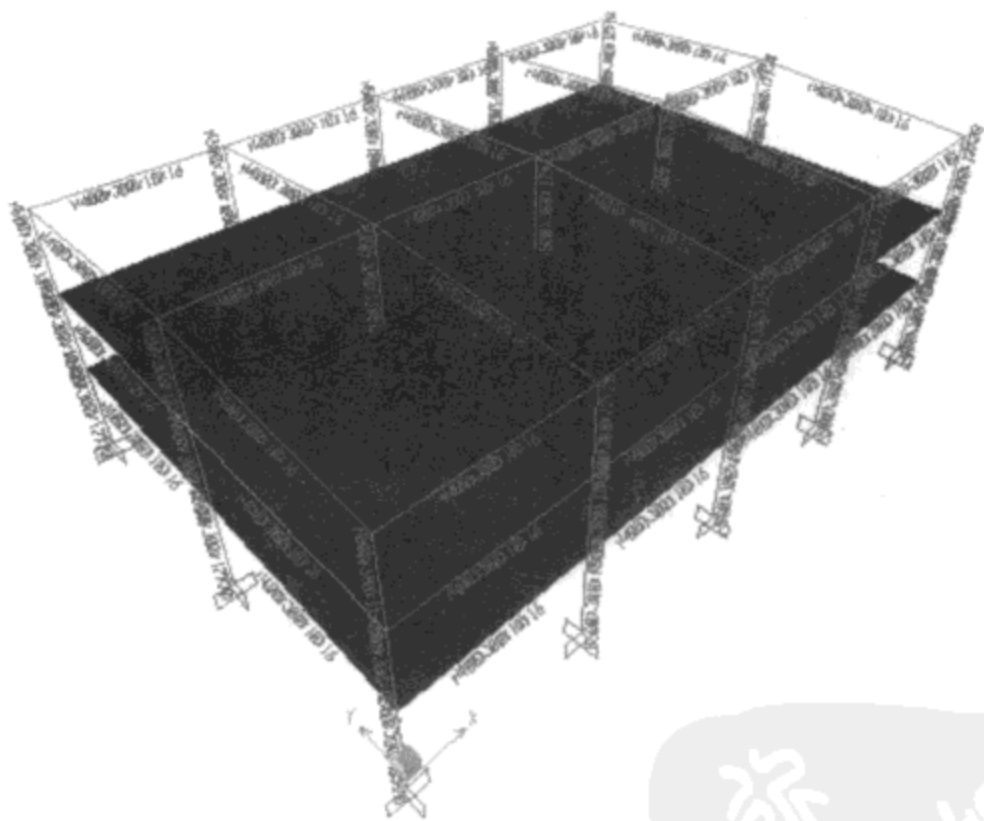


图 2-42 截面设计信息

点击【设计】>【钢框架设计】>【显示设计信息】命令，弹出显示钢设计结果对话框，在设计输出下拉表中可以选择显示内容。暂取默认项（应力比），按【确定】按钮，此时视图中构件上会显示出应力比数值。

将光标在构件位置单击鼠标右键，弹出构件交互式设计对话框（图 2-43）。

在对话框中给出了所选构件信息，列表中给出所有设计组合对应的应力比。高亮显示的

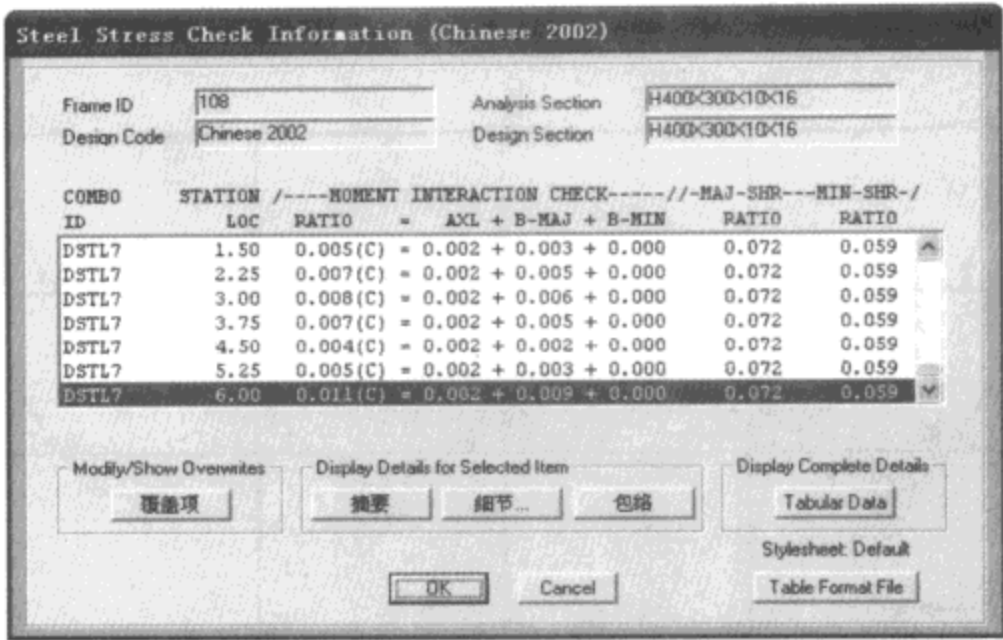


图 2-43 构件交互式设计对话框

为控制组合。
 点击【细节】按钮，则会给出构件详细的设计信息（图 2-44）。

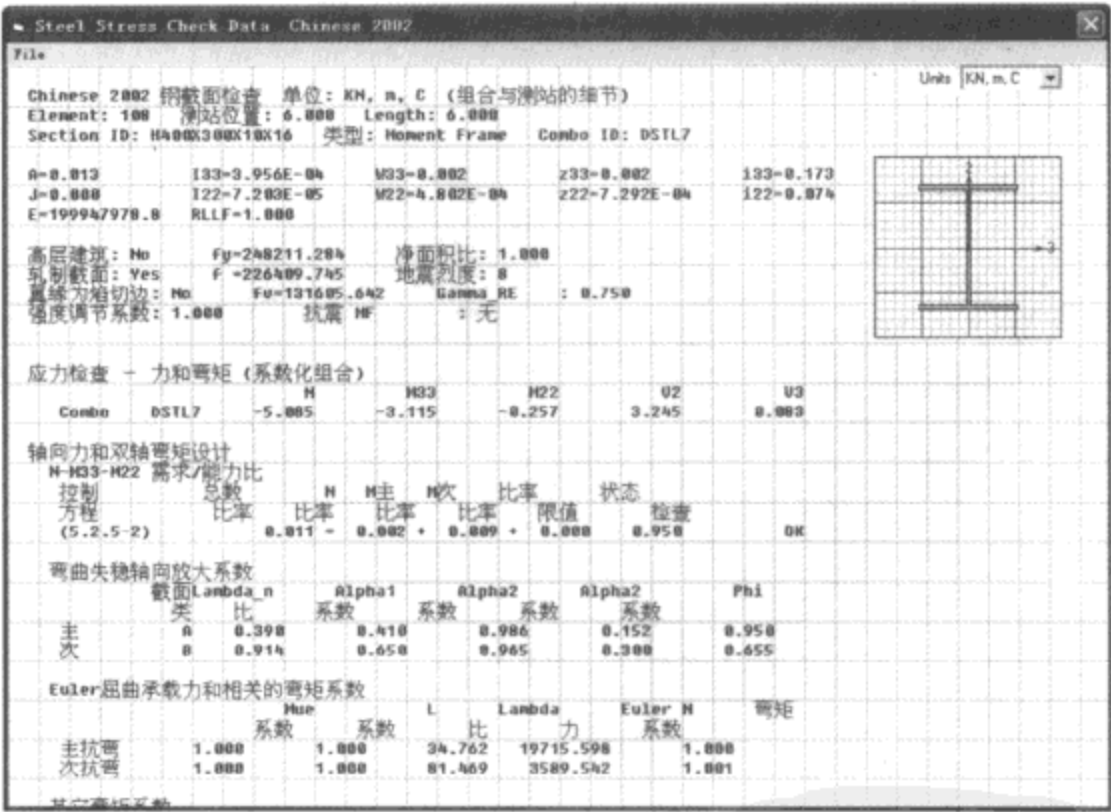


图 2-44 构件详细信息

第二部分

建模功能

SAP2000 以完全空间方式建立模型，建模方式具有灵活、快速、直观的特点。集成化的操作界面大大简化了建模过程的操作步骤，针对对象的操作将模型完全图形化、空间化，将模型的建立过程简化为直观的图形绘制过程。

建模功能部分基本上以 SAP2000 建模顺序为主线，全面、详细的对建模功能进行了介绍。章节内容从基本的对话框使用说明，配合模型例题，对程序本身功能进行了阐述，也从使用者的角度对操作过程进行了描述，动静结合、层次分明，能够让使用者全面了解 SAP2000 的建模功能和特点。

建模功能主要介绍了 SAP2000 坐标系与轴网的建立、材料与对象的定义、对象的绘制、荷载工况的定义与施加、特殊功能的指定、视图显示的控制、快速建模及导入导出功能等，作为学习、掌握 SAP2000 使用功能的基础内容。其中第 3 章坐标系与轴网章节部分介绍了轴网的建立和对轴线的编辑及其辅助轴线的使用；第 4 章单元库章节介绍了 SAP2000 提供的分析模型单元，包括点单元、面单元、实体单元等，将其作为 SAP2000 的基础理论知识进行了详细介绍；第 5 章材料与截面章节首先介绍了 SAP2000 中各种材料的定义方法，对材料的属性数据定义进行说明，包括涉及到的相关技术背景，尤其是材料的高级属性，对后面涉及到的非线性分析或动力分析都作为基本数据，其次对象部分内容主要介绍了 SAP2000 提供的对象类型和对象截面定义的方法及其适用范围和技术特点，例如线对象、面对象、实体对象等，作为组成模型构件的基本属性数据；第 6 章对象绘制章节按照线对象、面对象、实体对象介绍了 SAP2000 中各种对象的绘制方法、编辑修改方式、以及相关的功能和技巧等；第 7 章荷载工况和施加章节介绍了荷载工况、分析工况的定义菜单、涉及中国规范荷

载工况的定义方法,以及针对对象的荷载施加方法等;第8章特殊功能指定章节主要介绍在实际建模过程中对模型各种特殊属性的指定,例如约束、节点区、轴线偏移、节点束缚等,提供了模型中遇到的细部问题的处理方法;第9章视图功能章节对SAP2000的视图控制功能进行了说明,例如平面、立面视图控制,视角控制以及颜色控制等,对于视图建模为主的程序来说,视图控制是重要的环节;第10章快速建模及导入导出章节对SAP2000建模灵活、多样性的功能和特点进行了阐述,包括模板建模、与CAD、与Excel、与Access数据库等程序之间的数据交互功能,为后面实际复杂模型建模打下基础。

总之,作为SAP2000使用的第一个步骤,如何快速、准确地建立模型能够体现出工程师对力学知识的理解以及对程序的熟练掌握程度。建模部分通过对程序基本操作界面和基本技巧的全面、细致的介绍,体现了SAP2000对于各种行业结构模型的适用性与灵活性,突出介绍了SAP2000针对建模的优势功能,是工程师了解、掌握SAP2000使用的前提和参考。

新
平
知
道

第3章

坐标系与轴网

SAP2000 作为空间有限元分析、设计软件，在建模过程中空间的定位一般通过轴网辅助进行。轴网可以由用户定义生成，也可以由数据导入生成。SAP2000 的轴网系统一般由若干坐标系组成，而轴线是组成坐标系的基本对象。用户定义的第一个坐标系是整体坐标系，此后通过添加附加坐标系完成复杂轴网的定义。对于轴网线的编辑可以整体进行，也可以单根轴线进行。对轴网线以外的定位还可以借助参考线和参考面。在 SAP2000 中建模不一定需要轴网，但准确、快速的定义轴网系统对于提高空间建模速度是非常有帮助的。熟练掌握定义轴网的技巧是必不可少的。

3.1 轴网

SAP2000 中轴网由坐标系组成，用户可以定义的坐标系有两种类型：笛卡尔坐标系（直角坐标系）和柱坐标系。定义的第一个坐标系被称为整体坐标系（GLOBAL），它是生成其他附加坐标系的前提条件，因此不能被删除或者更名。用户可以通过添加附加的笛卡尔坐标系、柱坐标系或者轴线，拼装较为复杂的轴网系统。

3.1.1 新建轴网


打开 SAP2000 界面后，点击【文件】>【新模型】命令或者【新建模型】按钮，弹出新坐标系/轴网 系参见图 3-1 顶栏对话框（图 3-1）。对话框数据输入见表 3-1。

表 3-1

| 系 统 名 称 | 显示系统默认坐标系名称 | |
|---------|-------------|-----------------|
| 轴网线数量 | X 方向 | 输入整体坐标系 X 方向轴线数 |
| | Y 方向 | 输入整体坐标系 Y 方向轴线数 |
| | Z 方向 | 输入整体坐标系 Z 方向轴线数 |

续上表

| 系 统 名 称 | 显示系统默认坐标系名称 | |
|---------|-------------|------------------|
| 轴网间距 | X 方向 | 输入整体坐标系 X 方向轴线间距 |
| | Y 方向 | 输入整体坐标系 Y 方向轴线间距 |
| | Z 方向 | 输入整体坐标系 Z 方向轴线间距 |

在对话框中，系统名称为灰色状态，表示 GLOBAL 名称无法更改。在轴网线数量区域和轴网间距区域输入 X、Y、Z 方向轴线数和轴线间距。需要对数据进一步编辑则点击【编辑轴网】按钮，弹出定义轴网数据对话框（图 3-2）。对话框说明见表 3-2。



图 3-1 新坐标系/轴网 系对话框

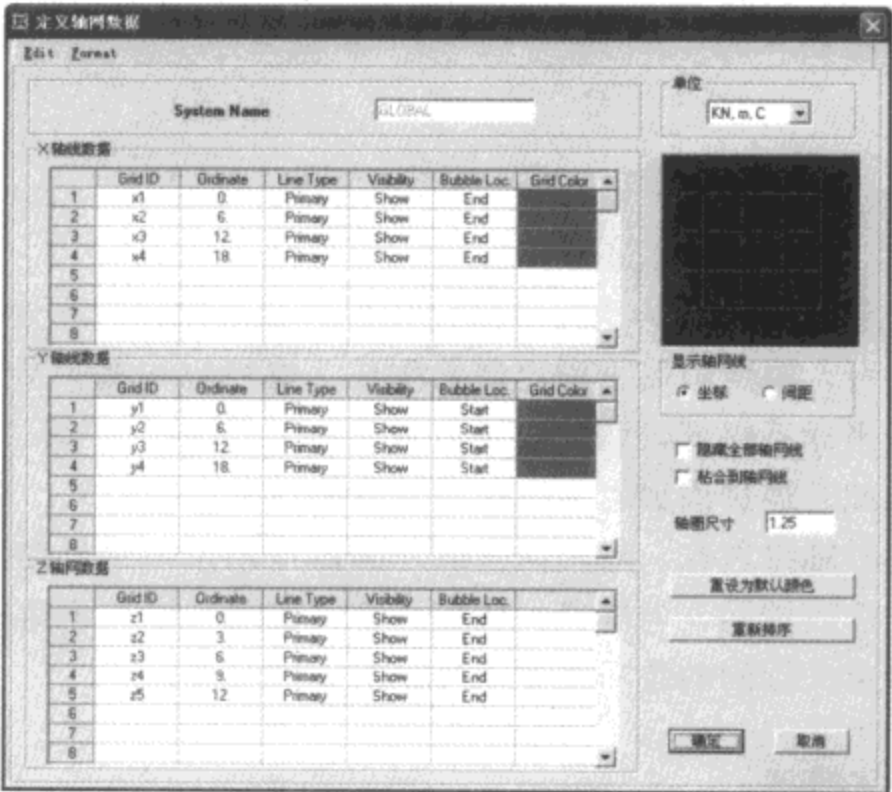


图 3-2 定义轴网数据对话框

表 3-2

| System Name | 显示系统默认坐标系名称 | |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| X、Y 轴线数据 | Grid ID（轴线 ID） | 显示轴线编号，用户可以修改 |
| | Ordinate（坐标） | 显示轴线坐标或到下一轴线的间距，用户可以修改 |
| | Line type（类型） | 双击选择轴线类型：Primary（主轴线）、Second（次轴线） |
| | Visibility（可见性） | 双击选择轴线可见性：Show（可视）、Hide（隐藏） |
| | Bubble Loc（轴圈位置） | 双击选择轴线圈的位置：Top（上）、Bottom（下） |
| | Grid Color（轴网线颜色） | 显示当前轴线的颜色，用户可以编辑 |
| 显示轴网线（选项） | 坐标 | 坐标列按轴线坐标显示 |
| | 间距 | 坐标列按轴线间距显示 |
| 单位（下拉菜单） | 选择轴线尺寸显示单位制 | |
| 隐藏全部轴网线 | 勾选则隐藏全部轴网线 | |
| 粘合到轴网线 | 将附加坐标系粘合到整体坐标系。控制显示局部坐标系原点项 | |

续上表

| | | |
|-------------|--------------|---|
| System Name | 显示系统默认坐标系名称 | |
| 轴圈尺寸 | 输入轴圈尺寸 | |
| 重设为默认颜色 | 重新设轴线颜色为默认颜色 | |
| 重新排序 | 重置轴线坐标 | |
| Edit 菜单项 | Cut | 剪切轴线数据表格中数据 |
| | Copy | 复制轴线数据表格中数据 |
| | Paste | 粘贴轴线数据表格中数据 |
| | Delete | 删除轴线数据表格中数据 |
| | Insert Row | 插入轴线数据表格中数据行 |
| | Delete Row | 删除轴线数据表格中数据行 |
| Format 菜单项 | Color | 在某个轴线的轴线颜色上单击鼠标左键，再点击【Format】>【Color】命令，显示设置轴线颜色对话框。可以选择颜色。这一功能也可以直接在某个轴线的轴线颜色上双击 |

对于一个新建轴网的数据进行编辑，首先在单位制下拉列表中设置适当的数据显示单位制。然后选择轴网线间距显示方式。对于数据的编辑直接在表格中进行。数据的修改，例如轴线编号和间距，直接选择表格单击鼠标左键，键入数据即可。对于轴线属性的修改，例如类型、可视性、线圈位置，则在表格位置双击鼠标左键，属性会在固有值间进行切换。

轴线编号可根据习惯进行修改，一般输入字母或数字。

轴线类型分为 Primary（主轴线）、Second（次轴线），主轴线带有轴线编号，次轴线不带轴线编号。

对于某一编号轴线的可视性可以在 Invisibility 表格中控制。如果需要隐藏全部轴线，可以直接勾选隐藏全部轴网线勾选项。

轴线颜色可以通过点击【Grid Color】方格弹出的颜色编辑器进行设置。

如果整体坐标系需要被定义为柱面坐标系，则在新坐标/轴网 系对话框中选择【柱面坐标】项（图 3-3）。

此时，轴网线数量、间距以半径和弧度方向定义。点击【编辑轴网】按钮，弹出定义轴网数据对话框（图 3-4）。

对话框与之前介绍的笛卡尔坐标系的定义对话框基本一致，只是轴线的定义方式是按照柱面坐标显示的。如右轴网线区域表示每段圆弧半径坐标；顶轴网线区域表示每段弧度的夹角度数。

注意：定义轴网数据对话框中的轴线数和间距都是以新坐标系与轴网对话框中的数据为基础的。因此对于较多轴线的轴网务必事先准确定义轴线数量，防止后期添加轴线带来的不便。

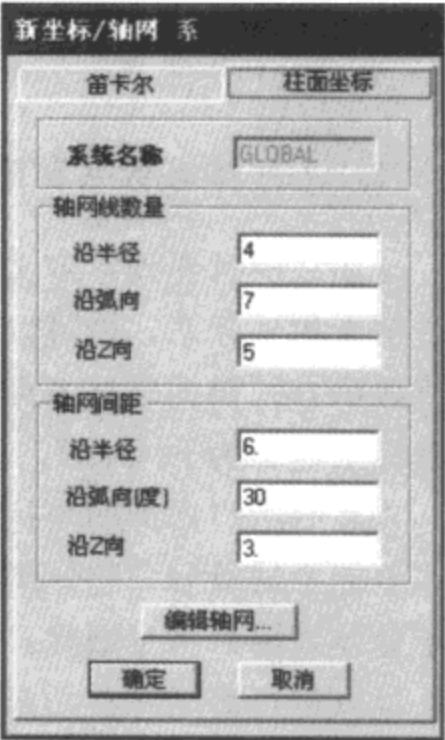


图 3-3 新坐标/轴网 系对话框



图 3-4 定义轴网数据对话框

3.1.2 整体坐标系和附加坐标系

如之前所提到，定义的第一个坐标系被称为整体坐标系（GLOBAL）。整体坐标系可以是笛卡尔坐标系，也可以是柱面坐标系。整体坐标系坐标轴均为 X、Y、Z 轴显示，但坐标值显示方式根据坐标系类型不同而有所区别。笛卡尔坐标系显示为 X、Y、Z 坐标值，柱面坐标系显示为 r 、 t 、Z，分别表示半径、角度、Z 坐标值。

此后用户添加的坐标系被称为附加坐标系。附加坐标系可以是新建坐标系，也可以是整体坐标系的复制。整体坐标系与附加坐标系区别在于整体坐标系不可删除，位置不能移动，附加坐标系可以进行删除和移动操作。附加坐标系个数没有限制，并且可以绕 X、Y、Z 轴旋转、空间移动。每个附加坐标系的坐标原点都是独立的，当附加坐标系移动后，坐标原点也会随之移动。

当新建附加坐标系时，点击【定义】>【坐标系统/轴网】命令，或者在视图空白位置单击鼠标右键弹出快捷菜单选择【编辑轴网数据】命令，弹出轴网/坐标系统对话框（图 3-5）。对话框说明见表 3-3。

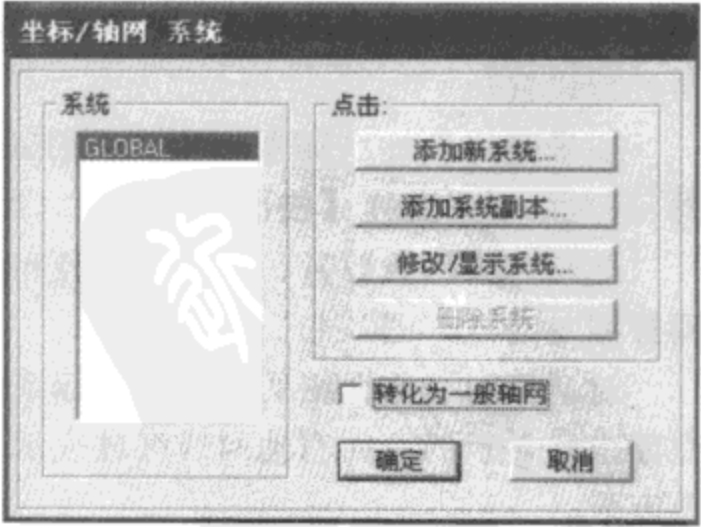


图 3-5 轴网/坐标系统对话框

表 3-3

| 系 统 | 显示当前所有的坐标系统供用户选择 | |
|-----------|---|------------------------------------|
| 按钮 | 添加新系统 | 弹出新坐标系/轴网系统对话框 |
| | 添加系统副本 | 添加一个与列表中高亮显示的坐标系相同的坐标系，弹出定义轴网数据对话框 |
| | 修改/显示系统 | 弹出定义轴网数据对话框 |
| | 删除系统 | 删除列表中高亮显示的坐标系 |
| 转换为一般轴线系统 | 勾选则使高亮显示的坐标系的轴线分解，使该坐标系轴线由统一编辑状态变为单独可编辑状态，该命令为不可逆操作 | |

在对话框中点击【添加新系统】按钮，弹出新坐标系/轴网系统对话框。选择坐标系类型后，点击【编辑轴网】按钮，弹出附加坐标系定义轴网数据对话框（图 3-6）。

对话框与整体坐标系【定义轴网数据】对话框的区别在于右下角【局部坐标系原点】按钮。当移动附加坐标系时，点击【局部坐标系原点】按钮，弹出坐标系对话框(图 3-7)。对话框说明见表 3-4。

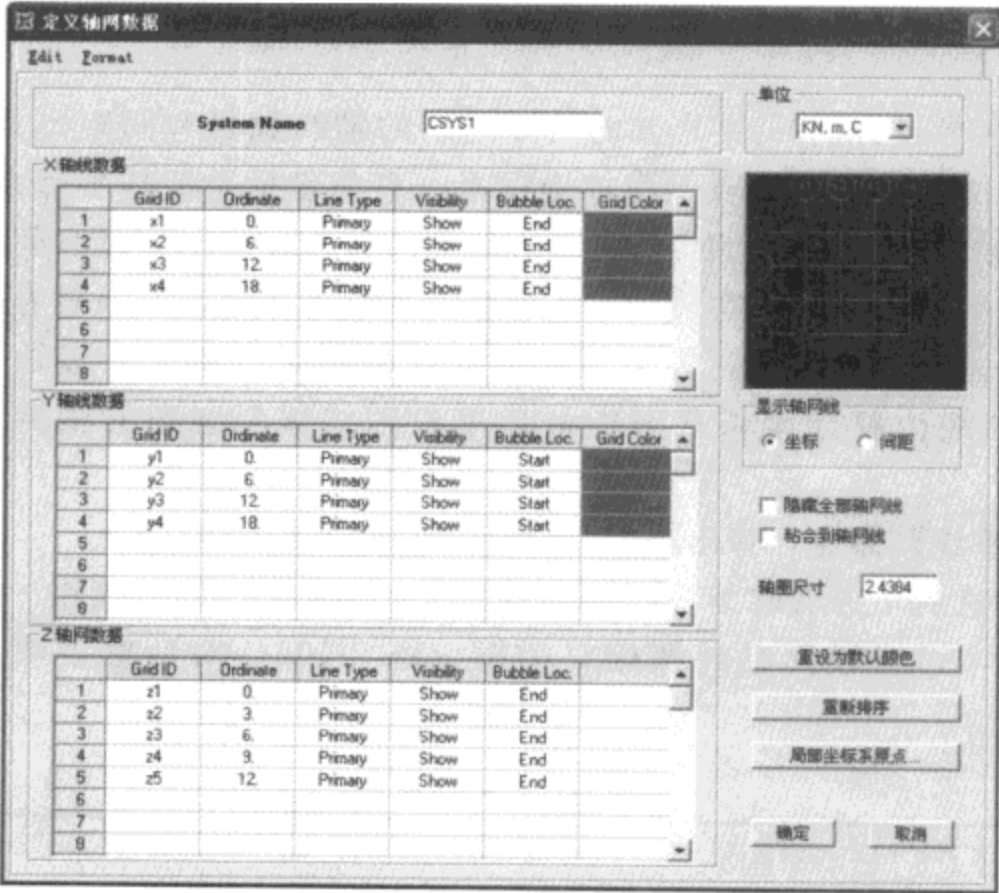


图 3-6 定义轴网数据对话框

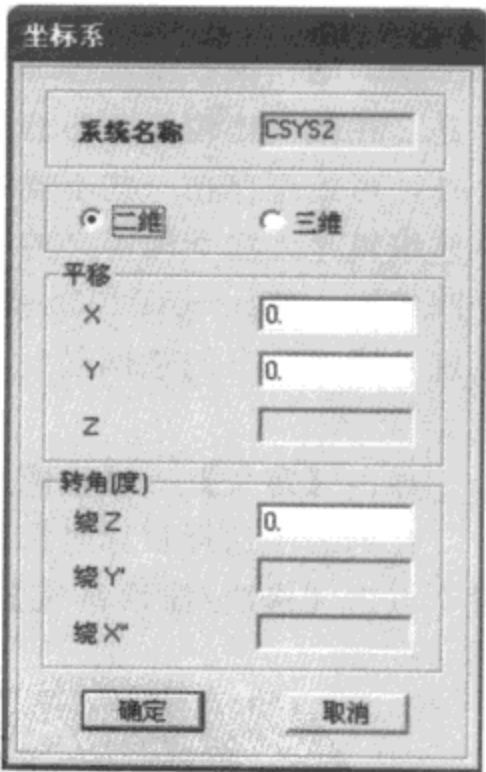


图 3-7 坐标系对话框

表 3-4

| 系 统 名 称 | 系统提供默认坐标系名称 |
|---------|---|
| 二维 | 附加坐标系以整体坐标系原点做平面 X、Y 方向平移及绕 Z 轴转动 |
| 三维 | 附加坐标系以整体坐标系原点做平面 X、Y、Z 方向平移及绕当前 Z、Y、X 轴转动 |

续上表

| 系 统 名 称 | 系统提供默认坐标系名称 | |
|---------|-------------|--------------------|
| 平移 | X | 输入附加坐标系原点 X 轴坐标值 |
| | Y | 输入附加坐标系原点 Y 轴坐标值 |
| | Z | 输入附加坐标系原点 Z 轴坐标值 |
| 转角（度） | Z | 输入附加坐标系绕自身 Z 轴旋转角度 |
| | Y' | 输入附加坐标系绕自身 Y 轴旋转角度 |
| | X'' | 输入附加坐标系绕自身 X 轴旋转角度 |

在角度输入域中，正值代表绕旋转轴逆时针转动，负值代表绕旋转轴顺时针转动。

在 SAP2000 视图中所有坐标系一次只能显示一个，坐标系的切换操作在界面右下角坐标系下拉列表中进行选择（图 3-8）。

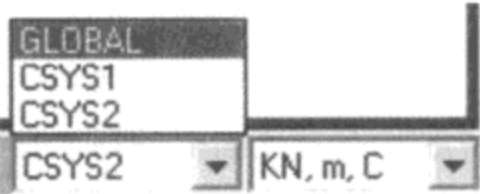


图 3-8

选择的坐标系会切换为当前坐标系。视图仅显示当前坐标系，光标坐标值以及显示类型以当前坐标系原点为基准。

3.1.3 一般轴网系统

轴网的相关数据通过 X 方向（半径方向）和 Y 方向（环向）的轴线数目和间距定义。但是，在轴线比较复杂的情况下，除了需要增加若干附加坐标系（直角坐标系或柱坐标系）之外，可能还存在一些不规则的轴线。这些轴线的定义，仅在表格中使用轴线的数量和间距整体编辑是无法准确定义的，因此，需要有一种功能使轴线能够更灵活的单独定义或者直接绘制编辑。就此 SAP2000 提供了一般轴线系统，完成这样的轴线的定义。所谓一般轴网系统是通过已有的轴网转化，使轴线由整体编辑状态拆散成单根轴线编辑状态的轴网系统。

点击【定义】>【轴网/坐标系统】命令，弹出坐标/轴网 系统对话框（图 3-9）。

在列表中选择目标坐标系，勾选右下方转化为一般轴网勾选项，即完成了转化操作。此时，点击【修改/显示系统】按钮，弹出轴网系统数据对话框（图 3-10）。对话框说明见表 3-5。

表 3-5

| | | |
|-------|----------------------------------|-------------------------|
| 轴网系统 | 显示轴网系统名称，用户可以修改 | |
| 轴网线 | 显示轴网中所有轴线名称 | |
| 点击 | 添加新的轴网线 | 弹出轴网线对话框，详见图 3-11 所示 |
| | 修改/显示轴网线 | 弹出轴网线对话框，详见图 3-11 所示 |
| | 删除轴网线 | 删除高亮显示的轴网线 |
| Z 轴网线 | 定义 Z 轴网线 | 弹出定义轴网数据对话框，详见图 3-12 所示 |
| 坐标系 | 弹出坐标系对话框，详见图 3-7（如果为整体坐标系，不可以修改） | |

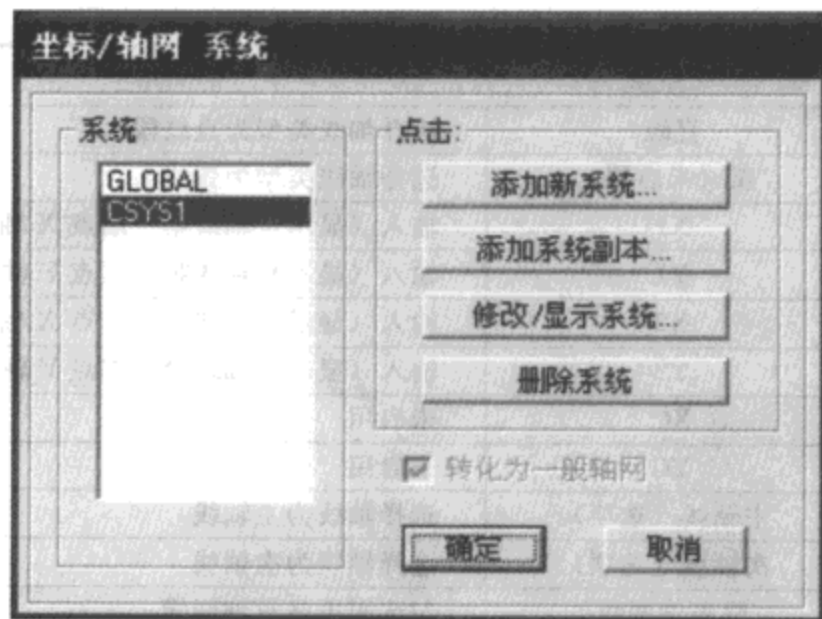


图 3-9 坐标/轴网 系统对话框

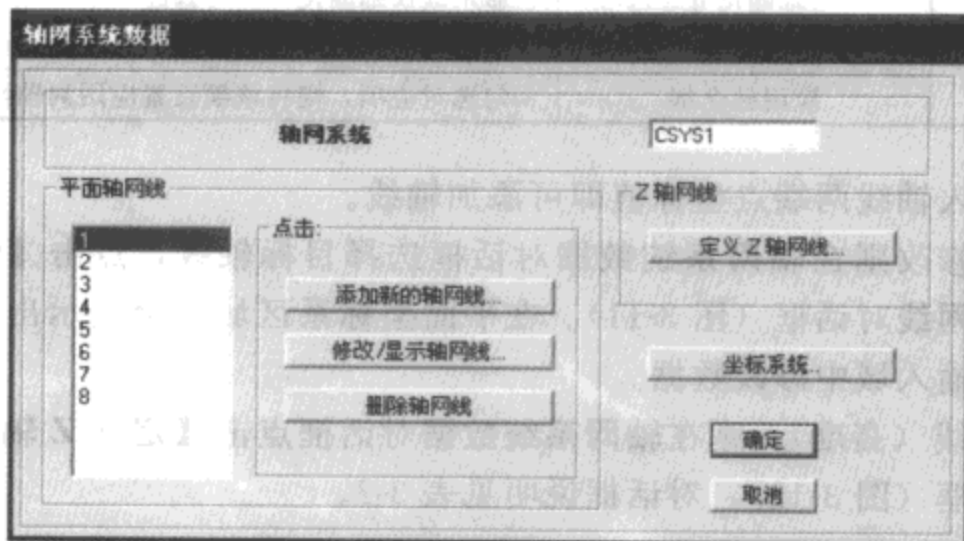


图 3-10 轴网系统数据对话框

轴网线已被拆分成单根轴线，用户可以根据需要添加轴线或者对已有轴线进行编辑，例如添加轴线，点击【添加新的轴网线】按钮，弹出轴网线对话框（图 3-11）。对话框说明见表 3-6。

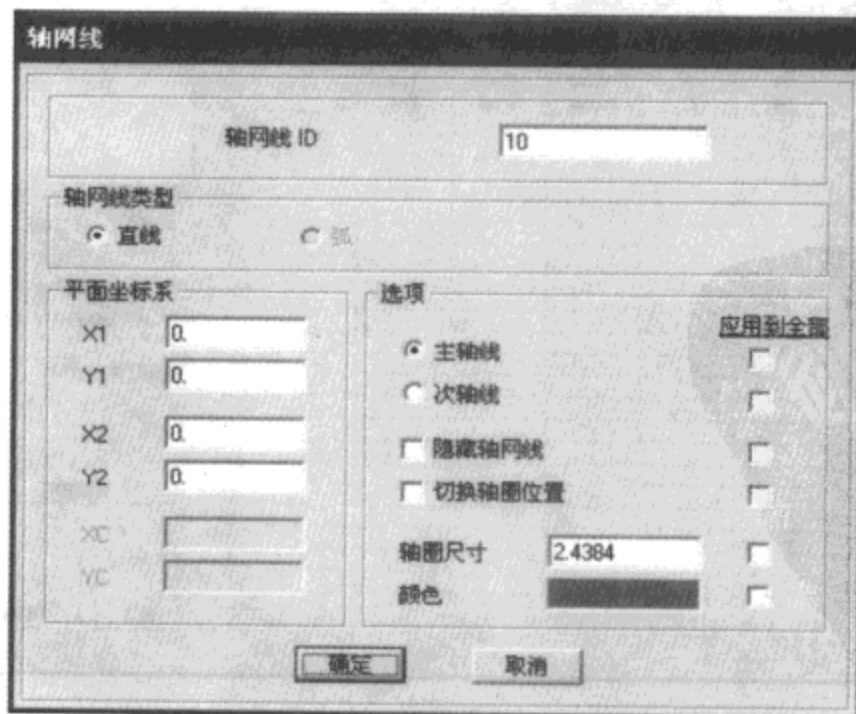


图 3-11 轴网线对话框

表 3-6

| | | |
|--------|---------|-----------------------|
| 轴网线 ID | 输入轴线标签 | |
| 轴网线类型 | 直线 | 选择轴线类型为直线段 |
| | 弧（未启用） | 选择轴线类型为弧线 |
| 平面坐标系 | X1 | 输入（显示）轴线第一端点 X 轴坐标 |
| | Y1 | 输入（显示）轴线第一端点 Y 轴坐标 |
| | X2 | 输入（显示）轴线第二端点 X 轴坐标 |
| | Y2 | 输入（显示）轴线第二端点 Y 轴坐标 |
| | XC | 未启用 |
| | YC | 未启用 |
| 选项 | 主轴线（选项） | 选择轴线为主轴线 |
| | 次轴线（选项） | 选择轴线为次轴线 |
| | 隐藏轴网线 | 勾选则不显示轴网线 |
| | 切换轴圈位置 | 勾选则轴圈切换至轴线另一端 |
| | 轴圈尺寸 | 显示默认轴圈尺寸，可修改 |
| | 颜色 | 点击色框弹出颜色编辑器，修改轴线颜色 |
| | 应用到全部 | 勾选对应项，则将该项设置应用到轴网全部轴线 |

在对话框中输入轴线两端点坐标值即可添加轴线。

对已有轴线的修改则在轴网系统数据对话框选择目标轴线，点击【修改/显示轴网线】按钮，同样弹出轴网线对话框（图 3-11）。在平面坐标系区域中会显示出已有轴线端点坐标值，用户可直接在输入域中修改数据。

定义 Z 方向轴线（高度），则在轴网系统数据对话框点击【定义 Z 轴网线】按钮，弹出定义轴网数据对话框（图 3-12）。对话框说明见表 3-7。

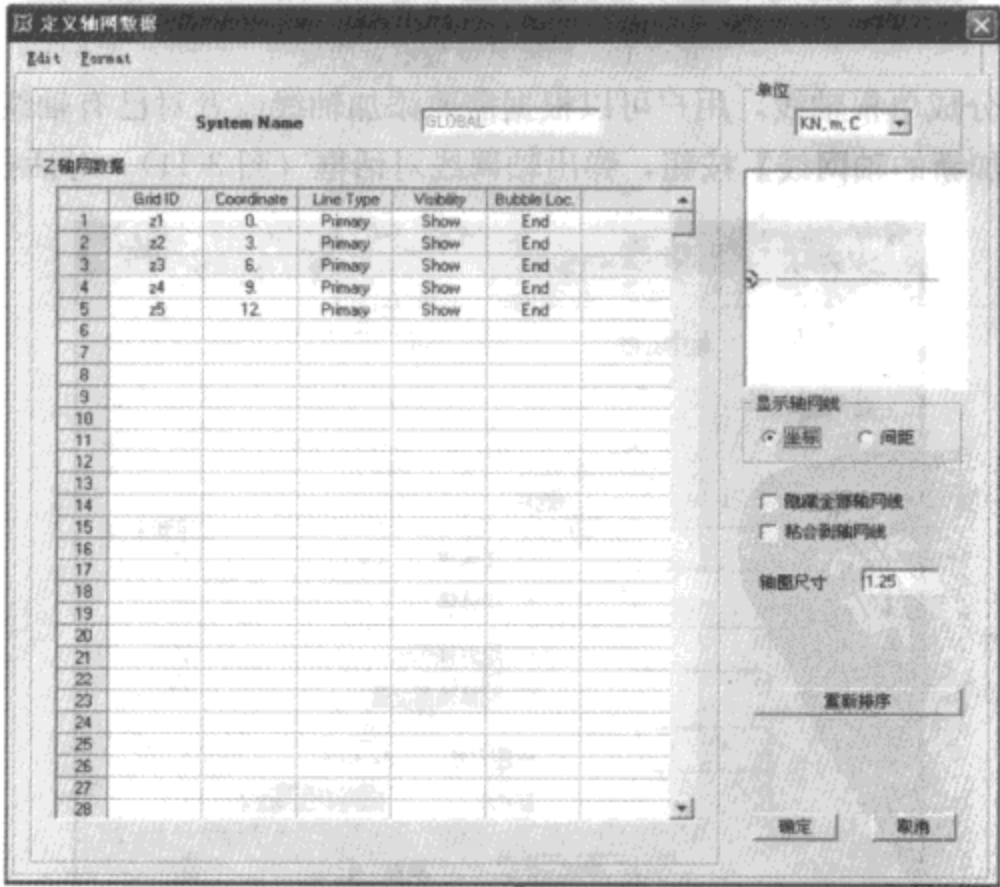


图 3-12 定义轴网数据对话框

表 3-7

| System Name | | 显示系统默认坐标系名称 |
|-------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| Z 轴网数据 | Grid ID (轴线 ID) | 显示轴线编号, 用户可以修改 |
| | Ordinate (坐标) | 显示轴线坐标或到下一轴线的间距, 用户可以修改 |
| | Line Type (线型) | 双击选择轴线类型: Primary (主轴线)、Second (次轴线) |
| | Visibility (可见性) | 双击选择轴线可见性: Show (可视)、Hide (隐藏) |
| | Bubble Loc (轴圈位置) | 双击选择轴线圈的位置: Top (上)、Bottom (下) |
| | (Grid Color) 轴网线颜色 | 显示当前轴线的颜色, 用户可以编辑 |
| 显示轴网线 (选项) | 坐标 | 坐标列按轴线坐标显示 |
| | 间距 | 坐标列按轴线间距显示 |
| 单位 (下拉菜单) | 选择轴线尺寸显示单位制 | |
| 隐藏全部轴网线 | 勾选则隐藏全部轴网线 | |
| 粘合到轴网线 | 将附加坐标系粘合到整体坐标系。控制显示局部坐标系原点项 | |
| 轴圈尺寸 | 输入轴圈尺寸 | |
| 重新排序 | 重置轴线坐标 | |
| Edit 菜单项 | Cut | 剪切轴线数据表格中数据 |
| | Copy | 复制轴线数据表格中数据 |
| | Paste | 粘贴轴线数据表格中数据 |
| | Delete | 删除轴线数据表格中数据 |
| | Insert Row | 插入轴线数据表格中数据行 |
| | Delete Row | 删除轴线数据表格中数据行 |

此对话框用于定义一般坐标系 Z 轴方向（高度）的轴线，定义方法与之前介绍过的定义轴网数据对话框相同。

点击轴网系统数据对话框中【轴网系统】按钮，弹出坐标系对话框（图 3-7），可以对一般坐标系进行移动操作。

除了使用对话框对一般轴线进行编辑以外，还可以在视图中直接对轴线进行绘制、修改。首先按照前面章节新建一个轴网，并将其转化为一般轴网系统。点击【绘图】>【绘制一般轴网线】命令，弹出对象属性对话框。光标处于绘制状态，此时用户就可以以两点连线的方式，在任意位置绘制轴线。

在视图中改变轴线方向或删除操作，需要先将轴网解除锁定。在视图空白位置单击鼠标右键，弹出快捷菜单，在菜单上选择【锁定屏幕轴网系统编辑】命令并点击，使右侧勾选状

态消失（图 3-13）。

回到视图中，此时就可以用光标直接选择轴线，按键盘 Delete 键即可删除轴线。点击左侧工具条中【设置重定形单元模式】按钮，光标变为绘制状态，在轴线位置点击使轴线变为可编辑虚线状态，此时，用户可以将光标移动至轴线端点，按住鼠标左键对端点进行脱拽操作（图 3-14）。

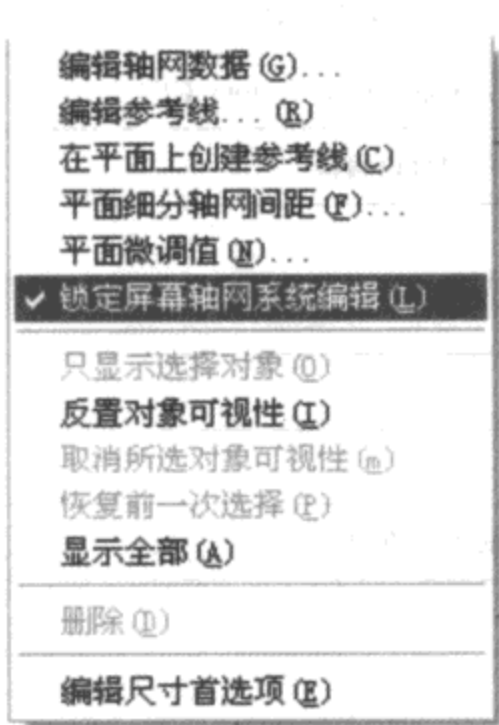


图 3-13

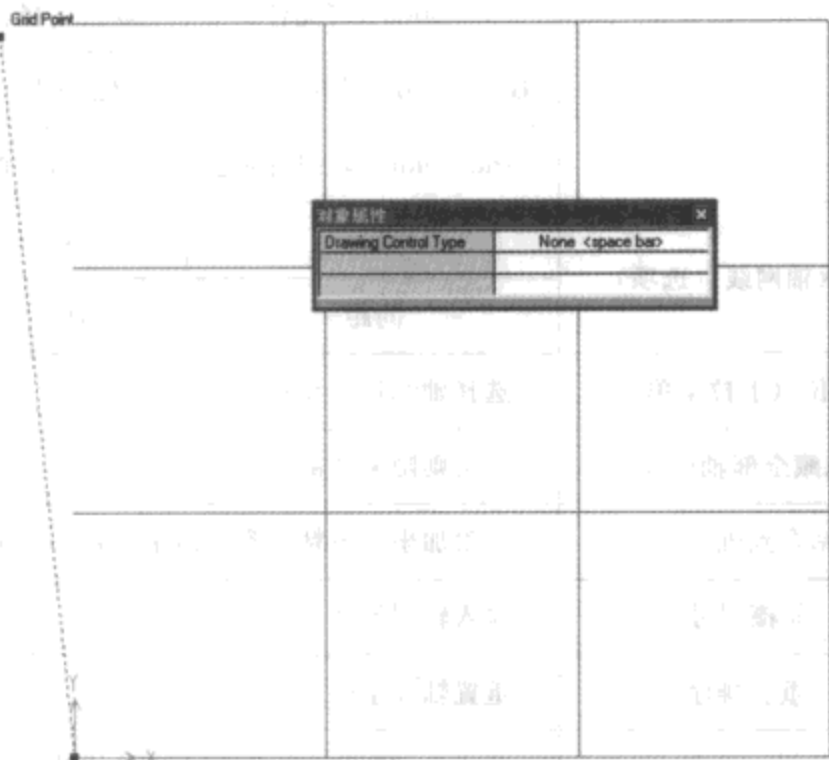


图 3-14

注意：转化为一般轴网为不可逆操作。即转化为一般轴网的轴线无法恢复为整体编辑状态。因此用户在转化操作之前需谨慎，或者通过添加目标坐标系的副本进行转化。

3.2 参考线

SAP2000 提供了较为完善的轴网系统作为绘制构件的辅助工具。上一节介绍的轴网系统能够满足大多数情况下的建模需要，但仍需要一些轴线来辅助绘制特殊位置的构件，例如在平面视图中任意点的定位，SAP2000 提供了以参考线作为轴网的一种补充轴线，形成一种更为灵活的平面定位方法。

参考线表现为立面中的一条轴线，在平面视图中显示为一个点，因此在平面视图中参考线起到定位点的作用，可以用来在平面视图中的任意位置定位，因此又称为参考点。在立面视图中参考线与竖向轴线的的作用基本相同。

参考点的绘制方法是通过轴网交点或者已经存在的点位置的相对距离来绘制。参考线的绘制方法很简单，在平面视图中，点击【绘图】>【绘制参考点】命令或者在平面视图空白位置单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【在平面上创建参考线】命令，弹出对象属性浮动窗（图 3-15）。

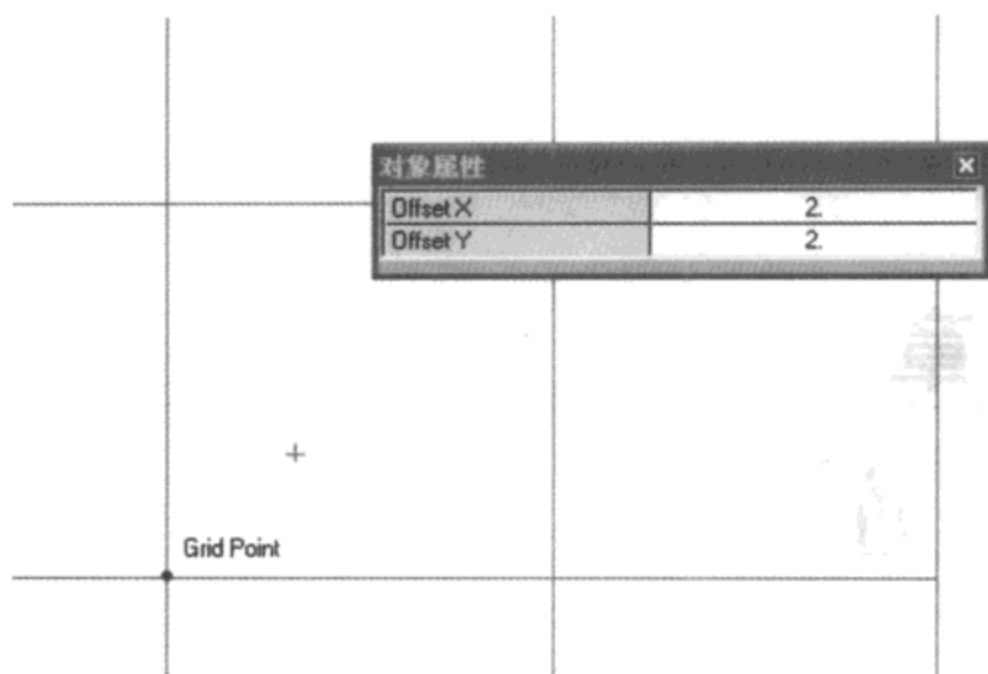


图 3-15 对象属性浮动窗

在浮动窗中输入相对距离值，例如 Offset X=2 (m)、Offset Y=2 (m)，将光标移动至轴线交点。当显示出捕捉到交点的红色点时，单击鼠标左键，此时距该点 X 方向 2m、Y 方向 2m 位置就会出现一个十字形参考点（图 3-15），光标可以捕捉到参考点，借助参考点可以两点连线或者多点连面绘制构件。视图在三维状态下时，可以看到参考点实际上是一条贯穿轴网全高的轴线。

参考线也可以通过对话框定义。在视图空白位置单击鼠标右键，弹出快捷菜单，在菜单上选择【编辑参考线】命令，弹出编辑参考线对话框（图 3-16）。对话框说明见表 3-8。

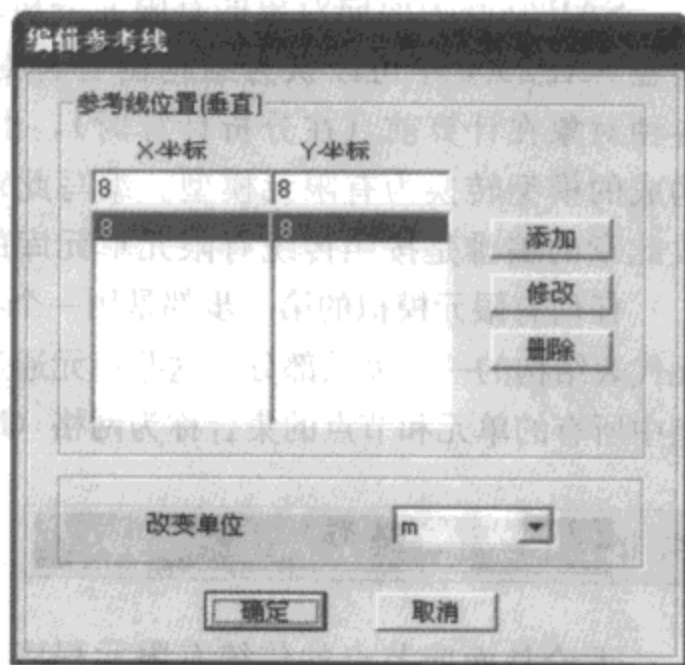


图 3-16 编辑参考线对话框

表 3-8

| | | |
|---------------|-------------|---------------------------|
| 参考线位置 (垂直) | X 坐标 | 输入/显示参考线 X 轴坐标 |
| | Y 坐标 | 输入/显示参考线 Y 轴坐标 |
| | 添加 (按钮) | 点击则将输入数据添加到列表中 |
| | 修改 (按钮) | 点击则将输入域中数据覆盖列表中高亮显示的参考线数据 |
| | 删除 (按钮) | 点击则将删除列表中高亮显示的参考线数据 |
| 改变单位 | 改变当前数据显示单位制 | |

在一般情况下参考线不会对结构计算产生影响，因此可以在使用完后直接将其删除。删除或者移位操作只能在编辑参考线对话框中进行。

第4章

单元库

SAP2000 为面向对象的有限元分析软件，在传统有限元中结构由各种形式的单元组成，而在 SAP2000 中可以认为结构由各种对象（点对象、线对象、面对象、实体对象）构成。各种对象在计算前（在分析计算时），由 SAP2000 本身自动转换为 FEM，即将由各种对象构成的模型转换为有限元模型。编写此章的目的就是要让程序使用者了解各种单元的特点，故此章的编排是按照传统有限元单元库的方式来编写的。

任何有限元模拟的第一步都是用一个有限单元的集合来离散结构的实际几何形状，每一个单元代表结构的一个离散部分。这些单元通过共用节点来连接。许多单元依次相连组成了结构。模型中所有的单元和节点的集合称为网格（Mesh）。通常，网格只是实际结构几何形状的近似表达。

4.1 SAP2000 中的自动边束缚功能

无论是面向节点的传统有限元程序，还是面向对象的 SAP2000、ETABS 程序，它们所遵从的原理都是一致的。传统有限元中单元与单元之间的关系有以下几种：一是通过节点直接连接；二是通过单元连接，本质上说也是通过节点连接；三是通过限制方程连接，如耦合、接触等。上面的几种连接关系直接或间接地体现了有限元连续性的假设。SAP2000 在单元连接技术上更进一步，如果实际结构变形连续，但两相邻单元并非以节点相连，而是以边（Edge）相连或部分相连，此时不需要定义耦合，只需工程师指定自动边束缚（ETABS 中是自动指定的），这是面向对象设计有限元程序中关键性的技术。

举个小例子，来说明自动边束缚的作用。

一块尺寸为 $12\text{m} \times 18\text{m}$ 的矩形板，板厚 0.1m ，四角点固定。 x_1 - x_2 区域（称为 A1）的板承受 1000Pa 的活荷载作用。承受荷载的板单元尺寸为 $3\text{m} \times 3\text{m}$ ， x_2 - x_3 区域（称为 A2）单元尺寸为 $3\text{m} \times 3.6\text{m}$ ，如图 4-1 所示。

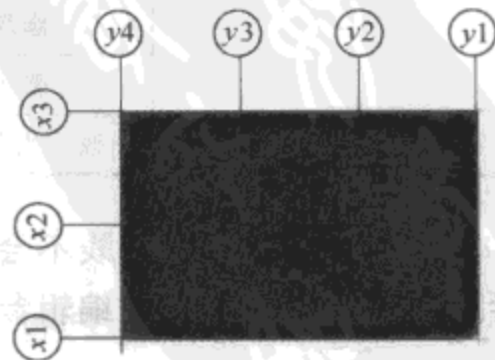


图 4-1 单元布置

从单元图上可以看出，A1 与 A2 交界线处节点数目为： $7+6-2=11$ 个。在传统有限元中，如果不指定耦合方程的话，在活荷载作用下，此板的变形如图 4-2 所示。

在 SAP2000 中为使此板变形协调，选择交线两侧面单元，【指定】>【生成边束缚】，激活沿对象边生成边束缚选项，再次运行活荷载分析工况，得到的变形结果如图 4-3 所示。

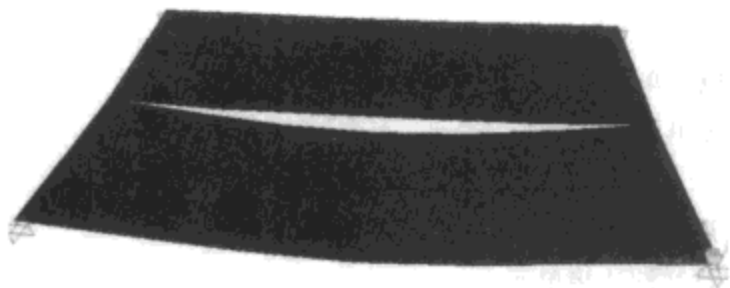


图 4-2 板变形图



图 4-3 生成边束缚后的板变形图

有了自动边束缚功能，工程师就可以在实际工程中以对象（梁、柱、楼板、剪力墙等）为基本的绘制对象，类似于 CAD 程序一样快速形成大体量的结构模型。因传统有限元需要工程师仔细规划模型，精确划分单元，以保证单元与单元的连接，而耗费大量宝贵的时间。而 SAP2000 就是由于具备自动边束缚的功能，才会使其成为土木工程界最流行的有限元软件之一。

4.2 SAP2000 的单元特点及其分类

同传统的有限元程序如 ANSYS、ABAQUS 等相类似，SAP2000 中具有框架单元、壳单元、实体单元、连接单元等，这些单元组合起来模拟复杂的结构。与上述程序不一样的是，工程师可以认为 SAP2000 中各个单元节点的自由度都为 6 个（U1, U2, U3, R1, R2, R3），只不过不同的单元激活的自由度是不相同的。例如框架单元的节点自由度有 6 个：三个平动自由度和三个转动自由度，实体单元节点只具有 3 个平动自由度。这样处理至少有以下两个优点：一、便于模拟特殊的力学行为，如节点铰接。在类似 ANSYS 程序中，工程师要模拟铰接，只能通过节点自由度耦合的命令来实现，同一位置存在两个节点，两个节点自由度建立耦合方程，这个耦合方程体现铰接的关系。而在 SAP2000 中，除了可以采用上面的方式外，最简单的方式莫过于节点自由度的释放。即选中框架单元，释放掉此单元两端节点的抗弯自由度和一端的抗扭自由度；二、模拟平面受力。在分析之前，只要激活分析选项中的自由度选项，就可以很方便的模拟各种平面问题。

在 SAP2000 中，单元一共分为四类：第一类是线单元，在结构物中用来模拟梁、柱、支撑、桁架和索；第二类为面单元，主要分为壳单元和二维实体单元，在单元形状及构成上，都属于面对象。壳单元细分为板、膜、薄壳、厚壳，在建筑模型中用来模拟墙、楼板、筏板基础等；第三类为体单元，此单元多用于细部分析；第四类为点单元，在 SAP2000 中称为连接单元，连接单元可以在两节点之间绘制，也可以在一个节点位置处绘制，单节点的连接单元默认为一节点接地。如图 4-4 所示。

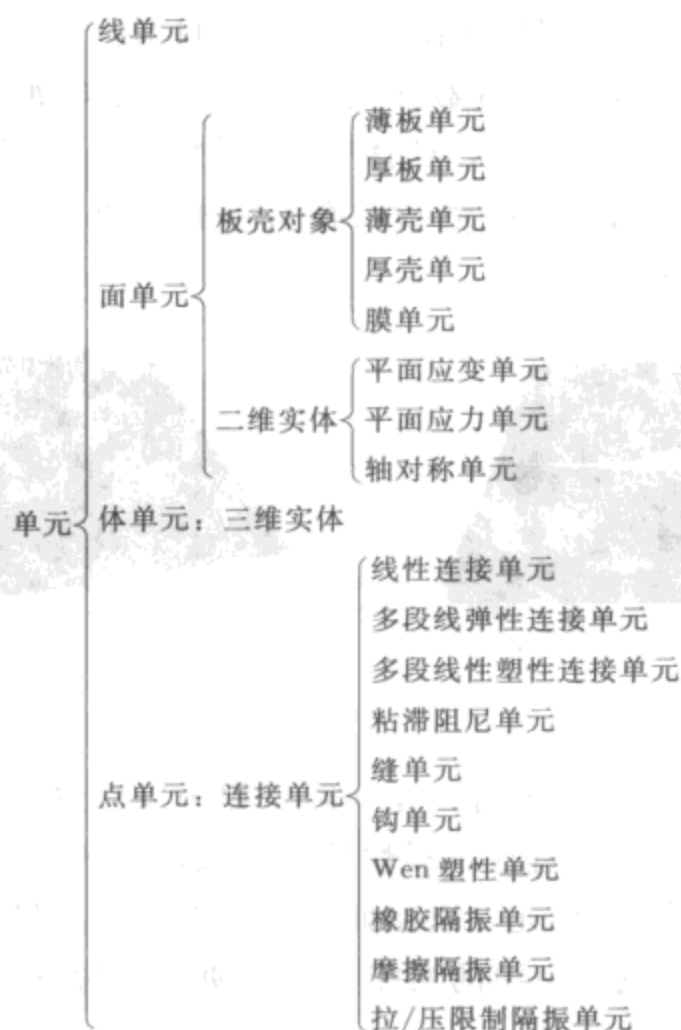


图 4-4

4.3 线单元

顾名思义，线单元的单元形状为线形，在 SAP2000 中可以细分为框架单元、索单元和预应力筋/束单元。

4.3.1 框架单元

框架单元使用一般的三维梁-柱公式，包括双轴弯曲、扭转、轴向变形、双轴剪切变形等效应。

在平面和三维结构中，框架单元用来模拟梁、柱、斜撑和桁架。当加上非线性属性（如单拉，大变形）时，框架单元还可用来模拟索行为。

局部坐标系

每一框架单元有其自己的单元局部坐标系，用来定义截面属性、荷载和输出。框架单元的局部坐标轴用 1、2、3 代表。1 轴沿单元长度方向；2、3 轴位于和工程师指定的单元方向相垂直的平面内。清楚地理解单元局部 1-2-3 坐标系定义及其与整体 X-Y-Z 坐标系的关系很重要，工程师可以利用局部坐标系统简化对某些荷载的输入。例如线荷载垂直于局部坐标轴的 1 轴，沿 2 轴方向，而 1 轴与整体坐标轴的 Z 轴不正交。

关于局部坐标系的具体规定（包括其他形式的单元）请参阅《CSI 参考手册》，另外由于程序本身带有直接显示局部坐标系的功能，这在一定程度上大大方便了工程师的使用。

截面

每一个直线框架单元由两个节点控制其几何位置，起始节点一般称为 i 节点，终点称为 j 节点。在一般的有限元中 i 与 j 节点之间的框架单元的截面属性基本为常数，即为等截面的。而在 SAP2000 中， i 与 j 节点间的截面是可以变化的，比如 I33、I22 可以遵从线性、二次或三次方的变化，其他截面常数也有相应的变化。这样就避免了用多段直杆来近似模拟变截面杆的情况。特别提及的是在桥梁模块中，各个截面的组成尺寸都可以根据工程师的指定而进行变化，这样就大大缩短了工程师的建模时间，且能精确模拟变截面的梁系结构。

框架的截面在 SAP2000 中可以很方便的定义，如参数形式的直接定义，型钢库的调用或者直接指定常数。在一些有限元中，要求梁的截面必须是连通的，在 SAP2000 中没有这个要求，在截面定义器中可以任意绘制想要的截面，包括不连续的梁截面，这种截面在某些工业工程中十分常见。

属性修正

有时根据结构的不同，需要对截面属性进行修正。如模拟柔索结构，这种索基本上不能承受弯矩。如果用框架单元来模拟索结构，就需要对索截面属性进行折减；如果用膜单元来模拟建筑结构的楼板，考虑到楼板对梁抗弯能力的提高，需要对这种梁截面的抗弯属性进行修改；为使连梁在地震中先破坏，需要在分析前对连梁的属性进行折减。修改的截面可以依赖于定义的截面，也可以指定给部分单元。

自由度及其释放

框架单元每个节点具有六个自由度，分别是平动自由度 $U1$ 、 $U2$ 、 $U3$ 和转动自由度 $R1$ 、 $R2$ 、 $R3$ 。（注 1、2、3 为单元的局部坐标，具体规定参看《CSI 参考手册》）单元与单元连接时工程师可以根据实际情况进行不同连接属性的指定。刚性连接时，自由度不进行释放，铰接时释放 i 、 j 节点 2、3 方向的弯矩及任一节点的扭矩自由度；弹性连接时，指定各自由度间的连接刚度。

插入点

默认单元局部 1 轴沿截面的中性轴，即在截面形心处。而在实际工程中，常需要工程师在截面上指定另外一点作为对齐点，如以梁顶或柱的外角点进行对齐。这个对齐的位置被称作截面的主点。可供选择的主点位置见图 4-5 所示，默认位置为 10 点。

当选择好主点后，工程师还可以基于主点进行节点偏移的指定。节点偏移首先用来计算单元轴线和局部坐标系，然后主点被放置在所产生的局部 2-3 平面上。

在 SAP2000 中经常使用这个属性，模拟建筑结构中的梁板体系时，两种对象是顶部对齐的。工业厂房中常见的牛腿柱，是外缘对齐的，如果按照默认情况绘制对象，对象是形心对齐的。这就需要工程师在绘制完成之后，通过插入点来指定对象的对齐方式。

注意：直接绘制框架单元时，主点的默认位置为形心，此主点在绘制过程中不能进行更改。若需更改主点，则需要选中单元，进行【指定】>【插入点-控制点】修改的操作。

刚性区

两个单元如梁和柱在节点的连接处，会有截面的重叠。在许多结构中，由于构件截面尺寸较大，搭接长度在连接构件的总长度中占较大比例，如图 4-6 所示，这对结构的刚度影响较大。工程师可对每一单元指定两个端部偏移： $ioff$ 与 $joff$ ，例如 $ioff$ 为一指定构件和其他

连接构件在节点 i 的搭接长度，对于指定构件，它是从节点至连接表面的距离， $joff$ 与 $ioff$ 类似。基于所有连接在公共节点的最大截面尺寸，SAP2000 的图形用户界面对每一单元自动计算端部偏移。当然工程师可以自己直接指定。

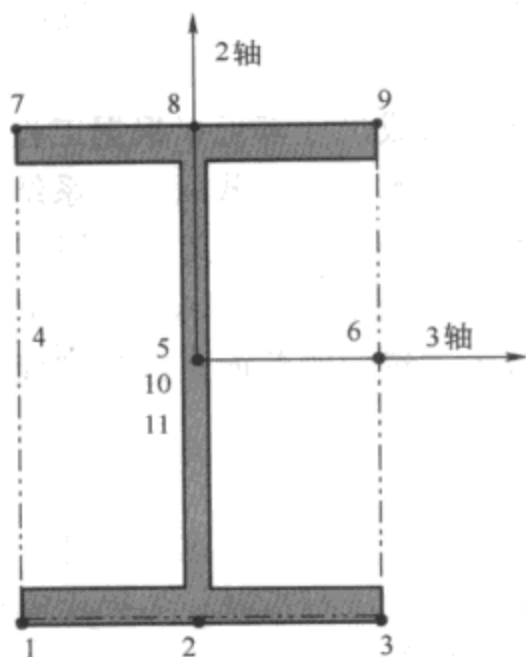


图 4-5 框架截面主点

1-底左；2-底中；3-底右；4-中左；5-中中；6-中右；
7-顶左；8-顶中；9-顶右；10-形心；11-剪力中心

注：对图示双对称截面，点 5，10，11 是相同的

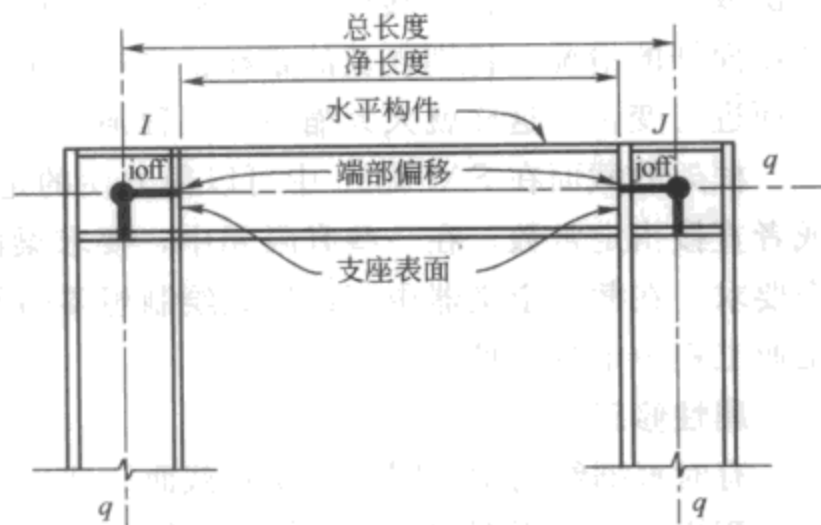


图 4-6 框架单元的端部偏移

工程师使用一个 Rigid 的端部刚度系数，来指定端部偏移刚性区内的比例。在刚性区内，按照刚体来计算杆件弯曲变形和剪切变形，按实际能力来计算轴向压缩和扭转的变形。这样柔性杆的计算长度为：

$$L_{ef} = L - \text{Rigid}(ioff + joff)$$

注意：在变截面单元的每端，在端部偏移长度内，截面属性被假定为恒定。截面属性只在支座表面沿净长度变化，不受端部刚性系数 Rigid 的影响。

质量

在动力分析中，结构的质量用来计算惯性力。框架单元所贡献的质量集中在节点 i 和 j 上。在单元内部不考虑惯性效应。单元的总质量等于沿质量密度 m 的长度乘以截面积 A ，加上附加的单位长度质量 m_{pl} 的积分。对于变截面单元，质量沿单元的每一变截面节段成线性变化，且在端部偏移是恒定的。

使用和类似分布横向荷载导致在简支梁端部反力的同样方法，总质量被分配至两个节点上。

注意：动力计算需要质量在节点上进行分配时，忽略端部释放，即总质量被分配给三个平动自由度，对旋转自由度不计算质量惯性矩。

荷载及内力输出

框架单元可以承受自重、集中荷载、跨间线荷载、温度荷载。

框架单元内力是在单元截面上进行应力积分而得到的力和弯矩。

这些内力为：

P ——轴力

V_2 ——在 1-2 平面的剪力

V_3 ——在 1-3 平面的剪力

T ——轴向扭矩

M_2 ——在 1-3 平面（关于 2 轴）的弯矩

M_3 ——在 1-2 平面（关于 3 轴）的弯矩

4.3.2 预应力筋/束单元

预应力筋/束是一个可以包含在其他对象（框架、壳、板、轴对称实体和实体）中可以实现预应力和张拉应力对这些对象产生影响的一种特殊类型对象。这些预应力筋/束附着在其他对象上并加强作用在这些对象上的荷载。

预应力束单元（预应力筋/束单元在本章中统称为预应力束单元，下同）属于线单元中的一种，从形状上看，它既可以是直线，类似于直线框架，也可以是曲线线形，类似于曲线框架。

SAP2000 中模拟预应力的方式有两种，一种是将预应力束模拟为一种单元，另一种方式是将其模拟为荷载。如果只关心添加预应力构件的力学行为，可以将预应力作为荷载处理，此时将预应力作为等效荷载，根据剖分的大小计算各剖分点的集中力和力矩。如果将预应力作为单元，那么除了实现上述功能外，还可以指定拉压比限制等非线性属性，可以查看其他荷载对预应力束的内力影响。当预应力用单元来模拟时，剖分后的预应力束将在分析中被当作短的、直线段的等效框架单元。当工程师知道由于弹性缩短或因时间延迟影响所带来的预应力损失是多少时，线性分析中预应力束模拟为荷载是足够的。

预应力束可能是一个具有复杂几何形状且长度很长的对象，因分析的需要，它将被自动剖分为一些小段。在预应力束定义过程中工程师必须指定这些离散段的最大长度，因为这些长度可以影响预应力束施加在结构上的荷载和分析结果的精度。工程师可以对于高曲率的索对象或当预应力束所通过的结构具有复杂的几何形状时，选择较短的离散长度。如果不能确定使用多大的离散长度，工程师可以测试几种值来观察它们对结果的影响。当然剖分的越细结果就越趋于稳定，但这增加了计算时间。

连接及自由度

预应力束可以与框架、壳、板、轴对称实体和实体等单元连接，并且通过这些连接预应力束贯穿单元的长度，这些连接是程序自动完成的。另外，如果预应力束的两个节点不包含在该单元中，而是通过 i 和 j 两个节点连接的，不推荐后面的这种做法，即体外预应力体系。对于体外预应力体系，可以用索单元或者框架单元来模拟。上面关于预应力束的讨论仅限于体内预应力束。

预应力束对象沿着它的长度方向具有六个自由度，然而，它对结构的影响是基于它所连接的单元。当连接到框架和壳单元时，它可以将力和弯矩传递到这些单元的节点上；当连接的是板、轴对称实体和实体单元时，它只将力传递给节点。这个特点和框架单元是一致的，原因是各个单元存在自由度问题。

当结构中包含体内预应力束单元时，结构的自由度不会增加，原因是预应力束单元总是包含在包含它的单元之中。

荷载及内力输出

预应力束可以承担预应力荷载、重力荷载、温度荷载。

预应力束内力是在单元截面上进行应力积分而得到的力和弯矩。这些内力为：

P ——轴力

V_2 ——在 1-2 平面的剪力

V_3 ——在 1-3 平面的剪力

T ——轴向扭矩

M_2 ——在 1-3 平面（关于 2 轴）的弯矩

M_3 ——在 1-2 平面（关于 3 轴）的弯矩

这些内力和弯矩位于沿预应力筋单元长度的每一截面，且可作为分析结果的一部分进行打印输出。内力是遵循预应力筋的自然坐标系统进行输出的。

4.4 面单元

4.4.1 板壳对象

在工程中广泛使用的板壳结构，由于它在几何上有一个方向的尺度比其他两个方向小得多的原故，在结构力学中需引入一定的假设，使之简化为二维问题。这种简化不仅是为了便于用解析的方法求解，而且从数值求解的角度考虑也是必要的。它可以使计算量得到很大的缩减，同时也可以避免因求解方程系数矩阵的元素间相差过大而造成的困难。

在 SAP2000 中，板壳对象按照受力特点可以分为三类：膜单元、板单元及壳单元。膜单元只具有平面内的刚度，承受膜力，建筑结构中楼板通常用膜单元来模拟；板单元的行为与膜单元相反，只具有平面外的刚度，承受弯曲力，模拟薄梁或者地基梁等；壳单元的力学行为是膜单元与板单元之和，是真正意义上的壳单元。也可以根据中面的形状划分：如果壳的中面为平面，则壳的薄膜应力和弯曲应力状态互不耦合，而壳的中面也可为曲面，此时薄膜应力与弯曲应力耦合。

工程上对于壳的厚度 h 与其宽度 L 之比（即厚宽比） $h/L < 1/10$ 的壳称为薄壳，壳的厚宽比在 $1/10 < h/L < 1/5$ 之间的壳，称为中厚壳。薄壳中横向剪应力对变形的影响较小，而中厚壳中横向剪应力对变形的影响较大。

弹性壳小挠度分析有两种基本理论，Kirchhoff 理论和 Mindlin/Reissner 板理论。前者忽略了壳中横向剪应力对变形的影响，应用很广，但只适用于薄壳；后者考虑了横向剪应力对变形的影响，但仍然采用应力应变直线分布假设，表达公式也不太复杂，适用于中厚壳。

Kirchhoff 理论的基本假设有三个：

(1) 平行于壳中面的各层互不挤压，即 $\epsilon_z = 0$ ；

(2) 直法线假定：变形前垂直于中面的直线段，在变形后仍保持为直线且垂直于变形后

的中面，这相当于忽略横向剪切变形，即 $\gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$ ；

(3) 中面内无平行于中面的位移，即 $u_{z=0} = 0, v_{z=0} = 0$ 。

Kirchhoff 理论忽略了剪切变形 γ_{xz} 和 γ_{yz} 以及法向应力 σ_z 对壳变形的影响。当壳的厚度与宽度比 h/L 处于薄壳范围时，采用 Kirchhoff 薄壳理论进行计算可以减少计算量，而且误差较小。但对于中厚板或是集中力作用在点附近、边界周围以及小孔周边区的薄壳，必须利用中厚壳理论才能得出精确的结果。

Mindlin/Reissner 理论的基本假定是：

- (1) 与壳的厚度相比，位移是微小的；
- (2) 垂直于中面的应力忽略不计；
- (3) 变形前垂直于中面的直线，变形后仍保持为直线，但不一定再垂直于中面；
- (4) 挠度和法线转角为各自独立的场函数。

可见 Mindlin/Reissner 壳保持了一些 Kirchhoff 壳的特点，但由于不忽略剪切变形 γ_{xz} 和 γ_{yz} ，使变形前垂直于中面的直线变形后不再垂直于中面，转角变形中应包括非均匀的平均剪切变形。

单元形状及质量评价

壳单元（包括其平面单元）有两种形状：一种为四节点构成的四边形，一种为三节点构成的三角形。在没有特殊边界的情况下，推荐首选四边形单元，三角形单元一般应用在转换处。如图 4-7 所示为单元剖分的两个例子。

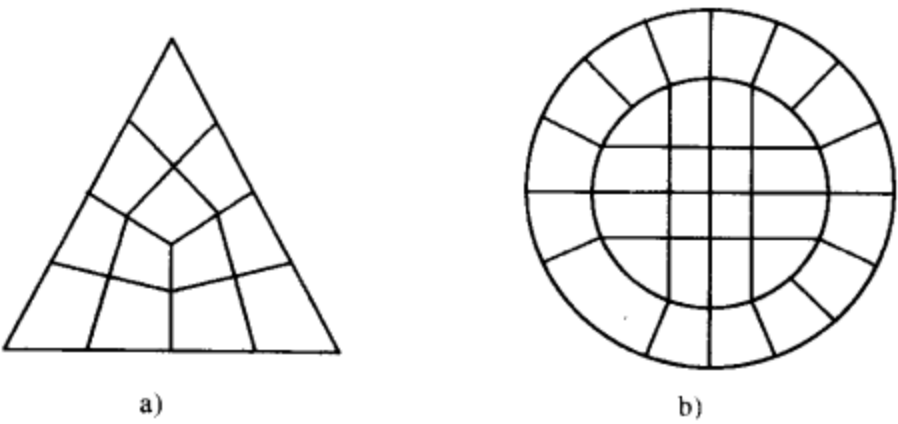


图 4-7 单元剖分
a) 三角形区域；b) 圆形区域

面单元长边与短边距离的比值，称为形状比。评价应力为主时不要超过 1/3，评价位移为主时不要超过 1/5。非线性分析时，形状比的作用比非线性分析时更敏感。图 4-8 列举了四边形单元和三角形单元形状比 (A) 的计算方法。

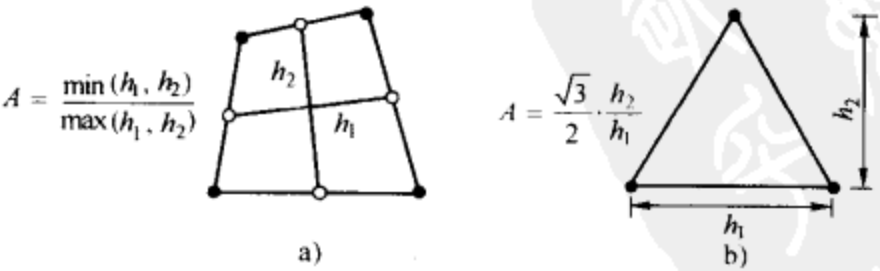


图 4-8 四边形单元和三角形单元的形状比

用倾斜角 α 表示单元偏离直角四边形的程度，倾斜角不要超过 45° ，四边形所有内角 β 应在 $45^\circ \sim 135^\circ$ 之间，注意内角必须小于 180° 。如图 4-9 所示。

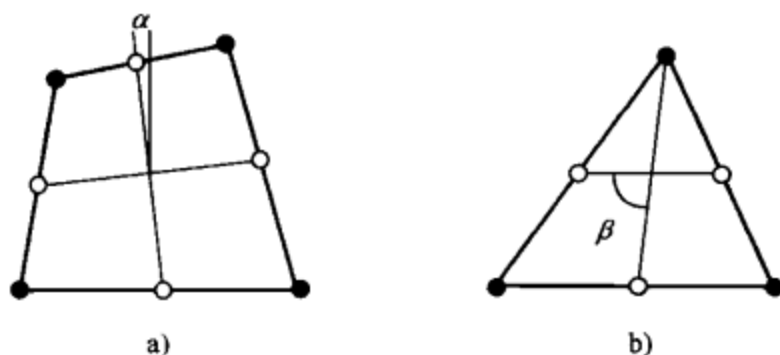


图 4-9 衡量四边形单元与三角形单元的偏离指标

对于四边形单元，用锥度 Δ 表示其变形程度（图 4-10）。

四边形单元的四个节点偏离同一平面的程度称之为翘曲。一般，推荐翘曲较大时，用三角形单元代替四边形单元。角点法线间的角度可用来衡量扭转程度。角点法线垂直于交于此点的两边。如果任意两个角点法线的交角小于 30° ，将得到最佳结果，但此角度不得超过 45° （图 4-11）。

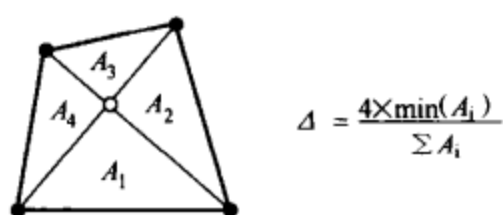


图 4-10 四边形单元的锥度

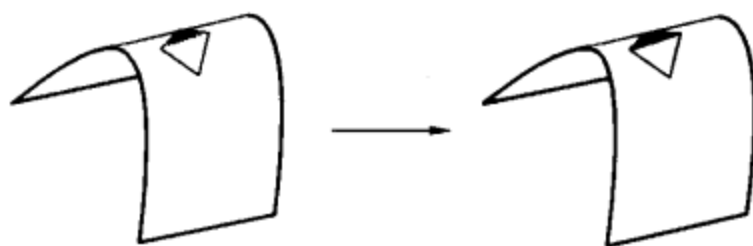


图 4-11 四边形单元的翘曲

自由度

壳单元总在每个连接点激活所有 6 个自由度。当单元被作为纯膜来使用时，工程师必须确保约束或其他支座提供法向平动和弯曲转动自由度；当一个单元被当作一个纯板来使用时，工程师必须确保约束或其他支座提供面内平动和关于法向轴的转动自由度。

对三维结构，建议使用完全壳（膜加板）行为。

质量

在动力分析时，结构的质量用来计算惯性力。由壳单元贡献的质量集中在单元节点上。在单元内部不考虑惯性力。

单元总质量等于在单元平面上对质量密度 m 乘以厚度 t 的积分。总质量用一致质量矩阵的对角元按比例分配给节点。总质量被分配给每个平移自由度：UX，UY，和 UZ。对于转动自由度，不计算质量惯性矩。

自重荷载

自重荷载激发模型中所有单元的自重。对于一个壳单元，自重是一个均布在单元平面的力。自重值等于重量密度 w 乘以厚度 t 。

自重荷载总是作用向下，在整体-Z 方向。工程师可用一个比例系数按比例调整自重，并应用于结构中的所有单元。

其他荷载和内力及应力输出

壳单元还可承受均布荷载、表面压力荷载和温度荷载。

壳单元内力（也称为应力合力）是在整个单元厚度积分应力而得的力和弯矩。要注意的是，这些应力合力是平面内单位长度的力和弯矩。它们存在于单元中间面的每一点。

正内力相应于在整个厚度上恒定的正应力状态。故正应力由内力计算得到，横向剪力为平均值，实际的剪力分布呈抛物线形，在顶部和底部为零且在单元中间面为一最大值或最小值。在单元的标准 2×2 高斯积分点计算应力和内力，且向外插值到节点。虽然它们在节点给出值，但应力和内力存在于整个单元。

更多信息参见《CSI 分析参考手册》。

4.4.2 平面单元

平面单元用来模拟二维实体的平面应力和平面应变行为。

非协调弯曲模式

SAP2000 中很多单元可以指定为非协调完全模式（对应程序单元定义中，选择不相容模式的复选框），包括平面单元、轴对称平面单元及实体单元。

在介绍非协调模式之前，先简单介绍一下剪力自锁现象。

考虑一个受纯弯曲结构中的一小块材料，材料将（如图 4-12 所示）产生弯曲。平行于水平轴的直线按常曲率弯曲，而沿厚度方向上的直线保持为直线。水平线与竖直线之间的夹角为 90° 。

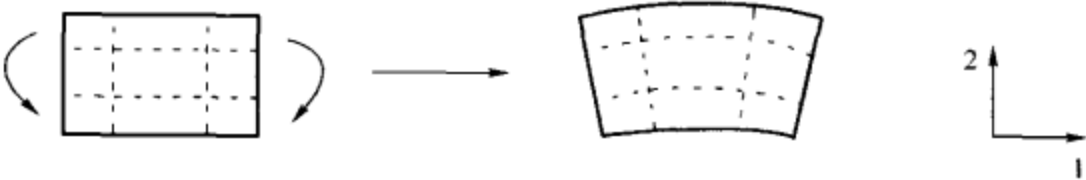


图 4-12 弯曲材料的变形

一个线性单元的边不能弯曲，所以用单个单元来模拟小块材料，其变形后的形状如图 4-13 所示。

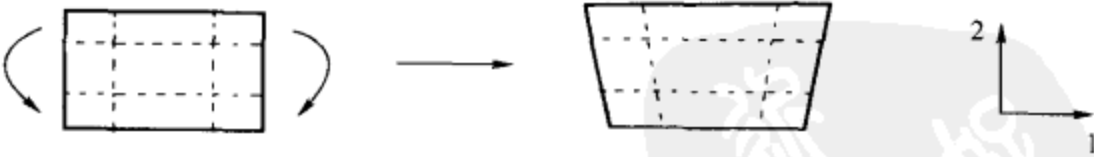


图 4-13 受完全的完全积分线性单元变形

为清楚起见，画出了通过积分点的虚线。很明显，上面直线的长度增加，这说明 1 方向的应力 σ_{11} 是拉伸的；类似，下面直线的长度缩短，说明 σ_{11} 是压缩的；竖直直线的长度没有改变（假设位移很小），因此所有积分点上的 σ_{22} 为零。所有这些结论与受纯弯曲的小块材料的预测应力状态是一致的。但是在每一个积分点，竖直线与水平线之间的夹角开始时是

90°, 变形后改变了, 这说明每一点的剪应力 σ_{12} 不为零, 这是不正确的: 在纯弯曲下一块材料中的剪应力应为零。此现象即剪力自锁现象。

引起剪力自锁现象的原因是单元的边不能弯曲。它的存在意味着应变能不引起弯曲变形而引起剪切变形。总挠度变小了, 即单元太刚硬了。

剪力自锁只影响受弯曲荷载的弯曲积分线性单元, 这些单元在受直接或剪切荷载时没有问题。

非协调模式可以用来解决完全积分一阶单元的剪力自锁问题。既然剪力自锁是由于单元的位移场不能模拟与弯曲相联系的运动学现象引起的, 那么可把能够增强单元位移梯度的附加自由度引入到一阶单元。这种对位移梯度的增强, 允许一阶单元中通过如图 4-14a) 所示的单元范围的位移梯度有一个线性变化。标准的单元构造导致图 4-14b) 所示单元有一个恒定的位移梯度, 从而导致与剪应力自锁有关的非零剪应力。这种对位移梯度的增强对一个单元而言完全是内在的并且与单元边上的节点无关。

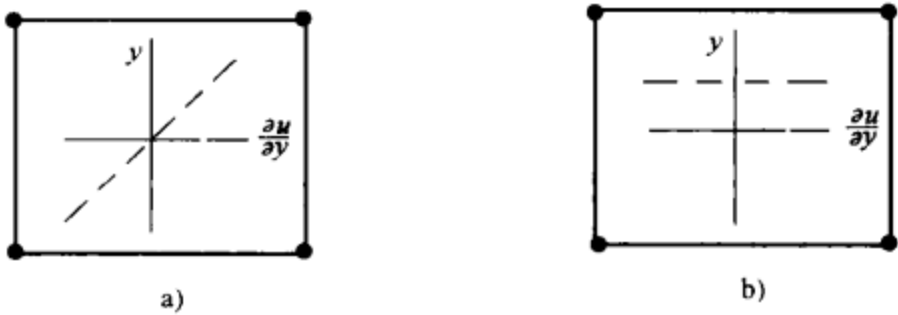


图 4-14

a) 非协调单元模式 (增强位移梯度); b) 采用标准构造的一阶单元

在弯曲问题中, 用非协调模式可以得到与二次单元相当的结果, 而且计算费用明显降低。但他们对单元扭曲很敏感。

非协调单元之所以有用, 是因为它们如果应用得当, 则在很低花费时仍可得到较高的精度。但必须保证单元扭曲是非常小, 然而当网格复杂时这一点是很难保证的。在弯曲不重要的情况下, 如一般的岩土问题, 则不能使用非协调弯曲模式。

自由度

平面单元在每一连接的节点激活了 3 个平动自由度, 转动自由度没有被激活。

平面应力单元只对单元面内的自由度贡献刚度, 所以有必要对垂直于平面的平动自由度提供约束或其他支座; 否则, 结构将不稳定。

除平面行为外, 平面应变单元模拟抵抗平面剪力, 即剪力垂直于单元平面, 这样就对所有 3 个平动自由度建立了刚度。

质量

由平面单元贡献的质量集中在单元节点上。在单元内部不考虑惯性力。单元总质量等于在单元平面上对质量密度 m 乘以厚度 t 的积分, 总质量用一致质量矩阵的对角元按比例分配给节点, 总质量被分配给每个自由度: UX 、 UY 和 UZ 。对于转动自由度, 不计自重荷载激发模型中所有单元的自重。

荷载及应力输出

平面单元可以承受自重荷载、表面及孔隙压力荷载和温度荷载。

程序在平面单元的标准 2×2 高斯积分点计算应力，且向外插值到节点。

4.4.3 轴对称实体单元

该单元用来模拟一个三维轴对称实体的有代表性的二维截面。对称轴可位于模型中的任意位置。每个单元应完全位于包含对称轴的平面。若不是，则对单元在包含对称轴和单元中心的平面的投影建立公式。

轴对称实体单元是一个三节点或四节点单元，用来模拟在轴对称荷载作用下的轴对称结构。它是基于包含 4 个非协调弯曲模式的等参公式。

假定在周边方向上几何属性、荷载、位移、应力和应变没有变化，则在周边方向上的任意位移将被看作是轴对称，进行扭曲处理。

若单元的形状为矩形，使用非协调弯曲模式可显著改善单元在平面内的弯曲性能。改善的效果甚至在非矩形中也有体现。

自由度

单元每个节点有 3 个平动自由度，转动自由度没有被激发。对于所有 3 个自由度建立刚度。在平面的自由度代表径向和轴向的行为，法向平动代表周长方向上的扭转。

应力和应变

轴对称实体单元用来模拟一个轴对称实体结构的有代表性一段的中间面，此结构的应力和应变沿圆周方向不变。

对称轴

对于每一个轴对称实体截面，工程师可选择一个对称轴，此轴被指定为一个工程师定义的可替换坐标系的 Z 轴。所有使用给定的轴对称实体截面的轴对称实体单元具有相同的对称轴。

对于大多数建模的情况，工程师只需要一个对称轴。然而，若工程师在模型中需要多个对称轴时，只需设置所需的可替代坐标系，并定义相应的轴对称实体截面属性。

工程师需要明白，几乎不可能建立一个轴对称实体单元连接其他单元的敏感模型，或轴对称实体单元之间连接的模型。采用多个对称轴的目的是为了在同一模型中建立多个独立的轴对称结构。

弧度和厚度

轴对称实体单元代表一个通过绕对称轴旋转 360° 所建立的实体。然而，分析只考虑实体中具有代表性的一段。工程师使用参数 **arc**（单位为度）指定节段的尺寸，例如，**arc** = 360 模拟整个结构，**arc** = 90 模拟 1/4 的结构。设置 **arc** = 0，默认为模拟一个 1 弧度的节段，1 弧度为 $180^\circ/\pi$ ，大约 57.3° 。单元“厚度”（圆周方向范围），随着对称轴的径向距离 r 的增加而增加： $h = \frac{\pi \cdot \text{arc}}{180}$ ，显然厚度在整个单元平面是变化的。

单元厚度用来计算单元刚度、质量和荷载。因此，计算的单元节点力和 **arc** 成正

比。

质量

轴对称实体单元贡献的质量集中在单元节点上。在单元内部不考虑惯性力。

单元总质量等于在单元平面上对质量密度 m 乘以厚度 h 的积分。总质量用一致质量矩阵的对角元按比例分配给节点。

荷载及应力输出

轴对称单元可以承受自重荷载、表面及孔隙压力荷载和温度荷载。特殊的是，轴对称单元还可以承受离心力荷载。

在轴对称实体单元的标准 2×2 高斯积分点计算应力，向外插值到节点。

4.5 体单元

实体单元是一个八节点单元，用来模拟三维结构和实体。它是基于包含 9 个可选的非协调弯曲模式的等参公式。若单元的形状为矩形，使用非协调弯曲模式可显著地改善单元在平面内的弯曲性能，改善的效果甚至在非矩形中也有体现。

每一实体单元有 6 个四边形面和 8 个节点，如图 4-15 所示。

自由度

实体单元的激发位于每个连接节点的 3 个平动自由度上，转动自由度没有被激发。单元对于所有的平动自由度贡献刚度。

质量

实体单元贡献的质量集中在单元节点上。在单元内部不考虑惯性力。单元总质量等于在单元体积上对质量密度 m 的积分。总质量用一致质量矩阵的对角元按比例分配给节点。总质量被分配给每个自由度：UX，UY 和 UZ。

荷载及应力输出

此单元可以承受自重荷载、表面及孔隙压力荷载和温度荷载。

在实体单元的标准 $2 \times 2 \times 2$ 高斯积分点计算应力，且向外插值到节点。

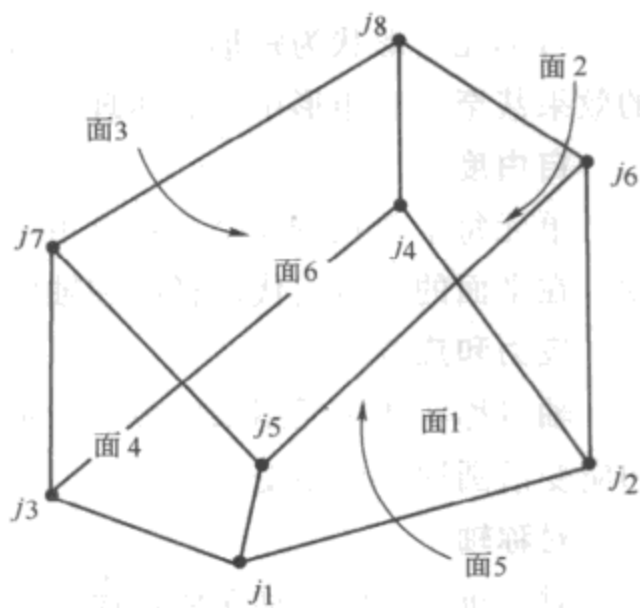


图 4-15 实体单元

4.6 连接单元

SAP2000 可以定义两种连接属性：线性/非线性、频率相关。线性/非线性的属性集必须制定给每个连接单元，指定频率相关的属性集给连接单元或支座单元是有选择性的。

连接单元有两种形式，一种是两节点的连接单元，一种是单节点的连接单元（也可认为是两节点的连接单元，另一节点接地）。

由连接单元贡献的质量集中在单元节点 i 和 j 上。在单元内部不考虑惯性力。对于每个连接/支座属性，工程师可指定一个总平动质量 m ，一半的质量被分配给在单元上的一个或两个节点的 3 个平动自由度，对于单节点单元，假定一半的质量是接地的；工程师可另外指定转动质量弯矩惯性矩 $mr1$ ， $mr2$ 和 mr ，一半的质量惯性矩被分配给在单元上的一个或两个节点的 3 个平动自由度，对于单节点单元，假定一半的质量惯性矩是接地的。

转动惯量在单元的局部坐标轴中定义，但将被程序转换至对节点 i 和 j 的局部坐标系。若这 3 个惯量不相等，且单元的局部轴不平行于节点局部轴，则在转换时将产生交叉惯性矩项，程序会略去这些项，这就导致一些误差。

大部分连接单元需要指定线性或非线性属性，线性属性包含了单元用来进行线性分析及其他类型分析（如果没有定义其他属性）的线性属性。非线性属性用来进行非线性分析及在非线形分析之后进行线性分析。

下面就不同的连接单元分别进行介绍。

4.6.1 线性连接

顾名思义，此单元为线性单元，需要工程师指定刚度及各方向的阻尼值。刚度及阻尼值可以是耦合的也可以是解耦的。

虽然两个节点可以利用桁架或者梁单元连接，但这些单元不能充分反映轴向和旋转方向的刚度。以单元坐标系为坐标参数输入弹性连接单元具有六个参数，即三个轴向位移刚度和三个沿轴转动的转动刚度值。

在桥梁结构中上部结构和下部桥墩之间的垫板以及弹性地基梁下的接触面都可以利用线性连接单元建立计算模型。

4.6.2 多段线弹性连接单元

此连接单元用来模拟力与位移遵从图 4-16 所示的行为。力与位移的关系必须为：通过原点；至少有一个正的变形点和一个负的变形点；对于变形值必须为单调增加的，没有相等的两个值。

图 4-16 所示的行为是非线性的，然而却是弹性的。这意味着单元加载和卸载沿着相同的曲线，即没有能量耗散。

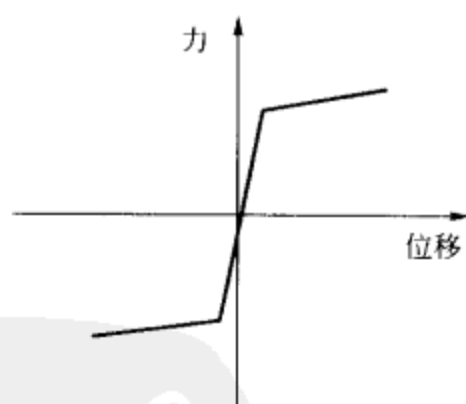


图 4-16 多段线弹性连接单元的力与位移关系曲线

4.6.3 多段线性塑性连接单元

此连接单元模拟的是常见材料的塑性行为。塑性关系通过一系列的力与变形的关系曲线来定义，塑性包括随动硬化（Kinematic）模型、Takeda 模型和用来模拟钢筋混凝土塑性行为的枢纽点（Pivot）塑性。

（1）随动硬化（Kinematic）模型属性

此模型基于在金属中常见的动态硬化行为，对于每一自由度，工程师可指定多段线性随动硬化塑性属性，如图 4-17 所示。

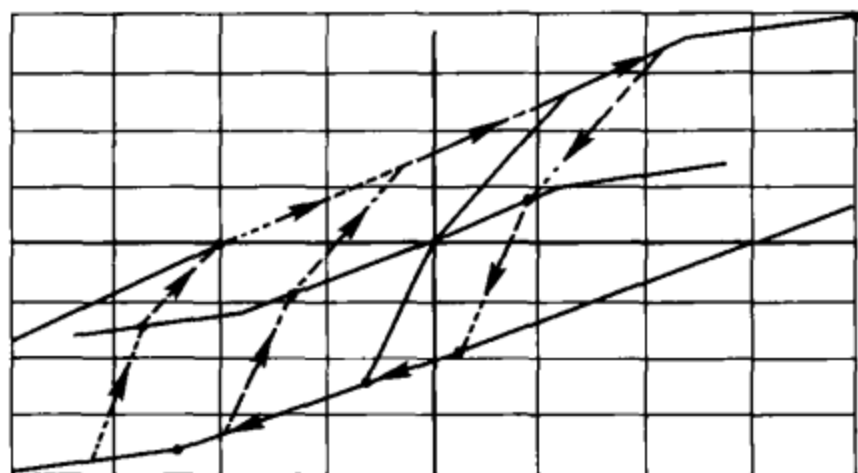


图 4-17 单轴变形的随动硬化塑性属性

所有内部变形都是独立的，即任一个自由度变形不影响其他自由度的变形。若用户不定义某个自由度非线性属性，则该自由度使用线性有效刚度（可能为零）。

非线性力-变形关系用多段线性曲线来给定，用户定义一组点来确定此曲线。此曲线可为任意形状，但必须遵从以下限制条件：

- 一个点必须为原点 (0, 0)
- 至少有一个正变形的点和一个负变形的点
- 对于指定点的变形值必须单调增加，不能有相等的两值
- 在一点的力（弯矩）必须和变形同号（可为零）
- 任一曲线终点的斜率不能为负

由在正变形轴上的最后两点定义的斜坡被外推至无限正变形，同样，由在负变形轴上的最后两点定义的斜坡被外推至无限负变形。

图 4-17 给定的曲线定义了简单荷载作用下的力-变形关系。在原点两侧的第一个斜坡是弹性的，剩余的节段定义了塑性变形。如果在弹性段卸载，其将在反向沿着塑性变形前的两个弹性节段轨迹变形，如果是在塑性变形段卸载，则其将沿着塑性变形后的滞回卸载曲线进行卸载。

在随动硬化的准则下，一个方向的塑性变形“拉”其他方向的变形曲线沿塑性变形方向移动。此过程中要考虑如下标识的点：

- 原点为点 0
- 在正坐标轴的点被标识为 1, 2, 3..., 从原点计起
- 在负坐标轴的点被标识为 -1, -2, -3..., 从原点计起

例如图 4-18 所示，原点两侧各定义了 3 个点。此图显示的是单元在循环增加荷载作用下的轴向变形行为。

在此例中，首先为弹性加载，从点 0 到点 1。当荷载从点 1 加到点 2 时，发生塑性变形，这由点 1 沿曲线向点 2 的移动体现。点 -1 由点 1 拉动到与力和变形方向上有相同数量的位置上，点 0 也和点 1 及 -1 一起移动，保持弹性斜率。

当荷载反向时，单元沿着从点 1 至点 -1 移动的弹性直线卸载，然后向点 -2 移动。点 -2 还未移动，且只在负方向的荷载推动其时才移动，或只在正方向的荷载推动点 2 时才移

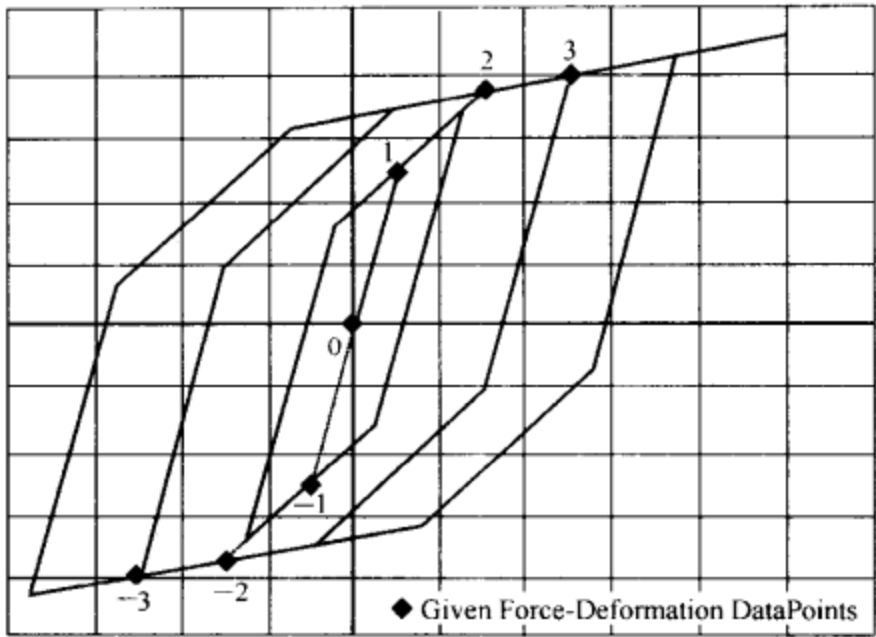


图 4-18 多段线性随动硬化塑性属性（循环增加荷载作用下轴向变形）

动，其对于点-2 拉动相同的量。

当荷载再次反向时，点 1 向点 2 推动，然后它们一起向点 3 推动，同时拉动点-1 和-2，此过程在余下的整个过程中延续，在点 3 和点-3 间的斜率保持平滑。

当定义多段线性曲线上的点时，用户应明白对称点将被连接，即使是非对称的曲线也是如此。这样用户能够对滞回曲线的形状进行一些控制。

(2) Takeda 塑性属性

这个模型与随动硬化模型非常相似，但是使用退化的滞回曲线。属性定义与随动硬化塑性属性定义的方式基本等同。在卸载过程中，当通过水平轴时，卸载曲线沿着反向加载路径 (Backbone Force Deformation) 的切线方向。如图 4-19 所示。

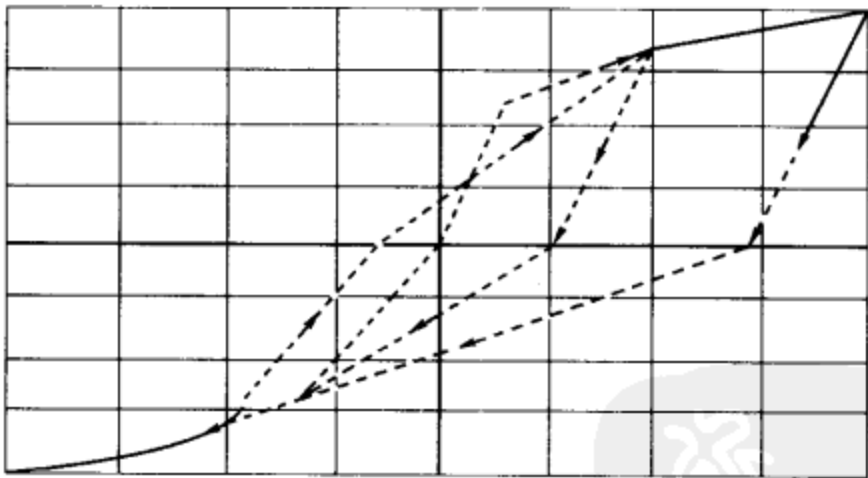


图 4-19 多段线性 Takeda 塑性，对轴向变形

(3) 枢纽点 (Pivot) 滞回塑性属性

此模型与 Takeda 塑性模型相似，但是具有一个附加参数来控制退化滞回曲线。它尤其适用于钢筋混凝土对象，在力-变形（或弯矩-转动）平面内，卸载和反向加载骨架线趋向于某些特殊点 (Pivot Point，我们称之为枢纽点)。其属性定义与随动硬化或 Takeda 塑性的属性定义基本相同，只是附加了下面几个比例系数：

.....

- α_1 ——对应于正荷载卸载到 0 路径上的枢纽点
- α_2 ——对应于负荷载卸载到 0 路径上的枢纽点
- β_1 ——对应于反向加载从 0 到正荷载路径上的枢纽点
- β_2 ——对应于反向加载从 0 到负荷载路径上的枢纽点
- η ——决定了经过塑性变形后弹性斜坡的退化程度

这些参数在图 4-20 中进行了说明。

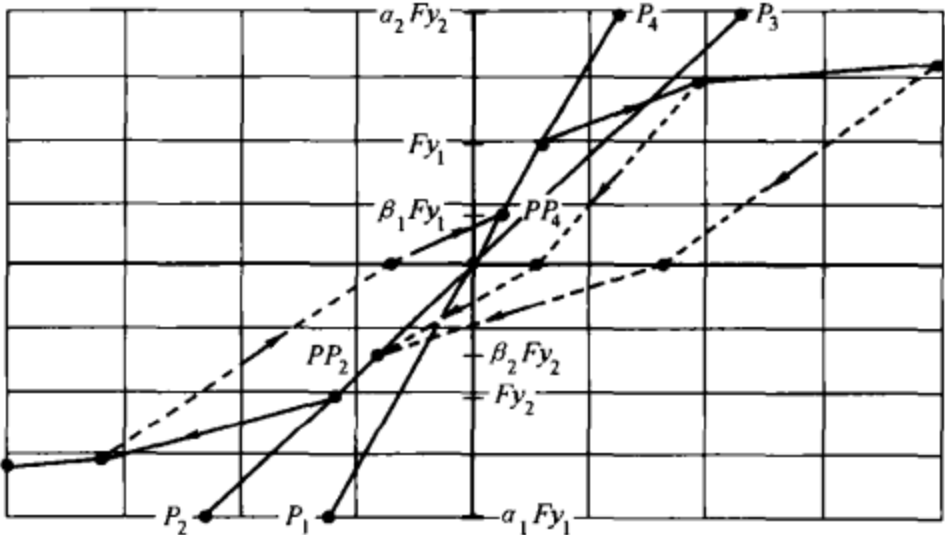


图 4-20 多段线性枢纽点 (Pivot) 塑性，对轴向变形

4.6.4 粘滞阻尼单元

SAP2000 中的粘滞阻尼单元采用的是精确的 Maxwell 计算模型，在该模型中，阻尼器与弹簧串连，如图 4-21 所示。

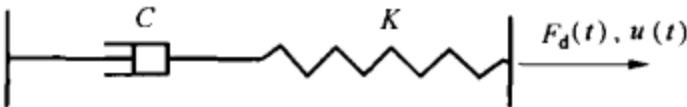


图 4-21 粘滞阻尼单元示意

假设阻尼器与“弹簧”的位移分别是 d_k 和 d_c ，则有下列关系成立：

$$d = d_k + d_c \tag{4-1}$$

$$f_d = kd_k = cd_c^{\text{exp}} \tag{4-2}$$

式中： k ——弹簧常数；
 c ——阻尼系数；
 exp ——阻尼指数；
 d_k ——在阻尼器的变形；
 d_c ——在阻尼器的变形速度。

阻尼指数必须是正值；使用的范围是在 0.2~2.0 之间。

4.6.5 缝单元

缝单元行为描述如下：

$$f = \begin{cases} k(d + open) & d + open < 0 \\ 0 & d + open \geq 0 \end{cases} \quad (4-3)$$

其中 k 为弹簧常数，且 $open$ 为初始缝开启，其必须为零或正值。

图 4-22 所示为缝单元轴向变形行为。

利用缝单元，可以将 $open$ 设置为零来模拟只压对象。

4.6.6 钩单元

钩单元的行为描述如下：

$$f = \begin{cases} k(d - open) & d > open \\ 0 & d \leq open \end{cases} \quad (4-4)$$

其中 k 为弹簧常数，且 $open$ 为初始缝开启，其必须为零或正值。

图 4-23 所示的为钩单元轴向变形行为。

利用钩单元，可以将 $open$ 设为零来模拟单拉对象。

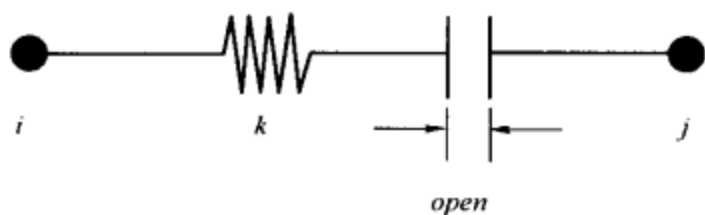


图 4-22 缝单元示意

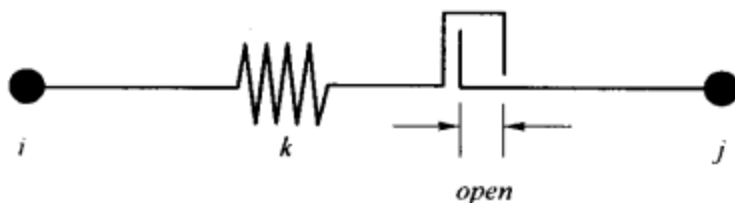


图 4-23 钩单元示意

4.6.7 Wen 塑性单元

此塑性模型是基于 1976 年 Wen 提出的滞后行为。图 4-24 所示的为同轴 Wen 塑性。

$$f = r \cdot k \cdot d + (1 - r)\sigma_y \cdot z \quad (4-5)$$

式中： k ——弹性弹簧常数；

σ_y ——屈服力；

r ——指定的屈服后刚度对弹性刚度 k 的比值；

z ——表示为一个内部滞后变量，此变量范围为 $|z| \leq 1$ ， $|z| = 1$ 代表屈服面。

$$z = \frac{k}{\sigma_y} \begin{cases} d(1 - |z|^{\exp}) & d_z > 0 \\ 0 & d_z \leq 0 \end{cases} \quad (4-6)$$

其中 \exp 为等于或大于 1 的指数。此指数越大，屈服比率越大。实际指数限值大约是 20。公式 z 等价于 Wen 模型 $A=1$ 及 $\alpha=\beta=0.5$ 。

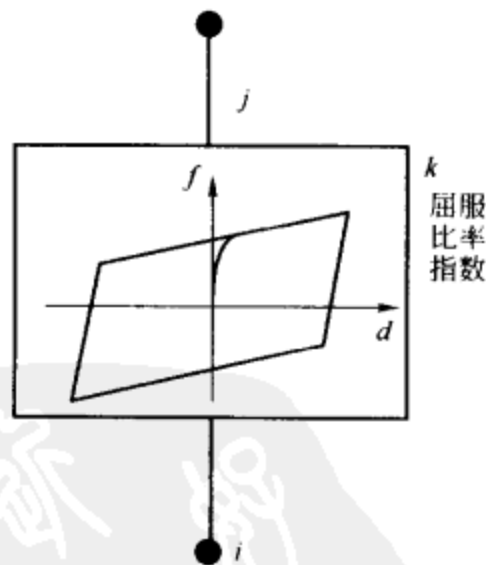


图 4-24 对于同轴塑性 Wen 模型

4.6.8 橡胶隔振单元

这是一个双轴的滞后隔振器，对于两个剪切变形有耦合的塑性属性，且对余下的 4 个变形有线性的有效刚度属性，如图 4-25a) 所示。

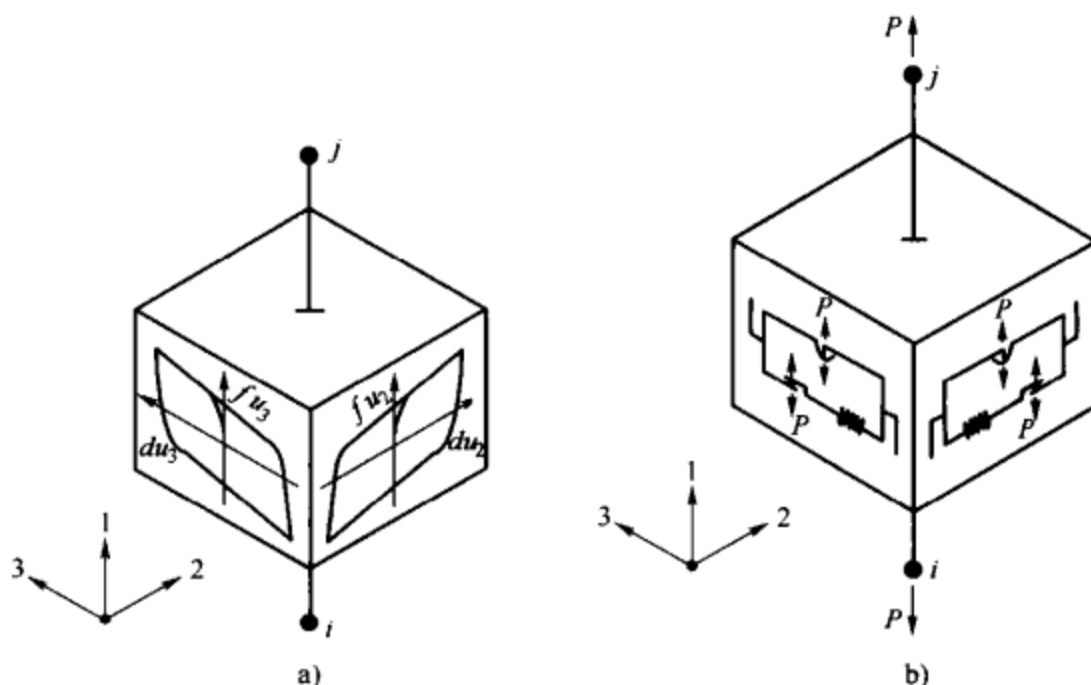


图 4-25

a) 双轴剪切变形的滞后隔振属性；b) 摩擦摆隔振属性

对每一个剪切变形自由度，工程师可独立的指定线性或非线性行为。

若两个剪切自由度均为非线性，耦合的力-变形关系如下指定：

$$f_{u2} = r_2 \cdot k_2 \cdot d_{u2} + (1 - r_2) \sigma_{y2} \cdot z_2 \quad (4-7)$$

$$f_{u3} = r_3 \cdot k_3 \cdot d_{u3} + (1 - r_3) \sigma_{y3} \cdot z_3 \quad (4-8)$$

其中 k_2 和 k_3 为弹性弹簧系数， σ_{y2} 和 σ_{y3} 为屈服力， r_2 和 r_3 为屈服后刚度对弹性刚度 (k_2 和 k_3) 的比例。这些变量的范围为 $\sqrt{z_2^2 + z_3^2} \leq 1$ 。 $\sqrt{z_2^2 + z_3^2} = 1$ 代表屈服。

z_2 和 z_3 初始值为零，其变化遵从下列等式：

$$\begin{Bmatrix} z_2 \\ z_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - a_2 z_2^2 & -a_3 z_2 z_3 \\ -a_3 z_2 z_3 & 1 - a_3 z_3^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{k_2}{\sigma_{y2}} d_{u2} \\ \frac{k_3}{\sigma_{y3}} d_{u3} \end{Bmatrix} \quad (4-9)$$

$$\text{式中：} a_2 = \begin{cases} 1 & d_{u2} z_2 > 0 \\ 0 & d_{u2} z_2 \leq 0 \end{cases}, a_3 = \begin{cases} 1 & d_{u3} z_3 > 0 \\ 0 & d_{u3} z_3 \leq 0 \end{cases}。$$

如果只是一个剪切自由度具有非线性行为，则上面的等式变为单轴塑性行为。

4.6.9 摩擦摆隔振单元

此单元在剪切变形上与摩擦塑性耦合，具有沿剪切方向滑移后的滑移后刚度，在轴向上具有缝行为，对于弯矩具有线性有效刚度，如图 4-19b) 所示。此单元还可模拟在接触面上的缝和摩擦行为。

单元不能承受轴拉力，轴力为 $p = f_{ul} = \begin{cases} kl \cdot d_{ul} & d_{ul} > 0 \\ 0 & d_{ul} \leq 0 \end{cases}$ ，刚度 kl 必须为正值，这样单元才会具有非线性剪力。

对于每个剪切变形自由度，工程师可以独立指定为线性或者非线性行为。

若两个剪切自由度为非线性，对于每个剪切变形，摩擦和摆并联（平行作用）：

$$f_{u2} = f_{u2f} + f_{u2p} \quad (4-10)$$

$$f_{u3} = f_{u3f} + f_{u3p} \quad (4-11)$$

摩擦力-变形关系如下：

$$f_{u2f} = -p\mu_2 z_2 \quad (4-12)$$

$$f_{u3f} = -p\mu_3 z_3 \quad (4-13)$$

式中 μ_2 与 μ_3 为摩擦系数， z_2 与 z_3 为内部滞后变量。摩擦系数与速度相关，由下式给出：

$$\mu_2 = f_2 - (f_2 - s_2)e^{-rv}$$

$$\mu_3 = f_3 - (f_3 - s_3)e^{-rv}$$

式中 s_2 和 s_3 为静摩擦系数（速度为零）， f_2 和 f_3 为动摩擦系数（速度大于零）。 V 是滑移的合速度：

$$v = \sqrt{d_{u2}^2 + d_{u3}^2}$$

r 为有效的反向速度：

$$r = \frac{r_2 \cdot d_{u2}^2 + r_3 \cdot d_{u3}^2}{v^2}$$

式中 r_2 和 r_3 为反向的特征滑移速度。对于像聚四氟乙烯-钢的交接面，摩擦系数一般随滑移速度一起增加。

内部滞后变量 $\sqrt{z_2^2 + z_3^2} \leq 1$ ， $\sqrt{z_2^2 + z_3^2} = 1$ 代表屈服， z_2 和 z_3 初始值为零，且按下式变化：

$$\begin{Bmatrix} z_2 \\ z_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 - a_2 z_2^2 & -a_3 z_2 z_3 \\ -a_3 z_2 z_3 & 1 - a_3 z_3^2 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{k_2}{p\mu_2} d_{u2} \\ \frac{k_3}{p\mu_3} d_{u3} \end{Bmatrix} \quad (4-14)$$

式中 k_2 和 k_3 为无滑移时滑移器的弹性剪接刚度。

$$a_2 = \begin{cases} 1 & d_{u2} > 0 \\ 0 & d_{u2} \leq 0 \end{cases}, a_3 = \begin{cases} 1 & d_{u3} > 0 \\ 0 & d_{u3} \leq 0 \end{cases} \quad (4-15)$$

此模型允许在剪力不为零时存在滑移，当剪力接近屈服值 pu 时，滑移值变的非常大。工程师可以指定大的弹性剪切刚度来减少滑移值。

摆的力-变形关系如下：

$$f_{u2p} = -p \frac{d_{u2}}{R_2} \quad (4-16)$$

$$f_{u3p} = -p \frac{d_{u3}}{R_3} \quad (4-17)$$

半径为零代表一个平面，相应的剪力为零。一般，在两个剪力方向的半径是相等的（球

面)，或一个半径为零（圆柱表面），允许指定不相等的非零半径。

如果一个剪切自由度是非线性的，则上面的摩擦公式变为：

$$f_t = -p\mu z \quad (4-18)$$

$$\mu = f - (f - s)e^{-\tau d} \quad (4-19)$$

$$\dot{z} = \frac{k}{p\mu} \begin{cases} d(1 - z^2) & \dot{d}z > 0 \\ 0 & \dot{d}z \leq 0 \end{cases} \quad (4-20)$$

上述摆方程的非线性自由度属性不变。

线性弹簧关系应用在三个弯矩变形及无非线性属性的剪切变形上。所有线性自由度都使用相应的等效刚度，其值可能为零。对于非线性分析，轴向自由度总是为非线性的。

4.6.10 拉/压限制隔振单元

此单元在剪切自由度上具有和摩擦摆隔振类似的行为，在轴向上具有缝与钩的行为，即不仅可以受拉也可以受压，在三个弯矩变形上也具有非线性行为。

4.7 不同单元类型之间的连接

这里的单元连接指的是不同单元不通过耦合（约束）关系建立起来的连接情况。实际模型中，可能存在两种以上单元，这就存在单元的连接问题。

如图 4-26 所示板单元与框架单元通过一个节点连接，由于板单元没有绕单元坐标系 3 轴的旋转自由度，所以如果框架单元诱发板单元绕 3 轴旋转，则连接位置的某个方向为铰接；同理由于实体没有旋转自由度，当板单元与实体连接时，则很容易导致某个方向出现铰行为；而框架单元和实体单元相邻时，三个方向都会出现铰的行为。

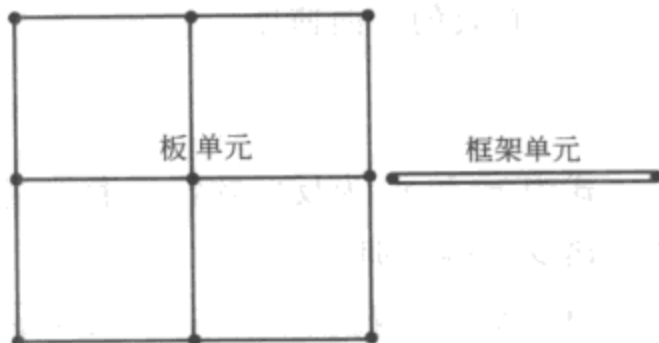


图 4-26 板单元与框架单元的连接

自由度不协调是有限元分析中的一个难点，处理方法较多，如可以使用过渡单元、罚单元和虚拟单元。针对于 SAP2000，我们可以使用虚拟单元处理自由度不协调问题。

例如图 4-27 所示的实体与梁单元连接时，可以设置两个虚拟的梁单元，伸到两个分离的节点上，并释放这两个虚梁单元的转动自由度。梁单元的弯矩就会以拉力和压力形成力矩的方式传递到与之相连的节点上。在实体单元与梁单元重叠的位置处也可能有不实际的额外刚度，因为此处的材料具有双倍的强度和密度，建模时需要注意将这种影响控制在一个允许的范围内。比较明智的处理方法是不应把这些传递单元设置在模型应力比较集中的区域。同样用虚拟梁单元也可以模拟壳和实体单元的连接。如图 4-28 所示。

注意：此处的虚拟梁单元的属性不同于 ETABS 中的虚梁对象（属性为 none 的框架对象），前者为实际结构中不存在的对象，只是为了保证单元连接而采用的一种假想的具有截面属性的梁单元。

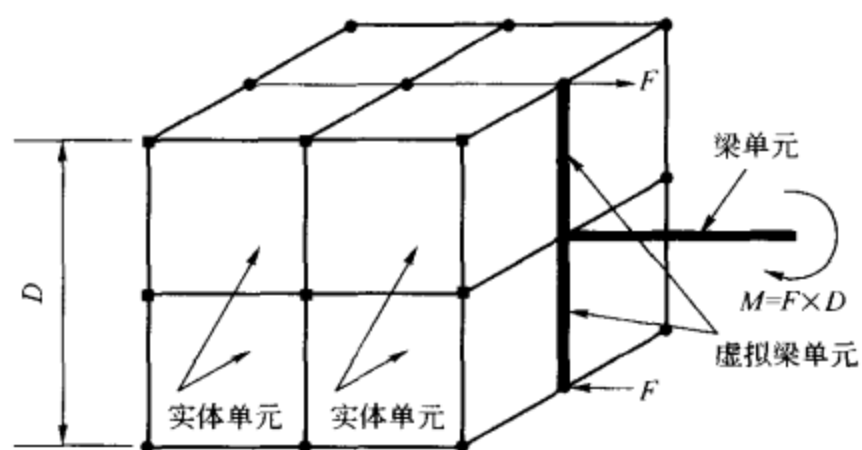


图 4-27 用虚拟梁单元来处理梁与实体单元的连接

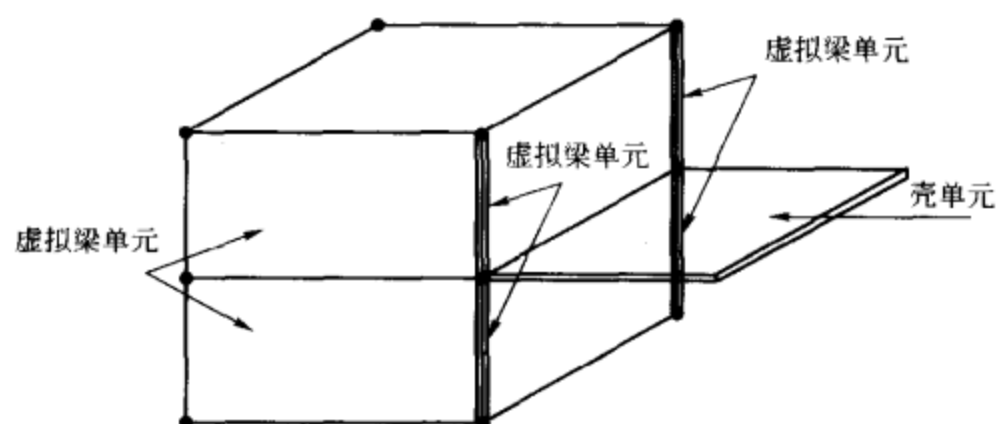


图 4-28 用虚拟梁单元来处理壳与实体单元的连接

第5章

材料与截面

SAP2000 提供了较为丰富的材料类型与单元类型。材料定义是指定义赋予单元的材料属性，是计算构件的基本属性数据。新版 SAP2000 系统对材料的定义更加灵活，使用户可以控制的参数更加深入多样。截面定义是指 SAP2000 提供的线单元、面单元、实体单元类型构件的截面属性定义，截面属性是构成单元的基本要素。在 SAP2000 中形成一个构件的顺序是：定义材料（物理属性）→定义截面（截面几何属性）→绘制对象（确定构件几何属性）。

5.1 材料定义

用户定义的材料属性可以赋予多个不同类型的单元。在 SAP2000 中材料属性分为分析属性、设计属性和高级属性。不同的属性应用于不同阶段的计算。同时，用户可以定义各项同性、各项正交异性以及单轴应力的材料。

分析属性是在结构分析过程中参与计算的数据，通过这些数据计算出结构构件在各种工况下的标准内力。因此，原则上在 SAP2000 系统中可以定义任意的材料属性，只要用户能够提供其基本物理属性，例如密度、弹性模量、热膨胀系数等。

材料的设计属性是根据规范对构件设计、校核时的依据，例如混凝土的强度、钢筋等级以及钢的屈服强度等。因此设计属性是有针对性的，具有设计属性的构件类型才能进行设计、校核。设计类型系统默认的材料类型包括铝、冷轧钢、钢、混凝土等。目前，能够根据中国规范设计的材料类型有混凝土和钢。

材料的高级属性一般用于非线性分析或动力分析，可以考虑材料的徐变、阻尼和应力-应变关系等，用户可根据需要进行修改。

5.1.1 一般材料定义

这里的一般材料是指工程中常用的处于线弹性阶段属性的材料。点击【定义】>【材料属性】命令，弹出材料定义对话框（图 5-1）。对话框说明见表 5-1。

表 5-1

| 材料列表 | 显示已经定义的材料属性名称 | |
|------|---------------|----------------------------------|
| 点击 | 添加新材料 (按钮) | 添加材料时点击, 弹出材料属性数据对话框 (图 5-2) |
| | 修改/显示材料 (按钮) | 修改材料时点击, 弹出该材料的材料属性数据对话框 (图 5-2) |
| | 删除材料 (按钮) | 删除列表中高亮显示的材料 |

对话框列表中显示出系统提供的几种材料类型: ALUM (铝)、CLDFRM (冷轧钢)、CONC (混凝土)、STEEL (钢)、OTHER (其他)。它们本身带有各自的属性, 可以直接使用, 但不能被删除。当选择设计类型为 None (无) 时, 材料的设计属性数据定义被关闭, 程序不对属性为 None (无) 材料进行设计后处理; 当选择其他类型时, 输入的设计属性数据与整体单位制有关, 所以当输入有不同单位制的数据时, 要注意单位制的转换。例如, 在输入混凝土材料设计属性中的强度等级 (C 值) 时, 在默认单位制 ($\text{N} \cdot \text{mm}$) 下输入的值与混凝土标号一致, 比如 C20 混凝土就输入 20, 但当单位制是 ($\text{kN} \cdot \text{mm}$) 时, 输入的值就应当是 20000。

用户自定义材料时, 例如定义中国标准 Q235 钢, 首先选择定义材料的类型 STEEL, 然后点击【添加新材料】按钮, 弹出材料属性数据对话框 (图 5-2)。对话框说明见表 5-2~表 5-7。

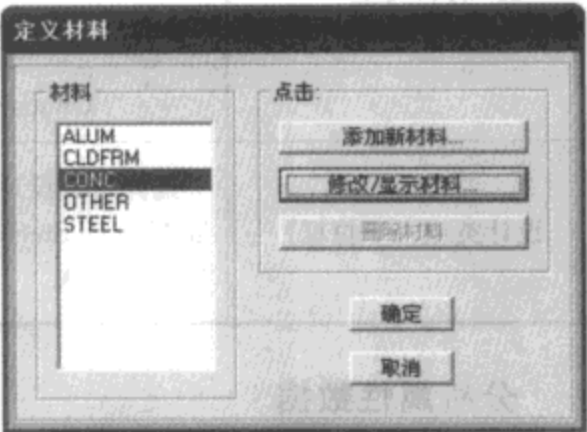


图 5-1 材料定义对话框

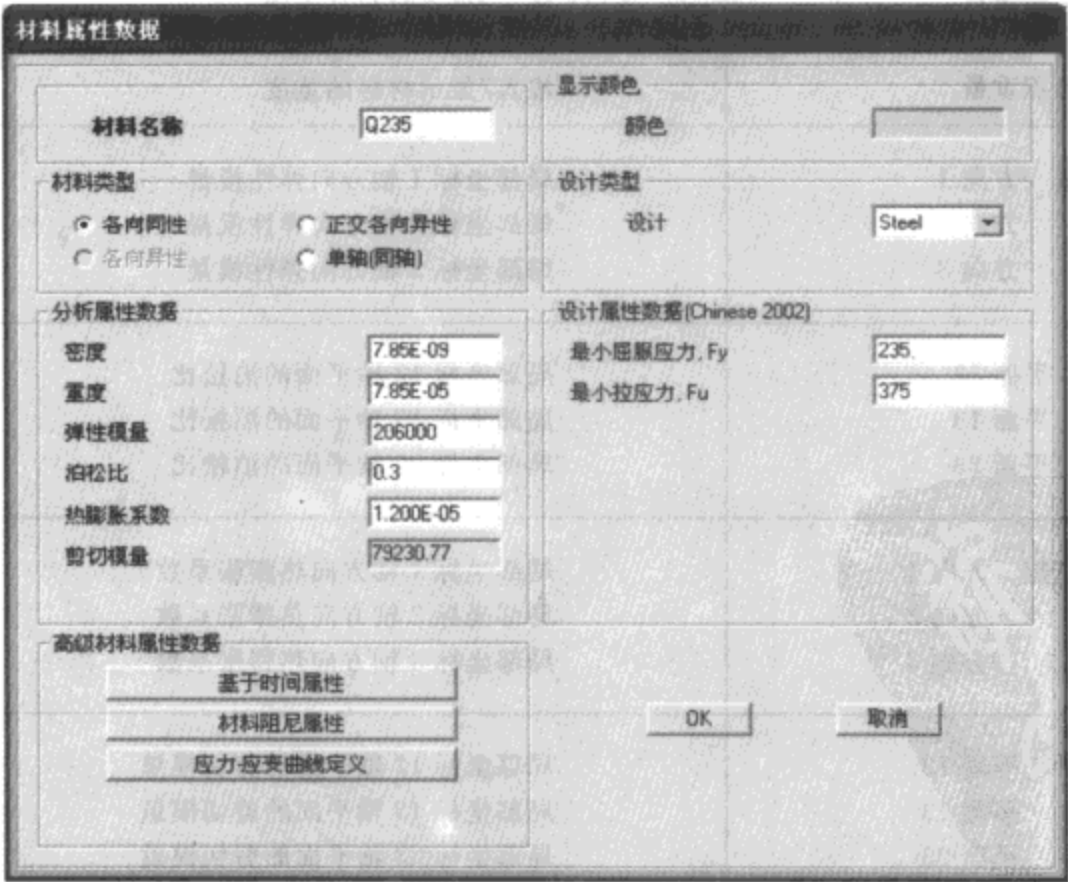


图 5-2 材料属性数据对话框

表 5-2

| | | |
|-----------|--|-----------------------|
| 材料名称 | 显示材料名称，用户可以修改 | |
| 显示颜色 | 颜 色 | 点击色块，弹出颜色编辑器，修改材料显示颜色 |
| 材料类型 | 各向同性 | 定义各向同性材料 |
| | 正交各向异性 | 定义正交各向异性材料 |
| | 各向异性 | 未启用 |
| | Uniaxial | 定义单轴属性材料 |
| 设计类型（下拉框） | 选择材料设计类型，从而决定具有该材料的构件的设计处理方式。选项为 Concrete——混凝土、Steel——钢材、Aluminum——铝、ColdFormed——冷轧钢、Rebar——钢筋、None——无 | |

分析属性数据

材料类型为各向同性表 5-3

| | | | |
|--------|--------------|-------------|---------------|
| 密 度 | 输入/显示材料的密度 | 泊 松 比 | 输入/显示材料的泊松比 |
| 重 度 | 输入/显示材料的重度 | 热膨胀系数 | 输入/显示材料的热膨胀系数 |
| 弹性模量 | 输入/显示材料的弹性模量 | 剪切模量 | 显示材料的剪切模量 |

材料类型为正交各向异性表 5-4

| | |
|-------------------------------|--|
| 每单位体积质量 | 输入/显示材料的密度 |
| 每单位体积重量 | 输入/显示材料的重度 |
| 弹性模量 方向 1 方向 2 方向 3 | 局部坐标 1 轴方向弹性模量 局部坐标 2 轴方向弹性模量 局部坐标 3 轴方向弹性模量 |
| 泊松比 平面 12 平面 13 平面 23 | 局部坐标 12 轴平面的泊松比 局部坐标 13 轴平面的泊松比 局部坐标 23 轴平面的泊松比 |
| 热膨胀系数 方向 1 方向 2 方向 3 | 局部坐标 1 轴方向热膨胀系数 局部坐标 2 轴方向热膨胀系数 局部坐标 3 轴方向热膨胀系数 |
| 剪切模量 平面 12 平面 13 平面 23 | 局部坐标 12 轴平面的剪切模量 局部坐标 13 轴平面的剪切模量 局部坐标 23 轴平面的剪切模量 |

设计属性数据（中国规范标准）

设计类型为 Concrete（混凝土）

表 5-5

| | |
|-------------------|-----------------------------|
| 混凝土强度等级 C | 输入混凝土立方体抗压强度标准值 |
| 受弯钢筋屈服应力 f_{yk} | 输入用于抗弯和轴向荷载计算的钢筋强度标准值 |
| 受剪钢筋屈服应力 f_{yk} | 输入用于抗剪计算的钢筋强度标准值 |
| 轻质混凝土 | 勾选表示为轻质混凝土，抗剪强度折减系数项变为可编辑状态 |
| 抗剪强度折减系数 | 输入剪切强度折减系数，一般取 0.75~0.85 |

设计类型为 Steel（钢材）

表 5-6

| | |
|--------------|-------------|
| 最小屈服应力 F_y | 输入钢材屈服强度标准值 |
| 最小拉应力 F_u | 输入钢材抗拉强度标准值 |

高级材料属性数据

表 5-7

| | |
|------------|------------------------|
| 基于时间属性（按钮） | 弹出基于时间属性对话框，详见图 5-4 |
| 材料阻尼属性（按钮） | 附加材料阻尼，详见图 5-6 |
| 应力-应变曲线定义 | 材料应力-应变曲线数据对话框，详见图 5-7 |

首先将材料名称改为“Q235”，在设计类型下拉菜单中选择“STEEL”，根据材料表在分析属性输入域以及设计属性数据输入域分别输入相应数据（如图 5-2 所示的数据）。点击【确定】即可。

对于一般的工程材料，都定义为各项同性，表现为材料的行为独立于荷载方向或材料朝向，剪切行为与膨胀行为不耦合，并且不受温度影响。一般混凝土和钢材都符合此假定。

各向同性材料应变与应力以及温度变化的力学、热性能的关系如下：

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_{21} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{21} \\ \tau_{31} \\ \tau_{23} \end{bmatrix} + \alpha \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5-1}$$

式中： E ——杨氏弹性模量；
 ν ——泊松比；
 G ——剪切模量；
 α ——热膨胀系数。

但对于一些特殊材料，各个受力方向为弹性不同的多轴应力材料，用户可以定义为各项正交异性材料。在材料属性数据对话框材料类型选择【各项正交异性】选项，对话框变为如

图 5-3 所示。

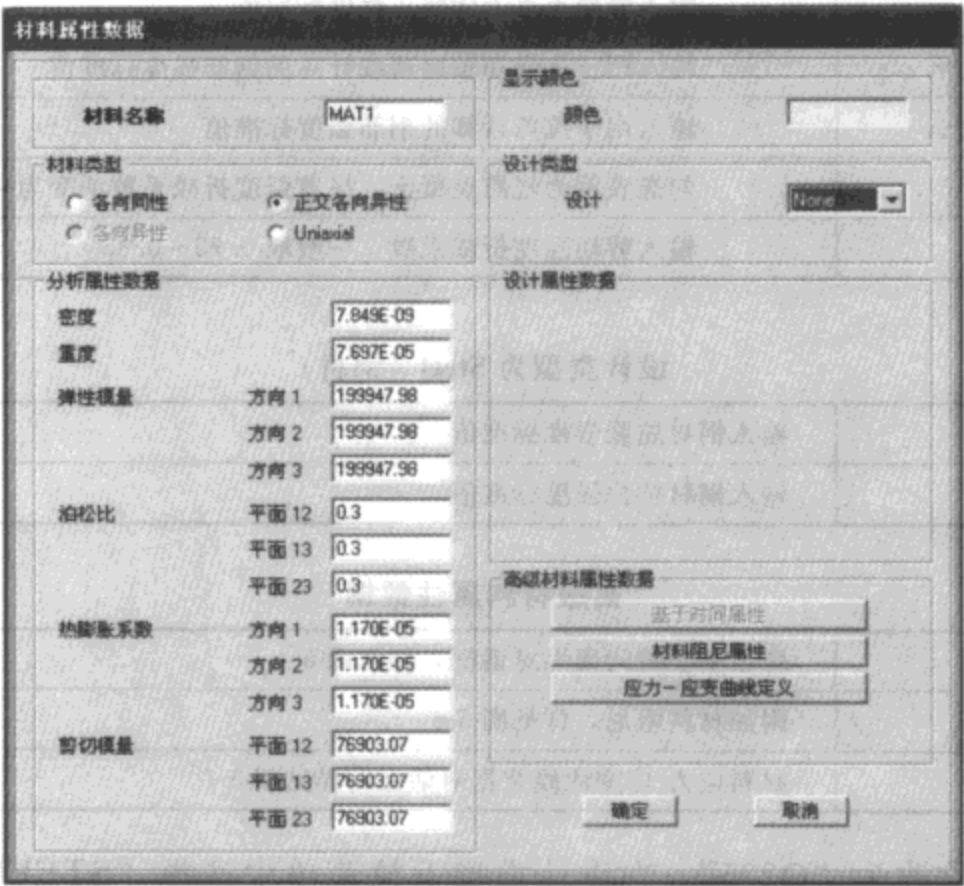


图 5-3 材料属性数据对话框

在对话框分析属性数据输入域中，材料的弹性模量、泊松比、热膨胀系数、剪切模量均按 3 个正交材料局部坐标分开输入。

各向正交异性材料的性能在三个局部坐标轴方向可以是不同的，并且抗剪性能与抗拉性能没有直接关系而且不受温度变化影响。各向同性材料应变与应力以及温度变化的力学、热性能的关系如下：

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_{21} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_2} & -\frac{\nu_{13}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_1} & -\frac{\nu_{32}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{21} \\ \tau_{31} \\ \tau_{23} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5-2)$$

式中： E_1 、 E_2 、 E_3 ——杨氏弹性模量；

ν_{12} 、 ν_{21} 、 ν_{13} 、 ν_{31} 、 ν_{23} 、 ν_{32} ——泊松比；
 G_4 、 G_5 、 G_6 ——剪切模量；
 α_1 、 α_2 、 α_3 ——热膨胀系数。

每种材料都有局部坐标系，默认状态下材料局部坐标与赋予的单元局部坐标系一致，也即是当各项正交异性材料被指定给具体对象后，该对象各个方向的弹性行为将不同且相互独立，而且用户可以根据需要改变材料的局部坐标轴与单元局部坐标轴的角度关系，这将在后面章节中加以说明。

5.1.2 材料高级属性定义

基于时间属性

对混凝土和钢可以指定与时间相关属性，用来在阶段施工分析中进行徐变、收缩和龄期效应计算。目前，这方面的计算方法基于欧洲 CEB-FIP-90 模式规范给出了相应规定。

钢

当设计材料类型为钢时，在图 5-3 中点击【基于时间属性】按钮，弹出基于时间属性 for Steel 对话框（图 5-4）。

勾选【预应力钢筋松弛】选项，在 CEB-FIP 类别下拉菜单中出现 1、2 两个选项。

根据 CEB-FIP 2~5 条对预应力松弛的等级划分，将预应力钢丝和钢绞线松弛划分为一级松弛和二级松弛，分别对应正常的松弛特征、改进的松弛特征，初始应力等于 0.6、0.7、0.8 乘以 f_{puk} 在 1000 小时时的松弛 ρ_{1000} 。关于预应力钢筋的相关计算方法和规定详见 CEB-FIP-90 模式规范 2.3 节。

混凝土

当设计材料类型为混凝土时，在图 5-3 中点击【基于时间属性】按钮，弹出基于时间属性 for Concrete 对话框（图 5-5）。对话框说明见表 5-8。

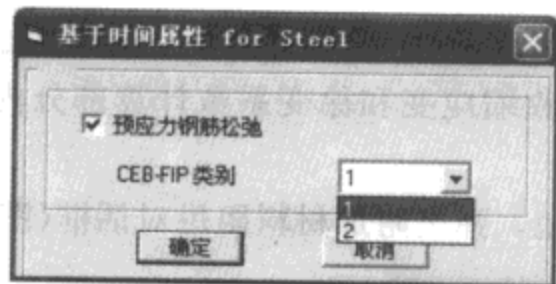


图 5-4 基于时间属性 for Steel 对话框

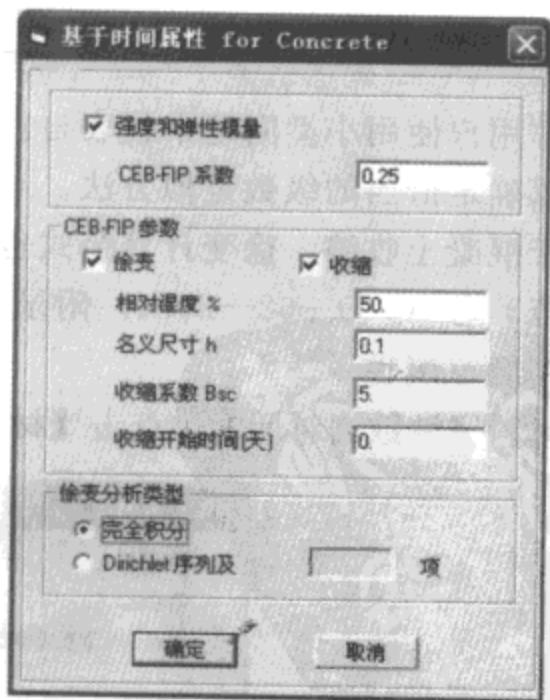


图 5-5 基于时间属性 for Concrete 对话框

表 5-8

| | | |
|------------|----------------|--|
| 强度和弹性模量 | CEB-FIP 系数 | 混凝土龄期 t 日时的抗压强度计算公式的系数 s ，取决于水泥种类，对于快硬高强水泥取 0.2，对于普通快硬水泥取 0.25，对于慢硬水泥取 0.38。公式详见 CEB-FIP 90 模式规范 2.1.6.1 节 |
| CEB-FIP 参数 | 徐变 | 勾选后相对湿度和名义尺寸项被激活 |
| | 收缩 | 勾选后收缩系数和收缩开始时间项被激活 |
| | 相对湿度 % | 周围环境的相对湿度 RH |
| | 名义尺寸 h | 构件的名义尺寸。按照 CEB-FIP 90 模式规范公式 2.1-69 计算。详见 CEB-FIP 90 模式规范 2.1.6.4.3 节 |
| | 收缩系数 Bsc | 计算名义收缩系数中以水泥种类而定的系数。对慢硬水泥取 4，对普通或快硬水泥取 5，对快硬高强水泥取 8。详见 CEB-FIP 90 模式规范 2.1.6.4.4 节 |
| | 收缩开始时间 (天) | 总收缩或膨胀应变计算公式中收缩或膨胀开始时的龄期。详见 CEB-FIP-90 模式规范 2.1.6.4.4 节 |
| 徐变分析类型 | 完全积分 | 在完全积分里，分析中的每个应力增量成为材料记忆的一部分。这会保证精确的结果，但是对于大量应力增量的分析，需要计算机的存储和计算时间以增量数量的平方来增加。因此对于大规模问题，这将使得求解过程变得不切实际 |
| | Dirichlet 序列及项 | 使用 Dirichlet 级数近似法 (Ketchum, 1986)，用户可以选择一个固定数目的级数项来存储。每项都用应力增量来进行修改，但是项的数量在分析过程中是不变的，这就意味着存储和运行时间与应力增量的数量成线性关系。Dirichlet 级数的每一项可以视为在特征松弛时间的弹簧和阻尼器系统，用户可以尝试用不同数量的项来检查分析结果，以确定自己的选择是恰当的 |

推荐用户使用小型问题来代表自己的大型模型，并且对比各种数量的级数与完全积分的解答，以确定恰当的级数近似方法。

关于混凝土收缩、徐变计算公式也可以参见中国《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D—62—2004) 附录 F 中关于混凝土收缩应变和徐变系数计算部分内容。

材料阻尼属性

在材料属性数据对话框中点击【材料阻尼属性】按钮，弹出附加材料阻尼对话框(图 5-6)。



图 5-6 附加材料阻尼对话框

在对话框阻尼比输入域中输入材料附加阻尼比。此阻尼比用于结构动力分析，材料阻尼是对所有分析工况有相同影响的材料属性。

对于每一种材料，用户可指定一个材料模态阻尼比 r ， $0 \leq r < 1$ 。由此种材料的单元 j 贡献于振型 i 的阻尼比 r_{ij} 为：

$$r_{ij} = \frac{r \phi_i^T K_j \phi_i}{K_i}$$

(5-3)

式中： ϕ_i ——模态 i 的振动形状；
 K_j ——单元 j 的刚度矩阵；
 K_i ——模态 i 的模态刚度在模型中对所有单元 j 取和：

$$K_i = \sum_j \phi_i^T K_j \phi_i$$

(5-4)

应力-应变曲线定义

在材料属性数据对话框中点击【应力-应变曲线定义】按钮，弹出应力-应变曲线数据对话框（图 5-7）。对话框说明见表 5-9。

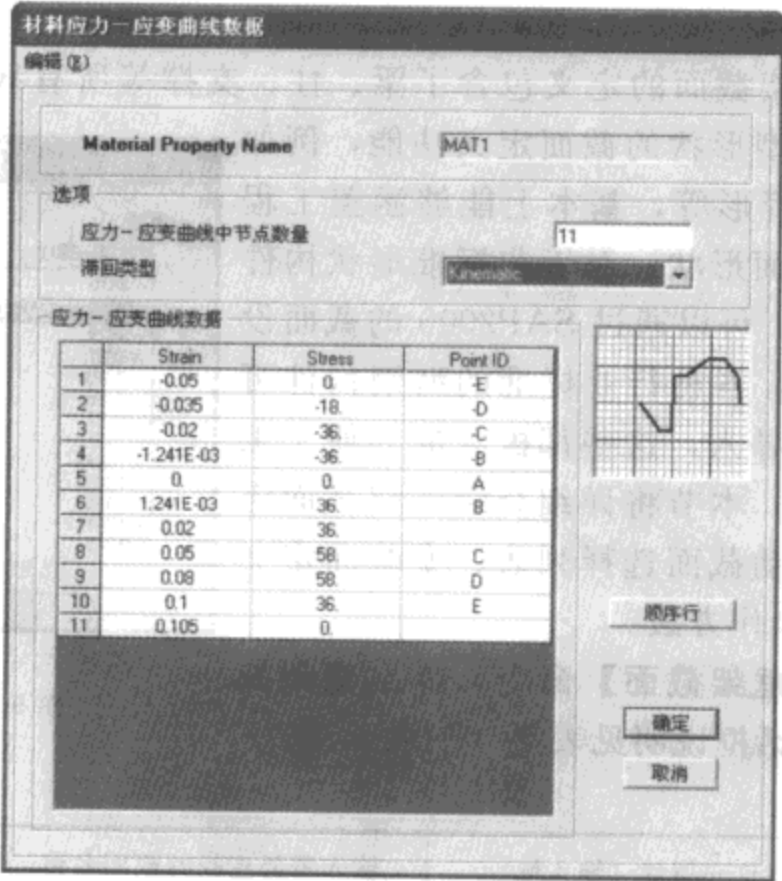


图 5-7 应力-应变曲线数据对话框

表 5-9

| Material Property Name | | 显示截面名称 |
|------------------------|--------------|------------------------------------|
| 选 项 | 应力-应变曲线中节点数量 | 显示/输入材料应力-应变曲线数据中控制坐标点的数量 |
| | 滞回类型 | 选择滞回曲线类型：Kinematic、Taketa、Pivot 曲线 |
| 应力-应变曲线数据 | Strain | 应变数据，用户可以修改 |
| | Stress | 应力数据，用户可以修改 |
| | Point ID | 曲线控制点的编号，用户可以修改。A 点总是原点 |

对每种材料都可以指定应力-应变曲线，该曲线用来生成框架单元中非线性铰的属性，用于 Pushover 分析。所有的曲线都具有 A、B、C、D、E 五个控制点。

(1) 点 A 总是原点。

(2) 点 B 代表屈服。无论对点 B 指定何种变形值，在上升到点 B 的过程中铰内没有变形。在点 B 的位移（转动）将从点 C、点 D、和点 E 的变形中减去。只有超过点 B 的塑性变形才被铰显现。

(3) 点 C 代表 pushover 分析的极限承载力。用户为其他目的可指定从 C 到 D 的正斜率。

(4) 点 D 代表 pushover 分析的残余强度。用户为其他目的可指定从 C 到 D 或从 D 到 E 的正斜率。

(5) 点 E 代表完全失效。超过点 E，铰将荷载降至在 E 点下水平轴的点 F（未显示）。若用户不想铰这样失效，要确认对在点 E 的变形指定一个大值。

5.2 框架截面定义

SAP2000 系统中框架截面的定义包含了梁、柱、支撑等所有线对象类型构件的截面。系统本身自带了多种典型形状的截面定义功能，例如工字形、槽形、角形、管形等，基本上能够涵盖工程中所有能够涉及到的截面形状。对于非标准形状构件截面或者组合构件截面，可以通过 SAP2000 的截面设计器进行自定义，此外，各种行业标准的型钢构件可以从外部型钢数据文件导入，这些都极大的方便了工程师对构件截面的定义。本节将详细介绍框架截面定义、外部文件导入、自动截面选择列表、变截面定义以及 SD 截面设计器的操作方法。

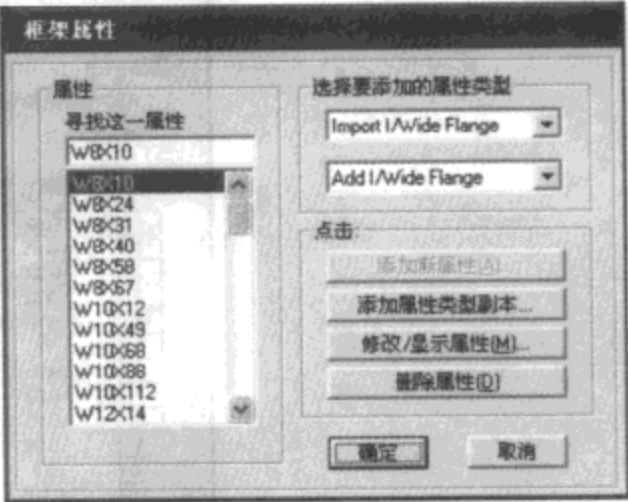


图 5-8 框架属性对话框

点击【定义】>【框架截面】命令，弹出框架属性对话框（图 5-8）。对话框说明见表 5-10～表 5-13。

表 5-10

| 属 性 | 寻找这一属性（输入域） | 输入需要查找的截面名称 |
|-----|-------------|-------------------------------|
| | 列表 | 显示所有 SAP2000 自带的和工程师定义的构件截面名称 |

选择要添加的属性类型——Import（导入）

表 5-11

| | | | |
|-----------------------|-------------|---------------|----------|
| Import I /Wide Flange | 导入工字形/宽翼缘截面 | Import Tee | 导入 T 形截面 |
| Import Channel | 导入槽形截面 | Import Angle | 导入角形截面 |
| Import Double Angle | 导入双角形截面 | Import Circle | 导入圆形截面 |

续上表

| | | | |
|--------------------|--------|--------------------|--------|
| Import BoX/TuBe | 导入箱形截面 | Import General | 导入一般截面 |
| Import Pipe | 导入管形截面 | Import Steel JoIst | 导入桁架截面 |
| Import Rectangular | 导入矩形截面 | | |

选择要添加的属性类型——Add (添加) 表 5-12

| | | | |
|----------------------|----------------|----------------------|-------------|
| Add I /Wide Flange | 添加工字形/宽翼缘截面 | Add PC Conc I Girder | 添加预制混凝土工字形梁 |
| Add Channel | 添加槽形截面 | Add General | 添加一般截面 |
| Add Tee | 添加 T 形截面 | Add Cold Formed C | 添加冷弯卷边槽钢 |
| Add Angle | 添加角形截面 | Add Cold Formed Z | 添加冷弯卷边 Z 形钢 |
| Add Double Angle | 添加双角形截面 | Add Cold Formed Hat | 添加冷弯向外卷边槽钢 |
| Add Box/Tube | 添加箱形截面 | Add Steel Joist | 添加桁架截面 |
| Add Pipe | 添加管形截面 | Add Auto select list | 添加自动截面选择列表 |
| Add Rectangular | 添加矩形截面 | Add SD Section | 添加截面设计器设计截面 |
| Add Circle | 添加圆形截面 | Add Nonprismatic | 添加变截面 |
| Add BU I Cover Plate | 添加带有盖板的组合工字形截面 | | |

点 击 表 5-13

| | |
|----------------------|--------------------------|
| Add Property | 弹出高亮显示截面类型属性对话框，用于添加截面 |
| Add Copy of Property | 弹出高亮显示截面类型属性对话框，用于添加截面副本 |
| Modify/Show property | 弹出截面类型属性对话框，用户可以进行修改 |
| Delete Property | 删除列表中高亮显示的截面 |

5.2.1 导入截面

SAP2000 中文版提供了包括中国规范在内的多国规范标准的型钢截面数据库文件。这些型钢截面数据库文件存在于 SAP2000 的安装目录下，以 .pro 为后缀名。目前已经进数据库的型钢类型包括：翼缘型钢、槽钢、角钢、圆钢管。工程师在定义截面时可以直接将数据文件导入使用。例如导入中国规范宽翼缘型钢表，在框架属性对话框中，在最初显示为 **Import I / Wide Flange** 的下拉框右侧三角符号处点击鼠标左键，弹出下拉菜单选项，在菜单中选择 **Import I / Wide Flange** (图 5-9)。



图 5-9 定义框架属性对话框

在 SAP2000 安装目录下可以看到所有程序自带的截面属性文件。表 5-14 列出的是各数据文件的含义。

表 5-14

| | | | |
|----------------|----------------------|----------------|--------------|
| AA6061-T6. pro | AA 标准 6061-T6 压型铝材截面 | Chinese. pro | 中国标准型钢 |
| AISC13. pro | 美国钢结构协会型钢 V13 | CISC. pro | 加拿大钢结构协会型钢 |
| AISC13M. pro | 美国钢结构协会型钢 V13M | Euro. pro | 欧洲型钢 |
| AISC3. pro | 美国钢结构协会型钢 V3 | Indian. pro | 印度标准型钢 |
| AISC. pro | 美国钢结构协会型钢 | Joists. pro | 钢桁架梁协会型钢 |
| AusNZV8 | 澳大利亚及新西兰标准型钢 | Sections. pro | 美国钢结构协会型钢 V2 |
| BSShapes. pro | 英国标准型钢 | Sections8. pro | 美国钢结构协会型钢 V3 |

打开 Chinese. pro 文件,弹出型钢列表对话框(图 5-10)。

在对话框的列表区域中,列出 Chinese. pro 文件中所有截面类型为 I / Wide Flange(工字钢/宽翼缘工字钢)的型钢截面。其中的截面根据行业标准分为国标(GB)、冶标(YB)和行业规范标准。具体标注格式可以参看相应规范标准。

在表格中可以导入一个或者一组型钢截面名称,例如选择 GB-HM600×300×12×20,点击【确定】按钮,弹出 I / Wide Flange 截面对话框(图 5-11)。对话框说明见表 5-15~表 5-20。



图 5-10 型钢列表对话框

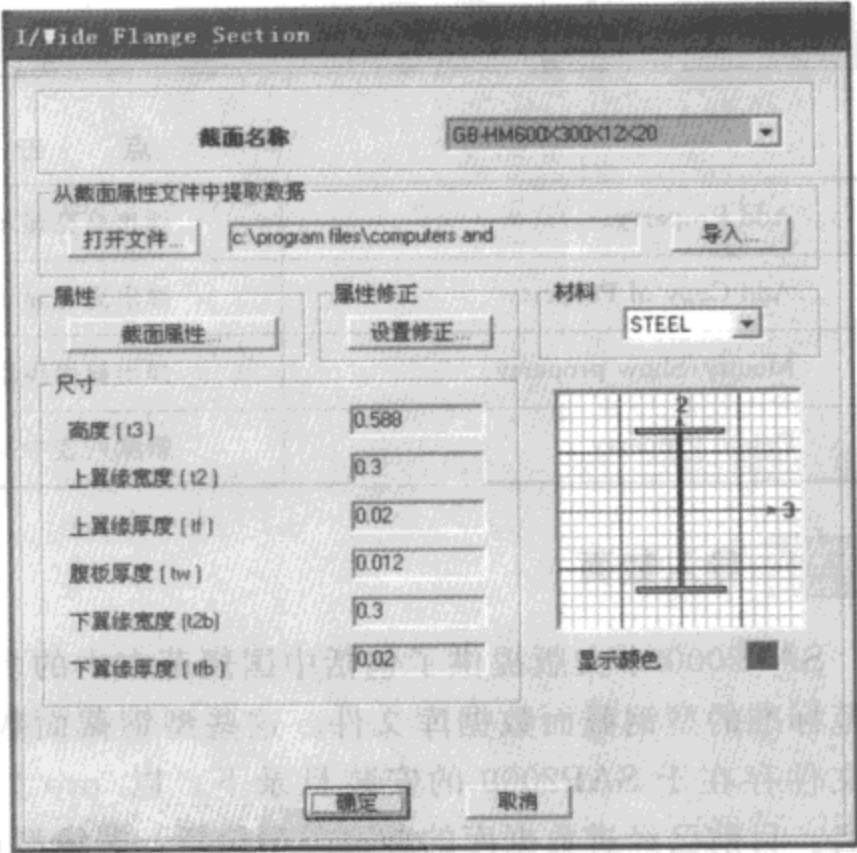


图 5-11 I / Wide Flange 截面对话框

截 面 名 称 表 5-15

| | |
|------|-----------|
| 截面名称 | 显示型钢截面的名称 |
|------|-----------|

从截面属性文件中提取数据 表 5-16

| | |
|------|---------------------------|
| 打开文件 | 按钮后的显示框中显示打开文件的路径 |
| 导入 | 点击则打开显示框中显示的截面数据文件,导入截面数据 |

属 性

表 5-17

| | |
|------|------------------------------|
| 截面属性 | 点击弹出属性数据对话框(图 5-14),显示截面属性数据 |
|------|------------------------------|

属 性 修 正

表 5-18

| | |
|------|-------------------------------------|
| 设置修正 | 点击弹出分析属性修正系数对话框(图 5-15),为截面属性指定修正系数 |
|------|-------------------------------------|

材 料

表 5-19

| | |
|-----|----------------|
| 下拉框 | 列出材料名称,为截面指定材料 |
|-----|----------------|

尺 寸

表 5-20

| | | | |
|-------|----------|-------|----------|
| 高度 | 显示梁高度 | 腹板厚度 | 显示腹板厚度 |
| 上翼缘宽度 | 显示上部翼缘宽度 | 下翼缘宽度 | 显示下部翼缘宽度 |
| 上翼缘厚度 | 显示上部翼缘厚度 | 下翼缘厚度 | 显示下部翼缘厚度 |

在此对话框中显示型钢的具体尺寸,在材料区域中选择该截面的材料。点击【截面属性】按钮查看型钢截面的几何特性。点击【设置修正】按钮可以设置分析属性的修正系数。关于修正系数将在下一节介绍。

其他型钢导入的具体操作步骤与上述基本相同,这里不再赘述。

5.2.2 一般截面定义

一般截面定义是指在框架属性对话框添加列表中提供给用户的各种形状的等截面定义 (图 5-12)。

用户在下拉列表中选择形状名称,进行自定义截面。例如添加混凝土矩形截面时,在下拉菜单中选择 Add Rectangular, 点击【添加新属性】按钮,弹出 Rectangular Section 对话框(图 5-13)。对话框说明见表 5-21~表 5-27。

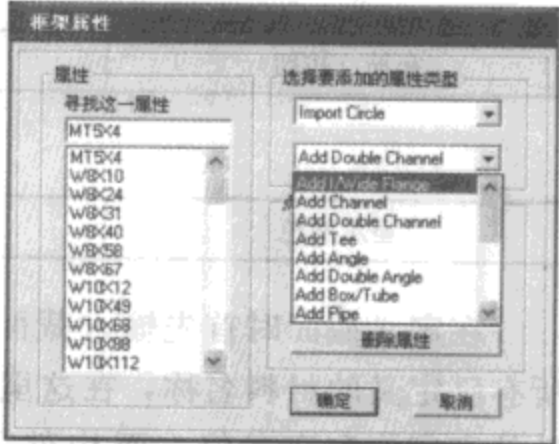


图 5-12 框架属性对话框

截 面 名 称 表 5-21

| | |
|------|-----------------|
| 截面名称 | 显示默认截面名称,用户可以修改 |
|------|-----------------|

属 性 表 5-22

| | |
|-----------|--------------------|
| 截面属性 (按钮) | 弹出属性数据对话框 (图 5-15) |
|-----------|--------------------|

属 性 修 正 表 5-23

| | |
|-----------|------------------------|
| 设置修正 (按钮) | 弹出分析属性修正系数对话框 (图 5-16) |
|-----------|------------------------|

材 料 表 5-24

| | |
|-----|-------------------------|
| 下拉框 | 列出所有已经定义过的材料名称,可以选择截面材料 |
|-----|-------------------------|

尺 寸

表 5-25

| | | | |
|----|---------------------|----|---------------------|
| 高度 | 输入截面高度 (即视图中 2 轴方向) | 宽度 | 输入截面宽度 (即视图中 3 轴方向) |
|----|---------------------|----|---------------------|

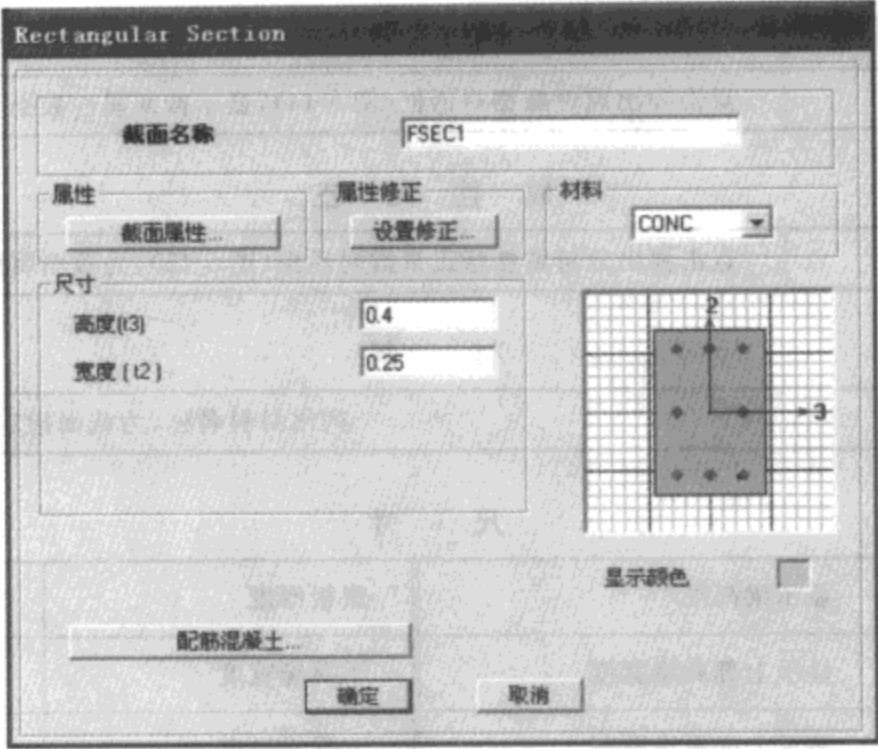


图 5-13 Rectangular Section 对话框

混凝土（材料选择混凝土） 表 5-26

| | |
|--------|-------------------|
| 布筋（按钮） | 弹出布筋数据对话框（图 5-16） |
|--------|-------------------|

显 示 颜 色 表 5-27

| | |
|------|--------------------------|
| 显示颜色 | 点击色框弹出颜色编辑器，修改此截面构件的显示颜色 |
|------|--------------------------|

在定义截面时首先输入截面名称，然后在材料类型下拉框中指定材料。下拉菜单包含所有已定义的材料名称，在这里选择混凝土材料，例如 CONC。在截面尺寸输入域键入构件的高度值和宽度值，而构件的类型（柱、梁）则通过对话框下面的【布筋】按钮指定。

输完截面尺寸后，SAP2000 会自动计算各项截面特性。在 Rectangular Section 对话框中，点击【截面属性】按钮，弹出属性数据对话框（图 5-14）。

在对话框中显示截面面积、关于各局部坐标轴的惯性矩等截面特性值。其中 2 轴、3 轴是指构件的局部坐标轴（参见图 5-13Rectangular Section 对话框中的截面视图）。

系统允许对截面惯性矩、横截面面积和抗剪面积等特性值进行调整。如果需要调整时，则点击【设置修正】按钮，弹出属性/刚度修正系数对话框（图 5-15）。

在此对话框中，属性/刚度修正系数区域中的各项右侧显示的是修正系数，系统参与计算的截面特性值等于属性数据中显示的各截面特性值乘以这一对话框中显示的各对应项的系数。例如将惯性矩指定为零，可以模拟弯矩释放；在横截面面积输入 3，将截面积放大 3 倍，可以模拟提高杆件轴向刚度。

此处的属性/刚度修正系数对话框与【指定】>【框架/索/钢束】>【属性修正】命令对话框完全相同。如果对截面定义属性/刚度修正系数对话框和【指定】>【框架/索/钢束】>【属性修正】命令对话框中的系数都进行了修改，则这两个系数会相乘。两种属性系数修

正方法的区别在于修正的对象不同。截面定义的属性修正应用于所有具有该种截面属性的构件；而【指定】>【框架/索/钢束】>【属性修正】命令的属性修正是针对于用户选择的个别构件。简言之，如果工程师选择在先前截面定义中作了属性修正的线对象，使用【指定】>【框架/索/钢束】>【属性修正】命令再一次进行属性修正，则该线对象在原截面修正的基础上再一次修正。

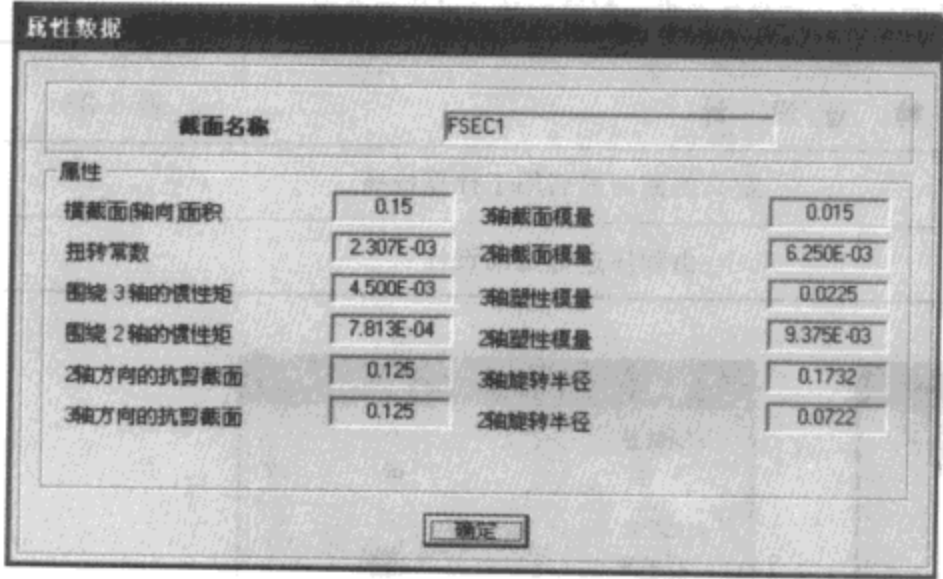


图 5-14 属性数据对话框

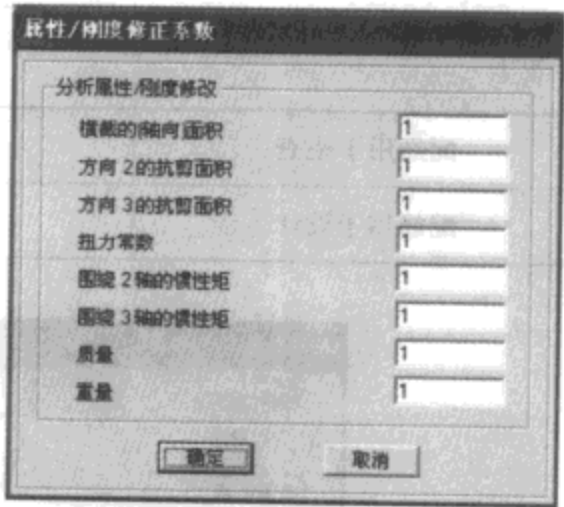


图 5-15 属性/刚度修正系数对话框

在 Rectangular Section 对话框中，如果材料区域选择了混凝土，则对话框中增加混凝土截面区域，点击【布筋】按钮，弹出布筋数据对话框（图 5-16）。对话框说明见表 5-28～表 5-33。

设计类型 表 5-28

| | |
|---|----------------|
| 柱 | 对话框为柱的布筋数据输入方式 |
| 梁 | 对话框为梁的布筋数据输入方式 |

布筋配置 表 5-29

| | |
|----|--------|
| 矩形 | 矩形截面布筋 |
| 圆形 | 圆形截面布筋 |

横 向 布 筋 表 5-30

| | |
|-----|-----------------------|
| 绑扎 | 箍筋为绑扎钢筋形式 |
| 螺旋的 | 箍筋为螺旋箍筋形式。选择圆形截面布筋时有效 |

矩 形 布 筋 表 5-31

| | |
|--------------|---|
| 到钢筋中心的混凝土保护层 | 输入柱边缘至钢筋中心的距离。默认值取柱截面深（高）度的 1/10。在圆形柱布置矩形配筋这种特殊情况下，保护层取为从柱的边缘到矩形配筋框的角部钢筋中心的最小距离 |
| 3 轴方向的钢筋数 | 柱的平行于截面局部 3 轴坐标的纵向配筋数量（包括角部钢筋） |
| 2 轴方向的钢筋数 | 柱的平行于截面局部 2 轴坐标的纵向配筋数量（包括角部钢筋） |
| 钢筋尺寸 | 输入截面上配筋的钢筋尺寸。中国规范钢筋为 *d 形式，例如 20d（直径 20mm） |

圆 形 布 筋

表 5-32

| | |
|-----------|--|
| 到钢筋中心的混凝土 | 输入柱边缘至钢筋中心的距离。在圆形柱布置矩形配筋这种特殊情况下，保护层取为从柱的边缘到矩形配筋框的角部钢筋中心的最小距离 |
| 3 轴方向的钢筋数 | 柱的平行于截面局部 3 轴坐标的纵向配筋数量（包括角部钢筋） |
| 2 轴方向的钢筋数 | 柱的平行于截面局部 2 轴坐标的纵向配筋数量（包括角部钢筋） |

检 查/设 计

表 5-33

| | |
|--------|---------------|
| 配筋用于检查 | 定义的截面配筋用于计算校核 |
| 配筋用于设计 | 由程序进行配筋设计 |

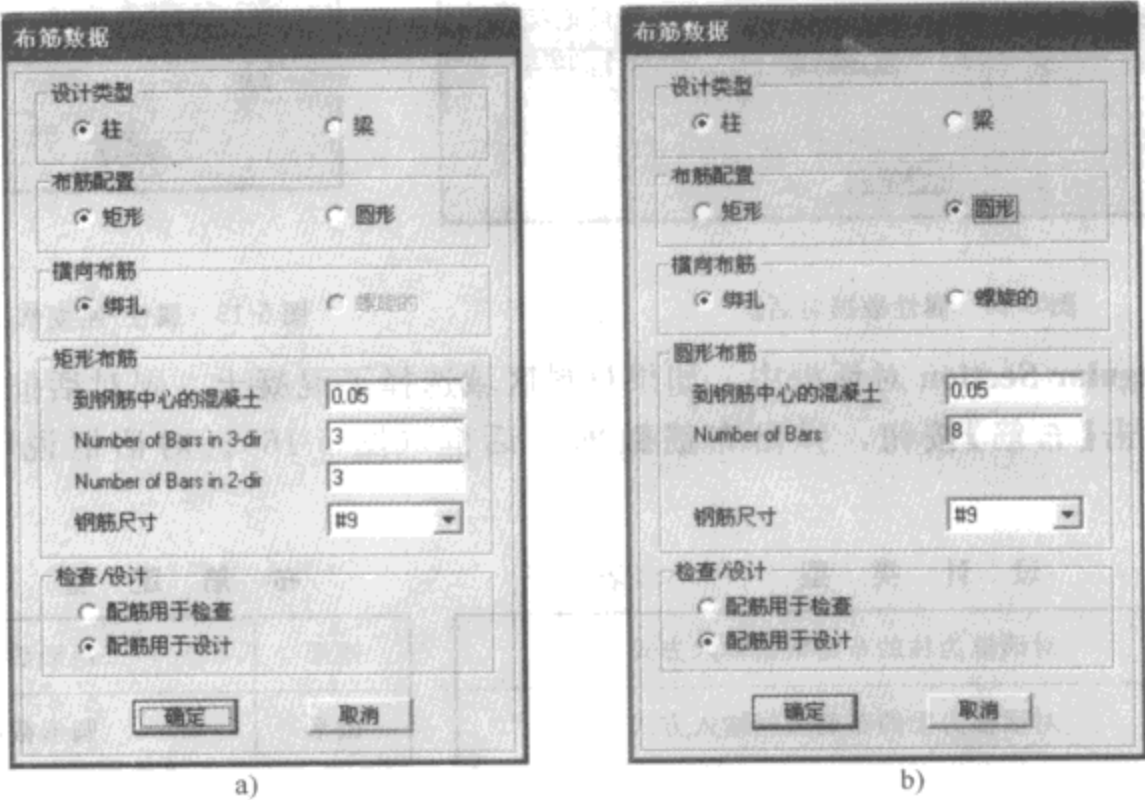


图 5-16 布筋数据对话框
a) 矩形布筋；b) 圆形布筋

在此对话框中指定截面布筋的形式。在设计类型区域中需要选择定义的截面是柱截面还是梁截面。选择柱时，布筋数据对话框如图 5-16 所示，纵向筋又分为矩形布筋（图 5-16a）和圆形布筋方式（图 5-16b）。纵向钢筋矩形布置时，横向钢筋只能为绑扎式；纵向钢筋圆形布置时，横向钢筋可为绑扎式或螺旋式。在矩形（圆形）布筋设置区中指定保护层厚度（至钢筋中心）、钢筋根数和钢筋尺寸。工程师可以指定构件配筋是用于设计还是用于检查。如果用于检查，则指定的钢筋总面积（尺寸和根数）将参与设计计算并进行校核；如果用于设计，除忽略钢筋尺寸外，将使用配筋数据对话框中的所有信息，并且计算全部所需的钢筋面积。

设计类型选择为梁时，布筋数据对话框变为如图 5-17 所示。对话框说明见表 5-34、表 5-35。

到钢筋中心的混凝土保护层厚度

表 5-34

| | |
|---|-----------------------------------|
| 顶 | 输入梁上层钢筋中心至梁上层边缘距离。默认值取梁截面高度的 1/10 |
| 底 | 输入梁下层钢筋中心至梁下层边缘距离。默认值取梁截面高度的 1/10 |

延性梁的布筋覆盖项

表 5-35

| | |
|---|----------------------------------|
| 顶 | 指定梁顶部左右两端纵向配筋的钢筋面积。若此处为零值时，由程序计算 |
| 底 | 指定梁底部左右两端纵向配筋的钢筋面积。若此处为零值时，由程序计算 |

在此对话框中，输入梁钢筋保护层厚度。

延性梁的布筋覆盖项指梁的左端与右端处顶部和底部所配纵向配筋的截面面积。SAP2000 中所使用的这些覆盖项作用如下：

(1) 混凝土框架设计后处理器中

当在混凝土梁中设计抗剪是基于所提供的纵向配筋（即抗剪设计基于梁的抗弯承载力）时，SAP2000 将计算的所需钢筋与在配筋覆盖项中所定义的配筋进行比较，并取较大值以确定抗剪设计所依据的抗弯承载力。

当梁的跨中 最小配筋 是基于梁端部配筋的某个百分比时，SAP2000 将计算的所需梁端配筋与在配筋覆盖项中所定义的配筋进行比较，并取较大值以确定梁的跨中 最小配筋。

当柱的抗剪设计是基于梁传递给柱的最大弯矩值时，SAP2000 将计算所需的梁端配筋与在配筋覆盖项中所定义的配筋进行比较，并取较大值以确定梁的抗弯承载力。

(2) 框架非线性铰属性中

当把作为默认值定义的任何自由度指定给一个混凝土构件时，SAP2000 基于计算的在梁两端的配筋（假定使用混凝土框架设计后处理器完成设计）和指定的配筋覆盖项所定义的配筋进行比较，并取较大值，计算力-变形属性。

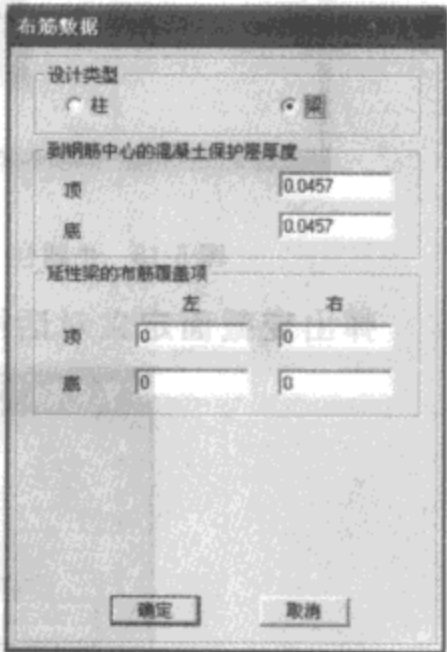


图 5-17 布筋数据对话框

5.2.3 变截面定义

工程实际中经常遇到截面沿构件长度方向变化的构件，例如混凝土牛腿柱、钢结构中带端板的梁。SAP2000 提供了定义变断面构件的功能。

以定义牛腿柱为例（图 5-18）介绍变截面定义的具体操作步骤。

定义如图 5-18 所示牛腿柱。牛腿柱在 A、B、C、D 四个断面处均为矩形截面，AB 段截面为 SEC1（截面尺寸 500mm×300mm）；BC 段由 SEC1 线性变为 SEC2（截面尺寸 800mm×300mm）；CD 段为 SEC2。下面介绍变截面的定义方法。

需要注意，在定义变截面之前，先要按照之前介绍的一般截面定义方法定义 2 个控制截面 SEC1、SEC2。确定层高定义与柱高相同，本例层高 3800mm。

在框架属性对话框中，点击最初显示为 Add I/ Wide Flange 下拉框，弹出下拉菜单。点

击下拉框右侧向下的【箭头】按钮，选择 Add Nonprismatic（图 5-19）。

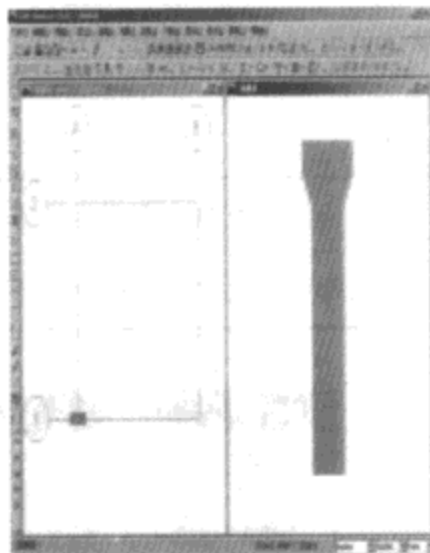


图 5-18 牛腿柱



图 5-19 选择 Add Nonprismatic

弹出变截面定义对话框（图 5-20）。对话框说明见表 5-36、表 5-37。

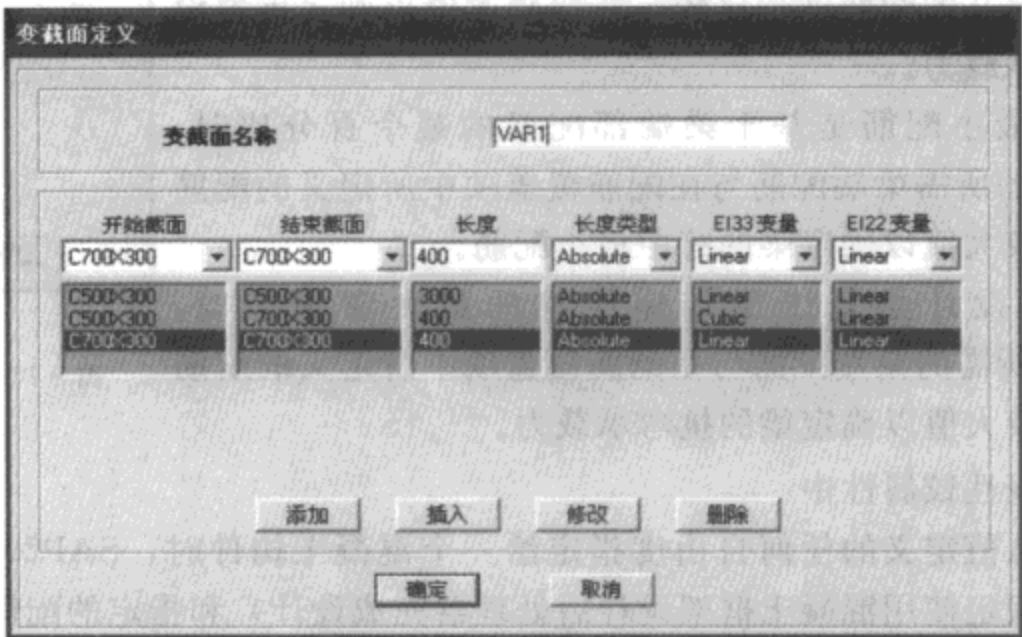


图 5-20 变截面定义对话框

表 5-36

| | |
|-----------|---|
| 变截面名称 | 输入变截面的名称 |
| 开始截面（下拉框） | 选择构件的起始截面 |
| 结束截面（下拉框） | 选择构件的结束截面 |
| 长度 | 输入长度范围。分为比例值和绝对值，由下一参数长度类型决定 |
| 长度类型（下拉框） | 变量：输入的长度值为该截面段占构件总长度的比例 绝对：输入的长度值为该截面段的实际长度 |
| EI33 变量 | 局部坐标轴 3-3 方向 EI 值的变化规律。线性：截面间呈线性变化；抛物线：截面间呈平方关系变化；三次方：截面间呈 3 次方关系变化 |
| EI22 变量 | 局部坐标轴 2-2 方向 EI 值的变化规律。线性：截面间呈线性变化；抛物线：截面间呈平方关系变化；三次方：截面间呈 3 次方关系变化 |

| | |
|----|----------------------------|
| 添加 | 点击则将输入域中的数据添加到变截面列表 |
| 插入 | 点击则将输入域中的数据安插在列表中高亮显示的截面位置 |
| 修改 | 点击则将输入域中的数据覆盖至高亮显示的截面 |
| 删除 | 点击则删除列表中高亮显示的变截面 |

在变截面定义对话框的变截面名称输入域中输入变截面名称。构件的两端分别为 I 和 J。构件的局部坐标轴从 I 指向 J。输入的顺序为从 I 到 J，一段一段的输入。表格的每行代表构件各段的截面数据。如图 5-20 所示，输入顺序为 AB、BC、CD 段，共三行数据。首先在开始截面下拉框中选择 SEC1；结束截面也为 SEC1；其长度为一个固定值 3000mm，在长度编辑框中输入 3000；长度类型选择绝对。此段 SAP2000 会自动判断开始截面和结束截面是否相同， EI_{33} 和 EI_{22} 是否不变。可以在 EI_{33} 变量和 EI_{22} 变量不做任何选择。点击【添加】按钮，输入域中的数据会自动列于下面的表格中。

然后再输入 BC 段的数据。在开始截面中选择 SEC1；在结束截面出选择 SEC2；长度输入 400；长度类型为绝对。因为 BC 段截面沿 2 轴方向截面高度 h 线性变化，根据 $EI_{22} = E \frac{hb^3}{6}$ ； $EI_{33} = E \frac{bh^3}{6}$ 。因为 b 不变， h 线性变化，所以 EI_{22} 线性变化； EI_{33} 三次方关系变化。在 EI_{33} 变量中选择三次方；在 EI_{22} 变量中选择线性。点击【添加】按钮，将该段数据列于表中下面一行。

最后，输入 DC 段的数据。开始截面选择 SEC2；结束截面选择 SEC2；长度输入 400；长度类型为绝对； EI_{22} 变量和 EI_{33} 变量选择线性变化。点击【添加】按钮，将该段数据列于表中下面一行。

这里长度类型有两种选择，一个是绝对，表示绝对长度；一个是变量，表示相对长度。相对长度的定义可以使所定义的变截面类型适合于不同长度的构件。 EI 变化的设置针对截面的形状而定，例如一个矩形截面宽度的一个线性变化导致 EI_{33} 线性变化，一个矩形截面高度的一个线性变化导致 EI_{33} 三次方变化，一个 I 型高度的一个线性变化导致 EI_{33} 抛物线变化。除了 EI_{33} 与 EI_{22} 之外其余的刚度属性，总被假定在每个分段两端之间线性变化；类似，质量和重量密度总是假定在每个分段两端之间线性变化。

参数设置完成后，按【确定】键，变截面名称将被添加进截面列表中。

定义变截面梁的方法与定义变截面柱的方法相同。

5.2.4 自动截面选择列表定义

对于钢结构设计，SAP2000 提供了优化设计功能。用户可以为框架构件指定一组截面，由程序自动优化选择截面，这一组截面便称为自动选择截面。

在框架属性对话框中，点击最初显示为 Add I/ Wide Flange 下拉框，弹出下拉菜单（图 5-21）。点击下拉框右侧向下的【箭头】按钮，选择 Add Auto Select List。

弹出自动选择截面对话框（图 5-22）。对话框说明见表 5-38～表 5-40。

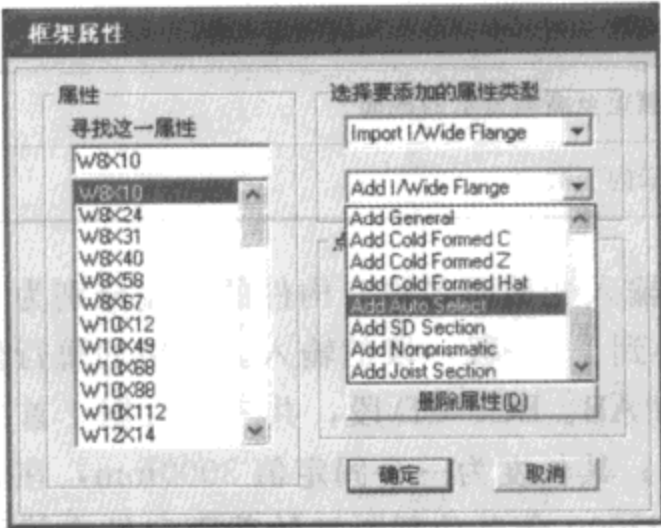


图 5-21 定义框架属性对话框

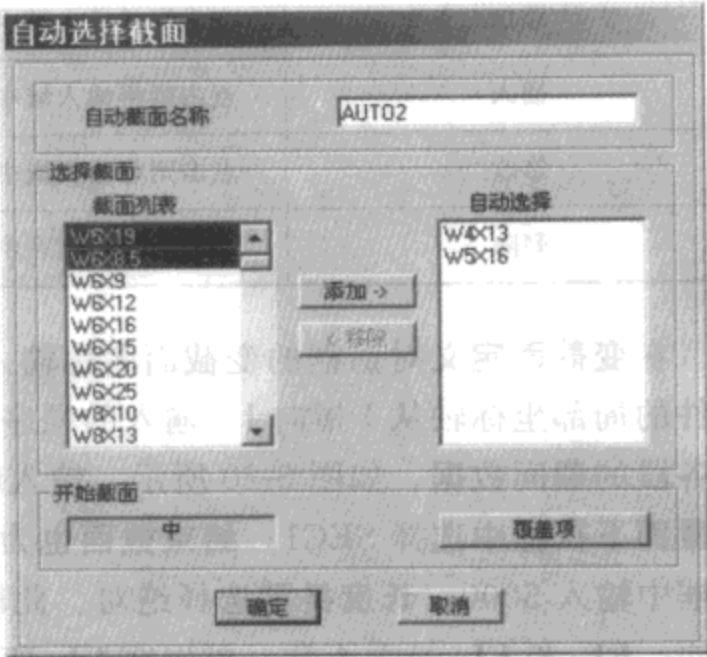


图 5-22 自动选择截面对话框

自动截面名称 表 5-38

| | |
|--------|-----------------|
| 自动截面名称 | 显示默认自动截面名称，可以修改 |
|--------|-----------------|

选择截面 表 5-39

| | |
|------|---------------------|
| 截面列表 | 显示所有程序默认的以及自定义的截面名称 |
| 自动选择 | 显示该自动截面列表中所有构件截面名称 |

开始截面 表 5-40

| | |
|---------|---|
| 显示域 | 显示分析自动列表中起始设计截面名称或者位置。程序默认列表中的中间截面为起始截面 |
| 覆盖项（按钮） | 弹出选择截面对话框（图 5-23） |

首先在自动截面名称的编辑栏中输入自动选择截面的名称。选择截面区域中左侧的截面列表中显示出所有定义的材料为钢材的截面名称，点击【添加】按钮，截面进入自动选择列表。自动选择列表中的截面就是定义的这组自动选择截面中的截面。如果选择不相邻的多个截面，在选择截面时按下 Ctrl 键；如果是选择连续排列的截面，按下鼠标左键拖拽选择截面。选择的截面全部是高亮显示，点击【添加】按钮后，这些截面将移动到右侧自动选择列表中。如果要从自动选择列表中移除不需要的截面，则选择截面名称，点击【移除】按钮，这些截面将移动到左侧的截面列表中。

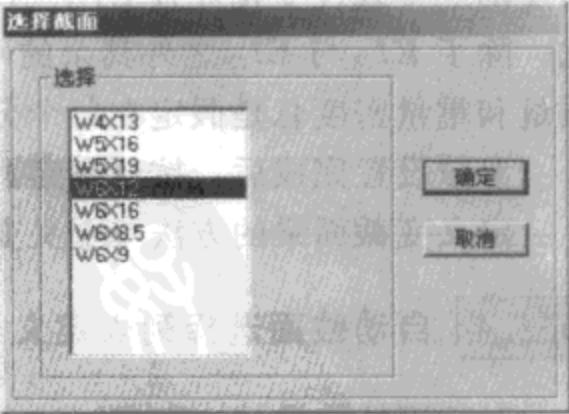


图 5-23 选择截面对话框

系统默认从自动选择列表的中间截面开始迭代计算。用户可以指定开始截面，点击开始截面区域中的【覆盖项】按钮，弹出选择截面对话框（图 5-23）。

在选择截面对话框的选择区域中，在指定为开始截面的截面名称上单击鼠标左键，高亮

显示该截面，点击【确定】按钮，退回到自动选择截面对话框，可以看到，开始截面区域中显示出该截面的截面名称。

最后，在自动选择截面对话框中点击【确定】按钮，退回到定义框架属性对话框，定义的自动选择截面名称自动高亮显示在属性区域的列表中。在绘制构件时，就可以将自动选择截面属性指定给钢框架构件，在绘制构件的章节中我们将会介绍自动选择截面的使用方法。

5.2.5 截面设计器定义截面

SAP2000 系统中提供了 Section Designer 截面编辑器，工程师可以定义任意形状的截面。通过截面编辑器定义的截面简称 SD 截面。SD 截面可以由同一种材料构成，也可以是组合截面。

在框架属性对话框中点击最初显示为 Import I / Wide Flange 的下拉框，弹出下拉菜单选项，在菜单中选择 Add SD Section 选项，点击【添加新属性】按钮(图 5-24)。

弹出 SD 截面数据对话框 (图 5-25)。对话框说明见表 5-41~表 5-45。

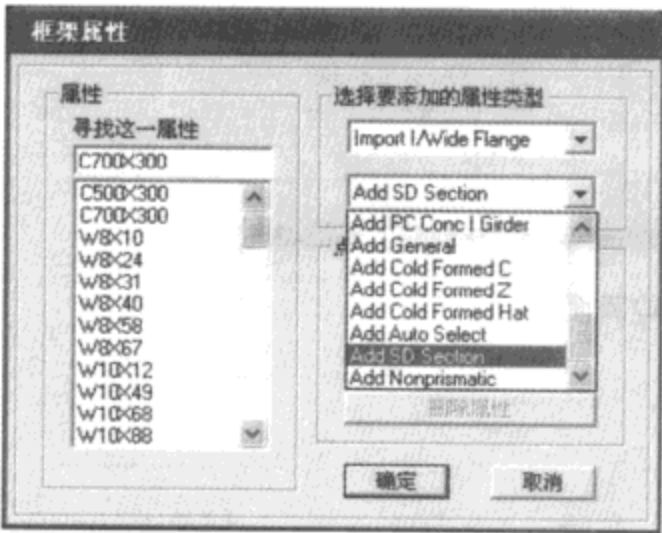


图 5-24 定义框架属性对话框

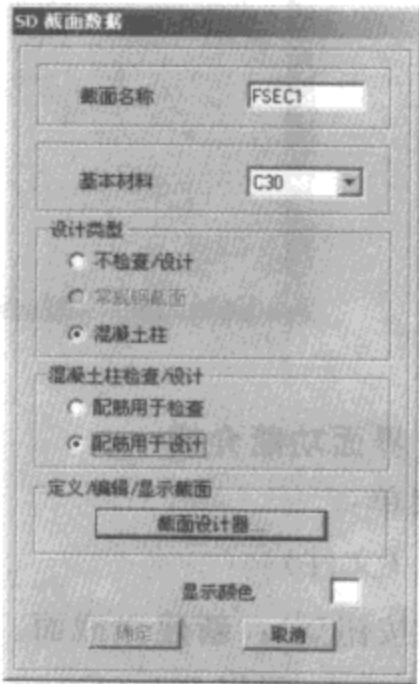


图 5-25 SD 截面数据对话框

截面名称 表 5-41

| | |
|------|-----------|
| 截面名称 | 显示/输入截面名称 |
|------|-----------|

基本材料 表 5-42

| | |
|------|-------------|
| 基本材料 | 选择指定截面的基本材料 |
|------|-------------|

设计类型 表 5-43

| | |
|--------|----------------------------------|
| 不检查/设计 | 不进行校核或设计 |
| 常规钢截面 | 由钢框架设计后处理器按一般截面设计 |
| 混凝土柱 | 由混凝土框架设计后处理器设计。选择该项激活混凝土柱检查/设计选项 |

混凝土柱检查/设计

表 5-44

| | |
|--------|----------------|
| 配筋用于检查 | 用于校核计算 |
| 配筋用于设计 | 使用设计后处理器进行配筋设计 |

定义/编辑/显示截面

表 5-45

| | |
|-----------|-------------------|
| 截面设计器（按钮） | 进入截面设计器界面（图 5-26） |
|-----------|-------------------|

点击【截面设计器】按钮，运行截面设计器程序。弹出 CSISD 界面（图 5-26）。

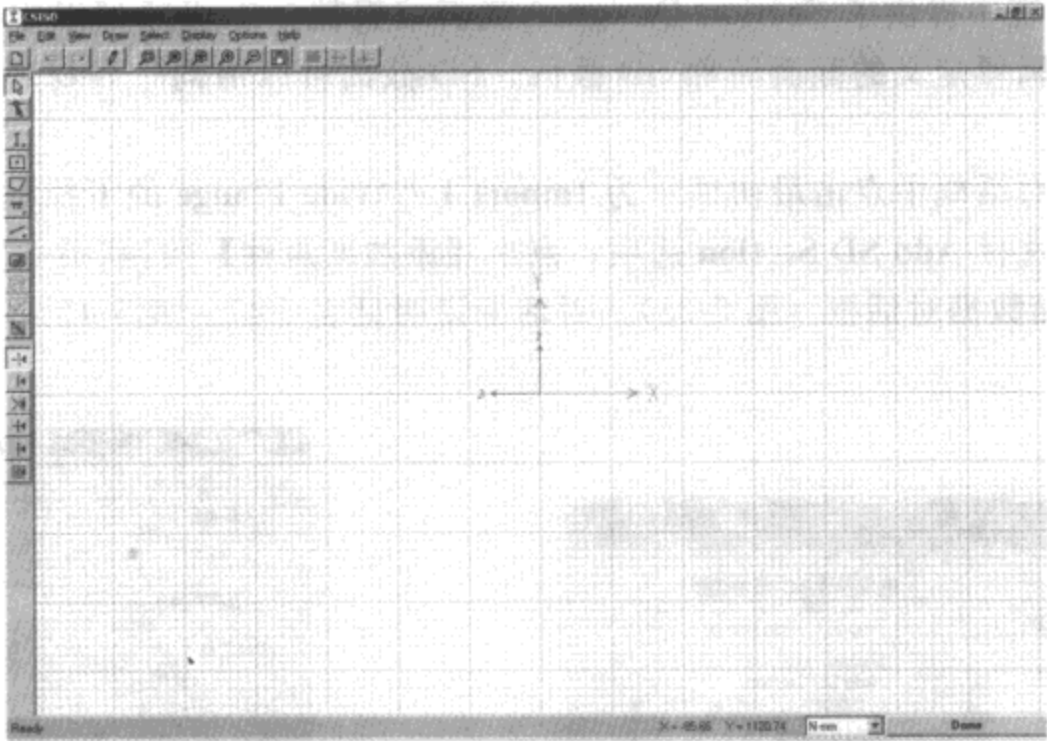


图 5-26 CSISD 界面

CSISD 界面功能介绍

命令菜单：

➤ File（文件）

New（按钮）：新建立截面。如果绘图区已有截面，点击则覆盖绘图区已有的截面。

Print Setup：弹出 **Print Setup** 对话框，进行打印设置。在 **Print Setup** 对话框中，可以设置页边距、标题、打印机、用纸大小及方向等。这些设置仅在截面设计器中有效，对 SAP2000 的打印设置无效。

Print Graphics：打印当前显示的截面图形。

➤ Edit（编辑）

Undo（按钮）：撤销命令。

Redo（按钮）：恢复命令。

Delete：删除选择的对象。工程师也可以在选择对象后按键盘 **Delete** 键进行删除操作。

Align：对齐命令。以第一个选择的对象为对齐基准。操作时，先点击选择的第一个对象，其他对象可以点击或者窗选。

水平方向：

Left：选择的所有对象对齐到第一个选择对象的左边缘。

Center: 选择的所有对象对齐到第一个选择对象的水平方向中心点。

Right: 选择的所有对象对齐到第一个选择对象的右边缘。

垂直方向:

Top: 选择的所有对象对齐到第一个选择对象的顶边缘。

Middle: 选择的所有对象对齐到第一个选择对象的垂直方向中心点。

Bottom: 选择的所有对象对齐到第一个选择对象的底边缘。

Change Shape To Poly: 将选择的结构形状和实体形状转换为多边形。当结构形状和实体形状转换为多边形后,可将其角点进行任意拖拽,改变形状。

Change Bar Shape To Single Bar: 将线形、矩形、多边形及圆形样式附加的布筋修改为一系列单根钢筋形。

Merge Areas: 将两个有重叠的形状合并为一个形状。此命令在选择了两个形状时有效。


Get Area Inter Section: 将两个有重叠的截面保留相交部分。此命令在选中两个截面时有效。


Get Area DifferenCes: 两个形状之间有重叠部分,保留重叠之外的部分。此命令在选中两个截面时有效。


Remove Overlapping Area: 两种不同材料的形状搭接时,删除先绘制形状中搭接的部分。


Check Section: 检查截面、提示警告信息。


➤ **View (视图)**

Rubber band (按钮): 窗选局部放大命令。放大显示窗选的范围。

Restore Full View (按钮): 恢复全视图命令。在截面设计器窗口中可以看到全部截面。

Previous Zoom (按钮): 恢复上一次缩放命令,恢复到上一次缩放的设置中。此命令只恢复一次缩放操作。


Zoom In One Step (按钮): 单步放大命令。SAP2000 默认自动缩放步长为 10%,每点击一次,截面放大 10%。缩放步长可以使用【Options】>【Preferences】命令进行修改。

Zoom Out One Step (按钮): 单步缩小命令。SAP2000 默认自动缩放步长为 10%,每点击一次,截面缩小 10%。缩放步长可以使用【Options】>【Preferences】命令进行修改。

Pan (按钮): 平移视图命令。在视图中单击并且按下鼠标左键,拖动平移视图。在视图边界以外的距离可以使用【Options】>【Preferences】命令进行修改。每点击此命令一次只执行一次操作。


Show Guide Lines: 轴网线显示开关。

Show Axes: 截面局部坐标轴和设计器坐标轴显示开关。

Refresh Window (按钮): 刷新窗口命令。


➤ **Draw (绘图)**

Select Mode (按钮): 选择对象命令。可以从绘图模式切换到选择模式。

Reshape Mode (按钮

Draw Structural Shape: 绘制结构形状, 命令及按钮说明见表 5-46。

Draw Solid Shape: 绘制实体形状, 命令及按钮说明见表 5-47。

Draw Poly Shape (按钮

Draw Reinforcing Shape: 绘制钢筋, 命令及按钮说明见表 5-48。

表 5-46

| 命 令 | 按 钮 | 绘 制 对 象 |
|---------------|---|-----------|
| I/Wide Flange |  | 工字形/宽翼缘截面 |
| Channel |  | 槽形截面 |
| Tee |  | T 形截面 |
| Angle |  | 角形截面 |
| Double Angle |  | 双角形截面 |
| Box/Tube |  | 箱形截面 |
| Pipe |  | 管形截面 |
| Plate |  | 板截面 |

表 5-47

| 命 令 | 按 钮 | 绘 制 对 象 |
|-----------|---|---------|
| Rectangle |  | 矩形截面 |
| Circle |  | 圆形截面 |
| Segment |  | 弓形截面 |
| Sector |  | 扇形截面 |

表 5-48

| 命 令 | 按 钮 | 绘 制 对 象 |
|-----------------|---|---------|
| Single Bar |  | 单根布筋 |
| Line pattern |  | 线形布筋 |
| Rectangular Bar |  | 矩形布筋 |
| Circular Bar |  | 圆形布筋 |







Draw Reference Lines: 绘制参考线, 命令及按钮说明见表 5-49。

表 5-49

| 命 令 | 按 钮 | 绘 制 对 象 |
|-----------------------|---|---------|
| Draw Reinforce Line |  | 直线参考线 |
| Draw Reinforce Circle |  | 圆形参考线 |

Snap To: 捕捉到……。设置捕捉各种特殊的点, 命令及按钮说明见表 5-50。

表 5-50

| 命 令 | 按 钮 | 捕 捉 对 象 |
|------------------------------------|---|---------------------------|
| Guideline Inter Sections and Point |  | 轴网线交点和角点、端点与形状的中心点 |
| Line Ends and MidPoint |  | 形状边线的端点和中点 |
| Line interSections |  | 线的交点或与形边线的交点 |
| Perpendicular Projections |  | 线段的垂足 |
| Lines and Edges |  | 轴网线、线和形状的边线 |
| Fine Grids |  | 细分的轴网点, 这些点的间距可由细分轴网间距项控制 |

Constrain Draw Line To: 绘制线控制, 命令说明见表 5-51。

➤ **Select** (选择)

Select: 选择, 命令及按钮说明见表 5-52。

表 5-51

| 命 令 | 按 钮 | 控 制 对 象 |
|----------------|-----|----------|
| None | | 无 |
| Constant X | | 恒定 X 轴分量 |
| Constant Y | | 恒定 Y 轴分量 |
| Constant Angle | | 恒定角度 |

表 5-52

| 命 令 | 按 钮 | 选 择 方 式 |
|-----------------------|-----|-----------|
| Point/window | | 单击左键选择或窗选 |
| Inter Section line | | 相交线选择 |
| All | | 选择全部对象 |

Deselect: 取消选择, 命令说明见表 5-53。

表 5-53

| 命 令 | 按 钮 | 选 择 方 式 |
|-------------------|-----|----------------|
| Point/window | | 单击左键选择或者窗选取消选择 |
| InterSection line | | 取消相交线选择 |
| All | | 取消全部选择 |

Get Previous Selection: 获取前一次选择的所有对象。

Clear Selection (按钮

➤ Display (显示)





Show Section Properties (按钮

表 5-54

| | |
|---------------|---|
| Base material | 显示基本材料 |
| Axis angle | 角度定义中性轴的方位(方向), 也就是承载弯矩的方向。截面逆时针旋转为正方向 |
| A | 截面面积, 长度 ² |
| J | 扭转惯性矩, 长度 ⁴ |
| I33 | 关于 3 轴的惯性矩, 长度 ⁴ |
| I22 | 关于 2 轴的惯性矩, 长度 ⁴ |
| I23 | 惯性矩, 长度 ⁴ |
| AS2 | 平行于 2 轴的剪切面积, 长度 ² |
| AS3 | 平行于 3 轴的剪切面积, 长度 ² |
| S33 (+Face) | 在 2 轴正方向截面外缘上的 3 轴截面模数, 长度 ³ |
| S33 (-Face) | 在 2 轴负方向截面外缘上的 3 轴截面模数, 长度 ³ |
| S22 (+Face) | 在 3 轴正方向截面外缘上的 2 轴截面模数, 长度 ³ |
| S22 (-Face) | 在 3 轴负方向截面外缘上的 2 轴截面模数, 长度 ³ |
| r33 | 围绕 3 轴的旋转半径 |
| r22 | 围绕 2 轴的旋转半径 |
| Xcg | 在截面设计器坐标中截面重心的 X 值 |
| Ycg | 在截面设计器坐标中截面重心的 Y 值 |

Show Interaction surface (按钮

Show moment-Curvature Curve (按钮

Show Stress (按钮

➤ Options (选项)

Preference : 显示截面设计器设置对话框 (图 5-28)。对话框说明见表 5-55。

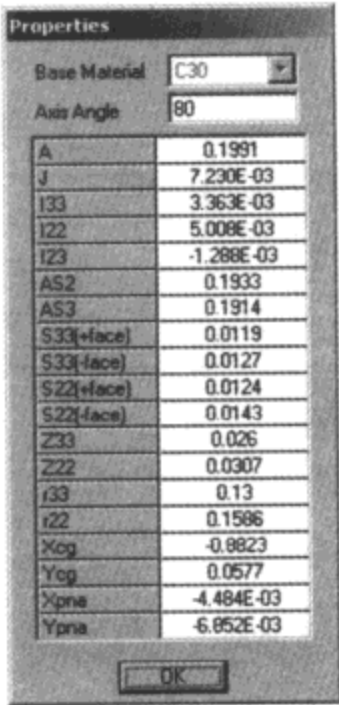


图 5-27 力学属性对话框

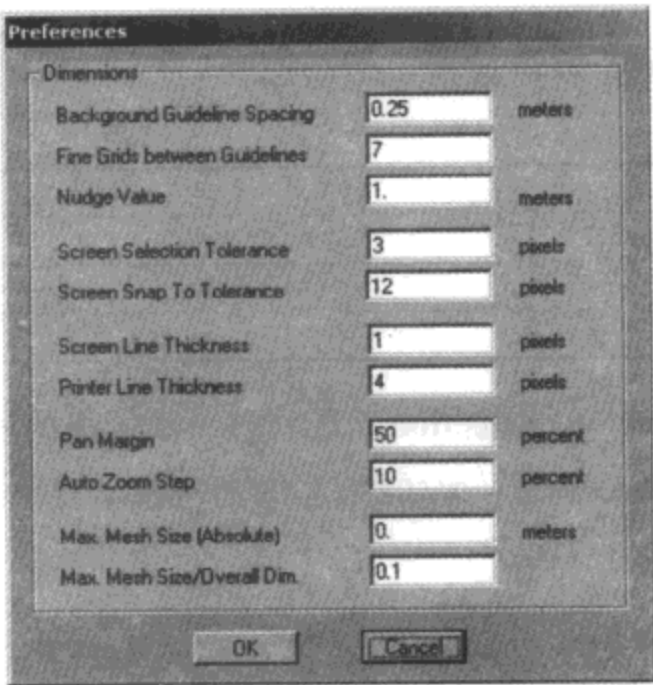


图 5-28 截面设计器设置对话框

Dimensions (尺寸) 表 5-55

| | |
|-------------------------------|--|
| Background Guideline Spacing | 设置背景网格线间距 |
| Fine Grids Between Guidelines | 设置细分轴网格线数量 |
| Nudge Value | 微调值。这是用户在键盘上单击相应键 (Ctrl+方向键) 后微小移动的距离, 此项按长度单位输入, SAP2000 默认此项在英制单位中为 48inch, 在公制单位中为 1m |
| Screen Selection Tolerance | 屏幕选择容差值。当在形状上单击以选择它时, 用户鼠标光标必须在该选择容差值内才可以选择到它, 此项按像素单位输入, 屏幕选择容差值对窗选没有效果, 截面设计器默认此项为 3 个像素 |
| Screen Snap To Tolerance | 屏幕捕捉容差值。当在 SAP2000 中使用捕捉功能时, 用户鼠标光标必须在捕捉容差值内才可捕捉到它, 此项按像素单位进行输入, 截面设计器默认此项为 12 个像素 |
| Screen Line Thickness | 屏幕线宽。此参数控制屏幕全部的线宽。线宽是按像素单位输入, 它对俯视图没有效果, 截面设计器默认此项为 1 个像素 |
| Printer Line Thickness | 打印机线宽。此参数控制输出到打印机的线宽与字体, 线宽是按像素单位输入, 截面设计器默认此项为 4 个像素 |

续上表

| | |
|----------------------------|--|
| Pan Margin | 平移页边距。此为超出用户可以平移的视图边的距离，它是以窗口尺寸百分比的形式输入的，截面设计器默认此项为 50%，如果平移页边距设置为 0% 时，用户不能平移 |
| Auto Zoom Step | 自动缩放步长。此项按百分比输入，在视图中全部对象是按此百分比进行缩放的，该项的 SAP2000 默认值为 10% |
| Max Mesh Size (Absolute) | 最大剖分尺寸。按绝对值输入 |
| Max Mesh Size /Overall Dim | 最大剖分尺寸。按百分比输入 |

■ **Colors:** 显示截面编辑器颜色管理设置对话框（图 5-29）。

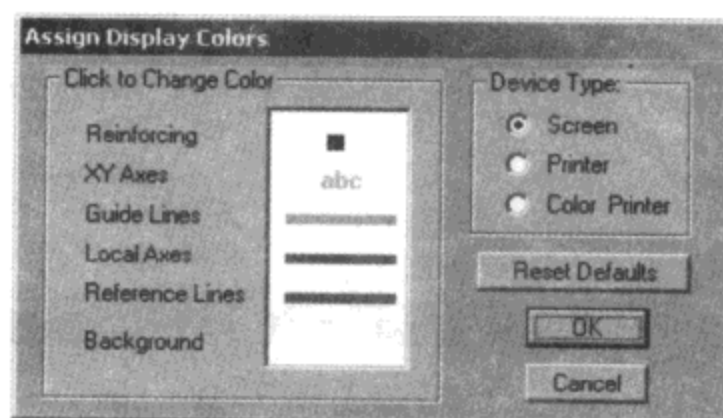


图 5-29 截面编辑器颜色管理设置对话框

■ **Click to Change Color:** 在相应的颜色块单击鼠标左键，弹出颜色编辑器，可对输出颜色进行设置。详细说明见表 5-56。

表 5-56


| | |
|-----------------|---|
| Reinforcing | 设置钢筋显示颜色 |
| XY Axes | 设置截面编辑器 X、Y 轴颜色 |
| Guide lines | 设置背景网格线颜色 |
| Local axes | 设置局部 2 轴、3 轴颜色 |
| Reference lines | 设置布筋参考线颜色 |
| Background | 设置截面设计器窗口的背景颜色。截面轮廓线总是显示为与背景色相反的颜色。背景项不控制相关曲面和弯矩曲率图显示窗口的背景色。这些背景色不能修改 |

■ **Device type:** 用户指定颜色是用于屏幕显示、输出到非彩色打印机还是输出到彩色打印机。

■ **Reset default:** SAP2000 中的默认颜色。

在 SD 截面数据对话框（图 5-26）中，给截面指定了基本材料。当在 CSISD 界面绘制截面的过程中我们给截面指定了不同于基本材料的其他材料，也就是组合构件截面时，则在计算截面力学属性时，作等刚度代换计算，将不同材料的刚度都转化为基本材料。当出现一种材料包含在另一种材料的截面中（例如型钢组合柱）时，系统计算截面积时会自动减掉重叠

部分的面积。

例如定义型钢混凝土组合柱截面，在 CSISD 界面左侧绘制工具条中点击绘制矩形截面按钮，光标变为绘制状态，在绘图区 X、Y 原点点击鼠标左键，生成矩形截面。在截面位置点击鼠标右键弹出 Shape Properties-Solid 对话框，如图 5-30 所示。

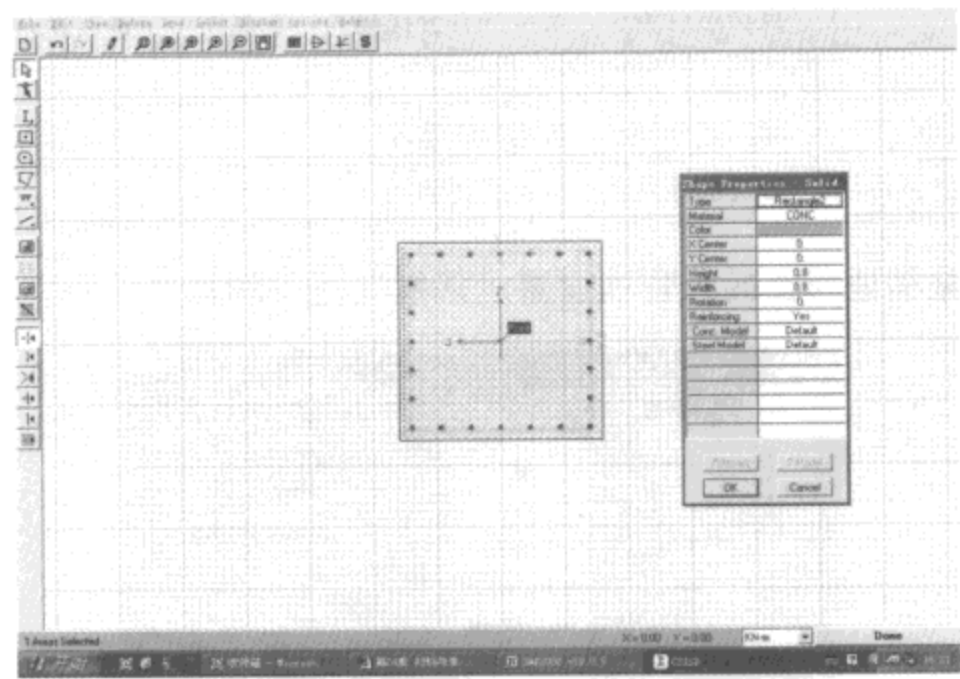



图 5-30 Shape Properties-Solid 对话框

在对话框中可以修改截面属性，包括类型 (Type)、材料 (Material)、中心点坐标 (X、Y Center)、高度 (Height)、宽度 (Width)、角度 (Rotation)、配筋 (Reinforcing) 等。在本例中将截面高度和宽度修改为 “0.8” (m)，配筋项选择 Yes。点【OK】按钮。

点击左侧绘制工具条中绘制结构形状按钮，在矩形原心处点击鼠标左键，绘制出工字钢。修改工字钢的属性数据，需要从重叠截面中选出工字钢，按住 Ctrl 键的同时在工字钢位置点击鼠标右键，弹出选择列表对话框 (图 5-31)。

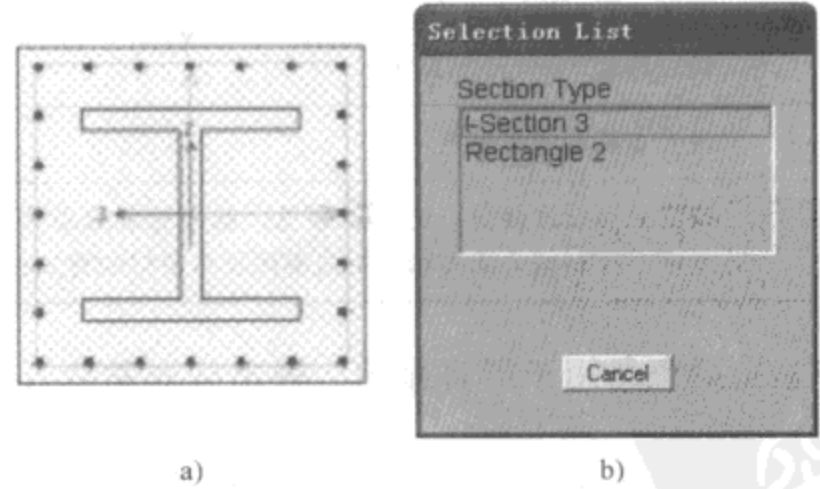



图 5-31 组合截面

在列表中列出了所有重叠部位的截面名称，选择工字形截面 (I-Section)，则弹出该截面的属性对话框 (图 5-32)。

在对话框中查看/修改工字型截面几何、材料数据。在这里可以直接选择已定义的截面属性，例如型钢库截面，点击【OK】按钮，完成截面绘制。点击界面右下角【Done】按钮退出截面编辑器，完成截面定义。

如果需要修改钢筋属性数据，则将光标在钢筋位置按下鼠标右键，弹出 **Edge Reinforcing** 对话框，显示某一侧钢筋数据，用户可以对钢筋直径、间距等属性进行修改。

当绘制 SD 截面时，截面的插入点一般为截面重心，构件拉伸显示如图 5-33 所示。

对于所有自定义（简称 SD）截面可以点击显示截面属性按钮  查看截面属性数据（图 5-34）。

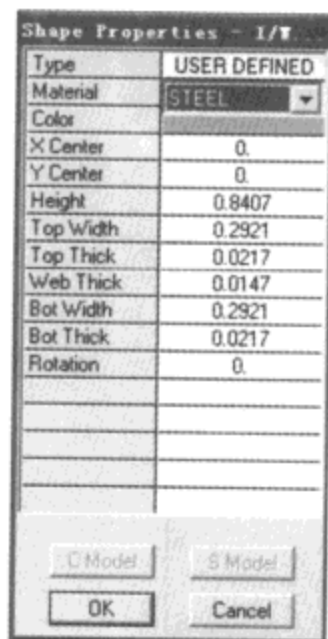


图 5-32 截面属性对话框

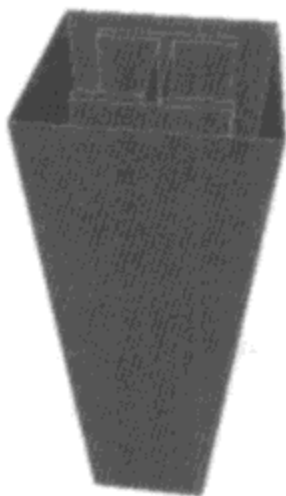


图 5-33 组合截面构件

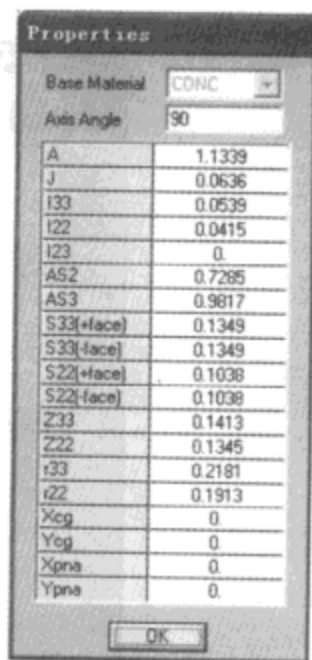



图 5-34 截面属性数据

对于一个标准混凝土截面（由混凝土和钢筋组成），点击显示相关面按钮 ，可以查看截面 PMM 相关面曲线（图 5-35）。

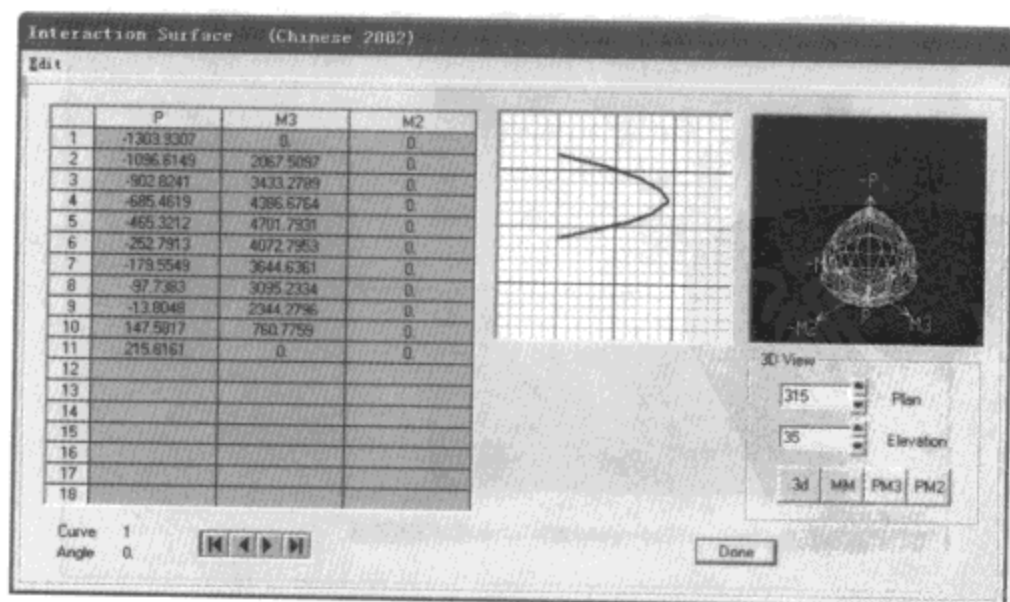




图 5-35 PMM 相关面曲线

对于一个标准混凝土截面（由混凝土和钢筋组成），点击弯矩-弯曲曲线按钮 ，可以查看截面各种应力-应变关系曲线（图 5-36），包括弯矩（Moment）曲线、混凝土应变（Strain）曲线、中性轴（Neutral Axis）曲线、钢筋应变（Steel Strain）曲线、混凝土抗压（Con Comp）曲线、钢筋抗压（Steel Comp）曲线、钢筋抗压（Steel Ten）曲线。

对于一个标准混凝土截面（由混凝土和钢筋组成），点击显示应力按钮  可以显示截面在各种力作用下的应力等值线图（图 5-37）。用户可以在右侧力值输入框中输入各种方向力，视图会显示对应的截面应力等值线图，可以作为截面校核的参考。

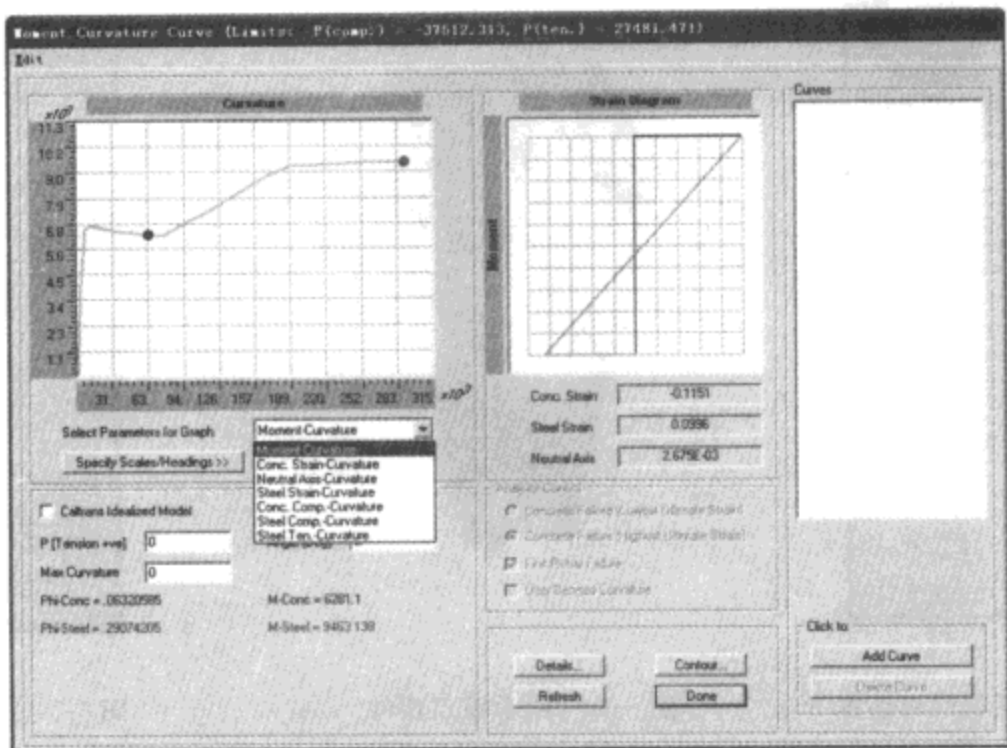


图 5-36 应力-应变关系曲线

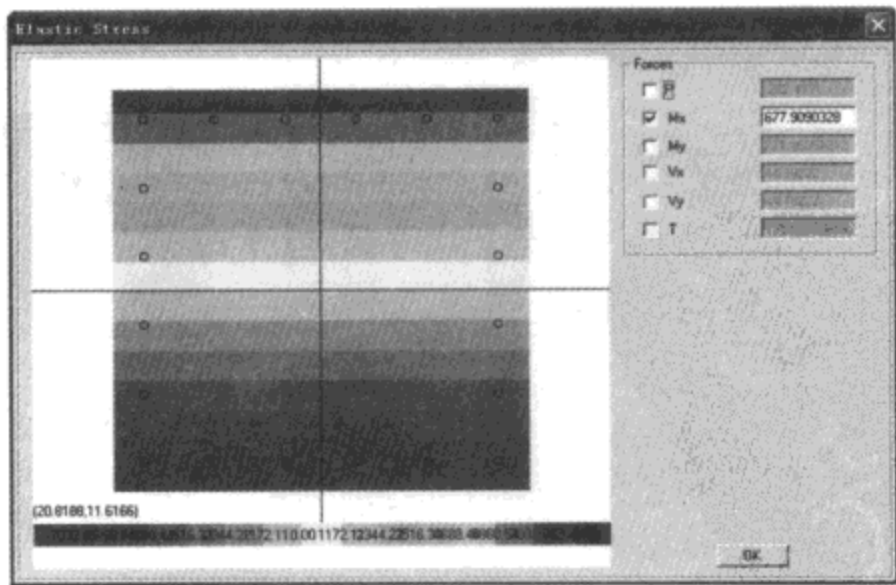


图 5-37 应力等值线图

5.3 面截面定义

在 SAP2000 系统中，提供的面对象包括壳（Shell）、平面（Plane）、轴对称实体（Asolid）。点击【定义】>【面截面】命令，弹出面截面对话框（图 5-38）。对话框说明见表 5-57～表 5-59。

截 面 表 5-57

| | |
|----|-------------|
| 截面 | 显示当前所有面截面名称 |
|----|-------------|

选择要加入的截面类型 表 5-58

| | |
|------------|---|
| 选择要加入的截面类型 | 选择添加截面的类型，包括 Shell（壳）、Plane（平面）、Asolid（轴对称实体） |
|------------|---|

点 击 表 5-59

| | |
|---------|--------------------------|
| 添加新截面 | 弹出高亮显示截面类型属性对话框，用于添加截面 |
| 添加截面副本 | 弹出高亮显示截面类型属性对话框，用于添加截面副本 |
| 修改/显示截面 | 在弹出的截面类型属性对话框中，用户可以进行修改 |
| 删除截面 | 删除列表中高亮显示的截面 |

壳单元用来在平面和三维结构中模拟壳、膜和板的性能，是模型中最常用的一种，例如结构中的楼板、墙、坡面等均以壳定义。壳单元是一个组合了膜和板弯曲行为的 3 节点或 4 节点单元（4 节点单元不必是平面）。根据对象受力行为的特点将壳分为纯壳属性、膜属性、板属性。

膜行为使用一个等参数的公式，包括面内的平动刚度部分和一个垂直于单元平面的旋转刚度部分。

板弯曲行为包括双向、面外、板旋转刚度部分和一个垂直于单元平面的平动刚度。默认使用薄板（Kirchhoff）公式，忽略横向剪切变形。另外，用户可选择厚板（Mindlin /Reissner）公式，该单元包括横向剪切变形。

对壳单元在 SAP2000 中一般建议使用完全壳属性，除非整个结构是平面的且被充分约束。

平面单元是一个 3 节点或 4 节点单元，用来模拟二维均匀厚度的实体平面应力和平面应变行为。它是基于包含 4 个非协调弯曲模式的等参数公式。单元应为平面的，若不是，则对该单元在计算得到的平均平面上的投影建立公式。该单元可以用于模拟平面处于平面应力状态的薄平面结构或者处于平面应变状态的长等截面结构。应力和应变假定在厚度方向没有变化。对于平面应力单元，没有面外刚度；对于平面应变单元，单元由抵抗平面剪切刚度来承

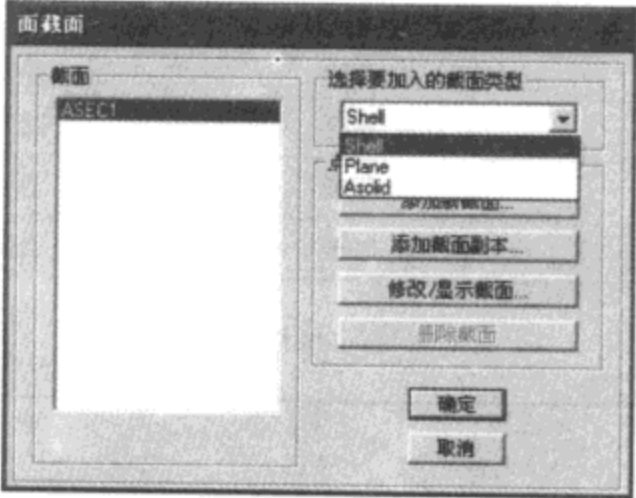


图 5-38 面截面对话框

受荷载。

轴对称实体是一个 3 节点或 4 节点单元，它是基于包含 4 个非协调弯曲模式的等参公式，用于模拟三维轴对称实体中具有代表性的二维截面。它是对三维实体单元的平面简化模型，例如取圆柱体半径方向的剖切面。对称轴可位于模型中的任意位置，每个单元应完全位于包含对称轴的平面，若不是，则对单元在包含对称轴和单元中心平面的投影建立公式。轴对称实体假定在周边方向上几何属性、荷载、位移、应力和应变没有变化。在周边方向上的任意位移被作为轴对称的扭曲处理。

5.3.1 壳截面定义

在面截面对话框截面类型下拉表中选择 **Shell**，点击【添加新截面】按钮，弹出壳截面数据对话框(图 5-39)。对话框说明见表 5-60~表 5-66。



图 5-39 壳截面数据对话框

| 截 面 名 称 | | 表 5-60 |
|---------|-----------------------|--------|
| 截面名称 | 显示默认截面名称，用户可以修改 | |
| 显示颜色 | 点击色框，弹出颜色编辑器，设置截面显示颜色 | |

| 类 型 | | 表 5-61 |
|----------|---|--------|
| 壳-薄壳 | 选择面对象类型为壳属性，忽略横向剪切变形 | |
| 壳-厚壳 | 选择面对象类型为壳属性，包括横向剪切变形 | |
| 板-薄板 | 选择面对象类型为板属性，忽略横向剪切变形 | |
| 板-厚板 | 选择面对象类型为板属性，包括横向剪切变形 | |
| 壳-分层/非线性 | 选择激活【Modify/Show Layer Definition】按钮，点击则弹出 Shell Section Layer Definition 对话框 | |

| 材 料 | | 表 5-62 |
|------|-----------------------|--------|
| 材料名称 | 在下拉菜单中指定截面材料属性 | |
| 材料角 | 输入材料 1 轴与对象局部坐标 1 轴夹角 | |

| 厚 度 | | 表 5-66 |
|-----|--------------------------------------|--------|
| 膜 | 输入膜行为属性厚度。此厚度用于计算壳和膜自重和质量，以及壳和膜平面内刚度 | |
| 弯曲 | 输入板行为属性厚度。此厚度用于计算壳和板平面外弯曲和横向剪切刚度 | |

| 混凝土壳设计参数 | | 表 5-64 |
|------------|---|--------|
| 修改/显示壳设计参数 | 点击弹出 Concrete Shell Section Design Parameter 对话框 (图 5-40) | |

刚度修正 表 5-65

| | |
|------|---------------------------|
| 设置修正 | 点击弹出属性/刚度修正系数对话框 (图 5-42) |
|------|---------------------------|

温度相关属性 表 5-66

| | |
|-----|-----|
| 热属性 | 未启用 |
|-----|-----|

(1) 壳类型

对于壳和板的类型选择，系统提供了两种厚度计算公式——厚板（Mindlin /Reissner）公式和薄板（Kirchhoff）公式，两种厚度公式的选择取决于在板或壳的板——弯曲行为中是否包括横向剪切变形。当厚度大于其跨度的 1/10 或 1/5 时，剪切变形趋向于重要，它们还在弯曲应力集中的附近十分显著，如在厚度突变处或支座处，以及靠近洞口或凹的角点处。虽然对薄板弯曲问题，剪切变形确实可以忽略，但厚板公式趋向于更准确，对较大的特征系数和网格扭曲，厚板公式的准确度比薄板公式更高。除非用户使用一个扭曲的网格且知道其剪切变形将会较小或者用户试图匹配一个理论薄板解，一般建议用户使用厚板公式。

(2) 材料角

被指定给单元的材料属性具有方向性，尤其对于各向异性材料，这种特性显得更加重要。材料的方向性体现为材料的局部坐标系。材料的局部 3 轴与面单元的局部 3 轴总是重合的（图 5-40），但材料的局部 1 轴与单元的局部 1 轴是可以存在夹角的。材料角就是指材料的局部 1 轴与对象的局部 1 轴的夹角，此角度对各向同性材料没有影响。

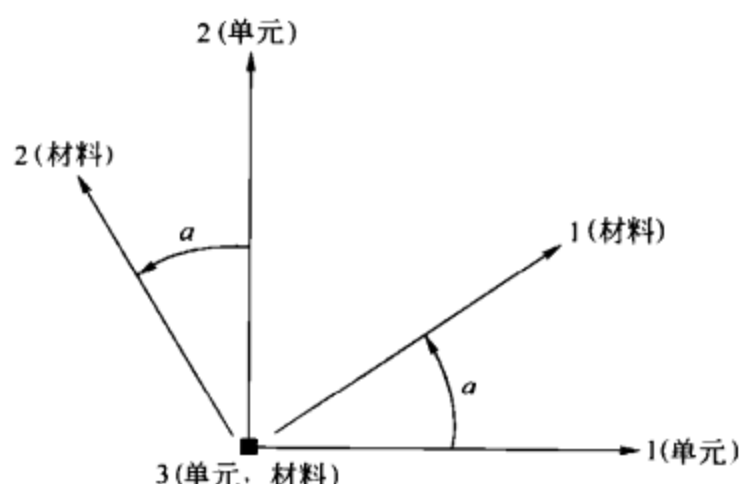


图 5-40 面单元材料角

(3) 混凝土壳设计参数

点击【修改/显示壳设计参数】按钮，弹出 Concrete Shell Section Design Parameter 对话框（图 5-41）。对话框说明见表 5-67～表 5-69。

截面名称 表 5-67

| | |
|------|-----------------|
| 截面名称 | 显示默认截面名称，用户可以修改 |
|------|-----------------|

Rebar Layout Options 表 5-68

| | |
|------------|----------|
| Default | 系统默认钢筋层数 |
| One layer | 设置单层钢筋 |
| Two Layers | 设置双层钢筋 |

Cover to Centroid of Steel 表 5-69

| | |
|-----------------------|--------------------|
| Top Bar-Direction1 | 1 轴方向顶部筋至钢筋中心保护层厚度 |
| Top Bar-Direction2 | 2 轴方向顶部筋至钢筋中心保护层厚度 |
| Bottom Bar-Direction1 | 1 轴方向底部筋至钢筋中心保护层厚度 |
| BottomBar-Direction2 | 2 轴方向底部筋至钢筋中心保护层厚度 |

SAP2000 引入了混凝土壳配筋设计功能，该功能的技术原理基于以下两篇论文：

- 《钢筋混凝土壳和板优化设计》，由丹麦工业大学 Troels Brondum-Nielsen 于 1974 年发表。
- 《混凝土板横向剪力设计》，由 Peter Marti 于 ACI 结构期刊 1990 年 3～4 月期发表。

通常，板单元得到 8 个应力结果。以 SAP2000 术语描述，这些结果分别为三个膜特性平面内力 f_{11} 、 f_{22} 、 f_{12} ；两个弯矩 m_{11} 、 m_{22} 和一个扭矩 m_{12} ；以及两个横向剪力 V_{13} 、 V_{23} 。为了设计的目的，将混凝土板视为两层以钢筋为中心面的外层和一层无开裂混凝土核心层组成的板单元。依据 Marti (1990) 所采用的方法，假定由钢筋混凝土保护层 (i. e., 外层) 承担板弯矩和面内轴向力，由混凝土核心层承担横向剪力 (图 5-42)。

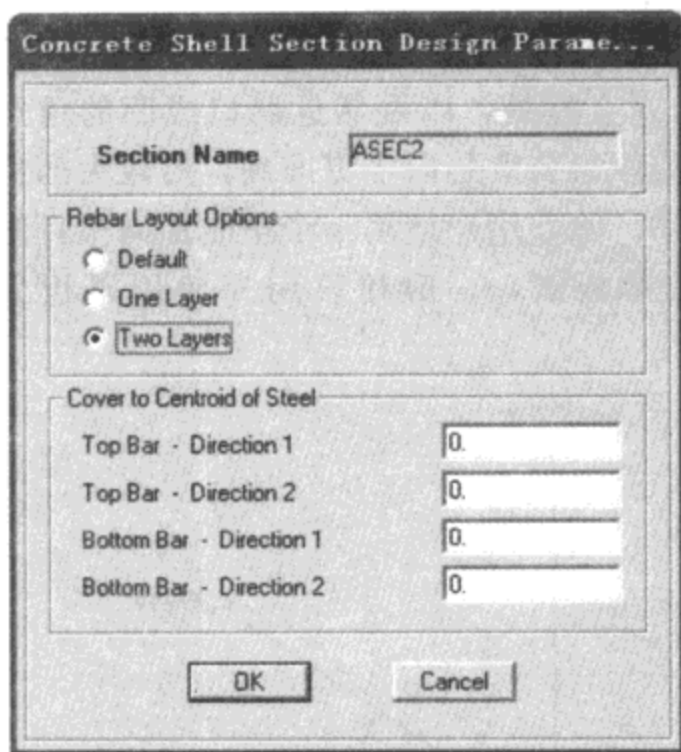


图 5-41 Concrete Shell Section Design Parameter 对话框

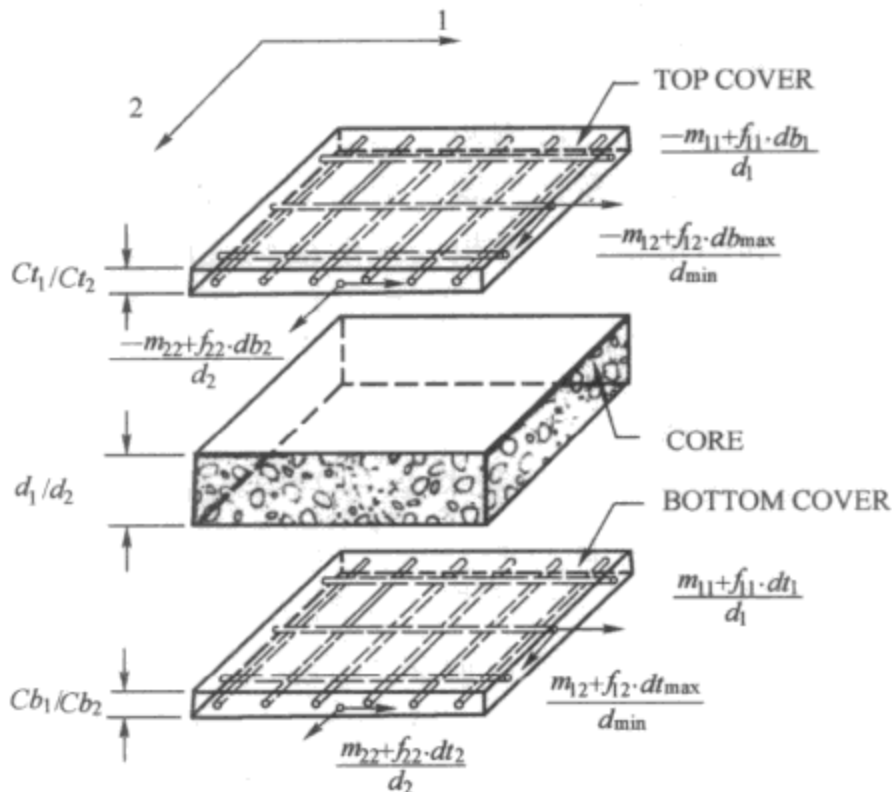


图 5-42

SAP2000 假定混凝土核心不产生斜裂缝，在这种纯剪切情况下，三明治模型中截面的剪力不会对模型平面内力产生影响。因此，模型不需要提供横向配筋，并且也不会增加面内钢筋分配的剪力。

SAP2000 对混凝土板设计的过程概述如下：

①将混凝土板视为两层以钢筋为中心面的外层和一层无开裂混凝土核心层组成的板单元，如图 5-42 所示。

②每层厚度取下列条件较小值：

- 至钢筋中心保护层厚度的两倍。
- 板中心到钢筋中心距离的两倍。

③将板六种分析结果 f_{11} 、 f_{22} 、 f_{12} 、 m_{11} 、 m_{22} 和 m_{12} 转换为顶部、底部钢筋层中心面独立的纯平面内力 N_{11} 、 N_{22} 、 N_{12} 。为了使弯矩转换为力，将外钢筋层之间的距离作为力臂。

④各层的钢筋内力 N_{Des1} 、 N_{Des2} ，混凝土主压力 F_{c1} 、 F_{c2} ，以及混凝土主压应力 S_{c1} 、 S_{c2} 的计算均依据 Brondum Nielsen 1974 年发表的计算方法。

⑤钢筋内力利用钢筋应力和应力折减系数换算成单位宽度配筋面积 A_{st1} 、 A_{st2} (i. e., 配筋量)。

关于混凝土壳单元设计输出可以参见第 13 章 (结果与输出) 壳单元应力输出部分内容。

(4) 刚度修正

刚度修正是对面对象刚度的调整，点击【设置修正】按钮，弹出属性/刚度修正系数对话框（图 5-43）。

对话框中膜类型的修正指面内刚度的修正，以 f 表示；抗弯类型修正指面外刚度修正，以字母 m 表示；抗剪刚度以字母 v 表示；此外还有质量修正和重量修正。字母后面的数字表示面局部坐标轴方向。输入框中是修正系数，默认状态都是 1。在分析过程中修正系数会与截面的刚度或自重相乘得出调整后的值。

修正系数只影响分析属性，不会影响任何设计属性。 f_{11} 、 f_{22} 和 f_{12} 修改实质上等于壳单元厚度的修改系数， m_{11} 、 m_{22} 和 m_{12} 修改实质上等于壳单元厚度三次方的修改系数，但不会影响对质量和自重的计算。

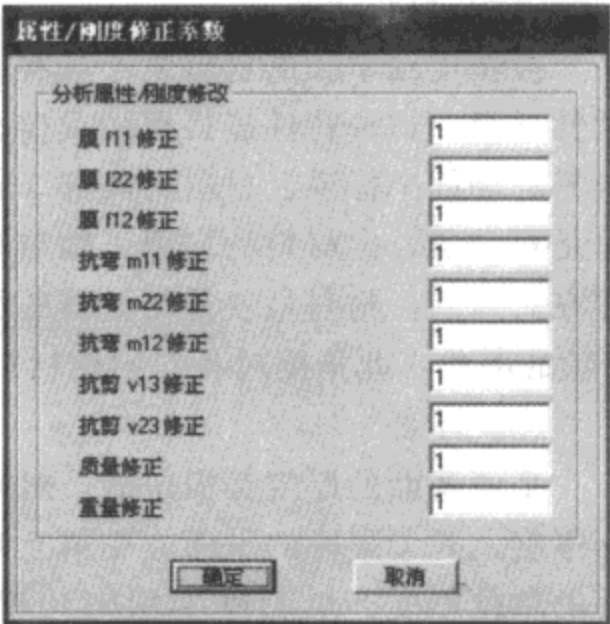


图 5-43 属性/刚度修正系数对话框

5.3.2 平面截面定义

在面截面对话框选择要加入的截面类型下拉菜单中选择 Plane 项，点击【添加新截面】按钮，弹出 Plane Section Data 对话框（图 5-44）。对话框说明见表 5-70～表 5-75。

| 截 面 名 称 | | 表 5-70 |
|---------|-----------------------|--------|
| 截面名称 | 显示默认截面名称，用户可以修改 | |
| 显示颜色 | 点击色框，弹出颜色编辑器，设置截面显示颜色 | |

| 类 型 | | 表 5-71 |
|-------|--------------|--------|
| 平面-应力 | 选择平面单元为应力模型 | |
| 平面-应变 | 选择平面单元为应变模型 | |
| 不相容模式 | 勾选则启用非协调弯曲模式 | |

| 材 料 | | 表 5-72 |
|------|-----------------------|--------|
| 材料名称 | 在下拉菜单中指定截面材料属性 | |
| 材料角 | 输入材料 1 轴与单元局部坐标 1 轴夹角 | |

| 厚 度 | | 表 5-73 |
|-----------|----------|--------|
| Thickness | 输入平面单元厚度 | |

| 刚 度 修 正 | | 表 5-74 |
|---------|--------------------------|--------|
| 设置修正 | 点击弹出属性/刚度修正系数对话框（图 5-42） | |

| 温度相关属性 | | 表 5-75 |
|--------|-----|--------|
| 热属性 | 未启用 | |

(1) 类型

平面单元模拟具有均匀厚度且其应力和应变在厚度方向不变的结构中间面。平面应力模型适用于相对平面尺寸较薄的结构。厚度法向应力被假定为零，由于泊松效应，厚度法向应变可能不是零，横向剪应力和剪切应变被假定为零，在厚度方向的位移对单元没有影响。

平面应变模型适用于相对平面尺寸较厚的结构。厚度法向应变被假定为零，由于泊松效应，厚度法向应力可能不是零，横向剪应力及剪切应变依赖于在厚度方向上的位移。默认每个单元在其刚度公式中有 4 个非协调弯曲模式，若单元为矩形，非协调弯曲模式显著的改善了单元性能，甚至对非矩形也会改善其性能；若一个单元形状是严重扭曲的，则不能使用非协调弯曲模式；单元使用标准的等参数公式，在弯曲不重要的情况，如一般的岩土问题，也不能使用非协调弯曲模式。

(2) 材料角

被指定给单元的材料属性具有方向性，尤其对于各向异性材料，这种特性显得更加重要。材料的方向性体现为材料的局部坐标系。材料的局部 3 轴与面单元的局部 3 轴总是重合的，但材料的局部 1 轴与单元的局部 1 轴是可以存在夹角的。材料角就是指材料的局部 1 轴与单元的局部 1 轴的夹角，此角度对各向同性材料没有影响。

(3) 厚度

平面截面的厚度是恒定的，对平面应力单元可以是实际厚度，对无限厚的平面应变单元则可以是一个具有代表性的单位厚度。单元厚度用来计算单元刚度、质量和荷载。因此，单元计算的节点力与此厚度成正比。

(4) 刚度修正

参见 5.3.1 节壳刚度修正部分说明。



图 5-44 Plane Section Data 对话框

5.3.3 轴对称实体单元定义

在面截面对话框选择要加入的截面类型下拉菜单中选择 Asolid 项，点击【添加新截面】按钮，弹出 Plane Section Data 对话框（图 5-45）。对话框说明见表 5-76～表 5-81。

| 截 面 名 称 | | 表 5-76 |
|---------|-----------------------|--------|
| 截面名称 | 显示默认截面名称，用户可以修改 | |
| 显示颜色 | 点击色框，弹出颜色编辑器，设置截面显示颜色 | |

| 类 型 | | 表 5-77 |
|-------|--------------|--------|
| 不相容模式 | 勾选则启用非协调弯曲模式 | |

| 材 料 | | 表 5-78 |
|------|-----------------------|--------|
| 材料名称 | 在下拉菜单中指定截面材料属性 | |
| 材料角 | 输入材料 1 轴与单元局部坐标 1 轴夹角 | |

| 在坐标系统中关于 Z 轴对称 | | 表 5-79 |
|----------------|-------------|--------|
| 坐标系 | 指定截面的对称轴坐标系 | |

| 厚 度 | | 表 5-80 |
|---------------|-----------------|--------|
| Arc (degrees) | 指定轴对称实体截面所截取的弧度 | |

| 刚 度 修 正 | | 表 5-81 |
|---------|--------------------------|--------|
| 设置修正 | 点击弹出属性/刚度修正系数对话框（图 5-42） | |

(1) 类型

默认地，每个单元在其刚度公式中有 4 个非协调弯曲模式。若单元为矩形，非协调弯曲模式显著的改善了单元性能，甚至对非矩形也会改善其性能；若一个单元形状是严重扭曲的，则不能使用非协调弯曲模式；单元使用标准的等参数公式，在弯曲不重要的情况，如一般的岩土问题，也不能使用非协调弯曲模式。

(2) 材料角

被指定给单元的材料属性具有方向性，尤其对于各向异性材料，这种特性显得更加重要。材料的方向性体现为材料的局部坐标系。材料的局部 3 轴与面单元的局部 3 轴总是重合的，但材料的局部 1 轴与单元的局部 1 轴是可以存在夹角的。材料角就是指材料的局部 1 轴与单元的局部 1 轴的夹角，此角度对各向同性材料没有影响。

(3) 对称轴

轴对称实体截面需要由用户指定一个对称轴，此轴都为 Z 轴方向。系统默认整体坐标系 Z 轴为对称轴。用户可以通过添加附加坐标系来为截面指定不同的对称轴，所有的对称轴都为 Z 轴方向。一般一个轴对称实体只需要一个对称轴，用户也可以建立多个对称轴，但对应的轴对称实体结构均是相互独立的。

(4) 厚度

轴对称实体单元代表一个通过绕对称轴旋转 360°所建立的实体。然而，分析只考虑实体中具有代表性的一段。用户使用参数 arc（单位为度）指定节段的尺寸。例如，arc=360 模拟整个结构，arc=90 模拟 1/4 的结构。系统默认 arc=0，当取零时表示模拟一个 1 弧度的节段。1 弧度为 180°/π，大约 57.3°。

单元厚度用来计算单元刚度、质量和荷载。因此，计算的单元节点力和 arc 成正比（图 4-46）。

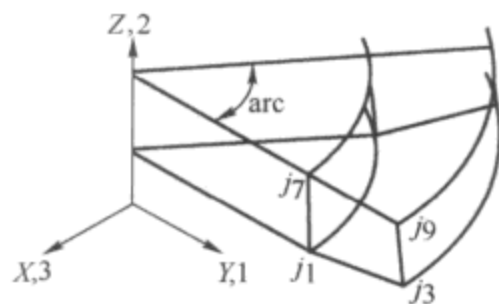


图 5-46 轴对称实体单元

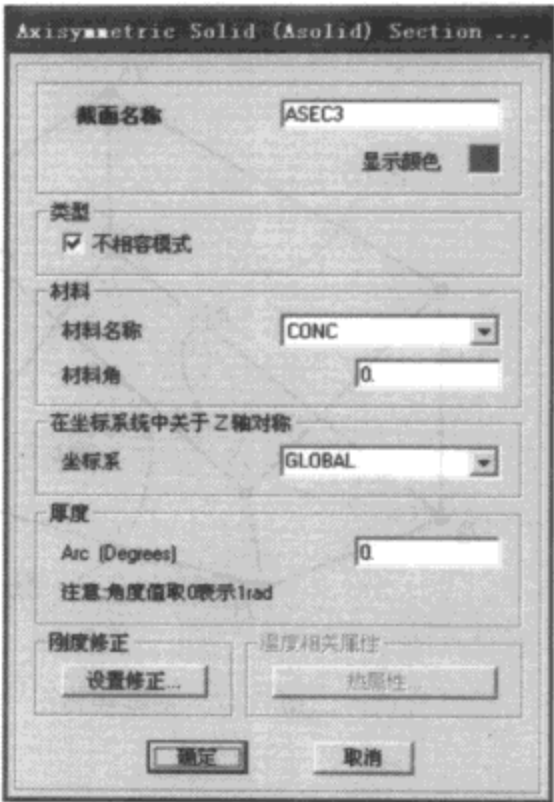


图 5-45 Plane Section Data 对话框

5.4 实体单元截面定义

实体单元是一个 8 节点单元，多体现为六面体，是基于包含 9 个可选的非协调弯曲模式的等参公式，用于模拟三维实体结构（图 5-47），例如坝体等大型浇筑体的力学分析。对于实体的节点只具有平动自由度，没有转动自由度，因此以实体模拟的结构只传递力而不传递弯矩。

点击【定义】>【实体属性】命令，弹出实体属性对话框（图 5-48）。对话框说明见表 5-82、表 5-83。

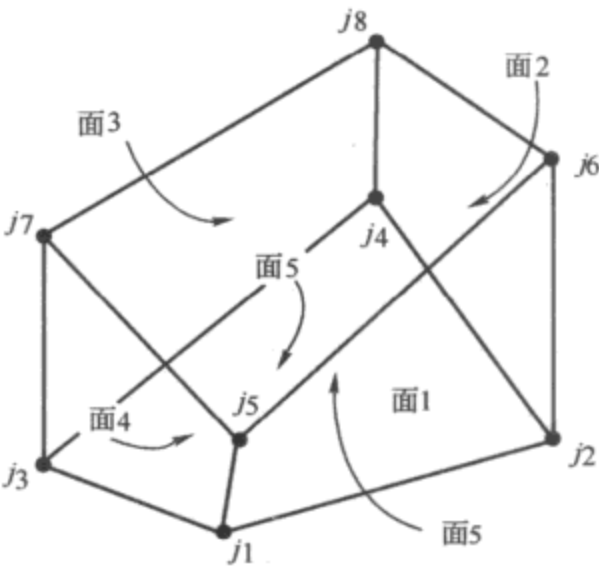


图 5-47 三维实体

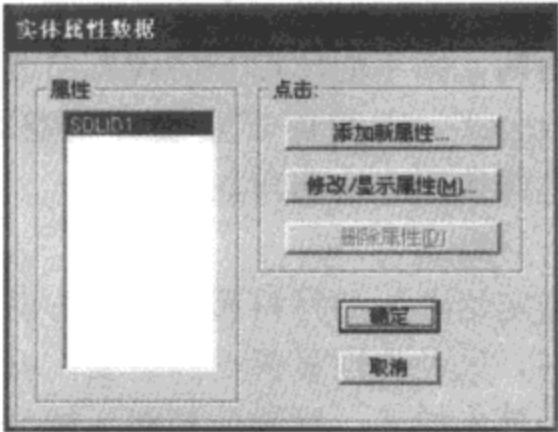


图 5-48 实体属性对话框

属 性 表 5-82

| | |
|----|--------------|
| 属性 | 显示当前所有实体截面名称 |
|----|--------------|

点 击 表 5-83

| | |
|---------|---------------------------------|
| 添加新属性 | 点击弹出实体属性数据对话框，添加新属性 |
| 修改/显示属性 | 点击弹出实体属性数据对话框，可对列表高亮显示的截面属性进行修改 |
| 删除属性 | 删除列表高亮显示的截面属性 |

点击【添加新属性】按钮，弹出实体属性数据对话框（图 5-49）。对话框说明见表 5-84～表 5-87。

属 性 名 称 表 5-84

| | |
|------|-----------------|
| 属性名称 | 显示默认属性名称，用户可以修改 |
|------|-----------------|

材 料 表 5-85

| | |
|-------|-------------------------|
| 材料名称 | 在下拉菜单中指定截面材料属性 |
| 材料角 A | 输入材料局部 3 轴与单元局部坐标 3 轴夹角 |
| 材料角 B | 输入材料局部 2 轴与单元局部坐标 2 轴夹角 |
| 材料角 C | 输入材料局部 1 轴与单元局部坐标 1 轴夹角 |

类 型 表 5-86

| | |
|-------|--------------|
| 不相容模式 | 勾选则启用非协调弯曲模式 |
|-------|--------------|

颜 色 表 5-87

| | |
|------|-----------------------|
| 显示颜色 | 点击色框，弹出颜色编辑器，设置截面显示颜色 |
|------|-----------------------|

(1) 材料角

由于实体是三维模型，因此可以定义材料方向属性与单元局部坐标的空间角度关系。在材料局部坐标系与对象局部坐标系对正的前提下，材料角 A 对应材料坐标系与单元局部坐标 3 轴夹角；材料角 B 对应材料坐标系与单元局部坐标 2 轴夹角；材料角 C 对应材料坐标系与单元局部坐标 1 轴夹角（图 5-50）。



图 5-49 实体属性数据对话框

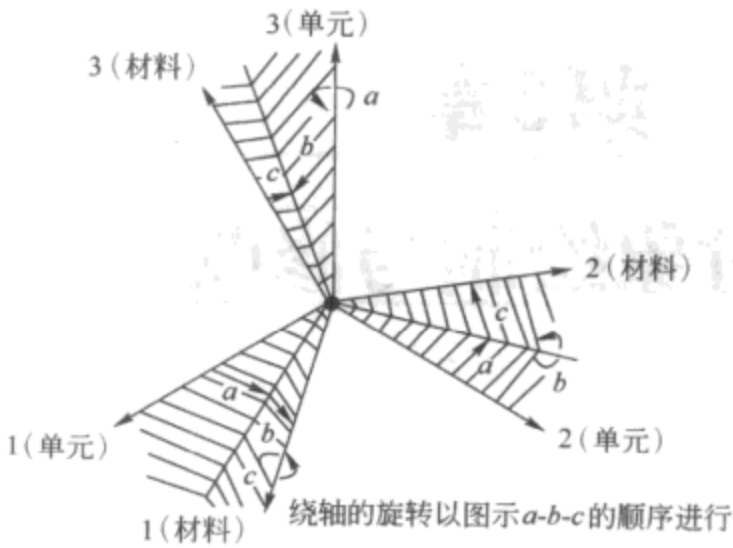


图 5-50 实体单元材料角

(2) 类型

默认每个单元在其刚度形式中有 9 个非协调弯曲模式。若单元为矩形，非协调弯曲模式能够显著改善单元性能，甚至对非矩形单元也会改善其行为；若单元形状是严重扭曲的，则不能使用非协调弯曲模式；单元使用标准的等参公式，在弯曲不重要的情况，如一般的岩土问题，也不能使用非协调弯曲模式。

第6章







对象绘制与修改

SAP2000 的绘图菜单配合捕捉功能、选择功能、组的功能和各种视图显示功能，使得工程师可以直观灵活地建立模型，并在平面图、立面图或者三维视图中进行绘制。本章重点介绍了 SAP2000 绘制点对象、线对象、面对象和实体对象的方法。其绘制方法主要有在轴网区格内点击生成、多点连续点击生成线、多点连续点击生成面、窗选区域生成对象以及通过编辑拉伸生成线、面和实体等等，同时在绘制过程中配合以辅助的编辑功能，来完成复杂模型的建立。本章通过介绍点捕捉功能、绘制方法、选择功能、组的定义以及对象信息查看来阐述 SAP2000 建模的各种操作方法。

6.1 捕捉功能

SAP2000 有着强大的类似 CAD 的捕捉功能。在绘制构件时可以利用捕捉功能准确地进行点的定位。捕捉功能的功能按钮在程序界面的左边工具栏处，也可以使用【绘图】>【捕捉】命令。相关说明见表 6-1。

表 6-1

| 按钮 | 命 令 | 捕 捉 功 能 |
|---|-----------|------------|
|  | 捕捉轴网交点和点 | 捕捉节点和轴网交点 |
|  | 捕捉线的端点和中点 | 捕捉线对象中点和端点 |
|  | 捕捉交点 | 捕捉相交线的交点 |
|  | 捕捉垂直投影 | 捕捉垂直投影垂足点 |
|  | 捕捉线和边 | 捕捉光标临近的线对象 |
|  | 捕捉细分轴网 | 捕捉细分轴网点 |

捕捉功能一般配合绘图功能使用，捕捉功能开关可以随时在绘制构件的过程中应用，并且允许同时按下多个捕捉控制按钮。SAP2000 的视图设有隐形的网格点，当按下【捕捉细分轴

网】按钮后,光标每移动一定距离就会捕捉到一个点。工程师可以对网格间距进行设置,点击**【选项】>【首选项】>【尺寸/容差】**命令,弹出尺寸/容差首选项对话框(图6-1)。

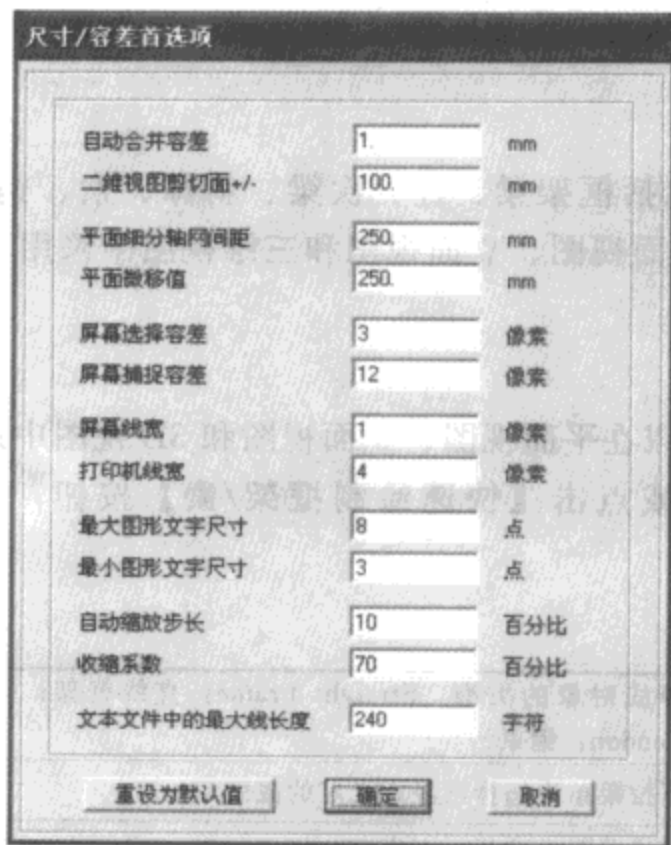


图 6-1 尺寸/容差首选项对话框

在对话框中修改平面细分轴网间距,可控制光标移动时捕捉细分轴网的距离。

6.2 点对象(节点)的绘制

绘制点对象时,点击**【绘图】>【绘制特殊节点】**命令或点击**【绘制特殊节点】**按钮。弹出对象属性对话框(图6-2),控制要绘制的点对象与屏幕上点击位置之间的距离关系数值。

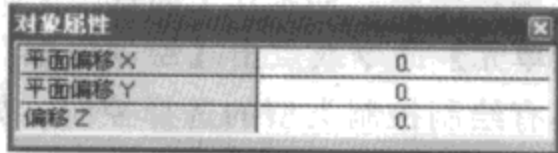


图 6-2 特殊节点属性对话框

激活**【捕捉网格交点和点】**按钮,可以捕捉到网格交点和对象节点位置,直接绘制。若要绘制的特殊节点对象的位置与现有节点之间有偏移量,在**对象属性**对话框中输入偏移X、偏移Y和偏移Z的值。

在视图中任意位置点击鼠标左键,可以绘制一个点对象。可以在轴网线的交点上绘制点对象,还可以在交点的附近点击鼠标左键并按住鼠标左键拖动到对角位置,拉出一个虚线的矩形框,在矩形框之内的所有轴网线的交点上自动绘制点对象。

由于多绘制一个点对象就多6个自由度,对于有些可以指定给线对象或面对象的操作,再绘制点对象就有些多余,只有一些特殊情况下才会用到点对象的绘制功能,如在面对象上施加一个集中荷载。如果简单地在面对象上绘制一个点对象,在点对象上指定荷载,那么这个荷载与面对象不会发生关系,正确的做法是在荷载作用位置上绘制点对象,选择该点对象作为面对象的自动剖分点,对面对象进行剖分,施加的集中荷载实际上是作用在面对象剖分后产生的节点上。

在上述情况下正确绘制的点对象，虽然多了 6 个自由度，但是这 6 个自由度实际包含在对象模型转换为分析模型时自动生成的自由度中，并没有增加多余的自由度。

6.3 线对象的绘制

SAP2000 中的线对象包括框架梁、柱、次梁、斜撑、索、钢束等等。并且提供多种线对象的绘制方法，可以在平面视图、立面视图和三维视图中采用不同的方法进行绘制。

6.3.1 绘制直线框架

直线框架梁柱的绘制可以在平面视图、立面视图和 3D 视图进行。点击【绘图菜单】>【快速绘制框架/索/钢束】或点击【快速绘制框架/索】按钮，弹出对象属性对话框（图 6-3）。对话框说明见表 6-2。

表 6-2

| | |
|-----------|--|
| 线对象类型 | 选择线对象的类型。Straight Frame：直线框架；Curved Frame：曲线框架；Cable：索；Tendon：钢束 |
| 截面 | 从下拉菜单中选择已经定义好的截面 |
| 弯矩释放 | 选择线对象两端的自由度释放方式。Continuous：两端刚接；Pinned：两端铰接 |
| XY 平面偏移垂直 | 输入 XY 平面内法线方向的偏移 |

绘制框架梁柱构件时，可以在 X 方向或 Y 方向的轴线段附近点击鼠标左键，SAP2000 自动在轴线段上绘制构件；也可以按住鼠标左键拖动拉出一个虚线矩形框，在窗口中的轴线段上自动绘制构件。有时需要在轴线以外位置绘制构件，如果构件平行于轴线，使用平面法线偏移绘制。如果在平面视图中绘制一般的构件，通常可以点击【绘图菜单】>【绘制框架/索单元】命令或点击【绘制框架/索单元】按钮，弹出对象属性对话框（图 6-4）。对话框中具有绘制控制类型的选择控制，如图 6-4 所示。

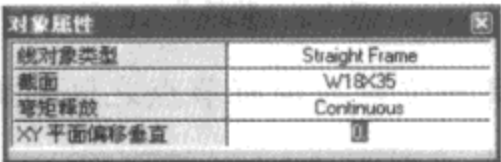


图 6-3 对象属性对话框

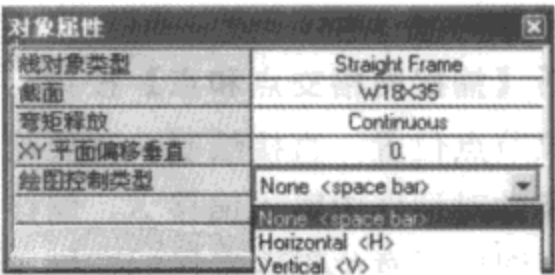


图 6-4 对象属性对话框

绘图控制类型 Drawing Control Type，详细说明见表 6-3。

表 6-3

| | |
|-------------------------|----------------|
| None | 无控制 |
| 水平绘制 | 控制线对象绘制方向为水平方向 |
| 竖直绘制 | 控制线对象绘制方向为竖直方向 |
| Parallel to Angle（与角平行） | 输入控制线对象绘制角度 |

续上表

| | |
|---------------------------------------|-----------------------------------|
| Fixed Length (固定长度) | 输入控制线对象绘制长度 |
| Fixed Length and Angle (固定长度和固定角度) | 输入控制线对象绘制长度和角度 |
| Fixed dh and dv (固定 dh 和固定 dv) | 输入线对象距起始点，在水平方向固定长度增量和在竖直方向固定长度增量 |

这个命令是以两点连线的方式绘制构件，需要配合捕捉功能按钮，在第一个点的位置上点击鼠标左键，在第二个点的位置上再点击鼠标左键，即绘制完一条线对象。

6.3.2 绘制曲线框架

曲线框架梁柱的绘制可以在平面视图、立面视图和 3D 视图中进行。点击【绘图菜单】>【快速绘制框架/索/钢束】或点击【快速绘制框架/索】按钮，弹出线对象曲线梁承索参数 4 对话框（图 6-5）。在窗口中指定修改曲线框架的属性数据，点击【确定】按钮，完成曲线框架的定义。对话框说明见表 6-4。

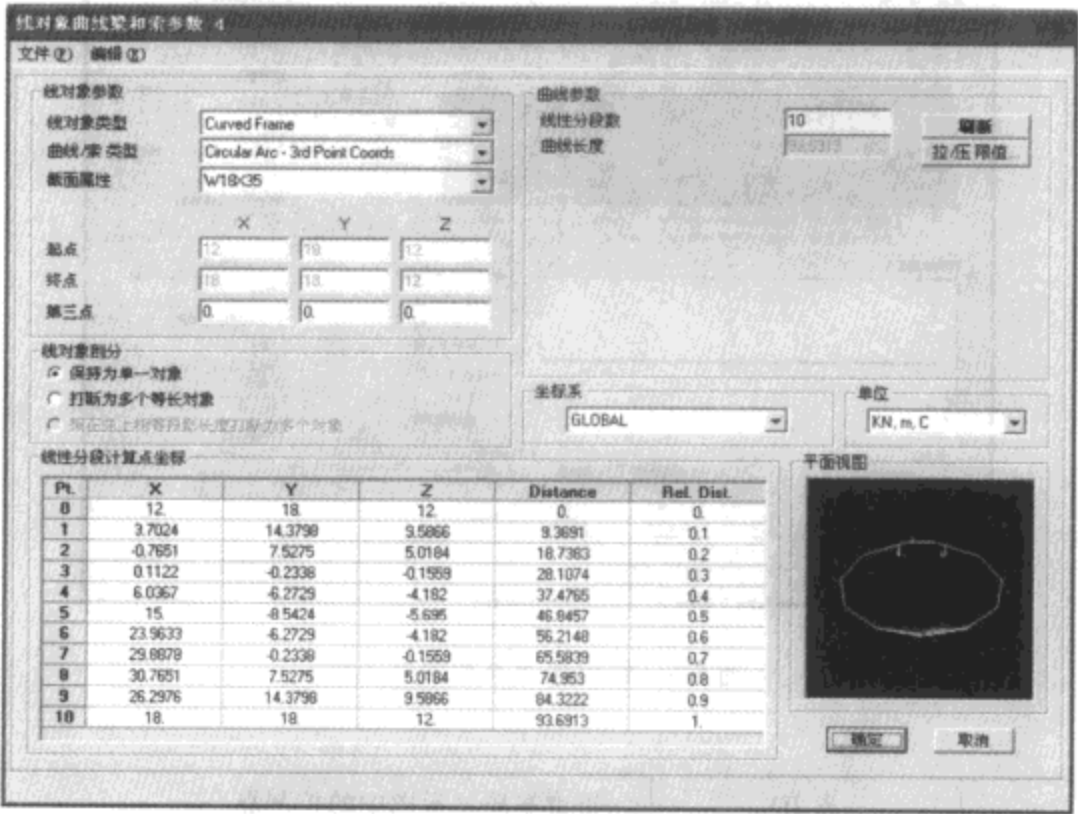


图 6-5 线对象曲线梁参数对话框

表 6-4

| | |
|--------|---|
| 线对象类型 | 直接弹出的线对象类型为 Curved Frame（曲线框架） |
| 曲线/索类型 | 第 3 点编号来确定圆弧；第 3 点坐标来确定圆弧；平面点和半径来确定圆弧；第 3 点编号来确定抛物线；第 3 点坐标来确定抛物线 |
| 截面属性 | 从下拉菜单中选择已经定义好的截面 |
| 线性分段数 | 指定给曲线的有限元细分段数 |
| 曲线长度 | 根据给定的参数，程序能够自动计算出曲线的长度拉压限值 |
| 线对象剖分 | 保持作为单一的线对象；打断分割为多个等长对象，其分割的段数根据线性分段数来确定；按照在对应弦上相等的投影长度来进行曲线的分割 |

续上表

| | |
|-----------|----------------------------|
| 线性分段计算点坐标 | 根据已给定的参数，程序自动计算出曲线的分段点处的坐标 |
| 坐标系 | 切换坐标系 |
| 单位 | 切换单位制，对话框中的数值自动更新 |

曲线框架还可以通过点击两点的方式进行绘制，需要配合捕捉功能按钮，在起始点上点击鼠标左键，在结束点的位置上再点击鼠标左键，那么也会弹出上面的对话框，方法同上。

6.3.3 绘制钢束

钢束的绘制可以在平面视图、立面视图和 3D 视图中进行。点击【绘图菜单】>【绘制框架/索/钢束单元】命令或点击【绘制框架/索单元】按钮，弹出对象属性对话框。在线对象类型项选择 **Tendon**（钢束），打开【捕捉】按钮以两点方式点击后弹出线对象钢束数据 6 对话框（图 6-6）。对话框说明见表 6-5。

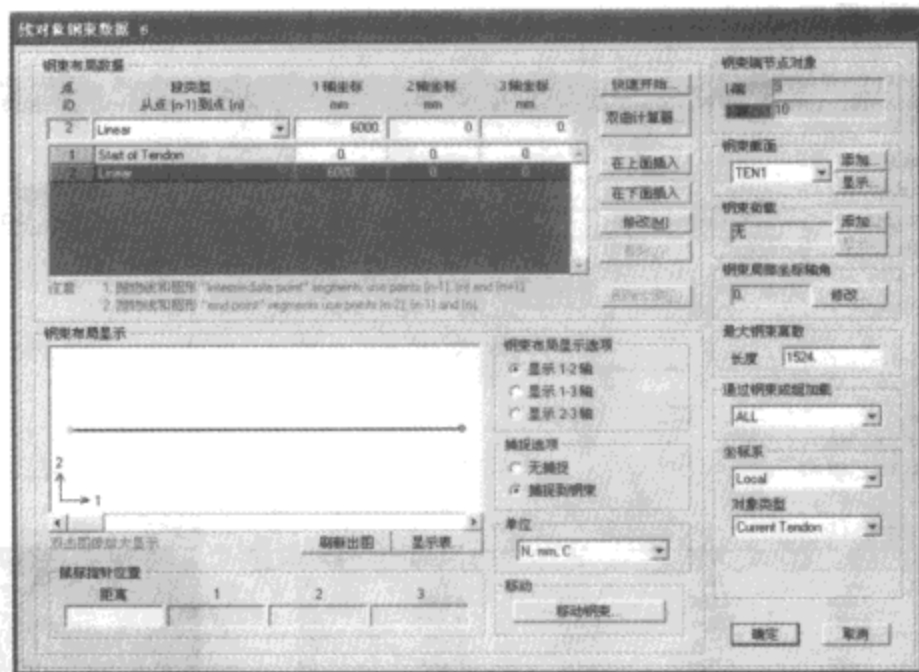


图 6-6 线对象钢束数据对话框

表 6-5

| | | |
|--------|----------------|---|
| 钢束布局数据 | 点 ID | 钢束布局显示图中的控制点 |
| | 1/2/3 轴坐标 (mm) | 控制点在局部坐标 1 轴、2 轴、3 轴的坐标 |
| | 快速开始 | 弹出钢束快速开始模板，快速定义钢束的形状 |
| | 双曲计算器 | 弹出定义抛物线钢束布局形状对话框，可以修改控制点的坐标，计算出抛物线的形状 |
| 钢束布局显示 | 刷新出图 | 根据对话框中修改的各个参数，刷新后在图形显示区域内显示钢束的形状曲线 |
| | 显示表 | 显示钢束布局表格 |
| | 鼠标指针位置 | 在钢束的布局显示图上移动鼠标，显示的是鼠标指针位置距钢束曲线起点的距离以及各个轴的坐标 |
| | 单位 | 从下拉菜单中选择单位制，可以随时更改 |
| | 移动钢束 | 给钢束指定一个距离或坐标的移动 |

续上表

| | | |
|----------|-----|---------------------------|
| 钢束端节点对象 | I 端 | 程序自动指定的 I 端节点 ID 号 |
| | J 端 | 程序自动指定的 J 端节点 ID 号 |
| 钢束截面 | 添加 | 添加新的钢束截面属性 |
| | 显示 | 显示修改更新已经定义的钢束截面属性 |
| 钢束荷载 | 添加 | 添加钢束荷载 |
| | 显示 | 显示已经指定的线对象钢束荷载 |
| 钢束局部坐标轴角 | 修改 | 改变钢束的局部坐标轴相对于整体坐标系 X 轴的夹角 |
| 最大钢束离散 | 长度 | 钢束离散的最大长度 |
| 坐标系 | | 可以选择整体坐标系或者局部坐标系 |
| 对象类型 | | 可以选择当前的钢束对象或者在局部轴上投影控制点对象 |

修改定义上述参数后，点击【确定】按钮，即在视图中显示出钢束的绘制。

6.3.4 绘制索

索的绘制可以在平面视图、立面视图和 3D 视图中进行。点击【绘图菜单】>【绘制框架/索单元】命令或点击【绘制框架/索单元】按钮，弹出对象属性对话框，在线对象类型项选择 Cable（索），打开【捕捉】按钮以两点方式点击后弹出线对象曲线梁和索参数 1 对话框（图 6-7）。对话框说明见表 6-6。

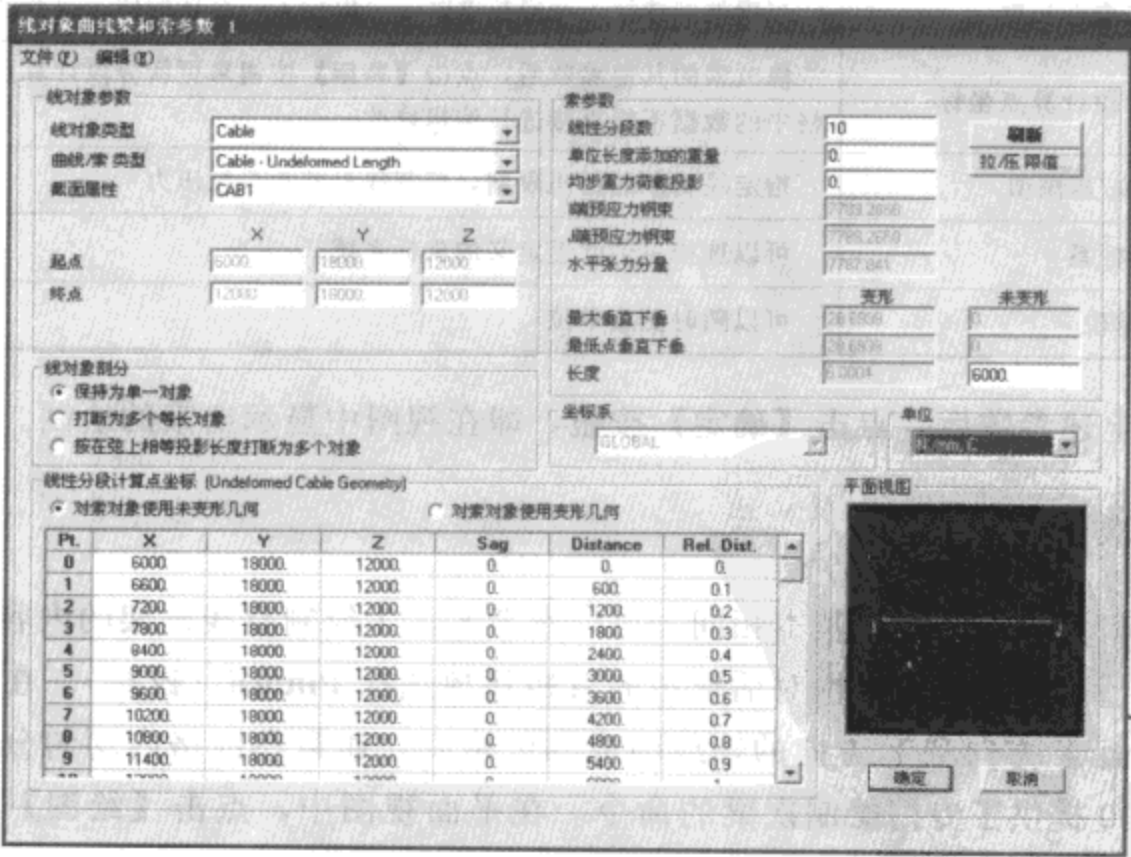



图 6-7 线对象曲线梁和索参数对话框

表 6-6

| | | |
|-------|-------------------|--|
| 线对象参数 | 线对象类型 | 选择线对象的类型 (Straight Frame: 直线框架; Curved Frame: 曲线框架; Cable: 索) |
| | 曲线/索类型 | 选择曲线索的类型 (I 端最小拉力、J 端最小拉力、I 端拉力、J 端拉力、水平拉力分量、最大竖向垂度、最低点竖向垂度、无变形长度) |
| | 截面属性 | 选择已经定义的索的截面属性 |
| | 起点 | 索起点的 X, Y 和 Z 坐标值 |
| | 终点 | 索终点的 X, Y 和 Z 坐标值 |
| 线对象剖分 | 保持为单一对象 | 分析时作为单一线对象处理 |
| | 打断为多个等长对象 | 分析时剖分为若干等长度线对象 |
| | 按在弦上相等投影长度打断为多个对象 | 分析时剖分为在弦上等长度若干线对象 |
| 索参数 | 线性分段数 | 给出索的分段数量 |
| | 单位长度添加的重量 | 单位长度的重量 |
| | 均布重力荷载投影 | 指定索重力方向荷载 |
| | I 端预应力钢束 | 当索类型选择 I 端的拉力时, 可以输入一个新的值来改变默认值 |
| | J 端预应力钢束 | 当索类型选择 J 端的拉力时, 可以输入一个新的值来改变默认值 |
| | 水平张力分量 | 当索类型选择水平张力分量时, 可以输入一个新的值来改变默认值 |
| | 最大垂直下垂 | 当索类型选择最大垂直下垂时, 可以输入一个新的值来改变默认值 |
| | 最低点垂直下垂 | 当索类型选择最低点垂直下垂时, 可以输入一个新的值来改变默认值 |
| | 未变形长度 | 当索类型选择未变形长度时, 可以输入一个新的值来改变默认值 |
| | 线性分段计算点坐标 | 修改索的其他参数后, 点击【刷新】按钮来更新分段计算点的坐标数据。表格中的数据不能直接进行编辑修改 |
| | 拉/压限值 | 指定线对象的拉压限制, 控制线对象承受拉压力 |
| 坐标系 | | 可以选择一个已经定义的坐标系统 |
| 单位 | | 可以随时更换单位 |

修改定义上述参数后, 点击【确定】按钮, 即在视图中显示出索的绘制。

6.3.5 绘制次梁

次梁绘制和梁的绘制方法基本相同。可以参考 6.3.1 绘制直线框架的内容。次梁端部通常按铰接处理, 可以在浮动属性对话框中的弯矩释放选择 Pinned (铰接)。在结构中次梁一般布置在由平面 X 方向和 Y 方向的轴线围成的区格内, 通常在区格内均匀分布。根据这一特点, SAP2000 提供了专门绘制次梁的命令。在平面视图中, 点击【绘图】>【快速绘制次梁】命令或点击【快速绘制次梁】按钮, 弹出对象属性浮动对话框 (图 6-8)。对话框说明见表 6-7。

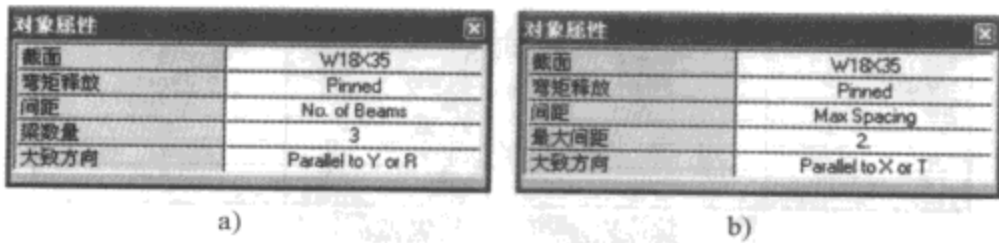



图 6-8 次梁对象属性对话框

表 6-7

| | |
|----------|--|
| 截面 | 选择绘制次梁的截面。包括程序提供和工程师定义的截面 |
| 弯矩释放 | 选择释放方式。Pinned：铰接；Continuous 刚接 |
| 间距 | 选择次梁间距方式。包括 No. of Beams：按次梁根数；Max Spacing：次梁最大间距 |
| 梁数量/最大间距 | 选择 No. of Beam 时输入次梁根数 选择 Max Spacing 时输入最大间距 |
| 大致方向 | Parallel to X or T：平行于 X 轴，按 Y 轴主梁间距均匀布置次梁或按角度平均布置次梁 Parallel to Y or R：平行于 Y 轴，按 X 轴主梁间距均匀布置次梁或按同心圆弧相切的方向均匀布置次梁 Normal to Near Edge：垂直于最近主梁方向均匀布置次梁 |

在属性右侧编辑栏中点击鼠标左键，在下拉框中选择次梁的截面名称。根据结构特性，弯矩释放选择次梁的两端连接情况，一般选择为 **Pinned**（铰接）。间距编辑栏实际上是指定间距方式。一种方法可以指定一个区格中次梁的数量，即选择 **No. of Beams**（梁数量）；另一种方法是指定次梁的最大间距，由程序自动计算需要的次梁数量，即选择 **Max Spacing**（最大间距）。当选择不同的间距，间距下面一行的标题栏可能为梁数量或最大间距，输入相应的数值。大致方向编辑栏中选择布置次梁的方向。

实际应用中，有时布置的次梁不一定在区格中均匀分布，可能偏向某一个主梁，这时可以使用【绘图】>【绘制框架\索\钢束】命令或【绘制框架\索单元】按钮，配合捕捉功能，捕捉梁的两个端点，逐根来绘制。

6.3.6 绘制支撑



支撑构件的绘制可以在平面视图、立面视图中绘制。当绘制竖向支撑时，切换到立面视图，点击【快速绘制支撑】命令或【快速绘制支撑】按钮，弹出对象属性浮动对话框。在对象属性浮动对话框中，支撑编辑栏中设置了常用的支撑形式，包括 X 形、倒 V 形、V 形、反斜撑、正斜撑。当选择不同支撑形式时，支撑编辑栏下面的参数也有所不同，分别如图 6-9 所示。支撑默认的连接属性为 **Pinned**（铰接），可以定义中心支撑和偏心支撑。绘制支撑之前，先选择支撑的截面属性，支撑两端约束条件及支撑形式。对于不同支撑形式设置需要的参数。绘制时直接点击 X 方向轴线与 Z 方向轴线围成的区格或 Y 方向轴线与 Z 方向轴线围成的区格中的任意位置。SAP2000 按照设定的参数自动绘制各种支撑（图 6-9）。对话框说明见表 6-8。



图 6-9 支撑对象属性对话框

表 6-8

| | |
|--|--|
| 截面 | 选择绘制支撑的截面，包括程序提供或工程师定义的 |
| 弯矩释放 | 选择释放方式，包括 Continuous（连续）和 Pinned（铰接） |
| 支撑 | 选择支撑的形式。包括 X：X 形；Inverted V：倒 V 形；V：V 形；Eccen Back：反斜撑；Eccen Forward：正斜撑 |
| 选择 Inverted V 支撑参数 中心偏心 左偏心 右偏心 | 支撑上方一侧，两支撑点之间的距离 支撑下方一侧，左端点偏离框架节点的距离 支撑下方一侧，右端点偏离框架节点的距离 |
| 选择 V 支撑参数 中心偏心 左偏心 右偏心 | 支撑下方一侧，两支撑点之间的距离 支撑上方一侧，左端点偏离框架节点的距离 支撑上方一侧，右端点偏离框架节点的距离 |
| 选择 Eccen Back 支撑参数 左偏心 右偏心 | 斜撑左端点偏离框架节点的距离 斜撑右端点偏离框架节点的距离 |
| 选择 Eccen Forward 支撑参数 左偏心 右偏心 | 斜撑左端点偏离框架节点的距离 斜撑右端点偏离框架节点的距离 |

如果绘制横向水平支撑，切换到平面视图，点击【快速绘制支撑】命令或【快速绘制支撑】按钮在平面视图中绘制，与绘制竖向支撑方法一样。

6.3.7 绘制线对象的辅助功能

在实际工程建模中，绘制对象的同时会经常需要编辑修改对象，这里我们介绍几种比较常用的编辑修改功能。

(1) 延伸及剪切功能

首先切换到选择状态下，即点击左侧命令条中的，光标指示为斜向左上方，然后选中

要延伸的线对象、延伸到的线对象、需要延伸的框架线的端点，再点击【编辑】>【截短/延长框架】命令，弹出截短/延长选择框架对话框（图 6-10）。

选择【延长框架】，即可实现线对象的延长。如图 6-11 所示。

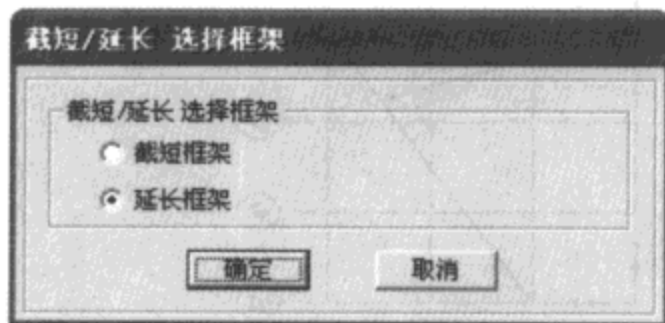


图 6-10 截短/延长选择框架对话框



图 6-11 延长框架线示意图

同理截短框架线，选中要截短的线对象、作为截短界线的线对象、需要截短的框架线的端点，再点击【编辑】>【截短/延长框架】命令，弹出截短/延长选择框架对话框（图 6-10），选择【截短框架】，即可实现线对象的剪切。如图 6-12 所示。

(2) 点对齐

当某些构件需要对齐到某个线对象的投影点上，或者需要投影到坐标轴上，为满足这些需求，SAP2000 中提供了点对齐命令。切换到选择状态，选中需要对齐的端点，然后点击【编辑】>【对齐点】命令，弹出对齐选择点对话框（图 6-13）。



图 6-12 截短框架线示意图

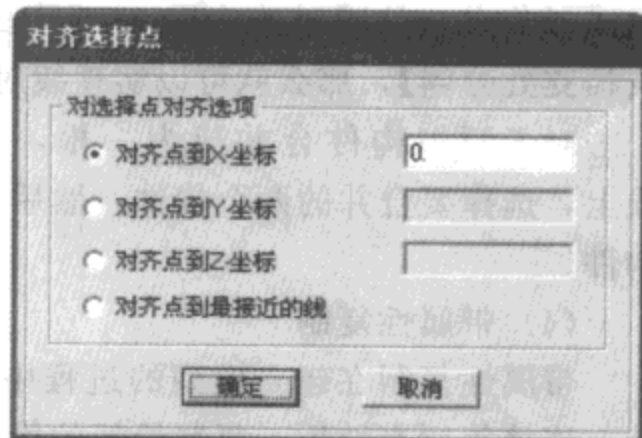


图 6-13 对齐选择点对话框

选择【对齐点到 x 坐标】，那么构件将会如图 6-14 所示。

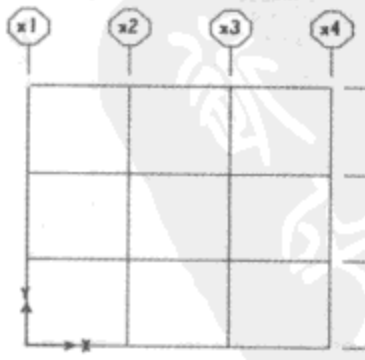
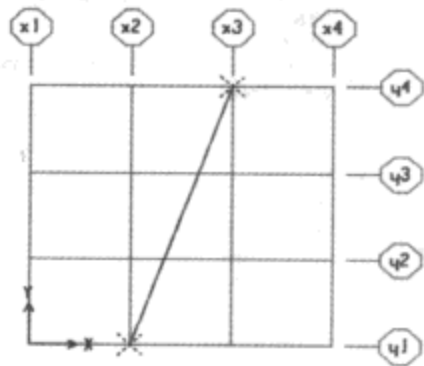


图 6-14 对齐点到 x 坐标示意图

选择【对齐点到最近的线】，那么构件端点将对齐到该端点在最近线上的投影点，如图 6-15 所示。

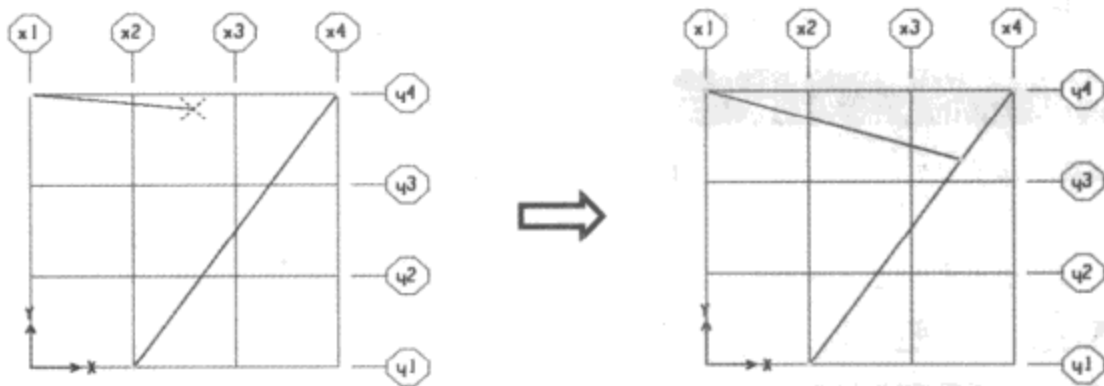


图 6-15 对齐点到最近的线示意图

(3) 分割、合并框架

在实际工程中经常会遇到框架的合并与分割，以满足实际的受力情况。选择需要分割的线对象，然后点击【编辑】>【分割对象】命令，弹出分割选择框架对话框（图 6-16）。

例如填写分割的段数 2 和分割的比例数 4，那么将按照这些数据将框架分割为 2 段，长度的比例为 1:4。在建模中比较常用的是相交线对象的分割，选中与其相交的线或者节点，并同时选中图 6-16 中的【在选择框架和节点相交处分割】，那么就可以实现线对象的分割。

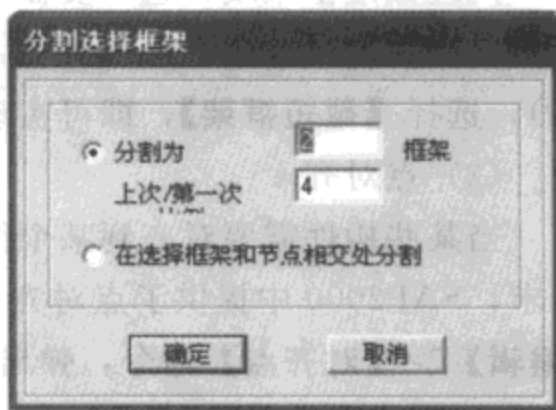


图 6-16 分割选择框架对话框

对于两根构件合并成为一根，与分割框架的操作类似，但框架构件必须在同一轴线上，选择要合并的两个构件，然后点击【编辑】>【合并对象】命令，即可合并成为一根构件。

(4) 带属性复制

带属性复制在建立模型的过程中是比较常用的功能，能够将原构件所带有的截面、荷载、连接等所有性质，复制给新的构件。并且新对象的属性可以与原对象完全相同，也可以进行有选择的控制。选择需要复制的构件，然后点击【编辑】>【带属性复制】命令，弹出【复制】对话框（图 6-17）。对话框说明见表 6-9~表 6-11。

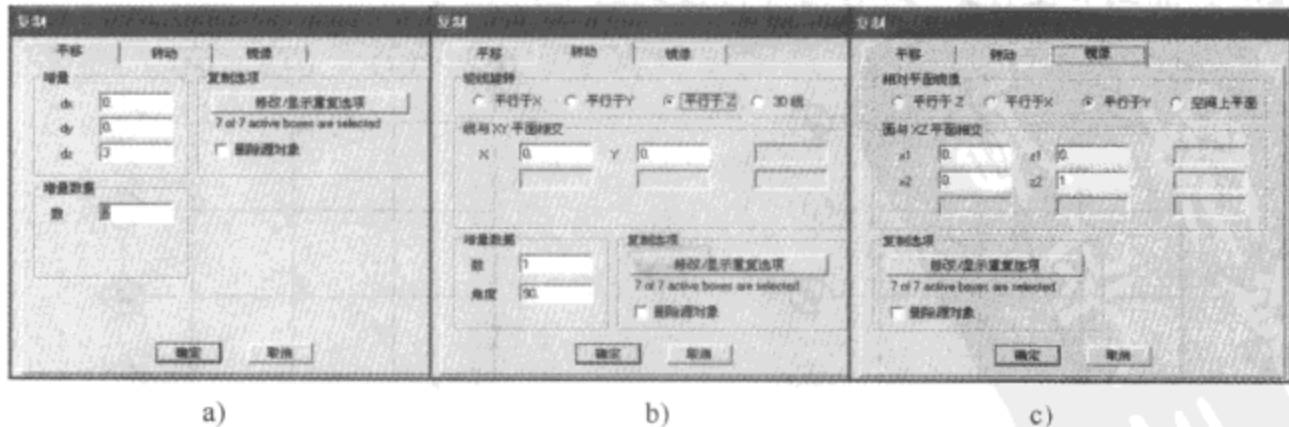


图 6-17 复制对话框

| | | |
|------|-------------|---------------------------|
| 增量 | dx | 复制得到的新对象与原对象在 x 方向上的距离 |
| | dy | 复制得到的新对象与原对象在 y 方向上的距离 |
| | dz | 复制得到的新对象与原对象在 z 方向上的距离 |
| 增量数据 | 数 | 复制生成新对象的个数 |
| 复制选项 | 修改 \ 显示重复选项 | 构件属性有选择的控制按钮，见图 6-17a) 所示 |
| | 删除源对象 | 勾选则删除被复制的源对象 |

| | | |
|--------|-------------|--|
| 绕线旋转 | 平行于 X | 绕着平行于 X 轴的直线旋转 |
| | 平行于 Y | 绕着平行于 Y 轴的直线旋转 |
| | 平行于 Z | 绕着平行于 Z 轴的直线旋转 |
| | 3D 线 | 绕着空间的直线旋转，由空间的两点坐标来确定 |
| 线与平面相交 | 线与 YZ 平面相交 | 选择绕平行于 X 轴的直线旋转，该直线与 YZ 平面的交点 Y 坐标和 Z 坐标 |
| | 线与 XZ 平面相交 | 选择绕平行于 Y 轴的直线旋转，该直线与 XZ 平面的交点 X 坐标和 Z 坐标 |
| | 线与 XY 平面相交 | 选择绕平行于 Z 轴的直线旋转，该直线与 XY 平面的交点 X 坐标和 Y 坐标 |
| 增量数据 | 数 | 复制生成新对象的个数 |
| | 角度 | 绕直线所旋转的角度 |
| 复制选项 | 修改 \ 显示重复选项 | 构件属性有选择的控制按钮，见图 6-17b) 所示 |
| | 删除源对象 | 勾选则删除被复制的源对象 |

| | | |
|--------|-------------|---------------------------------|
| 相对平面镜像 | 平行于 Z | 相对平行于 Z 轴的平面 |
| | 平行于 X | 相对平行于 X 轴的平面 |
| | 平行于 Y | 相对平行于 Y 轴的平面 |
| | 空间上平面 | 相对于空间的平面镜像复制，由空间平面内的三点坐标来确定 |
| 面与平面相交 | 面与 XY 平面相交 | 相对平行于 Z 轴且与 XY 平面的两个交点确定的平面镜像复制 |
| | 面与 YZ 平面相交 | 相对平行于 X 轴且与 YZ 平面的两个交点确定的平面镜像复制 |
| | 面与 XZ 平面相交 | 相对平行于 Y 轴且与 XZ 平面的两个交点确定的平面镜像复制 |
| 复制选项 | 修改 \ 显示重复选项 | 构件属性有选择的控制按钮，见图 6-17c) 所示 |
| | 删除源对象 | 勾选则删除被复制的源对象 |

对话框中的平移 \ 旋转 \ 镜像三个标签，提供了三种进行带属性复制的方式，针对属性的选择和控制在图 6-17 中的【修改/显示重复选项】按钮，弹出复制选项对话框（图 6-18）。

对话框中有两个分页栏，有控制构件的指定属性和荷载设计属性选项。在默认情况下，构件包含构件所有的属性，复制给新对象。如果需要部分属性的连带复制，可以在这个对话框

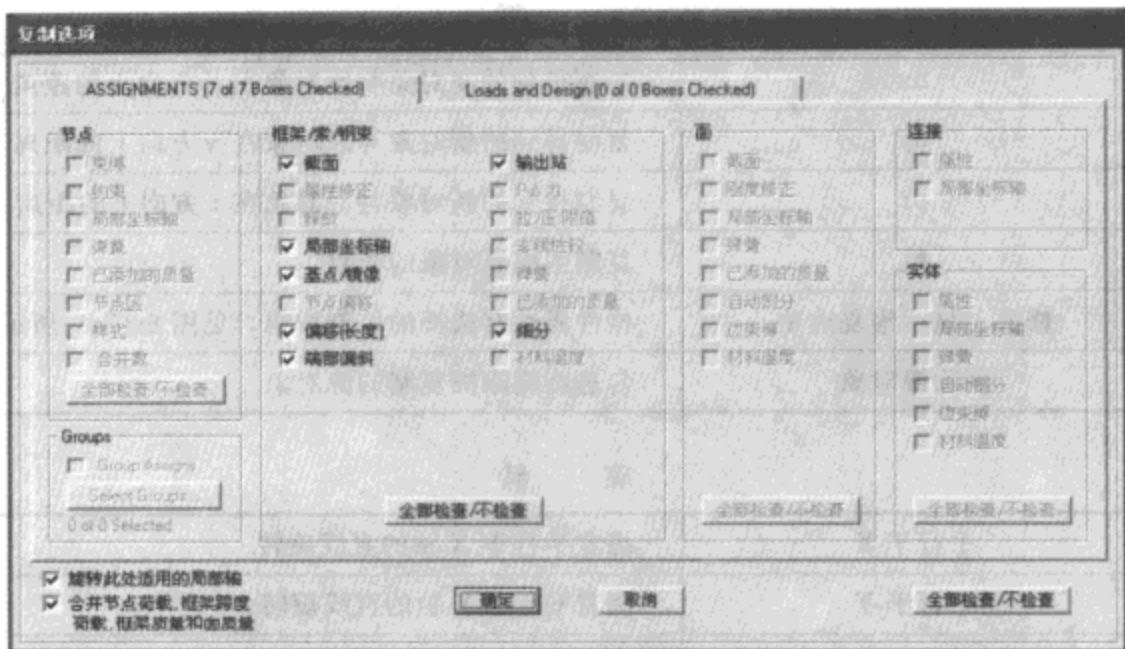


图 6-18 复制选项对话框

框中进行对应项目的选择。带属性复制功能与简单的复制相比，能够节省重新指定及施加荷载等繁重的工作量，使建模更加快捷。

6.4 面对象的绘制

SAP2000 中的面对象代表着结构中的楼板、墙、筒仓壁、坡道等薄壳构件，并且提供了多种绘制面对象的方法，包括点击生成面对象、快速点击生成面对象、线对象拉伸生成面对象等方法。下面分别介绍绘制面对象的各种常用方法。

6.4.1 绘制壳面


根据要绘制的面的截面形状，可以选择不同的命令。比如绘制任意形状的楼板，可以点击【绘图】>【绘制多边形面】命令或点击【绘制四边形面】按钮，弹出对象属性浮动对话框（图 6-19）。对话框说明见表 6-12。



图 6-19 楼板对象属性对话框

表 6-12

| 截面 | 选择绘制面的截面属性 |
|------------------------------------|----------------------------------|
| 绘图控制类型 | |
| 选择 None | 无控制 |
| 选择 Horizontal | 控制面对象边绘制方向为水平方向 |
| 选择 Vertical | 控制面对象边绘制方向为竖直方向 |
| 选择 Parallel to Angle (与角平行) | 输入控制面对象起始边绘制角度 |
| 选择 Fixed Length (固定长度) | 输入控制面对象起始边固定长度 |
| Fixed Length and Angle (固定长度和固定角度) | 输入控制面对象起始边的长度; 输入面对象起始边绕 Z 轴旋转角度 |
| Fixed dh and dv (固定 dh 和固定 dv) | 输入面对象起始边在水平方向长度增量和在竖直方向长度增量 |

绘制之前，选择截面属性，然后调整上述所需参数，最后绘制。

如果绘制墙体壳面，可以在立面视图或者三维视图进行绘制，点击【绘图】>【绘制矩形面】命令或【绘图】>【快速绘制面】命令，这两个命令绘制的都是矩形的面对象。

在立面视图中，点击【绘图菜单】>【快速绘制面单元】或点击【快速绘制面】按钮，弹出面对象属性对话框（图 6-20）。对话框说明见表 6-13。

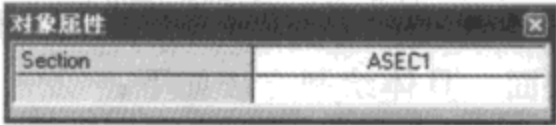


图 6-20 面对象属性对话框

表 6-13

| 属性 | 选择绘制面的截面属性。包括程序提供或工程师定义的截面 |
|----|----------------------------|
|----|----------------------------|

选择已经定义的面单元截面属性，可以直接在轴线围成的区格内任意位置上点击鼠标左键，则 SAP2000 自动在立面的区格内布置一片墙。这一命令也可以窗选一个范围，那么在范围之内的所有轴网区格内分别绘制墙。

在立面视图对墙体进行开洞，可以先进行几何剖分，然后删去开洞部位的墙。具体操作：在立面视图选择一片墙，点击【编辑】>【剖分面】命令，弹出划分选择面对话框（图 6-21）。

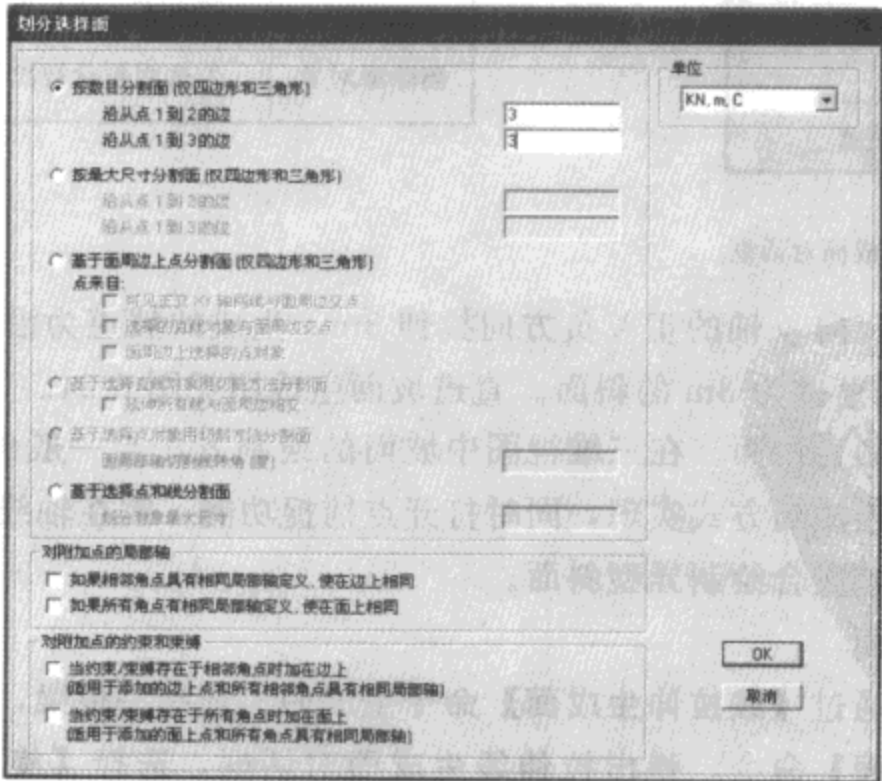


图 6-21 划分选择面对话框

如图 6-22 所示根据需要将墙体剖分成若干对象，将洞口位置的墙删除即可。

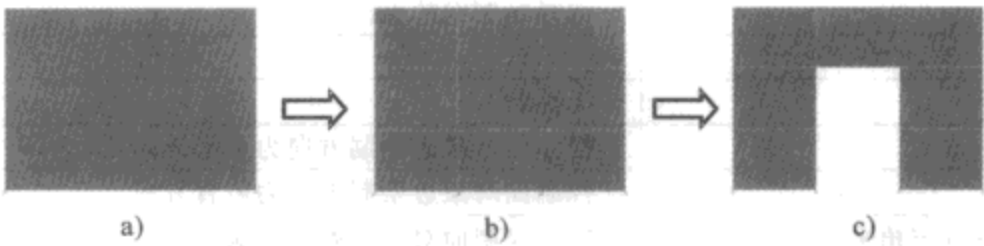


图 6-22 墙开洞
a) 整片墙；b) 3×3 部分；c) 删除洞口的墙

6.4.2 绘制斜面

在实际工程中经常会遇到坡道、车道、旋转楼梯等等。在 SAP2000 中可以根据不同情况，利用线对象拉伸生成面或者在三维视图中绘制。斜面一般可分为直坡面、螺旋坡面、曲坡面。具体绘制方法如下：

(1) 绘制直坡面

方法一：线拉伸生成面绘制直坡面，选择一根梁线对象，点击【编辑】>【拉伸】>【拉伸线生成面】命令，在拉伸线生成面对话框中设置如图 6-23（单位：m）所示，对话框说明见表 6-14。



平 移 表 6-14

| | |
|-------|----------------|
| dx | x 方向拉伸的投影距离 |
| dy | y 方向拉伸的投影距离 |
| dz | z 方向拉伸距离，相当于高差 |
| 数 | 拉伸生成面的个数 |
| 删除源对象 | 勾选则删除被拉伸的线对象 |

图 6-23 拉伸线生成面对话框

分别选择线对象，向 y 轴的正 \ 负方向拉伸 3m，生成的坡道为沿 y 轴正方向投影长度为 6m，沿 z 轴负方向落差为 3m 的斜面。直道坡面生成图见图 6-24。

方法二：三维绘制直坡面。在三维视图中坡面的绘制方法与一般面对象绘制方法一样，通过绘制面命令多点连成面方式实现，同时打开点捕捉功能，需在轴线间准确捕捉斜面的四个角点，此种方法比较适合绘制异型斜面。

(2) 绘制螺旋坡面

绘制螺旋坡面是通过【线拉伸生成面】命令生成的。选择一根梁，点击【编辑】>【拉伸】>【拉伸线生成面】命令，弹出拉伸线生成面对话框，选择【旋转】菜单（图 6-25）。对话框说明见表 6-15。

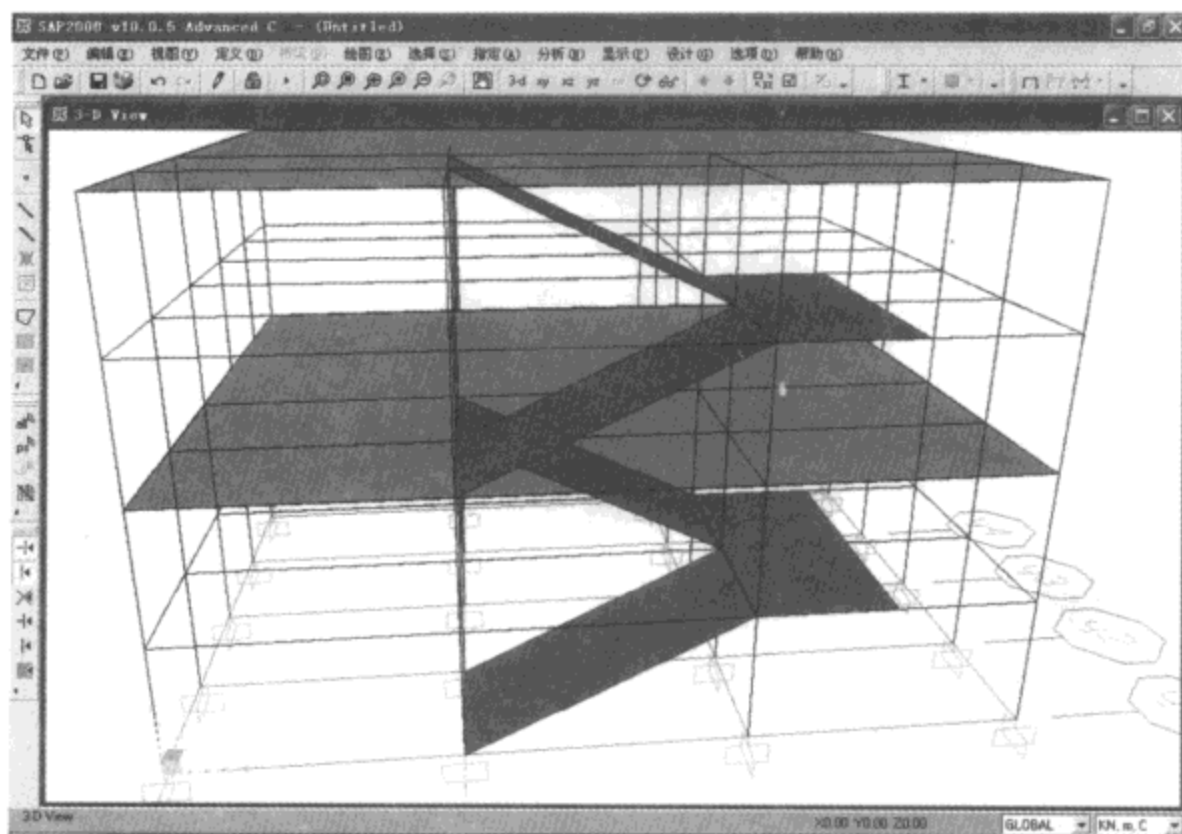


图 6-24 绘制直道坡面

例如图 6-26 中的旋转楼梯高为 12m，可以被分为 80 段，每段 10° 。数据输入如图 6-25 所示，便可以得到旋转楼梯的模型（图 6-26）。其中拉伸生成的面对象默认属性是壳。

表 6-15

拉伸线生成面

平移 旋转 高级

绕轴旋转

☐ X ☐ Y ☒ Z

绕点旋转

点 X 6

点 Y 0

增量数据

角度 10

数 80

总升高 (Z) 12

☒ 删除源对象

确定 取消

图 6-25 拉伸线生成面对话框

| | | |
|-------|--------------|------------------------------------|
| 绕轴旋转 | X | 绕 X 轴旋转 |
| | Y | 绕 Y 轴旋转 |
| | Z | 绕 Z 轴旋转 |
| 绕点旋转 | 点 X | 旋转圆心点的 X 坐标 |
| | 点 Y | 旋转圆心点的 Y 坐标 |
| 增量数据 | 角度 | 将螺旋面剖分成若干段后，单段投影的角度 |
| | 数 | 螺旋面剖分的个数。在这里“角度”与“数”的乘积是整个螺旋面旋转的角度 |
| | 总升高 (Z) | 螺旋面的高度 |
| 删除源对象 | 勾选则删除被拉伸的线对象 | |

(3) 高级拉伸

在实际工程中经常会遇到一些曲面，也可以通过线对象拉伸生成。选择一根梁，点击【编辑】>【拉伸】>【拉伸线生成面】命令，弹出拉伸线生成面对话框，选择高级菜单

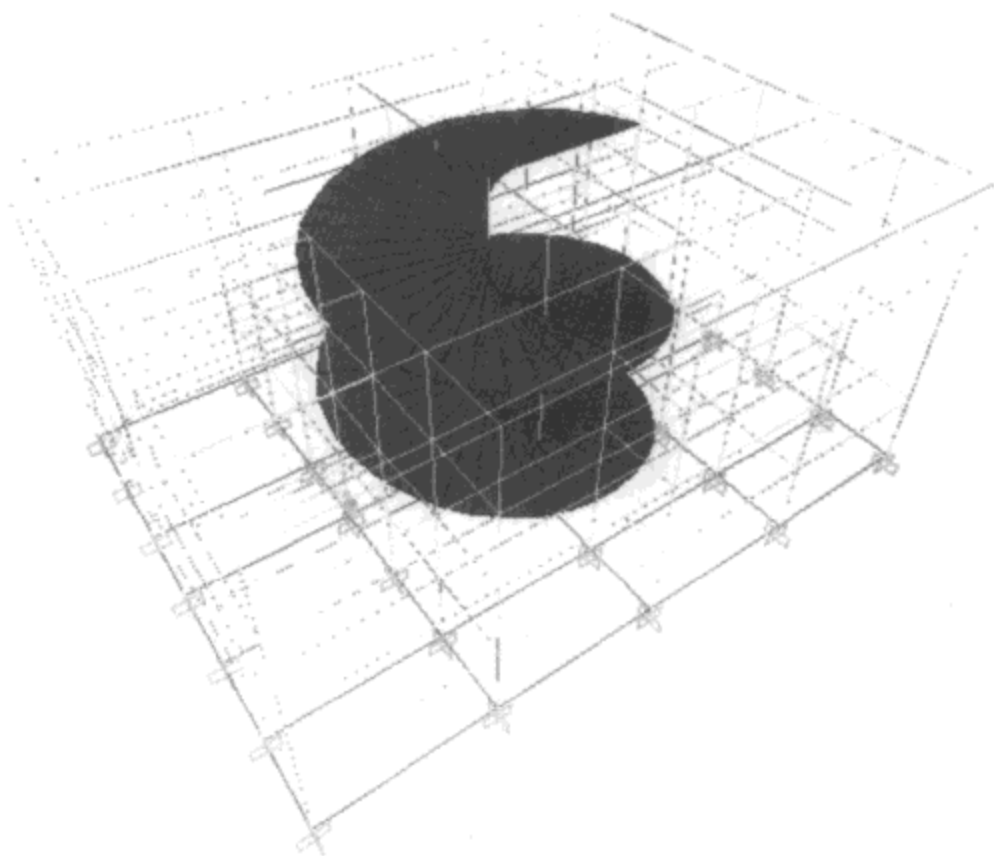


图 6-26 绘制旋转坡道

(图 6-27)。拉伸路径可以指定全局 X、Y、Z 轴来定义。再点击【定义/修改路径】按钮，弹出定义拉伸路径对话框（图 6-28）。对话框说明见表 6-16。

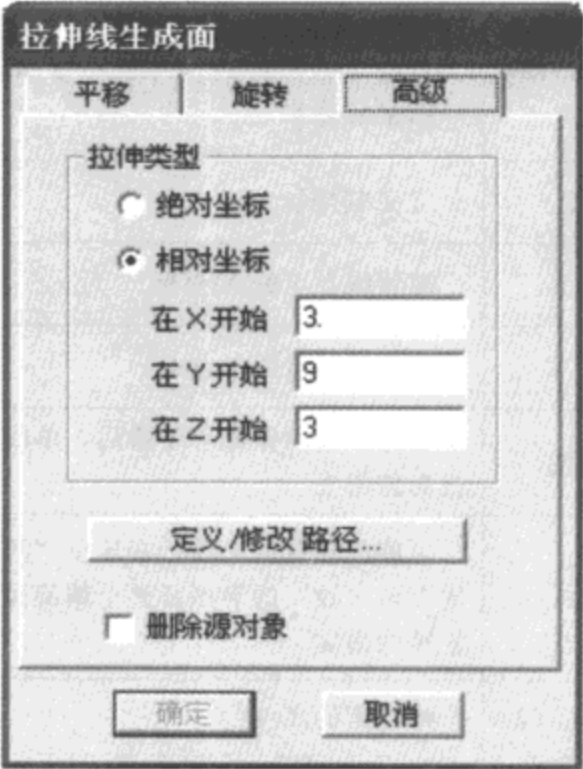


图 6-27 拉伸生成面对话框

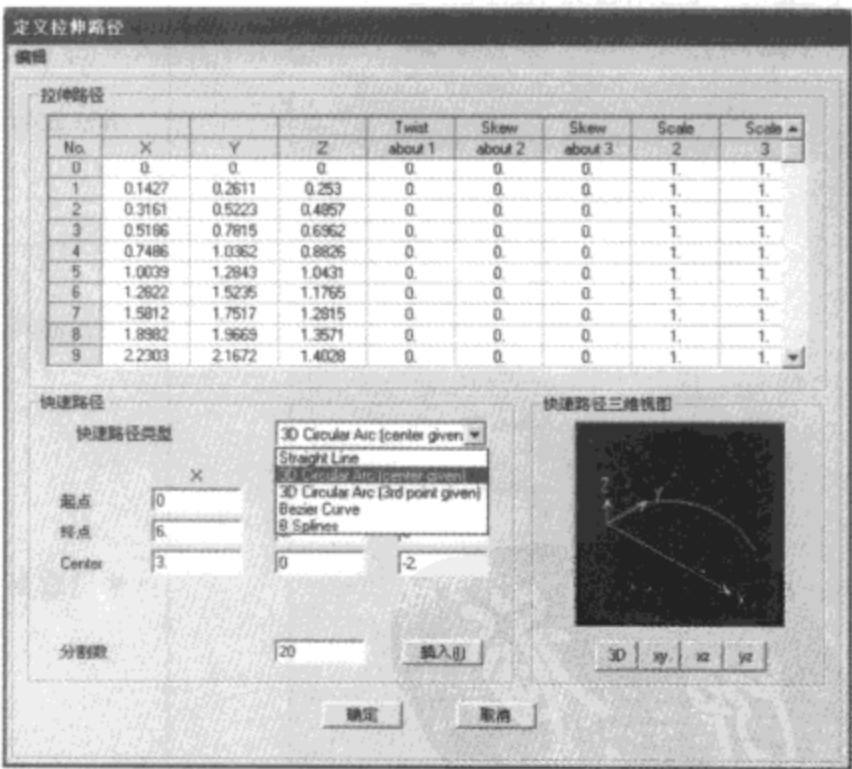


图 6-28 定义拉伸路径对话框

利用线对象可以根据定义的任何曲线路径进行拉伸，可以选择快速拉伸的典型路径，将数据插入到电子表格中；也可以在电子表格中直接输入数据来定义拉伸路径，然后 SAP2000 会根据所定义的路径自动的拉伸出曲面。

表 6-16

| | | |
|------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 拉伸路径 | 电 子 表 格 | 直接在单元表格内输入数值定义拉伸路径 |
| 快速路径 | Straight Line | 直线路径，指定附加数据是起点、终点的 X、Y、Z 坐标 |
| | 3D Circular Arc (center given) | 空间圆弧路径，指定附加数据是起始 X、Y、Z 坐标，中心坐标 |
| | 3D Circular Arc (3rd point given) | 空间圆弧路径，指定附加数据是三点的 X、Y、Z 坐标 |
| | Bezier Curve | 贝塞尔曲线，指定附加数据是坐标点的电子表格 |
| | B Splines | 贝塞尔多义线，指定附加数据是坐标点的电子表格和平滑常数 |
| | 分割数 | 拉伸生成曲面的分段数量 |
| | 插入 | 点击该按钮，自动将快速指定的典型曲线的数据输入到拉伸路径的电子表格中 |

6.5 实体单元的绘制

SAP2000 实体的形成有两种方法，一种是通过面拉伸生成实体；另一种是利用模板生成实体。利用模板生成实体参见第 10 章，本章主要介绍通过面拉伸生成实体。

选定面对象，点击【编辑】>【拉伸】>【拉伸面生成实体】，弹出拉伸面到实体对话框（图 6-29）。对话框说明见表 6-17、表 6-18。

平 移表 6-17

| | | |
|-------|--------|------------------|
| 拉伸方向 | 垂直于面表面 | 面的拉伸方向垂直于面 |
| | 用户定义 | 根据工程师要求来定义面的拉伸方向 |
| 增量数据 | dx | x 方向拉伸的投影距离 |
| | dy | y 方向拉伸的投影距离 |
| | dz | z 方向拉伸距离，相当于高差 |
| | 数 | 拉伸生成体的个数 |
| 删除源对象 | | 勾选则删除被拉伸的面对象 |

表 6-18

| | | |
|-------|---------|------------------------|
| 绕轴旋转 | X | 绕 X 轴旋转 |
| | Y | 绕 Y 轴旋转 |
| | Z | 绕 Z 轴旋转 |
| 绕点旋转 | 点 X | 旋转圆心点的 X 坐标 |
| | 点 Z | 旋转圆心点的 Z 坐标 |
| 增量数据 | 角度 | 旋转体的单段投影的角 |
| | 数 | “角度”与“数”的乘积是整个螺旋面旋转的角度 |
| | 总升高 (X) | 旋转体的高度 |
| 删除源对象 | | 勾选则删除被旋转的面对象 |

使用这个【平移】命令可以将面平移拉伸生成实体，方便快捷。

针对一些旋转体的构筑物，比如螺旋形坝体等，绘制旋转体时，可以选择对话框内的【旋转】菜单（图 6-30）。

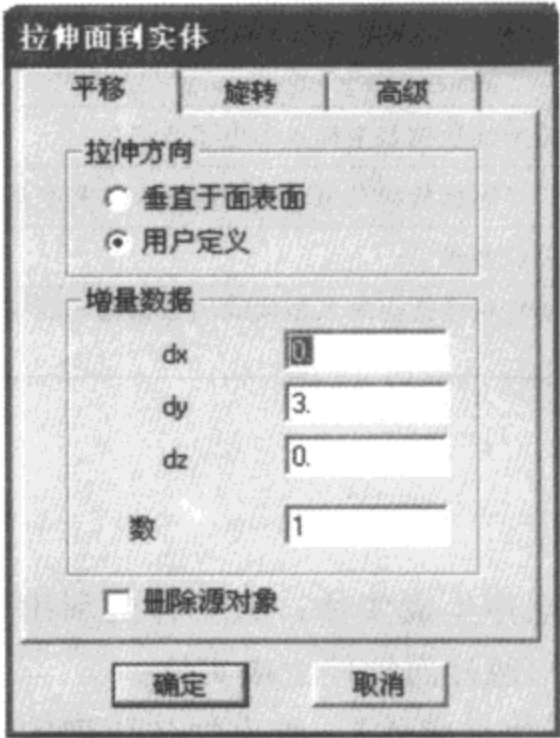


图 6-29 拉伸面到实体对话框

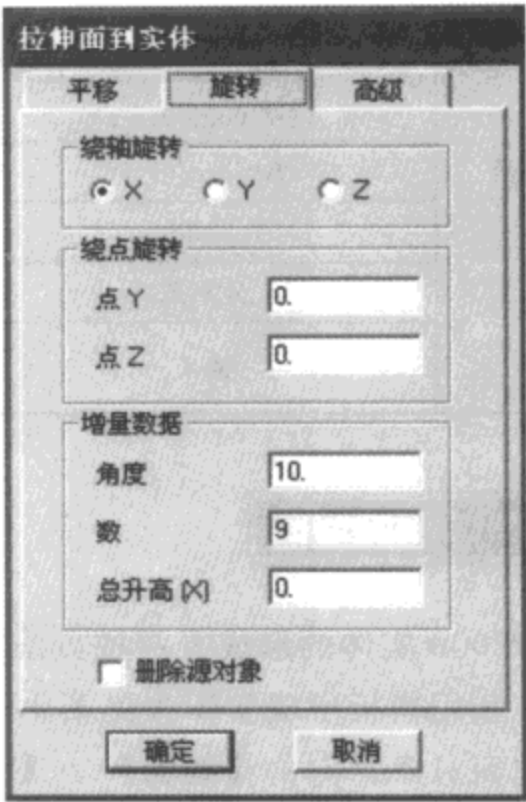



图 6-30 拉伸面到实体对话框

此外实体还可以通过高级拉伸面对象生成。选定面对象，点击【编辑】>【拉伸】>【拉伸面生成实体】，弹出拉伸面到实体对话框。选择【高级】菜单（图 6-30），拉伸路径可以指定全局 X、Y、Z 轴来定义，其内容及方法同 6.4.3 的高级拉伸。

6.6 重定形命令

直接在对象或轴线上进行拖拽，可以使其改变形状，简单方便。点击【绘图】>【设置重定形单元模式】或点击【重定形】按钮，此时光标变成绘制状态。

如果需要修改对象，就在需要修改的对象上单击鼠标左键，对象变成虚线，端点变成白色矩形，按住鼠标左键移动，拖拽到指定位置释放鼠标，就完成了对象的重定形。

如果是轴线需要修改，那么需要将轴网系统转化为一般轴线，然后打开轴网系统的锁定，即可用重定形命令进行修改。方法与重定形对象一样。

此外修改对象的端点位置还有比较快捷的方法，就是直接坐标修改，在点属性对话框中进行，具体操作方法见 6.9.1 点信息。

6.7 组的操作

SAP2000 中，组是把具有同样特性的对象集合在一起，可以按组的名称选择对象，以组为单位设计对象，使用组在模型中定义截面切割，可获得这些截面切割上的作用力等等。通常要先定义组的名称，再把它指定给一组对象。点击【定义】>【组】命令，弹出定义组

对话框（图 6-31）。

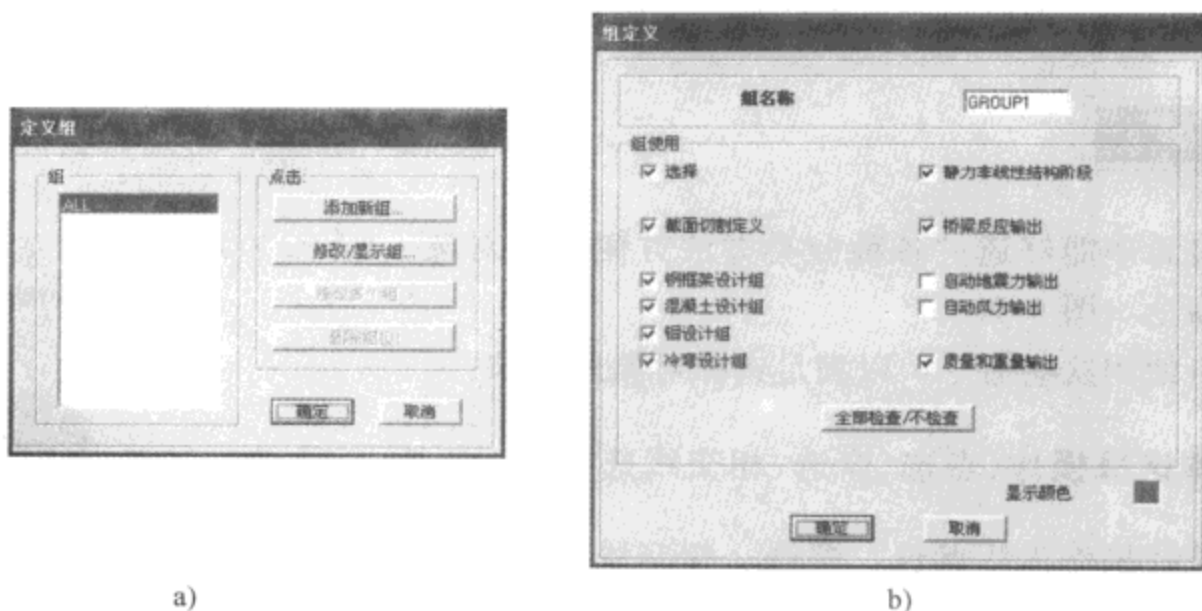


图 6-31 定义组对话框

在列表中的名称 ALL，表示程序中所有对象都被指定成默认的组 ALL，这个名称不能被删除。点击【添加新组】按钮，弹出组定义对话框。根据实际工程的需要，在对话框中勾选所定义组的用途。

然后，在视图中选择一组构件，点击【指定】>【指定到组】命令，弹出指定/定义组对话框，选择组的名称，使其高亮显示（图 6-32）。

点击【确定】按钮后，该组构件就被编成以该名称定义的组；也可以直接选择一组构件，点击【指定】>【组】的名称命令，在指定/定义组对话框中添加新名称，点击【确定】按钮即可。组的定义是开放的，可以随时选择其他构件，点击【指定】>【组】的名称命令将构件添加到已有的组中，并且一个构件可以属于多个组。

在定义完组后，可以通过组来选择构件。点击【选择】>【选择】>【组】命令，弹出选择组对话框（图 6-33）。

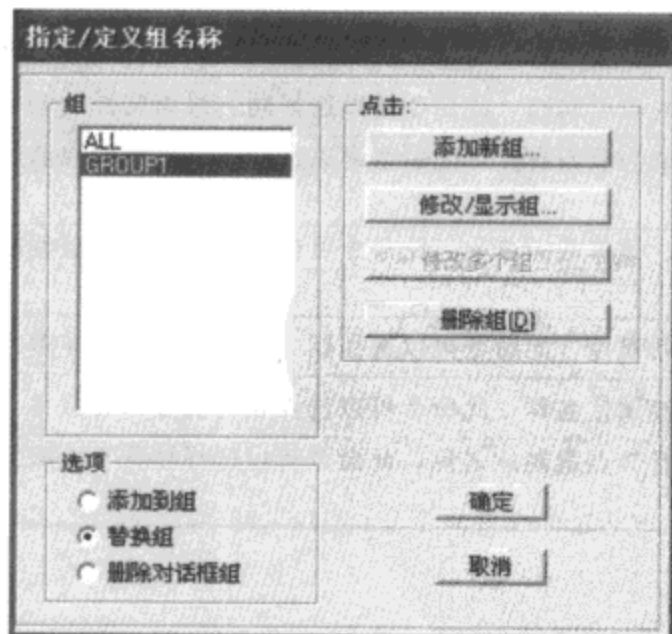


图 6-32 定义组对话框



图 6-33 选择组对话框

在对话框列表中选择组的名称，使其高亮显示。按【确定】后，视图中被指定为该组的构件都显示成虚线，说明组成员构件都被选中，这时就可以对这组构件进行指定操作了。

6.8 选择功能

在操作时希望能够通过各种分类方法方便选择对象。SAP2000 提供了多种选择命令（图 6-34）。

可以配合使用这些命令，以满足选择对象的要求。

6.8.1 基本选择操作(点选、窗选、相交线选择)

基本的选择操作包括点选、窗选、相交线选择，当鼠标的指针处于选择状态时，可以进行选择。在对象上点击鼠标左键选择对象，称为点选；在区域的左上角点击鼠标左键，按着左键拖拽鼠标光标至区域的另一个对象，选择区域内的对象，称为窗选；在要选择对象上，穿过对象绘制一条虚线，与之相交的对象将被选择，称为相交线选择，即点击【选择】>【相交线】命令，然后在要选的对象上绘制虚线。

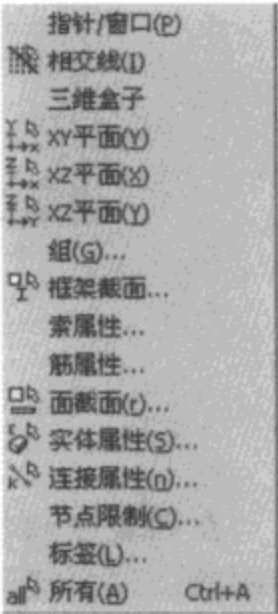


图 6-34 选择命令

6.8.2 按照性质选择

如图 6-34 所示，用户可以点击【选择】菜单，根据对象的属性来选择。相关说明见表 6-19。

表 6-19

| | |
|-----------|---|
| XY 平面 (Y) | 在视图中选择一个点对象，则与该点在同一个 XY 平面内的所有对象都被选中 |
| XZ 平面 (X) | 在视图中选择一个点对象，则与该点在同一个 XZ 平面内的所有对象都被选中 |
| XZ 平面 (Y) | 在视图中选择一个点对象，则与该点在同一个 XZ 平面内的所有对象都被选中 |
| 框架截面 | 点击弹出选择截面对话框，列表中列出所有框架截面名称，此命令可以选择同一截面属性的线单元 |
| 索属性 | 点击弹出选择属性对话框，列表中列出所有索的截面属性，此命令可以选择同一截面属性的线单元 |
| 筋属性 | 点击弹出选择属性对话框，列表中列出所有钢束的截面属性，此命令可以选择同一截面属性的线单元 |
| 面截面 | 点击弹出选择截面对话框，列表中列出所有墙、楼板截面名称，此命令可以选择同一截面属性的面单元 |
| 实体属性 | 点击弹出选择属性对话框，列表中列出所实体的属性，此命令可以选择同一截面属性的实体单元 |
| 连接属性 | 点击弹出选择属性对话框，列表中列出所有连接属性名称，此命令可以选择相同属性的连接单元 |
| 节点限制 | 点击弹出选择约束属性对话框，列表中列出所有节点限制的名称，此命令可以选择特殊节点限制的单元 |

6.8.3 按照编号选择

点击【选择】>【标签】命令，弹出通过标签选择对话框（图 6-35）。对话框说明见表 6-20。

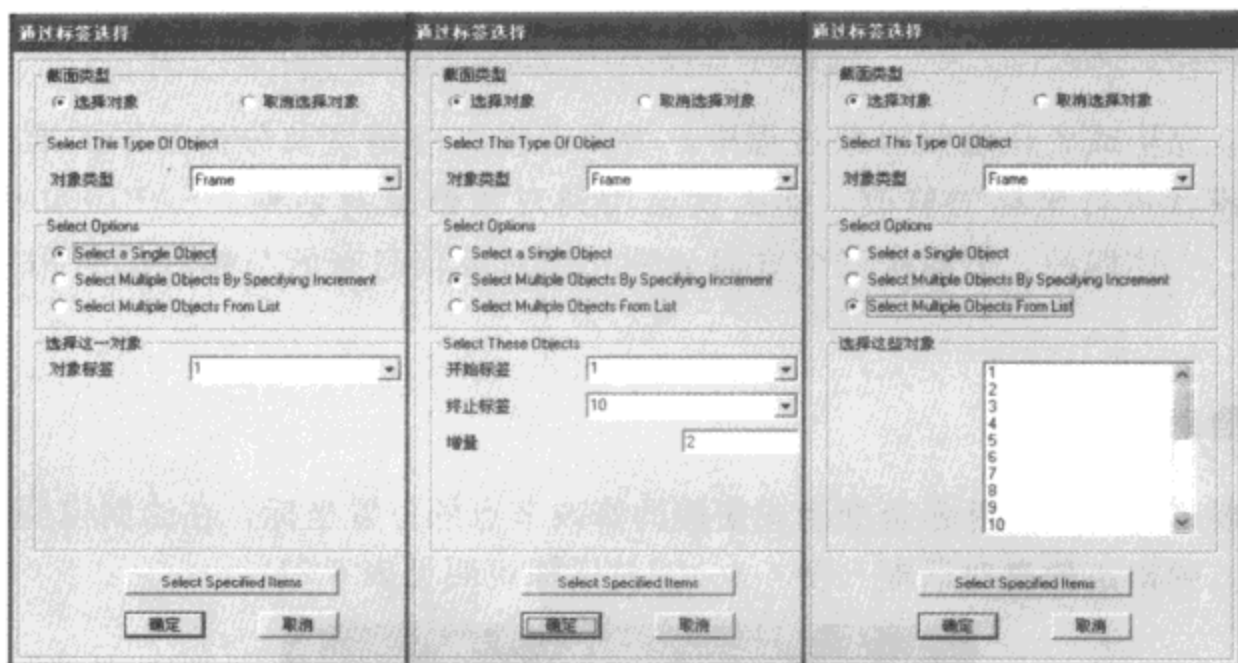


图 6-35 通过标签选择对话框

表 6-20

| | | |
|-----------|----------------------------------|--------------------------|
| 截面类型 | 选择对象 | 勾选确定本次操作是选择对象 |
| | 取消选择对象 | 勾选确定本次操作是取消选择对象 |
| 对象类型 | 根据模型中的所有对象，在下拉菜单中按照对象类型分别列出，以供选择 | |
| 选择对象 | 选择单个对象 | 通过对象标签编号仅选单一对象 |
| | 通过选项选择多个对象 | 选择编号位于起始和终止对象编号中间的构件 |
| | 从列表中选择多个对象 | 按照对象类型给出这类对象的下拉列表，从列表中选择 |
| 选择这一（些）对象 | | 给出选择对象的条件 |

这个命令不但可以选择对象还可以取消对象的选择，还可以按照对象类型，进行单一对象的选择、区间段内多对象的选择或者从下拉列表中选择多个对象。

6.8.4 辅助选择功能（全选、清除选择、反选）

■ 全选（按钮 ）

用来选择全部对象的快捷命令。

■ 清除选择（按钮 ）

清除当前所有选择。

■ 反选

取消对当前对象的选择，而选择其他未被选择的对象。

SAP2000 的选择功能十分灵活，工程师在实际建模过程中应不断积累选择命令的使用技巧，使之更加得心应手。

6.9 对象信息查看

模型建立完毕或者在绘制对象过程中，为保证模型的精度及分析结果的准确，需要经常进行检查或者进行坐标的修改，那么就会用到对象信息对话框。SAP2000 中对象分为点、线、面、实体四种，下面从三个方面分别介绍对象信息查看与修改的常用方法和一般过程。

6.9.1 点信息

如果需要查看所绘构件是否准确或便捷的修改节点的位置坐标，在绘制模型的节点处点击鼠标右键，弹出点信息对话框（图 6-36）。对话框说明见表 6-21。

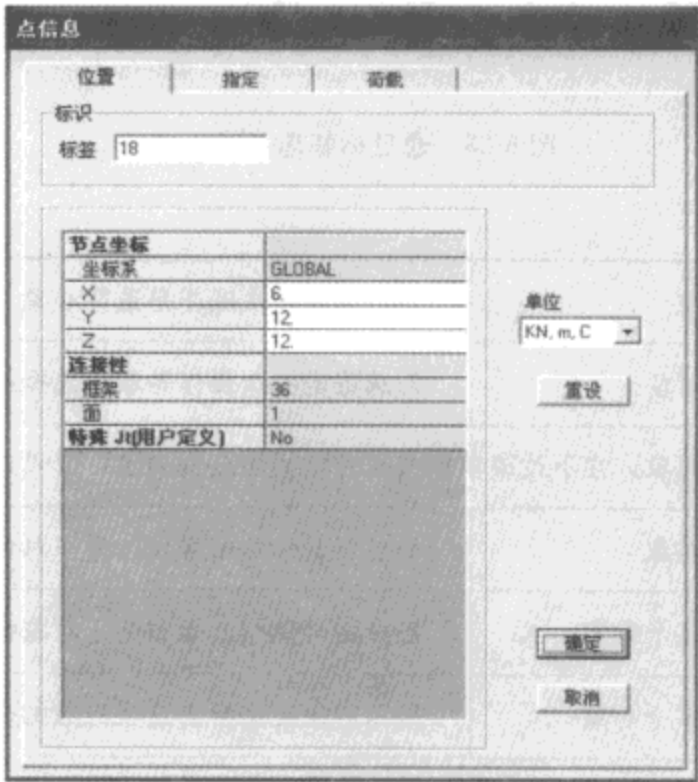


图 6-36 点信息对话框

表 6-21

| 标识 | 标签 | 程序给在该点处所绘制的对象自动编制的标识号 |
|------|-----|----------------------------------|
| 节点坐标 | 坐标系 | 全局坐标系 |
| | X | 节点 X 轴的坐标，可进行修改，若点击【重设】按钮即可恢复原数值 |
| | Y | 节点 Y 轴的坐标，可进行修改，若点击【重设】按钮即可恢复原数值 |
| | Z | 节点 Z 轴的坐标，可进行修改，若点击【重设】按钮即可恢复原数值 |
| 连接性 | 框架 | 相交在该节点处的框架编号 |

在对话框中只有节点 X、Y、Z 坐标是可编辑的，即可以在此处实现直接坐标修改。直接更改 X、Y、Z 坐标，点击【确定】按钮后，在图形中的构件会相应地发生端点的位置变化。

在建立模型和绘制结构期间随时需要查看该节点的指定信息，来检查校核对节点各项指定操作的正误。如果对该点进行一些属性的指定（参见第八章），可以点击图 6-37 中的【指定】选项卡，弹出点的指定信息的菜单（图 6-37）。菜单说明见表 6-22。

表 6-22

| | | |
|----|------|-------------------------------------|
| 指定 | 标识 | 程序给在该点处所绘制的对象自动编制的标识号 |
| | 束缚 | 给该点对象指定的束缚名称和类型，此时该节点指定的为刚性隔板 |
| | 约束 | 指定给该节点的约束种类 |
| | 局部坐标 | 如图是程序默认的局部坐标系，在指定中如作更改，在此将会显示 |
| | 弹簧 | 弹簧属性的从属 |
| | 质量 | 指定给该节点的附加点质量 |
| | 节点区 | 指定给该节点的节点区 |
| | 节点样式 | 该点所指定的节点样式，显示名称和数值 |
| | 成组 | 该节点所在定义的组，如果没有指定成组，那么如图 6-37 显示 ALL |

如果需要查看该节点的荷载信息，可以点击图 6-37 中的【荷载】按钮，弹出点的荷载信息菜单（图 6-38）。菜单说明见表 6-23。

表 6-23

| | | | |
|----|------|---------|-----------------------|
| 荷载 | 标识 | | 程序给在该点处所绘制的对象自动编制的标识号 |
| | 荷载工况 | | 所指定给节点的荷载工况类型 |
| | 节点力 | 力在 X 方向 | 节点在 X 方向上受到的力 |
| | | 力在 Y 方向 | 节点在 Y 方向上受到的力 |
| | | 力在 Z 方向 | 节点在 Z 方向上受到的力 |
| | | 弯矩关于 X | 节点绕 X 轴方向受到的弯矩 |
| | 节点位移 | | 给节点指定一个 Y 方向的地面位移 |

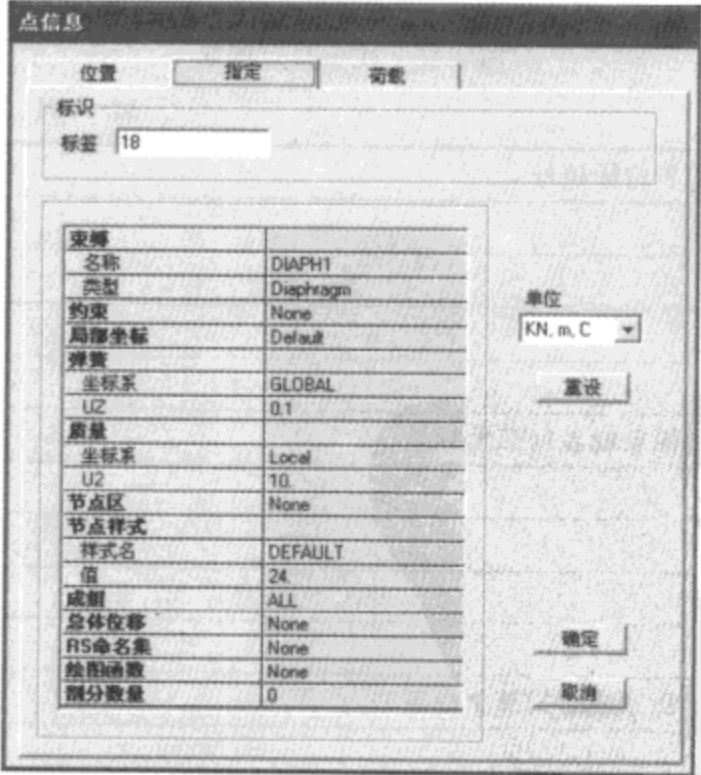


图 6-37 点信息对话框

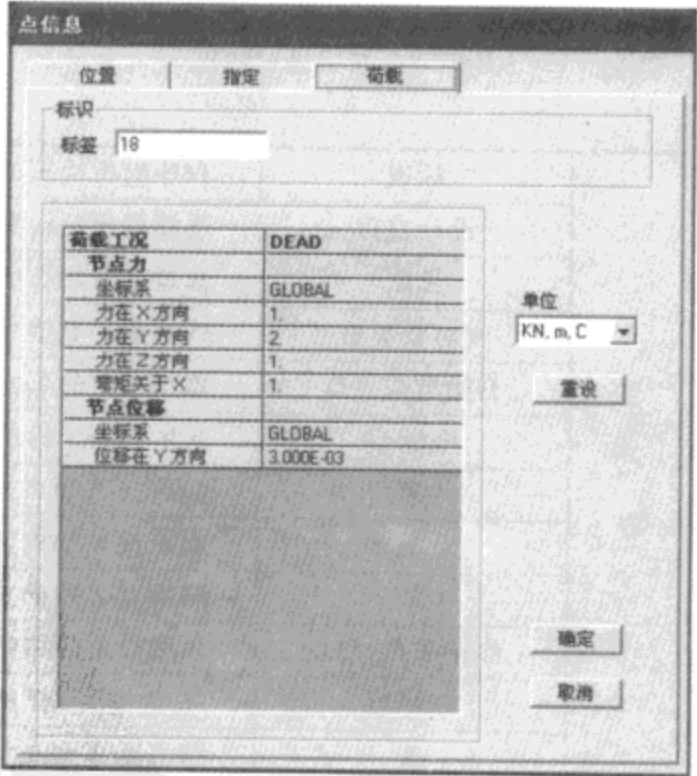


图 6-38 点信息对话框

6.9.2 线信息

如果需要查看线对象的位置或所绘构件是否准确，在已绘制模型中的线对象上点击鼠标右键，弹出线信息对话框（图 6-39）。对话框说明见表 6-24。

如果需要查看该线对象的指定信息，可以点击线信息对话框的【指定】按钮，弹出线对象的指定信息的菜单（图 6-40）。详细说明见表 6-25。

如果需要查看该线对象的荷载信息，可以点击线信息对话框的【荷载】按钮，弹出线对象的荷载信息菜单（图 6-41）。详细说明见表 6-26。

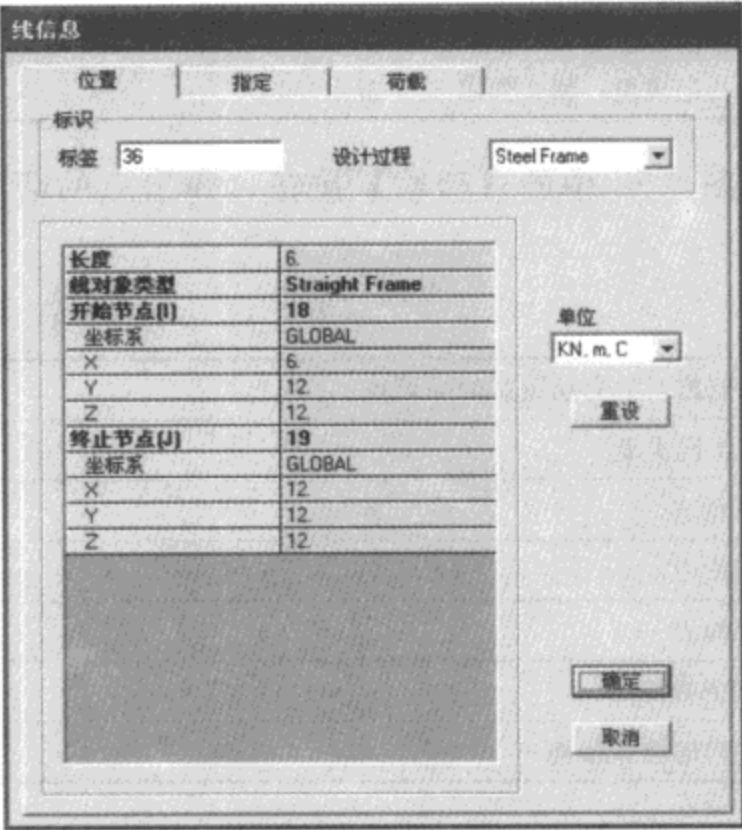


图 6-39 线信息对话框

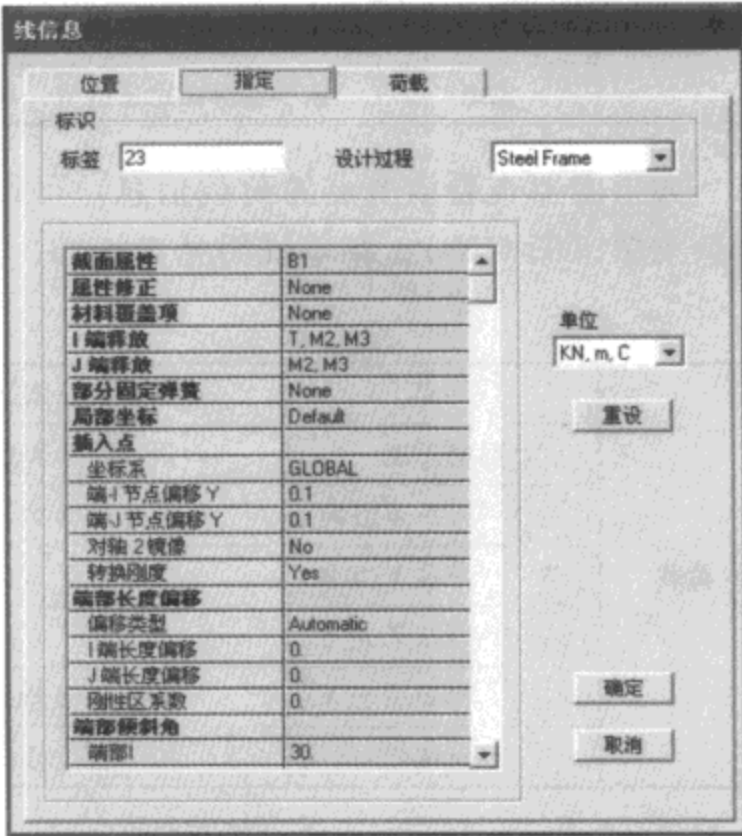


图 6-40 线信息对话框

表 6-24

| | | |
|----|----------|-----------------------|
| 位置 | 标识 | 程序给所绘制的对象自动编制的标识号 |
| | 设计过程 | 选择按照何种类型进行设计 |
| | 长度 | 该线对象的长度 |
| | 线对象类型 | 线对象的类型 |
| | 开始节点 (I) | 该线对象的起始点编号 |
| | 坐标系 | 起始点的坐标从属于整体坐标系或者局部坐标系 |
| | X | 起始点 X 轴的坐标 |
| | Y | 起始点 Y 轴的坐标 |
| | Z | 起始点 Z 轴的坐标 |
| | 终止节点 (J) | 该线对象的结束点编号 |
| | 坐标系 | 结束点的坐标从属于整体坐标系或者局部坐标系 |
| | X | 结束点 X 轴的坐标 |
| | Y | 结束点 Y 轴的坐标 |
| | Z | 结束点 Z 轴的坐标 |

表 6-25

| | | |
|----|---------|-------------------------|
| 指定 | 标识 | 程序给所绘制的对象自动编制的标识号 |
| | 设计过程 | 按照何种类型进行设计 |
| | 截面属性 | 定义的截面名称 |
| | 属性修正 | 线对象是否被指定分析属性修正系数 |
| | 材料覆盖项 | 线对象是否进行了材料的替换 |
| | I 端释放 | 线对象 I 端释放的约束 |
| | J 端释放 | 线对象 J 端释放的约束 |
| | 部分固定弹簧 | 是否指定框架部分固定弹簧 |
| | 局部坐标 | 是否进行了局部坐标的改变，此时是程序默认的情况 |
| | 插入点 | 构件偏心的指定以及端点偏移的尺寸 |
| | 端部长度偏移 | 是指定为根据连续性自动偏移或是自定义长度偏移 |
| | I 端长度偏移 | 线对象 I 端被指定的偏移长度 |
| | J 端长度偏移 | 线对象 J 端被指定的偏移长度 |

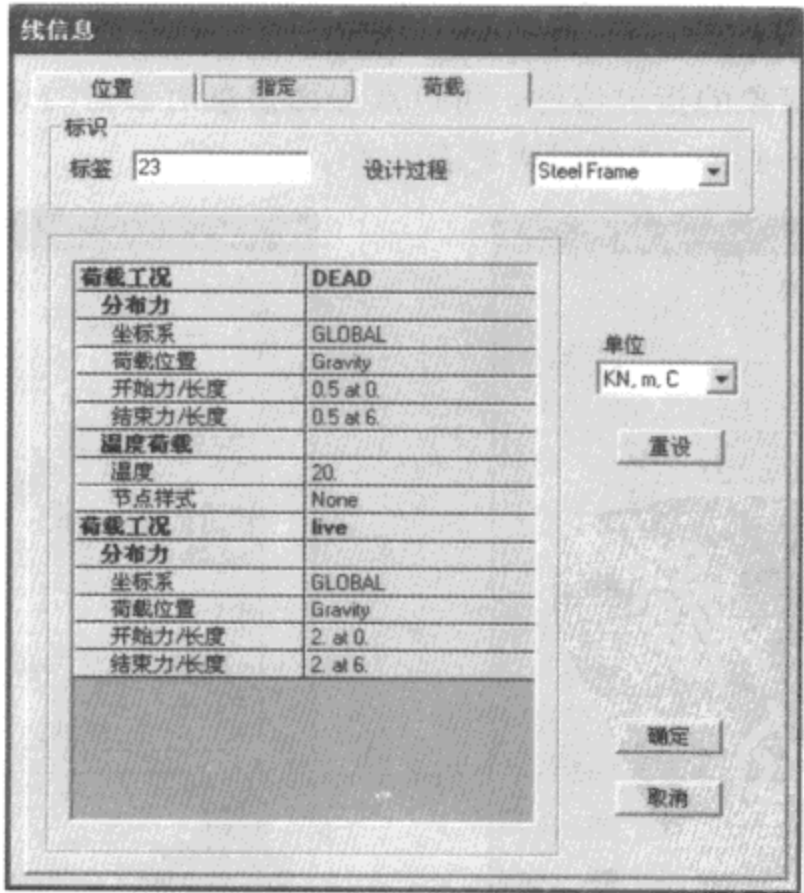


图 6-41 线信息对话框

表 6-26

| | | | |
|----|------|--------|--------------------|
| 荷载 | 标 识 | | 程序给所绘制的对象自动编制的标识号 |
| | 设计过程 | | 按照何种类型进行设计 |
| | 荷载工况 | | 所施加荷载工况的类型 |
| | 分布力 | 坐标系 | 分布力是按照整体坐标系施加的 |
| | | 荷载位置 | 分布力的方向 |
| | | 开始力/长度 | 在起始位置处分布力的值 |
| | | 结束力/长度 | 在结束位置处分布力的值 |
| | 温度荷载 | 温度 | 温度变化值 |
| | | 节点样式 | 可以通过定义的节点样式来添加温度荷载 |

6.9.3 面信息

如果需要查看面对象的位置是否准确，在已绘制模型中的面对象上点击鼠标右键，弹出面信息对话框（图 6-42）。对话框说明见表 6-27。

表 6-27

| | | |
|----|-------------|---------------------|
| 位置 | 标 识 | 程序给所绘制的对象自动编制的标识号 |
| | 面 | 面对象的面积 |
| | 点 1 (2/3/4) | 程序给所绘制面对象自动编制的角点的编号 |
| | 坐标系 | 该角点所在的坐标系 |
| | X | 该角点 X 轴的坐标 |
| | Y | 该角点 Y 轴的坐标 |
| | Z | 该角点 Z 轴的坐标 |
| | | |

如果需要查看该面对象的指定信息，可以点击面信息对话框的【指定】按钮，弹出面对象的指定信息菜单（图 6-43）。详细说明见表 6-28。

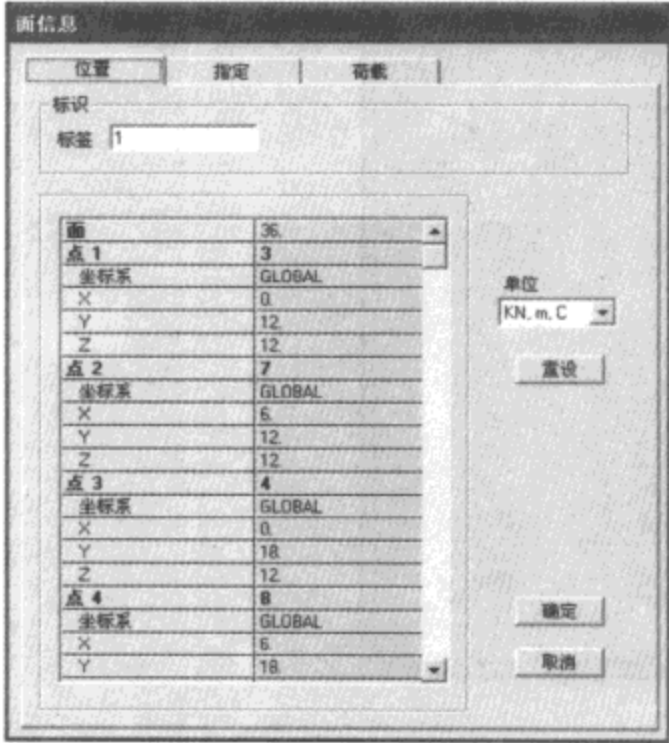


图 6-42 面信息对话框

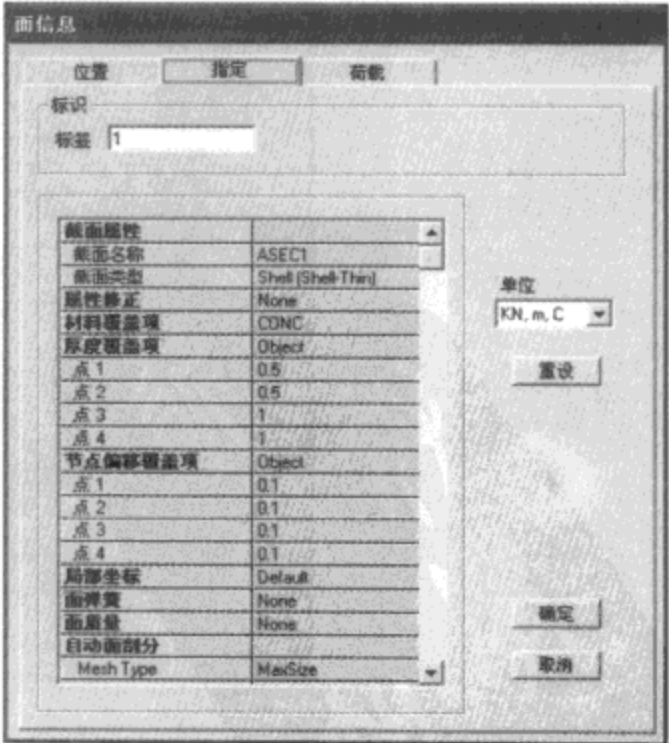


图 6-43 面信息对话框

表 6-28

| | | | |
|----|---------|--------------------------|----------------------|
| 指定 | 标 识 | 程序给所绘制的对象自动编制的标识号 | |
| | 截面属性 | 截面名称 | 所定义的面截面的名称 |
| | | 截面类型 | 截面的分析属性类型 |
| | 属性修正 | 对面截面的刚度是否进行修正 | |
| | 材料覆盖项 | 对面对象是否进行材料的调整 | |
| | 厚度覆盖项 | 点 1 | 面对象的角点 1 的厚度调整 |
| | | 点 2 | 面对象的角点 2 的厚度调整 |
| | | 点 3 | 面对象的角点 3 的厚度调整 |
| | | 点 4 | 面对象的角点 4 的厚度调整 |
| | 节点偏移覆盖项 | 点 1 | 面对象的角点 1 的在厚度方向的偏心大小 |
| | | 点 2 | 面对象的角点 2 的在厚度方向的偏心大小 |
| | | 点 3 | 面对象的角点 3 的在厚度方向的偏心大小 |
| | | 点 4 | 面对象的角点 4 的在厚度方向的偏心大小 |
| | 局部坐标 | 是否进行了局部坐标的改变, 此时是程序默认的情况 | |
| | 面弹簧 | 面对象是否指定了面弹簧, 具有面弹簧的约束性质 | |
| | 面质量 | 是否对面对象指定附加的面质量 | |
| | 自动面剖分 | 指定面对象进行有限元细分 | |

如果需要查看该面对象的荷载信息, 可以点击面信息对话框的【荷载】按钮, 弹出面对象的荷载信息菜单 (图 6-44)。详细说明见表 6-29。

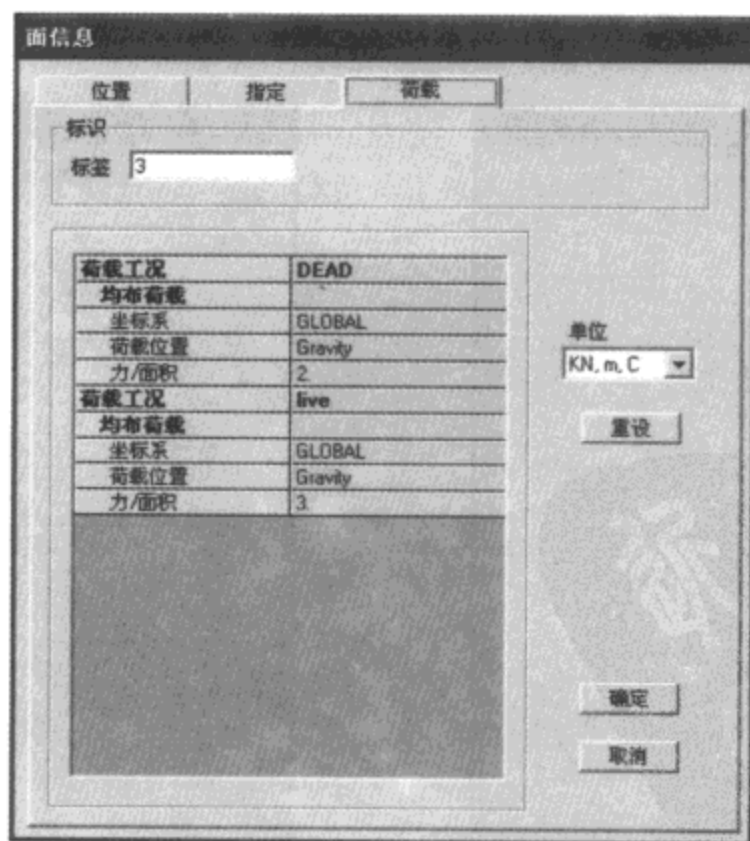


图 6-44 面信息对话框

表 6-29

| | | | |
|----|------|-------------------|-----------------|
| 荷载 | 标 识 | 程序给所绘制的对象自动编制的标识号 | |
| | 荷载工况 | 所施加荷载工况的类型 | |
| | 均布荷载 | 坐标系 | 均布荷载是按照整体坐标系施加的 |
| | | 荷载位置 | 均布荷载的方向 |
| | | 力/面积 | 在作用面积上的均布荷载值 |

6.9.4 实体信息

如果需要查看实体对象的位置是否准确，在已绘制模型中的面对象上点击鼠标右键，弹出**实体信息**对话框（图 6-45）。对话框说明见表 6-30。

表 6-30

| | | |
|----|---------------------|----------------------|
| 位置 | 标 识 | 程序给所绘制的对象自动编制的标识号 |
| | 体 积 | 实体对象的体积 |
| | 点 1 (2/3/4/5/6/7/8) | 程序给所绘制实体对象自动编制的角点的编号 |
| | 坐标系 | 该角点所在的坐标系 |
| | X | 该角点 X 轴的坐标 |
| | Y | 该角点 Y 轴的坐标 |
| | Z | 该角点 Z 轴的坐标 |
| | | |

如果需要查看该实体对象的指定信息，可以点击**实体信息**对话框的【指定】按钮，弹出**实体对象的指定信息**菜单（图 6-46）。详细说明见表 6-31。

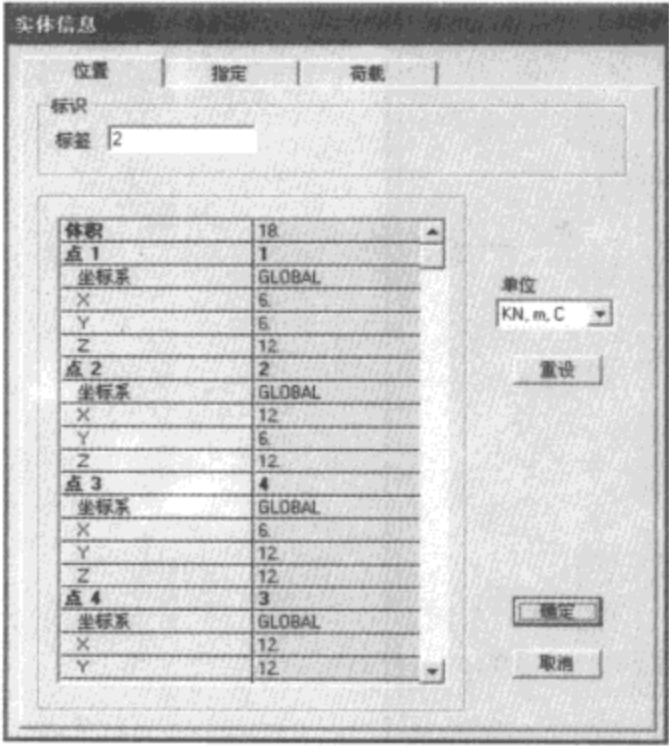


图 6-45 实体信息对话框

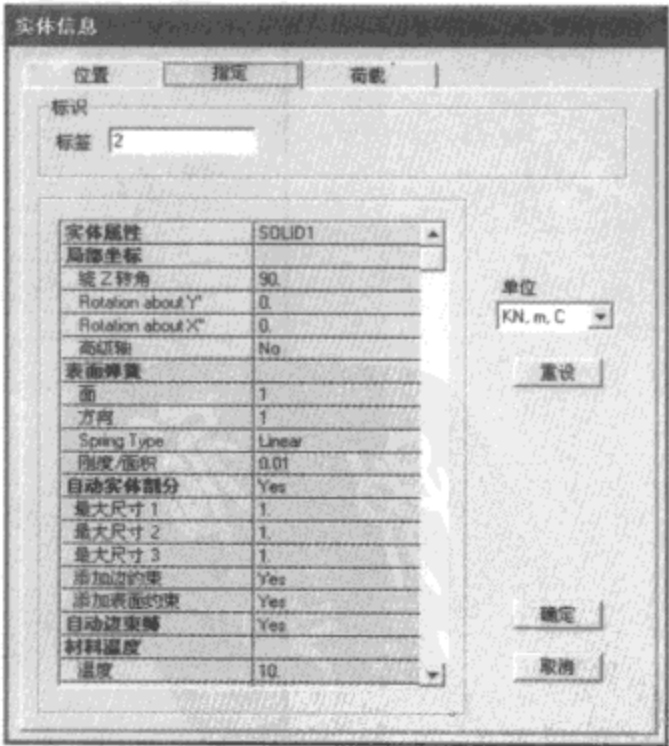


图 6-46 实体信息对话框

表 6-31

| | | |
|----|--------|------------------------------|
| 指定 | 标 识 | 程序给所绘制的对象自动编制的标识号 |
| | 实体属性 | 所定义实体的名称 |
| | 局部坐标 | 是否进行了局部坐标的改变，此时是绕 z 轴旋转 90° |
| | 表面弹簧 | 实体对象是否对表面指定了面弹簧，是否具有面弹簧的约束性质 |
| | 自动实体剖分 | 指定实体对象进行有限元细分 |
| | 自动边束缚 | 指定实体对象边的自动约束 |
| | 材料温度 | 指定实体对象的温度 |

如果需要查看该实体对象的荷载信息，可以点击**实体信息**对话框的【荷载】按钮，弹出实体对象的荷载信息菜单（图 6-47）。详细说明见表 6-32。

表 6-32

| | | | |
|----|------|-------------------|--------------------|
| 荷载 | 标 识 | 程序给所绘制的对象自动编制的标识号 | |
| | 荷载工况 | 所施加荷载工况的类型 | |
| | 表面压力 | 面 | 表面压力所施加的面 |
| | | 力/面积 | 在作用面上的表面压力荷载值 |
| | | 节点样式 | 是否通过节点样式来施加 |
| | 空隙压力 | 力/面积 | 在作用面上的均布荷载值 |
| | | 节点样式 | 是否通过节点样式来施加 |
| | 温度荷载 | 温度 | 温度变化值 |
| | | 节点样式 | 可以通过定义的节点样式来添加温度荷载 |

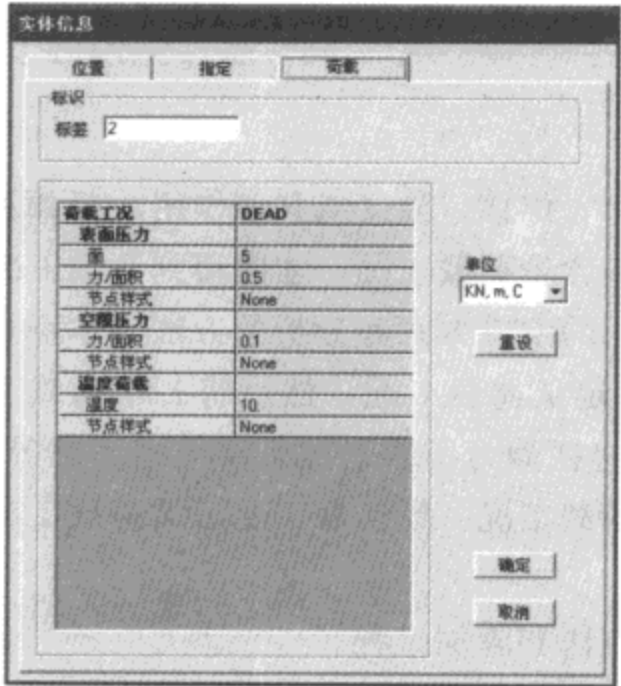


图 6-47 实体信息对话框

注意：所有对象信息查看的对话框中的【单位】区域下的选项均可根据我们的需要进行更改操作，对话框中的各种数值便与之对应变化，以方便我们查看。

第7章

荷载工况和施加

荷载工况是作用于结构上的按指定方式空间分布的力、位移、温度或其他作用。荷载工况本身不能在结构上产生任何响应，只有在分析工况中包含了荷载工况，才能得到荷载工况的作用结果。分析工况定义了荷载工况的作用方式、结构的响应方式和分析的方法。本章主要讲述荷载工况的定义和施加。在 SAP2000 中，首先要定义荷载工况，然后将各个荷载工况中的指定荷载施加到结构上。SAP2000 中的荷载工况包括静力荷载工况、反应谱工况等。静力荷载工况又细分为恒荷载工况、活荷载工况、地震荷载工况、风荷载工况、雪荷载工况等。

本章将介绍各种静力荷载工况及反应谱工况的定义方法和施加过程。

7.1 定义静力荷载工况

SAP2000 中对于荷载工况的数目没有限制，可以定义一个或多个荷载工况。若单独查看某些荷载作用下的结构内力、变形等，则可以将这些荷载单独定义为一个荷载工况。点击【定义】>【荷载工况】命令，弹出定义荷载对话框（图 7-1）。对话框说明见表 7-1。

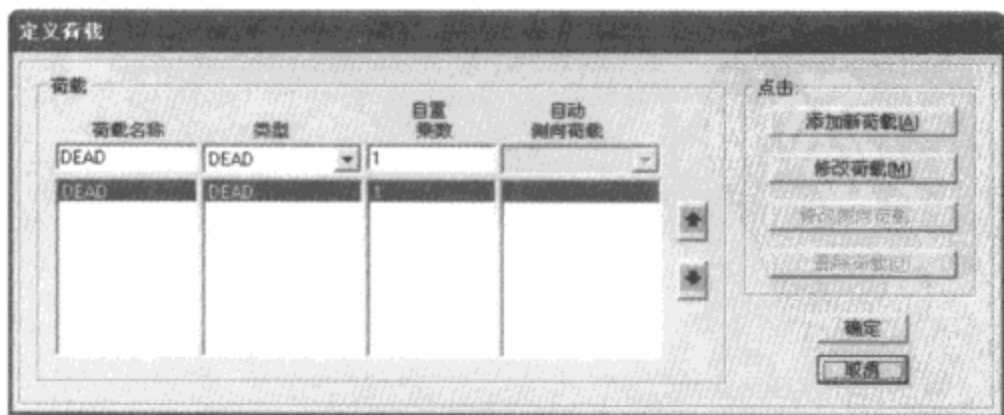


图 7-1 定义荷载对话框

表 7-1

| | | |
|----|------------|--|
| 荷载 | 荷载名称 | 输入荷载工况名称。名称只能是字母和数字 |
| | 类型 | 在下拉框中选择荷载类型。SAP2000 根据荷载类型自动进行荷载组合 |
| | 自重乘数 | 自重系数 |
| | 自动侧向荷载 | 在下拉框中选择侧向荷载对应的各国家规范，此下拉框只对地震荷载工况、风荷载和波浪荷载工况有效 |
| 点击 | 添加新荷载（按钮） | 点击按钮，则将输入域中的工况数据添加到荷载列表中 |
| | 修改荷载（按钮） | 点击按钮，则将输入域中的数据覆盖列表中高亮显示的荷载工况行 |
| | 修改侧向荷载（按钮） | 点击按钮，则弹出侧向荷载的参数对话框，此按钮只对选择侧向荷载规范的地震荷载工况、风荷载工况和波浪荷载工况有效 |
| | 删除荷载（按钮） | 点击按钮，则删除列表中高亮显示的荷载工况，同时在荷载组合中该工况也将被删除 |

在这一对话框中完成结构分析中静力荷载工况的定义。在荷载区域中下面列表部分是已经定义了的荷载工况。第一列荷载是荷载工况的名称。例如，定义 X 方向的风荷载工况可以命名为 WINDX。第二列类型是荷载工况的荷载类型，设定方法是点击类型下拉框，选择相应的荷载类型。SAP2000 自动生成荷载组合时，将根据荷载类型为各个荷载工况设定荷载组合系数。荷载类型主要包括：DEAD（恒荷载）、SUPER DEAD（附加恒荷载）、LIVE（活荷载）、REDUCE LIVE（折减活荷载）、QUAKE（底部剪力法地震荷载）、WIND（自动风荷载）、SNOW（雪荷载），WAVE（波浪荷载）、MOVING LOAD（车道荷载）、OTHER（其他荷载工况，不参与任何荷载组合），这里 SUPER DEAD（附加恒荷载）、REDUCE LIVE（折减活荷载）不适合中国规范。

第三列自重乘数是该荷载工况中自动包含自重的系数，其值为 0~1。如果在某一荷载工况中，设置了非零的自重系数，SAP2000 将自动计算结构中所有构件的自重，将自重乘以自重系数施加在构件上。在荷载工况中定义自重系数时，不要给多个荷载工况定义非零的自重系数。一个为 1 的自重乘数表示在荷载工况中包括结构的全部自重，一般在静力荷载工况中只指定一个为 1 的自重乘数，通常为 DEAD 恒载工况，因为在自动生成荷载组合时，可能造成重复考虑结构自重的错误。

最后一列自动侧向荷载是在定义横向地震荷载或风荷载时选择使用的规范。

SAP2000 仅默认恒荷载工况（DEAD）。在这一对话框中，如果添加新的荷载工况，先在列表区域的最上面一行编辑行中键入新荷载工况的信息，然后点击【添加新荷载】按钮。这时编辑行中的内容将被添加到下面的荷载工况列表中；如果修改某个荷载工况的定义，首先在荷载工况列表中高亮显示该荷载工况所在的行，SAP2000 自动将这一荷载工况的信息在编辑行中显示，在编辑行中修改数据后，点击【修改荷载】按钮，那么在下面列表中这一荷载工况的内容将发生变化；如果定义横向荷载工况，应该高亮显示荷载工况所在的列表行，然后点击【修改侧向荷载】按钮，在弹出的相应对话框中进行修改。

7.2 自动地震荷载工况

中国规范中的底部剪力法在 SAP2000 中就是通过 QUAKE（地震荷载）类型的荷载工况来实现的。点击【定义】>【荷载工况】命令，在弹出的定义荷载对话框（图 7-2）中，在

荷载区域上面的编辑行中，输入荷载工况名称为 **QX**、选择荷载工况类型为 **QUAKE**、自重乘数为 0、选择中国规范 **Chinese2002**。点击【添加新荷载】按钮，将地震荷载工况自动添加到荷载工况列表中。

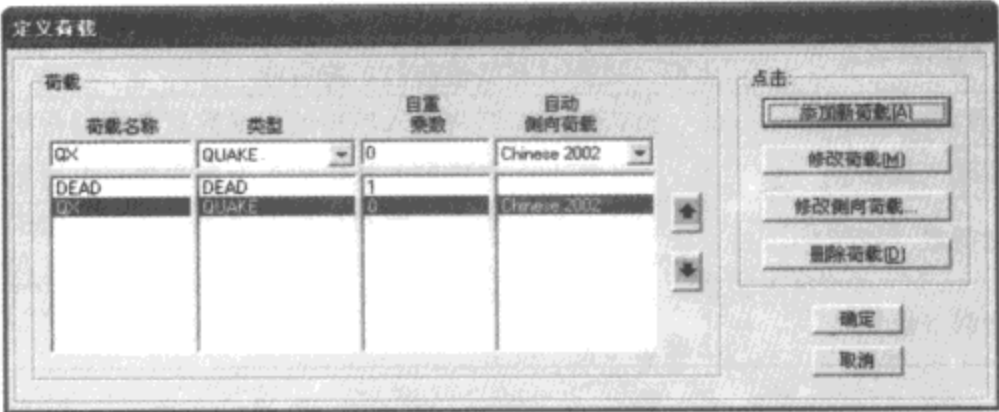


图 7-2 定义荷载对话框

如图 7-2 所示，此时高亮显示 **QX** 工况，点击【修改侧向荷载】按钮，定义底部剪力法计算地震荷载所需要的参数。弹出中国 2002 地震荷载对话框（图 7-3）。对话框说明见表 7-2。

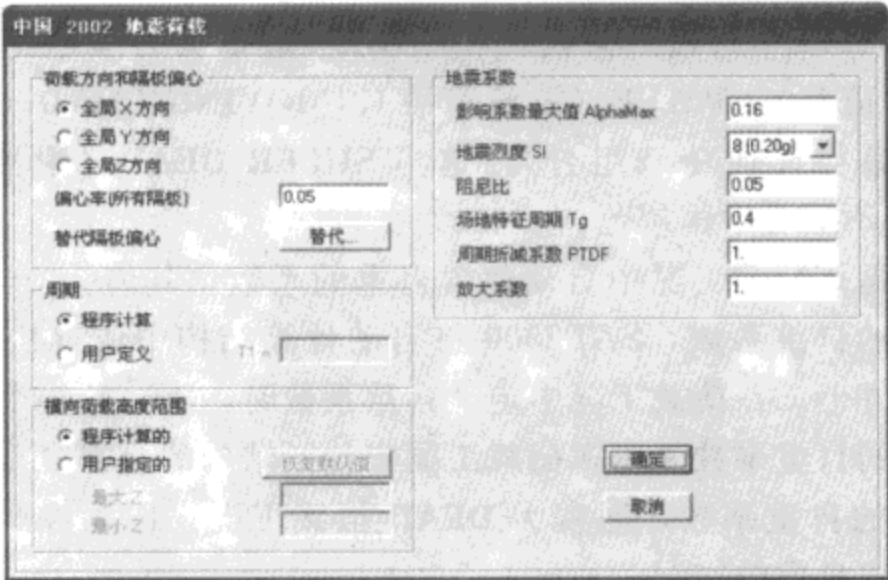


图 7-3 中国 2002 地震荷载对话框

表 7-2

| | | |
|-------------------|-----------|--|
| 荷载方向 和隔板 偏心 | 全局 X 方向 | 指定地震方向为 X 轴方向 |
| | 全局 Y 方向 | 指定地震方向为 Y 轴方向 |
| | 全局 Z 方向 | 指定地震方向为 Z 轴方向 |
| | 偏心率（所有隔板） | 默认偏心率为 0.05，此值可以修改 |
| | 替代隔板偏心 | 按钮用于指定其他不同偏心率的隔板。只有当模型中具有刚性隔板时，隔板偏心选项才有意义，当没有隔板偏心时，SAP2000 将忽略偏心 |
| 周期 | 程序计算 | 由 SAP2000 计算结构周期 |
| | 用户定义 | 由工程师指定结构周期 |
| 横向荷 载高度 范围 | 程序计算的 | 由 SAP2000 计算地震作用范围 |
| | 用户定义的 | 由工程师根据实际情况或规范规定指定地震作用范围 |

续上表

| | | |
|------|---------|-------------------------------|
| 地震系数 | 影响系数最大值 | 按抗震规范取值输入 |
| | 地震烈度 | 下拉菜单中列出了抗震规范规定的各项地震烈度值，可以选择指定 |
| | 阻尼比 | 结构阻尼比。默认值为 0.05，可根据实际情况修改 |
| | 场地特征周期 | 根据抗震规范输入场地特征周期值 |
| | 周期折减因数 | 考虑填充墙对结构周期的折减系数 |
| | 放大系数 | 输入系数，对整体结构的地震作用进行放大或者缩小 |

底部剪力法的计算方法采用抗震规范的 5.2 水平地震作用计算和 5.3 竖向地震作用计算的相关条目。如果结构需要采用底部剪力法计算地震作用时，应该定义自动地震荷载工况；如果结构需要采用反应谱法计算地震作用时，则不需要定义自动地震荷载工况。对于底部剪力法地震工况，由于一个工况只对应一个方向的地震力，所以对于考虑多个方向地震力的情况，工程师需要分别定义多个方向的地震荷载工况。底部剪力法可以考虑 X 方向、Y 方向或 Z 方向地震作用以及偶然偏心。当各楼层考虑不同的偏心值时，点击【替代隔板偏心】按钮，指定各隔板的偏心率。

在地震系数区域中，输入与地震作用计算相关的规范参数。在影响系数最大值输入域中输入水平地震影响系数最大值；在地震烈度编辑栏的下拉菜单中，列表显示抗震规范规定的各项地震烈度值，可以选择地震烈度；阻尼比输入域显示默认值为 0.05，我们可以根据实际情况修改。在结构总体信息中定义的场地土类型、设计地震分组及场地特征周期仅用于输出报告，这里需要重新输入。

在计算相应于结构基本自振周期的水平地震影响系数时，考虑非承重墙体的刚度影响，所采用的结构自振周期应予以折减。在周期折减因数编辑域中输入周期折减系数。根据高规规定对于框架结构，填充墙较多的可取 0.6~0.7，填充墙较少的可取 0.7~0.8，对于框架剪力墙结构可取 0.8~0.9，对于纯剪力墙结构不折减。

SAP2000 提供了包括中国规范在内的多国规范的地震荷载，以满足各种实际结构分析的需要。地震工况是按底部剪力法计算水平地震作用或竖向地震作用的荷载工况，我们设置好参数后，SAP2000 会自动将其施加在结构上，无需人为指定。

7.3 反应谱工况

反应谱工况的定义分为两步，首先定义反应谱函数，然后定义分析工况，选择反应谱工况，添加反应谱函数。点击【定义】>【函数】>【反应谱】命令，弹出定义反应谱函数对话框（图 7-4）。对话框说明见表 7-3。

表 7-3

| | | |
|----------|--------|-------------------------|
| 反应谱 | 列表 | 列出所有定义的反应谱函数名称 |
| 选择添加函数类型 | 下拉菜单 | 列出各国规范反应谱函数供选择 |
| 点击 | 添加新函数 | 点击则弹出定义反应谱函数对话框 |
| | 修改/显示谱 | 点击则弹出列表中高亮显示的定义反应谱函数对话框 |
| | 删除谱 | 删除列表中高亮显示的反应谱函数 |

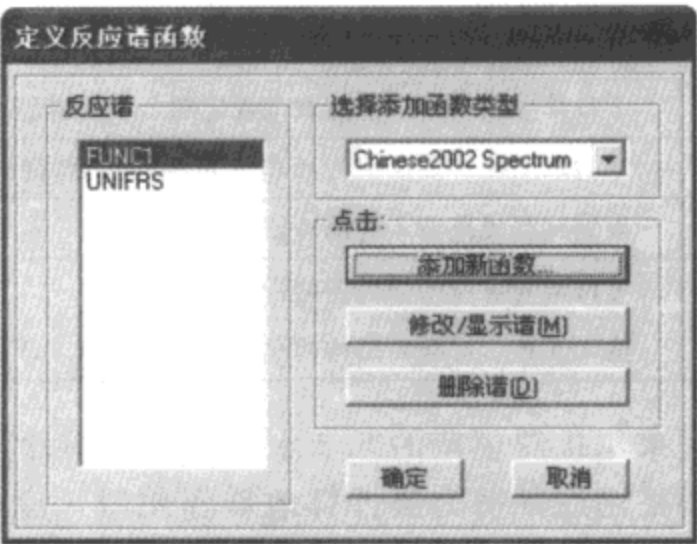


图 7-4 定义反应谱函数对话框

在下拉菜单中选择 **Add Chinese 2002 Spectrum** (中国 2002 规范反应谱)，弹出反应谱中国 2002 函数定义对话框 (图 7-5)。对话框说明见表 7-4。

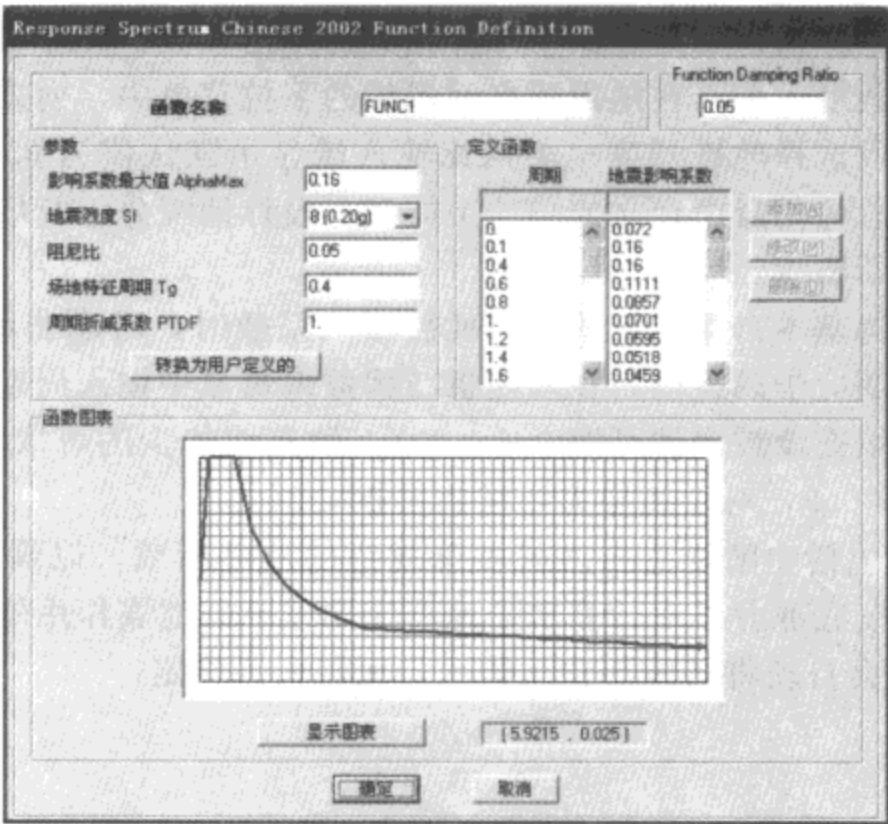


图 7-5 反应谱中国 2002 函数定义对话框

表 7-4

| | | |
|------|------------------|-------------------------------|
| 函数名称 | 显示反应谱函数名称，名称可以修改 | |
| 参数 | 影响系数最大值 | 工程师可按抗震规范取值输入 |
| | 地震烈度 | 下拉菜单中列出了抗震规范规定的各项地震烈度值，可以选择指定 |
| | 阻尼比 | 默认值为 0.05，可根据实际情况修改 |
| | 场地特征周期 | 工程师可根据抗震规范输入场地特征周期值 |
| | 周期折减系数 | 考虑填充墙对结构周期的影响系数 |

续上表

| | | |
|------|--------|---|
| 定义函数 | 周期 | 显示图表曲线横坐标周期值 |
| | 加速度 | 显示图表曲线纵坐标地震影响系数值 |
| | 添加（按钮） | 将输入域中数据添加进列表 |
| | 修改（按钮） | 将输入域中数据覆盖列表中数据 |
| | 删除（按钮） | 删除列表中高亮显示的数值 |
| 函数图表 | 显示图表 | 显示反应谱曲线图。如果没有显示，则点击【显示图表】按钮显示。右侧数据框显示图中光标红点所在曲线位置的坐标值 |

在对话框中首先输入函数名称，然后在参数输入域中设置相关地震参数。此时函数图表中显示出反应谱函数曲线。在图表中曲线上红点位置表示鼠标当前位置，可以用鼠标控制红点移动，同时在下方的显示框中显示出红点所在位置坐标值。在定义函数区域列表中显示的是反应谱曲线所有控制点的坐标值，但并不能进行修改。如果需要对函数进行修改，可以点击对话框中【转换为用户定义】的按钮，弹出反应谱函数定义对话框（图 7-6）。对话框说明见表 7-5。

在对话框中可以在定义函数区域对函数值进行修改。如果添加新的数值，在输入域中输入周期和地震影响系数值，点击【添加】按钮。比如中国 2002 反应谱默认状态下曲线谱周期范围是 6s，在转化为用户自定义后，工程师可以将曲线时间段延长。如果修改数据，选择该数值，使其高亮显示，这时数值会自动显示在编辑框中，工程师在编辑框中修改，点击【修改】按钮，则将新值覆盖列表中高亮显示的值；如果删除某行数据，则选择该数值，使其高亮显示，点击【删除】按钮。

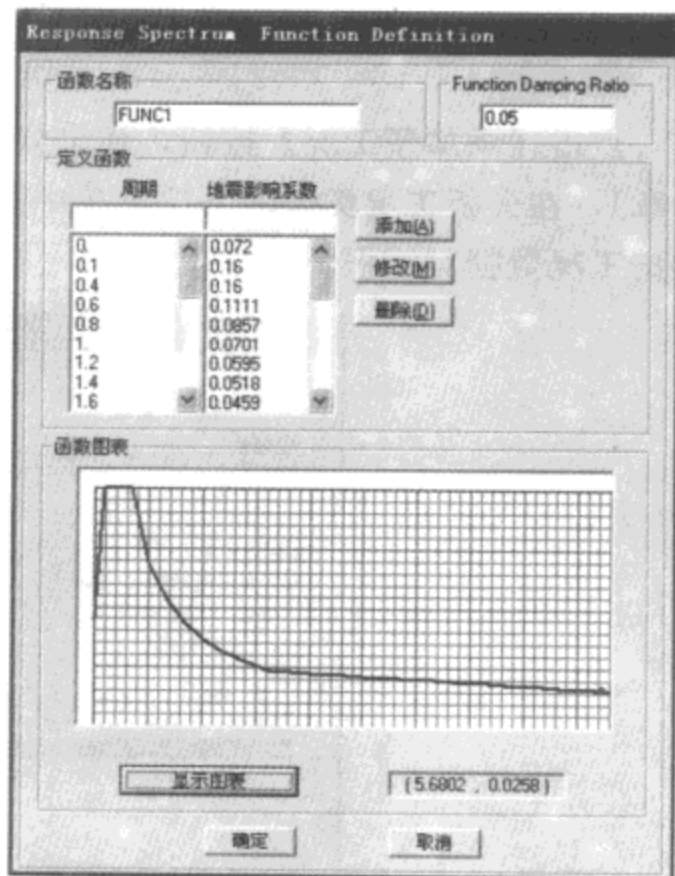


图 7-6 反应谱函数定义对话框

表 7-5

| | | |
|------|--------|---|
| 定义函数 | 周期 | 显示图表曲线横坐标周期值 |
| | 地震影响系数 | 显示图表曲线纵坐标地震影响系数值 |
| | 添加（按钮） | 将输入域中数据添加进列表 |
| | 修改（按钮） | 将输入域中数据覆盖列表中高亮显示的数据 |
| | 删除（按钮） | 删除列表中高亮显示的数值 |
| 函数图表 | 显示图表 | 刷新显示反应谱曲线图。如果没有显示，则点击【显示图表】按钮显示。右侧数据框显示图中光标红点所在曲线位置的坐标值 |

定义了反应谱函数后，就可以定义反应谱工况。点击【定义】>【分析工况】命令，弹出分析工况对话框（图 7-7）。

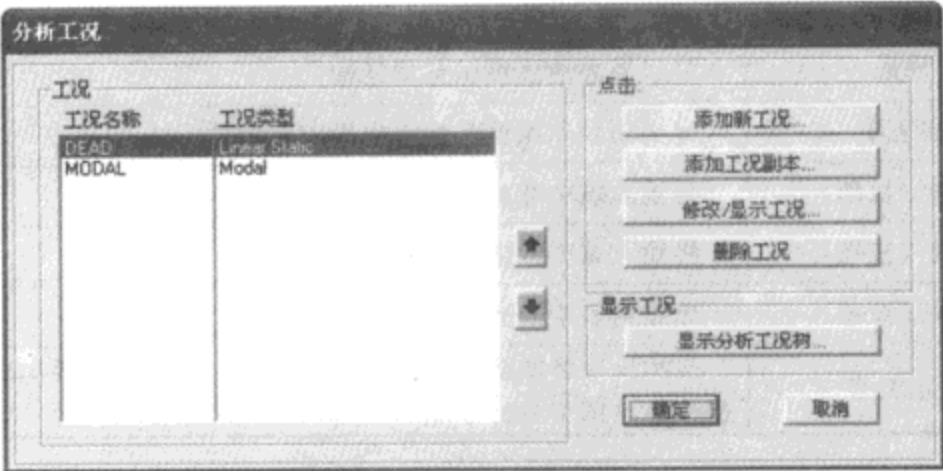


图 7-7 分析工况对话框

点击【添加新工况】按钮，弹出分析工况数据对话框（对于其他分析工况的定义参见第十章），在分析工况类型的下拉菜单中选择 **Response Spectrum**（反应谱工况）（图 7-8）。反应谱工况数据对话框说明见表 7-6。

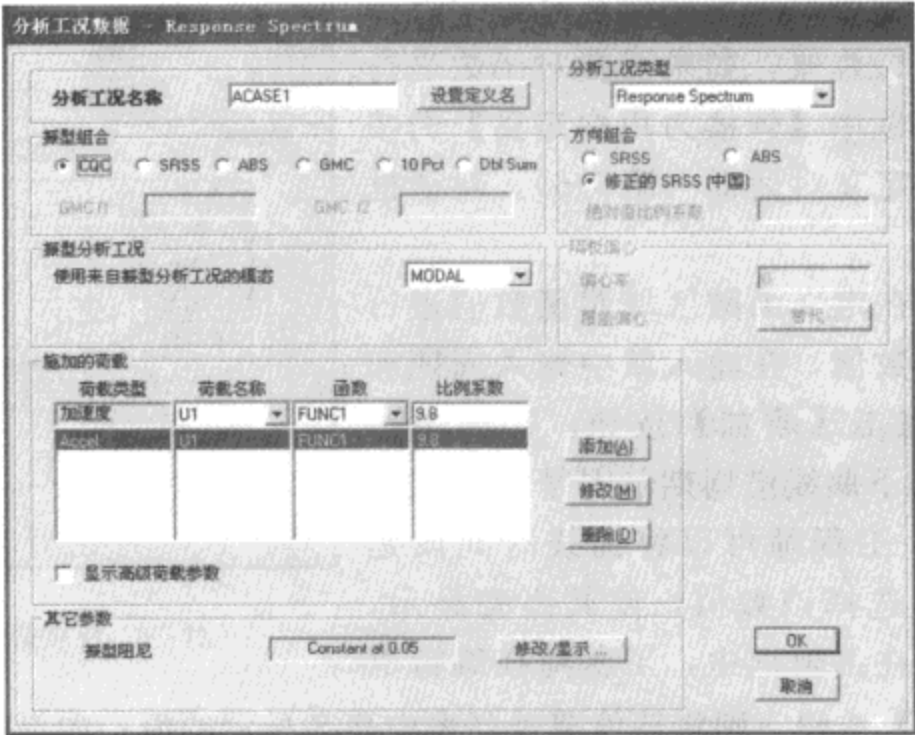


图 7-8 反应谱工况数据对话框

表 7-6

| | | |
|--------|------------------|-----------------------------|
| 分析工况名称 | 显示反应谱工况名称，可以进行修改 | |
| 设置定义名 | 点击以分析工况类型命名 | |
| 振型组合 | CQC | 完全二次平方根法 |
| | SRSS | 平方和方根法 |
| | ABS | 绝对值法 |
| | GMC | 这是被称为 Gupta 方法的通用模态（振型）组合方法 |
| 方向组合 | SRSS | 平方和平方根法 |
| | ABS | 绝对值法 |
| | 修正的 SRSS（中国） | 中国规范修正的平方和平方根法 |

续上表

| | | |
|-------|------|---|
| 施加的荷载 | 荷载类型 | 加速度 |
| | 荷载名称 | U1、U2、U3 分别对应沿整体坐标轴 X、Y、Z 方向的加速度作用 |
| | 函数 | 下拉菜单中选择已定义过的反应谱函数 |
| | 比例系数 | 定义某个方向反应谱函数的比例系数。其值应取重力加速度值，单位与整体单位制一致 |
| 其他参数 | 振型阻尼 | 结构阻尼比，SAP2000 默认值 0.05。可以点击【修改/显示】按钮，来进行振型阻尼的替代 |

在反应谱工况数据对话框中振型组合选项按照中国规范通常选择 CQC（耦联）和 SRSS（非耦联）两项；对于方向组合我们一般选择修正的 SRSS（中国）。在定义完反应谱工况后，荷载将自动施加到结构上，不再需要人工指定，并且反应谱工况将自动参与荷载组合。更多分析内容可参见第十章。

7.4 自动风荷载工况

在进行结构分析时，对于不同的风向，需要定义多个风荷载工况。给风荷载工况定义名称时建议名称中体现风荷载方向，例如 X 方向风荷载可以定义为 WINDX。荷载工况类型选择 WIND。风荷载工况一般不考虑自重，自重乘数取“0”。在自动侧向荷载下拉菜单中选择 Chinese 2002（中国规范），然后点击【添加新荷载】按钮，将风荷载工况添加到荷载列表中（图 7-9）。

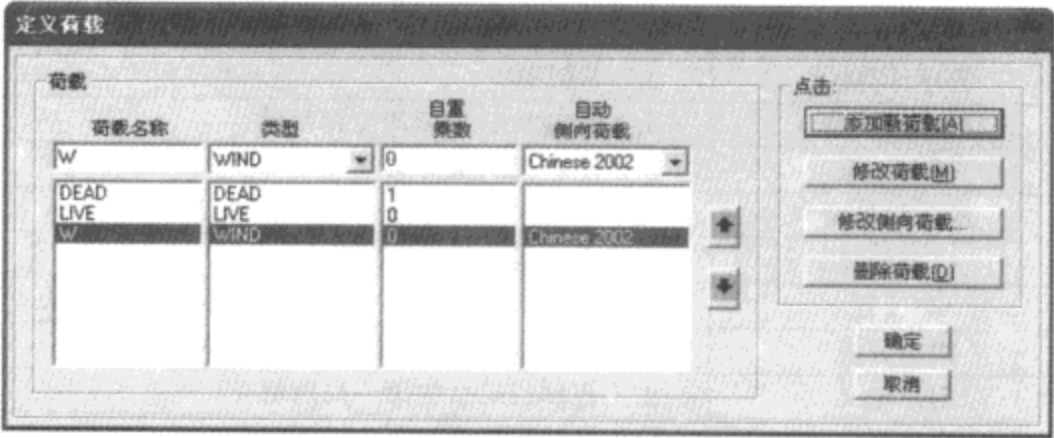


图 7-9 静荷载工况名对话框

然后指定风荷载工况的参数。高亮显示风荷载工况名称所在的行，点击【修改侧向荷载】按钮，弹出中国 2002 风荷载对话框（图 7-10）。对话框说明见表 7-7。

在风力作用面与体型系数区域中，我们可以选择风力作用面来自刚性隔板范围或风力作用面来自面对象。当结构比较规则并且结构中定义了刚性隔板时，选择风力作用面来自刚性隔板范围，这时 SAP2000 自动将垂直于风向的刚性楼板宽度定义为迎风面宽度，点击【修改/显示暴露面宽度】按钮，显示迎风面宽度列表。按照高规的相关规定，整个结构按照一个体型系数自动计算风荷载，并将各层的风荷载施加在各刚性楼板的质心位置上。

在结构高度范围内，我们可以控制风荷载的作用高度范围。在风力作用面高度区域中，可以选择风荷载作用的 z 值坐标。

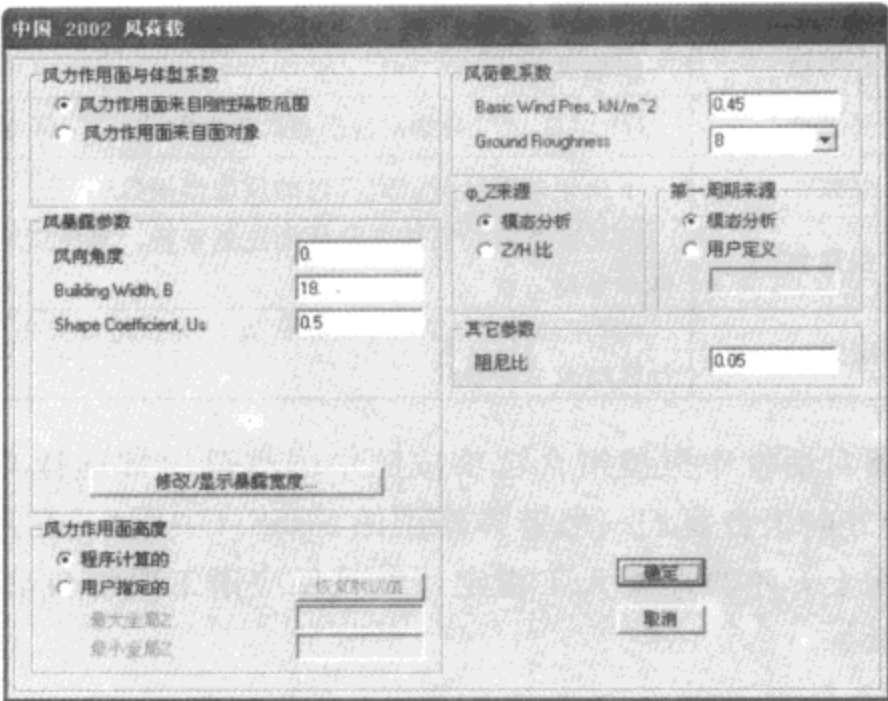


图 7-10 中国 2002 风荷载对话框

表 7-7

| | | |
|---------------------|-----------------------|---|
| 风力作用面与 体型系数 | 风力作用面来自刚性 隔板范围 | 选择该项使用在刚性隔板范围自动施加风荷载。在这里可以指定风向 角度（0 度即 X 轴方向，90 度即 Y 轴方向）。建筑宽度由 SAP2000 自 动计算得出，工程师可进行修改。体型系数需要工程师根据荷载规范和 模型情况进行输入 |
| 风暴露参数 | 风力作用面来自面对象 | 选择该项使用面对象指定不同体型系数自动计算风荷载 |
| | 风向角度 | 输入风荷载角度与 X 轴夹角 |
| | Building Width, B | 建筑宽度，SAP2000 自动计算出默认风向角度的刚性隔板范围宽度 |
| | Shape Coefficient, Us | 体型系数，输入结构体型系数 |
| 风力作用面高度 | 程序计算的 | 由程序计算 |
| | 用户指定的 | 由工程师指定 Z 值的坐标范围 |
| 风荷载系数 | 基本风压 | 输入基本风压值（单位 KN/m ² ） |
| | 地面粗糙度 | 在下拉菜单中选择地面粗糙度类型 |
| φ_z 来源 (风荷载振型系数) | 模态分析 | 由模态分析计算振型系数 |
| | Z/H 比 | 按荷载规范附录 F 规定的高宽比简化计算方法 |
| 第一周期来源 | 模态分析 | 由 SAP2000 计算结构第一振型的周期 |
| | 用户定义 | 由工程师指定结构第一周期值 T ₁ |
| 其它参数 | 阻尼比 | 输入结构阻尼比 |
| 修改/显示暴露 宽度按钮 | 表格 | 表格中列由 SAP2000 计算出的自动风荷载作用宽度以及刚性隔板中心坐 标。工程师可以将表格转换为可修改状态，对风荷载作用范围自行指定 |
| | 从隔板范围计算 | 通过 SAP2000 计算的隔板宽度确定风荷载作用范围。此时，表格为 不可编辑状态 |
| | 用户定义 | 表格转换为可编辑状态，可以修改表格中的数据 |

在风荷载系数区域中，需要输入基本风压单位为 kN/m²，选择地面粗糙度。在 φ_z 选项区域中，我们选择风荷载振型系数的计算方法。选择模态分析，则 SAP2000 按照振型分析计算风荷载振型系数；对于规则结构，选择 Z/H 比，按高规规定的高宽比简化计算方法计算风荷载振型系数。

结构周期 T₁ 来源，可以选择模态分析，由 SAP2000 确定 T₁；也可以选择工程师定义，由工程师指定结构第一周期。在其它参数区域中，输入阻尼比。

设定完各个参数之后，点击【确定】按钮退出该对话框，完成风荷载工况定义。

7.5 波浪荷载

几十米的水中的大坝、池壁或水工模型等，在进行结构分析时，要考虑波浪荷载的作用，需要定义波浪荷载工况。水的速度和加速度由拖拉和惯性力计算得到，并将其转换为分布荷载施加在结构上。点击【定义】>【荷载工况】命令，在弹出的定义荷载对话框（图 7-11）中，在荷载名称区域的编辑行中，输入荷载工况名称为 **Wave**、选择荷载工况类型为 **WAVE**、自重乘数为 0、选择自动侧向荷载为 **API WSD2000**。点击【添加新荷载】按钮，将波浪荷载工况添加到荷载工况列表中。

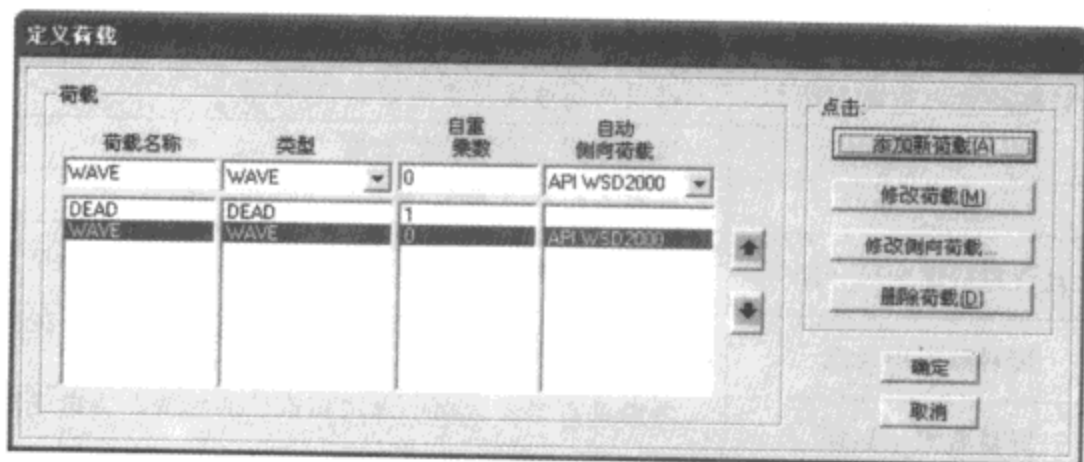


图 7-11 定义荷载对话框

如图 7-11 所示，此时高亮显示 **Wave** 工况，点击【修改侧向荷载】按钮，定义波浪荷载计算所需要的参数，弹出波浪荷载对话框（图 7-12）。对话框说明见表 7-8。

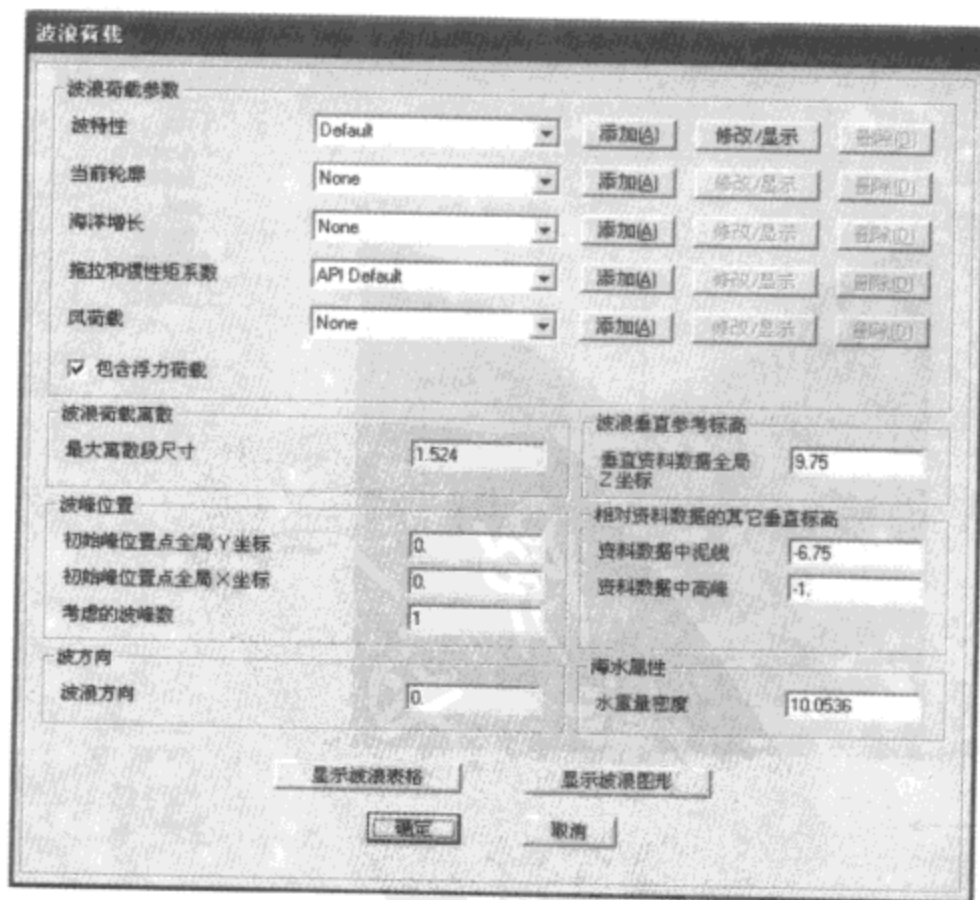


图 7-12 波浪荷载对话框

表 7-8

| | | |
|---------------|---------------|---|
| 波浪荷载参数 | 波特性 | 使用默认值，或者点击【添加】或【修改/显示】按钮，打开波浪特征值对话框，定义波的数据、选择波理论 |
| | 当前轮廓 | 波浪的轮廓，即水流的形状，使用默认值或者点击【添加】或【修改/显示】按钮，打开水流形状数据对话框 |
| | 海洋增长 | 海洋深度，即填写海洋深度数据，使用默认值或者【添加】或【修改/显示】按钮，打开海洋增长数据对话框 |
| | 拖拉和惯性矩系数 | 使用默认值，或者【添加】或【修改/显示】按钮，打开拖拉和惯性系数对话框 |
| | 风荷载 | 波浪风荷载，使用默认值或者【添加】或【修改/显示】按钮，打开波浪风荷载对话框 |
| | 包含浮力荷载 | 勾选将把浮力包括为波浪荷载工况的一部分 |
| 波浪荷载离散 | 最大离散段尺寸 | 作用于对象的分布波浪荷载的最大离散长度，即考虑作用于单元的分布波浪荷载沿单元上的间距不超过指定波浪荷载离散长度 |
| 波峰位置 | 初始峰位置点全局 Y 坐标 | 指定初始波峰位置点全局 Y 坐标 |
| | 初始峰位置点全局 X 坐标 | 指定初始波峰位置点全局 X 坐标 |
| | 考虑的波峰数 | 指定考虑的波峰位置数量 |
| 波方向 | 波浪方向 | 波浪方向与 X 轴正方向的逆时针夹角 |
| 波浪垂直参考标高 | 垂直资料数据全局 Z 坐标 | 波浪在垂直方向全局 Z 坐标。垂直参考数据的位置坐标是任意的 |
| 相对资料数据的其它垂直标高 | 资料数据中泥线 | 考虑垂直参考数据中泥水分界线的位置标高，在泥水分界线以下无波浪荷载 |
| | 资料数据中高峰 | 考虑垂直参考数据中水流顶点处的峰值，决定于拖拉和惯性矩系数的定义 |
| 海水属性 | 水重量密度 | 海水的重度 |

按照以上介绍的内容可以用户自定义，也可以添加波及形状，选择适合的波理论来进行计算。然后点击【显示波浪图形】按钮，弹出波绘图对话框（图 7-13）。

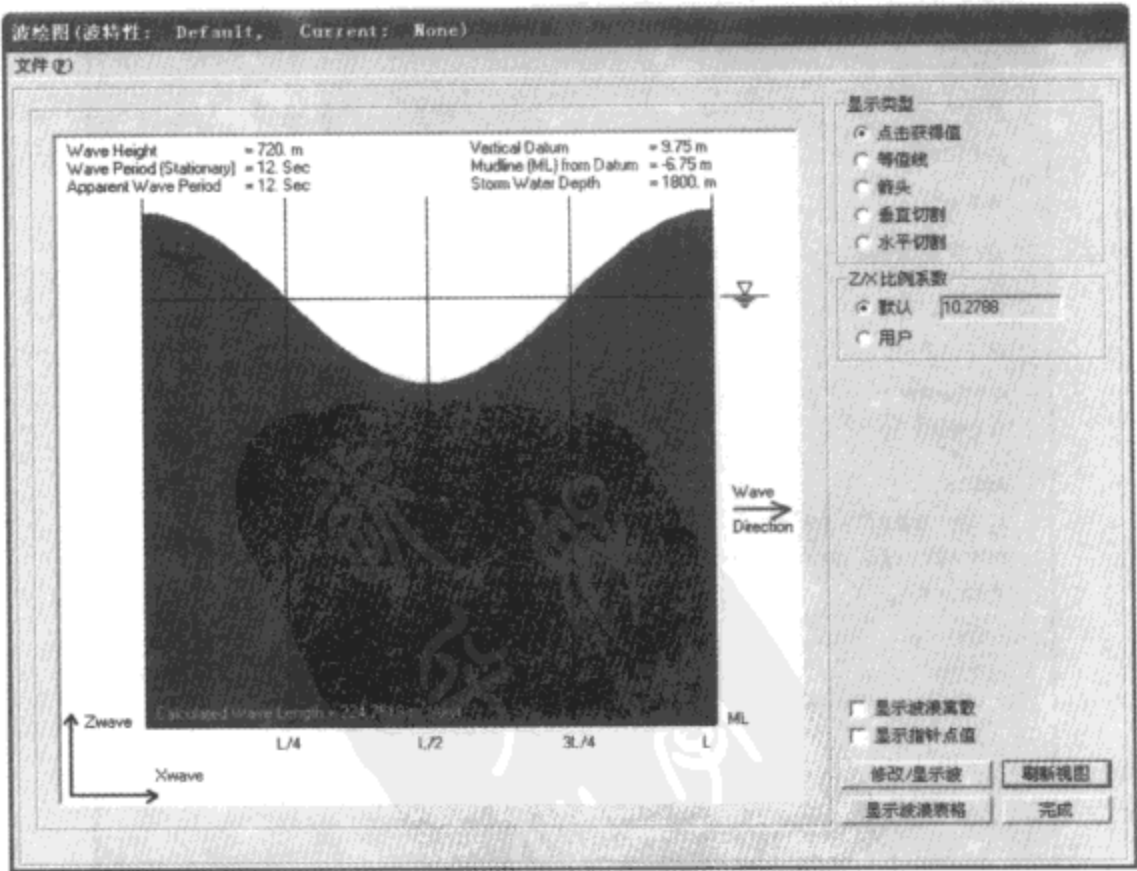


图 7-13 波绘图对话框

图形显示波形的计算结果，图形上方显示了计算参数，默认显示为点击获得值，此时在图形上点击，右侧可以获取光标点击处的计算结果，还可以利用等值线、箭头、垂直切割等方式进行显示，并能够获取相应的计算结果。

7.6 车道荷载

在公路立交桥或者桥梁等结构分析中必不可少的是车道荷载工况，用来确定结构由车辆活荷载重量产生的响应，可用来确定由多车道荷载产生的最大、最小位移及内力。在上部结构定义车道，代表活荷载作用位置。为了考虑复杂的交通方式，这些车道不必是平行或长度相同。程序 SAP2000 能够计算出由每一车道荷载产生的所有响应量的影响线。本节主要说明在定义荷载工况菜单中如何给结构添加车道荷载。

点击【定义】>【荷载工况】命令，在弹出的定义荷载对话框（图 7-11）中，在荷载名称区域的编辑行中，输入荷载工况名称为 MOVE，选择荷载工况类型为 MOVING LOAD，弹出一个对话框（图 7-14）。

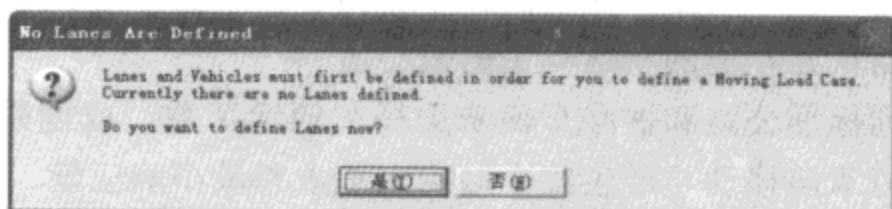


图 7-14

然后点击【是】按钮，弹出定义车道对话框，然后点击【从框架添加已定义的新车道】按钮，弹出车道数据对话框（图 7-15）。对话框说明见表 7-9。

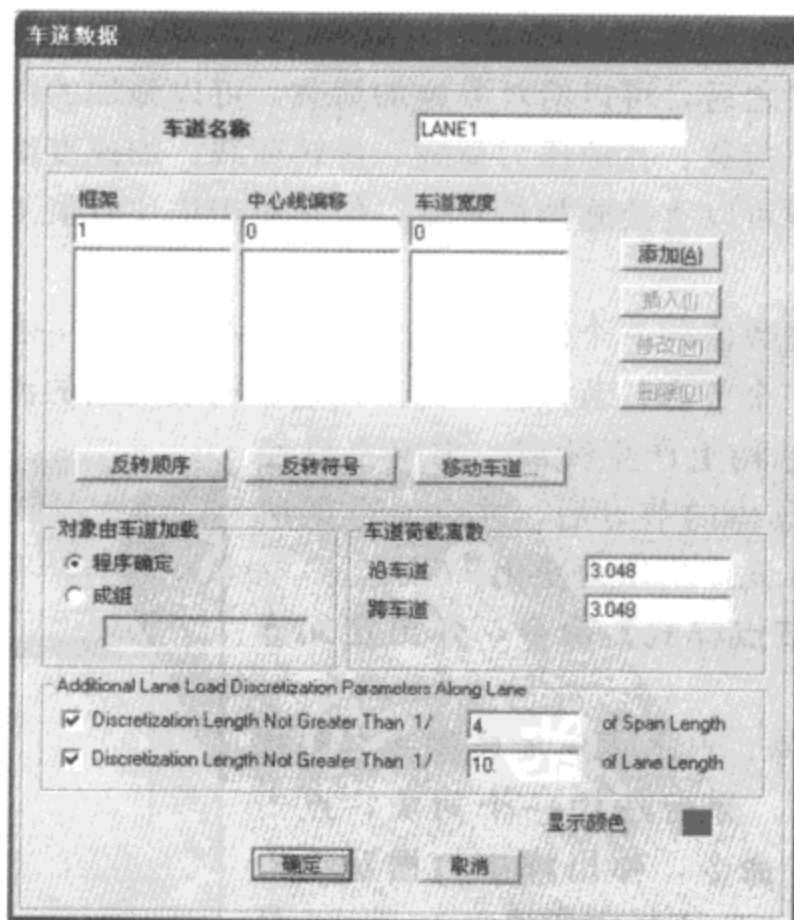


图 7-15 车道数据对话框

表 7-9

| | |
|---------|---|
| 车道名称 | 默认名称或输入另一个名称 |
| 框架 | 点击【设置显示选项】按钮，在框架/索区域中，选中标签复选框，那么在图形上将显示框架的标签 ID。输入代表车道的框架标签，当点击【添加】按钮时，该标签将在显示区域中出现 |
| 中心线偏移 | 按当前单位输入车道与框架中心线之间的距离 |
| 反转顺序 | 对框架 ID/偏心重新排序 |
| 反转符号 | 点击【反转符号】按钮，将正偏心改为负偏心或将负偏心改为正偏心 |
| 移动车道 | 打开移动车道对话框，并移动车道一定距离或指定坐标 |
| 对象由车道加载 | 程序确定：SAP2000 根据车道数据对话框中指定的数据确定车道荷载；组：使用相关的下拉列表指定组名，与定义【菜单】>【组】命令相对应，使用此选项控制施加到车道的荷载 |
| 车道荷载离散 | 指定沿车道和跨车道的荷载离散，用当前长度单位输入值 车道定义后，使用【指定菜单】>【框架/索】>【车道】命令将定义的车道指定给包含车道的框架单元 |

车道的横向位置用相对道路单元的偏心来指定。车道偏心的正负号定义是：对在车道自左向右的桥梁立面视图，位于道路单元后面的车道偏心为正值；或者对在道路上沿车道方向行驶的司机，位于道路单元左侧的车道有正的偏心值。

工程师可从一系列标准公路和铁路车辆来选择车辆活荷载，或创建自己的车辆活荷载。车辆可在桥梁任一车道双向移动，产生整个结构上最大和最小响应量。每一车辆活荷载可被放置在任一车道上，或限制在某些车道上。程序可自动寻找整个结构上由于在不同车道放置不同车辆所产生的最大和最小响应量。

7.7 节点样式

在完成荷载工况定义之后，可以给对象施加荷载。可以施加的荷载为集中荷载、分布荷载、预应力荷载、面压力荷载、孔隙压力荷载、旋转荷载、加速度荷载、温度荷载和支座移动等等。对于简单的荷载可以直接施加给对象，但是对于描述数值复杂的空间荷载分布，节点样式非常有效。

节点样式是包含标量数值的一个组，相当于在节点处定义的一组标量，与坐标系无关。每个数值对应结构上的一个节点。节点样式用来描述结构上复杂的温度变化和压力分布。

节点样式本身不在结构上产生荷载，需要将已经命名的节点样式指定给具体的节点后，才会对框架单元产生温度变化，对面单元产生压力变化。

点击【定义】>【节点样式】命令，弹出定义样式名对话框（图 7-16）。

输入节点样式的名称，点击【添加新样式名】按钮，添加一个节点样式。然后选中一个对象，点击【指定】>【节点样式】命令，弹出样式数据对话框（图 7-17），定义 $Ax+By+Cz+D$ 中的值（ x, y, z 是相对于当前坐标原点的点坐标）。样式数据对话框说明

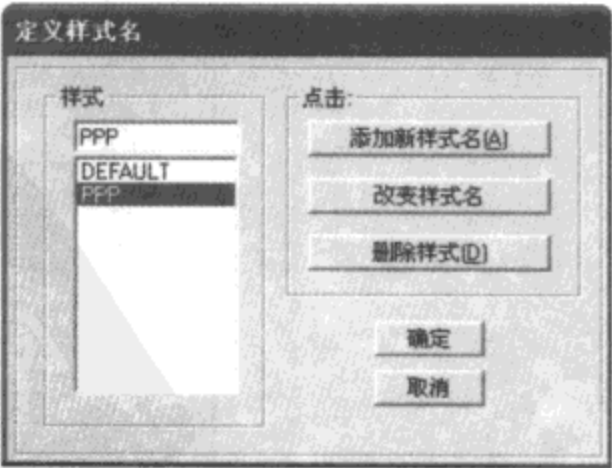


图 7-16 定义样式名对话框

见表 7-10。

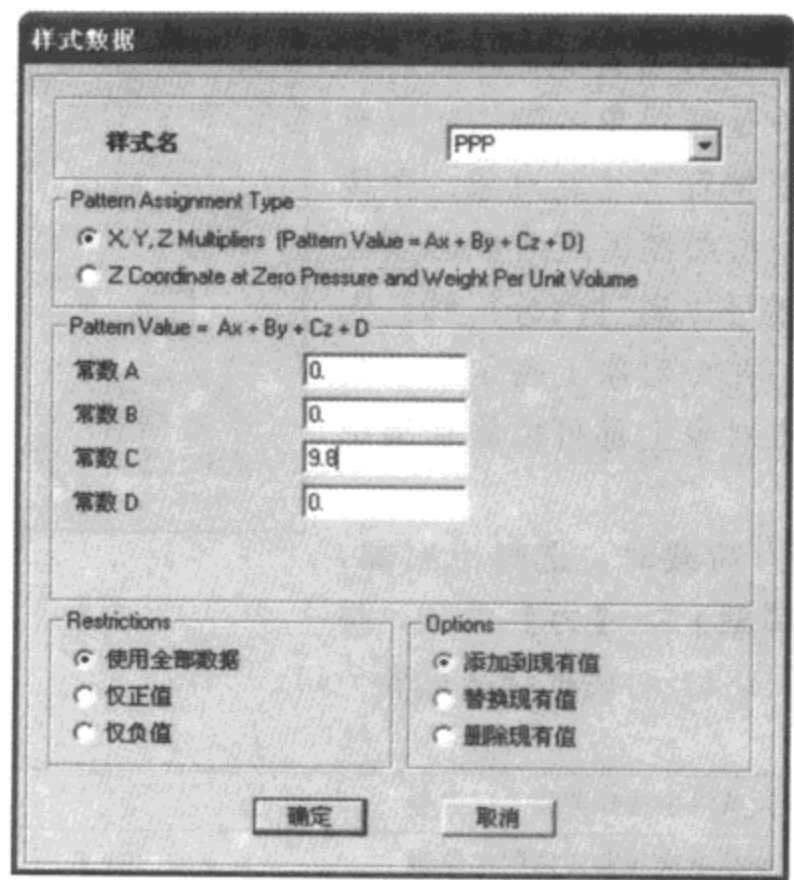


图 7-17 样式数据对话框

表 7-10

| | | |
|--------|-------------------|---|
| 样式名 | 在下拉菜单中选择已定义的节点样式名 | |
| 样式定义类型 | X、Y、Z 多项式 | 在下表中输入整体坐标系中的梯度分量，根据多项式确定样式值 |
| | 零压力处的 Z 值及重度 | 对于液体而言，易于定义起始液面的位置和单位体积重度，然后 SAP2000 将会自动计算 |
| 限制 | 使用全部数据 | 默认允许所有的正值和负值 |

在编辑框中输入常数 A、B、C 和 D，这些常数用于定义值 $Ax + By + Cz + D$ (x 、 y 和 z 是相对于当前坐标系统的节点坐标)，该值将被赋给这个节点。将这些值乘到通过框架静力荷载为框架单元指定的温度值或者通过壳静力荷载指定的压力上。

7.8 集中荷载

SAP2000 中除了自重荷载、地震荷载和自动风荷载和波动荷载是自动施加到结构上以外，其他荷载都需要人工施加。在定义材料时，工程师已经给出了材料属性，凡是能够根据材料属性计算出来的力，SAP2000 会自动进行计算，例如楼板的自重，我们在定义材料密度以及楼板厚度时已经给出了数据，则会根据这些数据计算楼板的自重，而不需要我们去给楼板指定自重荷载；再例如根据给出材料的密度和地震参数，SAP2000 会通过模型的几何数据计算出地震力，也不需要我们去给模型指定地震力荷载，因此需要工程师施加的荷载主要是附加荷载，比如附加恒荷载、活荷载、雪荷载等无法根据已有数据确定的荷载。SAP2000 施加荷载的方法一般是先选择构件，然后通过指定荷载命令施加荷载。

7.8.1 给点对象施加集中荷载

在 SAP2000 中点荷载可以通过点对象或者线对象施加。施加的点应该是线对象的端点、面对象的角点或者面对象节点位置上的点对象。在楼板或墙上作用集中荷载，所绘制的点对象必须在面对象上，面上的点位置可以通过剖分得到。先在面单元上绘制点对象，在点对象上指定集中荷载。在结构任意位置的点对象上都可以施加集中荷载。

给点对象指定集中力荷载时，选择点对象，点击【指定】>【节点荷载】>【力】命令，弹出节点荷载对话框（图 7-18）。对话框说明见表 7-11。

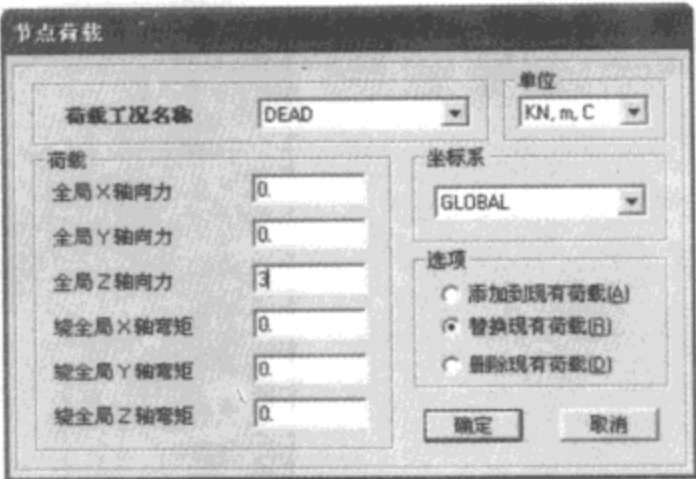


图 7-18 节点荷载对话框

表 7-11

| | | |
|--------|----------------|-----------------|
| 荷载工况名称 | 在下拉菜单中选择荷载工况名称 | |
| 单位 | 下拉菜单中选择输入值的单位制 | |
| 荷载 | 全局 X 轴向力 | 输入沿 X 轴方向水平力值 |
| | 全局 Y 轴向力 | 输入沿 Y 轴方向水平力值 |
| | 全局 Z 轴向力 | 输入沿 Z 轴方向竖向力值 |
| | 绕全局 X 轴弯矩 | 输入围绕 X 轴旋转弯矩值 |
| | 绕全局 Y 轴弯矩 | 输入围绕 Y 轴旋转弯矩值 |
| | 绕全局 Z 轴弯矩 | 输入围绕 Z 轴旋转弯矩值 |
| 选项 | 添加到现有荷载 | 输入的荷载值与现有荷载进行叠加 |
| | 替换现有荷载 | 输入的荷载值替换现有荷载 |
| | 删除现有荷载 | 删除现有的荷载值 |

首先选择荷载工况名称。在荷载区域中输入荷载分量值按【确定】后，相应的力值和方向会显示在节点上。值的正负与坐标轴方向有关，正值则是沿坐标轴正方向的力，负值则是沿坐标轴反方向的力。弯矩方向根据坐标轴由右手法则确定。

此外，对于面对象和实体对象也可以施加集中荷载，但首先需要对其进行剖分，然后对剖分位置的点指定集中荷载，那么也就归结于给点对象施加集中荷载了。

7.8.2 给线对象施加集中荷载

虽然可以在线对象上绘制一个点，再通过点指定点荷载，但是要保证点一定在线对象上。由于每增加一个点对象，在转化成分析模型时要增加 6 个自由度，因此建议使用【指定】>【框架/线荷载】>【点】命令来对线对象施加点荷载。

给线对象施加集中力荷载时，首先选择线对象，然后点击【指定】>【框架/索/钢束荷载】>【点】命令，弹出框架集中荷载对话框（图 7-19）。对话框说明见表 7-12。

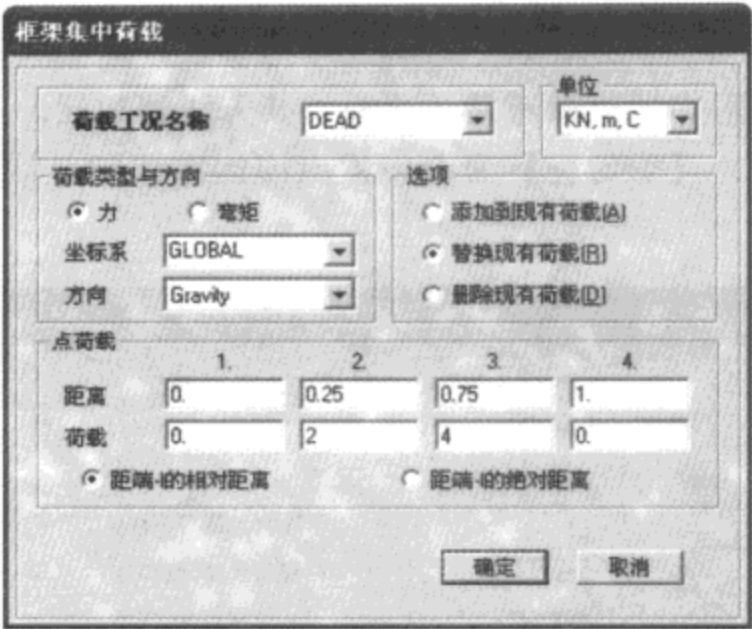


图 7-19 框架集中荷载对话框

表 7-12

| | | |
|---------|-----------------|-------------------|
| 荷载工况名称 | 在下拉菜单中选择荷载工况名称 | |
| 单位 | 在下拉菜单中选择输入值的单位制 | |
| 荷载类型与方向 | 力 | 在选项中选择施加荷载的类型为力 |
| | 弯矩 | 在选项中选择施加荷载的类型为弯矩 |
| | 方向 | 在下拉菜单中选择荷载方向 |
| | Gravity | 重力方向 |
| | X | 整体坐标 X 轴方向 |
| | Y | 整体坐标 Y 轴方向 |
| | Z | 整体坐标 Z 轴方向 |
| 选项 | 添加到现有荷载 | 输入的荷载值与现有荷载进行叠加 |
| | 替换现有荷载 | 输入的荷载值替换现有荷载 |
| | 删除现有荷载 | 删除现有的荷载值 |
| 点荷载 | 距离 | 输入荷载控制点距构件 I 端距离值 |
| | 荷载 | 输入荷载控制点的荷载值 |
| | 距端 I 的相对距离 | 选择该项则以相对距离方式输入距离值 |
| | 距端 I 的绝对距离 | 选择该项则以绝对距离方式输入距离值 |

在对话框中选择集中荷载的荷载工况名称。在类型与方向区域中选择力或者弯矩，点击方向下拉框，选择荷载方向；在点荷载区域中输入荷载作用位置以及荷载值，然后按【确定】，点荷载便施加给线对象。

7.9 分布荷载

可以在面对象上施加均匀分布荷载；在线对象上施加分布线荷载。分布荷载可以是均匀分布、梯形分布。首先要选择施加荷载的面对象或线对象，然后用指定菜单将荷载施加到对象上。

7.9.1 面均布荷载

施加面荷载，无论是附加恒荷载还是活荷载，其方法都相同。我们首先选择面对象，点击【指定】>【面荷载】>【均匀壳】命令，弹出面均布荷载对话框（图 7-20）。对话框说明见表 7-13。

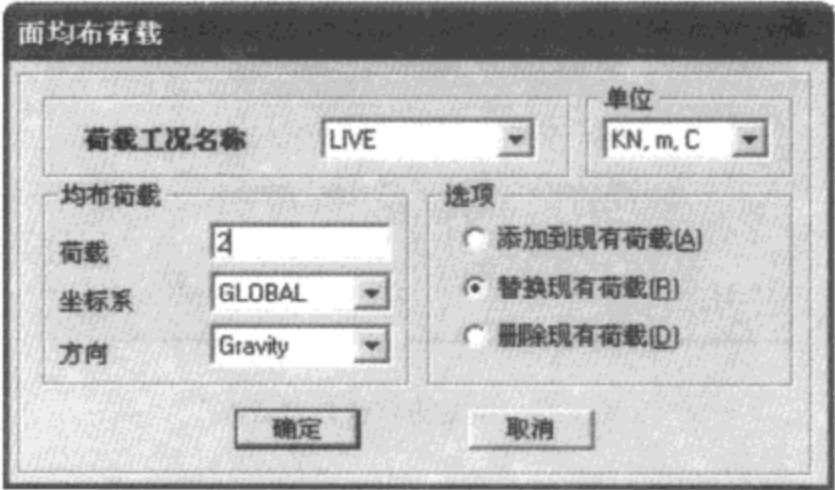


图 7-20 面均布荷载对话框

表 7-13

| | | |
|--------|--------------------------|--------------------------------|
| 荷载工况名称 | 下拉菜单中列出所有荷载工况名称，可以选择工况名称 | |
| 单位 | 在下拉菜单中选择输入荷载值的单位制 | |
| 均布荷载 | 荷载 | 输入荷载值，其正负与方向有关 |
| | 坐标系 | Global 整体坐标系；Area Local 面局部坐标系 |
| | 方向 | 在下拉菜单中选择荷载方向 |
| | Global X | 整体坐标 X 轴方向 |
| | Global Y | 整体坐标 Y 轴方向 |
| | Global Z | 整体坐标 Z 轴方向 |
| | Global X Proj | 整体坐标 X 轴投影方向 |
| | Global Y Proj | 整体坐标 Y 轴投影方向 |
| | Global Z Proj | 整体坐标 Z 轴投影方向 |
| | Gravity | 重力方向 |
| | Gravity Proj | 重力投影方向 |
| | Local1 | 局部 1 轴方向 |
| | Local2 | 局部 2 轴方向 |
| | Local3 | 局部 3 轴方向 |
| 选项 | 添加到现有荷载 | 输入的荷载值与楼面现有荷载进行叠加 |
| | 替换现有荷载 | 输入的荷载值替换楼面已有荷载 |
| | 删除现有荷载 | 删除楼面现有的荷载值 |

在对话框中，首先在荷载工况名称下拉菜单中选择工况名称；在单位下拉框中指定输入值的单位制；在荷载输入域中，根据设定的单位制输入荷载值。对于新建楼板，荷载的方向按其默认值 Gravity（重力方向），选择【替换现有荷载】即可。按【确定】后，视图中楼板中间位置会显示出荷载数值。

7.9.2 线均布荷载

在 SAP2000 中对于框架填充墙或者设备荷载的处理，一般将其自重转化为线荷载指定给梁。其操作方法与施加面荷载相似。首先选择梁线对象，点击【指定】>【框架/线荷载】>【分布】命令，弹出框架分布荷载对话框（图 7-21）。对话框说明见表 7-14。

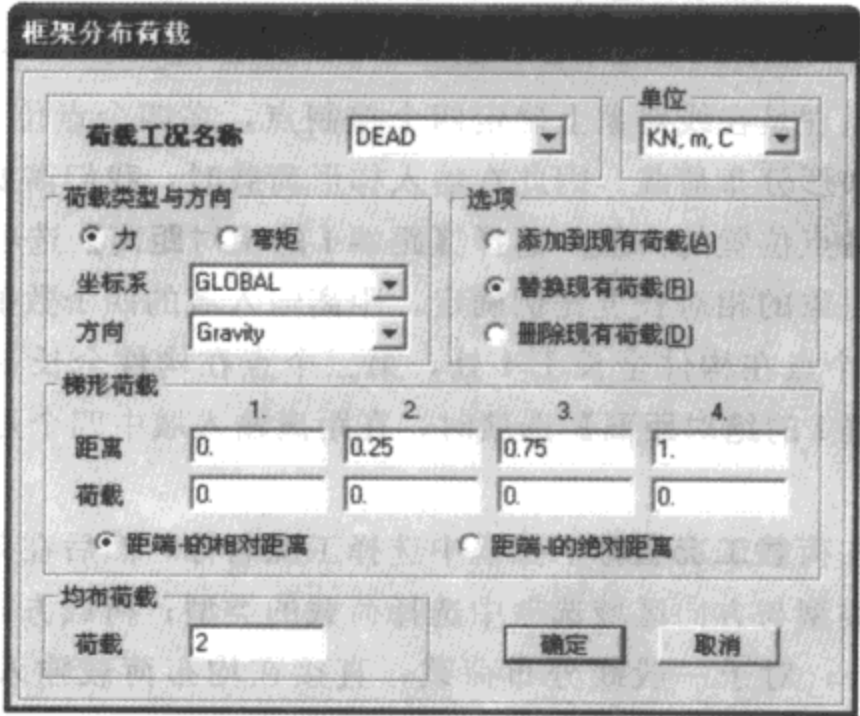


图 7-21 框架分布荷载对话框

表 7-14

| | | |
|---------|---------------|--------------------------|
| 荷载工况名称 | | 下拉菜单中列出所有荷载工况名称，工程师选择工况 |
| 荷载类型与方向 | 力 | 在选项中选择施加荷载的类型为力 |
| | 弯矩 | 在选项中选择施加荷载的类型为弯矩 |
| | 坐标系 | Global 整体坐标系；Local 局部坐标系 |
| | 方向 | 在下拉菜单中选择荷载方向 |
| | Global X | 整体坐标 X 轴方向 |
| | Global Y | 整体坐标 Y 轴方向 |
| | Global Z | 整体坐标 Z 轴方向 |
| | Global X Proj | 整体坐标 X 轴投影方向 |
| | Global Y Proj | 整体坐标 Y 轴投影方向 |
| | Global Z Proj | 整体坐标 Z 轴投影方向 |
| | Gravity | 重力方向 |
| | Gravity Proj | 重力投影方向 |
| | Local1 | 局部 1 轴方向 |
| | Local2 | 局部 2 轴方向 |
| | Local3 | 局部 3 轴方向 |
| 单位 | | 在下拉菜单中选择输入荷载值的单位制 |

续上表

| | | |
|------|------------|-------------------|
| 梯形荷载 | 距离 | 输入荷载控制点距构件 I 端距离值 |
| | 荷载 | 输入荷载控制点的荷载值 |
| | 距端 I 的相对距离 | 选择该项则以相对距离方式输入距离值 |
| | 距端 I 的绝对距离 | 选择该项则以绝对距离方式输入距离值 |
| 均布荷载 | | 输入均布荷载值。其正负与方向有关 |

梯形荷载的输入原理是在线对象上确定四个控制点，在四个点位置分别输入四个力值，将四个值连线便形成梯形分布荷载。因此在输入梯形荷载时，我们需要输入的是线对象的四个控制点位置 and 对应各点位置的力值。选择【距端 I 的相对距离】选项时，在距离输入域中四个点的位置按照线对象的相对长度比例确定。距离输入域的四个数值分别表示第一个点在起始 (I) 端点，第二个点在构件全长 1/4 处，第三个点在构件全长 3/4 处，第四点在结束 (J) 端点。选择【距端 I 的绝对距离】选项时，在距离输入域中四个点的位置按照线对象的绝对长度比例确定。

在对话框中首先在荷载工况名称下拉框中选择工况名称，然后在单位下拉框中指定输入值的单位制；在荷载类型与方向区域选项中选择荷载的类型；荷载方向一般情况下取其默认值 Gravity（重力方向）；对于一般线分布荷载，直接在均布荷载输入域中输入荷载值，按【确定】后即可。

7.10 风荷载

SAP2000 提供自动计算风荷载的功能。在定义荷载工况时，如果选择【风力作用面来自于面对象】，还需要指定风作用面的风压系数，当然，对于复杂的建筑在不同的迎风面处指定不同的风压系数，这需要工程师先在模型中定义风荷载工况并且绘制承担风荷载的剪力墙或者近乎无质量无刚度的面，其绘制方法我们已经在第五章绘制构件方法中作了介绍。

在立面视图中选择面对象，点击【指定】>【面荷载】>【风荷载体型系数（壳）】命令，弹出面风荷载体型系数对话框（7-22）。对话框说明见表 7-15。

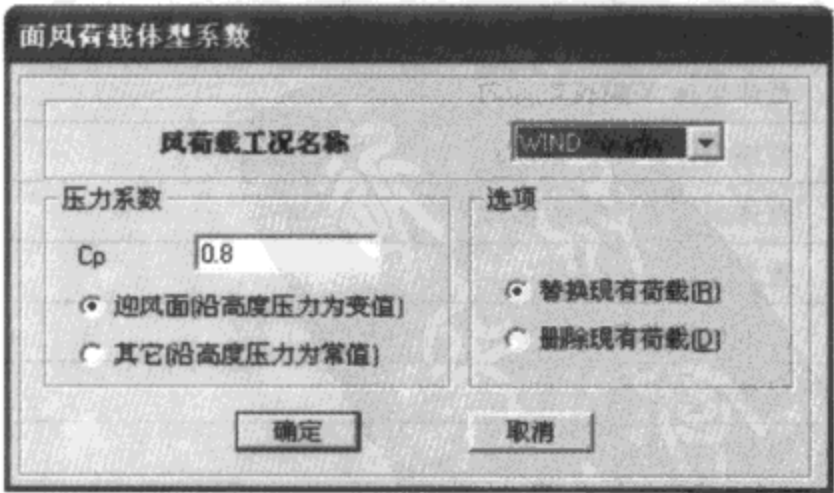


图 7-22 面风荷载体型系数对话框

表 7-15

| | | |
|---------|--------|---------------------------|
| 风荷载工况名称 | | 下拉菜单中列出所有荷载工况名称，可以选择工况 |
| 压力系数 | Cp | 根据规范输入体型系数。正负值与面对象局部坐标系有关 |
| 选项 | 替换现有荷载 | 输入的荷载值替换面对象上已经定义的风压系数 |
| | 删除现有荷载 | 删除楼面面对象上已经定义的风压系数 |

在对话框中首先选择风荷载工况名称，在压力系数区域中体型系数值的正负与局部 3 轴方向有关，输入正值时风荷载的方向与该面对象的局部 3 轴正方向一致，输入负值则与局部 3 轴方向相反。点击【视图】>【设置显示选项】按钮，在弹出的激活窗口选项对话框中勾选【面局部坐标轴】选项，打开局部坐标轴显示，面对象上蓝色坐标轴为局部 3 轴。工程师可以根据局部 3 轴方向，确定体型系数的正负，输入体型系数后，SAP2000 会自动计算风荷载值。

7.11 温度荷载

SAP2000 温度荷载是指在温度变化时在框架、壳、实体单元中产生的热应变，热应变等于材料的热膨胀系数和单元温度变化的乘积。材料的热膨胀系数由材料的本身性质决定，可以在材料的分析属性数据中来定义；单元的温度变化是由单元参考温度到单元荷载温度的改变。SAP2000 根据材料的属性和温度的变化计算出构件温度应力。如果使用英制单位，则以华氏度 $^{\circ}\text{F}$ 单位指定该温度；如果使用公制单位，则以摄氏度 $^{\circ}\text{C}$ 为单位指定该温度。

在每个荷载工况中的荷载温度可以不同，在不同的荷载工况中可以设置不同的温度荷载。用户可以指定荷载温度在整个单元上作为一个均布值施加，或者由节点样式插值施加。

给框架线对象指定温度荷载时，首先要给定参考温度，再来指定温度荷载值。例如参考温度是 10° ，温度升高 20° ，那么选择线对象（框架），点击【指定】>【框架\索\钢束荷载】>【参考温度】命令，弹出框架参考温度对话框（图 7-23）。对话框说明见表 7-16。

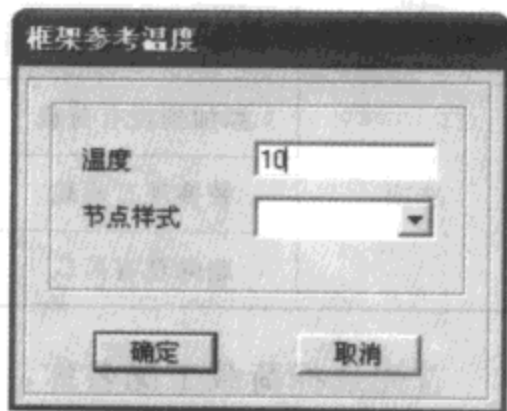


图 7-23 框架参考温度对话框

表 7-16

| | |
|------|--------------------------|
| 温度 | 参考温度值 |
| 节点样式 | 通过节点样式，选择已定义的节点样式来指定参考温度 |

再点击【指定】>【框架\索\钢束荷载】>【温度】命令，弹出框架温度荷载对话框（图 7-24）。对话框说明见表 7-17。

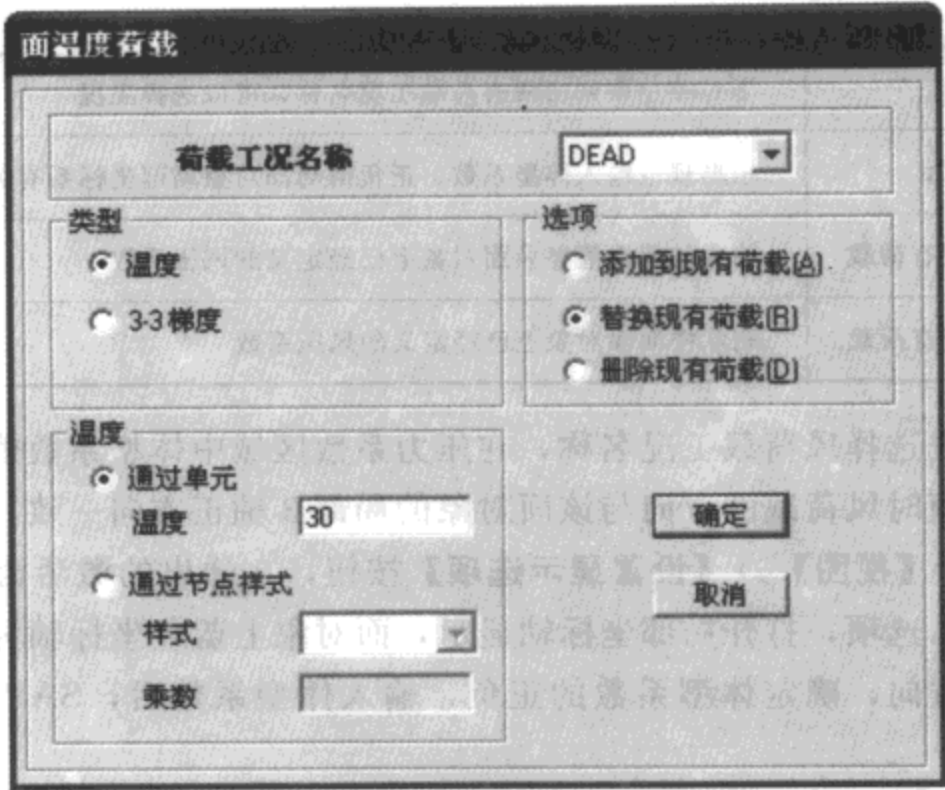


图 7-24 框架温度荷载对话框

表 7-17

| 荷载工况名称 | | 在下拉菜单中选择荷载工况名称 |
|--------|----------|------------------------------|
| 类型 | 温度 | 在整个截面内均匀恒定，产生轴向应变 |
| | 3-3 温度梯度 | 沿局部坐标 3 轴方向每单位长度的温度变化，产生弯曲应变 |
| 温度 | 通过单元温度 | 通过单元，指定温度值 |
| | 通过节点样式 | 通过节点样式，选择已定义的节点样式并指定一个乘数 |
| 选项 | 添加到现有荷载 | 输入的值与现有的值进行叠加 |
| | 替换现有荷载 | 输入的值替换现有的值 |
| | 删除现有荷载 | 删除现有的值 |

首先选择荷载工况名称，然后在通过单元温度输入域中输入值 30，实现了 20°的均匀温度变化，即参考温度 10°和荷载工况温度 30°的差。若在框架的横向方向来施加温度荷载，那么需要给定荷载温度梯度，温度梯度是单位长度上的温度变化。若温度沿单元局部轴的正向增加，则温度梯度为正值，温度梯度在中性轴处为零，所以不产生轴向应变，参考温度梯度总是假定为零。

在上述过程中，如果没有给对象指定参考温度，该参考温度将取为零。如果在荷载工况中荷载温度没有指定给对象单元，程序即默认荷载温度等于参考温度，因此不产生荷载。

给面单元、实体单元指定温度荷载方法与上述完全一样，只是温度梯度不同。对于面单元温度梯度退化成在厚度方向的温度线性变化，且产生弯曲应变。温度荷载在实体单元内产生的温度应变由从单元参考温度到单元加载温度的变化来计算，温度改变沿单元厚度是恒定

的，不需要再设定温度梯度。

7.12 地面位移荷载

地面位移只能指定给点对象。该点对象必须与结构直接相连，并且必须以约束、弹簧或者指定给点对象的连接单元这三种方式之一与地面相连。

当地面位移指定到有约束的点对象时，位移将出现在该点对象上；当地面位移指定到有弹簧或者地面连接单元的点对象时，该位移将发生在地面的弹簧或连接端部，而不是在该点对象上。如果把一个地面位移指定到一个没有通过约束、弹簧或地面连接单元与地面连接的点对象上，那么在运行分析时 SAP2000 将忽略该位移。

例如我们选择底层的点对象，点击【指定】>【节点荷载】>【位移】命令，弹出地面位移对话框（图 7-25）。对话框说明见表 7-18。

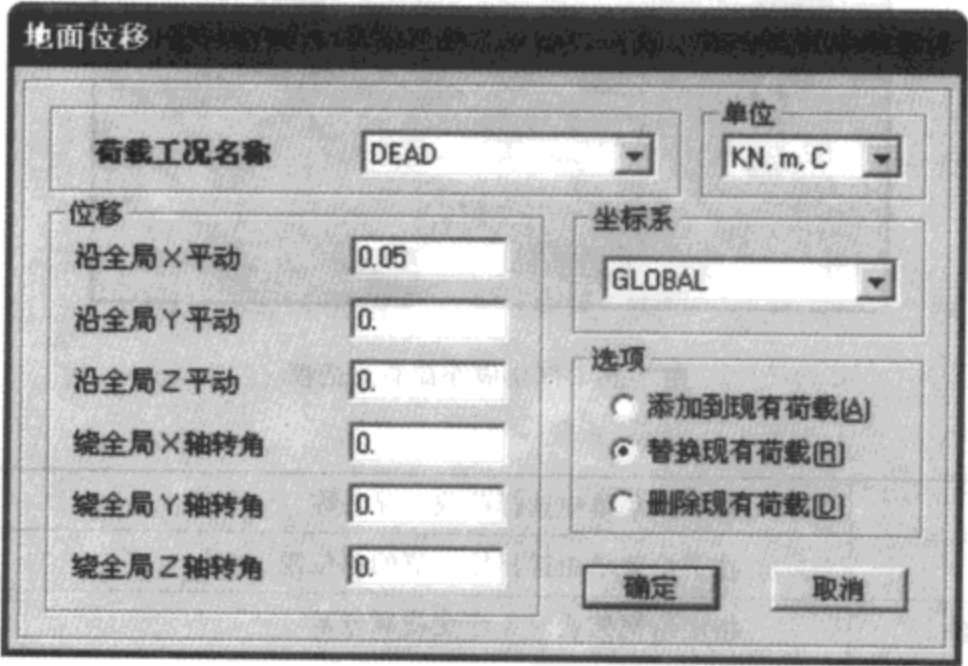


图 7-25 地面位移对话框

表 7-18

| | | |
|--------|-----------|-----------------|
| 荷载工况名称 | | 在下拉菜单中选择荷载工况名称 |
| 单位 | | 下拉菜单中选择输入值的单位制 |
| 位移 | 沿全局 X 轴平动 | 输入沿 X 轴方向水平位移值 |
| | 沿全局 Y 轴平动 | 输入沿 Y 轴方向水平位移值 |
| | 沿全局 Z 轴平动 | 输入沿 Z 轴方向竖向位移值 |
| | 绕全局 X 轴转角 | 输入围绕 X 轴旋转角度值 |
| | 绕全局 Y 轴转角 | 输入围绕 Y 轴旋转角度值 |
| | 绕全局 Z 轴转角 | 输入围绕 Z 轴旋转角度值 |
| 选项 | 添加到现有荷载 | 输入的位移值与现有位移进行叠加 |
| | 替换现有荷载 | 输入的值替换现有位移值 |
| | 删除现有荷载 | 删除现有的位移值 |

输入位移值按【确定】后，相应的数值和方向会显示在节点上。值的正负与坐标轴方向有关，正值则是沿坐标轴正方向平移，负值则是沿坐标轴负方向平移。旋转角方向根据坐标轴由右手法则确定。

7.13 应变荷载

可以对框架线对象和面对象施加应变荷载，方法是一样的，我们下面以框架单元为例进行说明。首先选择一个要指定应变荷载的框架线对象，点击【指定】>【框架/索/钢束荷载】>【应变】命令，弹出框架应变荷载对话框（图 7-26）。对话框说明见表 7-19。

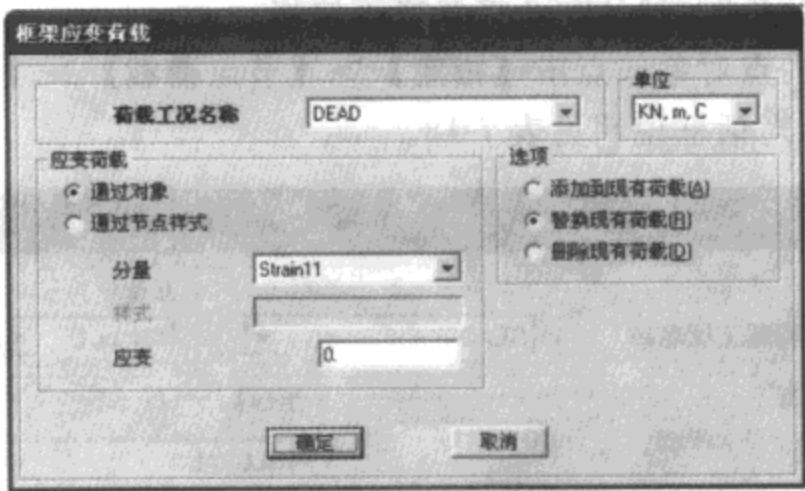


图 7-26 框架应变荷载对话框

表 7-19

| | | |
|--------|---------|--------------------------|
| 荷载工况名称 | | 在下拉菜单中选择荷载工况名称 |
| 单位 | | 在下拉菜单中选择输入值的单位制 |
| 应变荷载 | 通过对象 | 指定给框架线对象应变荷载分量 |
| | 通过节点样式 | 通过节点样式，选择已定义的节点样式并指定一个乘数 |
| 选项 | 添加到现有荷载 | 输入的值与现有的值进行叠加 |
| | 替换现有荷载 | 输入的值替换现有的值 |
| | 删除现有荷载 | 删除现有的值 |

应变荷载同样可以施加到面对象和实体对象上，均有两种方式：指定给对象应变分量或者是通过节点样式来添加。

7.14 表面压力荷载

表面压力荷载用来在单元侧面施加外部压力荷载。可以在壳、平面、轴对称实体和实体单元的任意外表面上施加外部压力。单元的各个面上的荷载是分别指定的。表面压力总是垂直作用于表面，正压力指向单元的内部。

选择一个或多个要施加荷载的面对象，点击【指定】>【面荷载】>【表面压力（全部）】命令，弹出面表面压力荷载对话框（图 7-27）。对话框说明见表 7-20。

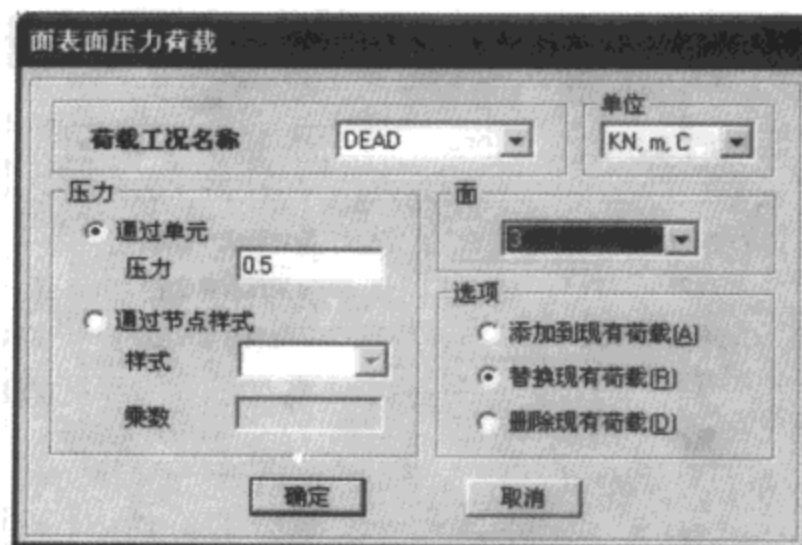


图 7-27 面表面压力荷载对话框

表 7-20

| | | |
|--------|---------|--------------------------|
| 荷载工况名称 | | 在下拉菜单中选择荷载工况名称 |
| 单位 | | 在下拉菜单中选择输入值的单位制 |
| 压力 | 通过单元压力 | 通过单元，指定压力值 |
| | 通过节点样式 | 通过节点样式，选择已定义的节点样式并指定一个乘数 |
| 面 | | 下拉菜单中选择单元表面 |
| 选项 | 添加到现有荷载 | 输入的值与现有的值进行叠加 |
| | 替换现有荷载 | 输入的值替换现有的值 |
| | 删除现有荷载 | 删除现有的值 |

压力在一个面上可以是均布的，也可以是由节点样式插值得到，对不同的面不必相同。作用在一侧的压力乘以厚度，并沿着侧面长度积分，然后被分配至在此侧面的两个节点上。对于静水压力分布利用节点样式即可得到，并且压力值可以相互叠加。

对于实体单元可以在任意 6 个面上施加表面压力荷载，方法相同。作用在面上的压力沿着此面进行积分，所产生的力被分配给在此面上的 4 个角点。

7.15 孔隙压力荷载

孔隙压力荷载用来模拟固体介质中流体的拖曳和浮力作用，比如水对土壤的作用。流体压力的标量值在单元节点通过节点样式给出，并在整个单元上进行插值。作用在单元上的全部力是在单元平面上此压力场梯度乘以厚度再对整个单元内压力分布梯度积分。此力被分配给单元的每一节点。流体压力的方向总是从高压区指向低压区。

选择一个要指定荷载的实体对象，点击【指定】>【实体荷载】>【孔隙压力】命令，弹出实体孔隙压力荷载对话框（图 7-28）。对话框说明见表 7-21。

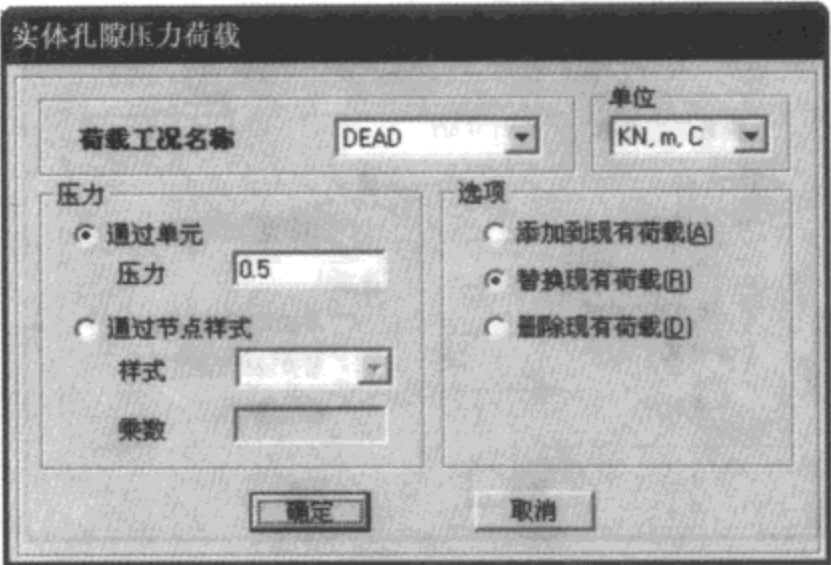


图 7-28 实体孔隙压力荷载对话框

表 7-21

| | | |
|--------|---------|--------------------------|
| 荷载工况名称 | | 在下拉菜单中选择荷载工况名称 |
| 单位 | | 在下拉菜单中选择输入值的单位制 |
| 压力 | 通过单元压力 | 通过单元，指定压力值 |
| | 通过节点样式 | 通过节点样式，选择已定义的节点样式并指定一个乘数 |
| 选项 | 添加到现有荷载 | 输入的值与现有的值进行叠加 |
| | 替换现有荷载 | 输入的值替换现有的值 |
| | 删除现有荷载 | 删除现有的值 |

按照这种方法指定给实体单元的孔隙压力荷载，产生的位移、应力和反力代表固体介质的响应。对于平面单元和轴对称作为实体的特殊形式，也可以施加孔隙压力荷载，方法相同，只是选择的是面对象。

7.16 预应力荷载

预应力荷载是通过嵌入到对象内部的预应力筋，即钢束来实现的。如果知道由于弹性缩短或因时间延迟所带来的预应力损失是多少时，即在线性分析中钢束可以模拟为荷载，嵌入到框架、壳、平面、轴对称实体和实体单元的内部，提供先张或后张预应力，此时钢束附着于对象，并在对象上施加荷载。

每个预应力筋将产生作用在结构其他部分的一系列自身等效力和弯矩。用户可以在不同的荷载工况指定不同的预应力荷载。

选择一个要指定荷载的钢束对象，点击【指定】>【框架/索/钢束荷载】>【钢束荷载】命令，弹出钢束荷载对话框（图 7-29）。对话框说明见表 7-22。

在对话框中定义损失前预应力筋中拉力；锚固位置：I 端或 J 端，预应力筋的拉力在这里施加；弯曲系数定义沿着预应力筋长度方向单位角度的改变（半径）拉力摩擦



图 7-29 钢束荷载对话框

损失（由于摩擦），它是从锚固端开始算起；不稳定系数指定了沿着预应力筋长度方向单位角度的改变（半径）拉力摩擦损失（由于摩擦），它是从锚固端开始算起，是由预应力筋不完整的直线形状引起的；锚固滑移指定了由于锚固端器具的松弛引起的预应力筋锚固端的滑移长度。

当预应力筋模拟为荷载时，其它损失参数区域内的参数需要指定：弹性收缩应力，是由作用预应力筋荷载引起的单元压应力收缩所引起；蔓延应力，是由作用预应力筋荷载单元的压应力蔓延应变引起；收缩应力，是由作用预应力筋荷载单元的压应力收缩引起；钢筋松弛应力，是由预应力筋自身的拉应力松弛应变引起。

为了计算复杂的锚固过程，用户可以在不同的荷载工况中指定不同的预应力荷载，并适当进行施加。

表 7-22

| | | |
|---------|------------|--|
| 荷载工况名称 | | 在下拉菜单中选择荷载工况名称 |
| 单位 | | 在下拉菜单中选择输入值的单位制 |
| 从这个位置张拉 | 钢束 I 端（起点） | 锚固位置为 I 端，钢束的拉力在这里施加 |
| | 钢束 J 端（终点） | 锚固位置为 J 端，钢束的拉力在这里施加 |
| | 两端同时地 | 两端同时张拉 |
| 摩擦和锚固损失 | 弯曲系数 | 从锚固端开始算起，沿着钢束长度方向单位角度的改变（半径）拉力摩擦损失（由于摩擦） |
| | 不稳定系数 | 从锚固端开始算起，沿着钢束长度方向单位角度的改变（半径）拉力摩擦损失（由于摩擦），是由钢束不完整的直线形状引起的 |
| | 锚固滑移 | 由于锚固端器具的松弛引起的钢束锚固端的滑移长度 |
| 其它损失参数 | 弹性收缩应力 | 由于作用钢束荷载引起的单元压应力收缩所引起 |
| | 蔓延应力 | 由于作用钢束荷载单元的压应力蔓延应变引起 |
| | 收缩应力 | 由于作用钢束荷载单元的压应力收缩引起 |
| | 钢束松弛应力 | 由于钢束自身的拉应力松弛应变引起 |
| 选项 | 替换现有荷载 | 输入的值替换现有荷载值 |
| | 删除现有荷载 | 删除现有的荷载值 |

7.17 荷载的显示

在施加完荷载后，我们可以用不同方式来显示所施加的荷载情况。下面分类进行介绍。

(1) 直接在构件上显示

施加的荷载是按点、线、面对象类型显示的，也就是说每次只能显示一种对象的单一工况下的荷载。点对象荷载显示时，会在点位置出现箭头方向，并在箭头上显示出力值；线对

象荷载直接以均布箭头显示；面对象荷载的显示是在面对象中间直接以数字显示。我们以线对象为例介绍荷载显示的具体操作过程：点击【显示】>【显示荷载指定】>【框架/索/钢束】命令，弹出显示框架荷载对话框（图 7-30）。对话框说明见表 7-23。

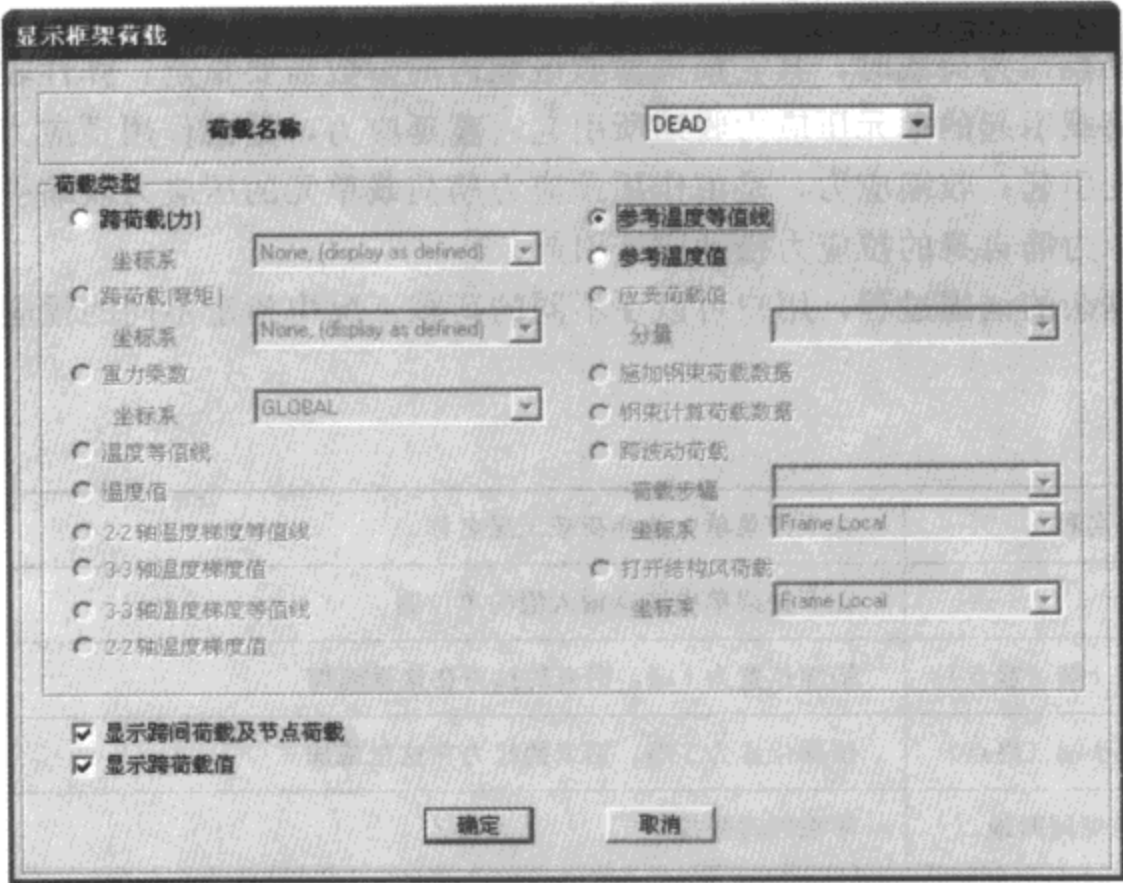


图 7-30 显示框架线荷载对话框

表 7-23

| | | |
|------|-------------|---|
| 荷载名称 | | 下拉菜单中列出所有荷载工况名称，选择工况 |
| 荷载类型 | | 如果结构中没有指定的荷载变为灰色，指定的所有作用于线对象上的荷载将按照类型进行显示 |
| 勾选项 | 显示跨间荷载和节点荷载 | 如果勾选将显示跨间荷载和节点荷载 |
| | 显示跨荷载值 | 如果勾选将在荷载分布图上显示荷载值 |

在对话框中首先选择显示荷载工况的名称，然后在荷载类型区域中选择需要显示的荷载类型，按【确定】按钮。在显示之前要确定已经给构件指定了该种荷载工况的线荷载，否则对话框中的【确定】按钮呈灰色。线对象均布荷载显示如图 7-31 所示。

(2) 在对象信息对话框中显示

建模阶段，在一个对象上（例如节点），单击鼠标右键，弹出点信息对话框（图 7-32）。点击显示对话框的荷载页面，显示该节点所有指定的荷载信息。

(3) 用数据表格显示荷载信息

点击【显示】>【显示表格】命令，弹出选择显示表格对话框（图 7-33）。

此对话框是所有模型建模分析和设计数据的控制显示。点击对话框中的各分支前的加号，这里以框架对象为例：选择【框架荷载指定】选项，然后按【确定】，弹出框架荷载数据表格（图 7-34）。

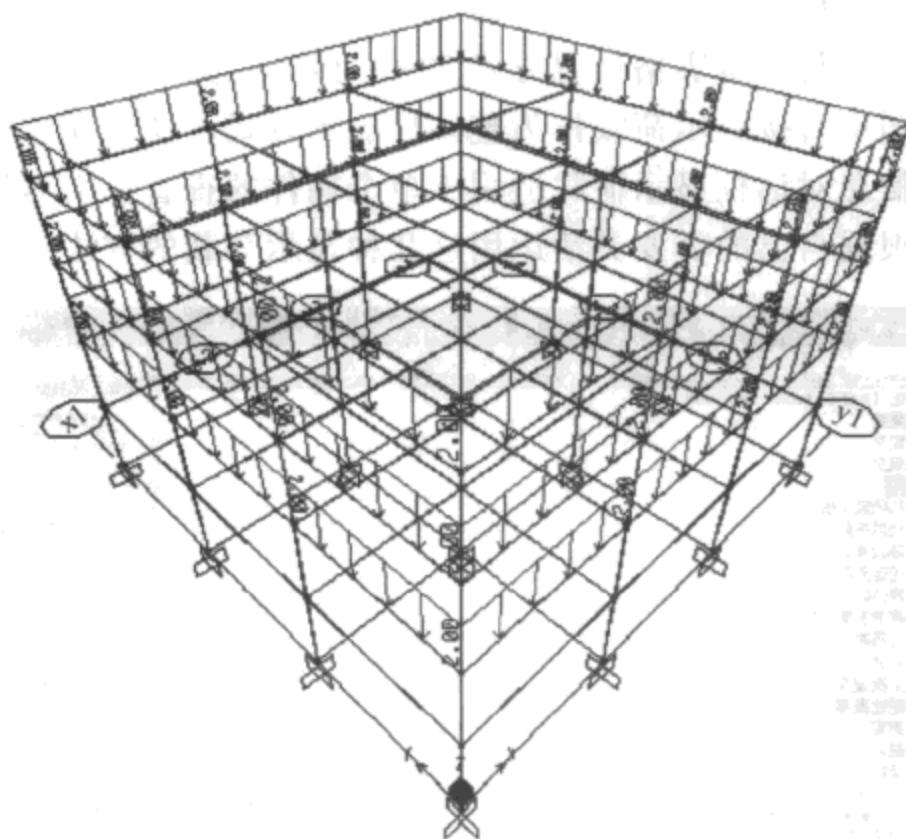


图 7-31 线对象均布荷载显示

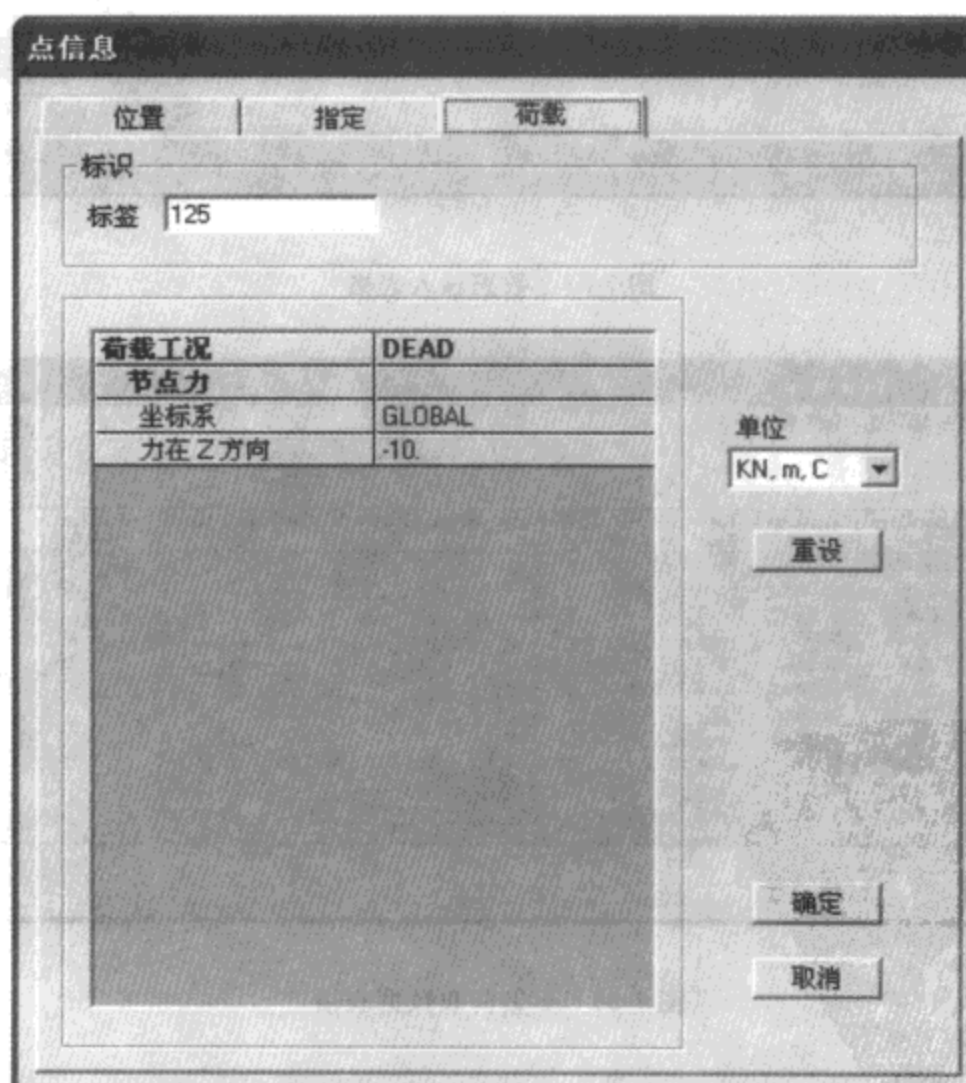


图 7-32 点信息对话框

表格还可以直接以文档格式显示并打印输出。点击【文件】>【打印表格】命令，弹出打印的输入表格对话框，与现实表格设置方式完全一致，只是它是文本文件的格式。

综上所述，在视图中直接显示荷载作为整体性显示方式，便于在建模过程中宏观查看模型，非常直观；对象信息对话框显示荷载适用于单个构件的查看；文本显示荷载便于存档以及打印输出。工程师根据自己的需要灵活运用这几种显示荷载的方法。

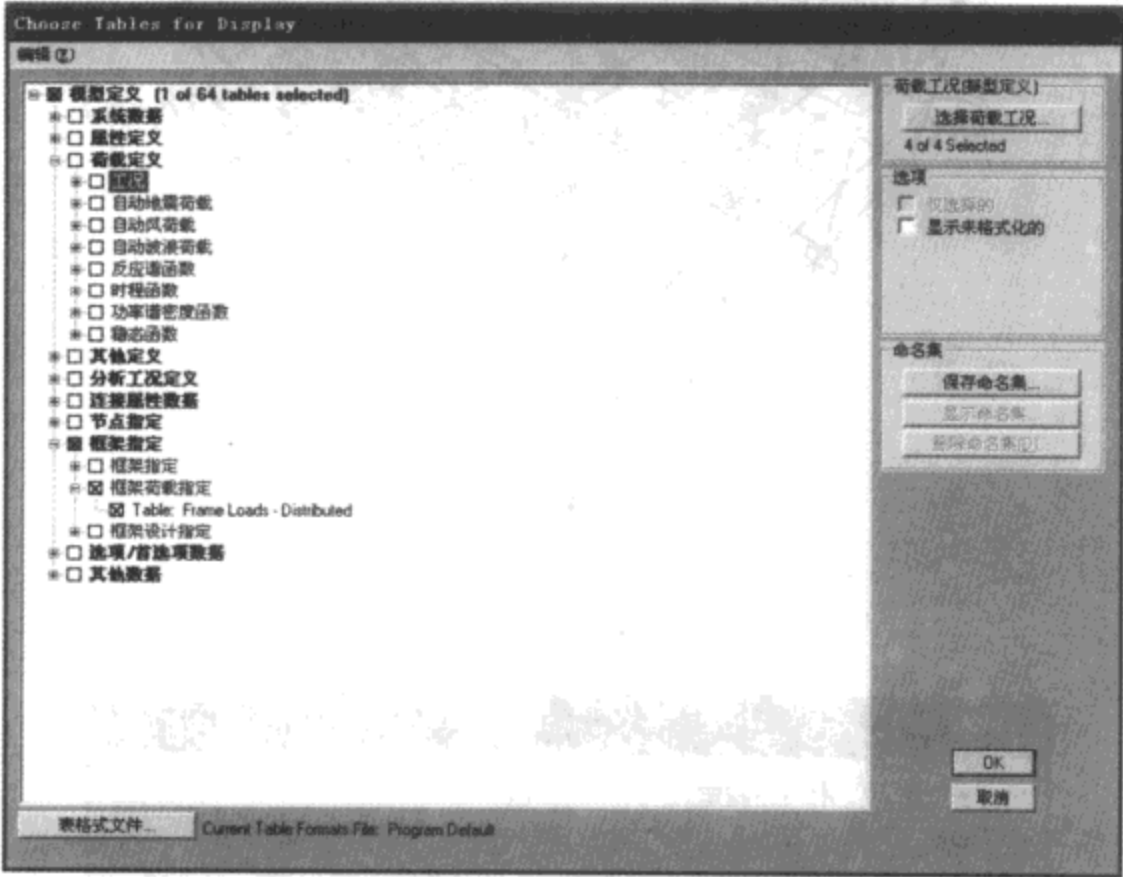


图 7-33 数据输入表格

Frame Loads - Distributed

文件(F) 视图(V) 选项(O) 格式(M)

Units: As Noted

Frame Loads - Distributed

| Frame Text | LoadCase Text | CoordSys Text | Type Text | Dir Text | DistType Text | RelDistA Unitless | AbsDistA m | bsDistB | F0verLA KN/m | F0verLB KN/m |
|------------|---------------|---------------|-----------|----------|---------------|-------------------|------------|---------|--------------|--------------|
| 93 | DEAD | GLOBAL | Force | Gravity | RelDist | 0 | 1 | 0 | 6 | 2 |
| 94 | DEAD | GLOBAL | Force | Gravity | RelDist | 0 | 1 | 0 | 6 | 2 |
| 95 | DEAD | GLOBAL | Force | Gravity | RelDist | 0 | 1 | 0 | 6 | 2 |
| 102 | DEAD | GLOBAL | Force | Gravity | RelDist | 0 | 1 | 0 | 6 | 2 |
| 103 | DEAD | GLOBAL | Force | Gravity | RelDist | 0 | 1 | 0 | 6 | 2 |
| 104 | DEAD | GLOBAL | Force | Gravity | RelDist | 0 | 1 | 0 | 6 | 2 |
| 105 | DEAD | GLOBAL | Force | Gravity | RelDist | 0 | 1 | 0 | 6 | 2 |
| 106 | DEAD | GLOBAL | Force | Gravity | RelDist | 0 | 1 | 0 | 6 | 2 |
| 107 | DEAD | GLOBAL | Force | Gravity | RelDist | 0 | 1 | 0 | 6 | 2 |
| 114 | DEAD | GLOBAL | Force | Gravity | RelDist | 0 | 1 | 0 | 6 | 2 |
| 115 | DEAD | GLOBAL | Force | Gravity | RelDist | 0 | 1 | 0 | 6 | 2 |
| 116 | DEAD | GLOBAL | Force | Gravity | RelDist | 0 | 1 | 0 | 6 | 2 |

记录: 1 of 36

完成

图 7-34 框架荷载数据表格

第8章

特殊功能指定

第七章介绍了 SAP2000 中提供的荷载工况定义以及分析工况定义。某些荷载工况和分析工况的定义是基于 SAP2000 中特殊功能指定的，例如风荷载工况的定义是基于刚性隔板的定义。建模过程中也需要对结构对象中的一些属性设置进行修正，这些属性包括结构底部支座、结构刚性隔板假定等结构性能，即节点支座约束、对节点的各种限制、偏心、线对象节点刚域、局部坐标轴、拉压比和单元剖分指定等对象属性。在 SAP2000 中，这些属性可以非常简便地指定给选中的某个或者某些构件。本章将分别介绍以上涉及到的各类特殊功能的指定和构件属性修正方法。

8.1 节点约束(restraint)

在结构模型的建立过程中，SAP2000 对于利用模板建立的模型，例如建筑结构首层的柱、墙、支撑等构件与结构底部默认生成铰接连接；对于绘制的各种构件不生成连接。实际工程的连接情况不一定和默认的形式相同，这就需要对底部支座的属性进行修改，这是通过节点约束的指定实现的。SAP2000 的支座指定并不局限于模型底部，在模型各节点处，可以按需要非常简便灵活地设置节点约束。

首先，选中需要指定节点约束的节点，然后点击【指定】>【节点】>【约束】命令，将弹出节点支座对话框（图 8-1）。对话框说明见表 8-1。

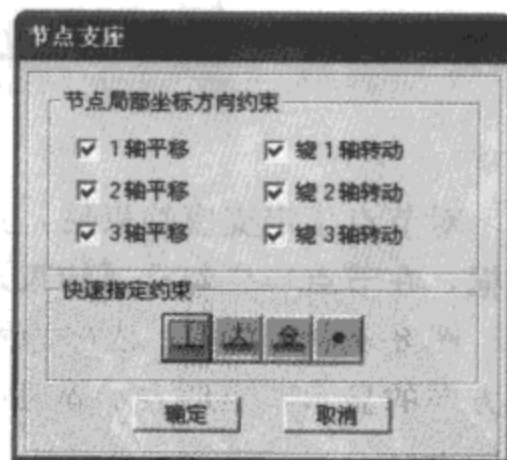






图 8-1 节点支座对话框

表 8-1

| | |
|------------|--|
| 节点局部坐标方向约束 | 包括三个方向的平动自由度和三个方向的旋转自由度，在选择框内勾选表示对该自由度进行约束 |
| 快速指定约束 | 快速指定固定支座、铰接支座、滑移支座和无约束端 |

该对话框分为两个主要的区域，上面的区域显示了全局方向约束，这个区域列出一个对象存在的 6 个自由度，包括 3 个方向的平动自由度和 3 个方向的旋转自由度。在选择框中勾选某项表示对该自由度方向施加约束，任意数量任意形式的自由度约束组合都可形成一种支座形式，通过这一区域我们可以形成任意形式的支座。

而实际工程中常用的支座形式只有几种，对话框中的第二部分快速指定约束列出了几种常用的支座形式：固定支座、铰接支座、滑移支座和无约束端。通过点击对应的四个按钮可以快速设定约束：

- 1) 固定支座 ：点击该按钮，约束所有 6 个自由度。
- 2) 铰接支座 ：点击该按钮，约束所有 3 个平动自由度，3 个旋转自由度无约束。
- 3) 滑移支座 ：点击该按钮，约束 Z 向平移自由度，其他自由度无约束。
- 4) 无约束端 ：点击该按钮，释放所有约束的自由度，即所有自由度均无约束。

当在快速指定约束区域指定支座时，全局方向约束区域将即时显示该支座的约束情况，在点击快速指定约束区域内按钮后，仍可以在全局方向约束区域内修改约束状态。

例如在快速指定约束区域内点击【滑移支座】，对话框将显示如图 8-2a) 的状态。这就是 XY 平面内的滑移支座，如果需要的仅是 X 方向的滑移支座，再在全局方向约束区域内勾选【Z 轴平移】即可实现我们所需要的支座形式，如图 8-2b) 所示。

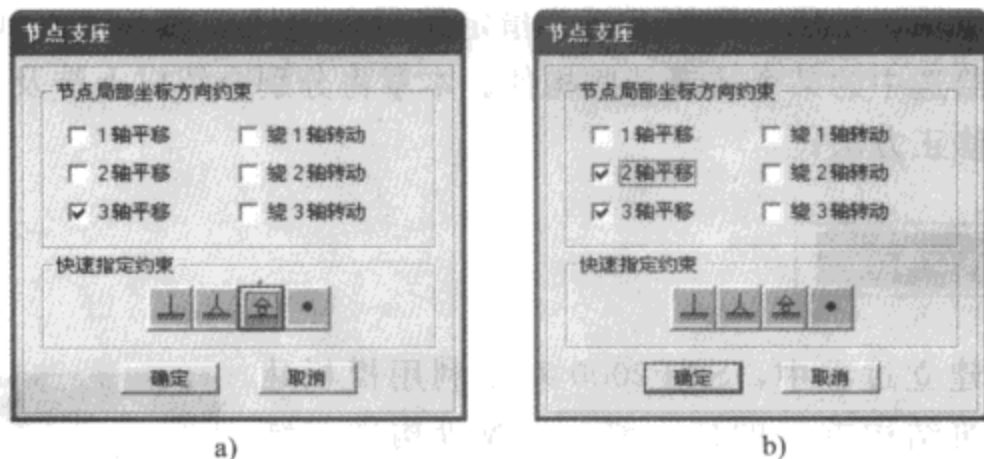


图 8-2 快速指定滑移支座

对节点指定支座约束后，点击【视图】>【设置显示选项】命令，弹出激活窗口选项对话框，在节点一栏勾选【约束】选项，在模型视图中显示节点支座形式如图 8-3 所示

图 8-3 中从左到右依次为固定支座、铰接支座、XY 滑移支座和自由无约束点。对于某个方向的显示，矩形表示固定约束，三角形表示铰接约束，圆形表示滑移约束，无图形表示无约束点。

对于结构支座，还有两点需要阐明：

首先，SAP2000 中约束是通过节点指定的，并不是结构楼层的整体特性，这一方面不同于国内常用的一些程序。这样可以灵活设置底层不同构件与基础的连接形式，可以简便地实现底部某些铰接，某些固接的结构形式；对于某些约束部位不在底层的结构可以很轻易的实现，只需选中该点指定约束即可；另外对于山坡建筑，底部支座可能不在同一楼层，甚至不在楼层内，使用 SAP2000 很容易实现，如图 8-4 所示约束形式。

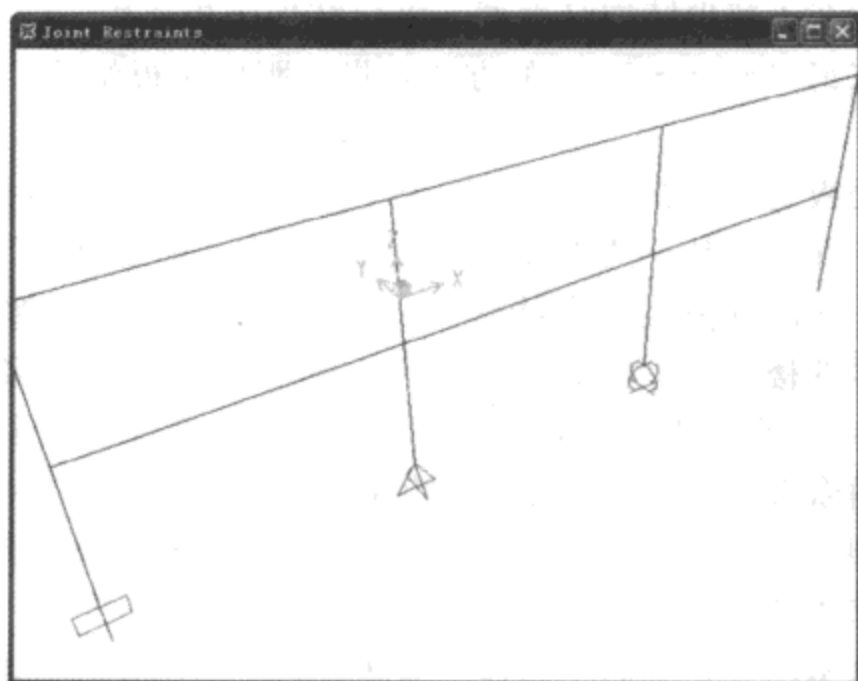


图 8-3 节点约束视图

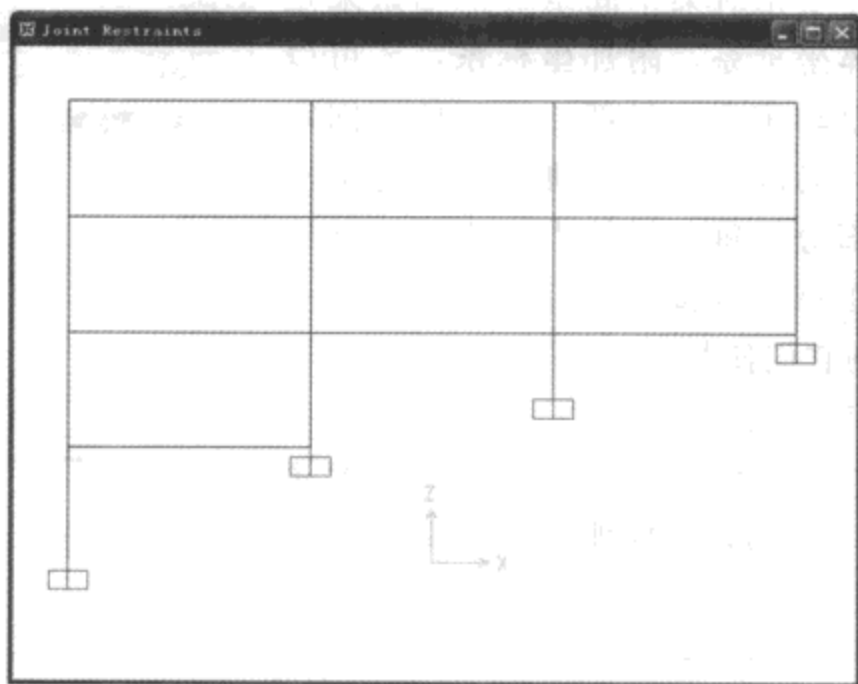


图 8-4 斜坡支座指定

其次，具有地下室的结构在建模中做节点约束指定时的注意事项：在 SAP2000 中约束是节点的属性，不是结构楼层的属性，程序不能指定某一楼层进行嵌固指定。当有地下室结构时，需要在首层结构与土向连接位置通过节点指定约束，当指定固定约束时，采用的是土的侧向刚度无限大的假设，但实际上土的侧向刚度并非无限大，建议采用节点弹簧和面弹簧模拟土和结构间的作用，通过调整弹簧刚度确定土的弹性状况。注意：这时指定的弹簧只应指定到地下室部分与土直接接触的结构节点和挡土墙上。

8.2 节点约束(constraint)

在建筑结构分析时，对于一般平面布置规则、楼板没有过大面积开洞的结构体系中，规范允许假定结构平面内的刚度无限大，即允许采用刚性隔板假定，并且这种假定是符合精度

要求的，这样做的目的在于减少结构自由度、缩短结构分析使用时间。在 SAP2000 中可以通过对节点指定节点束缚（constraint）的方式，指定刚性隔板给节点，实现结构平面内无限刚性的假定。

国内某些程序的楼板处理，在默认情况下为完全刚性板（刚性隔板），若要作弹性楼板分析需要作特殊指定，并且是基于某些特殊假定的基础上。而在有限元的分析中考虑楼板的实际弹性是一般情况，而刚性隔板只是特殊假定。SAP2000 紧紧依照有限元分析原理，楼板在默认情况下即为弹性楼板，并提供了刚性隔板的设置功能——即给节点指定节点束缚。

用 SAP2000 的节点束缚功能，指定刚性隔板给结构，实现规范中的结构平面无限刚性的假定，只是节点束缚众多功能之一，运用节点束缚的一种类型。节点束缚功能给工程师提供了多种节点束缚类型，本节对节点束缚的类型和指定，以及刚性隔板的意义作以介绍。

(1) 节点束缚的基本意义

使用节点束缚的基本功效是限制了结构中某些节点之间的相对自由度，减少系统中需要求解的方程数量，通常将提高计算的效率。

大多数束缚类型必须相对某个固定的坐标系来定义。坐标系可以是整体坐标系、附加坐标系，还可以从被束缚的节点位置自动定义。局部约束不使用固定坐标系，而是使用节点局部坐标系。拼接用来连接模型中分别定义的不同部分，每一拼接由一组可能被连接的节点组成。程序在每一拼接中搜寻在空间共享一个位置的节点，并限制它们使其像一个节点作用。

(2) 节点束缚的定义和指定

点击菜单【定义】>【节点束缚】命令弹出定义束缚对话框，如图 8-5 所示。对话框详细说明见表 8-2。

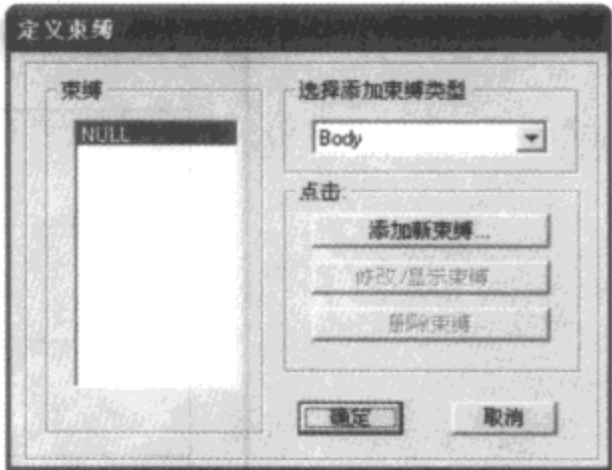


图 8-5 定义束缚对话框

表 8-2

| | |
|----------|--|
| 束缚 | 已定义的节点束缚名称列表，默认列出的 NULL 表示没有任何束缚，选择此项指定给节点，含义是取消节点的束缚属性 |
| 选择添加束缚类型 | 通过下拉菜单选择要添加的节点束缚的类型，包括：Body（体）、Diaphragm（隔板）、Plate（板）、Rod（杆）、Beam（梁）、Weld（拼接）、Equal（对等）、Local（局部轴）、Line（线） |
| 添加新束缚 | 点击弹出选中的束缚类型的定义对话框，定义不同类型的节点束缚 |
| 修改/显示束缚 | 修改/显示已定义的节点束缚的具体属性 |
| 删除束缚 | 删除已定义的节点束缚 |

在选择添加束缚类型下拉菜单中选定束缚类型后，点击【添加新束缚】按钮，即弹出具体束缚定义对话框，根据束缚类型的不同有相应的差别（具体的定义将在下面介绍）。具体参数定义完毕回到定义束缚对话框，点击【确定】按钮，完成节点束缚的定义。

定义完节点束缚后，选中需要指定束缚的节点，点击菜单【指定】>【节点】>【节点束缚】命令，弹出指定/定义束缚对话框（如图 8-6 所示，对话框说明见表 8-3），选中需要指定给已选节点的束缚名称，点击【确定】按钮，将节点束缚指定给选中节点。在此对话框中同样可以定义节点束缚，定义的操作和节点束缚类型同定义束缚对话框中的内容完全一致。

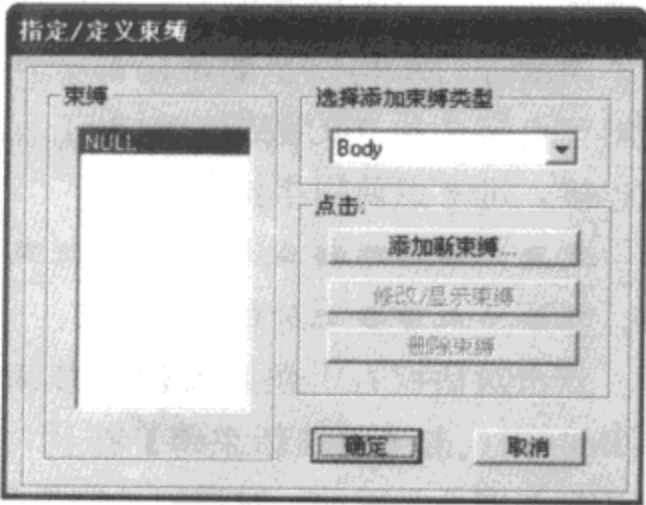


图 8-6 指定/定义束缚对话框

(3) 节点束缚的分类

SAP2000 中共有 9 种节点束缚的类型：Body（体）、Diaphragm（隔板）、Plate（板）、Rod（杆）、Beam（梁）、Weld（拼接）、Equal（对等）、Local（局部轴）、Line（线），这 9 种节点束缚分为三大类：刚体类型、对等类型和插值类型。

表 8-3

| | |
|----------|--------------------------------|
| 束缚 | 显示已定义的节点束缚的名称列表，通过点击选中某已定义节点束缚 |
| 选择添加束缚类型 | 下拉菜单，列出所有 9 种节点束缚名称，点击选取 |
| 添加新束缚 | 点击弹出与选中类型相对应的节点束缚详细定义对话框 |
| 修改/显示束缚 | 点击弹出选中的已定义节点束缚详细信息对话框，供查看和修改 |
| 删除束缚 | 点击删除选中的已定义节点束缚 |

1) 刚体类型

束缚将所有节点按同一类型刚体一起运动，会耦合旋转和平动自由度。所有的束缚节点是刚体行为，与被限制的节点一起平动和转动，好像被刚性连接所连接。

刚体类型包括：Body（体）、Diaphragm（隔板）、Plate（板）、Rod（杆）、Beam（梁）五种束缚类型：

2) 对等类型

不同节点的各独立自由度相同，约束节点的平动和转动是相等的。一般用于连接和对称情况。对等类型包括：Equal（对等）、Local（局部轴）两种类型。

3) 插值类型

将一个节点自由度通过其他节点自由度插值得到。一般用于连接不协调的单元。即为 Line（线）类型的节点束缚。

(4) 下面详细介绍这 9 种节点束缚的含义、定义方法和应用

1) Body（刚体束缚）

Body（刚体束缚）将其所有自由度按照一个三维刚体一起运动。所有受限节点通过刚性连接与其他节点相连接。默认在每一连接节点的所有自由度都参与束缚。然而，工程师可以选择一个被限制的子集，即选择任意的自由度组合进行束缚。

该束缚用于：①任意尺寸和类型的模型刚体。②模型刚性连接，例如几个梁和/或柱框

架连接处。对于连接有偏心处，该束缚格外有效。③将使用不同剖分的结构模型的不同部分连接起来。必须为各组束缚节点定义独立的束缚。如果工程师需要建立大量的这种连接，可考虑使用拼接束缚。

注意：体束缚将空间中任意位置的多个节点连接在一起，这些节点可在空间任意位置。

点击对话框右上角的选择添加束缚类型下拉菜单，选择 **Body**，点击【添加新束缚】按钮，弹出体束缚详细定义对话框如图 8-7 所示。对话框说明见表 8-4。

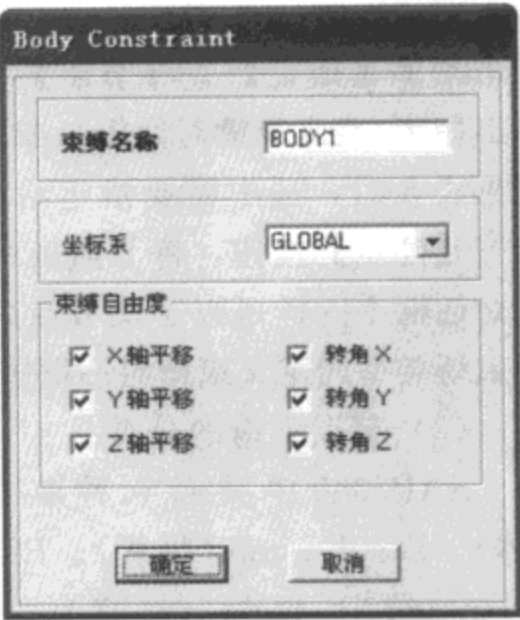


图 8-7 体束缚定义对话框

2) Diaphragm (隔板束缚)

Diaphragm (隔板束缚) 用来指定给节点，实现结构平面内无限刚性的假定。隔板束缚使所有被其限制的节点作为一个刚性（相对于膜的变形）的平面板来一起移动。所有限制节点被平面内刚性连接件连接在一起，但不影响平面（板）外的变形。

表 8-4

| | |
|-------|---|
| 束缚名称 | 查看更改体束缚名称 |
| 坐标系 | 查看更改体束缚坐标系 |
| 束缚自由度 | 在复选框中勾选某方向自由度，表示束缚此方向的自由度，可以限制节点的全部六个自由度的相对运动，也可以任意选择限制节点之间的某个或某几个自由度 |

该束缚用于：①模拟建筑结构混凝土楼板或混凝土填充板，这种板有很大的平面内刚度。②模拟桥梁上部结构的隔板，这些楼板一般具有很大的平面内刚度。

注意：隔板束缚的节点必须在一个平面内，否则，该束缚将会有效地束缚节点面外弯曲，这将使结构变刚，与实际不符。如果指定隔板束缚的点不在同一平面内，则在分析结果中报告的束缚力可能是不平衡的。

对于建筑结构使用刚性隔板，避免了由于将较大平面的楼板用膜单元模拟（楼板的刚度模拟为膜刚度）所产生的数值准确性问题。这在建筑结构的侧向（水平）动力分析中是十分有用的，因为其显著减少了所求解特征值问题的计算时间。

点击对话框右上角的选择添加束缚类型下拉菜单，选择 **Diaphragm**，点击【添加新束缚】按钮，弹出隔板束缚详细定义对话框如图 8-8 所示。对话框说明见表 8-5。

表 8-5

| | |
|----------------------|---|
| 束缚名称 | 查看更改隔板束缚名称 |
| 坐标系 | 查看更改隔板束缚坐标系 |
| 束缚轴 | 在选择框中选中某方向束缚轴，表示按此束缚轴束缚节点隔板运动 |
| 指定不同隔板束缚到每个不同的 Z 高度处 | 勾选此项，可以将选中的不同坐标值（对应束缚轴）处的节点，分别指定不同刚性隔板名称。例如：束缚 Z 轴，则对不同 Z 坐标值（标高）处的节点分别指定不同的刚性隔板；否则，对不同 Z 标高的节点将一同束缚绕 Z 轴的自由度 |

3) Plate (板束缚)

板束缚使其所有被限制的节点作为相对于弯曲变形刚度与刚性的平板一起移动。此种束缚使所有受限节点通过一个板面外抗弯刚性的连接与其他节点连接在一起，但是不影响平面内变形。

该束缚用于：①将实体类型单元（平面、轴对称实体和实体）与结构类型单元（框架和壳）相连。可通过该束缚将结构单元中的旋转转化为实体单元中的一组相等或相反的平动。②实现梁弯曲建模时的板截面保持“平截面”性质的假定。

注意：要在模型中产生作用，该束缚中必须具有至少两个节点。它一般用于位于同一个平面内的一组节点。但是，即使节点不在同一个平面内，该束缚也不会对模型产生任何不利影响。

点击对话框右上角的选择添加束缚类型下拉菜单，选择 Plate，点击【添加新束缚】按钮，弹出板束缚定义对话框如图 8-9 所示。对话框说明见表 8-6。

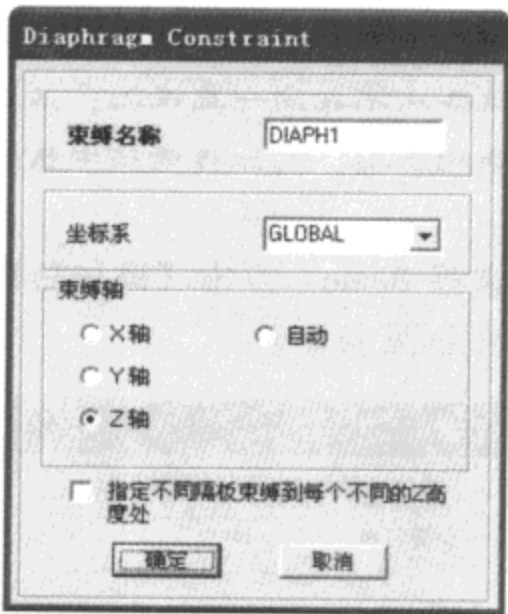


图 8-8 隔板束缚定义对话框

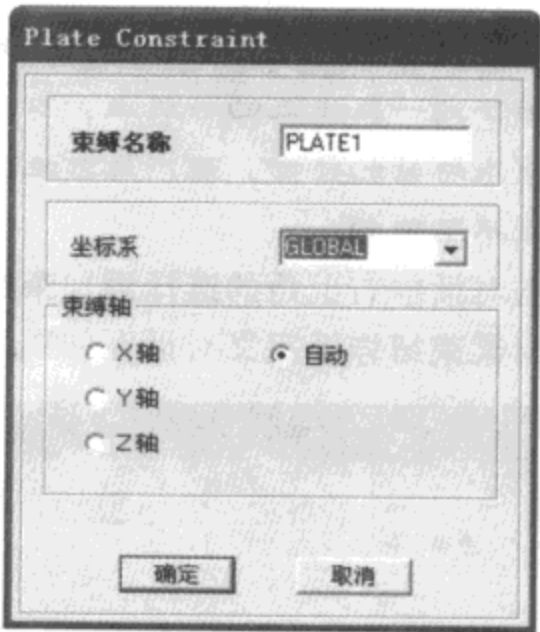


图 8-9 板束缚定义对话框

表 8-6

| | |
|------|-------------------------------|
| 束缚名称 | 查看更改板束缚名称 |
| 坐标系 | 查看更改板束缚坐标系 |
| 束缚轴 | 在选择框中选中某方向束缚轴，表示按此束缚轴束缚节点的板运动 |

4) Rod (杆束缚)

杆束缚使所有被限制的节点作为刚性的（相对于轴向变形）杆一起移动。所有受限节点在平行于杆轴的方向保持固定长度，但是所有垂直于轴的平动和所有的转动刚度不受影响。

该束缚用于：①防止框架单元的轴向变形。②保持节点之间的固定距离，模拟类似刚性桁架的连接

注意：该约束必须具有至少两个节点才能对模型产生作用。它一般用于在同一直线上的

一组点。如果节点不在同一条直线上，该束缚会约束绕两个弯曲轴的转动，而产生弯矩，这将不真实地使结构变刚，在分析结果中报告的限制力可能是不平衡的。

点击对话框右上角的选择添加束缚类型下拉菜单，选择 **Rod**，点击【添加新束缚】按钮，弹出杆束缚定义对话框如图 8-10 所示。对话框说明见表 8-7。

表 8-7

| | |
|------|--------------------------------|
| 束缚名称 | 查看更改杆束缚名称 |
| 坐标系 | 查看更改杆束缚坐标系 |
| 束缚轴 | 在选择框中选中某方向束缚轴，表示按此束缚轴束缚节点的轴向运动 |

5) Beam（梁束缚）

梁束缚使所有被限制的节点作为一个刚性的（相对于弯曲变形）直梁一起移动。所有受限节点通过一个具有轴外弯曲刚性的连接进行连接，但是所有轴向的平动和扭转不受影响。

该束缚可以用于：①将实体类型的单元连接到结构类型单元（框架和壳），结构单元的旋转可以通过束缚转化为实体单元中的一对相等或相反的平动。②防止框架单元中的弯剪变形。

注意：要在模型中产生作用，该束缚必须具有至少两个节点，节点可以有任意的空间位置。常用于同一直线上的一组点，有最好的效果，如果这些点不在同一直线上，该束缚会束缚节点绕束缚轴的转动，而产生弯矩，这将不真实地使结构变刚，在分析结果中报告的束缚力可能是不平衡的。

点击对话框右上角的选择添加束缚类型下拉菜单，选择 **Beam**，点击【添加新束缚】按钮，弹出梁束缚详细定义对话框如图 8-11 所示。对话框说明见表 8-8。

表 8-8

| | |
|------|---------------------------------|
| 束缚名称 | 查看更改梁束缚名称 |
| 坐标系 | 查看更改梁束缚坐标系 |
| 束缚轴 | 在选择框中选中某方向束缚轴，表示按此束缚轴束缚节点的梁性质弯曲 |

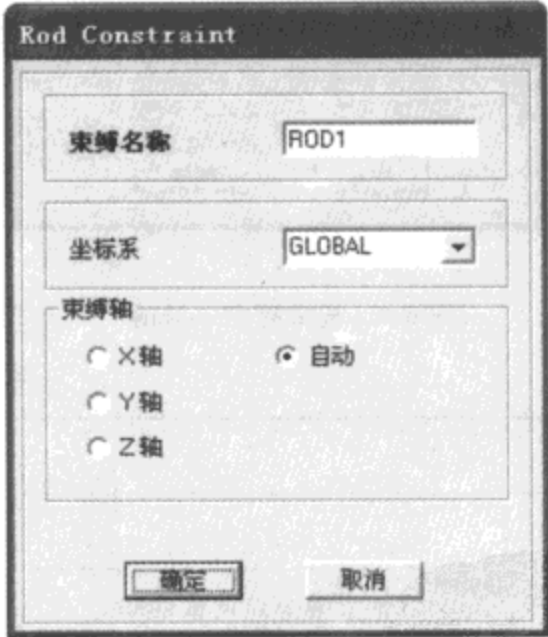


图 8-10 杆束缚定义对话框



图 8-11 梁束缚定义对话框

6) Weld (拼接约束)

拼接约束可以用于将使用不同剖分的结构模型部分连接起来。拼接不是一个独立的约束，而是几组点，产生若干刚体约束，程序通过这些组点自动生成多重体约束来连接重合的节点。

在施加拼接约束的一组节点中，内部为相邻的（小于工程师指定的距离容差）一组节点生成了一个独立的体约束。每个生成的约束可以包括两个或多个节点。在拼接约束中，所有不在其节点容差范围内的节点不会被约束。

注意：确认距离容差不是太大，否则会将本应是独立的模型的各个部分包括在一起。如果工程师需要连接那些不是很靠近的点，请独立定义体约束。

点击对话框右上角的选择添加约束类型下拉菜单，选择 Weld，点击【添加新约束】按钮，弹出拼接约束定义对话框如图 8-12 所示。对话框说明见表 8-9。

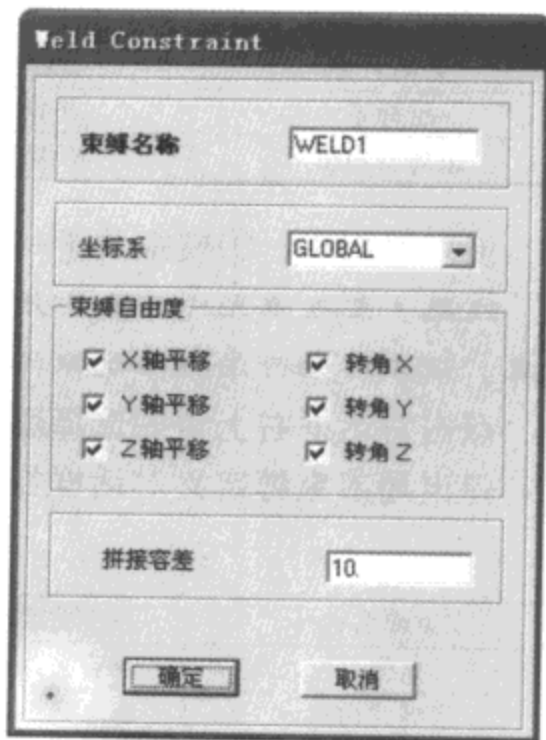


图 8-12 拼接约束定义对话框

表 8-9

| | |
|-------|-----------------------------|
| 约束名称 | 查看更改拼接约束名称 |
| 坐标系 | 查看更改拼接约束坐标系 |
| 约束自由度 | 在复选框中勾选某方向自由度，表示约束此方向的相对自由度 |
| 拼接容差 | 设置拼接容差大小，控制容差范围内的节点为拼接约束的对象 |

7) Equal (对等约束)

对等约束使其所有的节点在约束局部坐标系中的各所选自由度上按同一个或相反的位移运动，其他自由度不受影响。对等约束和刚体约束的不同在于，对等约束的转动和平动间没有耦合。

该约束用于：①在结构模型的不同部分之间进行部分连接，如伸缩缝和铰。②模拟关于一个面的对称和反对称情况。

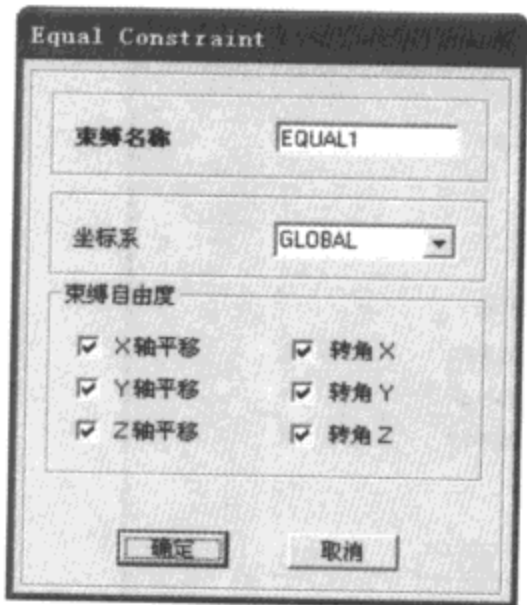


图 8-13 对等约束定义对话框

注意：要在模型中产生作用，该约束应至少有两个节点，这些节点空间位置任意。要连接网格，当约束节点不在同一位置时，最好使用体约束，否则会在模型中产生旋转约束。

点击对话框右上角的选择添加约束类型下拉菜单，选择 Equal，点击【添加新约束】按钮，弹出对等约束定义对话框如图 8-13 所示。对话框说明见表 8-10。

8) Local (局部约束)

局部约束使其所有的节点在节点局部坐标系中的各所选自由度上按同一个或相反的位移运动，其他自由度不受影响。与刚体类型的约束不同，局部约束中的旋转和平动之间没有耦合。如果所有约束节点具有同一个局部坐标系，则局部约束等同于对等约束。

表 8-10

| | |
|-------|---------------------------|
| 束缚名称 | 查看更改对等束缚名称 |
| 坐标系 | 查看更改对等束缚坐标系 |
| 束缚自由度 | 在复选框中勾选某方向自由度，表示束缚此方向的自由度 |

该束缚用于：①模拟关于一个线或点的对称情况。②模拟机构所束缚的位移。

注意：要在模型中产生作用，该束缚必须具有至少两个节点，这些节点可以有任意空间位置。该束缚的行为与所选束缚节点的局部坐标系有关。

点击对话框右上角的选择添加束缚类型下拉菜单，选择 Local，点击【添加新束缚】按钮，弹出局部束缚定义对话框如图 8-14 所示。对话框说明见表 8-11。

表 8-11

| | |
|-------|-------------------------------------|
| 束缚名称 | 查看更改局部束缚名称 |
| 坐标系 | 查看更改局部束缚坐标系 |
| 束缚自由度 | 在复选框中勾选某局部坐标轴方向自由度，表示束缚此局部坐标轴方向的自由度 |

9) Line（线束缚）

线束缚用于模拟两个不协调单元在一个边界处相交的情况。例如，位于线一侧的单元具有较细的剖分，其尺寸为另一侧较粗单元的一半。线束缚在模型中不强制施加刚性行为，而且沿线的变形是由两个网格中较粗的一个网格决定的。

沿着线对各个大的单元定义一个束缚。对大单元的节点（称为主节点）指定各束缚，同样对位于线另一边的两个主节点之间的小单元的所有节点（称为从节点）进行指定。从节点的位移由主节点的位移插值得到。工程师可以选择想要插值的自由度。

指定束缚的顺序不起控制作用，程序会自动将距所选择的形心位置最远的两个节点作为主节点。

注意：该约束必须具有至少三个节点才能对模型产生作用。它们要位于一条直线或近似直线上。

点击对话框右上角的选择添加束缚类型下拉菜单，选择 Line，点击【添加新束缚】按钮，弹出线束缚定义对话框如图 8-15 所示。对话框说明见表 8-12。

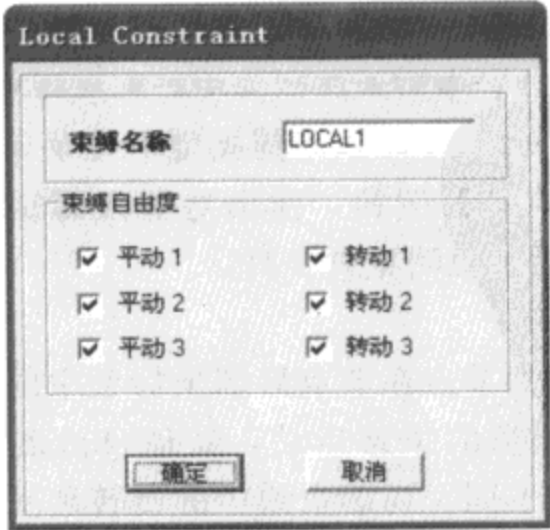


图 8-14 局部束缚定义对话框



图 8-15 线束缚定义对话框

表 8-12

| | |
|-------|---------------------------------|
| 束缚名称 | 查看更改线束缚名称 |
| 坐标系 | 查看更改线束缚坐标系 |
| 束缚自由度 | 在复选框中勾选某坐标轴方向自由度，表示束缚此坐标轴方向的自由度 |

8.3 节点区

在结构分析中，都假定结构梁柱节点区是刚性的，这样将导致节点区没有任何位移和内部变形。一般情况下，对于整体浇筑的钢筋混凝土结构，假定节点区为刚性是符合实际的。但是对于钢结构，其节点连接刚性普遍不如混凝土的刚性大，并且采用不同的连接形式的节点，刚性差异也比较大。很多钢结构节点需要加强，加强的节点和不加强的节点特性有很大的差异，故钢结构的节点假定为刚体是不符合实际的。综上所述，在结构分析时，特别是在钢结构分析时，需要对节点区进行一定的指定。

8.3.1 节点区的指定

SAP2000 可以对节点区进行指定来处理上述问题，SAP2000 中允许对节点区赋值差动旋转，在某些情况下，允许梁-柱、梁-支座和柱-支座连接性上的差动平移。在 SAP2000 建立的分析模型内部，在指定节点区的点上生成两个节点，这样在这两个节点间进行相关指定就可以模拟节点区的对应属性。

在 SAP2000 中指定节点区，首先选择要指定节点区的节点，然后点击【指定】>【节点】>【节点区】，弹出指定节点区对话框（如图 8-16）。对话框说明见表 8-13。

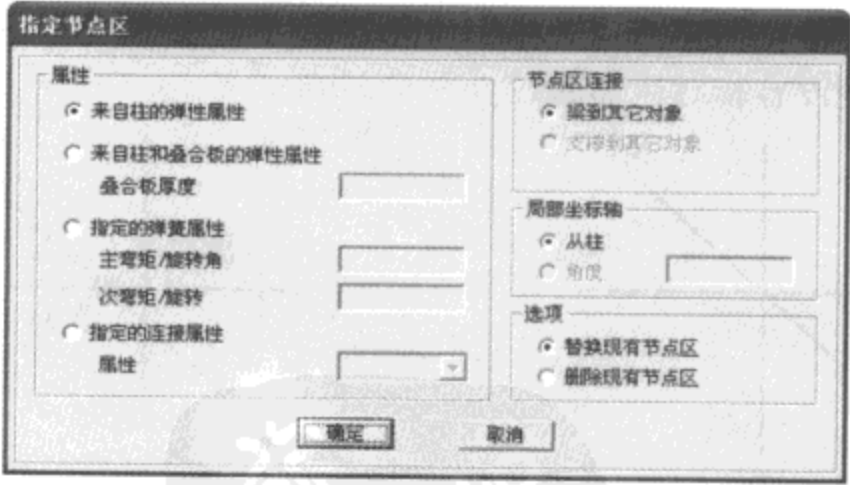


图 8-16 指定节点区对话框

表 8-13

| | | |
|----|--------------|-------------------------|
| 属性 | 来自柱的弹性属性 | 属性来自柱的弹性属性 |
| | 来自柱和叠合板的弹性属性 | 属性来自柱和叠合板的弹性属性，输入叠合板厚度 |
| | 指定的弹簧属性 | 属性来自指定的弹簧属性，定义弹簧刚度属性 |
| | 指定的连接属性 | 属性来自指定的连接属性，选择已经定义的连接属性 |

续上表

| | | |
|-------|---------|-----------------|
| 节点区连接 | 梁到其它对象 | 所定义的是梁和其它对象的节点 |
| | 支撑到其它对象 | 所定义的是支撑和其它对象的节点 |
| 局部坐标轴 | 从柱 | 通过从属柱来定义局部坐标轴方向 |
| | 角度 | 通过角度来定义局部坐标轴方向 |
| 选项 | 替换现有节点区 | 所定义的节点替换现有节点区 |
| | 删除现有节点区 | 仅删除现有节点区 |

在图 8-16 对话框中有三个主要设置区域和一个选项定义区域，三个主要设置区域分别描述了节点区的三个方面特征，包括节点的**连接性**（节点区两节点的位置属性）、**连接属性**（两节点间的弹性属性）和节点区所采用的**局部坐标轴**，下面将分别就节点区的这三个方面作详细介绍。选项区域指定了设置是**替换现有节点区**还是**仅删除现有节点区**。

(1) 连接性定义

节点区的连接性定义节点区连接构件的属性，连接性区域中有两个选项：**梁到其它对象**、**支撑到其它对象**，即梁和其它对象、支撑和其它对象的连接节点区。下面我们以梁和其它对象为例，详细介绍一下 SAP2000 对节点区的处理。

对于节点连接，SAP2000 将产生两个分离节点来模拟节点区。如图 8-17a) 所示，所有梁构件与这两个节点中的一个相连，而所有柱构件与另一个节点相连。这两个节点通过与具有节点区指定属性的一个弹簧相连。图 8-17b) 显示把具有梁-柱连接性的节点区指定给该节点的效果。SAP2000 从内部产生节点 1 和 2，它们实际上都出现在梁和其他构件交点处对象的同一位置上，为了把图形解释清楚，它们在图中显示于不同位置，柱构件与节点 1 相连，梁构件与节点 2 相连，节点 1 和 2 通过零长度弹簧相连，该弹簧的属性是我们下面需要定义的节点连接属性。节点区中的相对变形是发生在柱的端点和梁的端点之间，在单个柱单元或单个梁单元之间是没有相对运动的。

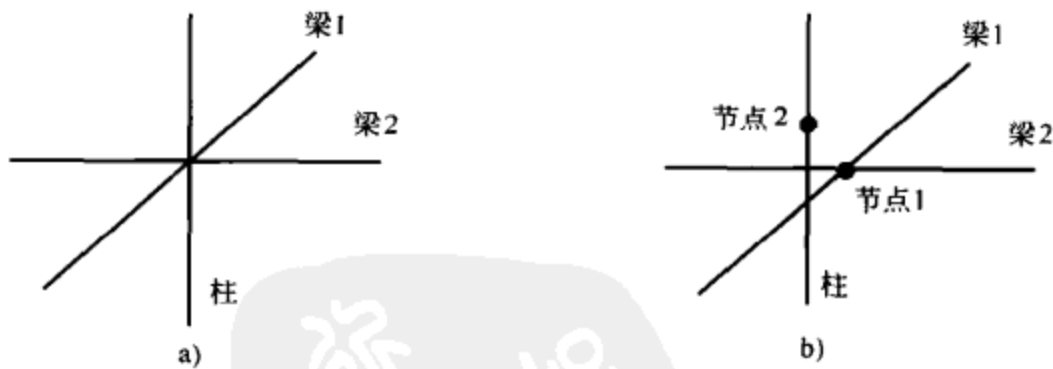


图 8-17 梁和其他对象节点分离示意图
a) 梁柱连接；b) 节点区节点分离

支撑到其它对象的节点区，与上面梁到其它对象的节点区类似。

(2) 连接属性定义

节点区连接属性的定义，SAP2000 中对这一属性的定义，设置了 4 个选项，这 4 个选项分别定义这一连接属性的来源或计算方法，我们可以根据实际工程的需求选择其中一种方法，下面分别叙述连接属性定义的各种方法。

1) 来自柱的弹性属性

来自柱的弹性属性选项，用于梁和柱之间的节点区。在这种情况下，只有围绕主轴（局部 3 轴）和次轴（局部 2 轴）弯曲的旋转属性才从柱中产生，把这些旋转属性制定给节点区弹簧。对于其他所有自由度，则假定节点区上的内部节点是刚性连接的。

2) 来自柱和叠合板的弹性属性

来自柱和叠合板的弹性属性选项，用于梁和柱之间的节点区。使用该选项时，要指定一个叠合板的厚度。SAP2000 把柱的腹板厚度（局部 2 轴方向）改为最初腹板厚度加上指定的叠合板厚度，并且计算这个修改后的截面属性。绕主轴和次轴弯曲的旋转属性将从修改后的柱截面中产生，把这些旋转属性指定给节点区弹簧。对于其他自由度，则假定节点区上的内部节点为刚性连接。

3) 来自指定的弹簧属性

该选项需要指定围绕主轴弯曲（围绕柱和节点区的局部 3 轴）和次轴弯曲（围绕柱和节点区的局部 2 轴）的旋转弹簧刚度，把这两种旋转弹簧属性指定给节点区弹簧。对于其他所有自由度，假定节点区上的内部节点为刚性连接。

4) 来自指定的连接属性

对于该选项，需要为节点区指定一个连接单元属性，然后把这些连接单元属性指定给弹簧。在这种情况下，如果对 6 个自由度定义非零连接属性，那么弹簧可能也具有所有 6 种自由度的属性；如果连接单元属性有一个自由度属性为零时，SAP2000 假设该自由度是刚性连接的。因此，如果工程师需要设置节点区的某一自由度具有零刚度，应该在该连接属性中为该自由度指定一非常小的刚度值。

注意：当选择前两项连接属性来源时，如果同时没有柱与带有节点区赋值的点对象相连接，那么 SAP2000 将忽略节点区赋值。

当选择第四项指定的连接属性时，需要在下拉菜单中选择已经定义好的连接属性。如果以静力非线性属性作为连接属性（塑性铰），那么在运行静力非线性分析时，将考虑这些属性；同样，如果以非线性动力属性作为连接属性，那么在运行动力非线性时程分析时，将考虑这些属性。因此，当工程师指定节点区属性是基于指定的连接属性时，就可以在节点区中模拟非线性性能。

(3) 局部坐标轴

局部坐标轴区域是用来定义节点区的局部坐标轴 2 轴的方向。局部 1 轴的正向总是与整体坐标轴 Z 轴正向相同，局部 3 轴的正方向可以通过局部 1、2 轴及右手法则来确定。程序提供局部坐标 2 轴的正方向指定有两种方法：与柱的局部 2 轴一致和自定义局部 2 轴方向。

在**局部坐标轴**区域选择**从柱**，则节点区的局部 2 轴和连接到节点区的柱局部 2 轴方向相同。

如果节点区的上面和下面都与柱相连，并且它们具有不同的局部轴方向，节点区的局部 2 轴与下面的柱的局部 2 轴方向一致。

在**局部坐标轴**区域选择**角度**，从整体坐标系 X 轴正向开始旋转一个角度，来指定节点区的局部坐标 2 轴方向。俯视时，正角为逆时针方向。零角度表示局部 2 轴正向同整体 X 轴的方向相同，90°角表示局部 2 轴正向与整体 Y 轴方向相同。

注意：在属性区域中指定连接属性为前三个选项时，SAP2000 默认的局部轴唯一选项从

.....

柱。如果指定局部 2 轴时基于一个柱，而在节点区位置上并不存在柱，那么局部 2 轴正向与整体坐标 X 轴正向方向相同。

节点区定义具有唯一性，即只能对节点指定唯一的节点区属性。如果对已经定义节点区的节点重新指定节点区，必须在选项区域选择【替换现有节点区】或【删除现有节点区】。显然，无论选择哪一选项，均会删除原有节点区设置。

8.3.2 节点区输出约定

SAP2000 可以输出节点区的位移、变形和内力分析结果，SAP2000 中对输出结果有确定的输出约定。下面我们从结果输出的这三个方面给出节点区的输出约定。

(1) 位移输出约定

给节点指定节点区后，程序会在节点区产生两个节点，这两个节点之间可以产生差动平移。而 SAP2000 中可以输出模型各节点全部 6 个自由度方向的位移。

指定了节点区后的节点，SAP2000 对节点位移的输出遵照下述约定：

梁到其它对象节点区：输出柱到梁节点的位移。

支撑到其它对象节点区：输出柱到支撑节点的位移。

节点区位移的方向规则是：平动位移正向同整体坐标轴正向一致，旋转位移方向由整体坐标轴方向和右手定则一同确定。指定了节点区的节点，其位移输出方式同一般节点位移输出方式相同，即图形显示和表格查看两种方式。

(2) 内部变形输出约定

给节点指定节点区后，节点区内部产生的两个节点之间会产生差动平移和旋转，使节点区产生内部变形。SAP2000 可以输出节点区的内部变形。

节点区的内部变形约定为：

梁到其它对象节点区：节点区 I 端为连接梁的节点，J 端为连接其他对象的节点。

支撑到其它对象节点区：节点区的 I 端为连接其他对象的节点，J 端为连接支撑的节点。

(3) 节点区内力约定

节点区内力的意义即为：显示有多少不平衡的荷载通过节点区传递。例如：连接梁柱节点的节点区内力可说明有多少不平衡弯矩从横梁传递到柱。节点区单元是零长度单元。节点区内力的计算同连接单元的内力计算相同。

8.3.3 节点区变形和内力输出

下面介绍节点区的变形和内力输出方法。对模型节点指定节点区属性、运行结构分析后，点击【显示】>【显示表格】命令，弹出 Choose Tables for Display 对话框（图 8-18）。

SAP2000 中模型产生的所有输入输出信息均可在此表中进行选择查看。在对话框中选中节点区输出一项（如图 8-18 所示），点击对话框右方的【选择荷载工况】、【选择分析工况】和【修改/显示选项】可控制表格输出内容。点击【OK】按钮弹出节点区内部变形和内力输出表格。

默认显示的是节点区内部变形输出表格（如图 8-19），可以看到各节点区的内部变形，包括三个平移和三个旋转变形。在右上方的下拉菜单中选择 Element Forces-Panel Zones 即可切换到节点区内力输出表格（如图 8-20），包括轴力、剪力、扭矩和弯矩。

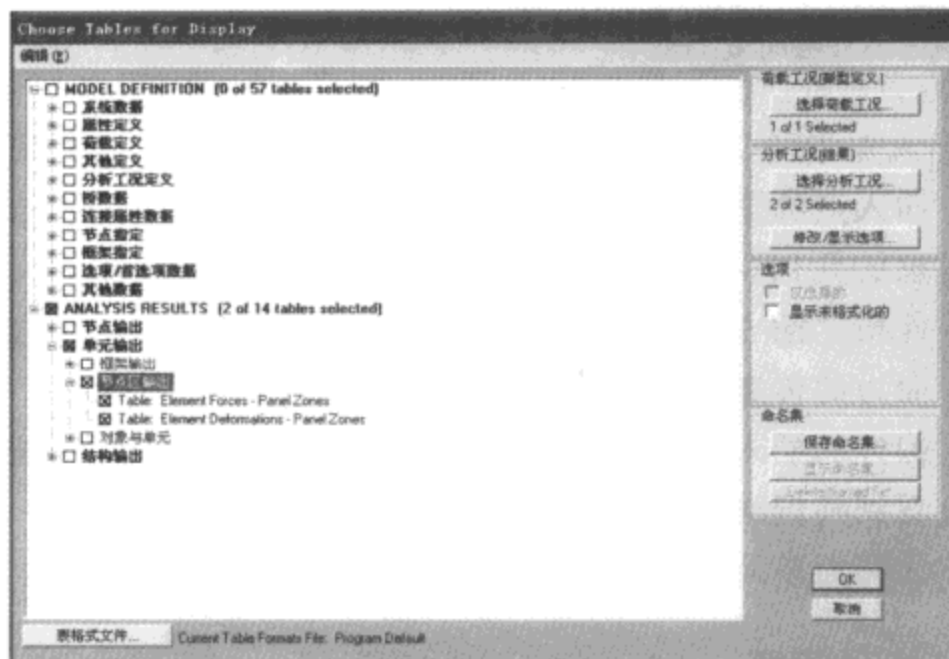


图 8-18 Choose Tables for Display 对话框

Element Deformations - Panel Zones

文件(F) 视图(V) 选项(O) 格式(S)

Units: As Noted

| LinkElem Text | Joint Text | OutputCase Text | CaseType Text | StepType Text | StepNum Unitless | U1 in | U2 in | U3 in |
|---------------|------------|-----------------|---------------|---------------|------------------|-------|-------|-------|
| 1 | 8 | DEAD | LinStatic | Mode | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 8 | MODAL | LinModal | Mode | 2 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 8 | MODAL | LinModal | Mode | 3 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 8 | MODAL | LinModal | Mode | 4 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 8 | MODAL | LinModal | Mode | 5 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 8 | MODAL | LinModal | Mode | 6 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 8 | MODAL | LinModal | Mode | 7 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 8 | MODAL | LinModal | Mode | 8 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 8 | MODAL | LinModal | Mode | 9 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 8 | MODAL | LinModal | Mode | 10 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 8 | MODAL | LinModal | Mode | 11 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 8 | MODAL | LinModal | Mode | 12 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 9 | DEAD | LinStatic | Mode | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 9 | MODAL | LinModal | Mode | 2 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 9 | MODAL | LinModal | Mode | 3 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 9 | MODAL | LinModal | Mode | 4 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 9 | MODAL | LinModal | Mode | 5 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 9 | MODAL | LinModal | Mode | 6 | 0 | 0 | 0 |

记录: 1 of 39

完成

图 8-19 节点区内部变形输出表格

Element Forces - Panel Zones

文件(F) 视图(V) 选项(O) 格式(S)

Units: As Noted

| LinkElem Text | Joint Text | Joint Text | OutputCase Text | CaseType Text | StepType Text | StepNum | P Kip | V2 Kip | V3 Kip | T Kip-in | M2 Kip-in | M3 Kip-in |
|---------------|------------|------------|-----------------|---------------|---------------|---------|-------|--------|--------|----------|-----------|-----------|
| 1 | 8 | 8 | DEAD | LinStatic | Mode | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2.747 | 15.386 |
| 1 | 8 | 8 | DEAD | LinStatic | Mode | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | -2.747 | 15.386 |
| 1 | 8 | 8 | MODAL | LinModal | Mode | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | -284.322 | 731 |
| 1 | 8 | 8 | MODAL | LinModal | Mode | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | -284.322 | 731 |
| 1 | 8 | 8 | MODAL | LinModal | Mode | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | -550.167 | -32.557 |
| 1 | 8 | 8 | MODAL | LinModal | Mode | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | -550.167 | -32.557 |
| 1 | 8 | 8 | MODAL | LinModal | Mode | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 606.826 | 3.117 |
| 1 | 8 | 8 | MODAL | LinModal | Mode | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 606.826 | 3.117 |
| 1 | 8 | 8 | MODAL | LinModal | Mode | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 385.145 | 38.404 |
| 1 | 8 | 8 | MODAL | LinModal | Mode | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 385.145 | 38.404 |
| 1 | 8 | 8 | MODAL | LinModal | Mode | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 41.442 | -2.617 |
| 1 | 8 | 8 | MODAL | LinModal | Mode | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 41.442 | -2.617 |
| 1 | 8 | 8 | MODAL | LinModal | Mode | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 83.615 | -2.417 |
| 1 | 8 | 8 | MODAL | LinModal | Mode | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 83.615 | -2.417 |
| 1 | 8 | 8 | MODAL | LinModal | Mode | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | -465.761 | -6.657 |
| 1 | 8 | 8 | MODAL | LinModal | Mode | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | -465.761 | -6.657 |
| 1 | 8 | 8 | MODAL | LinModal | Mode | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 332.896 | 16.379 |
| 1 | 8 | 8 | MODAL | LinModal | Mode | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 332.896 | 16.379 |
| 1 | 8 | 8 | MODAL | LinModal | Mode | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | -4.394 | 474.212 |
| 1 | 8 | 8 | MODAL | LinModal | Mode | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | -4.394 | 474.212 |
| 1 | 8 | 8 | MODAL | LinModal | Mode | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2.625 | 0.000 |

记录: 1 of 78

完成

图 8-20 节点区内力输出表格

8.4 插入点(线单元、面单元偏心)

SAP2000 中的插入点指的是我们通常所说的结构构件的偏心，对模型构件指定插入点即对构件指定偏心。插入点的意义同绘制构件时偏移的含义是完全不同的。通过绘制过程指定的构件偏移，是对象的几何位置发生了改变，会在构件偏移绘制的实际位置产生新的节点；而对已有模型构件指定插入点，实现了构件的偏心，构件的几何位置并不改变，模型中的节点也没有变化，而力的传递作用位置发生了改变。

在图形显示中，构件的插入点（构件偏心）属性只能在拉伸视图中显示；偏移绘制的构件在任何视图中均可看到其偏移。

下面分别对线单元和面单元的插入点的指定进行介绍。

8.4.1 线单元插入点的指定

线单元的插入点指定，不仅可以实现偏心的指定，还可以实现线单元主轴方向以及竖向的插入点指定，下面详细介绍线单元插入点的指定功能。

选中要指定插入点的线单元，点击【指定】>【框架/索/钢束】>【插入点】命令，弹出框架插入点对话框（图 8-21）。对话框说明见表 8-14，控制点的中英文对照见表 8-15。

定义线单元的插入点，首先确定线单元截面的控制点，即确定以哪一点为基准进行插入点指定，控制点定义的下拉菜单中有 11 个控制点位置，可供选择。图 8-22 中以 H 型钢为例描述各控制点相对于对象截面的位置。图中数字编号对应上表中编号。

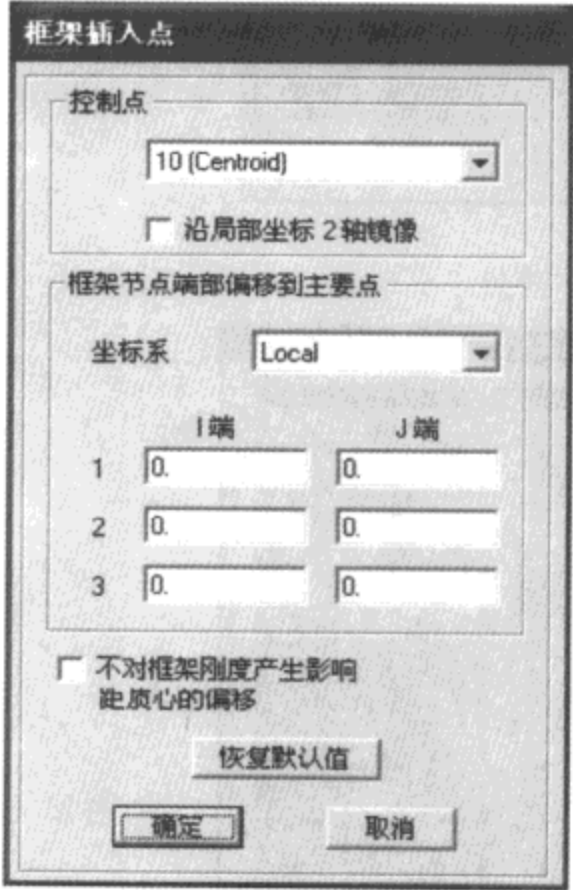


图 8-21 框架插入点对话框

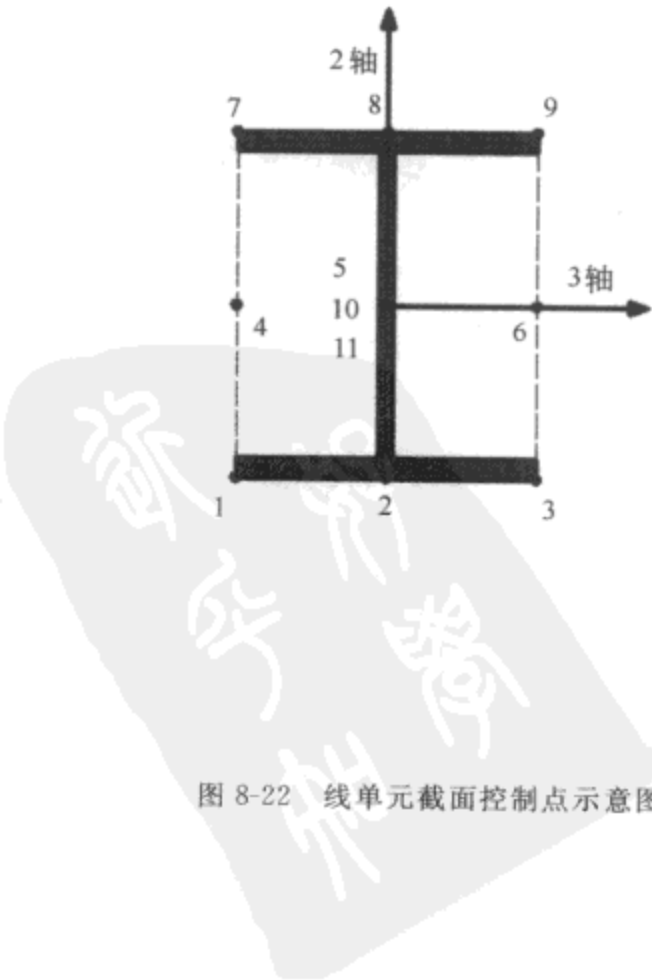


图 8-22 线单元截面控制点示意图

控制点是线单元截面上的点，定义一个相对位置，需要几何空间的基准点，对于框架梁柱节点来说，方位基准点位于柱的几何中心与楼层标高处的交点。

确定控制点后，即可对插入点的偏移值进行指定，即输入偏移值，确定插入点与基准点之间的关系。首先在框架节点端部偏移 to 主要点一栏中的下拉菜单中选择控制坐标系是局部坐标系 (Local) 还是整体坐标系 (Global)。

选择完毕后，可按照选择的控制坐标系，在下面的各坐标方向的编辑框中，分别输入 I、J 两端的偏移值确定插入点偏移距离，线对象的 I、J 端是由局部坐标轴方向确定的，这样就可以定义任意构件的相对关系。需要指出，这一相对偏移值是控制点到基准点的距离。

SAP2000 中默认的插入点的偏移值均为零，而且结构的方位基准点在楼层标高处，故为了保证梁的上表面与楼层标高平齐，框架梁的默认控制点为 8 Top Center (顶中)。有了 SAP2000 中的插入点功能，就能很轻松地实现不同高度的梁在楼层位置的平齐，并且可以轻松地控制梁的不同标高。在修改插入点时，默认的控制点均是 10 Centroid (质心)，即梁的中线与楼层平齐，应注意对此处进行修改。

表 8-14

| 控 制 点 | | 确定截面上的控制点 |
|------------------|-----|--|
| 框架节点端部偏移 to 主要点 | 坐标系 | 节点偏移使用的控制坐标系，可选局部坐标轴或整体坐标轴 |
| | 偏移值 | 输入线单元 I、J 两端在局部坐标轴 1、2、3 三方向或整体坐标轴 X、Y、Z 三方向的偏移值 |
| 不对框架刚度产生影响距质心的偏移 | | 勾选此项表示不考虑偏移对框架刚度的影响 |
| 恢复默认值 | | 将以上各项恢复为程序默认值 |

表 8-15

| 序号 | 英文 | 中文 | 序号 | 英文 | 中文 |
|----|---------------|----|----|--------------|------|
| 1 | Bottom Left | 底左 | 7 | Top Left | 顶左 |
| 2 | Bottom Center | 底中 | 8 | Top Center | 顶中 |
| 3 | Bottom Right | 底右 | 9 | Top Right | 顶右 |
| 4 | Middle Left | 左中 | 10 | Centroid | 形心 |
| 5 | Middle Center | 中中 | 11 | Shear Center | 抗剪中心 |
| 6 | Middle Right | 右中 | | | |

8.4.2 面单元插入点的指定

在 SAP2000 中，不仅可以实现线单元的偏心，还可以对面单元进行偏心属性的指定，即对面单元指定面对象厚度方向节点偏移。对于面对象，在指定功能中只能指定厚度方向上的节点偏移。

首先选中需要指定节点偏移的面单元，然后点击【指定】>【面】>【面厚度覆盖项】命令，弹出面对象厚度和节点偏移覆盖项对话框（如图 8-23 所示，对话框说明见表 8-16）。在此对话框中，可以实现对面单元的厚度和节点偏移的赋值。在这里指定面单元的厚度，可以给一个面单元指定不同位置不同厚度的复杂面厚度。同样，指定节点偏移时，可以指定面的各个角点在厚度方向上的复杂偏移形式，以满足各种偏移要求。由于面单元厚度的指定容

易理解，在此主要介绍面单元的节点偏移的指定。

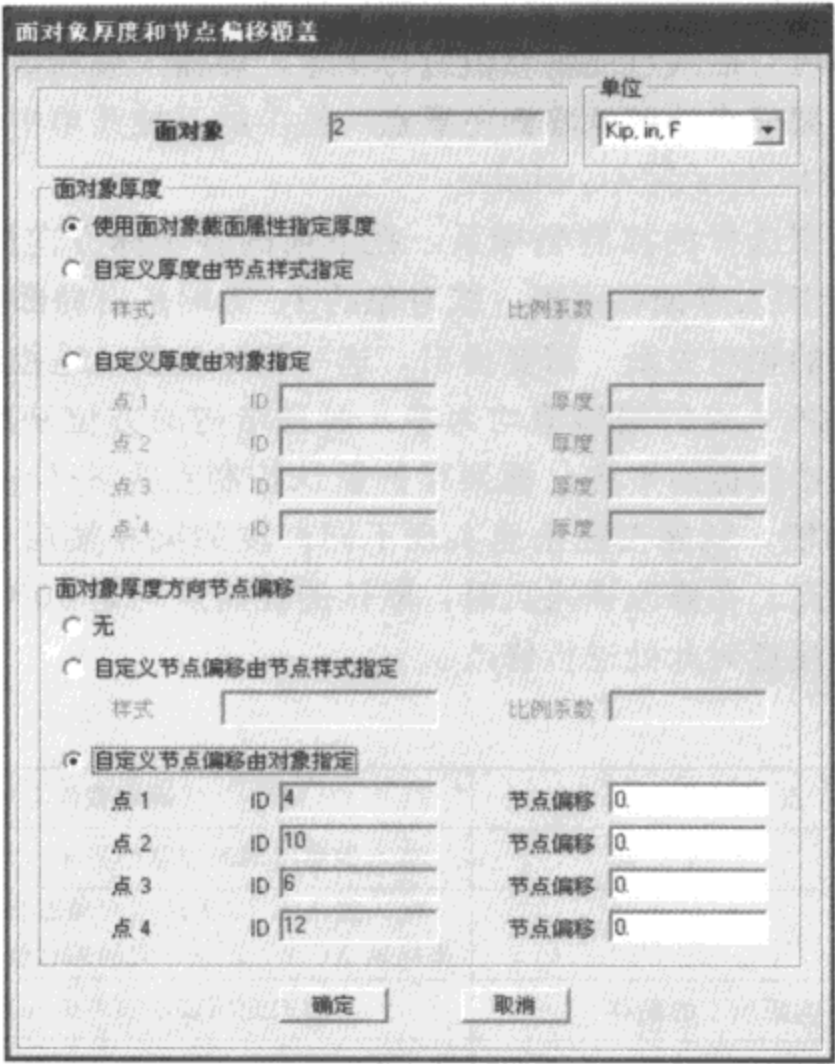


图 8-23 面对象厚度和节点偏移覆盖项对话框

表 8-16

| 面对象 | | 显示选中的面对象编号 |
|-------------|----------------|--|
| 单位 | | 下拉菜单可查看修改当前的单位制 |
| 面对象厚度 | 使用面对象属性指定厚度 | 以面单元的当前截面厚度为此面单元的厚度 |
| | 自定义厚度由节点样式指定 | 选择使用定义好的节点样式确定面对象各位置厚度，通过控制比例系数控制整体数值缩放 |
| | 自定义厚度由对象指定 | 工程师对面对的各角点进行厚度赋值，仅可为正值 |
| 面对象厚度方向节点偏移 | 无 | 无节点偏移 |
| | 自定义节点偏移由节点样式指定 | 选择使用定义好的节点样式确定面对象各位置的节点偏移，通过控制比例系数控制整体数值缩放 |
| | 自定义节点偏移由对象指定 | 工程师对面单元的各角点进行节点偏移的赋值 |

在面对象的节点偏移中，程序提供了三个选项。要指定节点偏移，应选择第二项和第三项，即由节点样式指定或工程师直接赋值。

(1) 自定义节点偏移由节点样式指定

首先选中自定义节点偏移由节点样式指定一项，样式一栏显示为下拉菜单，在其中选择要使用的节点样式，在比例系数一栏中添入对此节点样式使用的缩放比例系数的大小。点击【确定】完成面单元偏心的指定。

(2) 自定义节点偏移由对象指定

选中**自定义节点偏移由对象指定**一项，将对应选中面的各点编号和偏移值输入框激活，对应 **ID** 框中显示点 1~点 4 的各点编号，如果选中多个面对象，**ID** 框中则显示为多个。在**节点偏移**框中输入所需面单元的各个角点的偏心值的大小，输入正值表示沿面局部坐标 3 轴正方向，负值表示沿局部坐标 3 轴负向。点击【**确定**】完成节点偏移的指定。

对于四边形的面对象，对各节点输入节点偏移值，程序分别以面对象各组相邻的三个角点确定一个平面，用来确定面单元的空间形状，此时在拉伸视图中的面单元可能就不是一个平面了（可能为折面）。如果为三角形面对象，则以面的三个节点偏移后的位置确定面的空间形状，拉伸视图中仍为平面。

对平面各角点输入相同的节点偏移值，即面对象沿其厚度方向平移，这种情况就是通常使用的面的偏心，在 SAP2000 中可以非常灵活的实现面单元的各种偏心情况。

8.5 线对象端部偏移(刚域)

混凝土规范中对刚域有明确的要求，SAP2000 中通过线对象端部偏移的指定，实现了规范要求的混凝土结构梁柱节点位置刚域的设置。

8.5.1 端部偏移的作用

刚域，是规范用来处理混凝土梁柱节点区的重叠部分的问题。当框架线对象截面尺寸较大时，线对象重叠部分的刚度非常大，不容忽略它的影响。在 SAP2000 中对线对象的重叠部分（刚域），可以考虑其质量的自动扣除以及节点的刚域问题。SAP2000 通过**线对象端部长度偏移**的设置实现刚域的定义，符合规范的要求。并且，对线对象设计内力的取值也作了必要的调整，设计内力的取值，是取刚域边线的内力进行输出和设计的。

8.5.2 线对象端部偏移的指定

首先选中需要指定端部偏移的线单元，然后点击【**指定**】>【**框架/索/钢束**】>【**端部(长度) 偏移**】命令，弹出**框架端部长度偏移**对话框（图 8-24）。对话框说明见表 8-17。

表 8-17

| | |
|---------|--|
| 根据连续性自动 | 根据线对象截面尺寸自动计算偏移长度 |
| 自定义长度 | 分别输入 I、J 两端的偏移绝对长度，对框架线单元的端部偏移长度进行指定，单位为当前单位制的长度单位 |
| 刚域系数 | 在编辑栏中指定一个刚性区系数。该系数用来定义端部偏移中视为完全刚性的部分的比例，0 表示没有刚域，1 表示整个区域为刚域 |

对话框中提供了两种方式，**根据连续性自动**和**自定义长度**。

勾选**根据连续行自动**，表示由 SAP2000 程序根据框架线单元的相互重叠部分的截面尺寸，自动计算需要的端部偏移的长度，即刚域的尺寸，并把此值赋给框架线单元。SAP2000 仅对梁柱单元根据连续性自动计算其端部偏移的长度，不对支撑单元计算偏移长度，在计算

梁柱偏移长度时亦不考虑支撑构件的尺寸。默认情况下所有支撑构件的偏移长度为零, 支撑构件的端部偏移可手工进行指定。

当梁柱节点中有多个梁与柱相连时,计算柱的端部偏移长度时,是取连接到此节点的最大高度的梁进行考虑。

勾选**自定义长度**，表示由工程师手工给线单元指定 I 、 J 两端的绝对偏移值，工程师可分别对每根构件进行指定，也可对多个选中单元批量指定。可根据混凝土高规 5.3.4 条中的公式进行计算，然后把计算出的绝对偏移值指定给梁柱单元，此时使用的单位就是程序当前的单位制。

刚域系数，表示指定端部偏移的刚域部分在弯曲和剪切变形时的刚性程度。在**刚域系数**一栏中可输入 0~1 之间的一个系数，表示刚域的刚性程度从完全柔性到完全刚性。完全柔性，即刚域的弯曲和剪切刚度由线单元的实际刚度确定；完全刚性，即刚域内部没有弯曲和剪切变形。可以根据实际工程需要在 0~1 间选取适当的数值来模拟实际的半刚性。

程序中指定的端部偏移只影响刚域内的弯曲和剪切变形，对轴向和扭转变形没有限制作用，轴向和扭转变形刚度均取决于线单元的实际刚度，即完全柔性。

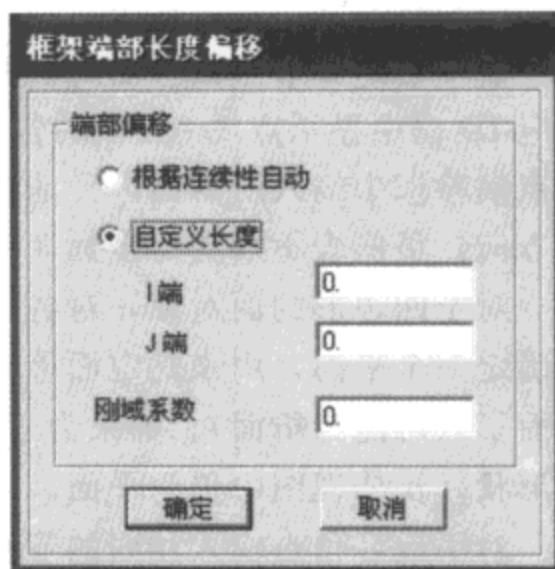


图 8-24 框架端部长度偏移对话框

8.5.3 端部偏移的显示输出

对线单元指定了端部偏移后，在**刚域系数**中输入任何数值，SAP2000 都会根据端部偏移的长度控制输出显示的线对象内力，如图 8-25 所示。

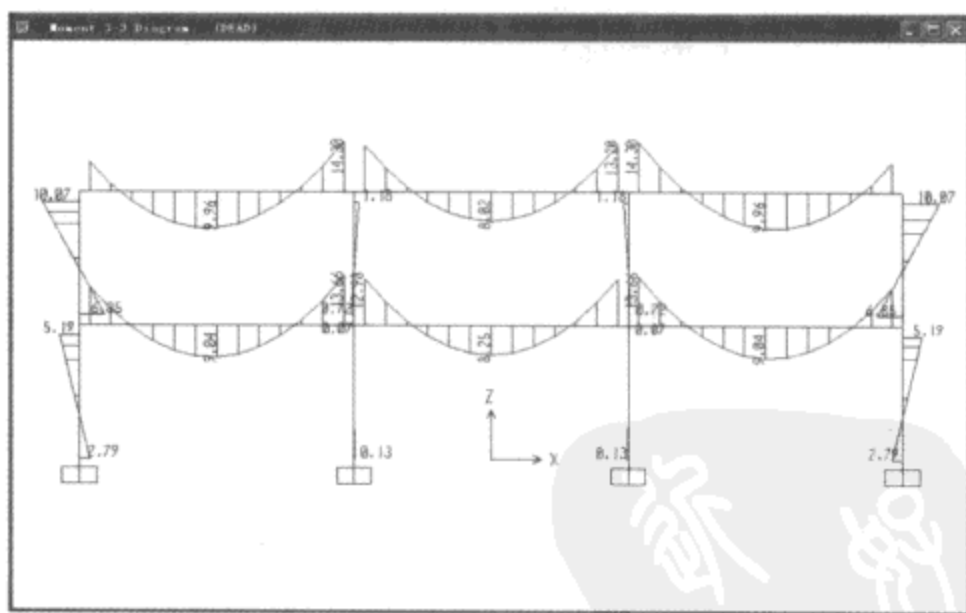


图 8-25 考虑端部偏移的线对象内力图

图 8-25 所示的模型，是一个纯框架结构，对所有构件指定其端部偏移长度由连续性自动计算，刚域系数设为 0。可以很直观的看出，内力仅输出到梁柱的边缘处，即程序自动计算的端部偏移长度边缘处。右键点击其中一根构件，例如上层中间跨的梁，弹出框架对象的内力详细输出对话框（图 8-26）。



图 8-26 框架对象的内力详细输出对话框

图中显示的是沿梁全长范围内的全部内力信息, 通过在图上滑动查看各位置的绝对内力大小值。点击对话框上方端长度偏移(位置)一栏中的按钮【I 端】, 图形显示如图 8-27 所示。图中显示的 I 端即为考虑端部偏移后的构件端部, 图中显示的端部内力大小同图 8-26 中的端部内力有一定的区别, 设计过程中使用的内力即为考虑端部偏移后的内力值。



图 8-27 框架对象的内力详细输出对话框 (I 端)

8.6 线对象端部释放

在线单元绘制过程中可以选择是铰接的还是固接的。当选择 **Pinned**（铰接）时，绘制的构件两端为铰接，线对象起点释放双向弯矩，终点释放双向弯矩和扭矩；当选择 **Continuous**（连续）时，绘出的构件两端均为刚接。SAP2000 中除了在绘制过程中提供了是否铰接的选项，在绘制结束后也可对选中构件进行端部约束条件的修改，并且不拘泥于完全铰接和完全刚接，可以根据实际情况，详细地控制端部各方向自由度的释放。

首先选中需要进行端部释放指定的线单元，点击【指定】>【框架/索/钢束】>【释放/部分固定】命令，弹出指定框架释放对话框（图 8-28）。对话框说明见表 8-18。

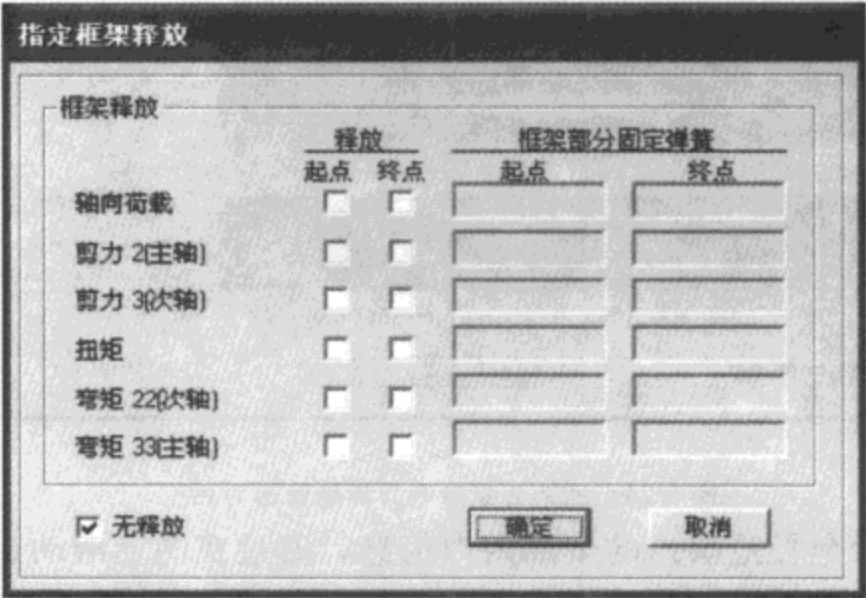


图 8-28 指定框架释放对话框

表 8-18

| | |
|-----------------|---|
| 端部释放内力类型 | 列出了可进行端部释放的六种内力：轴向荷载、双向剪力、扭矩和双向弯矩 |
| 释放（起点、终点） | 通过勾选对应的复选框，选择需要释放的某种内力的位置（起点、终点） |
| 框架部分固定弹簧（起点、终点） | 定义端部的部分固定弹簧，通过输入对应内力类型的弹簧刚度值，控制加在线单元端部的弹簧刚度 |
| 无释放 | 不进行端部释放 |

对于构件的两端，在此对话框中可以选择性的释放六种内力中的某几种内力，即释放端部三个平动自由度和三个转动自由度中的一个或多个自由度。释放栏中的起点和终点分别对应线对象的 **I**、**J** 两端。勾选了某种内力下的某端点，表示释放了该端的这种内力对应的自由度。

框架部分固定弹簧栏提供了部分固定的功能，当勾选某力下的某端点后，其后对应的框架部分固定弹簧的输入区域将被激活，默认显示零值，表示弹簧刚度为零，即全部释放。在此区域中输入一个弹簧刚度值，即可将此端的此种内力方向定义为部分固定。弹簧刚度值的单位就是对应此种内力的点弹簧刚度单位。点击【确定】，完成端部释放的指定。

如果要取消全部的端部释放，则勾选【无释放】选项，点击【确定】，就可以取消选中构件的全部端部释放指定。

注意：对于指定了端部偏移的线对象，端部释放的作用位置在偏移范围远离构件节点的

一端。SAP2000 中，某线对象的端部释放具有唯一性，一个框架线对象只能指定一个释放形式。

SAP2000 中允许指定任意稳定形式的端部释放，如果指定的端部释放使对象成为不稳定体系时，程序将不保留导致非稳定的释放选项（当为同一内力形式时，程序将自动替换；当不是同一内力形式时，程序将禁止此项勾选）。下面列举一些不稳定的释放形式，不管它们是单独的或是组合的，均不允许。

- 1) 两端释放 U1 (轴力)
- 2) 两端释放 U2 (2 轴剪力，主轴剪力)
- 3) 两端释放 U3 (3 轴剪力，次轴剪力)
- 4) 两端释放 R1 (扭矩)
- 5) 两端释放 R2 (2 轴弯矩，次轴弯矩) 及任意一端 U3
- 6) 两端释放 R3 (3 轴弯矩，主轴弯矩) 及任意一端 U2

除此之外，某些情况下，单个构件进行某种端部释放是稳定的，但是由多根释放的构件组成的结构体系，有可能是稳定的，这在结构分析的过程中都会提示错误，影响正常的结构分析计算。因此在做端部释放时，还应确保结构体系是稳定的。

8.7 对象的局部坐标轴

在 SAP2000 中，局部坐标轴是一个非常重要的概念，SAP2000 中的任何对象，如节点区、线、面、实体对象都具有局部坐标轴，它是对象的固有属性。局部坐标轴的作用也是非常重要的，对对象施加荷载、进行对象属性的指定修改、内力输出及设计输出等多种功能，都要遵循局部坐标系。SAP2000 中对象的局部坐标系，都是由 1、2、3 三个轴组成的正交坐标系统，具有默认的方向，工程师也可以根据需要对局部坐标系的方向进行修改。

8.7.1 默认局部坐标轴方向

(1) 点对象的默认局部坐标轴方向

点对象的默认局部坐标轴方向同整体坐标系 XYZ 一致，并且两者均为右手坐标系：

局部坐标 1 轴：沿 X 轴正向。

局部坐标 2 轴：沿 Y 轴正向。

局部坐标 3 轴：沿 Z 轴正向。

(2) 线对象的默认局部坐标轴方向

SAP2000 中线单元局部坐标 1 轴的方向默认是沿着线单元长度方向，并由 I 端指向 J 端，端部 I 是节点 i 加上其节点偏移，端部 J 是节点 j 加上其节点偏移（若有的话）。此轴的确定是独立于主节点的，此轴方向不可修改。局部 2 轴和 3 轴的方向垂直于线对象，并互相垂直。局部 2 轴和 3 轴的默认方向是根据局部 1 轴与整体 Z 轴的关系来确定的：

局部 1-2 平面是垂直的，即平行于 Z 轴。

局部 2 轴具有向上的 (+Z) 方向，若单元是垂直的，则局部 2 轴被定义为沿水平 +X 方向。

局部 3 轴是水平的，即处于 X-Y 平面内。

若局部 1 轴和 Z 轴夹角的正弦值小于 0.001，则单元被认为是竖直的。局部 2 轴与竖直轴的夹角和局部 1 轴与水平面的夹角相同，这样对水平单元而言，局部 2 轴是竖直向上的。

从构件的具体绘制过程角度来看，局部坐标系的默认方向遵循以下原则：

1) 使用【绘图】>【绘制框架/索/钢束】命令绘制线的对象

局部坐标 1 轴：沿线对象长度方向，由绘制起点（I 端）指向绘制终点（J 端）。

局部坐标 2 轴：垂直于线对象，竖直线对象 2 轴沿整体坐标 X 轴方向；非竖直构件局部 2 轴保持在 Z 轴的投影沿 Z 轴正向。

局部坐标 3 轴：由局部坐标 1 轴、2 轴以右手法则确定。

2) 使用【绘图】>【快速绘制框架/索/钢束】命令绘制线的对象

平行于 Z 轴的线对象：

局部坐标 1 轴：沿 Z 轴正向。

局部坐标 2 轴：沿 X 轴正向。

局部坐标 3 轴：沿 Y 轴正向。

与 X 或 Y 轴平行的线对象：

局部坐标 1 轴：沿线单元平行的整体坐标轴（X 轴或 Y 轴）。

局部坐标 2 轴：沿 Z 轴正向。

局部坐标 3 轴：由局部坐标 1、2 轴以右手法则确定。

柱面轴网系统中的水平线对象：

局部坐标 1 轴：沿对应轴网线的起始点指向发散点。

局部坐标 2 轴：沿 Z 轴正向。

局部坐标 3 轴：由局部坐标 1、2 轴以右手法则确定。

(3) 面对象的默认局部坐标轴方向

面对象的局部坐标轴方向特点为：1、2 轴在面对象平面内，互相垂直；3 轴垂直于平面。局部 1 轴和 2 轴的默认方向由局部 3 轴与整体 Z 轴的关系来确定：

局部 3-2 平面取为竖直的，即平行于 Z 轴。

局部 2 轴取为向上的（+Z）方向，除非单元是水平的，此情况下局部 2 轴为沿整体 +Y 轴方向。

局部 1 轴是水平的，即在 X-Y 平面内。

若局部 3 轴和 Z 轴的夹角的正弦小于 0.001，则单元被认为是水平的。

局部 2 轴和竖向轴的夹角与局部 3 轴和水平轴的夹角相同，这意味着竖直单元局部 2 轴垂直向上。

从构件的具体绘制过程角度来看，局部坐标系的默认方向遵循以下原则：

1) 使用【绘图】>【绘制矩形面】命令或【绘图】>【快速绘制】命令绘制的面对象
竖直面对象：

局部坐标 1 轴：沿相平行的水平整体坐标轴（X 轴或 Y 轴）正方向。

局部坐标 2 轴：沿 Z 轴正向。

局部坐标 3 轴：垂直于面，由局部坐标 1、2 轴以右手法则确定。

水平面对象：

局部坐标 1 轴：沿整体坐标系 X 轴正方向。

局部坐标 2 轴：沿整体坐标系 Y 轴正方向。

局部坐标 3 轴：垂直于面，沿整体坐标系 Z 轴正方向。

2) 使用【绘图】>【绘制多边形面】命令绘制的面对象

此种方法绘制的面对象默认局部坐标轴方向非常复杂，和绘制的面各角点沿顺时针或逆时针方向有关，情况较多，这里仅以水平面为例作以介绍。

顺时针方向绘制：

局部坐标 1 轴：沿整体坐标系 X 轴负方向。

局部坐标 2 轴：沿整体坐标系 Y 轴负方向。

局部坐标 3 轴：垂直于面，沿整体坐标系 Z 轴负方向。

逆时针方向绘制：

局部坐标 1 轴：沿整体坐标系 X 轴正方向。

局部坐标 2 轴：沿整体坐标系 Y 轴正方向。

局部坐标 3 轴：垂直于面，沿整体坐标系 Z 轴正方向。

(4) 实体对象的默认局部坐标轴方向

实体对象的局部坐标系方向较为规则，所有形状和位置的实体对象局部坐标系的方向都是一致的。默认坐标轴方向同点对象的局部坐标轴相似。

局部坐标 1 轴：沿整体坐标系 X 轴正方向。

局部坐标 2 轴：沿整体坐标系 Y 轴正方向。

局部坐标 3 轴：沿整体坐标系 Z 轴正方向。

(5) 连接对象的默认局部坐标轴方向

1) 单点连接

局部坐标 1 轴：沿整体坐标系 Z 轴正方向。

局部坐标 2 轴：沿整体坐标系 X 轴正方向。

局部坐标 3 轴：沿整体坐标系 Y 轴正方向。

2) 两点间连接（同线单元的默认坐标轴方向相似）

局部坐标 1 轴：由绘制起点指向绘制终点。

局部坐标 2 轴：沿整体坐标系 Z 轴正方向。

局部坐标 3 轴：由局部坐标 1、2 轴以右手法则确定。

8.7.2 局部坐标轴的显示

在建模、施加荷载以及分析设计的过程中，很多时候要查看参照对象的局部坐标轴的方向，在默认的情况下，SAP2000 的视图框中是不显示局部坐标轴的，要显示局部坐标轴，点击【视图】>【设置显示选项】命令，弹出激活窗口选项对话框（图 8-29）。

在对话框中的节点、框/架索/钢束、面、实体和连接区域内，均有局部坐标轴选项，选择勾选其中的某项或某几项，即为显示某种或某几种对象的局部坐标轴。

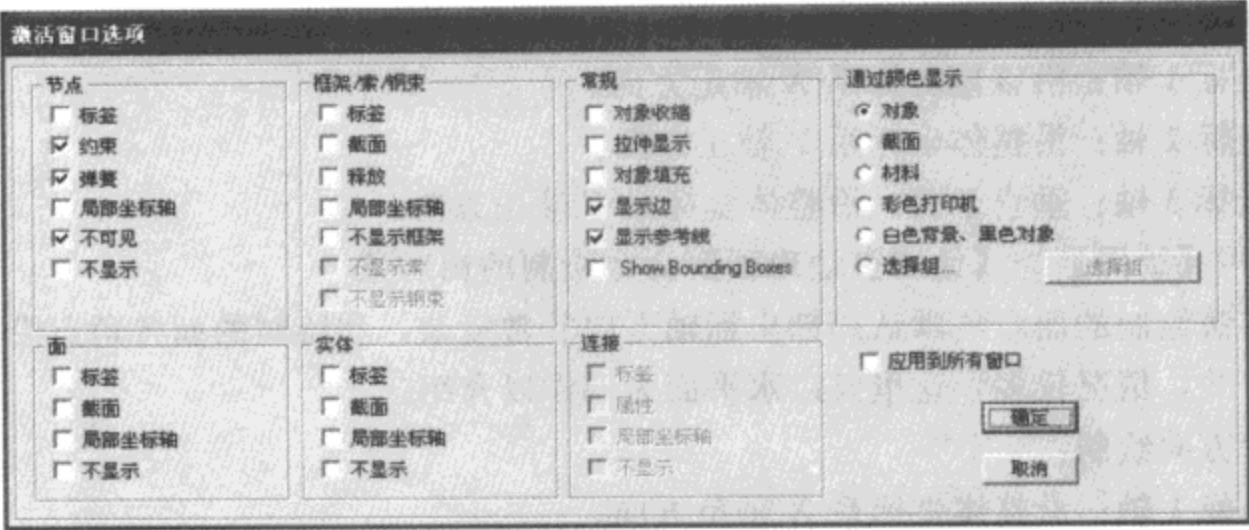


图 8-29 激活窗口选项对话框

模型中有某种对象，则相应的区域可用，为可操作区域；模型中没有的对象，则相应的区域不可用，为不可操作区域。例如：图 8-29 使用的模型中没有连接对象，图中连接区域不可用，其他区域可用。

勾选框/架索/钢束、面和实体区域内的【局部坐标轴】选项，点击【确定】按钮，显示出框架、面和实体的局部坐标轴。如图 8-30 所示。

图中，各对象的局部坐标轴显示为红、白、蓝三种颜色，分别表示局部坐标轴的 1、2、3 轴。局部坐标轴的显示位置为：点对象的点上，线对象的中间，面对象的几何中心，实体对象的几何中心，连接对象的中心。并且局部坐标轴显示不能在拉伸显示视图下显示。

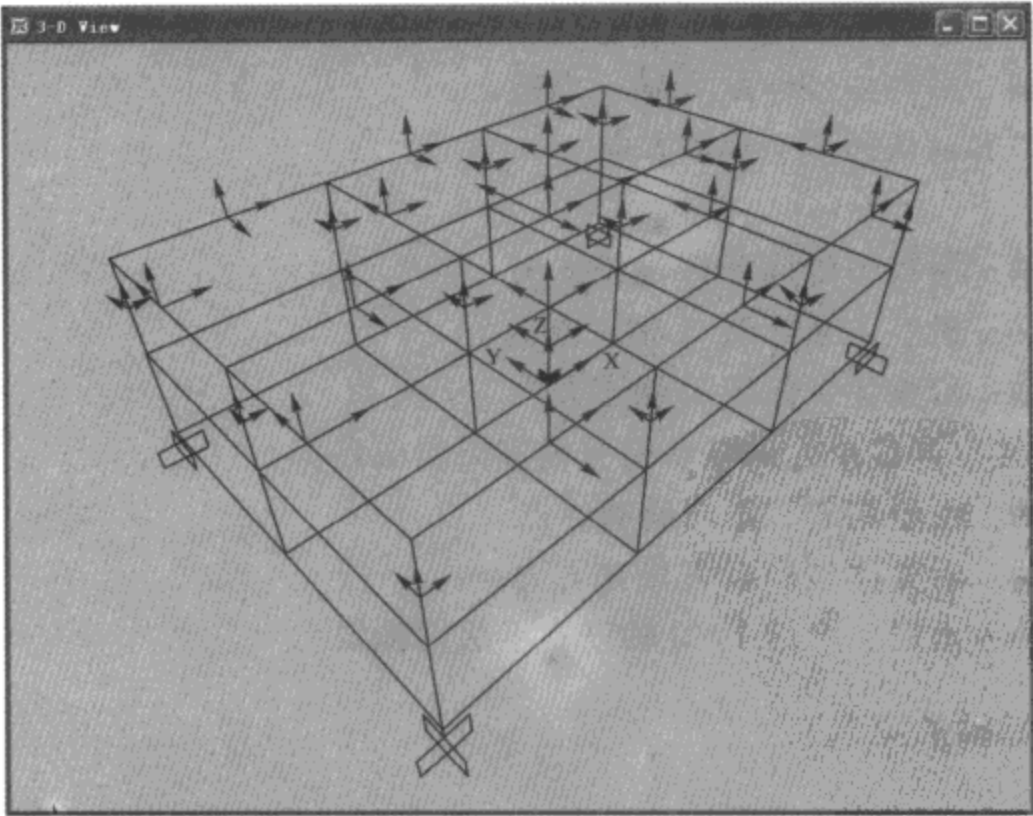


图 8-30 对象的局部坐标轴显示

8.7.3 局部坐标轴的修改

在建立模型的过程中，有时默认的局部坐标轴方向不能满足要求，需要对局部坐标轴进行修改，例如某根柱，要使其在平面内旋转一定的角度，某根梁要使其其中轴线非竖直的，就需要进行局部坐标轴的修改。

(1) 点对象的局部坐标轴修改

对于点对象的局部坐标轴在多数情况下使用默认方向是能够满足要求的，但在下述情况下有时需要在一些或所有节点修改局部坐标系：

- 斜约束（支座）；
- 约束用来施加旋转对称性；
- 约束用来施加对于一个不是平行于整体坐标平面的对称性；
- 节点质量（平移或旋转）的主轴不与全局轴平行；
- 节点位移和力的输出需要在另一个坐标系里描述。

只需要对受影响的节点修改节点局部坐标系方向。可以有一系列方法定义节点局部坐标系，它们可以单独或一起使用。局部坐标轴可以定义为平行于任意坐标系中任意坐标方向或者两点间的向量，此外，节点的局部坐标系可以用三个坐标角来指定。下面介绍点对象局部坐标轴的修改方法。

首先选中一个或多个要指定同一局部轴的节点，点击【指定】>【节点】>【局部轴】命令，打开节点局部轴对话框（图 8-31）。对话框说明见表 8-19。

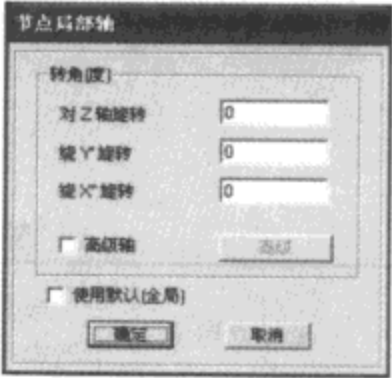


图 8-31 节点局部轴对话框

表 8-19

| | |
|---------------|-------------------------------------|
| 转角（度）Z、Y'、X'' | 输入绕 Z、Y'、X'' 轴的旋转角度值，单位为度，方向由右手法则确定 |
| 高级轴 | 勾选此项后，点击【高级】按钮可弹出节点高级轴对话框 |
| 使用默认（全局） | 勾选此项，使用默认的局部轴方向 |

如果要进行节点局部轴的高级设置，选择【高级轴】复选框，点击【高级】按钮，弹出节点高级轴对话框（图 8-32）。使用此对话框来修改所选对象的局部轴指定。对话框说明见表 8-20～表 8-23。

局部轴类型——切换控制的局部轴类型

表 8-20

| | |
|----|---------------------------------|
| 默认 | 选择【默认】选项，该对话框的其他区域将无效，局部坐标轴为默认值 |
| 高级 | 选择【高级】选项，可以设置高级的点局部坐标轴修改内容 |

局部平面——从下拉列表中选择局部平面

表 8-21

| | |
|----|---|
| 平面 | 从下拉列表中选择局部平面的两个方向。其中的两个局部坐标方向分别对应整体 Z、X 的方向 |
|----|---|

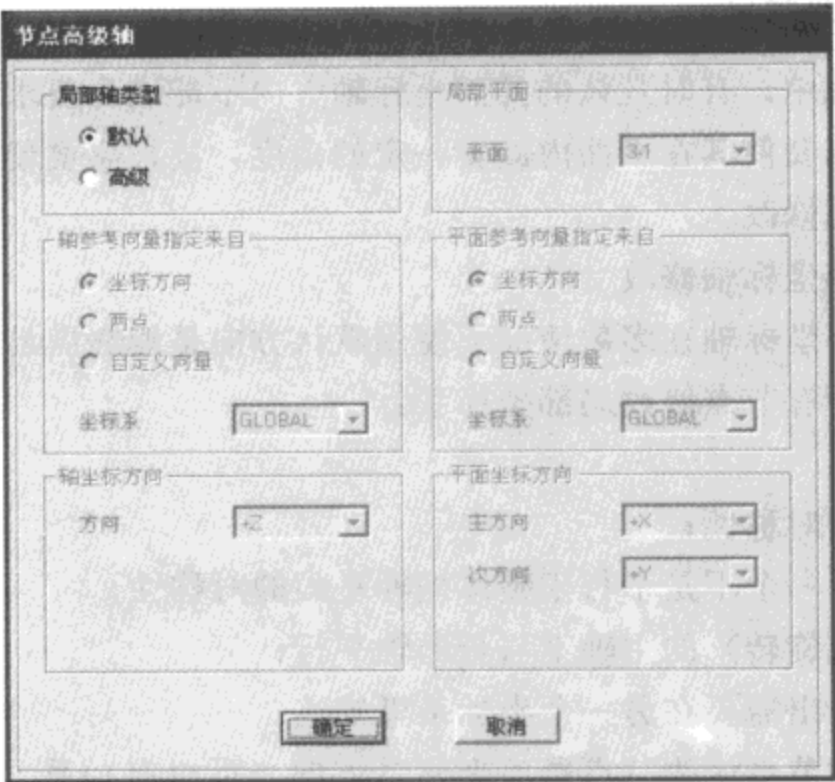


图 8-32 节点高级轴对话框

轴参考向量指定来自——选择控制轴参考向量的指定方式 表 8-22

| | |
|-------|---|
| 坐标方向 | 选择该选项时，该对话框的下面部分会显示轴坐标方向区域，其中有方向下拉列表。从下拉列表选择一个合适的坐标方向，这个方向将指定给 3 轴 |
| 两点 | 选择该选项时，该对话框的下面部分会显示轴参考向量的两点区域，包括轴向点 1 和轴向点 2 下拉列表。这些列表包括了模型中的节点和一个 None 选项。选择两个节点来指定 3 轴的指向，方向由 1 点指向 2 点 |
| 自定义向量 | 选择该选项时，该对话框的下面部分显示自定义轴参考向量区域，其中包括轴向量 X、轴向量 Y、和轴向量 Z 编辑框。在编辑框中输入各方向坐标值来指定轴参考向量，即 3 轴指向 |
| 坐标系 | 选择控制的坐标系 |

平面参考向量指定来自——选择控制平面参考向量的指定方式 表 8-23

| | |
|-------|--|
| 坐标方向 | 选择该选项，对话框的下面显示轴坐标方向区域，其中显示主方向和次方向下拉列表。对每个下拉列表选择坐标方向。这个方向指定的前提是 3 轴沿 Z 方向 |
| 两点 | 选择该选项，该对话框的下面显示一个平面考向量的两点区域，其中包括平面点 1 和平面点 2 下拉列表。这些列表包括了模型中的节点和一个 None 选项。选择两个点来指定轴参考向量，即指定 1 轴的平面指向，并且此指向为平面上的投影方向 |
| 自定义向量 | 选择该选项，该对话框的下面会显示自定义参考向量区域，其中包括平面向量 X、平面向量 Y、平面向量 Z 编辑框。在编辑框中输入坐标值指定轴参考向量，即指定 1 轴的平面指向，并且此指向为平面上的投影方向 |
| 坐标系 | 选择控制的坐标系 |

参考向量

定义一个节点局部坐标系必须指定平行于节点局部坐标平面之一的两个参考向量。坐标轴参考向量必须平行于在此平面内的一个局部坐标轴，且在此轴上有正投影；平面参考向量必须在其他局部坐标轴有正的投影，但并不需要平行于此轴，有正投影即参考向量的正方向必须和局部坐标轴的正方向夹角小于 90° 。

两个参考向量一起定义一个局部坐标轴和一个局部坐标平面，程序据此用向量代数确定第三个局部坐标轴。例如，可以选定参考向量平行于局部坐标轴 1，平面参考向量平行于局部 1-2 平面 ($i=1, j=2$)，或者，可以指定坐标轴参考向量平行于局部坐标轴 3，参考平面向量平行于 3-2 平面 ($i=3, j=2$)。可以选择使用参数 **local** 最方便定义的平面，它使用了值 12、13、21、23、31、32。两位数分别对应于 i 和 j ，默认值是 31。

定义坐标轴参考向量

对节点 j 定义坐标轴参考向量，必须先指定或使用默认值：一个坐标方向（默认是 +Z）；一个固定坐标系（默认是零，即整体坐标系）。也可以指定一对点，对每个节点，坐标轴参考向量按如下确定：指定一个从节点 1 到节点 2 的向量，如果这个向量是有限长度，它用作参考向量。否则，坐标方向按照在固定坐标系的节点计算，用作参考向量。

定义平面参考向量

对节点定义平面参考向量，必须首先指定或使用默认值：主坐标方向（默认是 +X），次要坐标方向（默认是 +Y）。两个方向不应该相互平行，除非确定它们和局部坐标轴 1 不平行。选择一个固定坐标系默认是整体坐标系。

也可以指定一对节点，对每个节点，平面参考向量按如下确定：

① 向量从节点 1 到节点 2 建立。如果这个向量是有限长度并且不平行于局部轴 i ，它作为参考向量 V_p ；

② 否则，主坐标方向在固定坐标系 $csys$ 的节点 j 计算。如果这个方向不平行于局部轴 i ，它作为参考向量 V_p ；

③ 否则，次坐标方向在固定坐标系 $csys$ 节点 j 计算。如果这个方向不平行于局部轴 i ，它作为参考向量 V_p ；

④ 否则，此方法失效，分析中止。

如果一个向量与局部轴的夹角正弦小于 0.001，则认为此向量与局部轴 i 平行。

(2) 线对象的局部坐标轴修改

对于线对象的局部坐标轴的修改，有两个命令：**【指定】 > 【框架/索/钢束】 > 【局部坐标】** 命令，可以进行局部坐标的旋转指定；**【指定】 > 【框架/索/钢束】 > 【反转连接】** 命令用来反转局部坐标轴的 1 轴指向。

1) **【指定】 > 【框架/索/钢束】 > 【局部坐标】** 命令

首先选中一个或多个要指定同一个局部坐标轴的线对象。然后点击 **【指定】 > 【框架/索/钢束】 > 【局部坐标】** 命令，打开框架局部轴对话框（图 8-33）。对话框说明见表 8-24。

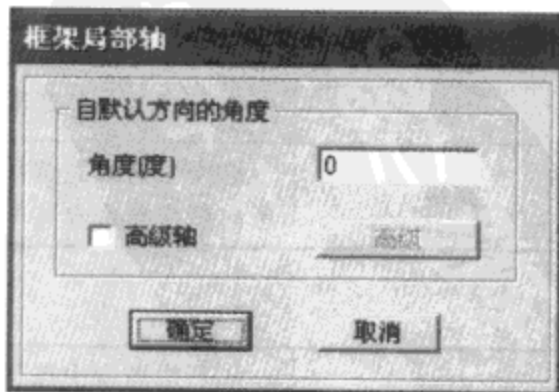


图 8-33 框架局部轴对话框图

表 8-24

| | |
|-------|------------------------------|
| 角度（度） | 输入绕 1 轴的旋转角度值，单位为度，方向由右手法则确定 |
| 高级轴 | 勾选此项后，点击【高级】按钮可弹出框架高级轴对话框 |

如果要进行线对象局部轴的高级设置，选中【高级轴】复选框，点击【高级】按钮，显示框架高级轴对话框（图 8-34）。对话框说明见表 8-25～表 8-27。

默认地，使用相对于整体方向 +Z 和 +X 的单元坐标角来定义单元局部坐标系。

定义参考向量

要定义横向的局部 2 和 3 轴，工程师要指定一个平行于局部轴 1-2 和 1-3 平面的参考向量。参考向量需在相应的横向局部轴（2 和 3）上有正的投影，这意味着参考向量正方向和期望横向轴正方向的夹角要小于 90°。要定义参考向量，工程师需首先指定或使用默认值：一个主坐标方向（默认为 +Z），一个次坐标方向（默认为 +X），一固定坐标系 csys（默认为整体坐标系），局部平面（local，将被参考向量决定，默认为 12，代表平面 1-2）。

还可以指定一对点确定方向，默认为 NONE，表示单元中心。若两点均为 NONE，则不使用此选项。

对每个单元，参考向量有如下确定：

- ①从节点 1 至节点 2 的向量。若此向量具有有限长度，且不平行于局部 1 轴，则其作为参考向量 V_p 使用；
- ②否则，主要坐标方向在固定坐标系 csys 中的单元中心进行计算。若此方向不平行于局部 1 轴，则其被用作参考向量 V_p ；
- ③否则，次要坐标系方向在固定坐标系 csys 中单元中心进行计算。若此方向不与局部 1 轴平行，其被用作参考向量 V_p ；
- ④否则，此方法失败且分析中止。

若一个向量与局部 1 轴的夹角的正弦值小于 0.003，认为与局部 1 轴平行。

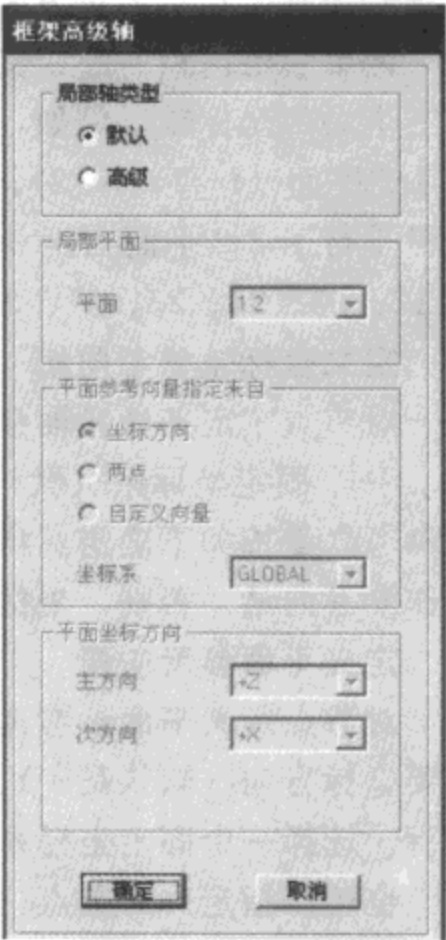


图 8-34 框架高级轴对话框

局部轴类型

表 8-25

| | |
|----|--|
| 默认 | 选择【默认】选项，该对话框的其他区域将无效，局部坐标轴按默认值 |
| 高级 | 选择【高级】选项，可以设置高级的点局部坐标轴修改内容，该对话框的输入数据视平面参考向量指定来自区域中的选择而不同 |

局部平面

表 8-26

| | |
|----|---|
| 平面 | 从下拉列表中选择局部平面的两个方向。其中的两个局部坐标方向分别对应整体 Z、X 的方向 |
|----|---|

平面参考向量指定来自

表 8-27

| | |
|-------|---|
| 坐标方向 | 选择该选项，该区域的下面将显示平面坐标方向区域，其中有主方向和次方向下拉列表。从各下拉列表中选择一个坐标方向。主方向对应线单元的默认 2 轴方向 |
| 两点 | 选择该选项，该区域的下面将显示平面参考向量的两点区域，其中有平面点 1 和平面点 2 下拉列表。列表中包括了模型中的点和一个 None 选项。选择用于指定平面参考向量的两个点，方向由 1 点指向 2 点。此方向对应梁 2 轴的方向 |
| 自定义向量 | 选择该选项，该区域的下面将显示自定义参考向量区域，其中有平面向量 X、平面向量 Y 和平面向量 Z 编辑栏。在这些编辑栏中输入数值以指定平面参考向量，对应局部 2 轴方向，并且是沿在线单元的截面平面内的投影方向 |
| 坐标系 | 选择作为控制的坐标系 |

2) 【指定】>【框架/索/钢束】>【反转连接】命令

表 8-28

| | |
|------------|------------------|
| 保存同样全局方向指定 | 指定的方向和朝向不变化 |
| 保存同样局部方向指定 | 指定的方向和朝向将根据局部轴变化 |

点击【指定】>【框架/索/钢束】>【反转连接】命令，弹出反转框架连接对话框（图 8-35）。对话框说明见表 8-28。

选择按全局轴保持当前方向，或是基于当前轴的指定按新局部轴切换，点击【确定】，反转局部 1 轴的方向。

(3) 面对象的局部坐标轴修改

修改面对象的局部坐标轴，有两个命令：【指定】>【面】>【局部轴】命令，可以进行局部坐标的旋转指定；【指定】>【面】>【反转局部 3 轴】命令用来反转局部坐标轴的 3 轴指向。

1) 【指定】>【面】>【局部轴】命令

首先选中一个或多个要指定同一个局部坐标轴的面对象。然后点击【指定】>【面】>【局部轴】命令，打开面局部轴对话框（图 8-36）。对话框说明见表 8-29。

表 8-29

| | |
|-------|------------------------------|
| 角度（度） | 输入绕 3 轴的旋转角度值，单位为度，方向由右手法则确定 |
| 高级轴 | 勾选此项后，点击【高级】按钮可弹出【面高级轴】对话框 |

如果要进行面对象局部轴的高级设置，选中【高级轴】复选栏，点击【高级】按钮，显示面高级轴对话框（图 8-37）。对话框说明见表 8-30～表 8-32。

局部轴类型

表 8-30

| | |
|----|--|
| 默认 | 选择【默认】选项，该对话框的其他区域不能修改，不需要其他的输入 |
| 高级 | 选择【高级】选项，可以设置高级的点局部坐标轴修改内容，该对话框的输入数据视平面参考向量指定来自区域中的选择而不同 |

局部平面

表 8-31

| | |
|----|--|
| 平面 | 从下拉菜单中选择局部平面，下拉菜单中的两个方向分别对应整体 Z 方向和 Y 方向 |
|----|--|

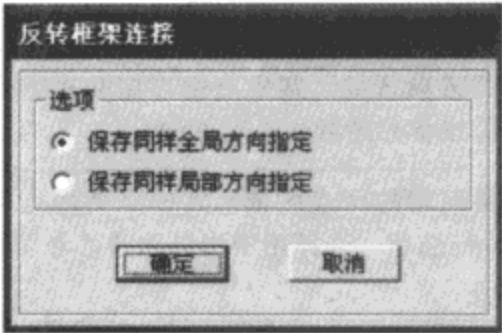


图 8-35 反转框架连接对话框

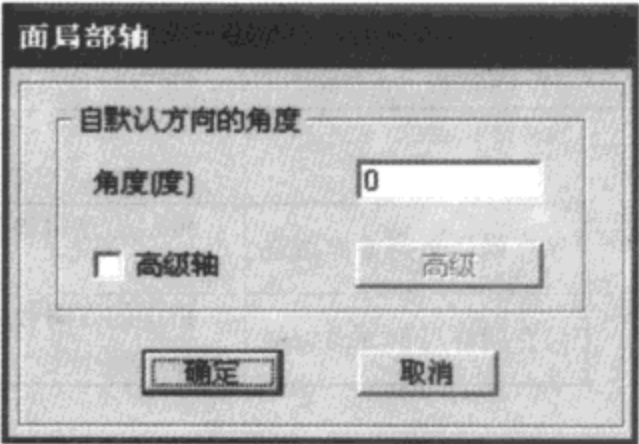


图 8-36 面局部轴对话框图



图 8-37 面高级轴对话框

平面参考向量指定来自 表 8-32

| | |
|-------|---|
| 坐标方向 | 选择该选项，该区域的下面将显示平面坐标方向区域，其中有主方向和次方向下拉列表。从各下拉列表中选择一个坐标方向 |
| 两点 | 选择该选项，该区域的下面将显示平面参考向量的两点区域，其中有平面点 1 和平面点 2 下拉列表。列表中包括了模型中的点和一个 None 选项。选择用于指定平面参考向量的两个点，方向由 1 点指向 2 点。此方向对应面 2 轴的方向 |
| 自定义向量 | 选择该选项，该区域的下面将显示自定义参考向量区域，其中有平面向量 X、平面向量 Y 和平面向量 Z 编辑栏。在这些编辑栏中输入数值以指定平面参考向量，对应局部 2 轴方向，并且是在面平面内的投影方向 |
| 坐标系 | 选择作为控制的坐标系 |

指定参考向量

为了定义局部坐标轴，工程师需指定一个平行于 3-1 平面或 3-2 平面的参考向量。此参考向量相对于切向局部轴（1 和 2）必须具有正的投影，即参考向量的正方向与期望的切向轴的夹角小于 90°。

要定义参考向量，工程师必须首先指定或使用默认值：一个主坐标向量方向（默认为 +Z）；一个次坐标方向（默认为 +Y），两方向不应相互平行，除非工程师确认它们不平行于局部 3 轴；一固定的坐标系（默认为零，表示整体坐标系）；局部平面，将被参考向量确定（默认为 32，代表平面 3-2）。

工程师可选择指定一对点确定局部轴（默认为 NONE，表示单元中心）。若它们均为 NONE，则不使用此选项。

对每一单元，参考向量如下定义：

①从一个节点至另一节点的向量，若此向量具有有限长度，且不平行于局部 3 轴，则其作为参考向量 V_p 使用；

②否则，在固定坐标系 csys 中的单元中心计算主要坐标方向，若此方向不平行于局部 3 轴，则其被用作参考向量 V_p ；

③否则，在固定坐标系 csys 中单元中心计算次要坐标系方向，若此方向不与局部 3 轴平行，其被用作参考向量 V_p ；

④否则，此方法失败且分析中止。

2) 【指定】>【面】>【反转局部 3 轴】命令

点击【指定】>【面】>【反转局部 3 轴】命令，弹出反转面局部 3 轴对话框（图 8-38）。对话框说明见表 8-33。

表 8-33

| | |
|------------|-----------------|
| 保存同样全局方向指定 | 指定的方向和朝向不被改变 |
| 保存同样局部方向指定 | 指定的方向和朝向将绕局部轴旋转 |

选择按全局轴保持当前方向，或是基于当前轴的指定按新局部轴切换，点击【确定】，反转局部 3 轴的方向。

(4) 实体对象的局部坐标轴修改

实体对象的局部坐标轴的修改以及修改中的各项含义、方向定义同节点局部坐标轴的修改是基本一致的，可以参照点对象的局部坐标轴修改部分。

(5) 连接对象的局部坐标轴修改

连接对象有两种形式：1 点连接（单点）和 2 点连接（两点间）。用于修改的命令也是有两个：【指定】>【连接/支座】>【局部轴】命令和【指定】>【连接/支座】>【反转连接】命令。

1) 【指定】>【连接/支座】>【局部轴】命令

修改 1 点连接局部坐标轴

首先选中一个或多个要指定同一局部轴的 1 点连接对象，点击【指定】>【连接/支座】>【局部轴】命令，打开非线性连接局部轴对话框（图 8-39）。对话框说明见表 8-34。

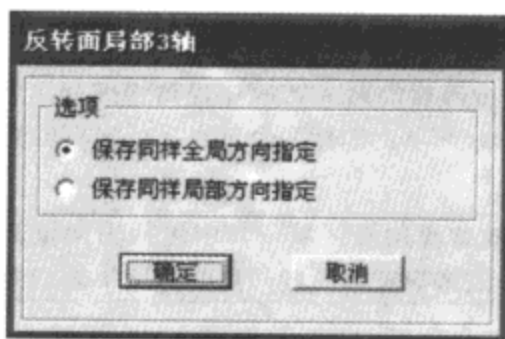


图 8-38 反转面局部 3 轴对话框

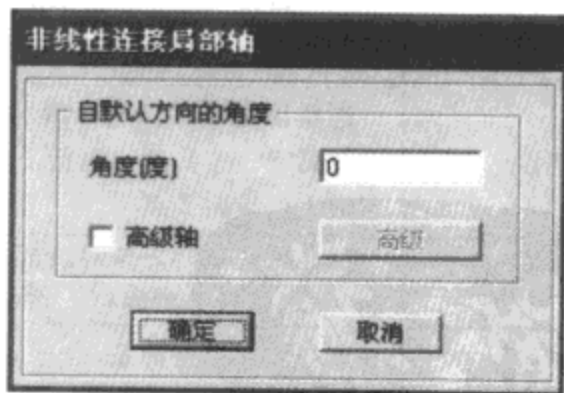


图 8-39 非线性连接局部轴对话框

表 8-34

| | |
|-------|------------------------------|
| 角度（度） | 输入绕 1 轴的旋转角度值，单位为度，方向由右手法则确定 |
| 高级轴 | 勾选此项后，点击【高级】按钮可弹出连接高级轴对话框 |

如果要进行节点局部轴的高级设置，选择【高级轴】复选框，点击【高级】按钮，弹出连接高级轴对话框（图 8-40）。使用此对话框来修改所选对象的局部轴指定。对话框说明见表 8-35～表 8-38。

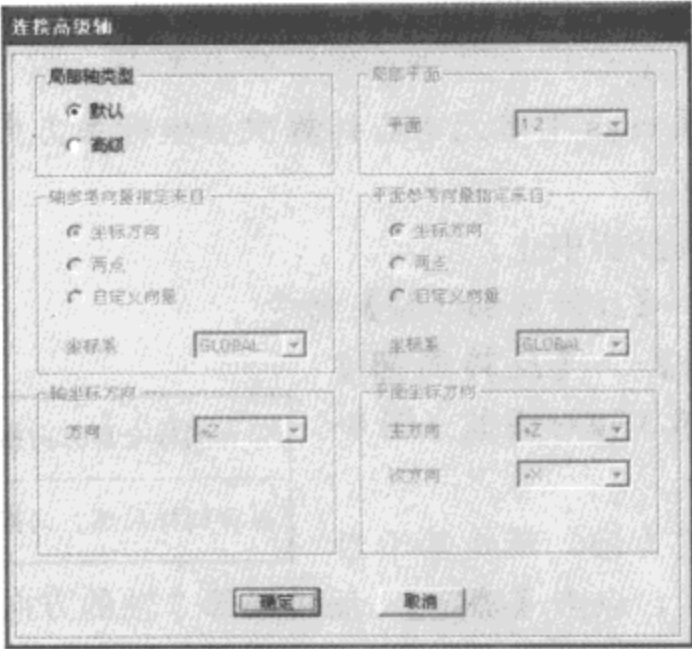


图 8-40 连接对象高级轴对话框

局 部 轴 类 型 表 8-35

| | |
|----|---|
| 默认 | 选择【默认】选项，该对话框的其他区域将无效，局部坐标轴按默认值 |
| 高级 | 选择【高级】选项，对话框中所需的输入项取决于轴参考向量指定来自和平面参考向量指定来自区域中所选的选项，在此对话框中的选项均基于局部坐标轴的默认方向 |

局 部 平 面 表 8-36

| | |
|----|---|
| 平面 | 从下拉列表中选择局部平面的两个方向。其中的两个局部坐标方向分别对应整体 Z、X 的方向 |
|----|---|

轴参考向量指定来自 表 8-37

| | |
|-------|---|
| 坐标方向 | 选择该选项时，该对话框的下面部分会显示轴坐标方向区域，其中有方向下拉列表。从下拉列表选择一个合适的坐标方向，这个方向对应局部 1 轴 |
| 两点 | 选择该选项时，该对话框的下面部分会显示轴参考向量的两点区域，包括轴向点 1 和轴向点 2 下拉列表。这些列表包括了模型中的节点和一个 None 选项。选择两个节点来指定 3 轴的指向，方向由 1 点指向 2 点 |
| 自定义向量 | 选择该选项时，该对话框的下面部分显示自定义轴参考向量区域，其中包括轴向量 X、轴向量 Y、和轴向量 Z 编辑框。在编辑框中输入各方向坐标值来指定轴参考向量，对应 1 轴指向 |
| 坐标系 | 选择控制的坐标系 |

平面参考向量指定来自 表 8-38

| | |
|------|---|
| 坐标方向 | 选择该选项，对话框的下面显示轴坐标方向区域，其中显示主方向和次方向下拉列表。对每个下拉列表选择坐标方向 |
| 两点 | 选择该选项，该对话框的下面显示一个平面考向量的两点区域，其中包括平面点 1 和平面点 2 下拉列表。这些列表包括了模型中的节点和一个 None 选项。选择两个点来指定轴参考向量。对应 2 轴的平面指向，并且此指向为平面上的投影方向 |

续上表

| | |
|-------|---|
| 自定义向量 | 选择该选项，该对话框的下面会显示自定义参考向量区域，其中包括平面向量 X、平面向量 Y、平面向量 Z 编辑框。在编辑框中输入坐标值指定轴参考向量，对应 2 轴的平面指向，并且此指向为平面上的投影方向 |
| 坐标系 | 选择控制的坐标系 |

修改 2 点连接局部坐标轴

2 点连接局部轴的修改与一点连接的方向指定同线单元类似，并且不可偏离连接线。高级对话框中的指定如果违背此原则，指定无效。

2) 【指定】>【连接/支座】>【反转连接】命令

此命令对 1 点连接无效，仅对修改 2 点连接有效。

选中需要反转的 2 点连接，点击【指定】>【连接/支座】>【反转连接】命令，2 点连接的 1 轴方向将反转。

8.8 拉压比限定(单拉单压构件)

在某些钢结构中，需要运用一些单拉构件，例如单拉索或者交叉单拉支撑。在 SAP2000 中提供了对线单元指定拉压比限值的功能，能够实现模型中单拉单压单元的模拟分析计算。

SAP2000 中对此种单元的处理是非线性的，并且此种设置仅在非线性的分析工况中起作用，所以必须设置非线性工况。例如，对某线对象设定了一个为零的压力限值，分析过程中如果对象轴向受压，该对象会无刚度地缩短；如果荷载反向了，则一旦达到初始长度就具有完全的受拉刚度。

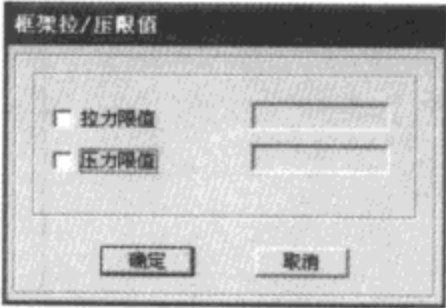


图 8-41 框架拉/压限值对话框

下面介绍拉压比限定的指定方法。

首先选中要指定拉压比限定的线单元，点击【指定】>【框架/索/钢束】>【拉压比限定】命令，弹出框架拉/压限值对话框（图 8-41）。对话框说明见表 8-39。

表 8-39

| | |
|------|--|
| 拉力限值 | 勾选此项前面的复选框，后面的输入框将激活，可以输入 0 或拉力（正）值来指定拉力限值给构件。0 表示不受拉力 |
| 压力限值 | 勾选此项前面的复选框，后面的输入框将激活，可以输入 0 或压力（负）值来指定压力限值给构件。0 表示不受压力 |

如果压力限值和拉力限值均为 0，则表示此线对象在非线性工况分析中不受力。

以图 8-42 模型为例。此模型为两层框架支撑结构，采用交叉支撑，上层两根支撑指定了拉压比限定，下层两根支撑未指定，在结构左侧两个节点指定了 X 方向的推力（DEAD 工况下），并将 DEAD 分析工况定义为非线性工况。

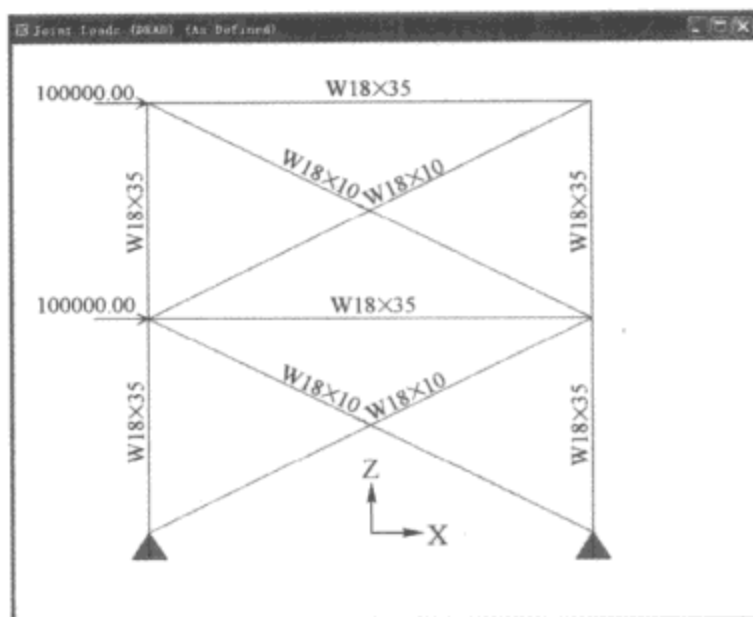


图 8-42 交叉斜撑模型图

分析计算结束后，显示线单元轴力图，如图 8-43 所示。

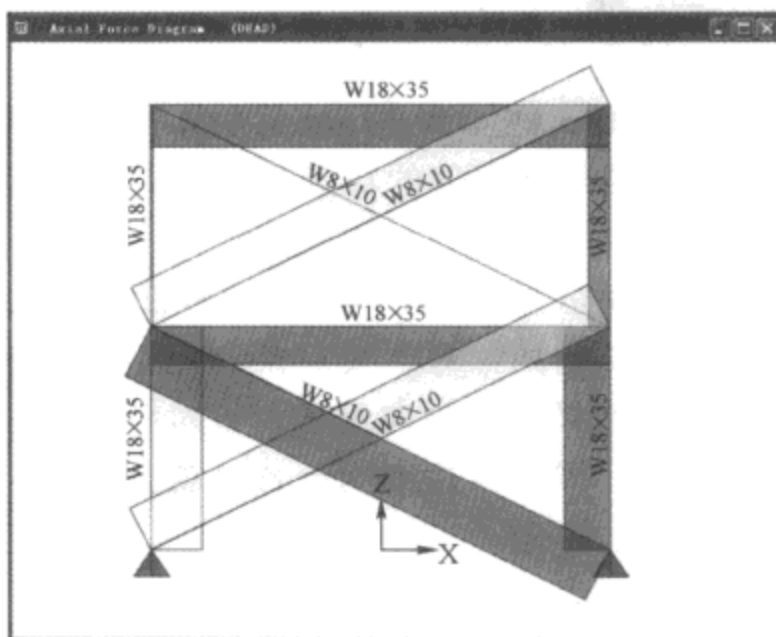


图 8-43 交叉斜撑模型轴力图

图中压力显示为灰色，拉力显示为白色。上层支撑构件指定了拉压比限定，应当受拉的支撑有拉力，而应该受压的构件无内力；下层构件未指定拉压比限定，拉力压力均如一般承受拉压力的支撑构件。

注意：拉压比限定的力学属性是非线性的，所以分析计算只有在非线性工况中才起作用；在线性工况中，拉压比的限定不起作用，构件刚度为其实际刚度。

SAP2000 中给构件指定拉压比限定，是通过折减相对刚度的方法来实现的。当构件受力超过压力（或拉力）的限值时，程序就会把抗压（或抗拉）刚度折减为抗拉（或抗压）刚度的 10^{-6} 大小。因此，对于有些刚度很大的杆件，给杆件指定压力（或拉力）限值，当杆件所受压力（或拉力）超过限值时，抗压（或抗拉）刚度折减为抗拉（或抗压）刚度的 10^{-6} 后其抗压刚度仍然不是非常小，在分析结果中此杆件仍然会有一定的压力（或拉力）。

8.9 单元剖分

对 SAP2000 中的对象，在计算分析之前，需要对应所要求的计算精度，指定一定的有限元剖分，即线对象、面对象、实体对象的单元剖分。

8.9.1 线对象自动框架细分

首先选中需要进行剖分的线对象，点击【指定】>【框架/索/钢束】>【自动框架细分】命令，弹出指定自动框架细分对话框（图 8-44）。对话框说明见表 8-40。

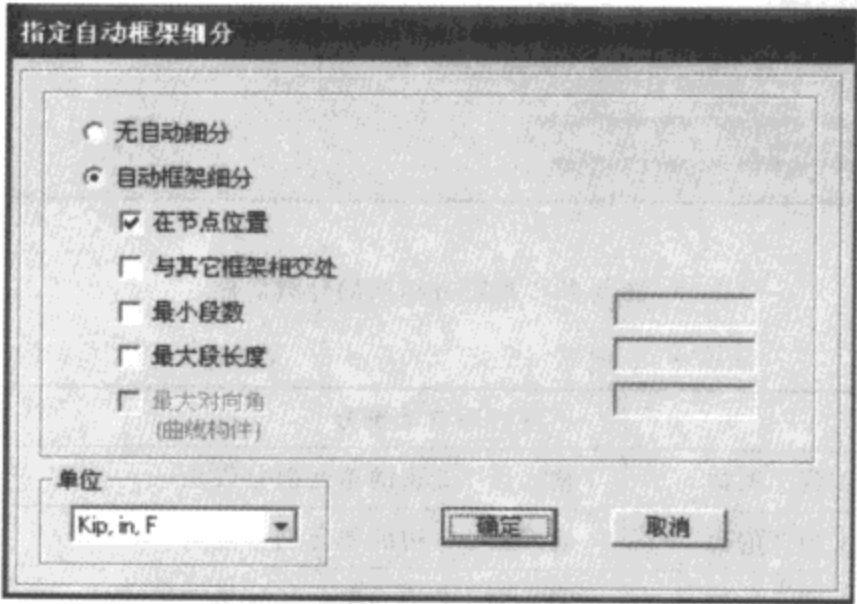


图 8-44 指定自动框架细分对话框

表 8-40

| 无自动细分 | | 不进行框架细分 |
|--------|-------------|-----------------------|
| 自动框架细分 | 在节点位置 | 在节点位置进行剖分 |
| | 与其它框架相交处 | 在与其它框架单元相交处剖分 |
| | 最小段数 | 按最小段数剖分构件，输入最小的段数限值 |
| | 最大段长度 | 按最大长度剖分构件，输入最大的长度限值 |
| | 最大对向角（曲线构件） | 按最大弧度值剖分曲线构件，输入最大弧度限值 |
| 单位 | | 从下拉菜单中选择此对话框中的控制单位 |

此对话框设置完毕后，点击【确定】按钮，完成对线对象的剖分指定。

8.9.2 面对象自动网格剖分

首先选中需要进行剖分的面对象，点击【指定】>【面】>【自动面网格剖分】命令，弹出指定自动面剖分对话框（图 8-45）。对话框说明见表 8-41。

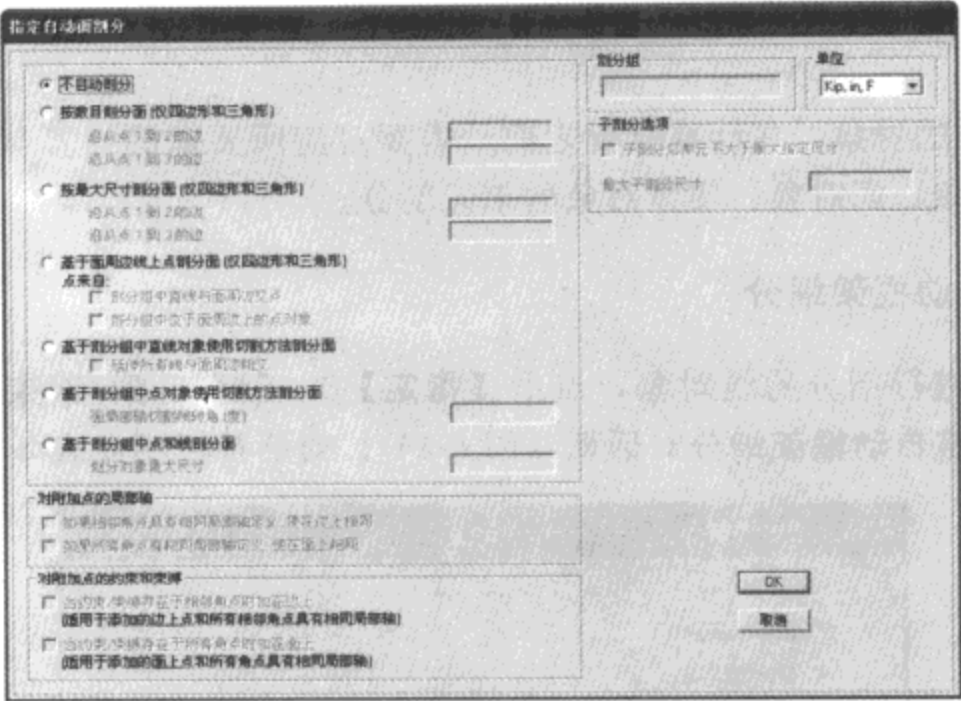


图 8-45 指定自动面剖分对话框

表 8-41

| 不自动剖分 | | 不进行面自动剖分 |
|---------------------|------------------------|---|
| 按数目剖分面 | 沿从点 1 到 2 的边 | 输入面 1-2 边的单元剖分数量 |
| | 沿从点 1 到 3 的边 | 输入面 1-3 边的单元剖分数量 |
| 按最大尺寸剖分面 | 沿从点 1 到 2 的边 | 输入面 1-2 边的单元剖分最大尺寸 |
| | 沿从点 1 到 3 的边 | 输入面 1-3 边的单元剖分最大尺寸 |
| 基于面周边线上点剖分面 | 剖分组中直线对象与面周边交点 | 以选中的直线与面的角点作为面剖分的基准线 注意：选中的线和面必须在同一平面内，并且在同一预先定义的组内 |
| | 剖分组中位于面周边上的点对象 | 以选中的面边缘上的点作为剖分面的基准点 注意：选中的点和面必须在同一平面内，点必须在面的边缘上，并且点和面在同一预先定义的组内 |
| 基于剖分组中直线对象使用切割方法剖分面 | | 以选择的线作为面的剖分基准线。选中【延伸所有线与面周边相交】选项表示对不穿过面边缘的线延长使其和面的边缘产生交点 注意：选中的线和面必须在同一平面内，并且在同一预先定义的组内 |
| 基于剖分组中点对象使用切割方法剖分面 | | 选择点作为面剖分的基准点，在面局部轴切割线转角编辑框中输入剖分线绕面局部坐标轴 3 轴的旋转角度，单位为“度”，逆时针方向为正 注意：选中的点和面必须在同一平面内，并且点和面在同一定义好的组内 |
| 基于剖分组中点和线剖分面 | | 以选中的线和点作为面的剖分基准线和基准点，在划分对象最大尺寸编辑框中输入剖分单元的最大尺寸 注意：选中的线和点必须同剖分面在同一平面内、同一组内，并且点和线必须完全在选中的面单元内 |
| 对附加点的局部轴 | 如果相邻角点具有相同局部轴定义，使在边上相同 | 新增的点对象局部坐标轴方向指定为与两个临近面的角点局部坐标一致 |
| | 如果所有角点有相同局部轴定义，使在面上相同 | 如果面单元所有角点的局部坐标轴均一致，则新增的点对象局部坐标轴与面角点一致 |

续上表

| | | |
|------------|--------------------|---|
| 对附加点的约束和束缚 | 当约束/束缚存在于相邻角点时加在边上 | 如果新增点的两相邻角点（目标剖分面的角点）的约束条件一致，并且其局部坐标轴与新增点一致，控制新增点的约束条件与相邻角点一致 |
| | 当约束/束缚存在于所有角点时加在面上 | 如果目标剖分面的所有角点的约束条件一致，并且其局部坐标轴与新增点一致，控制新增点的约束条件与面角点一致 |
| 剖分组 | | 在下拉菜单中选择已定义的组，作为剖分控制组，只有在选中的组中面才会被剖分，在选中组中点和线才能作为有效的剖分基准点和基准线 |
| 单位 | | 从下拉菜单中选择此对话框中的控制单位 |
| 子剖分选项 | | 在编辑框中输入最大的剖分尺寸作为面剖分的最大尺寸的控制值，此指定作为其他指定的总体指定控制 |

对话框设置完毕后，点击【确定】按钮，完成对面对象的剖分指定。

8.9.3 实体对象自动网格剖分

首先选中需要进行剖分的实体对象，点击【指定】>【实体】>【自动实体网格剖分】命令，弹出指定自动实体剖分对话框（图 8-46）。对话框说明见表 8-42。

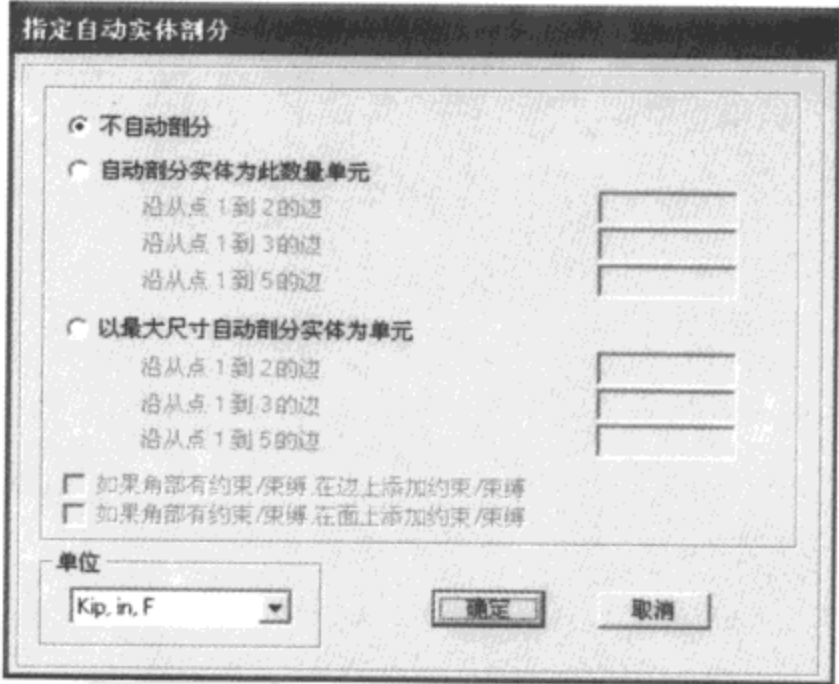


图 8-46 指定自动实体剖分对话框

表 8-42

| | | |
|--------------|--------------|------------------|
| 不自动剖分 | | 不进行面自动剖分 |
| 自动剖分实体为此数量单元 | 沿从点 1 到 2 的边 | 输入面 1-2 边的单元剖分数量 |
| | 沿从点 1 到 3 的边 | 输入面 1-3 边的单元剖分数量 |
| | 沿从点 1 到 5 的边 | 输入面 1-5 边的单元剖分数量 |

续上表

| | | |
|---------------------------|--------------|--------------------------|
| 以最大尺寸自动 剖分实体为单元 | 沿从点 1 到 2 的边 | 输入面 1-2 边的单元剖分最大尺寸 |
| | 沿从点 1 到 3 的边 | 输入面 1-3 边的单元剖分最大尺寸 |
| | 沿从点 1 到 5 的边 | 输入面 1-5 边的单元剖分最大尺寸 |
| 如果角部有约束/束缚，在边上添加 约束/束缚 | | 如果角部有约束/束缚，在实体边上添加约束/束缚 |
| 如果角部有约束/束缚，在面上添加约束/ 束缚 | | 如果角部有约束/束缚，在实体表面上添加约束/束缚 |
| 单位 | | 从下拉菜单中选择此对话框中的控制单位 |

对话框设置完毕后，点击【确定】按钮，完成对实体对象的剖分指定。

第9章

视图功能

SAP2000 具有集成化的界面，它的所有建模、分析及设计视图显示都是在同一个 Windows 界面中，这就涉及到 SAP2000 视图界面的显示问题。SAP2000 可以选择显示一个或多个窗口，可以任意调整窗口大小，并可以在各窗口中显示任意的选择内容，满足工程师对 SAP2000 的各种建模以及分析设计结果的图形显示查看要求。本章将详细介绍 SAP2000 中视图功能，主要是整体显示设定和模型图形的显示介绍，关于分析设计结果的图形显示将在相应的分析设计各章中详细介绍。

9.1 显示窗口的设定

SAP2000 能够同时显示 1~4 个窗口，可以根据需要进行设定，并且可以在不同的视图窗口中设定显示不同的内容，例如在不同窗口中同时显示二维、三维视图、内力图、变形图等，还可以选择任意窗口对其进行旋转放大缩小等修改。设定步骤如下：

点击【选项】>【窗口】，通过选择点击菜单中的相应选项进行显示窗口数量和分布方式的设定（图 9-1）。各命令内容和含义见表 9-1。

表 9-1

| | |
|----------------|---|
| 1 个 (O) | 单个窗口，满布程序视图界面 |
| 2 个 (垂直平铺) (V) | 两个窗口，左右分布，各占程序显示视图界面 1/2 |
| 2 个 (水平平铺) (H) | 两个窗口，上下分布，各占程序显示视图界面 1/2 |
| 3 个 (T) | 三个窗口，程序显示界面左边 1/2 部分一个，右边上下分布两个窗口，各占显示视图界面的 1/4 |
| 4 个 (F) | 四个窗口，各占程序显示视图界面的 1/4 |

对于每个窗口，都可以对其显示的内容进行设定，窗口顶部的标题栏会显示当前窗口的显示内容。工程师可以将任意窗口放大、缩小及移动，双击某个窗口的标题栏或点击标题栏

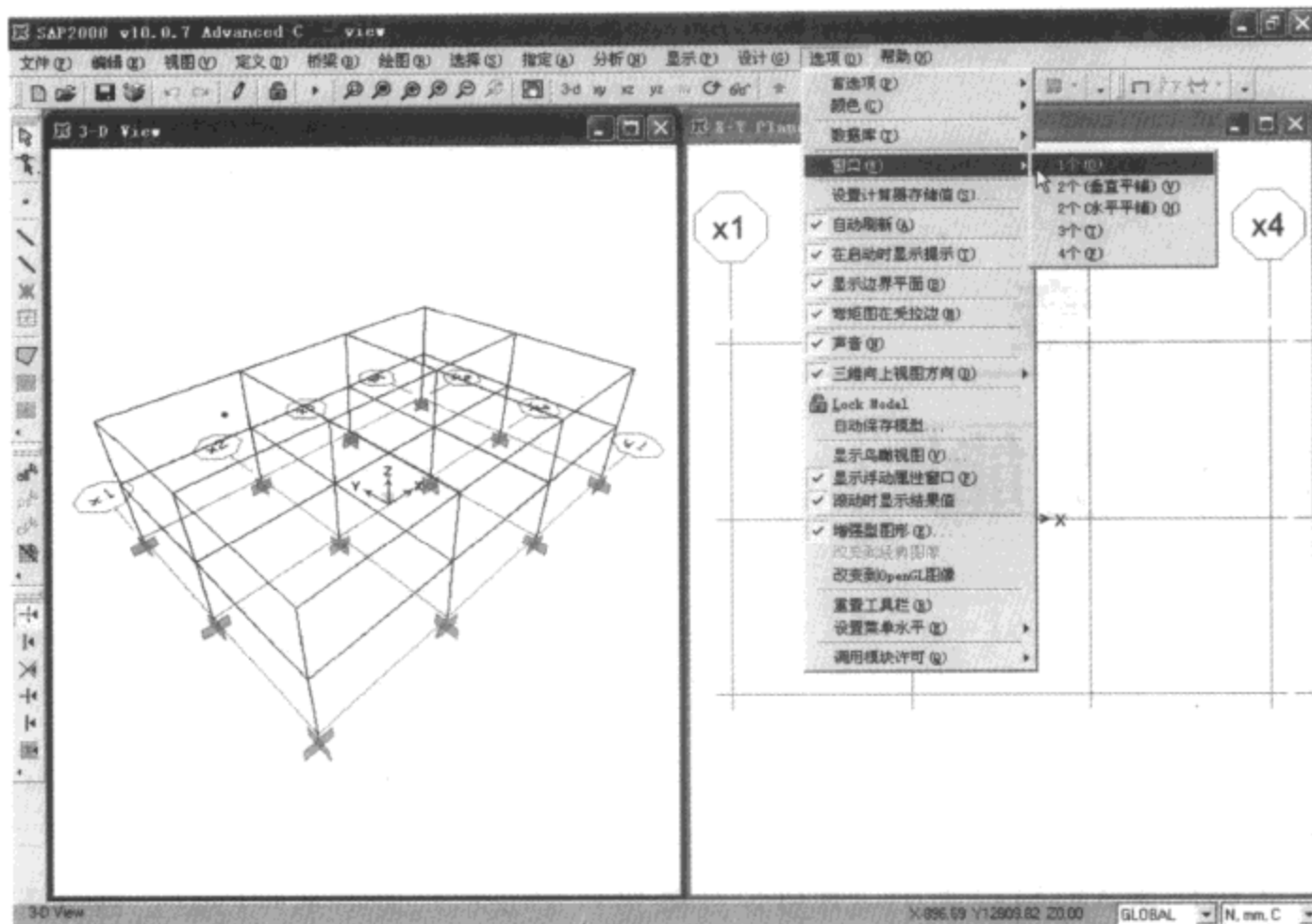


图 9-1 窗口数量设置

右边的【最大化】按钮，窗口最大化并覆盖其他窗口，点击标题栏右边的【恢复视窗】按钮，窗口恢复为最大化前大小。

在某个窗口中单击鼠标左键，则窗口变为激活状态，此时窗口标题栏高亮度显示，非激活状态为灰色。工程师可以对激活窗口的显示内容进行控制，视图控制及显示的命令一般对激活窗口有效。


SAP2000 中还提供俯视图的显示，点击【选项】>【显示鸟瞰视图】命令，弹出俯视图窗口，俯视图中显示的是当前激活窗口中的图形全貌。在俯视图中框选模型的某部分，当前激活窗口中则放大显示框选模型部分。

对于窗口的显示，SAP2000 中有一些快捷控制按钮：


【平移】按钮 ：点击后在激活视图中按住鼠标左键拖动，可移动视图


【设置默认 3D 视图】按钮 ：点击后，激活窗口将切换到程序默认的 3D 视图状态

【设置 XY 视图】按钮 ：点击此按钮，激活窗口切换到 XY 平面视图



【设置 XZ 视图】按钮 ：点击此按钮，激活窗口切换到 XZ 平面视图

【设置 YZ 视图】按钮 ：点击此按钮，激活窗口切换到 YZ 平面视图

【设置命名视图】按钮 ：点击弹出已命名的视图列表，选择后在激活窗口中显示选中的命名视图

【旋转 3D 视图】按钮 ：在 3D 视图显示状态下，此按钮处于可用状态，点击后在视图中按住左键拖动，3D 视图按照拖动方向旋转

【透视开关】按钮 ：点击切换是否按照透视图显示模型

【在表单中上移】按钮 、【在表单中下移】按钮 ：单击在平面视图表单中按顺序上移、下移切换平面视图

9.2 三维、二维视图定义及控制

SAP2000 中的视图定义及控制功能非常强大，本节对各种 3D、2D 视图的定义及显示控制进行介绍。

9.2.1 三维视图的定义及显示

点击【视图】>【设置三维视图】命令，弹出设置 3D 视图对话框（如图 9-2 所示，对话框说明见表 9-2），包含详细设置 3D 视图的角度等信息。

在视图方向角度区域中设置的这些角度用来确定视图的朝向。这些角度可被认为是工程师眼睛看向原点的位置。

点击【确定】显示选定的三维视图。

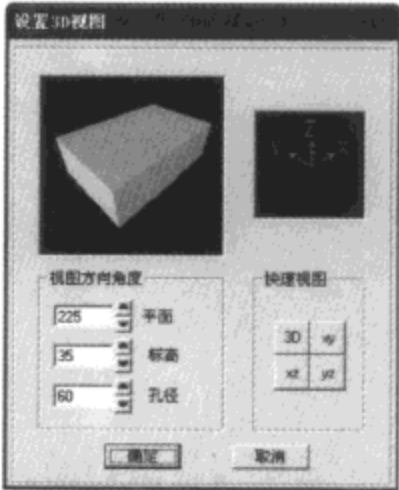


图 9-2 设置 3D 视图对话框

表 9-2

| | | |
|--------|----|---|
| 视图方向角度 | 平面 | 在 X-Y 平面的位置，0 在正 X 轴上，且 90 在正 Y 轴上 |
| | 标高 | 在 X-Y 平面上或下的位置，0 在 X-Y 平面，且 90 在正的 Z 轴 |
| | 孔径 | 用来计量透视的强度，或距原点的距离。0 代表工程师在无限远，且所有后退线是平行的（无透视）。在 30~60 间的值一般是足够的 |
| 快速视图 | 3D | 设置为默认的 3D 视图 |
| | xy | 设置为垂直于 xy 平面的透视图 |
| | xz | 设置为垂直于 xz 平面的透视图 |
| | yz | 设置为垂直于 yz 平面的透视图 |

9.2.2 二维视图的定义及显示

点击【视图】>【设置二维视图】命令，弹出设置 2D 视图对话框（图 9-3）。对话框说明见表 9-3。

表 9-3

| | | |
|-------------|--------|---|
| 平面 | Y-Z 平面 | 选中此项，在输入框中输入 X 轴的坐标值，显示 Y-Z 平面 X 坐标处的平面 |
| | X-Z 平面 | 选中此项，在输入框中输入 Y 轴的坐标值，显示 X-Z 平面 Y 坐标处的平面 |
| | X-Y 平面 | 选中此项，在输入框中输入 Z 轴的坐标值，显示 X-Y 平面 Z 坐标处的平面 |
| 视图方向（前面、后面） | | 切换视图的方向是正面还是背面 |

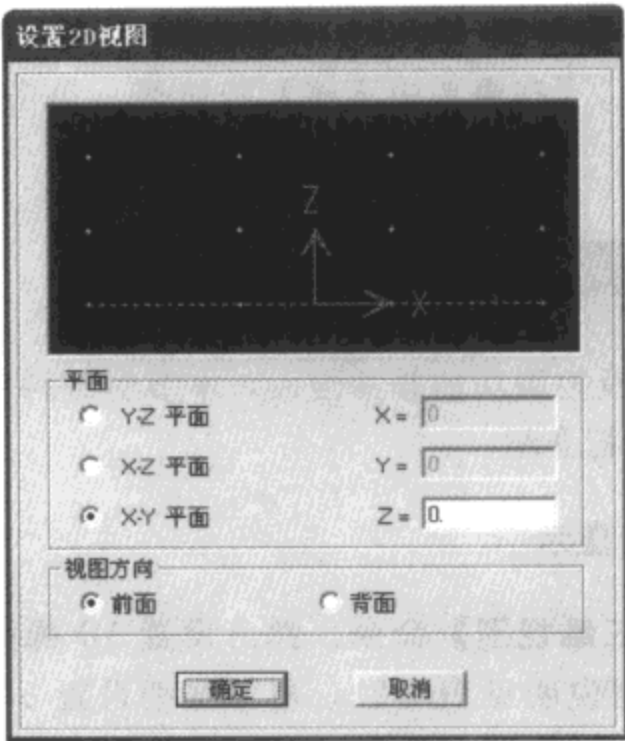


图 9-3 设置 2D 视图对话框

点击【确定】按钮显示设定的二维视图

9.2.3 定义新视图

点击【定义】>【命名视图】命令，弹出定义视图对话框（图 9-4）。对话框说明见表 9-4。

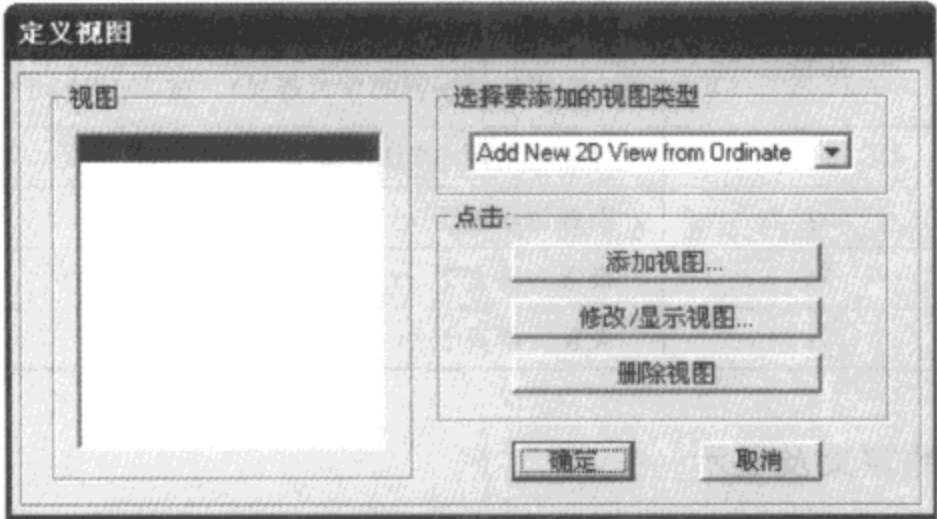


图 9-4 定义视图对话框

表 9-4

| | |
|------------|----------------------------------|
| 视 图 | 视图列表中显示已定义的视图名称 |
| 选择要添加的视图类型 | 在此下拉列表中选择要定义的新视图类型（二维、三维、平面展开视图） |
| 添加视图 | 点击后弹出对应视图类型的定义对话框 |
| 修改/显示视图 | 点击后弹出在视图列表中选中名称的视图的对话框，对此视图修改 |
| 删除视图 | 删除视图列表中选中的视图名称 |

下面分别介绍这三种类型的新视图的定义：

(1) 二维视图

在选择要添加的视图类型下拉列表中选中 **Add New 2D View from Ordinate** 一项，点击【添加视图】按钮，弹出设置 2D 视图对话框（图 9-5），

在视图名称中填入新定义二维视图的名称。

对话框中的其他内容及含义与点击【视图】>【设置二维视图】命令弹出的设置 2D 视图对话框中的内容相同。点击【确定】完成此视图的定义。回到定义视图对话框（图 9-4），视图列表中加入一个已定义的 Plane-13 视图名称（图 9-7）。

(2) 三维视图

在当前激活视图为三维视图的状态下，选择要添加的视图类型下拉列表中将显示 **Add New 3D View from Current Window** 一项（非三维视图不显示），选中此项，点击【添加视图】按钮，当前 3D 视图将作为一个视图模式保存起来，视图列表中将加入一个 3DView-14 视图名称（图 9-7）。

(3) 展开立面图

在一般的立面视图中，只能够查看一个立面上的模型和模型分析设计的结果。然而，实际上往往需要在同一个视图中查看多个立面的模型内容，以适应如构件的荷载施加等建模操作，以及模型分析设计结果整体立面查看的要求。这就需要定义展开立面图，即有转角的模型立面视图，把几个立面结合在一起，展开显示在同一个立面视图中。

在选择要添加的视图类型下拉列表中选中 **Add New Developed Elevation View** 一项，点击【添加视图】按钮，弹出定义展开立面对话框（图 9-6）。

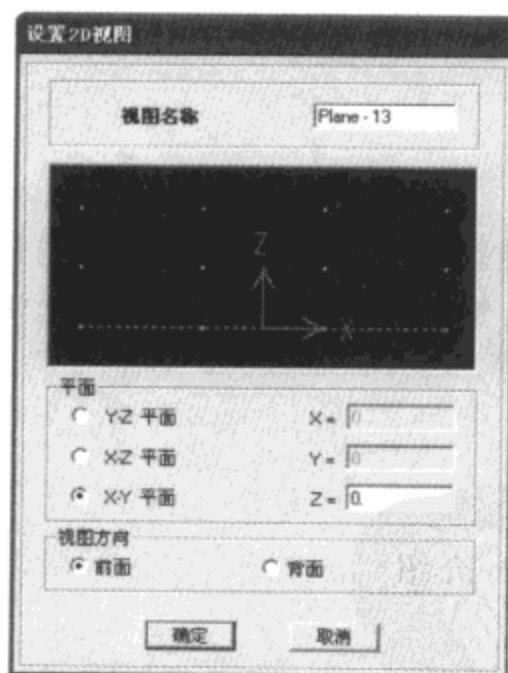


图 9-5 设置 2D 视图对话框

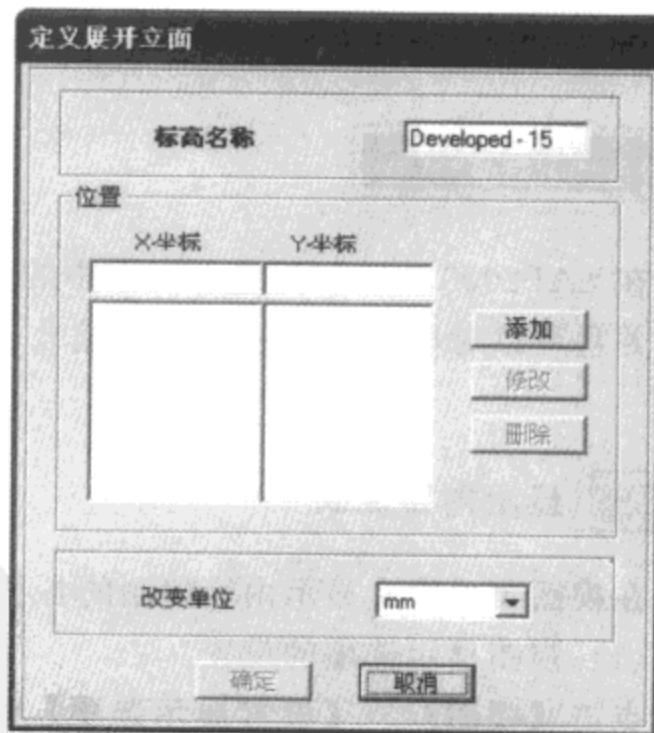


图 9-6 定义展开立面对话框

在视图名称中填入新定义二维视图的名称。

在位置区域中顺序输入展开立面经过 XY 平面各转折点的坐标值，点击【添加】按钮，添加定位点；点击【修改】按钮，修改已有定位点坐标；点击【删除】按钮，删除选中的已

有定位点。

点击【确定】按钮，展开立面定义完毕。视图列表中将加入一个 Developed-15 视图名称（图 9-7）。

9.2.4 显示定义的新视图

点击【视图】>【设置命名视图】命令，弹出选择视图对话框（图 9-8）。

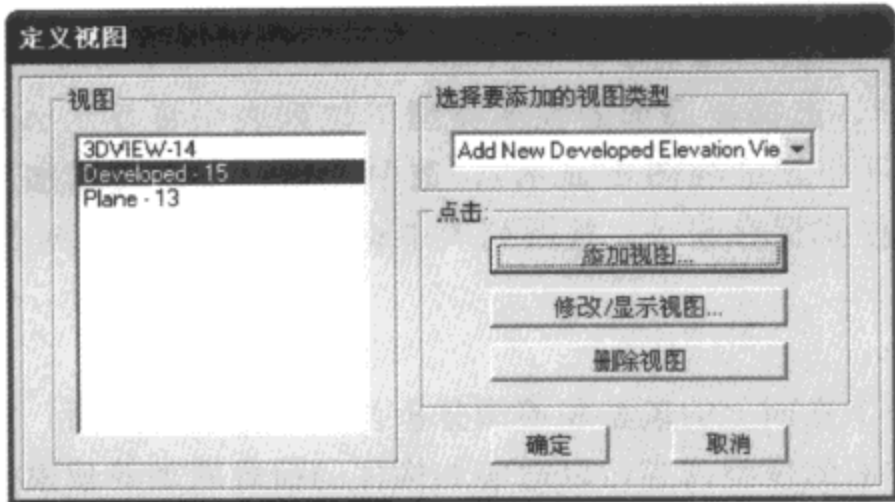


图 9-7 定义了三种视图的定义视图对话框

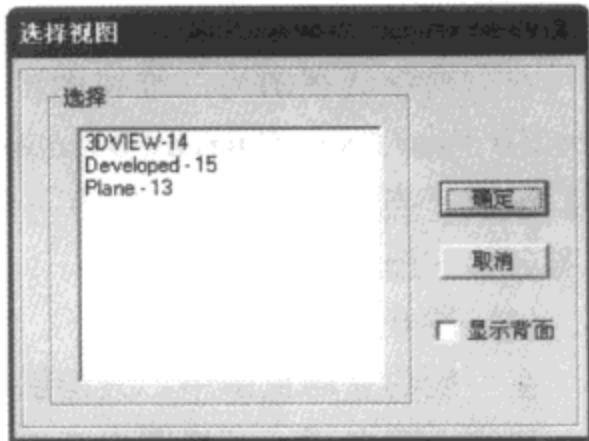


图 9-8 选择视图对话框

对话框中列出了已定义的三个视图，选中某个视图名称，是否勾选显示背面一项，表示是否显示已选视图的背面。

点击【确定】按钮，在激活的显示窗口中将切换显示选中的视图。


9.3 视图显示控制

在 SAP2000 中，可以控制视图中的各类显示内容是否显示，方便复杂模型的建立和查看，并且可以对显示内容进行图形缩放、控制显示视角等操作，本节详细介绍此类查看功能。

9.3.1 显示内容控制

在视图菜单中有显示内容控制的各种命令，下面一一介绍。

(1) 视图显示选项的设置

点击【视图】>【设置显示选项】命令，或者点击工具栏中的【设置显示选项】按钮, 弹出激活窗口选项对话框（如图 9-9 所示，对话框说明见表 9-5）。对话框中有节点、框架/索/钢束、面、实体、连接五种单元显示内容选择区域（模型中含有的对象类型，此对话框中对应的区域将被激活，为可选择区域；相反模型中没有的对象类型，对应的区域将失效，不可操作）和常规、通过颜色显示两个基本显示选项选择区域，以及一个【应用到所有窗口】复选选项。

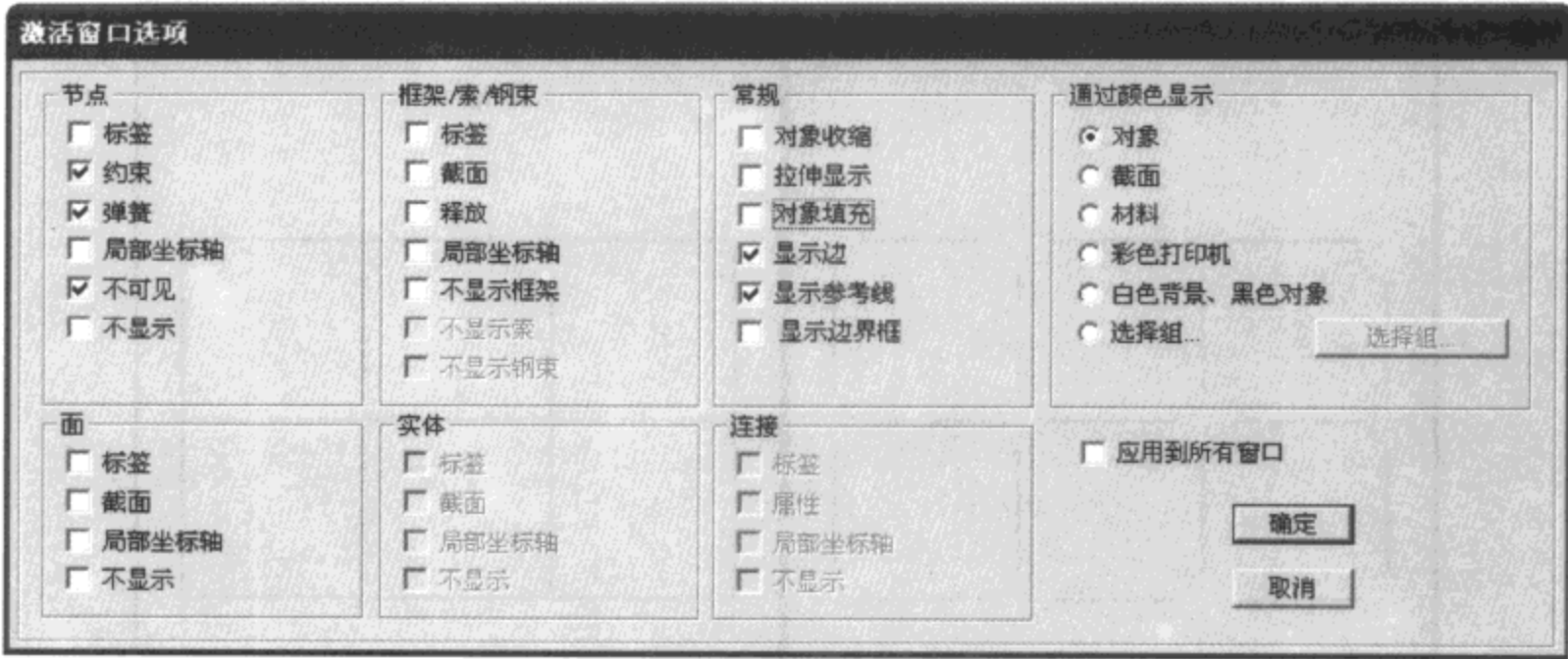


图 9-9 激活窗口选项对话框

表 9-5

| 区 域 | 意 义 |
|---------|--|
| 节点 | 控制节点的标签、约束、弹簧、局部坐标轴是否显示，节点是否不可见，节点是否不显示 |
| 框架/索/钢束 | 控制线单元的标签、截面、端部释放、局部坐标轴是否显示，框架对象、索对象、钢束对象是否不显示 |
| 常规 | 控制各种对象的显示模式，包括对象收缩、拉伸显示、对象填充、对象边、参考线、对象外轮廓线，选择中内容将会显示 |
| 通过颜色显示 | 按照指定给对象、截面、材料、组的颜色显示模型，选择这四项中的某项，图形显示的颜色将调用对应工程师指定的颜色。彩色打印机和白色背景、黑色对象选项快速切换打印中常用的白色背景下的彩色或黑白模型显示状态 |
| 面 | 控制面对象的标签、截面、局部坐标轴是否显示，面对象是否不显示 |
| 实体 | 控制实体对象的标签、截面、局部坐标轴是否显示，实体对象是否不显示 |
| 连接 | 控制连接对象的标签、属性、局部坐标轴是否显示，连接对象是否不显示 |
| 应用到所有窗口 | 勾选此项表示对以上各区域的选择对所有的视图窗口起作用，否则表示仅对当前激活窗口作用 |

在此对常规区域中的各选项的作用做以详细的介绍：

1) **对象收缩**：选择此选项后，视图中的所有构件都会从节点部位脱离一段显示。通过这种显示方法，工程师可以很方便地看出同一位置的构件连接情况。例如：两根物理属性完全一致的线单元相连，工程师可能分辨不清是一根还是两根线单元，选择【对象收缩】选项，在视图中就可以很清楚地看出线单元的数量，如图 9-10 所示。图中左侧为选择了对象收缩选项的图形，右侧未选择，对于其他单元也类似。

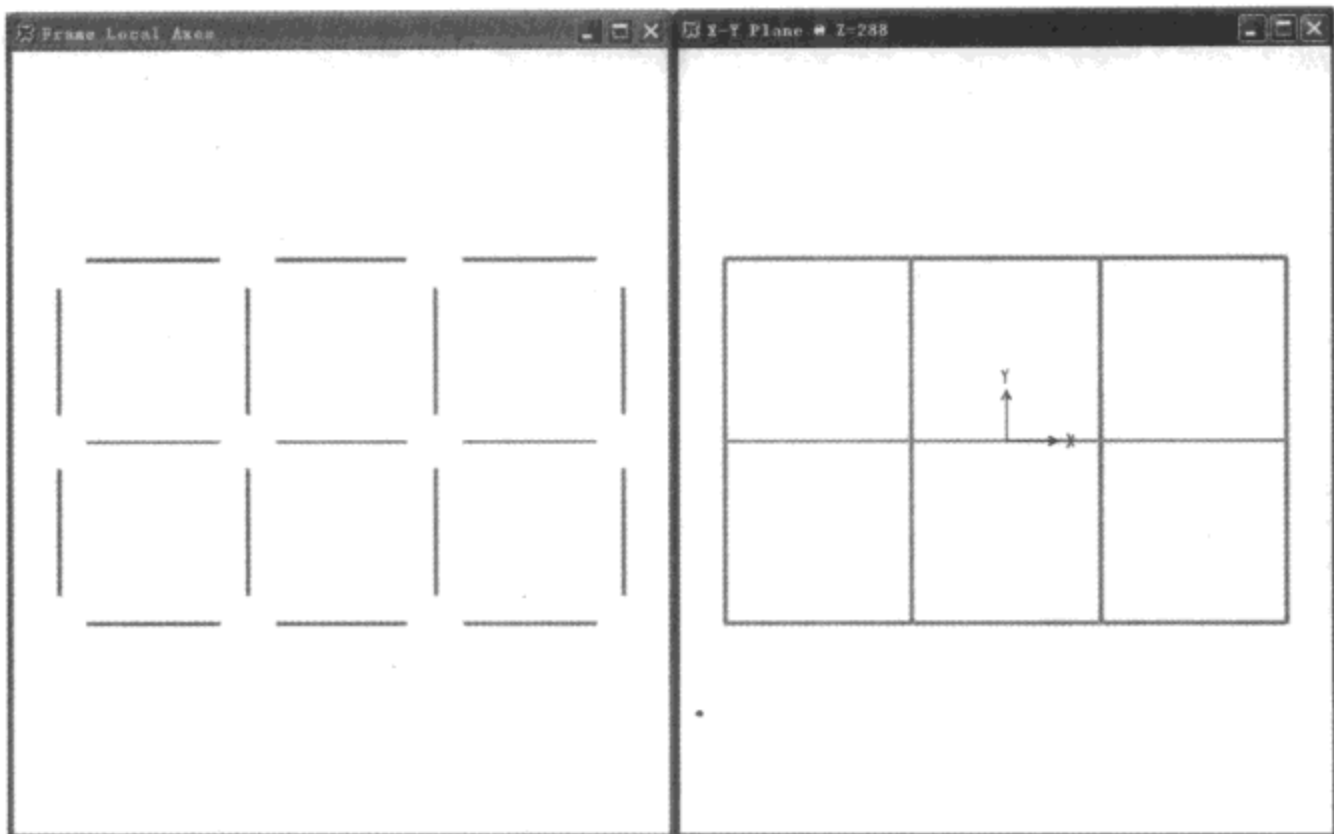


图 9-10 对象收缩显示

2) **拉伸显示**: 默认情况下结构构件只显示其代表的形状, 如线单元只显示一根线的样式。选择此项, 结构构件将按照其实际的截面显示, 如图 9-11 所示。并且在拉伸视图下, 会按实际情况显示结构对象的插入点属性, 即显示构件的节点偏移情况。

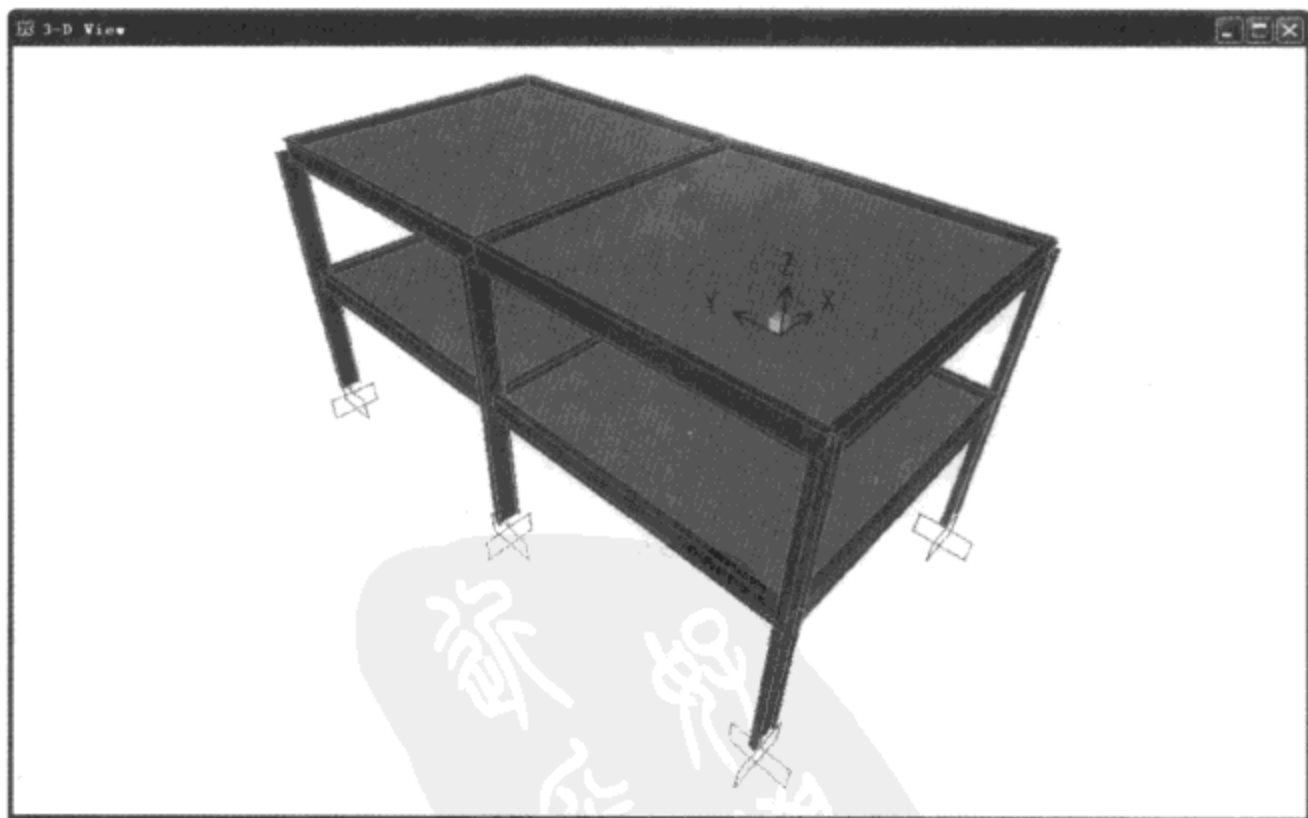


图 9-11 拉伸显示图

3) **对象填充**: 默认情况下的面、实体对象, 其显示是中空的。选择此项后, 在视图显示时面和实体对象将会以内部填充的方式显示。

4) **显示边**: 选择此项后, 在视图中显示面和实体对象的边的颜色。

5) **显示边框线**: 表示显示构件的边框线, 能够更清楚直观地看出构件的实际形状。

(2) 轴网、坐标轴的显示

轴网和坐标轴是否显示是由单独的菜单命令控制的, 点击视图菜单中的**【显示轴网】**和**【显示坐标轴】**命令可以切换控制轴网和坐标轴符号是否在视图中显示。这两个控制命令均是对当前窗口起作用, 默认视图下轴网和坐标轴都是显示的。

(3) 通过选择对象控制对象的显示

1) **只显示选择对象**: 在视图窗口中选择某些对象, 点击**【视图】>【只显示选择对象】**命令, 激活的视图窗口中将仅显示已选择的模型部分, 不显示未选择部分。

2) **反转视图选择**: 点击**【视图】>【反转视图选择】**命令, 窗口中将显示点击此命令前通过选择不显示的模型部分。

3) **从视图中移除选择**: 在视图窗口中选择某些对象, 点击**【视图】>【从视图中移除选择】**命令, 激活的视图窗口中将不显示选中的模型部分, 仅显示未选择的部分。

4) **恢复前次选择**: 此命令和**【视图】>【从视图中移除选择】**命令一起使用。当使用**【视图】>【从视图中移除选择】**命令时, 模型被选择的部分将从视图中移除。**【视图】>【恢复前次选择】**命令用来在当前视窗重新显示被选择的对象。

5) **显示全部**: 点击**【视图】>【显示全部】**命令在视图中显示模型全部内容, 其作用为取消以上四个命令的作用。

(4) 显示其它指定功能

SAP2000 中提供了对于结构模型其他指定的显示控制功能, 这些功能控制集中在菜单**【显示】>【显示其它指定】**中。此菜单中的命令对于结构中存在的对象类型可用, 可以点击; 对于结构模型中不存在的对象类型不可用, 不可点击 (如图 9-12)。

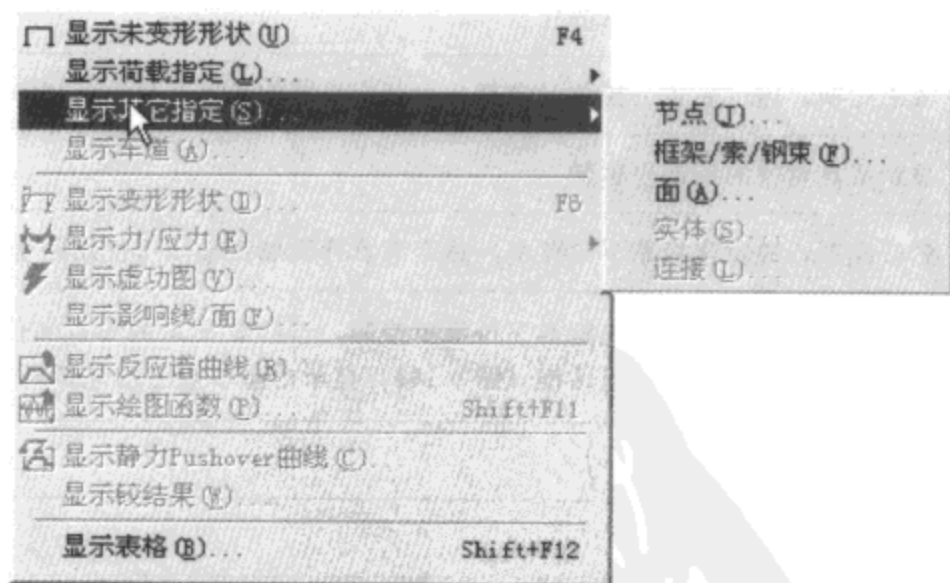


图 9-12 设置其他指定菜单

对于不同的结构对象有不同的控制, 下面分类进行介绍。

1) **节点**: 点击**【显示菜单】>【显示其它指定】>【节点】**命令, 弹出显示节点指定

对话框（如图 9-13 所示，对话框说明见表 9-6），在对话框中选择某种显示内容，点击【确定】，视图会有相应的显示变化。同样，在模型中节点上具有的指定属性选项可用，在模型中节点上没有的属性对应的选项灰色显示，不可选择。

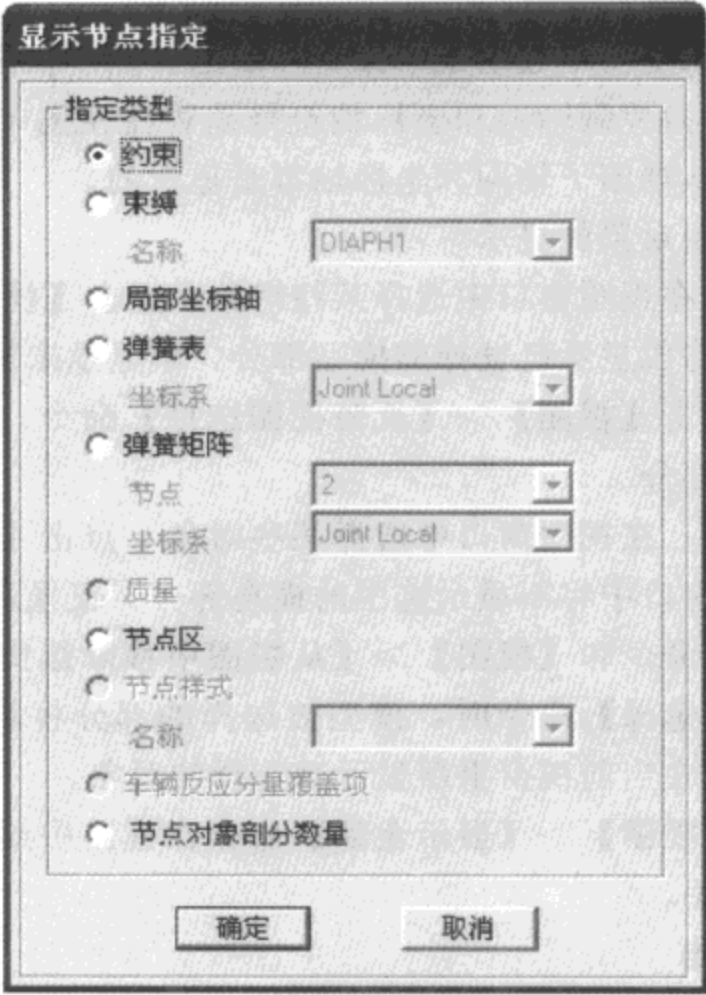


图 9-13 显示节点指定对话框

表 9-6

| | |
|-----------|--|
| 约 束 | 选择此项显示节点的约束属性 |
| 束缚 | 激活此项，通过名称下拉菜单选择一个节点束缚的名称，显示模型的节点束缚指定属性 |
| 局部坐标轴 | 显示节点对象的局部坐标轴 |
| 弹簧表 | 激活此项，通过坐标系下拉菜单，确定节点弹簧属性显示所使用的坐标系统 |
| 弹簧矩阵 | 激活此项，通过节点和坐标系下拉菜单控制，选择要显示的节点和使用的坐标系，点击【确定】，弹出 6×6 弹簧矩阵对话框（图 9-14），显示对应节点上的弹簧属性 |
| 质量 | 显示节点上指定的质量 |
| 节点区 | 显示节点区的指定情况 |
| 节点样式 | 激活此项，在名称下拉菜单中选择显示某个节点样式 |
| 车辆反应分量覆盖项 | 显示车辆反应分量的覆盖项 |
| 节点对象剖分数量 | 显示节点的剖分指定情况 |

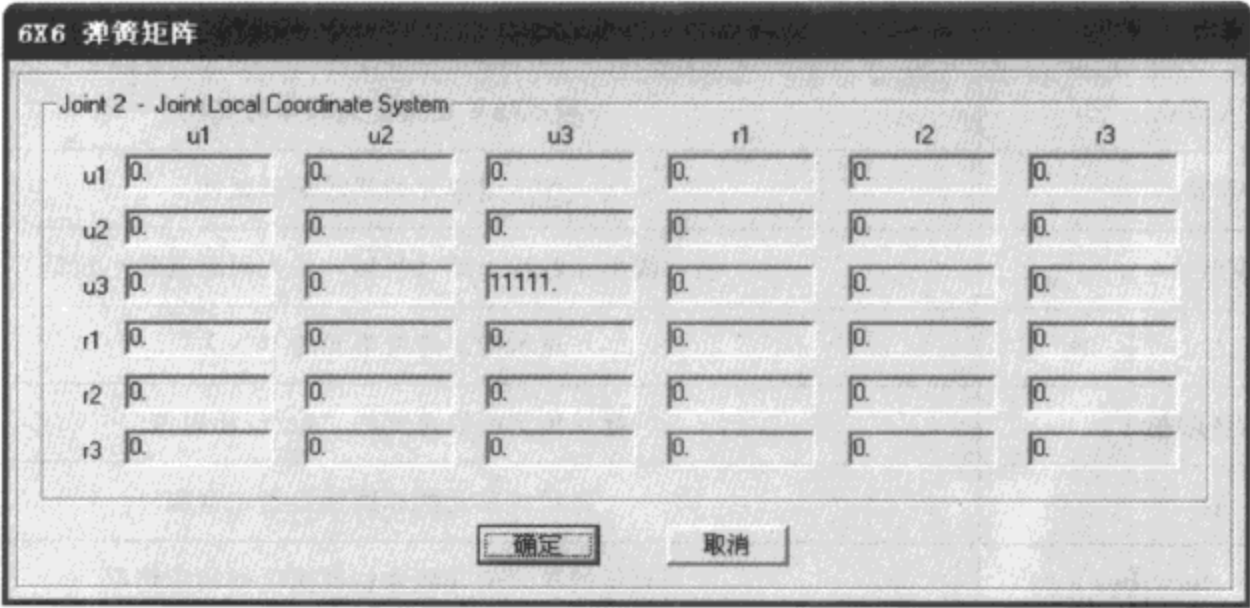


图 9-14 6×6 弹簧矩阵对话框

2) 框架/索/钢束：点击【显示菜单】>【显示其它指定】>【框架/索/钢束】命令，弹出显示框架/索/钢束指定对话框（图 9-15）。对话框说明见表 9-7。

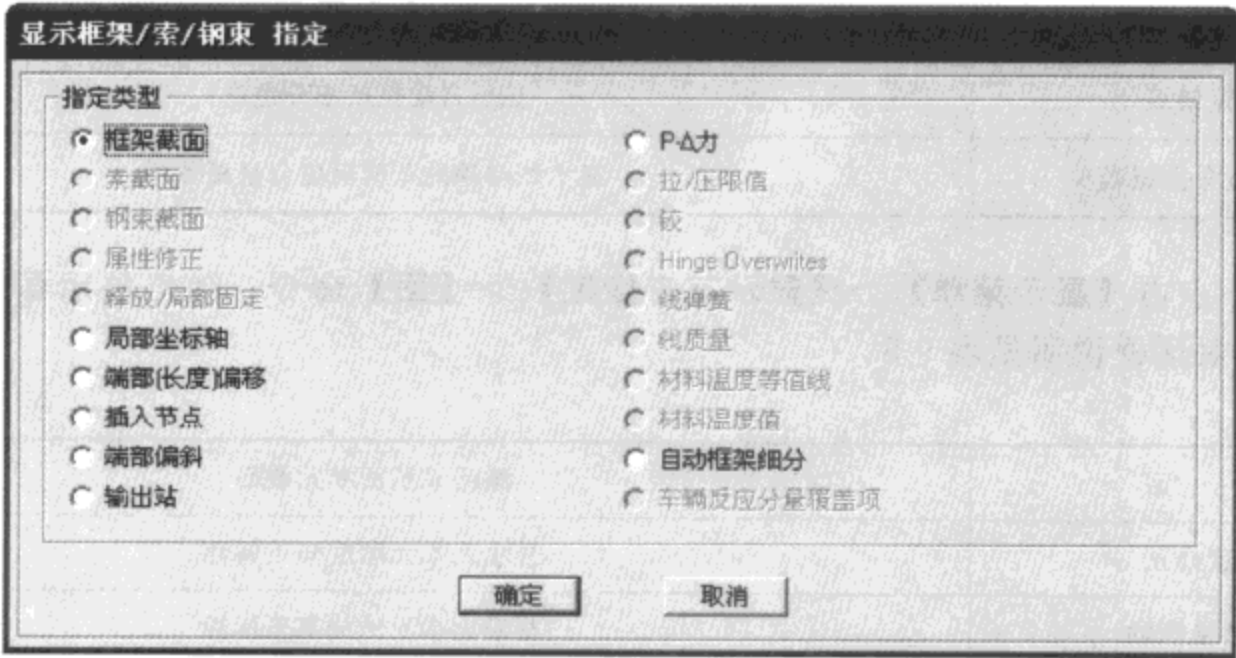


图 9-15 显示框架/索/钢束指定对话框

表 9-7

| | |
|----------|------------------|
| 框架截面 | 选择此项显示框架的截面名称 |
| 索截面 | 显示索截面的名称 |
| 钢束截面 | 显示钢束截面名称 |
| 属性修正 | 显示线单元的属性修正指定情况 |
| 释放/局部固定 | 显示线单元的端部释放属性 |
| 局部坐标轴 | 显示线单元的局部坐标轴 |
| 端部（长度）偏移 | 显示线单元端部偏移的实际长度图形 |

续上表

| | |
|------------------|------------------------|
| 插入节点 | 显示线单元指定插入点的属性 |
| 端部偏斜 | 显示线单元的端部偏斜属性 |
| 输出站 | 显示线单元的输出站（测站）最大间距或最小数量 |
| P-Δ 力 | 显示指定给线单元的 P-Δ 力 |
| 拉/压限值 | 显示指定给线单元的“拉/压比限值” |
| 铰 | 显示线单元的非线性铰指定情况 |
| Hinge Overwrites | 显示线单元的非线性铰覆盖项的指定情况 |
| 线弹簧 | 显示线单元的弹簧属性 |
| 线质量 | 显示指定给线单元的质量 |
| 材料温度等值线 | 以等值线的方式显示指定给线单元的温度荷载 |
| 材料温度值 | 以数值的方式显示指定给线单元的温度荷载 |
| 自动框架细分 | 显示自动框架细分情况 |
| 车辆反应分量覆盖项 | 显示线对象的车辆反应分量覆盖项 |

3) 面：点击【显示菜单】>【显示其它指定】>【面】命令，弹出显示面指定对话框（图 9-16）。对话框说明见表 9-8。

表 9-8

| | |
|-----------|--------------------------------|
| 截 面 | 激活显示面单元截面 |
| 刚度修正 | 显示面单元刚度修正属性 |
| 局部坐标轴 | 显示面单元的局部坐标轴 |
| 面弹簧 | 显示指定给面弹簧的指定情况，在下拉菜单中选择面单元的表面编号 |
| 面质量 | 显示指定给面质量的指定情况 |
| 材料温度等值线 | 以等值线方式显示指定给面的温度荷载 |
| 材料温度值 | 以数值显示方式显示面的温度值 |
| 自动面对象剖分 | 显示面自动剖分的指定情况 |
| 自动面边束缚 | 显示面单元自动线束缚指定 |
| 车辆反应分量覆盖项 | 显示面对象的车辆反应分量指定 |

4) 实体：点击【显示菜单】>【显示其它指定】>【实体】命令，弹出显示实体指定

对话框（图 9-17）。对话框说明见表 9-9。

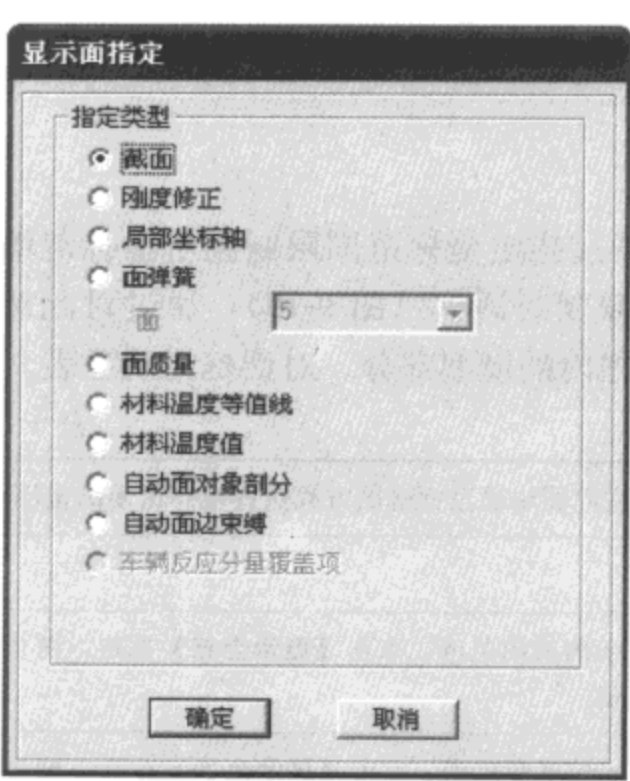


图 9-16 显示面指定对话框

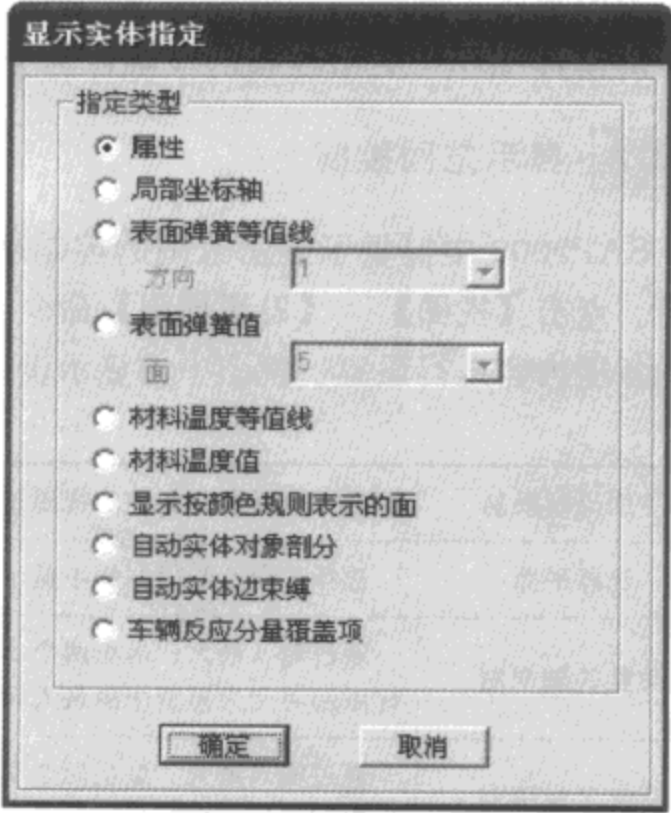


图 9-17 显示实体指定对话框

5) 连接：点击【显示菜单】>【显示其它指定】>【连接】命令，弹出显示连接指定对话框（图 9-18）。

表 9-9

| 属 性 | 显示实体单元的截面属性 |
|-------------|------------------|
| 局部坐标轴 | 显示实体单元的局部坐标轴 |
| 表面弹簧等值线 | 显示实体表面弹簧的等值线图 |
| 表面弹簧值 | 显示实体表面的弹簧数值 |
| 材料温度等值线 | 显示实体单元的温度等值线图形 |
| 材料温度值 | 显示实体的温度值 |
| 显示按颜色规则表示的面 | 显示按照颜色规则表示实体的各个面 |
| 自动实体对象剖分 | 显示实体单元的剖分指定情况 |
| 自动实体边束缚 | 显示对实体指定自动边束缚的情况 |
| 车辆反应分量覆盖项 | 显示对实体施加的车辆反应分量 |

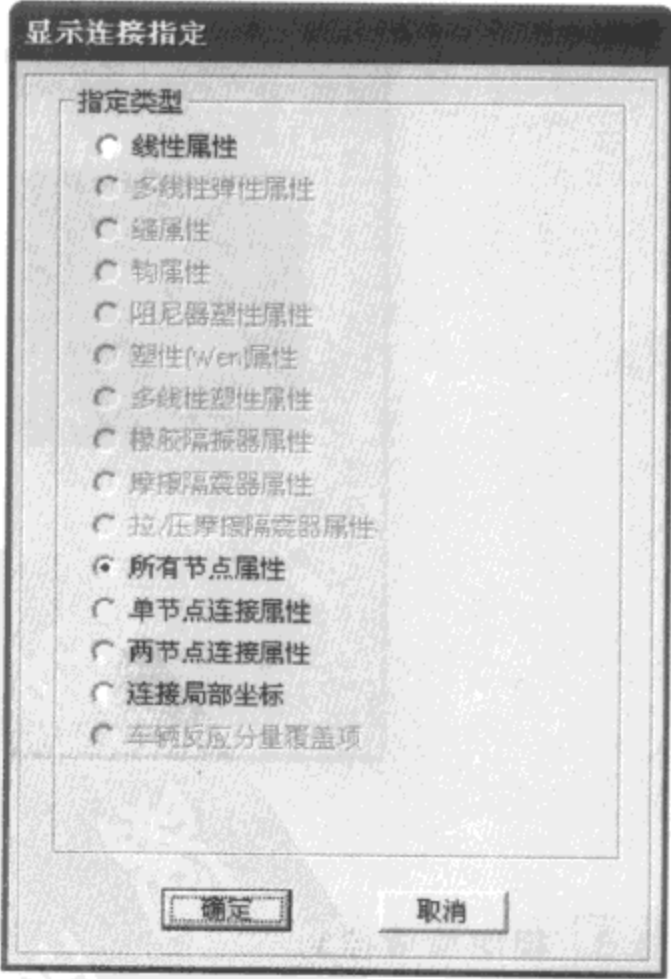


图 9-18 显示连接指定对话框

在此对话框中列出了用各种方法分类的连接属性类型，选择一项，点击【确定】按钮，视图中即显示出此种类型的连接属性情况。不同的仅是最后两项，选中后，对应会显示连接的局部坐标轴和指定给连接的车辆反应分量属性。

9.3.2 显示范围控制

SAP2000 中提供了显示范围的控制功能，能够通过指定坐标范围限制显示坐标范围内的内容。点击【视图】>【设置界限】命令，弹出设置限制对话框（图 9-19），通过对此对话框中的各项内容进行设置，视图中将显示设定在限制范围内的模型部分。对话框说明见表 9-10。

表 9-10

| | |
|----------|--|
| 平面绘制限制 | 显示选择的平面中的视图状态，并且可以在此图中通过框选的方式选择视图限制的范围 |
| 选择平面 | 选择平面绘制限制框中显示的平面 |
| 设置 X 轴限制 | 通过输入最大、最小两个 X 坐标值限制显示的视图范围，点击【显示全部】按钮，两个 X 坐标限制将变为模型中的最大和最小的 X 坐标值 |
| 设置 Y 轴限制 | 通过输入最大、最小两个 Y 坐标值限制显示的视图范围，点击【显示全部】按钮，两个 Y 坐标限制将变为模型中的最大和最小的 Y 坐标值 |
| 设置 Z 轴限制 | 通过输入最大、最小两个 Z 坐标值限制显示的视图范围，点击【显示全部】按钮，两个 Z 坐标限制将变为模型中的最大和最小的 Z 坐标值 |
| 忽略限制设置 | 选择此复选框，在设置限制对话框中的所有限制设置将被忽略，视图中显示全部模型范围 |

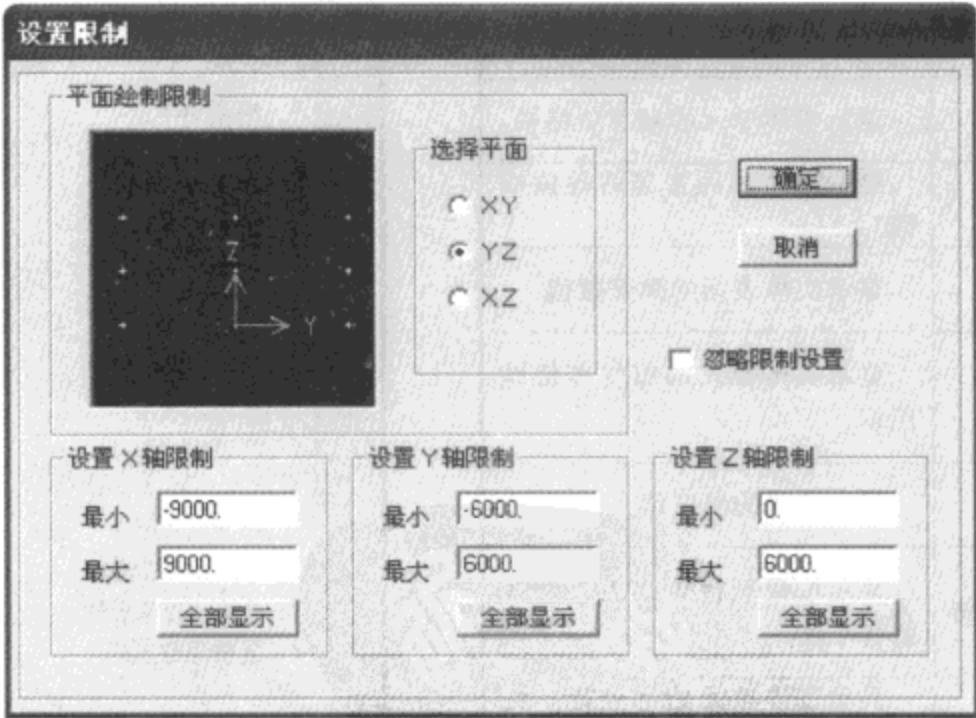



图 9-19 设置限制对话框

9.3.3 视图缩放控制


在模型的建模、编辑、分析设计结果查看过程中，视图的缩放是非常频繁的。SAP2000


中提供了多种缩放工具栏功能按钮。并且这些按钮在视图菜单中均有对应命令。

 **【橡皮筋缩放】**按钮：在视图窗中，按住鼠标左键拖拽矩形窗口局部放大。按一次按钮进行一次操作。

 **【恢复全视图】**按钮：点击此按钮视图居中显示全部内容。

 **【恢复前一步缩放视图】**按钮：点击此按钮恢复上一步缩放视图。

 **【单步放大】**按钮：每点击一次视图放大一步，默认步长 10%。

 **【单步缩小】**按钮：每点击一次视图缩小一步，默认步长 10%。

对于放大缩小的步长，SAP2000 中可以在选项菜单中设定，点击 **【选项】 > 【首选项】 > 【尺寸容差】** 命令，在弹出的尺寸/容差首选项对话框中，修改自动缩放步长一项指定一定的百分比数值给缩放步长。

9.4 颜色显示控制

在 SAP2000 中，工程师可以根据个人的需求对显示的颜色进行修改，方便个人的查看习惯。这些修改包括对不同类型构件的不同显示、输入输出结果的颜色显示设置等。通过对模型构件显示颜色、打印颜色、透明度以及分析结果颜色的编辑，使工程师可以通过不同颜色很方便地区分不同的构件以及其分析结果。

9.4.1 显示颜色控制

点击 **【选项】 > 【颜色】 > 【显示】** 命令，弹出指定颜色对话框（图 9-20）。对话框中一共有显示、输出两个选项卡，当前的选项卡为显示选项卡。

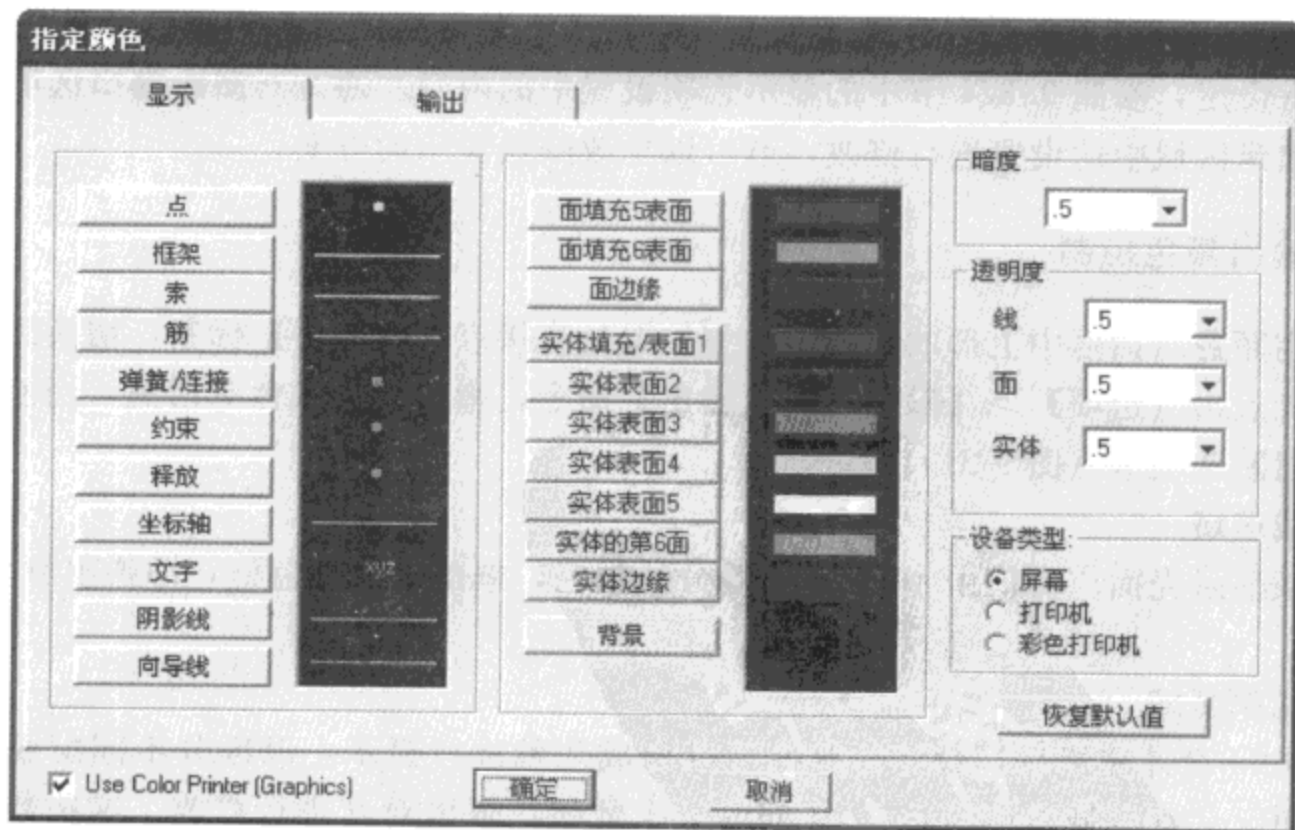


图 9-20 指定显示颜色对话框

颜色设置

对话框中左侧部分列出了各种类型构件的颜色显示，左键单击显示某种构件名称的按钮，将弹出颜色选择框，选择一种颜色，所有窗口中此类单元的显示颜色将改变为所选颜色。

暗度设置

SAP2000 把明暗度从 0 到 1 分为十个等级，通过设置 0~1 之间的一个数字，设置图形的暗度。“0”为最亮，“1”为最暗，默认为 0.5。只有当面单元和实体单元在填充显示时或者线单元在拉伸显示时，暗度的设置才有效。

透明度设置

SAP2000 把透明度从 0 到 1 分为十个等级，通过设置 0~1 之间的一个数字，分别设置线、面、实体单元的透明度。趋于“0”表示趋于不透明，趋于“1”表示趋于透明，默认均为 0.5。只有当面单元和实体单元在填充显示时或者线单元在拉伸显示时，透明度的设置才有效。

设备类型

选择在此对话框中所做设置内容控制的位置，可选择屏幕、打印机、彩色打印机。

默认设置

点击此按钮，此对话框中的所有设置还原为默认。

Use Color Printer (Graphics)

勾选表示使用彩色打印机。

对话框修改完成后点击【确定】，视图中相应类型的构件显示颜色将按照修改的模式发生改变。

SAP2000 中的颜色显示有多种显示方案，默认情况是按照对象类型区分的，工程师可以对其进行设定，参照 9.3.1 节中的显示选项设置中的内容。通过对激活窗口选项对话框中透过颜色显示区域中的设置进行修改，就可以更改颜色显示的方案。

9.4.2 输出颜色控制

在指定颜色对话框中上部的选项卡标签位置处直接点击【输出】标签，切换到输出颜色控制；或者点击【选项】>【颜色】>【输出】命令，弹出指定颜色对话框，当前的选项卡即为【输出】选项卡（图 9-21）。

等值线区域

本区域显示壳面应力值由小到大 15 等分的颜色，单击某个颜色框，即弹出颜色选择框，修改颜色。

交互比率区域

SAP2000 设计完毕后，设计的颜色可以分成几种进行显示，以区分不同配筋率或不同应力比的单元。此区域右侧显示 0~1 间的五个数字，可以对其进行修改，这些数字用来区分不同的配筋率或应力比的颜色显示，其含义即截面强度的利用率。注意这些数字必须按大小顺序输入。

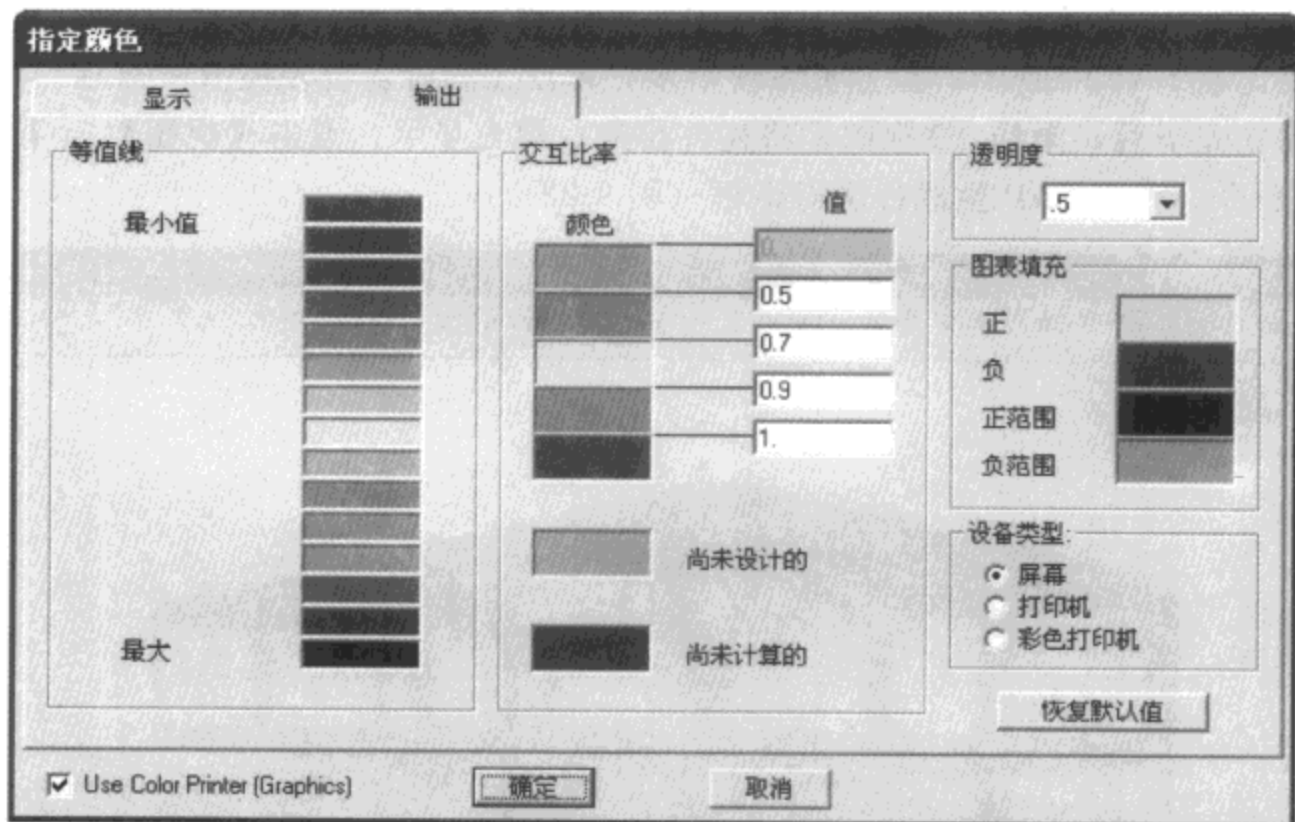


图 9-21 指定输出颜色对话框

下面的灰色表示尚未设计的构件，红色表示尚未计算的构件。

单击某个颜色框，即弹出颜色选择框，可以修改颜色。

透明度区域

SAP2000 把透明度从 0 到 1 分为十个等级，通过设置 0~1 之间的一个数字，设置单元的透明度。趋于“0”表示趋于不透明，趋于“1”表示趋于透明，默认为 0.5。

填充图表区域

此处显示的颜色为填充显示内力图时内力图中填充显示的颜色，区分正值、负值、正范围、负范围的内力颜色。正值、负值用于内力显示，正范围、负范围用于多值荷载组合的内力图输出。单击某个颜色框，即弹出颜色选择框，可以修改颜色。

设备类型区域

选择在此对话框中已设置过的内容的作用位置，可选择屏幕、打印机、彩色打印机。

恢复默认值

点击此按钮，此对话框中的所有设置还原为默认。

Use Color Printer (Graphics)

勾选表示使用彩色打印机。

9.5 Open GL 视图功能

SAP2000 中提供了根据建立的模型结构生成透视效果图的功能，这样工程师就可以很直观地从任意的角度查看模型，并且可以对透视图的光线进行调整，使视图达到最佳效果。

在 Open GL 视图中查看模型可以看出模型的实际形状和各个构件的具体截面，并且其视图查看速度要比在 SAP2000 中的拉伸视图快很多，方便工程师各种模型查看需求。

模型建立完毕后，激活 3D 视图，将构件拉伸、填充显示。点击【视图】>【生成 Open GL 视图】命令，弹出 SAP 生成视图对话框（图 9-22）。

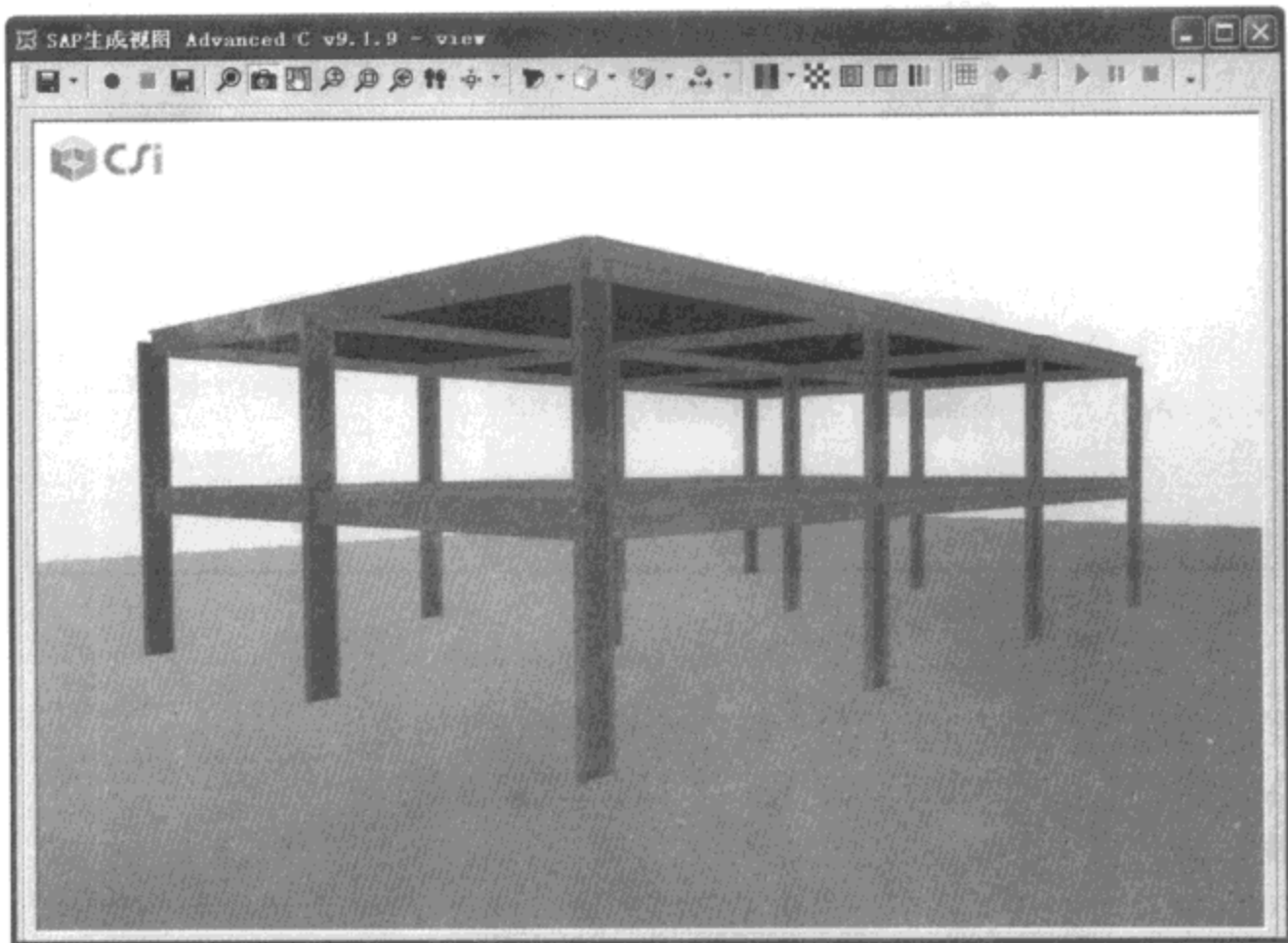


图 9-22 SAP 生成视图对话框


对话框显示出了 SAP2000 生成的视图，在此对话框中可以对视图的背景颜色和光线渲染进行调整，生成渲染透视图；并且可以通过录制功能，生成三维模型渲染视图动画，保存为 AVI 格式的文件。Open GL 视图功能的所有控制按钮均在对话框的上方，下面对各个命令分别进行介绍。

 **保存图像**：将图像保存为 BMP 位图文件。下拉菜单有三项可选择：

Entire Form：将整个对话框窗口保存为图像。

Plot Only：仅将对话框内的图像保存，不包括对话框的标题栏和工具栏。

User Region：仅保存工程师指定的区域。操作方法：点击此命令后，在弹出的保存对话框中输入图片名称，指定保存路径，按【确定】键后，在 Open GL 视图框中按住鼠标左键选择区域，随后弹出保存确认对话框，点击【确定】完成保存。


 **开始捕捉视频**：点击此按钮，开始录制动画，此时对视图的一系列放大、缩小、移动、旋转等操作，都将被录制下来。


 **停止捕捉视频**：点击此按钮，录制动画结束。


 **保存视频**：保存刚录制的视图动画，点击按钮弹出 OpenGL AVI 选项对话框


(图 9-23)。

在此对话框中指定保存路径，选择勾选两个 AVI 选项，指定 AVI 视频的持续时间，点击【确定】生成 AVI 视频文件。

 **重置和刷新视图**：点击此按钮，视图恢复显示到最初的状态。


 **移动视点**：按下此按钮后，在图上拖动鼠标，移动视角，模型保持中心点位置不变。

 **平移**：按下此按钮，在图上拖动鼠标，平移模型视图。


 **放大/缩小**：按下按钮，在图上拖动鼠标。以鼠标拖动起点为圆心，向上拖动为放大，向下拖动为缩小。

 **橡筋缩放**：按下按钮，在图中按住鼠标左键框选部分图形放大。


 **恢复前次视图**：点击恢复前次视图。


 **Walk**：按下此按钮，按住鼠标在图上拖动，视图将按照一定方向移动，仿佛观察者在运动中观察模型建筑，此时显示的箭头表示观察者行走的方向。

 **侧视图**：四种侧视图可供选择，X 方向的两个侧面和 Y 方向的两个侧面。


 **光源控制**：允许工程师从顶和底或从八个不同指南针方向选择光源。此选项不影响视图中模型透视和朝向。

 **修改亮度**：在亮、柔、黑之间增加或减小阴影效果。

 **修改表面材质**：在下拉菜单中选择应用阴暗、中等、发亮对象表面或高级材料设置。当选择高级材料设置时，显示高级材料设置对话框，可在此对话框中调节滑动条调整亮度及其他显示组成。

 **修改动态移动速度**：在下拉菜单中选择一种视图移动速度，有慢、中、快三种速度可供选择。

 **改变颜色**：点击弹出背景颜色控制对话框，对视图背景颜色进行指定。


 **表面贴图**：点击弹出纹理绘制设置对话框，可以修改对象纹理和背景纹理的显示，可以对混凝土和钢材的纹理分别进行指定。

 **透明度**：按下此开关，模型显示为透明。

 **暗度**：按下此开关，模型具有一定的暗度。

 **阻尼旋转**：按下此开关，模型视图具有阻尼旋转效果。

 **显示地面**：按下此开关，模型视图将显示地平面。

 **显示反射**：为模型视图增加反射效果。

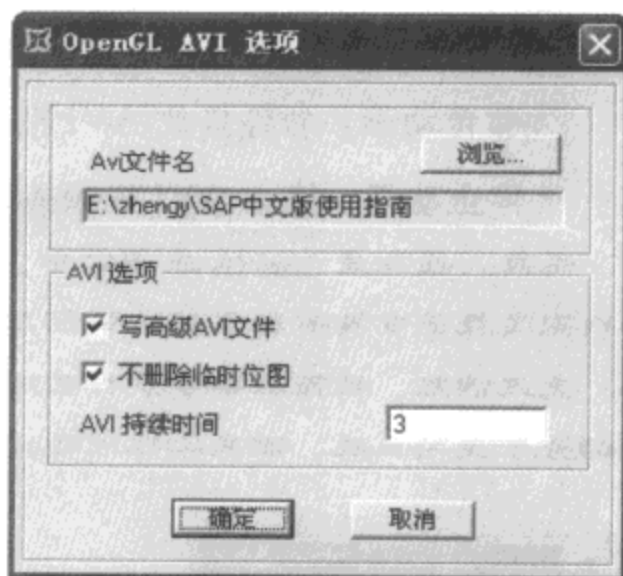


图 9-23 OpenGL AVI 选项对话框

- 显示阴影：为模型视图增加阴影效果。
- 播放动画：播放保存的 AVI 视频。
- 暂停动画：暂停播放 AVI 视频。
- 停止动画：停止 AVI 视频播放。

注意：在生成 Open GL 视图之前，首先要将模型视图指定为拉伸、填充显示，这样生成的模型透视图才具有真正的渲染图效果。在 Open GL 视图对话框中，通过调整视角、放大缩小、光线调整、表面渲染等多种功能，可以生成非常美观的渲染图。通过动画的制作，对结构的查看更为直观，满足工程师的多方面要求。

9.6 生成 AVI 视频功能

SAP2000 对模型进行分析之后，在模型的变形图中，可以通过动画的方式显示模型的变形视图，直观的查看荷载对结构模型的作用。这种动画不仅可以在程序中进行查看，还可以使用 SAP2000 提供的生成视频动画的功能，保存 AVI 格式的视频，用播放软件进行查看。生成的动画包括两种：多步动画视频和循环动画视频。

9.6.1 多步动画视频

多步动画视频，是用来显示结构在运行时程分析后的变形情况。

注意：为了产生最好的效果，在生成多步动画视频时，要保证模型所有的视图都处于非变形状态。

操作步骤如下：

首先定义时程分析工况，进行结构分析计算（必须运行时程分析），计算完毕后，点击【文件】>【生成视频】>【生成多步动画视频】命令，弹出保存文件对话框，指定保存文件名称（AVI 格式）和路径，点击【保存】按钮。弹出多点视频文件生成对话框（图 9-24）。对话框说明见表 9-11。

表 9-11

| | |
|---------|--|
| Avi 文件名 | 显示输出的 Avi 文件路径和名称，点击【浏览】按钮，可以对文件的保存路径和名称进行修改 |
| 出图类型 | 选择输出视频的类型是时程工况还是多步荷载工况 |
| 分析工况数据 | 选择输出的分析工况，设定开始、结束时间，以及指定时间间隔，控制图表的输出 |
| 显示选项 | 控制为变形线框架、三次曲线、加速度作用下地面绝对位移显示，设定变形图放大系数 |
| AVI 选项 | 设置生成 AVI 视频的具体参数，包括每秒帧数、帧尺寸（像素） |

点击【确定】按钮，生成 AVI 视频。

9.6.2 循环动画视频

SAP2000 对于各种变形图状态下的图形，均可以按照变形图形的情况，生成循环的 AVI 视频动画。

运行结构分析后，将当前视图切换到变形视图中，点击【文件】>【生成视频】>【生成循环动画视频】命令，弹出保存文件对话框，指定保存文件名称（AVI 格式）和路径，点击【保存】按钮。弹出生成动画视频文件对话框（图 9-25）。对话框说明见表 9-12。

表 9-12

| | |
|---------|--|
| Avi 文件名 | 显示输出的 Avi 文件路径和名称，点击【浏览】按钮，可以对文件的保存路径和名称进行修改 |
| AVI 选项 | 设定输出的 AVI 视频文件选项，包括动画时间、动画时间内的循环周期数、图形像素 |

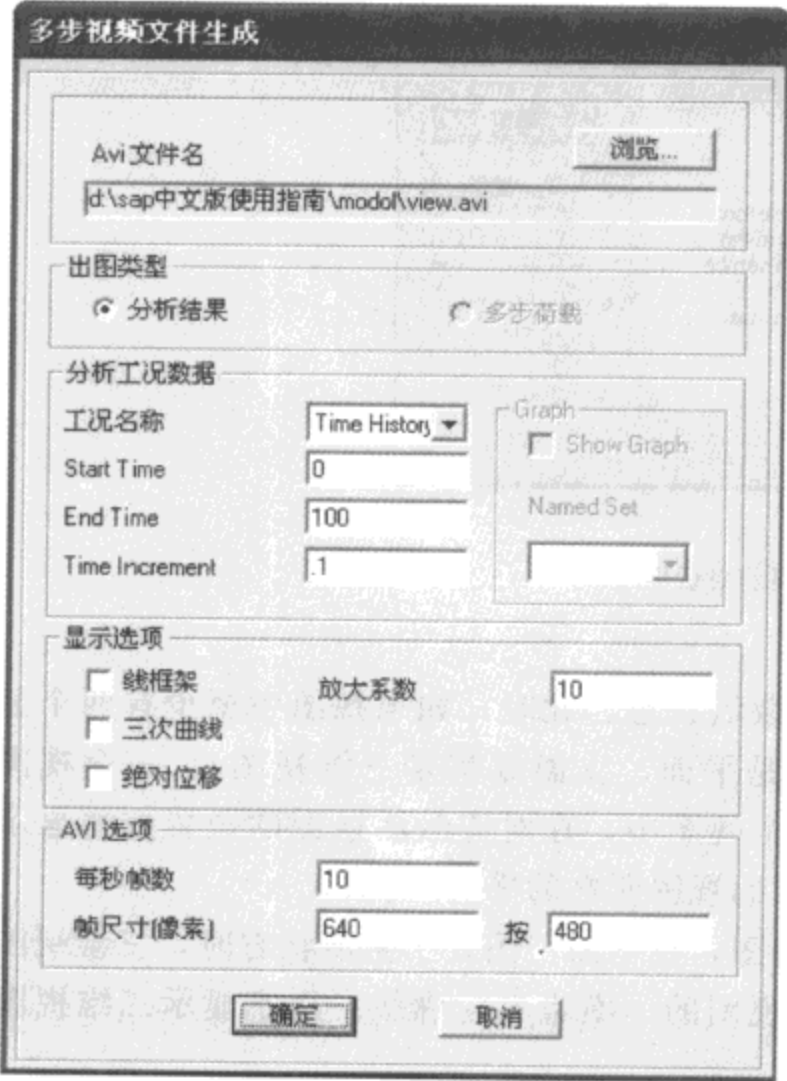


图 9-24 多点视频文件生成对话框

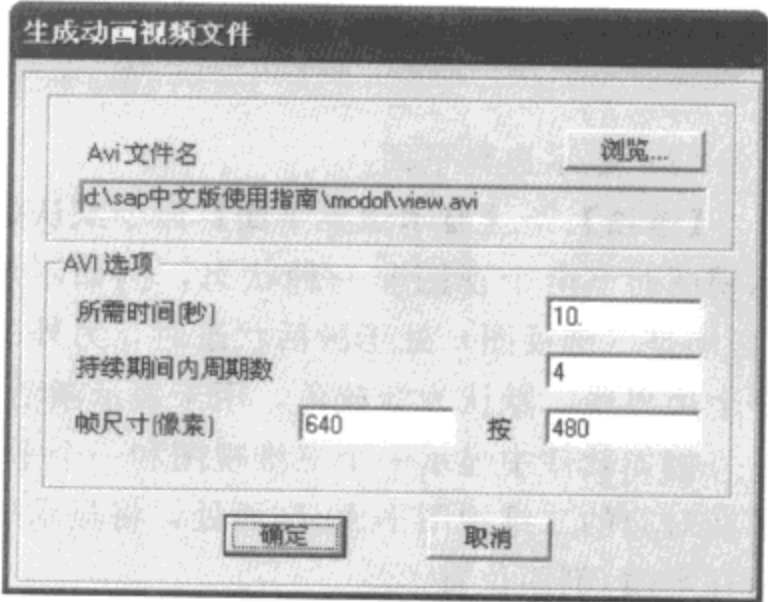


图 9-25 多点视频文件生成对话框

点击【确定】按钮，生成 AVI 视频。

9.7 其他基本视图设置功能

除了上述的视图功能外，SAP2000 还提供了其他多种视图设置的功能，这些视图的设置功能基本上集成于选项菜单中，下面针对选项菜单中的这些视图设置功能进行介绍。选项菜单中的命令在激活状态时，命令前面显示为一个勾选符号。

(1) 自动刷新视图

选项菜单中的【选项】>【自动刷新】命令默认处于激活状态，此时视图会随着工程师

对模型的编辑操作，随时刷新视图。如果模型非常大，建议把自动刷新的功能关闭，这样可以缩短模型编辑过程中花费的时间。关闭只需点击【选项】>【自动刷新】命令，命令前面的勾选符号将消失，此时要刷新视图，需要点击【视图】菜单的【刷新窗口】或【刷新视图】命令，激活【刷新视图】命令，再次点击【选项】>【自动刷新】命令即可。

(2) 在启动时显示提示

【选项】>【在启动时显示提示】命令默认处于激活状态。此时每次打开程序，会显示每日提示对话框，如图 9-26 所示，如果要关闭每日提示窗口，只需点击此命令，取消激活。

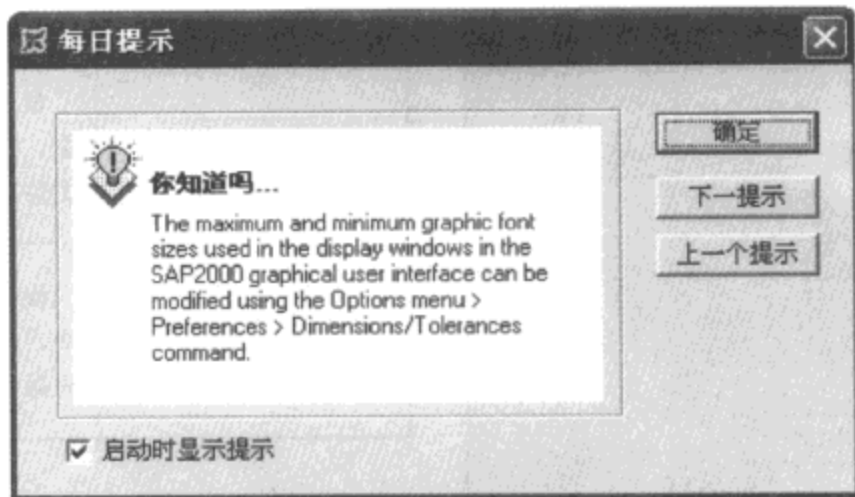


图 9-26 每日提示对话框

(3) 显示边界平面

【选项】>【显示边界平面】命令默认处于激活状态。此时，如果视图中至少有两个显示视图时（两个视图非一种状态，例如不可都是平面、立面或都是三维视图），一个视图（必须是二维视图）处于激活状态时，另外的一个视图中，在对应激活视图的位置处将显示一个边界线，默认为淡蓝色，用于表示激活窗口的视图所在的平面/剖面。

例如软件中显示一个三维视图和一个平面视图，在平面视图处于激活状态时，三维视图中在对应的二维视图平面/剖面处，将显示二维视图的一圈边界轮廓线，用于显示二维视图所在平面/剖面位置。

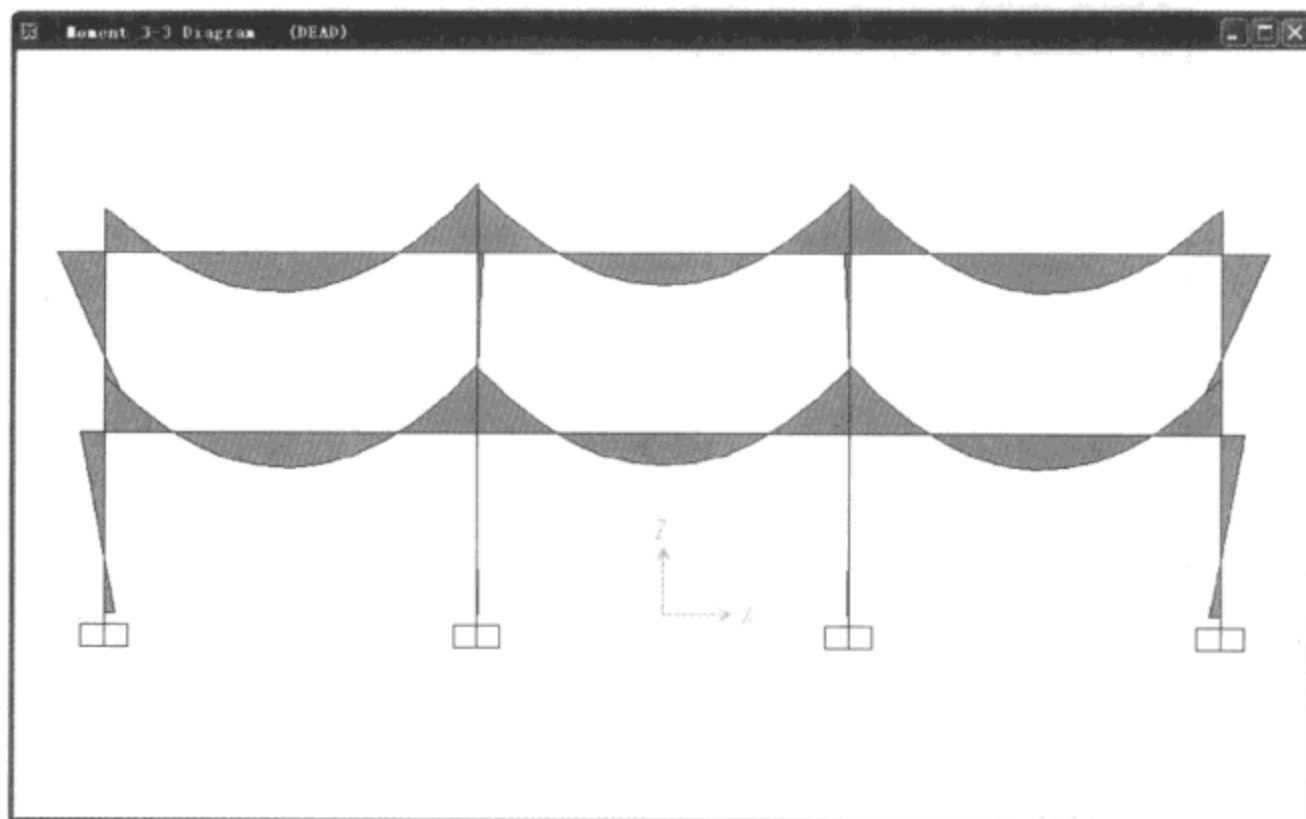
(4) 弯矩图在受拉边

【选项】>【弯矩图在受拉边】命令默认处于激活状态。在图像上显示弯矩图时，弯矩图显示在构件的受拉边，见图 9-27a)。如果点击【选项】>【弯矩图在受拉边】命令，使其处于非激活状态，将在构件的受压边显示弯矩图，见图 9-27b)。再次点击此命令，将还原为激活状态。

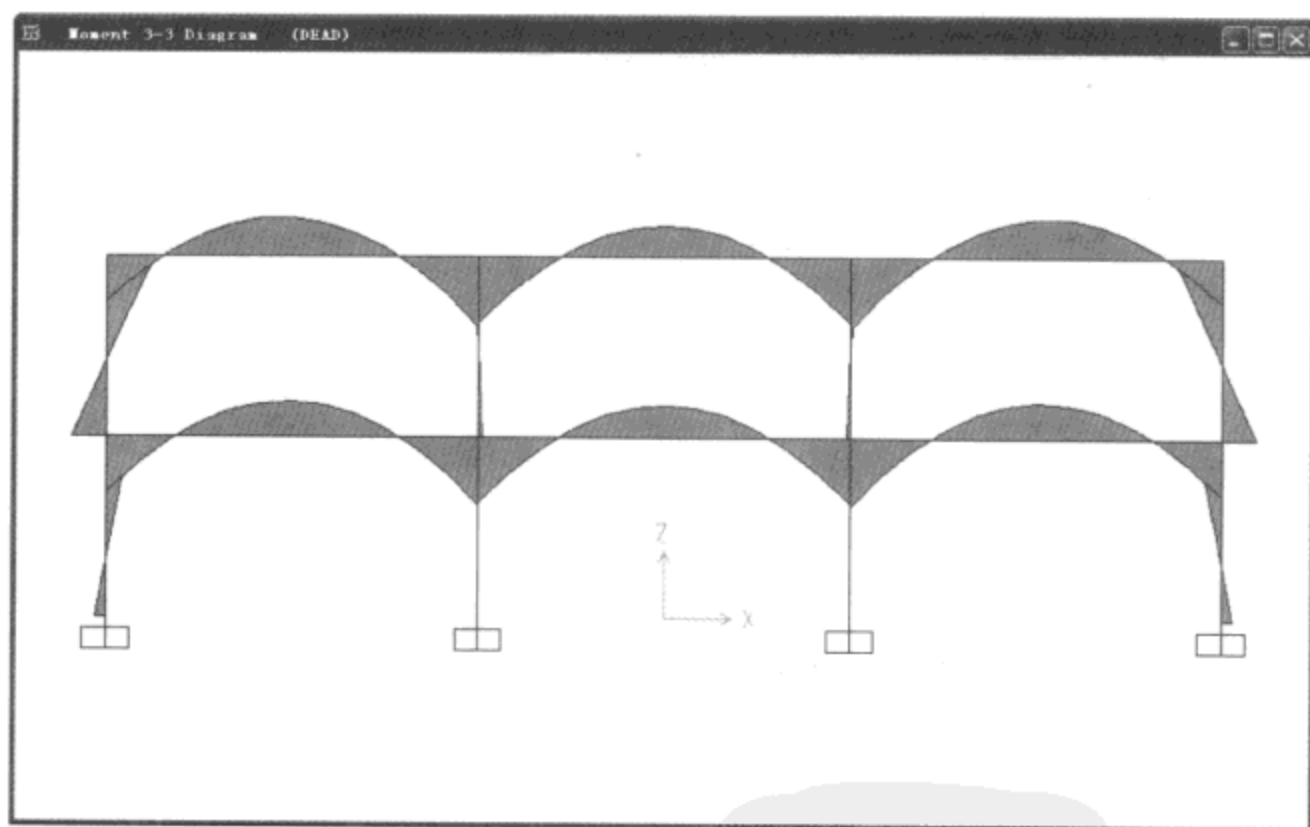
(5) 三维向上视图方向

在菜单【选项】>【三维向上视图方向】中，可以选择在三维视图显示时，显示向上的坐标轴，即在 X、Y、Z 坐标轴中选择一个作为向上显示的坐标轴。可以在三个坐标轴中进行切换选择，例如，要指定向上的坐标轴为 Y 轴，点击【选项】>【三维向上视图方向】>【Y】命令即可（图 9-28）。

(6) 显示浮动属性窗口



a)



b)

图 9-27 弯矩图显示

a) 弯矩图显示在受拉边; b) 弯矩图显示在受压边

【选项】>【显示浮动属性窗口】命令默认处于激活状态。这表示，在绘制建模时，点击【绘制对象】命令（线、面等所有对象），会弹出浮动属性窗口，可以修改绘制的构件属性。点击【选项】>【显示浮动属性窗口】命令，则此命令处于非激活状态，在进行构件绘制时，不会再显示浮动属性窗口。再次点击此命令，此命令被激活。

(7) 滚动时显示结果值

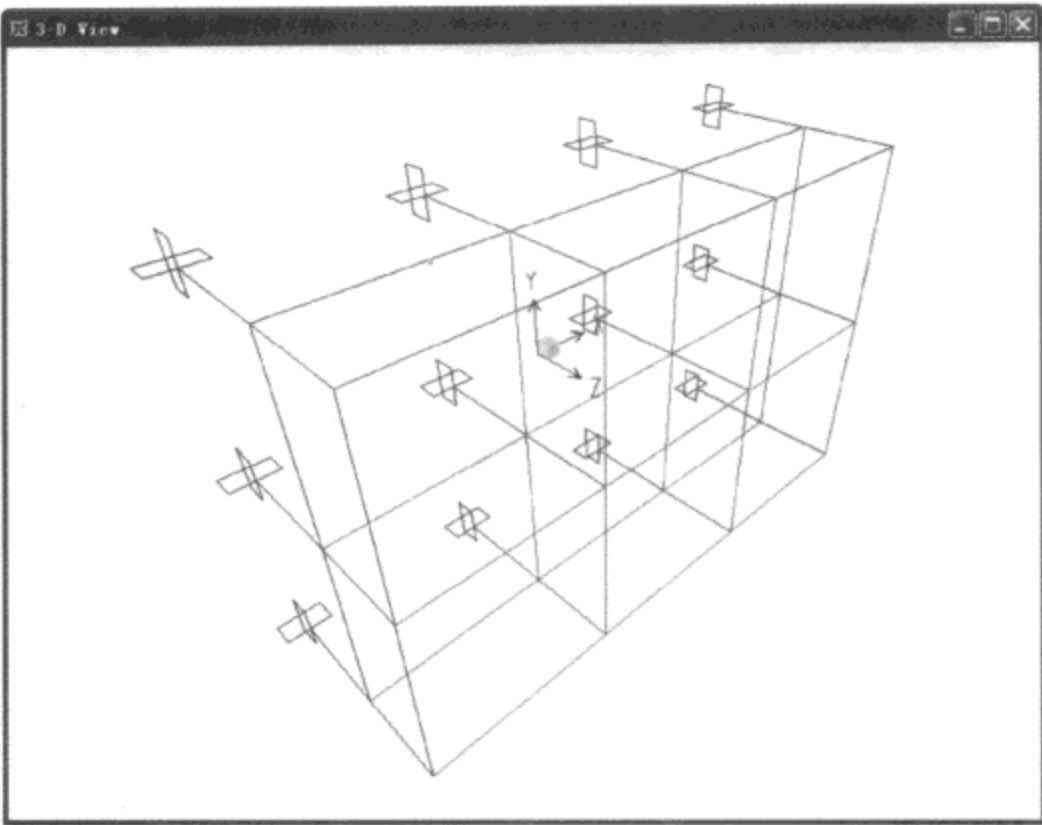


图 9-28 Y轴向上的三维视图

【选项】>【滚动时显示结果值】命令默认处于激活状态。这表示，分析结束后，在结构变形图显示状态下，移动鼠标到结构某点上，将显示点的变形值（平移和转动变形）。点击【选项】>【滚动时显示结果值】命令，则此命令处于非激活状态，在变形图上移动鼠标，不再显示点的变形值。再次点击此命令，此命令被激活。

(8) 增强型图形

默认的 SAP2000 视图均处于经典视图模式，非 OpenGL 透视图。

在经典视图下点击【选项】>【增强型图形】命令，弹出增强型图形选项对话框（图 9-29）。对话框说明见表 9-13。

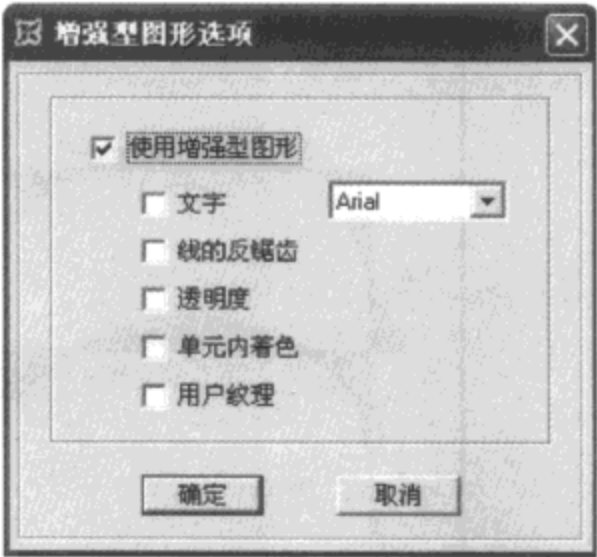


图 9-29 增强型图形选项对话框

表 9-13

| | |
|---------|------------------------------|
| 使用增强型图形 | 勾选此项表示使用增强型图形的设置 |
| 文字 | 勾选此项后，在后边的文字选择下拉菜单中选择显示使用的文字 |
| 线的反锯齿 | 使用此项，线的显示将具有立体感，更圆润 |
| 透明度 | 使模型视图的显示具有透明度的效果 |
| 单元内着色 | 勾选此项，使单元内部颜色显示更加美观 |
| 用户纹理 | 显示工程师指定的纹理 |

9.8 SAP2000 中的 OpenGL 视图

SAP2000 中新增了将视图显示为 OpenGL 透视图的功能，要在透视图中取得较好的效果，建议将对象的拉伸视图和对象填充显示全部打开。然后点击【选项】>【改变到 OpenGL 图像】命令，视图将切换到透视图的效果（图 9-30）。

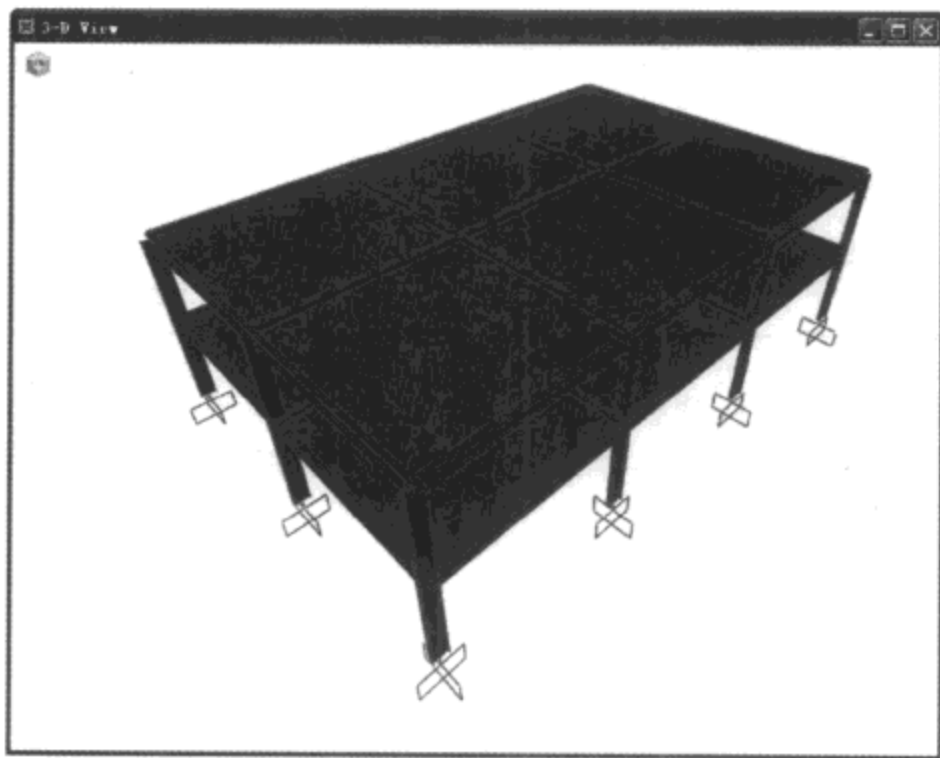


图 9-30 OpenGL 透视图

如果要对 OpenGL 视图进行一定的调整，点击【选项】>【增强型图形】命令，弹出高级 OpenGL 选项对话框（图 9-31）。对话框说明见表 9-14。



图 9-31 高级 OpenGL 选项对话框

表 9-14

| | |
|---------------------|-----------------------------|
| 显示反射 | 在透视图显示地面的反射 |
| 显示地面 | 显示地平面 |
| 显示阴影 | 显示结构的阴影 |
| Enable Lighting | 开启灯光效果 |
| 反锯齿 | 显示结构线型的反锯齿效果 |
| 激活高度缓冲 | 开启透视图的高度缓冲作用 |
| 带阴影背景 | 使图形背景带阴影的效果 |
| Enable Transparency | 开启透明度的效果，可以使用色彩透明和纯透明两种效果选项 |

工程师可以通过对 OpenGL 透视图的控制，使视图达到最好的可视化效果，使图形的查看更加美观。如果要切换回经典视图状态，点击【选项】>【改变到经典视图命令】即可。



第10章

快速建模及导入导出

SAP2000 中提供了很多快速建模的功能，为一些典型的结构模型提供了简便快捷的建模手段。例如通过已有模板建立模型、从既有的模型文件读取参数、从其他软件导入轴网或模型文件等功能。SAP2000 模型也可导出生成多种数据文件格式和其他结构及绘图软件接口，对于模型计算分析设计的结果也有简便快捷的导出查看方式。本章将详细介绍 SAP2000 中模型的快速建立和模型数据的导入导出功能。

10.1 模板建模功能

SAP2000 中提供了一系列结构类型的快速建模模板，对于较为规则的模型的建立可以从模板建模开始，然后再根据需要对模型进行修改。

10.1.1 新模型初始化模板

在 SAP2000 中点击【文件】>【新模型】命令，弹出新模型对话框（图 10-1）。对话框中的上面新模型初始化区域中有两个选项，含义见表 10-1：

表 10-1

| | |
|----------------|--|
| 从默认（包括单位）初始化模型 | 程序生成的模型采用默认的基本参数设置，并可以在建模过程中修改。 在后面的单位选择下拉菜单中选择模型的基本单位，以后切换单位也将转化为基本单位，并且每次模型均以基本单位打开 |
| 从现有文件初始化模型 | 选择此项，程序使用已有模型的基本参数和单位定义，在点击对话框下面的模板后，将弹出选择框，选择一个已有的模型 |

对话框的下面部分是选择模板区域，列出程序提供的初始化模板，点击某个模板，弹出各模板结构的具体参数定义对话框，定义各类结构模型。下面分别介绍各种模板下的模型建

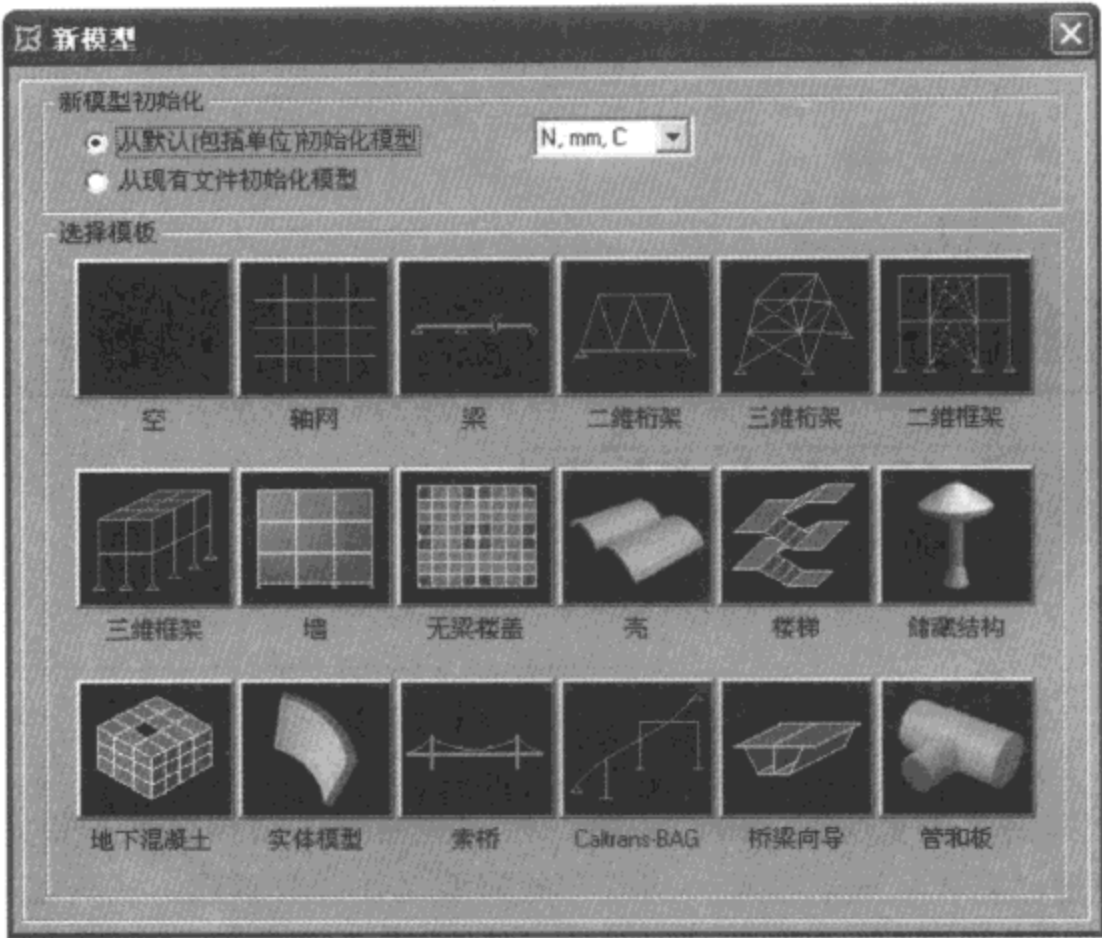


图 10-1 新模型对话框

立过程（其中 Caltrans-BAG、桥梁向导、管和板在本书后面会单独成章介绍，这里不再赘述）。

(1) 空模型

点击此项生成一个空的模型，模型中只有 XYZ 三个坐标轴，使用 SAP2000 提供的各种建模功能直接建立模型。

(2) 轴网

点击此项，弹出新坐标/轴网系对话框。坐标系的新建在本书前面部分坐标系与轴网一章中已作介绍，这里不在赘述。

(3) 梁

点击此项，弹出梁对话框（图 10-2）。对话框说明见表 10-2。

对话框左边显示梁的预览图，右边为对梁模型定义区域：

表 10-2

| | |
|-------|---|
| 连续梁尺寸 | 定义连续梁的跨数和跨长，勾选【使用定制轴网间距和原点定位】一项后，点击【编辑轴网】按钮，弹出定义轴网数据对话框，通过对 X 方向轴网定义，控制梁的跨数和跨度，程序仅在 X 轴上生成梁对象，对其他方向的轴网修改只生成轴网，不生成构件 |
| 截面属性 | 选择程序已有截面赋给生成的梁模型 |
| 约束 | 勾选此项表示对梁端施加约束 |

以程序默认的参数定义，定义梁模型完毕后，点击【确定】按钮，自动生成梁模型，显示如图 10-3。

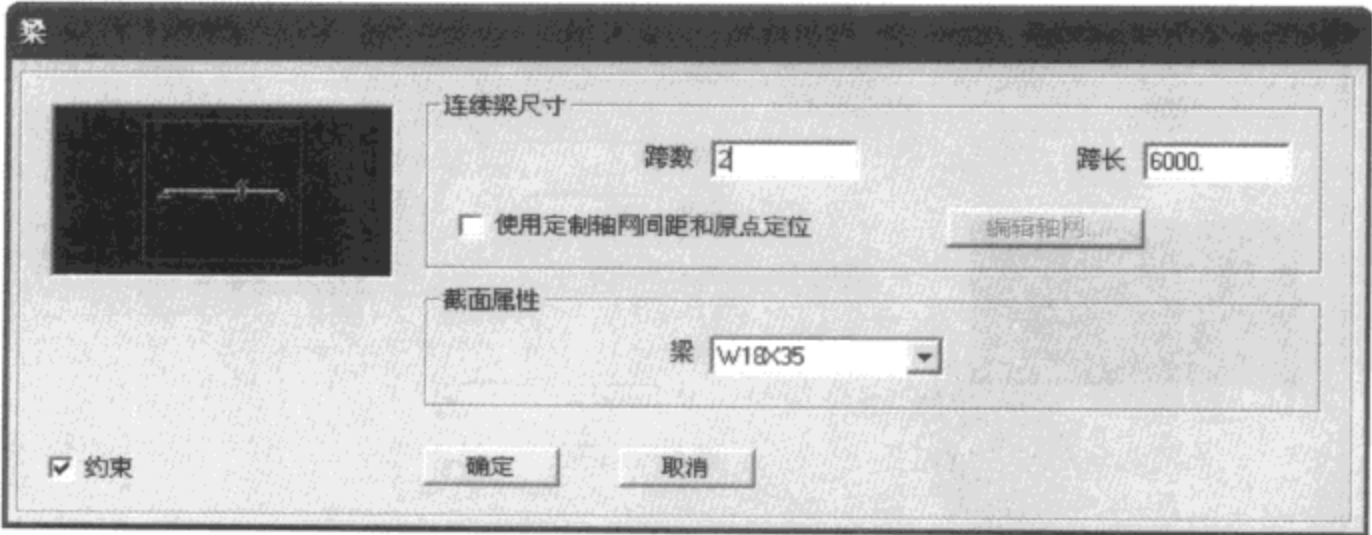


图 10-2 新建梁对话框

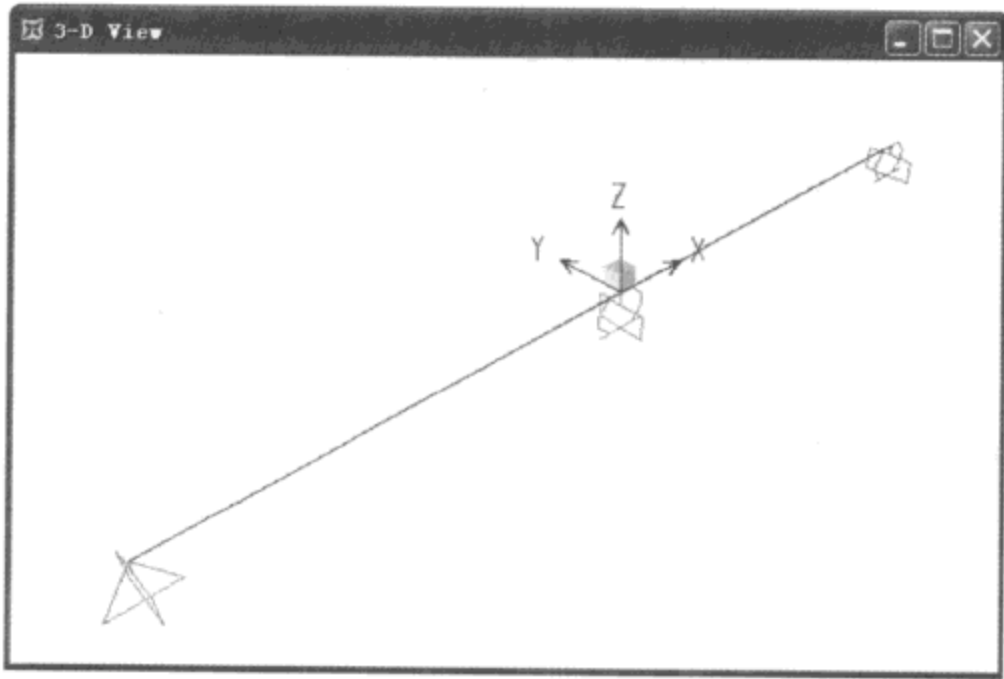


图 10-3 梁模型视图

(4) 二维桁架

此项用于生成二维桁架，点击此项，弹出二维桁架对话框（图 10-4）。

对话框左上方的二维桁架类型下拉菜单中列出三种二维桁架：**Sloped Truss**（斜桁架）、**Vertical Truss**（垂直桁架）、**Pratt Truss**（普拉特桁架）。通过点击选择桁架类型，同时此下拉菜单的下方预览图中将显示对应的桁架形状。

对话框右边是两个参数输入区域，对应不同类型的桁架将显示不同的参数定义框，**Sloped Truss**（斜桁架）、**Vertical Truss**（垂直桁架）的参数基本一致，如表 10-3 所示。

表 10-3

| | |
|------------------|---|
| 斜桁架尺寸/ 垂直桁架尺寸 | 定义桁架的分割数、分格长度和层高，勾选【使用定制轴网间距和原点定位】一项后，点击【编辑轴网】按钮，弹出定义轴网数据对话框，通过对 X、Z 坐标的修改，定义桁架尺寸 |
| 截面属性 | 选择程序已有截面赋给弦杆和支撑杆 |
| 约束 | 勾选此项表示对桁架两端施加约束 |

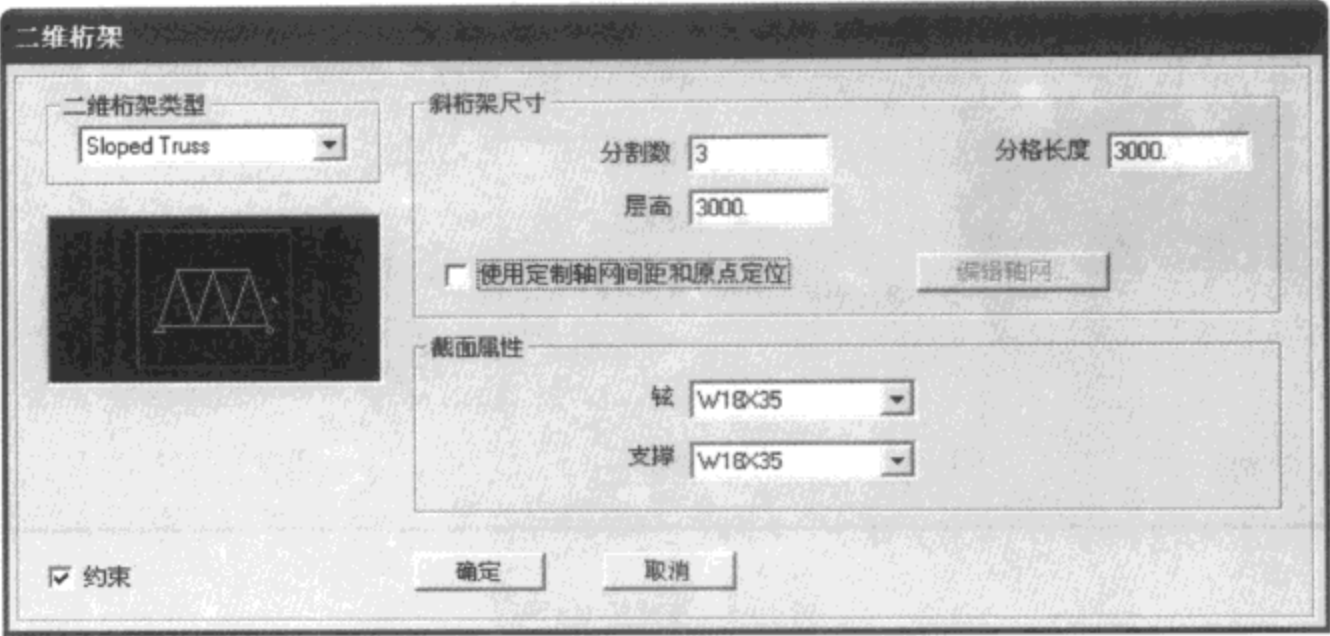


图 10-4 新建二维桁架对话框

选择 Pratt Truss 后，二维桁架对话框发生变化，如图 10-5 所示。对话框说明见表 10-4。

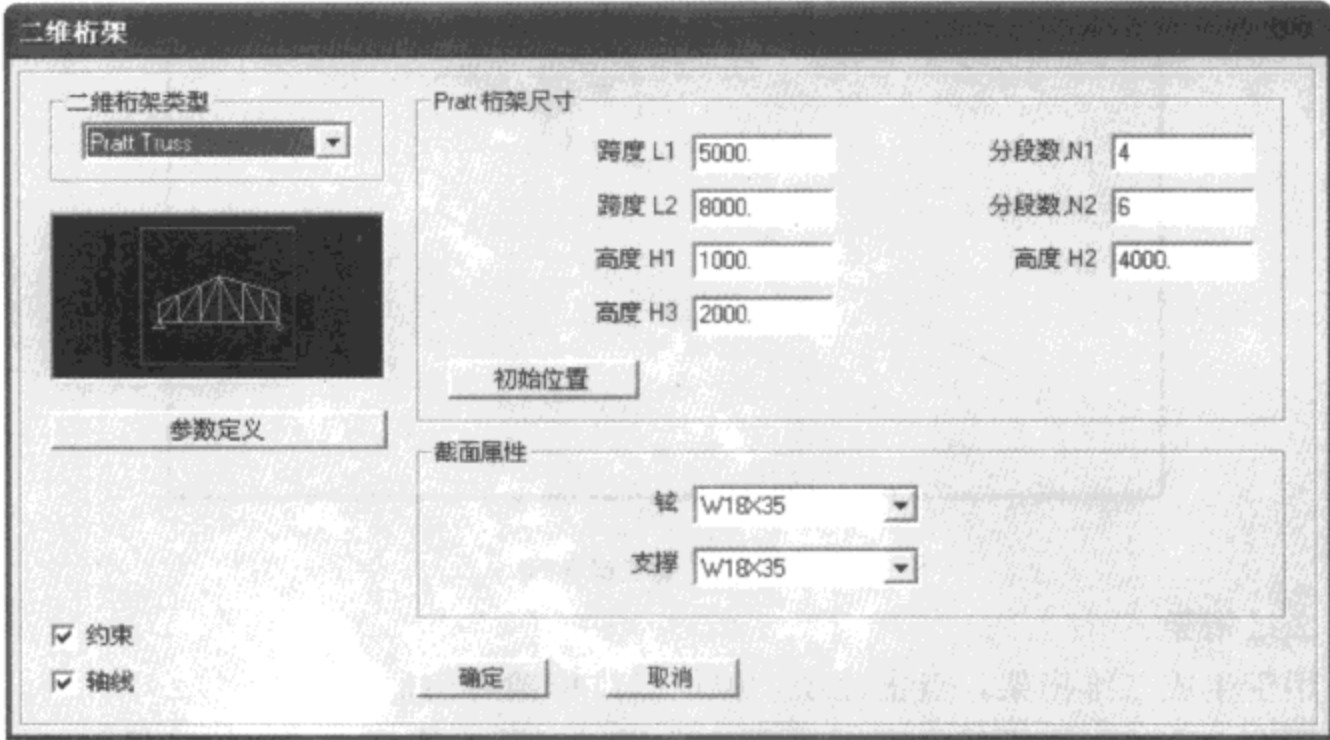


图 10-5 普拉特桁架对话框

表 10-4

| | |
|------------|------------------------------|
| 参数定义 | 点击此按钮，弹出 Pratt 桁架各参数含义对话框 |
| Pratt 桁架尺寸 | 在此区域内给 Pratt 桁架各参数赋值 |
| 初始位置 | 点击弹出坐标系对话框，输入坐标控制桁架初始位置和旋转角度 |
| 截面属性 | 选择程序已有截面赋给弦杆和支撑杆 |
| 约束、轴线 | 控制是否对桁架添加约束、是否生成轴线 |

以图 10-5 中定义的平面桁架参数定义为例，我们建立一个二维桁架，点击【确定】按钮，自动生成二维桁架模型，如图 10-6 所示。

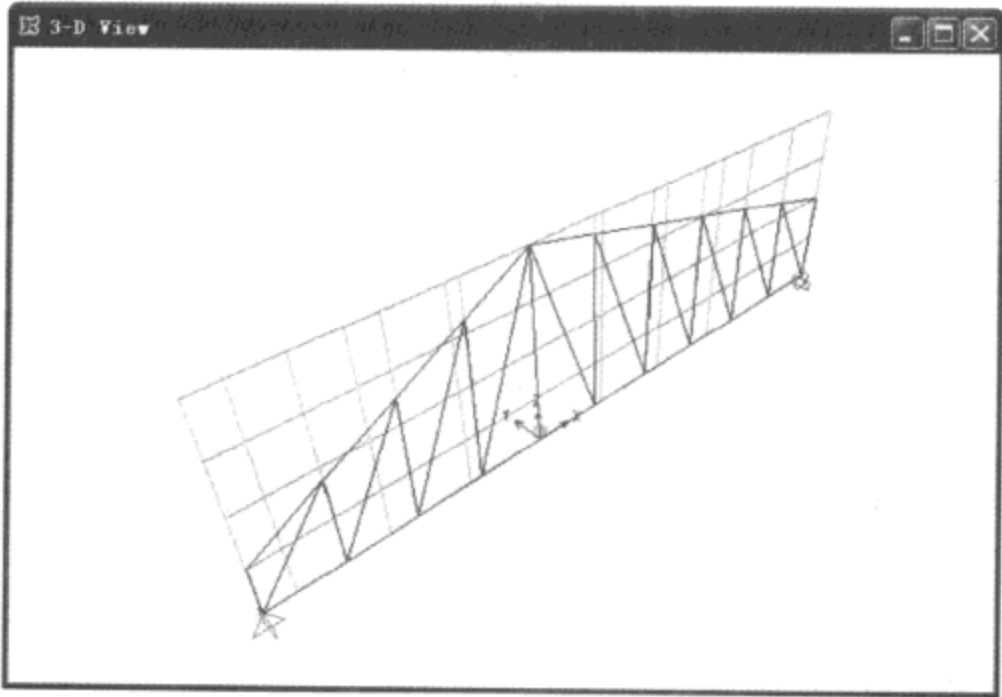


图 10-6 普拉特桁架视图

(5) 三维桁架

点击此项弹出三维桁架对话框（图 10-7）。

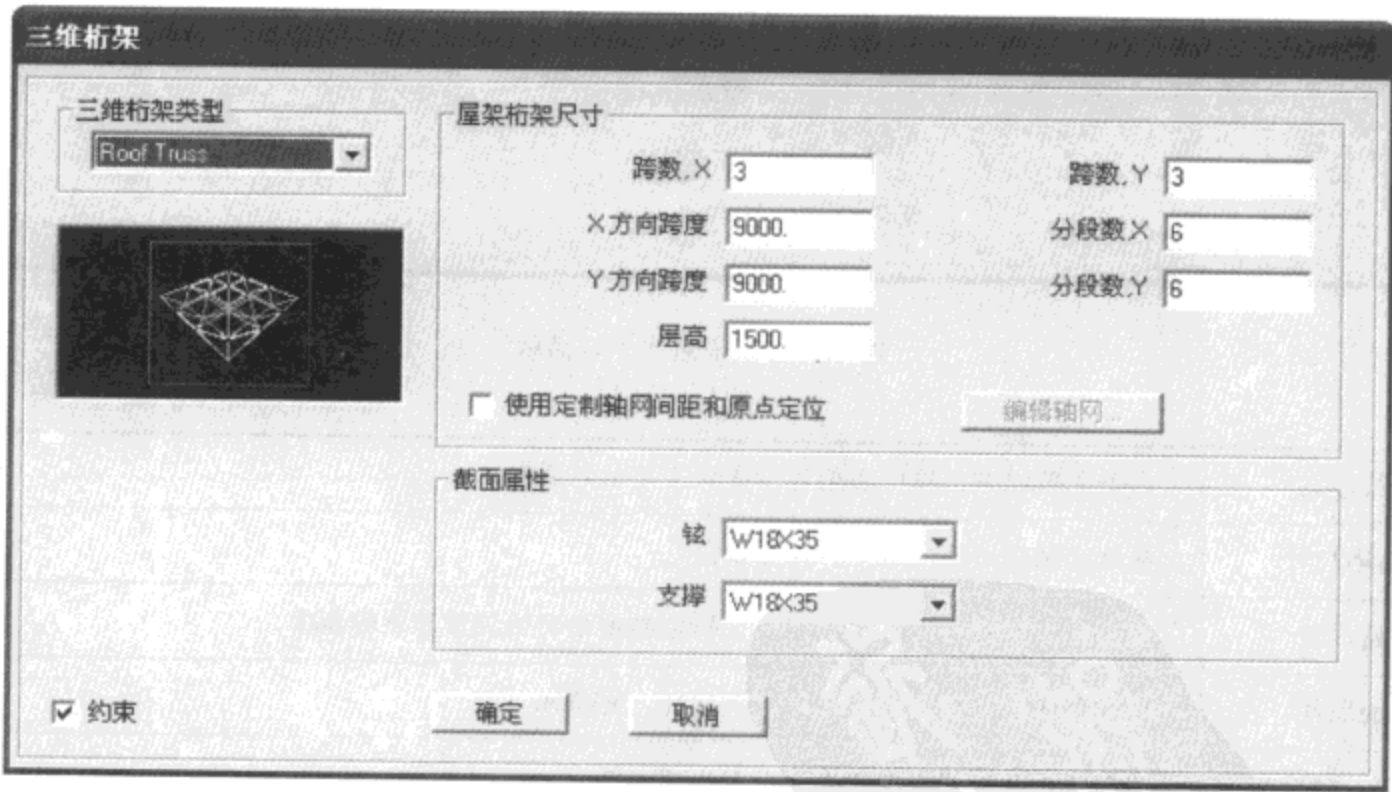


图 10-7 新建三维桁架对话框

在对话框左上的三维桁架类型下拉菜单中列出了屋架（Roof Truss）、四种输电塔架（Transmission Tower 1、2、3、4）和拉索式输电塔架（Guyed Tower）。

对于屋架的定义，右边的两个定义区域含义如表 10-5 所示。

表 10-5

| | |
|--------|---|
| 屋架桁架尺寸 | 定义屋架跨数、跨度、分段数和层高，勾选【使用定制轴网间距和原点定位】一项后，点击【编辑轴网】按钮，弹出定义轴网数据对话框，通过对 X、Y 坐标的修改，定义桁架尺寸 |
| 截面属性 | 选择程序已有截面赋给弦杆和支撑杆 |
| 约束 | 选择是否对屋架施加约束 |

选择四种输电塔架后，三维桁架对话框将发生改变。选择输电塔架 1 后，三维桁架对话框如图 10-8 所示，对话框说明见表 10-6。选择拉索式输电塔架后，三维桁架对话框如图 10-9 所示。

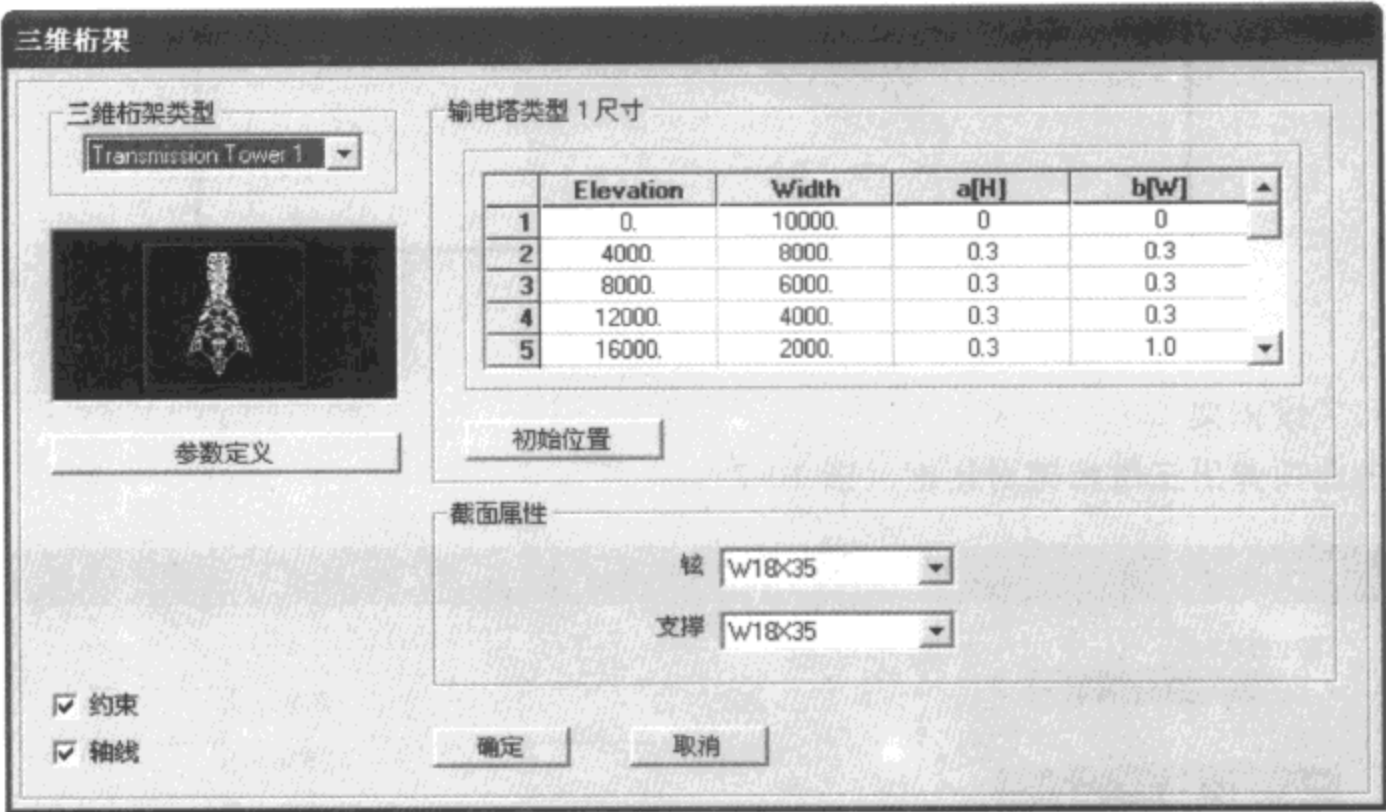


图 10-8 输电塔架 1 对话框

表 10-6

| | |
|-------|------------------------------|
| 参数定义 | 点击此按钮弹出输电塔架各参数含义显示对话框 |
| 输电塔尺寸 | 在此区域内给输电塔架各参数赋值 |
| 初始位置 | 点击弹出坐标系对话框，输入坐标控制桁架初始位置和旋转角度 |
| 截面属性 | 选择程序已有截面赋给弦杆、支撑杆、索单元 |
| 约束、轴线 | 控制是否对桁架添加约束、是否生成轴线 |

参数定义完毕，点击【确定】按钮，自动生成三维桁架模型。

我们以建立一个三维输电塔类型 1 的模型为例，参数的定义以图 10-9 中所示的定义为准，即使用程序默认的三维输电塔模型数据，单击【确定】按钮，模型建立，如图 10-10 所示。

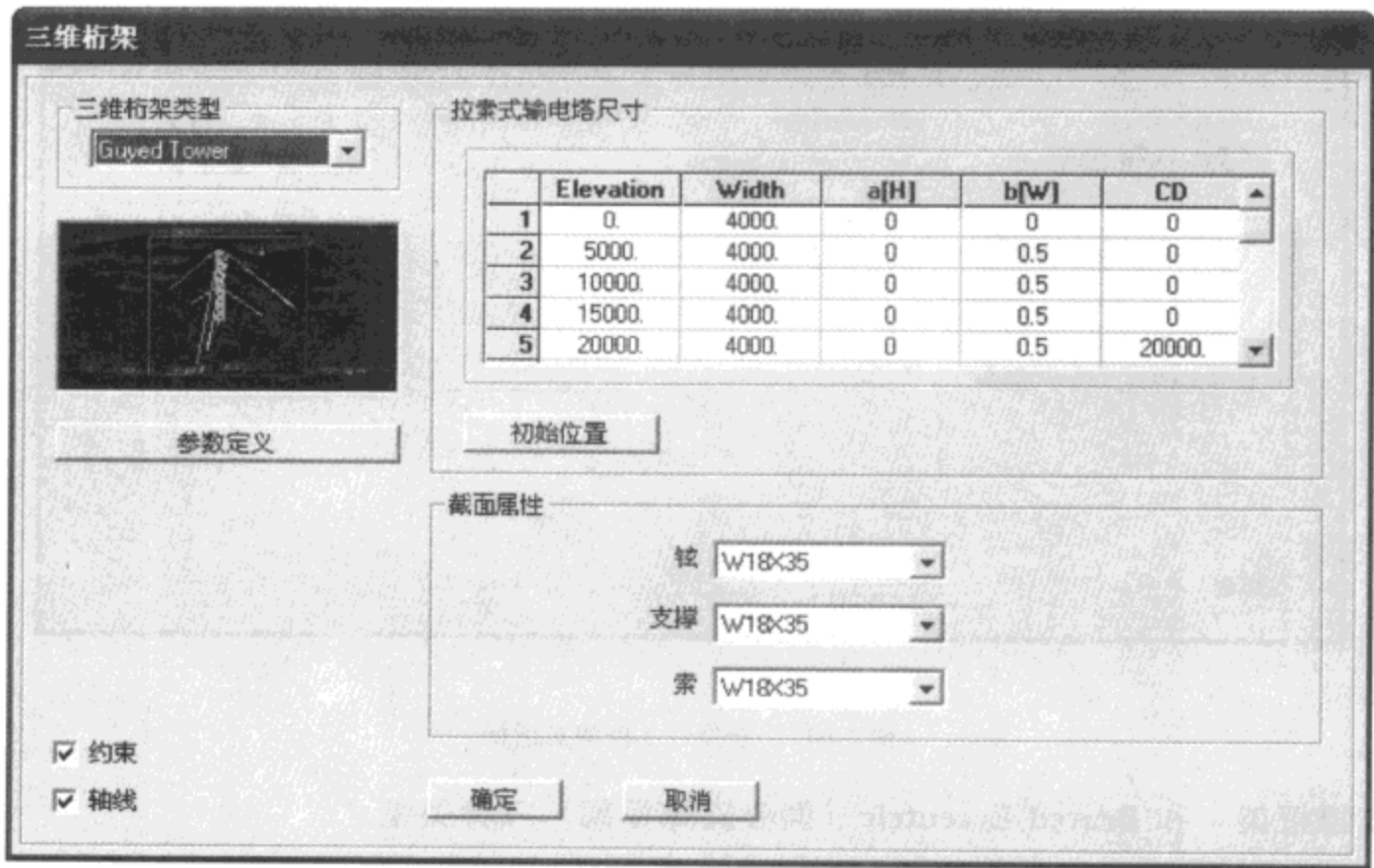


图 10-9 拉锁式输电塔架对话框

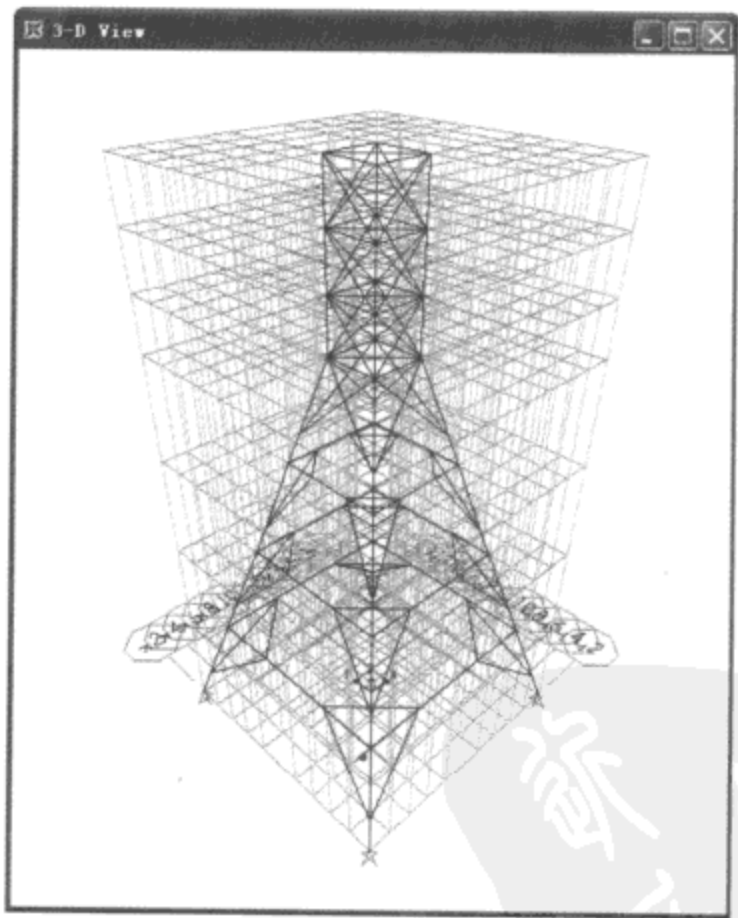


图 10-10 三维输电塔 1 模型

(6) 二维框架

点击此项弹出二维框架对话框（图 10-11）。

在对话框左上的二维框架类型下拉菜单中列出了 **Potal**（门式框架）、**Braced Concentric**

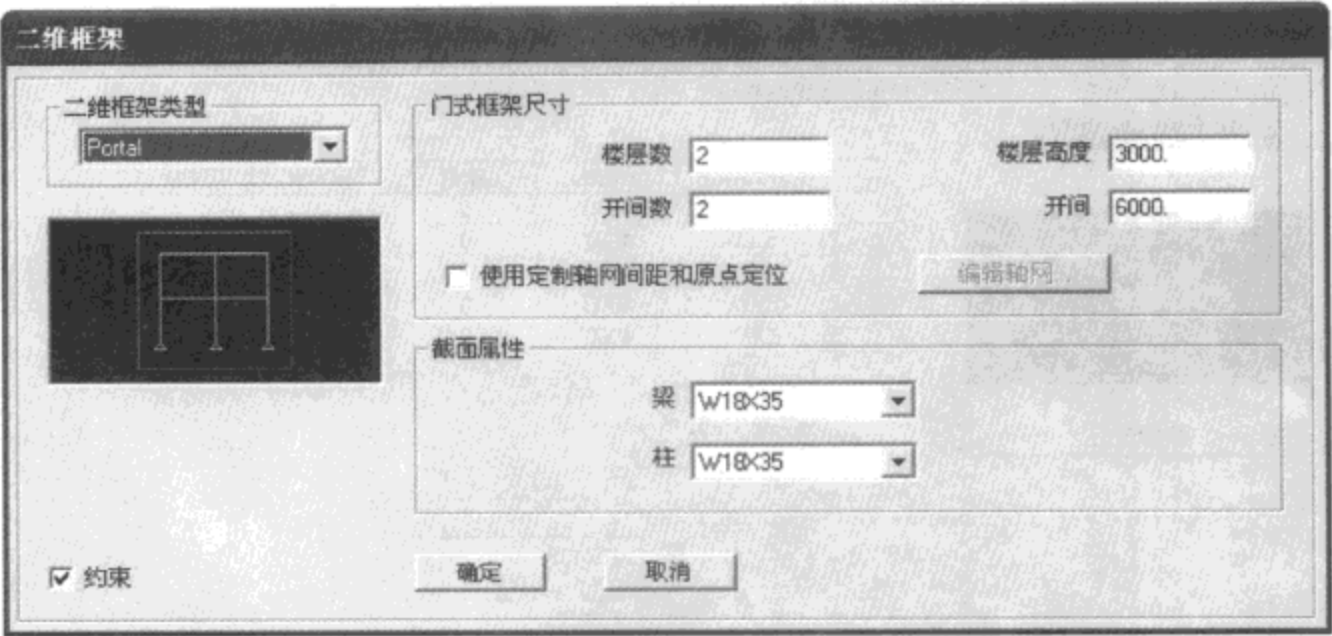


图 10-11 新建二维框架对话框

(中心支撑框架) 和 **Braced Eccentric** (偏心支撑框架) 三种类型。
对于门式框架的定义，右边的两个定义区域含义如表 10-7 所示。

表 10-7

| | |
|--------|--|
| 门式框架尺寸 | 定义门式框架楼层数、楼层高度、开间数和开间尺寸，勾选【使用定制轴网间距和原点定位】一项后，点击【编辑轴网】按钮，弹出定义轴网数据对话框，通过对坐标的修改定义门式框架尺寸 |
| 截面属性 | 选择程序已有截面赋给梁和柱 |
| 约束 | 选择是否对门式框架施加约束 |

如果选择 **Braced Concentric** (中心支撑框架) 和 **Braced Eccentric** (偏心支撑框架) 类型的框架，对话框同门式框架类似，只是 **Braced Concentric** (中心支撑框架) 多出了支撑杆件截面指定，**Braced Eccentric** (偏心支撑框架) 多出了偏心支撑的支撑间缝宽度的定义。参数定义完毕，点击【确定】按钮，自动生成二维框架模型。

例如我们要建立一个二维的带偏心支撑框架，我们选择二维框架的类型为 **Braced Concentric**，在对话框 (图 10-12) 中定义参数，在此例中选取程序默认值，点击【确定】按钮，生成二维偏心支撑框架，如图 10-13 所示。

(7) 三维框架

点击此项弹出三维框架对话框 (图 10-14)。

在对话框左上的三维框架类型下拉菜单中列出了 **Open Frame Building** (纯框架)、**Perimeter Frame Building** (周边框架)、**Beam-Slab Building** (梁板结构) 和 **Flat Plate Building** (无梁楼盖结构) 四种类型。

右边的两个定义区域含义如下表 10-8 所示。

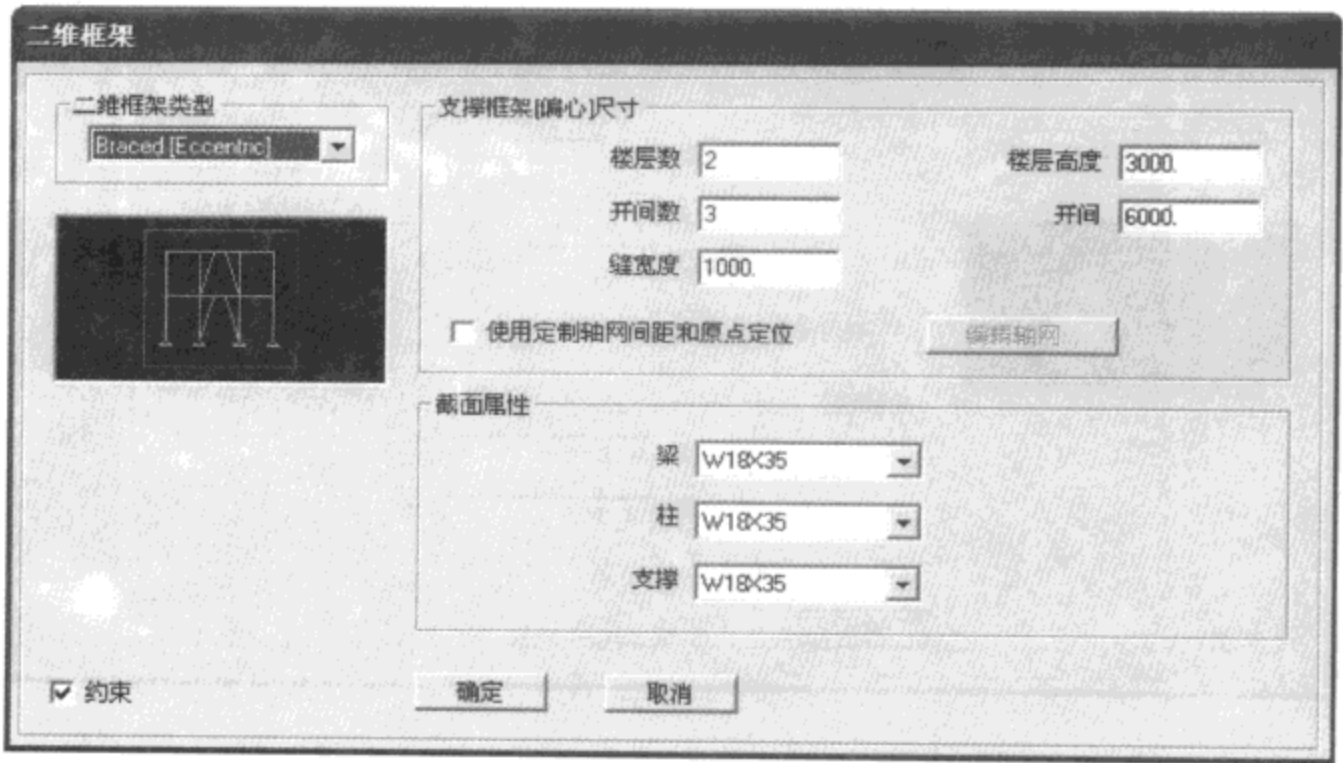


图 10-12 新建支撑框架对话框

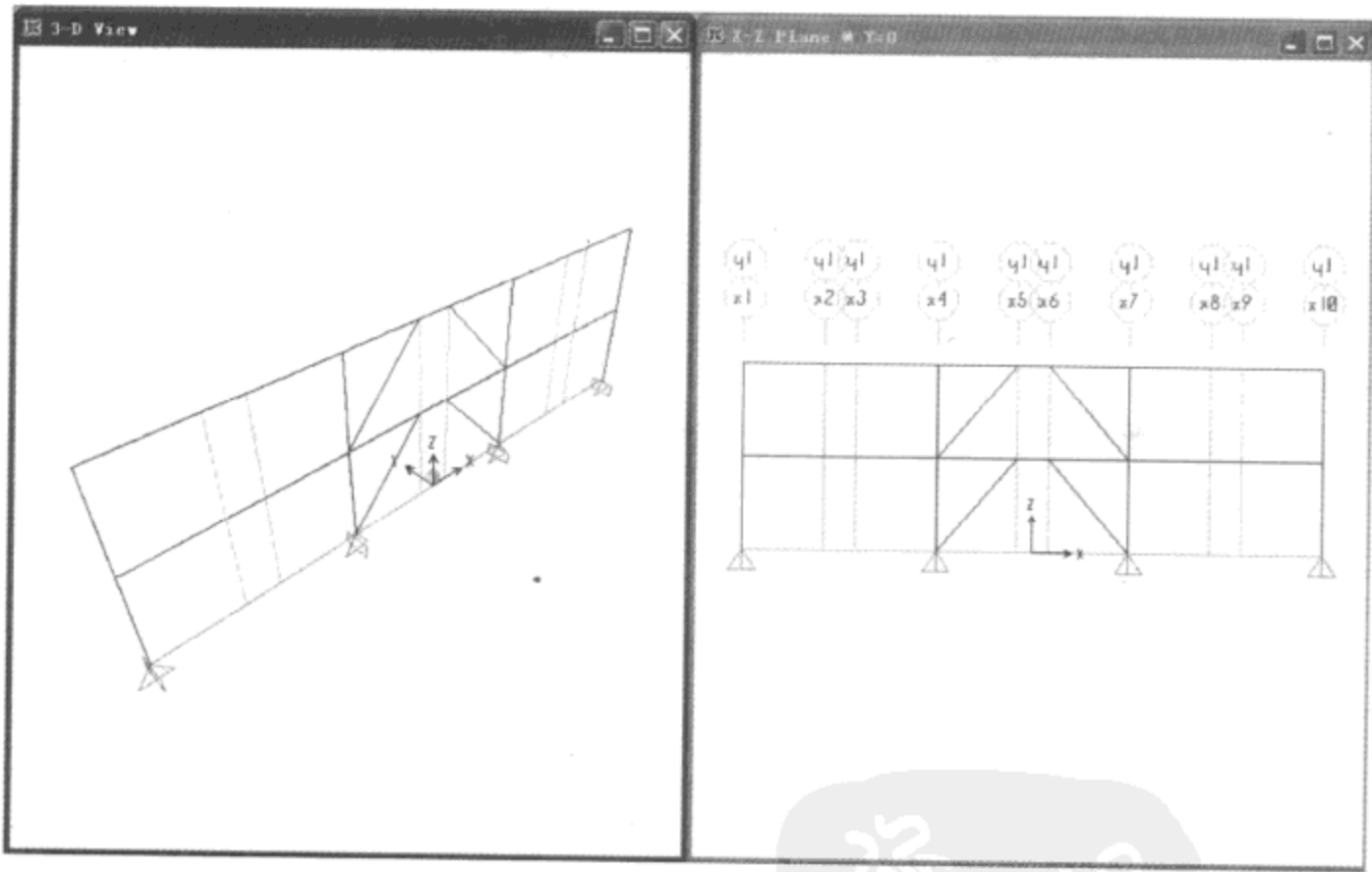


图 10-13 二维框架视图

表 10-8

| | |
|-------|--|
| 纯框架尺寸 | 定义纯框架楼层数、楼层高度、跨数和跨度，勾选【使用定制轴网间距和原点定位】一项后，点击【编辑轴网】按钮，弹出定义轴网数据对话框，通过对坐标的修改，定义纯框架尺寸 |
| 截面属性 | 选择程序已有截面赋给梁、柱、板 |
| 约束 | 选择是否对纯框架施加约束 |

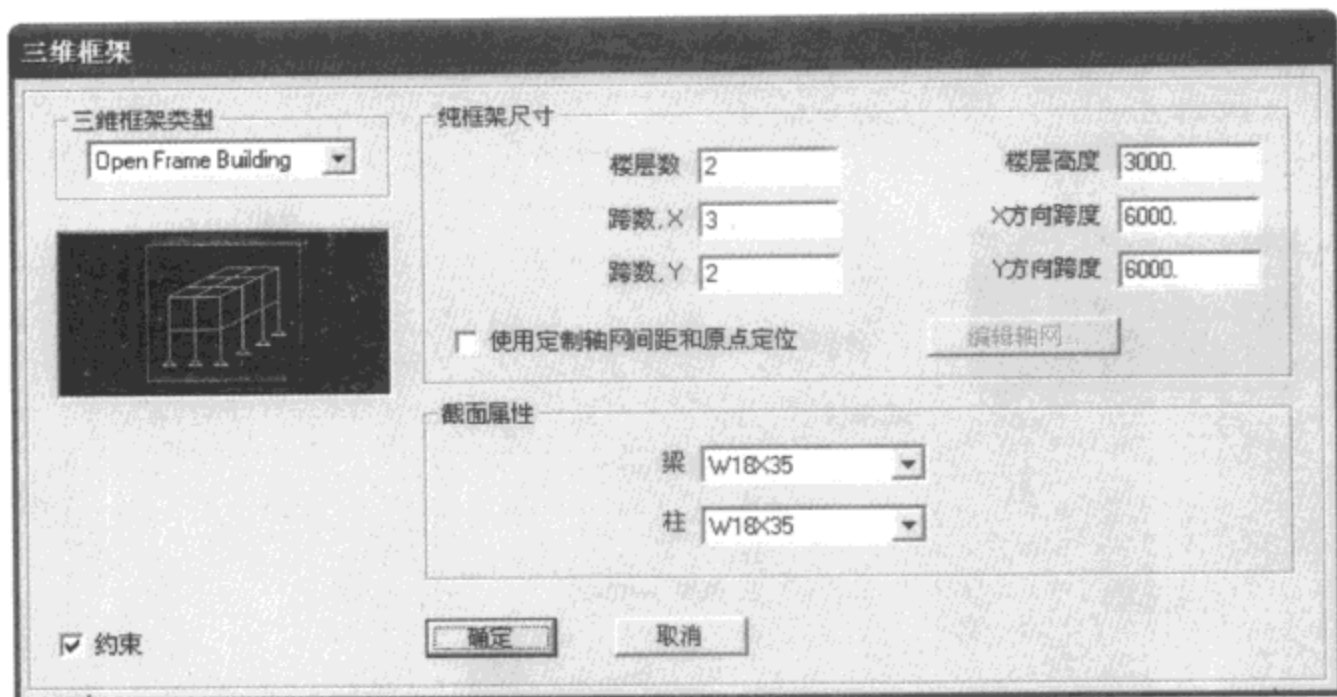


图 10-14 新建三维框架对话框

参数定义完毕，点击【确定】按钮，自动生成三维框架模型。

以建立一个最常用的梁板式框架结构为例，选用 **Beam-Slab Building**（梁板结构）类型，楼层数指定为“3”，其他参数选择默认，参数定义对话框如图 10-15 所示。选中【使用定制轴网间距和原点定位】一项，点击【编辑轴网】按钮，弹出定义轴网数据对话框，选择显示轴网线方式为【间距】，将 X 轴网线数据中 x2 和 x4 的间距改为 4000，Y 轴网线数据中 y2 间距改为 3000，Z 轴网线数据中 z1 间距改为 4000，如图 10-16 所示，点击【确定】，回到三维框架定义对话框，点击【确定】按钮，完成梁板式三维框架定义，生成的框架如图 10-17 所示。

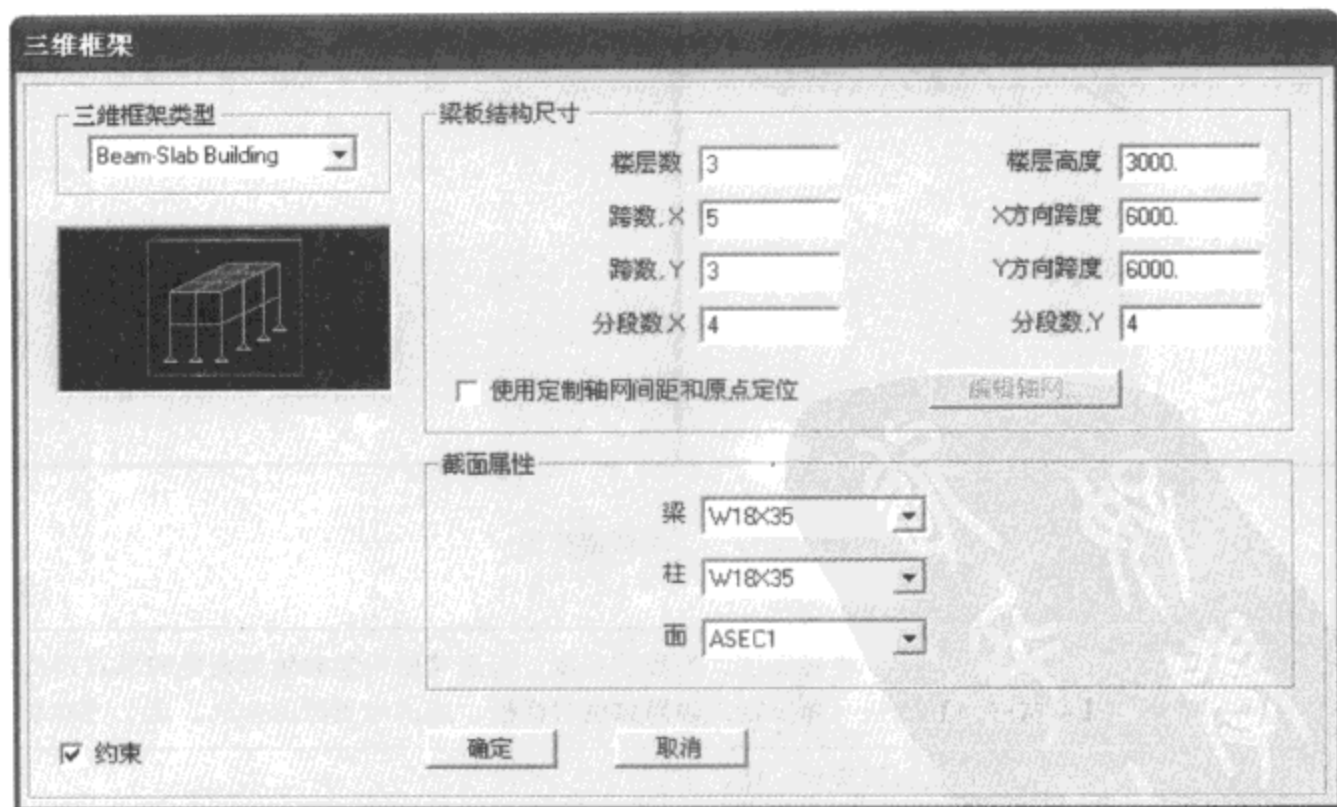


图 10-15 新建梁板结构框架对话框

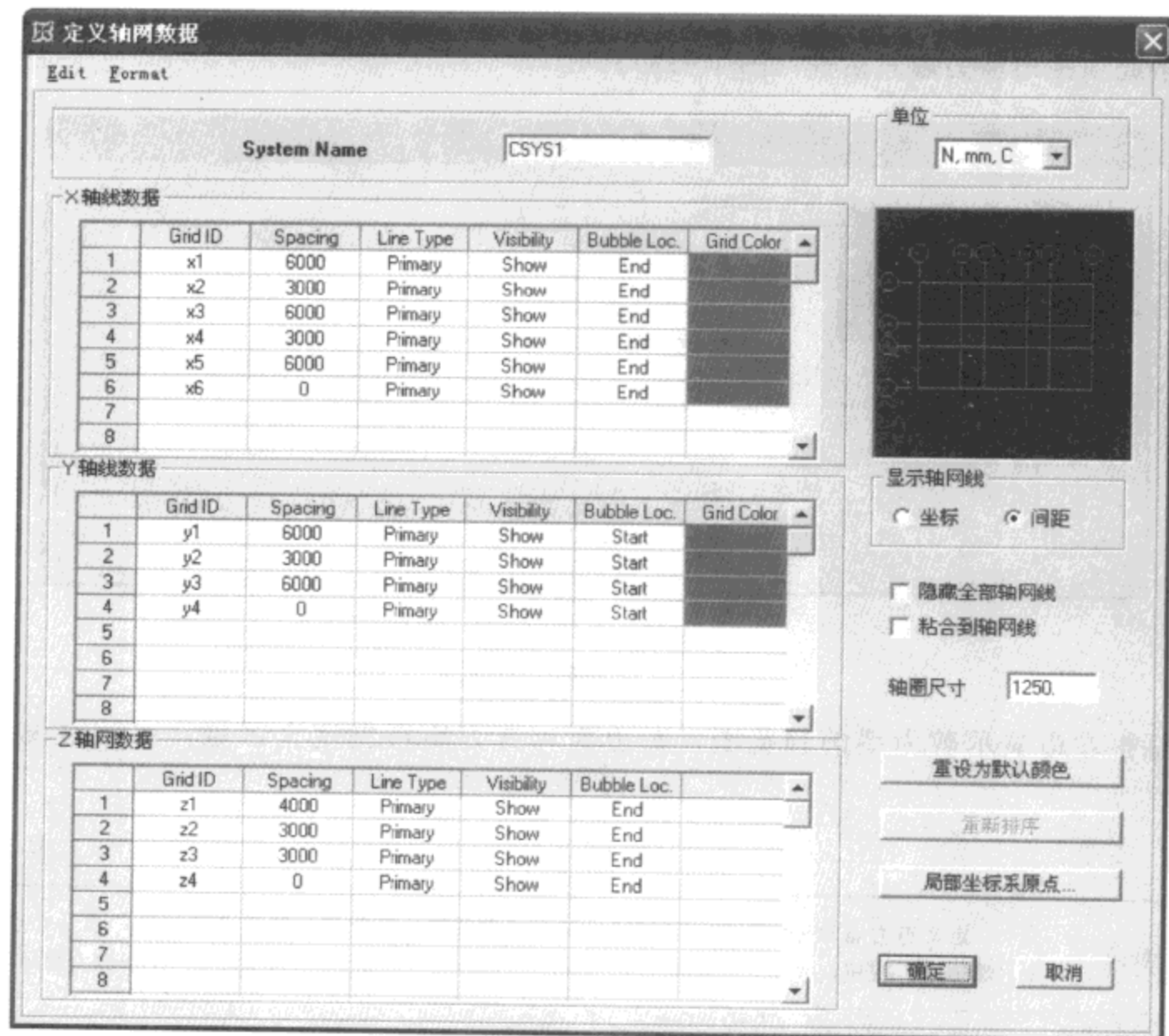


图 10-16 定义轴网数据对话框

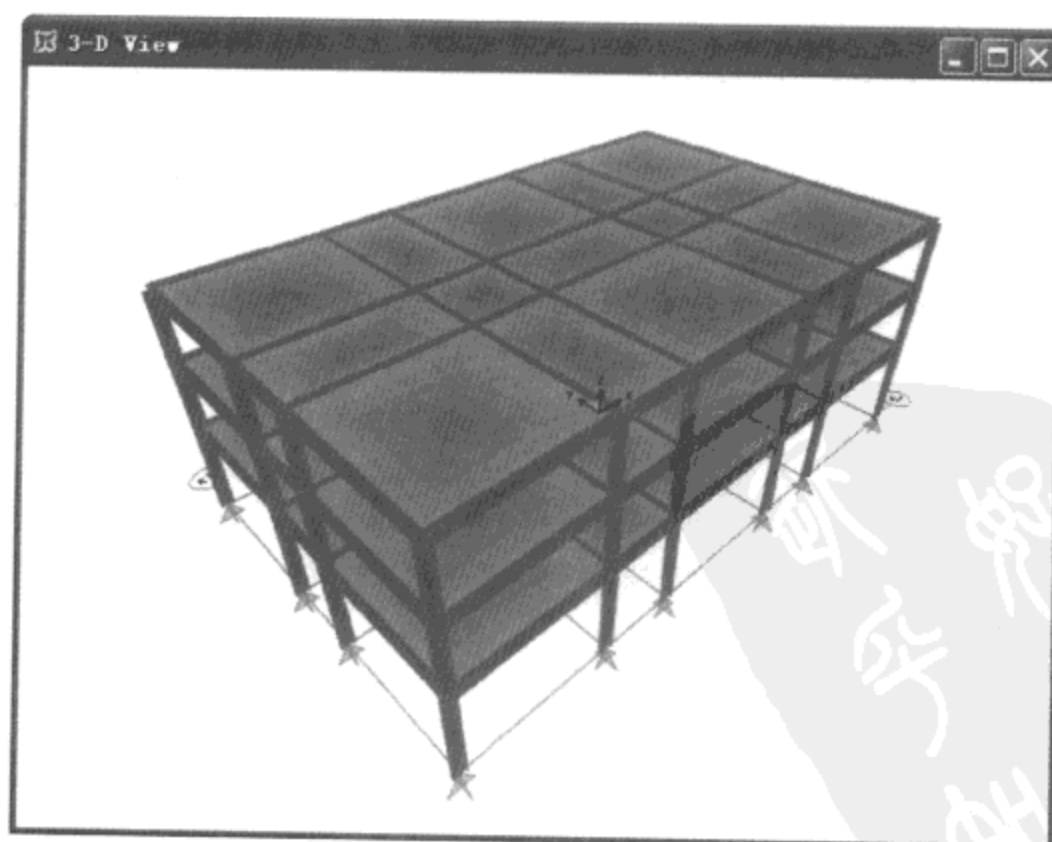


图 10-17 新建三维框架视图

(8) 墙
点击此项弹出剪力墙对话框（图 10-18）。



图 10-18 新建剪力墙对话框

对话框左边显示剪力墙的预览图，右边为对剪力墙模型定义区域，对话框说明见表 10-9。

表 10-9

| | |
|-------|---|
| 剪力墙尺寸 | 定义剪力墙的分段数和分段宽度，勾选【使用定制轴网间距和原点定位】一项后，点击【编辑轴网】按钮，弹出定义轴网数据对话框，通过对 X、Z 方向轴网定义，控制剪力墙形状 |
| 截面属性 | 选择程序已有截面赋给生成的剪力墙模型 |
| 约束 | 勾选此项表示对剪力墙角部施加约束 |

参数定义完毕，点击【确定】按钮，自动生成剪力墙模型。

(9) 无梁楼盖
点击此项弹出板对话框（图 10-19）。

对话框左边显示楼盖的预览图，右边为对楼盖模型参数定义区域，对话框说明见表 10-10。

表 10-10

| | |
|------|--|
| 板尺寸 | 定义无梁楼盖的分段数、分段宽度和跨中板带宽度，勾选【使用定制轴网间距和原点定位】一项后，点击【编辑轴网】按钮，弹出定义轴网数据对话框，通过对 X、Y 方向轴网定义，控制无梁楼盖形状 |
| 截面属性 | 选择程序已有截面赋给生成的楼盖模型 |
| 约束 | 勾选此项表示对楼盖角部施加约束 |

参数定义完毕，点击【确定】按钮，自动生成无梁楼盖模型。

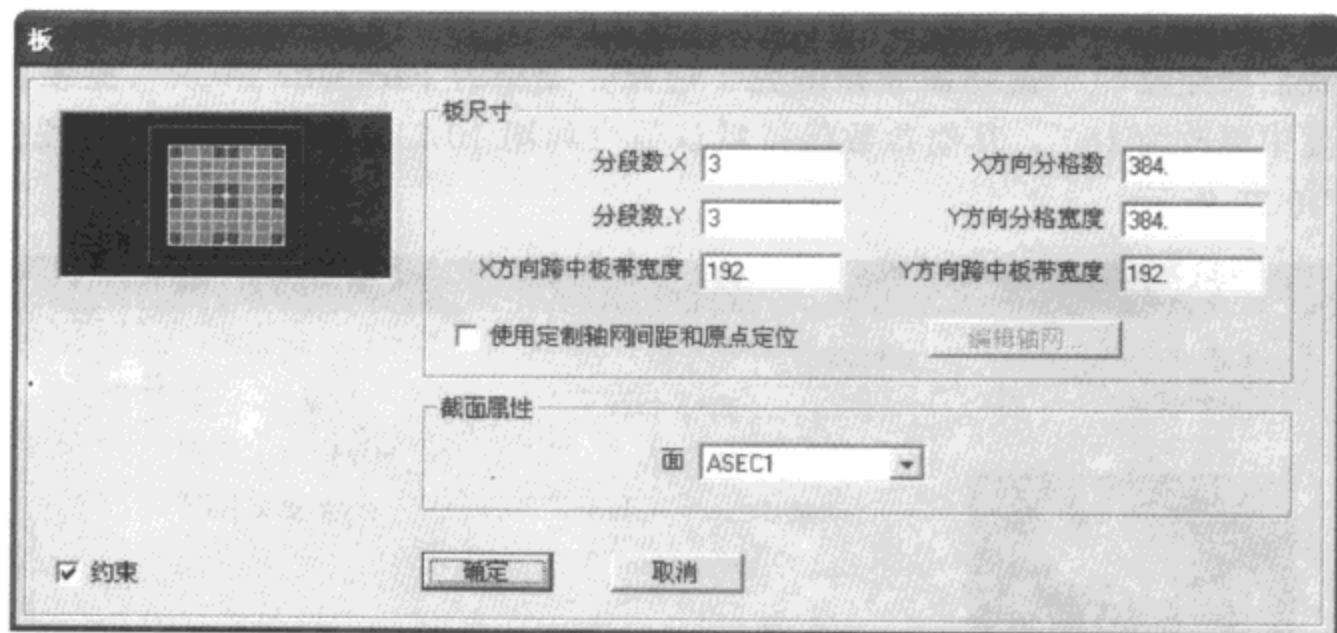


图 10-19 新建无梁楼盖对话框

(10) 壳

点击此项弹出壳对话框 (图 10-20)。

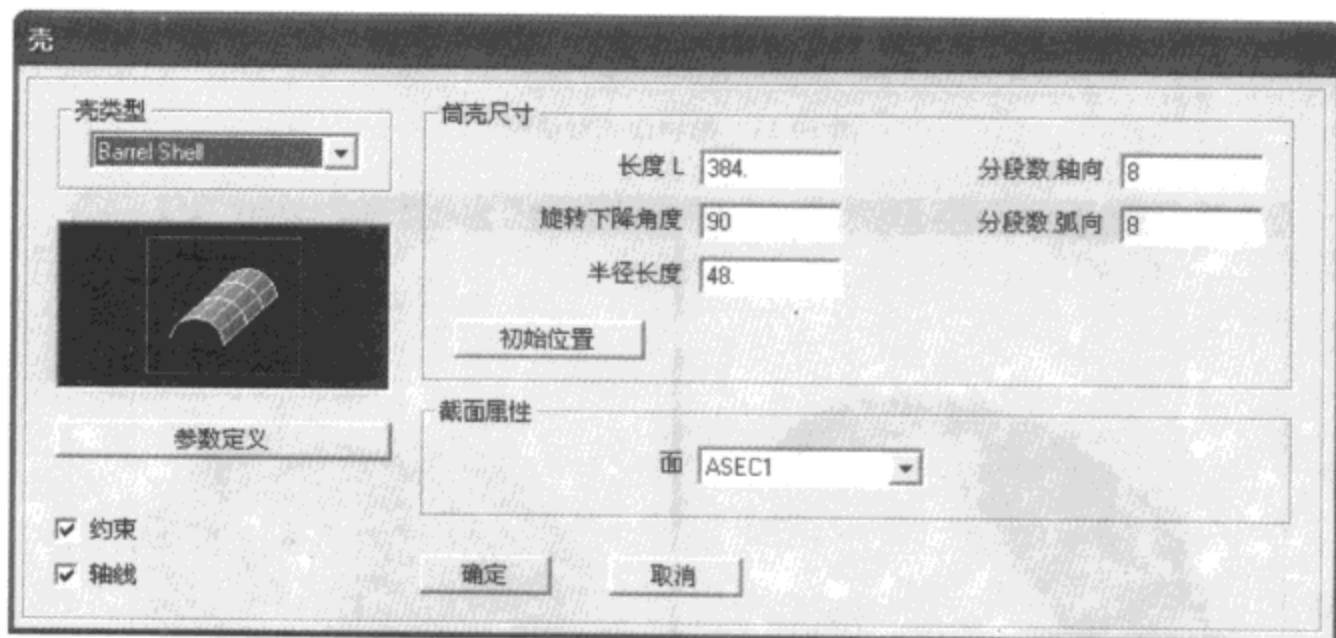


图 10-20 新建壳对话框

在对话框左上的壳类型下拉菜单中列出了 Cylinder (柱面)、Barrel Shell (筒壳)、Multi-bay Cylindrical Shell (多跨柱面壳)、Hyperbolic paraboloid (双曲抛物曲面壳)、Partial Sphere (部分球面)、Spherical Dome (球面屋顶)、Parabolic Dome (抛物面屋顶) 七种类型。

切换不同类型的壳, 右侧尺寸定义和截面属性定义区域会有相应的变化, 但基本类似。具体尺寸参数的含义可以通过点击左侧【参数定义】按钮, 弹出参数含义对话框, 参照其中的图形来了解。参数定义完毕后, 点击【确定】按钮, 程序自动生成定义的壳模型。

在壳的建立中, 利用模板建立是一个非常好用的方法, SAP2000 提供了各种形式的壳

模板，下面介绍的储藏结构实际上建立的也是壳模型。

例如我们要建立一个抛物面屋顶的壳，选择壳类型为 **Parabolic Dome**（抛物面屋顶），在结束角度中更改为 180° ，其他参数保持默认值（如图 10-21），点击【确定】按钮，生成模型见图 10-22 所示。

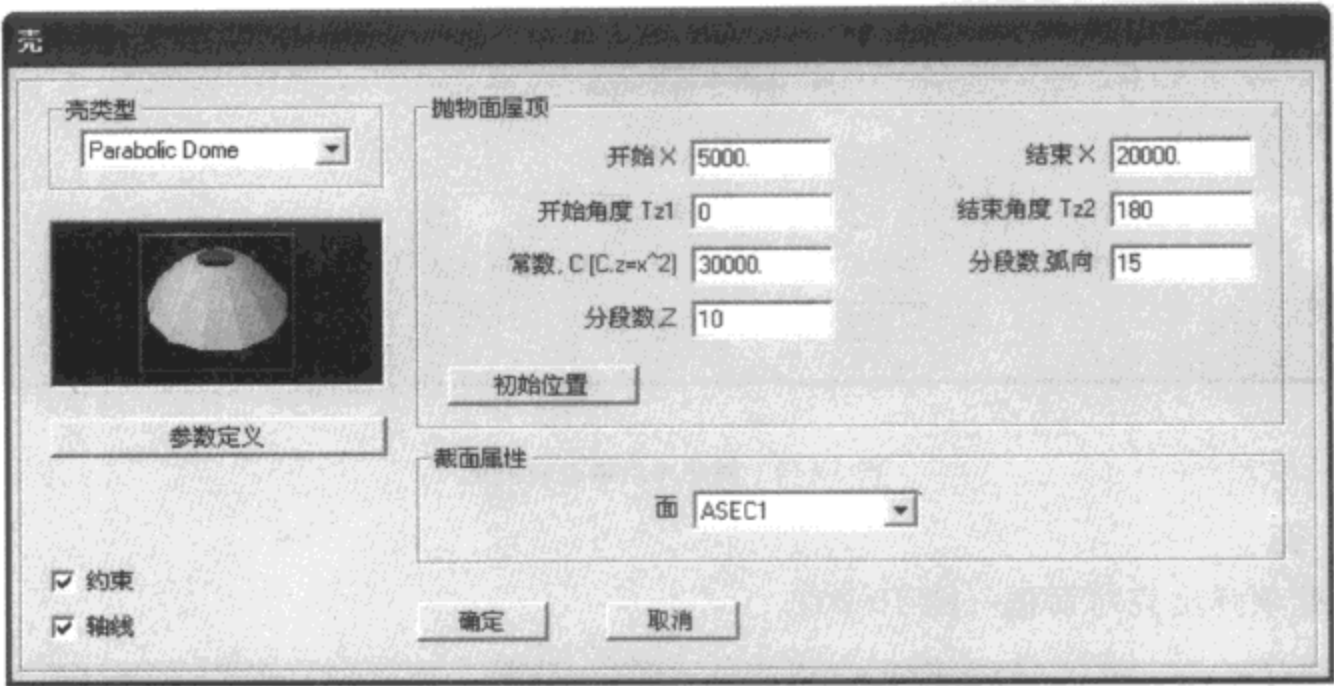


图 10-21 抛物面壳对话框

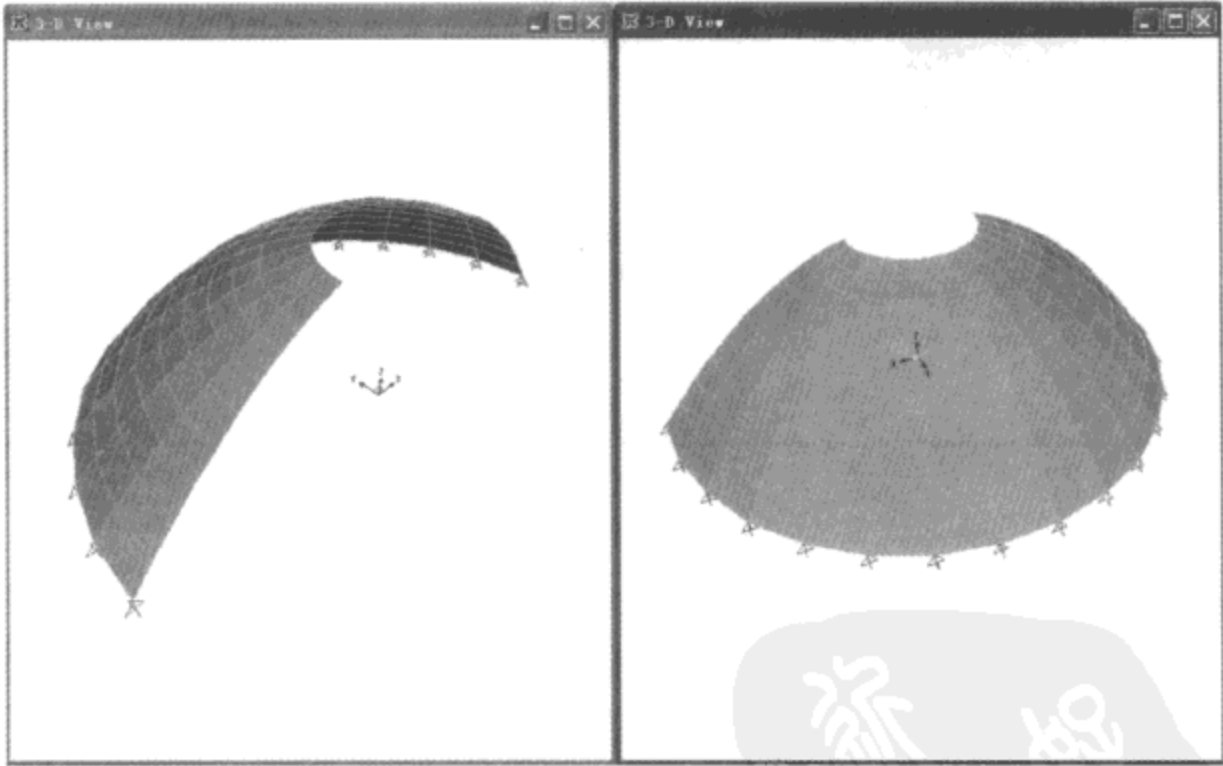


图 10-22 抛物面壳视图

(11) 楼梯

点击此项弹出楼梯对话框（图 10-23）。

在对话框左上的楼梯类型下拉菜单中列出了 **Staircase Type1**（楼梯类型 1）、**Staircase Type2**（楼梯类型 2）和 **Spiral Staircase**（旋转楼梯）三种类型。

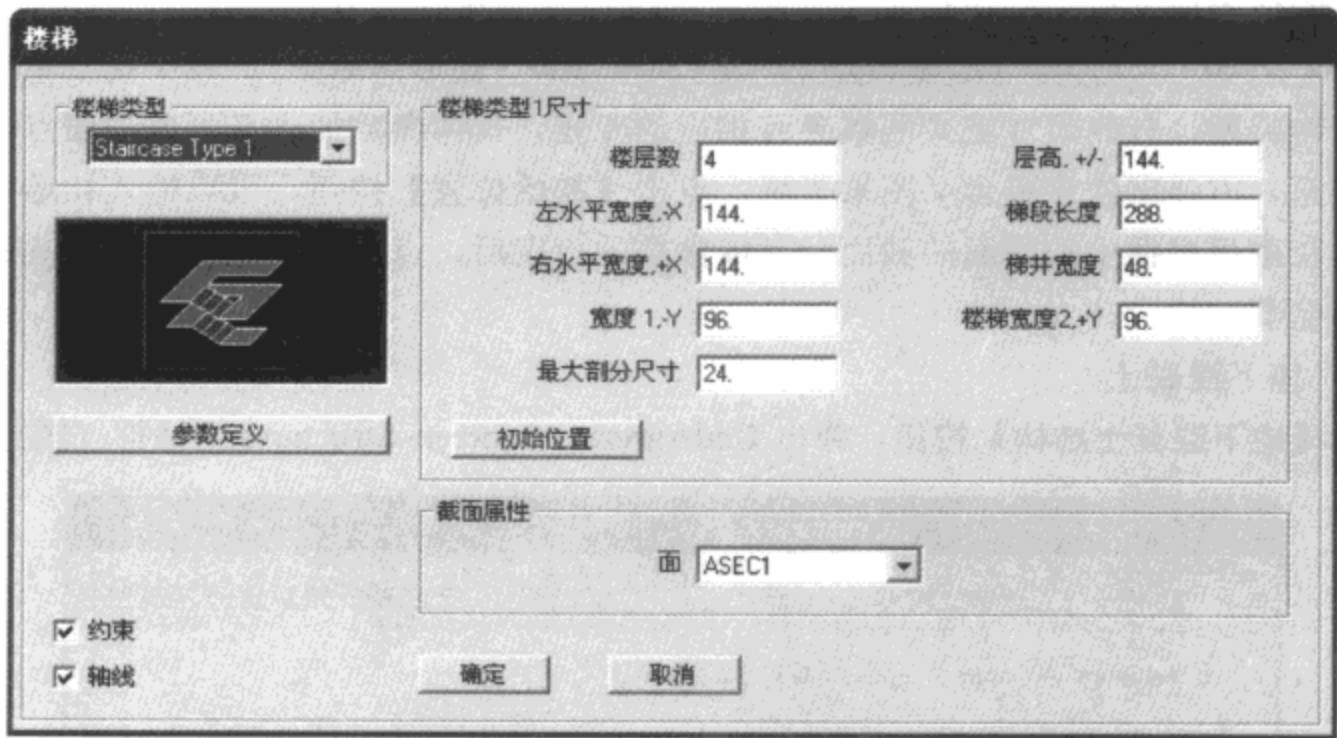


图 10-23 新建楼梯对话框

切换不同类型的楼梯，右侧尺寸定义和截面属性定义区域会有相应的变化，但基本类似。具体尺寸参数的含义可以通过点击左侧【参数定义】按钮，弹出参数含义对话框，参照其中的图形来了解。参数定义完毕后，把截面赋给楼梯，点击【确定】按钮，程序自动生成定义的楼梯模型。

(12) 储藏结构

点击此项弹出储藏结构对话框（图 10-24）。

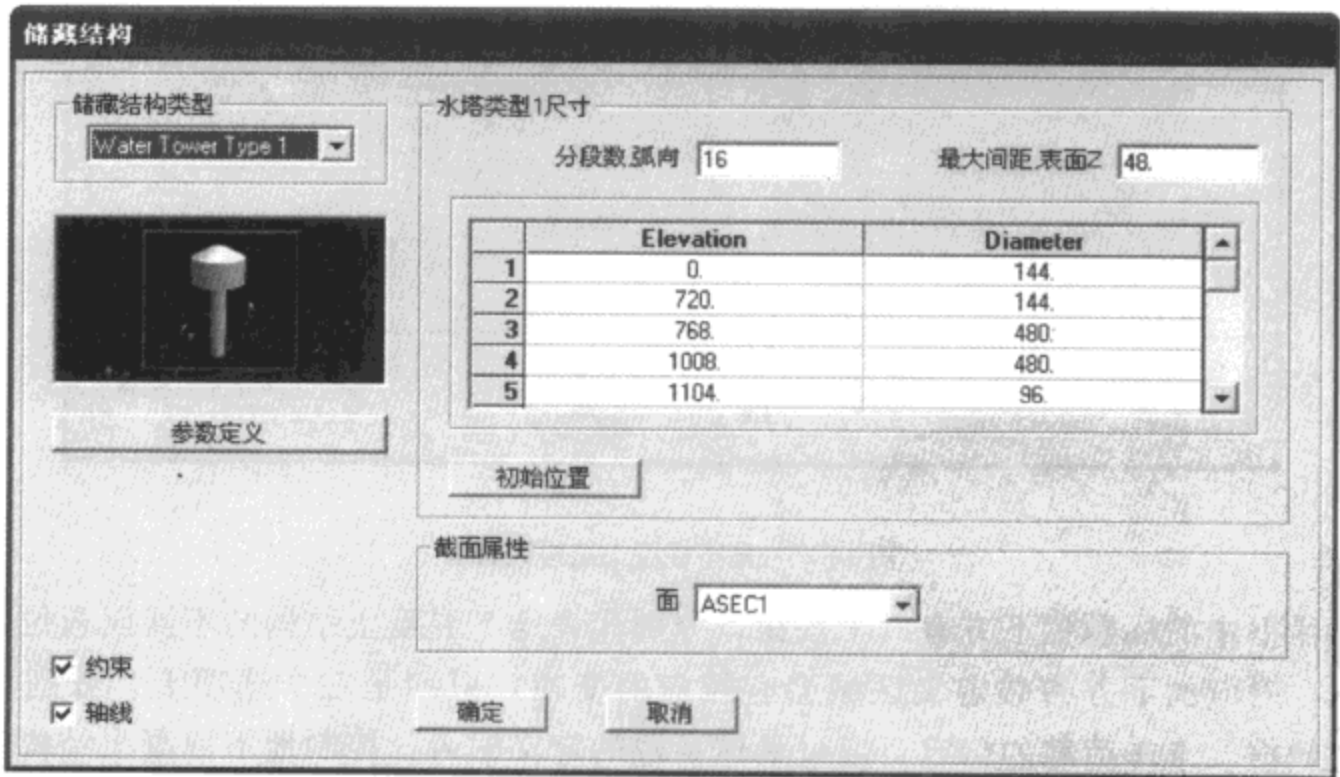


图 10-24 新建储藏结构对话框

储藏结构类型下拉菜单中提供了三种储藏结构可供选择：Water Tower Type1（水塔类型1）、Water Tower Type2（水塔类型2）和 Circle Silo（圆形储藏罐）。在下拉菜单中切换选择储藏结构类型，右侧尺寸定义区域会有相应的变化，具体参数的含义可以参照点击【参数定义】按钮，由弹出的参数含义图来了解。点击【初始位置】按钮，可以输入初始的模型位置坐标。在截面属性中选择面的截面。完成参数的指定后，点击【确定】按钮，程序自动生成指定的储藏结构。

（13）地下混凝土

点击【地下混凝土结构】按钮，弹出 Underground Concrete Structures 对话框（图10-25）。

Underground Concrete Structures

Top Slab | Bottom Slab | Riser | Top Section | Bottom Section | 3-Sided Bridge

Top Slab Structure Properties | Loading Data | Truck Load

Top Slab Structure Properties

Length along X: 144 | Number of Spaces along X: 2

Width along Y: 72 | Number of Spaces along Y: 6

Top Thickness: 6

Hole Data

Number of Holes: 2 | Update

| | Type | X Center | Y Center | X Size | Y Size | Active |
|---|-------------|----------|----------|--------|--------|--------|
| 1 | Rectangular | 9. | 36. | 12. | 12. | No |
| 2 | Rectangular | 135. | 36. | 12. | 12. | No |

☒ Restraints | ☒ Gridlines | Locate Origin... | OK | Cancel | Units: Kip, in, F

图 10-25 地下混凝土结构对话框

此对话框中的标题栏下方有六个按钮，分别代表地下混凝土结构的不同面板位置，点击某个按钮，对应的下方参数定义区域会有相应的变换，但均是三个选项卡，分别为结构属性、荷载数据、卡车荷载的指定。通过具体参数的定义输入，控制地下混凝土结构的快速建模。在对话框左下方可选择是否对模型加入约束和轴网；右下方有单位制的选择下拉菜单，可以选择控制单位制；点击【Locate Origin】按钮，在弹出的坐标系对话框中输入结构的布置坐标。

参数定义完毕后，点击【OK】按钮，程序自动建立地下混凝土结构。

(14) 实体模型

点击【实体模型】按钮，弹出实体模型对话框（图 10-26）。左上角的实体模型类型下拉菜单中列出了四种实体类型：Thick Arch（厚拱）、Variable Arch（变截面拱）、Prism1（棱台 1）、Block（块体）。

右侧的尺寸定义区域对应每种类型会有不同变化，具体参数含义参照点击【参数定义】按钮弹出的参数含义图。点击【初始位置】按钮可在弹出的对话框中输入初始坐标。在截面属性区域中选择实体的截面。点击【确定】，完成实体模型定义。

实体模型的建立可以在初始化模型时用快速建模的方法建立，也可以在绘制模型时用面拉伸成实体，现在我们用实体的初始化模板建立一个曲线变截面拱坝体。选择 Variable Arch（变截面拱）类型实体，对话框变为如图 10-27 所示。可以点击【参数定义】按钮，弹出参数定义解释对话框（如图 10-28 所示），参数的定义在这里选择默认值，完成定义后，点击【确定】，生成模型如图 10-29 所示。

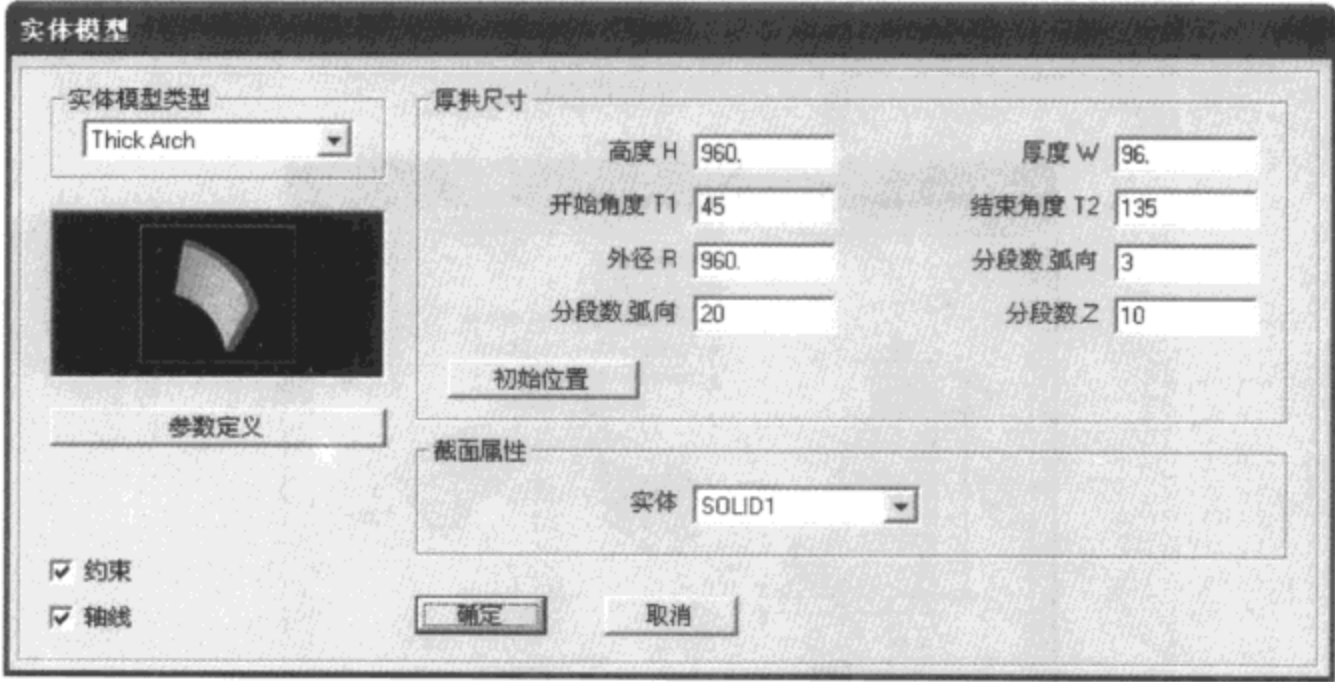


图 10-26 实体模型

(15) 索桥

点击此按钮，弹出悬索桥定义对话框（图 10-30）。

左上显示悬索桥的预览图，右侧为参数定义区域，对话框说明见表 10-11。

表 10-11

| | |
|---------|--|
| 参数定义 | 点击弹出参数含义图，查看悬索桥各尺寸参数含义 |
| 悬索桥尺寸区域 | 在此输入悬索桥各尺寸参数，包括左、中、右各跨长度和分段数，板厚、最小中间下降值和柱高 |
| 初始位置 | 点击弹出坐标系对话框，输入模型初始坐标 |
| 截面属性 | 分别指定梁、柱、索、面单元的截面 |
| 约束、轴线 | 选择是否对模型添加约束、轴线 |

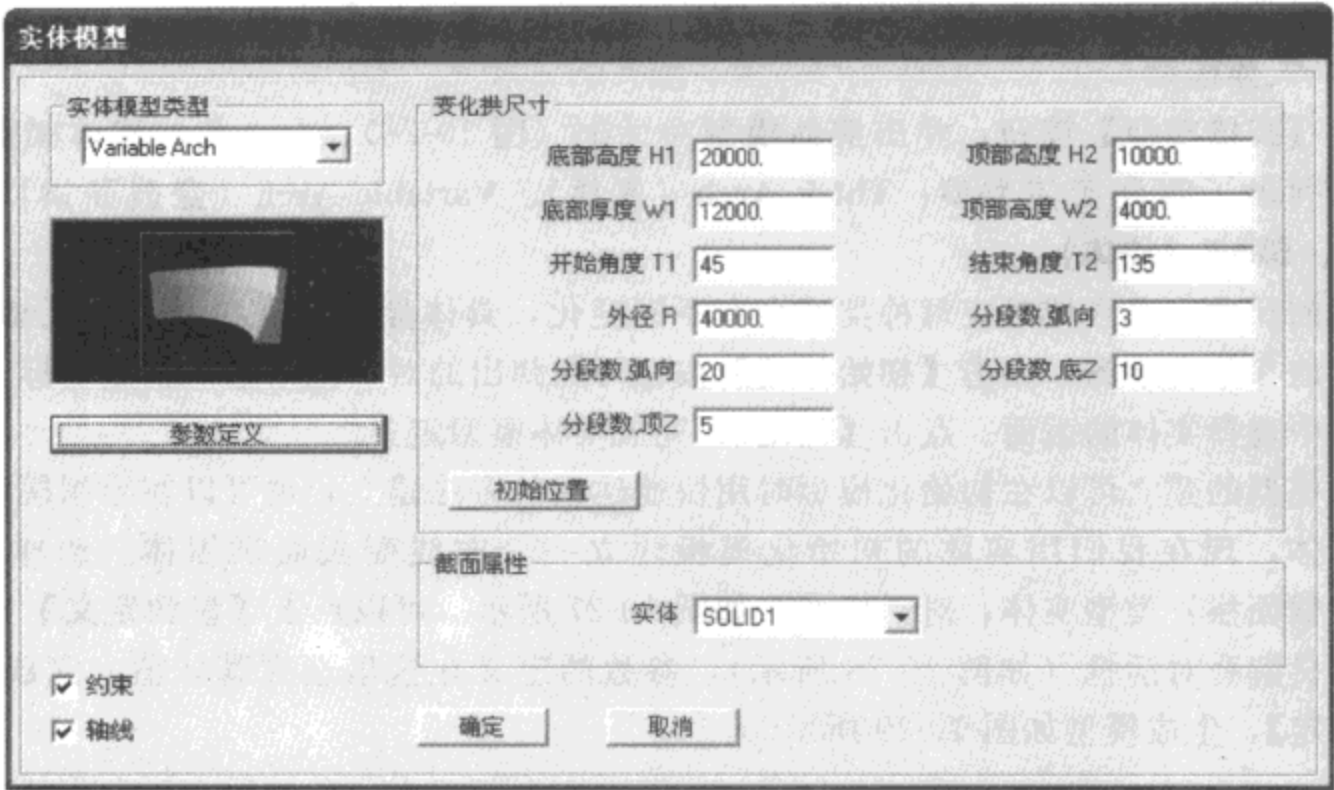


图 10-27 变截面拱对话框

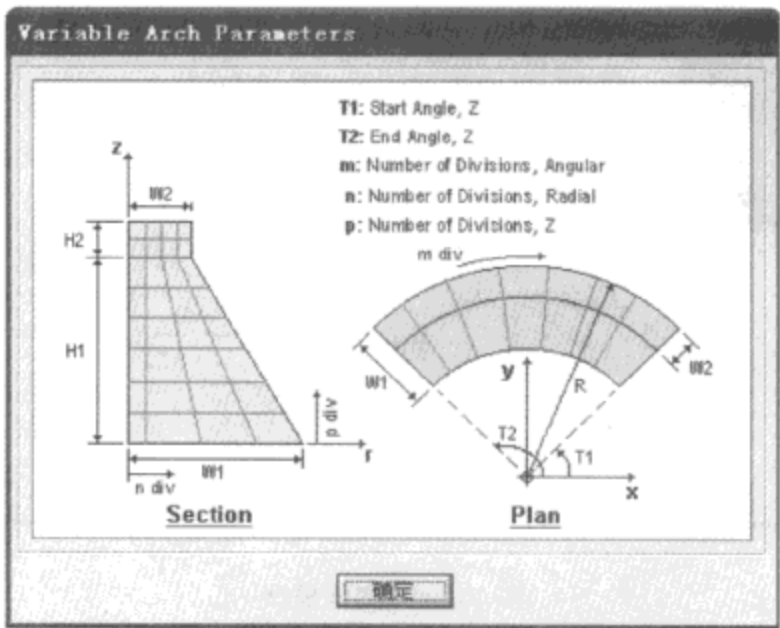


图 10-28 参数定义解释对话框

参数定义完毕后点击【确定】按钮，程序自动建立指定的悬索桥。

(16) 管和板

点击此按钮，弹出管和板定义对话框（图 10-31）。对话框说明见表 10-12。

表 10-12

| | | |
|-----------------------|----------------|-----------------------|
| Select Object 选择类型 | Plates 板 | 列出板模型的类型，通过选择控制建立的板模型 |
| | Pipes 管 | 列出管模型的类型，通过选择控制建立的管模型 |
| | Tubes 管道 | 列出管道类型，通过选择控制建立的管道模型 |
| | Connections 连接 | 列出各种连接部位的类型，选择控制建立的模型 |

| | | |
|---------------------------------|-------------------------|---|
| Object/Modal View 图像显示窗 | | 显示当前选择的模型，定义的模型参数对应的模型形状，并且可以通过全部显示、旋转图形、移动视图、放大缩小等基本操作控制视图 |
| Dimensions 尺寸控制 | | 在此区域中对模型的具体尺寸进行控制，尺寸更改后随时可以通过【Refresh】按钮刷新视图 |
| Parameters and Options 参数和选项 | Max Mesh Size 最大剖分尺寸 | 控制生成模型的最大剖分尺寸 |
| | Close Hode 封闭孔洞 | 把开的孔洞封闭 |
| | Close End 封闭端口 | 封闭连接模型等的端口 |
| Add To Current Model 添加到现有模型 | Scale 比例系数 | 在此输入当前模型部分的比例系数，>1 表示放大，<1 为缩小。默认为 1，表示原大小 |
| | Rotate 旋转角度 | 输入此模型部分绕整体坐标轴的旋转角度，默认值为 0，旋转的基准都是从 0 开始，方向以右手定则确定，单位为度 |
| | Move 坐标平移 | 输入此模型部分离开整体坐标轴原点的平移坐标，方向为整体坐标轴方向，单位跟控制单位制有关 |
| | Add Current Object | 添加当前模型部分到现有模型中，可以实现在此窗口中连续添加多个模型部分，使其结合起来快速建模 |
| | Remove Last Object | 删除上一个添加的模型部分 |
| | Clear Current Modal | 清空现有组合模型，表示把现有的模型部分全部清空，即模型中没有组合的模型 |
| No Objects in modals 模型中没有物体 | | 默认显示为 No Objects in modals，现在点击【OK】按钮，生成的模型为不经过组合的单一模型；在添加了模型部分后，显示随之改变，例如添加两个模型部分显示为 2 Objects in Modals，表示此模型中有两个部分组合 |

这里简单以一个 90°弯管加上一个底部为平台面的模型为例说明，如图 10-32 所示。

选择系统控制单位制为“N-mm”，首先建立一个平台的面，选择 Plates 模板中的 Rectangular Plate 的 Circular Hole 类型，孔的半径 Radius, R 改为 150，绕 Z 轴旋转的角度指定为 90°，对其他参数不进行修改（图 10-33），点击一次【Add Current Object】按钮，把这个模型部分加入到模型中。

然后在左侧的 Select Object 区域中选择 Pipes 类型中 Bent Shaply 类型，将转角参数（Angle, T）改为 90°，旋转控制中的绕 Y 轴旋转输入 90°，在沿 Z 轴的平移坐标中输入

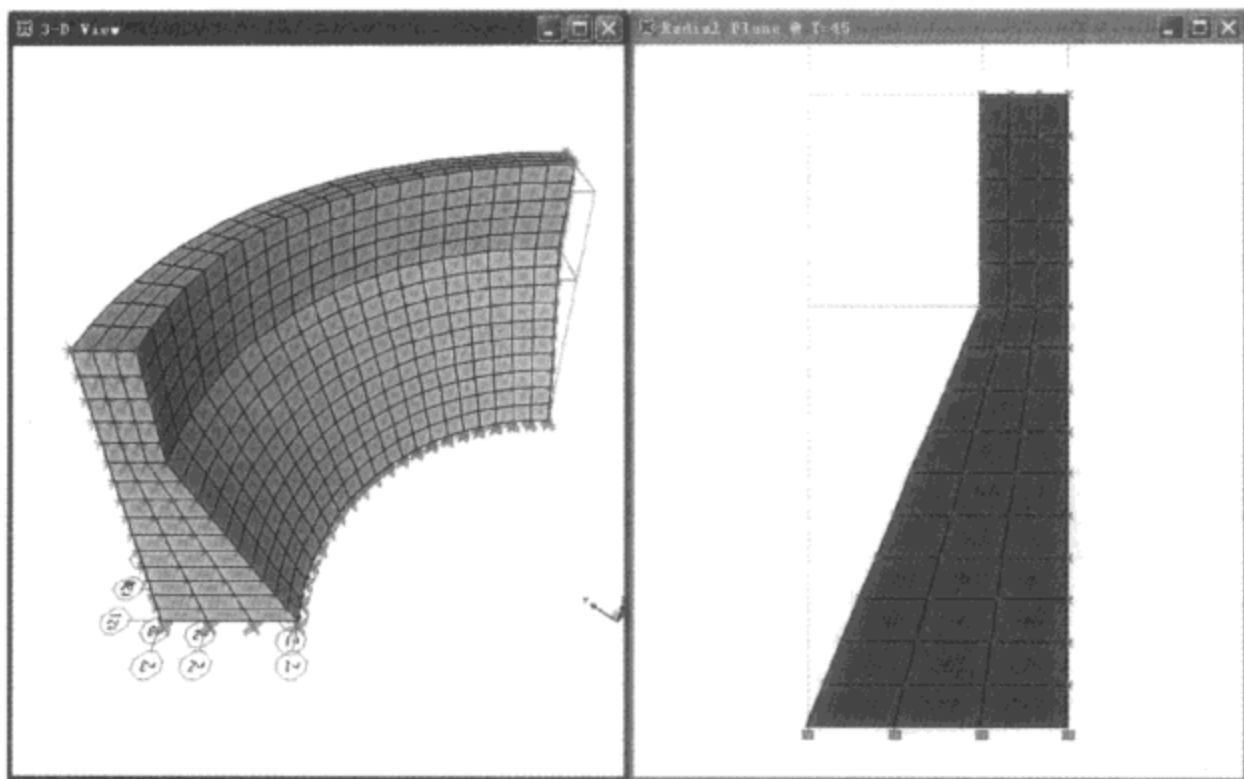


图 10-29 新建实体图形

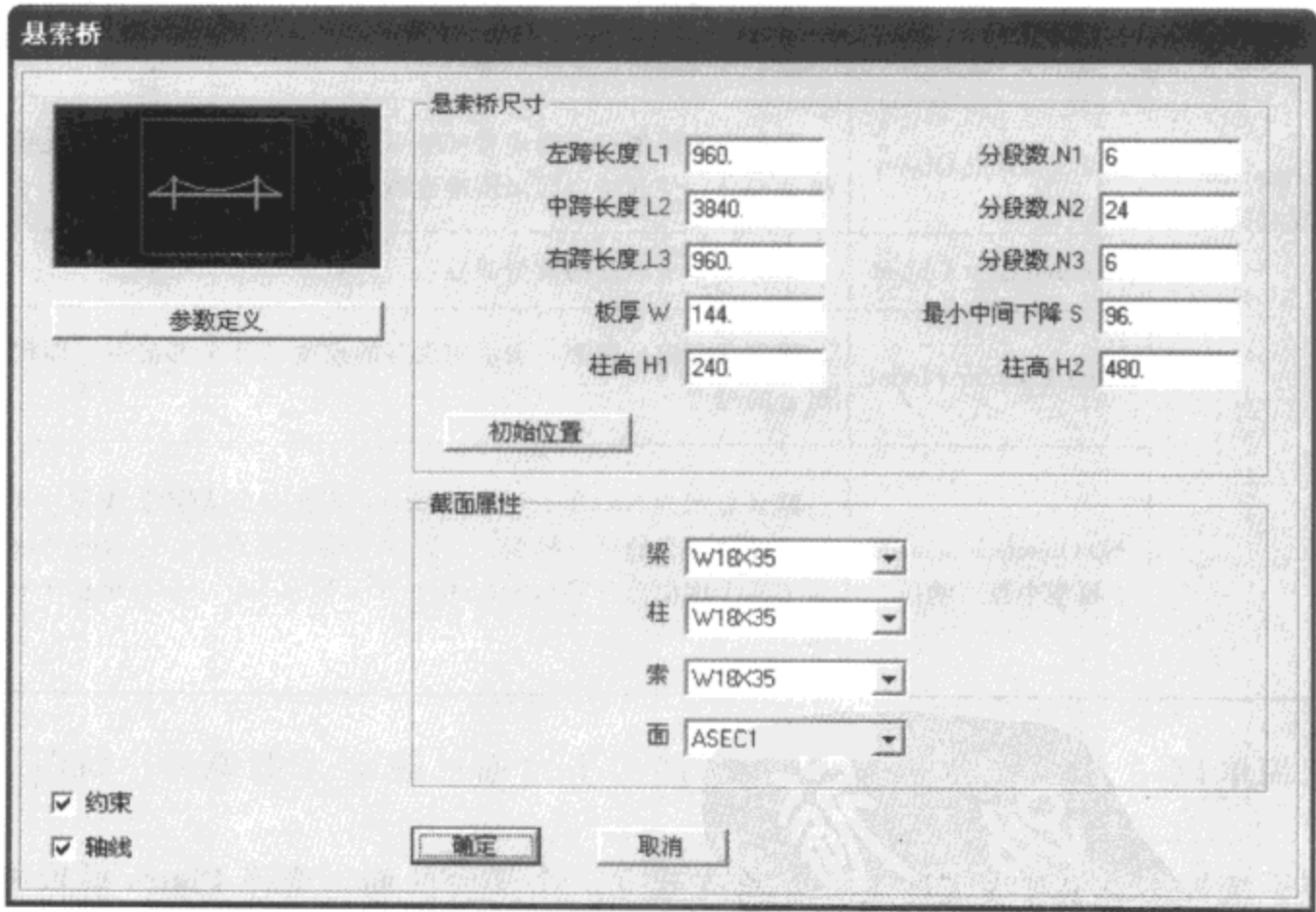


图 10-30 新建悬索桥对话框

600，其他参数如图 10-34 所示。点击一次【Add Current Object】按钮，把这个模型部分加入到模型中。点击【OK】按钮，生成管板模型，如图 10-32 所示。

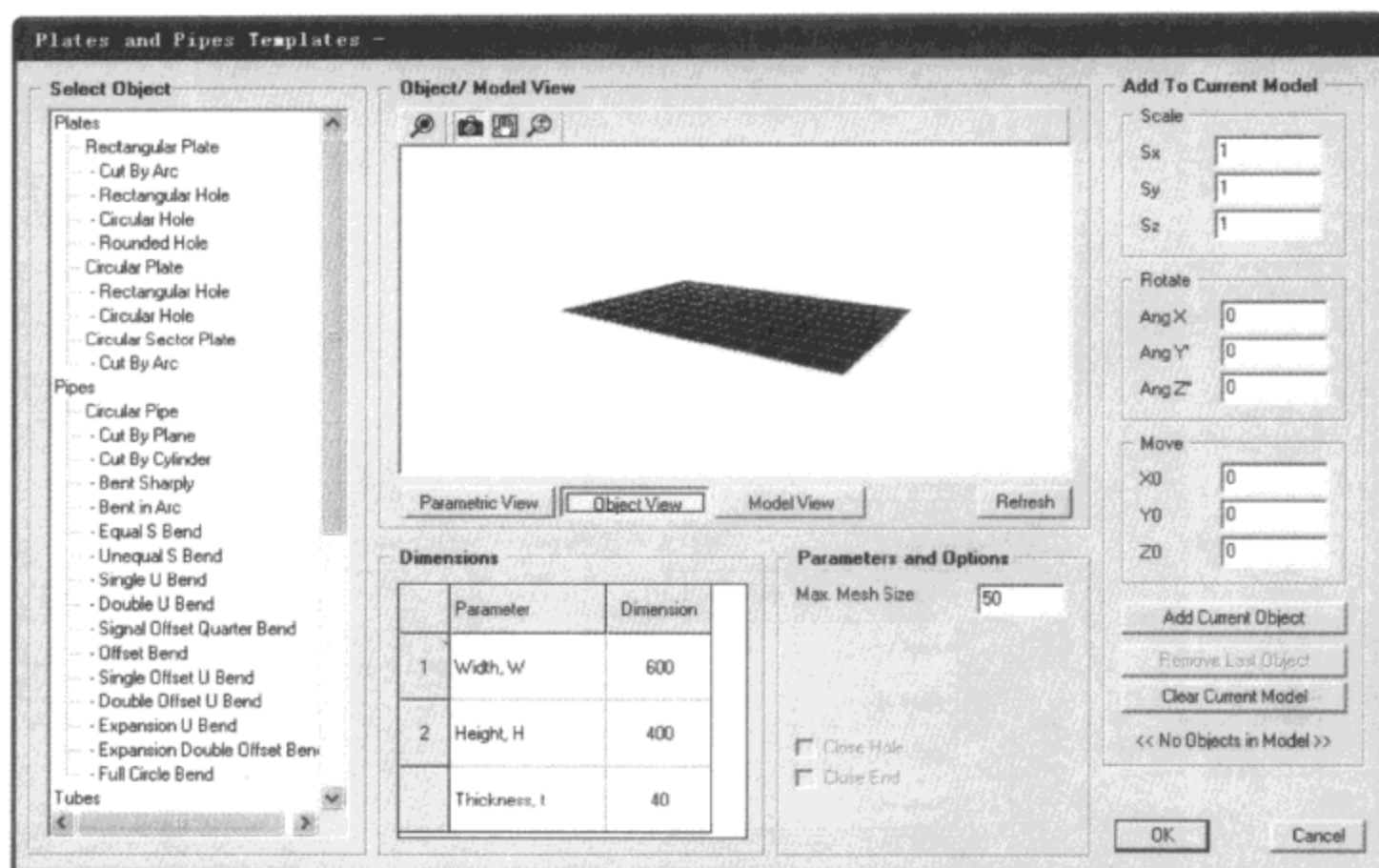


图 10-31 管和板定义对话框

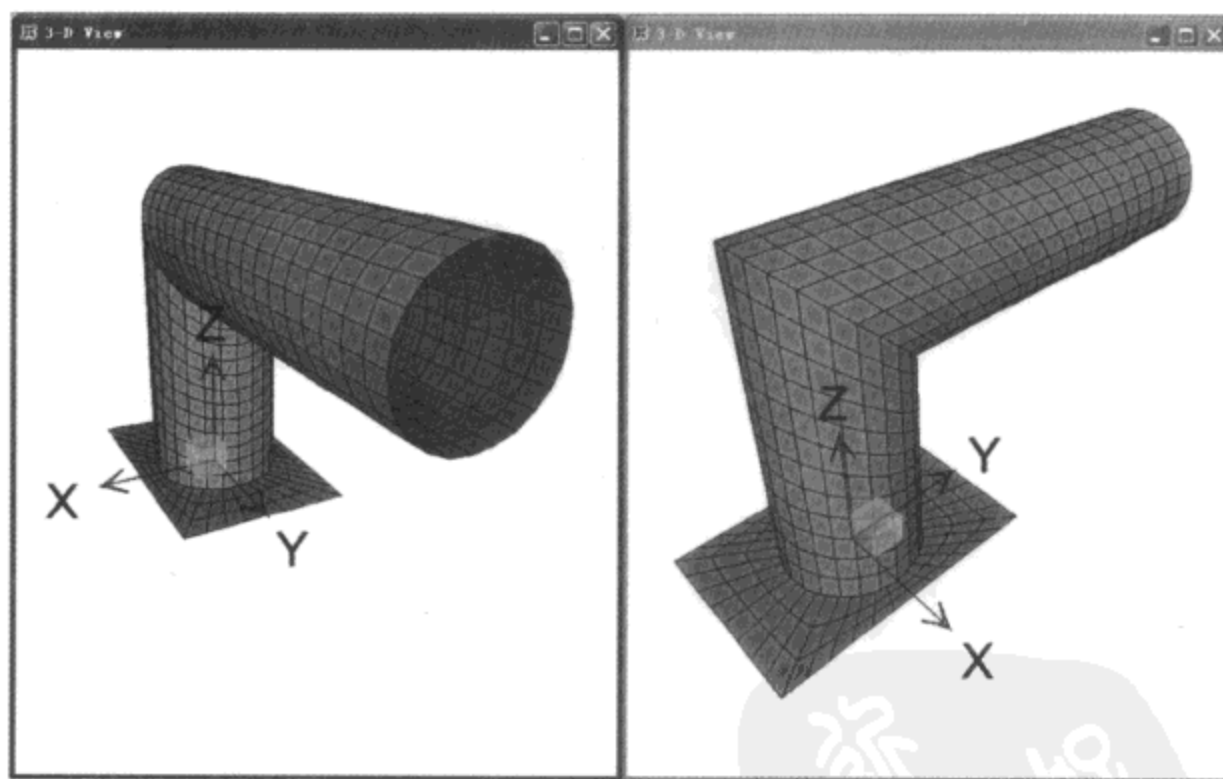


图 10-32 模型示意图

10.1.2 用模板添加结构到现有模型

在建立了一部分模型后，可能还需要在现有模型上利用模板添加新的部分，可以通过编辑菜单下的命令实现。点击【编辑】>【从模板中添加到模型】命令，弹出新模型对话框（图 10-35）。

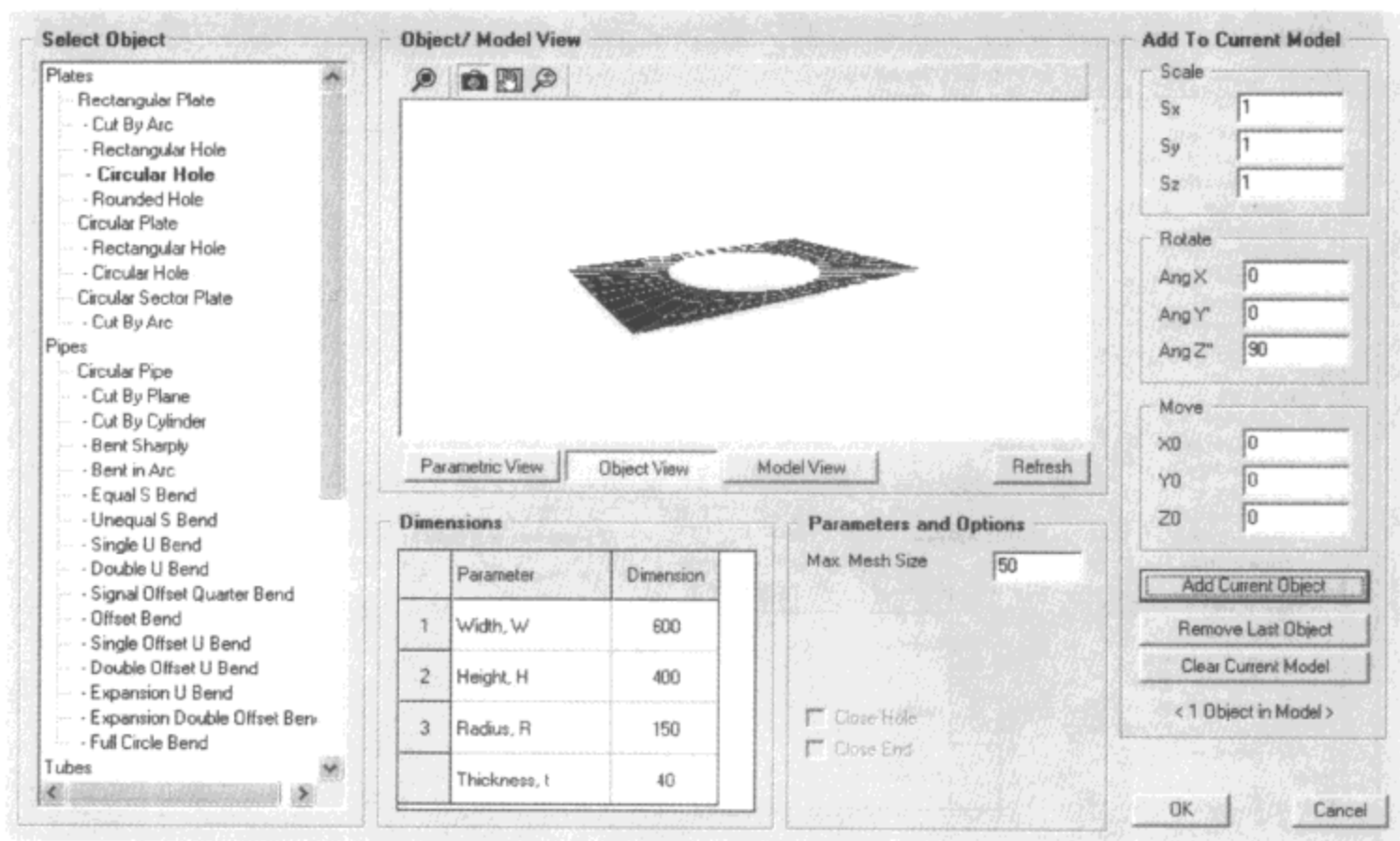


图 10-33 定义管底板

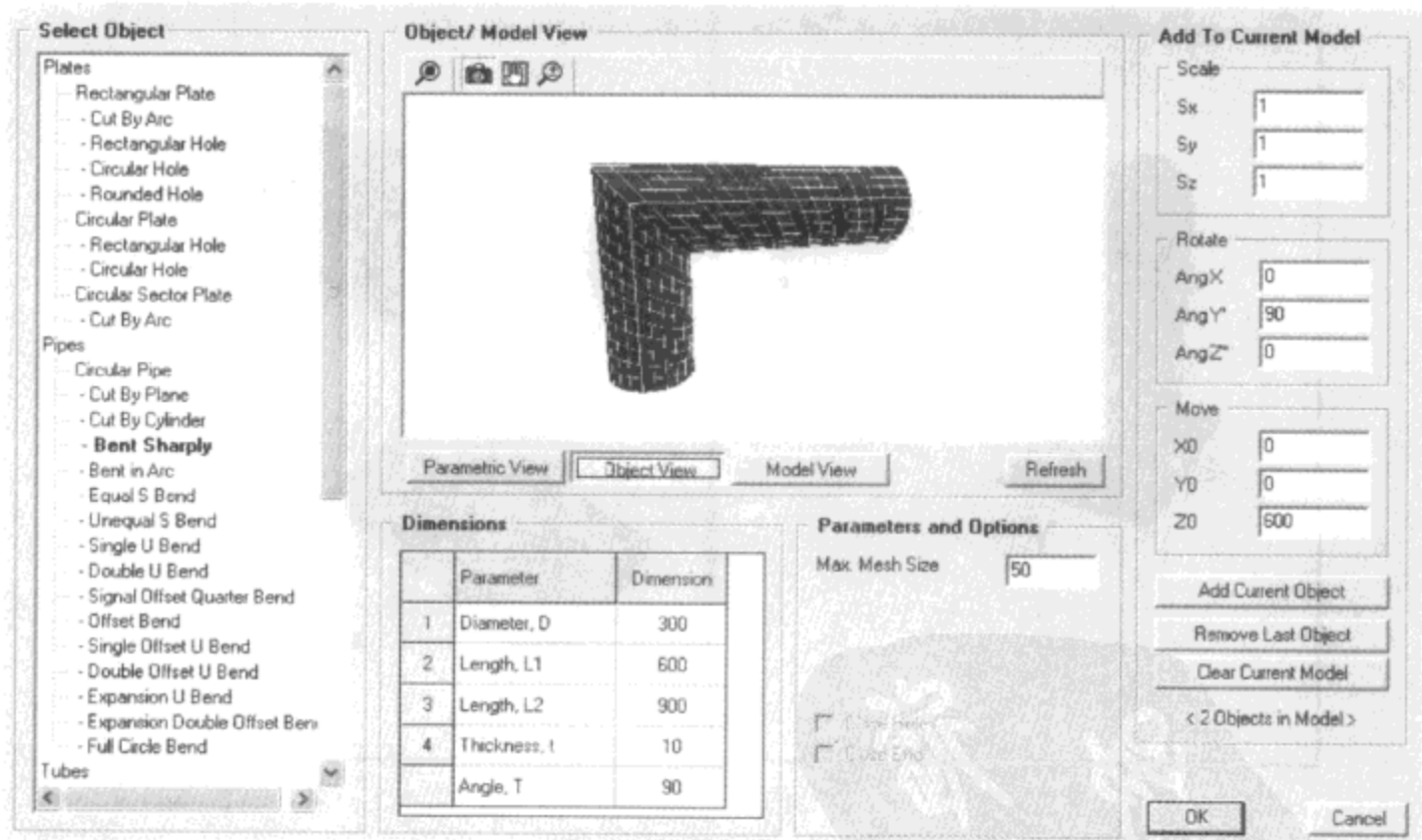


图 10-34 定义弯管

此对话框同点击【文件】>【新模型】命令弹出的对话框基本一致，只是新模型初始化区域和【空】、【轴网】按钮是灰色的，不可用。如果要添加新的模型部分，只要点击某个按钮，定义新模型部分的参数即可，操作的过程同新模型初始化的过程。定义完毕后新的模型



图 10-35 新模型对话框

部分将被添加到原有模型中。

10.2 AutoCAD 导入导出

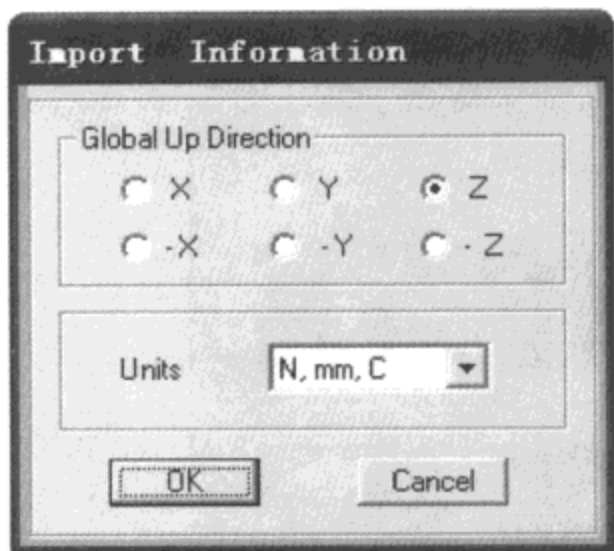
在实际的建筑结构设计中，许多工程师需要根据已有的 AutoCAD 图纸利用结构分析软件进行建模，再分析计算。很多时候，建模是个非常费时费力的过程，一些很复杂的模型例如网壳，如果能够利用 AutoCAD 软件绘制模型，并由结构分析程序直接利用 AutoCAD 图形进行分析，则建模过程将被大大简化。

SAP2000 中就为工程师提供了这方面的功能，能够通过导入 AutoCAD 文件，生成线单元，再在 SAP2000 中将构件截面赋给模型，这样就实现了快速的建模过程。并且 SAP2000 还能够把模型输入输出的信息导出生成为 DXF 后缀文件，到 AutoCAD 中去打开处理。这样 SAP2000 实现了同 AutoCAD 的交互设计功能。

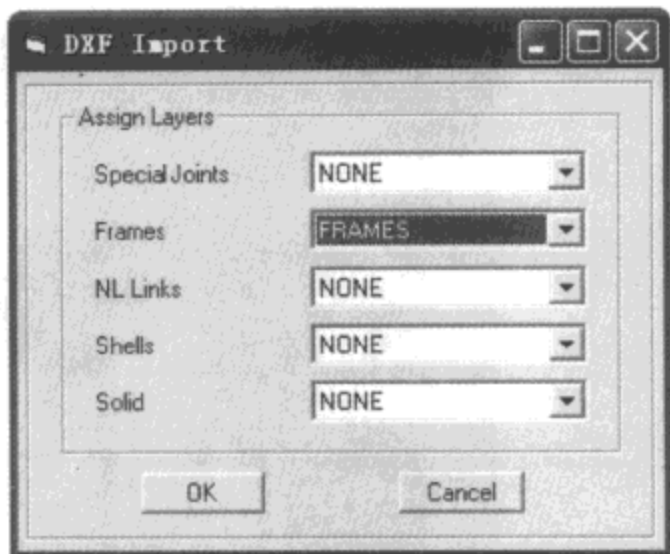
10.2.1 导入 AutoCAD.dxf 文件

点击【文件】>【导入】>【AutoCAD .dxf 文件】命令，弹出 Import DXF File 选择框，选择打开由 AutoCAD 生成的 DXF 文件，弹出 Import Information 对话框见图 10-36a)。

在 Global Up Direction 区域中整体坐标系选择结构竖直向上的方向，在 Units 区域中选择系统单位制。点击【OK】按钮，弹出 DXF Import 对话框，见图 10-36b)。选择各种对象（点、框架、非线性连接、壳面、实体）在 DXF 文件中对应的图层。点击【OK】按钮，程



a)



b)

图 10-36 导入 AutoCAD . DXF 文件

序按照指定的方式将 DXF 文件导入到 SAP2000 中。程序将对导入的对象赋给默认的截面，工程师按照需要对对象进行截面的指定修改，继续完成建模过程。

例如导入如图 10-37 所示的一个三维塔模型，在 SAP2000 中点击【文件】>【导入】>【AutoCAD . dxf 文件】命令，Import Information 对话框中设置保持如图 10-36a) 所示，点击【OK】按钮；在 DXF Import 对话框中给 Frames 型构件选择图层为 FRAMES，这个图层是 DXF 文件中的线构件的图层名称，然后点击【OK】按钮，见图 10-36b)。SAP2000 自动导入 DXF 模型（图 10-38），并给杆件赋值为默认的截面，可以随后再对杆件截面进行修改。

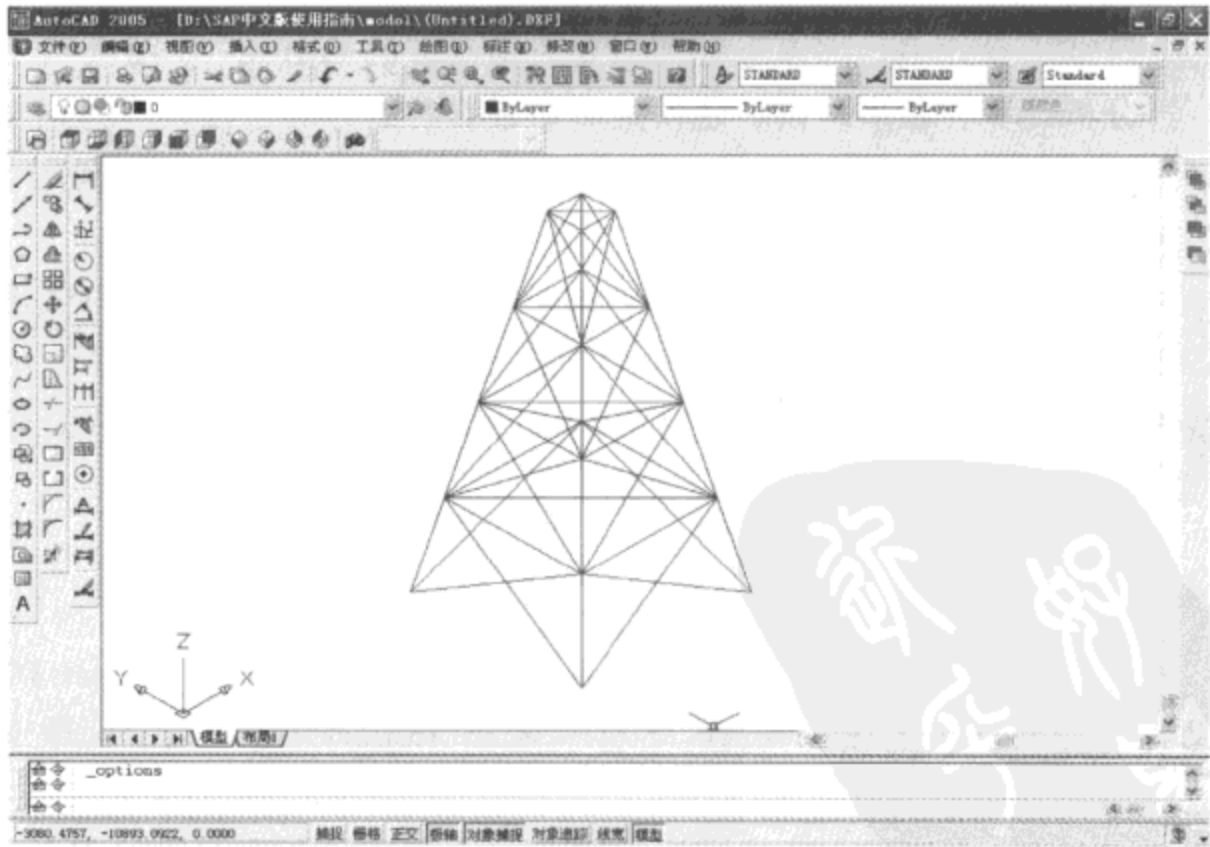


图 10-37 AutoCAD 中的三维塔

10.2.2 导出 AutoCAD. dxf 文件

点击【文件】>【导出】>【AutoCAD . dxf 文件】命令，弹出 Save AutoCAD . DXF File As 对话框，指定保存路径和文件名称，点击【确定】，弹出 DXF File Export Option 对话框，见图 10-39a)，选择是否按现有的 DXF 文件确定图层。点击【是】，提示选择一个已有的 DXF 文件，打开后弹出 DXF Export 对话框见图 10-39b)；点击【否】，直接弹出 DXF Export 对话框，见图 10-39b)。

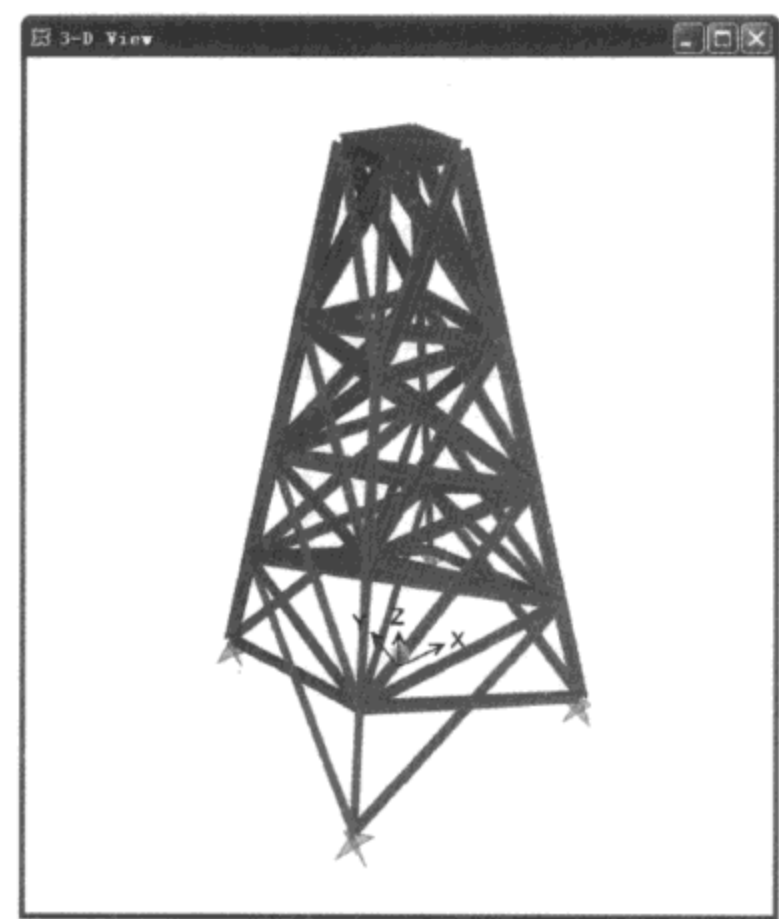


图 10-38 导入 SAP2000 的 DXF 模型

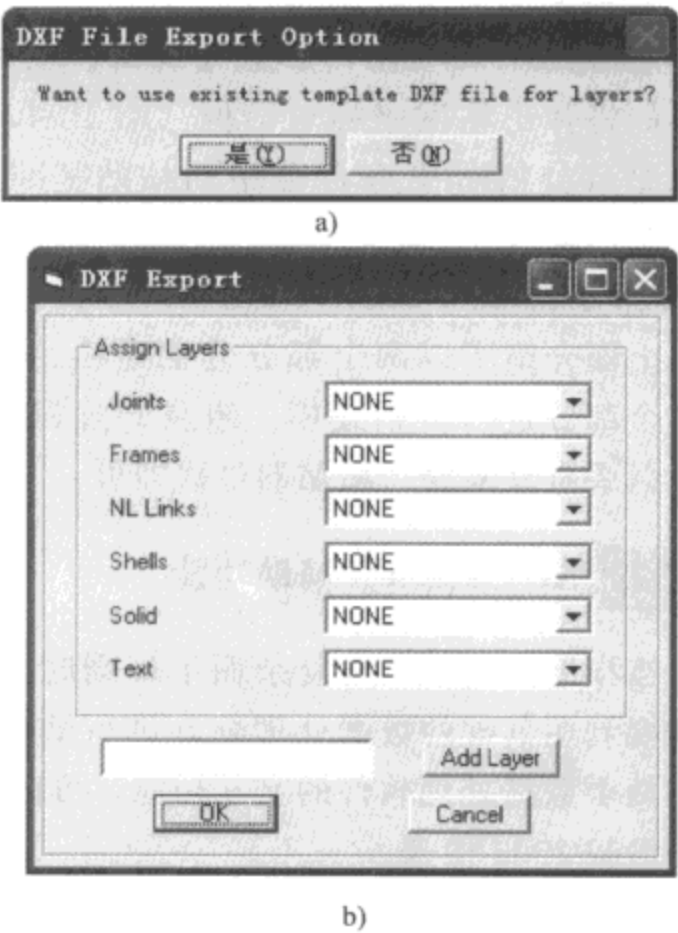


图 10-39 导出 AutoCAD. DXF 文件

在此对话框中为模型的单元（包括：点、框架、连接、壳、实体、文字）指定输出到 DXF 文件中后的图层名称；如果下拉菜单中没有需要的名称，在下边的输入框中，输入需要的名称，点击【Add Layer】按钮，这样下拉菜单中就增加了新输入的图层名称。图层指定完毕后，点击【OK】按钮，生成 DXF 文件。用 AutoCAD 打开即可进行图形的编辑。

10.3 模型组装及 Access、Excel 辅助功能

SAP2000 中提供了分块建模功能，对于一些非常复杂的工程，无需一位工程师耗费过长的时间去建立整个模型，而是可以由多位工程师同时建立模型的各个部分，然后再组装到一起，可以大大缩短设计周期。并且可以把模型的数据同 Access 数据库、Excel 表格等数据处理软件进行交互。

10.3.1 模型组装

在 SAP2000 中，当多位工程师对模型采用独立同步建模完成后，要把模型进行组装，是非常简单的。例如一个模型分为 A、B 两部分进行建模，要把两部分合并，可以新建一个空模型，把两个部分合并到一起；也可以直接将其中一个部分合并到另外一部分中去。

我们现在把 B 部分合并到 A 中去，打开 B 部分的模型，选中 B 模型部分所有的构件，点击【编辑】>【复制】命令，然后打开 A 模型，点击【编辑】>【粘贴】命令，程序界面将弹出粘贴坐标对话框（图 10-40）。在此对话框中输入 B 部分粘贴在 A 部分中的粘贴基准点 X、Y、Z 坐标值。坐标输入完毕后，点击【确定】按钮，B 部分即被组装到 A 部分中去。

上面介绍了以两个部分分别建模的例子，如果模型是分多个部分进行分别建模，组装的过程同分两部分建模类似，只要重复复制、粘贴的过程即可。

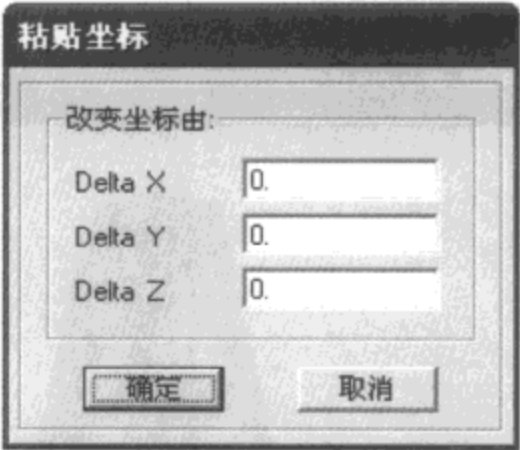


图 10-40 粘贴坐标对话框

10.3.2 Access、Excel 辅助功能

当模型的形状非常复杂而不规则时，利用 SAP2000 中的建模功能可能不是非常简便，就需要利用其他的数据处理软件进行辅助完成，SAP2000 提供了同 Access 数据库和 Excel 表格两个数据处理软件的交互功能，可以把数据导出到数据处理软件中进行修改，然后再导入到 SAP2000 中来。

如果要把模型导出到 Access 或 Excel 软件中，点击【文件】>【导出】>【SAP 2000 MS Access数据库 .mdb 文件】或【文件】>【导出】>【SAP2000 MS Excel 电子表格 .xls 文件】命令，弹出选择表输出到 Access 对话框（图10-41）。或选择表输出到 Excel 对话框两个对话框的内容和操作都是完全一致的，只是名称略有差别。对话框说明见表 10-13。

表 10-13

| | |
|------|-------------------------|
| 编辑区域 | 在树状图中选择需要导出的数据内容 |
| 荷载工况 | 点击按钮，弹出工况选择窗，选择要导出的工况名称 |
| 选项 | 控制导出选项 |
| 命名集 | 对某组表格进行命名集的操作 |

指定完毕后点击【确定】按钮，程序将自动把数据导出为 Access 数据库文件（后缀 mdb）或 Excel 电子表格文件（后缀 xls）。将文件打开可以进行编辑修改。

当要把文件导回到 SAP2000 中时，点击【文件】>【导入】>【SAP2000 MS Access 数

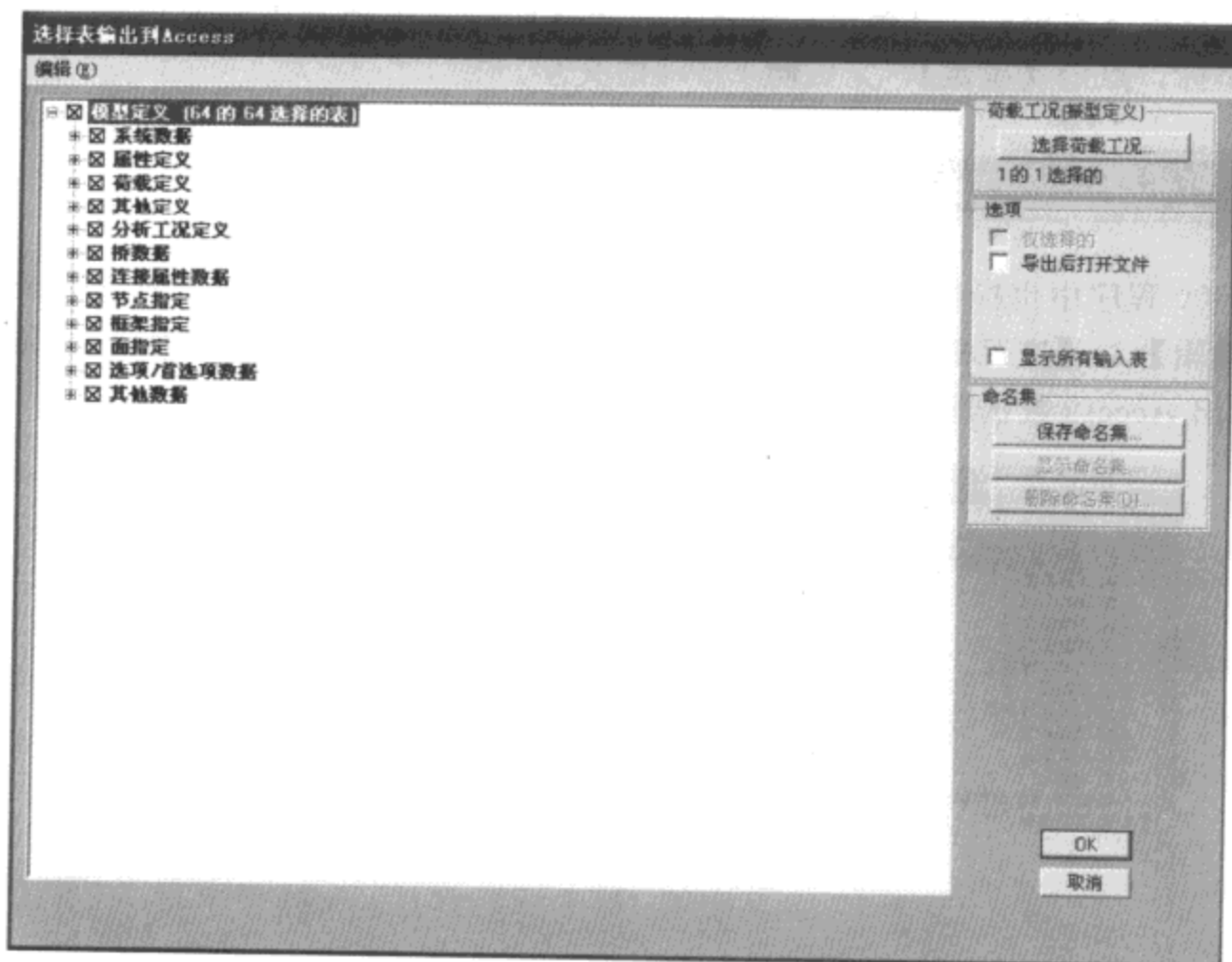


图 10-41 数据导出选择对话框

数据库 .mdb 文件】或【文件】>【导入】>【SAP2000 MS Excel 电子表格 .xls 文件】命令，弹出导入表数据库对话框（图 10-42）。对话框说明见表 10-14。

表 10-14

| | |
|------|---|
| 导入类型 | 选择是导入到一个新模型中还是添加到现有模型中，如果当前的 SAP2000 中已有一个模型，“添加到现有模型”选项将激活 |
| 高级选项 | 点击弹出高级选项对话框，对导入做高级选项指定 |

设置完毕点击【确定】按钮，程序自动导入 Access 数据库文件或 Excel 电子表格文件中的模型信息，在 SAP2000 中生成模型。

另外，在 SAP2000 中，也可以用复制、粘贴的方法同 Excel 电子表格程序进行交互。

选中需要复制到 Excel 电子表格软件中进行编辑的模型部分，点击【编辑】>【复制】命令，打开 Excel 程序，点击【编辑】>【粘贴】命令，模型数据会以表格的形式显示在 Excel 表格中。对表格数据进行修改后，选择所有数据，点击【编辑】>【复制】命令，再打开

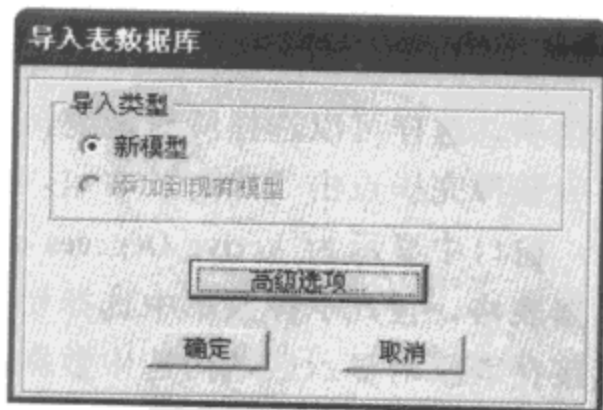


图 10-42 导入表数据库对话框

SAP2000，点击【编辑】>【粘贴】命令，程序界面将弹出粘贴坐标对话框，如图 10-40。输入基点坐标，点击【确定】，完成同 Excel 的交互。

10.4 SAP2000 交互式数据库编辑功能

SAP2000 程序中也提供了自身的交互式数据库编辑功能，在 SAP2000 中建立模型，然后点击【编辑】>【交互式数据库编辑】命令，弹出选择表进行交互式编辑对话框（图 10-43）。同输出 Access 数据库的数据选择类似。

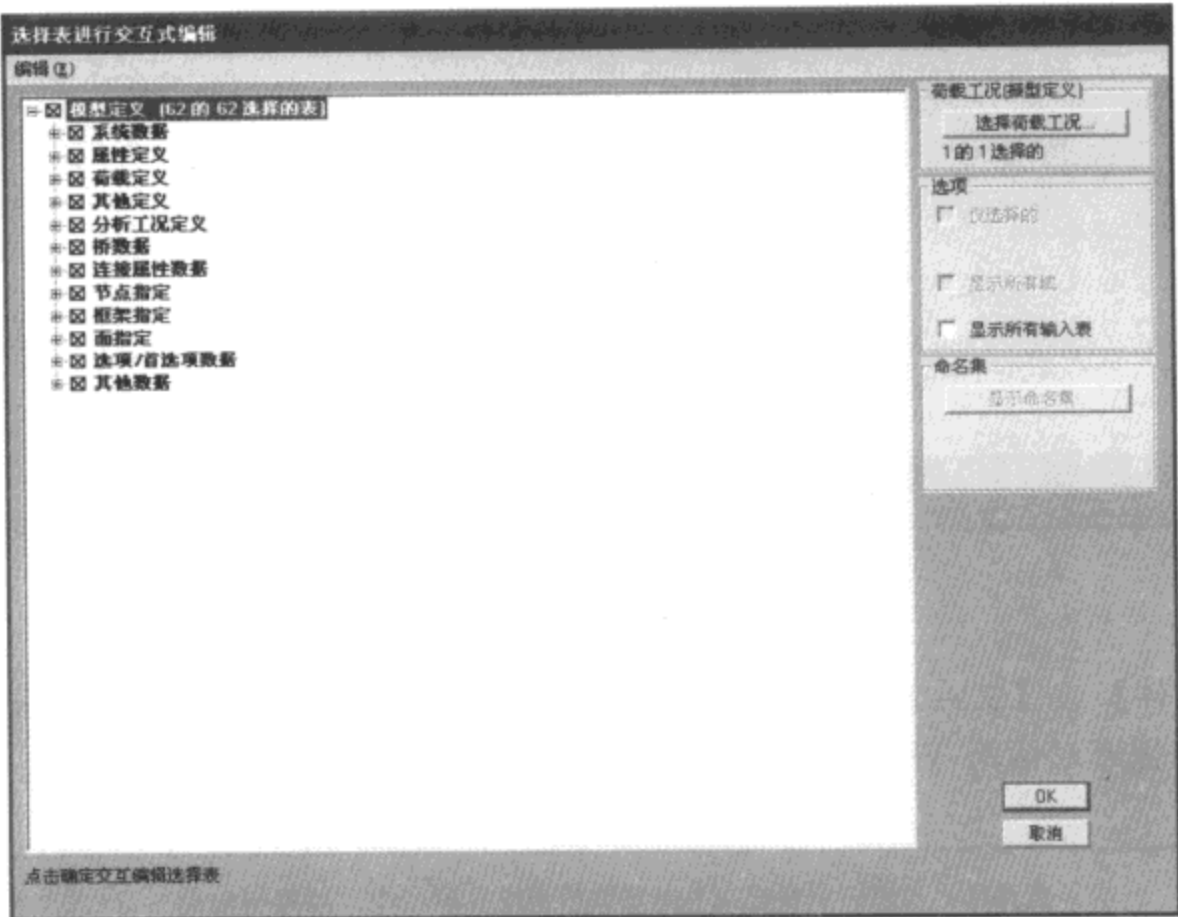


图 10-43 选择表进行交互式编辑对话框

在这个窗口中选择需要进行编辑的数据，窗口中显示出了当前模型中所有的全部数据表格列表。如果勾选了【显示所有输入表】项，则会多出一些表格，这些多出的表格是当前模型中没有的模型构件或荷载工况等。如果不仅需要修改模型，还需要给模型添加内容可以选择这项，这样可以选择所有能编辑的表格。

选择完毕点击【确定】按钮，弹出 Interactive Database Editing 窗口（图 10-44）。

窗口中显示为 Active Degrees of Freedom 的下拉菜单，列出了刚才选中输出的各个模型数据表格，在此下拉菜单中选择切换表格。在中间显示区域内可以对每个表格进行编辑，即直接在表格的显示区域内选中数据进行复制、粘贴、修改、删除等操作。

此窗口的右侧显示列出了一系列的按钮，是对表格编辑操作的常用功能按钮，这些按钮和窗口菜单中的命令基本上是对应的。

下面对此交互式数据库编辑窗口的【文件】、【Excel】、【编辑】、【视图】、【选项】五个菜单的功能和窗口右侧的功能按钮作以详细的介绍，见表 10-15～表 10-19。

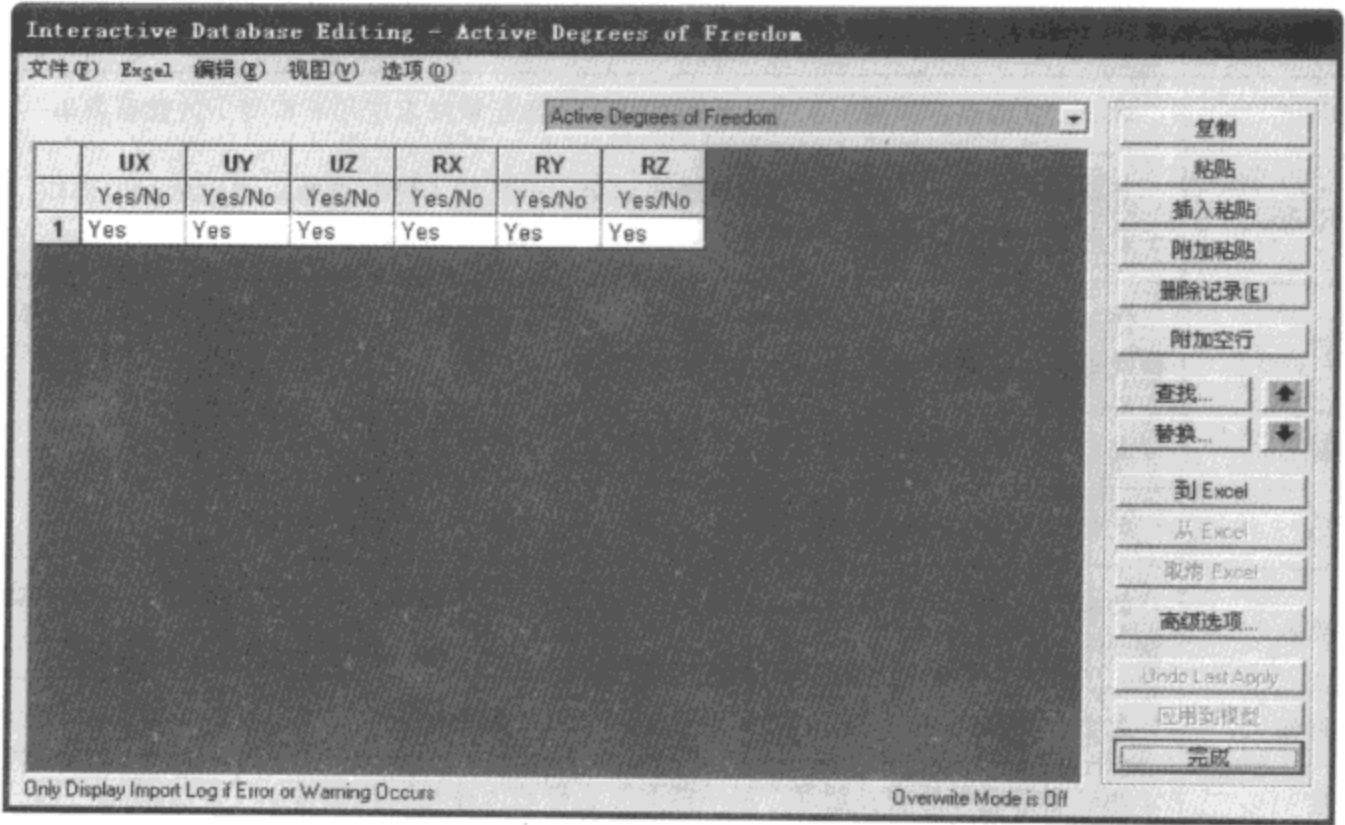


图 10-44 交互式数据库编辑窗

文 件 菜 单

表 10-15

| | |
|---------------------|--|
| 应用到模型 | 此命令功能同窗口右侧的【应用到模型】按钮。点击此命令，将使在交互式数据库窗口中修改的模型数据应用到 SAP2000 模型中去，模型会随数据库窗口中数据的变化适时地产生改变。如果没有对模型进行操作，则此命令显示为灰色，处于不可操作状态 |
| 完成（关闭数据库并返回模型） | 此命令的功能同窗口右侧的【完成】按钮。点击此命令，意味着工程师完成了交互式数据库的编辑，将关闭此窗口回到 SAP2000 模型中去。如果此时有数据库中的编辑还没有应用到模型中去，软件将提示工程师是否将改变应用到模型中去 |
| 【Undo Last Apply】按钮 | 此按钮的作用是，当工程师使用了【应用到模型】命令或按钮后，点击此按钮，将使数据库恢复到使用【应用到模型】命令对模型改变之前的模型状态，并且数据库同当前模型数据统一。如果没有使用过【应用到模型】命令，此命令按钮显示为灰色，处于不可操作状态 |

Excel 菜 单

表 10-16

| | |
|-------------------|---|
| 发送数据到 Excel | 此命令功能同窗口右侧的【到 Excel】按钮，点击此命令，将自动打开 Excel 电子表格软件，并把当前激活的表格中的数据传到 Excel 软件中，工程师可以通过 Excel 电子表格软件的数据处理功能对模型数据进行编辑 |
| 从 Excel 表取得数据到数据库 | 此命令功能同窗口右侧的【从 Excel】按钮，在点击【发送数据到 Excel】命令并完成了数据编辑后，点击此按钮表示将打开并编辑后的 Excel 表格导入到交互式数据库编辑窗口中来，同时关闭对应的 Excel 软件。如果没有用【发送数据到 Excel】命令打开 Excel 窗口，则此命令显示为灰色，为不可操作状态 |
| 取消 Excel 表中数据库 | 此命令功能同窗口右侧的【取消 Excel】按钮，在点击【发送数据到 Excel】命令并打开 Excel 窗口后，点击此按钮，表示取消在 Excel 软件中对数据做的编辑，同时关闭 Excel 软件。当没有用【发送数据到 Excel】命令打开 Excel 窗口时，此命令处于不可操作状态（灰色） |

编辑菜单

表 10-17

| | |
|---------|--|
| 恢复 Undo | 对交互式数据库中的操作进行恢复操作，仅限于恢复未应用到模型中的数据编辑 |
| 重做 Redo | 对交互式数据库中的数据进行重做的编辑，是在用了恢复功能后可以进行的操作，并且仅限于重做未应用到模型中的操作 |
| 剪切 | 用于剪切表中选中的数据，可以剪切单个数据、单行或多行、单列或多列数据。只能剪切表格数据，对表格行标题或列标题没有影响 |
| 复制 | 此命令功能同窗口右侧的【复制】按钮。用于复制选中的表格数据 |
| 粘贴 | 此命令功能同窗口右侧的【粘贴】按钮。用于粘贴选中的表格数据 |
| 粘贴插入 | 此命令功能同窗口右侧的【粘贴插入】按钮。用于在选中的表格数据的上面插入粘贴一行数据 |
| 粘贴附加 | 此命令功能同窗口右侧的【粘贴附加】按钮。用于在选中的表格最下面附加粘贴一行数据 |
| 删除 | 删除当前选择的表格数据，但不能删除表格的行标题和列标题 |
| 删除记录 | 此命令功能同窗口右侧的【删除记录】按钮。删除所有选中的行的数据记录和表格的行标题 |
| 插入空记录 | 在当前选中的表格数据上面插入一行空数据 |
| 附加空记录 | 此命令功能同窗口右侧的【附加空行】按钮。在当前的表格最下面一行附加一行空数据 |
| 向上移动记录 | 把当前选中的一行数据记录在表格中向上移动 |
| 向下移动记录 | 把当前选中的一行数据记录在表格中向下移动 |
| 查找 | 此命令功能同窗口右侧的【查找】按钮。点击弹出查找和替换对话框，用于查找数据 |
| 替换 | 此命令功能同窗口右侧的【替换】按钮。点击弹出查找和替换对话框，用于查找并替换数据 |
| 对齐 | 通过选择对表格中选中的数据进行一般对齐、左对齐、居中对齐或右对齐 |

视图菜单

表 10-18

| | |
|----------|---|
| 最大显示（切换） | 使用此按钮在最大化和中间尺寸中间切换显示窗口 |
| 隐藏选择列 | 隐藏在表格中选择的列数据 |
| 显示所有列 | 显示表格中所有列 |
| 自动调整列 | 自动调整列的宽度来显示数据 |
| 域描述 | 点击弹出窗口，显示当前域的信息 |
| 单元信息 | 点击显示当前单元信息 |
| 计算器 | 当选中表格中的数字型数据时，此命令激活，点击弹出计算器，可以通过计算器计算数据 |
| 下拉列表 | 当选中表格中的非数字型数据时，此命令激活，点击后在选中的数据上将显示下拉列表，在下拉列表中选择数据进行赋值 |

选 项 菜 单

表 10-19

| | |
|-----------|---|
| 覆盖振型 | 覆盖振型 |
| 显示/隐藏按钮 | 通过点击可以切换是否显示窗口右侧的常用功能按钮 |
| 加亮表改变 | 点击激活加亮改变的表数据功能，更改过的数据高亮度显示 |
| 高级导入选项 | 此命令功能同窗口右侧的【高级选项】按钮。点击弹出高级导入日志对话框，控制从数据库导入到 SAP2000 中时的导入设置 |
| 导入后总是显示日志 | 激活表示在每次将数据库数据导入应用到 SAP2000 中时显示导入日志 |

以上对数据库编辑窗口的各功能进行了具体的介绍，下面我们以一个简单的例子把 SAP2000 交互式数据库功能的使用过程给大家作以介绍。

首先我们建立一个简单的两层钢结构框架，如图 10-45 所示：

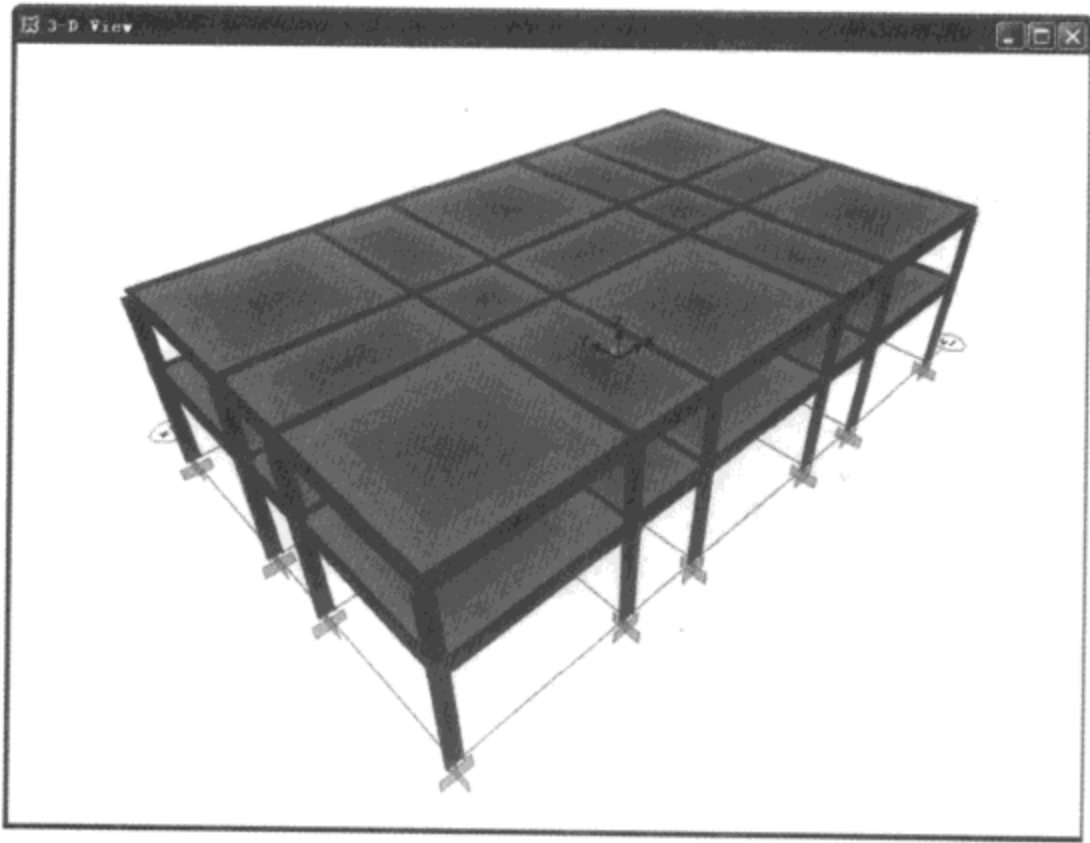


图 10-45 两层钢框架模型

点击【编辑】>【交互式数据库编辑】命令，弹出选择表进行交互式编辑对话框（图 10-43）。选择所有的模型数据表格，即选中选择表进行交互式编辑对话框所有列出的表格。点击【OK】按钮，弹出 Interactive Database Editing 窗口。在表格下拉列表中，切换到 Joint Coordinates 表格（图 10-46）。

这个表格是模型中节点的坐标表格，编号为 3、6、9、12 的四个节点 Z 坐标均为 7000，我们把这四个节点的坐标改为 5000，然后在此窗口中点击【应用到模型】按钮（如果需要对模型的其他信息做修改可以继续进行编辑，这里仅以对模型做简单修改为例）。然后点击【完成】按钮，回到 SAP2000 软件窗口中，修改后的模型如图 10-47 所示。

Interactive Database Editing - Joint Coordinates

文件(F) Excel 编辑(E) 视图(V) 选项(O)

Joint Coordinates

| | Joint | CoordSys | CoordType | XorR | Y | T | Z | SpecialJt |
|----|-------|----------|-----------|-----------|----------|---------|---------|-----------|
| | Text | Text | Text | mm | mm | Degrees | mm | Yes/No |
| 1 | 1 | GLOBAL | Cartesian | -15000.00 | -9000.00 | | 0.00 | No |
| 2 | 2 | GLOBAL | Cartesian | -15000.00 | -9000.00 | | 4000.00 | No |
| 3 | 3 | GLOBAL | Cartesian | -15000.00 | -9000.00 | | 7000.00 | No |
| 4 | 4 | GLOBAL | Cartesian | -15000.00 | -3000.00 | | 0.00 | No |
| 5 | 5 | GLOBAL | Cartesian | -15000.00 | -3000.00 | | 4000.00 | No |
| 6 | 6 | GLOBAL | Cartesian | -15000.00 | -3000.00 | | 7000.00 | No |
| 7 | 7 | GLOBAL | Cartesian | -15000.00 | 0.00 | | 0.00 | No |
| 8 | 8 | GLOBAL | Cartesian | -15000.00 | 0.00 | | 4000.00 | No |
| 9 | 9 | GLOBAL | Cartesian | -15000.00 | 0.00 | | 7000.00 | No |
| 10 | 10 | GLOBAL | Cartesian | -15000.00 | 6000.00 | | 0.00 | No |
| 11 | 11 | GLOBAL | Cartesian | -15000.00 | 6000.00 | | 4000.00 | No |
| 12 | 12 | GLOBAL | Cartesian | -15000.00 | 6000.00 | | 7000.00 | No |
| 13 | 13 | GLOBAL | Cartesian | -9000.00 | -9000.00 | | 0.00 | No |
| 14 | 14 | GLOBAL | Cartesian | -9000.00 | -9000.00 | | 4000.00 | No |
| 15 | 15 | GLOBAL | Cartesian | -9000.00 | -9000.00 | | 7000.00 | No |
| 16 | 16 | GLOBAL | Cartesian | -9000.00 | -3000.00 | | 0.00 | No |
| 17 | 17 | GLOBAL | Cartesian | -9000.00 | -3000.00 | | 4000.00 | No |

Only Display Import Log if Error or Warning Occurs

Overwrite Mode is Off

复制

粘贴

插入粘贴

附加粘贴

删除记录(E)

附加空行

查找...

替换...

到 Excel

从 Excel

取消 Excel

高级选项...

Undo Last Apply

应用到模型

完成

图 10-46 Joint Coordinates 表格

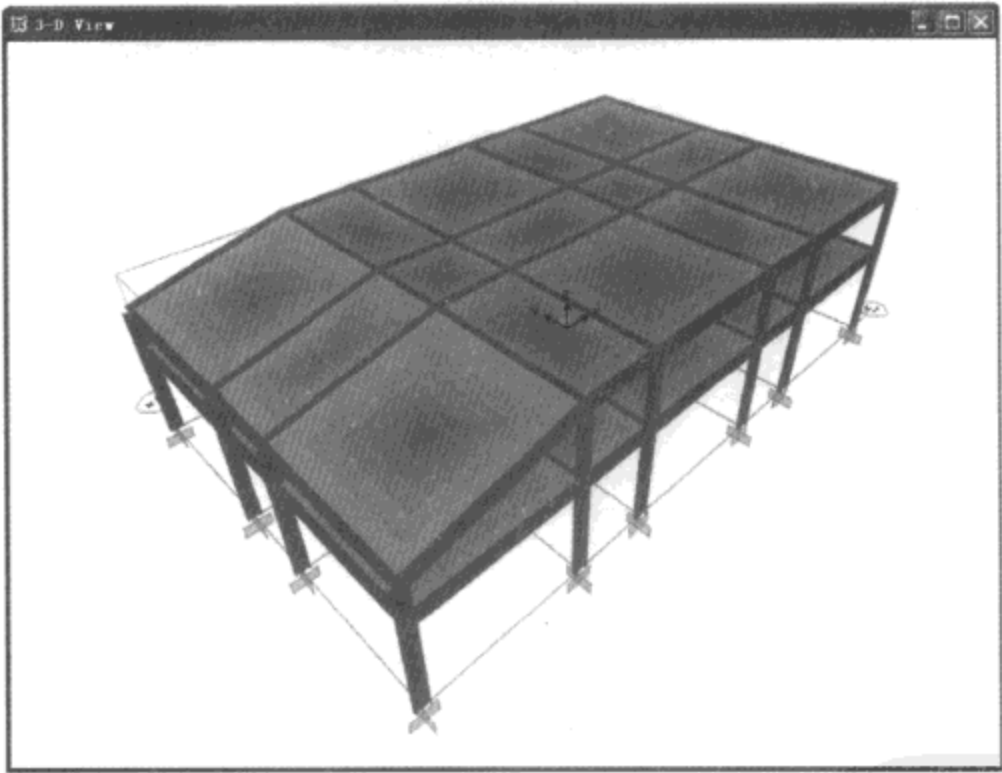


图 10-47 经过交互式数据库编辑后的模型

10.5 \$2K 文本文件及从 ETABS 中导入模型

SAP2000 软件还可以通过文本的方式保存，可以通过导入文本的方式生成模型，并且可以通过导入 ETABS 生成的相应模型文本，把 ETABS 的模型导入到 SAP2000 中来。

10.5.1 \$2K、S2K 文本文件

SAP2000 在模型保存时，保存的是一个后缀为 **.sdb** 的模型文件，同时也会保存一个后缀为 **\$2k** 的文本文件，它是 SAP2000 自动生成的以文本格式保存模型的备份文件。当后缀为 **.sdb** 的模型文件损坏时或者出现某些错误时，工程师可以通过导入 **\$2k** 文件的方法恢复已保存的模型。SAP2000 还可以通过自身的导出功能，导出后缀为 **.S2k** 的文本文件，可以作为模型的一种保存方式。

导出 **S2K** 文本文件的方法非常简单，建立完模型后，点击 **【文件】 > 【导出】 > 【SAP2000. S2k Text File】** 命令，程序弹出选择表输出到文本文件对话框（图 10-48）。

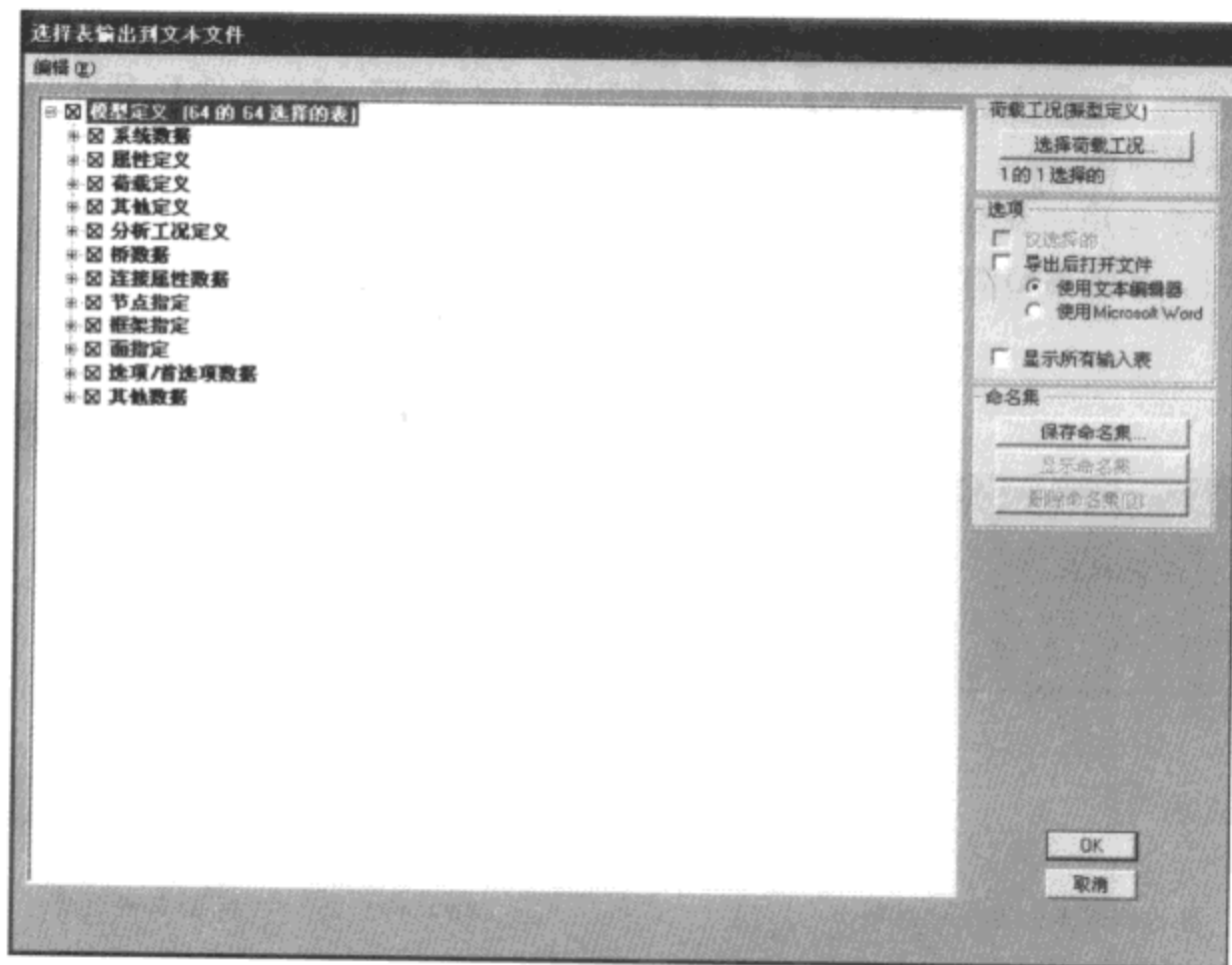


图 10-48 选择表输出到文本文件对话框

在对话框中选择需要保存的模型信息、荷载工况，设置完各种选项后，点击 **【OK】** 按钮，弹出保存对话框，指定保存路径和保存文件名称，点击保存生成 **S2K** 文本文件。

\$2K 和 **S2k** 文本文件的格式是完全一致的，工程师可以用写字板、记事本等文字处理软件打开，对其中的内容进行修改，然后再用 SAP2000 导入，可以实现对模型的修改。要导入文本文件，点击 **【文件】 > 【导入】 > 【SAP2000 V8N9N10. s2k Text File】** 命令，弹出导入表数据库对话框（图 10-42）。设置完毕点击 **【确定】** 按钮，弹出选择框，选中已保存的 **\$2K** 或 **S2k** 文本文件，程序自动导入选中的文本文件。

10.5.2 从 ETABS 中导入模型

SAP2000 可以从 ETABS 中导入模型文件，可以把 ETABS 建立的模型，在 SAP2000 中进行编辑分析计算。但是要注意：

1) 模型从 ETABS 导入 SAP2000 的过程中, 用膜单元建立的楼板上面施加的荷载, 在 SAP2000 中不能自动传递到梁或柱上。由于 SAP2000 中的膜单元没有平面外的刚度, 如果在膜面外施加荷载, 会出现计算错误。所以在从 ETABS 中导入模型的过程中, 需将用膜单元建立的楼板换成用壳单元建立楼板。

2) 在 ETABS 模型导入到 SAP2000 的过程中, 所有构件的质量都计算为点质量施加到了模型的各个节点上, 同时所有材料的密度都设为零。工程师在用 SAP2000 导入 ETABS 模型时, 需要对此注意。把所有的材料密度全部赋予正常的数值, 并把所有节点施加的质量取消即可解决此问题。

要导入模型, 首先要从 ETABS 中输出 **S2K** 的文本文件, 用 ETABS 中的导出功能实现。ETABSv8 和 v9 版本中导出的 **S2K** 文件是 SAP2000V7 版本的文本文件, 需要在 SAP2000 中使用 **【文件】 > 【导入】 > 【SAP2000 V6 或 V7. s2k 文件】** 命令, 弹出导入旧版本文件提示框 (图 10-49)。

程序提示要运用转化器, 将模型文件由旧版本转换为 V8 版本的模型文件。点击 **【运行转换器】** 按钮, 弹出 **SAP2000 Translator** 转换器窗口 (图 10-50)

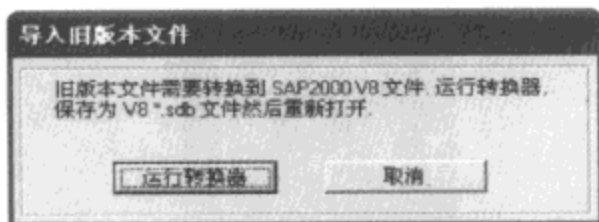


图 10-49 导入旧版本文件提示框图

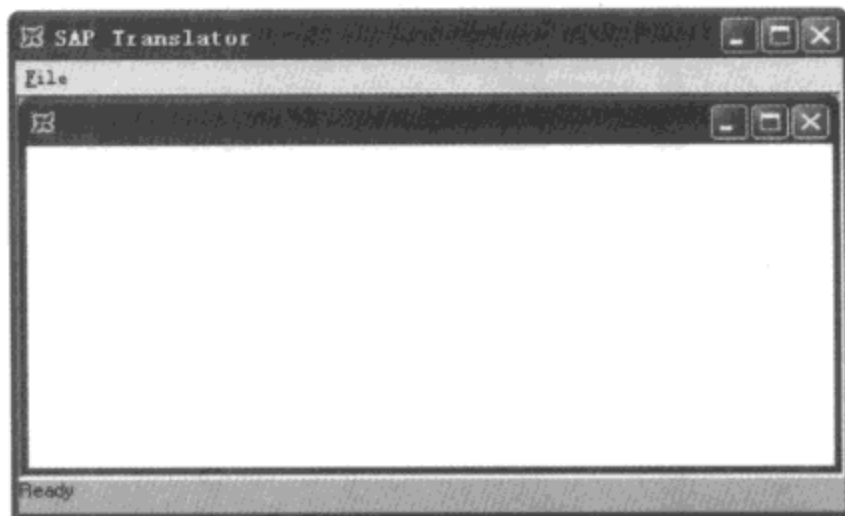


图 10-50 SAP2000 版本转换器

在转换器中点击 **【File】 > 【Import SAP2000 V6/V7 Text (.s2k, \$2k) File】** 命令, 弹出选择框, 选择 ETABS 生成的 **S2k** 文件, 例如选择一个由 ETABS 生成的 **S2k** 文件 “conc. S2k”。程序自动转换旧版本文件为 V8 版本的模型文件。转换完毕后窗口如图 10-51 所示。

点击 **【File】 > 【Save As SAP2000 V8 SDB】** 命令, 弹出保存对话框, 指定保存路径和文件名称, 保存 SDB V8 版本文件。转换完毕后, 关闭转换器窗口, 用 SAP2000 打开刚转化的 SDB 文件。这样就完成了从 ETABS 中导入模型到 SAP2000 中的过程。

10.6 与其他程序软件数据接口

SAP2000 中除了可以与上述的各程序交互进行数据处理外, 还与其他多个软件有数据接口, 这样, 工程师就可以灵活的在多个软件之间互相转换读取数据, 可以运用多个软件进行建模分析设计以及绘图。对于一些大型的超高超限工程, 利用多个结构分析软件进行结构

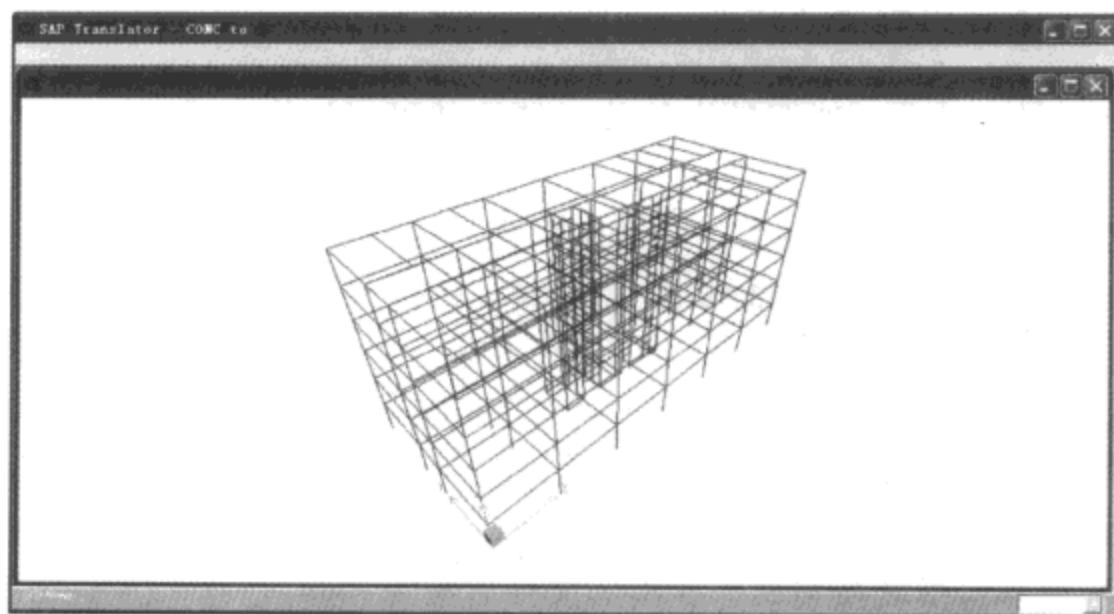


图 10-51 转换的模型

校核会使工作更加方便，缩短设计周期。

10.6.1 由 SAP2000 导入其他软件的模型

SAP2000 通过导入功能，除了可以导入 SAP 各版本的文本文件外，还能够导入其他多种软件建立的模型。

导入功能均是通过菜单【文件】>【导入】中的各命令实现的：

(1) **导入 CIS/2 STEP 文件**：此功能用于导入一个采用 CIM 钢构件整合标准 (CIS) 的文件。CIS 是一套用于钢结构行业中的正式计算规范，它使软件应用能相互兼容。该文件类型通常由美国以外别国的型钢制造者使用。

(2) **导入 Framework Plus 文件**：用于在 SAP2000 中导入 Framework 模型文件，导入的文件后缀名为 .SFC。

(3) **导入 IGES. igs 文件**：用于导入 IGES 模型文件，文件后缀为 .igs。

(4) **导入 NASTRAN. dat 文件**：导入用 NASTRAN 建立的结构分析模型到 SAP2000 中。此命令导入模型几何形状、连接、材料、截面属性、荷载、约束条件。因为 NASTRAN 和 SAP2000 有不同的有限元单元库和不同的分析功能，不是所有的 NASTRAN 数据都可以导入，例如曲面壳不能导入。导入 NASTRAN 模型时，程序会给出导入哪些项，忽略哪些项的选择信息。

(5) **导入 .std/.gti 文件**：导入用 STAAD/STRUDL 建立的结构分析模型到 SAP2000 中。导入模型几何形状、连接、材料、截面属性、荷载、约束条件。由于 STAAD/STRUDL 和 SAP2000 有不同的有限元单元库和不同的分析功能，不是所有的 STAAD/STRUDL 数据都可以导入。程序会给出导入哪些项，忽略哪些项的选择信息。

(6) **导入 ProSteel 交换数据库文件**：导入钢结构分析设计软件 ProSteel 生成的模型交互式数据库文件。

(7) **导入 IFC File**：导入采用一种建筑行业统一标准——IFC 标准的数据形式文件，此标准能和许多建筑及结构软件进行交互。例如：建筑软件 ArchiCAD。

10.6.2 由 SAP2000 导出到其他软件

SAP2000 通过导出功能，能够导出其他多种软件可以读取的数据，供其他建筑结构设计软件使用。

导出功能均是通过菜单【文件】>【导出】中的各命令实现的：

(1) 导出 **CIS/2 Step** 文件：此命令将使用 CIM 钢件整合标准 (CIS) 导出保存数据，生成 CIS/2 文件，文件后缀为 .stp。

(2) 导出 **Steel Detailing Neutral** 文件：用于生成钢结构细节中间文件，文件后缀 .SDN。

(3) 导出 **Framework Plus** 文件：用于生成 Framework 模型文件，文件后缀名为 .SFC。

(4) 导出 **IGES. igs** 文件：用于生成 IGES 初始图形交换规定格式的文件，导出 2D 和 3D 模型、图形和图解自然转换格式。导出的文件后缀为 .igs。

(5) 导出 **SASSI** 文件：导出文件由 SASSI2000 读取使用，SASSI2000 是一个计算土与结构在动力作用下的相互作用的二维或三维软件。

(6) 导出 **ProSteel** 交换数据库文件：导出钢结构分析设计软件 ProSteel 交换数据库文件。

(7) 导出 **IFC File**：按一种建筑行业统一标准——IFC 标准导出的数据形式文件，能和许多建筑及结构软件进行交互。例如：建筑软件 ArchiCAD。

第三部分

分析功能

从 SAP5 到 SAP2000, 作为土木工程界通用的有限元程序, 强大的分析功能一直是 SAP 系列软件最大的特色。其分析精度, 尤其是动力分析的精度使它保持着业界标准的地位。SAP2000 的分析类型包括线性静力分析、非线性静力分析、线性动力分析、非线性动力分析、移动荷载分析、多步静力分析、屈曲分析、频域分析等。本部分只阐释 SAP2000 基本的分析功能, 高级分析功能如非线性静力分析、非线性时程分析、移动荷载分析等功能在本书第五部分(高级分析功能及应用)进行详细介绍。

SAP2000 提供点、线、面单元以模拟建筑结构中的各种构件。SAP2000 提供自动剖分功能和自动边束缚功能, 在保证计算精度的条件下大大节省了工程师的工作量。

SAP2000 把结构的质量和自重这两个概念加以清晰的区分并建立了相互间可以进行多重定义的动能, 这样方便用户按《建筑抗震设计规范》要求, 对重力荷载代表值进行输入。

SAP2000 在计算模态分析时, 除了提供精确的特征向量法分析外, 还提供了与荷载相关的 Ritz 向量 (LDR) 分析法。LDR 向量能用于线性和非线性结构的动力分析, 与精确特征向量法相比, 新的修正 Ritz 法用更少的计算工作量可产生更精确的结果。

SAP2000 对模态分析输出质量参与系数, 可以判断结构每一个模态是属于某一方向的平动振型还是扭转振型, 确定第一平动振型和第一扭转振型后就可以判断是否满足规范对第一扭转周期与第一平动周期的限值要求。

SAP2000 对各种类型分析给出相应的分析结果, 便于用户查看。例如时程分析的时程轨迹和反应谱曲线、提供分析结果的屏幕输出、表格输出和文本输出。可以通

过动画显示的屏幕分析结果输出，使工程师更方便直观地把握结构性能。

本部分介绍了 SAP2000 基本的分析功能，包括第 11 至第 14 章。第 11 章介绍了分析选项的作用、用户设置；第 12 章从理论入手，为用户详细介绍了模态分析、反应谱分析方法以及操作过程；第 13 章从计算方法着眼，介绍了时程分析方法及其各个细节；第 14 章根据 SAP2000 的结果输出格式，从图形、表格、文件等方面为用户详细介绍并演示了 SAP2000 强大的后处理功能。

新
平
和
解
慶

第11章

分析工况

11.1 定义分析工况

SAP2000 丰富的分析功能可以从对分析工况的定义中得以体现。定义分析工况也就是定义荷载的作用方式、结构的反应方式以及分析方法等等。对同一个模型可以定义任意多种分析工况。运行模型分析时，可以有选择地运行工况，也可以删除多余的工况。

点击【定义】>【分析工况】命令，弹出分析工况对话框（图 11-1），其中左边列表框中显示已有的分析工况名称及工况类型，这些内容可以通过对话框右边的按钮进行添加或修改。例如点击右边的【添加新工况】按钮，弹出分析工况数据对话框（图 11-2）。该对话框中的内容根据分析工况类型的不同而不同，例如定义线性静力分析工况的对话框如图 11-2 所示，定义反应谱工况的对话框如图 11-3 所示。不同类型分析工况的定义都会涵盖三方面的内容：荷载的作用方式、结构的反应方式和分析方法。

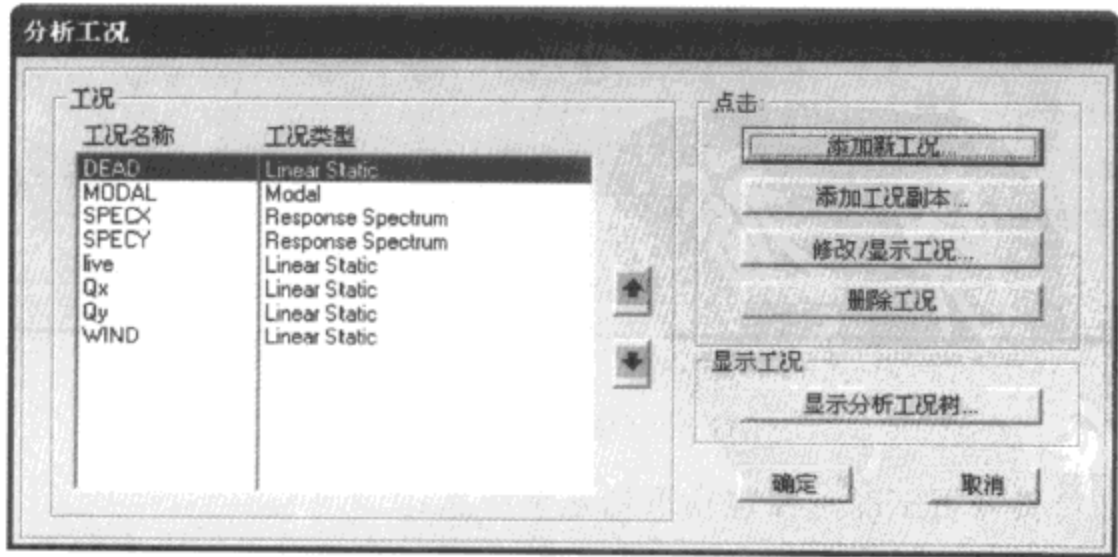


图 11-1 定义分析工况对话框

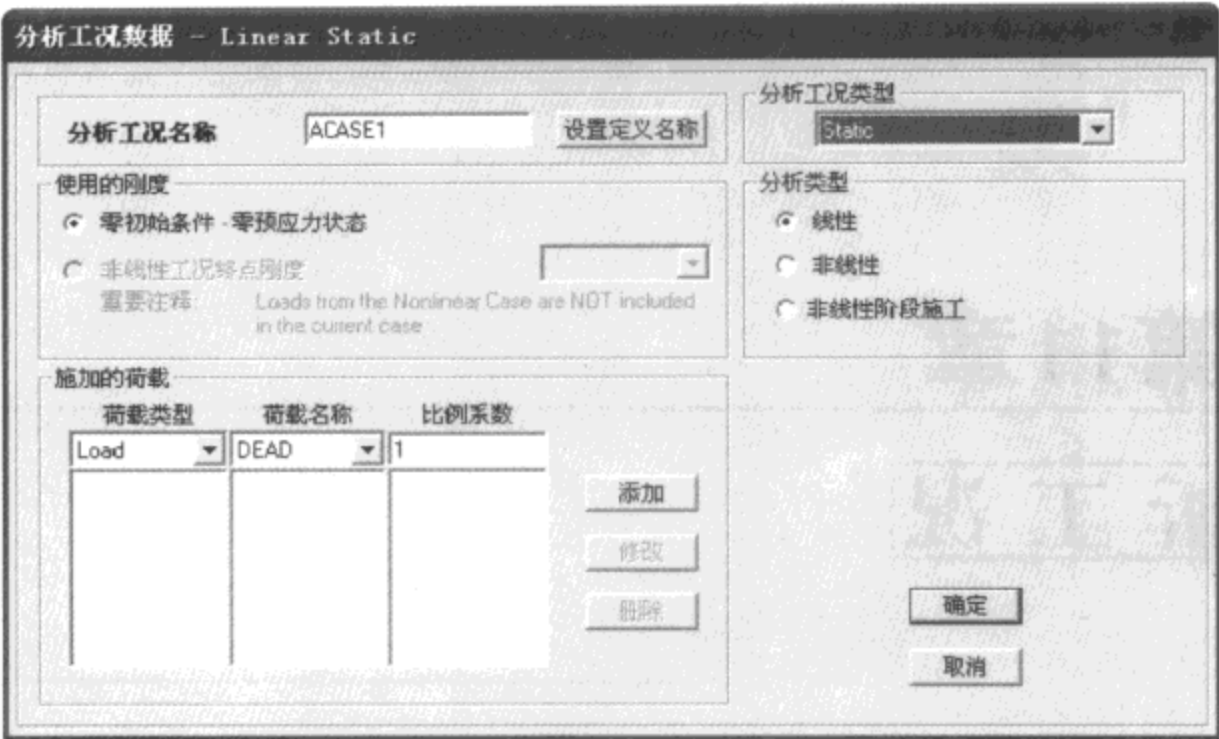


图 11-2 线性静力分析工况对话框

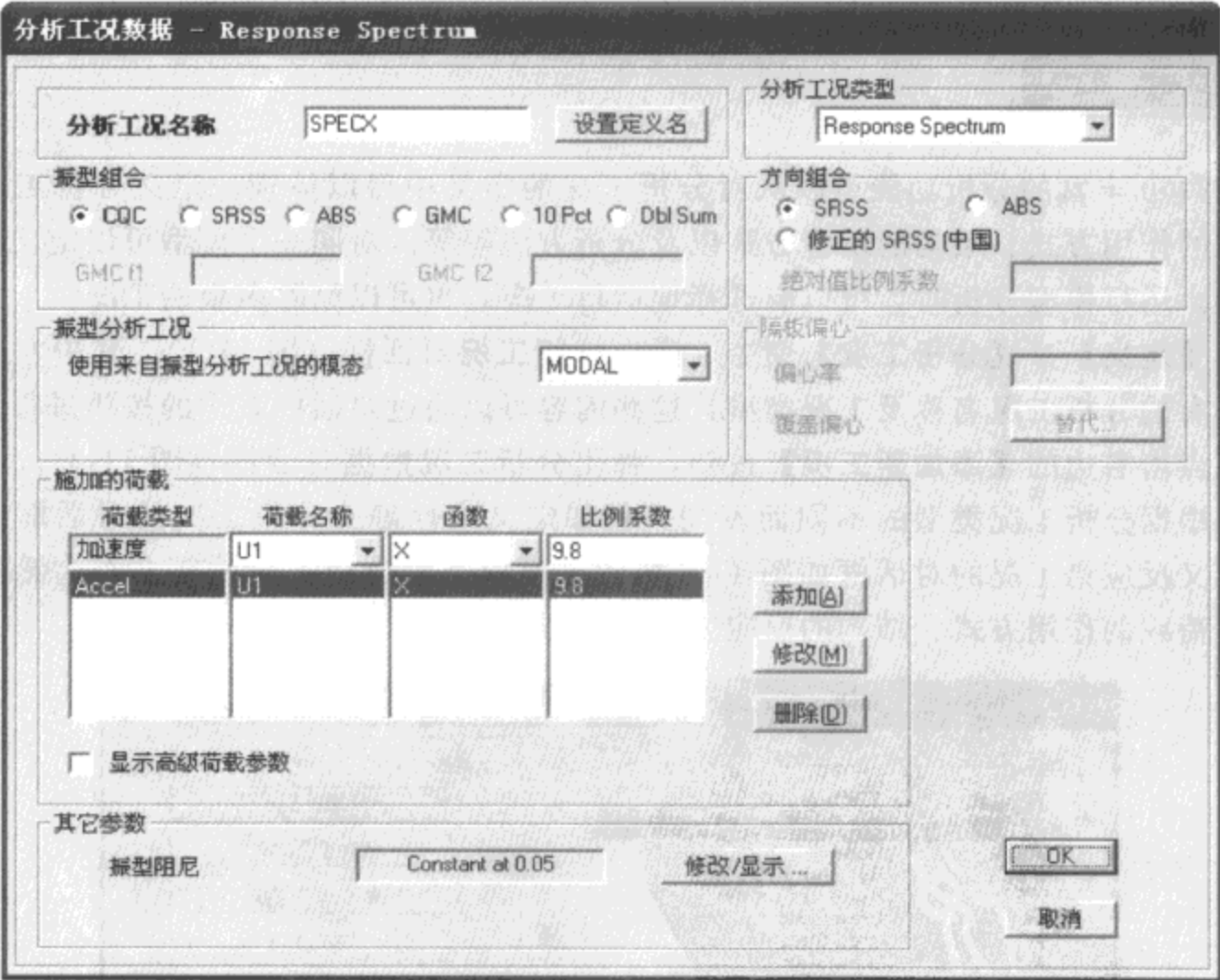


图 11-3 反应谱分析工况对话框

总的来说，定义分析工况主要包括下列基本信息：

工况名称——定义分析工况的名称，每一种分析工况需定义一个不同的名称。这些工况名称用于提取分析的结果（位移、应力等）、生成组合，有时也用于生成其他分析工况。可

以在分析工况名称栏中输入自定义的工况名称，也可以在选择分析工况类型后点击【设置定义名】按钮，设置对应工况类型的默认名称。

分析类型——定义分析工况的类型（静力、反应谱、时程、屈曲等），以及分析方法的类型（线性、非线性等）。如果选择不同的分析类型，相应地，在分析工况数据对话框中需提供不同的分析参数。

施加的荷载——对于多数分析类型，可以指定施加在结构上的荷载工况。根据分析类型的不同，需要的具体数据可能不同。

定义各个具体分析工况的详细讲解请参见后续相关章节。

11.2 分析类型简介

同一个分析模型可以有多种分析工况。从最广泛的意义上讲，根据结构对荷载响应方式的不同，分析类型可以划分为线性和非线性。选择分析类型是定义分析工况的一项重要内容。

11.2.1 线性分析

若分析类型是线性的，则表示结构从零应力状态开始，并且在分析过程中结构的属性（刚度、阻尼等）保持不变。另外结构的响应（应力、位移等）与施加荷载的大小成正比，不同工况下线性分析的结果可以进行叠加。

线性分析的工况类型有：静力分析（Linear Static）、用特征向量或 Ritz 向量求解振型的模态分析（Modal）、求解地震响应的反应谱分析（Response Spectrum）、时程动力响应分析（Time History）、屈曲模式分析（Buckling）、求解桥梁车辆活荷载的移动荷载分析（Moving Load）、谐振稳态分析（Steady State）、功率谱密度分析（Power Spectrum Density）。

定义线性分析工况时需要注意以下两点：

（1）初始刚度。对于线性分析工况，可以指定程序采用整个结构在无应力状态下的刚度（默认情况），或者采用非线性分析工况结束时的结构刚度。采用非线性分析工况结束时结构刚度的最常见原因有：为了包括初始 $P-\Delta$ 分析得到的 $P-\Delta$ 效应、为了包括索结构的张拉硬化效应、为了考虑施工阶段中的部分模型等。

（2）初始状态。线性分析从零应力状态开始。即使定义的线性分析工况用到了先前的非线性分析的刚度，但它不包括由先前分析得到的荷载。

11.2.2 非线性分析

若分析类型是非线性的，则表示结构属性可能随时间、变形、荷载而变化。实际发生多大的非线性与定义的属性、荷载大小以及指定的分析参数有关。此外，非线性分析可以从一个先前的非线性分析继续，就是其初始状态可以包括来自于先前分析的所有荷载效应，如变形、应力等。因此，所有非线性分析工况可以链接起来以实现复杂加载次序。但是，对于非线性分析，由于结构属性可能发生变化，而且可能有初始非零应力状态，所以响应与荷载可

不能成正比，因而不同非线性分析的结果一般不能进行叠加。

非线性分析的工况类型有：非线性静力分析（Nonlinear Static）和非线性时程分析（Nonlinear Time History）。

定义非线性分析工况时需要注意以下几点：

（1）初始状态。对于非线性分析，分析开始时的初始条件有两个选项：**【零初始条件】**和**【从前一个非线性分析继续】**。**【零初始条件】**代表结构的位移和速度为零，所有单元无应力，且无非线性变形的历史。**【从前一个非线性分析继续】**代表前面一个分析的位移、速度、应力、荷载、能量以及非线性状态历史被继承。

（2）非线性参数。非线性参数的定义（图 11-4）是定义分析工况的一项重要内容。主要包括以下四方面的内容。

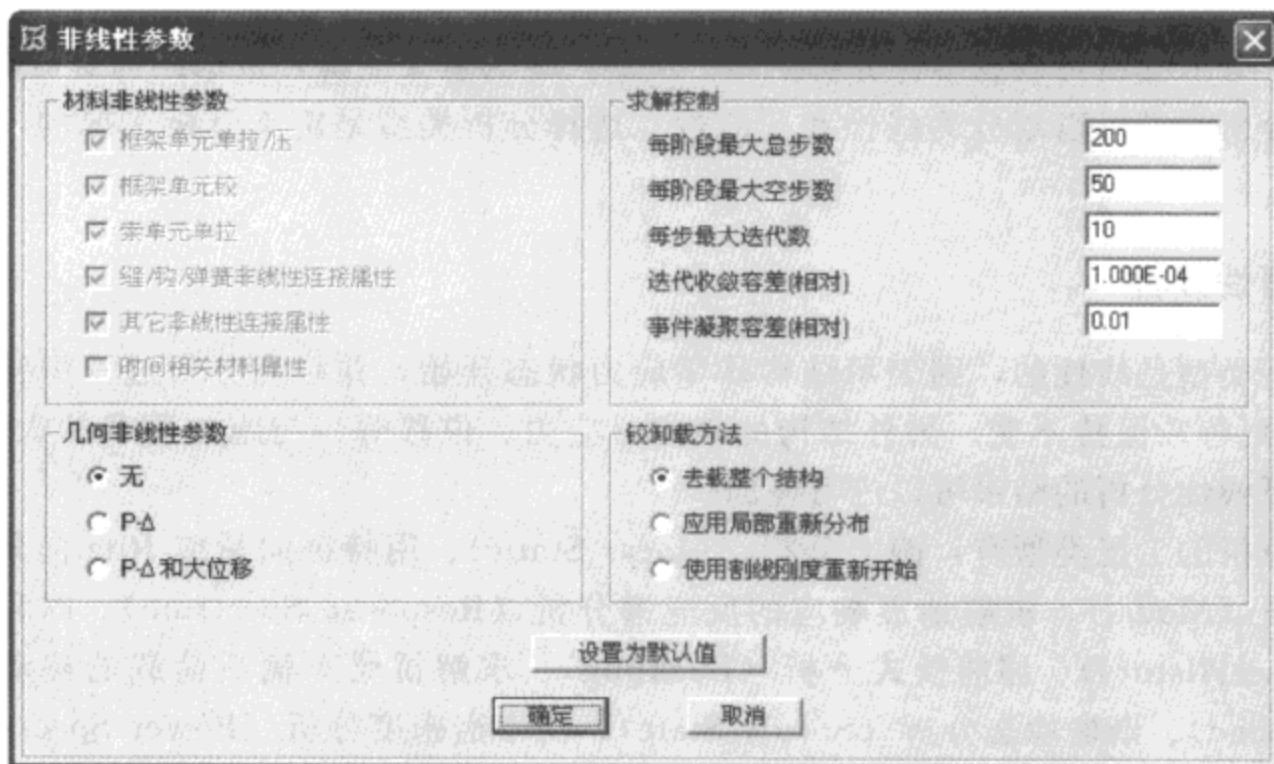


图 11-4 非线性参数对话框

材料非线性参数——材料非线性主要是指连接/支座单元内的多种类型的非线性属性、框架单元内的拉压极限、框架单元内的塑性铰等。所有在模型中定义的材料非线性将在非线性分析工况中考虑。

几何非线性参数——SAP2000 可选择考虑 $P-\Delta$ 效应、大位移的影响。当从一个非线性分析延续至另一个非线性分析时，建议采用相同的几何非线性设置。

非线性求解控制——非线性分析是一个不断迭代直至求解收敛的过程。合理地设定求解控制参数可以使求解过程更加理想。

铰卸载方法——此选项主要用于框架铰属性的 Pushover 分析。当一个铰卸载时，程序通过这里的指定来找到卸除铰所承担荷载的方法，且重新分配至结构的其他部分。

（3）输出。输出需要查看或保存的结果。对于非线性静力分析，一般只保存最终状态。若还需要保存多个中间状态，使用分析工况数据对话框中结果保存一栏的**【修改/显示】**按钮，弹出图 11-5 所示的对话框，这时可以对其中的参数进行设定。对于时程分析，可直接

在分析工况数据对话框中定义时间步数据（图 11-6）。

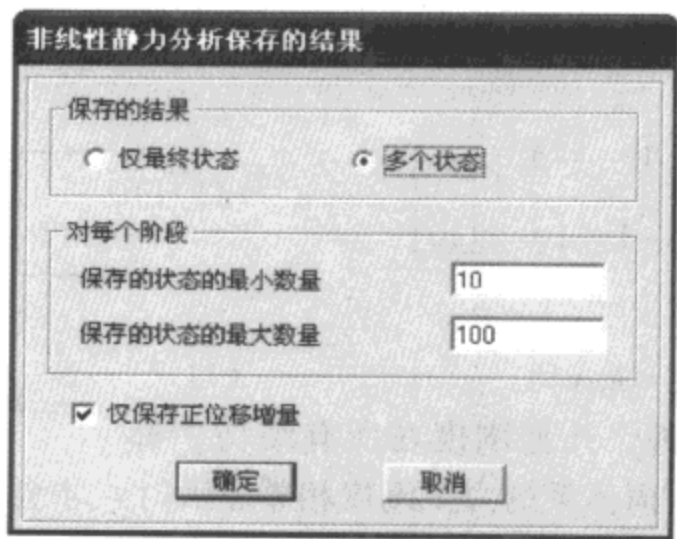


图 11-5 非线性静力分析结果保存对话框



图 11-6 非线性时程分析时间步输出

11.3 几何非线性

对于非线性静力分析和非线性直接积分时程分析，SAP2000 可以考虑的几何非线性包括：

无：所有平衡方程均针对结构未变形的形状考虑。此时，结构的荷载-变形关系是线性的，程序使用原始的（未变形的）结构几何形状形成平衡方程。

P-Δ：平衡方程考虑部分结构的变形形状。此时，结构中存在较大应力，以初始的和较小变形后的几何形状来形成平衡方程都会存在很大差异。其中，拉力趋向于抵抗单元的转动和使结构刚化，压力趋向于增加单元的转动和使结构失稳。

大位移：所有平衡方程以结构变形后的形状建立。此时，结构经历大变形，常规的工程应力和应变不再适用，必须使用变形后的几何形状形成平衡方程。SAP2000 中的大变形效应只包括大的平动和转动效应，并假定所有单元内的应变较小。

当进行了一个非线性分析后，其最终的刚度矩阵可用于其后的线性分析。在非线形分析中考虑的任意几何非线性效应将影响线性分析结果。因此，可以实现在一系列可叠加的线性分析中包含建筑结构的 P-Δ 效应，或索结构中的拉伸刚化效应。

11.3.1 几何刚度

我们知道，一根长杆件受到很大压力时，其侧向刚度会明显减小，一个很小的侧向荷载就有可能引起杆件屈曲，这是由于杆件的“几何刚度”改变所引起的。几何刚度矩

阵是杆件的长度和杆件中力的函数。如图 11-7 所示的水平索（长度为 L 、初始拉力为 T ），索两端受到两个侧向位移 v_i 和 v_j 的作用，产生的附加力 F_i 和 F_j 可以用下列矩阵方程来表示：

$$\begin{bmatrix} F_i \\ F_j \end{bmatrix} = \frac{T}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ v_j \end{bmatrix} \quad (11-1)$$

或者用符号表示：

$$\mathbf{F}_G = \mathbf{k}_G \mathbf{v} \quad (11-2)$$

\mathbf{k}_G 即索的几何刚度矩阵。几何刚度在所有结构中都存在，只不过只有当它与结构体系的力学刚度相差较大时，才会有明显影响。

对于具有弯曲属性的杆件，不仅端部的侧移会产生附加力，其端部的转动也会产生附加弯矩。因此，杆件上的总受力是：

$$\mathbf{F}_T = \mathbf{F}_E + \mathbf{F}_G = [\mathbf{k}_E + \mathbf{k}_G] \mathbf{v} = \mathbf{k}_T \mathbf{v} \quad (11-3)$$

\mathbf{k}_T 即杆件的总刚度矩阵，它包括杆件的基本刚度矩阵（即基于物理属性的“力学”刚度矩阵）和杆件的几何刚度矩阵。总刚度矩阵可以考虑加入几何刚度后对结构的影响，当杆件所受轴力为压力时，几何刚度为负，会产生应力软化效应。

SAP2000 程序可以把几何刚度矩阵添加到构件单元刚度矩阵中，以考虑应力硬化或应力软化效应。因此，可以方便地对索塔、斜拉桥或悬索桥进行建模。不过，如果单元中的初始轴向力由于附加荷载的作用发生了明显改变，则可能需要迭代处理。

以一道简单的例题来说明几何刚度对结构内力的影响。如图 11-8 所示，三根立柱的材料、截面尺寸都相同，均受到侧向力的作用。柱 A 仅受侧向力的作用，柱 B 受到侧向力和轴向压力的共同作用，柱 C 受到侧向力和轴向拉力的共同作用。使用 SAP2000 对其进行静力非线性分析，考虑 $P-\Delta$ 效应，得到如图 11-9 所示的弯矩图以及如图 11-10 所示挠度图。比较柱 A、柱 B 的计算结果可以看出，轴向压力趋于减小立柱的抗侧刚度，使得柱 B 在侧向力作用下的弯矩增大、变形加剧。同理，比较柱 A、柱 C 的计算结果可以看出，轴拉力趋于增大立柱的抗侧刚度，使得柱 C 在侧向力作用下的弯矩减小、变形减小。

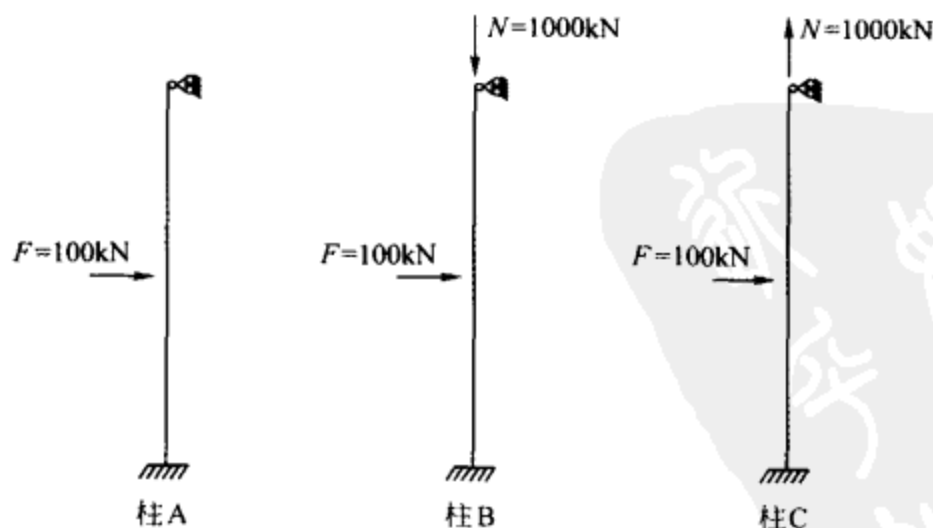


图 11-8 立柱模型

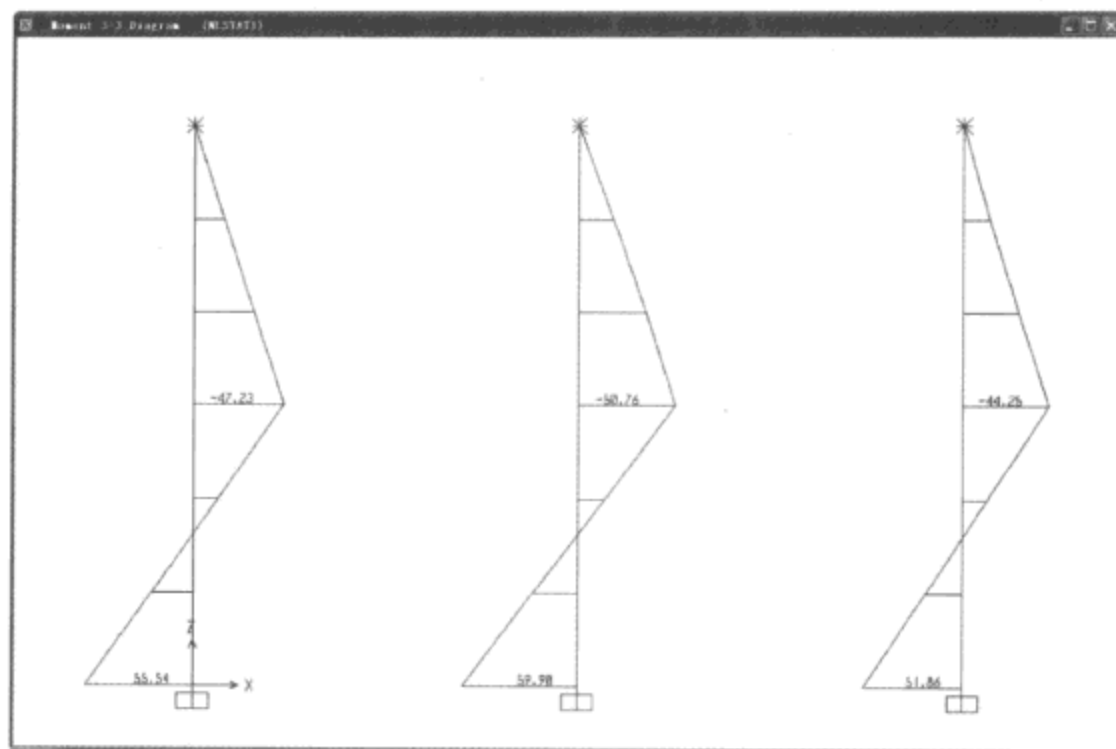


图 11-9 柱弯矩图 (从左至右分别为柱 A、柱 B、柱 C)

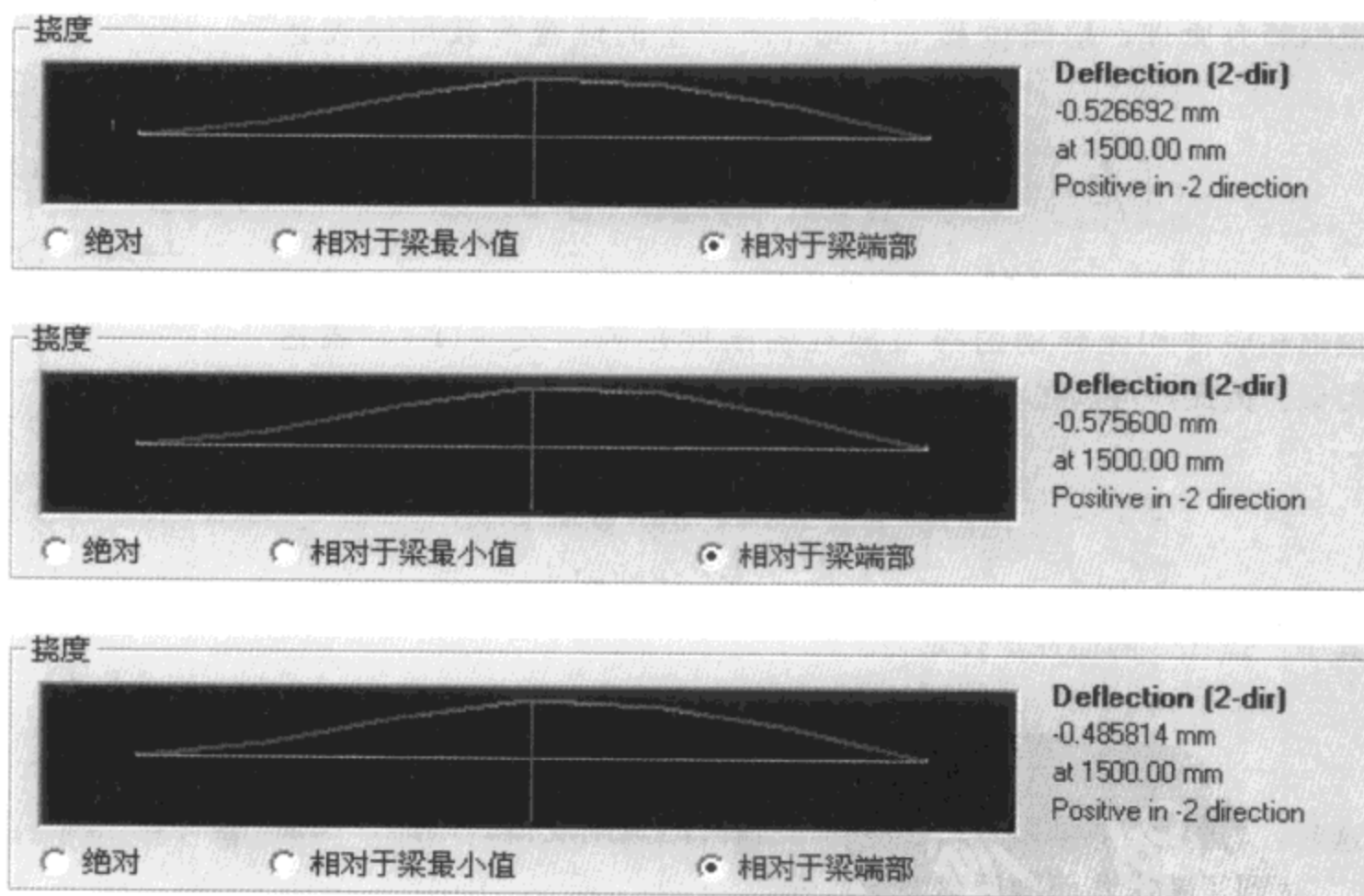


图 11-10 柱挠度图 (从上至下分别为柱 A、柱 B、柱 C)

11.3.2 重力 $P-\Delta$ 效应

建筑结构在水平风荷载或水平地震作用下产生侧移,重力荷载由于该侧移而引起附加效应,称为重力 $P-\Delta$ 效应。对于一般高层建筑, $P-\Delta$ 效应可使结构的位移和内力增加,当位

移较大时甚至导致结构失稳。

影响结构稳定和重力 $P-\Delta$ 效应的主要因素是结构的侧向刚度和重力荷载。中国规范将侧向刚度与重力荷载的比值（即刚重比）作为一个控制条件。刚重比的下限就是结构的稳定要求，当刚重比小于最低要求时，重力 $P-\Delta$ 效应急剧增加，可能导致结构的整体失稳。当结构刚度足够大，刚重比达到一定量值时，结构侧移变小，重力 $P-\Delta$ 效应不明显，计算上可以不考虑其影响，此时的刚重比称为上限条件。当刚重比介于上限条件和下限条件之间时，需考虑重力 $P-\Delta$ 效应的影响。

多数把 $P-\Delta$ 效应合并在建筑分析中的传统方法是将该问题视为几何非线性问题之一，并提出了迭代求解的方法，但这些方法是耗时的，一般只适用于静力分析。其实，对于建筑结构， $P-\Delta$ 问题是可以线性化求解的，并不需要迭代。这是由于不管侧向荷载和位移是多少，引起 $P-\Delta$ 效应的重力荷载总是不变的，并且可以认为结构整体位移与结构尺寸相比是很小的。SAP2000 程序基于上述思想，采用在建筑结构楼层之间添加“虚柱”的方法，以实现几何刚度的修正，从而准确地求解 $P-\Delta$ 问题。

以竖直悬臂型结构为例（图 11-11），简要说明 SAP2000 对建筑结构重力 $P-\Delta$ 效应的求解方法。

根据静力原理，层间位移 $u_i - u_{i-1}$ 所产生的倾覆荷载可以表达为：

$$\begin{bmatrix} f_i \\ f_{i-1} \end{bmatrix} = \frac{w_i}{h_i} \begin{bmatrix} 1.0 & -1.0 \\ -1.0 & 1.0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ u_{i-1} \end{bmatrix} \quad (11-4)$$

式中 w_i 是楼层 i 上方的总恒荷载重量。

顶部和底部均无转动的等截面柱的刚度矩阵与式（11-4）表达形式类似。因此，可以在楼层之间添加“虚柱”，“虚柱”的力-位移方程是：

$$\begin{bmatrix} f_i \\ f_{i-1} \end{bmatrix} = \frac{12EI}{h_i^3} \begin{bmatrix} 1.0 & -1.0 \\ -1.0 & 1.0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ u_{i-1} \end{bmatrix} \quad (11-5)$$

其中“虚柱”的惯性矩设定为：

$$I = -\frac{w_i h_i^2}{12E} \quad (11-6)$$

这时，“虚柱”具有与线性几何刚度相同的负刚度值。因此，添加“虚柱”达到了考虑几何刚度影响的效果。

更加详细的说明可参阅 Wilson 的著作《结构静力与动力分析》。

11.3.3 大位移

大位移分析考虑结构在变形后形状下的平衡。此时的大变形只包括大的平动和转动，程序假定所有单元仍是小应变。这意味着，考虑单元位置或方向的变化对结构的影响，但忽略单元形状或大小明显变化对结构的影响。

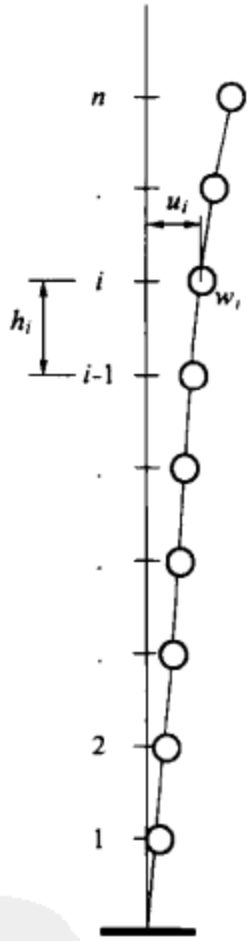


图 11-11 悬臂型结构

对于多数结构， $P-\Delta$ 选项是足够的。但对于变形显著的索结构或膜结构，需要使用大位移选项。索结构常用框架/索单元来模拟，膜结构常用壳单元（或平面应力单元）来模拟。当进行大位移分析时，需将索或膜分割至足够小的单元，来保证每一单元内的相对转动较小。

11.3.4 初始静力非线性工况

由于非线性分析结果一般不能进行叠加，而在设计阶段，通常需要考虑若干荷载的组合。因此，可以先定义一个初始静力非线性工况，来考虑几何非线性的影响，并使其刚度矩阵作为其他线性分析的基础，使得所有分析结果对于设计是可以叠加的。下面，以 $P-\Delta$ 效应为例来说明定义方法。

定义一个初始静力非线性工况，至少需指定以下内容：

- (1) 设置名称，如“PDELTA”。
- (2) 从零初始状态开始。
- (3) 施加将产生 $P-\Delta$ 效应的荷载，一般为恒载和部分活载。
- (4) 几何非线性参数，选择 $P-\Delta$ 效应。

对于求解控制参数，如每步最大迭代数、收敛容差等等，若 $P-\Delta$ 效应是合理小的，那么默认值是足够的。

随后可定义其他线性分析工况，使其使用 PDELTA 工况的刚度。这些工况可以是：线性静力分析、模态分析工况（如 PDMODES）、线性直接积分时程分析工况、移动荷载分析工况、反应谱工况和模态时程分析工况。其中，反应谱工况和模态时程分析工况可基于工况 PDMODES 的振型来定义。由于这些工况是线性的且基于相同的刚度矩阵，其分析结果是可以叠加的。

11.4 施加荷载

第7章讲解了荷载工况的定义，荷载工况本身不能在结构上产生任何响应，只有在分析工况中包含了荷载工况，才能得到荷载工况的作用结果。定义分析工况对话框中施加的荷载一栏即是定义该分析工况中荷载的施加方式。对于不同的分析类型，这一栏需要的数据可能不同。比如，多数情况下需要提供的荷载信息如图 11-12 所示，其中，荷载类型主要有 Load 和 Accel 两类，即可以是一种荷载工况或一个加速度荷载。荷载名称在下拉菜单中选择，若荷载类型选择为 Load，荷载名称的备选项是定义荷载工况时给定的名称，若荷载类型选择为 Accel，其备选项将是加速度荷载的作用方向。比例系数是对荷载值的一种修正，可根据实际需要来设定。在有些分析类型中（如反应谱分析、时程分析等），荷载可能是时间或其他参量的函数，定义分析工况时就需要提供更多关于荷载的信息（图 11-13）。图 11-13 中，函数是一系列纵横坐标数据对，定义了荷载的变化规律。该项下拉菜单中备选的函数名称是先前通过命令【定义】>【函数】设定的。另外，不同分析类型工况还有其自身的高级荷载参数，通过勾选【显示高级荷载参数】可以设定这些参数，其具体的含义和作用请参见后续的相关章节。



图 11-12 施加荷载定义



图 11-13 施加荷载高级定义

设定好关于荷载的参数后，点击【添加】按钮，各项内容出现在下方的列表框中，此时即完成一种荷载作用的定义。若需要在一个分析工况中施加组合荷载，可继续设定荷载参数并根据需要使用【添加】、【修改】或【删除】按钮。由此可知，一个分析工况可以对应一个荷载工况，也可以对应一组荷载的组合工况。

11.5 工况组合

分析工况可以是一个荷载工况或一组荷载的组合工况。另外，通过命令【定义】>【组合】，可以在分析完成之后将分析工况的结果进行组合。这里的组合是不同分析工况结果的总和或包络。组合结果包括节点的所有位移、力和单元的内力或应力。组合数量可以任意指定，每个组合需要定义一个不同的名称，且不能与分析工况的名称相同。可以通过【定义】>【添加默认设计组合】来添加基于规范定义的组合方式，也可以根据需要来自定义组合（如图 11-14 所示）。

对每一个响应量（位移、内力等），参与分析的每个分析工况可以为组合提供一个或两个值。比如线性静力分析、模态分析或屈曲分析得到的单独模式、多步分析工况中的单步等情况会为组合提供一个单独值，组合时可视为两个相同的值。有些类型的分析工况会产生两个不同的值，比如，反应谱工况提供两个值：最大值是计算的正值，最小值是负值中绝对值最大的值；多步分析工况的包络结果提供两个值：最大值和最小值；移动荷载工况提供分析参数允许的车道上，车辆荷载产生的最大和最小值。对某些类型的组合，两个值都会被用

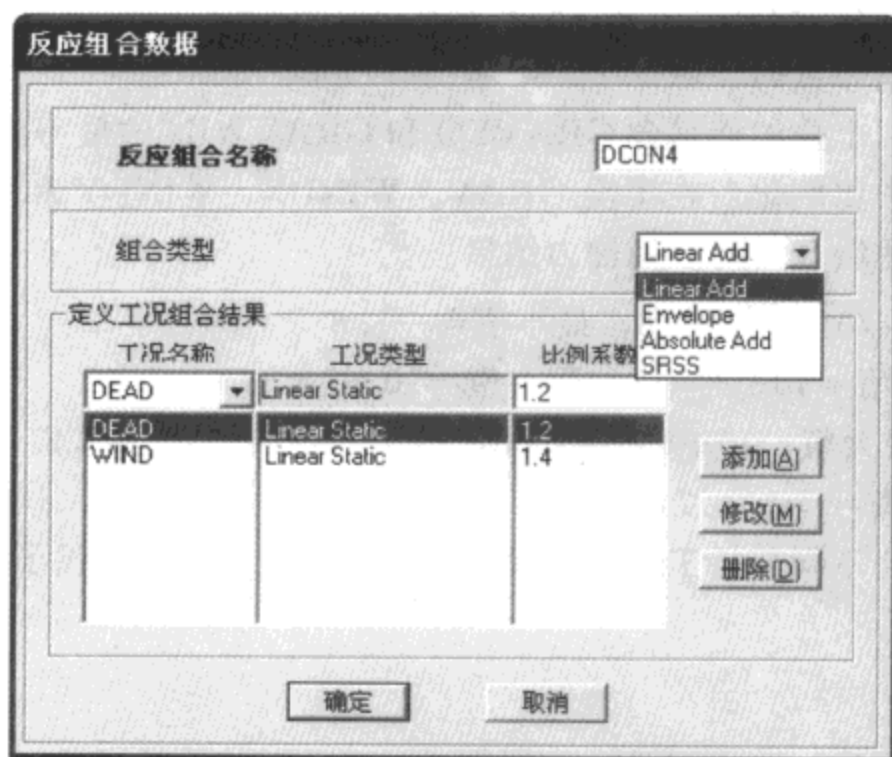


图 11-14 定义组合

到；对其他类型的组合，只用到较大的绝对值。

根据分析工况提供的结果，每个组合会产生一对数值：最大值和最小值。组合的类型有四种，分别为：

叠加型 (Linear Add)：组合的最大值是各个参与工况最大值的算术线性组合。同样地，组合的最小值是各个参与工况最小值的算术线性组合。

绝对值型 (Absolute Add)：组合的最大值是各个参与工况绝对值的大值之和。组合的最小值是组合的最大值的负数。

SRSS 型：组合的最大值为各个参与工况绝对值的最大值的平方和的平方根。组合的最小值是组合的最大值的负数。

包络型 (Envelope)：组合的最大值是各个参与工况最大值中的最大值。同样地，组合的最小值是各个参与工况的最小值中的最小值。

对于线性问题，线性结果可以叠加，算术求和型的工况组合是有意义的；对于非线性问题，非线性结果通常不能叠加，因此需要在非线性分析工况中施加组合的荷载，以正确分析其组合效应。这可能需要定义多种分析工况求解而非组合工况结果。但是，非线性分析工况可以包括在任何包络型组合中，因为它们之间不进行叠加。

下面举例说明组合类型的使用及其产生的结果。

将重力荷载和两个相互垂直的横向风荷载设定为三个线性静力分析工况：GRAV、WINDX 和 WINDY。运行了一个名称为 EQ 的反应谱分析工况。定义如下四个组合：

WIND：两个风荷载 WINDX、WINDY 的 SRSS 类型组合。每个响应量生成的最大和最小值的绝对值相等，互为相反数。

GRAVEQ：重力荷载 GRAV 和反应谱结果 EQ 的叠加型组合。该组合自动考虑地震荷载的正向和负向。

GRAVWIN: 重力荷载 GRAV 和风荷载组合 WIND 的叠加型组合。风荷载组合 WIND 已经考虑了荷载的正向和负向。

SEVERE: 产生两个叠加型组合 GRAVEQ 和 GRAVWIN 的最不利情况的包络型组合。

假定某框架单元中比例化后在工况 GRAV、WINDX、WINDY 和 EQ 下的轴力分别为 10、5、3 和 7。对上述组合可得下列轴力结果:

WIND: 最大值 $=\sqrt{5^2+3^2}=5.8$, 最小值 $=-5.8$

GRAVEQ: 最大值 $=10+7=17$, 最小值 $=10-7=3$

GREAVWIN: 最大值 $=10+5.8=15.8$, 最小值 $=10-5.8=4.2$

SEVERE: 最大值 $=\max(17, 15.8) = 17$, 最小值 $=\min(3, 4.2) = 3$

由此可知, 在组合不同分析工况的结果时, 不同的组合类型提供了相当强的功能和相当大的灵活性。

11.6 分析顺序

SAP2000 的各个分析工况之间并不一定是彼此独立的, 而是可能存在一定的依存关系。在下列情况中, 一个分析工况会依赖于另一个分析工况:

(1) 振型叠加类型的分析工况 (反应谱分析或模态时程分析) 会用到由模态分析工况得到的振型。

(2) 一个非线性分析工况从另一个非线性工况结束状态开始。

(3) 一个线性分析工况用到一个非线性分析工况结束时计算的结构刚度。

一个依赖于其他工况的分析工况称为从属工况, 它所依赖的工况称为先决工况。程序进行分析时, 总是按照正确的顺序进行, 以保证从属工况在其所有的先决工况之后运行。可以根据需要建立一个或多个分析工况顺序, 可简单也可复杂。但是, 每一个分析顺序必须由一个从零开始的分析工况开始。

如果想查看分析工况顺序, 可以使用命令 **【定义】 > 【分析工况】 > 【显示分析工况树】**, 程序将用树状图显示已有分析工况间的从属关系, 示例如图 11-15 所示。

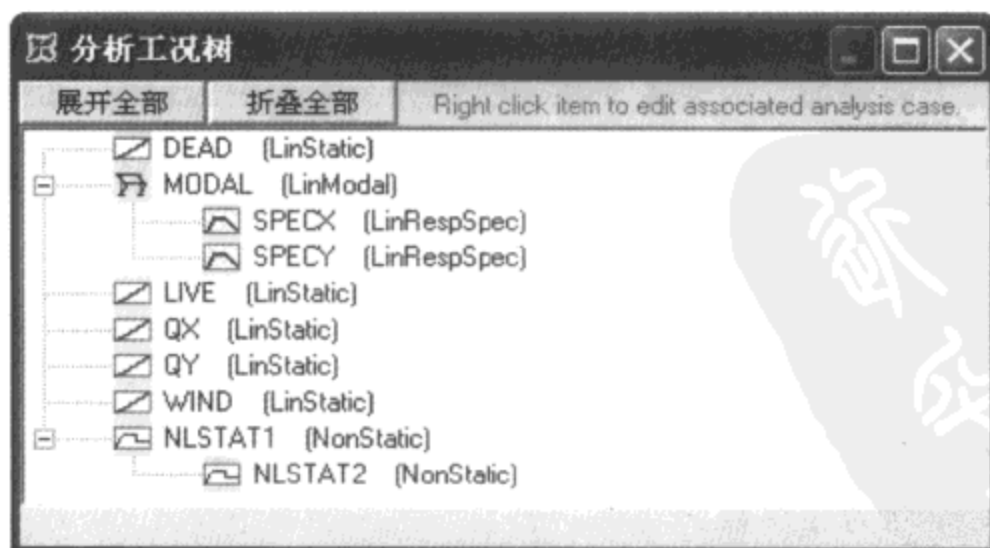


图 11-15 分析工况树置图

11.7 运行分析工况

分析工况定义完毕后，必须明确地运行分析工况，从而得到用于显示、输出和设计的结果。在运行分析之前，需要对分析选项进行设置，然后可以有选择地运行分析工况。

11.7.1 设置分析选项

点击【分析】>【设置分析选项】命令，弹出分析选项对话框，见图 11-16。其中，通过勾选有效自由度或点击快速自由度的相关按钮（见表 11-1）来设定分析模型的有效自由度。

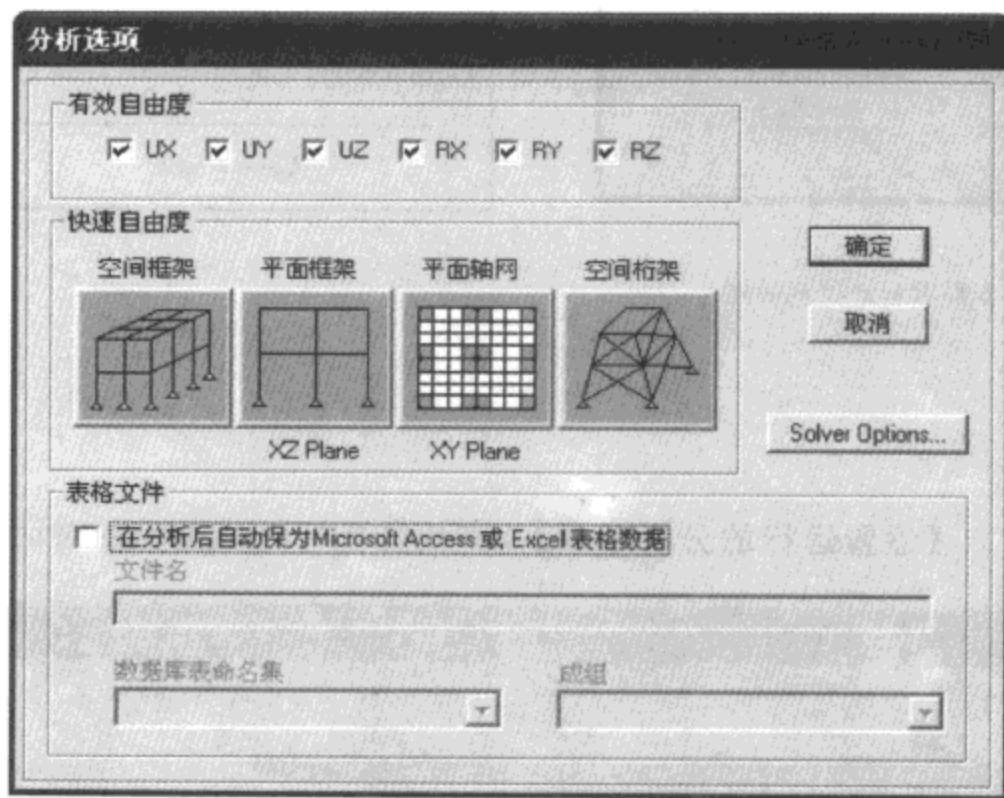


图 11-16 分析选项对话框

快速自由度

表 11-1

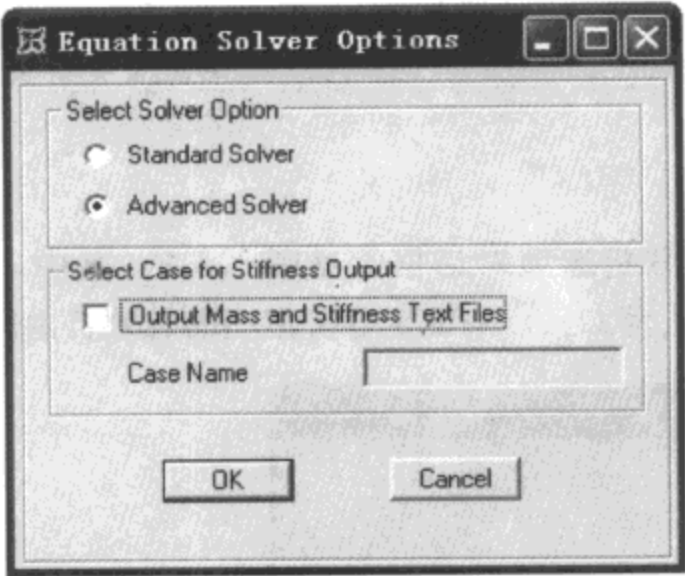
| | |
|------|----------------------------------|
| 空间框架 | 点击该按钮，快速设置 UX、UY、UZ、RX、RY、RZ 自由度 |
| 平面框架 | 点击该按钮，快速设置 UX、UZ、RY 自由度 |
| 平面轴网 | 点击该按钮，快速设置 UZ、RX、RY 自由度 |
| 空间桁架 | 点击该按钮，快速设置 UX、UY、UZ 自由度 |

表格文件一栏的勾选项是选择是否将模型信息和分析结果输出到 Access 文件或 Excel 文件。

点击对话框右边【Solver Options】按钮，弹出方程求解选项对话框，如图 11-17 所示，对话框说明见表 11-2。

SAP2000 V10 推出了高级求解器，该求解器比标准求解器计算速度更快、所需硬

盘空间更小、解题能力更强。特别适合于大型工程的计算。高级求解器是程序的默认求解选项。为了便于新旧对比和程序的稳定，依然保留了原有的标准求解器，可自行选择。



方程求解选项 表 11-2

| | |
|--------------------------------------|-------------|
| Select Solver Option | 选择求解选项 |
| Standard Solver | 标准求解器 |
| Advanced Solver | 高级求解器 |
| Select Case for Stiffness Output | 选择刚度输出工况 |
| Output Mass and Stiffness Text Files | 输出质量和刚度文本文件 |
| Case Name | 工况名称 |

图 11-17 方程求解选项对话框

11.7.2 运行分析

点击【分析】>【设置运行的分析工况】，弹出如图 11-18 所示的对话框。

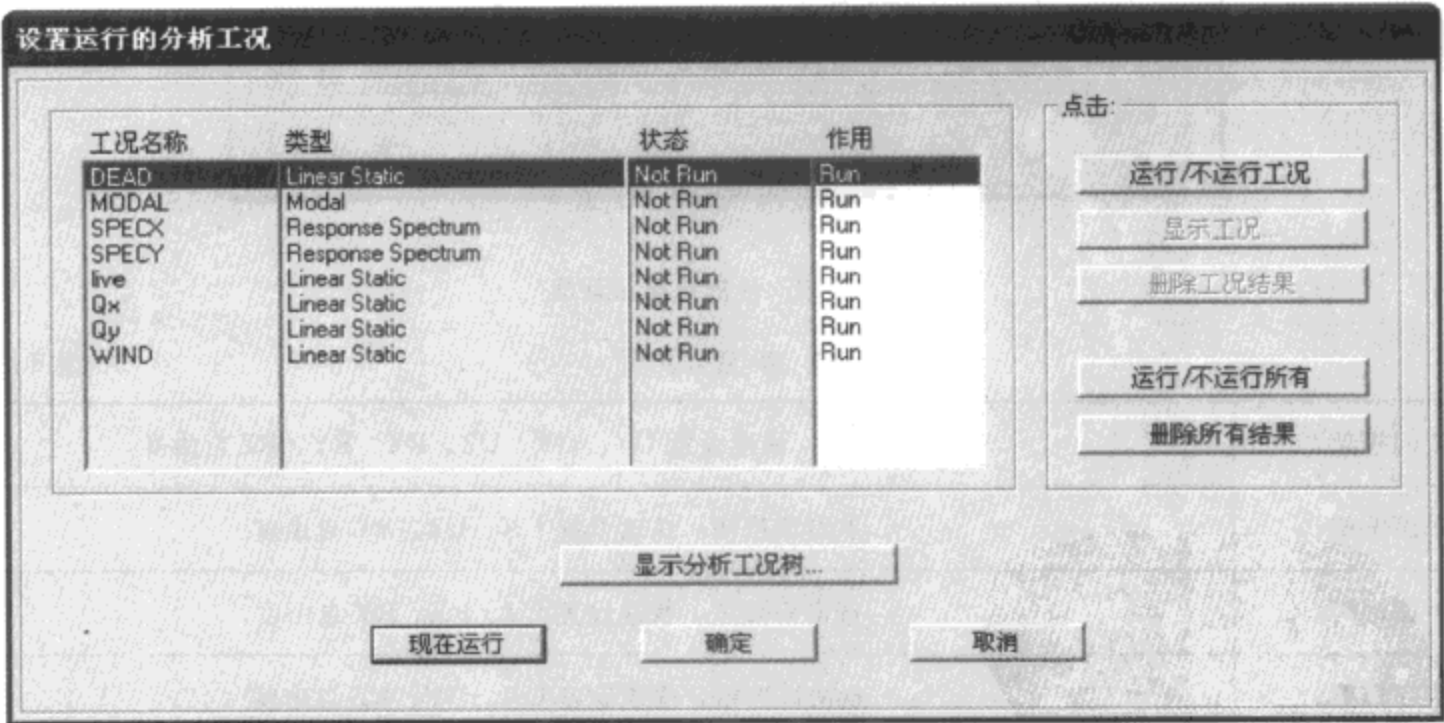


图 11-18 设置运行的分析工况对话框

SAP2000 可以有选择性的运行分析工况。对话框中状态一栏显示各分析工况是否已经被运行，作用一栏显示各分析工况当前是否将要运行。选中左边的分析工况后，点击右边的按钮，可以选择是否运行已选择的工况。这使得工程师可以定义所需要的任意多种分析工

况，而不需要每次都全部运行它们。对于有耗时较长的非线性分析的情况，这一点很有益处。

程序执行分析时，会自动确定工况的运行顺序，以保证先决工况在所有从属工况之前运行。而且不管先决工况是否被选中运行，程序在运行从属工况前还是会运行所有先决工况。如果先决工况没有完成分析，则它们相应的从属工况将不被运行。不过，程序仍将继续运行其他不依赖于未完成分析工况结果的工况。

分析工况被运行后，程序将基于对象的模型转换为有限元，然后进行计算，以得到结构对分析工况中所施加荷载的响应。分析结果被存储起来以备后用。此外，可以在不删除已经运行分析工况结果的条件下添加新的分析工况，还可以修改已存在的分析工况。但是，经修改的工况和其所有的从属工况的结果都将被删除。

分析过程中的相关数据、警告和错误信息会形成分析日志文件（.LOG），方便工程师查看。

除了针对单个模型进行分析，SAP2000 还可以自动对多个模型依序进行分析。点击命令【文件】>【批处理文件控制】，弹出图 11-19 所示的对话框。该命令用于形成一个 SAP2000 的批处理文件 *.SBF，其中包括若干 SAP2000 模型，运行该批处理文件，程序即按照指定的顺序分析文件中包括的所有模型。由于免去了人工运行单个模型的操作，当需要让计算机长时间地自动运行工作时（比如夜间），此命令会十分有用。

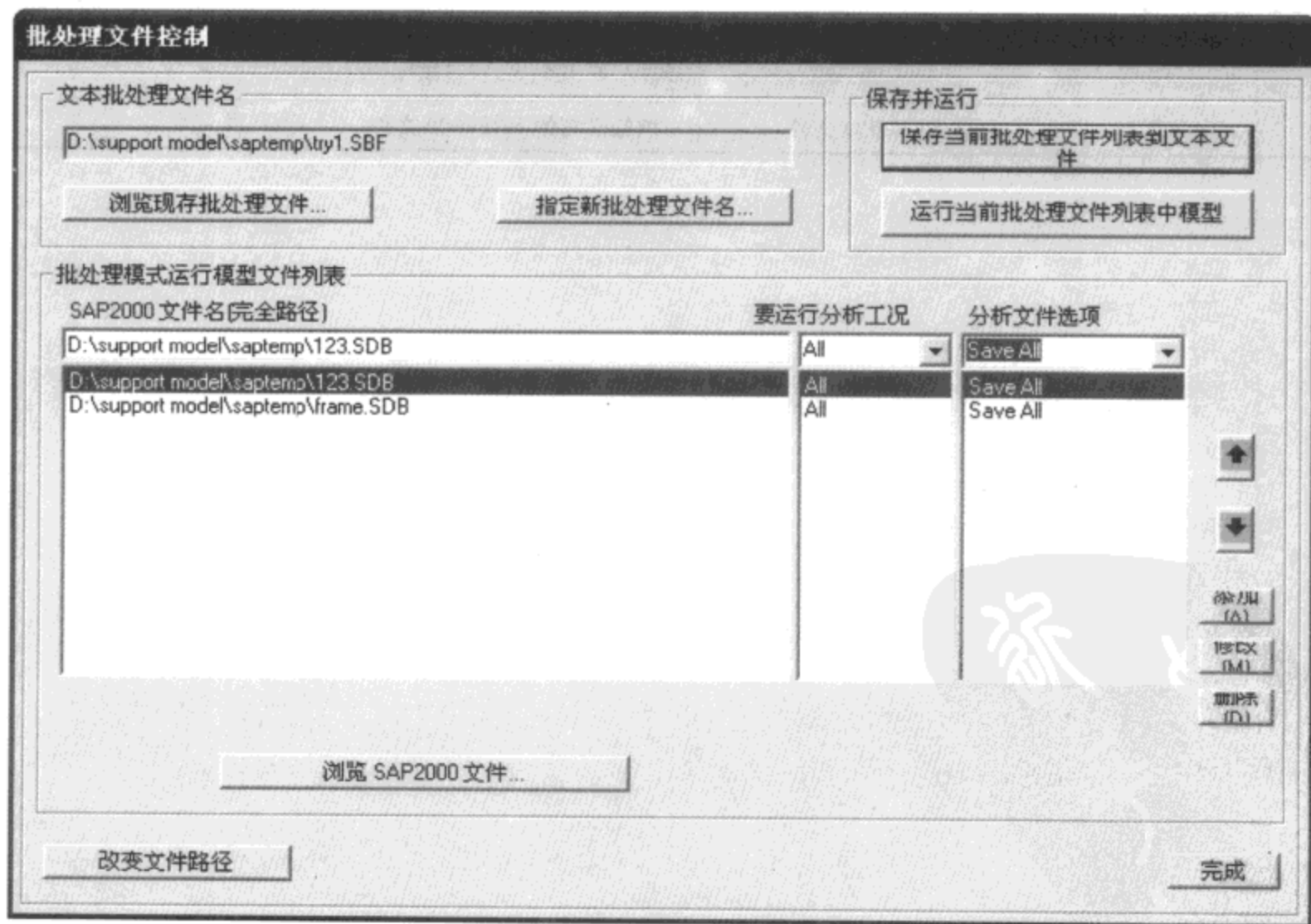


图 11-19 批处理文件控制对话框

批处理文件控制对话框中各项的意义如表 11-3 所示。其中，批处理模式运行模型文件列表一栏是用于指定批处理文件中包含的 SAP2000 文件，通过【添加、修改、删除】按钮对文件列表进行编辑。这一栏的分析文件选项有三个备选项：Save All 表示程序将保存所有分析文件，如果模型较大，相应产生的结果文件也需要更多的储存空间；Save Recovery Only 表示程序将保存产生结果所需要的最小数量的必要文件，常用于储存空间有限的情况；Delete All 表示程序将删除分析中产生的文件，若通过命令【定义】>【设置分析选项】设定了自动输出的表格，选择此项可仅保存这些表格以节约储存空间。

批处理文件控制

表 11-3

| 栏 目 名 称 | 项 目 / 按 钮 名 称 | 意 义 |
|---------------|-------------------|--|
| 文本批处理文件名 | 浏览现存批处理文件 | 浏览已有的 *.SBF 文件 |
| | 指定新批处理文件名 | 用于指定新形成的 *.SBF 文件名 |
| 保存并运行 | 保存当前批处理文件列表到文本文件 | 将文件列表中的若干 SAP2000 文件保存为批处理文件，便于以后调用 |
| | 运行当前批处理文件列表中模型 | 运行当前批处理文件列表中的 SAP2000 模型 |
| 批处理模式运行模型文件列表 | SAP2000 文件名（完全路径） | 包含于批处理文件中的 SAP2000 文件名称及路径 |
| | 要运行分析工况 | 可以选择 All（所有）或 Selected（仅选择的） |
| | 分析文件选项 | 可以选择 Save All（保存所有）、Save Recovery Only（保存部分）或 Delete All（删除所有） |
| | 浏览 SAP2000 文件 | 浏览已有的 SAP2000 文件 |

第12章

模态分析及反应谱分析

经典物理学告诉我们，我们所在的物理世界是一个动态的世界，静止只是相对的，荷载作用过程及结构的响应本质是一个动态的过程。结构分析和设计所需要解决的威胁结构安全的主要因素——地震作用和风作用，也是典型的动力作用，因此对结构进行一定水平动力分析是十分必要的。目前结构分析和设计领域的理论发展水平，也为我们提供了若干的结构拟动力分析和精确动力分析方法，本章和下一章的主要任务就是基于这些理论方法，阐述其在SAP2000中的实现和使用细节。

在结构动力分析中，结构动力响应的求解是基于结构中质量系统的动力平衡方程来完成的，基于经典物理定律，方程（12-1）给出了一个多自由度集中质量系统的动力平衡方程，它是一个关于时间的函数：

$$\mathbf{F}_I(t) + \mathbf{F}_D(t) + \mathbf{F}_S(t) = \mathbf{F}(t) \quad (12-1)$$

式中： $\mathbf{F}_I(t)$ ——作用在节点质量上的惯性力向量；

$\mathbf{F}_D(t)$ ——粘滞阻尼力向量或者能量耗散力向量；

$\mathbf{F}_S(t)$ ——结构承担的内力向量；

$\mathbf{F}(t)$ ——外部施加的荷载向量。

方程（12-1）是从经典物理学概念出发，对于结构系统，我们更为熟悉的是下面的二阶线性微分方程组：

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_s(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}_s(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}_s(t) = \mathbf{F}(t) \quad (12-2)$$

式中：

\mathbf{M} ——质量矩阵；

\mathbf{C} ——一个粘滞阻尼矩阵；

\mathbf{K} ——结构单元系统的静力刚度矩阵；

$\mathbf{u}_s(t)$ 、 $\dot{\mathbf{u}}_s(t)$ 、 $\ddot{\mathbf{u}}_s(t)$ ——分别是节点绝对位移、速度和加速度，它们皆是与时间相关的向量。

对于地震作用，基于方程 (12-2) 中外部荷载 $F(t)$ 等于零，可以写成：

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = -M_x\ddot{u}_{xg}(t) - M_y\ddot{u}_{yg}(t) - M_z\ddot{u}_{zg}(t) \quad (12-3)$$

其中 $\ddot{u}_{xg}(t)$, $\ddot{u}_{yg}(t)$, $\ddot{u}_{zg}(t)$ 是自由场地面位移 $u(t)_{ig}$ 的三个分量。

结构动力分析的主要任务就是求解方程 (12-2)，基于目前数值分析理论水平，它的求解并不是很复杂。对于结构分析最主要的一个方面：地震作用的分析，则可以将其具体到求解动力平衡方程 (12-3)。有几种不同的经典方法可以用于求解方程 (12-3)，这些方法基本上都可以使用 SAP2000 程序实现，本章将逐一对其进行阐述。

12.1 模态分析

模态分析也被称为振型叠加法动力分析，是线性结构系统地震分析中最常用而且最有效的方法。它最主要的优势在于计算一组正交向量之后，可以将大型整体平衡方程组缩减为数量相对较少的解耦的二阶微分方程，这样就明显减少了用于数值求解这些方程的计算时间。

使用 SAP2000 程序对结构进行的模态分析将为我们提供结构基本性能参数，帮助我们对结构响应进行定性的判断，并提供相关结构概念设计需求。模态分析为结构相关静力分析提供相关结构性能，包括结构静力地震作用分析和静力风荷载作用分析；模态分析还是其他动力分析的基础，包括反应谱分析和时程分析。

12.1.1 模态分析的基本理论

(1) 由动力方程转换为微分方程

针对地震作用下的结构系统动力平衡方程 (12-3)，可以按式 (12-4) 重写成一组 Nd 二阶微分方程：

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = F(t) = \sum_{j=1}^J f_j g_j(t) \quad (12-4)$$

其中 f_j 是 J 空间向量，该向量不随时间发生变化， $g_j(t)$ 是第 j 个与时间相关的函数。一般情况下，在结构分析过程中考虑的动力荷载包括地震作用、风荷载等这些荷载都可以使用这两个量的乘积去表达。

动力自由度的数量等于系统中集中节点质量的数量。如果需要，我们可以对方程 (12-4) 进行静力凝聚以消除无质量位移，静力凝聚可以减少所要求解的动力平衡方程的数量，提高计算效率。例如，在建筑结构分析过程中，我们经常会指定楼板为水平刚性的，每个刚性楼板只表现为具有三个方向自由度的一个集中质量，这样处理对于自由度的减少是非常明显的，因此这种方法经常在建筑结构分析程序中应用。

然而，静力凝聚明显增加了凝聚后刚度矩阵的密度和带宽，而且对于比较复杂的空间结构系统的动力求解，静力凝聚方法可能并不会很有效。基于以上两点，并考虑 SAP2000 所针对的结构体系类型大部分并非建筑结构，目前 SAP2000 不使用静力凝聚。

(2) 模态方程的生成

求解方程 (12-4) 的基本数学方法是分离变量法。为了完成变量分离，可以假设方程 (12-4) 解的表达形式为：

$$u(t) = \phi Y(t) \quad (12-5a)$$

式 (12-5a) 中 ϕ 是一个 $N_d \times N$ 矩阵, 该矩阵包含 N 个非时间函数的空间向量, 而 $Y(t)$ 是一个包含 N 个时间函数的向量。从方程 (12-5a) 可以导出:

$$\dot{u}(t) = \phi \dot{Y}(t) \quad (12-5b)$$

$$\ddot{u}(t) = \phi \ddot{Y}(t) \quad (12-5c)$$

在求解之前, 要求空间函数满足下列质量和刚度正交性条件: $\phi^T M \phi = I$, $\phi^T K \phi = \Omega^2$, 其中 I 为一个对角单位矩阵, Ω^2 是一个对角项为 ω_n^2 的对角矩阵。

把方程 (12-5a) 至 (12-5c) 代入方程 (12-4), 然后左乘 ϕ^T , 产生以下 N 个未知数方程:

$$I \ddot{Y}(t) + d \dot{Y}(t) + \Omega^2 Y(t) = \sum_{j=1}^J p_j g_j(t) \quad (12-6)$$

其中 $p_j = \phi^T f$, 定义 p_j 为荷载函数 j 的模态参与系数。 d 为阻尼矩阵, 一般情况下并不一定是对角矩阵。为了解耦, 将模态阻尼的对角项定义为 $d_m = 2\xi_n \omega_n$, 形成假设在振型之间无耦合的典型阻尼。其中 ξ_n 定义为第 n 振型中的阻尼与该振型的临界阻尼之比。于是方程 (12-6) 变为:

$$\ddot{y}_n(t) + 2\xi_n \omega_n \dot{y}_n(t) + \omega_n^2 y_n(t) = \sum_{j=1}^J p_{nj} g_j(t) \quad (12-7)$$

方程 (12-7) 是一个非耦合的典型线性结构系统的模态方程, 而对于三维地震运动, 模态方程可以写为:

$$\ddot{y}_n(t) + 2\xi_n \omega_n \dot{y}_n(t) + \omega_n^2 y_n(t) = p_{nx} \ddot{u}(t)_{gx} + p_{ny} \ddot{u}(t)_{gy} + p_{nz} \ddot{u}(t)_{gz} \quad (12-8)$$

式 (12-8) 中三维模态参与系数或在此工况中的地震激励系数由 $P_n = -\phi_n^T M_j$ 定义, 其中 j 是 x 、 y 或 z , 而 n 是振型阶数。

(3) 模态方程一般求解方法

式 (12-7) 给出了非耦合的典型线性结构系统的模态方程, 对这一典型模态方程有许多不同方法可以进行求解, 比如我们比较熟悉的快速 Fourier 变换法或 Duhamel 积分数值计算等。SAP2000 使用了分段多项式方法进行模态方程的求解, 这一方法是在较小时间增量内使用多项式近似出来的荷载精确解, 也是计算机程序对此方程进行数值求解的最经济和最精确的方法。分段多项式方法的另外一个优点是它没有稳定性问题, 也不会引入数值阻尼。因为多数地震地面加速度在 0.005s 间隔内被定义为线性的, 所以对于所有频率的该类型荷载而言, 此方法是准确的。

SAP2000 程序使用了一种非常简单但又很强大的递归关系, 使得多项式模拟精确解的方法计算效率有了很大的提高。由于此精确分段多项式技术方法速度快, 因此它也可以用来以很少的计算时间建立精确的地震反应谱。应用这一递归关系的分段多项式求解技术对随机荷载、瞬时荷载以及动力荷载的初始条件都是十分有效的, 所以也可以把这种求解法用于任意周期荷载。

另外对于模态方程的求解, 还需要指出模态截取的问题。在 SAP2000 模态分析工况定义时, 需要我们确定模态分析过程中最大模态数目。由于地震运动只激励起结构的较低频率, 所以基本荷载数据不包含超过 50Hz 的信息。忽略较高频率系统振型通常不会引起太大误差, 这也是我们在工程分析和设计中一直在使用的方法。

12.1.2 SAP2000 模态分析中质量源定义

从前面的论述中可以看到，结构动力分析是基于集中节点质量的动力响应和基本平衡方程的，因此精确描述结构系统质量分布就成为结构动力分析的基础。结构质量首先包含构件单元自身质量在节点的集中，但不仅限于此，比如我们比较熟悉的填充墙，由于并非主要抗侧力构件，一般并不会在计算模型中输入，但是在结构动力分析中填充墙质量却是绝对不能够忽略的。这时我们就需要将这部分质量以另一种方式进行考虑，此类问题就可以使用质量源的定义来完成。

质量源是 SAP2000 中一个非常重要的概念，它定义了结构动力分析所需要考虑的结构质量的计算方式。它把程序中结构的质量和自重这两个概念加以清晰的区分并建立相互间可以进行多重定义的联系。在中国规范中，结构动力分析以及结构地震作用计算基于建筑物的重力荷载代表值。重力荷载代表值实际上给出的是一个质量计算方式，定义了求解地震作用时结构质量的计算方法，它同样可以并且需要通过质量源的定义来实现。因此在使用中国规范进行结构分析和设计时需要特别注意质量源的概念。

(1) SAP2000 中的质量和重量

在 SAP2000 中结构构件自身的质量和重量计算分别基于材料定义中密度和重度两个参数。默认情况下，SAP2000 自动计算所有构件的重量，如图 12-1 所示的定义静载工况名对话框。

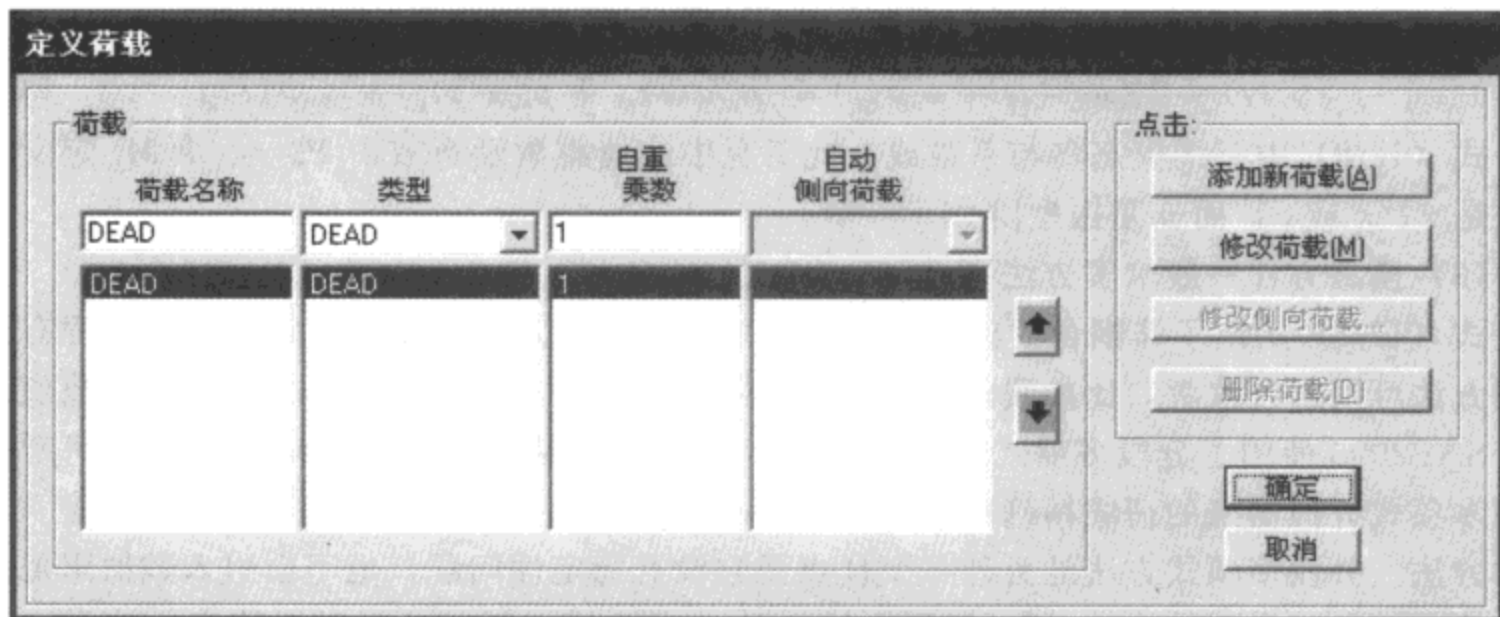


图 12-1 静荷载工况定义对话框

在定义静载工况名对话框中 DEAD 类型荷载为结构恒荷载，自重乘数将一定比例的结构自重作为 DEAD 工况的荷载施加在结构上。当自重乘数定义为 1.0（默认值）时，SAP2000 将全部自重转换为 DEAD 工况的荷载。当自重乘数定义为 0 时，结构将不计算结构自重产生的恒荷载。将自重乘数定义为小于 1 的正数，表示将自重的一部分添加到 DEAD 工况的荷载中。

SAP2000 中的质量可以由几个方面组成。它包括了结构构件的质量这一基本的参量（它是基于结构构件材料的密度信息，并且与结构构件自重相对应），还包括荷载通过重力加速度关系转化的质量以及通过点、线或面指定的附加质量信息。前面所谈到的填充墙质量就可以由其自重产生施加在结构上的荷载转化为质量，其中使用的重力加速度值是程序默认的

9.81m/s^2 ，这一参量是不能被修改的。附加质量与结构自身质量不同，它仅增加结构质量，不产生自重而增加重力荷载，因此对结构的静力分析不会产生影响。根据结构动力分析的不同需求，在 SAP2000 中，可以按照不同方式定义不同的质量信息。

(2) 质量源的定义

在结构动力分析之前，必须先定义质量源参数。SAP2000 给出了质量源的三种定义方式。定义质量源时，需要点击【定义】>【质量源】命令，弹出定义质量源对话框（图 12-2）。

来自对象和附加质量

这是默认的质量源选项。采用这种方法时，所有外加的荷载不会转换为结构质量。此时，结构的质量由结构的构件体积乘以构件材料的密度（材料属性数据对话框中的密度一项）产生。利用这一选项，不能直接满足中国规范要求的重力荷载代表值要求。

来自荷载

此方法定义的质量来源于荷载，可以在此处定义《建筑抗震设计规范》的重力荷载代表值组合方式，然后将其按比例转化为质量信息。按《建筑抗震设计规范》第 5.1.3 条的规定：自重、附加恒荷载的系数为 1.0，活荷载的系数是 0.5。结构的质量等于组合后求得的荷载除以重力加速度 g 。注意，此方法的概念是将荷载转化为质量。所以它的准确度是基于参与荷载的准确度，如果施加的荷载有误，则通过这种方法求得的结构质量也是错误的。

来自对象、附加质量以及荷载

此方法计算的质量是按第一、二种方法求得的质量之和。在实际工程中采用此方法时，为了构建中国规范要求的重力荷载代表值，在定义荷载的质量乘数一栏中一般只需要定义可变荷载的质量乘数，质量乘数值为《建筑抗震设计规范》表 5.1.3 中的组合系数，而不应包括恒荷载。如果用户使用此方法时在定义荷载的质量乘数一栏指定了恒荷载，结构自身的质量将被计算两遍而出现错误。

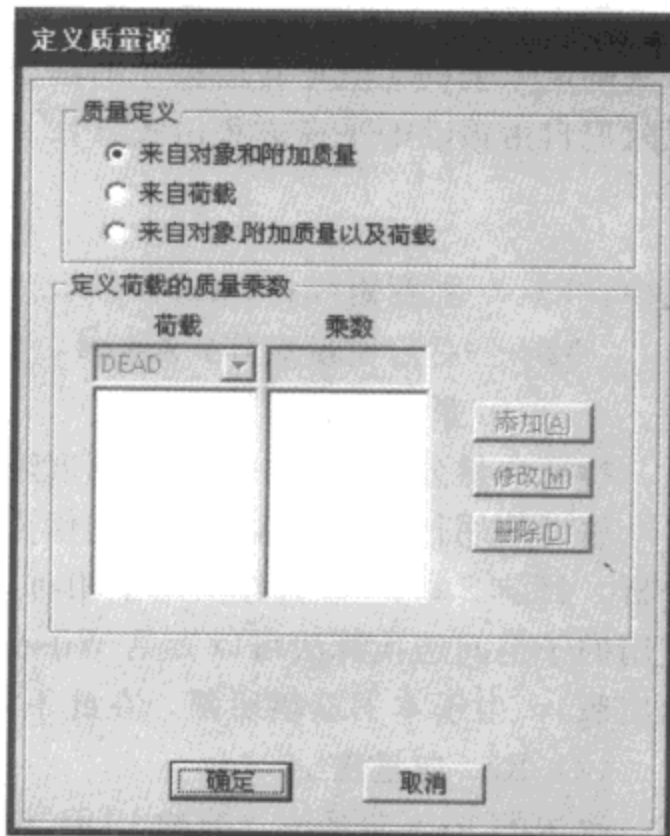


图 12-2 质量源定义对话框

12.1.3 特征向量法和 Ritz 向量法

前面我们所讨论的模态分析方法是非耦合线性结构或已经解耦的线性结构模态分析的基本方法，因此对于耦合线性结构，必须先要对结构采用适当的方法进行解耦。使用适当的方法对结构模态方程进行解耦也是动力分析中的一个重要的部分，在早期地震工程学中，动力分析的 Rayleigh-Ritz 方法广泛地用于计算近似解。随着高速计算机的发展，精确特征向量取代了 Ritz 向量并成为地震分析的基础。

SAP2000 版本中除了提供精确的特征向量法分析外，还提供了与荷载相关的 Ritz 向量 (LDR) 分析法，LDR 向量能用于线性和非线性结构的动力分析，并与精确特征向量法相

比, 新的修正 Ritz 法用更少的计算工作量可产生更精确的结果。除此以外, Ritz 向量法自动包含了静态凝聚数字技术、Guyan 消减和对于较高振型截取的静态修正等优点。下面我们将从经典模态方程出发, 简单阐述一下两种模态分析方法的基本理论。

(1) 特征向量法

为了解耦式 (12-3) 的动力平衡方程, 需要计算方程特征向量与特征值。特征向量分析方法确定系统的无阻尼自由振动的振型形状和频率。它是对一般特征值问题的求解, 典型的无阻尼自由振动的平衡方程由式 (12-9) 给出:

$$[K - \omega_i^2 M]v_i = 0 \quad (12-9)$$

式中: K ——刚度矩阵;

M ——对角质量矩阵; $\lambda = \omega^2$, 是特征值的对角矩阵, ω 为圆频率, 是相应的特征向量 (即振型形状)。

特征向量分析方法中使用的刚度矩阵与静力分析的刚度矩阵是一致的。

可以使用行列式搜索法、逆迭代法、子空间迭代法等进行平衡方程 (12-9) 的特征向量分析。目前 SAP2000 程序使用了相对更加稳定的子空间迭代法进行特征向量分析。程序所使用的子空间迭代算法可以参见 Wilson 的著作《结构静力与动力分析》(中国建筑工业出版社出版), 由于本书篇幅所限, 在此不再过多描述。

(2) Ritz 向量法

改进的 Ritz 向量法 (简称 LDR 方法), 即与荷载相关的 Ritz 向量法的物理基础认可结构动态响应是空间荷载分布的函数。弹性结构的无阻尼动态平衡方程可写成以下形式:

$$M\ddot{u}(t) + Ku(t) = R(t) \quad (12-10)$$

对于结构动力分析所经常考虑的地震作用或风荷载工况, 与我们前面所谈到的相同, 方程 (12-10) 中作用在结构上与时间相关的荷载 $R(t)$ 可写作:

$$R(t) = \sum_{j=1}^J f_j g(t)_j = FG(t) \quad (12-11)$$

方程中独立的荷载模式 F 不是时间的函数。在地震作用分析时, 这些荷载模式是结构方向的质量分布函数; 在风荷载工况中, 顺风平均风压是这些向量之一。使用相关数值技术, 时间函数 $G(t)$ 总能展开为正弦和余弦函数的 Fourier 级数。因此, 如果忽略阻尼, 则要求解的典型动态平衡方程为以下形式:

$$M\ddot{u}(t) + Ku(t) = F\sin\omega t \quad (12-12)$$

因此, 典型荷载频率 ω 的精确动态响应为以下形式:

$$Ku = F + \omega^2 Mu \quad (12-13)$$

由于方程 (12-13) 中荷载频率是未知的, 不能对该方程进行直接求解。但是基于相关推导, 可以得到下列递归方程:

$$Ku_i = Ku_{i-1} \quad (12-14)$$

SAP2000 和 ETABS 都使用了 LDR 方法。LDR 方法考虑了动力荷载的空间分布, 因此可以得到更精确的结果。在分析过程中, 第一个向量块是来自于结构上荷载模式的静态响应, 这就是我们在 Ritz 向量法定义时需要指定初始向量的原因, 也就是说当我们定义了初始向量后, 第一个向量块的静态响应就来源于该初始荷载向量。另外, 对于只有在质量自由

度状态下才施加荷载的工况，LDR 向量总是精确特征向量的线性组合。

对于初始向量的选择，一般可以使用动力荷载的空间分布向量作为一个初始荷载向量。程序允许在三个自由方向的加速度、静力荷载工况和内嵌非线性变形荷载中选择初始向量，可以指定任意数量的初始向量。其中内嵌非线性变形荷载只有在结构分析所进行的振型非线性时程分析是基于模态分析工况的情况下才是需要的，这时在荷载类型中添加连接荷载，在荷载名中选择 All 选项。

对于反应谱分析必须在初始向量中添加质量自由度方向的加速度荷载。对于时程分析，在每个荷载工况或任意时程工况使用的加速度荷载中，一个初始向量是必须的。

(3) 特征向量法和 Ritz 向量法的对比

SAP2000 提供了特征向量法和 Ritz 向量法两种模态解耦的基本方法，原因是对于大型结构系统，求解自由振动振型和频率的特征值问题可能需要大量的计算工作，这时单纯的特征向量分析就可能变得比较困难，并且在自由振动振型的计算中，完全忽视荷载的空间分布。由于计算的许多振型对荷载是正交的并且不参与动态响应，因此耗费大量精力所得到结构振动振型并不一定能够提高计算的精度，甚至有些时候是没有任何帮助的，这是特征向量法分析所存在的主要问题。

但是相比而言的 Ritz 向量法，由于所有求得特征向量都是与荷载相关的，因此避免了不参与动态响应的对于结构精度没有帮助的振型的计算，将有限的计算时间全部用于对于结果精度有增进的振型计算中。换句话说，在考虑相同的计算振型数目的前提下，使用 LDR 方法将得到更精确的结果，也可以得到规范所要求的更高的结构质量参与系数。

除此以外，如果在无质量自由度状态下施加动力荷载，那么在振型叠加分析中即使使用精确的振型，也不会收敛到精确解，并且在施加荷载处附近的位移和应力会有明显误差。因此，如果把精确特征向量用于这样的问题，就没有必要应用本应需要的“静态校正法”。有可能用最少的计算工作量来计算一组刚度和质量正交的 Ritz 向量，对荷载的任何空间分布而言，这都会收敛到精确解。

我们都知道对于特征向量分析法，必须指定振型数目的截断位置，这样会带来高阶振型的截断误差，对于对高阶振型敏感的结构而言，这样处理对其结果精度影响是非常大的。与之相比较，初始向量集包含了“静态响应”，LDR 方法避免了高阶振型截取所带来的误差。可以证明，基于唯一一组荷载相关向量的动力分析可产生比使用相同数量的精确振型法得到更为精确的结果。

12.1.4 质量参与系数和荷载参与系数

SAP2000 程序分别输出了模态分析中结构的质量参与系数、静荷载参与系数和动荷载参与系数，它们总体反映了模态分析截断高阶振型与所有振型精确分析所存在的某一类型的误差，这一点我们在前面已经谈到了。

我国 2002 版结构规范提出了结构模态分析中所考虑振型质量累计参与系数的要求，《高层建筑混凝土结构技术规程 (JGJ 3—2002)》中 5.1.13 条第二款规定对 B 级高度高层建筑和复杂高层建筑，“计算振型数应使振型参与质量不小于总质量的 90%”。另外为了控制结构扭转效应的潜在破坏力，规范规定了结构扭转响应的上限，《高层建筑混凝土结构技术规

程 (JGJ 3—2002)》中 4.3.5 条规定:“结构扭转为主的第一周期 T_t 与平动为主的第一周期 T_1 之比, A 级高度建筑不应大于 0.9; B 级高度的建筑、混合结构高层建筑及复杂高层建筑不应大于 0.85”。为了满足这一条,首先需要判断结构的第一平动周期和第一扭转周期,该判断也需要使用本节所提到的质量参与系数的概念。

SAP2000 针对三个自由度方向的加速度、所有静荷载情况和所有非线性变形荷载输出结构的静荷载和动荷载的模态分析参与系数,这两个系数的主要意义在于使用模态积分时程分析相关时程模态所考虑的振型数目是否足够。

(1) 质量参与系数

SAP2000 对于质量参与系数的计算是基于一个特定方向上的单位基底加速度以及由于该作用引起的基底剪力来进行的。此种工况的稳态解不包含阻尼或弹性力,因此对于 x 方向上的单位基底加速度,模态响应方程可以写为:

$$\ddot{y}_n = p_{nx} \tag{12-15}$$

x 方向的总基底抵抗剪力 (包括 N 个振型) 为:

$$V_x = \sum_{n=1}^N p_{nx}^2 \tag{12-16}$$

对于在任何方向上的单位基底加速度,精确的基底抵抗剪力必须等于该方向上的所有质量分量之和。因此,质量参与系数定义为该参与质量除以该方向上的总质量。即:

$$X_{mass} = \frac{\sum_{n=1}^N p_{nx}^2}{\sum m_x} \tag{12-17a}$$

$$Y_{mass} = \frac{\sum_{n=1}^N p_{ny}^2}{\sum m_y} \tag{12-17b}$$

$$Z_{mass} = \frac{\sum_{n=1}^N p_{nz}^2}{\sum m_z} \tag{12-17c}$$

振型有效质量系数为振型对六个整体坐标方向中每一个方向加速度荷载响应的计算重要性提供了一种量度,因此它对于确定反应谱分析和地震时程分析的准确性非常有用。振型有效质量系数不提供任何除加速度荷载以外的其他荷载时程分析准确性的信息。SAP2000 质量参与系数的输出项目及其意义见表 12-1。

质量参与系数输出项意义 表 12-1

| 序号 | 输出项目 | 单位 | 说明 |
|----|-------------------|----|----------------------------------|
| 1 | OutputCase | 文本 | 输出工况名 |
| 2 | StepType | 文本 | 输出步类型,对于模态分析工况为 Mode,即模态分析 |
| 3 | StepNum | 无 | 输出步,对于模态分析工况为振型排序号 |
| 4 | Period | 秒 | 该振型的周期值 |
| 5 | UX、UY、UZ | 无 | 该振型 X、Y 和 Z 三个方向的质量参与比,此时全部质量为 1 |
| 6 | SumUX、SumUY、SumUZ | 无 | X、Y 和 Z 三个方向的质量参与比振型顺序累加值 |
| 7 | RX、RY、RZ | 无 | 该振型绕 X、Y 和 Z 三个轴的质量参与比,此时全部质量为 1 |
| 8 | SumRX、SumRY、SumRZ | 无 | 绕 X、Y 和 Z 三个轴的质量参与比振型顺序累加值 |

如果模态分析工况考虑所有振型，则结构在每个自由度方向上结构质量参与系数的累计值为 100%。对于《高层建筑混凝土结构技术规程》中要求的结构模态分析截取所需要达到的累积质量 90% 的参与，我们主要是通过查看最后一个振型输出项目中第六项进行控制的，该项给出了 X、Y 和 Z 三个方向各振型质量参与系数的累加值。因为对于地震作用和风荷载作用等我们关心的主要是水平方向的响应，因此，如果 SumUX 和 SumUY 在最后一个振型累加值大于 0.9，就说明该模态分析工况中振型截取数量是满足规范要求的。

通过程序所输出的质量参与系数，我们可以判断结构每一个模态是属于某一方向的平动振型还是扭转振型，确定第一平动振型和第一扭转振型后就可以判断是否满足规范要求的第一扭转周期与第一平动周期的限值要求。对于判断某一个振型是平动振型还是扭转振型，主要是通过查看第五输出项中的 UX 和 UY 以及第七输出项中的 RZ 这三项的系数对比关系来确定的，如果 RZ 小于 UX 与 UY 的和，则说明为平动振型，反之则说明为扭转振型。如果确定为平动振型后，通过比较 UX 和 UY 的系数对比关系，可以确定是以哪个方向的平动为主，哪个方向的质量参与系数大，就说明该振型是哪个方向的平动振型。

对于一般平面比较规则的结构，前两个振型一般为两个主方向的平动振型，第三个振型为扭转振型，而且质量参与系数对比关系非常清晰，因而比较容易判断振型的属性。但是实际结构可能是比较复杂的，我们对于结构平动和扭转是从理论上进行区分的，而实际结构的耦联效应，可能很强，一个振型可能在平动的基础上带有一定的扭转，这时 UX、UY 和 RZ 之间可能就相差不大，因此我们在使用上面的判断规则的基础上，应该更多的考虑概念设计结构体系的调整，不应该一味的追求满足《规范》的条文。

另外，对于质量参与系数方面，还有一个问题需要注意，对于结构的前几个模态的 UX、UY 和 RZ 参与系数都很小（一般小于 0.01 甚至更小）的情况，一方面可能是结构本身存在局部振动，而且该局部振动频率小于整体结构的第一振型频率，局部振动可以通过振型动态视图输出出来查看，此时在确定结构第一平动或扭转模态时需要注意这一点，避免误选局部振型作为第一振型，也可以通过模态分析定义中的频率偏移和截断频率的定义来抑制局部振型的捕捉输出；另一方面可能是结构某些部位的连接或剖分出了问题，或结构存在自由点，这时常常伴随该结构振型的周期会非常长（一般大于 100s 以上），说明结构是存在问题的，需要对模型进行检查从而避免这些问题。

如果结构的某一模态为平动振型，往往还需要我们判断该结构振型的平动角，特别是结构的第一平动振型，其参数也反映了结构地震作用基底剪力的方向角。对此我们也可以通过质量参与系数来确定。例如，与第一个振型相关的基底剪力 X 轴角度可以由下式给出：

$$\theta_1 = \tan^{-1} \sqrt{\frac{UX}{UY}} \quad (12-18)$$

(2) 静荷载参与系数

静荷载参与系数标示了已计算振型相对于给定静荷载响应的吻合程度，它描述了对该静力荷载进行拟静力模态时程分析所得到结果的精确程度。该评测手段首先由 Wilson 提出。目前我国规范对该系数还没有明确的要求。但是为了能够给用户提供尽可能多的模态信息参量，在 SAP2000 中文版中保留了这些系数的输出。

Wilson 通过使用截断向量集来求解由静力荷载模式所引起的响应, 以计算静力位移, 并在此基础上定义了静荷载参与系数。如方程 (12-4) 所示, 荷载可以写作:

$$\mathbf{F}(t) = \sum_{j=1}^J \mathbf{f}_j g(t)_j \quad (12-19)$$

此时, 与荷载条件 j 相关的总外力功为:

$$E_j = \sum_{j=1}^J \mathbf{f}_j^T \mathbf{u}_j \quad (12-20)$$

根据方程 (12-7), 如果忽略惯性力与阻尼力, 与截断振型解相关的总外力功是:

$$\bar{E}_j = \frac{1}{2} \mathbf{f}_j^T \mathbf{v}_j = \sum_{n=1}^N \left(\frac{\boldsymbol{\phi}_n^T \mathbf{f}_j}{\omega_n} \right)^2 = \sum_{n=1}^N \left(\frac{p_{nj}}{\omega_n} \right)^2 \quad (12-21)$$

对于荷载条件 j , 定义静荷载参与系数 r_j 为由截断振型集所做的总功与由荷载模式所做的总外力功之比。即:

$$r_j = \frac{\bar{E}_j}{E_j} = \frac{\sum_{n=1}^N \left(\frac{p_{nj}}{\omega_n} \right)^2}{\mathbf{f}_j^T \mathbf{u}_j} \quad (12-22)$$

当采用拟静力时程分析求解静力解时, 静荷载参与系数的值对任何施加的静力荷载都应接近 100%; 如果分析是非线性的, 对所有非线性变形荷载, 静荷载参与比的值同样应接近 100%。

当然, 结合我们前面所谈到的模态分析方法, 可以知道当采用 Ritz 向量时, 对所有开始的荷载矢量, 静荷载参与比的值应总是 100%。但当采用特征向量时, 就不一定能够得到 100% 的质量参与结果。而且如果荷载矢量 p 作用在无质量的自由度上, 即使采用全部可能的特征向量, 也将无法给出 100% 的静荷载参与值。

(3) 动荷载参与系数

动荷载参与系数标示了已计算振型相对于给定动荷载响应的吻合程度, 它描述了对该动力荷载进行模态时程分析所得到结果的精确程度。它假定荷载仅仅作用在有质量的自由度上。基于只考虑惯性力抵抗荷载模式的假设, 任何作用在无质量自由度上的荷载矢量分量都不能输出动荷载参与系数, 并在分析过程中被忽略。

如果只考虑质量自由度, 由于荷载模式 f_j 而产生的准确加速度 \ddot{u}_j 为:

$$\ddot{u}_j = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{f}_j \quad (12-23)$$

在时间 $t=1$ 时的质点, 与荷载模式 j 相关的总动能为:

$$E_j = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{u}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{u}} = \frac{1}{2} \mathbf{f}_j^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{f}_j \quad (12-24)$$

根据方程 (12-7), 如果忽略无质量自由度, 当 $t=1$ 时, 模态与截断振型解相关的总动能为:

$$\bar{E}_j = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{v}}_j^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{v}}_j = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N p_{nj} \boldsymbol{\phi}_n^T \mathbf{M} \sum_{n=1}^N \boldsymbol{\phi}_n p_{nj} = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N (p_{nj})^2 \quad (12-25)$$

对于荷载条件 j , 现在可以把动力荷载参与系数 r_j 定义为与截断振型集相关的总动能与荷载模式相关的总动能之比。即:

$$r_j = \frac{\bar{E}_j}{E_j} = \frac{\sum_{n=1}^N (p_{nj})^2}{\mathbf{f}_j^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{f}_j} \quad (12-26)$$

从物理意义上讲, 动力荷载参与系数表示了模态分析捕捉到结构的高频响应的情况, 正常

情况下，如果动力荷载参与系数小于 100%，则说明高频反应没有被成功捕捉。另外，对于三个整体方向上的质量比例荷载，动力荷载参与系数和质量参与系数相同。从本质上讲动力荷载参与系数是质量参与比概念的延伸，因为质量参与系数只是针对于加速度类型动力荷载对计算所截取振型数目的要求而言的，而动力荷载参与系数将这一范围推广到了所有动力荷载形式。

12.1.5 算例

(1) 使用 SAP2000 进行模态分析的结果读取和规范参数控制

为了比较直观的说明 SAP2000 对于模态分析结果的输出，以及规范要求平扭参数、质量参与系数等参数的判断与控制，本节我们给出了一个算例。算例模型如图 12-3 所示，结构层高 3m，局部八层，其余为五层，最高部位高度为 24m。结构设置了一个两层的大空间部分（见立面图）。

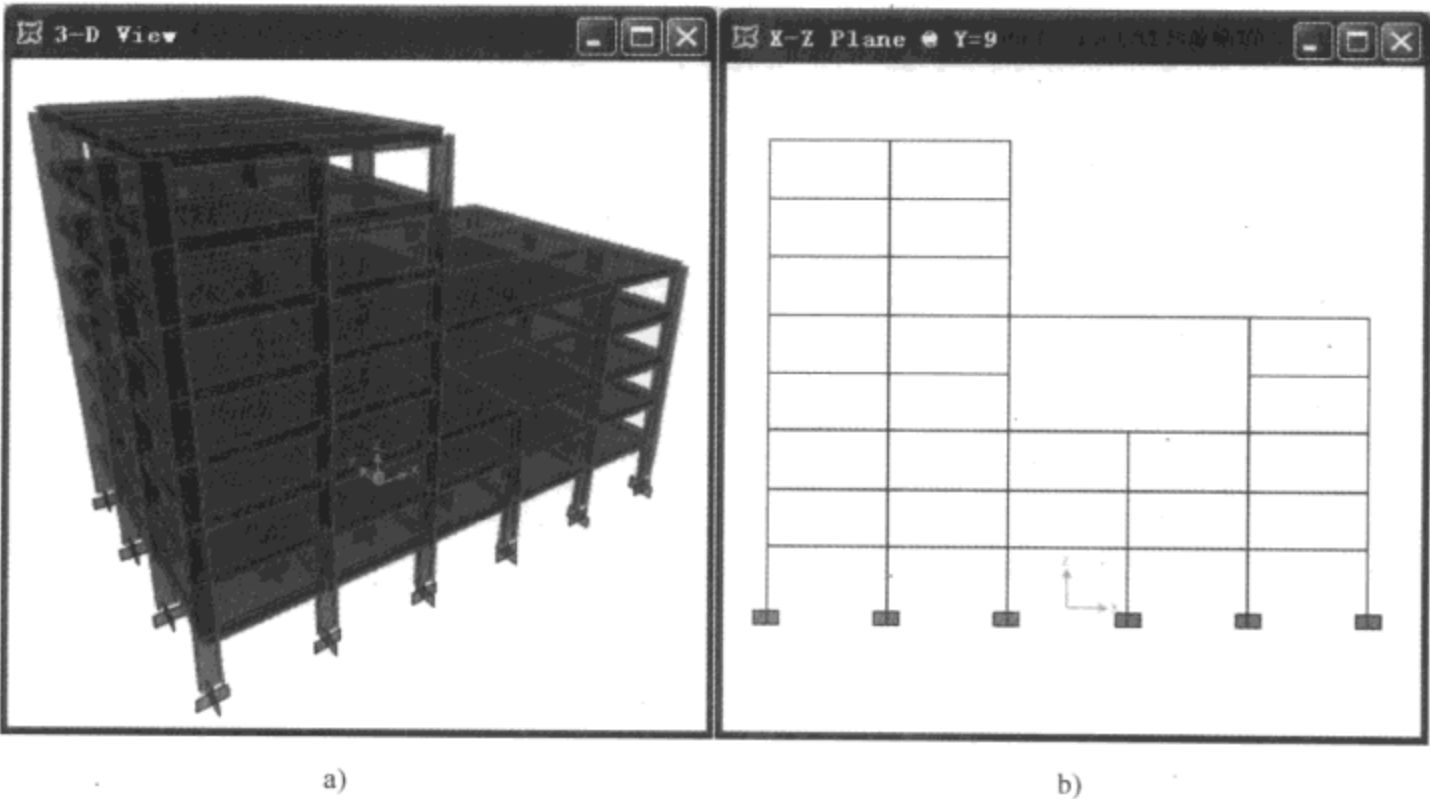


图 12-3 模态分析参数输出算例模型
a) 三维图；b) 立面图

在该算例中，定义了模态分析工况，分析方法选择特征值分析法，选择考虑的振型数量为 20 个，不考虑频率偏心。表 12-2 给出了 SAP2000 对模态分析质量参与系数的结果，其中三个方向的扭转自由度质量累计是没有意义的，因此没有给出输出结果。

算例质量参与系数输出信息 表 12-2

| 振型 序号 | 周期值 (s) | UX | UY | UZ | SumUX | SumUY | SumUZ | RX | RY | RZ |
|----------|------------|------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|
| 1 | 0.69 | 0.00 | 0.68 | 0.00 | 0.00 | 0.68 | 0.00 | 0.80 | 0.00 | 0.24 |
| 2 | 0.44 | 0.68 | 0.00 | 0.00 | 0.68 | 0.68 | 0.00 | 0.00 | 0.66 | 0.00 |
| 3 | 0.42 | 0.00 | 0.13 | 0.00 | 0.68 | 0.81 | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.51 |
| 4 | 0.25 | 0.00 | 0.09 | 0.00 | 0.68 | 0.90 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.03 |

续上表

| 振型 序号 | 周期值 (s) | UX | UY | UZ | SumUX | SumUY | SumUZ | RX | RY | RZ |
|----------|------------|------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|
| 5 | 0.18 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.68 | 0.90 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.08 |
| 6 | 0.17 | 0.13 | 0.00 | 0.01 | 0.81 | 0.90 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 7 | 0.16 | 0.00 | 0.05 | 0.00 | 0.81 | 0.95 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 8 | 0.16 | 0.03 | 0.00 | 0.04 | 0.84 | 0.95 | 0.05 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 9 | 0.15 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.84 | 0.95 | 0.05 | 0.01 | 0.00 | 0.00 |
| 10 | 0.12 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.84 | 0.95 | 0.05 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 11 | 0.11 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.84 | 0.95 | 0.05 | 0.00 | 0.00 | 0.04 |
| 12 | 0.10 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 0.84 | 0.98 | 0.05 | 0.00 | 0.00 | 0.02 |
| 13 | 0.09 | 0.08 | 0.00 | 0.00 | 0.92 | 0.98 | 0.05 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 14 | 0.09 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.92 | 0.99 | 0.05 | 0.00 | 0.00 | 0.01 |
| 15 | 0.08 | 0.00 | 0.00 | 0.40 | 0.92 | 0.99 | 0.46 | 0.00 | 0.13 | 0.00 |
| 16 | 0.08 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.92 | 0.99 | 0.46 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 17 | 0.08 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.92 | 0.99 | 0.46 | 0.05 | 0.00 | 0.00 |
| 18 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.92 | 0.99 | 0.47 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 19 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.92 | 0.99 | 0.47 | 0.01 | 0.00 | 0.00 |
| 20 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.92 | 0.99 | 0.48 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

我们可以根据周期信息来了解结构的前三个周期分别为 0.69s、0.44s 和 0.42s，模态分析结果得到如图 12-3 所示的振型图。我们可以按照本章前面所谈到的质量参与系数状态来判断前三个周期的平扭属性，首先可以看到对于结构第一周期，质量参与系数 UY 为 0.68， UX 和 UZ 分别为 0，说明结构的三个平动自由度相比属于 Y 方向的平动振型； RX 为 0.8，这是与 UY 相对应的，因为对于 UY 方向的平动绝大部分质量都是绕 X 轴的旋转， RY 为 0， RZ 为 0.24，因为结构的约束是发生在 XY 平面上的，所以 RZ 代表的是结构的扭转自由度质量参与系数，也就是说结构的第一振型带有一定的扭转属性，由于结构局部高度不一致（沿 X 方向），这一点也是可以预期的，但是 RZ 远小于 UY ，可以判断第一振型属于 Y 方向的平动振型。

同样对于第二振型平动自由度质量参与系数 UX 为 0.68， UY 和 UZ 为 0，对应 RY 为 0.66， RZ 为零，这一振型不带有扭转属性（沿 Y 方向结构是对称的），第二自由度为单纯的 X 方向的平动振型。对于第三振型 UY 为 0.12， RZ 为 0.51，说明这一振型为扭转振型，但带有一定的 Y 方向的平动效应。

从上面的分析我们可以明确以下几点，首先我们前面谈到对于通过质量参与系数判断平扭振型主要是比较 UX 、 UY 和 RZ 三个自由度质量参与情况，相比较哪个方向的质量参与比例比较大时，对应为哪个方向或属性的振型。对此工程师可能会产生疑问，如果平动方向 UX 或 UY 与 RZ 的质量参与系数非常相近，甚至相等时怎么办？对此，笔者觉得，假如这是发生在结构前三个振型以外时，可以不去管它，因为结构体系本身的复杂特性决定高阶振

型很可能出现对等的平扭耦联效应，并且高振型对于结构效应求解处于较次要的地位，也不影响对于相关规范条文的判断，因此笔者觉得这是可以接受的。

但是如果发生在前三个振型，就必须要进行仔细的分析了。大家都知道，平扭耦联的效应主要是源于结构平面质量和刚度分布的不均匀和不对称，并且平扭耦联对于结构的危害是比较大的，因此规范对于这方面进行了严格的控制。一般结构都会发生一定的平扭耦联，比如本算例，实际上也产生了一定的平扭耦联效应，原因是结构的局部高度差异及局部大跨度带来的结构质量及刚度分布不均匀，但是从概念设计上来看该结构并不是很特殊，计算结果也证实了平扭耦联效应并不是很明显，因此是可以接受的。实际上如果对于这一类结构或平面分布更复杂的结构，通过一个参数的量化来控制是平动还是扭转振型，那么这一参数稍小或稍大便带来了两个相反的结论，并且直接决定是否符合规范要求，是否为合理的结构，那么这一点差异是不会带来结构体系本质性的差异。

综上所述，笔者认为对于通过质量参与系数来判断结构平动和扭转振型不应该给出唯一的量化指标，对此实际上规范已经给出了指导方向，新的规范也是把概念设计放在第一位的。因此，笔者的建议是当前三个振型中出现 UX 或 UY 与 RZ 接近时，应该从概念设计方面寻找原因，并且应该尽量避免这一情况的出现，可以通过结构质量、刚度平面分布情况进行调整，或通过抗扭刚度的调整来实现这一目标，由于本书并非针对结构的设计，在此就不再赘述了。

从表 12-2 还可以看出，对于 UZ 方向平动质量参与系数，前几个振型都是零，实际上对于一般的结构体系，是不需要考虑 UZ 方向的动力效应的，因此也就不关注 UZ 方向的振型了。 UZ 方向的质量参与系数是判断结构竖向振型的主要依据。一般情况下只有带有大跨度、长悬臂的结构或结构体形非常复杂的结构才需要考虑竖向振型。比如本算例，结构中存在于一个大跨度部分，从质量参与信息可以看出，它发生了竖向振动，并且是出现在第六和第八周期，因为这一部分的质量相对于整体结构比例是比较小的，因此质量参与系数也是比较小的；更多质量参与，也即结构大范围的竖向振动是出现在第十五振型。 UZ 的质量参与系数为 0.4，并且它的周期是 0.08s，而第六周期的周期值是 0.17s，可以看出大跨度部分相对于整体结构，竖向是柔得多的。

最后我们需要判断结构地震动力分析所采用的模态分析的质量参与要求，也就是我们常说的 90% 以上的水平质量参与系数的限制。在表 12-2 中我们是通过 $SumUX$ 和 $SumUY$ 进行判断，并且只需要读取最后一个振型的累计质量就可以了，对于本算例我们可以看出， $SumUX$ 为 92%， $SumUY$ 为 99%，是满足要求的。至于 $SumUZ$ 和 $SumRZ$ 质量参与系数累计则越小越好。

图 12-4 给出了本算例前三个振型和第五、六、十五阶振型图，可以看出，从表 12-2 得到的结论也可以在振型图中直观的看到。第一振型为 Y 方向平动振型，略带扭转效应；第二振型为 X 方向平动振型，不带扭转；第三振型为扭转振型，略带 Y 方向的平动；第六振型为大跨部位局部竖向振型；第十五振型为大面积竖向振型。

SAP2000 还输出了振型质量和振型刚度情况，通过表 12-3 可看出，结构振型质量输出是正交归一化的结果，而振型刚度信息就是微分方程求解过程的特征值。根据经典无阻尼自由振动公式，便可以得到表中的模态周期值。

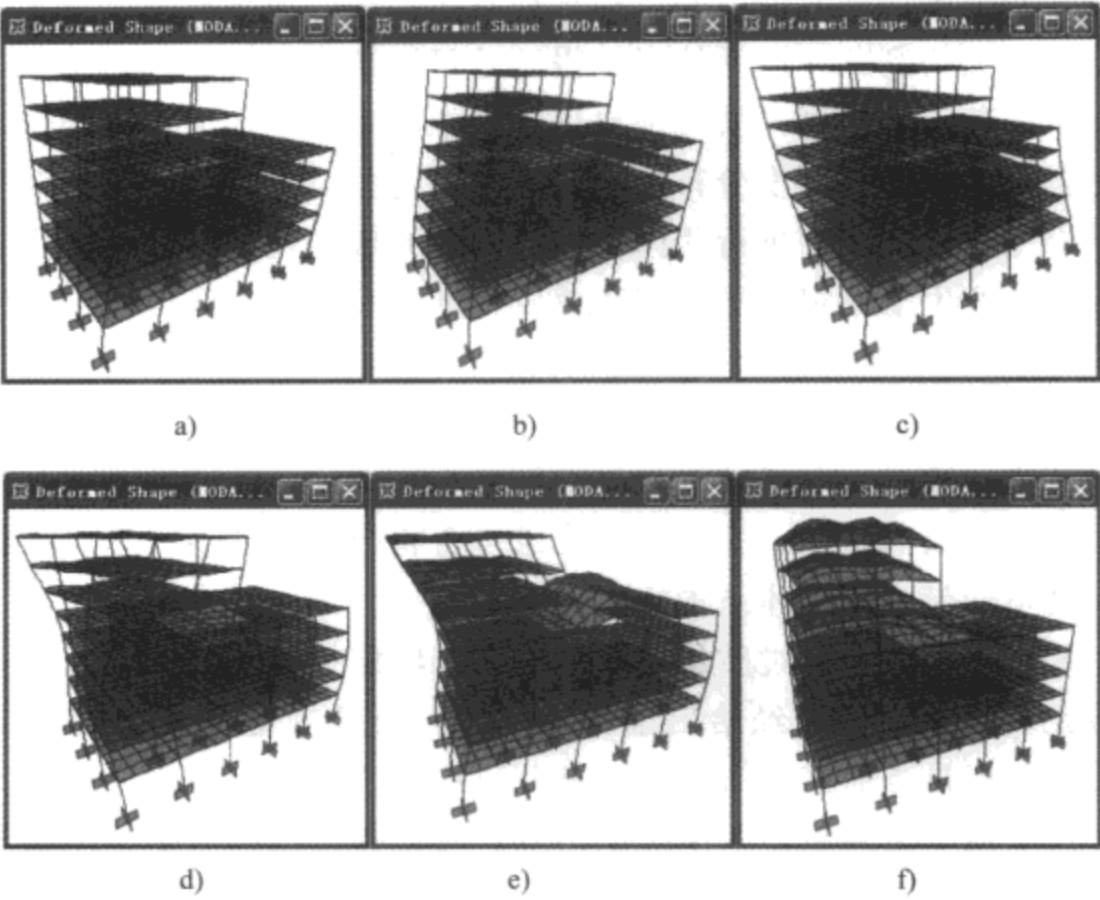


图 12-4 算例模型振型图

a) 第一振型；b) 第二振型；c) 第三振型；d) 第四振型；e) 第五振型；f) 第六振型
振型质量及刚度输出信息

表 12-3

| 振 型 序 号 | 周期值 (s) | 振型质量 (t) | 振型刚度 (kN/m) |
|---------|---------|----------|-------------|
| 1 | 0.69 | 1 | 82.42 |
| 2 | 0.44 | 1 | 204.39 |
| 3 | 0.42 | 1 | 221.91 |
| 4 | 0.25 | 1 | 612.05 |
| 5 | 0.18 | 1 | 1261.56 |

(2) 特征向量法和 Ritz 向量法算例对比

前面我们讨论了 SAP2000 所提供的两种模态分析方法：特征向量法和 Ritz 向量法。为了更直观地给出这两种方法在结构有限元分析过程中的区别，此处我们以一个单跨简支梁为例予以说明，见图 12-5。

该单跨梁跨度为 10m，跨中施加 50kN 集中荷载，分析过程中梁按照最大 1m 长的单元进行剖分。考虑在 XZ 平面内分析，分别定义了“EIGEN”和“RITZ”两个模态分析工况，前者是特征向量法，后者是 Ritz 向量法。两个模态分析工况所考虑的振型数量均为 5 个，Ritz 向量法考虑的初始激发荷载为 UZ 方向的加速度。

图 12-6 依次给出了两种模态分析方法前五阶振型图，由图可以清楚地看到由两种方法得到振型图是大不相同的。从经典结构动力学可以判断，特征值方法模态分析给出的结构振

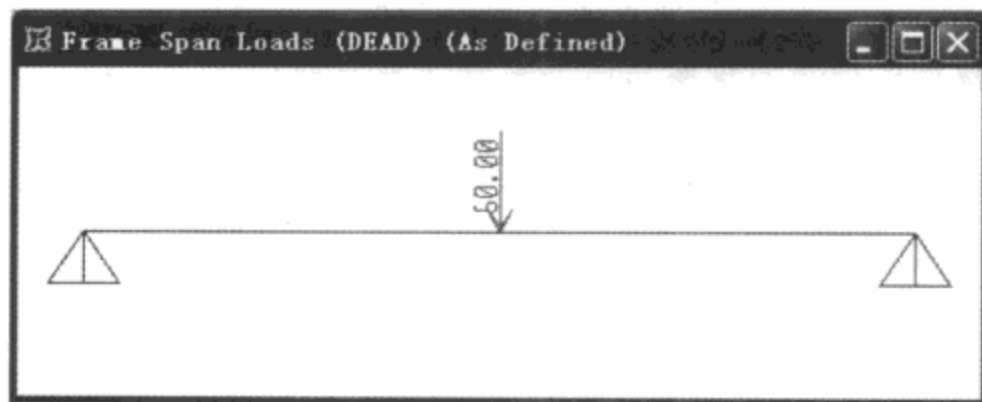


图 12-5 模态分析方法对比模型

型是一个单跨框架比较标准的振型，而 Ritz 向量法模态分析给出的结果则没有对这些振型进行全部考虑。两个方法的第一振型是相同的，Ritz 向量法的第二振型是特征向量法的第三振型，而 Ritz 向量法的第三振型是特征向量法的第五振型。我们仔细观察可以看到，Ritz 向量法所有振型都是对称的。

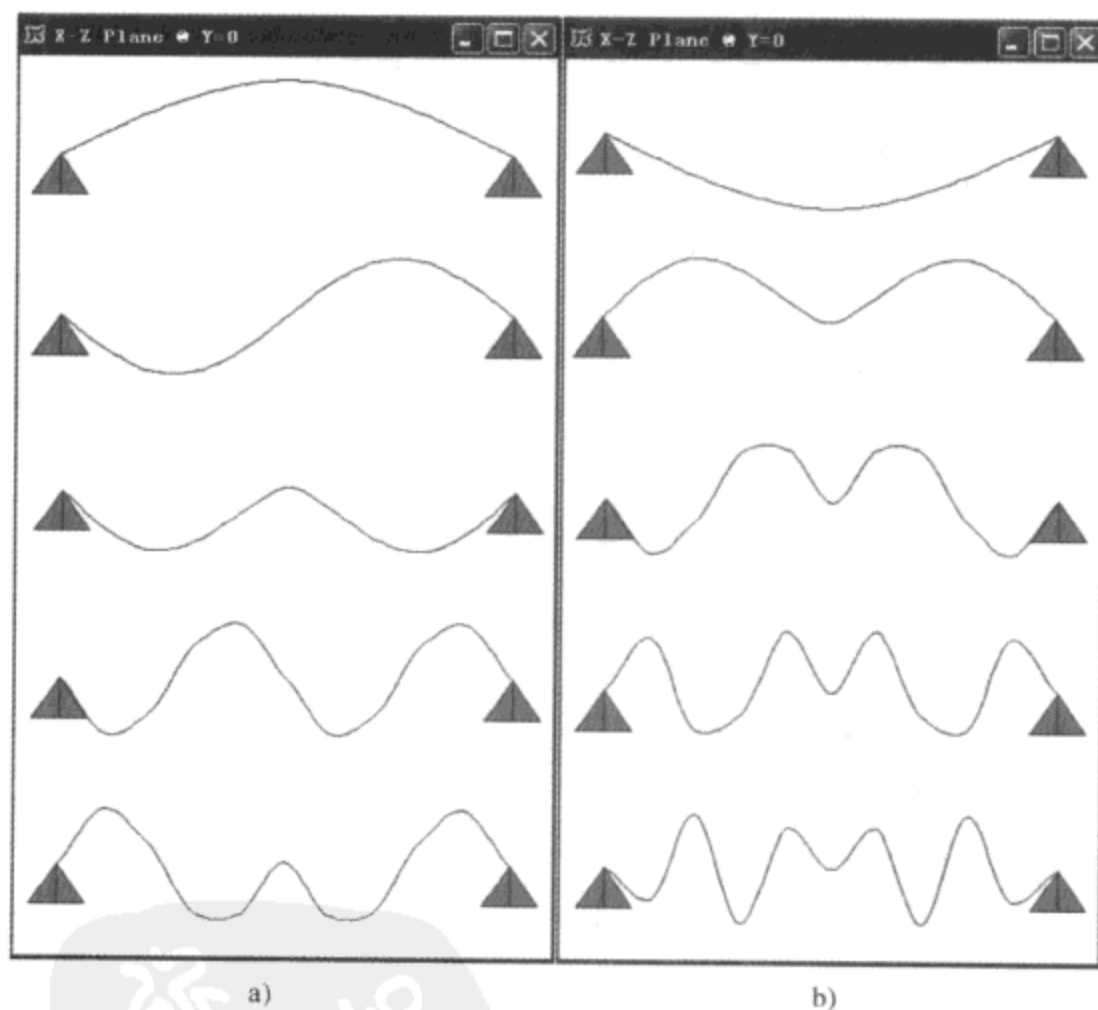


图 12-6 算例模型振型图

a) 特征向量法；b) Ritz 向量法

上面我们在给出算例条件的时候已经交待了，此处给框架梁施加的主要荷载是在梁的中心部位，因此荷载作用是对称的，而对于反对称的振型，并不是由荷载激发的，荷载在这些振型的动力贡献也为零。本章前面已经讨论过了，Ritz 向量法是考虑荷载分布状态及动力贡献的模态分析方法，所以在本算例中它忽略了所有反对称振型。所得到的结果同样是

考虑五个振型，但 Ritz 向量法会考虑更多有效的振型，也会得到更高的质量参与系数，这一点也可以通过本算例的模态质量参与结果来看（表 12-4）。

质量参与系数输出信息 表 12-4

| 工况名称 | 振型序号 | 周期值 (s) | 质量参与系数 | 累计质量参与系数 |
|-------|------|---------|--------|----------|
| EIGEN | 1 | 0.166 | 0.9733 | 0.9733 |
| | 2 | 0.014 | 0.0000 | 0.9733 |
| | 3 | 0.009 | 0.0193 | 0.9926 |
| | 4 | 0.004 | 0.0000 | 0.9926 |
| | 5 | 0.004 | 0.0054 | 0.9980 |
| RITZ | 1 | 0.166 | 0.9733 | 0.9733 |
| | 2 | 0.009 | 0.0193 | 0.9926 |
| | 3 | 0.004 | 0.0054 | 0.9980 |
| | 4 | 0.002 | 0.0016 | 0.9997 |
| | 5 | 0.002 | 0.0003 | 1.0000 |

从表 12-4 可以看出，特征向量法分析工况考虑五个振型得到的累计质量参与系数为 99.8%，而 Ritz 向量法得到了 100% 的质量参与系数。而且可以看出特征向量法第二个和第四个振型质量参与系数为 0，恰好是两个反对称振型，这也证实了我们前面提到的观点。对于本算例，我们还给出结构静力荷载参与系数和动力荷载参与系数，见表 12-5。

荷载参与系数结果 表 12-5

| 分析工况 | 动力荷载类型 | 自由度方向 | 静力参与系数 (%) | 动力力参与系数 (%) |
|-------|--------|-------|------------|-------------|
| EIGEN | 加速度 | UX | 0.0 | 0.0 |
| | 加速度 | UY | 0.0 | 0.0 |
| | 加速度 | UZ | 100.0 | 99.8 |
| RITZ | 加速度 | UX | 0.0 | 0.0 |
| | 加速度 | UY | 0.0 | 0.0 |
| | 加速度 | UZ | 100.0 | 100.0 |

从表 12-5 可以看出，由于我们没有考虑 UY 方向的自由度，而前五个振型没有 UX 方向的振型，因此 UX 和 UY 方向的荷载参与系数均为零。两种模态分析方法全部得到了 100% 的静荷载参与系数，说明计算振型对于恒载作用的吻合程度两种方法都是比较好的。对于动力荷载参与系数，特征向量法给出了 98% 的参与系数，而 Ritz 向量法给出了 100% 的质量参与系数，这也证实了本章前面的论述，Ritz 向量法分析因为考虑了更多的高阶振

型, 因此对于动力荷载的高频响应捕捉可以得到更好的结果。

12.2 反应谱分析

地震作用本质上是一种地面运动荷载, 虽然其发生的过程总体上很短暂, 但是作用的大小是随时间变化的, 目前结构分析的发展水平允许我们基于振型叠加法或其他方法在地震作用的整个过程中对结构的响应进行完整计算, 这就是我们所常说的结构时程分析。但是这种分析方法往往需要更复杂的计算工作, 而且所进行的分析往往需要更详尽并有针对性的场地信息, 这一点并不是所有实际工程都能够提供的, 另外, 时程分析会输出地震作用整个过程每一时刻的结构位移及内力响应, 对于这些信息的统计需要大量的工作量, 并且难以形成直接指导结构设计的信息。因此虽然时程分析是更为真实的结构动力分析, 但是能满足大部分结构规范要求 and 工程师需求的仍然是地震作用的反应谱分析。

地震作用反应谱分析本质上是一种拟动力分析, 它首先使用动力方法计算质点地震响应, 并使用统计的方法形成反应谱曲线, 然后再使用静力方法进行结构分析。时程分析的不足恰好是反应谱分析方法的优点, 光滑设计反应谱是地震运动的平均值, 它仅包括计算每个振型中的位移和构件力的最大值, 因此不需要对于多条地震波进行复杂计算。并且结构反应谱分析所给出的结构响应信息可以很方便的应用于结构设计, 避免了对整个时间范围内结构响应的处理。

12.2.1 反应谱分析的基本理论与方法

首先我们仍然是从前面所推导出来的模态方程出发, 来简单阐述一下反应谱分析方法的基本原理。对于三维地震运动, 典型的模态方程 (12-7) 可重写为:

$$\ddot{y}_n + 2\xi_n\omega_n\dot{y}_n(t) + \omega_n^2 y_n(t) = p_{nx}\ddot{u}(t)_{gx} + p_{ny}\ddot{u}(t)_{gy} + p_{nz}\ddot{u}(t)_{gz} \quad (12-27)$$

式 (12-27) 中三个振型参与系数是由 $p_m = -\Phi_n T M_i$ 定义的, i 为 x 、 y 或 z 。公式 (12-27) 考虑了结构三个方向上的地震作用, 一般情况下, 我们需要先求解一个方向地震作用响应, 然后再基于三个正交方向的分量考虑结构总响应, 换句话说, 前者是基于振型组合求解一个方向的地震响应, 后者是基于方向组合求解结构总响应。下面我们只考虑一个方向的地震输入, 方程 (12-27) 可写为:

$$\ddot{y}_n(t) + 2\xi_n\omega_n\dot{y}_n(t) + \omega_n^2 y_n(t) = p_{ni}\ddot{u}_g(t) \quad (12-28)$$

基于方程 (12-28), 我们可以绘制最大值响应 $y_{\max}(\omega)$ 的曲线。对于该加速度输入, 根据定义, 曲线是地震运动的位移反应谱。对于每个不同的阻尼值都会有一条不同的曲线与之对应。

对于具有周期 T_n 的典型振型 n 和对应的反应谱值 $S(\omega_n)$, 可以计算出结构的最大模态位移。与周期 T_n 相关的最大模态反应可由下式得出:

$$y_{\max}(T_n) = \frac{S(\omega_n)}{\omega_n^2} \quad (12-29)$$

结构的最大模态位移响应为:

$$u_n = y_{\max}(T_n)\phi_n \quad (12-30)$$

曲线 $\omega y_{\max}(\omega)$ 定义为伪-速度谱，而曲线 $\omega^2 y_{\max}(\omega)$ 定义为伪-加速度谱。对于零阻尼的特殊情况，系统总加速度等于 $\omega^2 y(t)$ 。曲线的标准表示形式为 $S(\omega)$ 对以秒为单位的周期 T ，其中：

$$S_a(\omega) = \omega^2 y_{\max}(\omega) \quad (12-31)$$

根据标准矩阵结构分析，使用在静力分析中所需的相同方程，计算出对应的模态内力 f_{kn} 。

基于不同周期结构响应峰值大小，我们也可以绘制结构速度和加速度反应谱曲线。一般情况下，随着周期的延长，位移反应谱为上升曲线；速度反应谱曲线为平直曲线，相对比较恒定；加速度反应谱大体为下降曲线。一般情况下，我们并不关心速度反应谱，因为它不是反应谱的实质部分，而目前结构设计的主要依据是加速度反应谱，这在国内外不同地区的规范是相同的。图 12-7 给出了典型设计加速度反应谱曲线。

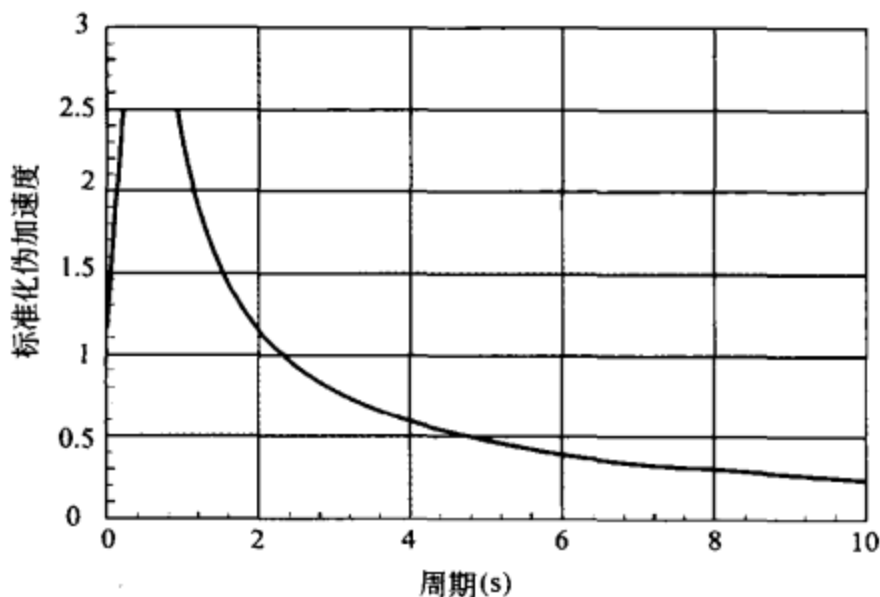


图 12-7 典型设计反应谱

加速度反应谱在短周期部分为快速上升曲线，并且在结构周期与场地特征周期接近时出现峰值，后面更大范围是逐渐下降段。峰值出现的时间与对应的周期与场地类别有关系，一般情况下 I 类场地约为 0.1~0.2s，II 类场地约为 0.3~0.4s，III 类场地约为 0.5~0.6s，IV 类场地约为 0.7~1.0s。而且通过反应谱曲线的基本形态可以看出，结构的地震作用大小取决于结构的自振周期和场地特性。一般来说，随着结构自振周期的延长，地震作用将减小。而如果结构的自振周期与场地特征周期相近，结构地震作用最大，这就是我们所常说的上平台。

12.2.2 振型组合的基本理论与方法

SAP2000 对于反应谱分析振型组合分析，给出了 CQC 法、SRSS 法、ABS 法、GMC 法、10Pct 法和 Dbl Sum 法等组合方法，见图 12-8。我国 2002 新的规范规定考虑结构藕联效应的情况，可以采用 SRSS 和 CQC 两种组合方法。

分析工况数据 - Response Spectrum

分析工况名称: ACASE1 设置定义名称

分析工况类型: Response Spectrum

振型组合: ☒ CQC ☐ SRSS ☐ ABS ☐ GMC ☐ 10 Pct ☐ Dbl Sum

GMC #1: GMC #2:

振型分析工况: 使用来自振型分析工况的模式 MODAL

Diaphragm Eccentricity: Eccentricity Ratio: Override Eccentricities: Override...

绝对值比例系数:

施加的荷载

| 荷载类型 | 荷载名称 | 函数 | 比例系数 |
|------|------|--------|------|
| 加速度 | U1 | UNIFRS | 1 |
| | | | |
| | | | |

添加(A) 修改(M) 删除(D)

☐ 显示高级荷载参数

其它参数: 振型阻尼 Constant at 0.05 修改/显示...

确定 取消

图 12-8 反应谱工况定义对话框

(1) ABS 法

ABS 法是绝对值相加法。这种方法的假设条件是所有振型的最大模态值都发生在相同的时间点上, 通过求它们绝对值和的方法来对振型进行组合。实际上同一时刻基本上不可能所有模态均发生最大值, 因此, 这一组合方法是用于计算结构中的位移或内力峰值的最保守方法。

(2) SRSS 法

SRSS 法是平方和的平方根法。这种方法假设所有最大模态值在统计上都是相互独立的, 通过求各参与组合的振型的平方和的平方根, 来进行组合。SRSS 方法不考虑各振型间的耦合效应, 实际上结构模态都是相关联的, 不可避免的存在耦合效应, 因此对于那些多数频率几乎相同的三维结构, 耦合效应的影响更加突出, 因此在这种情况下, 不适合使用这一组合方法。SRSS 方法是我国 2002 版新规范推荐使用的振型组合方式之一。

(3) CQC 法

CQC 法是完全平方根组合 (Complete Quadratic Combination) 法。这种方法是由 Wilson 等人在 1981 年提出的, 也是目前在不同国家和地区规范中应用最广泛的组合方式。CQC 法是以随机振动理论为基础, 考虑了振型阻尼引起的邻近振型间的静态耦合效应, 因此它是比 SRSS 组合方法更加合理的振型组合方式。CQC 法是我国 2002 版新规范推荐使用

的振型组合方式之一，并且规范要求如果结构扭转效应比较明显，并且振型间存在较强的耦合，一般推荐使用 CQC 组合方法。

当所有的振型阻尼均为零时，这种方法与 SRSS 方法相同。

使用 CQC 法所得到的单向水平地震作用的响应为：

$$S_{Ek} = \sqrt{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m S_j \rho_{jk} S_k} \tag{12-32}$$

式中， S_j ， S_k 分别是 j 、 k 振型地震作用标准值效应。对于固定阻尼的 CQC 法的交叉模态系数 ρ_{jk} 为：

$$\rho_{jk} = \frac{8\xi_j\xi_k(1+r)r^{3/2}}{(1-r^2)^2 + 4\xi_j\xi_kr(1+r)^2} \tag{12-33}$$

式中， $r = \frac{\omega_n}{\omega_m}$ ， r 必须等于或小于 1.0。需要注意的是，交叉模态系数阵列是对称的，所有项都是正的。

(4) GMC 法

GMC 法是一种通用模态（振型）组合方法。GMC 法又被称为 Gupta 法，原因是它与 Gupta 文献中所描述的完全模态（振型）组合程序是一样的。GMC 法与 CQC 法相似，它考虑了模态之间的统计耦合，但是除此之外，它还考虑了具有刚性反应内容的模式之间的相互关系，这在 CQC 组合方法中没有考虑。

在使用 GMC 法时，需要指定两个频率 f_1 和 f_2 ，它们是用来定义地面运动的刚性反应内容的，并且必须满足 $0 < f_1 < f_2$ 。所有模式的刚性反应部分被假定为完全关联的。

GMC 法假定在频率 f_1 下没有刚性反应，全部的刚性反应发生在频率 f_2 之上，并且频率刚性反应的一个内插值在频率 f_1 与 f_2 之间。频率 f_1 与 f_2 是地震输入的属性而非结构的属性。Gupta 定义 f_1 和 f_2 分别为：

$$f_1 = \frac{S_{Amax}}{2S_{Vmax}} \tag{12-34}$$

$$f_2 = \frac{1}{3}f_1 + \frac{2}{3}f_r \tag{12-35}$$

对于被考虑的地面运动， S_{Amax} 是最大的反应谱加速度， S_{Vmax} 是最大的反应谱速度， f_r 是地震输入的刚性频率。也就是说，在反应谱加速度上的频率在本质上是常量，并且等于在零周期时（无穷频率）的值。

(5) 10Pct 法

10Pct 法是《美国原子能控制委员会控制手册》1.92 中所提供的“百分之十法”。这种方法假设了频率相差小于或等于较小频率 10% 的两个振型间完整的正耦合。模态阻尼不会对这些耦合产生影响。

(6) Dbl Sum 法

Dbl Sum 法是《美国原子能控制委员会控制手册》1.92 中所提供的“双精度求和法”。这种方法假设了所有振型间的正耦合，并且考虑了关联系数，这一系数基于与 CQC 和 GMC 方法中相似的阻尼值，同时也基于地震持续时间。因此如果选择这种组合方式，需要定义地震持续时间“ t_d ”作为分析时的使用参数。

12.2.3 方向组合基本方法

(1) SRSS 法

SRSS 法是平方和的平方根法。这种方法假设两个方向响应最大值在统计上都是相互独立的,通过求两个方向平方和的平方根,来进行方向组合。SRSS 方法不考虑两个方向地震作用出现峰值统计上的相关性,因此组合值相对是比较保守的,但是与 ABS 法相比,它是相对较优化,因此是 SAP2000 程序默认的方法。

(2) ABS 法

ABS 法是绝对值相加法。当比例系数选择为 1 时,这种方法的假设条件是两个方向最大值都发生在相同的时间点上,通过求它们的绝对值之和来进行方向组合。实际上同一时刻两个方向不一定发生最大值,因此,这一组合方法是比较保守的方法。

在使用 ABS 方向组合法时,需要定义一个比例系数,其中把一个方向的地震作用某一响应值加上其他方向地震作用该响应与比例系数的乘积作为一种组合,最终组合值取所有组合绝对值的最大值,比如当选择比例系数为 0.6 时,某一类型的反应谱三个方向的组合响应为:

$$R = \max(\bar{R}_1, \bar{R}_2, \bar{R}_3) \quad (12-36)$$

式中:

$$\bar{R}_1 = R_1 + 0.6(R_2 + R_3) \quad (12-37a)$$

$$\bar{R}_2 = R_2 + 0.6(R_1 + R_3) \quad (12-37b)$$

$$\bar{R}_3 = R_3 + 0.6(R_1 + R_2) \quad (12-37c)$$

R_1 、 R_2 和 R_3 分别是三个方向地震作用该类型响应的值。

(3) Modified SRSS (Chinese) 法

Modified SRSS (Chinese) 法是我国规范所规定的双向地震的组合方式。这种方法本质上仍然是 SRSS 法,不同之处是它考虑了两个方向地震作用出现峰值统计上的相关性,在组合过程中引入相关性比例系数来考虑这一点。对于我国 2002 版新规范,根据强震观测记录的统计分析,规定这一比例系数为 1:0.85。

也就是在《建筑抗震设计规范 (GB 50012—2001)》中 5.2.3-2 条中所描述的:“双向地震作用的扭转效应,可按下列公式中的较大值确定:

$$S_{E_k} = \sqrt{S_x^2 + (0.85S_y)^2} \quad (\text{GB 50012—2001, 5.2.3-7})$$

$$S_{E_k} = \sqrt{S_y^2 + (0.85S_x)^2} \quad (\text{GB 50012—2001, 5.2.3-8})$$

式中, S_x 、 S_y 分别为 x 向、 y 向单向水平地震作用按 (5.2.3-5) 计算的扭转效应。”

12.2.4 中国规范反应谱分析在 SAP2000 中的实现

中国 2002 版新规范对结构地震作用的计算提供两种方法:底部剪力法和振型分解法。底部剪力法是一种静力计算方法,振型分解法就是我们这里所谈到的反应谱分析法,它虽然是一种拟动力分析方法,但可以得到比底部剪力法更为合理的结构地震作用分析结果。底部剪力法只考虑结构第一振型,对于第一振型起绝对控制作用的较低结构是基本可以接受的,但对高层建筑则会带来较大的误差,因此《高层建筑混凝土结构技术规程 (JGJ 3—2002)》

中 3.3.4-1 条规定“高层建筑结构宜采用振型分解反应谱法”。

(1) 中国规范振型分解反应谱法定义

在 SAP2000 程序中,我们可以使用规范所要求的两种方法进行地震作用的计算,其中底部剪力法是在静力荷载工况中进行定义的(本书前面的章节已经进行了说明)。当使用振型分解反应谱法进行计算时,需要先通过【定义】>【函数】>【反应谱】命令来定义反应谱函数,在选择添加函数类型下拉菜单选择中国 2002 版规范所给出的反应谱。然后,再通过【定义】>【分析工况】命令添加并定义反应谱分析工况即可。

对于中国规范振型分解法所要求的振型组合方式 SRSS 和 CQC 两种方法是 SAP2000 所提供的六种组合方式的前两种,而且程序默认选定的组合方式也是我国规范所推荐采用的 CQC 法。对于不同结构工程需要,我们可以选择其他几种振型组合方式进行计算。

如果我们需要计算的是单向地震作用,在施加的荷载选项中选择 U1(X 方向)或 U2(Y 方向),然后在比例系数选项中输入重力加速度值,需要特别注意,此时所使用的单位制为程序的全局单位制。

(2) 双向地震和偶然偏心

如果我们需要计算的是单向地震作用,此时不需要选择方向组合项,程序选择的默认选项也没有意义。我国《建筑抗震设计规范(GB 50012—2001)》中 5.1.1-3 条规定:对于“质量和刚度分布明显不对称的结构,应计入双向地震作用下的扭转影响,当需要计入双向地震作用时,需要在施加的荷载选项中同时选择 U1 和 U2 两个方向”。这时需要在方向组合中定义两个方向地震作用的组合方式,如果需要按照中国规范进行组合,可以直接选择 Modified SRSS (Chinese) (修正后的 SRSS) 组合方式即可。

当选择 Modified SRSS (Chinese) 方向组合方式后,程序会默认选择规范所要求的 1:0.85 的方向比例系数,并且自动考虑《建筑抗震设计规范(GB 50012—2001)》公式(5.2.3-7)和(5.2.3-8)两种组合方式进行地震作用方向组合,并输出包络结果。

抗震规范规定对于不需要考虑双向地震的结构,“应允许采用调整地震作用效应的方法计入扭转影响”,并提供了通过增大边榀结构承载力的方法增大结构抗扭能力的做法。对此,《高层建筑混凝土结构技术规程(JGJ 3—2002)》中给出了更为广泛适用的方法,也就是偶然偏心方法。从概念上讲偶然偏心是考虑了结构在施工、使用过程中质量偏心,以及地震地面运动扭转分量对于结构抗震的不利影响。偶然偏心对结构的影响是比较大的,它有可能会大于考虑双向地震作用的影响,特别是对边长较大结构的影响更大。

SAP2000 程序允许工程师考虑偶然偏心的影响,方法也很简单,只需要在偶然偏心区域选项中输入相关偶然偏心的值,比如是 5% 的偶然偏心则输入 0.05 即可。偶然偏心的计算方法实际上是一种地震计算附加偏心矩的方法,程序计算过程中地震作用仍然施加在刚性隔板的质心位置,不同的是此时会考虑 $0.05L$ 偏心所带来的附加扭矩值。需要注意的是,偶然偏心是在结构楼层刚性楼板假定的基础上的,因此程序需要工程师先对结构指定刚性隔板(方法参见本书前面章节),然后才可以定义偶然偏心,并且程序允许针对不同的楼层刚性隔板定义不相同的偶然偏心值。

目前,工程界一个比较热门的话题是考虑偶然偏心的单向地震作用和不考虑偶然偏心的双向地震作用所得结构的分析结果哪一个更大一些,两种分析是否存在相互涵盖关系。对

此，笔者使用 SAP2000 程序也做了相关分析对比工作，结论是两者不存在能够涵盖彼此的关系。实际上，偶然偏心和双向地震作用是两个完全不同的概念。在地震作用时，无论考虑单向地震作用还是双向地震作用，都有结构质量偶然偏心的影响；反之，不论是否考虑质量偶然偏心的影响，地震作用的多维性本来都应考虑。质量偶然偏心是结构自身的属性问题，双向地震作用是地震的特性问题。不过有一点是可以肯定的，同时考虑偶然偏心作用的双向地震分析则涵盖以上我们所分析的全部情况，SAP2000 程序可以进行这种分析工况的定义。但是由这种分析工况得到的结果是否过于保守，则需要工程师根据工程的实际情况来具体分析。



第13章

线性动力分析

上一章我们已经谈到使用反应谱分析法计算结构地震作用具有很多优点，但这种方法本质上仍然是一种拟动力方法，并不是结构真实的动力响应分析，只是对于结构动力响应最大值进行估算的近似方法。如果仅限于线弹性范围内，反应谱分析法仍然是被认为高效而且合理的方法。

时程分析是结构更加真实的动力分析，而且随着计算机运行速度的提高，最初时程分析在计算时间方面的困难已经被解决。另外，最主要的是结构设计领域的不断发展，结构分析早已经超出了线弹性的范围，面对更多非线性问题，反应谱法动力分析是没有任何意义的，这时就更需要动力时程分析的发展和应用。

SAP2000 为我们提供了线性时程分析和非线性时程分析功能，而且已经可以使用线性时程分析结果直接对结构构件进行设计。本章主要向大家介绍线性时程分析的内容。

13.1 线性时程分析的基本理论

线性时程分析本质上仍然是通过对结构基本动力微分方程（12-2）的求解，来得到结构在动力荷载作用下结构的基本响应大小的方法。与反应谱分析法不同的是，时程分析法是将动力作用以时间函数的形式引入微分方程，并通过相应的积分方式得到结构每一个时刻的响应以及响应的变化情况。因此时程分析的积分方式是此类型分析的关键问题之一。

在 SAP2000 程序中，时程分析可以使用的积分方式为模态积分和直接积分。模态积分方式是以结构的模态分析结果为基础，通过结构不同模态的积分求解来得到结构总的响应值，在程序中如果选择使用模态积分求解方式，需要选择积分求解所基于的模态分析工况，因此在定义该工况前需要先定义相关模态分析工况。一般情况下，如果结构需要考虑高阶振型的影响，就应该在该模态分析工况中考虑更多的振型数目。SAP2000 中所使用的模态积

分方法又被称为 FNA（快速非线性分析方法），我们将在后续章节非线性分析中介绍这一内容，本章主要介绍直接积分方法。

13.1.1 时间积分方式

直接积分法又被称为逐步求解法，它是最常规的动力分析求解方法，其本质是在一系列时间间隔范围内求解平衡方程。在 SAP2000 中时间积分方法的选择是通过其它参数区域时间积分参数的定义来完成的，这里提供了 Newmark 法、Wilson 法、排列法、Hiber-Huges-Taytor 法和 Chung and Hulbert 等方法可供选择，这些方法都是隐式方法，并且大部分都是无条件稳定的方法。正如 Wilson 教授所提出的：“只有单步的、隐式的、无条件稳定的方法才应该用于实际结构的逐步地震分析”。由于本书的篇幅所限，本节只介绍在 SAP2000 中推荐使用的几种直接积分方法。

(1) Newmark 法

Nemark 法是由 Nemark 在 1959 年提出的，在随后的发展过程中，许多其他研究者对这一方法进行了修改和改进。为了说明 Newmark 积分方法，将动力微分方程（11-2）式写成如下的形式：

$$M\ddot{u}_t + C\dot{u}_t + Ku_t = F_t \tag{13-1}$$

直接使用泰勒级数获得下列两个方程：

$$u_t = u_{t-\Delta t} + \Delta t \dot{u}_{t-\Delta t} + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{u}_{t-\Delta t} + \frac{\Delta t^3}{6} \dddot{u}_{t-\Delta t} + \dots \tag{13-2a}$$

$$\dot{u}_t = \dot{u}_{t-\Delta t} + \Delta t \ddot{u}_{t-\Delta t} + \frac{\Delta t^2}{2} \dddot{u}_{t-\Delta t} + \dots \tag{13-2b}$$

Newmark 截短了这些方程并以下列形式来表达这些方程：

$$u_t = u_{t-\Delta t} + \Delta t \dot{u}_{t-\Delta t} + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{u}_{t-\Delta t} + \beta \Delta t^3 \ddot{u} \tag{13-3a}$$

$$\dot{u}_t = \dot{u}_{t-\Delta t} + \Delta t \ddot{u}_{t-\Delta t} + \gamma \Delta t^2 \ddot{u} \tag{13-3b}$$

如果假定加速度在时间步长内是线性的，可得下列方程：

$$\ddot{u} = \frac{(\ddot{u}_t - \ddot{u}_{t-\Delta t})}{\Delta t} \tag{13-4}$$

将方程（13-4）代入式（13-3a）、式（13-3b）中，可产生标准形式的 Newmark 方程：

$$u_t = u_{t-\Delta t} + \Delta t \dot{u}_{t-\Delta t} + (\frac{1}{2} - \beta) \Delta t^2 \ddot{u}_{t-\Delta t} + \beta \Delta t^2 \ddot{u}_t \tag{13-5a}$$

$$\dot{u}_t = \dot{u}_{t-\Delta t} + (1 - \gamma) \Delta t \ddot{u}_{t-\Delta t} + \gamma \Delta t \ddot{u}_t \tag{13-5b}$$

Newmark 为结构系统中每个位移 DOF 的每个时间步长，通过迭代来求解方程（13-5a）、方程（13-5b）和方程（13-1）。通过用 DOF 相关的质量除以从方程（13-1）中获得 \ddot{u}_t 项。

在 SAP2000 现在的版本中所使用的 Newmark 方法并不是上面所述, 而是 1962 年 Wilson 改进的 Newmark 方法。Wilson 将 Newmark 法写成矩阵形式, 并添加了刚度与质量比例阻尼, 同时通过在每个时间步长对方程直接求解消除了对迭代的需要。这要求方程 (13-5a) 和方程 (13-5b) 以下列形式重写:

$$\ddot{u}_t = b_1(u_t - u_{t-\Delta t}) + b_2\dot{u}_{t-\Delta t} + b_3\ddot{u}_{t-\Delta t} \quad (13-6a)$$

$$\ddot{u}_t = b_4(u_t - u_{t-\Delta t}) + b_5\dot{u}_{t-\Delta t} + b_6\ddot{u}_{t-\Delta t} \quad (13-6b)$$

式 (13-6a) 和式 (13-6b) 中常量 b_1, b_6 为: $b_1 = \frac{1}{\beta\Delta t^2}$; $b_2 = \frac{1}{\beta\Delta t}$; $b_3 = \beta - \frac{1}{2}$; $b_4 = \gamma\Delta tb_1$; $b_5 = 1 + \gamma\Delta tb_2$; $b_6 = \Delta t(1 + \gamma b_3 - \gamma)$ 。

将式 (13-6a) 和式 (13-6b) 代入方程 (13-1), 可在时间 t 处按未知节点位移 u_t 的形式写出系统动力平衡方程。即:

$$(b_1M + b_4C + K)u_t = F_t + M(b_1u_{t-\Delta t} - b_2\dot{u}_{t-\Delta t} - b_3\ddot{u}_{t-\Delta t}) + C(b_4u_{t-\Delta t} - b_5\dot{u}_{t-\Delta t} - b_6\ddot{u}_{t-\Delta t}) \quad (13-7)$$

(2) Wilson 法

Newmark 方法本身并不是无条件稳定的, 1973 年 Wilson 在常规的 Newmark 方法的基础上通过引入一个系数 θ 达到了无条件稳定, 这就是现在 SAP2000 程序中所使用的 Wilson 积分方法。系数 θ 的目的是通过修改时间步长, 来消除真实解附近不稳定解的振荡。如果 θ 等于 1.0, 就是 Newmark 方法。Wilson 方法先将系数 θ 引入到时间步长公式:

$$\Delta t' = \theta\Delta t \quad (13-8a)$$

再将 θ 引入以下定义的荷载:

$$R_t' = R_{t-\Delta t} + \theta(R_t - R_{t-\Delta t}) \quad (13-8b)$$

其中 $\theta \geq 1.0$ 。

使用 Newmark 方法在积分时间步长 $\theta\Delta t$ 计算加速度 \ddot{u}_t 向量之后, 节点加速度值、速度值以及位移值就可由下列基本方程计算:

$$\ddot{u}_t = \ddot{u}_{t-\Delta t} + \frac{1}{\theta}(\ddot{u}_t' - \ddot{u}_{t-\Delta t}') \quad (13-9a)$$

$$\dot{u}_t = \dot{u}_{t-\Delta t} + (1 - \gamma)\Delta t\ddot{u}_{t-\Delta t} + \gamma\Delta t\ddot{u}_t \quad (13-9b)$$

$$u_t = u_{t-\Delta t} + \Delta t\dot{u}_{t-\Delta t} + \frac{\Delta t^2(1 - 2\beta)}{2}\ddot{u}_{t-\Delta t} + \beta\Delta t^2\ddot{u}_t \quad (13-10)$$

系数 θ 的使用有助于在系统的高阶振型中去除数值阻尼。然而, 对于高阶振型响应这是个很重要的问题, 引入的误差可能比较大。除此之外, 这一方法并不能在时间 t 处精确满足动力平衡方程。因此, SAP2000 程序并不推荐使用 Wilson 方法。

(3) Hiber-Huges-Taylor (HHT) 法

HHT 法本质上仍然是 Newmark 方法的发展, 这一方法是 Hughes 在 1987 年提出的。HHT 法将 α 系数引入并修改结构动力方程, 如公式 (13-11) 所示, 并对之使用 Newmark 方法进行求解。

$$M\ddot{u}_t + (1 + \alpha)C\dot{u}_t + (1 + \alpha)Ku_t = (1 + \alpha)F_t - \alpha F_{t-\Delta t} + \alpha C\dot{u}_{t-\Delta t} + \alpha Ku_{t-\Delta t} \quad (13-11)$$

式中 α 参数取值为 0~1/3 之间。

对于 $\alpha=0$ ，该方法等同于 $\alpha=0.5$ 和 $\beta=0.25$ 的 Newmark 方法，也等同于平均加速度法，而且当 $\alpha=0$ 可以得到各种方法中最高的精度，但是此时会导致过多的高频振型振动，这里的高频振型具有与时间步长同阶或低阶的周期。

更多的时候可能选择 α 为负值，此时高频振型被阻尼严重地耗散。这不是物理阻尼，因为当使用更小的时间步长时它会减小。在非线性分析中，经常需要使用一个 α 负值来确保结果的收敛性。

在使用 HHT 方法时，为了获得最好的结果，一般使用实际最小的时间步长，然后选择尽可能接近于零的 α 值。尝试使用不同的 α 和时间步长来确保结果不过分依赖于这些参数。

当 α 等于零时，HHT 方法还原为常量加速度方法。它在高阶振型中产生数值能量损耗，但是它不能像用于刚度比例阻尼的阻尼比一样被预测。同时，它也不能在时间 t 处求解基本平衡方程。虽然存在这些不足之处，但是这一方法在计算程序的使用过程中却得到了与使用刚度比例阻尼法的效率很相近的结果。在 SAP2000 程序中，HHT 方法也是程序默认的方法，SAP2000 建议用户使用默认的 HHT 方法，除非用户对其他方法有特定的需要。

13.1.2 阻尼参数设置

当结构遭遇地震作用时，即使结构主体构件保持弹性变形状态，结构次要构件的永久变形也将耗散一定的能量，从理论上讲这部分能量是很难估计的。在结构动力分析中，这部分能量耗散是通过阻尼来定义和实现的。对于数值计算本身，为获得稳定解，多数增量求解法也需加入一定的人工阻尼或者数值阻尼。SAP2000 在时程分析中允许工程师使用几种方法定义结构在数值分析中的阻尼参数，其中涉及了模态阻尼比以及质量和刚度比例阻尼的定义方式，在分析过程中也可以直接考虑连接单元的阻尼属性。现将各类阻尼比定义分述如下：

(1) 模态阻尼比

结构反应谱分析和时程分析都需要考虑结构阻尼的影响。一般情况下，结构阻尼是通过模态阻尼比来进行定义的，也就是前面模态方程 (12-7) 和方程 (12-8) 中的 ξ_n 项，我们定义 ξ_n 为 n 阶振型的阻尼比，它是该阶模态阻尼与其临界阻尼的比值。

一般情况下，在结构反应谱分析和时程分析过程中，混凝土结构的模态阻尼比一般选为 0.05，此时表示振动两个相邻极大值之间的衰减比为 0.73，而且每个周期的应变能耗损为 46.7%。钢结构的模态阻尼比一般选为 0.02，此时表示振动两个相邻极大值之间的衰减比为 0.88，而且每个周期的应变能耗损为 22.7%。因此阻尼比设置的大小对于结构的影响是非常关键的。

振型阻尼比的数值应该是在 0~1 之间。在过去的结构动力分析中，一般情况下各振型所采用的是相同的阻尼比，但是实测数据表明，结构高振型的阻尼比一般大于低振型的阻尼比。使用 SAP2000 程序时，可以为所有振型指定一个统一的阻尼比，也可以为不同振型指定不同的阻尼比，或根据周期和频率值指定对应阻尼比并在默认状态下进行插值，各振型的阻尼比之间是不相关的。

(2) 质量和刚度比例阻尼

另外，在 SAP2000 中还经常用到的另一种阻尼定义——质量和刚度比例阻尼，它也经常用于结构非线性增量分析中。这一阻尼类型也被称为 Rayleigh 阻尼，它是假设阻尼矩阵

与质量矩阵、刚度矩阵成正比。即：

$$C = \eta M + \delta K \quad (13-12)$$

在振型叠加分析中，阻尼矩阵必须具有下列属性才能分解模态方程：

$$2\omega_n \xi_n = \phi_n^T C \phi_n = \eta \phi_n^T M \phi_n + \delta \phi_n^T K \phi_n \quad (13-13a)$$

$$\phi_n^T C \phi_m = 0 \quad \text{当 } n \neq m \text{ 时} \quad (13-13b)$$

由于质量矩阵和刚度矩阵的正交属性，方程 (13-13a) 可重写为：

$$2\omega_n \xi_n = \eta + \delta \omega_n^2 \quad (13-14)$$

式 (13-14) 也可以表达为下式：

$$\xi_n = \frac{1}{2\omega_n} \eta + \frac{\omega_n}{2} \delta \quad (13-15)$$

显然，只在两个频率 i 与 j 下，就可准确指定模态阻尼，在下列方程中求解 η 与 δ ：

$$\begin{bmatrix} \xi_i \\ \xi_j \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \frac{1}{\omega_i} & \omega_i \\ \frac{1}{\omega_j} & \omega_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta \\ \delta \end{bmatrix} \quad (13-16)$$

对于一般情况，阻尼在这两个频率中被设定是相等的，即 $\xi_i = \xi_j = \xi$ ，这时，比例系数可由式 (13-17a) 和式 (13-17b) 计算：

$$\delta = \frac{2\xi}{\omega_i + \omega_j} \quad (13-17a)$$

$$\eta = \omega_i \omega_j \delta \quad (13-17b)$$

从物理意义上讲，质量比例阻尼的假设意味着存在有外部支承的阻尼器，而使用刚度比例阻尼对结构高阶振型具有阻尼增加效应。虽然 Rayleigh 型阻尼没有经过物理论证，而且它的使用对大多数结构来说是难以解释的，但是使用这一阻尼方式可以用较大的时间积分步长获得稳定的数值结果，因此在 SAP2000 程序中仍然被使用。

(3) 其他单元的阻尼考虑

目前，结构中经常使用阻尼器、隔振器等非线性连接单元，这些连接单元与一般的结构构件不同，其目的是主动耗散结构的应变能或削弱能量传输，从力学模型来看，这类连接单元本身具备较大的阻尼值。

当模型中包含这类连接单元时，SAP2000 将在动力分析过程中考虑这些阻尼的影响，并把连接单元属性中指定的线性有效阻尼系数或者非线性阻尼自动转换为振型阻尼，这一过程中将忽略振型间的交叉阻尼。这些振型阻尼值对每个振型一般是不同的，它们取决于每一振型在连接单元中引发的变形。在后面非线性连接单元定义部分，将谈到隔振、阻尼等非线性连接单元，也需要同时定义线性阻尼属性和非线性阻尼属性。在线性动力分析时，转换的是线性有效阻尼；在非线性分析时，转换的是非线性阻尼。

13.2 时程曲线的输入

在 SAP2000 中，当需要使用时程分析法进行结构地震作用计算时，需要先将地震波引

入到程序中,图 13-1 为定义时程函数对话框。地震波可以是实际地震记录波,也可以是人工模拟加速度时程曲线。

13.2.1 地震时程曲线的选取

关于地震波的选取,我国 2002 版新规范有明确的说明:“采用时程分析法时,应按建筑场地类型和设计地震分组选用不少于二组的实际强震记录 and 一组人工模拟的加速度时程曲线。”(《建筑抗震设计规范 (GB 50011—2001)》5.1.2-3),因此对于时程地震波的选取首先要基于建筑结构的场地类别和地震分组,另外需要选择不同的三种波进行计算,对此规范中也有相关说明。

前面我们在讲述反应谱分析中也谈到,时程分析相对于反应谱分析的一项弱点就是反应谱分析涵盖了一个地区地震作用的整体统计影响,而时程分析只能反映一次地震作用的影响,而且即使是相同场地类型和设计地震分组的地震波也可能给结构带来不同的响应结果。规范所采用的是根据小样本容量下的计算结果来估计地震效应值的方法,其理论依据是通过大量的地震加速度记录输入不同结构类型进行时程分析结果的统计分析,若选用不少于二条实际记录和一条人工模拟的加速度时程曲线作为输入,则计算的平均地震效应值不小于大样本容量平均值的保证率在 85% 以上,而且一般也不会偏大很多。

《建筑抗震设计规范 (GB 50011—2001)》中 5.1.2-3 还规定所选取的时程曲线“其平均地震影响系数曲线应与振型分解反应谱法所采用的地震影响系数曲线在统计意义上相符”。对于这一点规范也有所解释,“统计意义上相符”指的是时程曲线平均地震影响系数曲线与振型分解反应谱法所用的地震影响系数曲线相比,在各周期点上相差不大于 20%。计算结果的平均底部剪力一般不会小于振型分解反应谱法计算结果的 80%,每条地震波输入的计算结果不会小于 65%。因此,《建筑抗震设计规范 (GB 50011—2001)》中 5.1.2-3 也作了以下规定:“弹性时程分析时,每条时程曲线计算所得结构底部剪力不应小于振型分解反应谱计算结果的 65%,多条时程曲线计算所得结构底部剪力不应小于振型分解反应谱计算结果的 80%”。在这里需要注意的是在“弹性时程分析时”,因为前面我们提到过反应谱分析仅限于线弹性范围,而使用时程分析除了可以完成线性分析外,还可以进行罕遇地震作用下的弹塑性分析。

在 SAP2000 程序中,联机的技术资料为工程师提供了国际上常用的地震时程曲线和国内按场地类型不同归纳的一部分常用地震时程曲线。对于安装单机版的用户,可以通过访问本机安装目录下 Time History Functions 文件夹来读取这些数据,如果是安装了网络版客户端的用户,可以通过访问网络安装 SAP2000 程序的 Server 下相同的目录来调用这些数据。

SAP2000 所使用的时程曲线都是文本格式的,对于联机带有的地震时程曲线,可以通过文本格式对于曲线数据进行全面读取,也可以进行所需要的修改。工程师可以根据需要使

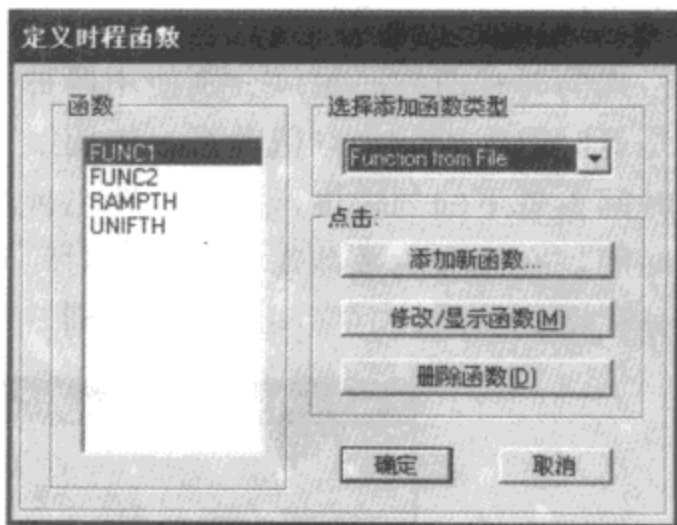


图 13-1 定义时程函数对话框

用文本构建时程曲线数据，也可以使用文本编辑人工模拟加速度曲线。SAP2000 在读取文本格式的时程曲线时可以分别使用两种方式：一种是时间和函数值对应的数据对格式，另一种是等时间间隔的函数值关系。使用第一种时数据格式为两列，左列为时间参量，右列为对应时间参量下的加速度函数值；第二种格式所有数据均为加速度函数值，时间为默认的等间隔时间，在读取函数前需要确定等时间间隔，对于联机带有的地震波该信息已经在前面文本部分注明，并将该时间间隔值输入到 SAP2000 时程曲线定义对话框内，如图 13-2 所示。



图 13-2 时程曲线定义对话框

13.2.2 任意动荷载时程曲线的输入

使用 SAP2000 可以对结构进行地震作用下的动力时程分析，但时程分析的应用范围不仅仅限于此，可以使用时程分析来完成风荷载、工业动力荷载、爆炸荷载等任意形式的动力荷载作用分析。在 SAP2000 的时程工况定义中也可以看到，在荷载类型中不仅可以选择几个方向的加速度荷载，还可以选择任意已经定义的静力荷载工况。

在使用 SAP2000 来模拟任意动力荷载时，必须具有该荷载的时程曲线数据。任意动力荷载也可以通过文本格式进行构建和编辑，其方法与地震时程曲线定义方法是相同的，唯一不同之处在于地震时程曲线中定义的是加速度大小，而在其他类型动力荷载中定义的是荷载值函数随时间的变化曲线。

在使用 SAP2000 来模拟任意动力荷载时需要注意的是，除了加速度作用模拟地震作用以外，其他类型的荷载必须是直接作用在结构对象上的荷载，比如说风荷载作用在结构迎风面上、工业冲击荷载作用在设备连接的结构结点上等，对于爆炸荷载，也是从冲击波作用在

结构构件开始进行分析的，对于爆炸从爆炸源通过空间传播到结构上的这一过程是不进行考虑的，换句话说 SAP2000 并不处理波动传递和场作用问题。

13.3 线性时程分析工况的定义

定义完成时程函数曲线之后，需要定义时程分析工况。当选择【定义】>【分析工况】命令后将弹出分析工况定义对话框，然后选择【添加新工况】并在分析工况类型下拉菜单中选择 Time History，也就是时程分析工况类型，便可以弹出分析工况数据对话框，如图 13-3 所示。时程分析工况全部定义都可以在这里完成。

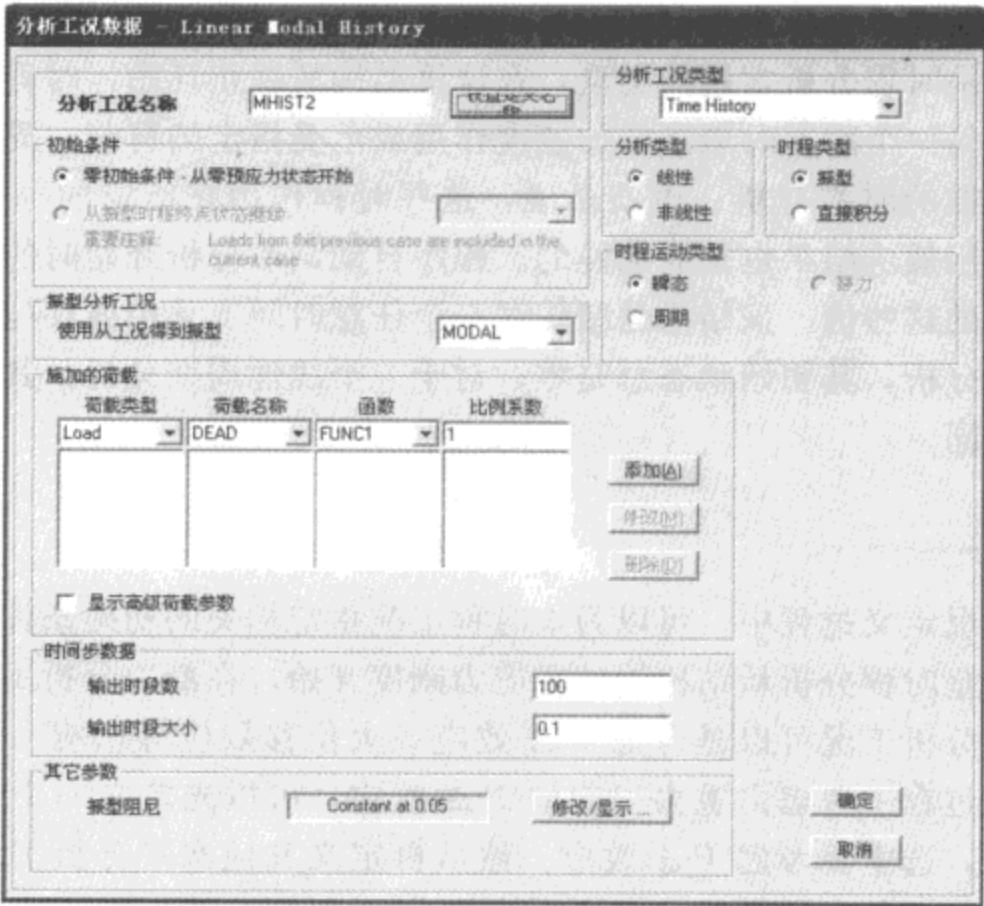


图 13-3 分析工况数据对话框

如果需要定义的是线性时程分析，首先需要在分析类型选项中选择线性分析类型，反之选择非线性分析类型，关于非线性时程分析的相关概念和定义过程我们将在后续章节进行介绍。

13.3.1 时程类型

分析类型定义区域的右边是时程类型的定义，也就是我们前面所谈到的时程积分类型的选择，包含振型（模态）积分方法和直接积分方法两种，当选择【直接积分】选项时，在对话框下面的其它参数定义区域将自动弹出时间积分方式的选择，点击【修改/显示】按钮可以修改积分类型，其中所包含的选项就是我们前面所谈到的几种常用的积分方式，选择的积分方式将直接在其它参数区域中显示出来，默认选项是 HHT 积分方法，它也将在该区域显示。对于各种积分方式的基本理论前面已经进行了简述，需要再次指出的是，



SAP2000 程序默认积分方法是 HHT 法，HHT 方法一般情况下会得到比较理想的结果，因此程序推荐用户使用默认的方法进行时程分析直接积分，除非用户对其他方法有特定的需要。

13.3.2 时程运动类型

在线性时程分析工况下，当我们选择使用振型（模态）积分类型时，该选项下面的时程运动类型将被激活，当选择直接积分时或选择非线性振型积分类型时，时程运动类型将一直选择为瞬态并且是不可以修改。时程运动类型是用来定义该时程工况运动类型的选项，此处有三个选项：瞬态、周期和静力，目前静力选项是不可用的。当时程类型定义为振型积分时，我们选择的运动类型可以为瞬态和周期两种。

瞬态运动类型是时程分析常用的类型，在这里结构从静止开始，时程分析定义的目的是为结构运动过程中每一个瞬态时刻指定加速度作用或承受指定的荷载。周期运动类型是用于指定的荷载为周期性的时程分析；也就是说，这些时程作用在给定的分析长度内无限次重复，同时，时程作用效应结果也是周期性的。程序自动调节分析开始时的位移和速度，以使之等于分析结束时的这些值。该结果是结构对一个任意时间变化中循环施加的荷载的稳态反应。对于线性瞬态分析，其初始状态总是零；对于一个线性周期分析，其初始状态设置与分析结束时的状态相同。

13.3.3 初始条件

在时程分析工况定义过程中，可以为本时程工况指定相关的初始条件。默认情况下，初始条件为零，也就是时程分析从结构构件零应力刚度开始。在静力分析工况中也存在初始条件指定功能，这些分析工况可以是考虑 $P-\Delta$ 效应或大位移效应等影响。例如，如果我们需要在水平作用分析过程中考虑由重力引起的 $P-\Delta$ 效应，可以先定义一个施加重力作用的非线性静力分析工况，选中要考虑 $P-\Delta$ 效应。然后再定义其他水平分析工况，并选择使用已经定义的非线性工况作为初始条件（或使用的刚度），这些水平分析工况就能够考虑重力 $P-\Delta$ 效应的影响。

在时程分析中，模态积分的线性时程分析工况是不能够指定初始条件的，原因是该分析使用源于模态分析工况的振型信息作为初始条件。模态积分的非线性时程分析工况和直接积分的线性和非线性时程分析工况都可以根据需要选择相应的初始条件。并不是所有的分析工况都可以作为初始条件指定给以上分析工况，对于不同类型的分析工况是不同的，这也是分析连续性的基本要求。只有已经定义模态积分的非线性时程分析工况才能够作为模态积分的非线性时程分析工况的初始条件，这一对应选择关系是唯一的。对于直接积分的线性和非线性工况，可以作为初始条件的分析工况有：非线性静力工况、非线性施工顺序工况和非线性直接积分时程分析工况。

需要注意的是，初始工况对于所定义工况的影响范围和深度是不同的，换句话说基于本工况的性质，它对于初始条件分析工况所承接的结果内容是不同的，这主要取决于本分析工况是线性分析工况还是非线性分析工况。如果本工况是线性分析工况，那么它所获得初始条件分析工况信息仅仅是刚度信息，也就是说初始工况中荷载作用下的结构效应不会被带到该

工况，初始工况结构构件的内力、应力及变形效应也不会对该工况有任何影响；如果本分析工况为非线性分析工况，那么它从初始条件分析工况所获得的信息是全面的，包括刚度信息、全部结构效应信息（内力、应力及变形等）以及先前加载历史导致的材料非线性效应信息等。

对于复杂的土木结构，我们希望在一个单独的分析工况中去解决一个方面的全部问题，但这往往是不能够实现的，特别是对于施工和使用过程中需要经过一系列复杂过程的结构，或者结构本身需要考虑比较多的影响因素，这些因素存在共同作用且从理论上又不能够进行简单叠加，这时候就需要根据程序所提供的初始条件的指定功能来实现以上的分析，有时候可能需要指定几层初始条件来完成一个连续的分析过程。

在动力时程分析过程中，一般情况下建议使用非线性直接积分类型工况去完成连续的时程分析，这也就是我们所说的完整非线性分析，原因就是对于线性时程工况指定初始分析工况时，该工况会考虑前面工况非线性刚度影响，但不会考虑后续附加的非线性影响。例如，在线性分析工况中不考虑施加荷载引起的附加 $P-\Delta$ 效应。类似地，如果非线性工况已引起移动的单拉支撑进入受压状态，如果取消它们的刚度，则线性荷载将不能使它们重新回到受拉状态。因此在确认与非线性刚度情况相比，非线性效应很小时，可以使用线性直接积分时程分析工况，否则，一般建议进行完整的非线性分析。

13.3.4 荷载作用施加

线性时程工况定义的主体部分是在施加的荷载处进行定义的，在这一区域可以定义施加荷载的类型，分为一般荷载类型和加速度荷载类型。当选择加速度荷载类型时，在后面荷载名称位置可以选择三个方向的加速度和绕三个轴的角加速度；当选择为一般荷载类型时，在后面荷载名称位置可以选择已经在静力荷载工况中定义的任意荷载工况名称。当完成荷载类型和荷载名称的定义后，需要在函数下拉菜单选择已经定义好的函数名称（也就是前面所提到的时程曲线），以及比例系数项，此处比例系数的意义是将时程曲线中所有函数值乘以一个放大系数或折减系数，来控制时程函数整个时间范围的函数值大小。比如《建筑抗震设计规范（GB 50011—2001）》表 5.1.2-2 给出了结构时程分析所用到的地震加速度时程曲线的最大值，这一最大值的获得就是通过时程曲线中峰值与比例系数的乘积来实现的，并且整个时间范围内函数值都会按比例进行所需的调整。

上面是对于时程工况荷载定义的基本选项，如果需要对其进行更进一步的定义，可以勾选本区域左下角的【显示高级荷载参数】选项，将弹出荷载定义的其他选项，见图 13-4 包括到达时间、采用坐标系和输入角度。到达时间定义了某一荷载作用波到达结构的时间，比如我们都知道地震作用包含了横波和纵波成分，纵波的传播速度要比横波快，因此结构在同一次地震作用下，横波要晚于纵波到达结构，这时就可以通过到达时间的定义来实现。到达时间一般用于加速度荷载，但是也可以用于其他荷载形式。坐标系和输入角度的定义只针对于加速度荷载，一般情况下地震加速度作用默认加载是参考全局坐标轴来完成的，在此处坐标系选项中，我们可以选择其他用户自定义坐标系统来施加地震加速度，并且可以在输入角度项中输入加速度与坐标轴的夹角，来模拟更为一般的地震作用。

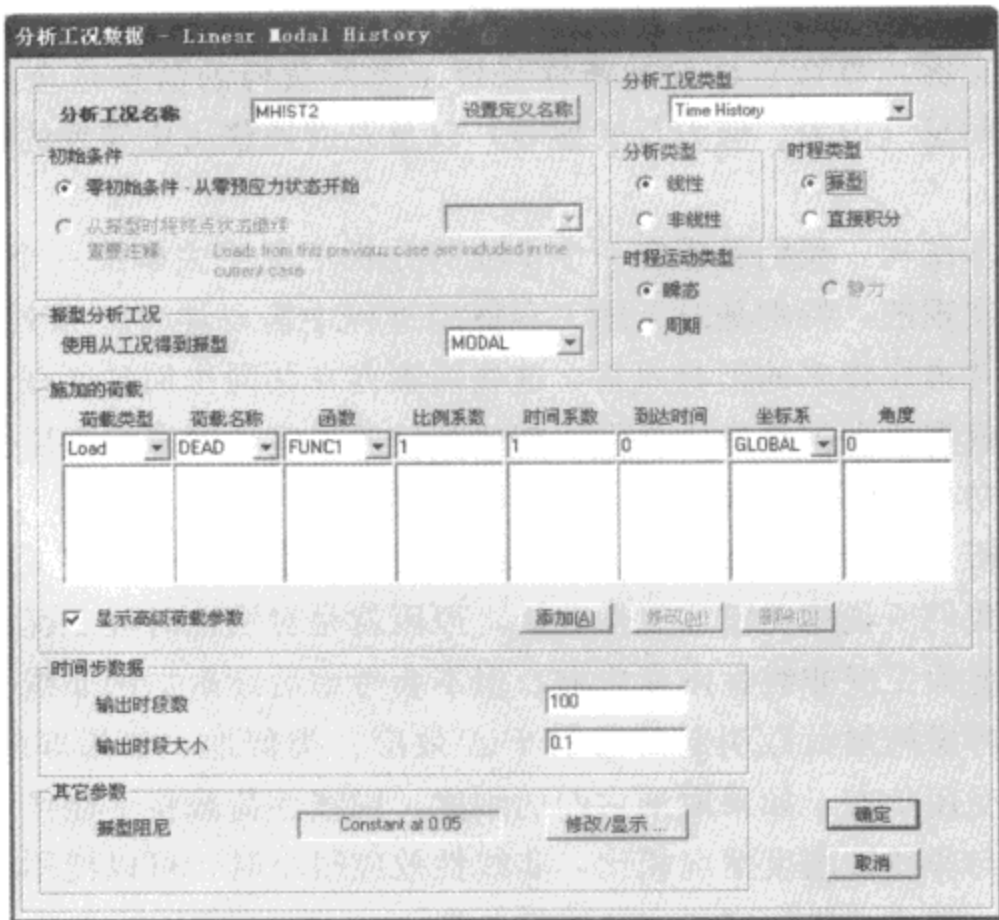


图 13-4 时程工况高级荷载参数定义

13.3.5 时间步数据

分析工况数据对话框中时间步数据区域主要是定义输出步参量的选项。虽然程序会计算每个时间步的时程函数荷载作用结构的效应，但不默认将所有结果都进行输出。最终分析输出的总时间是这里所定义的输出时间步数与输出时间步长的乘积。输出时间步长要不小于时程曲线输入的步长，否则输出时间步长将没有什么意义，一般建议取输出时间步长为其整数倍。输出时间是从零时刻零步数开始算起的，当定义的输出总时间小于总的时程作用时间时，程序将仅输出这一部分输出时间。

13.3.6 阻尼参数

时程工况定义中另一个主要的部分是阻尼的定义，关于动力分析中阻尼设置的相关理论在前面已经进行了简述，这里只讲述程序中进行线性时程分析阻尼参数的定义方式。对于时程分析采用的积分方式不同，阻尼的定义也不同，这里我们将分别进行阐述。

(1) 振型（模态）积分阻尼设置

当选择的是振型积分类型时，对话框中其它参数区域将显示振型阻尼选项，并显示振型阻尼定义的默认方式，点击【修改/显示】按钮将弹出振型阻尼定义对话框（见图 13-5）。

此处振型阻尼类型定义有三种方式：

- 1) 【所有振型常数阻尼】选项（见图 13-5）

如名称所表述的那样，使用此项是将所有振型的阻尼定义为常数。当选中该选项时，对

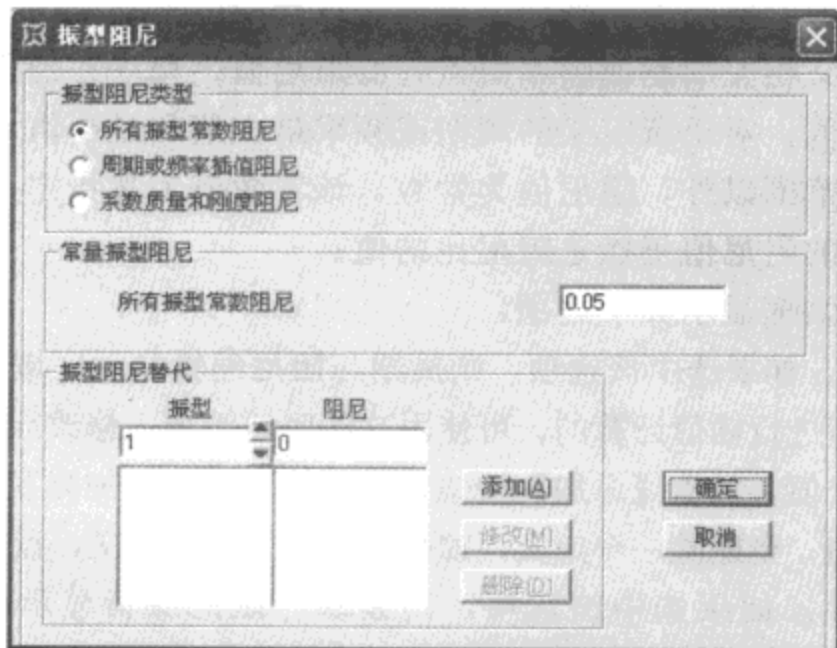


图 13-5 模态阻尼定义对话框（常量阻尼参数定义）

对话框显示一个所有模态常数阻尼的编辑框。例如，要施加 5% 的阻尼，在该编辑框中输入 0.05 即可。该对话框同时显示一个模态阻尼覆盖项区域，这一项的意义在于当对所有模态定义相同的常数阻尼后，可以选择若干模态定义阻尼覆盖项，对于定义覆盖项的模态，程序将使用覆盖项的阻尼值取代统一定义的阻尼常数值。可以使用【添加】、【修改】或【删除】命令对阻尼覆盖项进行相关的编辑。另外需要注意的是此项输入的阻尼值仍然是阻尼比的值。

2) 【周期或频率插值阻尼】选项（见图 13-6）

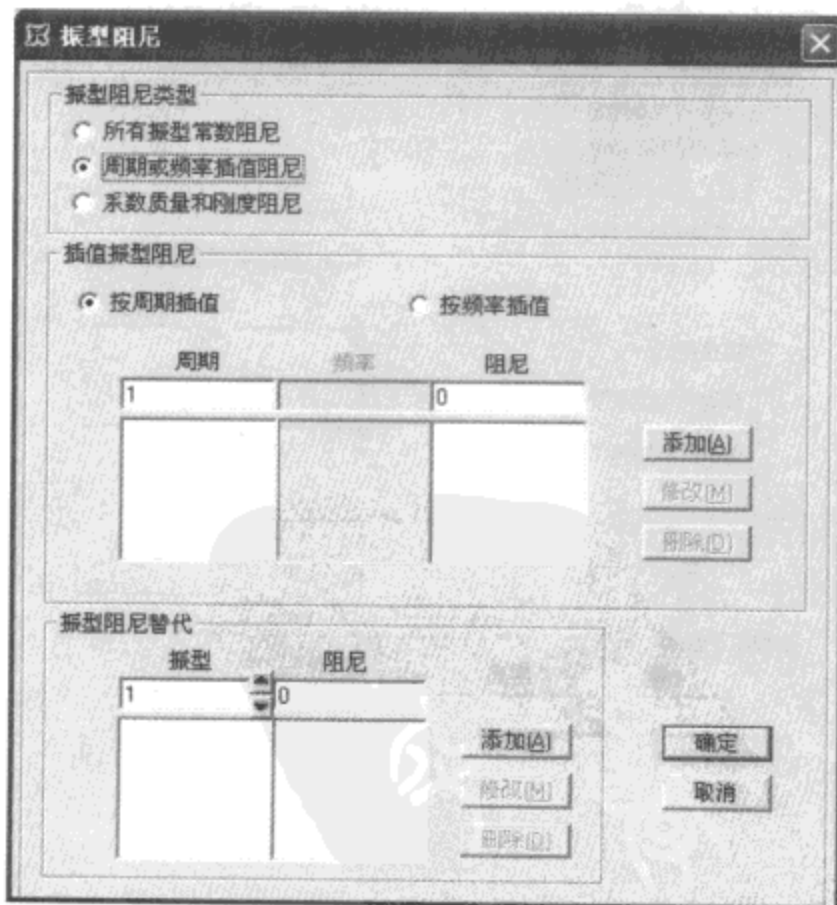


图 13-6 模态阻尼定义对话框（周期或频率差值阻尼参数定义）

此项是通过定义频率或周期点系列的阻尼值，进行插值来确定结构的振型阻尼。使用此项进行定义时，需要定义相关周期或频率值点处的阻尼值。程序在确定振型阻尼时，对于指定点处，阻尼值取定义值；对于所定义的周期或频率最大值和最小值之间的振型通过线性插值确定阻尼值；在指定范围以外，阻尼值为常数，该常数值为离指定点最近点处的值。另外需要注意的是此项输入的阻尼值仍然是阻尼比的值。

选中该选项时，对话框显示如下选项：

【按周期插值】选项。如果选中该选项，则周期与阻尼编辑显示区域将变为可操作的，此时阻尼的定义是根据周期值进行插值计算的。可使用这些区域添加、修改或删除各周期的阻尼。要添加一个定义，输入一个值，点击**【添加】**按钮；要修改一个值，加亮显示要修改的定义，进行修改，点击**【修改】**按钮；要删除一个定义，加亮显示要删除的定义，点击**【删除】**按钮。

【按频率插值】选项。如果选中该选项，则频率与阻尼编辑显示区域将变为可操作的，此时阻尼的定义是根据频率值进行插值计算的。同样可以使用这些区域**【添加】**、**【修改】**或**【删除】**等命令对定义进行编辑。

该对话框也将显示一个振型阻尼覆盖项区域，可以选择若干振型定义阻尼覆盖项，对于定义覆盖项的振型，程序将使用覆盖项的阻尼值取代前面定义或插值计算的阻尼值。可以使用**【添加】**、**【修改】**或**【删除】**命令对阻尼覆盖项进行相关的编辑。

在使用周期插值或频率插值方法定义振型阻尼的过程中，可以随时切换定义插值定义的方式，当从一种方式转换到另一种方式时，已经定义的阻尼值将随着周期与频率的相互转换而保留下来，并按照由小到大的顺序进行列表。

3) **【系数质量和刚度阻尼】**选项（见图 13-7）

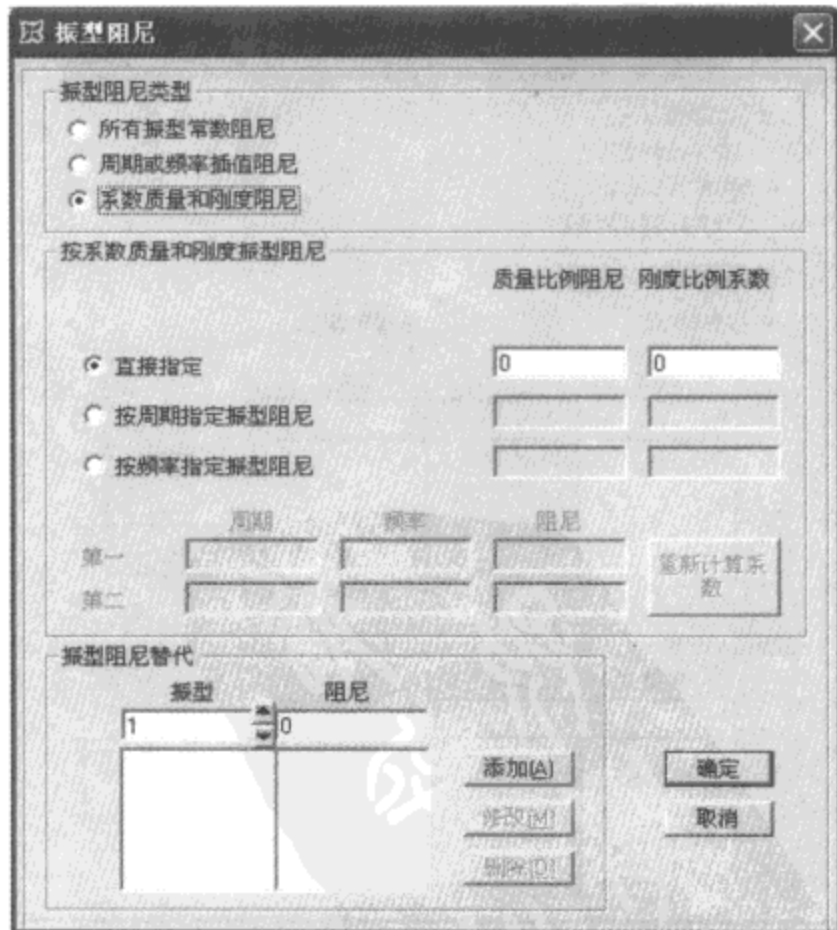


图 13-7 振型阻尼定义对话框（质量和刚度振型阻尼参数定义）

这一项是采用由刚度矩阵乘以指定的系数和质量矩阵乘以指定的另一个系数的组合计算得到阻尼矩阵的方式。这两个系数可以直接指定，也可以通过在两个不同周期或频率处指定阻尼值等量比例来计算，这里定义的阻尼值仍然是阻尼比的值。从数量关系上看，刚度比例化阻尼与频率成线性正比，而质量比例化阻尼与周期成线性正比。

选中该选项时，对话框显示如下选项：

【直接指定】选项。当选中该选项时，直接输入质量比例化系数和刚度比例化系数。所定义的比例系数的意义可以查看前面关于质量和刚度比例阻尼的理论简述。

【按周期指定振型阻尼】选项。当选中该选项时，在第一、第二周期和相关的阻尼编辑框中输入数值。在这些编辑框中输入数值后，SAP2000 将计算并在相应的显示栏中显示质量比例化系数和刚度比例化系数，这一参数的转换关系可以查看本章中式 (13-51)。如果在阻尼编辑框中输入数值，质量比例化系数和刚度比例化系数没有发生变化，那么可以点击**【重新计算系数】**按钮进行计算。

【按频率指定振型阻尼】选项。当选中该选项时，在频率和阻尼编辑框中输入数值。在这些编辑框中输入数值后，SAP2000 将计算并在相应的显示栏中显示质量比例化系数和刚度比例化系数，这一参数的转换关系可以查看本章中式 (13-51)。如果在阻尼编辑框中输入数值时，质量比例化系数和刚度比例化系数没有发生变化，那么可以点击**【重新计算系数】**按钮进行计算。

该对话框也将显示一个振型阻尼覆盖项区域，可以选择若干振型定义阻尼覆盖项，对于定义覆盖项的振型，程序将使用覆盖项的阻尼值取代前面使用质量和刚度比例系数定义的阻尼值。可以使用**【添加】**、**【修改】**或**【删除】**命令对阻尼覆盖项进行相关的编辑。

另外需要注意的是与第二项周期或频率插值阻尼定义不同，使用周期和频率计算指定阻尼时，第一、二周期阻尼值的定义是完全独立的。质量和刚度阻尼比例系数取决于使用哪种方式及其参数的设置。

(2) 直接积分阻尼设置 (图 13-8)

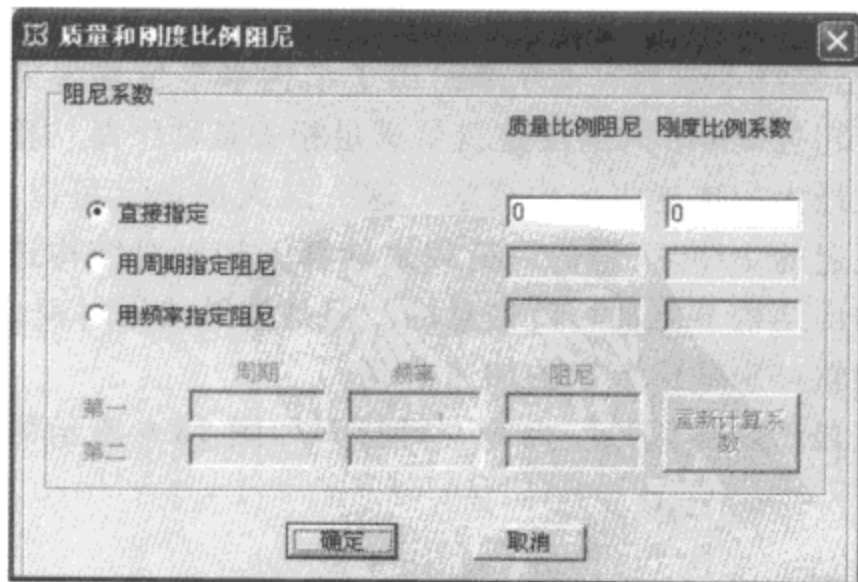


图 13-8 直接积分阻尼定义对话框

当选择的是直接积分类型时，对话框中其它参数区域将显示阻尼选项，并显示振型阻尼定义的默认方式，点击【修改/显示】按钮将弹出振型阻尼定义对话框：

因为直接积分方式并不是基于模态分析，也不会进行模态分析，因此它的阻尼设置方式中不包含振型（模态）阻尼的定义方式，其阻尼的设置方式是按照质量和刚度比例阻尼直接定义的。此处质量和刚度比例阻尼的定义方式及参数意义与振型积分阻尼设置的第三种方法——质量和刚度比例阻尼系数选项设置基本相同，唯一的不同之处是这里不包含振型阻尼覆盖项的设置，原因仍然是直接积分不会进行模态分析，因此不需要也不能够进行该项的设置。

13.4 线性时程分析结果的读取与输出

当一个线性时程分析工况被定义并运行之后，可以选择对该分析结果进行输出，时程分析的变形结果和内力、应力结果可以使用图形和文本的形式进行输出。针对时程分析工况，可以输出时程轨迹和节点反应谱曲线。

当使用图形和文本输出时程分析的结果时，其方法与结构其他分析工况的结果输出基本相同，这在本书前面的章节已有过全面的介绍，因此在本节就不再赘述了。唯一不同的一点需要注意，当选择时程工况进行输出时，因为时程分析本质上是一系列连续时间点的全面分析，因此输出变形和内力结果时，需要我们确定是输出每个时间步（一步一步）的结果，还是包络的结果。当选择包络的结果时，程序会输出在所有时间点位置结构效应的包络值；当选择输出一步一步的结果时，程序将输出时程分析的每一步结果，这时可以在显示结果设置对话框中选择要输出的时间点的值。如果是图形输出，对话框下边将显示向左向右的箭头，可以通过选择向左向右箭头来连续显示时程分析其他时刻的效应结果。

针对时程分析结果的特性，程序给出了时程轨迹和节点反应谱曲线的输出，本节我们将主要介绍这一部分时程结果的输出方式和使用。

13.4.1 时程轨迹的显示

《高层建筑混凝土结构技术规程》4.6 节给出了结构水平位移限值和舒适度的要求，其中 4.6.6 条规定，高度超过 150m 的高层建筑要满足相关条件下结构舒适度要求的限值，也就是表 4.6.6 结构顶点最大加速度限值的要求。这一最大加速度可以通过风洞试验来确定，也可以通过荷载规范规定的 10 年一遇的风荷载来计算。如果对结构进行常规的规范等效风荷载计算，是不能够输出结构节点加速度信息的。但是如果使用时程分析进行风荷载的动力分析，就可以通过时程轨迹来输出节点的加速荷载。

点击【显示】>【显示绘图函数】命令，可打开如图 13-9 所示的对话框。对话框说明见表 13-1～表 13-7。

时 程 工 况

表 13-1

| | |
|------------|--------------------|
| 分析工况（多步工况） | 选择一个要显示其结果的时程工况的名称 |
|------------|--------------------|

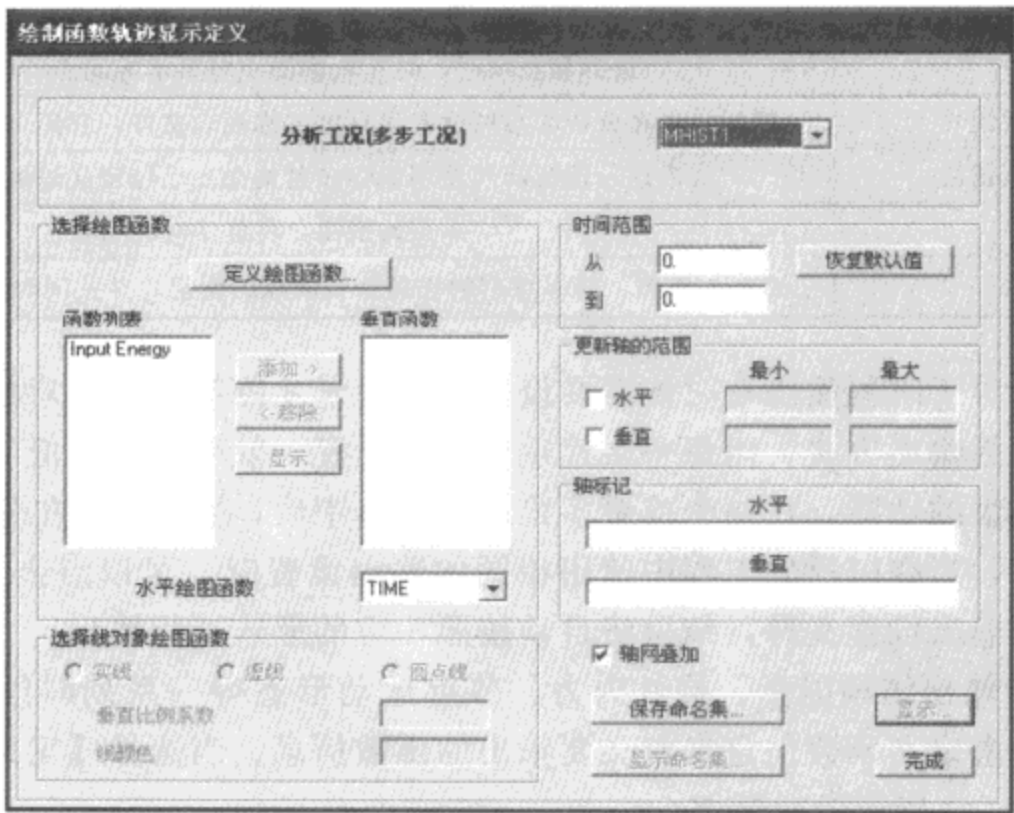


图 13-9 时程显示定义对话框

选 择 绘 图 函 数

表 13-2

| | |
|------------|---------------------------|
| 定义绘图函数（按钮） | 显示绘图函数对话框 |
| 函数列表 | 已定义的函数。Input Energy 指输入能量 |
| 垂直函数 | 要显示其轨迹的函数 |
| 水平绘图函数 | 水平坐标轴的函数 |

时 间 范 围

表 13-3

| | |
|-----------|--|
| 从...到... | 输入数值，定义一个显示结果的时间段。如果只想绘制一部分时程轨迹时，该命令比较有用 |
| 恢复默认值（按钮） | 用于将时间范围恢复为默认值 |

更 新 轴 的 范 围

表 13-4

| | |
|----|------------------------------|
| 水平 | 用于改变默认的水平坐标轴的范围。可控制时程轨迹的出图范围 |
| 垂直 | 用于改变默认的竖直坐标轴的范围。可控制时程轨迹的出图范围 |

轴 标 记

表 13-5

| | |
|----|-------------|
| 水平 | 定义时程轨迹水平轴名称 |
| 垂直 | 定义时程轨迹竖直轴名称 |

选择线对象绘图函数

表 13-6

| | |
|-----------|----------------|
| 实线、虚线、圆点线 | 定义所绘制的时程轨迹曲线线型 |
| 垂直比例系数 | 定义所绘制的数值调整系数 |
| 线颜色 | 定义所绘制的时程轨迹曲线颜色 |

| | |
|-----------|-----------------------------------|
| 轴网叠加 | 选择该选项时，时程轨迹图中将显示等间距的轴网网格 |
| 保存命名集（按钮） | 把用户现在分析输出的设置保存为名称列表文件，它们可以在以后进行访问 |
| 显示命名集（按钮） | 点击这一按钮访问使用保存命名集命令已经定义过的输出设置文件 |
| 显示（按钮） | 点击此按钮，将显示时程轨迹 |
| 完成（按钮） | 点击此按钮，将保存对时程显示对话框的设定，并关闭时程显示定义对话框 |

需要说明的是对于时程输出有时候需要设置许多参量才能够获得满意的输出效果，如果经常使用同样的数据输出方式，而每一次都重复这些设置，效率是比较低的，因此程序提供可以使用保存命令集的功能，在一个或更多检查框被选中后，把用户现在分析输出的设置保存为名称列表文件，当在以后的工程中使用相同的输出设置时，可以点击显示命令集选项，访问已经定义过的输出设置文件，结果将自动按照相应的形式进行输出。

SAP2000 可以输出结构能量、构件内力、节点运动形态等一系列时间函数信息。可以通过选中构件后点击定义函数信息来定义要输出的函数信息。当选择【定义绘图函数】选项后，将弹出如图 13-10 所示的对话框。

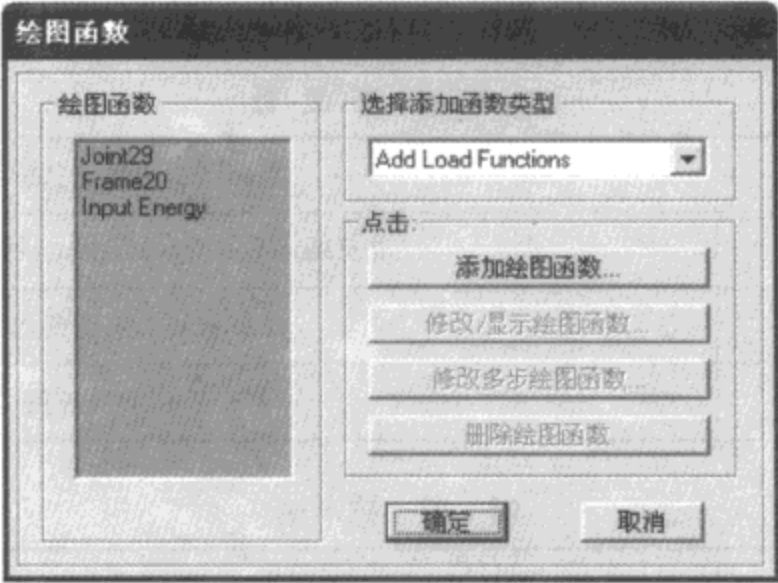


图 13-10 绘图函数对话框

点击该对话框的 **Add Input Functions** 下拉列表，可选择该列表中的某一类型的函数。表 13-8 列出了各类型函数的含义。

各类函数的含义

表 13-8

| | |
|------------------------|--------------------|
| Add Load Functions | 添加输入函数。将添加一个输入时程函数 |
| Add Energy Functions | 添加能量函数 |
| Add Base Functions | 添加基底反力函数 |
| Add Joint Disps/Forces | 添加节点位移/力函数 |
| Add Frame Forces | 添加框架对象内力函数 |

在函数区域选择一个节点编号后，在下拉菜单中选择 **Add Joint Disps/Forces** 并点击【修改/显示时程函数】按钮，弹出如图 13-11 所示的时程点函数对话框。对话框说明见表 13-9。

时程点函数对话框

表 13-9

| 绘图函数名称 | 定义函数的名称 |
|----------|---|
| Joint ID | 显示该点的编号, 也可以填入新的节点编号 |
| 向量类型 | 从列出的向量类型中选择一个 |
| 振型数 | 选择是包括全部振型还是只考虑一个振型 |
| 分量 | 从列出的六个向量分量中选择一个。UX、UY、UZ 表示三个整体坐标上的平动, RX、RY、RZ 表示绕三个整体坐标轴的旋转 |

在函数区域选择一个框架编号后, 在下拉菜单中选择 **Add Frame Forces** 并点击【修改/显示时程函数】按钮, 弹出如图 13-12 所示的时程框架函数对话框。对话框说明见表 13-10。

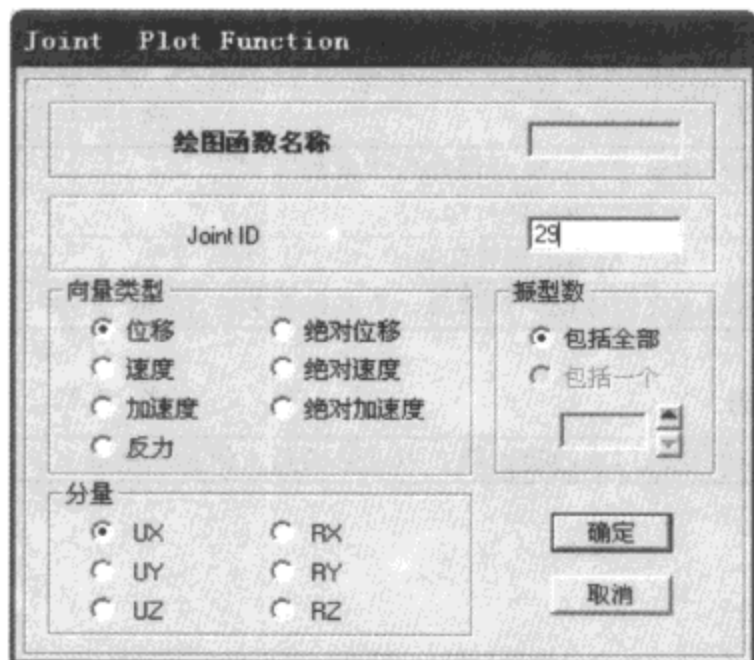


图 13-11 时程点函数对话框

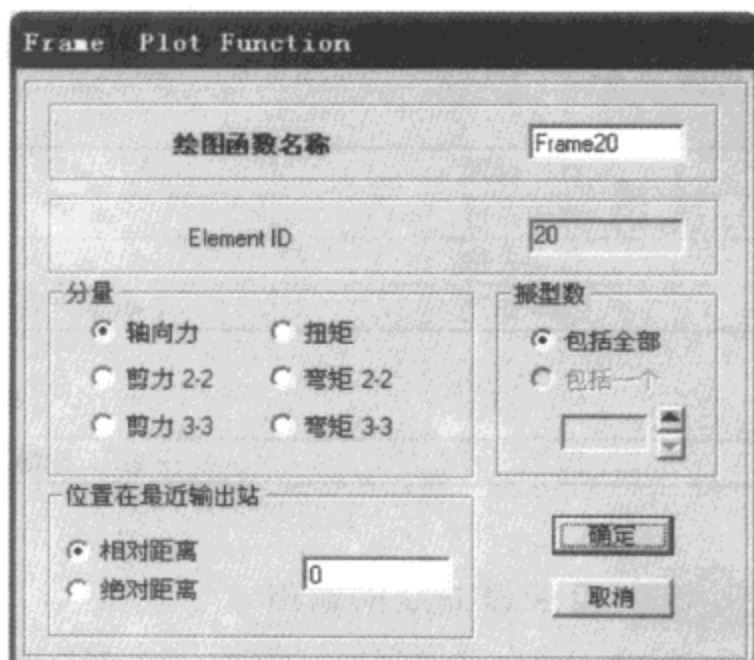


图 13-12 时程框架函数对话框

时程框架函数对话框

表 13-10

| 绘图函数名称 | 定义函数的名称 |
|------------|-----------------------------|
| Element ID | 显示该框架的编号, 也可以填入新的框架编号 |
| 分量 | 从列出的分量中选择一个 |
| 振型数 | 选择是包括全部振型还是只考虑一个振型 |
| 位置在最近输出站 | 使用相对距离或绝对距离定义输出位置相对于最近输出站距离 |

为了结果输出对比的方便, SAP2000 允许在一个图形中输出不同节点或框架某一效应的结果, 并且为了在图形中能够清晰地区分, 在对话框中定义每一条曲线的颜色。此时可以先点击选中垂直函数区域栏中的某个轨迹函数名称, 然后在该区域为其选择某种显示线型或显示颜色。当然, 对于黑白打印机而言, 仅仅在颜色上区分结果曲线是不能够实现的, 因此考虑到这一点, 程序中可以在选择线对象绘图函数位置定义选择结果输出的曲线类型。显示绘图函数轨迹对话框见图 13-13, 对话框说明见表 13-11、表 13-12。

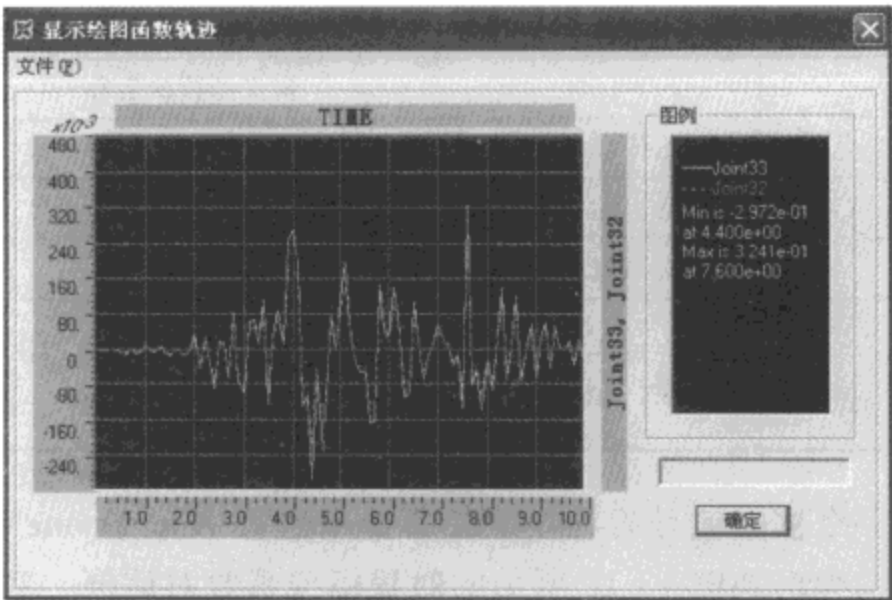


图 13-13 显示绘图函数轨迹对话框

文 件 表 13-11

| | |
|------|---------------------------------|
| 打印设置 | 打开打印设置对话框并设置打印参数 |
| 打印图形 | 将图形输出到打印机 |
| 打印表格 | 将表格输出到打印机 |
| 获取图片 | 获取整个表格、无标题的表格或仅图形部分，将其保存为一个图形文件 |

图 例 表 13-12

| | |
|-----|--------------------------------|
| 图 例 | 列出了各颜色的线型对应的时程轨迹曲线，以及总的最大值和最小值 |
|-----|--------------------------------|

13.4.2 反应谱曲线的输出

SAP2000 对模型中各点反应谱曲线的输出。使用【显示】>【显示反应谱曲线】命令，可打开反应谱生成对话框，如图 13-14～图 13-18 所示，对话框说明见表 13-13～表 13-24。通过该对话框，可设置要显示的反应谱参数并显示反应谱。该对话框共分为 5 个页面，下面分别对各页面进行解释。

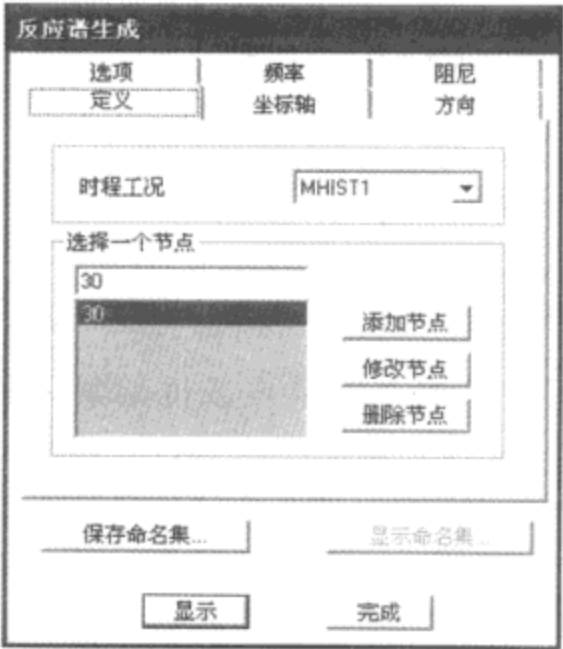


图 13-14 反应谱生成对话框-定义页面

时 程 工 况 表 13-13

| | |
|---------|-------------------|
| 时 程 工 况 | 选择要显示其分析结果的时程分析工况 |
|---------|-------------------|

选 择 一 个 点 表 13-14

| | |
|-------|-------------------------|
| 选择一个点 | 选择节点。1STORY1 表示第一层的节点 1 |
|-------|-------------------------|

向 量 方 向 表 13-15

| | |
|------|--------------|
| X 方向 | 输出 X 方向的分析结果 |
| Y 方向 | 输出 Y 方向的分析结果 |
| Z 方向 | 输出 Z 方向的分析结果 |

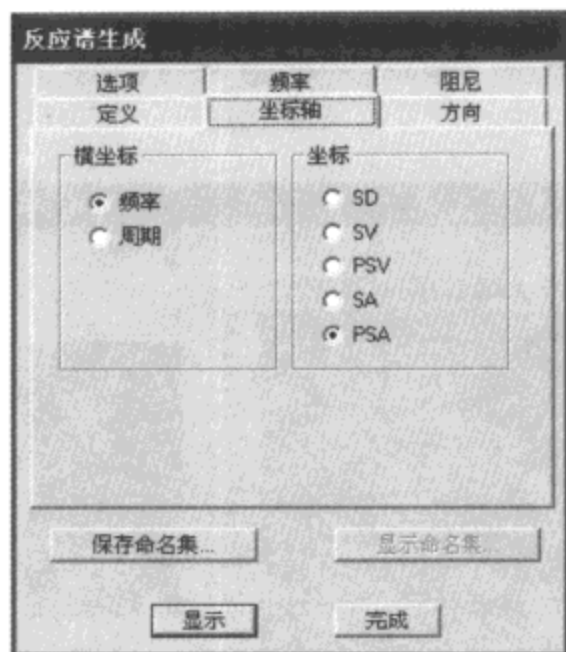


图 13-15 反应谱生成对话框-坐标轴页面

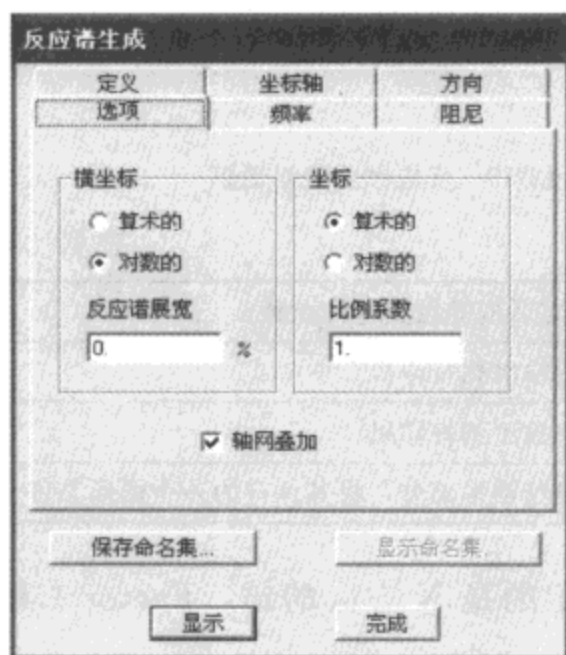


图 13-16 反应谱生成对话框-选项页面

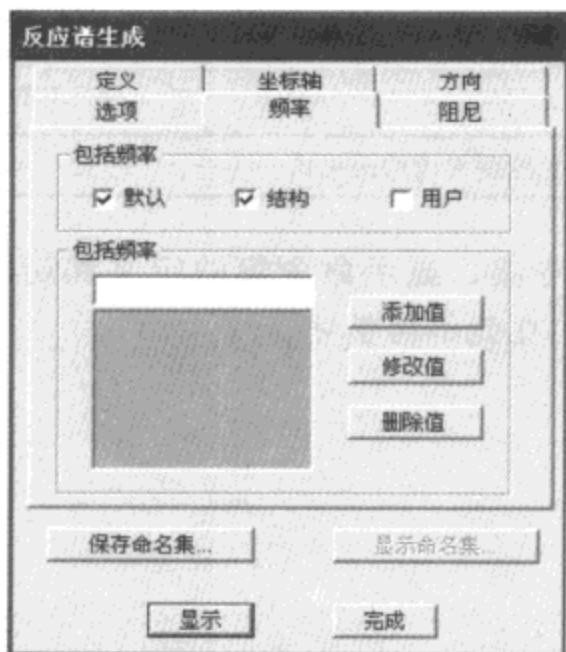


图 13-17 反应谱生成对话框-频率/周期页面

横 坐 标 表 13-16

| | |
|-------|-------------------------|
| 频率/周期 | 反应谱的水平坐标轴，既可以是频率，也可以是周期 |
|-------|-------------------------|

坐 标 表 13-17

| | |
|-----|-------------------|
| SD | 反应谱的垂直坐标轴。SD 为位移谱 |
| SV | 速度谱 |
| PSV | 拟速度谱 |
| SA | 加速度谱 |
| PSA | 拟加速度谱 |

横 坐 标 表 13-18

| | |
|-------|-----------------|
| 算术的 | 以算术方法表示反应谱的水平坐标 |
| 对数的 | 以对数坐标表示反应谱的水平坐标 |
| 反应谱展宽 | 以百分比表示的反应谱峰值宽度 |

坐 标 表 13-19

| | |
|------|-----------------|
| 算术的 | 以算术方法表示反应谱的垂直坐标 |
| 对数的 | 以对数方法表示反应谱的垂直坐标 |
| 比例系数 | 对输出结果的调整系数 |

轴 网 叠 加 表 13-20

| | |
|------|--------------------------------------|
| 轴网叠加 | 选择该选项时，时程轨迹图中将显示等间距的轴网网格；如不选择此项，则不显示 |
|------|--------------------------------------|

包括频率/周期 表 13-21

| | |
|-----|------------------------|
| 默 认 | 默认频率或周期，视坐标轴页面中所作的选择而定 |
| 结 构 | 由 SAP2000 根据结构模型计算得到 |
| 用 户 | 由用户指定。在下面包括频率/周期中输入 |

阻 尼 值 表 13-22

| | |
|-----|---------------------------------------|
| 阻尼值 | 可指定多达 6 个的阻尼值，SAP2000 为每个阻尼值生成一条反应谱曲线 |
|-----|---------------------------------------|

对上述输出参数进行设置之后，点击该对话框下面的【显示】按钮，弹出如图 13-19 所示的反应谱曲线对话框。

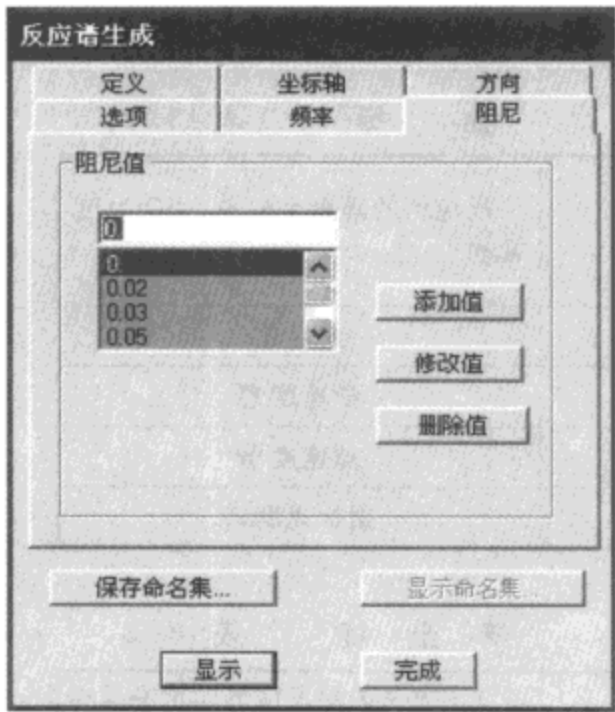


图 13-18 反应谱生成对话框-阻尼页面

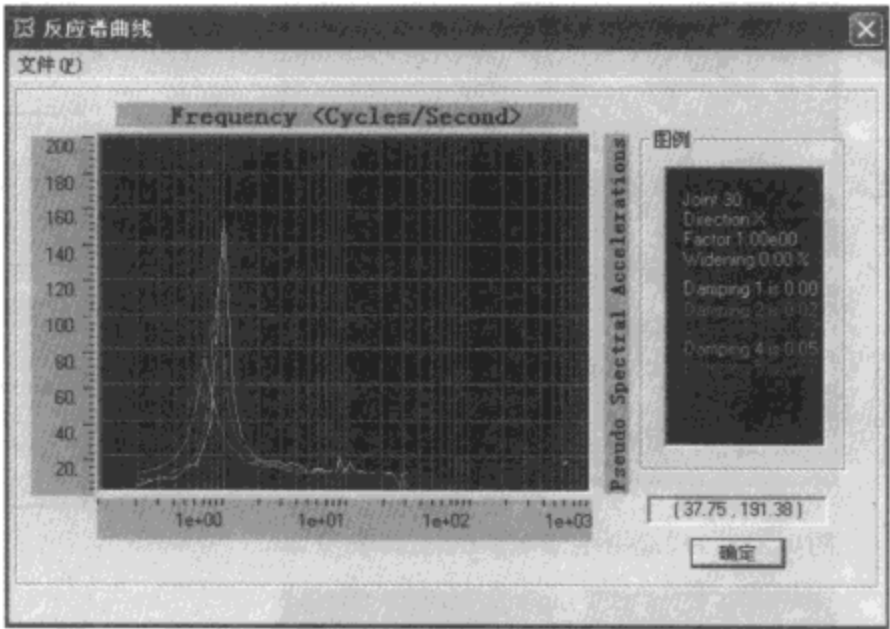


图 13-19 反应谱曲线对话框

文 件 表 12-23

| | |
|------|---------------------------------|
| 打印设置 | 打开打印设置对话框并设置打印参数 |
| 打印图形 | 将图形输出到打印机 |
| 打印表格 | 将表格输出到打印机 |
| 获取图片 | 获取整个表格、无标题的表格或仅图形部分，将其保存为一个图形文件 |

在该对话框右侧的图例中，Direction X 表示当前显示的是 X 方向的谱，Factor 1.00 指比例系数为 1，Widening0.00%指谱的峰值展宽为零。

该对话框右下角的坐标值是光标处于图中时，光标所在位置的坐标。图例中以 6 种不同颜色的文字表示图中不同颜色曲线对应的阻尼水平。

图 例 表 13-24

| | |
|----|----------------|
| 图例 | 列出了各颜色线型对应的阻尼比 |
|----|----------------|

除此以外，在上面的对话框中，同样存在着保存命令集、显示命令集的定义和访问选项，其意义和使用方法与前面时程轨迹结果的输出相同，在此不再赘述。

第14章

结果与输出

对应于强大的分析功能，SAP2000 同样提供了全面、灵活的数据输出方式，用户可以方便直观的查看分析、设计结果。同时，也可以根据需要自行对输出数据格式进行编辑排版，适用于不同结构类型的分析输出。

SAP2000 分析结果支持三种输出方式，即屏幕图形输出、屏幕表格输出、文档输出。输出结果包括整体模型和局部构件分析数据，各种荷载工况下的变形形状、振型形状、构件内力/应力图、构件能量/虚功图等。分析、设计结果的输出支持文档、数据库及电子表格等多种文件格式。本章将对 SAP2000 的分析结果数据进行介绍。

14.1 分析结果图形输出

本节所介绍分析结果的图形输出是指在运行分析后，在显示菜单下视图可以显示的包括荷载组合在内的所有工况变形图、内力/应力图等分析结果。而时程工况、Pushover 工况等特殊工况的结果显示将在相应的章节中进行介绍，本节不再提及。

14.1.1 显示变形形状

对于任意模型，分析完成后，视图会自动切换到某个工况下的变形状态（图 14-1）。

相关的工况名称可以从视图左上状态条中查看。当光标移动至节点位置，系统会自动弹出该节点在当前工况下的位移信息，如图 14-1 所示。 $U1$ 、 $U2$ 、 $U3$ 表示点局部坐标轴方向的平动位移， $R1$ 、 $R2$ 、 $R3$ 表示点局部坐标轴方向的转角。点击鼠标右键，弹出节点位移对话框（图 14-2），显示该点位移值。

如需要更换显示的工况，则点击【显示】>【显示变形形状】命令，弹出变形后形状对话框（图 14-3）。对话框说明见表 14-1～表 14-4。

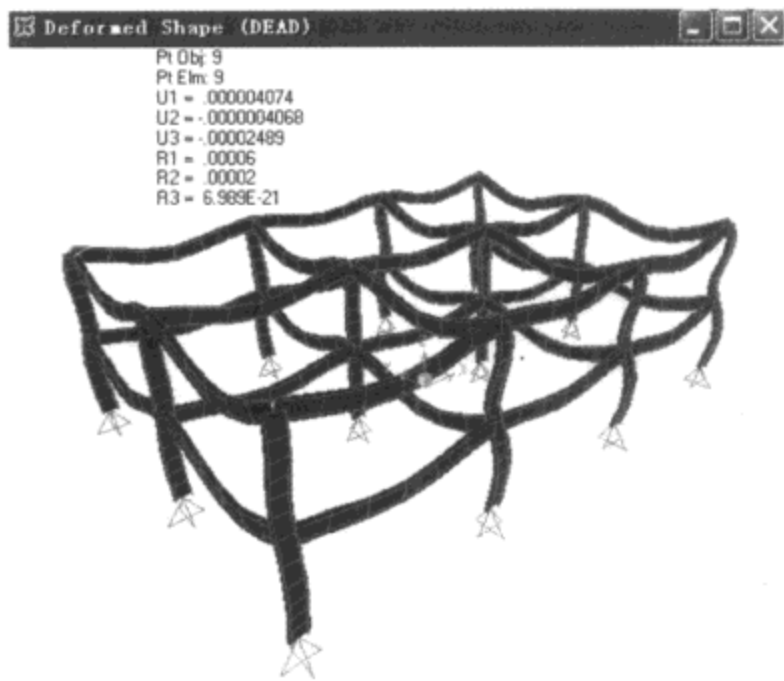


图 14-1 变形图

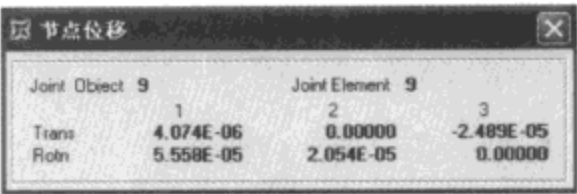


图 14-2 节点位移对话框

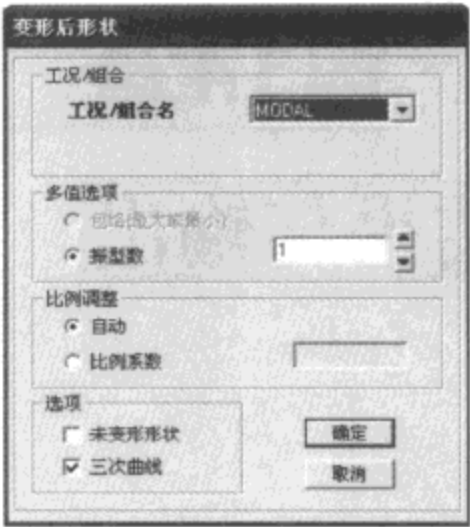


图 14-3 变形后形状对话框

工 况 / 组 合 表 14-1

| | |
|--------|--------------|
| 工况/组合名 | 在下拉菜单中选择工况名称 |
|--------|--------------|

多 值 选 项 表 14-2

| | |
|-----------|---|
| 包络（最大或最小） | 当工况具有多步属性时，显示变形包络图 |
| 振型数 | 具有振型结果的工况，选择显示的振型。点击向上箭头数值增加，点击向下箭头数值减小 |

比 例 调 整 表 14-3

| | |
|------|-------------------------|
| 自动 | 由系统自动计算比例系数并按该比例系数显示变形图 |
| 比例系数 | 由用户指定变形显示比例系数 |

选 项 表 14-4

| | |
|-------|-----------------------|
| 未变形形状 | 勾选则在显示变形形状同时，显示未变形的形状 |
| 三次曲线 | 使用三次曲线拟合图形 |

多值选项

多值选项会根据所显示工况的特性而变化内容，例如选择振型工况时，出现振型数选择项；选择时程工况时，会出现步数选择项；选择稳态分析工况时，会出现频率选择

项等。

比例调整

比例调整区域中的比例系数栏中的默认值是 SAP2000 自动计算得到的值。如果对 SAP2000 自动显示结果不满意，可以对此处的默认比例系数放大或缩小再进行显示。

选项

三次曲线选项用于指定绘制变形形状时是否使用三次曲线函数。三次曲线会影响变形形状图中带有框架截面属性的线对象的显示。当绘制变形形状时，节点会被置于精确的位置上。如果指定不计算三次曲线，则框架单元会被简单绘制为连接相应节点的直线；如果指定计算三次曲线，则 SAP2000 会执行下列计算：计算梁中心的平移和旋转，再根据梁左端的实际平移和旋转及梁中心的近似平移和旋转，从梁的左端到梁的中心绘制三次曲线，然后根据梁中心的近似平移和旋转及梁右端的实际平移和旋转，从梁的中心到梁的右端绘制三次曲线。

14.1.2 显示力/应力

当程序运行完分析操作后，单元的内力/应力均可以通过运行【显示】>【显示力/应力】命令在视图中显示出来。单元的力/应力显示方式根据单元类型分为以下几种：支座节点或弹簧支座节点反力，线（连接）单元和壳单元的内力，壳单元、面单元、轴对称实体单元、实体单元的应力等值线图。

(1) 支座节点或弹簧支座节点反力

运行分析完成后，点击【显示】>【显示力/应力】>【节点】命令，弹出节点反力对话框（图 14-4）。对话框说明见表 14-5～表 14-7。

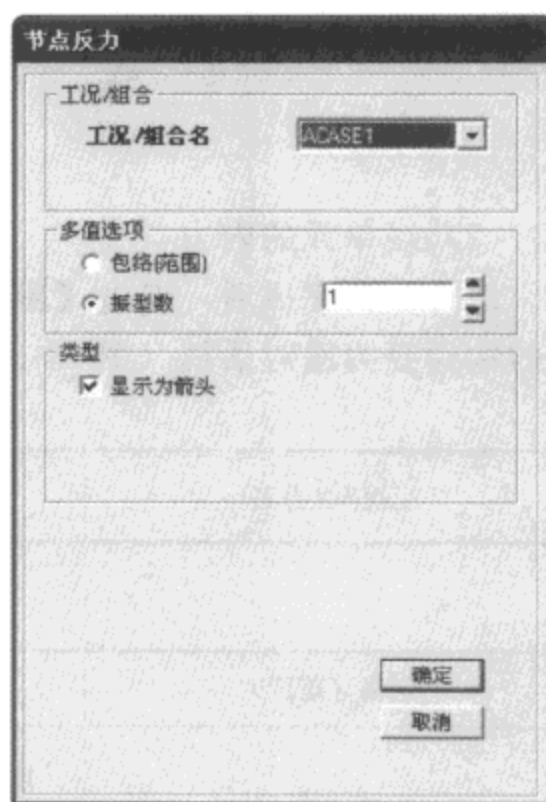


图 14-4 节点反力对话框

工 况 / 组 合

表 14-5

| | |
|--------|--------------|
| 工况/组合名 | 在下拉菜单中选择工况名称 |
|--------|--------------|

多 值 选 项

表 14-6

| | |
|--------|---|
| 包络（范围） | 当工况具有多步属性时，显示变形包络图 |
| 振型数 | 具有振型结果的工况，选择显示的振型。点击向上箭头数值增加，点击向下箭头数值减小 |

类 型

表 14-7

| | |
|----|-----------------|
| 箭头 | 勾选则在支座位置显示出力的方向 |
|----|-----------------|

所有指定了节点约束和节点弹簧的节点都可以显示出支座反力，如图 14-5 所示。

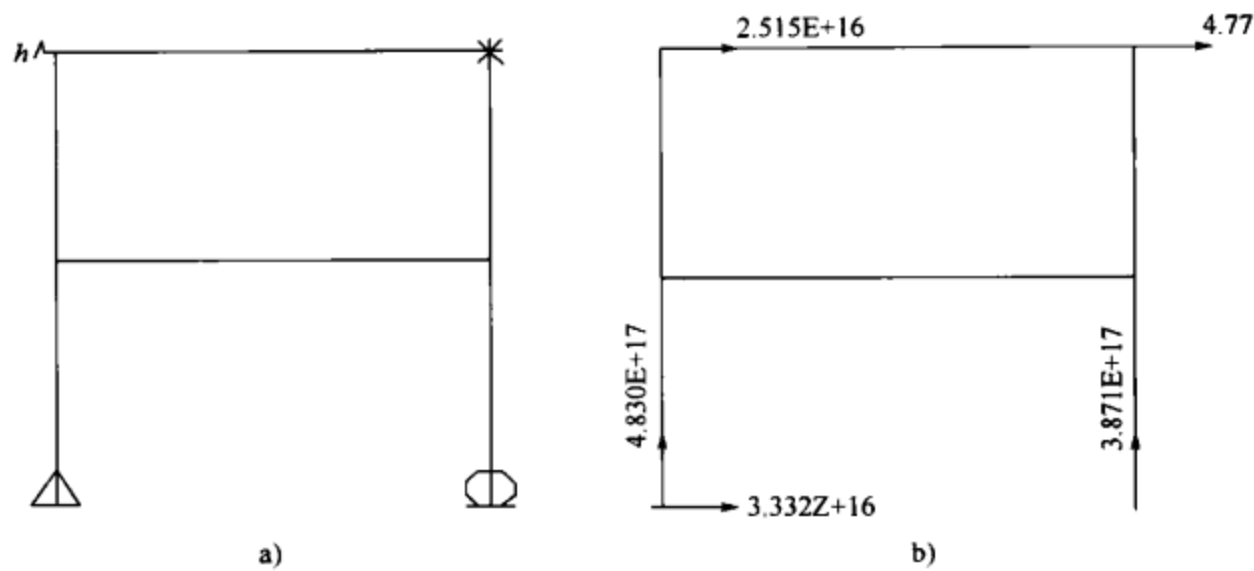


图 14-5 支座反力显示

(2) 线单元的内力

运行分析完成后，点击【显示】>【显示力/应力】>【框架/索/钢束】命令，弹出框架的构件受力图对话框（图 14-6）。对话框说明见表 14-8～表 14-12。

工 况/组 合表 14-8

| | |
|--------|--------------|
| 工况/组合名 | 在下拉菜单中选择工况名称 |
|--------|--------------|

多 值 选 项表 14-9

| | |
|--------|---|
| 包络（范围） | 当工况具有多步属性时，显示变形包络图 |
| 振型数 | 具有振型结果的工况，选择显示的振型。点击向上箭头数值增加，点击向下箭头数值减小 |

分 量表 14-10

| | |
|--------|----------------|
| 轴向力 | 轴力 |
| 扭矩 | 扭矩 |
| 剪力 2-2 | 沿构件局部 2 轴方向的剪力 |
| 剪力 3-3 | 沿构件局部 3 轴方向的剪力 |
| 弯矩 2-2 | 绕构件局部 2 轴方向的弯矩 |
| 弯矩 3-3 | 绕构件局部 3 轴方向的弯矩 |

比 例 调 整表 14-11

| | |
|------|-------------------------|
| 自动 | 由系统自动计算比例系数并按该比例系数显示变形图 |
| 比例系数 | 由用户指定变形显示比例系数 |

选 项表 14-12

| | |
|--------|-----------------------|
| 填充图表 | 用颜色填充显示内力图，不显示内力值 |
| 在图上显示值 | 不填充内力图，将在内力图上显示内力值 |
| 显示变形形状 | 勾选则在显示变形形状的同时显示未变形的形状 |

点击该对话框的【确定】按钮之后，屏幕上将显示构件在某荷载工况下的内力图（图 14-7）。

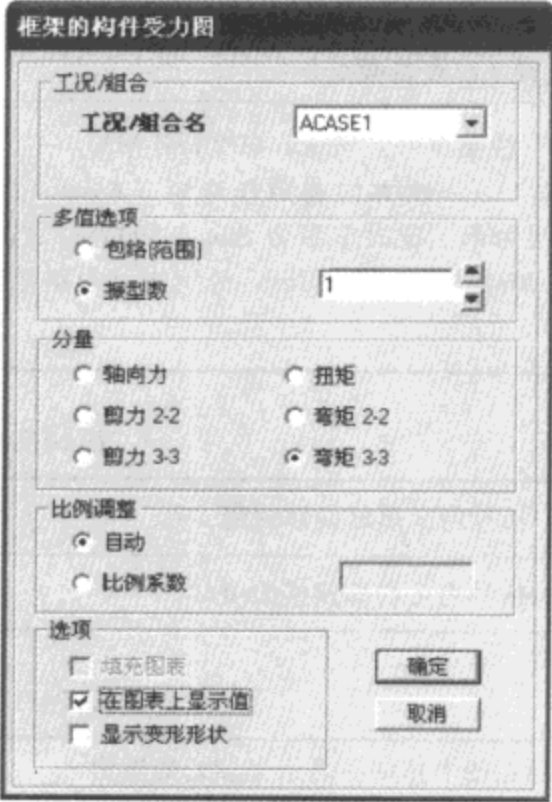


图 14-6 框架的构件受力图对话框

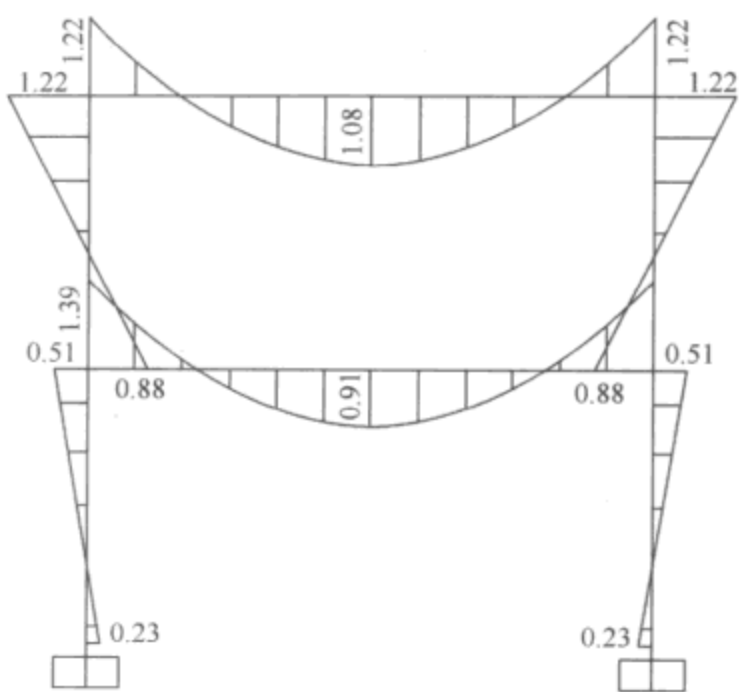


图 14-7 构件在某荷载工况下的内力图

当屏幕显示内力图时，可以在线单元上点击鼠标右键，弹出内力图对话框（图 14-8），对话框说明见表 14-13～表 14-21。该对话框显示该梁的计算简图和内力图。



图 14-8 内力图对话框

工 况

表 14-13

| | |
|----|--|
| 工况 | 选择一个荷载工况或荷载组合 |
| 项 | 在下拉菜单中选择输出的内力项。下拉菜单一：Major (V2 and M3) —— 主轴方向剪力和弯矩，Minor (V2 and M3) —— 次方向剪力和弯矩，Axial (P and T) —— 轴力和扭矩。下拉菜单二：当为单工况时显示为 Single Valued，当显示工况为包络时可选择 Max/Min Env、Max Env、Min Env，分别表示包络范围显示、包络最大值、包络最小值 |

端长度偏移（位置）

表 14-14

| | |
|-----|---------------------|
| I 端 | I 端的端部位置，括号内是端部偏移的值 |
| J 端 | J 端的端部位置，括号内是端部偏移的值 |

显 示 选 项

表 14-15

| | |
|------|----------------------------|
| 滚动数值 | 选择此选项时，可以用光标在图中拖动并显示光标处的数值 |
| 显示最大 | 选择此选项时，显示最大值 |

位 置

表 14-16

| | |
|----|------------------------|
| 位置 | 动态显示构件内力位置，用户可以输入指定位置值 |
|----|------------------------|

等 价 荷 载

表 14-17

| | |
|------|---|
| 等价荷载 | 显示梁上所受的外荷载（包括面单元等传递的荷载），右侧数值区域显示最大值或某位置处的均布荷载 |
|------|---|

结 果 剪 力

表 14-18

| | |
|----|------------------------------|
| 剪力 | 显示梁的剪力图，右侧数值区域显示最大值或某位置处的剪力值 |
|----|------------------------------|

结 果 弯 矩

表 14-19

| | |
|----|------------------------------|
| 弯矩 | 显示梁的弯矩图，右侧数值区域显示最大值或某位置处的弯矩值 |
|----|------------------------------|

挠 度

表 14-20

| | |
|---------|---------------|
| 挠度 | 显示梁的挠度 |
| 绝对 | 在整体坐标中的整体挠度 |
| 相对于梁最小值 | 相对于梁最小竖向位移的挠度 |
| 相对于梁端部 | 相对于梁端部竖向位移的挠度 |

单 位

表 14-21

| | |
|---------|--------------|
| 单位 | 选择显示单位制 |
| 重置为初始单位 | 重置单位制系统默认单位制 |

在该图中光标可以水平移动，显示线单元任意位置的内力值。

反应谱工况内力图显示的是两方向地震效应绝对值的最大值。包含反应谱工况的荷载组合显示的是两个方向地震力与其他荷载工况组合之后的数值，即在图形上显示的是两套数

值。在该图中右击某个构件，弹出单个构件内力图中显示的是正负绝对值的包络图（图 14-9）。

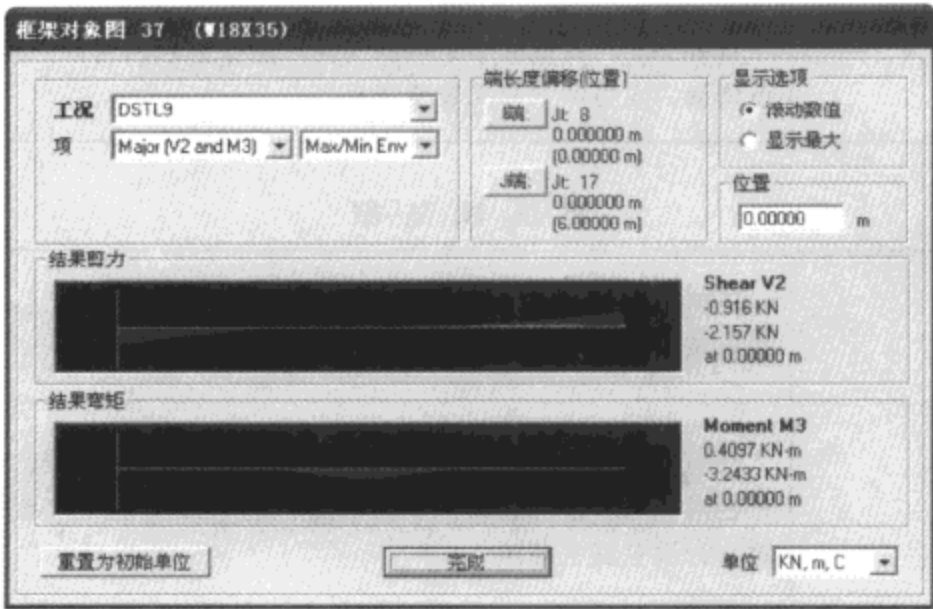


图 14-9 内力包络图

(3) 壳单元的内力与应力

点击【显示】>【显示力/应力】>【壳】命令，弹出构件受力图对话框（图 14-10），对话框说明见表 14-22～表 14-27。

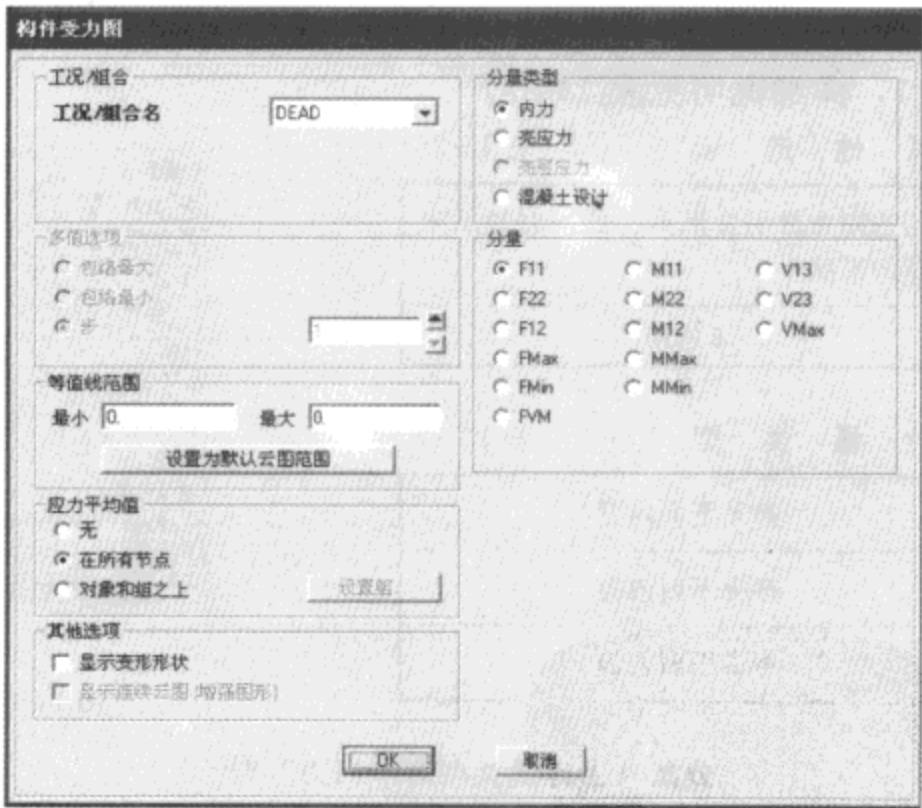


图 14-10 构件受力图对话框

工 况 / 组 合

表 14-22

| | |
|--------|-------------------------|
| 工况/组合名 | 点击此下拉菜单可选择一种荷载工况或荷载组合名称 |
|--------|-------------------------|

多 值 选 项

表 14-23

| | |
|-----------|--|
| 包络（最大或最小） | 当工况具有多步属性时，显示变形包络图 |
| 步 | 具有分步时间或振型结果的工况，选择显示的时间点或振型。点击向上箭头数值增加，点击向下箭头数值减小 |

等 值 线 范 围

表 14-24

| | |
|----|--|
| 最小 | 任何带有小于此编辑框中规定数值的受力和应力单元，都会按指定输出颜色对话框等值线选项区中的最小值颜色显示 |
| 最大 | 任何带有大于或等于此编辑框中规定数值的受力和应力单元，都会按指定输出颜色对话框等值线选项区中的最大值颜色显示。如果最小值与最大值都设置零，将自行设置颜色范围 |

应 力 平 均 值

表 14-25

| | |
|---------|--|
| 无 | 不进行应力平均 |
| 在所有节点 | 对所有节点进行应力平均 |
| 在对象和组之上 | 对选定的单元进行应力平均。还可点击【设置组】按钮，选择某些组，对这些组的单元进行应力平均 |

壳内力（图 14-11，详细说明见表 14-28）

其 他 选 项 表 14-26

| | |
|--------|-----------------------|
| 显示变形形状 | 勾选则在显示变形形状的同时显示未变形的形状 |
| 显示连续云图 | 未启用 |

分 量 类 型 表 14-27

| | |
|-------|--------|
| 内力 | 参见下面内容 |
| 壳应力 | 参见下面内容 |
| 混凝土设计 | 参见下面内容 |



图 14-11 内力分量

分量（当分量类型为“内力”时）表 14-28

| | |
|-------------|---|
| F11、F12、F22 | F11 是沿 1 轴方向，在正 1 面和负 1 面上，作用于单元中面上的每单位长度的轴向力。F22 是沿 2 轴方向，在正 2 面和负 2 面上，作用于单元中面上的每单位长度的轴向力。F12 是沿 2 轴方向，在正 1 面和负 1 面上，作用于单元中面上和沿 1 轴方向，在正 2 面和负 2 面上，作用于单元中面上的每单位长度的剪力 |
| FMax、FMin | 作用于单元中面上的每单位长度最大和最小主应力合力 |

续上表

| | |
|-------------|---|
| FVM | 等效合力 |
| M11、M12、M22 | M11 是围绕 1 轴，在正 1 面和负 1 面上，作用于单元中面上的每单位长度方向弯矩。其他项弯矩可以此类推 |
| MMax、MMin | 作用于单元中面上的每单位长度最大和最小主弯矩 |
| V12、V23 | V12 是按 2 轴方向，在正 1 面和负 1 面上，作用于单元中面上的每单位长度面外剪力。V23 是按 3 轴方向，在正 2 面和负 2 面上，作用于单元中面上的每单位长度面外剪力 |
| VMax | 作用于单元中面上的每单位长度最大主剪力 |
| 显示最大最小为箭头 | 当选择显示 Fmax、Fmin 时，力等值线显示为箭头 |

关于壳内力可参见图 14-12。

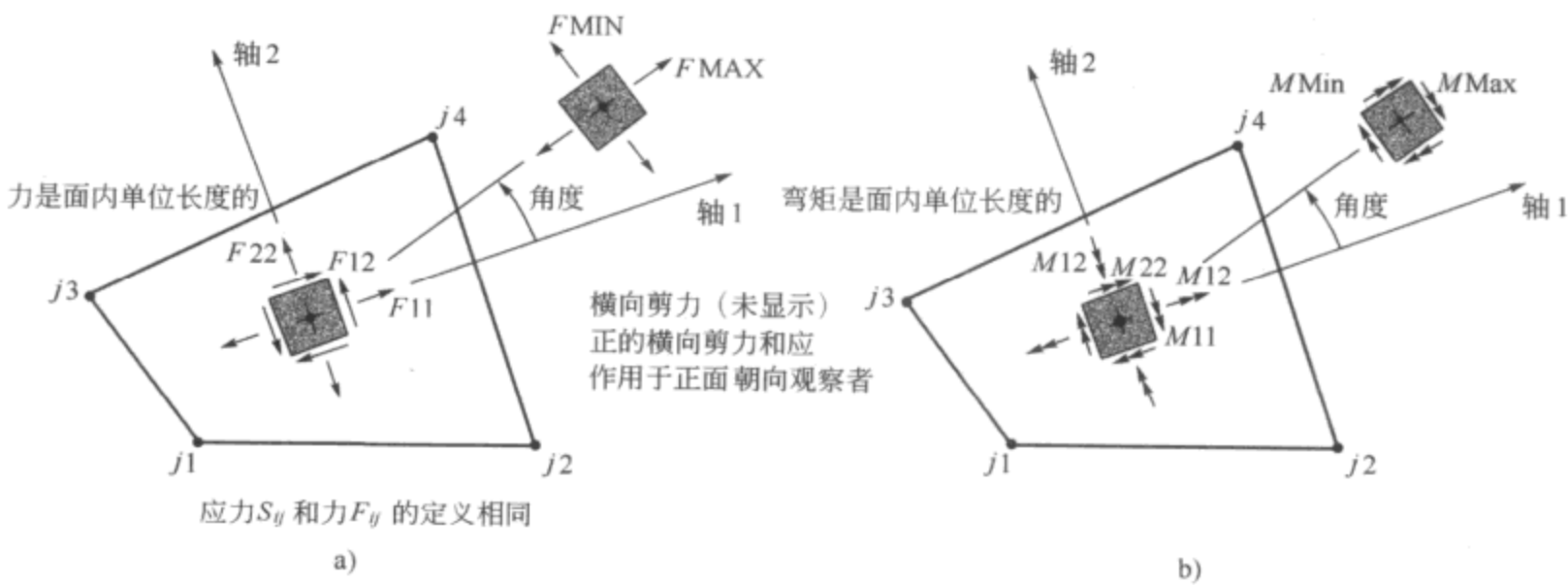


图 14-12 力、弯矩示意图
a) 应力和膜力；b) 板弯矩和扭矩

注意：壳单元内力（也称为应力合力）是在整个单元厚度积分应力而得的力和弯矩。这里显示的壳单元内力是沿壳单元中间面作用的每单位长度的内力。多个壳单元在其共用的节点处有相关的内力或应力。通常，不同壳单元在共用点上的力和应力是不连续的。更精细的网格剖分，会生成更接近的值。如果共用点处的受力或应力等值线未使用应力平均来标绘，通常会看到从单元到单元的受力或应力的突变。在该对话框中的应力平均值区域选择应力平均，可在图中去除这些突变，将等值线平滑化，等值线图见图 14-13。

壳应力（见图 14-14，详细说明见表 14-29、表 14-30）

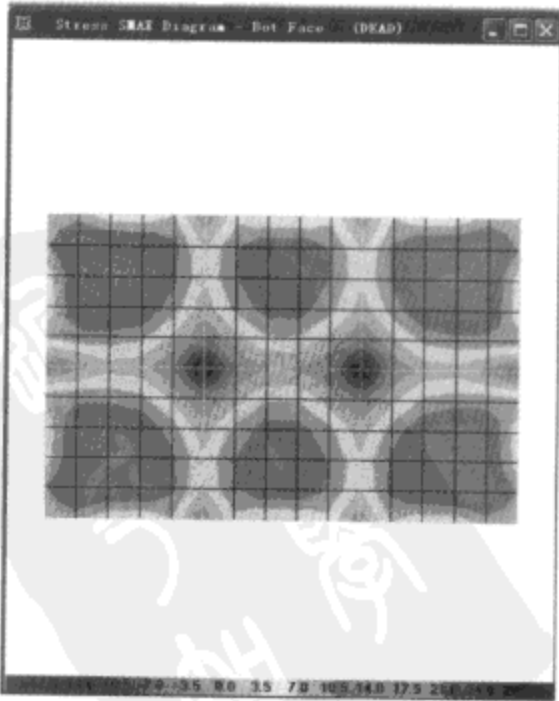


图 14-13 壳应力等值线图

分量类型

☐ 内力

☒ 壳应力

☐ 壳层应力

☐ 混凝土设计

输出类型

☒ 可见面

☐ 顶面

☐ 底面

☐ 最大

☐ 最小值

☐ 绝对最大

分量

☐ S11

☐ S22

☐ S12

☒ SMax

☐ SMin

☐ SVM

☐ 显示 Smax 和 Smin 为箭头

☐ S13

☐ S23

☐ SMaxV

图 14-14 壳应力输出分量

输出类型 表 14-29

| | |
|------|----------------|
| 可见面 | 显示当前视图位置可见面的应力 |
| 顶面 | 显示面单元顶面应力 |
| 底面 | 显示面单元底面应力 |
| 最大 | 显示应力最大值 |
| 最小值 | 显示应力最小值 |
| 绝对最大 | 显示应力绝对值最大值 |

分量（当分量类型为“壳应力”时）

表 14-30

| | |
|--------------------|--|
| S11、S22、S12 | S11 沿 1 轴方向，作用于正 1 面和负 1 面上的轴向应力；S22 沿 2 轴方向，作用于正 2 面和负 2 面上的轴向应力；S12 是按 2 轴方向作用于正 1 面和负 1 面上和按 1 轴方向作用于正 2 面和负 2 面上的剪应力 |
| SMax、SMin | SMax 是最大主应力，SMin 是最小主应力 |
| S13、S23 | S13 是沿 3 轴方向，作用于正 1 面和负 1 面上的面外剪应力。S23 是沿 3 轴方向，作用于正 2 面和负 2 面上的面外剪应力 |
| SMaxV | 横向最大剪应力 |
| SVM | 等效应力 |
| 显示 Smax 和 Smin 为箭头 | 当选择显示 Smax、Smin 时，应力等值线显示为箭头 |

关于应力输出分量可以参见图 14-15。

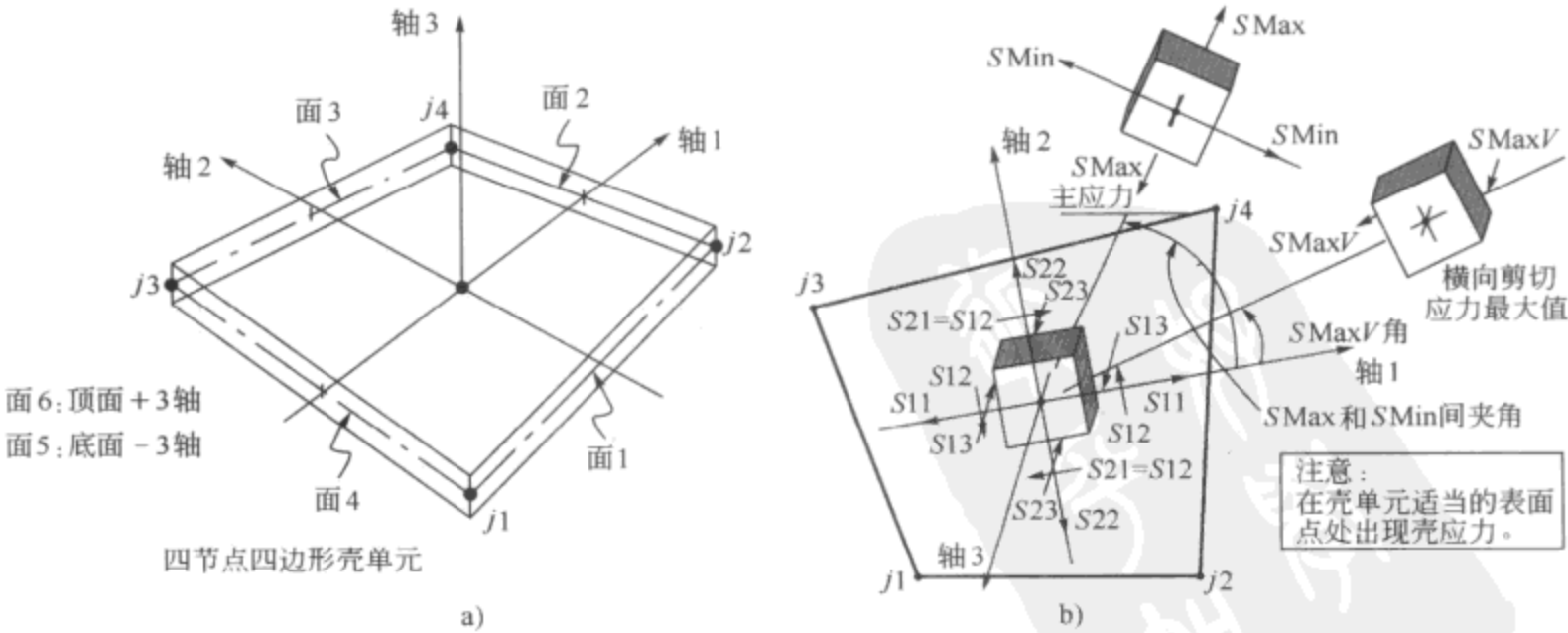


图 14-15 壳单元应力输出分量

混凝土设计（见图 14-16，详细说明见表 14-31、表 14-32）

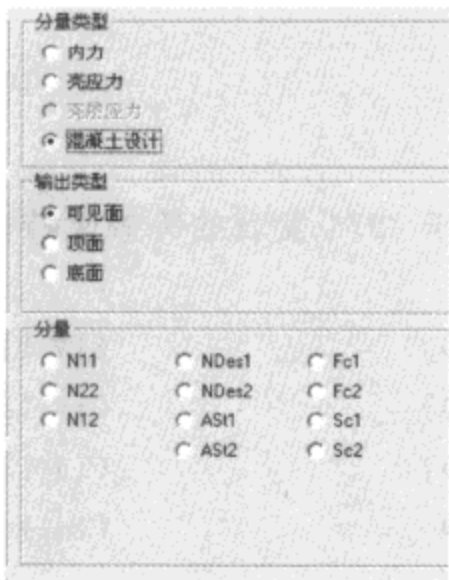


图 14-16 混凝土设计输出分量

输出类型 表 14-31

| | |
|-----|----------------|
| 可见面 | 显示当前视图位置可见面的内力 |
| 顶面 | 显示面单元顶面内力 |
| 底面 | 显示面单元底面内力 |

分量（当分量类型为“混凝土设计”时） 表 14-32

| | |
|-------------|----------------------------------|
| N11、N22、N12 | 分别表示局部 1 轴、2 轴方向等效平面内力，及等效剪切平面内力 |
| NDes1、NDes2 | 局部 1、2 轴方向设计内力 |
| ASt1、ASt2 | 局部 1、2 轴方向配筋面积 |
| Fc1、Fc2 | 局部 1、2 轴方向主压力 |
| Sc1、Sc2 | 局部 1、2 轴方向主压应力 |

关于壳的分层应力和混凝土板设计部分内容可以参见第 5 章（材料与截面）面截面定义相关内容。

由应力结果转换为等效膜特性平面内力的基本公式：

在壳单元中，截面高度 h 、保护层厚度 Ct_1 、 Ct_2 、 Cb_1 及 Cb_2 作为常量由用户在定义面截面属性时给出。如果未输入这些参数或参数为零，则系统默认取值为截面高度的 1/10。高度 h 用于所有的变量。

$$dt_1 = \frac{h}{2} - Ct_1 \tag{14-1}$$

$$dt_2 = \frac{h}{2} - Ct_2 \tag{14-2}$$

$$db_1 = \frac{h}{2} - Cb_1 \tag{14-3}$$

$$db_2 = \frac{h}{2} - Cb_2 \tag{14-4}$$

$$d_{\min} = d_1 \text{ 和 } d_2 \text{ 中小值}$$

$$db_{\max} = db_1 \text{ 和 } db_2 \text{ 中大值}$$

$$dt_{\max} = dt_1 \text{ 和 } dt_2 \text{ 中大值}$$

分析得到的六个应力结果，通过以下转换公式换算为等效内力：

$$N_{11}(top) = \frac{-m_{11} + f_{11}db_1}{d_1} \tag{14-5}$$

$$N_{11}(bot) = \frac{m_{11} + f_{11}dt_1}{d_1} \tag{14-6}$$

$$N_{22}(top) = \frac{-m_{22} + f_{22}db_2}{d_2} \tag{14-7}$$

$$N_{22}(bot) = \frac{m_{22} + f_{22}dt_2}{d_2} \tag{14-8}$$

$$N_{12}(\text{top}) = \frac{-m_{12} + f_{12}db_{\max}}{d_{\min}} \quad (14-9)$$

$$N_{12}(\text{bot}) = \frac{m_{12} + f_{12}dt_{\max}}{d_{\min}} \quad (14-10)$$

设计内力计算公式及相应配筋量:

对于每一层两个方向的设计内力都是采用 Brondum-Nielsen 于 1974 发表的等效膜特性平面内力理论得到的。

$$NDes_1(\text{top}) = N_{11}(\text{top}) + Abs\{N_{12}(\text{top})\} \quad (14-11)$$

$$NDes_1(\text{bot}) = N_{11}(\text{bot}) + Abs\{N_{12}(\text{bot})\} \quad (14-12)$$

$$NDes_2(\text{top}) = N_{22}(\text{top}) + Abs\{N_{12}(\text{top})\} \quad (14-13)$$

$$NDes_2(\text{bot}) = N_{22}(\text{bot}) + Abs\{N_{12}(\text{bot})\} \quad (14-14)$$

以下是当 $NDes_1$ 、 $NDes_2$ 小于零时的限制:

如果 $NDes_2(\text{top}) < 0$, 则:

$$NDes_1(\text{top}) = N_{11}(\text{top}) + Abs\left\{\frac{[N_{12}(\text{top})]^2}{N_{22}(\text{top})}\right\} \quad (14-15)$$

如果 $NDes_1(\text{top}) < 0$, 则:

$$NDes_2(\text{top}) = N_{22}(\text{top}) + Abs\left\{\frac{[N_{12}(\text{top})]^2}{N_{11}(\text{top})}\right\} \quad (14-16)$$

如果 $NDes_2(\text{bot}) < 0$, 则:

$$NDes_1(\text{bot}) = N_{11}(\text{bot}) + Abs\left\{\frac{[N_{12}(\text{bot})]^2}{N_{22}(\text{bot})}\right\} \quad (14-17)$$

如果 $NDes_1(\text{bot}) < 0$, 则:

$$NDes_2(\text{bot}) = N_{22}(\text{bot}) + Abs\left\{\frac{[N_{12}(\text{bot})]^2}{N_{11}(\text{bot})}\right\} \quad (14-18)$$

用上述公式计算出设计内力, 通过在混凝土材料定义时指定钢筋属性得到钢筋应力以及应力折减系数 φ_s , 转化为配筋量 (i. e., 单位宽度配筋面积)。假定应力折减系数取常数 0.9。配筋面积计算公式如下:

$$Ast_1(\text{top}) = \frac{NDes_1(\text{top})}{0.9(f_y)} \quad (14-19)$$

$$Ast_1(\text{bot}) = \frac{NDes_1(\text{bot})}{0.9(f_y)} \quad (14-20)$$

$$Ast_2(\text{top}) = \frac{NDes_2(\text{top})}{0.9(f_y)} \quad (14-21)$$

$$Ast_2(\text{bot}) = \frac{NDes_2(\text{bot})}{0.9(f_y)} \quad (14-22)$$

壳单元的主压力和应力

两个正交方向的主压力和应力依据 Brondum-Nielsen (1974) 发表的公式计算:

$$Fc_1(\text{top}) = N_{11}(\text{top}) + \frac{\{N_{12}(\text{top})\}^2}{N_{11}(\text{top})} \quad \text{if } NDes_1(\text{top}) < 0 \quad (14-23)$$

$$= -2Abs\{N_{12}(\text{top})\} \quad \text{if } NDes_1(\text{top}) \geq 0 \quad (14-24)$$

$$F_{c1}(\text{bot}) = N_{11}(\text{bot}) + \frac{\{N_{12}(\text{bot})\}^2}{N_{11}(\text{bot})} \quad \text{if } N_{Des1}(\text{bot}) < 0 \quad (14-25)$$

$$= -2Abs\{N_{12}(\text{bot})\} \quad \text{if } N_{Des1}(\text{bot}) \geq 0 \quad (14-26)$$

$$F_{c2}(\text{top}) = N_{22}(\text{top}) + \frac{\{N_{12}(\text{top})\}^2}{N_{22}(\text{top})} \quad \text{if } N_{Des2}(\text{top}) < 0 \quad (14-27)$$

$$= -2Abs\{N_{12}(\text{top})\} \quad \text{if } N_{Des2}(\text{top}) \geq 0 \quad (14-28)$$

$$F_{c2}(\text{bot}) = N_{22}(\text{bot}) + \frac{\{N_{12}(\text{bot})\}^2}{N_{22}(\text{bot})} \quad \text{if } N_{Des2}(\text{bot}) < 0 \quad (14-29)$$

$$= -2Abs\{N_{12}(\text{bot})\} \quad \text{if } N_{Des2}(\text{top}) \geq 0 \quad (14-30)$$

两个方向的顶层和底层主压应力计算公式如下

$$Sc_1(\text{top}) = \frac{F_{c1}(\text{top})}{2Ct_1} \quad (14-31)$$

$$Sc_1(\text{bot}) = \frac{F_{c1}(\text{bot})}{2Cb_1} \quad (14-32)$$

$$Sc_2(\text{top}) = \frac{F_{c2}(\text{top})}{2Ct_2} \quad (14-33)$$

$$Sc_2(\text{bot}) = \frac{F_{c2}(\text{bot})}{2Cb_2} \quad (14-34)$$

当点击【确定】后，模型中面对象应力以应力等值线图的方式显示在视图中。不同颜色代表不同内力应力分布。进入平面或者立面视图中，可以通过光标读取面对象任意位置的应力值（图 14-17）。

在壳单元位置点击鼠标右键，则弹出该壳单元的应力/内力等值线放大视图（图 14-18）。

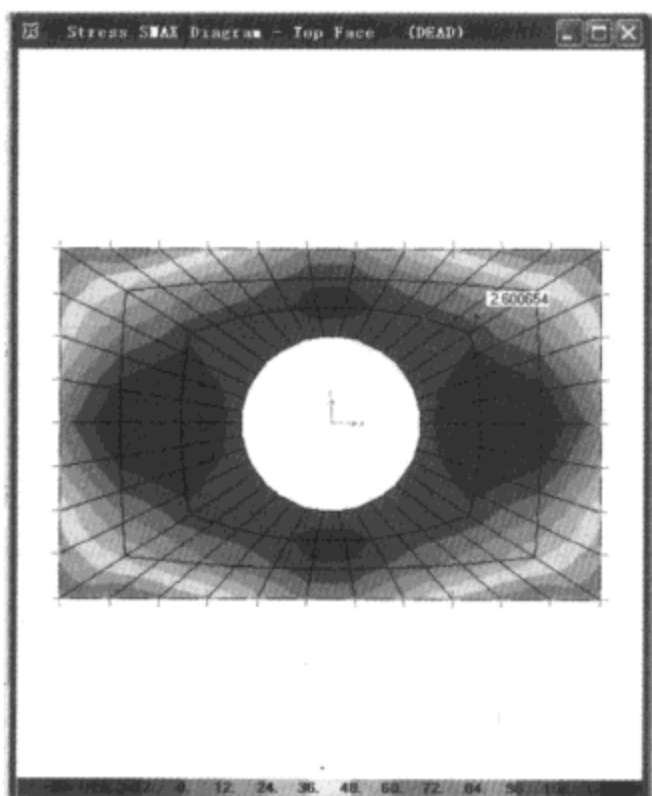


图 14-17 光标读取壳应力值

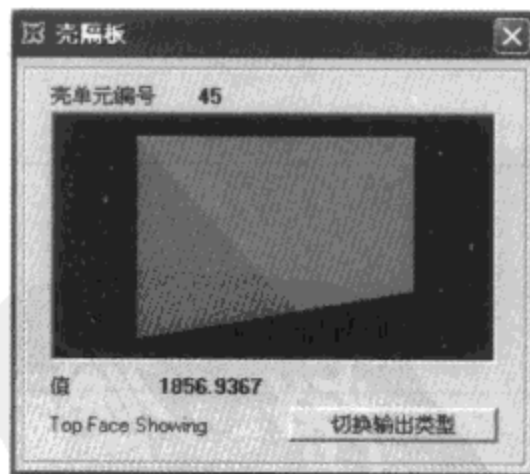


图 14-18 壳单元的应力/内力等值线放大视图

在对话框下面会输出光标所在位置的应力/内力值，拉正压负。点击【切换输出类型】按钮，可以在内力/应力输出类型之间切换。

(4) 面单元应力

点击【显示】>【显示力/应力】>【面】命令，弹出平面单元应力轮廓对话框（图 14-19）。对话框说明见表 14-33～表 14-38。

工 况/组 合表 14-33

| | |
|--------|-------------------------|
| 工况/组合名 | 点击此下拉菜单可选择一种荷载工况或荷载组合名称 |
|--------|-------------------------|

多 值 选 项表 14-34

| | |
|-----------|--|
| 包络（最大或最小） | 当工况具有多步属性时，显示变形包络图 |
| 步 | 具有分步时间或振型结果的工况，选择显示的时间点或振型。点击向上箭头数值增加，点击向下箭头数值减小 |

当分量类型为“应力”时表 14-35

| | |
|-----------------|---|
| S11、S22、S33、S12 | S11 沿 1 轴方向，作用于正 1 面和负 1 面上的轴向应力；S22 沿 2 轴方向，作用于正 2 面和负 2 面上的轴向应力；S33 沿 3 轴方向，作用于正 3 面和负 3 面上的轴向应力；S12 是按 2 轴方向作用于正 1 面和负 1 面上和按 1 轴方向作用于正 2 面和负 2 面上的剪应力 |
| SMAX、SMIN | SMAX 为最大主应力，SMIN 为最小主应力 |
| SVM | 最大主剪应力 |

等 值 线 范 围表 14-36

| | |
|----|--|
| 最小 | 任何带有小于此编辑框中规定数值的受力和应力单元，都会按指定输出颜色对话框等值线选项区中的最小值颜色显示 |
| 最大 | 任何带有大于或等于此编辑框中规定数值的受力和应力单元，都会按指定输出颜色对话框等值线选项区中的最大值颜色显示。如果最小值与最大值都设置零，将自行设置颜色范围 |

应 力 平 均 值表 14-37

| | |
|-------|--|
| 无 | 不进行应力平均 |
| 在全部节点 | 对所有节点进行应力平均 |
| 在对象和组 | 对选定的单元进行应力平均。还可点击【设置组】按钮，选择某些组，对这些组的单元进行应力平均 |

显 示 变 形 形 状表 14-38

| | |
|--------|------------------------|
| 显示变形形状 | 选中该选项时，将在变形后的形状上显示等值线图 |
|--------|------------------------|

(5) 轴对称实体单元应力

点击【显示】>【显示力/应力】>【轴对称】命令，弹出轴对称单元应力轮廓对话框（图 14-20）。对话框说明见表 14-39～表 14-44。

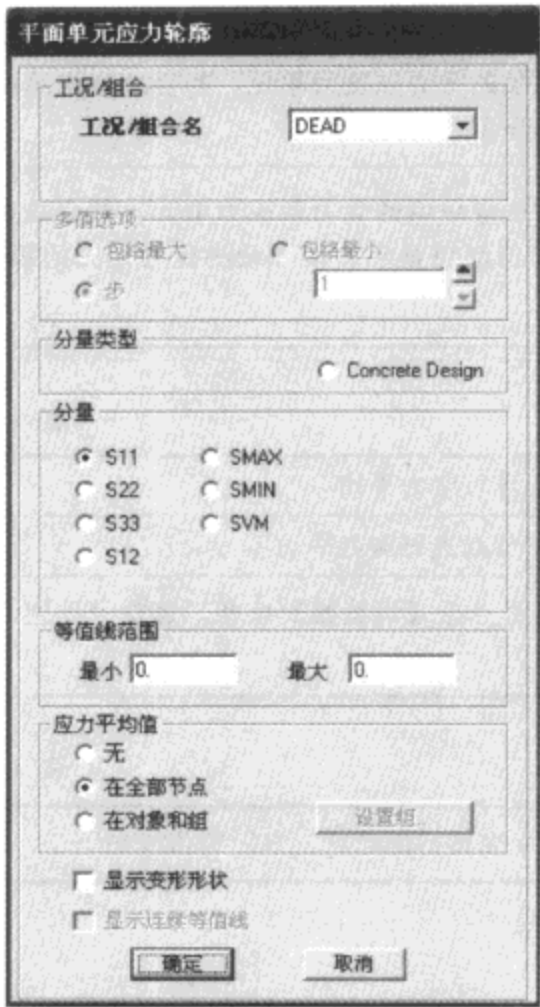


图 14-19 平面单元应力轮廓对话框

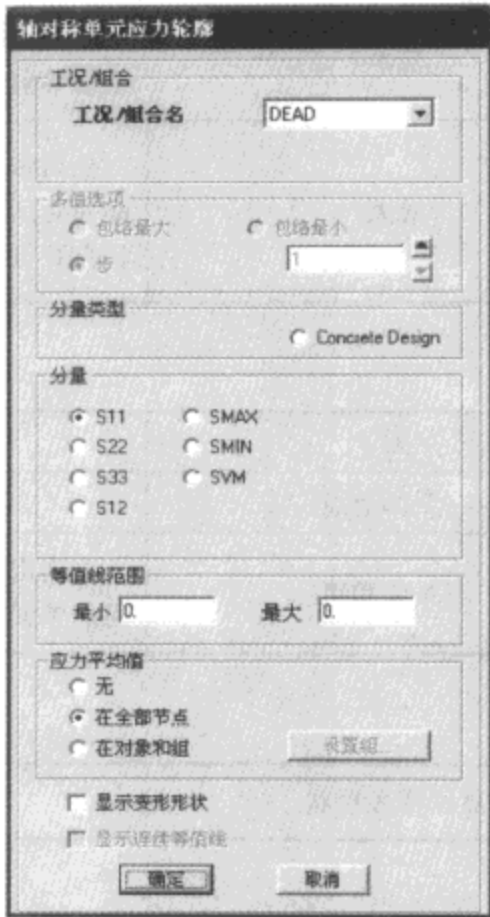


图 14-20 轴对称单元应力轮廓对话框

工 况 / 组 合 表 14-39

| | |
|--------|-------------------------|
| 工况/组合名 | 点击此下拉菜单可选择一种荷载工况或荷载组合名称 |
|--------|-------------------------|

多 值 选 项 表 14-40

| | |
|-----------|--|
| 包络（最大或最小） | 当工况具有多步属性时，显示变形包络图 |
| 步 | 具有分步时间或振型结果的工况，选择显示的时间点或振型。点击向上箭头数值增加，点击向下箭头数值减小 |

当分量类型为“应力”时 表 14-41

| | |
|-----------------|---|
| S11、S22、S33、S12 | S11 沿 1 轴方向，作用于正 1 面和负 1 面上的轴向应力；S22 沿 2 轴方向，作用于正 2 面和负 2 面上的轴向应力；S33 沿 3 轴方向，作用于正 3 面和负 3 面上的轴向应力；S12 是按 2 轴方向作用于正 1 面和负 1 面上和按 1 轴方向作用于正 2 面和负 2 面上的剪应力 |
| SMAX、SMIN | SMAX 是最大主应力，SMIN 是最小主应力 |
| SVM | 最大主剪应力 |

等 值 线 范 围

表 14-42

| | |
|----|--|
| 最小 | 任何带有小于此编辑框中规定数值的受力和应力单元，都会按指定输出颜色对话框等值线选项区中的最小值颜色显示 |
| 最大 | 任何带有大于或等于此编辑框中规定数值的受力和应力单元，都会按指定输出颜色对话框等值线选项区中的最大值颜色显示。如果最小值与最大值都设置零，将自行设置颜色范围 |

应 力 平 均 值

表 14-43

| | |
|-------|--|
| 无 | 不进行应力平均 |
| 在全部节点 | 对所有节点进行应力平均 |
| 在对象和组 | 对选定的单元进行应力平均。还可点击【设置组】按钮，选择某些组，对这些组的单元进行应力平均 |

显 示 变 形 形 状

表 14-44

| | |
|--------|------------------------|
| 显示变形形状 | 选中该选项时，将在变形后的形状上显示等值线图 |
|--------|------------------------|

(6) 实体单元的应力

点击【显示】>【显示力/应力】>【实体】命令，弹出实体单元应力轮廓对话框（图 14-21）。对话框说明见表 14-45～表 14-50。

工 况 / 组 合

表 14-45

| | |
|--------|-------------------------|
| 工况/组合名 | 点击此下拉菜单可选择一种荷载工况或荷载组合名称 |
|--------|-------------------------|

多 值 选 项

表 14-46

| | |
|-----------|--|
| 包络（最大或最小） | 当工况具有多步属性时，显示变形包络图 |
| 步 | 具有分步时间或振型结果的工况，选择显示的时间点或振型。点击向上箭头数值增加，点击向下箭头数值减小 |

当分量类型为“应力”时

表 14-47

| | |
|-------------------------|---|
| S11、S22、S33、S12、S13、S23 | S11 沿 1 轴方向，作用于正 1 面和负 1 面上的轴向应力；S22 沿 2 轴方向，作用于正 2 面和负 2 面上的轴向应力；S33 沿 3 轴方向，作用于正 3 面和负 3 面上的轴向应力；S12 是按 2 轴方向作用于正 1 面和负 1 面上和按 1 轴方向作用于正 2 面和负 2 面上的剪应力；S13 是按 3 轴方向作用于正 1 面和负 1 面上和按 1 轴方向作用于正 3 面和负 3 面上的剪应力；S23 是按 3 轴方向作用于正 2 面和负 2 面上和按 2 轴方向作用于正 3 面和负 3 面上的剪应力 |
| SMAX、SMID、SMIN | SMAX 是主应力 1、SMID 是主应力 2、SMIN 是主应力 3 |
| SVM | 最大主剪应力 |

等 值 线 范 围

表 14-48

| | |
|----|--|
| 最小 | 任何带有小于此编辑框中规定数值的受力和应力单元，都会按指定输出颜色对话框等值线选项区中的最小值颜色显示 |
| 最大 | 任何带有大于或等于此编辑框中规定数值的受力和应力单元，都会按指定输出颜色对话框等值线选项区中的最大值颜色显示。如果最小值与最大值都设置零，将自行设置颜色范围 |

应 力 平 均 值

表 14-49

| | |
|-------|--|
| 无 | 不进行应力平均 |
| 在全部节点 | 对所有节点进行应力平均 |
| 在对象和组 | 对选定的单元进行应力平均。还可点击【设置组】按钮，选择某些组，对这些组的单元进行应力平均 |

显 示 变 形 形 状

表 14-50

| | |
|--------|--------------------------------|
| 显示变形形状 | 选中该选项时，将在变形后的形状上显示等值线图 |
| 显示为箭头 | 选择显示 SMAX、SMID、SMIN 时，等值线显示为箭头 |

当按【确定】按钮后，视图中的实体单元的应力以等值线图的方式显示。进入平面或者立面视图中，可以通过光标捕捉读取实体模型任意位置的应力值，拉正压负（图 14-22）。

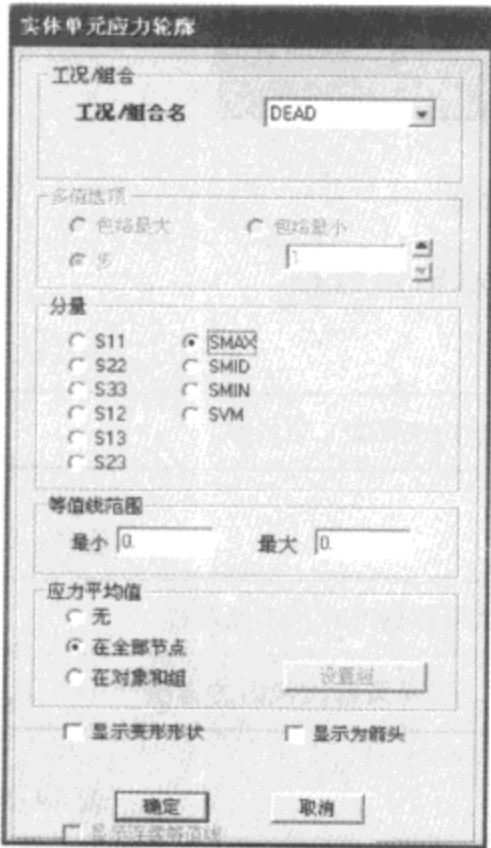


图 14-21 实体单元应力轮廓对话框

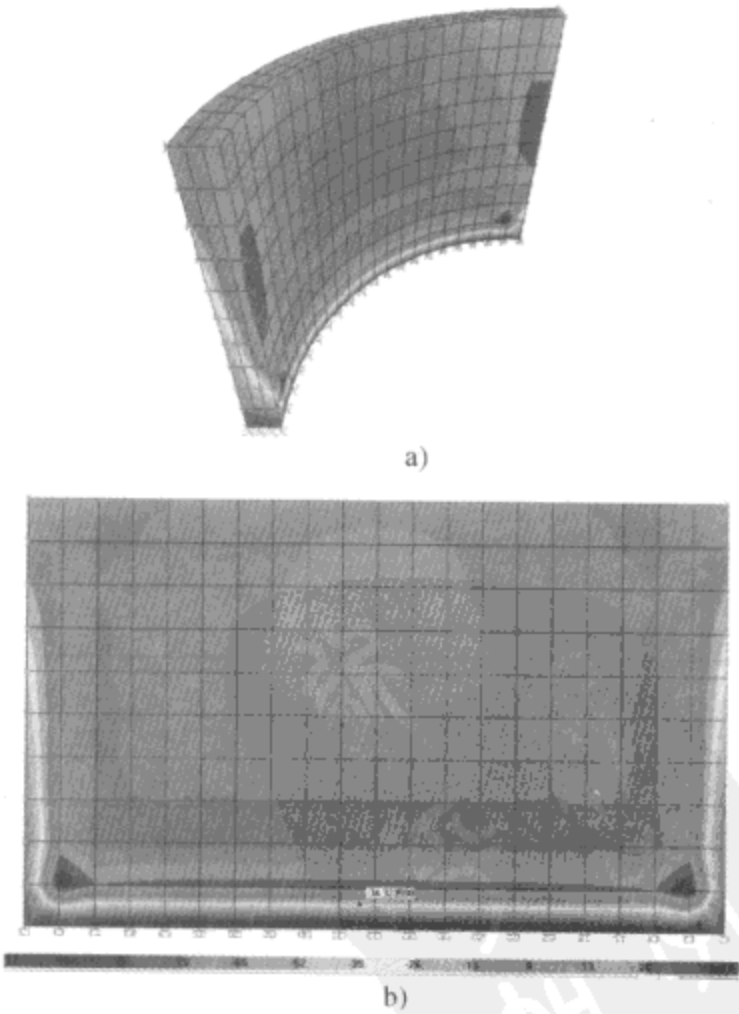


图 14-22

关于各种单元的特性可以参看材料与截面相应章节。

14.2 分析、设计结果数据表格显示

14.2.1 表格显示内容

SAP2000 中分析数据表格显示是通过运行【显示】>【显示表格】命令完成的。点击该命令，弹出 Choose Tables for Display 对话框（图 14-23），对话框说明见表 14-51~表 14-55。



图 14-23 Choose Tables for Display 对话框

树状图：显示所有输入、输出数据结构图，用户选择显示输出数据。

荷 载 工 况 表 14-51

| | |
|--------|-------------------|
| 选择荷载工况 | 选择显示的输入数据中的荷载工况名称 |
|--------|-------------------|

分 析 工 况 表 14-52

| | |
|---------|------------------------|
| 选择分析工况 | 选择所要显示输出分析结果数据的分析工况名称 |
| 修改/显示选项 | 点击弹出输出选项对话框，显示或修改输出的选项 |

选 项 表 14-53

| | |
|---------|----------------------|
| 仅选择的 | 仅显示选择对象的相关数据 |
| 显示未格式化的 | 勾选则显示数据小数点后保留位数未经格式化 |

命名集表 14-54

| | |
|-------|-------------|
| 保存命名集 | 保存当前所选择的输出项 |
| 显示命名集 | 显示保存过的选择输出项 |
| 删除命名集 | 删除保存过的选择输出项 |

表格式文件表 14-55

| | |
|-------|---------------------------------|
| 表格式文件 | 将输出表格文件格式按照默认格式输出或根据已有用户自定义格式输出 |
|-------|---------------------------------|

(1) 分析结果

树状图中的分析结果按照节点输出、单元输出、结构输出进行分类。用户点击分类名称左侧加号逐级进入下级分类图，点击分类名称左侧方框，使之出现叉号便表示指定输出内容。

节点输出（图 14-24）



图 14-24 节点输出

位移

Joint Displacements/Joint Displacements-Absolute：节点位移/节点位移-绝对（见图 14-25，详细说明见表 14-56）

| Joint Displacements | | | | | | | | | | |
|-------------------------|------------|-----------------|---------------|---------------|------------------|---------|---------|---------|------------|------------|
| 文件(F) 视图(V) 选项(O) 格式(M) | | | | | | | | | | |
| Units: As Noted | | | | | | | | | | |
| Joint Displacements | | | | | | | | | | |
| | Joint Text | OutputCase Text | CaseType Text | StepType Text | StepNum Unitless | U1 mm | U2 mm | U3 mm | R1 Radians | R2 Radians |
| ▶ | 6 | DEAD | LinStatic | | | -019373 | -003517 | .045304 | -000088 | .000011 |
| | | | | | | | | | | .000001942 |

图 14-25

表 14-56

| | |
|------------------|-----------------------|
| Joint | 节点编号 |
| OutputCase | 输出工况名称 |
| CaseType | 工况类型 |
| StepType | 分步类型 |
| StepNum | 分步编号 |
| U1、U2、U3，mm | 沿局部 1、2、3 轴位移，单位：毫米 |
| R1、R2、R3，Radians | 沿局部 1、2、3 轴旋转角度，单位：弧度 |

反力

Joint Reactions：节点反力（见图 14-26，详细说明见表 14-57）

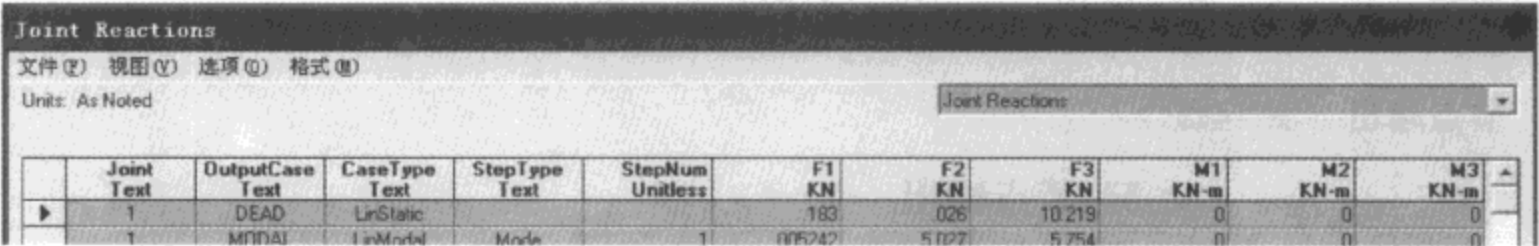


图 14-26

表 14-57

| | |
|---------------|-----------------------|
| Joint | 节点编号 |
| OutputCase | 输出工况名称 |
| CaseType | 工况类型 |
| StepType | 分步类型 |
| StepNum | 分步编号 |
| F1、F2、F3，KN | 沿局部 1、2、3 轴轴向力，单位：千牛 |
| M1、M2、M3，KN-m | 绕局部 1、2、3 轴弯矩，单位：千牛·米 |

速度和加速度

Joint Velocities-Relative/Joint Velocities-Absolute：节点速度-相对/节点速度-绝对（见图 14-27，详细说明见表 14-58）

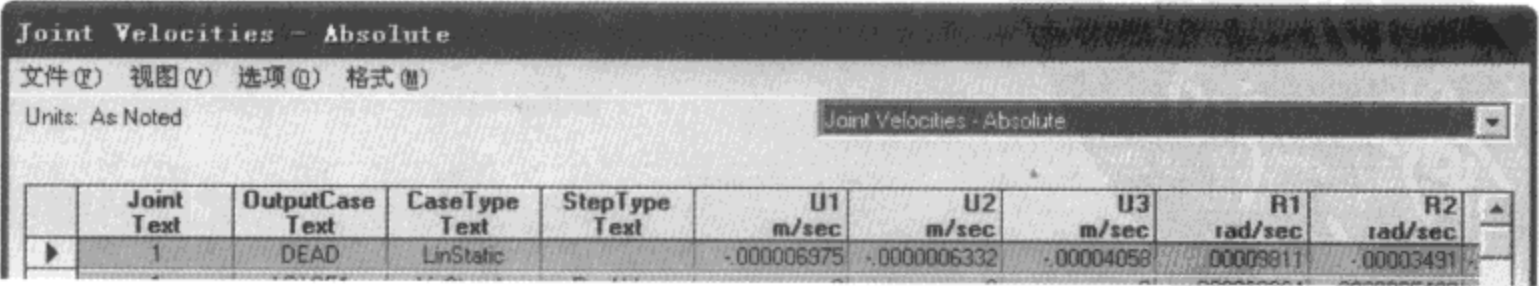


图 14-27

表 14-58

| | |
|-------------------|------------------------|
| Joint | 节点编号 |
| OutputCase | 输出工况名称 |
| CaseType | 工况类型 |
| StepType | 分步类型 |
| StepNum | 分步编号 |
| U1、U2、U3, m/sec | 沿局部 1、2、3 轴速度，单位：米/秒 |
| R1、R2、R3, rad/sec | 绕局部 1、2、3 轴角速度，单位：弧度/秒 |

Joint Accelerations-Relative /Joint Accelerations -Absolute: 节点加速度-相对/节点加速度-绝对（见图 14-28，详细说明见表 14-59）

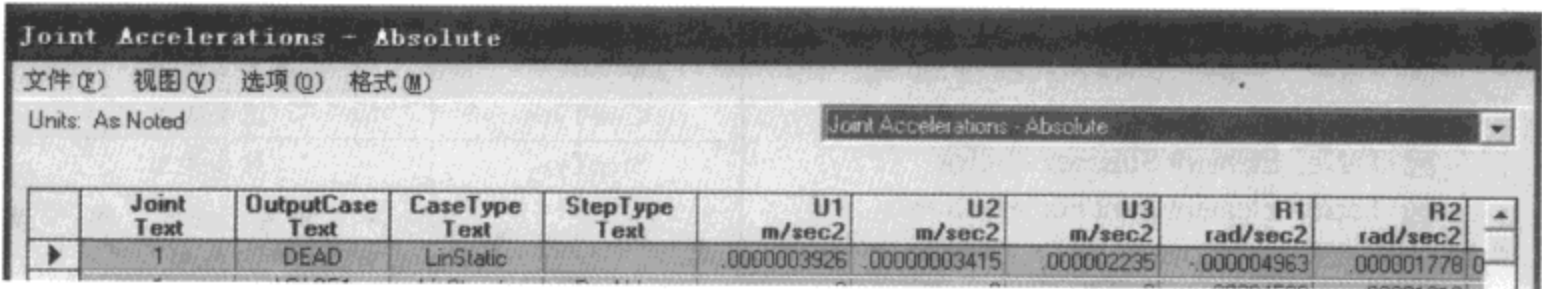


图 14-28

表 14-59

| | |
|--------------------|--------------------------------------|
| Joint | 节点编号 |
| OutputCase | 输出工况名称 |
| CaseType | 工况类型 |
| StepType | 分步类型 |
| StepNum | 分步编号 |
| U1、U2、U3, m/sec2 | 沿局部 1、2、3 轴轴向加速度，单位：米/秒 ² |
| R1、R2、R3, rad/sec2 | 绕局部 1、2、3 轴角加速度，单位：弧度/秒 ² |

注意：节点加速度指节点相对于结构的加速度，节点绝对加速度指节点相对于地面的加速度。

节点质量

Assembled Joint Masses: 集中节点质量（见图 14-29，详细说明见表 14-60）

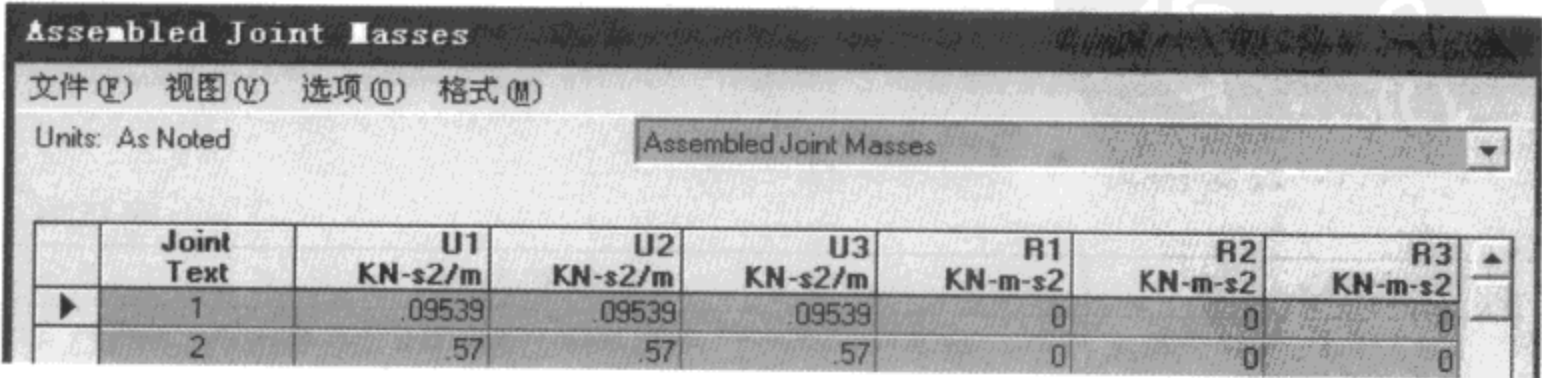


图 14-29

表 14-60

| | |
|-------------------|---|
| Joint | 节点编号 |
| U1、U2、U3, KN-s2/m | 沿局部 1、2、3 轴轴向质量, 单位: 千牛·秒 ² /米 |
| R1、R2、R3, KN-m-s2 | 绕局部 1、2、3 轴旋转惯量, 单位: 千牛·米·秒 ² |

单元输出 (图 14-30)

框架输出

Element Forces-Frames: 单元力-框架 (见图 14-31, 详细说明见表 14-61)

表 14-61

- ☒ 单元输出
- ☒ 框架输出
 - ☒ Table: Element Forces - Frames
 - ☒ Table: Element Joint Forces - Frames
- ☒ 实体输出
 - ☒ Table: Element Stresses - Solids
 - ☒ Table: Element Joint Forces - Solids
- ☒ 对象与单元
 - ☒ Table: Objects And Elements - Joints
 - ☒ Table: Objects And Elements - Frames
 - ☒ Table: Objects And Elements - Solids

| | |
|---------------|---------------------------------|
| Frame | 节点编号 |
| Station | 测站 |
| OutputCase | 输出工况名称 |
| CaseType | 工况类型 |
| StepType | 分步类型 |
| P、V2、V3, KN | 单元轴力, 局部 2 轴、3 轴剪力, 单位: 千牛 |
| T、M2、M3, KN-m | 绕局部 1 轴扭矩、绕局部 2、3 轴弯矩, 单位: 千牛·米 |
| Frame Elem | 框架单元编号 |
| Elem Station | 单元测站 |

图 14-30 单元输出

| Element Forces - Frames | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|------------|-----------|-----------------|---------------|---------------|---------|-------|-------|--------|---------|---------|----------------|---------------|
| 文件(F) 视图(V) 选项(O) 格式(M) | | | | | | | | | | | | | |
| Units: As Noted | | | | | | | | | | | | | |
| | Frame Text | Station m | OutputCase Text | CaseType Text | StepType Text | P KN | V2 KN | V3 KN | T KN-m | M2 KN-m | M3 KN-m | FrameElem Text | ElemStation m |
| ▶ | 1 | 0 | DEAD | LinStatic | | -10.229 | -183 | -027 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| | 1 | 1.8288 | DEAD | LinStatic | | -9.293 | -183 | -027 | 0 | 0492 | 3351 | 1 | 1.8288 |
| | 1 | 3.6576 | DEAD | LinStatic | | -8.358 | -183 | -027 | 0 | 0984 | 6702 | 1 | 3.6576 |

图 14-31

Element Joint Forces-Frames: 单元节点力-框架 (见图 14-32, 详细说明见表 14-62)

| Element Joint Forces - Frames | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|------------|------------|-----------------|---------------|---------------|-------|-------|--------|-----------------------|-----------------------|---------|----------------|--|
| 文件(F) 视图(V) 选项(O) 格式(M) | | | | | | | | | | | | | |
| Units: As Noted | | | | | | | | | | | | | |
| | Frame Text | Joint Text | OutputCase Text | CaseType Text | StepType Text | F1 KN | F2 KN | F3 KN | M1 KN-m | M2 KN-m | M3 KN-m | FrameElem Text | |
| ▶ | 1 | 1 | DEAD | LinStatic | | 183 | 027 | 10.229 | -6.107E-18 | 1.029E-17 | 0 | 1 | |
| | 1 | 2 | DEAD | LinStatic | | 183 | 027 | -8.358 | -0.000000000000000000 | -0.000000000000000000 | 0 | 1 | |

图 14-32

表 14-62

| | |
|------------|--------|
| Frame | 框架编号 |
| Joint | 框架节点编号 |
| OutputCase | 输出工况名称 |

续上表

| | |
|----------------|-------------------------|
| CaseType | 工况类型 |
| StepType | 分步类型 |
| F1、F2、F3, kN | 沿局部 1、2、3 轴轴向力, 单位: 千牛 |
| M1、M2、M3, kN-m | 绕局部 1、2、3 轴弯矩, 单位: 千牛·米 |
| Frame Elem | 框架单元编号 |

实体输出

Element stresses-solids: 单元应力-实体 (见图 14-33, 详细说明见表 14-63)

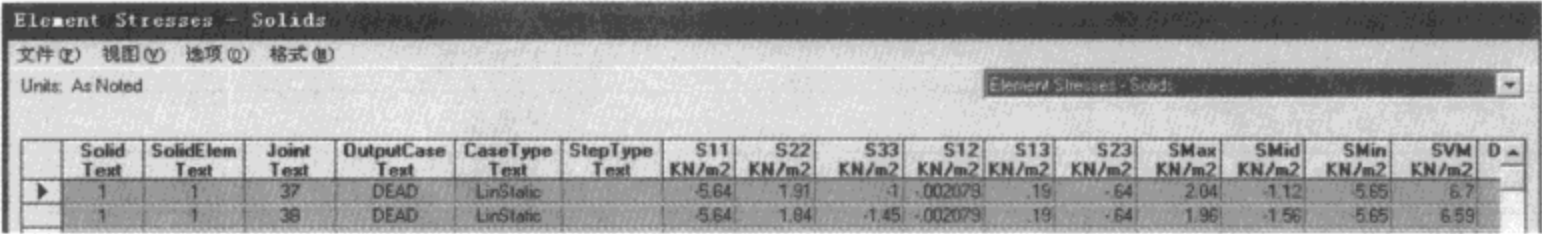
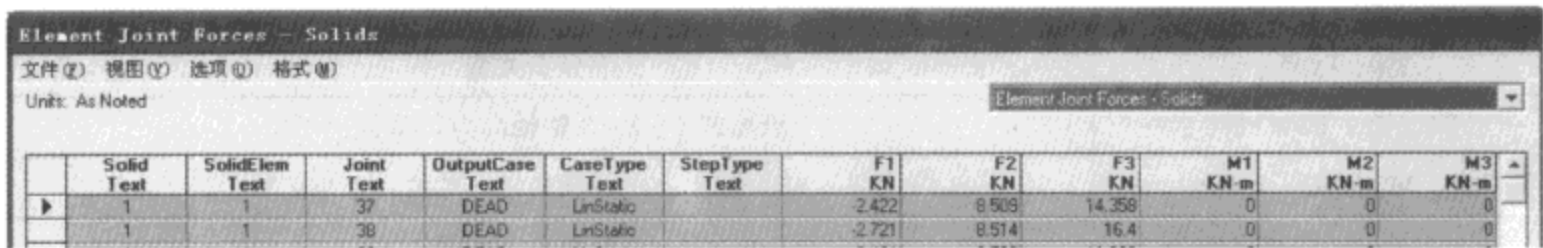


图 14-33

表 14-63

| | |
|----------------------------------|---|
| Solid | 实体标签编号 |
| SolidElem | 实体剖分单元编号 |
| Joint | 节点编号 |
| OutputCase | 输出工况名称 |
| CaseType | 工况类型 |
| StepType | 分步类型 |
| S11、S22、S33、S12、S13、S23 KN/m2 | S11 沿 1 轴方向, 作用于正 1 面和负 1 面上的轴向应力; S22 沿 2 轴方向, 作用于正 2 面和负 2 面上的轴向应力; S33 沿 3 轴方向, 作用于正 3 面和负 3 面上的轴向应力; S12 是按 2 轴方向作用于正 1 面和负 1 面上和按 1 轴方向作用于正 2 面和负 2 面上的剪应力; S13 是按 3 轴方向作用于正 1 面和负 1 面上和按 1 轴方向作用于正 3 面和负 3 面上的剪应力; S23 是按 3 轴方向作用于正 2 面和负 2 面上和按 2 轴方向作用于正 3 面和负 3 面上的剪应力。单位: 千牛·米 ² |
| SMax、SMid、SMin、SVM KN/m2 | SMax 是主应力 1、SMid 是主应力 2、SMin 是主应力 3、最大主剪应力, 单位: 千牛·米 ² |
| DirCosMax1、DirCosMax2、DirCosMax3 | 最大应力 1 方向余弦值、最大应力 2 方向余弦值、最大应力 3 方向余弦值 |
| DirCosMin1、DirCosMin2、DirCosMin3 | 最小应力 1 方向余弦值、最小应力 2 方向余弦值、最小应力 3 方向余弦值 |

Element Joint Forces-solids：单元节点力-实体（见图 14-34，详细说明见表 14-64）



| Solid Text | SolidElem Text | Joint Text | OutputCase Text | CaseType Text | StepType Text | F1 KN | F2 KN | F3 KN | M1 KN-m | M2 KN-m | M3 KN-m |
|------------|----------------|------------|-----------------|---------------|---------------|-------|-------|--------|---------|---------|---------|
| 1 | 1 | 37 | DEAD | LinStatic | | 2.422 | 8.509 | 14.358 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 38 | DEAD | LinStatic | | 2.721 | 8.514 | 16.4 | 0 | 0 | 0 |

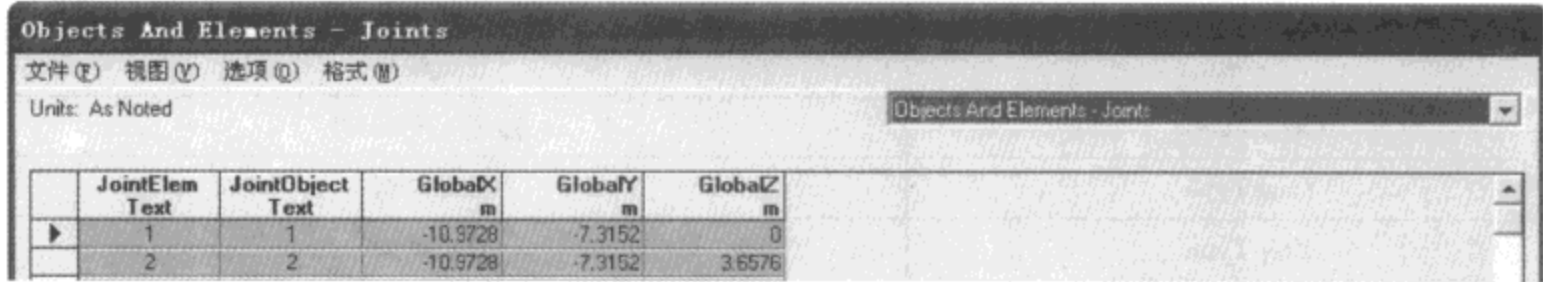
图 14-34

表 14-64

| | |
|----------------|-----------------------|
| Joint | 节点编号 |
| OutputCase | 输出工况名称 |
| CaseType | 工况类型 |
| StepType | 分步类型 |
| F1、F2、F3, KN | 沿局部 1、2、3 轴轴向力，单位：千牛 |
| M1、M2、M3, KN-m | 绕局部 1、2、3 轴弯矩，单位：千牛·米 |

对象与单元

Objects And Elements-Joint：对象与单元-节点（见图 14-35，详细说明见表 14-65）



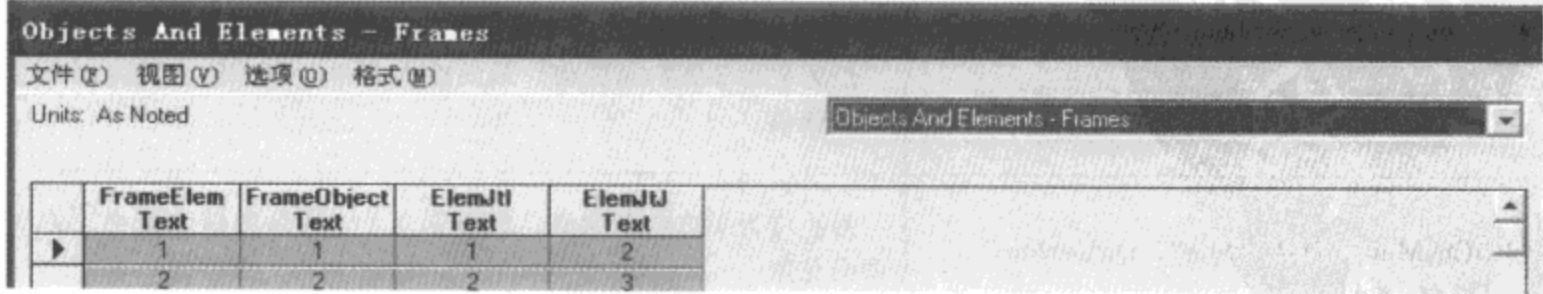
| JointElem Text | JointObject Text | GlobalX m | GlobalY m | GlobalZ m |
|----------------|------------------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 1 | -10.9728 | -7.3152 | 0 |
| 2 | 2 | -10.9728 | -7.3152 | 3.6576 |

图 14-35

表 14-65

| | | | |
|-------------|---------------|-----------|---------------|
| JointElem | 节点单元编号 | GlobalY m | 节点 Y 轴坐标，单位：米 |
| JointObject | 输出对象名称 | GlobalZ m | 节点 Z 轴坐标，单位：米 |
| GlobalX m | 节点 X 轴坐标，单位：米 | | |

Objects And Elements-Frames：对象与单元-框架（见图 14-36，详细说明见表 14-66）



| FrameElem Text | FrameObject Text | ElemJtl Text | ElemJtl Text |
|----------------|------------------|--------------|--------------|
| 1 | 1 | 1 | 2 |
| 2 | 2 | 2 | 3 |

图 14-36

表 14-66

| | | | |
|-------------|--------|---------|--------|
| FrameElem | 框架单元编号 | ElemJtI | 单元起点编号 |
| FrameObject | 框架对象编号 | ElemJtJ | 单元终点编号 |

Objects And Elements-Solid: 对象与单元-实体 (见图 14-37, 详细说明见表 14-67)

| Objects And Elements - Solids | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------------|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 文件(F) 视图(V) 选项(O) 格式(M) | | | | | | | | | | |
| Units: As Noted | | | | | | | | | | |
| | SolidElem Text | SolidObject Text | ElemJt1 Text | ElemJt2 Text | ElemJt3 Text | ElemJt4 Text | ElemJt5 Text | ElemJt6 Text | ElemJt7 Text | ElemJt8 Text |
| ▶ | 1 | 1 | 37 | 38 | 39 | 40 | 6 | 15 | 9 | 18 |
| | 2 | 2 | 6 | 15 | 9 | 18 | 41 | 42 | 43 | 44 |

图 14-37

表 14-67

| | |
|-------------------|-----------------------|
| SolidElem | 实体单元编号 |
| SolidObject | 实体对象编号 |
| ElemJt1、ElemJt2…… | 实体节点 1 编号、节点 2 单元编号…… |

结构输出 (图 14-38)

| |
|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> 结构输出 |
| <input checked="" type="checkbox"/> 基础反力 |
| <input checked="" type="checkbox"/> Table: Base Reactions |
| <input checked="" type="checkbox"/> 振型信息 |
| <input checked="" type="checkbox"/> Table: Modal Periods And Frequencies |
| <input checked="" type="checkbox"/> Table: Modal Load Participation Ratios |
| <input checked="" type="checkbox"/> Table: Modal Participating Mass Ratios |
| <input checked="" type="checkbox"/> Table: Modal Participation Factors |
| <input checked="" type="checkbox"/> Table: Response Spectrum Modal Information |
| <input checked="" type="checkbox"/> 其他输出项 |
| <input checked="" type="checkbox"/> Table: Buckling Factors |
| <input checked="" type="checkbox"/> Table: Total Energy Components |

图 14-38

基础反力

Base Reactions: 基础反力 (见图 14-39, 详细说明见表 14-68)

| Base Reactions | | | | | | | | | | |
|-------------------------|--------------------|------------------|------------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|------------------|------------------|
| 文件(F) 视图(V) 选项(O) 格式(M) | | | | | | | | | | |
| Units: As Noted | | | | | | | | | | |
| | OutputCase Text | CaseType Text | StepType Text | StepNum Unitless | GlobalFX KN | GlobalFY KN | GlobalFZ KN | GlobalMX KN-m | GlobalMY KN-m | GlobalMZ KN-m |
| ▶ | DEAD | LinStatic | | | 2.82E-14 | 4.865E-13 | 989.445 | 2544.8171 | 5089.6343 | 0.00000001133 |
| | MODAL | LinModal | Mode | 1 | 248 | 104.23 | -0.09304 | -325.6916 | 6575 | -612.3462 |
| | MODAL | LinModal | Mode | 2 | 94.170 | 370.624 | 103 | 1791.0010 | 3783.0071 | |

图 14-39

表 14-68

| | |
|-------------------------------------|------------------------------|
| OutputCase | 输出工况名称 |
| CaseType | 工况类型 |
| StepType | 分步类型 |
| StepNum | 分步编号 |
| GlobalFX、GlobalFY、GlobalFZ, KN | 沿整体坐标系 X 轴、Y 轴、Z 轴反力，单位：千牛 |
| GlobalMX、GlobalMY、GlobalMZ, KN-m | 绕整体坐标系 X 轴、Y 轴、Z 轴弯矩，单位：千牛·米 |
| GlobalX、GlobalY、GlobalZ, m | 整体坐标系原点坐标值，单位：米 |
| XcentrodFX、YcentrodFX、ZcentrodFX, m | X 轴方向反力所在质心点的 X、Y、Z 坐标值，单位：米 |
| XcentrodFY、YcentrodFY、ZcentrodFY, m | Y 轴方向反力所在质心点的 X、Y、Z 坐标值，单位：米 |
| XcentrodFZ、YcentrodFZ、ZcentrodFZ, m | Z 轴方向反力所在质心点的 X、Y、Z 坐标值，单位：米 |

振型信息

Modal Periods And Frequencies：振型周期与频率（见图 14-40，详细说明见表 14-69）

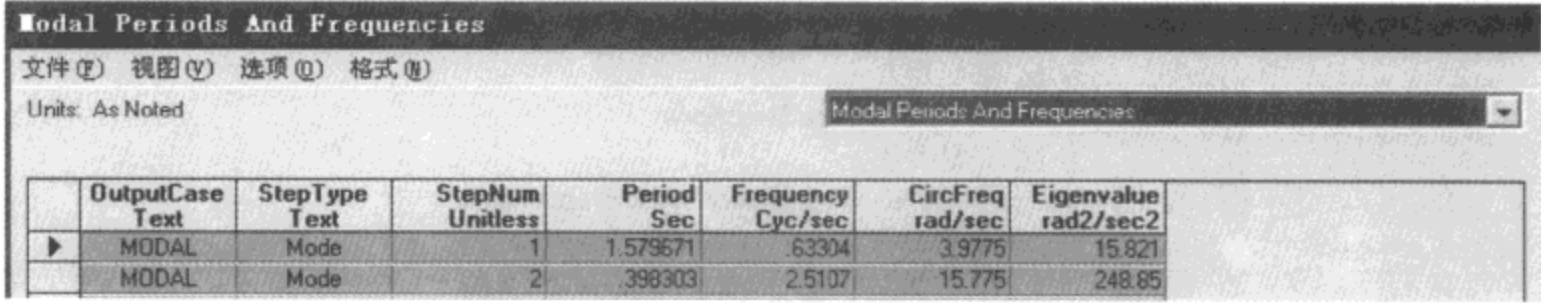


图 14-40

表 14-69

| | |
|-----------------------|--|
| OutputCase | 输出工况名称 |
| StepType | 分步类型 |
| StepNum | 分步编号 |
| Period , Sec | 周期，单位：秒 |
| Frequency, Cyc/sec | 频率，单位：次/秒 |
| CircFreq, rad/sec | 圆频率，单位：弧度/秒 |
| Eigenvalue, rad2/sec2 | 特征值，单位：弧度 ² /秒 ² |

Modal Load Participation Ratios：振型荷载参与比率（见图 14-41，详细说明见表 14-70）

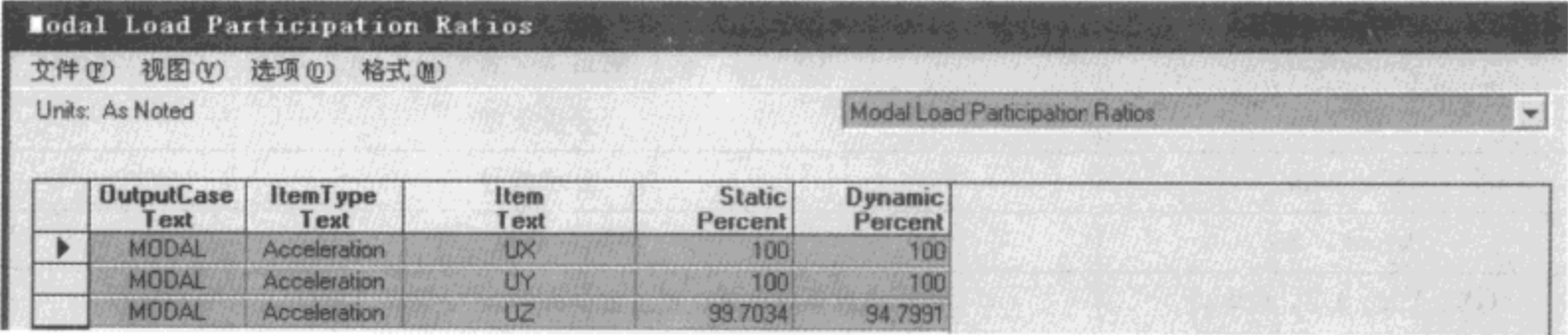


图 14-41

表 14-70

| | | | |
|------------|--------|-----------------|---------|
| OutputCase | 输出工况名称 | Static Percent | 静力参与百分比 |
| Item Type | 项目类型 | Dynamic Percent | 动力参与百分比 |
| Item | 项目方向 | | |

Modal Participating Mass Ratios: 振型质量参与系数 (见图 14-42, 详细说明见表 14-71)

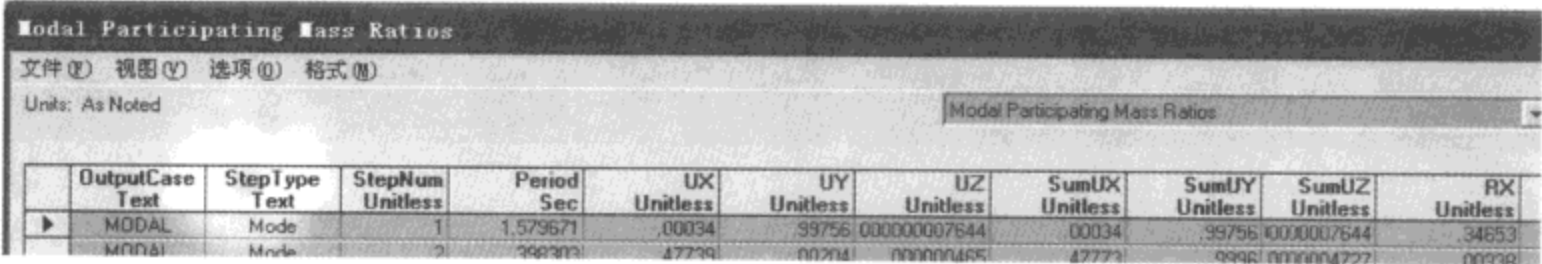


图 14-42

表 14-71

| | |
|-------------------|------------------------------|
| OutputCase | 输出工况名称 |
| Step Type | 分步类型 |
| Step Num | 分步编号 |
| Period , Sec | 周期, 单位: 秒 |
| UX、UY、UZ | 整体坐标系 X、Y、Z 三方向振型质量参与百分比 |
| SumUX、SumUY、SumUZ | 整体坐标系 X、Y、Z 三方向振型质量参与百分比累加值 |
| RX、RY、RZ | 绕整体坐标系 X、Y、Z 三方向振型质量参与百分比 |
| SumRX、SumRY、SumRZ | 绕整体坐标系 X、Y、Z 三方向振型质量参与百分比累加值 |

Modal Participation Factors: 振型参与系数 (见图 14-43, 详细说明见表 14-72)

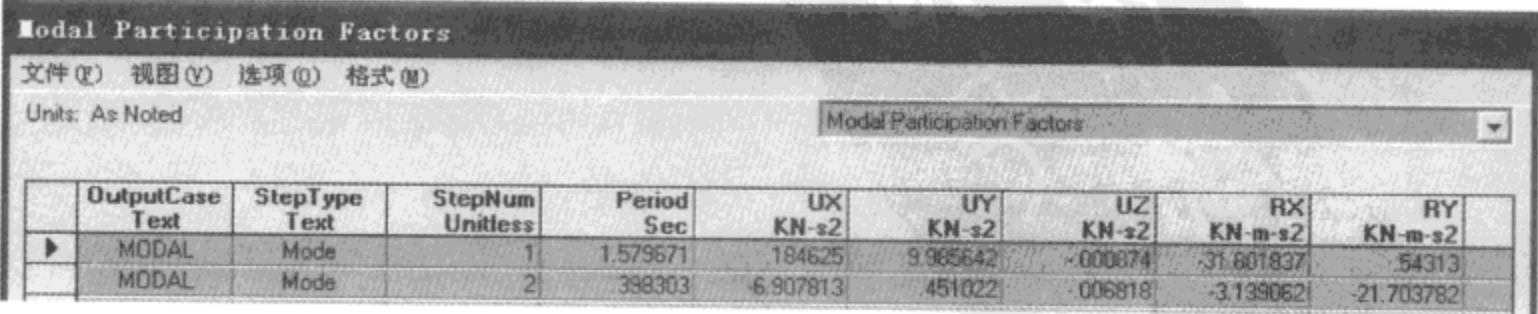


图 14-43

表 14-72

| | |
|--------------------|-------------------------------------|
| OutputCase | 输出工况名称 |
| Step Type | 分步类型 |
| Step Num | 分步编号 |
| Period , Sec | 周期, 单位: 秒 |
| UX、UY、UZ, KN-s2 | 整体坐标系 X、Y、Z 三方向振型参与系数, 单位: 千牛·秒² |
| RX、RY、RZ, KN-m-s2 | 绕整体坐标系 X、Y、Z 三方向振型参与系数, 单位: 千牛·米·秒² |
| ModalMass, KN-m-s2 | 振型质量, 单位: 千牛·米·秒² |
| ModalStiff, KN-m | 振型刚度, 单位: 千牛·米 |

Response Spectrum Modal Information: 反映谱振型信息 (见图 14-44, 详细说明见表 14-73)

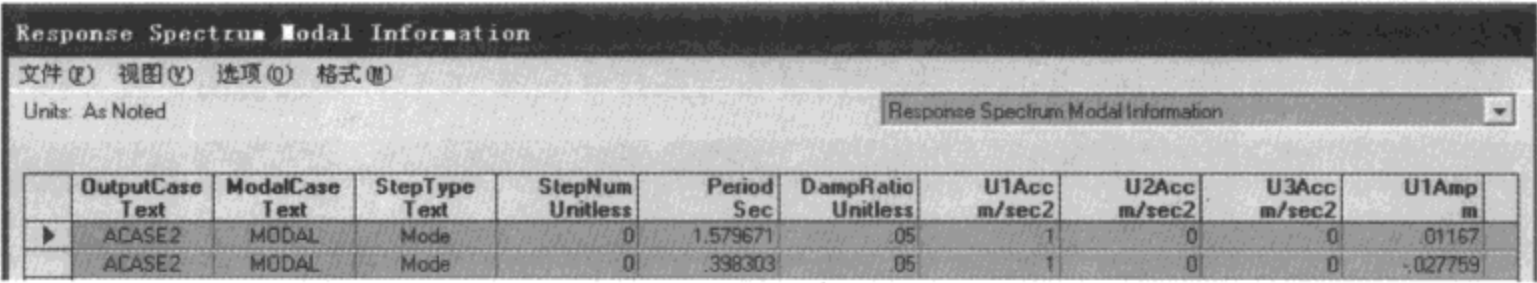


图 14-44

表 14-73

| | |
|---------------------------|--------------------------------|
| OutputCase | 输出工况名称 |
| ModalCase | 振型工况 |
| Step Type | 分步类型 |
| Step Num | 分步编号 |
| Period , Sec | 周期, 单位: 秒 |
| DampRatio | 阻尼比 |
| U1Acc、U2Acc、U3Acc, m/sec2 | 局部坐标 1 轴、2 轴、3 轴方向加速度 单位: 米/秒² |
| U1Amp、U2Amp、U3Amp, m | 局部坐标 1 轴、2 轴、3 轴方向振幅, 单位: 米 |

其他输出项

Buckling Factors: 屈曲系数 (见图 14-45, 详细说明见表 14-74)

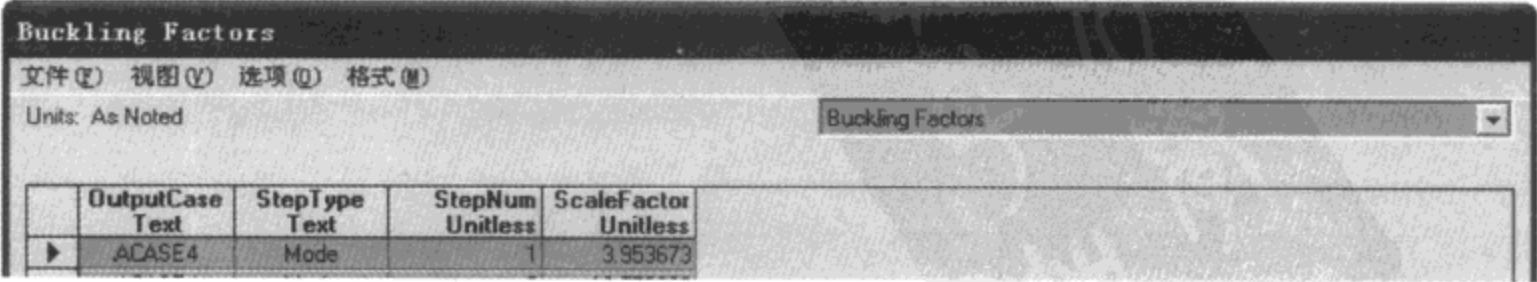


图 14-45

表 14-74

| | | | |
|------------|--------|-------------|--------------|
| OutputCase | 输出工况名称 | Step Num | 分步编号 |
| Step Type | 分步类型 | ScaleFactor | 比例系数，即屈曲安全系数 |

Total Energy Component: 全部能量构成（见图 14-46，详细说明见表 14-75）

| Total Energy Components | | | | | | | | | |
|-------------------------|--------------------|------------------|---------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------|---------------------|---------------|
| 文件(F) 视图(V) 选项(O) 格式(M) | | | | | | | | | |
| Units: As Noted | | | | | | | | | |
| Total Energy Components | | | | | | | | | |
| | OutputCase Text | CaseType Text | Input KN-m | Kinetic KN-m | Potential KN-m | ModalDamp KN-m | LinkDampers | LinkHystrtc KN-m | Error KN-m |
| ▶ | ACASE1 | LinMSSlat | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | ACASE2 | LinRespSpec | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

图 14-46

表 14-75

| | |
|-------------------|----------------|
| OutputCase | 输出工况名称 |
| Case Type | 分步类型 |
| Input , KN-m | 输入能量，单位：千牛·米 |
| Kinetic, KN-m | 动能，单位：千牛·米 |
| Potential , KN-m | 势能，单位：千牛·米 |
| ModalDamp, KN-m | 振型阻尼，单位：千牛·米 |
| LinkDampers | 连接单元阻尼 |
| LinkHystrtc, KN-m | 连接单元滞洄，单位：千牛·米 |
| Error, KN-m | 错误，单位：千牛·米 |

(2) 设计结果 (Design Results)

关于设计数据表格中系数的详细信息可以参看设计章节。

14.2.2 设置表格格式(*.fmt)及过滤器的使用

SAP2000 对数据表格显示的格式或者数据可以进行个性化的设置，便于用户针对需要对输出的表格进行调整。系统提供了 *.fmt 格式文件用于将用户设置的表格格式进行保存及提取，过滤器可以设置条件将数据有选择性地输出。

例如，将运行分析完成的第二章例题模型中编号为 1 的梁进行输出，输出条件为所有荷载组合工况下跨端（0m 处与 8m 处）的内力，并且主轴内力数据位置前移，将输出项改为汉字，输出表格如图 14-47 所示，并将此输出格式保存。

操作步骤如下：

第一步：选择构件，显示表格内力数据

首先，模型分析完成后，点击【选择】>【选择】>【标签】命令，在对话框中按标签

选择编号为 1 的梁，如图 14-48 所示。选择完毕点击【确定】按钮。

Element Forces - Frames

文件(F) 视图(V) 选项(O) 格式(M)

Units: As Noted

Filter: Station NOT BETWEEN 0.5 and 7.5

| 框架 Text | 单元 m | 输出工况 Text | 工况类型 Text | 轴力 KN | 主轴弯矩 KN-m | 主轴剪力 KN | 次轴弯矩 KN-m | 次轴剪力 KN |
|------------|---------|--------------|--------------|----------|--------------|------------|--------------|------------|
| 1 | 0 | DSTL16 | Combination | -947 | 60.6193 | -64.18 | 0.93 | 0.76 |
| 1 | 8 | DSTL16 | Combination | 376 | -133.5646 | 80.767 | 1.07 | -0.91 |
| 1 | 0 | DSTL17 | Combination | 947 | 60.0975 | -64.261 | -0.93 | 0.76 |
| 1 | 8 | DSTL17 | Combination | 376 | -134.7683 | 81.536 | 1.07 | -0.91 |
| 1 | 0 | DSTL18 | Combination | -947 | 50.5604 | -53.476 | 0.93 | 0.76 |
| 1 | 8 | DSTL18 | Combination | 376 | -111.2035 | 67.241 | 1.07 | -0.91 |
| 1 | 0 | DSTL19 | Combination | 947 | 50.0286 | -53.957 | -0.93 | 0.76 |
| 1 | 8 | DSTL19 | Combination | 376 | -112.4082 | 68.013 | 1.07 | -0.91 |
| 1 | 0 | DSTL20 | Combination | -947 | 53.7239 | -62.637 | 0.93 | 0.76 |
| 1 | 8 | DSTL20 | Combination | 376 | -136.5637 | 82.276 | 1.07 | -0.91 |
| 1 | 0 | DSTL21 | Combination | 947 | -53.2882 | -62.718 | -0.93 | 0.76 |
| 1 | 8 | DSTL21 | Combination | 376 | -133.7744 | 83.047 | 1.07 | -0.91 |
| 1 | 0 | DSTL22 | Combination | -947 | -57.4397 | -65.723 | 0.93 | 0.76 |
| 1 | 8 | DSTL22 | Combination | 376 | -126.5595 | 79.258 | 1.07 | -0.91 |
| 1 | 0 | DSTL23 | Combination | 947 | -66.9669 | -65.803 | -0.93 | 0.76 |
| 1 | 8 | DSTL23 | Combination | 376 | -129.7642 | 80.03 | 1.07 | -0.91 |
| 1 | 0 | DSTL24 | Combination | -947 | -43.681 | -51.934 | 0.93 | 0.76 |
| 1 | 8 | DSTL24 | Combination | 376 | -116.2085 | 68.75 | 1.07 | -0.91 |
| 1 | 0 | DSTL25 | Combination | 947 | -43.1493 | -52.014 | -0.93 | 0.76 |
| 1 | 8 | DSTL25 | Combination | 376 | -117.4133 | 69.826 | 1.07 | -0.91 |

记录: 1 of 54

完成

图 14-47 表格数据输出

通过标签选择

画面类型

☒ 选择对象 ☐ 取消选择对象

Select This Type Of Object

对象类型: Frame

Select Options

☒ Select a Single Object

☐ Select Multiple Objects By Specifying Increment

☐ Select Multiple Objects From List

Select These Objects

对象标签: 1

Select Specified Items

确定 取消

图 14-48 通过标签选择对话框

点击【显示】>【显示表格】命令，在弹出的对话框中选择框架构件内力输出项，如图 14-49 所示。

Choose Tables for Display

编辑(E)

☐ 模型定义 [0 of 72 tables selected]

- ☐ 系统数据
- ☐ 属性定义
- ☐ 荷载定义
- ☐ 其他定义
- ☐ 分析工况定义
- ☐ 桥数据
- ☐ 连接属性数据
- ☐ 节点指定
- ☐ 框架指定
- ☐ 面指定
- ☐ 选项/首选项数据
- ☐ 其他数据

☒ 分析结果 [1 of 16 tables selected]

- ☐ 节点输出
- ☒ 单元输出
 - ☒ 框架输出
 - ☒ Table: Element Forces - Frames
 - ☐ Table: Element Joint Forces - Frames
 - ☐ 面积输出
 - ☐ 对象与单元
- ☐ 结构输出

荷载工况(荷载定义)

选择荷载工况...

4 of 4 Selected

分析工况(结果)

选择分析工况...

27 of 32 Selected

修改/显示选项

选项

☒ 仅选择的

☐ 显示未格式化的

命名集

保存命名集...

显示命名集...

删除命名集(D)

OK

取消

表格式文件... Current Table Format File: D:\modeltest\12.txt

图 14-49

点击对话框右侧【选择分析工况】按钮，在弹出的对话框中选择所有组合工况。
两次点击【OK】键，弹出框架单元内力数据表格对话框，如图 14-50 所示。

| Frame Text | Station m | Output Case Text | Case Type Text | P KN | V2 KN | V3 KN | T KN-m | M2 KN-m |
|------------|-----------|------------------|----------------|------|---------|-------|--------|---------|
| 1 | 0 | DSTL1 | Combination | 0 | -72.248 | 0 | -3076 | 0 |
| 1 | 5 | DSTL1 | Combination | 0 | -67.494 | 0 | -3076 | 0 |
| 1 | 1 | DSTL1 | Combination | 0 | -62.74 | 0 | -3076 | 0 |
| 1 | 1.5 | DSTL1 | Combination | 0 | -57.987 | 0 | -3076 | 0 |
| 1 | 2 | DSTL1 | Combination | 0 | -53.233 | 0 | -3076 | 0 |
| 1 | 2 | DSTL1 | Combination | 0 | -24.722 | 0 | -0928 | 0 |
| 1 | 2.5 | DSTL1 | Combination | 0 | -19.968 | 0 | -0928 | 0 |
| 1 | 3 | DSTL1 | Combination | 0 | -15.215 | 0 | -0928 | 0 |
| 1 | 3.5 | DSTL1 | Combination | 0 | -10.461 | 0 | -0928 | 0 |
| 1 | 4 | DSTL1 | Combination | 0 | -5.707 | 0 | -0928 | 0 |
| 1 | 4 | DSTL1 | Combination | 0 | 27.615 | 0 | -116 | 0 |
| 1 | 4.5 | DSTL1 | Combination | 0 | 32.368 | 0 | -116 | 0 |
| 1 | 5 | DSTL1 | Combination | 0 | 37.122 | 0 | -116 | 0 |
| 1 | 5.5 | DSTL1 | Combination | 0 | 41.876 | 0 | -116 | 0 |
| 1 | 6 | DSTL1 | Combination | 0 | 46.629 | 0 | -116 | 0 |
| 1 | 6 | DSTL1 | Combination | 0 | 72.282 | 0 | 5172 | 0 |
| 1 | 6.5 | DSTL1 | Combination | 0 | 77.036 | 0 | 5172 | 0 |
| 1 | 7 | DSTL1 | Combination | 0 | 81.789 | 0 | 5172 | 0 |
| 1 | 7.5 | DSTL1 | Combination | 0 | 86.543 | 0 | 5172 | 0 |
| 1 | 8 | DSTL1 | Combination | 0 | 91.297 | 0 | 5172 | 0 |

图 14-50 单元内力数据表格对话框

第二步：修改数据表格式


在框架单元内力数据表格对话框上部菜单栏点击【格式】命令，弹出修改/显示数据库表格格式对话框（图 14-51）。

| Item | Field Name | Operator | Filter Value |
|------|------------|---------------|------------------------|
| 1 | Printed | 框架 (Frame) | None |
| 2 | Printed | 车站 (Station) | NotBetween 0.5 and 7.5 |
| 3 | Printed | 输出工况 (Output) | None |
| 4 | Printed | 工况类型 (CaseTy) | None |
| 5 | Printed | 轴力 (P) | None |
| 6 | Printed | 主弯矩 (M3) | None |
| 7 | Printed | 主剪力 (V2) | None |
| 8 | Printed | 次弯矩 (M2) | None |
| 9 | Printed | 次剪力 (V3) | None |
| 10 | Printed | 扭矩 (T) | None |
| 11 | Printed | FrameElem | None |
| 12 | Printed | ElemStation | None |

图 14-51 修改/显示数据库表格格式对话框

首先修改表格域名称。对话框右上角的表格中显示了当前数据表所有输出项，选择第一行“Frame”，勾选左上方【修改域名】，然后选择力的输出项，域名项，在输入域中键入“框架”。同法，将其他表格域名进行翻译更改，如图 14-51 所示。

然后设置过滤。过滤的作用是通过用户通过输入操作项（Operator）设置过滤类型，例如等于、大于、小于或范围以内、范围以外等，在过滤值范围（Filter Value）中输入数值范围，从而控制显示数据。本例中，构件长度为 8m，测站间距为 0.5m，因此需要显示的端部表示为 0.5~7.5m 范围以外的测站。在右上角的表格选择测站一行，在数据表格操作列（Operator）中点击出下拉菜单，选择 **NotBetween**（在范围以外）项。在滤值范围（Filter Value）中输入“0.5 and 7.5”。

调整输出项布置顺序。选择 M3（主弯矩）行，点击对话框右侧方向按钮，将其位置向上移动至 P 轴力下方。按此方法将 V2（主剪力）、M2（次弯矩）、V3（次剪力）调整至如图 14-51 所示布置顺序。

同时，用户还可以设置表格各列数据的排列顺序，在对话框下方表格排序按这些域排序区域中选择表格列，勾选右侧勾选框，可以使该列表格中数据按大小升序或降序排列。

最后，保存当前表格格式。点击对话框右下方【保存表格格式到文件】按钮，即可将当前表格格式保存为 .fmt 格式文件，将文件名定为“report”。点击【OK】，弹出的数据表格显示如图。当用户再次进行构件端部内力表格数据输出时，就可以调用保存过的 .fmt 格式文件（图 14-52）。

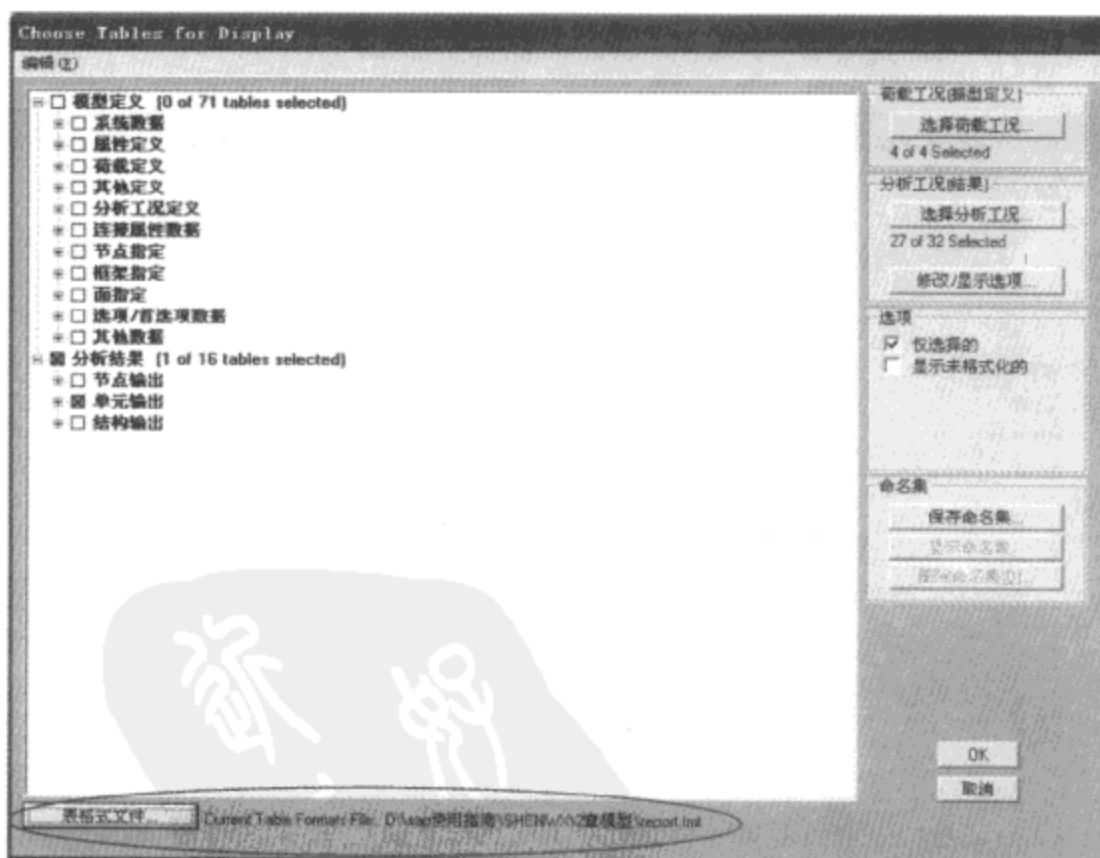


图 14-52 内力表格数据输出对话框

所保存的 .fmt 格式文件除了可以在数据表格显示中调用外，在【打印表格】命令设置以及定制书写报告器命令设置对话框中都可以进行调用（参见相应章节）。

注意：设置的表格格式只针对所保存表格输出的类型。例如，本节例题中所保存的格式文件为梁构件内力输出，在今后调用该格式时只能针对同样输出类型的表格，即梁内力输出数据表格。

14.3 分析、设计结果数据文件输出

系统分析、设计结果可以直接打印到文档输出，并且可以导出为数据库文件（*.mdb）或者电子表格（*.xls）进行输出。

14.3.1 打印表格输出

当系统运行分析完成后，点击【文件】>【打印表格】命令，弹出 Choose Tables for Printing 对话框（图 14-53）。

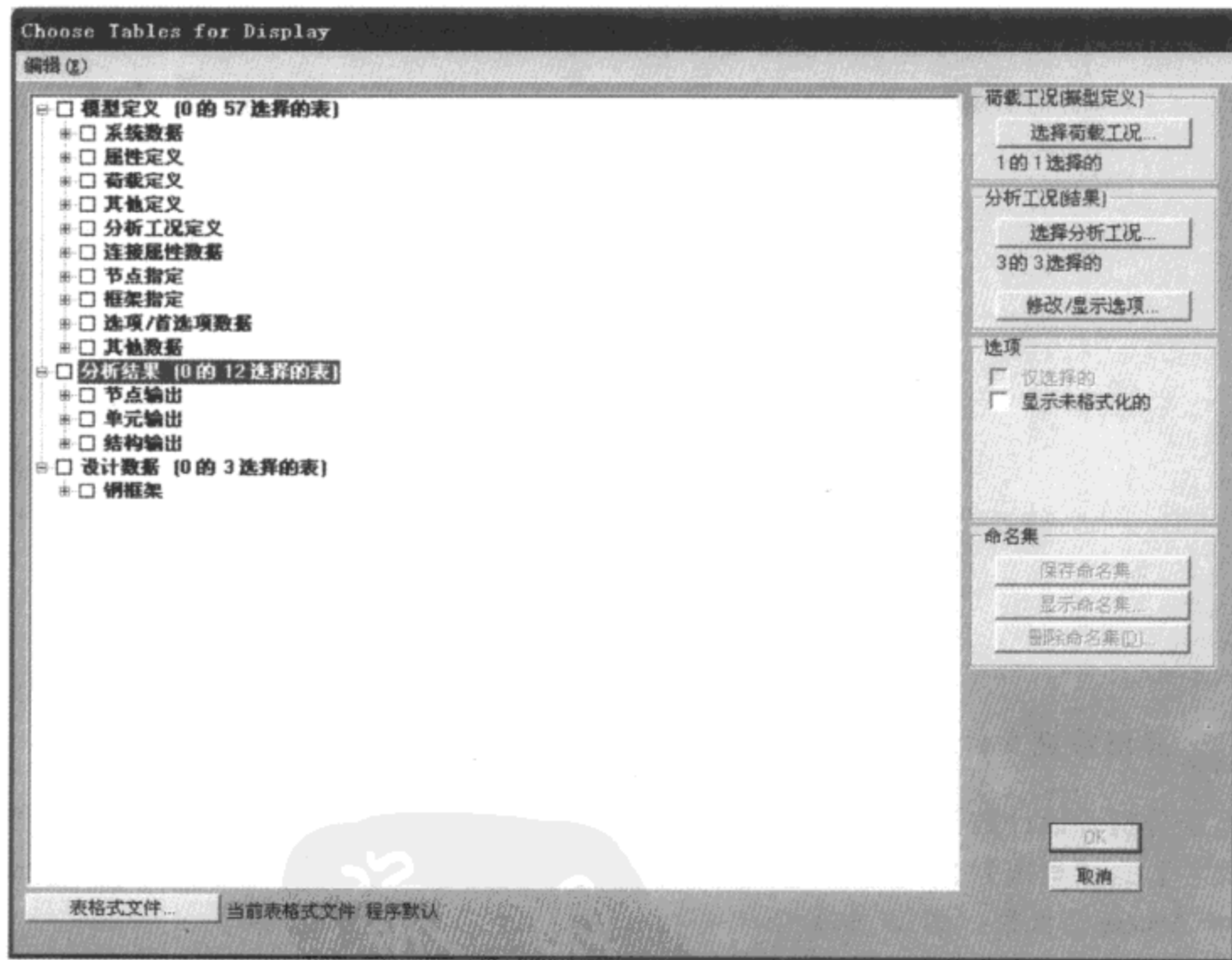


图 14-53 Choose Tables for Printing 对话框

树状图的内容及对话框使用可以参见表格显示数据对话框章节内容。用户选择需要打印的选项，输出类型选择文档类型或者 TXT 文档。

RTF (Rich Text Format) 文档、TXT 文档分别如图 14-54、图 14-55 所示。

Table: Base Reactions, Part 2 of 4

| OutputCase | StepType | StepNum | GlobalMZ | GlobalX | GlobalY | GlobalZ | XCentroidF | YCentroidF |
|------------|----------|-----------|------------|---------|---------|---------|-------------|------------|
| Text | Text | Unitless | KN-m | m | m | m | X | Y |
| DEAD | | | -3.211E-15 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 3.078E+17 | -26.00960 |
| MODAL | Mode | 1.000000 | -3.007E-08 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 6658433.32 | 5.29167 |
| MODAL | Mode | 2.000000 | 3249.0203 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 5.471E-10 | 49.42528 |
| MODAL | Mode | 3.000000 | -1.147E-09 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | -1582241020 | 7.58954 |
| MODAL | Mode | 4.000000 | -2441.3108 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 9.638E-11 | 3.58596 |
| MODAL | Mode | 5.000000 | 3045.7016 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 6.780E-10 | -5.84881 |
| MODAL | Mode | 6.000000 | 9.272E-10 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 9247587.01 | 4.55547 |
| MODAL | Mode | 7.000000 | 3167.8318 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | -9.955E-10 | -8.37774 |
| MODAL | Mode | 8.000000 | -2842.8131 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | -6.791E-09 | -9.50254 |
| MODAL | Mode | 9.000000 | 2379.3488 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | -3.664E-09 | -13.99934 |
| MODAL | Mode | 10.000000 | 3.714E-08 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 13843165.43 | 1.18967 |
| MODAL | Mode | 11.000000 | 1083.2847 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 1.846E-07 | -13.41772 |
| MODAL | Mode | 12.000000 | 9107.1275 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | -6.918E-09 | 7.14269 |
| DSTL1 | | | -4.335E-15 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 4.155E+17 | -35.11296 |

图 14-54 RTF 文档

SAP2000 v10.0.3 4-24-06 14:42:03

Table: Assembled Joint Masses

| Joint | U1 | U2 | U3 | R1 | R2 | R3 |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Text | KN-s2/m | KN-s2/m | KN-s2/m | KN-m-s2 | KN-m-s2 | KN-m-s2 |
| 1 | 0.51 | 0.51 | 0.51 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 2 | 2.65 | 2.65 | 2.65 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 3 | 0.48 | 0.48 | 0.48 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 4 | 0.51 | 0.51 | 0.51 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 5 | 3.67 | 3.67 | 3.67 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 6 | 0.67 | 0.67 | 0.67 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 7 | 0.51 | 0.51 | 0.51 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 8 | 2.65 | 2.65 | 2.65 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 9 | 1.31 | 1.31 | 1.31 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 10 | 0.51 | 0.51 | 0.51 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 11 | 3.67 | 3.67 | 3.67 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 12 | 0.67 | 0.67 | 0.67 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 13 | 0.51 | 0.51 | 0.51 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 14 | 4.69 | 4.69 | 4.69 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 15 | 0.86 | 0.86 | 0.86 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 16 | 0.51 | 0.51 | 0.51 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 17 | 3.67 | 3.67 | 3.67 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 18 | 2.33 | 2.33 | 2.33 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |

图 14-55 TXT 文档

14.3.2 导出数据文件

系统分析、设计数据可以导出为数据库 (*.mdb) 文件和电子表格 (*.xls) 文件。点击【文件】>【导出】>【SAP2000 MS Access 数据库.mdb 文件】命令，弹出 Choose Tables for Access 对话框（图 14-56）。

用户选择需要输出的选项，将数据导出为 Access 数据库文件（图 14-57）。数据库输出项分类数据可以参见表格显示数据章节。

点击【文件】>【导出】>【SAP2000 MS Excel 表格.xls 文件】命令，弹出 Choose Tables for Excel 对话框（图 14-58）。

表格分页内容与表格显示数据对话框（图 14-58）中的一致。用户选择需要输出的选项，将数据导出为 Excel 数据库文件。数据库输出项分类数据可以参见表格显示数据章节。

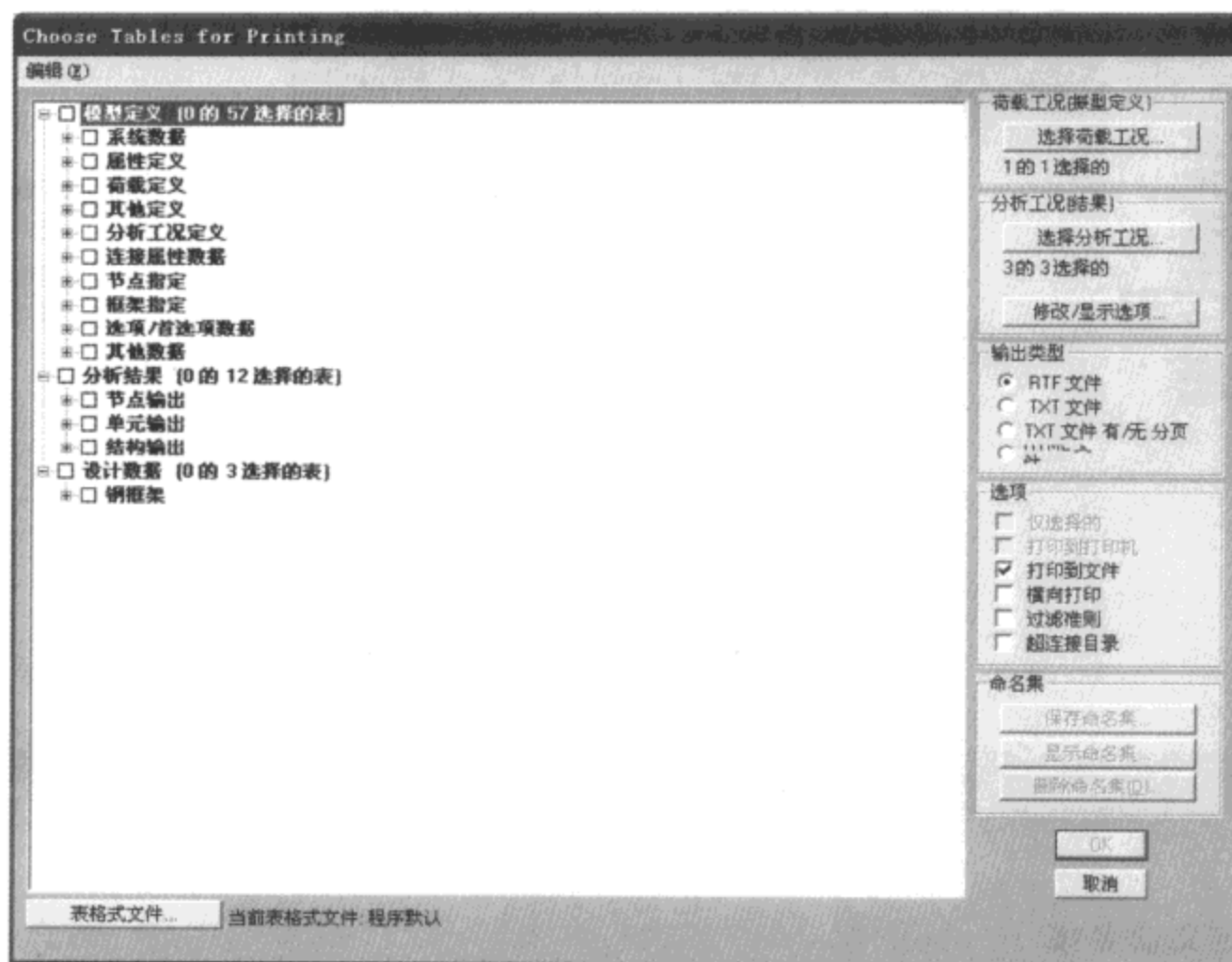


图 14-56 Choose Tables for Access 对话框

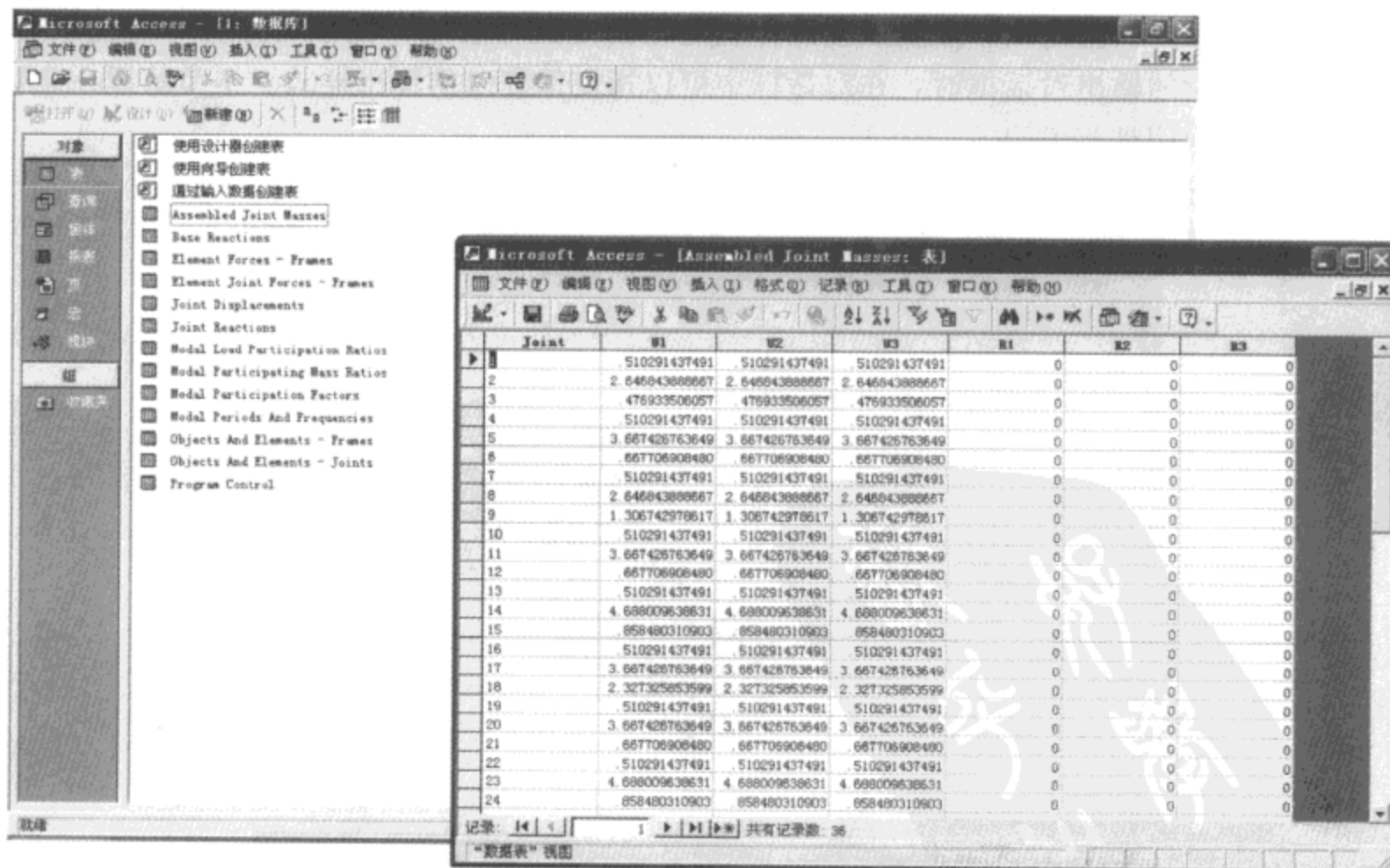


图 14-57 导出 Access 数据库文件

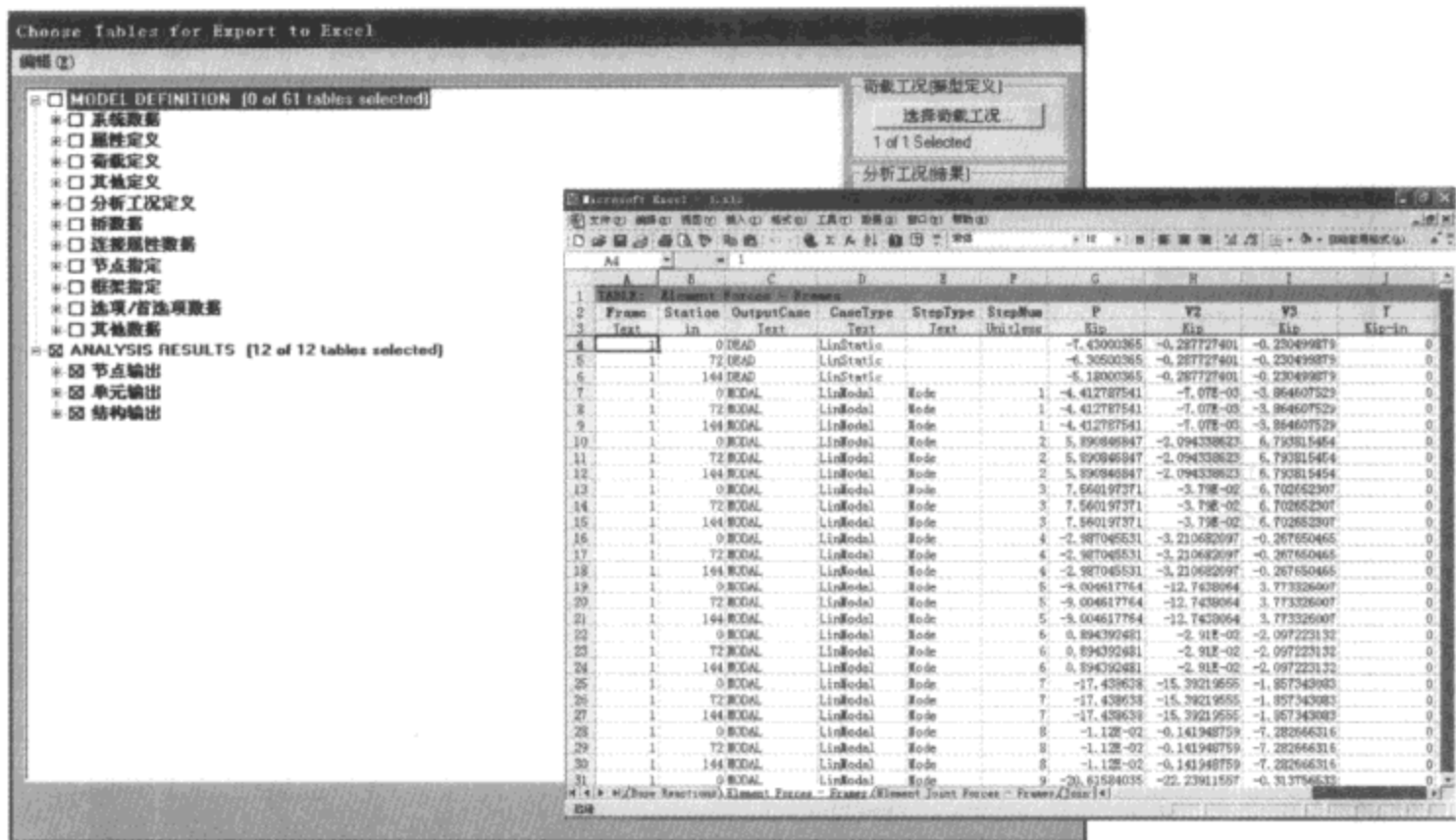


图 14-58 导出 Excel 文件

14.3.3 定义命名集

定义命名集功能可以将用户设定的表格输出样式保存，以便在进行表格显示输出或者表格打印输出时对表格数据输出项的选定。用户可以对打印输出表格、虚功输出、Pushover 输出、节点时程反映谱输出、多步工况函数轨迹输出定义命名集。当系统运行分析完成后，用户在显示相应的输出对话框时，在对话框中可以指定保存过的输出样式。本节将以一个数据表格命名集为例进行说明。

现为一个已完成分析、设计的钢框架模型数据定义命名集，如图 14-59 所示。

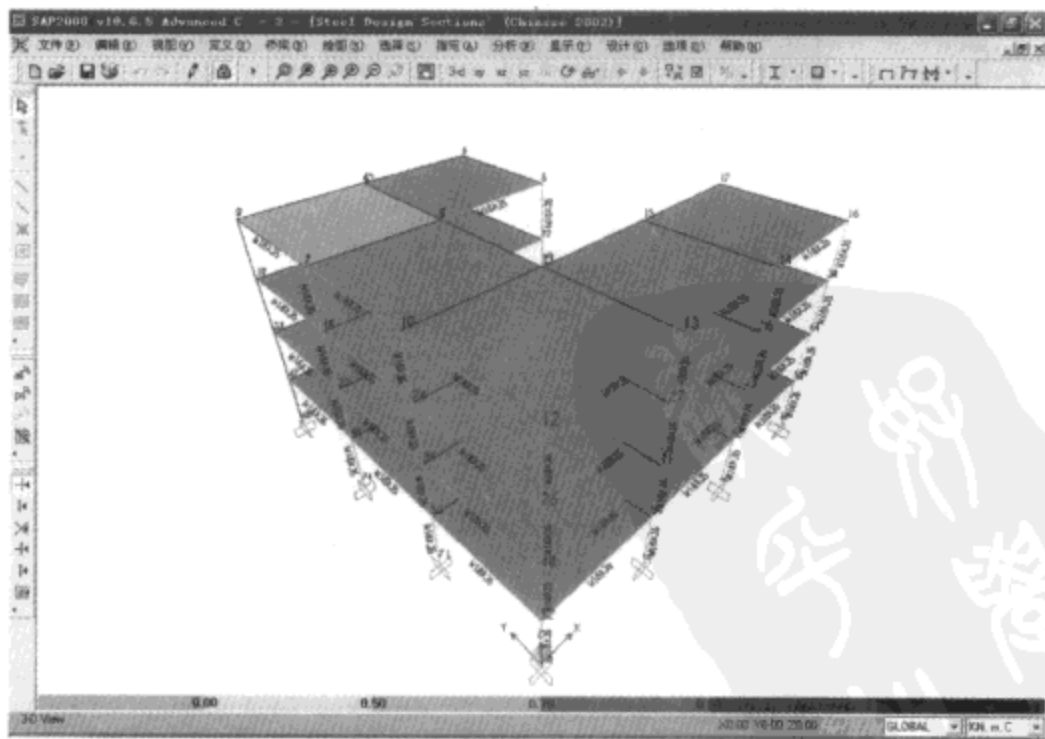


图 14-59 完成分析、设计的模型

为了将结果数据分类打印，将命名集定义为两类：结构分析总信息（ANALYSIS）和构件设计信息（DESIGN）。结构分析总信息包括质量、周期、质量参与系数以及分析工况定义等，构件设计信息包括框架构件的设计信息等。

首先定义结构总信息命名集，点击【定义】>【命名集】>【表】命令，弹出 Define Database Table Named Sets 对话框（图 14-60）。

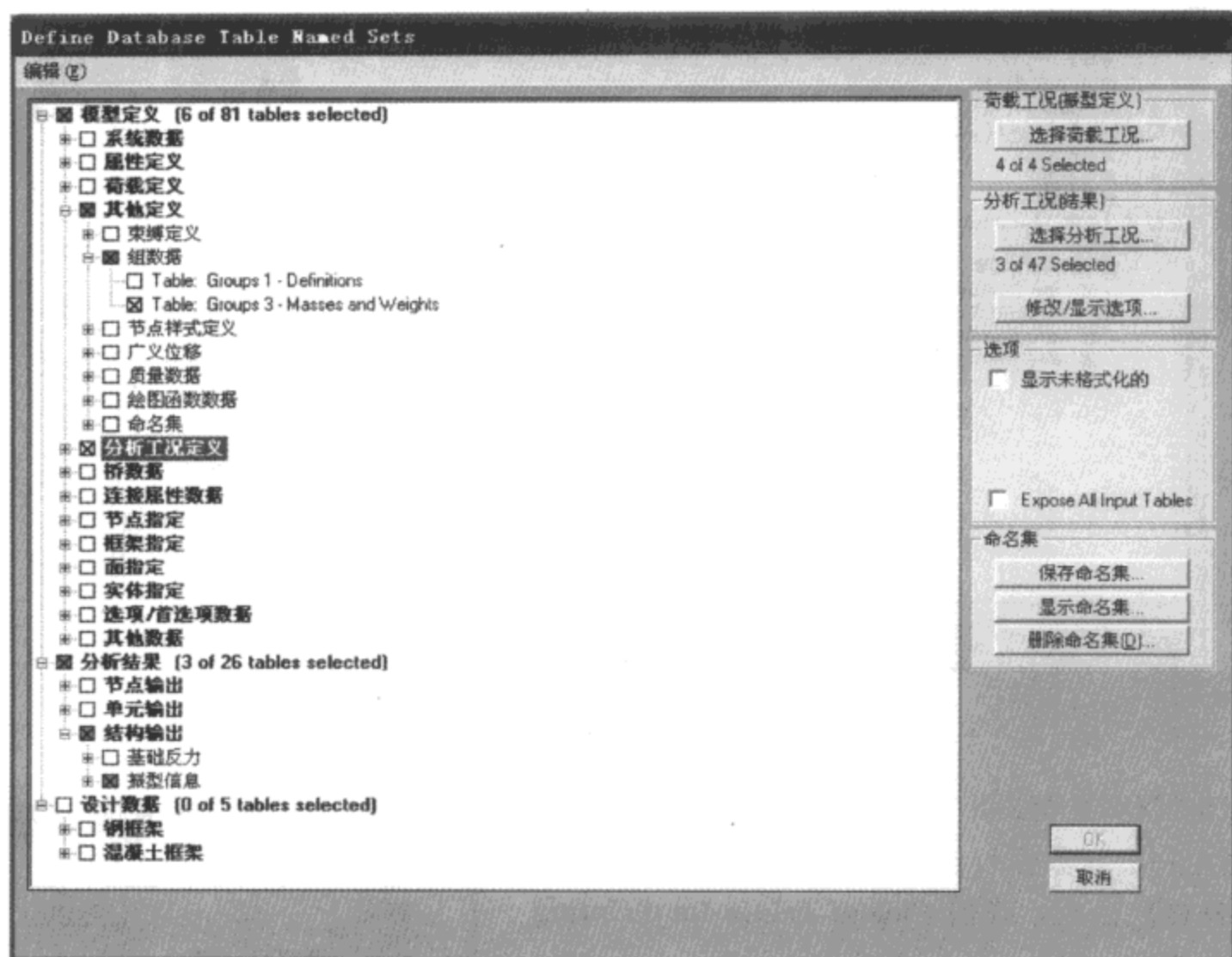


图 14-60 Define Database Table Named Sets 对话框

在数据树状图中勾选其他定义项中的质量数据、分析工况定义、分析结果项中的振型信息，如图所示。选择后点击右侧【保存命名集】按钮，弹出 Database Table Named Sets 对话框（图 14-61）。

在输入框键入“ANALYSIS”，点击右侧【Add New DBT Set】按钮，点击【OK】，返回 Define Database Table Named Sets 对话框。在对话框中选择钢结构设计数据项，如图 14-62 所示。

选择后点击右侧【保存命名集】按钮，再次弹出 Database Table Named Sets 对话框，键入“Design”名称（图 14-63）。

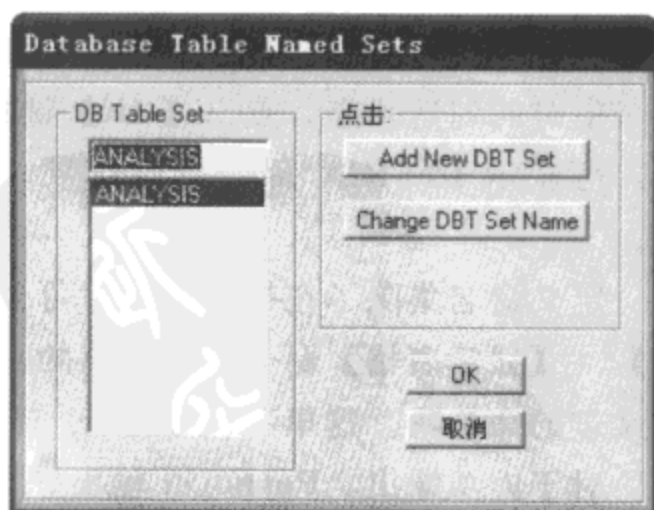


图 14-61 Database Table Named Sets 对话框

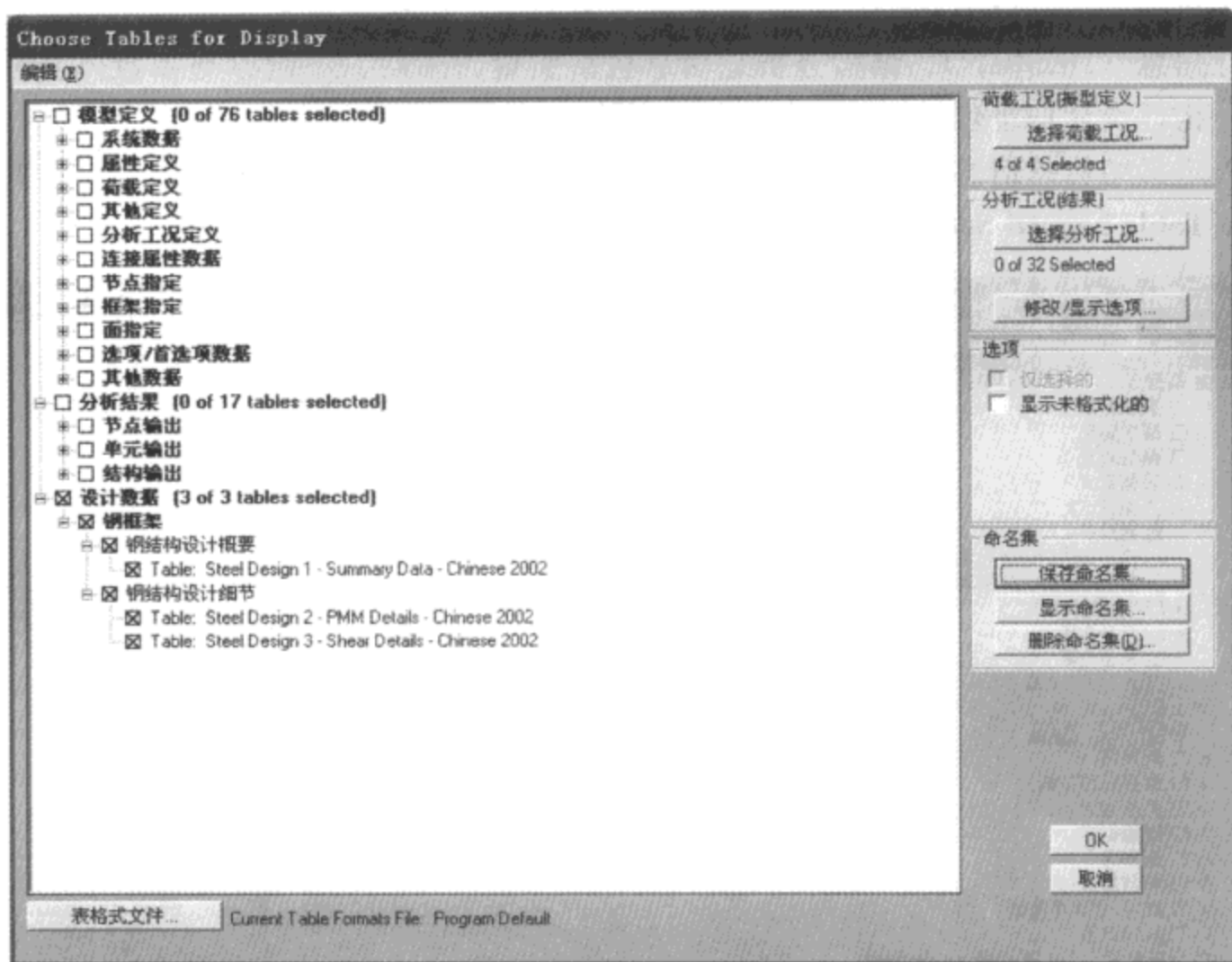


图 14-62 Define Database Table Named Sets 对话框

点击【OK】键退出对话框。命名集定义完成。

当用户进行数据打印输出时，点击【文件】>【打印表格】命令，弹出 Choose Tables for Printing 对话框（图 14-64）。

在对话框中，点击右侧【显示命名集】按钮，弹出 Database Table Named Sets 对话框。选择 ANALYSIS 名称，则树状图显示为定义 ANALYSIS 命名集时的勾选状态，点击【OK】键执行打印。同理，可显示 DESIGN 命名集勾选项，进行打印输出。

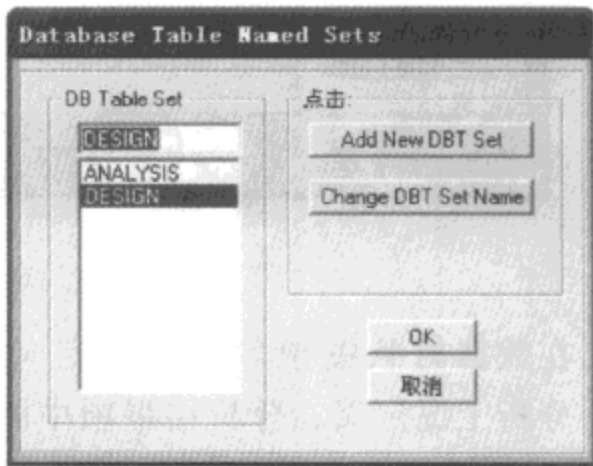


图 14-63 Database Table Named Sets 对话框

定义命名集除了在打印输出时可以使用以外，还可以在显示表格输出中使用。点击【显示】>【显示表格】命令，在弹出的数据树状图中点击【显示命名集】按钮，同样可以使用定义过的命名集。这里不再详述。

对于虚功输出、Pushover 输出、节点时程反应谱输出、多步工况函数轨迹输出定义命名集的方法与数据表格树状图的是一致的，只是设置输出的对话框内容有所不同。关于特殊工况输出设置对话框的介绍可以参见相应分析工况章节。



图 14-64 Choose Tables for Printing 对话框

14.4 特殊输出

特殊输出是指 SAP2000 提供的对生成数据的二次编辑输出功能。例如察看一组构件的合力或者节点之间的相对位移，可以通过 SAP2000 提供的截面切割及广义位移定义实现。除此以外，对于输出计算报告书的格式，用户也可以根据需要通过使用定制书写报告器命令对其进行编辑、排版。本节主要对这些功能进行介绍。

14.4.1 截面切割与广义位移

用户可以通过组的定义，实现对系统分析数据的二次编辑输出。例如对模型某个位置切割面的综合内力输出，或者模型某两个节点的相对位移。此功能在系统中的命令体现为截面切割和广义位移。

(1) 截面切割

截面切割是一种力/应力输出方式，用于显示结构中某些位置的合力或应力。具体操作时有两种方法，第一种是定义截面切割组法，下面称为方法一；第二种是绘制法，下面称为方法二。方法一可以求出一组构件的合力，可以为某些特殊情况提供一个快捷求合力的方法；方法二可以绘出某些对象在某一切割位置处的应力或合力，该方法不仅可求出合力，也

可给出面对象或者实体对象沿某个切割面的应力分布。

方法一

如图 14-65 所示的钢框架-支撑结构，欲求出底层左侧两个柱的柱顶在 X 向地震力作用下的剪力，一种直接的方法是在分析结果数据中查找并求和，但是对于实际工程这种方法可能比较繁琐。截面切割的方法一是处理这类求和的简捷方法。

1) 定义组

点击【定义】>【成组】命令，弹出定义组对话框（图 14-66），定义一个名为 COLUMN 的新组。

注意：截面切割以及用于截面切割的组的定义不要在手工网格划分之前进行，建议在分析完成之后进行。

2) 将求和对象指定到组中

在第一层的平面视图下，选中求合力的两个柱（轴线 X1），注意，要把柱顶的两个点也选中，SAP2000 求和时需要用到这两个点的位置。此时 SAP2000 将对柱顶部的剪力求和。如果需要对柱底部的剪力求和，则要选中柱底部的点，然后点击【指定】>【组的名称】，弹出指定/定义组名称对话框（图 14-67），在对话框的成组区域中高亮显示组名 COLUMN。点击【确定】按钮，退出该对话框。

3) 定义截面切割

点击【定义】>【截面切割】命令，弹出截面切割对话框，点击【添加截面切割】按钮，打开截面切割数据对话框（图14-68）。对话框说明见表 14-76～表 14-82。

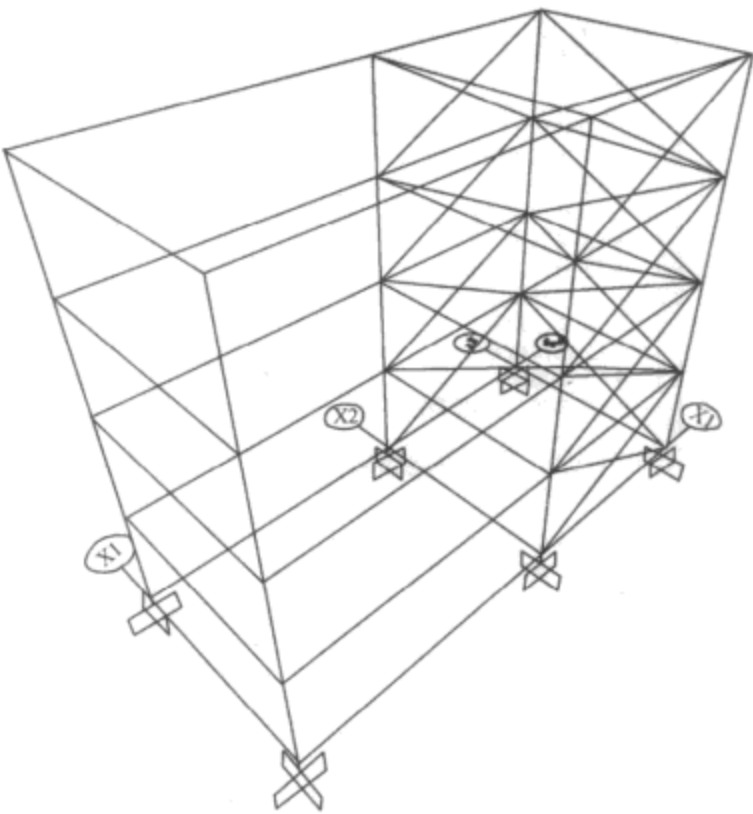


图 14-65 截面切割模型

截面切割名称 表 14-76

| 截面切割名称 | 输入截面切割的名称 |
|--------|-----------|
|--------|-----------|

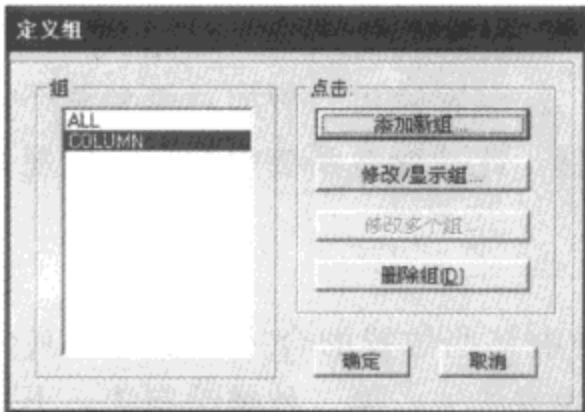


图 14-66 定义组对话框



图 14-67 指定/定义组名称对话框

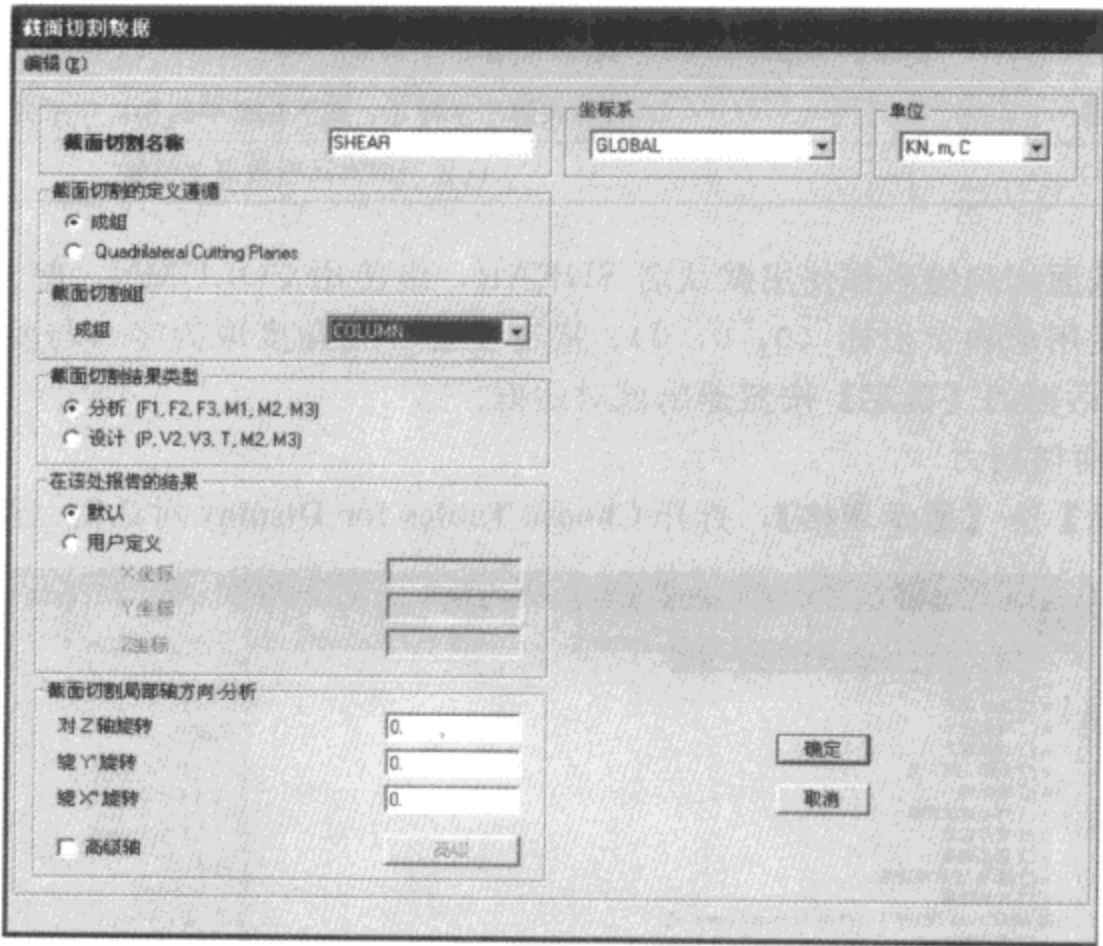


图 14-68 截面切割数据对话框

截面切割的定义遵循

表 14-77

| | |
|--------|-------------|
| 成 组 | 按组输出合力 |
| 四边形切割面 | 按四边形切割面输出合力 |

截 面 切 割 组

表 14-78

| | |
|----|------------------------------|
| 成组 | 在下拉菜单中选择一个已定义的组。该组包含需要求合力的构件 |
|----|------------------------------|

截面切割结果类型

表 14-79

| | |
|-----|----------------|
| 分 析 | 按照单元局部坐标轴输出合力 |
| 设 计 | 按照构件受力特性输出设计合力 |

在该报告处的结果

表 14-80

| | |
|------|--|
| 默 认 | 默认力的求和点的坐标。默认求和位置的坐标是截面切割组中包括的所有对象坐标的平均值 |
| 用户定义 | 用户指定合力点的坐标位置 |

截面切割局部轴方向分析

表 14-81

| | |
|-----------|------------------------|
| 对 Z 轴旋转 | 指定切割方向绕整体坐标 Z 轴旋转角度 |
| 对 Y' 轴旋转 | 指定切割方向绕整体坐标 Y' 轴旋转角度 |
| 对 X'' 轴旋转 | 指定切割方向绕整体坐标 X'' 轴旋转角度 |
| 高 级 轴 | 切割方向高级设置。参见对象局部坐标系定义章节 |

其 他

表 14-82

| | |
|-----|-----------------------|
| 坐标系 | 若存在附加坐标系，在下拉菜单选择坐标系名称 |
| 单 位 | 设置当前对话框数据单位制 |

本例中，截面切割的名称使用默认名 SHEAR，组使用 COLUMN，剪力和与求和点位置无关，这里使用求和点坐标 (0, 0, 0)。局部坐标 1 轴角度取为零（与整体坐标 X 轴一致）。点击该对话框的【确定】按钮退出该对话框。

4) 查看截面切割力

点击【显示】>【显示表格】，打开 Choose Tables for Display 对话框（图 14-69）。

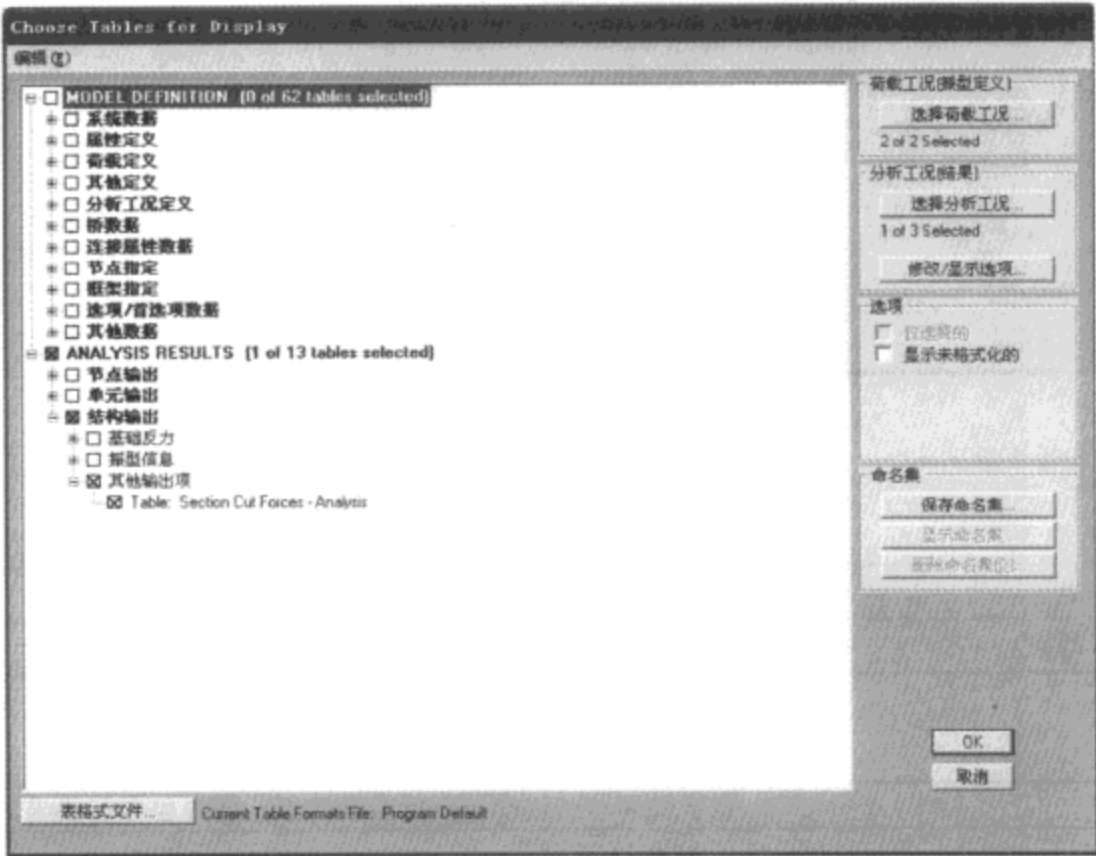


图 14-69 Choose Tables for Display 对话框

在数据输出树状图中其他输出项选择 Section Cut Force，点击【选择分析工况】按钮，选择地震工况，点击【OK】按钮，弹出 Section Cut Force 对话框（图 14-70）。

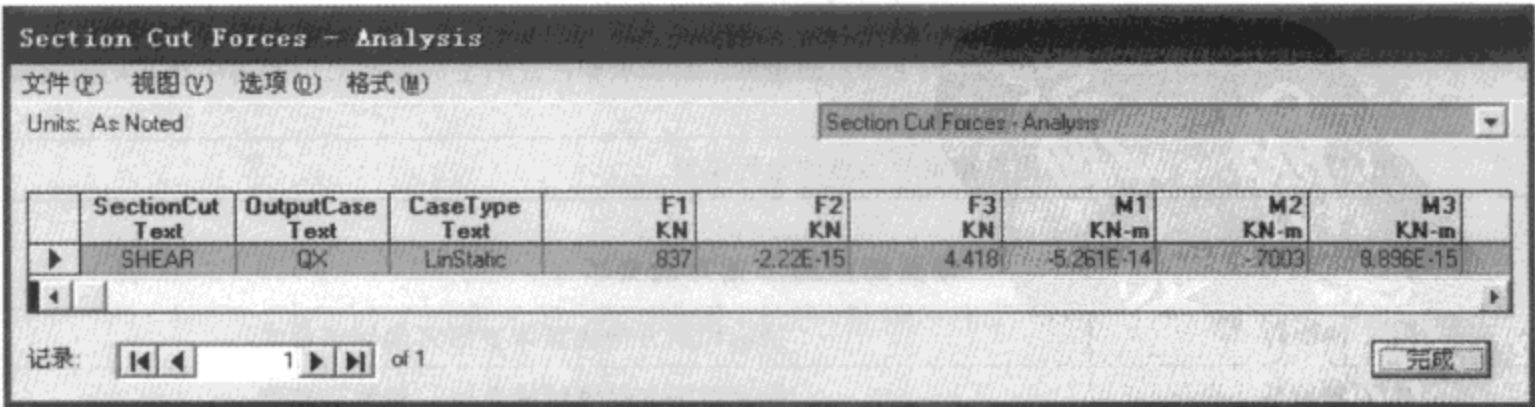


图 14-70 Section Cut Force 对话框

在该表中, F1 即为柱 X 方向的剪力, 该数值为 0.837 kN。

截面切割方法一的操作中借用了组的操作, 通过表格显示结果。同法用户可以察看层的剪力等。建议在分析完成之后进行截面切割操作。在选择求合力的构件的同时也要选中每个构件一侧的端点, 如果是面单元, 需要选择其一侧 (如底部) 的两个角点。SAP2000 需要这些点来确定各构件截面切割的位置, 并可能用到这些点来确定合力点。

方法二

截面切割的第二种方法是直接在结构的面单元变形、内力图或应力图上沿某个方向绘制一个切割面, 来显示该切割面上的应力、内力分布以及合力。

如图 14-71 所示结构, 使用现浇混凝土板, 板面布置有 15kN/m^2 的均布活荷载, 模型中板的自动剖分尺寸设置为 1m。模型自动剖分结果如图所示。要考察的是活荷载作用下作用板的应力和合力。

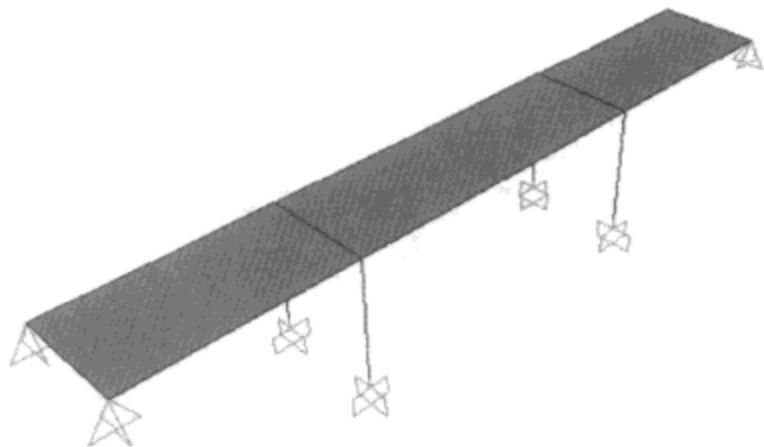


图 14-71 截面切割模型

1) 显示内力图。

运行分析之后, 在平面视图下, 点击【显示】>【显示力/应力】>【壳】命令, 弹出 Member Force Diagram 对话框 (图 14-72)。查看活荷载作用下主应力的分布, 按图设置壳的 Member Force Diagram 对话框选项。

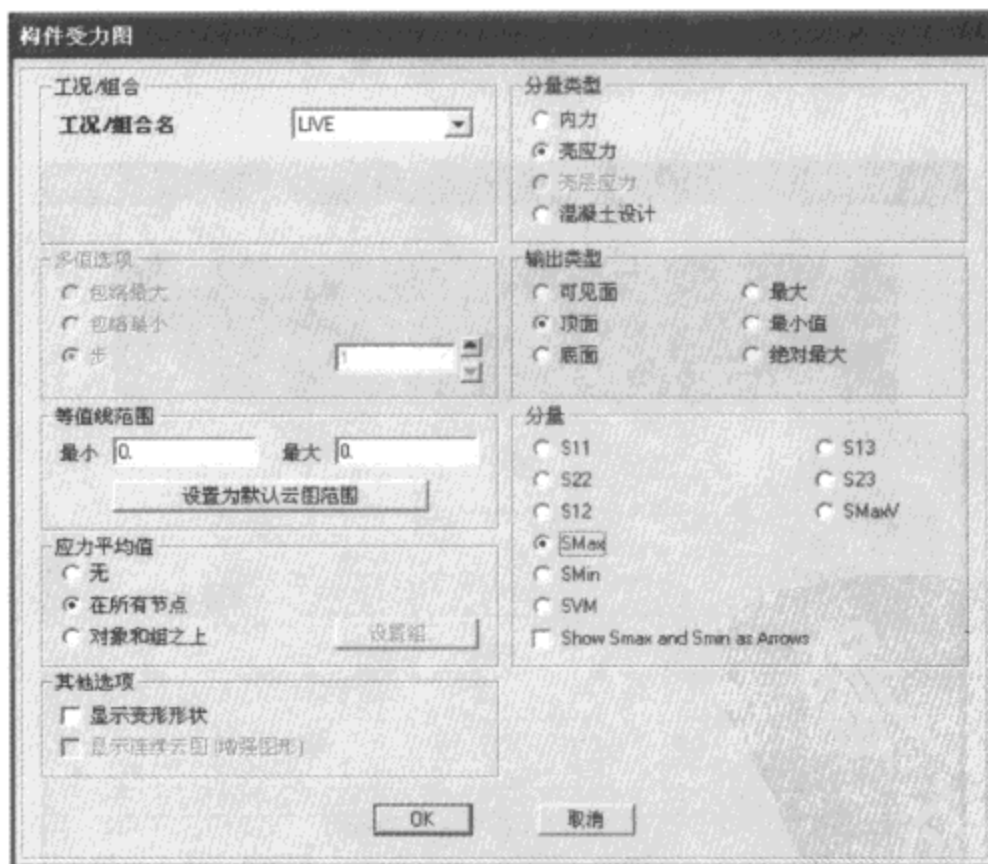


图 14-72 Member Force Diagram 对话框

点击【OK】按钮, 退出该对话框。此时在当前屏幕上将显示如图 14-73 所示的主应力图。

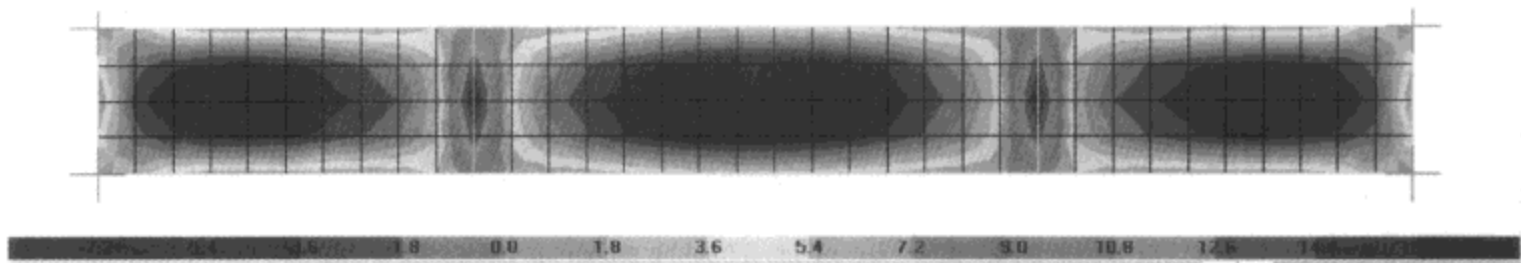


图 14-73 主应力图

2) 绘制截面切割。

点击【绘制】>【截面切割】命令，进入绘图状态，在显示最大主应力的平面图中按下左键并拖动鼠标，绘制一条切割线，从中间跨中心偏左 1m 处开始，向右拖动 2m。如图 14-74 中的虚线所示。

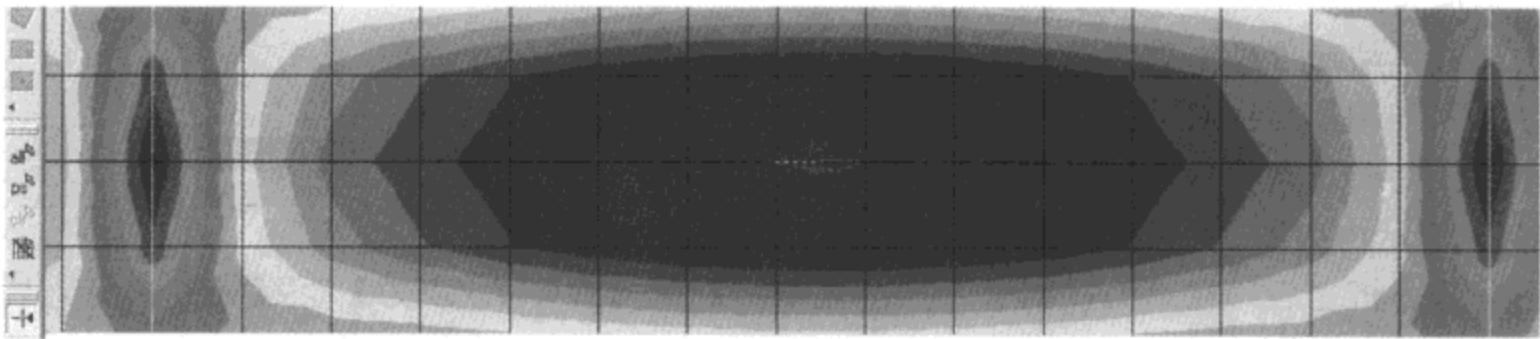


图 14-74 绘制截面切割

松开鼠标左键，弹出截面切割应力与力对话框（图 14-75）。对话框说明见表 14-83～表 14-87。

图 14-75 截面切割应力与力对话框

截面切割线

| | X | Y | Z |
|-----|---------|--------|---|
| 起始点 | 16.9894 | 1.9877 | 6 |
| 结束点 | 18.034 | 2.0145 | 6 |

合力位置与角度

| | X | Y | Z | 角度(°) |
|------|---------|--------|---|-------|
| 合力位置 | 17.5117 | 2.0061 | 6 | 0.924 |

包括 ☒ 框架 ☒ 壳 ☒ 轴对称壳体 ☒ 平板 ☐ 梁 ☐ 桁架

合力

| | 右侧 | | | 左侧 | | |
|----|----------|---------|--------|---------|---------|-------|
| | 1 | 2 | Z | 1 | 2 | Z |
| 力 | -6.1265 | 0.0668 | 15 | 6.1265 | -0.0668 | 15 |
| 弯矩 | -28.8271 | -11.299 | -0.037 | 28.8497 | 11.6529 | 0.037 |

保存切割 关闭 刷新

图 14-75 截面切割应力与力对话框

截面切割线

表 14-83

| | |
|-----|-------------------------------|
| 起始点 | 绘制的截面切割线的起点坐标。可以在此处输入坐标重新定义起点 |
| 结束点 | 绘制的截面切割线的终点坐标。可以在此处输入坐标重新定义终点 |

合力位置与角度

表 14-84

| | |
|-------|--|
| X、Y、Z | SAP2000 基于此坐标点求合力，该坐标的默认值是截面切割线起点和终点坐标的平均值。该合力位置可以修改 |
| 角度 | 截面切割局部坐标的角度 |
| 包括… | 指定合力值中包括哪些构件类型的力 |

合 力

表 14-85

| | |
|-------|--------------------------------|
| 力、弯矩 | 分别显示了截面切割线左侧和右侧的局部坐标下的合力 |
| 左侧、右侧 | 指从截面切割线起始点向结束点的方向的左侧和右侧 |
| 1、2、Z | 这里的三个方向对应的分别是截面切割局部坐标的 1、2、3 轴 |

保 存 切 割

表 14-86

| | |
|----|----------------------|
| 按钮 | 保存当前对话框中截面切割数据至数据表格中 |
|----|----------------------|

刷 新

表 14-87

| | |
|----|-------------------|
| 按钮 | 修改坐标位置后，重新显示截面切割力 |
|----|-------------------|

该对话框的上部是当前视图显示的应力沿切割线分布情况，对于立面图或变形图不显示该图。另外，由于合力是根据两侧的节点力统计出的，而不是根据同一组点统计的，所以两侧的合力可能略有差异，该差异会随着剖分的精细程度而变小。本例中，可以由左侧 1 轴弯矩得到板中局部坐标下的 2 轴轴向弯矩，其值为 $11.65\text{kN}\cdot\text{m}$ 。

在方法二中，截面切割可以在平面视图或立面视图下的内力/应力图或变形图中绘制。切割面上的合力也可以包括线对象的内力。该方法一般用于求一定长度上的楼板或墙的合力。

(2) 广义位移

广义位移是一种位移输出方式，通过广义位移可以输出模型节点之间的相对位移、位移求和或相对转角等。定义广义位移一般要在模型分析运行之前进行。

如图 14-76 所示钢框架结构，欲求出节点 12 和节点 26 在 Y 向地震作用下 Y 方向相对位移及转角。步骤如下：

1) 定义广义位移

点击【定义】>【广义位移】命令，弹出广义位移对话框，点击对话框中【添加新广义位移】按钮，弹出广义位移定义对话框（图 14-77）。对话框说明见表 14-88～表 14-90。

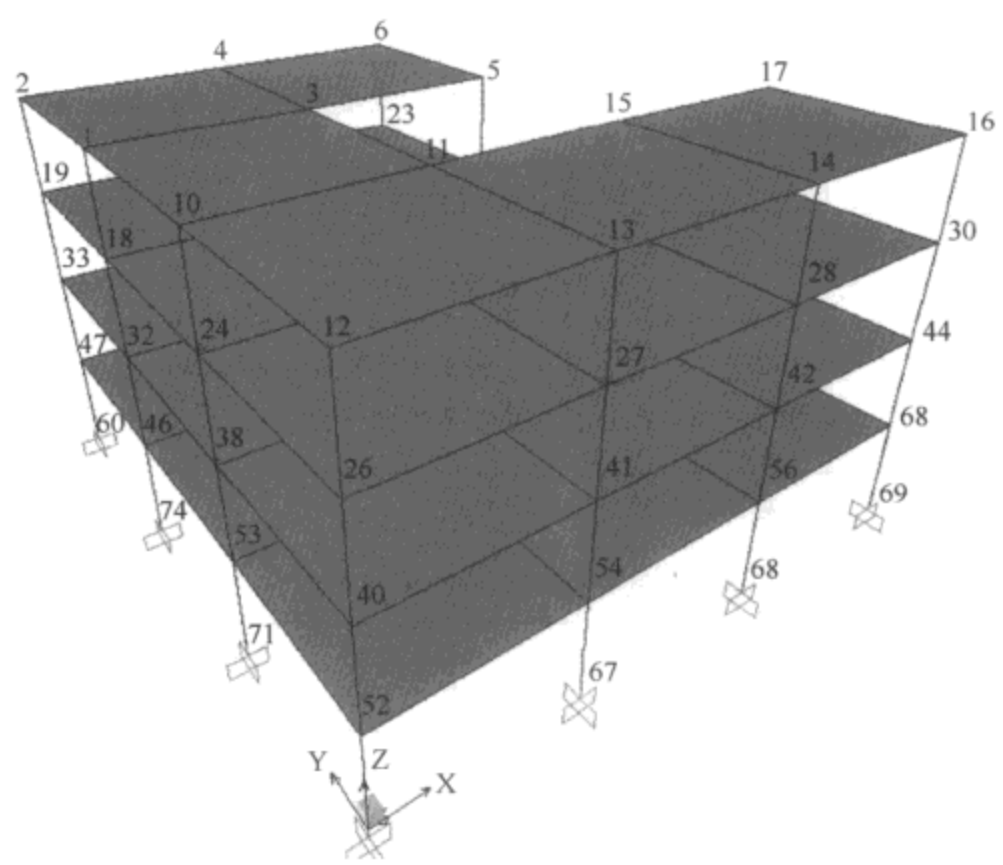


图 14-76 模型节点编号

广义位移名称

GDISP1

类型

☒ 平移

☐ 旋转

比例系数

| 节点 | U1 | U2 | U3 | R1 | R2 | R3 |
|----|----|-----|----|----|----|----|
| 12 | 0. | 1. | 0. | 0. | 0. | 0. |
| 12 | 0. | 1. | 0. | 0. | 0. | 0. |
| 26 | 0. | -1. | 0. | 0. | 0. | 0. |

添加(A)

修改(M)

删除(D)

确定

取消

图 14-77 广义位移定义对话框

广 义 位 移 名 称 表 14-88

| | |
|--------|--------------------|
| 广义位移名称 | 显示系统提供的默认名称，用户可以修改 |
|--------|--------------------|

类 型 表 14-89

| | |
|----|------------|
| 平移 | 指定输出类型为平移 |
| 旋转 | 指定输出类型为旋转角 |

比 例 系 数

表 14-90

| 节点 | 输入节点编号 |
|-------------------|---|
| U1、U2、U3、R1、R2、R3 | 输入节点比例系数，分别代表沿局部 1 轴、局部 2 轴、局部 3 轴以及绕局部 1 轴、局部 2 轴、局部 3 轴方向 |

在对话框中首先确定输出位移的类型，假定 GDISP1 为相对平移类型，在节点位置输入节点编号，比例系数是指节点平动分量或转动分量参与到广义位移的系数。例如求节点 12 和节点 26 在整体坐标系 Y 轴方向（节点局部坐标 2 轴）的相对位移，则在节点 12U2 方向比例系数输入 1，在节点 26U2 方向比例系数输入 -1，待系统在计算出两个节点的位移后分别乘以各自比例系数再作求和，在本例中表现为相减，即相对位移。

同理，再定义 GDISP2 作为转角类型广义位移（图 14-78）。

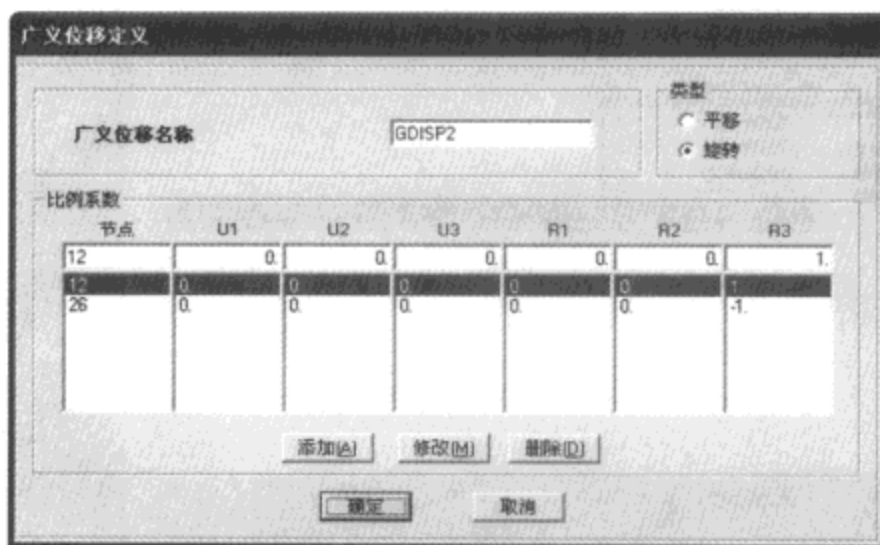


图 14-78 定义广义位移

2) 运行分析

点击【定义】>【荷载工况】命令，定义 Y 向地震荷载工况（图 14-79）。运行分析程序。

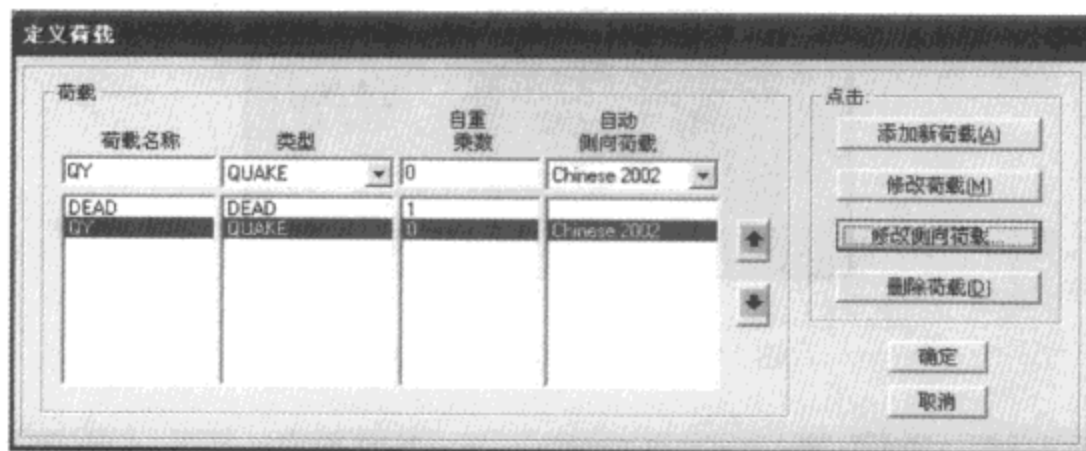


图 14-79 定义荷载对话框

3) 察看分析结果

点击【显示】>【显示表格】命令，弹出 Choose Tables for Display 对话框，选择输出项（图 14-80）。

勾选广义位移输出项（Joint Displacements-Generalized）后，在该位置右击鼠标执行选择定义的广义位移名称命令（图 14-80），弹出 Select Gen Displs 对话框（图 14-81）。

全选广义位移名称，退出对话框，点击【OK】按钮。弹出 Joint Displacements-Generalized 表格数据对话框（图 14-82）。

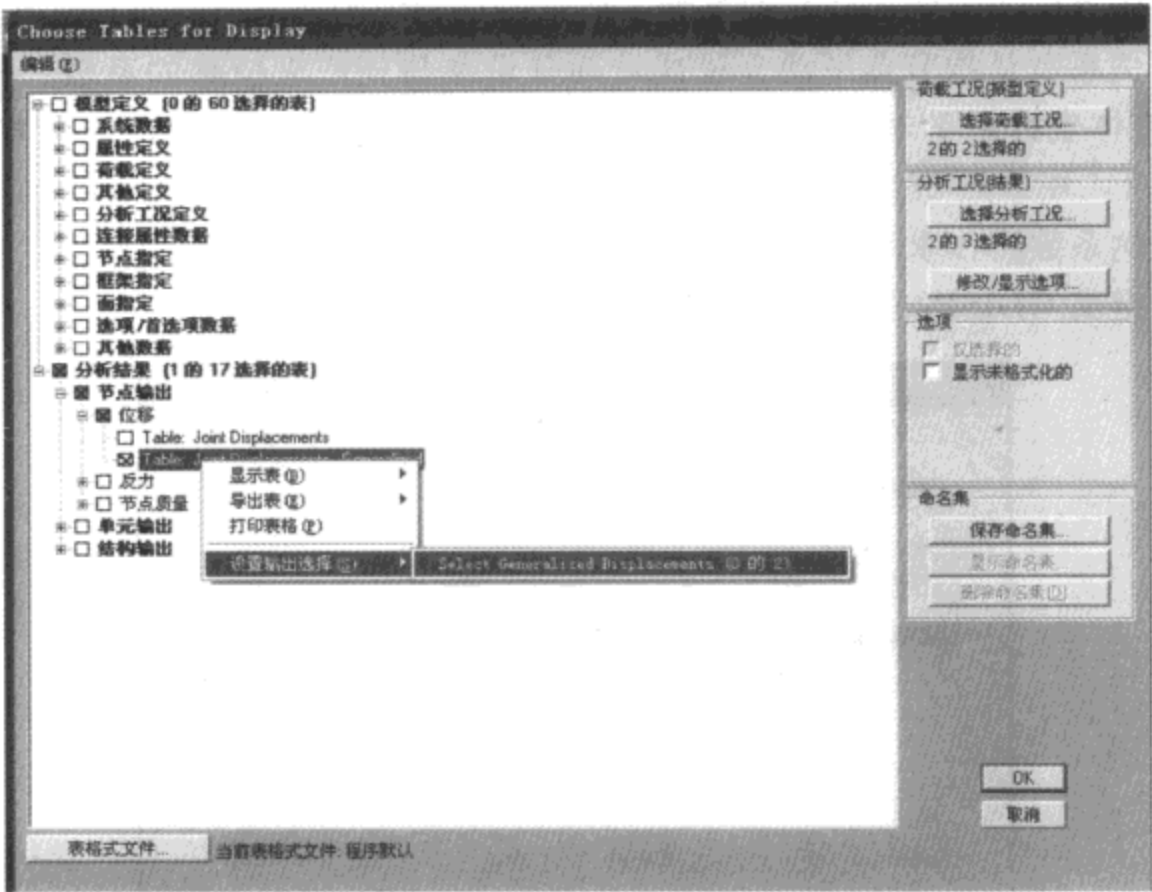


图 14-80 Choose Tables for Display 对话框

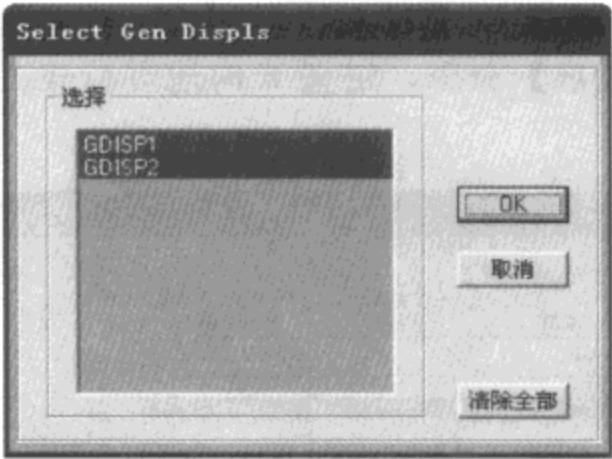


图 14-81 Select Gen Displs 对话框

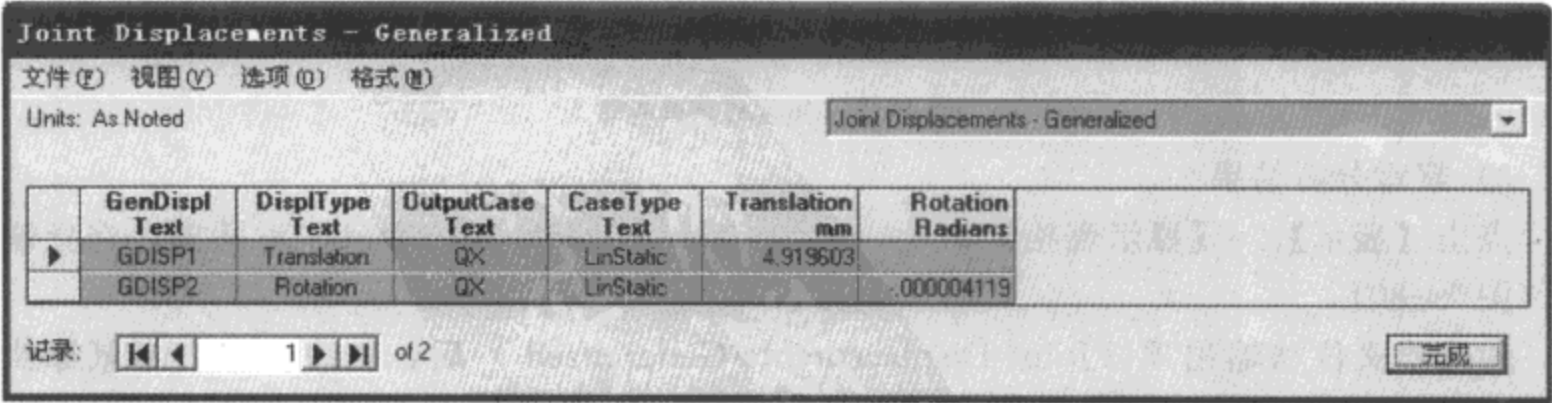


图 14-82 Joint Displacements-Generalized 对话框

从数据表格中可以读取到节点 12 和节点 26 在 Y 向地震作用下, Y 向相对位移 (GDISP1) 为 4.9mm, 相对转角为 $4.1\text{E}-06$ 弧度。

14.4.2 定制书写报告器

定制书写报告器功能可以将 SAP2000 生成的数据库文件按照自定义格式输出为文档格式的计算报告书。数据库文件可以是一个已有的 (*.mdb) 文件, 也可以是从电子表格文件 (*.xls) 或 SAP2000 文本文件 (*.s2k, *.s2k) 转换生成的数据库文件, 同时通过该命令也可以直接生成 SAP2000 数据库文件。定制书写报告器命令可以将 SAP2000 数据库文件按照预定格式, 将内容输出为 RTF (rich text format) 文件、TXT 文件、HTML 文件, 并指定由 Microsoft Word 程序打开。通过定制书写报告器功能可以实现用户对输出报告格式的编辑, 能够根据需要输出相关数据。

例如, 将一个已完成分析的模型的数据打印计算报告 (图 14-83), 内容包括模型概述、工况定义、计算周期、总质量、基底反力。

首先, 在打开已运行完的模型文件中点击【文件】>【定制书写报告器】命令, 弹出建立用户报告对话框 (图 14-84)。对话框说明见表 14-91~表 14-98。

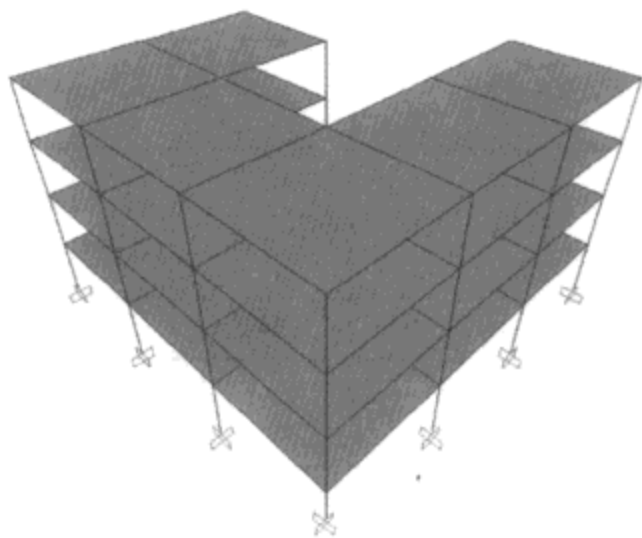


图 14-83 模型

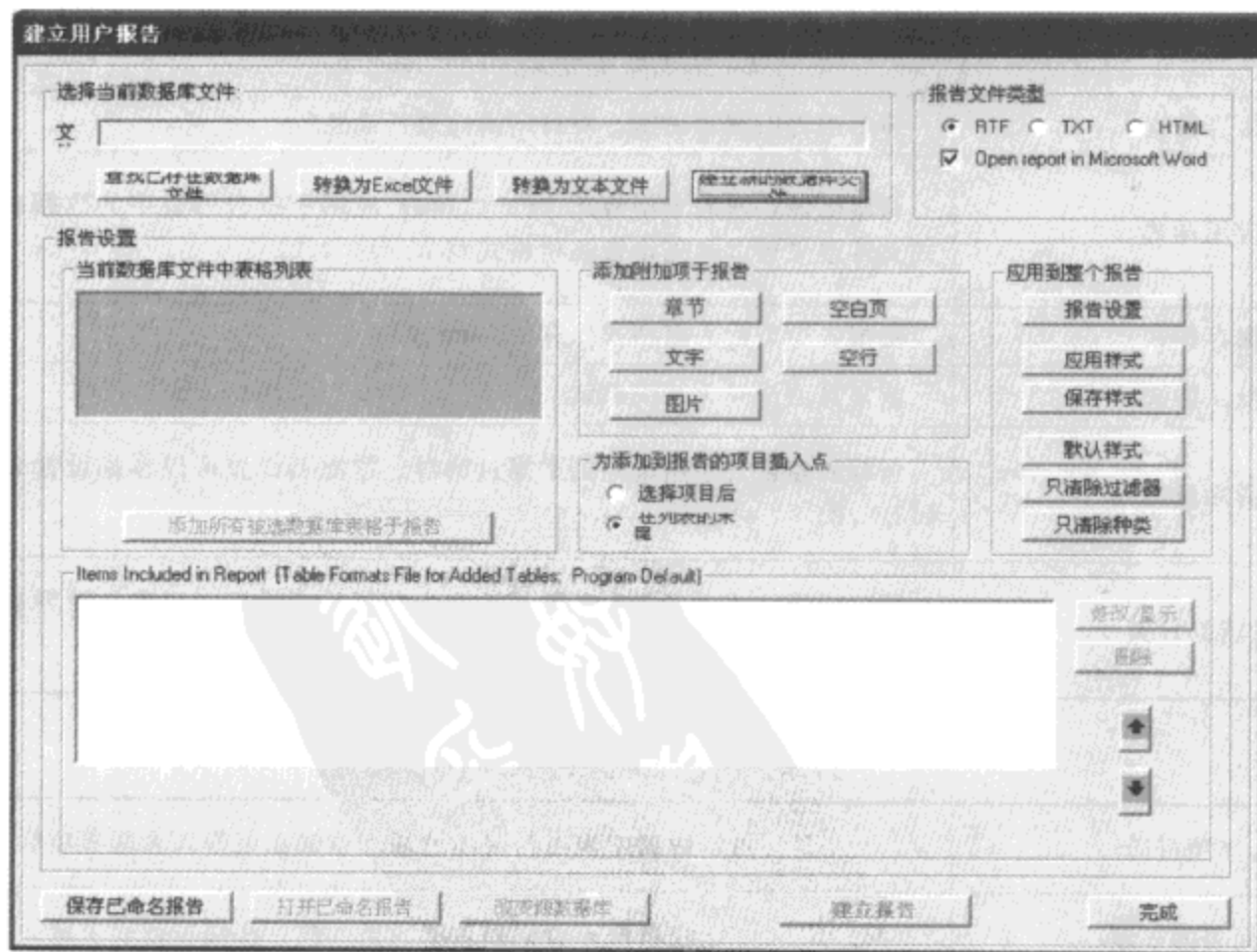


图 14-84 建立用户报告对话框

选择当前数据库文件

表 14-91

| | |
|--------------|-----------------------------------|
| 查找已保存数据库文件 | 打开已有数据库文件 (*.mdb) |
| 转换为 Excel 文件 | 转换已有电子表格文件 (*.xls) 为数据库文件 |
| 转换为文本文件 | 转换已有 SAP2000 文本文件 (*.s2k) 为数据库文件 |
| 建立新的数据库文件 | 将当前模型数据导出数据库文件 |

报 告 文 件 类 型

表 14-92

| | |
|-------------------------------|--|
| RTF、TXT、HTML | 设置输出文件类型为 RTF (Rich Txt Format) 格式、TXT (纯文本) 格式、HTML (网页) 格式 |
| Open Report in Microsoft Word | 指定报告以 Microsoft Word 程序打开 |

报 告 设 置

表 14-93

| | |
|---------------------|----------------------|
| 当前数据库文件中表格列表 | 生成的数据库文件中的表格列表 |
| 添加所有被选数据库表格于报告 (按钮) | 将选中的列表中表格项添加至下方报告列表中 |

添加附加项于报告

表 14-94

| | |
|----------------------|--------------------------------|
| 章节、文字、图片、空白页、空行 (按钮) | 点击按钮则在报告中插入章节题目、文字、图片、空白页、空行等项 |
|----------------------|--------------------------------|

应用到整个报告

表 14-95

| | |
|--------|--|
| 报告设置 | 弹出报告设置对话框，对打印页面进行设置 |
| 应用样式 | 调用已保存过的表格格式文件 (.fmt) 应用于报告列表中的数据表格。表格格式文件定义可以参见设置表格格式章节 (14.2.2) |
| 保存样式 | 将报告中当前表格格式保存为 .fmt 文件 |
| 默认样式 | 恢复页面设置为系统默认 |
| 只清除过滤器 | 清除表格格式中所设定的数据过滤器。过滤器设置可以参见设置表格格式章节 (14.2.2) |
| 只清除种类 | 清除表格格式中所设定的数据排序。数据排序设置可以参见设置表格格式章节 (14.2.2) |

为添加到报告的项目插入点

表 14-96

| | |
|--------|--------------------------|
| 选择项目后 | 指定数据库表格列表项的插入位置在报告列表选择项后 |
| 在列表的末尾 | 指定数据库表格列表项的插入位置在报告列表末尾 |

Item Included in Report

表 14-97

| | |
|-------|-------------|
| 列表 | 打印报告内容列表 |
| 修改/显示 | 修改/显示表格数据内容 |
| 删除 | 删除选择的报告列表内容 |

按 钮

表 14-98

| | |
|---------|---------------------------------|
| 保存已命名报告 | 保存报告列表中的格式内容 |
| 打开已命名报告 | 打开保存过的报告列表格式内容 |
| 改变源数据库 | 改变报告列表中数据库文件路径，即将当前格式应用于其他数据库文件 |

点击【建立新的数据库文件】按钮，弹出 Choose Tables for Access 对话框，勾选输出项（图 14-85）。

点击【OK】按钮，弹出保存对话框将生成的数据库文件命名为“Report”。

点击【保存】按钮，回到建立用户报告对话框（图 14-85），生成的数据库文件中的数据列表已经加入到报告设置列表中。下面所做的工作就是将这些数据列表按照顺序排版，排版后的内容将显示在下方 Item Included in Report 列表中。首先添加章节题头，设第一章为模型概述，点击【章节】按钮，弹出 Report Item-Section 对话框（图 14-86），在标题栏输入“Summary”，点击【OK】按钮。回到建立用户报告对话框。

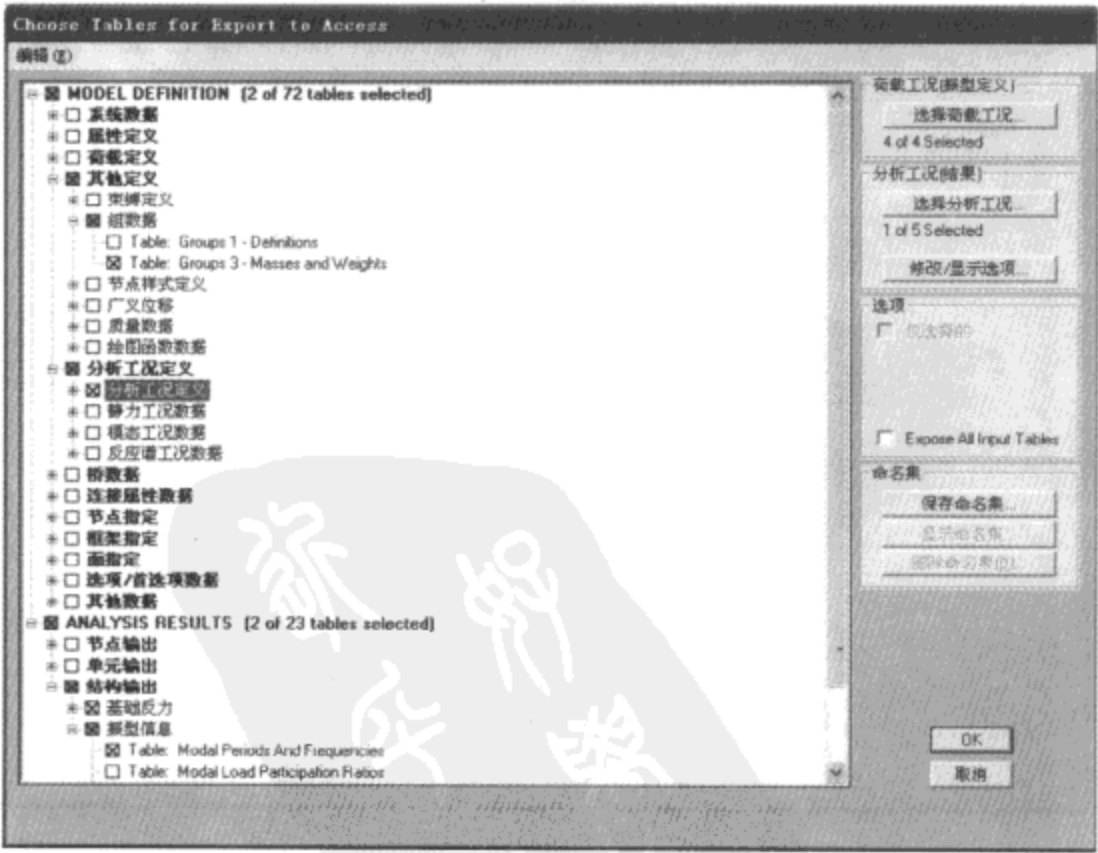


图 14-85 Choose Tables for Access 对话框

点击【文字】按钮，弹出 Report Item-Text 对话框（图 14-87），输入概述标题和文字内容等。

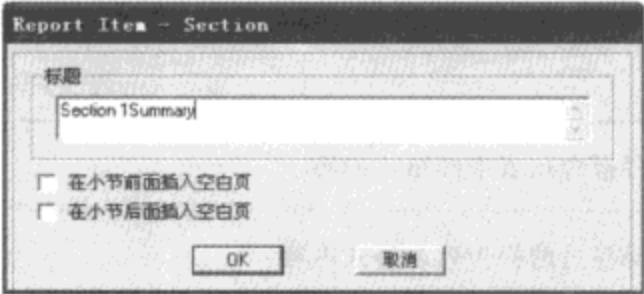


图 14-86 Report Item-Section 对话框

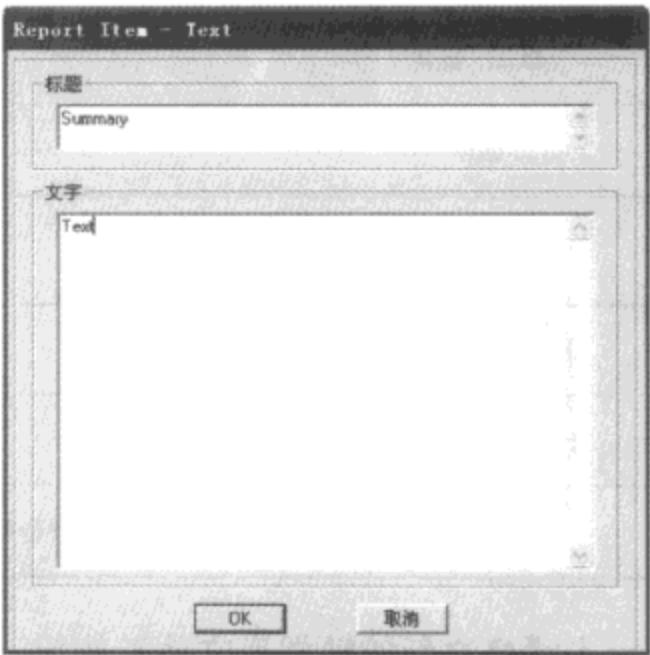


图 14-87 Report Item-Text 对话框

点击【OK】按钮，回到建立用户报告对话框。点击【图片】按钮，弹出输出图片对话框（图 14-88），可以将模型图片加入到报告中。图片可以通过 SAP2000 输出图片命令实现。

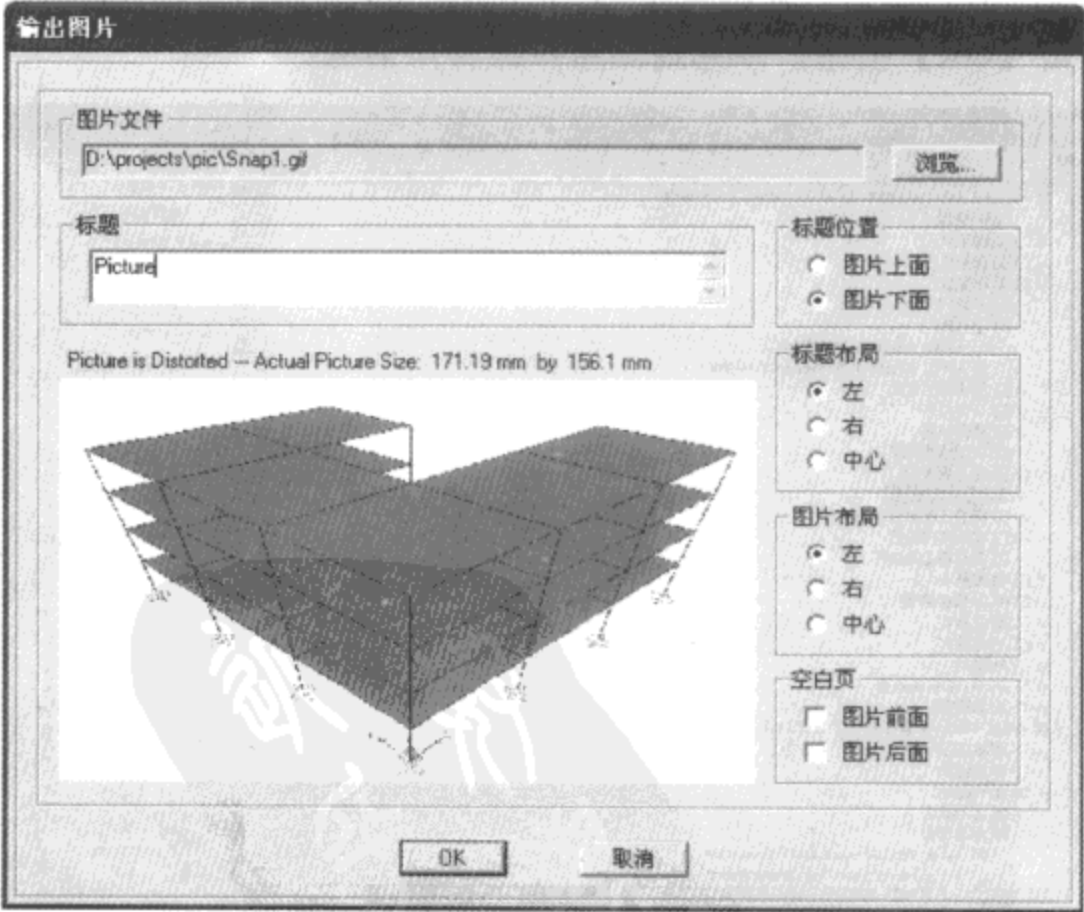


图 14-88 输出图片对话框

点击 **OK** 按钮，回到建立用户报告对话框。再次点击 **【章节】** 按钮，添加第二章。设第二章内容为荷载工况定义。在 **Report Item-Section** 对话框中输入“Analysis Case”（图 14-89）。

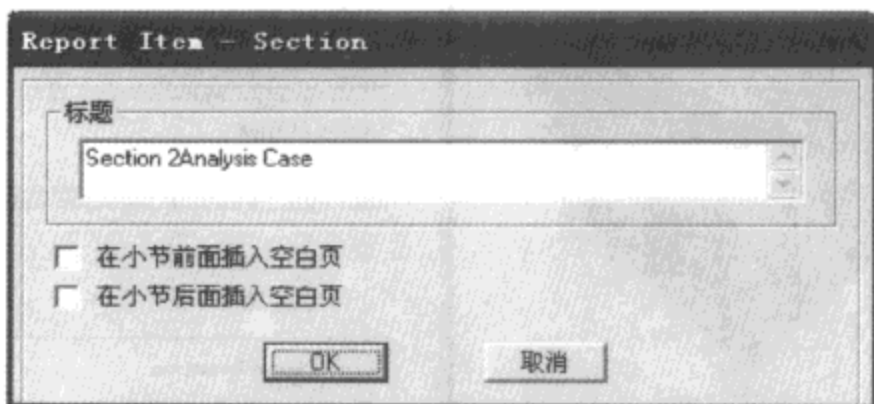


图 14-89 Report Item-Section 对话框

点击 **【OK】** 按钮，回到建立用户报告对话框。在当前数据文件中表格列表中选择 **Analysis Case Definitions** 项，点击 **【添加所有被选数据库表格于报告】** 按钮，将该项添加至 **Item Included in Report** 列表中，随后将质量、周期、基底反力等项按照上述方法依次添加至报告列表中（图 14-90）。

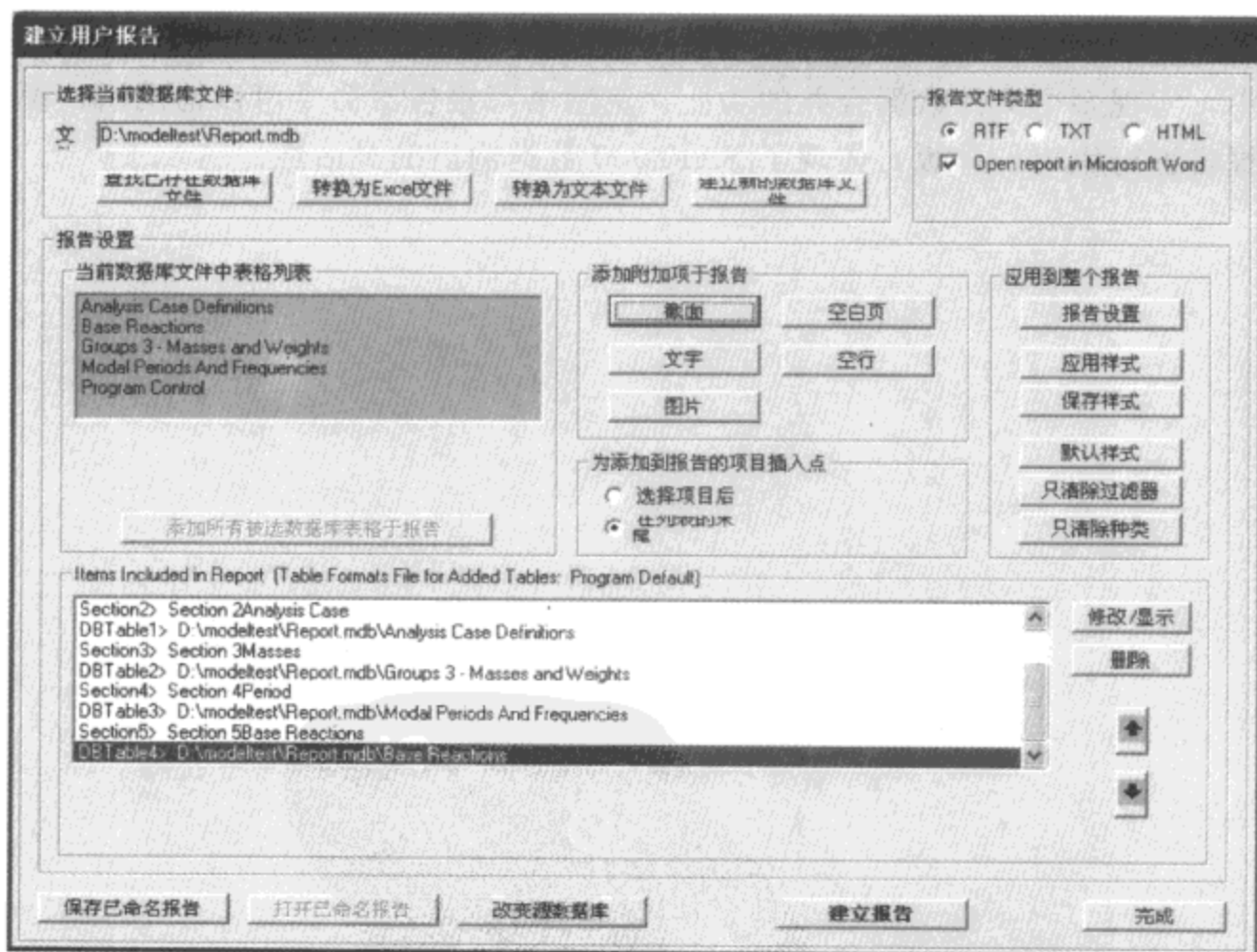


图 14-90 建立用户报告

将输出报告定为 RTF 格式，点击 **【建立报告】** 按钮，输入文件名称及路径，按 **【确认】** 按钮，系统直接将报告输出至 Word 文档（图 14-91）。

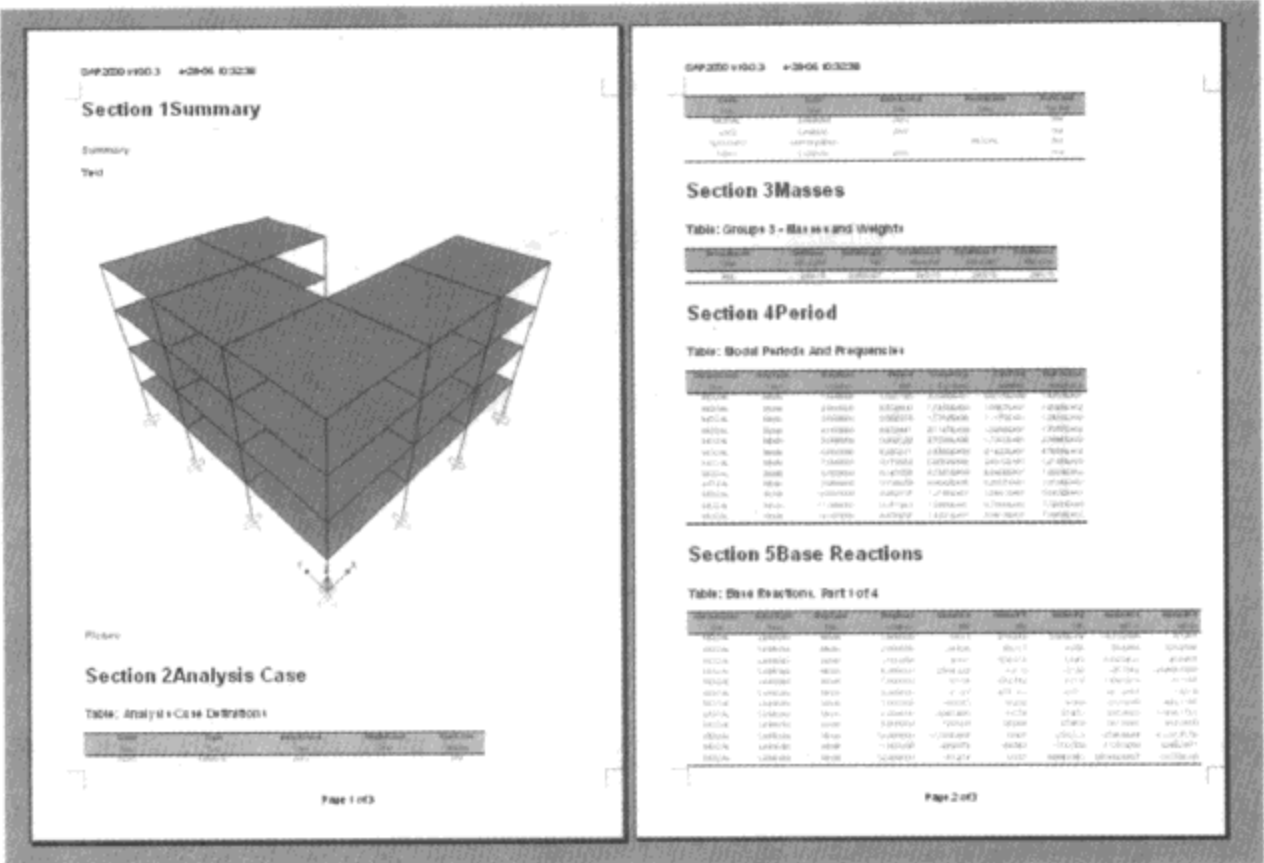


图 14-91 计算报告

除此以外，用户还可以将已有的 SAP2000 数据库文件、电子表格文件中的数据添加至输出报告中，实现多个文件数据合并的功能。定制书写报告器命令可以协助用户根据需要对输出数据报告进行编辑、排版，体现了 SAP2000 数据输出的灵活性。

第四部分

设计功能

SAP2000 是一个集成化的分析设计软件，它在结构分析运算之后，可以进行结构的设计，包括：钢框架设计、混凝土框架设计、铝框架设计、冷弯框架设计。同时，对于各种结构类型的混合结构也可以进行一体化的设计。现在 SAP2000 对于钢框架和混凝土框架的设计功能已经贯入了中国规范，可以运用中国规范进行设计。同时，在 SAP2000 中可以用多国规范对结构进行设计校核，满足工程师或科研人员的不同要求。

同时，SAP2000 提供的设计功能是一个交互式的优化设计过程，不同于国内其他设计软件，SAP2000 在设计过程中用户可以随时对设计构件进行交互式的查看修改，工程师可以通过对整体结构设计参数的修改实现设计控制的目的，而且工程师可以对单个构件的设计参数进行交互式设计控制，并且实现过程非常简单。通过交互式的设计功能 SAP2000 能够满足各种结构的不同设计要求。

在钢框架设计或者混合结构的钢框架部分设计过程中，SAP2000 提供了一套全面的优化设计功能，工程师通过简单的指定，就能够由程序自动完成钢框架的优化设计。并且可以在设计过程中实时控制构件截面的校核和优选过程，并且还可以为钢框架结构指定结构优化目标，例如：周期目标和变形目标，在设定了这样的结构目标后，程序将通过选择最适当的截面来实现优化设计。

SAP2000 对于钢框架结构和混凝土框架结构已经贯入中国现行设计规范，SAP2000 中文版在软件的规范条文实现上做了非常深入而且有效的工作，实现了 SAP2000 中文版对钢框架和混凝土框架设计结果的全面细致的输出显示功能，同时兼容了视图显示、数据表格统计显示等多种设计结果显示功能。并且，SAP2000

在设计过程中自动生成所需要的设计组合，对各种类型的荷载工况和分析工况可以自动进行组合。对于更加复杂的组合，工程师还可以自己进行定义。

SAP2000 中文版在设计功能上为工程师提供了非常简便的操作功能，实现了自动设计和交互优化设计的结合。

在设计功能部分中，第 15 章介绍 SAP2000 自动生成荷载组合以及自定义荷载组合和修改荷载组合的功能；第 16 章介绍混凝土梁柱构件以及混凝土面的设计功能；第 17 章介绍钢框架梁、柱、支撑构件的交互式优化设计功能。

新
平
和
智
慧

第15章

荷载组合

经过前面的介绍,工程师应当了解荷载工况是作用于结构上按指定方式在空间分布的力、位移、温度或其他作用。荷载工况本身不能在结构上产生任何响应,只有分析工况包含了荷载工况,才能得到荷载工况的作用结果。而分析完成后的组合是对分析工况结果的组合,是不同分析工况结果的总和或包络。

而本章所讲的组合与前面计算阶段不同,是 SAP2000 在进行设计时,根据所选规范自动生成的设计荷载组合,或工程师自定义的荷载组合。

15.1 默认荷载组合与荷载组合的定义

SAP2000 在开始运行结构设计命令时,会根据结构类型和工程师所选的规范自动生成荷载组合。默认生成的荷载组合满足所选规范要求。如果所选规范为中国规范,那么 SAP2000 可以根据中国规范对荷载工况自动进行设计荷载组合。根据荷载规范 3.2 条以及《建筑抗震设计规范》和《高层建筑混凝土结构技术规程》(简称高规)、《高层民用建筑钢结构技术规程》(简称高钢规)中的相关规定,SAP2000 中文版编制了默认设计荷载组合,主要考虑的设计荷载组合如下:

(1) 重力荷载组合+活荷载

永久荷载效应起控制作用 $1.35DL+0.7\times1.4LL$

可变荷载效应起控制作用 $1.2DL+1.4LL$

永久荷载对结构有利 $1.0DL+1.4LL$

(2) 重力荷载+风荷载

$1.2DL\pm1.4WL$

$1.0DL\pm1.4WL$

楼面活荷载效应起控制作用 $1.2DL+1.4LL\pm0.6\times1.4WL$

楼面活荷载效应起控制作用 $1.0DL+1.4LL\pm0.6\times1.4WL$

风荷载效应起控制作用 $1.2DL+0.7\times1.4LL\pm1.4WL$

风荷载效应起控制作用 $1.0DL+0.7\times1.4LL\pm1.4WL$

(3) 重力荷载+水平地震作用 (7、8 度, $H\leq60\text{m}$)

不考虑风荷载及竖向地震作用 $1.2(DL+\gamma_{EG}\times LL)\pm1.3E_hL$

不考虑风荷载及竖向地震作用 $1.0(DL+\gamma_{EG}\times LL)\pm1.3E_hL$

(4) 重力荷载+水平地震作用+风荷载 (7、8 度, $H>60\text{m}$)

不考虑竖向地震作用 $1.2(DL+\gamma_{EG}\times LL)\pm1.3E_hL\pm0.2\times1.4WL$

不考虑竖向地震作用 $1.0(DL+\gamma_{EG}\times LL)\pm1.3E_hL\pm0.2\times1.4WL$

(5) 重力荷载+竖向地震作用 (9 度)

$1.2(DL+\gamma_{EG}\times LL)\pm1.3E_vL$

$1.0(DL+\gamma_{EG}\times LL)\pm1.3E_vL$

(6) 重力荷载+水平地震作用+竖向地震作用 (9 度, $H\leq60\text{m}$)

不考虑风荷载 $1.2(DL+\gamma_{EG}\times LL)\pm1.3E_hL\pm0.5E_vL$

不考虑风荷载 $1.0(DL+\gamma_{EG}\times LL)\pm1.3E_hL\pm0.5E_vL$

(7) 重力荷载+水平地震作用+竖向地震作用+风荷载 (9 度, $H>60\text{m}$)

$1.2(DL+\gamma_{EG}\times LL)\pm1.3E_hL\pm0.5E_vL\pm0.2\times$

$1.4WL$

$1.0(DL+\gamma_{EG}\times LL)\pm1.3E_hL\pm0.5E_vL\pm0.2\times$

$1.4WL$

其中, DL 为恒荷载; LL 为活荷载; WL 为风荷载; E_hL 为水平地震荷载; E_vL 为竖向地震荷载; γ_{EG} 为可变荷载组合系数。

如果希望在运行设计之前查看自动生成的荷载组合的信息, 点击【定义】>【添加默认设计组合】命令, 弹出设计组合对话框 (图 15-1)。对话框说明见表 15-1。

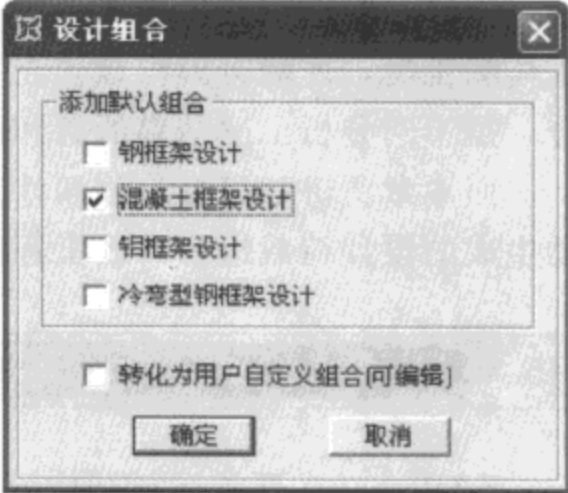


图 15-1 设计组合对话框

添 加 默 认 组 合

表 15-1

| | |
|---------------------|--------------------------------|
| 钢框架设计 | 勾选则在定义荷载组合对话框列表中显示钢框架设计荷载组合 |
| 混凝土框架设计 | 勾选则在定义荷载组合对话框列表中显示混凝土框架设计荷载组合 |
| 铝框架设计 | 勾选则在定义荷载组合对话框列表中显示铝框架设计荷载组合 |
| 冷弯型钢框架设计 | 勾选则在定义荷载组合对话框列表中显示冷弯型钢框架设计荷载组合 |
| 转化为用户自定义组合 (可编辑) | 勾选则可以在定义荷载组合对话框列表中修改各设计单元的荷载组合 |

在对话框中勾选结构设计类型, 按【确定】键退出。如果需要查看组合具体信息, 点击【定义】>【组合】命令, 弹出定义反应组合对话框 (图 15-2)。

在对话框列表中列出了根据已有荷载工况自动生成的荷载组合名称。每个荷载组合的名称由两部分组成, 字母部分是结构设计类型的英文字母简写, 数字部分代表组合的编号。例如混凝土设计组合表示为 DCON1; 钢框架设计组合表示为 DSTL1; 冷弯型钢框架设计组合

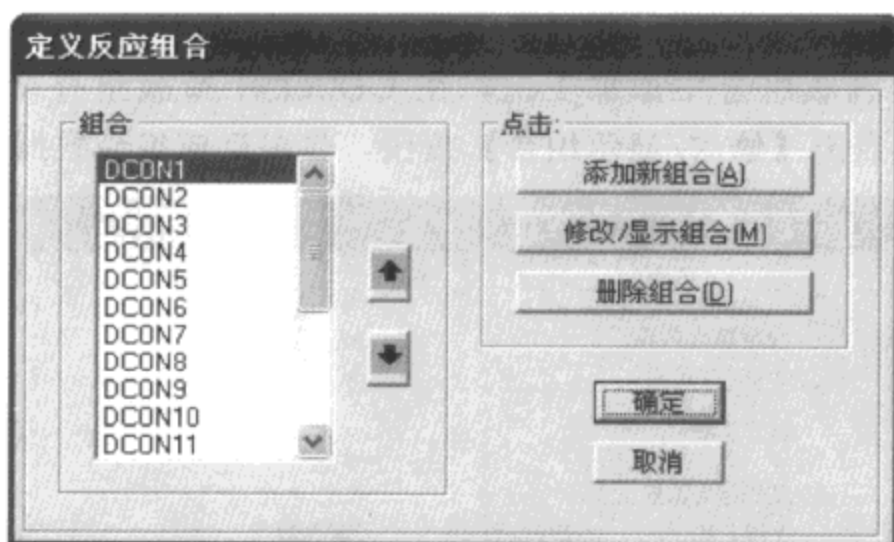


图 15-2 定义荷载组合对话框

表示为 DCLD1 等等，这些名称都是默认生成的，因此在自定义荷载组合名称时不要与默认名称相同，此外亦不能以名词“MODE”作为自定义组合的名称，因为它与默认生成的振型工况名称相同。

查看单个荷载组合信息时，选择组合名称，使其高亮显示，点击【修改/显示组合】按钮，弹出反应组合数据对话框（图 15-3）。

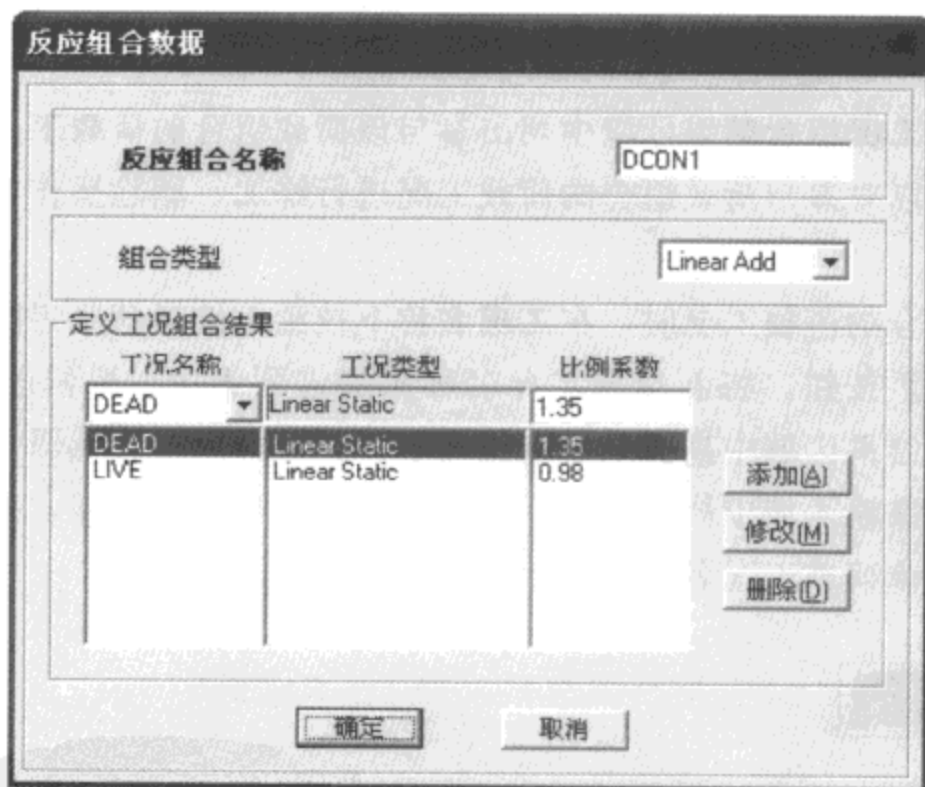


图 15-3 荷载组合数据对话框

在对话框定义工况组合结果列表中显示当前选择的组合信息，包括工况名称和比例系数。此时对话框只提供查看功能并不能对对话框中的数据设置进行修改。

如果希望对自动生成的荷载组合进行修改或者添加，首先要点击【定义】>【添加默认设计组合】命令的操作，在弹出的设计组合对话框中（图 15-1），勾选转化为工程师自定义组合（可编辑），然后按【确定】退出。再点击【定义】>【荷载组合】命令，弹出定义反应组合对话框（图 15-2），此时自动生成的荷载组合名称前面就多了字母“U”，表示用户可

以进行修改了。

例如在 UDCON1 荷载组合中添加工况，在 UDCON1 荷载组合名称上点击鼠标左键，高亮显示 UDCON1，点击【修改/显示组合】按钮，弹出反应组合数据对话框（图 15-4）。

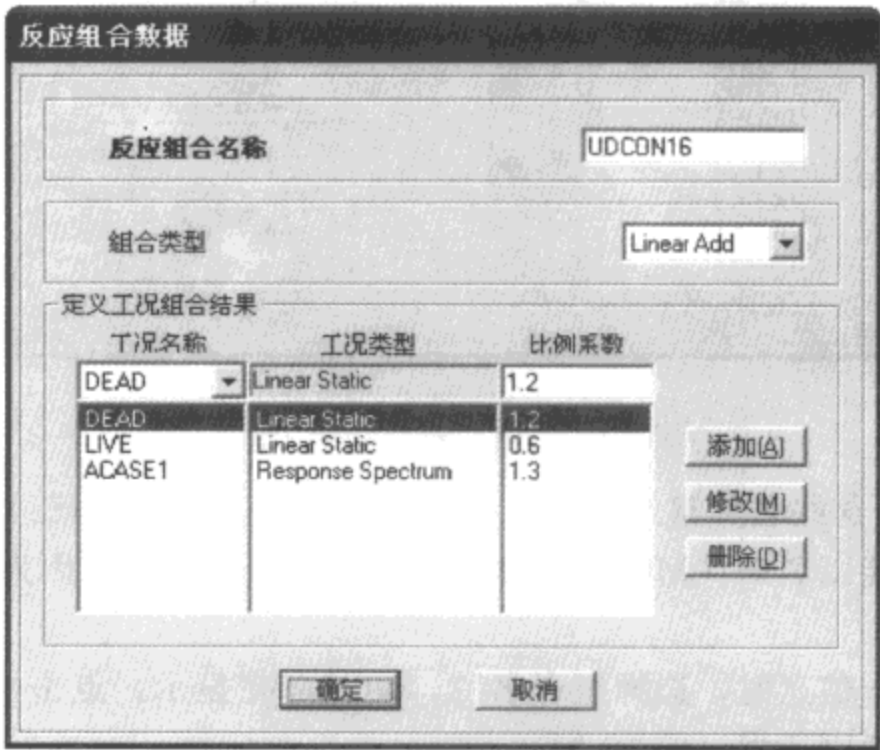


图 15-4 反应组合数据对话框

在对话框的定义工况组合结果区域中列出参与该荷载组合的荷载工况的名称、工况类型和比例系数，我们可以对参与荷载组合的荷载工况进行添加、删除操作，并且可以修改荷载工况的分项系数。

添加参与荷载组合的荷载工况时，在工况名称下拉菜单选择荷载工况名称，然后输入比例系数，点击【添加】按钮，将新荷载工况名称添加进列表中。要修改荷载工况分项系数时，在定义工况组合结果区域中高亮显示该工况名称，此时第一行编辑栏自动显示该荷载工况的数据，在比例系数输入域中修改比例系数后，单击【修改】按钮。要删除参与组合的荷载工况时，高亮显示该荷载工况名称，点击【删除】按钮。

15.2 用户自定义组合

在实际工程应用时，对于一些特殊情况需要我们另外定义一些必需的设计荷载组合。自定义荷载组合功能可以定义静力荷载工况之间的组合，静力荷载工况与已经定义的荷载组合之间的组合，静力荷载工况与反应谱工况、时程工况之间的组合，荷载工况与各振型之间的组合。并且用户还可以定义只包括一种分析工况的组合。

对于自定义荷载组合，点击【定义】>【组合】命令，弹出定义反应组合对话框（图 15-2）。如果之前没有运行过【定义】>【添加默认设计组合】命令，或者没有运行过结构设计，则组合列表为空。定义新组合时，点击【添加新组合】按钮，弹出反应组合数据对话框（图 15-5）。对话框说明见表 15-2。

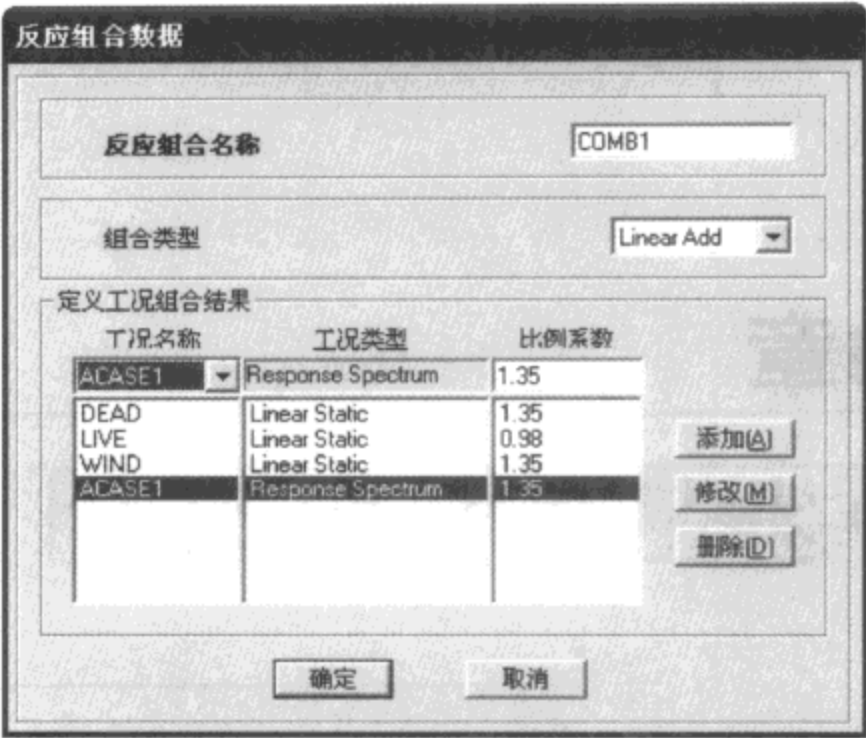


图 15-5 反应组合数据对话框

反 应 组 合 数 据 表 15-2

| | | |
|--------------|--------|----------------------------|
| 反应组合名称 | | 输入反应组合名称 |
| 组合类型 | | 选择组合方式 |
| ADD | | 叠加型。组合值取各分析工况值的代数和 |
| ENVE | | 包络型。组合值取各分析工况值的最大值 |
| ABS | | 绝对值型。组合值取各分析工况值的绝对值和 |
| SRSS | | 平方和开方型。组合值取各分析工况值平方求和后再开平方 |
| 定义工况 组合结果 | 工况名称 | 在下拉框中选择分析工况名称 |
| | 工况类型 | 显示当前高亮显示工况的类型 |
| | 比例系数 | 输入分项系数 |
| | 添加（按钮） | 点击则将输入域中的数据添加到列表中 |
| | 修改（按钮） | 点击则将输入域中的数据覆盖到列表中高亮显示的行 |
| | 删除（按钮） | 点击则删除列表中高亮显示的行 |

在对话框中，首先在反应组合名称输入域中输入组合名称。组合类型对于线性问题，算术求和型的组合有意义；对于非线性问题，最好将荷载在分析工况中进行组合，然后只用组合来计算包络值。在定义工况组合结果区域中的工况名称下拉框中选择分析工况名称，在比例系数输入域中输入分项系数，按【添加】按钮，将输入域中的参数添加到列表中。重复此步操作，直到荷载工况数量、类型满足要求为止。

第16章

混凝土框架结构设计及壳设计

16.1 混凝土框架结构设计的一般过程

在运行分析以前，设计菜单中的命令为非激活状态。完成一次分析后，才可对模型进行设计。混凝土框架结构设计的一般步骤如下：

1) 设置混凝土框架设计首选项。使用【选项】>【首选项】>【混凝土框架设计】命令选择混凝土框架设计规范，并查看其设计首选项，如果有必要可进行修改。程序已为所有混凝土框架设计首选项提供了默认值，因此无需定义任何首选项，除非需要修改一些默认的数值。

2) 查看修改覆盖项。使用【设计】>【混凝土框架设计】>【查看/修改覆盖项】命令，可以对选定构件的覆盖项进行修改。使用该命令前，需先选择框架单元，然后再点击此命令查看。这里可以选择单个构件，也可以选择多个构件，查看修改其覆盖项。程序已经为全部混凝土框架设计覆盖项提供了默认值，除非希望修改默认值，一般情况下不必人工指定。

3) 选择设计组合。程序会自动生成规范规定的设计荷载组合，若仅按规范规定的组合形式进行设计，可不操作这一步，但如果需要使用与默认生成项不同的荷载组合，可点击【设计】>【混凝土框架设计】>【选择设计组合】，通过【添加】或【移除】按钮对组合列表中的组合形式进行增减。设计过程中将考虑设计组合列表中的所有组合形式。

4) 运行设计。点击【设计】>【混凝土框架设计】>【开始结构设计/检查】，运行混凝土框架设计。

5) 显示设计信息。运行设计完成以后，程序会自动显示梁柱的纵向配筋值。也可点击【设计】>【混凝土框架设计】>【显示设计信息】，在弹出对话框中的下拉菜单中选择需要显示的设计结果，其中包括纵向配筋、抗剪配筋、纵向配筋率、轴压比、抗扭配筋等结果。

此外，SAP2000 提供了交互式混凝土框架设计和检查功能。即运行一次设计后，可以对设计参数进行交互式的修改和即时查看修改后的设计结果。

混凝土框架结构的设计过程是一个迭代的过程。开始分析时所用的截面往往与最终设计时所用的截面不相同。这里需要明确两个概念：分析截面和设计截面。分析截面是前一次分析所采用的截面，设计截面是当前设计所采用的截面。必须确保使用最终框架截面尺寸进行结构分析，然后用分析所得来的力进行设计或校核，也就是最终需要将设计截面和分析截面统一。使用【设计】>【混凝土框架设计】>【校核分析与设计截面】，可以检查此时的设计截面是否与分析截面相同。如果校核结果存在构件的分析截面与设计截面不符，程序会自动选择这部分构件，将目前设计截面信息替换所有分析截面，重新运行分析，再进行设计就可以了。

16.2 设计首选项及设计组合

混凝土框架设计首选项是设计前首先需要查看的内容。点击【选项】>【首选项】>【混凝土框架设计】弹出如下对话框（图 16-1，对话框说明见表 16-1）。首选项表格左边一列是各选项的名称，右边一列是其对应的值，当选中某项时，在项描述一栏中将出现对选中项的阐述。当需要修改某项时，可点击该项来激活它，随后进行修改。各选项的修改形式有两种，一种是选择性的，即点击激活该项后将显示一个下拉菜单，然后可选择菜单中的任意一项，这种形式不能自由填写内容；另一种形式是数据填写，点击激活后，光标将处于该值位置，等待我们改写。对首选项进行修改后，若要还原为程序默认值，可点击对话框下端设置为程序指定（默认）值一栏中的相应按钮；若想将首选项的内容还原为前一个指定值，则点击对话框下端设置为前一个值一栏中的相应按钮。

首 选 项 表 16-1

| 项 目 | 意 义 | 默 认 值 |
|----------|--|--------------|
| 设计规范 | 选择各国设计规范 | Chinese 2002 |
| 时程设计 | 选择时程分析方法 Envelopes/Step-by-Step | Envelopes |
| 相关曲线数 | 形成相关面所需要的相关曲线数（4 或 4 的倍数） | 24 |
| 相关点数 | 形成相关曲线所需要的点数量（奇数） | 11 |
| 结构重要性系数 | 对应《混凝土结构设计规范》3.2.1、3.2.3 条 | 1 |
| 柱设计步骤 | 柱设计采用的方法为 Simplified/Appendix F，即对双向偏心受压构件正截面受压承载力的计算方法可选择简化法和附录 F 的方法（GB 50010—2002 第 7.3.14 条） | Simplified |
| 抗震设计等级 | 对应《建筑抗震设计规范》6.1.2 条 | Grade I |
| 样式活荷载系数 | 考虑连续梁和悬臂梁活荷载不利分布的参数（国外规范），中国用户一般取 0 | 0.75 |
| 截面承载力利用率 | 截面承载力面积与截面面积比值 | 0.95 |

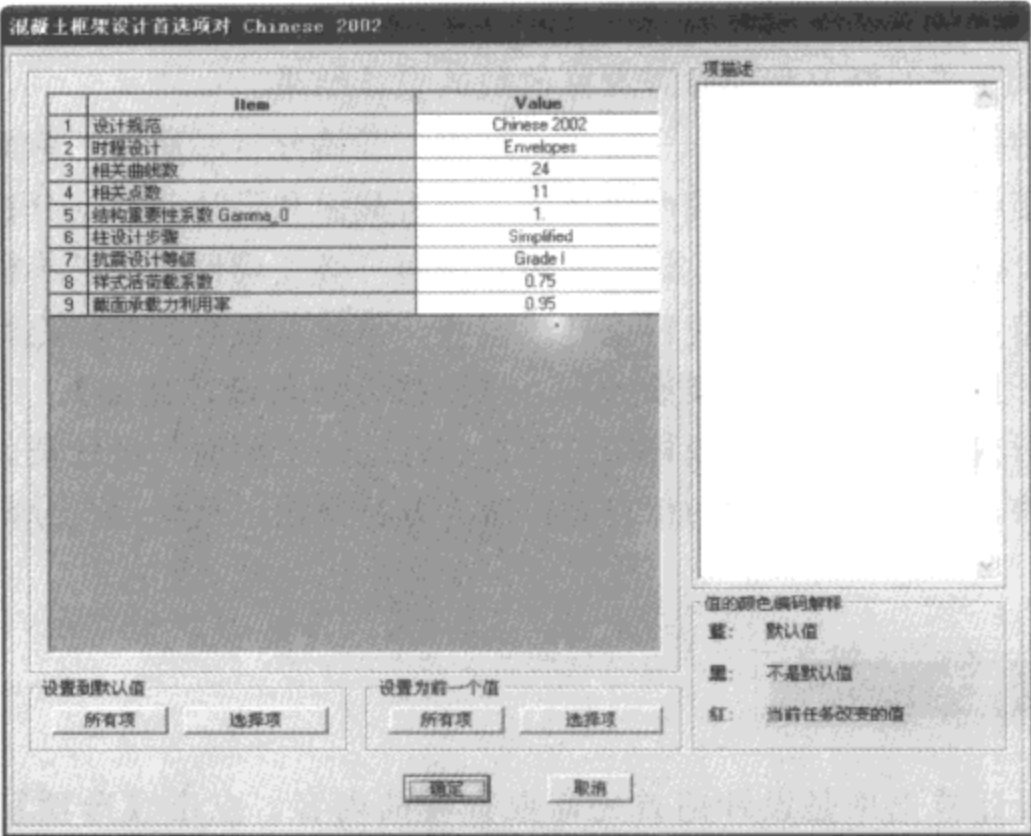


图 16-1 混凝土框架设计首选项对话框

当所有的选项均定义完毕后，点击【确定】，程序将退出首选项菜单，并保存所作修改。若不想保存修改可以点击【取消】，程序将不保存所作修改。

首选项定义完成后，可以对框架结构本次设计所考虑的荷载组合进行定义。点击【设计】>【混凝土框架设计】>【选择设计组合】，将弹出如下对话框（图 16-2）。程序默认生成的设计组合以及自定义添加的组合都将出现在右边的设计组合一栏中，可使用【添加】或【移除】按钮对设计组合列表中的组合项进行增减。若无需更改，可不进行此项操作。程序在设计过程中将考虑设计组合列表中的所有组合形式。

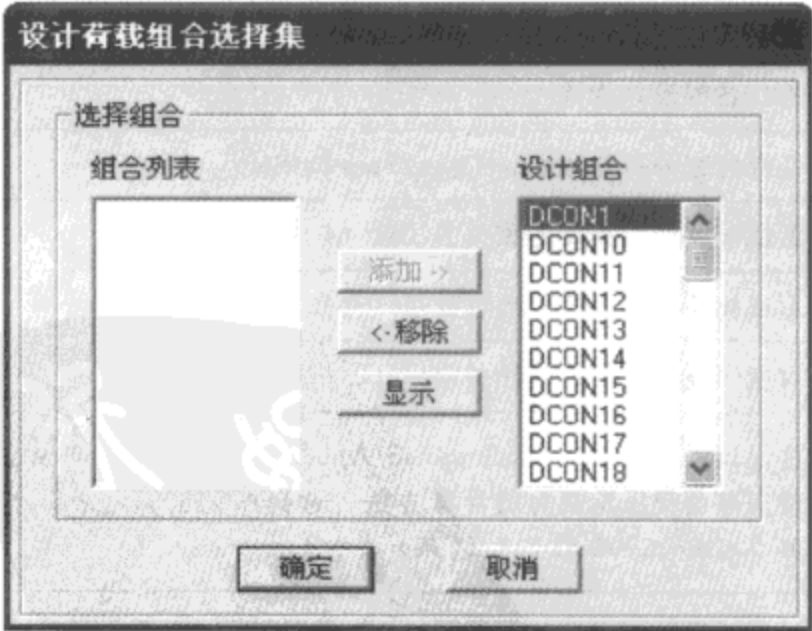


图 16-2 设计荷载组合选择集对话框

首选项和设计荷载组合定义完成后便可运行混凝土框架结构设计。设计完成后，视窗中将自动显示梁柱的纵向配筋值。

16.3 交互式设计

设计运行完成后，屏幕将显示每个构件的设计结果。这时选中某根构件后点击鼠标右键，可进入该构件的交互设计模式。如果当前没有显示设计结果（而设计已被运行），则可点击【设计】>【混凝土框架设计】>【交互式混凝土框架设计】，然后右键点击框架单元进入该单元的交互式设计模式。进入交互式设计模式后，梁会弹出如图 16-3 所示的对话框，柱会弹出如图 16-4 所示的对话框，对话框说明见表 16-2。

Concrete Beam Design Information (Chinese 2002)

Frame ID: 295 Analysis Section: B300600
Design Code: Chinese 2002 Design Section: B300600

| COMBO ID | STATION LOC | TOP STEEL | BOTTOM STEEL | SHEAR STEEL |
|----------|-------------|-----------|--------------|-------------|
| DCON28 | 3500.00 | 0.000 | 360.000 | 0.572 |
| DCON28 | 4000.00 | 360.000 | 0.000 | 0.572 |
| DCON28 | 4000.00 | 360.000 | 0.000 | 0.572 |
| DCON28 | 4500.00 | 360.000 | 0.000 | 0.572 |
| DCON28 | 5000.00 | 479.806 | 0.000 | 0.572 |
| DCON28 | 5500.00 | 723.781 | 0.000 | 0.572 |
| DCON28 | 6000.00 | 985.593 | 0.000 | 0.572 |

修改/显示覆盖项: 覆盖项 显示选中项目的细节: Summary 弯曲细节 抗剪细节 显示完全细节: 表数据

OK 取消 Stylesheet Default 表格式文件

图 16-3 混凝土梁设计信息对话框

Concrete Column Design Information (Chinese 2002)

Frame ID: 116 Analysis Section: C600600
Design Code: Chinese 2002 Design Section: C600600

| COMBO ID | STATION LOC | LONGITUDINAL REINFORCEMENT | MAJOR SHEAR REINFORCEMENT | MINOR SHEAR REINFORCEMENT |
|----------|-------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| DCON25 | 3000.00 | 2250.000 | 0.000 | 0.492 |
| DCON26 | 0.00 | 2250.000 | 0.000 | 0.000 |
| DCON26 | 1500.00 | 2250.000 | 0.000 | 0.000 |
| DCON26 | 3000.00 | 2250.000 | 0.000 | 0.000 |
| DCON27 | 0.00 | 2250.000 | 0.000 | 0.408 |
| DCON27 | 1500.00 | 2250.000 | 0.000 | 0.413 |
| DCON27 | 3000.00 | 2250.000 | 0.000 | 0.417 |

修改/显示覆盖项: 覆盖项 显示选中项目的细节: Summary 弯曲细节 抗剪细节 相关 节点剪力 显示完全细节: 表数据

OK 取消 Stylesheet Default 表格式文件

图 16-4 混凝土柱设计信息对话框

混凝土框架梁（柱）设计信息

表 16-2

| 项 目 | 意 义 |
|----------------------------|--|
| Frame ID | 框架单元的标签 |
| Analysis Section | 分析截面，即前一次分析所采用的截面形式 |
| Design Code | 选择的设计规范 |
| Design Section | 设计截面，即当前设计所采用的截面形式 |
| COMBO ID | 荷载组合的名称 |
| STATION LOC | 测站位置 |
| TOP STEEL | 顶部配筋，该项仅用于梁，它是指测站上的纵向顶部配筋所需总面积 |
| BOTTOM STEEL | 底部配筋，该项仅用于梁，它是指测站上的纵向底部配筋所需总面积 |
| SHEAR STEEL | 抗剪配筋，该项仅用于梁，它是指测站上的每单位长度抗剪配筋所需总面积 |
| LONGITUDINAL REINFORCEMENT | 纵向配筋，该项仅用于柱 |
| MAJOR SHEAR REINFORCEMENT | 主轴方向抗剪配筋，该项仅用于柱，它是柱主方向上的每单位长度抗剪配筋所需总面积 |
| MINOR SHEAR REINFORCEMENT | 次轴方向抗剪配筋，该项仅用于柱，它是柱次方向上的每单位长度抗剪配筋所需总面积 |
| 覆盖项 | 查看、修改覆盖项 |
| 摘要 | 设计信息摘要显示输出 |
| 弯曲细节 | 弯曲设计细节显示输出 |
| 抗剪细节 | 抗剪设计细节显示输出 |
| 相关 | 相关性信息显示输出 |
| 节点剪力 | 节点剪力信息显示输出 |
| 表数据 | 表格数据，将设计信息以表格形式显示输出，可导出或打印表格信息 |
| 表格式文件 | 程序以默认或用户自定义的电子表格形式输出构件设计信息 |

对话框中间位置的活动窗口显示了选中构件的配筋信息输出，它包括选中构件的每个输出站上，每个设计荷载组合所得到的设计信息。对由程序设计的柱，活动窗口中最初被高亮显示的项目是所需最大纵向钢筋的数据项；对由程序设计的梁，活动窗口中最初被高亮显示的项目是最大底部配筋的数据项；对于程序校核的柱，带有最大承载力比的数据最初被高亮显示。

交互式设计的主要访问途径是【覆盖项】按钮。点击 Concrete design beam (column) information 对话框中的【Overwrites】按钮，将弹出混凝土框架设计覆盖项对话框（图 16-5，对话框说明见表 16-3）。

覆盖项对话框中列举了可以进行修改的设计参数。当选中某项时，在右边项描述框中会显示对该项的简要阐释。若想改变某项的值，可点击选中该项进行选择式或填写式修改。与

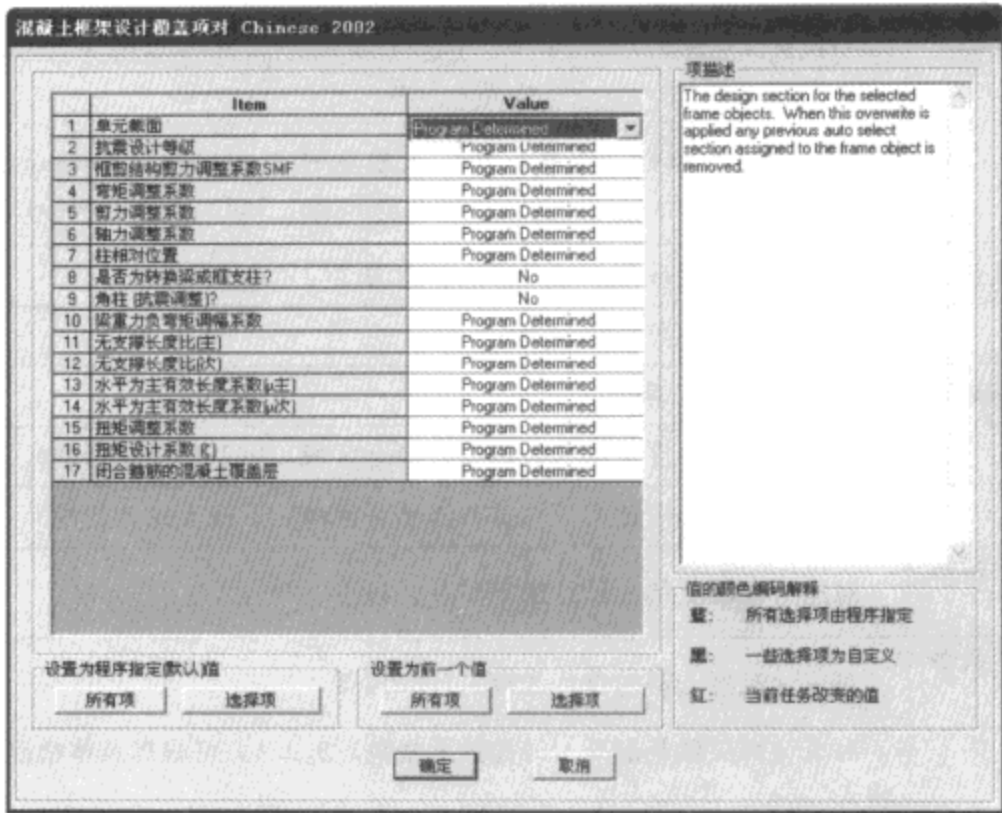


图 16-5 混凝土框架设计覆盖项对话框

前面介绍设定首选项的操作相同，若想将某项还原为程序默认值，或还原为前一个指定值，可使用对话框下方设置为程序指定（默认）值或设置为前一个值一栏中的相关按钮。

覆盖项的修改只应用于被选定的框架结构构件，并且程序已经给各覆盖项指定了默认值，因此往往不需要重新指定所有的覆盖项。根据需要，当某覆盖项被修改时，程序只将其修改指定给所选择的构件。

点击【确定】按钮退出混凝土框架设计覆盖项对话框，此时程序会根据新的覆盖项内容对选定杆件进行一次交互式设计，相应地设计细节的输出内容会随之变化。但此时只是临时考虑覆盖项修改所带来的影响，不会被长期保存。若继续点击 Concrete design beam (column) information 对话框中的【确定】按钮，覆盖项的修改才会长期有效。

混凝土框架设计覆盖项 表 16-3

| 项 目 | 意 义 | 默 认 值 |
|----------------|------------------------------------|---------|
| 单元截面 | 已定义的截面 | 构件截面 |
| 抗震设计等级 | 《建筑抗震设计规范》6.1.2 | 首选项中的定义 |
| 框剪结构剪力调整系数 SMF | 框架承担最小地震剪力调整系数对应《高层建筑混凝土技术规程》8.1.4 | 程序计算 |
| 弯矩调整系数 | 针对框架柱或框支柱的弯矩调整 | 按规范取值 |
| 剪力调整系数 | 针对框架梁、框架柱的剪力调整 | 按规范取值 |
| 轴力调整系数 | 针对框支柱的轴力调整 | 按规范取值 |

续上表

| 项 目 | 意 义 | 默 认 值 |
|----------------------|--|---------------|
| 柱相对位置 | 选择中柱、边柱、角柱、端柱或独立柱。（Center Column、Side Column、Corner Column、End Column、Individual Column） | 程序自动判断 |
| 是否为转换梁或框支柱？ | 是否按转换梁或框支柱调整设计内力 | No |
| 角柱（抗震调整）？ | 是否按角柱调整设计内力 | No |
| 梁重力负弯矩调幅系数 | 梁端弯矩调幅系数 | 0.85 |
| 无支撑长度比（主） | 主轴方向净长度比率（去掉节点叠合区域，以及支撑的影响） | 程序自动计算 |
| 无支撑长度比（次） | 次轴方向净长度比率（去掉节点叠合区域，以及支撑的影响） | 程序自动计算 |
| 水平为主有效长度系数（ μ 主） | 对应《混凝土结构设计规范》7.3.11-3 | 按规范取值 |
| 水平为主有效长度系数（ μ 次） | 对应《混凝土结构设计规范》7.3.11-3 | 按规范取值 |
| 扭矩调整系数 | 对应《高层建筑混凝土结构技术规范》5.2.4，可根据具体情况输入 | 1 |
| 扭矩设计系数（Zeta） | 对应《混凝土结构设计规范》7.6.4 | 按规范取值 |
| 闭合箍筋的混凝土覆盖层 | 箍筋钢筋保护层厚度（用于计算受扭时混凝土核心部分周长） | 梁 30mm、柱 20mm |

执行【设计】>【混凝土框架设计】>【重置所有覆盖项】命令，则所有混凝土框架单元的全部覆盖项都被恢复为默认值，并且所有当前设计结果都将被删除。

16.4 中国规范相关信息

16.4.1 刚度调整系数

SAP2000 中文版允许用户输入适当的比例系数来调整构件的力学属性。这些属性包括：

- ①轴向刚度 AE_1
- ②剪切刚度 $A_{s2}G_{12}$ 和 $A_{s3}G_{12}$
- ③扭转刚度 JG_{12}
- ④弯曲刚度 $I_{33}E_1$ 和 $I_{22}E_1$
- ⑤截面质量
- ⑥截面重量

工程师可以通过调整构件的上述力学属性，来进一步合理地修正分析模型。对于中国的工程设计人员，根据 JGJ 3—2002 第 5.2.2 条，楼面中梁的刚度由于考虑楼面的约束作用可予以增大，增大系数可取 1.3~2.0。在 SAP2000 中，若楼板使用膜单元，未考虑楼板平面外刚度的贡献，与上述规范条文阐述的情况相符，因此可修正杆件相应的惯性矩来增大其弯曲刚度。具体来讲，即选中需要修正的楼面梁，点击【指定】>【框架/索/钢束】>【属性修正】命令，然后在围绕 3 轴的惯性矩一项中输入放大系数。

16.4.2 竖向荷载作用下梁弯矩调整

梁端负弯矩调整系数。装配式整体框架梁端负弯矩调幅系数可取为 0.7~0.8, 现浇框架梁端负弯矩调幅系数可取为 0.8~0.9 (JGJ 3—2002 第 5.2.3 条)。该系数在程序中的默认值为 0.85, 用户也可以通过修改覆盖项中梁重力负弯矩折减系数来重新指定。此调整针对竖向荷载作用下的梁端负弯矩进行, 梁端负弯矩调整之后, 梁的跨中弯矩会根据内力平衡条件自动进行相应的调整。

梁的跨中弯矩调整。根据 JGJ 3—2002 第 5.2.3 条, 梁跨中截面正弯矩设计值不应小于竖向荷载作用下按简支梁计算的跨中弯矩设计值的 50%。此规则程序会自动执行。

16.4.3 结构周期比验算

为了控制结构在地震作用下的扭转效应,《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2002) 中第 4.3.5 条规定:“以结构扭转为主的第一周期 T_t 与以平动为主的第一周期 T_1 之比, A 级高度高层建筑不应大于 0.9; B 及高度高层建筑、混合结构高层建筑及复杂高层建筑不应大于 0.85。”完成结构分析后, SAP2000 中文版会详细输出结构的振型信息, 包括平动和扭转周期的数值, 用户可根据这些数据与规范此条进行对比判断。

16.4.4 框架构件的抗震等级

《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001) 第 6.1.2 条规定了钢筋混凝土房屋的抗震等级。《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2002) 4.8 节对高层建筑钢筋混凝土结构的抗震等级作了进一步的规定。总体上将抗震等级划分为特一级、一级、二级、三级和四级 (SAP2000 中文版相应的代号为: Super I、Grade I、Grade II、Grade III 和 Grade IV)。用户可通过【首选项】>【混凝土框架设计首选项】来设定结构的抗震等级, 也可以根据实际情况通过交互式设计 (即修改覆盖项) 来调整个别构件的抗震等级。

16.4.5 框架构件的内力调整

构件内力调整的意义在于贯彻结构抗震设计的基本思想, 即“强柱弱梁、强剪弱弯、强节点、强柱根”。其目的是限制大震下塑性铰出现的部位, 避免或减少脆性剪切破坏先于弯曲破坏; 加强柱子, 推迟塑性铰的形成, 预防结构倒塌整体失效。

构件内力调整的基本做法是依据结构类型、抗震设防烈度和房屋高度决定结构抗震等级; 然后按抗震等级对结构构件内力进行调整。

抗震等级定义完成后, 程序会对框架构件的属性进行判断, 然后根据规范对其内力进行调整, 调整系数可以在设计细节中查看。对一般框架中的梁、柱构件, 程序会自动识别, 但对于角柱、框支柱等构件需要在覆盖项中人工指定。另外, 在覆盖项中可以人为修改内力调整系数 (即覆盖项中的弯矩调整系数、剪力调整系数、轴力调整系数), 因此对于一些特殊构件, 程序不能自动判断时, 工程师可以在覆盖项中直接修改其内力调整系数。

16.5 设计结果输出

SAP2000 中文版的结构设计结果输出方式主要有三种：图形、表格和文本。图形输出可以直接将配筋结果，包括梁柱的纵向配筋面积、抗剪配筋面积、纵向配筋率以及柱轴压比等信息在视窗中标识于结构的几何模型上；表格输出可以将框架结构的分析结果和设计结果以表格的方式输出，输出内容还可以包括模型本身的几何物理信息；文本输出实际是将表格输出的内容以文本的形式输出，形成指定的文本文件。下面以图 16-6 所示的模型为例，介绍混凝土框架结构设计结果的输出方式。

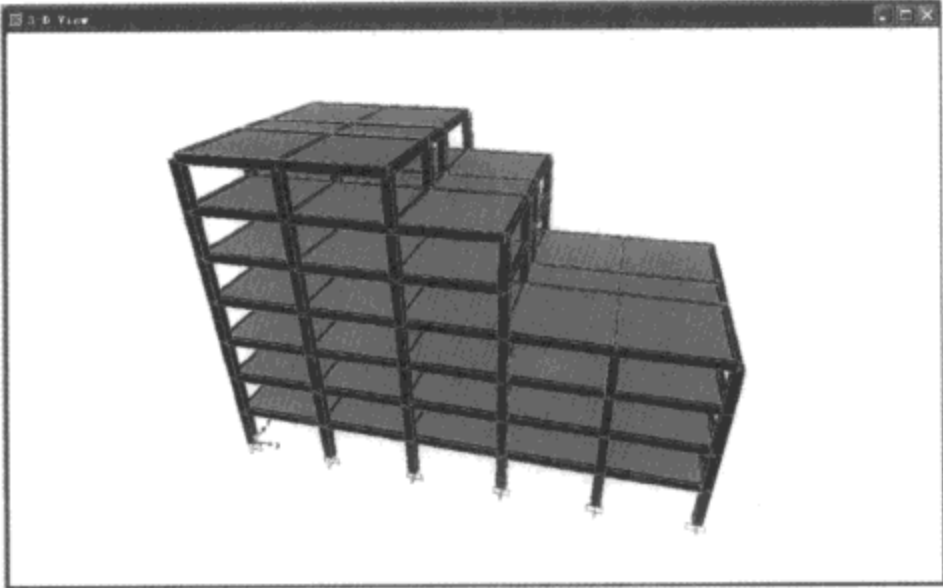


图 16-6 混凝土框架设计示例模型

16.5.1 图形输出

混凝土框架结构设计运行完成后，程序当前用户界面激活窗口（包括 3D 视图、平面和立面视图）将自动显示构件纵向配筋结果。实现图形输出的主要命令是【设计】>【混凝土框架设计】>【显示设计信息】。设计运行完成后，点击该命令将弹出显示混凝土设计结果对话框，如图 16-7 所示，对话框说明见表 16-4。在设计输出的下拉菜单中选择需要图形输出的显示内容，其中包括纵向配筋、抗剪配筋、纵向配筋率、轴压比、抗扭配筋等结果。注意此时设计结果显示值的单位与视窗右下角的全局单位制一致。



图 16-7 显示混凝土设计结果对话框

图形输出的显示内容

表 16-4

| 项 目 | 意 义 |
|---------------------------------|------------------------|
| Longitudinal Reinforcing | 框架构件的纵向配筋 |
| Rebar Percentage | 框架构件的配筋率 |
| Shear Reinforcing | 框架构件的抗剪配筋 |
| Column P-M-M Interaction Ratios | 柱 P-M-M 相关比率（用于柱的截面校核） |
| Joint Shear Reinforcing | 节点抗剪配筋 |
| Torsion Reinforcing | 框架构件的抗扭配筋 |
| N/ (fc * A) | 轴压比 |
| Identify P-M Failure | 区别显示 P-M 失效构件 |
| Identify Shear Failure | 区别显示剪切失效构件 |
| Identify All Failures | 区别显示所有失效构件 |

(1) Longitudinal Reinforcing 纵向配筋

构件的纵向包络配筋结果在三维视图和二维视图中都可以显示。一般通过 xy 视图清楚地显示梁的纵向配筋结果，通过 xz 或 yz 视图来查看柱的配筋结果，如图 16-8～图 16-10 所示。

图形输出中梁的纵向配筋数据为两排，分别对应梁截面顶部和底部配筋，每排三个数据分别对应梁的两端和跨中三个控制截面的配筋量。

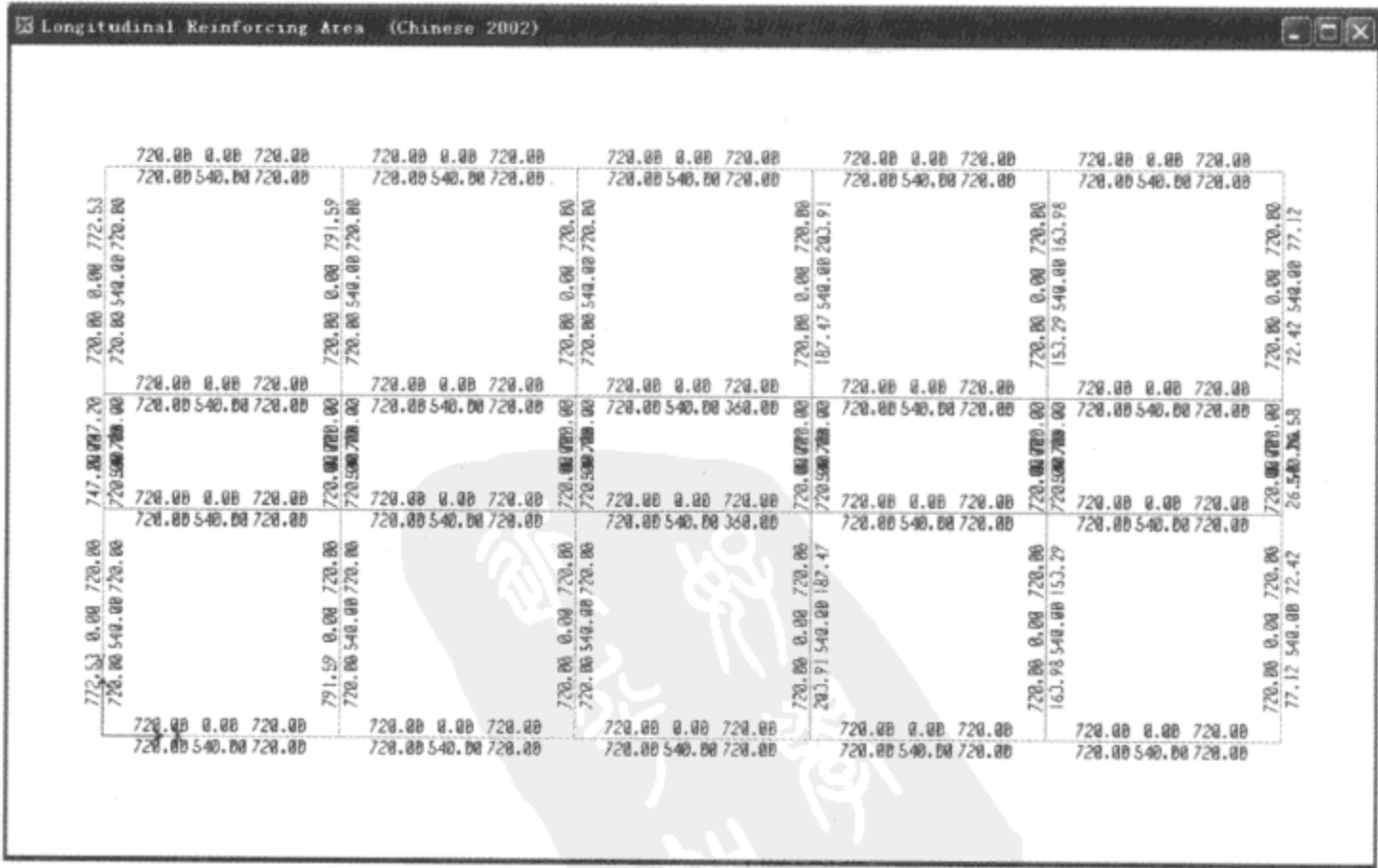


图 16-8 混凝土梁纵向配筋结果图形输出（ xy 视图）

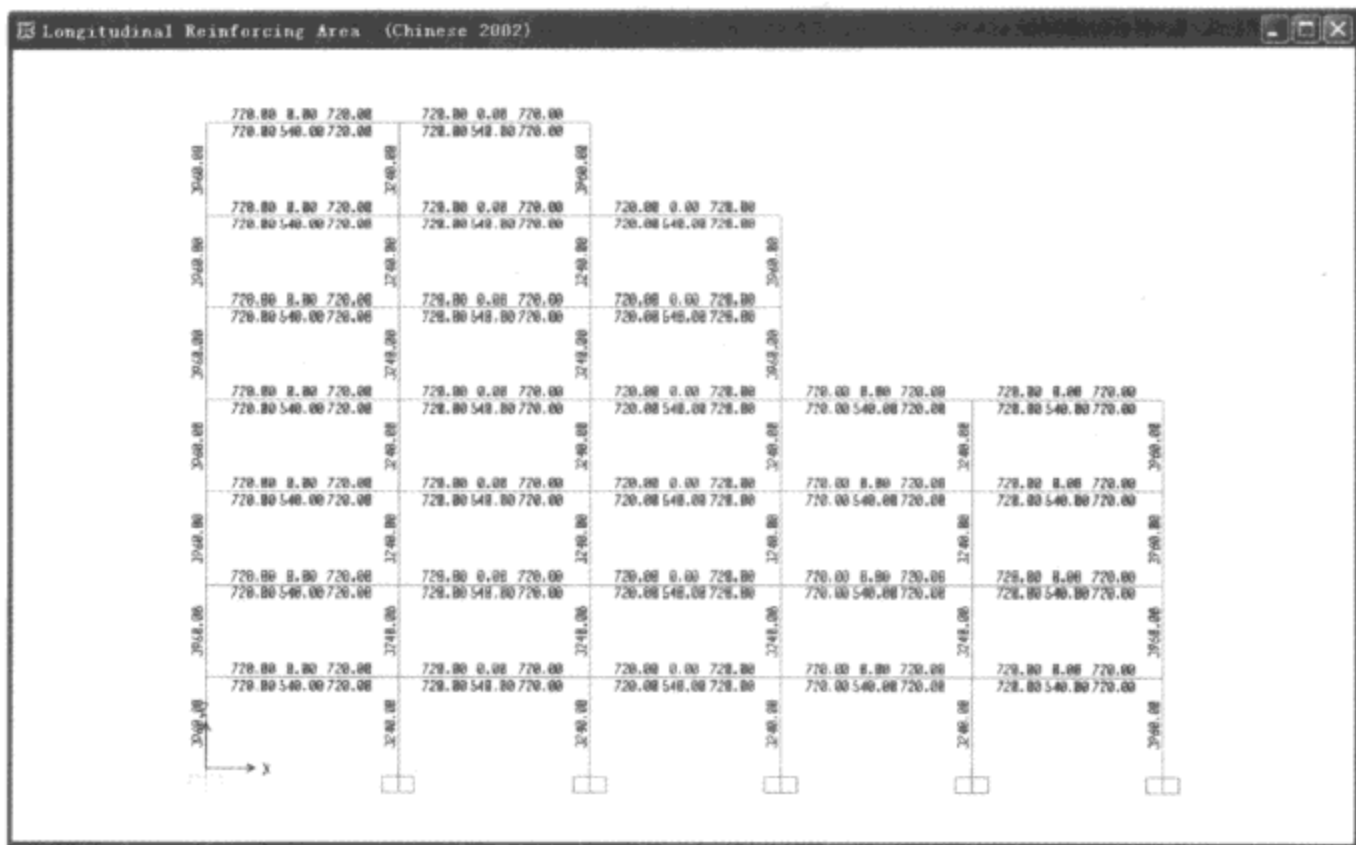


图 16-9 混凝土梁柱纵向配筋结果图形输出 (xz 视图)

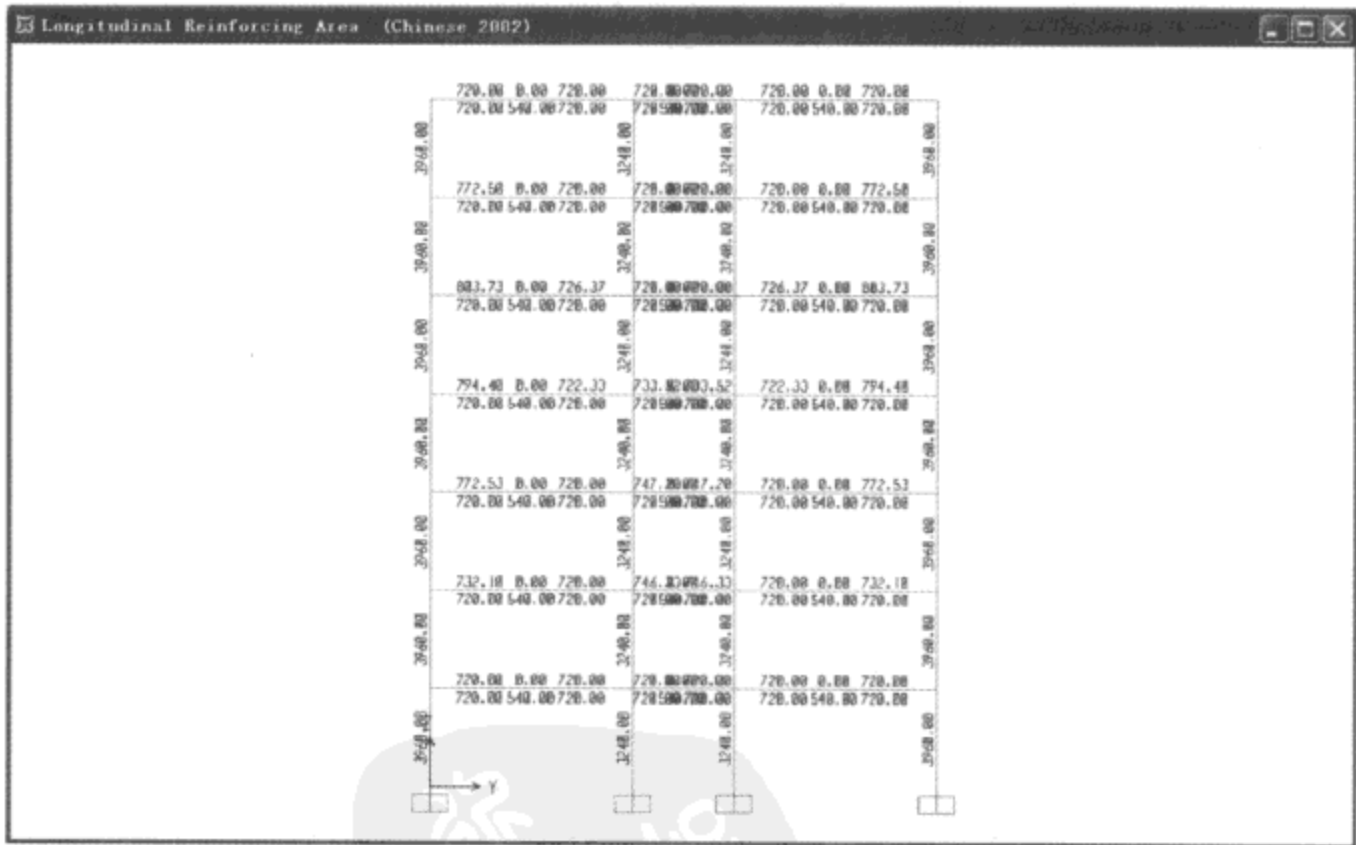


图 16-10 混凝土梁柱纵向配筋结果图形输出 (yz 视图)

(2) Shear Reinforcing 抗剪配筋

抗剪包络配筋结果图形输出中柱的抗剪配筋数据有两排，分别对应柱 X 和 Y 方向上的抗剪配筋结果。本例中抗剪配筋为构造配筋，因此显示输出值为零。另外，梁的抗剪配筋数据为一排三个数据，分别对应梁的两端和跨中三个控制截面的配筋量，如图 16-11、图 16-12 所示。

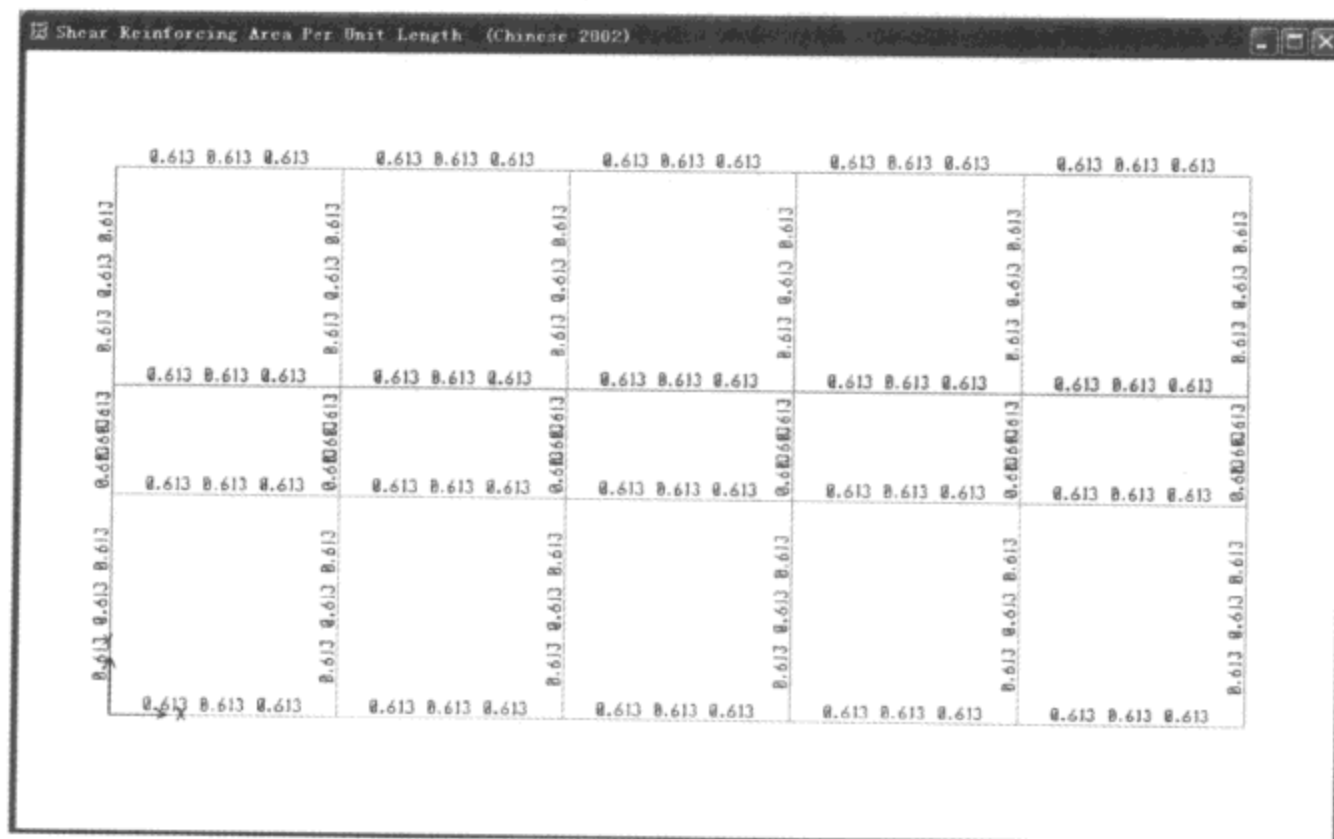


图 16-11 混凝土梁抗剪配筋结果图形输出 (xy 视图)

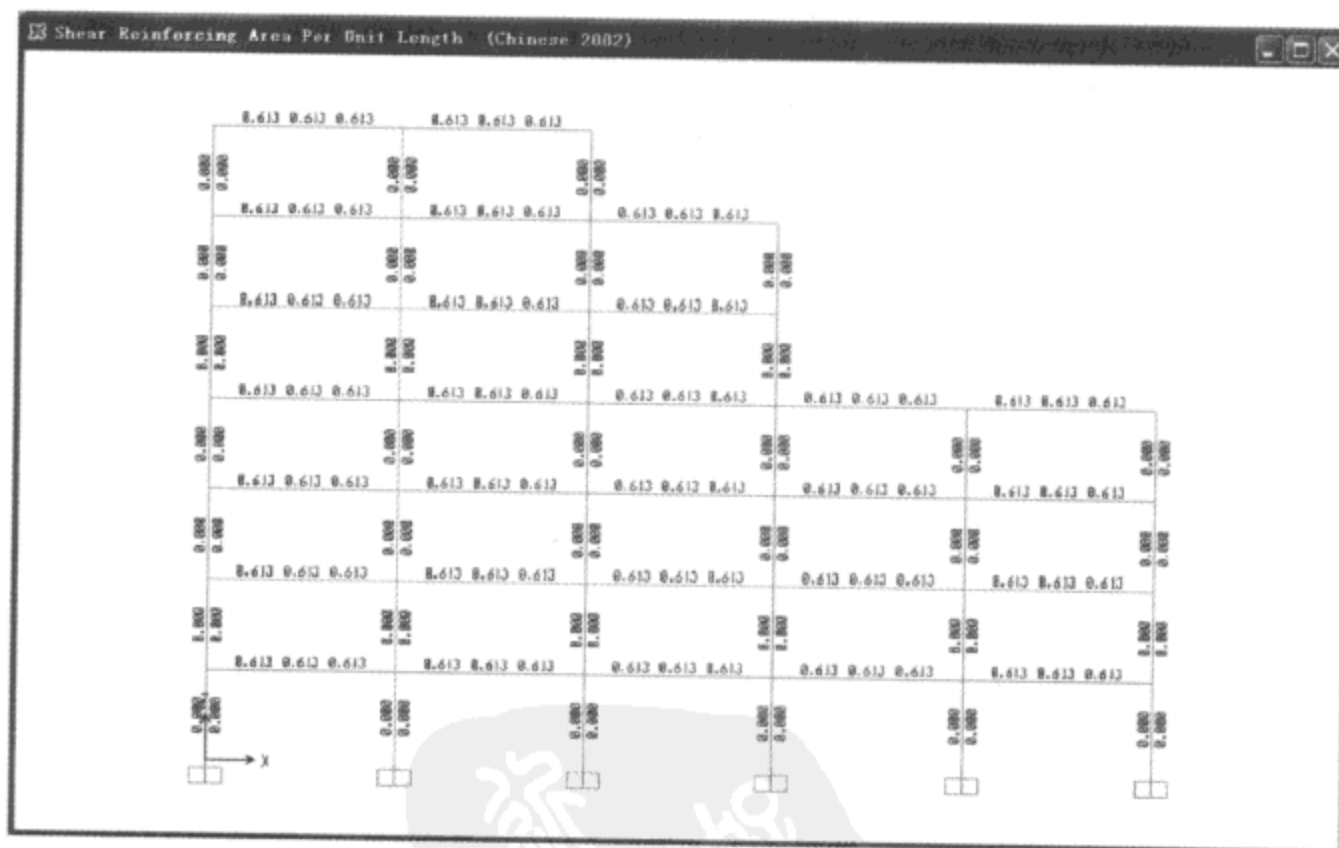


图 16-12 混凝土梁柱抗剪配筋结果图形输出 (xz 视图)

(3) $N/(f_c A)$ 轴压比

在立面或三维视窗中可以显示每根柱的轴压比设计结果。轴压比指柱组合的轴压力设计值与柱的全截面面积和混凝土轴心抗压强度设计值乘积之比值。若出现轴压比不符合规范要求的情况，视窗中将出现相应的提示，具体内容可在设计细节中查看。

(4) Column P-M-M Interaction Ratios 柱 P-M-M 相关比率

当混凝土框架柱用于截面校核时，程序可输出截面的承载力比率，即柱 P-M-M 相关比率。定义柱截面时，设定实际的截面尺寸和配筋方式，并勾选【配筋用于检查】一项。此时，柱截面用于校核。运行完分析与设计，选择显示 **Column P-M-M Interaction Ratios**，视窗中将显示每根需要校核的柱的截面承载力比率，如图 16-13 所示。若柱截面承载力超限，柱构件将显示红色并标注“O/S”，并且在细节中输出相应的警告信息。

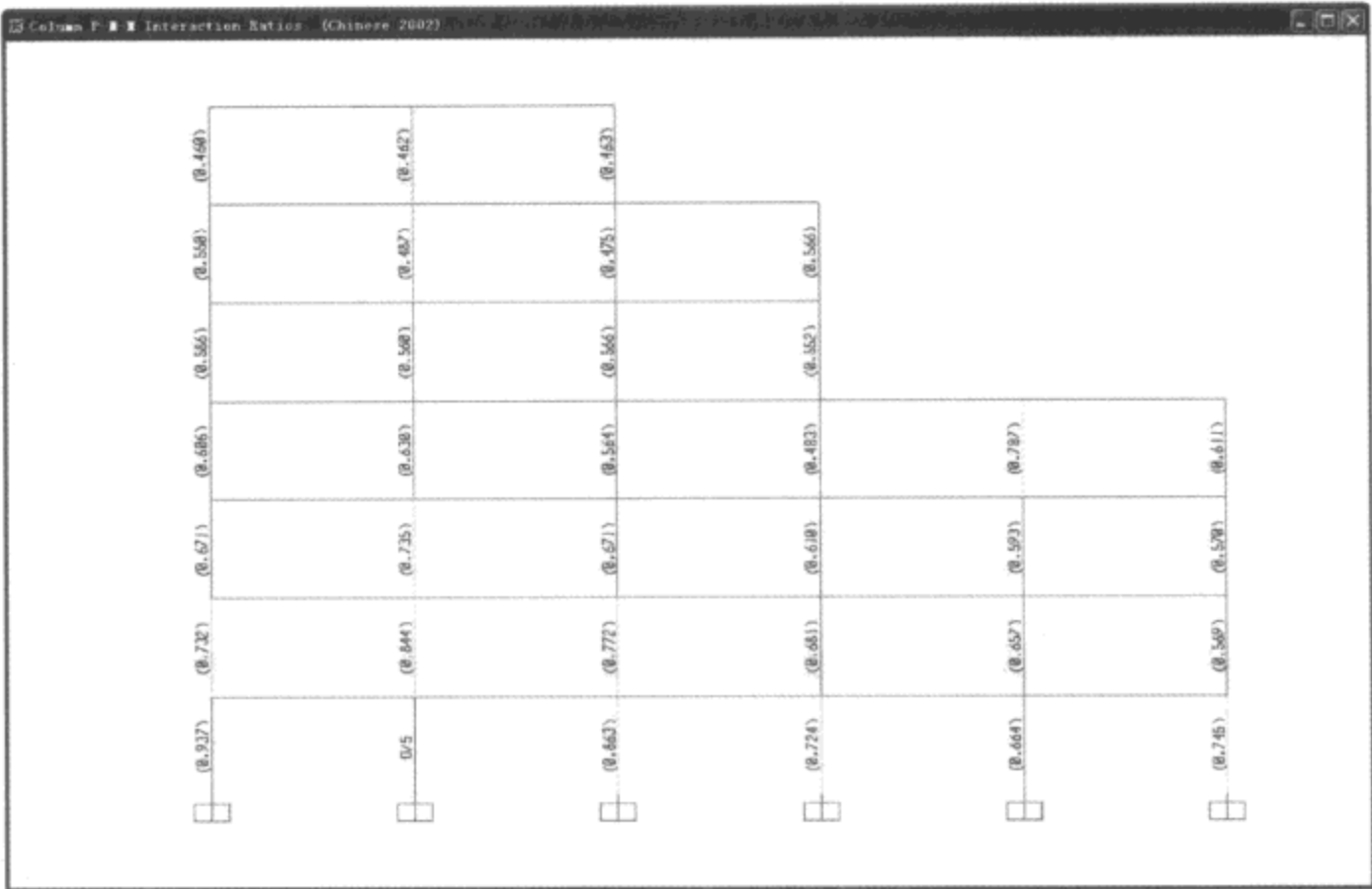


图 16-13 柱 P-M-M 相关比率

16.5.2 各荷载组合工况设计结果及细节输出

上述图形输出的设计结果都是包络值，即所有设计组合的设计结果包络值，这通常是设计人员最关心的设计结果。但有时也需要关心某个特定荷载组合下的设计值。SAP2000 中文版可以输出每一个荷载组合下的设计结果。在显示设计结果的状态下，选中构件然后点击鼠标右键，将弹出设计信息对话框。如果选择的是梁，弹出图 16-3 所示的对话框；如果选择的是柱，弹出图 16-4 所示的对话框，对话框中各项的意义请参见表 16-2。

对话框中的活动窗口显示了各个荷载组合下构件各个控制截面的配筋信息，高亮选择其中的一项再点击【Flex. Details (抗弯细节)】或【Shear Details (抗剪细节)】按钮，即可查看选定设计组合下选定截面的设计细节，这里显示的设计信息均基于首选项中选定的设计规范。比如点击【Summary (摘要)】按钮，将输出选定荷载组合下选定截面的设计细节摘要。“摘要”的内容是对构件“抗弯细节”和“抗剪细节”的归纳，包括构件的尺寸信息、材料信息、抗震信息以及设计内力和配筋计算结果等。图 16-14 显示了某根混凝土梁，在编号为 DCON27 的荷载组合下，位于 6m 处截面（梁端）的设计信息摘要。

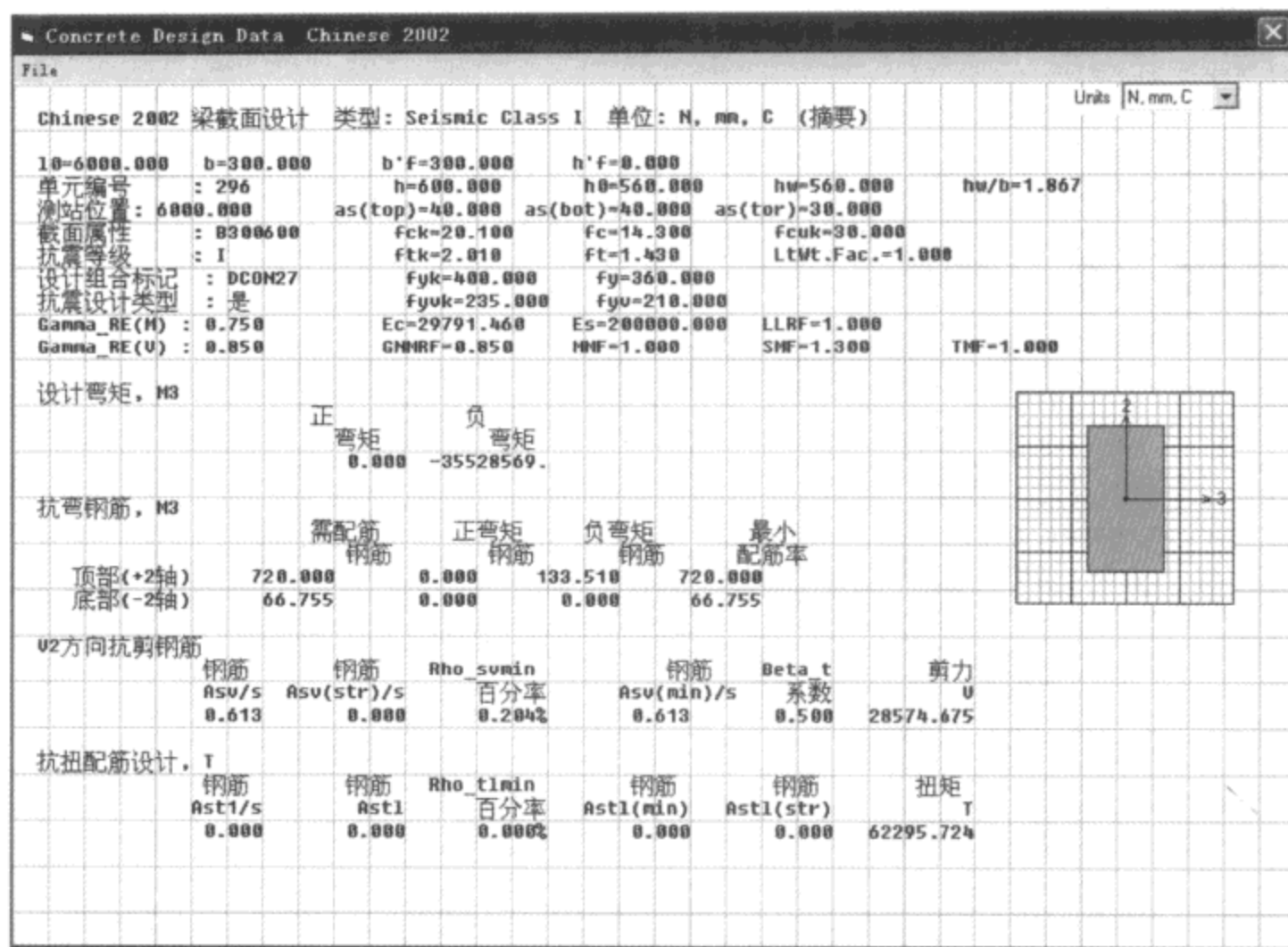


图 16-14 混凝土梁设计摘要输出

点击【Flex. Details (抗弯细节)】按钮, 将输出抗弯设计的细节信息, 包括构件的基本信息、设计弯矩以及抗弯设计过程中的中间参数。图 16-15a) 和图 16-15b) 分别显示了混凝土梁和混凝土柱的抗弯设计细节。其中混凝土柱是按双向受弯构件设计, 设计方法可在混凝土框架设计首选项中进行选择。

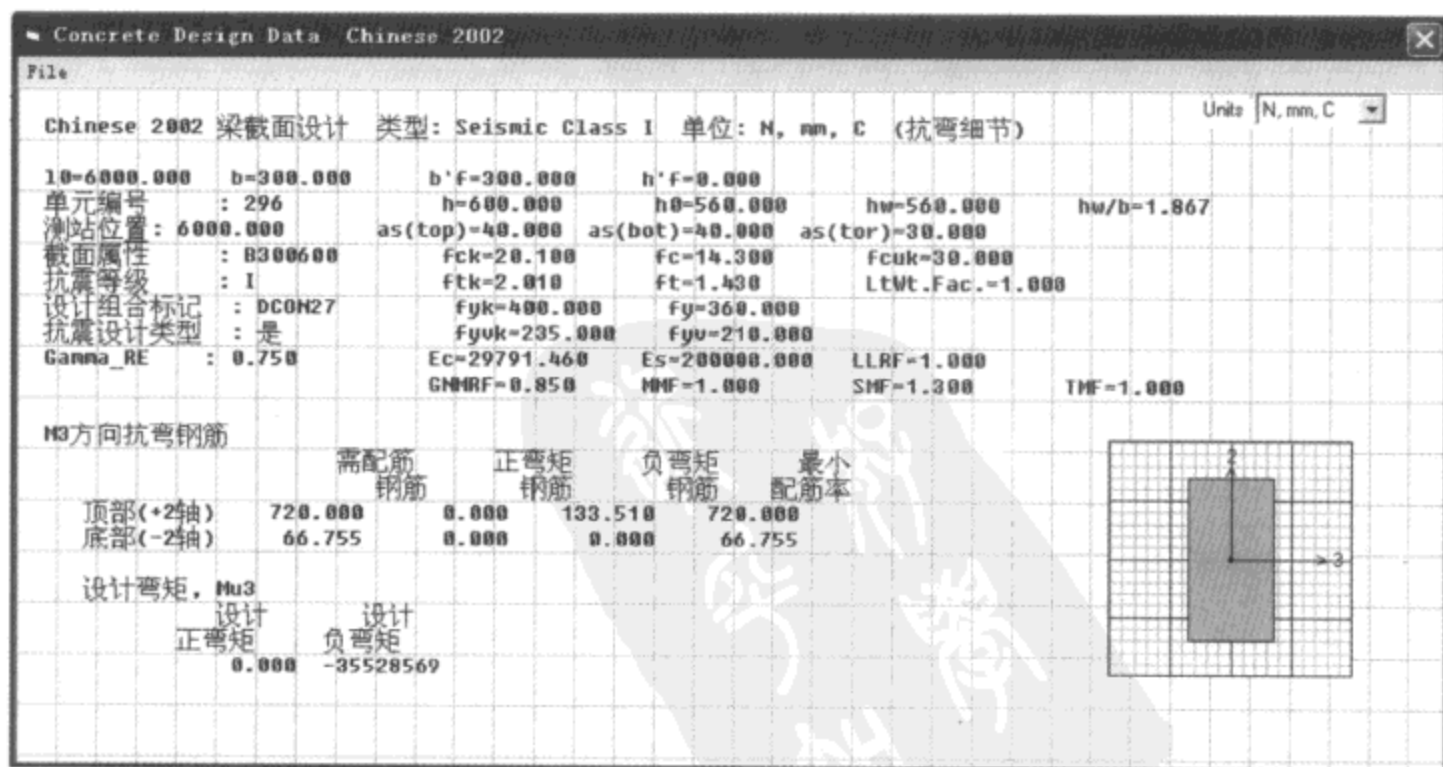


图 16-15a) 混凝土梁抗弯设计细节输出

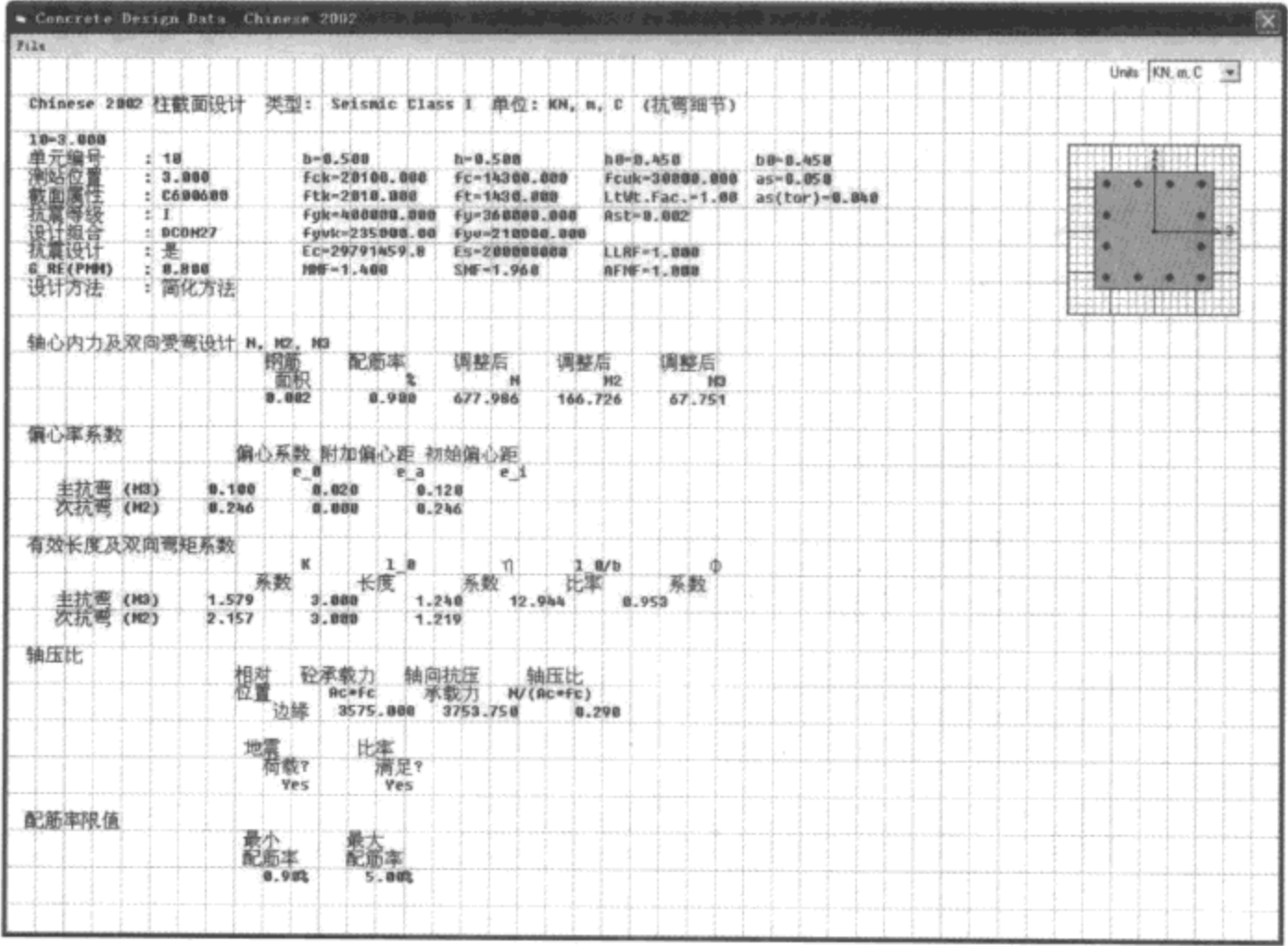


图 16-15b) 混凝土柱抗弯设计细节

点击【Shear Details (抗剪细节)】按钮，将输出抗剪设计的细节信息。图 16-16 和图 16-17 显示了混凝土梁和混凝土柱的抗剪设计细节。其中包括构件的基本信息、设计内力、剪扭设计过程中的中间参数以及设计结果。主要参数和项目名称的含义列于表 16-5 中。

抗 剪 细 节 释 义 表 16-5

| | 名 称 | 含 义 |
|-----|--------------------|--|
| 参 数 | β_c 系数 | 混凝土强度影响系数，参见 GB 50010—2002 第 11.3.3 条 |
| | β_t 系数 | 混凝土受扭承载力降低系数，参见 GB 50010—2002 第 7.6.8 条 |
| | λ 系数 | 剪跨比，参见 GB 50010—2002 第 7.5.4 条、第 11.4.9 条 |
| | ρ_{svmin} 百分率 | 梁箍筋的配筋率，参见 GB 50010—2002 第 11.3.9 条 柱箍筋加密区的体积配箍率，参见 GB 50010—2002 第 11.4.17 条 |
| | Pl. 惯性矩 W_t | 矩形截面受扭塑性抵抗矩，参见 GB 50010—2002 第 7.6.3 条 |
| | Pl. 惯性矩 W_{tw} | 腹板部分受扭塑性抵抗矩，参见 GB 50010—2002 第 7.6.3 条 |
| | Pl. 惯性矩 W_{tf} | 翼缘部分受扭塑性抵抗矩，参见 GB 50010—2002 第 7.6.3 条 |
| | λ_v 系数 | 柱箍筋最小配筋特征值，参见 GB 50010—2002 第 11.4.17 条 |
| | ζ 系数 | 受扭纵向钢筋与箍筋的配筋强度比值，参见 GB 50010—2002 第 7.6.4 条 |
| | ρ_{tlmin} 百分率 | 受扭纵筋的配筋率 |

续上表

| | 名 称 | 含 义 |
|------|---------|--|
| 栏目名称 | 抗剪设计系数 | 抗剪设计中的中间系数，参见 GB 50010—2002 第 7.5.1 条、第 7.6.8 条、第 11.3.3 条、第 11.4.8 条 |
| | 抗剪配筋最大值 | 剪扭截面验算，参见 GB 50010—2002 第 7.6.1 条、第 11.3.3 条、第 11.4.8 条 |
| | 抗剪配筋设计 | 剪扭承载力验算及受剪承载力计算，参见 GB 50010—2002 第 7.6.2 条、第 7.6.8 条、第 11.3.4 条、第 11.4.9 条 |
| | 扭矩设计参数 | 抗扭设计中的中间参数，参见 GB 50010—2002 第 7.6.8 条 |
| | 抗扭设计配筋 | 剪扭承载力计算，参见 GB 50010—2002 第 7.6.8 条、第 7.6.11 条、第 7.6.13 条、第 7.6.14 条 |
| | 抗扭纵向配筋 | 参见 GB 50010—2002 第 10.2.5 条 |

注：表中“栏目名称”一项没有将混凝土梁和混凝土柱分开注释，而是将相关的规范条款一并标注，读者可根据构件类型自行判断。

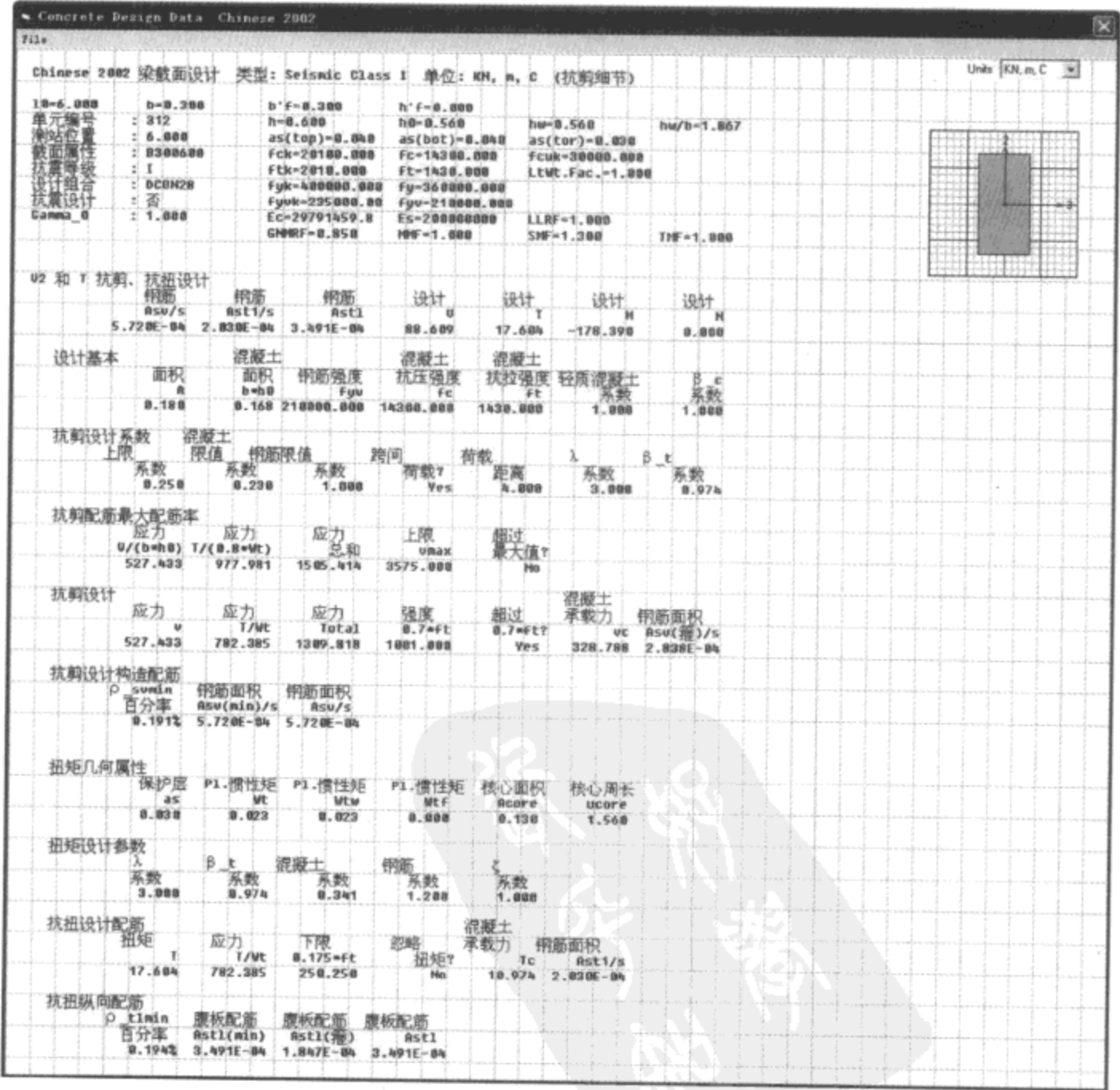


图 16-16 混凝土梁抗剪设计细节输出

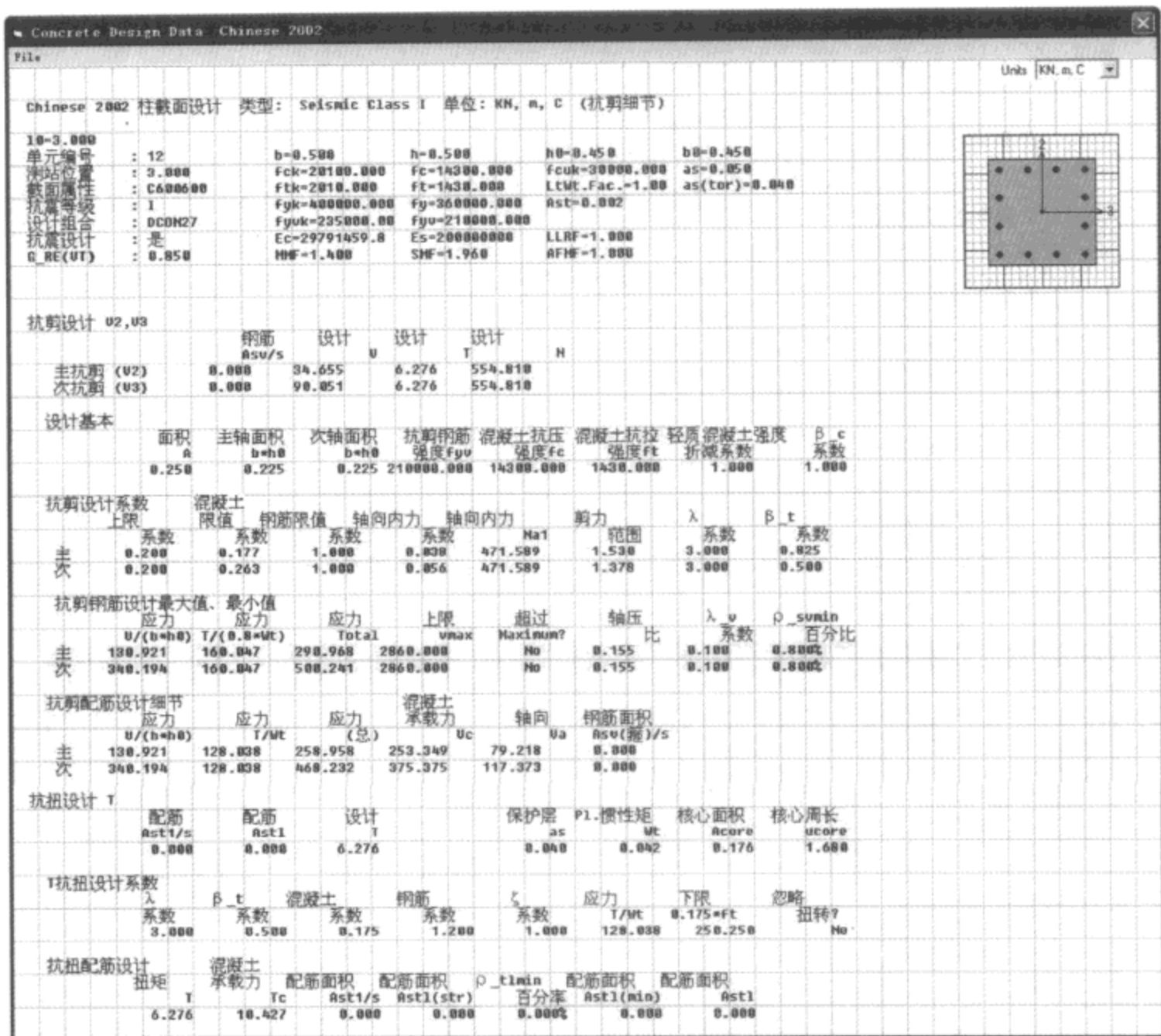


图 16-17 混凝土柱抗剪设计细节输出

16.5.3 表格输出

表格输出可以更详细的列举出有关杆件的设计信息，点击命令【显示】>【显示表格】，将弹出如图 16-18 所示的对话框。左边区域的树状图列举了可以表格显示的内容，主要包括三个部分：模型定义、分析结果和设计数据。每个部分又有若干分类，每种类别下都列举了相应的表格名称。点击【DESIGN DATA】>【混凝土框架】>【混凝土框架概要】，出现两个表格的名称，分别是关于混凝土柱和梁的设计摘要数据信息。点击需要输出的表格名称，前面方框内显示有叉，即代表选中。对话框中的内容设置完毕后，点击【OK】，即生成需要显示的表格，如图 16-19、图 16-20 所示。

此外，可以有选择性地对某些指定构件的设计结果进行表格输出。在模型中点击选中需要查看的构件，再点击【显示】>【显示表格】命令，弹出的对话框中右边选项一栏中，【仅选择的】一项是默认勾选的。相应地，随后输出的是关于选中构件的设计结果表格。

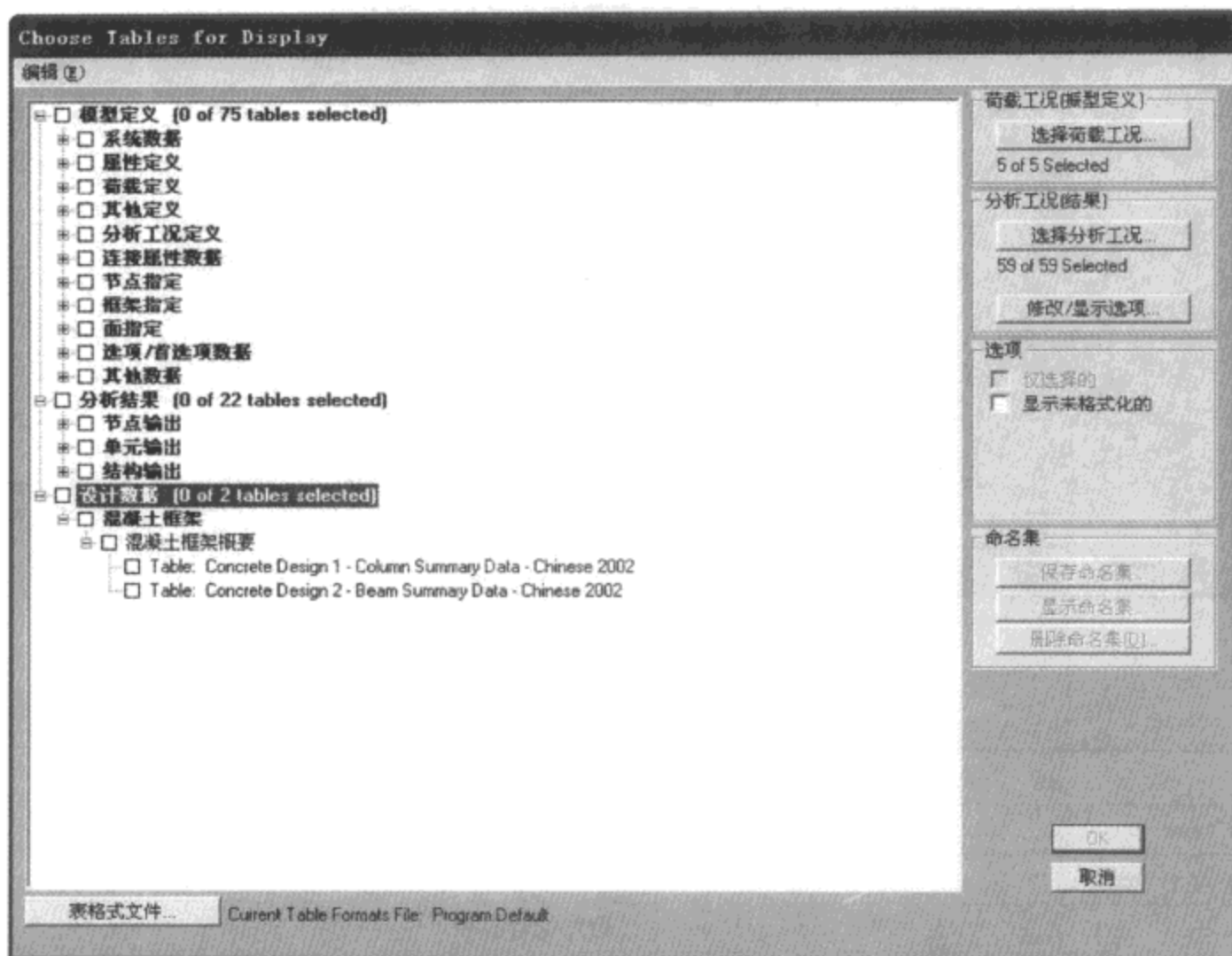


图 16-18 显示表格对话框

Concrete Design 1 - Column Summary Data - Chinese 2002

文件(F) 视图(V) 选项(O) 格式(S)

Units: As Noted

| Frame Text | DesignSect Text | DesignType Text | DesignOpt Text | Status Text | Location mm | PMMCombo Text | PMMArea mm2 | PMMRatio Unitless | VMax Tr |
|------------|-----------------|-----------------|----------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------------|---------|
| 1 | C600600 | Column | Design | No Messages | 0 | DCON27 | 3960 | | DCO |
| 1 | C600600 | Column | Design | No Messages | 1500 | DCON27 | 3960 | | DCO |
| 1 | C600600 | Column | Design | No Messages | 3000 | DCON27 | 3960 | | DCO |
| 2 | C600600 | Column | Design | No Messages | 0 | DCON27 | 3960 | | DCO |
| 2 | C600600 | Column | Design | No Messages | 1500 | DCON27 | 3960 | | DCO |
| 2 | C600600 | Column | Design | No Messages | 3000 | DCON27 | 3960 | | DCO |
| 3 | C600600 | Column | Design | No Messages | 0 | DCON27 | 3960 | | DCO |
| 3 | C600600 | Column | Design | No Messages | 1500 | DCON27 | 3960 | | DCO |
| 3 | C600600 | Column | Design | No Messages | 3000 | DCON27 | 3960 | | DCO |
| 4 | C600600 | Column | Design | No Messages | 0 | DCON27 | 3960 | | DCO |
| 4 | C600600 | Column | Design | No Messages | 1500 | DCON27 | 3960 | | DCO |
| 4 | C600600 | Column | Design | No Messages | 3000 | DCON27 | 3960 | | DCO |
| 5 | C600600 | Column | Design | No Messages | 0 | DCON27 | 3960 | | DCO |
| 5 | C600600 | Column | Design | No Messages | 1500 | DCON27 | 3960 | | DCO |
| 5 | C600600 | Column | Design | No Messages | 3000 | DCON27 | 3960 | | DCO |
| 6 | C600600 | Column | Design | No Messages | 0 | DCON27 | 3960 | | DCO |
| 6 | C600600 | Column | Design | No Messages | 1500 | DCON27 | 3960 | | DCO |
| 6 | C600600 | Column | Design | No Messages | 3000 | DCON27 | 3960 | | DCO |
| 7 | C600600 | Column | Design | No Messages | 0 | DCON27 | 3960 | | DCO |

记录: 1 of 420

完成

图 16-19 混凝土柱设计摘要表格输出

当同时输出多个表格时，通过点击表格对话框右上角的下拉菜单，实现在不同表格间的切换。

混凝土框架设计数据表格输出释义见表 16-6。

Concrete Design 2 - Beam Summary Data - Chinese 2002

文件(F) 视图(V) 选项(O) 格式(M)

Units: As Noted

| | Frame Text | DesignSect Text | DesignType Text | Status Text | Location mm | FTopCombo Text | FTopArea mm2 | FBotCombo Text | FBotArea mm2 |
|---|------------|-----------------|-----------------|-------------|-------------|----------------|--------------|----------------|--------------|
| ▶ | 141 | B300500 | Beam | No Messages | 0 | DCON27 | 720 | DCON22 | 720 |
| | 141 | B300500 | Beam | No Messages | 500 | DCON27 | 540 | DCON22 | 540 |
| | 141 | B300500 | Beam | No Messages | 1000 | DCON27 | 540 | DCON22 | 540 |
| | 141 | B300500 | Beam | No Messages | 1500 | DCON23 | 540 | DCON27 | 540 |
| | 141 | B300500 | Beam | No Messages | 2000 | DCON23 | 540 | DCON27 | 540 |
| | 141 | B300500 | Beam | No Messages | 2000 | DCON23 | 540 | DCON27 | 540 |
| | 141 | B300500 | Beam | No Messages | 2500 | DCON51 | 0 | DCON27 | 540 |
| | 141 | B300500 | Beam | No Messages | 3000 | DCON51 | 0 | DCON27 | 540 |
| | 141 | B300500 | Beam | No Messages | 3500 | DCON91 | 0 | DCON27 | 540 |
| | 141 | B300500 | Beam | No Messages | 4000 | DCON22 | 540 | DCON27 | 540 |
| | 141 | B300500 | Beam | No Messages | 4000 | DCON22 | 540 | DCON27 | 540 |
| | 141 | B300500 | Beam | No Messages | 4500 | DCON22 | 540 | DCON27 | 540 |
| | 141 | B300500 | Beam | No Messages | 5000 | DCON27 | 540 | DCON23 | 540 |
| | 141 | B300500 | Beam | No Messages | 5500 | DCON27 | 540 | DCON23 | 540 |
| | 141 | B300500 | Beam | No Messages | 6000 | DCON27 | 720 | DCON23 | 720 |
| | 142 | B300500 | Beam | No Messages | 0 | DCON27 | 720 | DCON20 | 720 |
| | 142 | B300500 | Beam | No Messages | 500 | DCON27 | 540 | DCON20 | 540 |
| | 142 | B300500 | Beam | No Messages | 1000 | DCON27 | 540 | DCON22 | 540 |
| | 142 | B300500 | Beam | No Messages | 1500 | DCON23 | 540 | DCON27 | 540 |

记录: 1 of 3010

完成

图 16-20 混凝土梁设计摘要表格输出

表 16-6

| 项 目 | 意 义 |
|------------------|------------------------------|
| Frame Text | 构件编号 |
| Design Sect Text | 构件设计截面 |
| Design Type Text | 构件设计类型 |
| Design Opt Text | 设计选项 (Design or Check/设计或校核) |
| Status Text | 状况标注 |
| Location | 测站 |
| PMM Combo Text | 柱 PMM 设计组合 |
| PMM Area | 柱按压弯构件设计纵向配筋面积 |
| PMM Ratio | PMM 承载能力比率 (校核时显示) |
| VMaj Combo Text | 柱主轴方向抗剪设计组合 |
| VMaj Rebar | 柱主轴方向抗剪配筋面积 |
| VMin Combo Text | 柱次轴方向抗剪设计组合 |
| VMin Rebar | 柱次轴方向抗剪配筋面积 |
| FTop Combo Text | 梁截面顶部配筋设计组合 |
| FTop Area | 梁截面顶部配筋面积 |
| FBot Combo Text | 梁截面底部配筋设计组合 |
| FBot Area | 梁截面底部配筋面积 |
| V Combo Text | 梁抗剪设计组合 |
| V Rebar | 梁抗剪配筋面积 |
| Tlmg Combo | 梁抗扭纵向配筋设计组合 |
| Tlmg Area | 梁抗扭纵向配筋面积 |
| Err Msg Text | 错误信息 |
| Warn Msg Text | 警告信息 |

除了设计结果,设计人员所关心的振型信息和底层柱底反力也能以表格的方式输出。这些表格位于显示表格对话框中的【分析结果】>【结构输出】。

中国的工程设计人员所关心的振型信息主要集中于 Modal Participating Mass Ratios, 如图 16-21 所示,表中给出了各个振型的周期(Period),以及各个振型对应六个整体坐标方向的质量参与百分比(UX、UY、UZ、RX、RY、RZ)和质量参与百分比累加值(SumUX、SumUY、SumUZ、SumRX、SumRY、SumRZ)。根据质量参与系数,用户可以判断每个振型的基本形态,通常我们所关心的分量是 UX、UY、RZ。比如,某阶振型中,UX 的数值远大于 UY、RZ,说明该振型以 X 方向的平动为主;同理,若 RZ 的数值远大于 UX、UY,说明该振型带有明显的扭转。另外,也可以通过动画,直观地显示各个振型的形态,并根据上述信息来确定第一平动周期和第一扭转周期。质量参与百分比累加值反应了振型参与质量的大小。《高层建筑混凝土结构技术规程》明确规定对于 B 级高度高层建筑“计算振型数应使振型参与质量不小于总质量的 90%”,因此可查看质量参与百分比累加值 SumUX、SumUY 是否大于等于 90,若不满足要求,需要增加求解的振型数量。

| Output Case | Step Type | Step Name | Period | UX | UY | UZ | SumUX | SumUY | SumUZ | RX | RY | RZ | SumRX | SumRY | SumRZ |
|-------------|-----------|-----------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| MODAL | Mode | 1 | 7.45274 | 0.000001421 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000001421 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000001421 | 0.000000000 | 0.000000000 |
| MODAL | Mode | 2 | 6.86184 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 |
| MODAL | Mode | 3 | 6.67636 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 |
| MODAL | Mode | 4 | 6.54054 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 |
| MODAL | Mode | 5 | 6.4977 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 |
| MODAL | Mode | 6 | 6.4602 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 |
| MODAL | Mode | 7 | 6.4277 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 |
| MODAL | Mode | 8 | 6.3947 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 |
| MODAL | Mode | 9 | 6.3617 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 |
| MODAL | Mode | 10 | 6.3287 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 |
| MODAL | Mode | 11 | 6.2957 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 |
| MODAL | Mode | 12 | 6.2627 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 |
| MODAL | Mode | 13 | 6.2297 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 |
| MODAL | Mode | 14 | 6.1967 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000 |

图 16-21 振型质量参与系数表格输出

输出底层柱底反力的表格名称为“Base Reactions”(图 16-22),表中可以显示所有荷载组合以及单工况下的底层柱底反力。设计人员所关心的 V_x 、 V_y 、 N 、 M_x 和 M_y 分别对应表中的 GlobalFX、GlobalFY、GlobalFZ、GlobalMX 和 GlobalMY。表中内容的详细解释请参见“结果与输出”一章。

16.5.4 文本输出

文本输出实际上是将表格输出的内容集中到一个文件内,形成一个新的文本文件。点击命令【文件】>【打印表格】,弹出如图 16-23 所示的对话框。完成相关设置后,点击【OK】,在随后弹出的对话框中指定文件名和保存路径,即可生成选定表格的文本文件。前述表格输出的内容都可以这种方式输出,并生成相应的文本文件。

此外,还可以通过【文件】>【导出】将设计结果数据输出到电子表格(xls)或数据库(mdb)文件中,再通过 EXCEL 电子表格或 ACCESS 数据库等软件进行编辑。关于输出的详细讲解请参见“结果与输出”一章。

Base Reactions

文件(F) 视图(V) 选项(O) 格式(M)

Units: As Noted

| OutputCase Text | CaseType Text | StepType Text | StepNum Unitless | GlobalFX KN | GlobalFY KN | GlobalFZ KN | GlobalMX KN-m | GlobalMY KN-m |
|--------------------|------------------|------------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|------------------|
| SPECY | LinRespSpec | Max | | 1.696 | 1601.467 | 3.403 | 19706.9396 | 17.3401 |
| live | LinStatic | | | 000000008691 | 00000001418 | 5265 | 39487.5 | -69255.0 |
| Qx | LinStatic | | | -2041.814 | 00000002771 | 00000000145 | 00000004033 | -27233.9353 |
| Qy | LinStatic | | | 000000008309 | -1886.412 | 00000000108 | 25239.174 | 00000001208 |
| WIND | LinStatic | | | -98.777 | 000000006505 | 4.619E-14 | 000000001156 | -1156.0865 |
| DCON1 | Combination | | | 000000005438 | 000000008197 | 34548.126 | 259189.632 | -445998.860 |
| DCON2 | Combination | | | 000000005293 | 000000008036 | 33494.045 | 251275.284 | -432982.750 |
| DCON3 | Combination | | | 000000004614 | 000000007028 | 29140.205 | 218609.62 | -376378.460 |
| DCON4 | Combination | | | -138.288 | 000000005856 | 26123.045 | 195992.784 | -337644.27 |
| DCON5 | Combination | | | 138.288 | 000000001796 | 26123.045 | 195992.784 | -334407.22 |
| DCON6 | Combination | | | -138.288 | 000000006864 | 21769.205 | 163327.32 | -281639.976 |
| DCON7 | Combination | | | 138.288 | 000000001695 | 21769.205 | 163327.32 | -278402.934 |
| DCON8 | Combination | | | -82.973 | 8.919E-13 | 33494.045 | 251275.284 | -433963.86 |
| DCON9 | Combination | | | 82.973 | 000000001518 | 33494.045 | 251275.284 | -432011.63 |
| DCON10 | Combination | | | -82.973 | -1.167E-13 | 29140.205 | 218609.62 | -377949.57 |

记录: 1 of 90

完成

图 16-22 底层柱底反力表格输出

Choose Tables for Printing

编辑(E)

☐ 模型定义 (0 of 75 tables selected)

- ☐ 系统数据
- ☐ 属性定义
- ☐ 荷载定义
- ☐ 其他定义
- ☐ 分析工况定义
- ☐ 连接属性数据
- ☐ 节点指定
- ☐ 框架指定
- ☐ 面指定
- ☐ 选项/首选项数据
- ☐ 其他数据

☐ 分析结果 (0 of 22 tables selected)

- ☐ 节点输出
- ☐ 单元输出
- ☐ 结构输出

☒ 设计数据 (2 of 2 tables selected)

- ☒ 混凝土框架

荷载工况(荷载定义)

选择荷载工况...

5 of 5 Selected

分析工况结果

选择分析工况...

59 of 59 Selected

修改/显示选项...

输出类型

- ☒ RTF 文件
- ☐ TXT 文件
- ☐ TXT 文件有/无分页
- ☐ HTML 文件

选项

- ☐ 仅选定的
- ☐ 打印到打印机
- ☒ 打印到文件
- ☐ 横向打印
- ☐ 过滤准则
- ☐ 超连接目录

命名集

保存命名集...

显示命名集...

删除命名集(D)...

OK

取消

表格式文件... Current Table Formats File: Program Default

图 16-23 文本输出对话框

16.6 壳设计

SAP2000 可以对壳进行计算和设计，输出结果包括壳的分布应力、等效力、主应力、

分布钢筋等等。对于壳的设计，程序主要依据以下两份文献：

1) Brondum-Nielsen, T. 1974. Optimum Design of Reinforced Concrete Shells and Slabs. Technical University of Denmark. Report NR. R.

2) Marti, P. 1990. Design of Concrete Slabs for Transverse Shear. *ACI Structural Journal*. March-April.

以本章图 16-6 所示的模型为例。若需要对楼板进行分析，则楼板单元的类型需设定为壳。运行分析后，点击命令【显示】>【显示力/应力】>【壳】，在弹出的对话框的 **Component Type** 一栏中选择 **Concrete Design**，随后在 **Component** 一栏中选择需要显示的内容（图 16-24）。

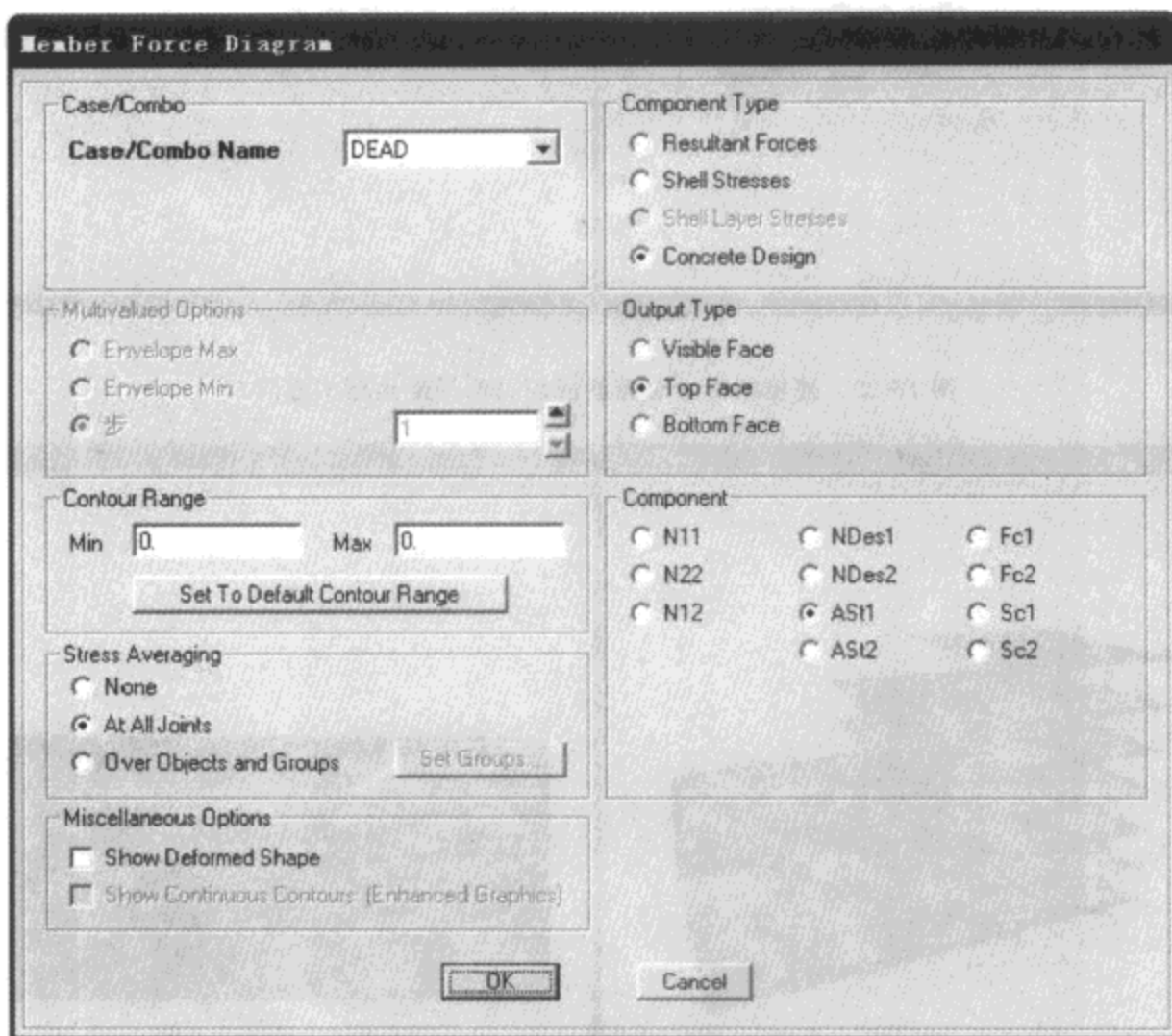


图 16-24 楼板设计结果输出对话框

例如，查看恒载作用下楼板截面的配筋结果。在图 16-24 所示的对话框中，首先选择荷载工况 **DEAD**，再选择 **Output Type** 一栏的 **Top Face**（上层配筋），并在 **Component** 一栏中选择 **AS1**（面局部坐标 1 方向）或 **AS2**（面局部坐标 2 方向），即面内两个方向的配筋面积（单位长度的配筋面积），结果输出如图 16-25 所示。

同理，若选择 **Bottom Face** 以及 **AS2**，得到如图 16-26 所示的结果输出，即楼板截面下层，在面局部坐标 2 方向的单位长度的配筋面积。使用上述方法，即可查看楼板双层双向的配筋量。

关于壳设计详细的计算方法和参数含义，请参见“结果与输出”一章。

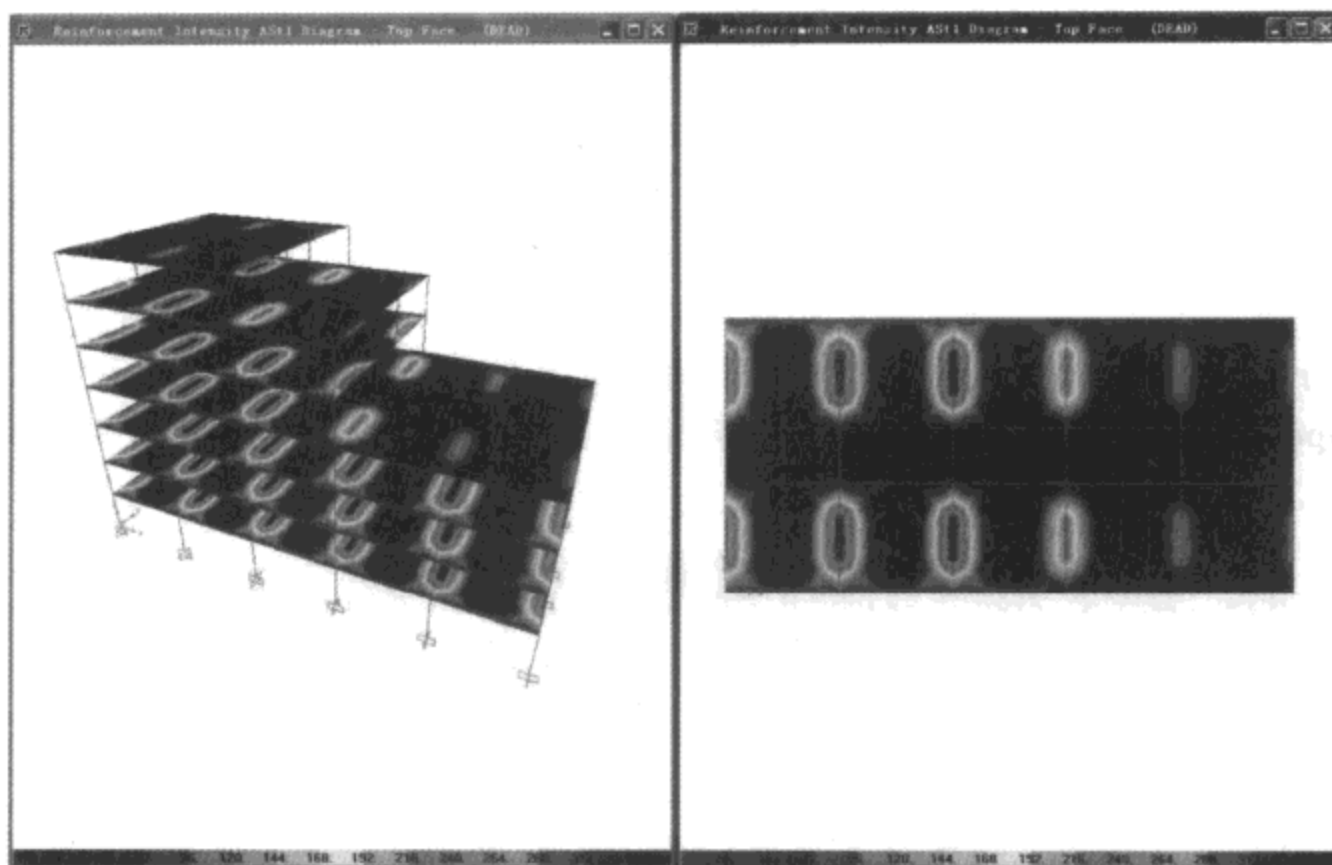


图 16-25 楼板截面上层配筋面积（面局部坐标 1 方向）

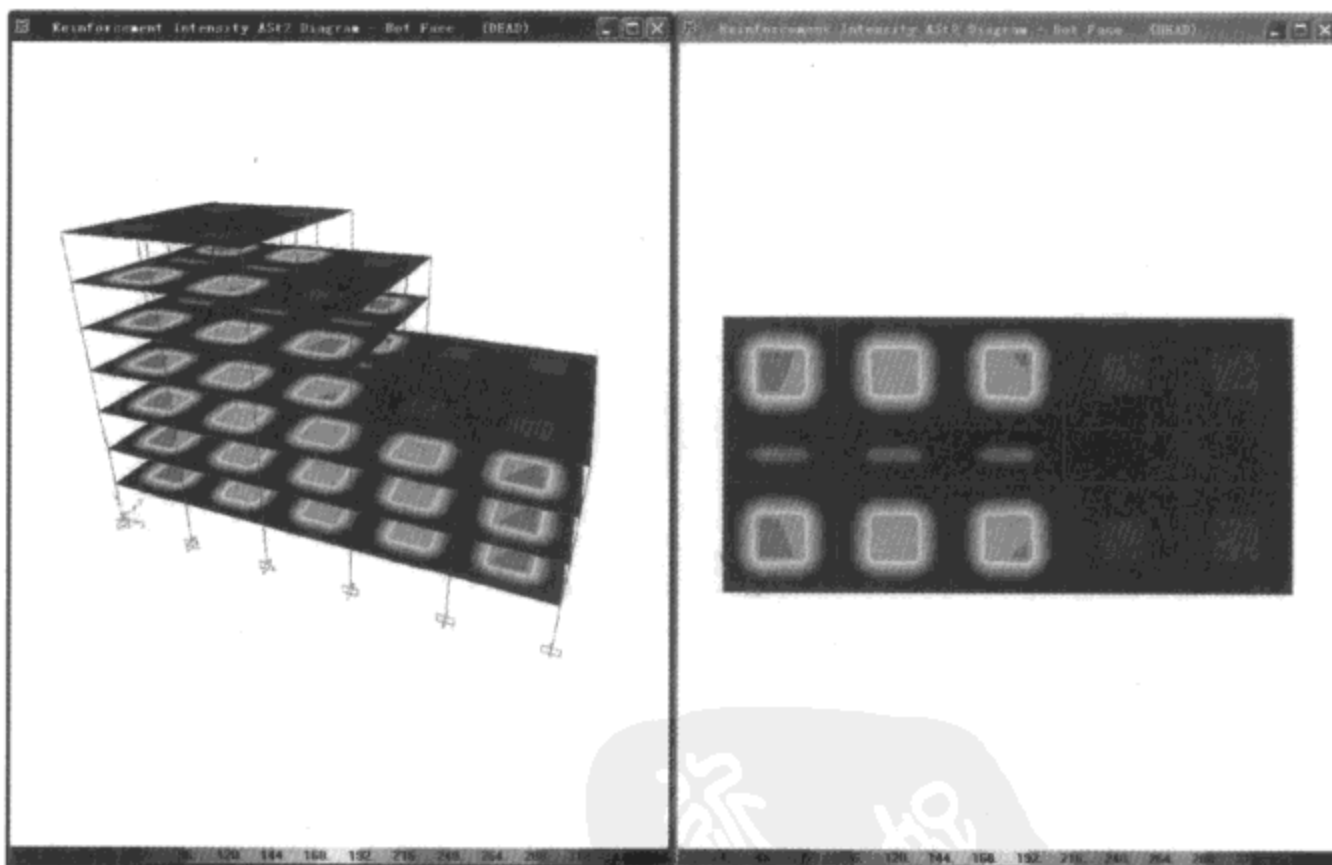


图 16-26 楼板截面下层配筋面积（面局部坐标 2 方向）

第17章

钢结构设计和优化过程

在 SAP2000 中，钢结构的设计具有交互式的优化设计功能。首先，工程师可以将特定的一组截面赋给构件，构件通过自动优化设计的功能反复分析设计，选出最优截面；其次，SAP2000 中的设计过程是个交互式设计过程，工程师可以通过修改构件的各个设计参数，控制整个设计过程。对构件进行钢构件设计的前提是构件的设计类型为钢（STEEL），在未变形视图中右键点击某根构件，在弹出对话框中的设计过程一栏会显示当前构件的设计类型。

SAP2000 中的钢结构设计功能非常强大，兼容了中国、美国、欧洲等各国规范，下面先介绍钢结构的设计过程，然后详细介绍 SAP2000 中的钢结构设计功能。

17.1 钢结构设计过程

本节大体介绍在 SAP2000 中钢结构设计的基本流程：

- 1) 建立模型；
- 2) 运行结构分析；
- 3) 使用【选项】>【首选项】>【钢框架设计】命令，查看指定钢框架设计的整体参数，包括使用的规范、是否验算挠度、应力比限值等；
- 4) 根据需要使用【设计】>【钢框架设计】>【选择设计组】命令，控制设计组指定；
- 5) 根据需要使用【设计】>【钢框架设计】>【选择设计组合】命令，控制参加设计的组合，SAP2000 默认自动选择参加设计的组合，如果需要添加或删除默认的设计组合，可以通过此命令进行指定；
- 6) 根据需要使用【设计】>【钢框架设计】>【查看/修改覆盖项】命令，指定钢构件设计覆盖项；
- 7) 根据需要选择使用【设计】>【钢框架设计】>【设置位移目标】命令，设定结构的目标位移设计值；
- 8) 根据需要选择使用【设计】>【钢框架设计】>【设置周期目标】命令，设定结构

的目标周期设计值；

9) 点击【设计】>【钢框架设计】>【开始结构设计/检查】命令，进行钢结构设计/检查；

10) 查看钢结构设计结果；

11) 使用【设计】>【钢框架设计】>【修改设计截面】命令，可以对选中的钢构件修改其设计截面，点击【设计】>【钢框架设计】>【开始结构设计/检查】命令，再次运行设计，此次设计将使用修改构件的新设计截面；

12) 使用【分析】>【运行分析】命令重新进行结构分析，此时使用的构件截面即为最新指定的截面属性；

13) 再次进行钢框架设计，使用新的分析结果和截面属性进行设计校核；

14) 检查设计结果，确定钢结构设计满足要求后，点击【设计】>【钢框架设计】>【设置自动选择截面为空】命令，此命令将删除所有自动选择截面，仅保存最后指定给构件的截面信息，此操作使自动选择截面属性变为固定截面属性，并且可以减小模型文件大小。

以上是钢结构设计的基本过程。下面将以一个小的钢结构模型为例进行详细的介绍。示例模型为一个三层纯框架结构，层高 3m，X 方向四跨，Y 方向三跨。将所有梁指定同一种截面，所有柱指定同一种截面，全部采用中国 H 型钢库截面，并指定自动截面选择列表进行优化设计。模型如图 17-1 所示。

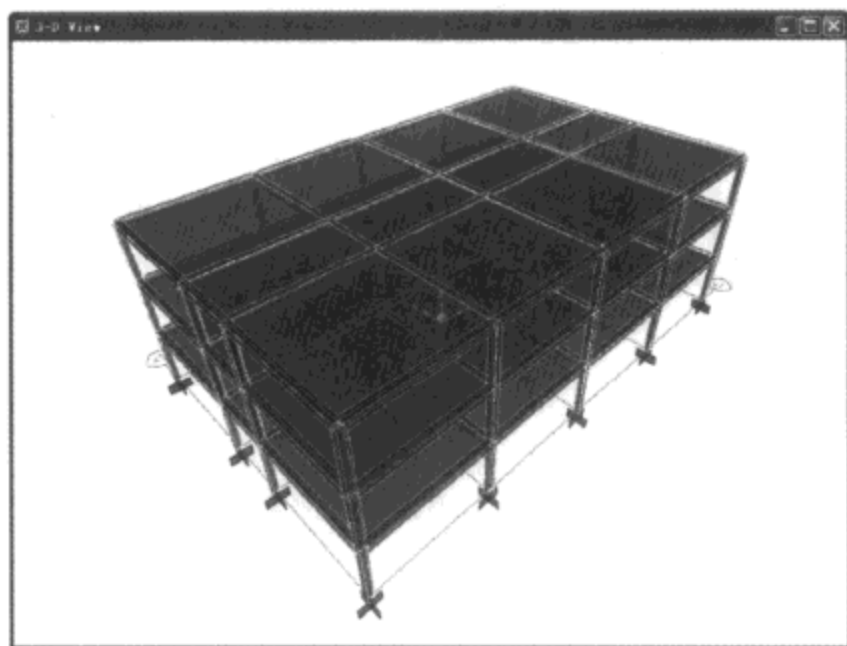


图 17-1 钢结构模型图

17.2 自动选择截面列表的设置

要在 SAP2000 中进行钢结构的优化设计，需要在建模时定义一个或多个自动选择类型的钢框架截面。自动选择截面的定义在前面有关截面定义的章节中已有详细介绍，这里只从设计过程的角度进行介绍。

(1) 导入中国型钢截面库截面

点击【定义】>【框架截面】命令，弹出框架属性对话框（图 17-2）。

点击右上角的下拉框，选择 Import I/Wide Flange 项，点击【添加新属性】按钮，弹出

打开截面属性文件对话框，在程序安装目录下找到中国型钢截面库 **Chinese. pro** 文件。弹出如图 17-3 所示的对话框。

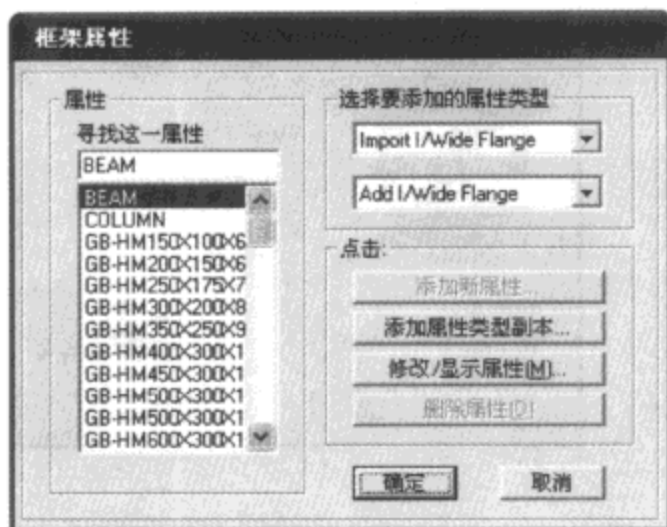


图 17-2 框架属性对话框图



图 17-3 导入型钢截面对话框

在此对话框中选择需要导入的型钢截面，配合使用键盘上的 Shift 或 Ctrl 键可以选择多个截面，也可按下鼠标左键拖动选择多个截面。点击【确定】按钮，退出对话框，弹出 I/Wide Flange Section对话框（图 17-4）。

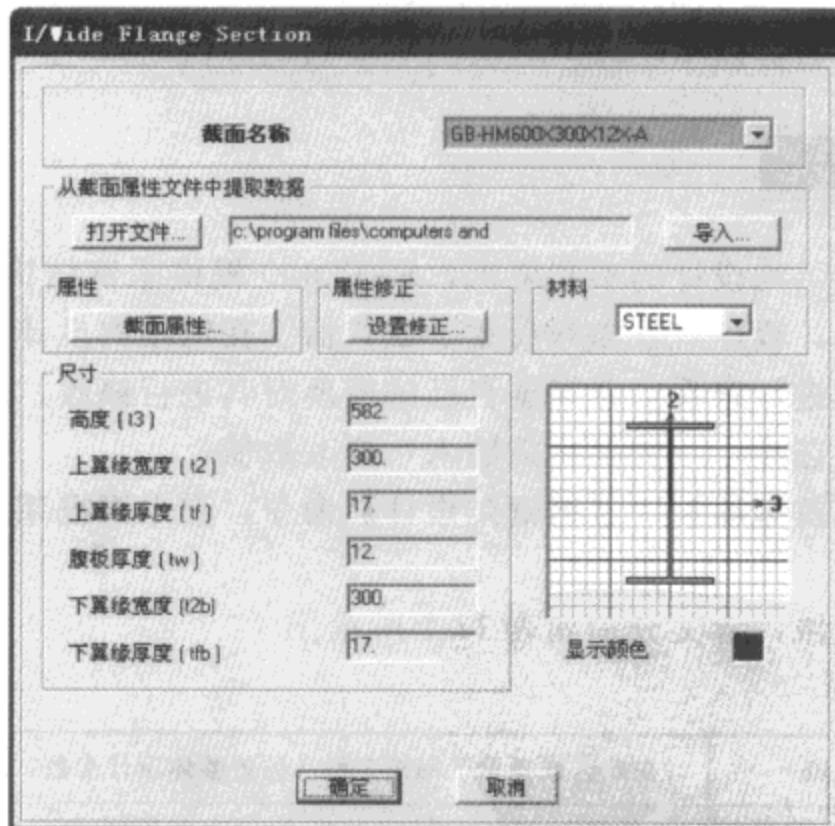


图 17-4 I/Wide Flange Section 对话框

可以对构件的材料进行修改，点击【确定】关闭该对话框。

(2) 添加自动选择列表截面

点击框架属性对话框右上方第二个下拉菜单，选择其中的 Add Auto Select 一项（图

17-5)。点击【添加新属性】按钮，弹出自动选择截面对话框（图 17-6）。



图 17-5 框架属性对话框



图 17-6 自动选择截面对话框

在左侧截面列表中选择欲指定给自动选择截面的若干型钢截面，点击【添加】按钮，选中的截面则显示在右侧自动选择列表内。点击【覆盖…】按钮弹出显示选择截面对话框，在其中选择一个分析设计初始试算截面（程序默认取自动选择列表中间位置的截面），点击【确定】回到自动选择截面对话框，在此对话框中点击【确定】按钮，关闭对话框，即完成了一个自动选择截面的定义。本例中，我们定义一个名称为“BEAM”的梁自动选择截面（选择若干名称以 GB-HM 开头的中国型钢库截面）和一个名称为“COLUMN”的柱自动选择截面（选择加入若干名称以 GB-HW 开头的中国型钢库截面）。

17.3 钢结构设计首选项

为满足工程师对钢结构设计的不同要求，SAP2000 提供了钢结构设计首选项设置功能。在钢结构设计首选项中，程序对各参数设置了默认值。在钢结构设计之前，工程师一般需要对首选项中的参数设置进行查看，并根据自己的需要对其进行修改。修改的方式有两种：一种是通过下拉菜单进行选择；一种是直接输入，修改数值。

点击【选项】>【首选项】>【钢框架设计】命令，弹出钢框架设计首选项对话框（图 17-7）。

对话框中有五个区域，含义分别如表 17-1 所示。

表 17-1

| | |
|------------|-----------------------------------|
| 钢框架设计参数主区域 | 在此区域显示了钢框架设计的各整体设计参数，可以根据需要对其进行修改 |
| 设置到默认值区域 | 可以选择把全部项目或选中项目设置为默认值 |
| 设置为前一个值区域 | 可以选择把全部项目或选中项目设置为前一个设定值 |
| 项描述区域 | 在此区域中显示对选中项目的基本描述 |
| 值的颜色编码解释区域 | 显示参数区域中各种颜色显示的含义 |

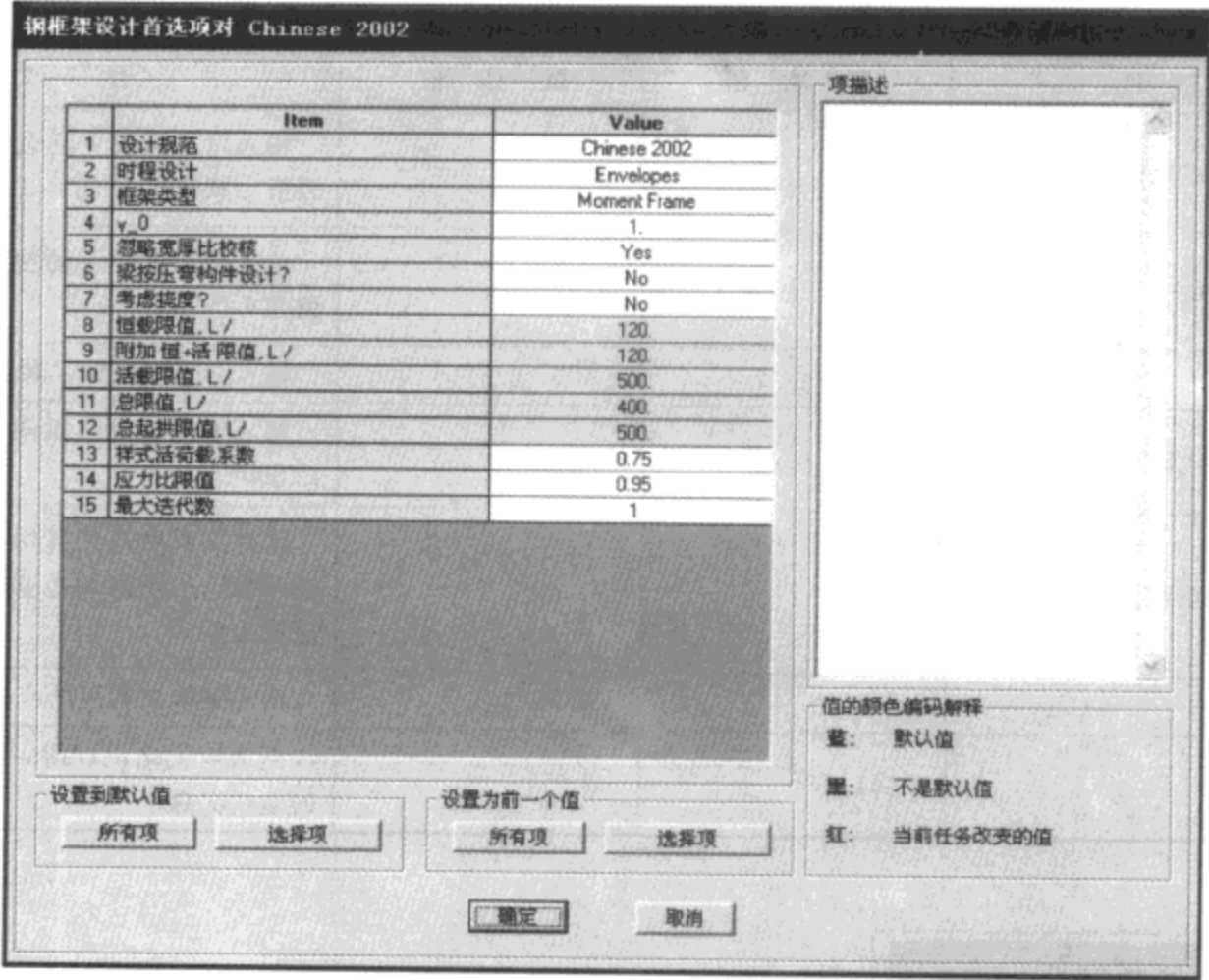


图 17-7 钢框架设计首选项对话框

参数含义中的各参数具体含义见表 17-2。

表 17-2

| 项 目 | 可 能 值 | 默 认 值 | 含 义 |
|------------|--|--------------|----------------------------|
| 设计规范 | Chinese2002 等 各 国 规范 名称 | Chines2002 | 在此项中选择程序钢框架设计所使用的规范 |
| 时程设计 | Envelopes/Step by Step | Envelopes | 选择时程分析工况的设计方式 |
| 框架类型 | Moment Frame / Braced Frame CBF / Braced Frame EBF | Moment Frame | 指定框架体系设计类型，包括：框架、中心支撑、偏心支撑 |
| γ_0 | >0 | 1 | 结构重要性系数 |
| 忽略宽厚比检查 | Yes /No | Yes | 指定是否忽略宽厚比限值的检查 |
| 梁按压弯构件设计? | Yes /No | No | 指定梁是否按照压弯构件进行设计 |
| 考虑挠度? | Yes /No | No | 指定是否验算钢构件的挠度 |
| 恒载限值, L/ | ≥ 0 | 120 | 输入恒载作用下的构件挠度限值，默认值为 L/120 |

续上表

| 项 目 | 可 能 值 | 默 认 值 | 含 义 |
|---------------|----------|-------|--|
| 附加 恒+活 限值, L/ | ≥ 0 | 120 | 输入附加恒载+活载作用下的挠度限值, 默认值为 $L/120$ |
| 活载限值, L/ | ≥ 0 | 500 | 输入活载作用下的挠度限值, 默认值为 $L/500$ |
| 总限值, L/ | ≥ 0 | 400 | 输入总挠度限值, 默认值为 $L/400$ |
| 总起拱限值, L/ | ≥ 0 | 500 | 输入钢构件总起拱限值, 默认值为 $L/500$ |
| 样式活荷载系数 | ≥ 0 | 0.75 | 国外规范中与悬臂构件有关的活荷载系数, 与中国规范基本无关, 一般应取为 0 |
| 应力比限值 | ≥ 0 | 0.95 | 输入钢截面利用的应力比限值 |
| 最大迭代数 | ≥ 1 | 1 | 钢结构优化设计时, 在此指定最大的迭代次数 |

17.4 钢结构设计条件设定

本节将介绍有关 SAP2000 中钢结构设计功能的实现方式, 以及一些具体参数的定义方式和含义。

17.4.1 设定设计组

SAP2000 中可以对钢结构的构件进行分组优化设计, 通过把若干具有自动选择截面的构件定义为一组, 在设计之前指定设计组, 程序在对结构的优化设计过程中将对这一组中的构件赋予同一个钢结构截面。在设定的组中没有自动选择列表的截面, 在分组设计中将被忽略, 单独进行设计校核。

另外, 如果这一设计组构件中有部分构件或全部构件在设计荷载作用下超限, 即设定的自动选择列表中的所有截面都不满足要求, 这种情况下设计组的设定将失效, 构件将不再按照设计组的设定进行统一选择截面。

设定设计组的操作方式如下:

点击【设计】>【钢框架设计】>【选择设计组】命令, 弹出钢构件设计组选择集对话框(图 17-8)。

在对话框左边的组列表显示框中, 显示了已定义的各个组的名称, 选中要设定为设计组的组名, 点击【添加】按钮, 选中的组将被移到右侧的设计组显示框中; 如果要移除已经选中的设计组, 在右侧显示框中选择相应组名, 点击【移除】按钮, 相应组名将被移动到左侧显示框中。在此例中, 我们将 BEAM (所有梁构件指定为一组, 组名称为 BEAM) 和 COL (所有柱构件指定为一组, 组名称为 COL) 两个组合指定为设计组。ALL 组合包括模型中所有的构件, 一般不可把这个组合指定为设计组。

17.4.2 选择设计组合

用 SAP2000 进行设计时，程序会根据所使用的规范自动生成荷载组合。而工程师可以选择采用部分或全部荷载组合进行钢框架设计。在默认情况下，程序会对所有钢构件按照其对应的所有默认组合进行设计校核。如果要选择部分组合进行设计，具体步骤为：点击【设计】>【钢框架设计】>【选择设计组合】命令，弹出设计荷载组合选择集对话框（图 17-9）。对话框说明见表 17-3。

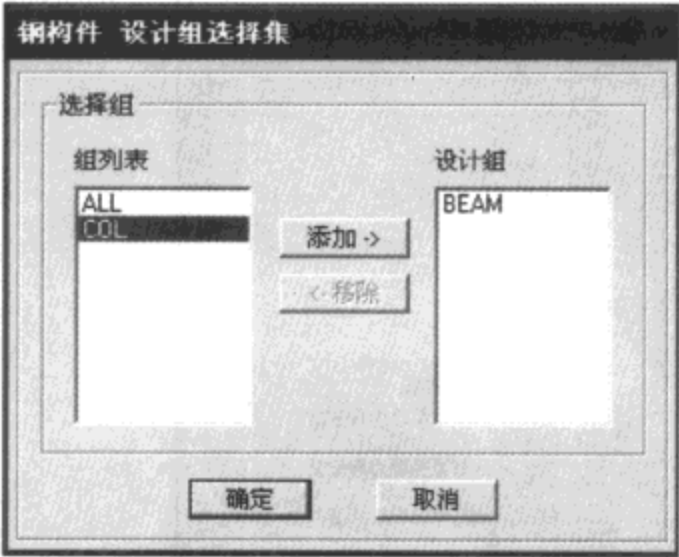


图 17-8 钢构件设计组选择集对话框

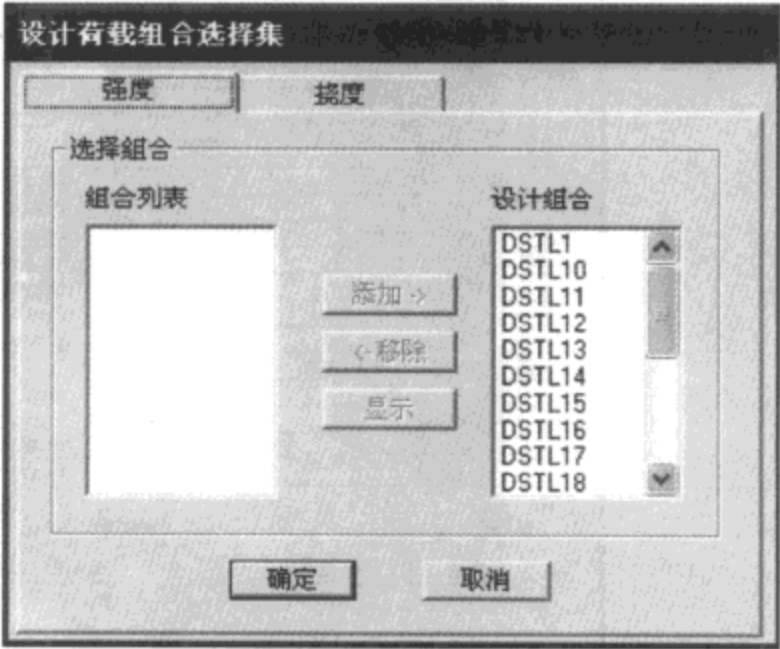


图 17-9 设计荷载组合选择集对话框

对话框中显示有**强度**和**挠度**两个选项，分别显示在承载力设计验算和挠度设计验算中运用的组合。

表 17-3

| | |
|--------|--|
| 组合列表 | 显示所有不用于钢框架设计的荷载组合 |
| 设计组合列表 | 显示所有用于钢框架设计的荷载组合，默认情况下所有的钢框架设计组合均显示在此列表中 |
| 添加 | 选中 组合列表 中的组合名称，点击此按钮，添加到 设计组合列表 中 |
| 移除 | 选中 设计组合列表 中的组合，点击此按钮，将组合移动到 组合列表 中 |
| 显示 | 点击此按钮，显示选中组合的内容 |

选择移除某些不需要的设计组合，再次进行钢框架设计。这部分选择的构件将按照指定的荷载组合进行设计校核。

本例中，使用所有默认的钢框架设计组合进行设计。

17.4.3 查看/修改钢构件的覆盖项

在进行钢结构设计之前，SAP2000 会对钢结构构件参数指定默认值，如果要对某些构件的细部参数进行查看修改，可以通过查看/修改钢结构的覆盖项来实现这部分功能。

首先选中要查看修改的构件，点击【设计】>【钢框架设计】>【查看/修改覆盖项】命令，弹出钢框架设计覆盖项对 Chinese2002 对话框（17-10）。本例中均使用默认值。

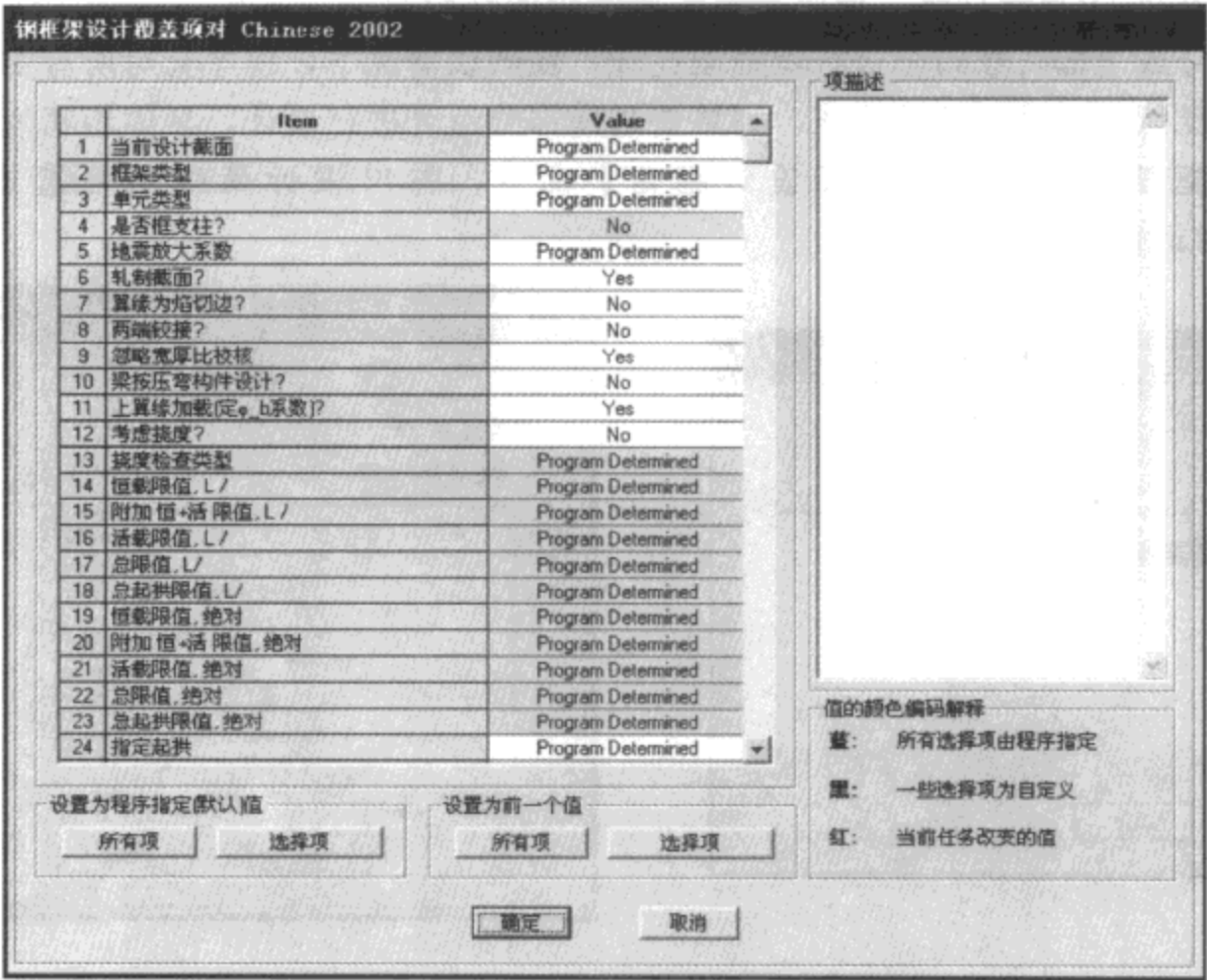


图 17-10 钢框架设计覆盖项对 Chinese2002 对话框

覆盖项中各项的含义见表 17-4。

表 17-4

| 项 目 | 可 能 值 | 默 认 值 | 含 义 |
|--------|---|-------|--------------------------------|
| 当前设计截面 | 所有钢截面 | 当前截面 | 可直接修改截面，并按照修改后的截面，基于先前设计内力校核计算 |
| 框架类型 | Moment Frame /Braced Frame, CBF/Braced Frame, EBF | 程序确定 | 可选三种框架设计体系类型：框架梁柱、中心支撑、偏心支撑 |
| 单元类型 | Column/Beam/Brace | 程序确定 | 可选框架的设计类型：框架柱、梁、支撑构件 |
| 是否框支柱？ | Yes/No | No | 指定是否为框支柱 |
| 地震放大系数 | ≥ 1.0 | 程序计算 | 对框支柱/托柱梁/V 或人字支撑的地震荷载产生的内力进行调整 |
| 轧制截面？ | Yes/No | 程序确定 | 用于判断截面类型，见《钢结构规范》表 5.1.2-1 |

续上表

| 项 目 | 可 能 值 | 默 认 值 | 含 义 |
|-------------------|-----------------------------|-------|--|
| 翼缘为焰切边? | Yes/No | 程序确定 | 用于判断截面类型, 见《钢结构规范》表 5.1.2-1 |
| 两端铰接? | Yes/No | 程序确定 | 指定钢梁是否仅以腹板与柱或主梁连接, 参见《钢结构高规》第 6.1.2 条 |
| 忽略宽厚比较核 | Yes/No | Yes | 是否忽略 b/t 的验算 |
| 梁按压弯构件设计? | Yes/No | 程序确定 | 控制梁是否按照压弯构件进行设计, 影响钢梁设计校核时的公式选取 |
| 上翼缘加载? | Yes/No | Yes | 用于梁的弯曲整体稳定系数的计算, 见《钢结构规范》附录 B |
| 考虑挠度? | Yes/No | No | 选择 Yes, 以下各项挠度限值的输入框将亮起, 输入挠度限值; 选择 No, 限值输入框不可操作 |
| 挠度检查类型 | Ratio /Absolute /Both | Both | 选择用于挠度检查的三种方式: 比率、绝对值、两者都有。选择对应类型的挠度限值影响下面不同类型限值输入框是否可操作 |
| 恒载限值, L/ | >0 | 程序确定 | 控制恒载作用下的挠度比率 |
| 附加 恒+活 限值, L/ | >0 | 程序确定 | 控制附加恒载+活载作用下的挠度比率 |
| 活载限值, L/ | >0 | 程序确定 | 控制活载作用下的挠度比率 |
| 总限值, L/ | >0 | 程序确定 | 控制全部荷载作用下的挠度比率 |
| 总起拱限值, L/ | >0 | 程序确定 | 控制总的起拱比率 |
| 恒载限值, 绝对 | ≥ 0 | 程序确定 | 控制恒载作用下的绝对挠度值 |
| 附加 恒+活 限值, 绝对值 | ≥ 0 | 程序确定 | 控制附加恒载+活载作用下的绝对挠度值 |
| 活载限值, 绝对 | ≥ 0 | 程序确定 | 控制活载作用下的绝对挠度值 |
| 总限值, 绝对 | ≥ 0 | 程序确定 | 控制全部荷载作用下的绝对挠度值 |
| 总起拱限值, 绝对 | ≥ 0 | 程序确定 | 控制总的绝对起拱值 |
| 指定起拱 | ≥ 0 | 0 | 自定义起拱大小 |
| 净截面与毛截面面积比 | 0-1 | 0.9 | 控制净截面与毛截面的面积比 |
| 活荷载折减系数 | ≥ 0 | 程序计算 | 考虑连续梁和悬臂梁的活荷载折减系数 |

续上表

| 项 目 | 可 能 值 | 默 认 值 | 含 义 |
|----------------|----------|-------|--|
| 无支撑长度比（主） | >0 | 程序计算 | 构件在主轴方向上，相邻两个支撑间距离的最大值 |
| 无支撑长度比（次，LTB） | >0 | 程序计算 | 构件次轴方向上相邻两个支撑间距离的最大值 |
| 有效长度系数（Mue 主） | >0 | 程序计算 | 《钢结构高规》公式 6.3.2 的计算长度系数 |
| 有效长度系数（Mue 次） | >0 | 程序计算 | 《钢结构高规》公式 6.3.2 的计算长度系数 |
| 弯矩系数（Beta_m 主） | >0 | 程序计算 | 等效弯矩系数（主轴 β_{mx} ），《钢结构规范》5.2.5 条 |
| 弯矩系数（Beta_m 次） | >0 | 程序计算 | 等效弯矩系数（次轴 β_{my} ），《钢结构规范》5.2.5 条 |
| 弯矩系数（Beta_t 主） | >0 | 程序计算 | 等效弯矩系数（主轴 β_x ），《钢结构规范》5.2.5 条 |
| 弯矩系数（Beta_t 次） | >0 | 程序计算 | 等效弯矩系数（次轴 β_y ），《钢结构规范》5.2.5 条 |
| 轴向稳定系数（Phi 主） | >0 | 程序计算 | 轴心受压整体稳定系数（主轴 φ_x ），《钢结构规范》5.1.2 条 |
| 轴向稳定系数（Phi 次） | >0 | 程序计算 | 轴心受压整体稳定系数（次轴 φ_y ），《钢结构规范》5.1.2 条 |
| 弯曲稳定系数（Phi 主） | >0 | 程序计算 | 弯曲整体稳定性系数（主轴 φ_{bx} ），按照《钢结构规范》附录 B 计算 |
| 弯曲稳定系数（Phi 次） | >0 | 程序计算 | 弯曲整体稳定性系数（次轴 φ_{by} ）按照《钢结构规范》附录 B 计算 |
| 塑性系数（Gamma 主） | >0 | 程序确定 | 截面塑性发展系数（主轴 γ_x ），《钢结构规范》4.1.1 |
| 塑性系数（Gamma 次） | >0 | 程序确定 | 截面塑性发展系数（次轴 γ_y ），《钢结构规范》4.1.1 |
| 截面影响系数（Eta） | 1/0.7 | 程序确定 | 考虑开口截面的影响系数 η ，参照《钢结构规范》公式 5.2.2-3 |
| 强柱弱梁系数（Eta） | ≥ 0 | 程序计算 | 《建筑抗震设计规范》8.2.5-1 的强柱系数 η 。如果要忽略强柱弱梁的校核，可将此数值设为 0 |

续上表

| 项 目 | 可 能 值 | 默 认 值 | 含 义 |
|----------------------|----------|-------|--|
| Euler 弯矩系数 (Delta 主) | ≥ 0 | 程序计算 | 主轴欧拉弯矩系数, 参见《钢结构规范》5.2.5 条 |
| Euler 弯矩系数 (Delta 次) | ≥ 0 | 程序计算 | 次轴欧拉弯矩系数, 参见《钢结构规范》5.2.5 条 |
| 屈服应力 f_y | ≥ 0 | 0 | 钢材屈服强度, 为 0 表示采用材料定义处的强度 |
| 允许的法向应力 f | ≥ 0 | 0 | 钢材抗拉、抗压、抗弯强度设计值, 为 0 表示采用材料定义处的强度 |
| 允许的剪应力 f_v | ≥ 0 | 0 | 钢材的抗剪屈服强度, 为 0 表示采用材料定义处的强度 |
| 考虑假设的剪力? | Yes/No | Yes | 如果为 Yes, 则按照轴心受压构件计算剪力 (《钢结构规范》5.1.6 条) 和实际设计剪力的较大值, 作为设计剪力。如果为 No, 则不考虑《钢结构规范》5.1.6 条 |
| 应力比限制 | > 0 | 0.95 | 可以在此指定每根构件的应力比限制 |

17.4.4 设定自动优化目标

在 SAP2000 中, 工程师可以对钢结构指定两种设计优化目标:

- 1) 基于结构侧向位移进行优化
- 2) 基于结构周期进行优化

工程师可以根据个人需要选择是否设定这两种结构设计优化目标。设定目标后, 在结构设计过程中, 如果目标不满足, SAP2000 将基于虚功原理修改一些构件截面, 原理上对于虚功大的构件进行较多的修改。

(1) 设置侧向位移目标

点击【设计】>【钢框架设计】>【设置位移目标】命令, 弹出侧向位移目标对话框 (图 17-11)。对话框说明见表 17-5。

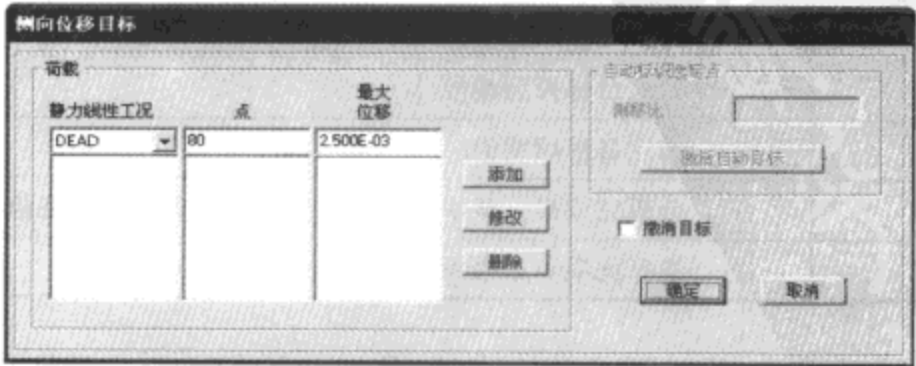


图 17-11 侧向位移目标对话框

表 17-5

| | |
|--------|---|
| 静力线性工况 | 在下拉菜单中选择一个静力线性工况 |
| 点 | 指定一个点的编号，指定此点为目标控制点 |
| 最大位移 | 指定该点在该荷载工况下的最大位移控制值 |
| 侧移比 | 指定侧移比率 |
| 激活自动目标 | 点击此按钮，程序会自动在左侧荷载选项区域中生成所选点侧向位移目标值，该值是侧移比与所选点标高的乘积 |
| 撤消目标 | 勾选此项，指定的侧移控制不起作用 |

注意：必须至少选择一个点对象，自动标识选定区域才会被激活。

可以通过对话框左侧指定各点的最大位移值，也可以通过选择特定的点指定侧移比，自动激活选定点将作为目标位移控制点。

在优化过程中，如果这些点在指定工况下任意方向的位移大于目标位移控制值，SAP2000 将根据构件虚功的大小，有选择地改变构件截面，重新对结构进行分析设计。

(2) 设置周期目标

点击【设计】>【钢框架设计】>【设置周期目标】命令，弹出周期目标对话框（图 17-12）。对话框说明见表 17-6。

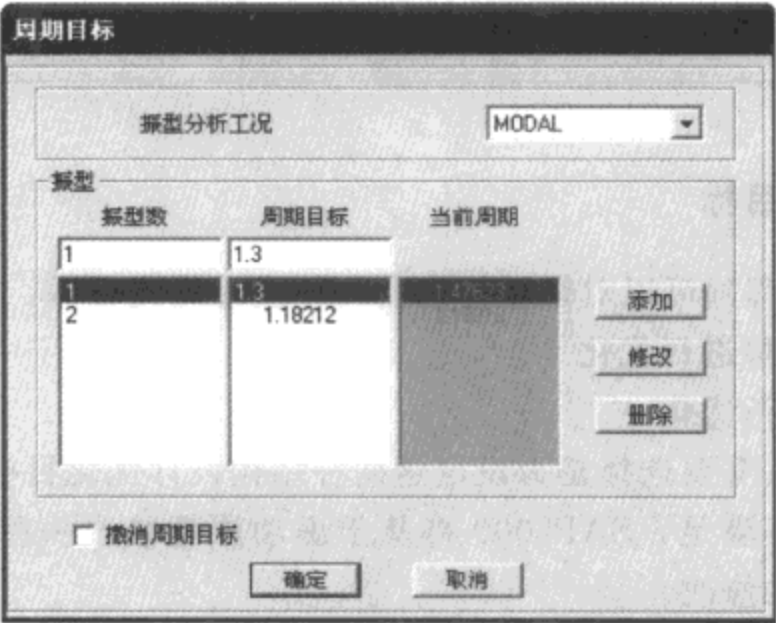


图 17-12 周期目标对话框

表 17-6

| | |
|--------|------------------------|
| 振型分析工况 | 选择一个振型分析的工况 |
| 振型数 | 输入目标振型编号 |
| 周期目标 | 指定目标周期值 |
| 当前周期 | 分析完成后，显示对应振型编号周期的当前周期值 |
| 撤消周期目标 | 选择此项，取消周期目标设定 |

在此对话框中可以对各振型下周期进行目标指定，SAP2000 在优化过程中将以指定的这些周期值为优化目标，对结构整体刚度进行控制。

17.5 钢结构自动优化设计及交互式设计

17.5.1 自动优化设计

设定了自动选择截面的钢结构就可以对其进行优化设计。点击【设计】>【钢框架设计】>【开始结构设计/检查】命令，钢框架设计开始。在优化设计的过程中，SAP2000 会自动判断构件截面是否满足，如果不满足，自动更换截面，程序根据更换的截面再次进行分析计算。这种迭代次数同设计首选项中的最大迭代次数设置有关，如果自动迭代数为 3，则最多进行三次迭代。

SAP2000 中自动优化设计的过程全部是自动的，程序会自动迭代选择满足的截面进行设计校核，如果截面满足条件或自动选择截面列表中的截面不能满足，则设计停止。

自动优化设计完毕后，可以通过【设计】>【钢框架设计】菜单（图 17-13）中的其他几个命令来进行手工的设计操作和钢框架设计的后续工作。下面介绍菜单中其他各命令的具体含义（表 17-7）。

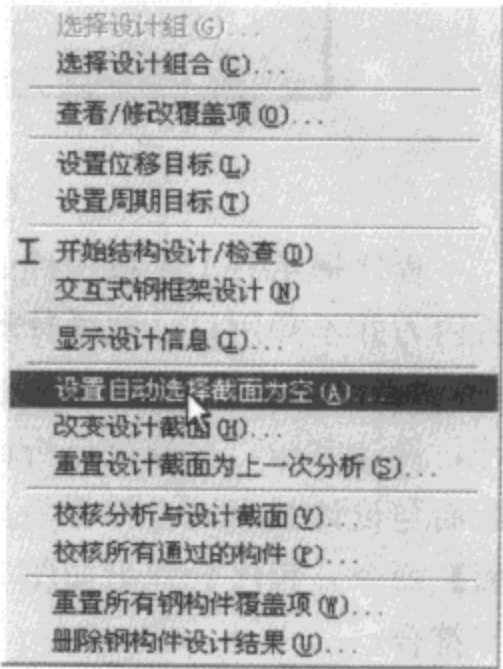


图 17-13 钢框架设计菜单

表 17-7

| | |
|--------------|--|
| 设置自动选择截面为空 | 通过自动优化设计，确定所有的截面都满足要求后，可以使用此命令把指定给构件的自动选择截面取消，此时构件的截面为经过优化设计的现有截面，不再具有自动选择列表截面的性质和功能 |
| 改变设计截面 | 用于修改一个或多个选择构件的设计截面，其分析截面不改变，作用与覆盖项中第一项相同。更改后可以不重新分析，仅用上一次的内力计算，查看近似的设计结果。再次进行分析时，程序将使用修改后的截面进行分析 |
| 重置设计截面为上一次分析 | 如果使用改变设计截面命令改变了构件的截面，使用此命令可以把构件的截面重新恢复为修改前的截面 |
| 校核分析与设计截面 | 分析设计后，工程师对某些构件进行了设计截面的修改，使用此命令可以检查确定哪些截面的设计截面和分析截面是不同的 |
| 校核所有通过的构件 | 用于检查哪些截面通过了设计校核，哪些没有通过 |
| 重置所有钢构件覆盖项 | 该命令使所有的钢框架构件的覆盖项内容恢复为默认值，可减小 SAP2000 设计生成的文件的大小 |
| 删除钢构件设计结果 | 删除所有的钢结构设计结果，删除所有设计产生的文件内容，减小 SAP2000 设计生成的文件的大小 |

在本例运行设计之后，点击【设计】>【钢框架设计】>【校核分析与设计截面】命令，程序将弹出提示框，提示有部分构件的分析截面与设计截面不符合（如图 17-14 所示）。

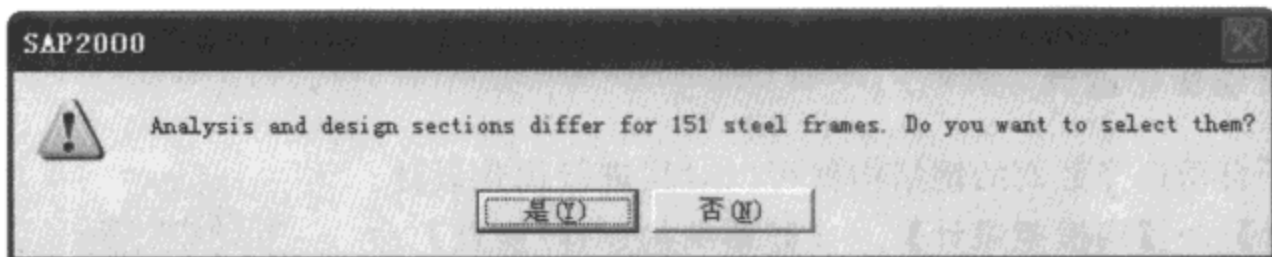


图 17-14 校核分析与设计截面提示框（不符合）

程序提示有 151 根构件的分析截面与设计截面不同，表示这些构件设计校核时使用的分析内力并不是用设计截面计算出的内力，而是用分析截面计算出的内力。这样，我们需要重新运行结构分析，此时使用的构件截面就是上次设计完毕的设计截面；然后再运行钢结构设计，设计完毕再次校核分析截面和设计截面，如果仍有不符合，则重复以上步骤，直到分析截面与设计截面完全符合为止。此时点击【设计】>【钢框架设计】>【校核分析与设计截面】命令，程序会弹出如图 17-15 所示的提示框，提示所有钢构件的分析截面与设计截面全部符合。

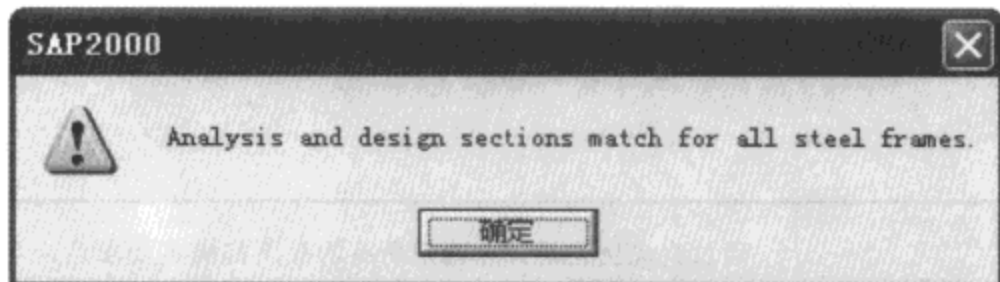


图 17-15 校核分析与设计截面提示框（符合）

注意：钢结构设计完成后，只有先存盘再退出 SAP2000，设计结果才能够保存，下次打开程序才能继续查看编辑上一次设计结果。否则，设计结果自动删除。

17.5.2 交互式钢框架设计

SAP2000 的钢结构设计可以是一个交互式的过程，工程师可以随时参与到设计过程中来，也可以对钢结构设计过程中涉及到的很多参数进行查看或修改。

在 SAP2000 中，视图未显示设计信息（设计输入或输出信息）时，点击【设计】>【钢框架设计】>【交互式钢框架设计】命令，当前激活的视图窗口将切换到显示当前设计截面视图状态（设计输入数据视图的一种）。（**注意：**在显示模型的设计输入输出数据的视图中，点击此命令，视图不发生变化。）

在设计输入输出结果显示的视图中，右键点击某根构件，将弹出设计细节显示对话框，可以查看设计计算的应力比等数据。可以通过修改覆盖项，对钢框架进行交互式的设计。修改覆盖项后，此构件将立即按照新的指定重新设计验算。

17.6 设计结果显示输出

SAP2000 对钢结构的设计结果提供了多种显示输出方式，包括：屏幕图形、屏幕表格、Word 文本文件、电子表格、数据库文件等。在工程设计中，常用的查看方式是在图形上直接查看构件的应力比或通过导出表格文件查看。在显示设计结果的图形中右键点击构件，可以查看覆盖项以及设计中各参数的计算结果细节。下面将详细介绍各种查看方式。

17.6.1 设计结果屏幕图形显示输出

钢结构设计结束后，SAP2000 在视图中默认显示各构件的设计截面。构件的最大应力比可以在图形中通过构件的颜色加以区分。默认情况下，应力比大于 1.0 的构件显示为红色。可以通过【设计】>【钢框架设计】>【显示设计信息】命令，选择显示不同的设计信息。点击该命令，即弹出显示钢设计结果对话框（图 17-16）。



图 17-16 显示钢设计结果对话框

此对话框中分为设计输出和设计输入两个下拉列表，通过点击前边的选择框，可以切换激活设计输出或设计输入下拉列表。下拉菜单中的内容介绍见表 17-8。

设计输出 表 17-8

| | |
|--------------------------------|---|
| P-M Ratio Colors & Value | 显示压弯应力比的数值和对应的构件颜色 |
| P-M Colors / Shear Ratio Value | 显示压弯应力比的剪切应力比数值和对应的构件颜色，给出主、次两个方向的应力比数值 |
| P-M Ratio Colors / no Value | 仅显示压弯应力比数值对应的颜色 |
| Double Plate Thickness | 显示加劲板厚度 |
| Beam / Column Capacity | 显示各节点处的双方向梁柱承载力比 |
| P-M Colors / Beam Shear Force | 显示压弯梁应力比对应的颜色和梁剪力 |
| P-M Colors / Brace Axial Force | 显示支撑的应力比对应的颜色和轴力 |
| Identify P-M Failure | 显示压弯破坏的构件 |
| Identify Shear Failure | 显示剪切破坏的构件 |
| Identify All Failure | 显示所有失效的构件 |

设计输入

设计输入列表中的内容，类似于覆盖项中的内容，包括设计截面、覆盖项中使用的各种

参数的显示，其显示的内容及含义均可在覆盖项中对应查找到，这里不再赘述。

这些设计输入或输出信息的查看可以在 SAP2000 的二维、三维视图中进行，并可灵活选取不同的内容进行显示。例如在平面视图中显示构件的应力比和颜色，选择设计输出 **P-M Ratio Colors & Value** 项，如图 17-17 所示。

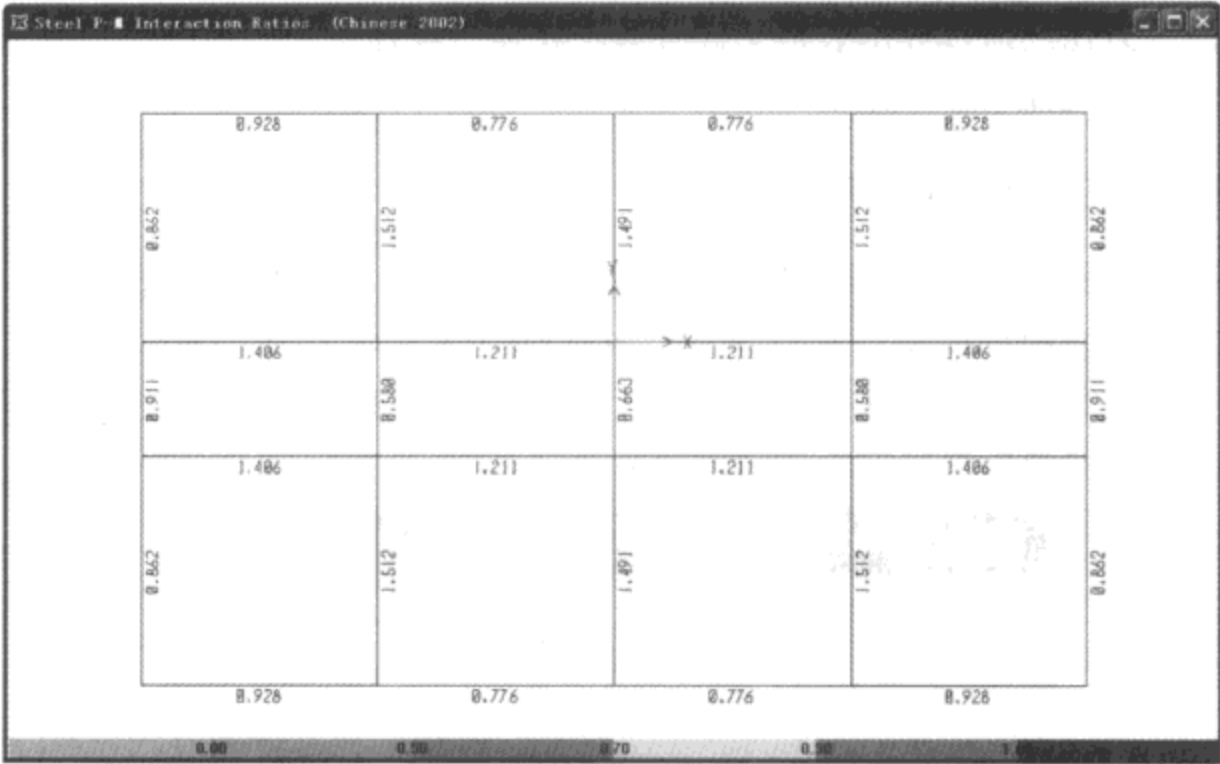


图 17-17 图形显示应力比和构件设计颜色

图中显示的数值即为对应构件的压弯应力比计算结果，视图下方的不同颜色条对应于不同应力比范围。

17.6.2 设计结果屏幕表格显示输出

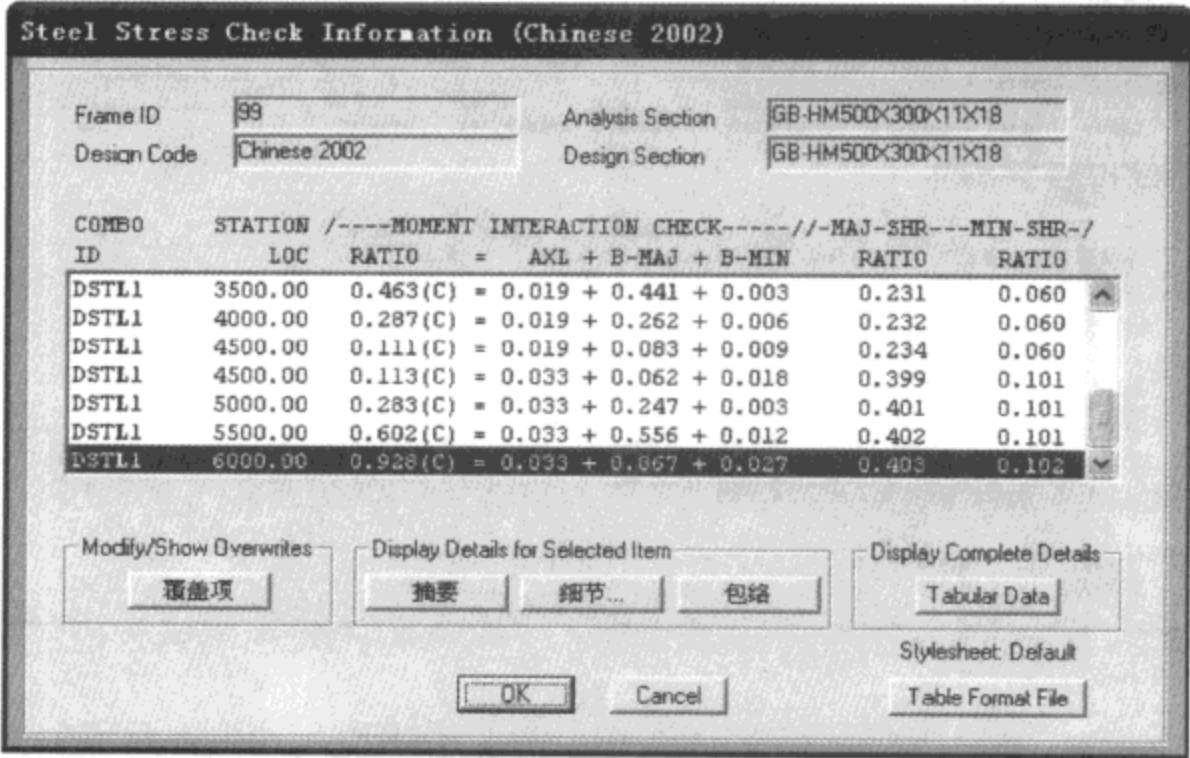
在显示设计结果的图形上，右键单击某个构件，弹出 **Steel Stress Check Information**（钢构件应力检查信息）对话框，如图 17-18a）所示。如果在覆盖项中选择了考虑校核构件的挠度，则在应力检查信息对话框中的左下角会提示选择显示校核的项目，包括两项：**Strength**（强度）和 **Deflection**（挠度）。选择 **Deflection**（挠度）项，会显示挠度检查信息，如图 17-18b)所示，对话框说明见表 17-9。

表 17-9

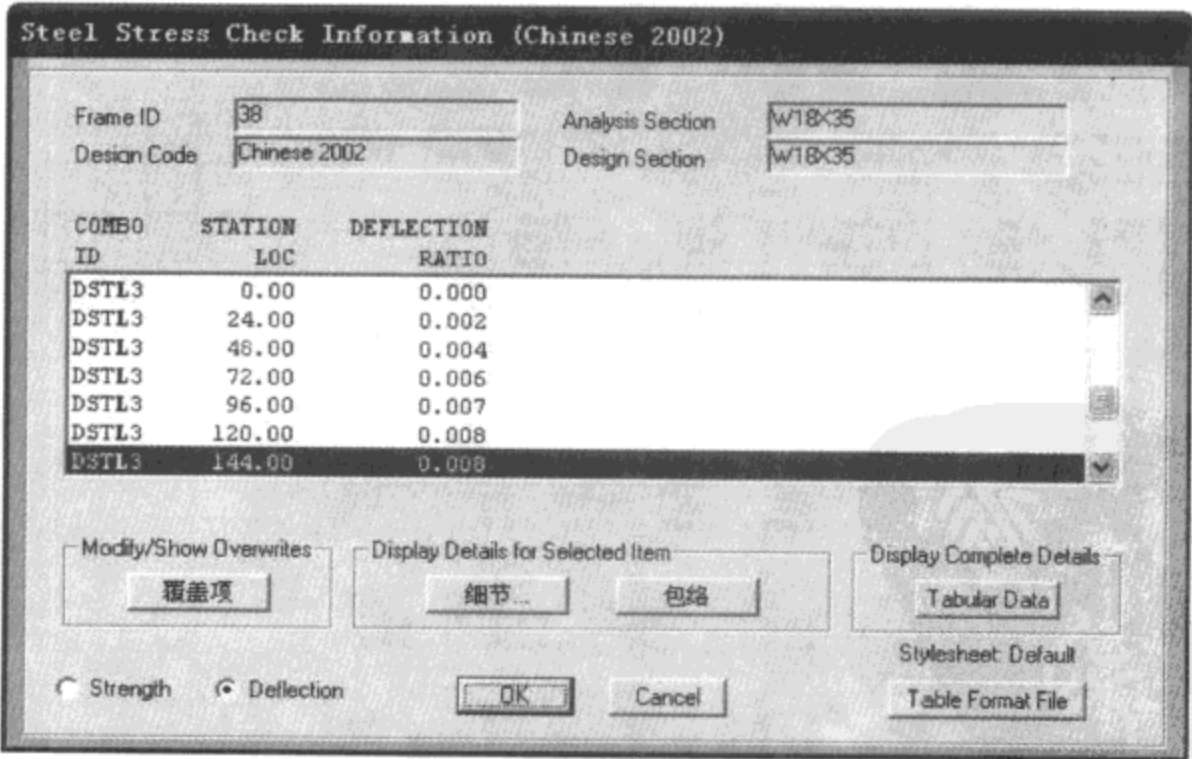
| | |
|---|--|
| Frame ID | 框架构件编号 |
| Design Code | 钢结构设计时使用的规范 |
| Analysis Section | 分析过程中使用的截面 |
| Design Section | 钢构件设计时使用的截面测站位置 |
| COMBO ID | 显示当前组合的编号 |
| STATION LOC | 测站位置 |
| MOMENT INTERACTION CHECK (RATIO、AXL、B-MAJ、B-MIN) | 显示构件三向应力的应力比，包括总的应力比、轴向应力比、主抗弯应力比、次抗弯应力比 |

续上表

| | |
|---------------------------------|------------------------------------|
| MAJ SHEAR RATIO、MIN SHEAR RATIO | 主方向剪切应力、次方向剪切应力 |
| DEFLECTION RATIO | 挠度比例 |
| 覆盖项 | 点击此按钮，弹出覆盖项对话框，对其查看修改 |
| 摘要、细节、包络 | 点击弹出摘要、细节、包络计算表格和参数 |
| Tabular Data | 点击弹出当前构件的具体设计参数及结果的数据库表格 |
| Table Format File | 点击此按钮，程序以默认或工程师自己定义的电子表格形式输出构件设计信息 |



a)

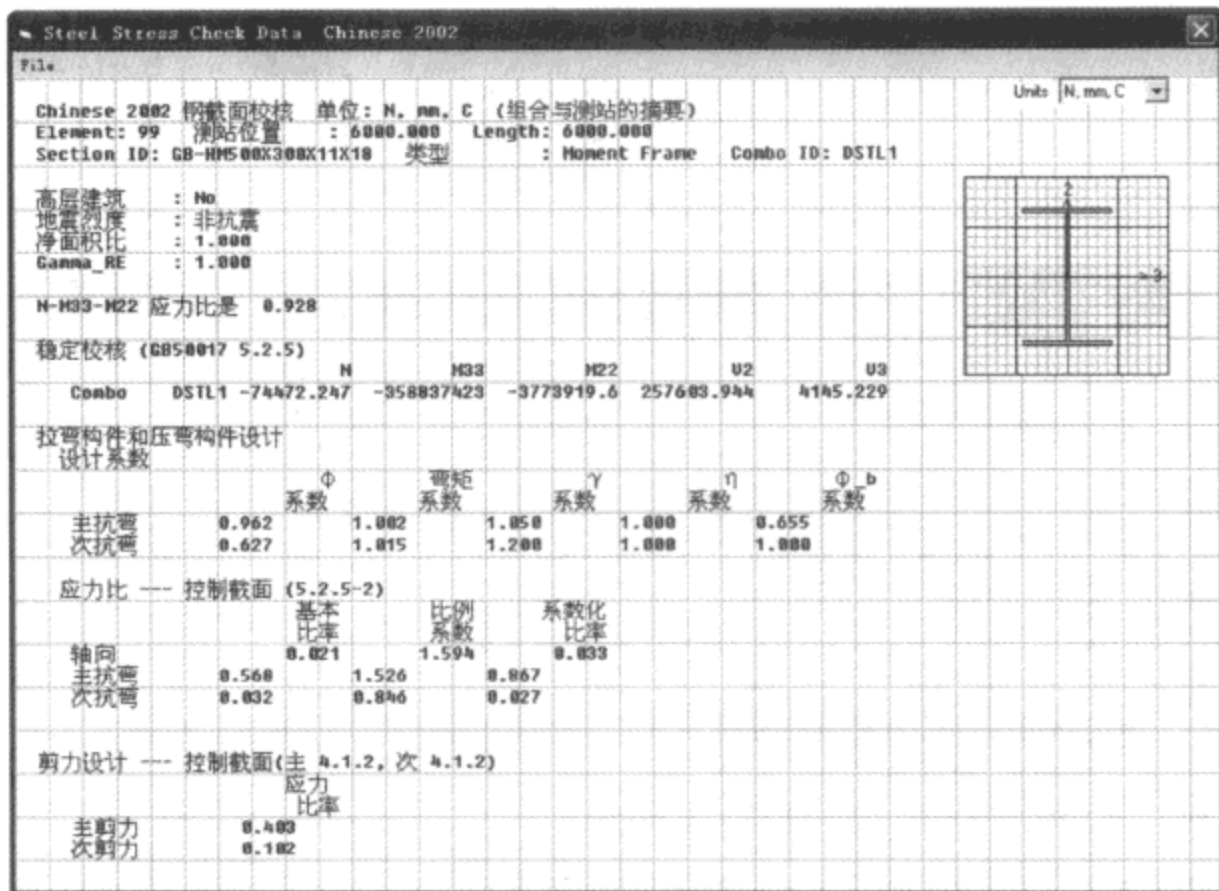


b)

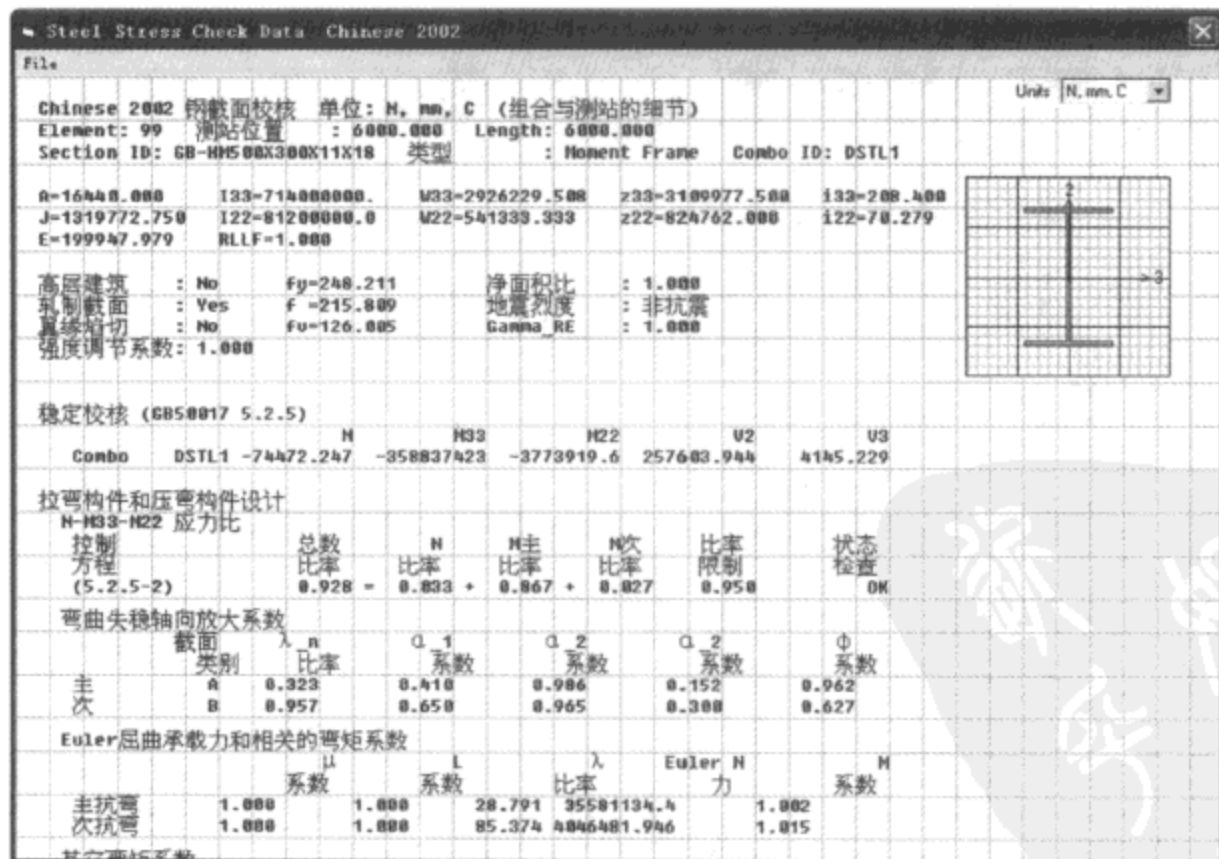
图 17-18

a) 钢构件应力检查信息对话框；b) 钢构件挠度检查信息对话框

点击【摘要】、【细节】或【包络】按钮，将对应弹出设计摘要数据表（显示当前荷载组合及测站下的设计参数和结果摘要，图 17-19a）、设计细节数据表（显示当前荷载组合及测站下的详细设计结果，图 17-19b）或设计包络数据表（显示最大应力比对应的组合和测站下的设计计算信息，图 17-19c）。

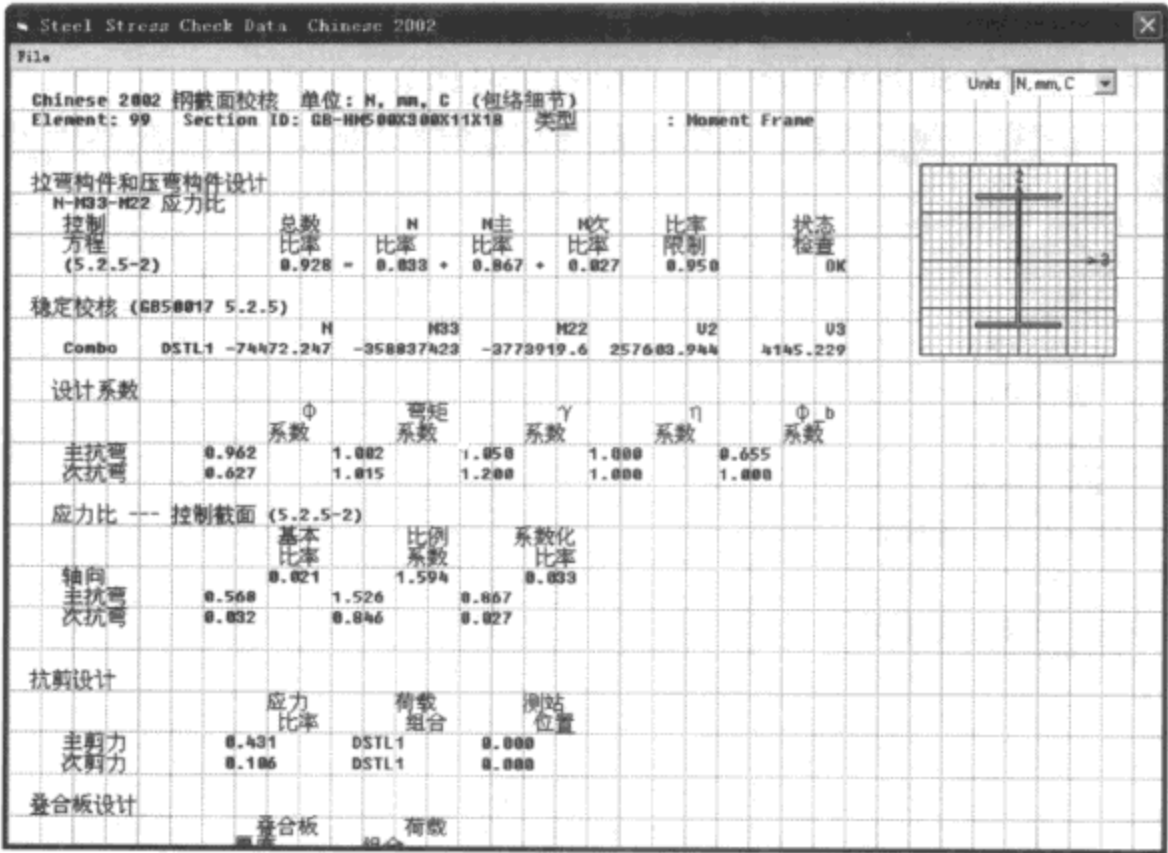


a)



b)

图 17-19



c)

图 17-19 详细设计信息表格

a) 设计摘要数据表；b) 设计细节数据表；c) 设计包络数据表

这三个表格窗口中，主要为两个方向弯矩和轴向力作用下应力比的计算过程，包括各参数和控制方程的显示。SAP2000 对压弯构件、纯弯构件或支撑非抗弯构件的各个强度、稳定公式分别进行验算，把得到最大应力比的那个方程确定为构件的控制方程。表中各参数的具体含义与覆盖项中的含义基本对应，可以参照覆盖项介绍部分。

设计细节数据表格中的各参数分为几个区域，见图 17-19b)，详细介绍见表 17-10。

表 17-10

| | |
|--------------------|--|
| 弯曲失稳轴向放大系数 | 其中显示截面类别的确定以及确定钢构件轴压稳定系数的计算过程，其中各参数含义参照《钢结构设计规范》附录 C |
| Euler 屈曲承载力和相关弯矩系数 | 显示计算构件的欧拉屈曲承载力的各参数，“λ 比率”为构件的双向长细比，“M 系数”=1/(1-0.8N/N'EX)，参照《钢结构设计规范》5.2.5 条 |
| 其他弯矩系数 | 包括塑性发展系数、等效弯矩系数、截面影响系数、弯曲稳定系数，参照《钢结构设计规范》4.2、5.2.2、5.2.5 条 |
| 应力比 | 显示纯弯或压弯构件的应力计算过程，实际应力是 N/A 或 M/W 的计算结果；比例系数是在对应控制方程中除去实际应力项外的系数。 |
| 剪力设计 | 显示构件截面抗剪验算的过程 |

17.6.3 设计结果的其他输出方式

设计结果除了以图形的方式显示外，还有其他多种输出方式。

(1) 输出为 WORD 文档

点击【文件】>【打印表格】命令，弹出选择打印表对话框（图 17-20）。

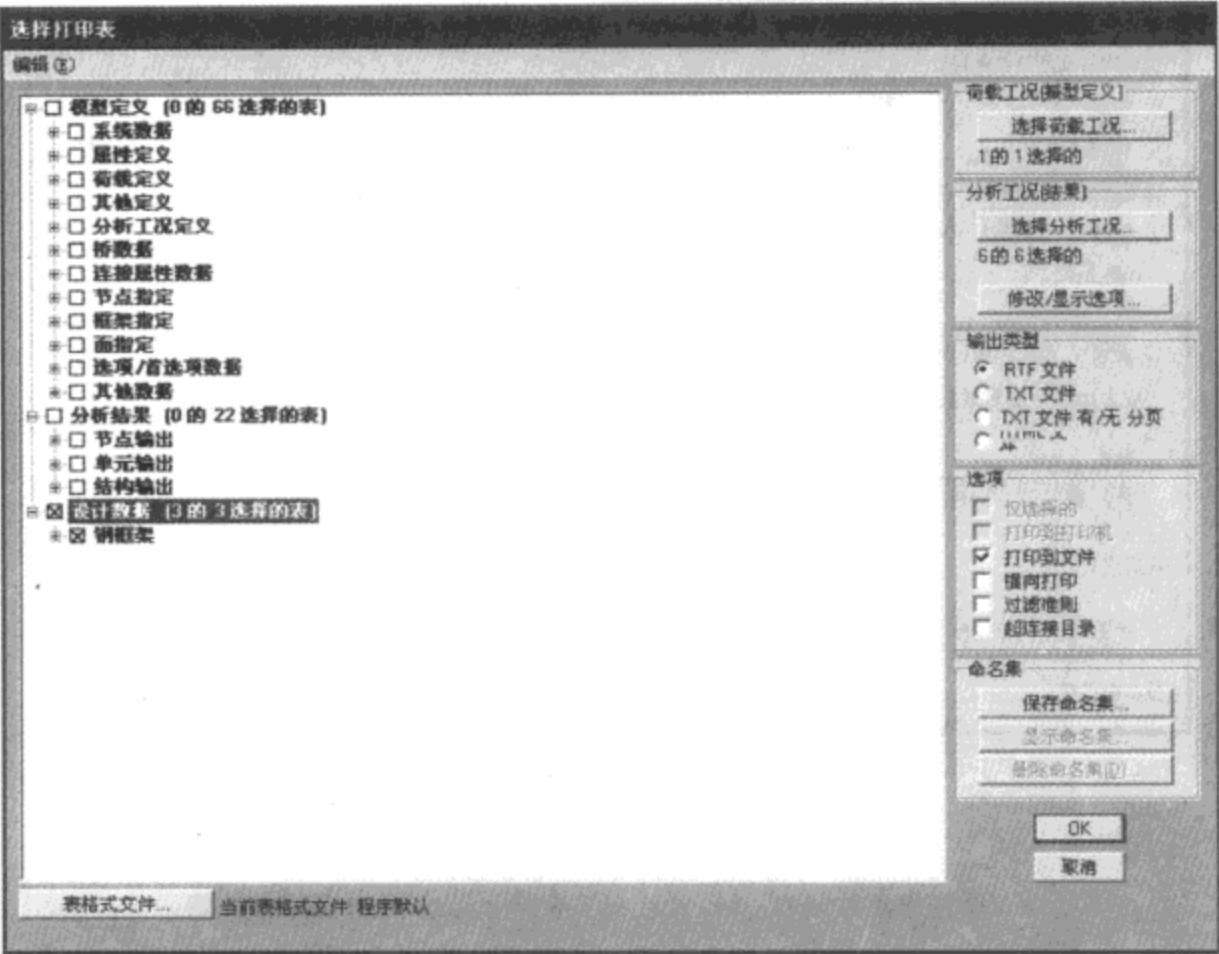


图 17-20 选择打印表格对话框

在此对话框中选择要输出的设计数据，选择输出工况和输出文件格式，选中打印到文件（否则将直接在打印机上打印），点击【OK】按钮，程序将设计结果的各个表格直接输出为文本文件，可以用 Word 打开。

(2) 输出为电子表格或数据库文件

点击【文件】>【导出】>【SAP2000 MS Excel 电子表格 .xls 文件】命令或【文件】>【导出】>【SAP2000 MS Access 数据库 .mdb 文件】命令，弹出选择表输出到 Excel 对话框或选择表输出到 Access 对话框（图 17-21）。

选中要输出的设计数据、荷载工况、分析工况，以及在对话框中对其他选项进行编辑后，点击【OK】按钮，程序即把设计的数据文件导出到电子表格（xls）和数据库（mdb）文件中。对应文件可以通过 EXCEL 电子表格和 ACCESS 数据库等软件打开。

注意：以上的几种输出方式都是要通过树状表格的选取，如果没有进行过设计，则不会显示设计内容。

(3) SAP2000 中的设计数据表格

点击【显示】>【显示表格】命令，通过对树状图的选择，点击【OK】，弹出设计结果数据表格，如图 17-22 所示。

在此对话框中，可以通过右上方的下拉菜单选择显示不同的钢结构设计输出表格。各菜单的功能介绍见表 17-11。

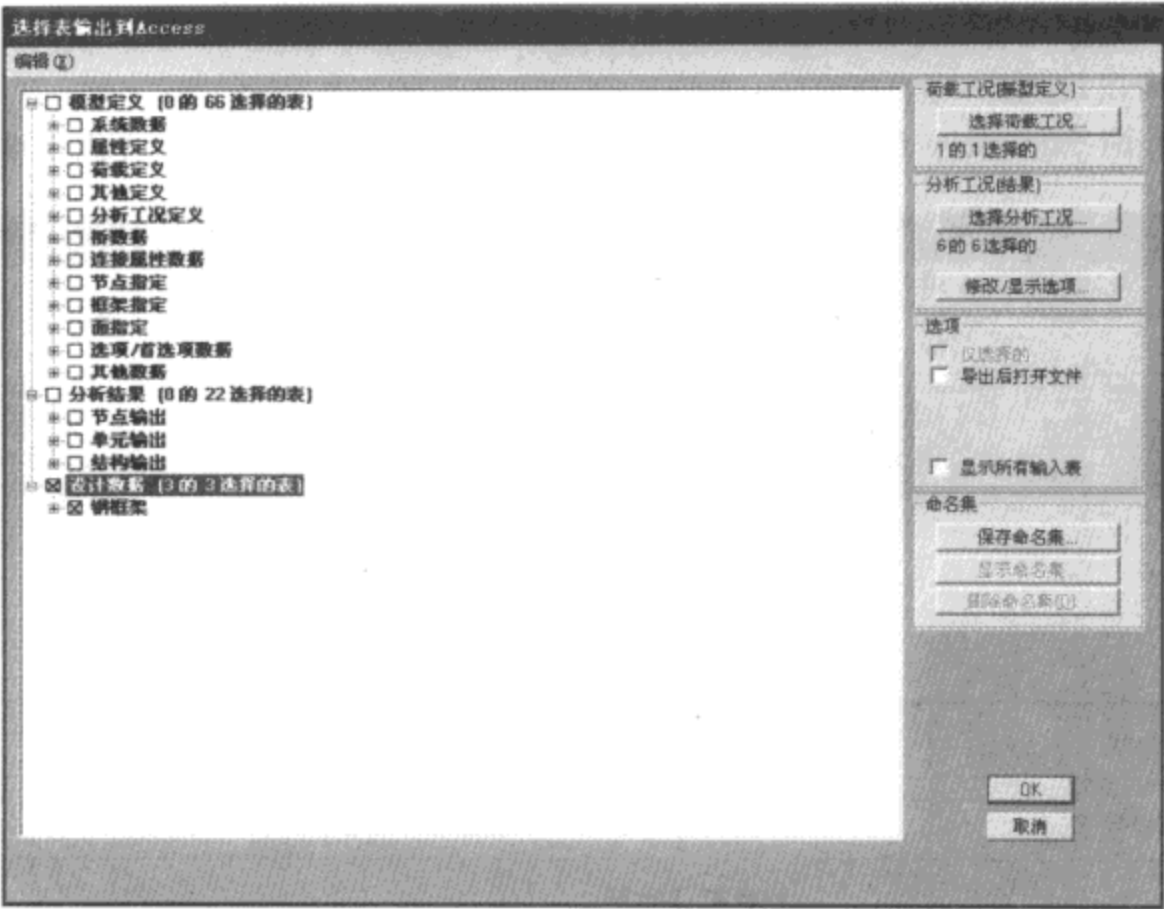


图 17-21 输出为电子表格或数据库文件的选择表格对话框

Steel Design 1 - Summary Data - Chinese 2002

文件(F) 视图(V) 选项(O) 格式(M)

Units: As Noted

Steel Design 1 - Summary Data - Chinese 2002

| | Frame Text | DesignSect Text | DesignType Text | Status Text | Ratio Unitless | RatioType Text | Combo Text |
|---|------------|-------------------|-----------------|-------------|----------------|----------------|------------|
| ▶ | 1 | 1B-HW400x400x18x2 | Column | No Messages | 752244 | PMM | DSTL1 |
| | 2 | 1B-HW400x400x18x2 | Column | No Messages | 795035 | PMM | DSTL1 |
| | 3 | 1B-HW400x400x20x3 | Column | No Messages | 844336 | PMM | DSTL1 |
| | 4 | 1B-HW400x400x20x3 | Column | No Messages | 847047 | PMM | DSTL1 |
| | 5 | 1B-HW400x400x20x3 | Column | No Messages | 828882 | PMM | DSTL1 |
| | 6 | 1B-HW400x400x30x5 | Column | No Messages | 80761 | PMM | DSTL1 |
| | 7 | 1B-HW400x400x20x3 | Column | No Messages | 847047 | PMM | DSTL1 |
| | 8 | 1B-HW400x400x20x3 | Column | No Messages | 828882 | PMM | DSTL1 |
| | 9 | 1B-HW400x400x30x5 | Column | No Messages | 80761 | PMM | DSTL1 |
| | 10 | 1B-HW400x400x18x2 | Column | No Messages | 752244 | PMM | DSTL1 |
| | 11 | 1B-HW400x400x18x2 | Column | No Messages | 795035 | PMM | DSTL1 |
| | 12 | 1B-HW400x400x20x3 | Column | No Messages | 844336 | PMM | DSTL1 |
| | 13 | 1B-HW400x400x30x5 | Column | No Messages | 783915 | PMM | DSTL1 |
| | 14 | 1B-HW400x400x45x7 | Column | No Messages | 729844 | PMM | DSTL1 |
| | 15 | 1B-HW400x400x45x7 | Column | No Messages | 863985 | PMM | DSTL1 |
| | 16 | 1B-HW400x400x45x7 | Column | No Messages | 773043 | PMM | DSTL1 |
| | 17 | 1B-HW400x400x45x7 | Column | No Messages | 732185 | PMM | DSTL1 |
| | 18 | 1B-HW400x400x45x7 | Column | No Messages | 813971 | PMM | DSTL1 |
| | 19 | 1B-HW400x400x45x7 | Column | No Messages | 773043 | PMM | DSTL1 |
| ◀ | 20 | 1B-HW400x400x45x7 | Column | No Messages | 727165 | PMM | DSTL1 |

记录: 1 of 153

完成

图 17-22 SAP2000 设计结果数据表格

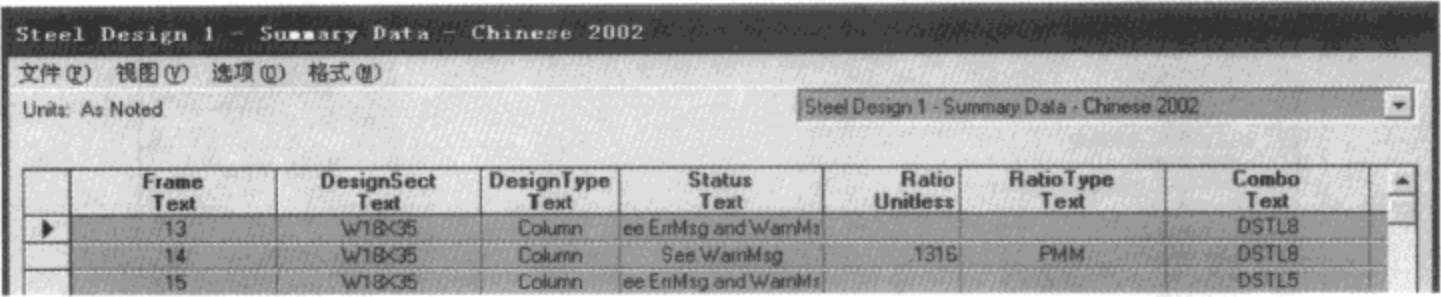
表 17-11

| 菜 单 | 功 能 |
|-----|--|
| 文件 | 把表格数据导出到 EXCEL 电子表格、ACCESS 数据库文件；转到 Word、文本编辑器中打开文件；打印表格到文本文件；添加或移除表格等 |
| 视图 | 编辑窗口的视图大小，控制列宽为默认等 |
| 选项 | 控制打印的背景，打印内容控制 |
| 格式 | 点击弹出格式控制对话框可以对表格的格式进行控制 |

SAP2000 中的钢结构设计输出数据表格中的各项含义解释如下：

1) 钢结构设计概要

Steel Design1-Summury Data（钢结构设计概要），如图 17-23 所示，详细说明见表 17-12。



| Frame Text | DesignSect Text | DesignType Text | Status Text | Ratio Unitless | RatioType Text | Combo Text |
|------------|-----------------|-----------------|------------------------|----------------|----------------|------------|
| 13 | W18X35 | Column | See ErrMsg and WarnMsg | | | DSTL8 |
| 14 | W18X35 | Column | See WarnMsg | 1316 | PMM | DSTL8 |
| 15 | W18X35 | Column | See ErrMsg and WarnMsg | | | DSTL5 |

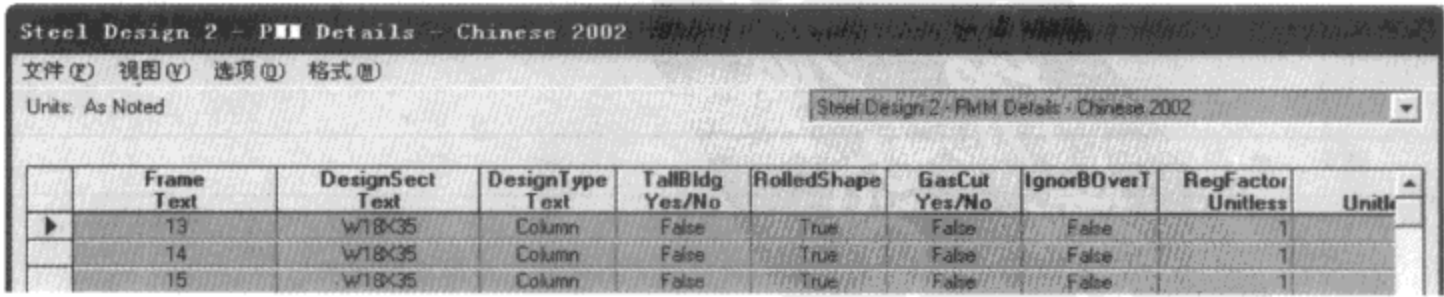
图 17-23 钢结构设计概要

表 17-12

| | |
|--------------|---------------------------|
| Frame | 框架编号 |
| DesignSect | 设计截面 |
| DesignType | 构件设计类型 |
| Status | 设计情况。未通过设计的构件，提示察看错误或警告信息 |
| Ratio | 设计结果应力比 |
| RatioType | 比例类型 |
| Combo | 设计控制组合 |
| Location (m) | 输出测站位置（单位：米） |
| Errmsg | 构件设计错误信息 |
| WarnMsg | 构件设计警告信息 |

2) 钢结构设计细节

Steel Design2-PMM Details（钢结构设计-压弯设计细节），如图 17-24 所示，详细说明见表17-13。



| Frame Text | DesignSect Text | DesignType Text | TallBldg Yes/No | RolledShape | GasCut Yes/No | IgnorBOverT | RegFactor Unitless | Units |
|------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|---------------|-------------|--------------------|-------|
| 13 | W18X35 | Column | False | True | False | False | 1 | |
| 14 | W18X35 | Column | False | True | False | False | 1 | |
| 15 | W18X35 | Column | False | True | False | False | 1 | |

图 17-24 钢结构设计-压弯细节表

表 17-13

| | |
|-------------------------|---------------------------------------|
| Frame | 框架编号 |
| DesignSect | 设计截面 |
| DesignType | 构件设计类型 |
| TallBldg (Yes/No) | 是否为高层建筑。True : 是, False: 否 |
| RolledShape | 是否为轧制截面。True : 是, False: 否 |
| GasCut (Yes/No) | 是否为焰切边翼缘。是/否 |
| IgnorBOverT | 是否忽略宽厚比限制。True : 是, False: 否 |
| RegFactor | 折减系数 |
| SI | 地震烈度 |
| GammaRE | 承载力抗震调整系数 |
| E (KN/m ²) | 弹性模量。单位: 千牛/米 ² |
| Fy (KN/m ²) | 钢材屈服强度。单位: 千牛/米 ² |
| F (KN/m ²) | 钢材抗弯、抗拉、抗压强度设计值。单位: 千牛/米 ² |
| Fv (KN/m ²) | 钢材抗剪强度设计值。单位: 千牛/米 ² |
| AeOverAg | 净面积与总面积比 |
| Status | 设计状态 |
| Combo | 设计组合 |
| Location (M) | 控制测站位置。单位: 米 |
| N (KN) | 设计轴力。单位: 千牛 |
| Mmajor (KN/m) | 主轴方向设计弯矩。单位: 千牛/米 |
| Mminor (KN/m) | 次轴方向设计弯矩。单位: 千牛/米 |
| Vmajor (KN/m) | 主轴方向剪力。单位: 千牛/米 |
| T (KN/m) | 设计扭矩。单位: 千牛 |
| Equation | 计算公式来源 |
| TotalRatio | 总应力比 |
| Nratio | 轴力应力比 |
| Mmajratio | 主轴方向弯矩应力比 |
| Mminratio | 次轴方向弯矩应力比 |
| Srlimit | 应力比限值 |
| SecClassMaj | 主轴方向截面类型 |
| LambdanMaj | 构件主轴方向长细比 |
| Alpha1Major | 主轴方向 α_1 系数 |
| Alpha2Major | 主轴方向 α_2 系数 |
| Alpha3Major | 主轴方向 α_3 系数 |
| PhiMajor | 构件主轴方向轴心受压杆件的稳定系数 |
| SecClassMin | 次轴方向截面类型 |

续上表

| | |
|---------------------------|------------------------------------|
| LambdanMin | 次轴 λ_n |
| Alpha1Minor | 次轴方向 α_1 系数 |
| Alpha2Minor | 次轴方向 α_2 系数 |
| Alpha3Minor | 次轴方向 α_3 系数 |
| PhiMinor | 构件次轴方向轴心受压杆件的稳定系数 |
| MueMajor | 主轴方向计算长度系数 |
| LambdaMajor | 构件主轴方向长细比 |
| NcrMajor | 主轴方向欧拉力 |
| MueMinor | 次轴方向计算长度系数 |
| LratioMinor | 次轴方向有效长度系数 |
| LambdaMinor | 构件次轴方向长细比 |
| NcrMinor | 次轴方向欧拉力 |
| GammaMajor | 主轴方向塑性发展系数 |
| BetamMajor | 主轴方向等效弯矩系数 |
| BetatMajor | 主轴方向等效弯矩系数 |
| Eta | 截面影响系数 |
| PhibMajor | 均匀弯曲的受弯构件主轴方向等效弯矩系数整体稳定系数 |
| GammaMajor | 主轴方向塑性发展系数 |
| BetamMinor | 次轴方向等效弯矩系数 |
| BetatMinor | 次轴方向等效弯矩系数 |
| PhibMinor | 均匀弯曲的受弯构件次轴方向等效弯矩系数整体稳定系数 |
| NDsgn (KN) | 设计轴力。单位：千牛 |
| FN (KN/m ²) | 实际轴向应力。单位：千牛/米 ² |
| FNOverf | 实际应力比 |
| SFN | 轴力比例系数 |
| MMajDsng (KN/m) | 构件主轴方向设计弯矩。单位：千牛/米 |
| Fm33 (KN/m ²) | 绕局部 3 轴实际弯曲应力。单位：千牛/米 ² |
| Fm33Overf | 实际应力比 |
| SFM33 | 主轴方向弯矩比例系数 |
| MMinDsng | 构件主次向设计弯矩 |
| Fm22 (KN/m ²) | 绕局部 2 轴实际弯曲应力。单位：千牛/米 ² |
| Fm22Overf | 实际应力比 |
| SFM22 | 次轴方向弯矩比例系数 |
| Length (m) | 构件长度。单位：米 |
| MajAxisAng Degrees | 主轴角度。单位：度 |
| RLLF | 活荷载折减系数 |

续上表

| | |
|--------------|----------------------------|
| SectClass | 截面类型 |
| Framing Type | 框架类型：框架梁柱/中心支撑/偏心支撑/其他框架单元 |
| ErrMsg | 设计错误信息 |
| WarnMsg | 设计警告信息 |

3) 抗剪设计细节

Steel Design3-Shear Details（钢结构设计-剪力设计细节，如图 17-25 所示，详细说明见表17-14。

| Steel Design 3 - Shear Details - Chinese 2002 | | | | | | | |
|---|------------|-----------------|-----------------|-------------|-----------|-----------|------------------|
| 文件(F) 视图(V) 选项(O) 格式(M) | | | | | | | |
| Units: As Noted | | | | | | | |
| Steel Design 3 - Shear Details - Chinese 2002 | | | | | | | |
| | Frame Text | DesignSect Text | DesignType Text | Status Text | fy KN/m2 | fv KN/m2 | VMajorCombo Text |
| ▶ | 1 | W18x35 | Column | No Messages | 248211.28 | 131605.64 | DSTL1 |
| | 2 | W18x35 | Column | No Messages | 248211.28 | 131605.64 | DSTL1 |
| | 3 | W18x35 | Column | No Messages | 248211.28 | 131605.64 | DSTL1 |

图 17-25 钢结构设计-剪力设计细节表

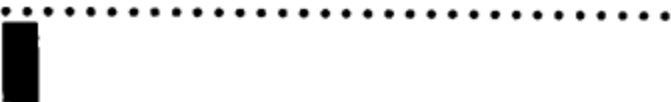
表 17-14

| | |
|--------------------|--------------------|
| Frame | 框架编号 |
| DesignSect | 设计截面 |
| DesignType | 构件设计类型 |
| Status | 设计情况 |
| Fy (KN/m²) | 钢材屈服强度。单位：千牛/米² |
| Fv (KN/m²) | 钢材抗剪强度设计值。单位：千牛/米² |
| VmajorCombo | 主轴方向抗剪设计组合 |
| VmajorLoc (M) | 主轴方向抗剪设计测站。单位：米 |
| V2Major (KN) | 2 轴方向主剪力。单位：千牛 |
| V3Major (KN) | 3 轴方向主剪力。单位：千牛 |
| FictMajor (Yes/No) | 考虑主抗剪方向假象剪力。是/否 |
| TauMajor (KN/m²) | 主剪应力计算值。单位：千牛/米² |
| VmajorRatio | 主剪力应力比 |
| VminorCombo | 次剪力应力比 |
| VminorLoc (M) | 次剪力测站位置。单位：米 |
| V2Minor (KN) | 局部 2 方向轴设计剪力。单位：千牛 |
| V3Minor (KN) | 局部 3 方向轴设计剪力。单位：千牛 |
| FictMinor (Yes/No) | 考虑次抗剪方向假象剪力。是/否 |
| TauMinor (KN/m²) | 次剪应力计算值。单位：千牛/米² |
| VminorRatio | 次剪力应力比 |



续上表

| | |
|--------------|----------------------------|
| T (KN/m) | 设计扭矩。千牛/米 |
| SLRLimit | 应力比限值 |
| RLLF | 活荷载折减系数 |
| Framing Type | 框架类型：框架梁柱/中心支撑/偏心支撑/其他框架单元 |
| ErrMsg | 设计错误信息 |
| WarnMsg | 设计警告信息 |



第五部分

高级分析功能

本部分的主题为高级分析功能，主要内容是阐述 SAP2000 在结构分析实践中可能会使用的较为深入的分析功能。这些功能，对于绝大部分常规结构的分析和设计是不一定需要的，因此对于 SAP2000 程序的初学者，本书的这一部分内容并不一定需要掌握，读者可以根据自身的工程需要或掌握情况来安排阅读。

这一部分共分为 4 章，分别介绍了结构的屈曲分析、静力非线性分析、动力非线性分析和桥梁模块等内容。与前面的章节不同，本书从这一部分开始每一章相关分析内容都给出了分析算例，并从实际工程出发对分析结果进行了深入的讨论，以便读者对于这些内容能更加直观形象的进行了解和学习。

结构的屈曲分析一般是大跨度空间结构体系或者钢结构局部构件需要进行的分析，此时结构的极限承载力状态主要是由稳定控制，而非强度控制。建筑结构的稳定问题一般分为两类，第一类为分支点失稳（特征值屈曲）；第二类是极值点失稳。SAP2000 中的屈曲分析工况（Buckling）是解决第一类失稳问题的，而对于第二类失稳问题，需要结合 SAP2000 静力非线性等分析功能进行综合解决。

我国 2002 版新的结构规范体系已经提出了基于大震作用下的结构实施整体分析并进行变形控制的要求，这时结构将由弹性状态跨越到塑性状态，结构的刚度、承载力和阻尼比都将发生非线性的变化。此外，复杂的空间或柔性结构体系，传统结构分析的小变形假定已经远远不能满足结构分析精度的要求，对于这一类结构必须考虑进行真实大变形的几何非线性分析。阻尼器和隔振器等耗能减震装置在结构中的应用越来越广泛，对于这些装置其刚度和阻尼属性往往体现出较强的非线性特性，因此需要程序进行动力非线性分析以完成设置这些装置的结构的整体准确的分析。

SAP2000 程序考虑结构非线性类型包括材料非线性（框架单元内的拉/压限值、框架单元内的塑性铰、混凝土龄期影响徐变和收缩等）；几何非线性（ $P-\Delta$ 效应、大位移效应）；连接单元的非线性（各类阻尼单元、隔振单元、塑性连接单元、多线性和非线性单元等）；边界非线性（缝隙单元和挂钩单元等）。SAP2000 可以完成一定范围内的非线性静力和非线性动力分析，并且在非线性动力分析中提供了模态积分和直接时间积分两种积分方式，模态积分采用了比较高效的 FNA（快速非线性）分析方法。

本部分中第 18 章介绍了屈曲分析的方法和应用；第 19 章介绍了 SAP2000 中 Pushover 静力非线性分析和阶段施工分析；第 20 章介绍了 SAP2000 非线性动力分析，重点是非线性动力分析的方法以及几个方面的非线性动力分析应用；第 21 章频域分析分别介绍了结构的稳态分析和功率谱密度分析；第 22 章桥梁模块介绍了桥梁分析 BAG (Bridge Analysis Generator) 方法和桥梁模块的相关内容。第 21 章和第 22 章的内容对于一般的结构分析及 SAP2000 程序的使用者不是一定需要掌握的，读者可以有选择性的进行阅读和学习。

新
知
增
進

第18章

屈曲分析

18.1 概述

结构失稳（屈曲）是指在外力作用下结构的平衡状态开始丧失，稍有扰动变形便迅速增大，最后使结构破坏。稳定问题一般分为两类，第一类是理想化的情况，即达到某种荷载时，除结构原来的平衡状态存在外，还可能出现第二个平衡状态，所以又称平衡分岔失稳或分支点失稳，在数学处理上是求解特征值问题，故又称特征值屈曲。此类结构失稳时相应的荷载称为屈曲荷载。第二类是结构失稳时，变形迅速增大，而不会出现新的变形形式，即平衡状态不发生质变，也称极值点失稳。结构失稳时相应的荷载称为极限荷载。此外，还有一种跳跃失稳，当荷载达到某值时，结构平衡状态发生一个明显的跳跃，即突然过渡到非邻近的另一具有较大位移的平衡状态。由于在跳跃时结构已经破坏，其后的状态不能被利用，所以可归入第二类失稳。

SAP2000 的屈曲分析工况（Buckling）在于解决线性屈曲问题，属于第一类失稳，在分析过程中不考虑结构的非线性属性。对于非线性屈曲分析，在 SAP2000 中，可以通过定义非线性静力分析工况来模拟。

18.2 线性屈曲

18.2.1 技术背景

结构的第一类稳定问题，在数学上归结为广义特征值问题。SAP2000 也是通过对特征方程的求解，来确定结构屈曲时的极限荷载和破坏形态。程序的屈曲特征方程为：

$$[K - \lambda G(r)]\psi = 0 \quad (18-1)$$

式中： K ——刚度矩阵；

- $G(r)$ ——荷载向量 r 作用下的几何 ($P-\Delta$) 刚度;
- λ ——特征值对角矩阵;
- Ψ ——对应的特征向量矩阵。

求解特征方程，得到特征值和对应的特征向量，用以确定屈曲荷载及其对应的变形形态。每一组“特征值-特征向量”称为结构的一个屈曲模式，程序按照找到这些模式的顺序从数字 1 到 n 为各模式命名。

特征值 λ 称为屈曲因子。在给定模式中，它必须乘以 r 中的荷载才能引起屈曲。即屈曲荷载为屈曲因子与给定荷载的乘积。有时，也可以将 λ 视为安全系数：如果屈曲因子大于 1，给定的荷载必须增大以引起屈曲；如果它小于 1，给定荷载必须减小以防止屈曲。当然，屈曲因子也可以为负值，这说明当荷载反向时会发生屈曲。

SAP2000 可以生成任意数量且对应不同荷载形式的屈曲分析工况，每个工况可以定义需要的屈曲模式数量，工程师可以对自己所关心的荷载清楚地计算屈曲，从而了解基于荷载的屈曲模式。

18.2.2 定义屈曲分析工况

SAP2000 中进行屈曲分析的基本步骤是：定义用于屈曲分析的荷载工况；在分析模型中建立荷载作用；定义屈曲分析工况；运行分析；查看结果，得到各个屈曲模态的解。

首先定义用于屈曲分析的荷载工况，然后点击命令【定义】>【分析工况】，在弹出的对话框中点击【添加新工况】按钮，弹出分析工况数据对话框。在分析工况类型中选择 **Buckling**，出现关于屈曲分析工况数据的对话框（图 18-1）。

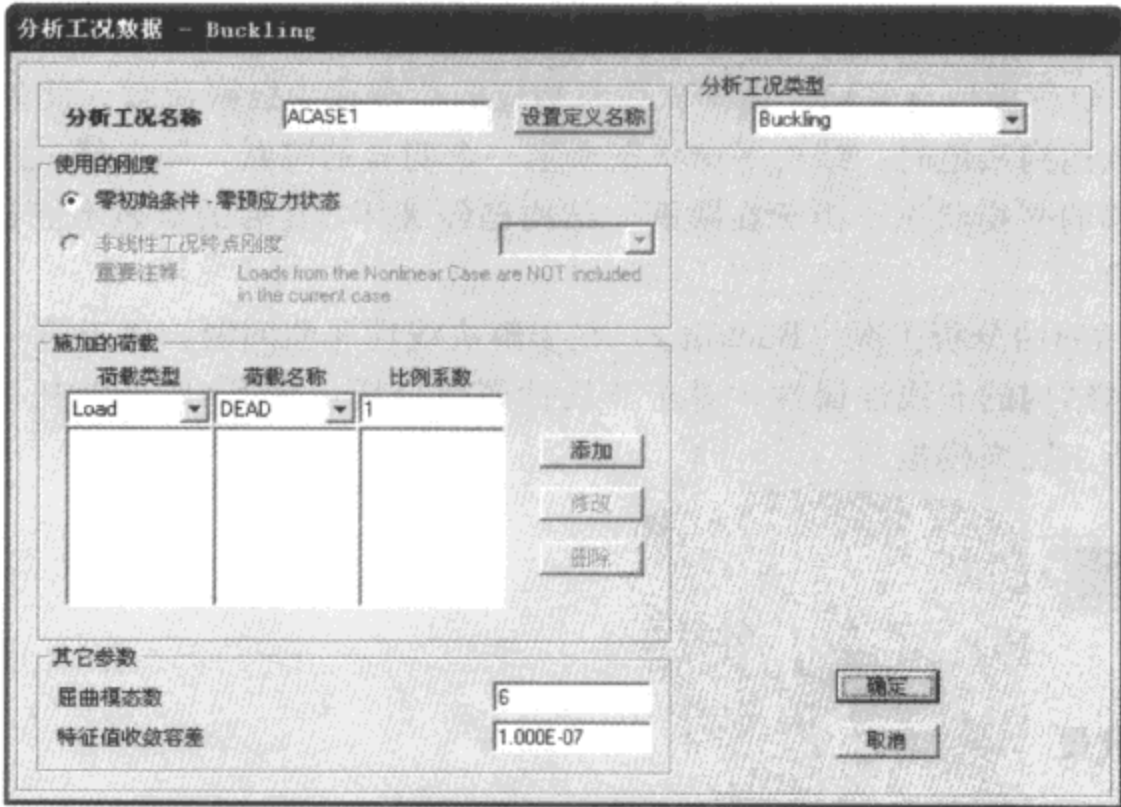


图 18-1 屈曲分析工况数据对话框

使用的刚度一栏，用于定义屈曲分析开始时的初始状态。默认情况下程序会采用整个结构在无应力状态下的刚度矩阵，也可以选择采用某个非线性分析工况结束时的结构刚度。

施加的荷载一栏，用于定义形成特征方程中荷载向量 r 的荷载形式。这里的荷载可以是一个荷载工况或加速度，也可以是几个荷载工况和/或加速度的线性组合。

其它参数一栏，用于定义计算需要的屈曲模态数量和收敛容差。因为前几个屈曲模态可能有非常小的屈曲因子，所以一般需要寻找超过一个的屈曲模态，建议最少找到六个。

完成上述参数的设置后，点击【确定】，即完成一个屈曲分析工况的设定。重复这些操作，可以生成任意数量的屈曲分析工况，从而可以对多种荷载作用形式下的结构屈曲模式分别进行分析。

18.2.3 屈曲分析结果显示

屈曲分析的结果输出主要有两种方式：图形显示和表格显示。

运行分析后，点击命令【显示】>【显示变形形状】，在弹出的对话框（图 18-2）中选择需要查看的屈曲工况名称，输入屈曲模态数，点击【确定】，视窗中即显示相应的屈曲变形，并且在视窗标题栏中显示相应屈曲因子的大小。

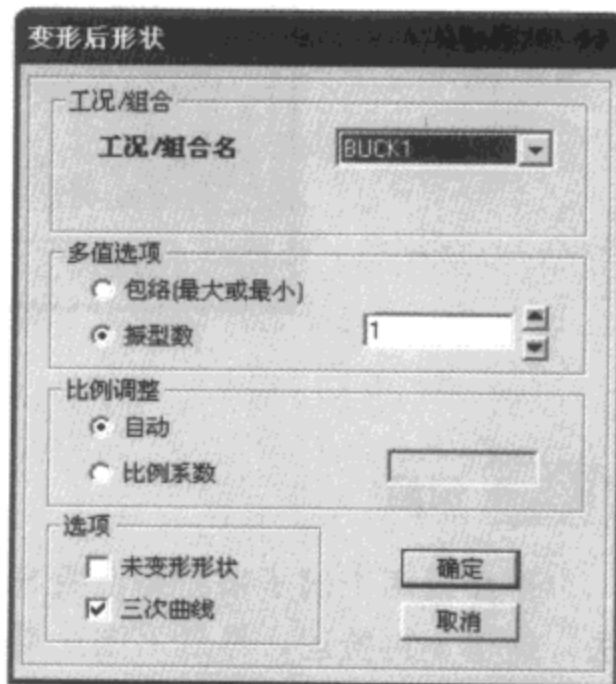


图 18-2 显示屈曲变形对话框

另外，也可以以表格的形式输出屈曲分析结果。点击命令【显示】>【显示表格】，在弹出的对话框（图 18-3）中勾选【结构输出】>【Other Output Items】>【Buckling Factors】，点击【确定】，即生成包含所有屈曲因子的表格（图 18-4）。

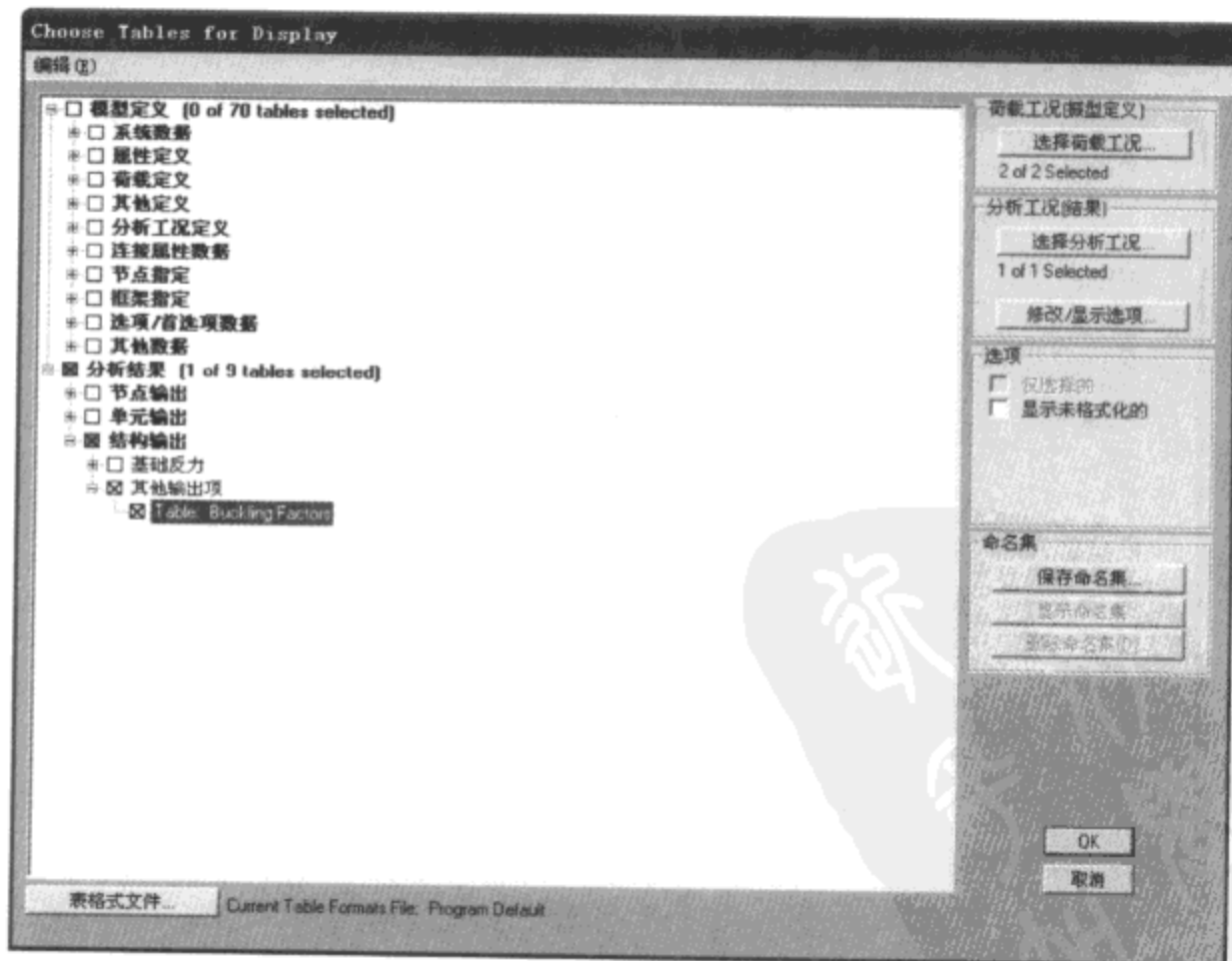


图 18-3 定义屈曲分析结果表格输出

Buckling Factors

文件(F) 视图(V) 选项(O) 格式(M)

Units: As Noted Buckling Factors

| | OutputCase Text | StepType Text | StepNum Unitless | ScaleFactor Unitless |
|---|--------------------|------------------|---------------------|-------------------------|
| ▶ | BUCK1 | Mode | 1 | 225.208346 |
| | BUCK1 | Mode | 2 | 2096.556637 |
| | BUCK1 | Mode | 3 | 2901.207112 |
| | BUCK1 | Mode | 4 | 9005.112512 |
| | BUCK1 | Mode | 5 | 12630.419 |
| | BUCK1 | Mode | 6 | 913339.024 |

记录: 1 of 6

完成

图 18-4 表格输出屈曲分析结果

18.2.4 例题

下面以两个例子来简要说明 SAP2000 屈曲分析工况的运用。前面已详细介绍了实现方法，这里不再赘述，尽量用图片来阐明。

【例题 18-1】如图 18-5 所示，求解 H 型钢柱在轴力作用下的屈曲模式及屈曲荷载的大小。

- (1) 为了更清晰地观察钢柱的屈曲变形，采用壳单元来模拟 H 型钢，如图 18-5a)。
- (2) 定义施加轴力（屈曲荷载）的荷载工况（命名为 AXIAL）。采用表面压力来给钢柱施加轴向荷载，本例中是在柱顶壳面的面 3 位置处施加均布的表面压力，大小为 1N/mm^2 （图 18-5b）。

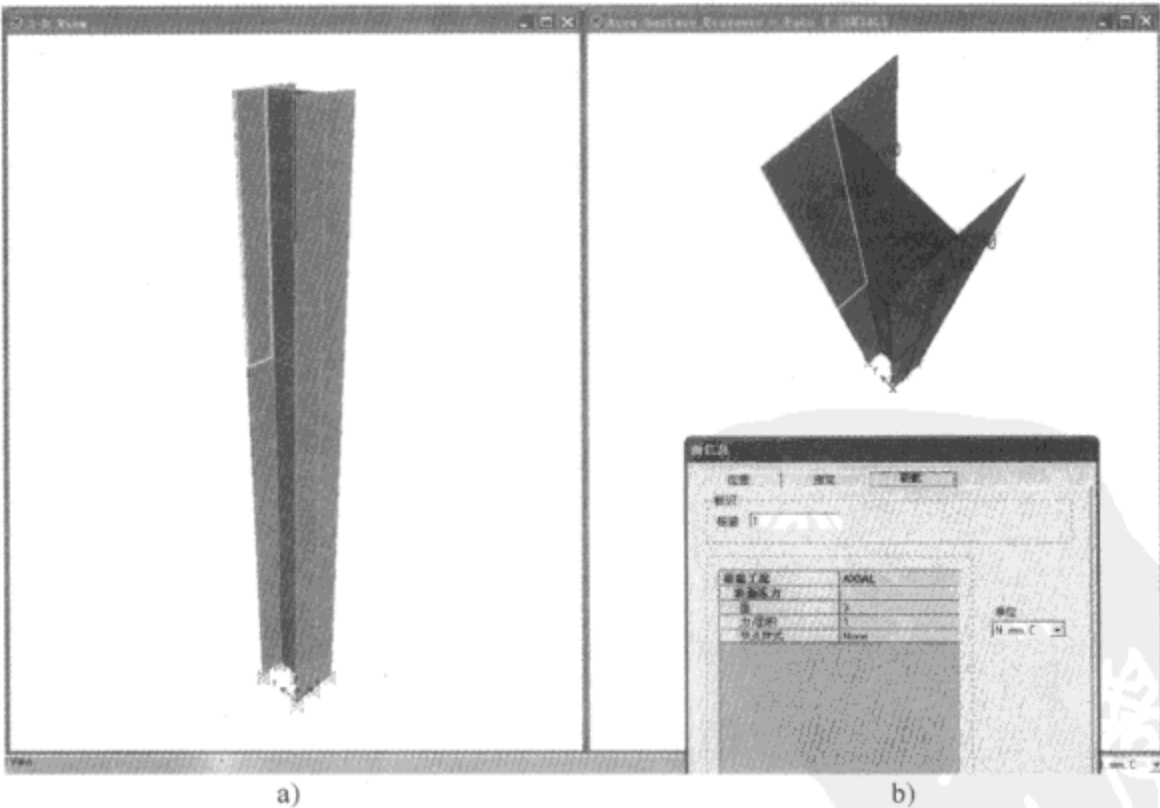


图 18-5 H 型钢柱模型

(3) 定义静力非线性工况 DEAD，添加自重作用并考虑 $P-\Delta$ 效应；然后，定义屈曲分析工况 Buck1（图 18-6），初始刚度来自 DEAD 工况；运行分析。

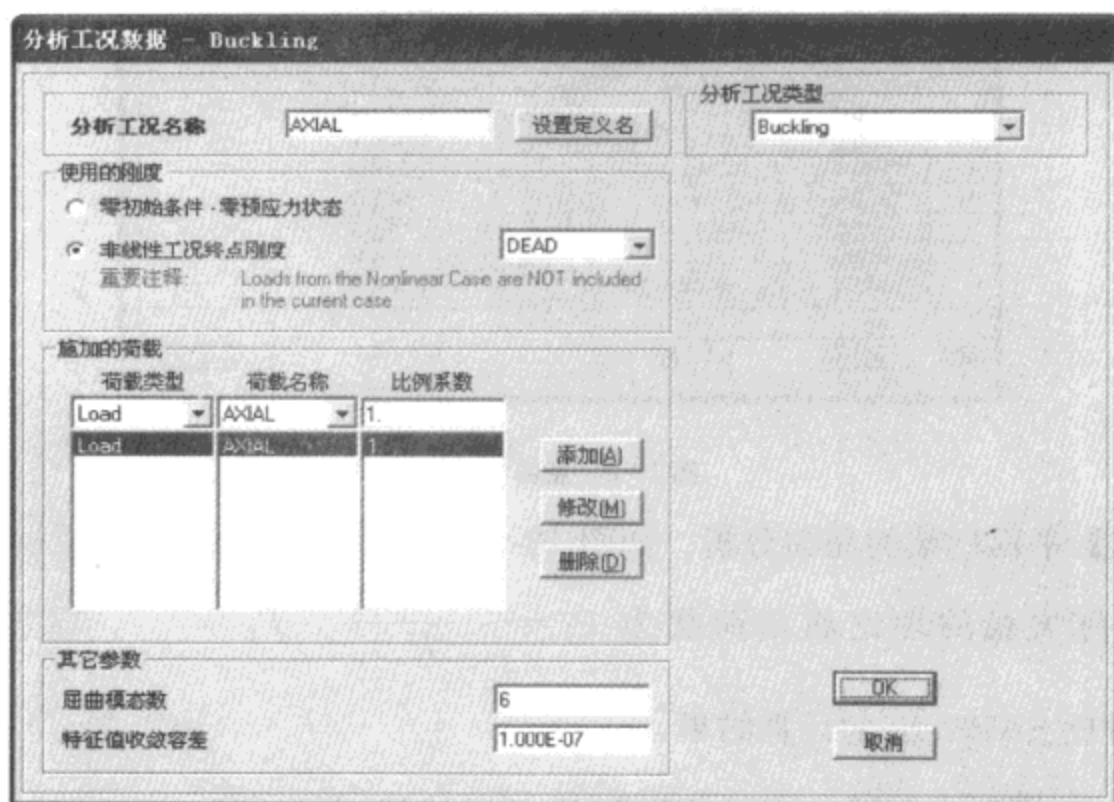


图 18-6 定义屈曲工况

(4) 查看结果。从显示的屈曲变形（图 18-7）可以看出，第一屈曲模式（图 18-7 左上）是弱轴方向侧移的整体失稳，第二屈曲模式是由柱顶转动引起的扭转（图 18-7 右上），第三屈曲模式是强轴方向侧移的整体失稳（图 18-7 左下），第四屈曲模式是柱顶几个角点的局部失稳而引起的变形（图 18-7 右下）。从表格输出的结果（图 18-8）可以知道，最小屈曲因子约为 241，即柱顶均布压力的屈曲荷载为 $1 \times 241 = 241 \text{ N/mm}^2$ 。

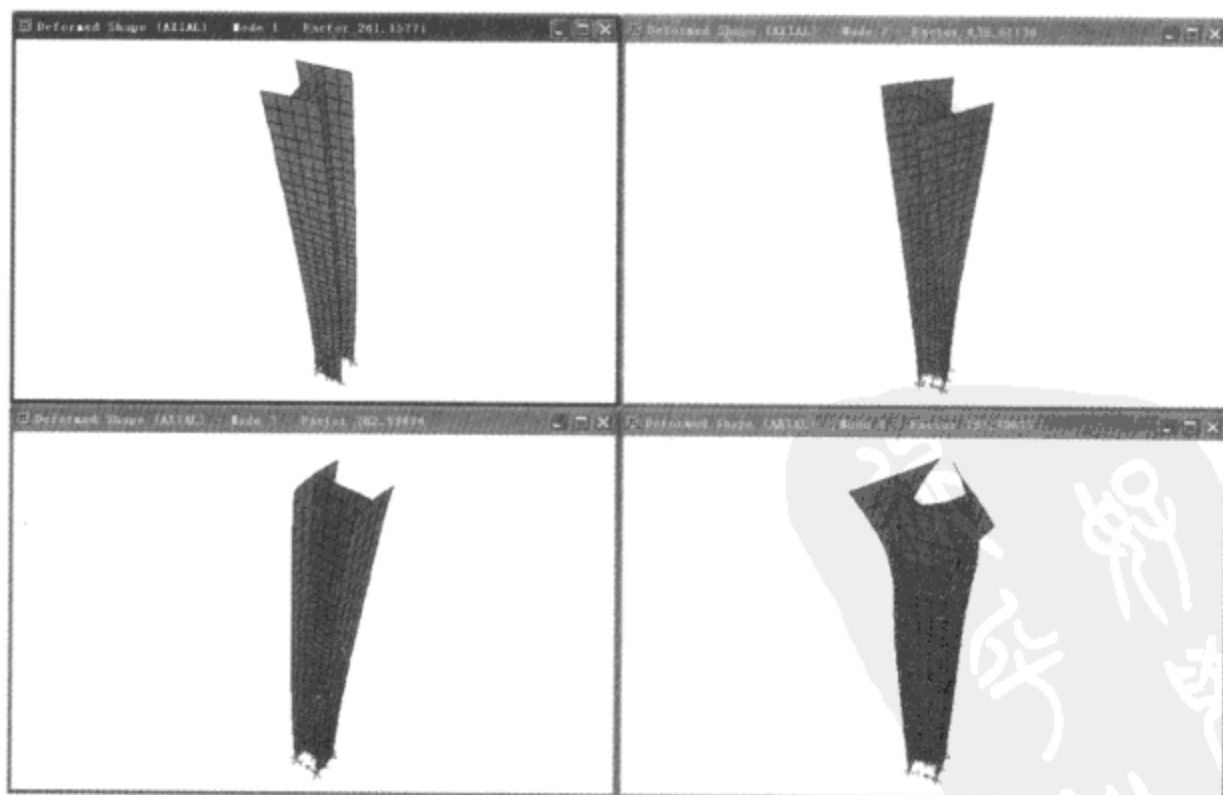


图 18-7 第 1~第 4 屈曲模式

Buckling Factors

文件(F) 视图(V) 选项(O) 格式(M)

Units: As Noted Buckling Factors

| | OutputCase Text | StepType Text | StepNum Unitless | ScaleFactor Unitless |
|---|--------------------|------------------|---------------------|-------------------------|
| ▶ | AXIAL | Mode | 1 | 241.15771 |
| | AXIAL | Mode | 2 | 439.611364 |
| | AXIAL | Mode | 3 | 762.596842 |
| | AXIAL | Mode | 4 | 793.895774 |
| | AXIAL | Mode | 5 | 1029.037408 |
| | AXIAL | Mode | 6 | 1041.87497 |

记录: 1 of 6

完成

图 18-8 屈曲因子表

【例题 18-2】平面钢架的屈曲分析。如图 18-9 所示结构，其反对称失稳和对称失稳的理论屈曲荷载为 $P_1 = \frac{2.1040EI}{l^2}$ ， $P_2 = \frac{14.6602EI}{l^2}$ 。对比 SAP2000 的计算结果。

(1) SAP2000 模型中钢架的物理参数为 $E=2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ， $I=4.9 \times 10^6 \text{ mm}^4$ ， $L=6\text{m}$ 。其理论屈曲荷载为：

$$P_1 = \frac{2.1040EI}{l^2} = 57.27\text{kN}$$
$$P_2 = \frac{14.6602EI}{l^2} = 399.08\text{kN}$$

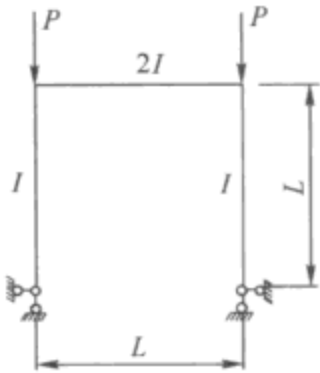


图 18-9 平面钢架结构简图

(2) SAP2000 模型（图 18-10 左）中 $P=1\text{kN}$ ，计算结果如图 18-10 右所示。第一屈曲模式为反对称失稳（图 18-10 右上），屈曲因子为 57.6376；第二屈曲模式为对称失稳（图 18-10 右下），屈曲因子为 401.9922。因此， $P_1=57.6376\text{kN}$ ， $P_2=401.9922\text{kN}$ 。

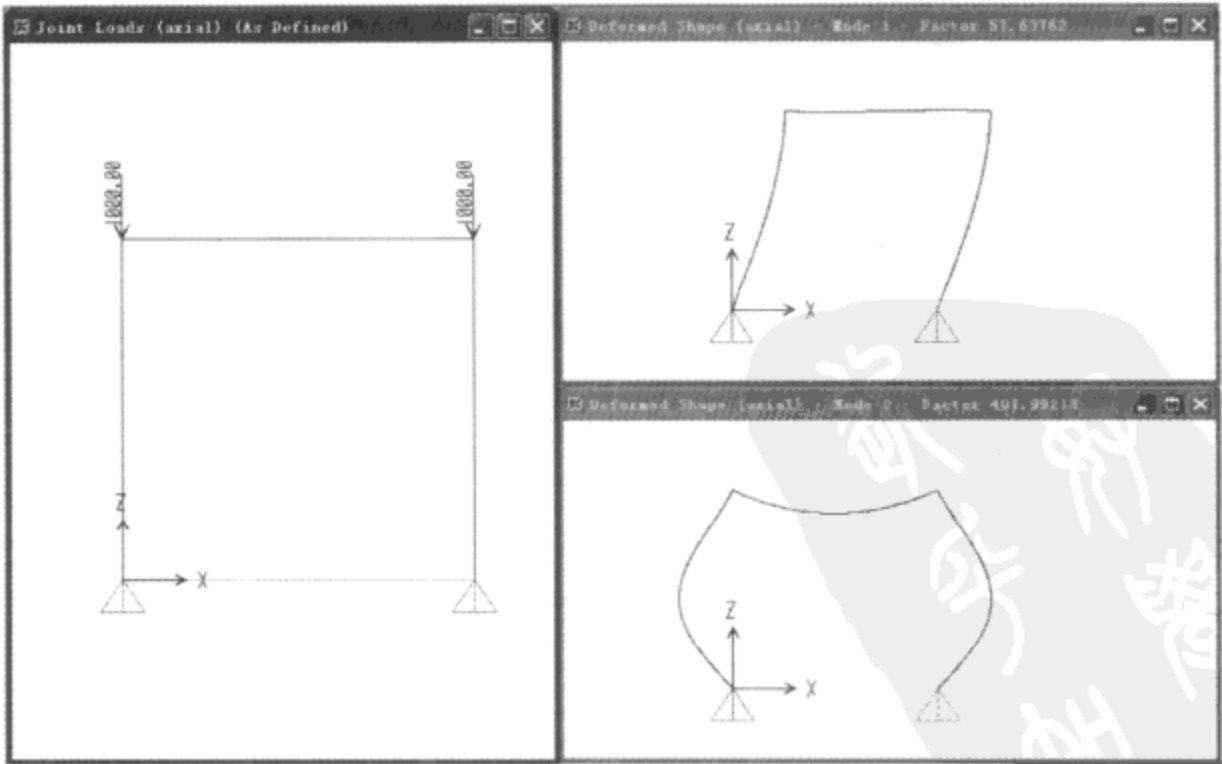


图 18-10 平面钢架模型及其屈曲模式

SAP2000 的计算结果与理论解十分接近,第二屈曲模式的结果误差稍大一些,但也不超过 1%。在建模过程中,钢架单元的细分程度对计算结果影响较大,即分得越细越真实,但计算耗时也越长,对于复杂模型需要综合两个因素合理选择单元细分程度。

18.3 非线性屈曲

18.3.1 技术背景

第二类稳定问题,在数学上归结为一个非线性方程的求解。通常是把结构的临界荷载分成若干级荷载增量。就某一级加载而言,荷载-变形曲线中的相应部分可近似地认为是直线。于是一个总体表现为非线性的过程可以按若干个小的线性过程的叠加来处理,并且在每个增量步对应的线性过程中计入该过程开始时的全部轴向力影响和应力-应变关系,这种线性化处理的结果也能很好地逼近原来的非线性过程。

实际上,工程结构的稳定问题多数属于第二类,因为实际工程中的构件不可避免地存在“初始缺陷”,结构的几何非线性和材料非线性对稳定分析的影响也是客观存在的。第一类稳定问题不考虑这些因素对临界荷载的影响,只是将给定荷载放大 λ 倍,然后将其形成的结构几何刚度“一步到位”地叠加到结构总刚中,去检查它的“随遇平衡”状态,因而不可能考虑加载过程中的非线性效应。不过,由于第一类稳定问题的力学情况比较简单明确,在数学上作为矩阵特征值问题也比较容易处理,而且它的临界荷载可近似代表相应的第二类稳定问题的上限,所以第一类稳定问题在理论分析中仍占有重要地位。

SAP2000 中通过定义非线性静力分析工况来处理非线性稳定问题。其中,几何非线性包括考虑 $P-\Delta$ 效应和大位移,材料非线性需要指定相应的非线性铰行为来模拟,如果模型中还含有其他非线性连接单元,其非线性属性也会被考虑。当然,限于相关理论和计算方法的发展,目前 SAP2000 对非线性稳定问题的求解还存在一定的局限性:其一,目前程序还不能考虑壳的非线性,铰指定仅限于框架单元。其二,杆件出现塑性铰的位置需提前指定。因此,建议工程师首先进行一个相同荷载的线性分析,了解结构的内力分布,再根据单元的截面情况进行非线性铰指定。其三,默认的铰属性都是基于国外规范,我国规范对此还没有明确的规定。因此如果需要精确分析,必须基于大量的实验数据来判定杆件的力学行为。在 SAP2000 的新版本中,将陆续完善上述问题,增加分层非线性壳单元、框架和剪力墙的纤维铰自动生成等功能。关于材料非线性的详细讨论可参见后续相关章节,本节主要针对考虑几何非线性的屈曲问题进行讨论。

对于几何非线性的屈曲问题,“屈曲因子”的概念不再适用,应通过其他方法来判断是否达到临界荷载。比如观察结构变形的趋势,或者观察与外荷载相平衡的基底反力的变化规律,还可以通过荷载-位移曲线的形状来判断。下面,以一个三铰拱的例子来说明如何利用 SAP2000 来处理几何非线性屈曲问题。

18.3.2 三铰拱非线性屈曲分析算例

【例题 18-3】三铰拱受到集中力的作用,模型如图 18-11 所示,半径 R 等于 3m,张角

2α 为 120° 。

(1) 利用柱坐标系建立模型，两端约束设为铰接，并将拱顶的弯矩释放。定义名为 p 的荷载工况（图 18-12），并将该荷载工况下的单位集中力施加于拱顶（图 18-13）。另外，该算例为一平面模型，所以在运行分析前，应在分析选项中指定相应的有效自由度。

(2) 定义屈曲分析工况（图 18-14）。运行屈曲分析工况的目的，是了解该三铰拱线性屈曲的临界荷载值的大小，有助于评估非线性屈曲分析的临界荷载值。计算结果表明，线性屈曲临界荷载约为 18300kN（图 18-15）。

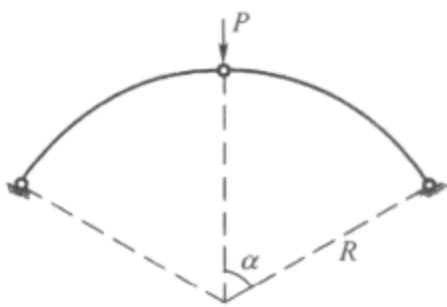


图 18-11 三铰拱模型

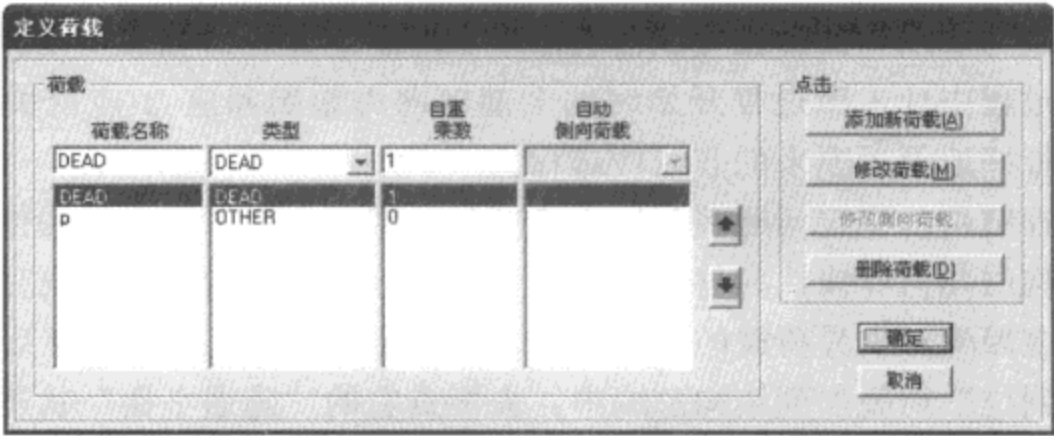


图 18-12 集中力荷载工况定义

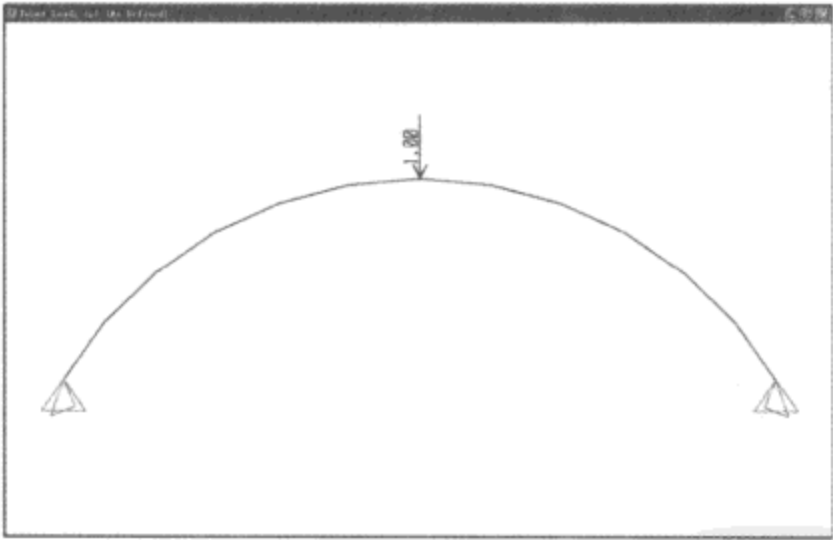


图 18-13 承受集中力作用的三铰拱模型

(3) 定义静力非线性分析工况，计算三铰拱在集中荷载作用时的大变形。点击命令【定义】>【分析工况】，在弹出的对话框中（图 18-16），分析工况类型选择 **Static**，分析类型为非线性，施加的荷载一栏仍然选择荷载工况 **p**，比例系数是对荷载值的调整，此处取一个较大的值 20000。点击【非线性参数】按钮，勾选 **P-Δ** 和 **大位移** 选项，即在运算过程中考虑几何非线性的影响。注意，SAP2000 的大位移是指结构发生大的变形（平动或转动），但此时程序仍然假定所有的单元发生小应变。因此，在建立模型时，对所有杆件都进行了进一步的剖分，保证每一单元内的相对转动较小。

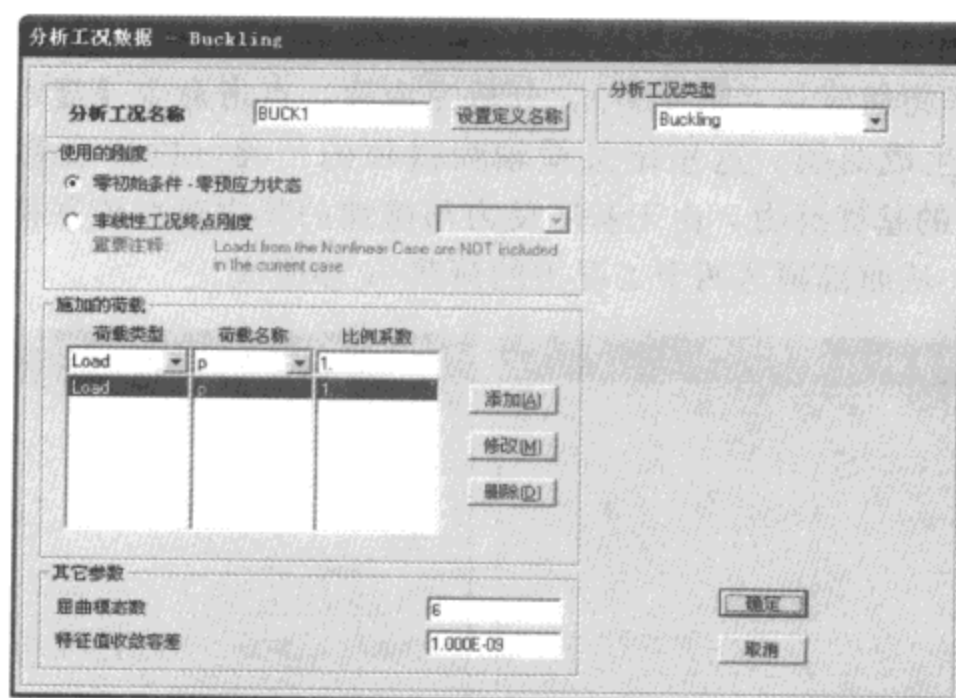


图 18-14 定义屈曲分析工况

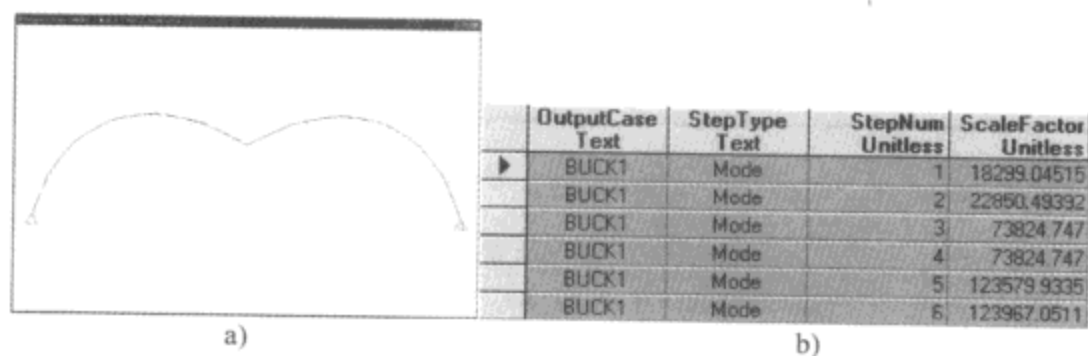


图 18-15 线性屈曲模态及屈曲因子

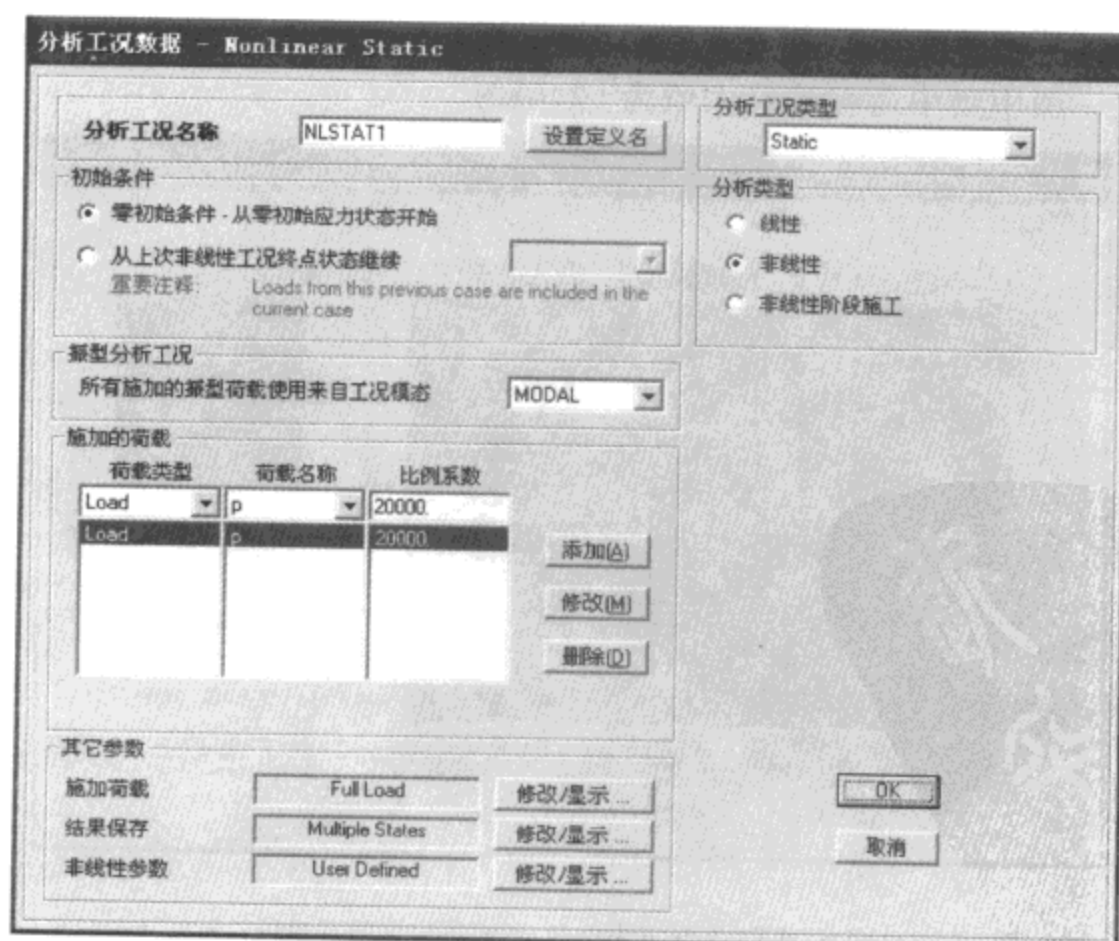


图 18-16 定义静力非线性工况

本例中，定义了两个静力非线性工况 NLSTAT1 和 NLSTAT2，分别采用荷载控制和位移控制两种方式来施加荷载（图 8-17）。分析完成后，点击命令【显示】>【显示绘图函数】，可以根据需要生成曲线。这里定义横轴为拱顶的位移（拱顶位移沿 $-Z$ 轴，故值为负），纵轴为 Z 方向的基底反力，由于基底反力与施加的集中荷载值平衡，故以此来间接反映集中荷载的变化。从而得到这两个工况下的荷载-位移曲线。

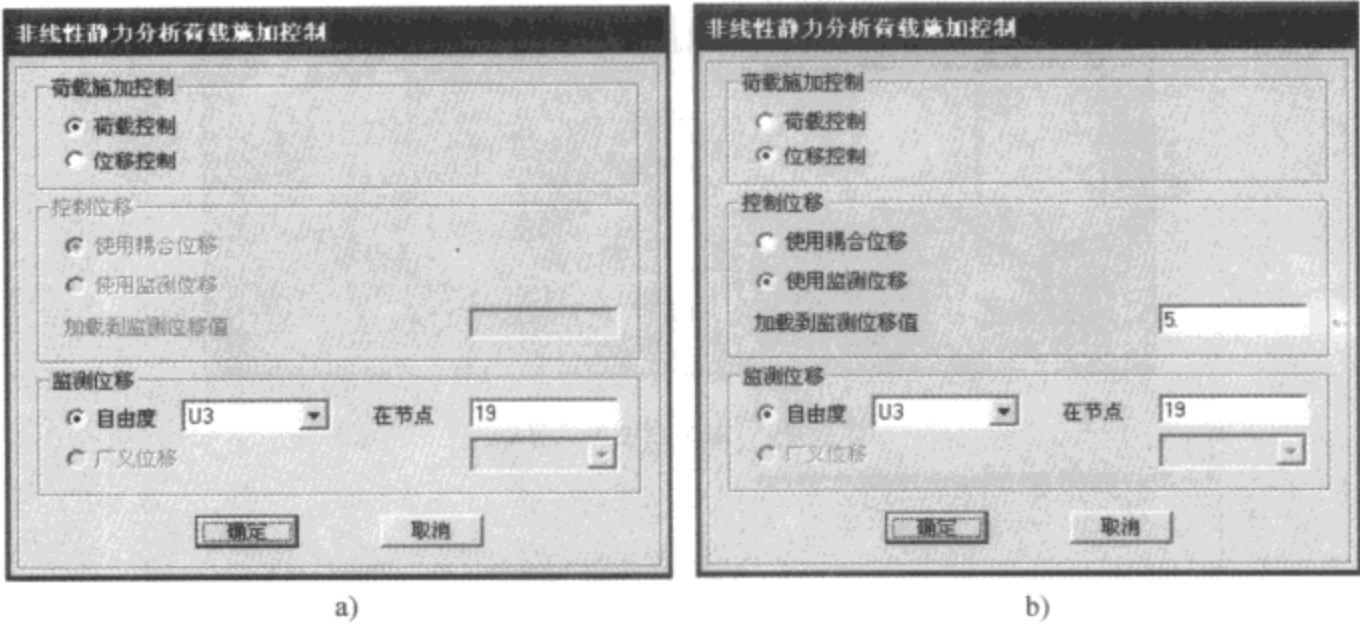


图 18-17 工况荷载施加控制
a) 工况 NLSTAT1; b) 工况 NLSTAT2

图 18-18 给出 NLSTAT1 工况下的荷载-位移曲线，可以看到随着荷载的增大，拱顶位移增加（注意：位移值为负，代表位移方向与 Z 轴正向相反），当结构发生屈曲时，其刚度矩阵出现奇异，计算结果不再收敛，此时荷载-位移曲线几乎平行于横轴，即荷载不再增加而位移无限增大。图中集中荷载的最大值为 6245kN。

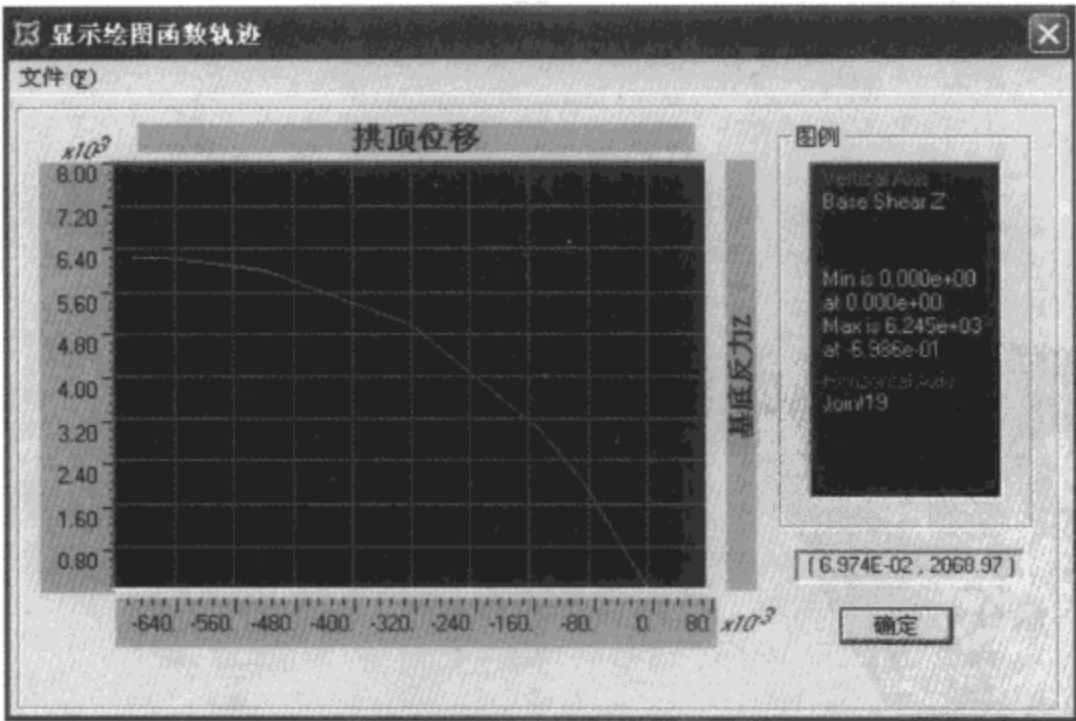


图 18-18 NLSTAT1 工况下集中荷载-拱顶位移图（单位：kN、m）

图 18-19 给出 NLSTAT2 工况下的荷载-位移曲线。在初始阶段荷载值随着拱顶位移的增大而增大,当荷载增大到一定程度时,进一步加大位移,荷载值反而减小并出现反号的情况。这表明此时结构需要施加反方向的集中荷载才能维持平衡。整条曲线反映了位移逐步增加时,外荷载的变化规律。而工程师们所关心的屈曲荷载即曲线中的第一个峰值点,对应的集中荷载大小约为 6210kN。

通过上述分析可知,非线性屈曲的临界荷载约 6200kN,远小于线性屈曲分析得到的临界荷载 18300kN。

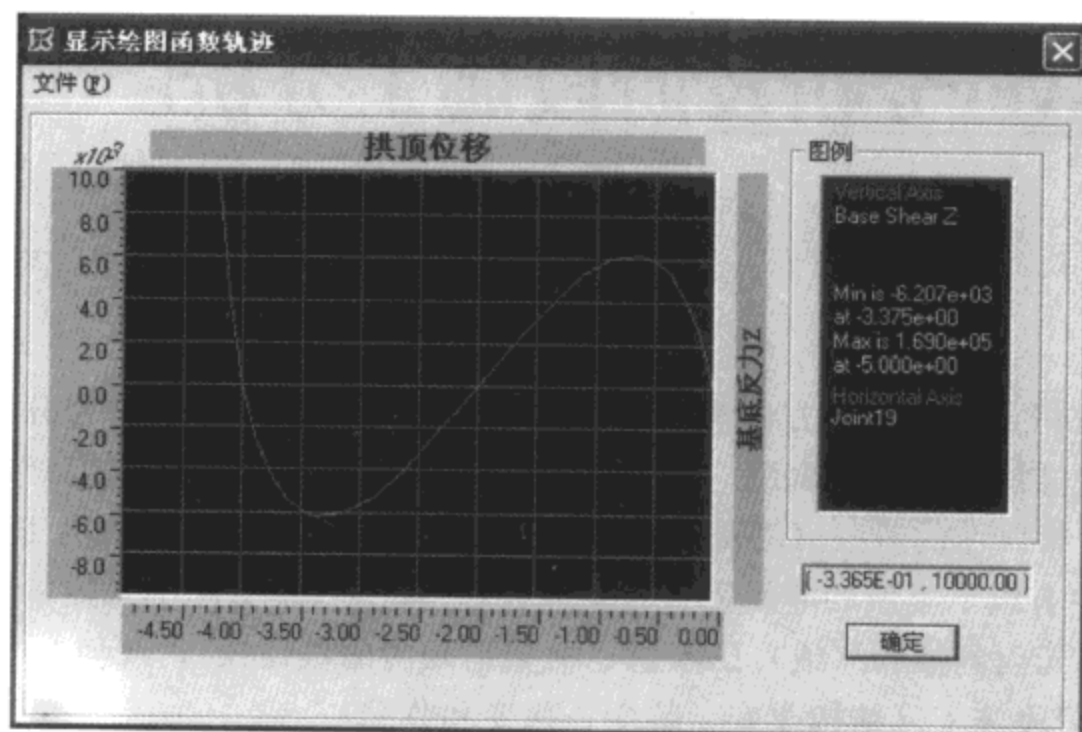


图 18-19 NLSTAT2 工况下集中荷载-拱顶位移图 (单位: kN、m)

第19章

Pushover分析及阶段施工分析

Pushover 分析及阶段施工分析都属于非线性静力分析。非线性静力分析应用广泛，包括：分析结构的材料和几何非线性；对于后续的线性分析形成 $P-\Delta$ 刚度矩阵；考虑收缩徐变等时间相关材料属性的阶段（增量）施工加载；进行索分析；进行静力 Pushover 分析。

SAP2000 中有以下类型的非线性：材料非线性（在连接/支座单元内的多种类型的非线性属性、框架单元内的拉和（或）压限值、框架单元内的塑性铰）；几何非线性（ $P-\Delta$ 效应、大位移效应）；阶段施工（结构改变、龄期、徐变和收缩）。

本章主要介绍静力非线性分析中的 Pushover 分析和阶段施工分析。首先介绍 Pushover 的基本知识，包括 Pushover 的概念以及 FEMA 356、ATC-40 的相关内容，Pushover 在 SAP2000 中的实现方法和过程，包括塑性铰、静力非线性（Pushover）分析工况；然后介绍静力非线性阶段施工分析；最后介绍两道例题，分别是 Pushover 分析、阶段施工分析的操作。非线性时程分析的内容将在第二十章介绍。

19.1 Pushover 分析

静力非线性分析方法（Nonlinear Static Procedure），也称 Pushover 分析法，是基于性能评估现有结构和设计新结构的一种方法。静力非线性分析是结构分析模型在一个沿结构高度为某种规定分布形式且逐渐增加的侧向力或侧向位移作用下，直至结构模型控制点达到目标位移或结构倾覆为止的过程。控制点一般指建筑物顶层的形心位置；目标位移为建筑物在设计地震力作用下的最大变形。

Pushover 方法的早期形式是“能力谱方法”（Capacity Spectrum Method CSM），基于能量原理的一些研究成果，试图将实际结构的多自由度体系的弹塑性反应用单自由度体系的反应来表达，初衷是建立一种大震下结构抗震性能的快速评估方法。从形式上看，这是一种将静力弹塑性分析与反应谱相结合、进行图解的快捷计算方法，它的结果具有直观、信息丰富的特点。正因为如此，随着 90 年代以后基于位移的抗震设计（Displacement-Based

Seismic Design, DBSD) 和基于性能 (功能) 的抗震设计 (Performance-Based Seismic Design, PBS D) 等概念的提出和广为接受, 使这种方法作为实现 DBSD 和 PBS D 的重要工具, 得到了重视和发展。

这种方法本身主要包含两方面的内容: 计算结构的能力曲线 (静力弹塑性分析)、计算结构的目标位移及结果的评价。第一方面内容的中心问题是静力弹塑性分析中采用的结构模型和加载方式; 第二方面内容的中心问题则是如何确定结构在预定水平地震作用下的反应, 目前可分为以 ATC-40 为代表的 CSM 和以 FEMA356 为代表的 NSP (Nonlinear Static Procedure, 非线性静力方法), CSM 的表现形式是对弹性反应谱进行修正, 而 NSP 则直接利用各种系数对弹性反应谱的计算位移值进行调整, 两者在理论上是一致的。

在一些文献中只将第一方面的内容称为 Pushover, 不包括计算目标位移和结果评价的内容。本文中, 将两方面的内容统称为 “Pushover 分析”。

基于结构行为设计使用 Pushover 分析包括形成结构近似需求和能力曲线并确定曲线交点。需求曲线基于反应谱曲线, 能力谱基于 Pushover 分析。在 Pushover 分析中, 结构在逐渐增加的荷载作用下, 其抗侧能力不断变化 (通常用底部剪力-顶部位移曲线来表征结构刚度与延性的变化, 这条曲线我们可以看作是表征结构抗侧能力的曲线)。将需求曲线与抗侧能力曲线绘制在一张图表中, 如果近似需求曲线与能力曲线有交点, 则称此交点为性能点。利用性能点能够得到结构在用需求曲线表征的地震作用下结构底部剪力和位移。通过比较结构在性能点的行为与预先定义的容许准则, 判断设计目标是否达到。

在结构产生侧向位移的过程中, 结构构件的内力和变形可以计算出来, 观察其全过程的变化, 判别结构和构件的破坏状态, Pushover 分析比一般线性抗震分析提供更为有用的设计信息。

在大震作用下, 结构处于弹塑性工作状态, 目前的承载力设计方法, 不能有效估计结构在大震作用下的工作性能。Pushover 分析可以估计结构和构件的非线性变形, 结果比承载力设计更接近实际; Pushover 分析相对于非线性时程分析, 可以获得较为稳定的分析结果, 减少分析结果的偶然性, 同时可以大大节省分析时间和工作量。

19. 1. 1 Pushover 与 FEMA 356 及 ATC-40 概述

SAP2000 中的 Pushover 分析基于 FEMA 356 和 ATC-40。FEMA-356 (Seismic Rehabilitation of Buildings) 是美国 Federal Emergency Management Agency 对于钢结构、钢筋混凝土结构、砌体结构及木结构建筑物以其性能表现为基准 (Performance-Based) 的抗震评估方法, 其前身为 FEMA 273。它的主要目的是为建筑物抗震及加固提供一套分析方法和标准, 依照不同的地震等级与不同的建筑物性能表现等级 (Building Performance Level) 而制定出不同的修复目标 (Rehabilitation Objectives)。地震大小等级是指建筑物在使用年限中可能遇到的地震灾害, 建筑物性能等级则代表建筑物遭受地震作用后可维持的功能, 共分 4 级: 正常使用 (Operational)、可立即使用 (Immediate Occupancy)、生命安全 (Life Safety)、建筑物不倒塌 (Collapse Prevention)。为达到大震不倒, 中震可修, 小震不坏的原则, FEMA 356 制定了基本的安全指标 (Basic Safety Objective), 规定了不同地震等级下建筑物需达到的生命安全 (Life Safety) 等级或建筑物不倒塌的等级。对一般结构提出 4 种方法来

评估结构是否可达到所要求的抗震性能，这4种方法分别为静力线性（LSP），动力线性（LDP），静力非线性（NSP），动力非线性（NDP）。

ATC-40（Applied Technology Council, 1996）为一学术报告，它针对 Pushover 分析方法给出一整套详细说明及范例。FEMA-440（Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures）是 ATC-55（ATC-40 的最新报告）项目技术报告。

FEMA 356 采用“目标位移法”（Target Displacement Method），用一组修正系数，修正结构在“有效刚度”时的位移值，来估计结构非线性位移。ATC-40 采用“能力谱法”，先建立 5% 阻尼的线弹性反应谱，再用能量耗散效应折减反应谱值，并以此来估计结构的非线性位移。FEMA-356 与 ATC-40 从根本上来讲是一致的，都是形成 Pushover 曲线来表示结构的横向变形能力。以上两种方法，都是以弹性反应谱为基础，将结构简化成等效单自由度体系。因此，它主要反映结构第一周期的性质，当较高振型为主时，如较高的高层建筑和具有局部薄弱部位的建筑，采用上述非线性分析法将要受到限制。

目前，FEMA 356、FEMA 440，SAP2000 最新版已经包含了最新的研究成果及相应的规范，同时新增加了分层非线性壳单元、框架和剪力墙的纤维铰自动生成功能。

Pushover 分析的基本工作分为两个部分：建立侧向荷载作用下的结构荷载-位移曲线图；对结构抗震能力的评估。

(1) 侧向荷载作用下结构荷载-位移曲线图

结构承载力曲线的确定步骤如下：①结构计算模型的确定；②结构构件的实际承载力计算，包括构件截面开裂弯矩和构件实际正截面受弯承载力（对剪力墙尚需计算受剪承载力）；③构件的弹性、开裂和屈曲后刚度的估计；④用 Pushover 分析估计层间侧向刚度和层间位移角；⑤确定结构承载力曲线。Pushover 分析的一个结果是结构的荷载-位移曲线，它表示了侧向总剪力与顶点侧向位移的关系。图 19-1 所示为理想的荷载-位移曲线。

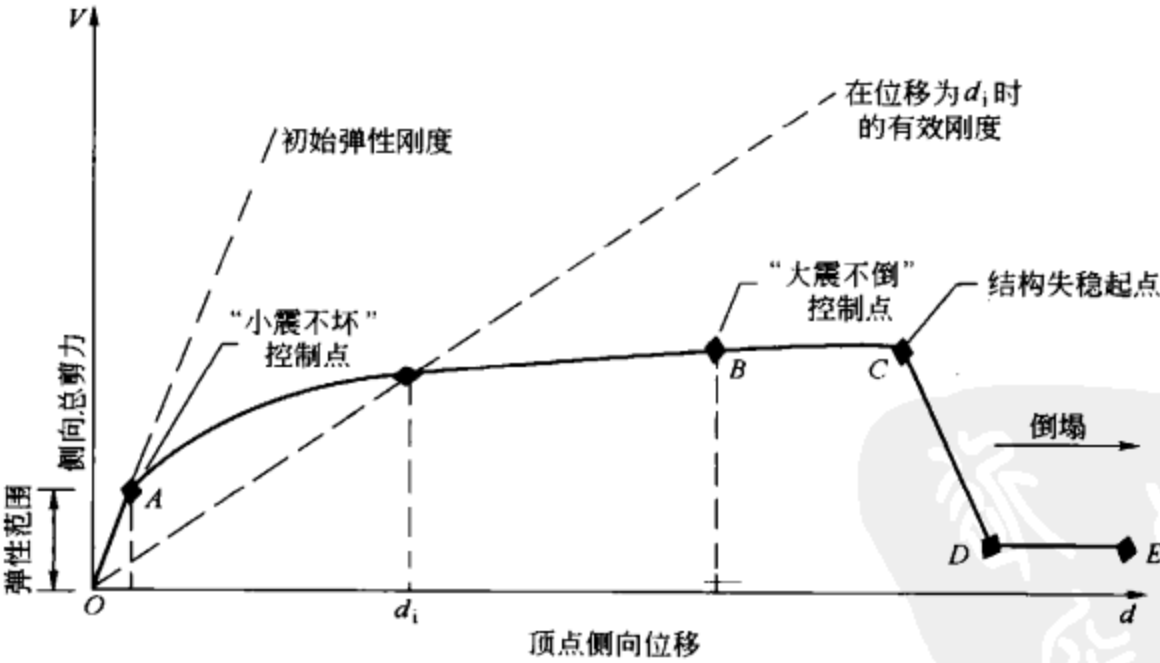


图 19-1 结构荷载-位移曲线

如图所示，在侧向力作用下，结构变形经历几个阶段：弹性变形阶段 OA 、稳定的非线性变形阶段 ABC 、失稳直至倒塌阶段 CDE 。

Pushover 分析得到的荷载位移曲线表征的是侧向总剪力与顶点侧向位移（结构各层层间位移之和）的关系，抗规要求得到某个薄弱层的层间位移，此时工程师可以抛开荷载位移曲线直接从结构变形数据中得到。

(2) 结构抗震能力的评估

可以通过如下三种方法进行结构抗震能力的评估：①用规范规定的容许层间位移角，检验结构承载力曲线上对应层剪力（按延性系数对层弹性地震力折减后的数值）的位移角是否符合要求。②用层承载力曲线相应的恢复力模型，按时程分析校核非线性层间变形是否符合规范限值的要求。③建立 ADRS 谱（以谱加速度为纵坐标，谱位移为横坐标的 Sa-Sd 谱）和能力谱（由承载力曲线转换得来），将两条曲线放在同一个图上，得出交会点的位移值，同目标位移进行比较，检验是否满足弹塑性变形验算要求。

通过 Pushover 分析得到荷载-位移曲线后，还不能立即将图上某一点的位移确定为代表结构抗震性能的“目标位移”，并与规范规定的容许变形限值进行比较，以确定结构的抗震能力是否达到要求。因为 Pushover 分析是把一个多自由度体系的结构，按照等效的单自由度结构来处理，其外作用（地震需求）和结构反应（结构的承载能力）要经过一系列的转换处理。处理方法有多种，主要有“能力谱法”和“目标位移法”。

(3) 能力谱法

这个方法是美国 ATC-40 采用的方法，也是日本新的建筑基准法（BSL 2000）采用的方法。其基本思想是，建立两条相同基准的谱线：一条是由荷载-位移曲线转化成的能力谱线（亦称供给谱线、承载力谱线），另一条是由加速度反应谱转化成的 ADRS 谱（亦称需求谱线），把两条线放在同一个图上，两曲线的交点定为“目标位移点”（或“结构抗震性能点”），将性能点所对应的位移与位移容许值比较，判断是否满足抗震要求。

将能力曲线（Pushover Curve）转换为能力谱，每个点都需要转换，从能力曲线上任一点的 V_i ， Δ_{roof} 转换到能力谱相应的点 S_{ai} 和 S_{di} ，可采用以下的公式：

$$S_{ai} = \frac{V_i/G}{\alpha_1} \quad S_{di} = \Delta_{roof}/\gamma_1 X_{1,roof} \tag{19-1}$$

式中： α_1 ——第一振型质量参与系数；

γ_1 ——第一振型参与系数；

$X_{1,roof}$ ——第一振型顶点振幅。

振型参与系数如下定义：

$$\alpha_1 = \frac{[\sum_{i=1}^N (m_i \varphi_{i1})]^2}{[\sum_{i=1}^N m_i] [\sum_{i=1}^N (m_i \varphi_{i1}^2)]} \quad \gamma_m = \frac{\sum_{i=1}^N (m_i \varphi_{im})}{\sum_{i=1}^N (m_i \varphi_{im}^2)} \tag{19-2}$$

式中： γ_m ——第 m 振型的振型参与系数；

m_i —— i 层的质量；

φ_{im} ——振型 m 在 i 层的振幅；

N ——层数。

为建立加速度-位移反应谱 ADRS（Acceleration-Displacement Response Spectra），按照 ADRS（加速度-位移反应谱）格式，结构能力（Pushover）曲线与需求谱都是以加速度反应

谱对位移谱的坐标来绘制的（见 ATC-40 第 8~12 页）。由标准的加速度反应谱（ S_a-T 谱）转换为 S_a-S_d 谱（谱加速度为纵坐标，谱位移为横坐标），便是 ADRS 谱。反应谱曲线上的第一点，同谱加速度 S_a 、谱速度 S_v 、谱位移 S_d 和周期 T 有确定的关系，要从标准的加速度反应谱 S_a-T （第 1 段常加速度）模式转换为 ADRS 模式，必须确定曲线上每一点的相应于 S_{ai} 和 T_i 的 S_{di} 值，其关系可从下式求得：

$$S_{di} = \frac{T_i^2}{4\pi^2} S_{ai} g \tag{19-3}$$

标准的需求反应谱包含一组常量的谱加速度和另一组常量的谱速度；在周期 T_i 处的谱加速度和谱位移有如下的关系（第 2 段常速度）：

$$S_{ai} g = \frac{2\pi S_v}{T_i} \quad S_{di} = \frac{T_i}{2\pi} S_v \tag{19-4}$$

标准模式的反应谱与 ADRS 模式的转换，如图 19-2 中右侧图所示。

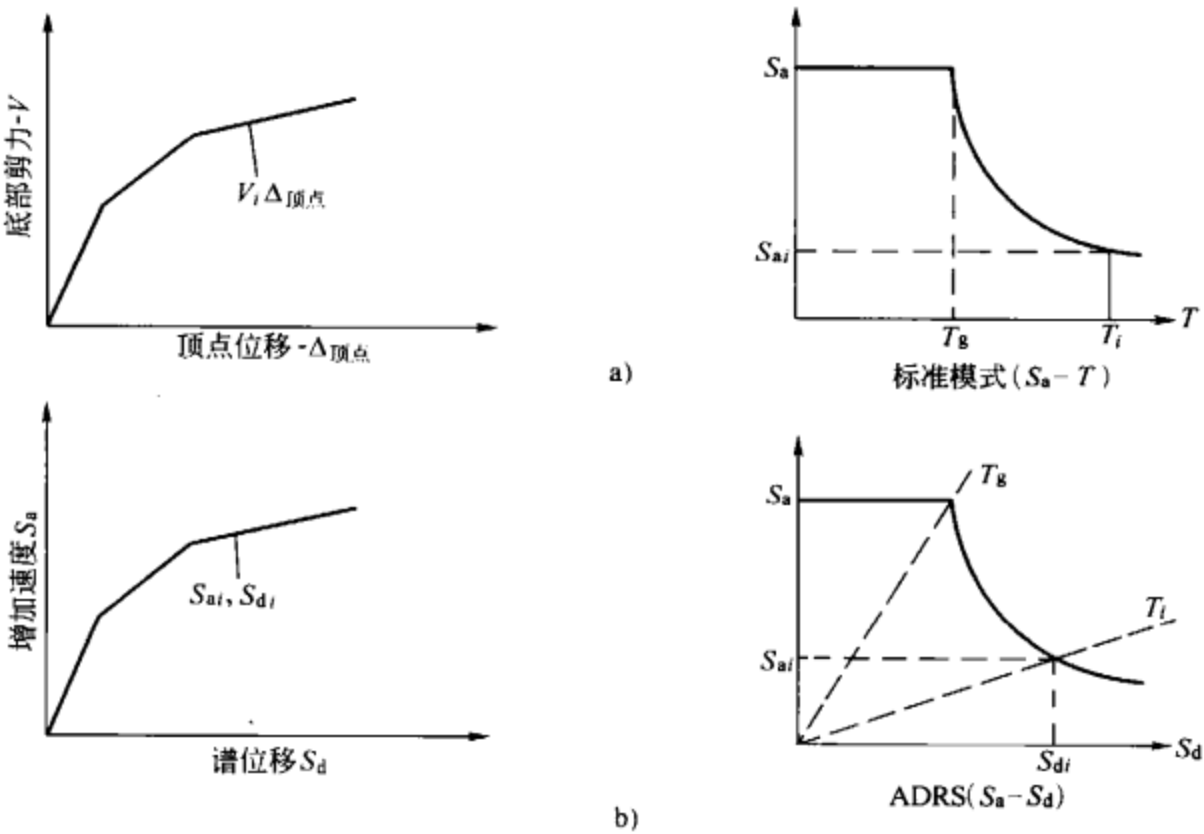


图 19-2 能力谱转换与反应谱转换
a) 荷载-位移曲线；b) 能力谱

寻找地震需求与结构承载力供给之间的关系之前，须考虑结构非线性耗能性质对地震需求的折减。当地震作用于结构，达到非线性状态时，结构物的固有粘滞阻尼（Viscous Damping）及滞回阻尼（Hysteretic Damping）会导致结构物在运动过程中产生消能的作用，如图 19-3 所示。滞回阻尼及固有阻尼（Inherent Damping）可用等效粘滞阻尼（Equivalent Viscous Damping）来评估，如下式所示：

$$\beta_{eq} = \beta_0 + 0.05 \tag{19-5}$$

式中： β_{eq} ——等效粘滞阻尼；
0.05——结构本身固有的粘滞阻尼；
 β_0 ——滞回阻尼经计算得到的等效粘滞阻尼，由下式评估。

$$\zeta = \frac{E_D}{4\pi E_S} \quad (19-6)$$

式中：\$E_D\$——结构单周期运动阻尼耗能，等于由滞回环包围的面积，即平行四边形的面积；

\$E_S\$——最大的应变能，等于阴影斜线部分的三角形面积。

图 19-3 为韧性结构物的滞回环，但在某种情况下并非如此完美，ATC 利用 \$\kappa\$ 来体现此问题，表 19-1 中不同的结构物根据地震持续时间长短将结构物行为分为三类。TYPE A：\$\kappa=1\$，结构滞回环与图 19-3 接近，具有良好的耗能能力；TYPE B：\$\kappa=2/3\$，表示结构具有中等耗能能力；TYPE C：\$\kappa=1/3\$，表示结构耗能能力不佳。表 19-2 是将不同的阻尼比对 \$\kappa\$ 的修正，最后将 \$\beta_{eq}\$ 换为 \$\beta_{eff}\$（等效阻尼比）：

$$\beta_{eff} = \kappa\beta_0 + 5 = \frac{63.7\kappa(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}} + 5 \quad (19-7)$$

结构行为类型

表 19-1

| 地震持时 | 新建筑 | 平均现存建筑 | 现存老建筑 |
|------|--------|--------|--------|
| 短 | Type A | Type B | Type C |
| 长 | Type B | Type C | Type C |

阻尼修正系数 \$\kappa\$

表 19-2

| 结构行为类型 | \$\beta_0\$ (%) | \$\kappa\$ |
|--------|-----------------|---|
| Type A | \$\le 16.25\$ | 1.0 |
| | \$> 16.25\$ | \$1.13 - 0.51 (S_{ay} S_{dpi} - S_{dy} S_{api}) / S_{api} S_{dpi}\$ |
| Type B | \$\le 25\$ | 0.67 |
| | \$> 25\$ | \$0.845 - 0.446 (S_{ay} S_{dpi} - S_{dy} S_{api}) / S_{api} S_{dpi}\$ |
| Type C | 任意值 | 0.33 |

\$\beta_{eff}\$ 用来评估反应谱的折减系数，其关系由公式 19-8 得到，当结构的系统阻尼比大于 5% 的临界阻尼时，对 5% 阻尼的弹性反应谱的折减得到需求谱，公式如下：

$$SR_A = \frac{1}{B_S} = \frac{3.21 - 0.68 \ln(\beta_{eff})}{2.12} \quad SR_V = \frac{1}{B_L} = \frac{2.31 - 0.41 \ln(\beta_{eff})}{1.65} \quad (19-8)$$

\$SR_A\$ 和 \$SR_V\$ 分别代表弹性反应谱常数加速度区和常数速度区的折减系数，表 19-3 为不同的结构行为下，\$SR_A\$ 和 \$SR_V\$ 所能折减的容许值。

.....

S_{RA} 和 S_{RV} 最小容许值

表 19-3

| 结构行为类型 | S_{RA} | S_{RV} |
|--------|----------|----------|
| Type A | 0.33 | 0.50 |
| Type B | 0.44 | 0.56 |
| Type C | 0.56 | 0.67 |

能力谱与需求谱放在同一个 ADRS 图上, 如图 19-4 所示, 两组曲线有个交汇点, 如果这个交点与 (a_p, d_p) 点相近, 此点可视为“性能点”(Performance Point), 或称“目标位移点”, 如果此点远离 (a_p, d_p) 点, 则计算过程须重复进行, 直至达到满意为止。

(4) 目标位移法

这个方法是 FEMA-356 推荐的方法, 其基本思想是建立控制点的“目标位移”。建筑顶层的质量中心(屋顶小间不作为顶层)定为结构的位移控制点。目标位移用下列公式给出:

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (19-9)$$

式中: T_e ——建筑物在考虑的方向上有效基本周期, s;

C_0 ——相关谱位移和可能的结构顶位移修正系数;

C_1 ——短周期结构最大弹性变形与非弹性变形间修正因子;

C_2 ——最大位移反应上滞回效果的修正系数;

C_3 ——动力 $P-\Delta$ 效应位移增加修正系数;

S_a ——反应谱加速度, 结构在考虑方向上有效基本周期和阻尼。

有效基本周期 T_e 由下式确定

$$T_e = T \sqrt{\frac{K}{K_e}} \quad (19-10)$$

式中: T ——弹性基本周期, 用弹性动力分析确定;

K 、 K_e ——结构弹性侧向刚度和结构有效侧向刚度。 K 和 K_e 的确定如图 19-5 所示。将荷载-位移曲线用双线性折线代替, 初始刚度为 K , 在曲线上 0.6 倍屈服剪力处的割线刚度称为有效刚度 K_e 。

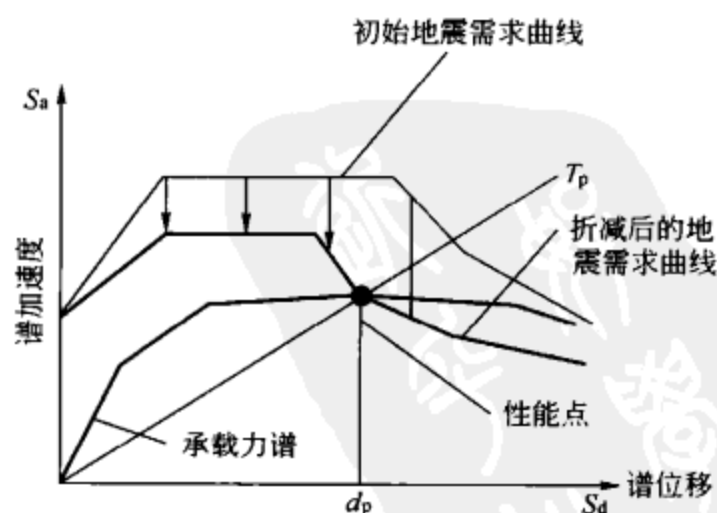


图 19-4 能力谱与需求谱

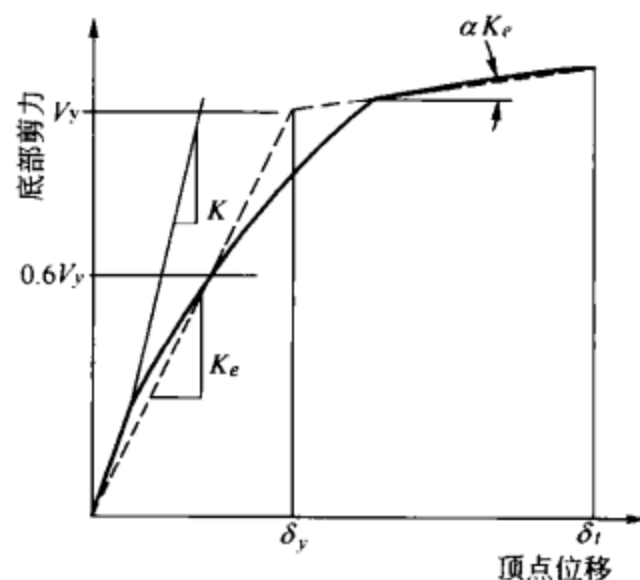


图 19-5 荷载-位移曲线和有效刚度的计算

系数 C_0 考虑了多自由度的顶点位移和等效单自由度体系位移之间的差异，可以按下面的方法之一计算得到：

①取控制点平面处的弹性第一振型参与系数值。

$$C_0 = X_1 \gamma_1 = X_{1n} \sum_{i=1}^n X_{1i} G_i / \sum_{i=1}^n X_{1i}^2 G_i \tag{19-11}$$

式中： G_i —— i 平面上的重量；

X_{1i} ， X_{1n} ——第一振型 i 点和顶点平面上的振型相对位移。

②采用实际的结构沿高度方向的变形曲线，求控制点平面处的振型参与系数值。

③采用表 19-4 中所列数值（假定第一振型为直线）

C_0 系数取值表 表 19-4

| 楼层数 | 1 | 2 | 3 | 5 | ≥ 10 |
|------|-----|-----|-----|-----|-----------|
| 修正层数 | 1.0 | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 1.5 |

系数 C_1 为最大非弹性位移与由线弹性反应计算出的位移差异的修正系数。这个系数考虑到非线性位移反应与线性位移反应在控制点上的差异，FEMA 356 根据理论和实验资料，建议 C_1 按下式取值

$$C_1 = \begin{cases} 1 & \text{当 } T_e \geq T_g \\ [1 + (R - 1)T_g/T_e]/R, \text{ 且 } 1 \leq C_1 \leq 1.5 & \\ 1 & \text{当 } T_e < T_g \end{cases} \tag{19-12}$$

式中： T_g ——场地特征周期；

R ——弹性的计算内力与计算的屈服承载力的比值，由下式计算得到：

$$R = \frac{S_a}{V_y/G} \frac{1}{C_0} \tag{19-13}$$

V_y ——用静力非线性分析计算的屈服承载力，荷载-位移曲线（即底部剪力和控制点的位移之间关系曲线）采用双线性曲线；

G ——全部恒载和部分可变荷载组合值。

系数 C_2 为滞回线形状对最大位移反应的影响修正系数。上述 C_1 系数的取值，是基于非弹性的单自由度体系的平均反应，具有双线性滞回模型，如果滞回环存在明显捏拢或刚度退化，则其能量吸收及消耗能力将会减小，并将产生更大的位移，目前只有少量资料能定量估计这种位移增大的影响，仅仅知道对周期短、强度低、捏拢现象很明显的结构，这种影响十分重要，而且非线性程度愈小，捏拢的程度也愈小。

基于以上的认识和判断，FEMA-356 给出了如表 19-5 所示的 C_2 系数，其中考虑了两种因素：一是地震作用的大小（分三个水平，超越概率分别为 50 年 50%，50 年 10% 和 50 年 2%）；另一个是结构或构件的承载力和刚度退化的程度。

C₂ 系数取值表

表 19-5

| 地震作用水平 | $T=0.1$ (s) | | $T \geq T_g$ (s) | |
|--------------|-----------------|----------------|------------------|----------------|
| | 结构和构件承载力和刚度退化类型 | | | |
| | 1 ^① | 2 ^② | 1 ^① | 2 ^② |
| 50 年超越概率 50% | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 50 年超越概率 10% | 1.3 | 1.0 | 1.1 | 1.0 |
| 50 年超越概率 2% | 1.5 | 1.0 | 1.2 | 1.0 |

注：①任一层在设计地震下，30%以上的楼层剪力，由可能产生承载力或刚度退化的抗侧力结构承担的结构，这些结构和构件包括：中心支撑框架、非配筋砌体墙、受剪破坏的墙（或柱），或由以上结构组合的结构类型；

②上述以外的各类框架。

系数 C₃ 为动力 P-Δ 效应放大系数，对屈服后具有正刚度的结构，C₃=1，屈服后具有负刚度的结构，按下式计算：

$$C_3 = 1.0 + \frac{|\alpha| (R-1)^{3/2}}{T_e} \leq 1 + 5(\theta - 0.1)/T \quad (19-14)$$

式中：α——屈服后刚度与有效刚度之比；

T——弹性结构基本周期；

θ——稳定系数。

$$\theta = \frac{\sum G_i \Delta u_i}{V_i h_i} \quad (19-15)$$

式中：ΣG_i——第 i 层以上的重力荷载代表值；

Δu_i——第 i 层楼层质心处的弹性和弹塑性层间位移；

V_i——第 i 层地震剪力设计值；

h_i——第 i 层层间高度。

对于 FEMA 356 中的容许准则，在非线性过程中分为变形控制（Deformed-Controlled Actions）和力控制（Force-Controlled Actions）。变形控制指非线性分析中预期变形能力不能超过最大变形能力；力控制指构件下限强度不少于最大设计内力。确定方法通过 FEMA356 中定义的各种过程，考虑结构中所有共存的力和变形，针对不同结构类型分别确定。

（5）性能点的确定

ATC-40 定义了三种过程确定性能点。最常用的是方法 A，过程如下：

①建立结构 5%阻尼设计反应谱并转换成 ADRS 格式；

②非线性能力曲线转化为能力谱，使用式（19-1）；

③选择一个试验性能点（S_{api}，S_{dpi}），可以用等位移近似如图 19-6 所示或基于工程经验；

④形成能力谱双线表示、能力谱线下面积和双线表示面积相等，在锯齿状能力谱情况下，双线性基于能力谱使得复合能力谱性能点发生；

⑤使用式（19-8）计算谱折减系数，折减需求谱和能力谱画在一起；

⑥如果折减需求谱与能力谱相交于（S_{api}，S_{dpi}）或相交点在 S_{dpi} 的 5% 范围内，相交点表示性能点；

⑦如果交点不在容许范围（5% 的 S_{dpi}），选择另外一点重复步骤（4）～（7），步骤（6）的交点可以作为下一次迭代的起点。

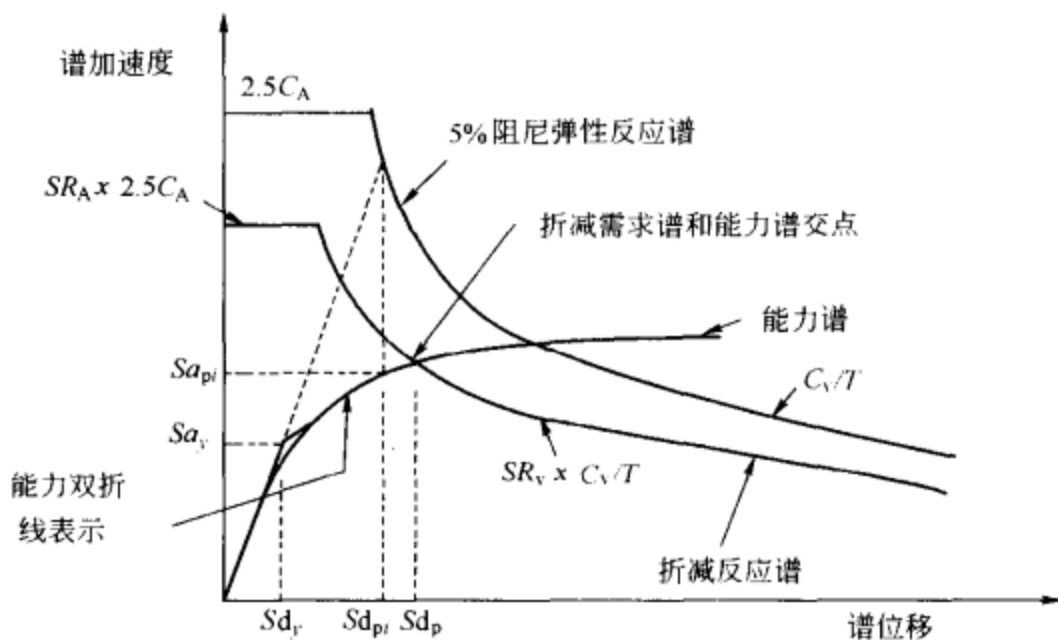


图 19-6 确定性能点

ATC-40 中过程 B 假设屈服点和过屈服斜率是常数的近似迭代方法，过程 C 为图表法，适合于手算。

SAP2000 在进行 Pushover 分析时，采用 ATC-40 中过程 A 和过程 B（不需要近似假设）相结合的精确求解方法自动确定性能点。

19.1.2 UBC 规范反应谱与中国规范反应谱参数转换

与中国反应谱对比见图 19-7，可以得到 C_A 、 C_V 。

$$\eta_2 \alpha_{\max} = 2.5 C_A \quad T_g = T_s = C_V / 2.5 C_A \quad (19-16)$$

例如：场地特征周期为 $T_g = 0.45$ ，8 度多遇地震，阻尼比为 0.05，所以 $\eta_2 \alpha_{\max} = 0.16$ ，可得 $C_A = 0.064$ ， $C_V = 0.072$ 。

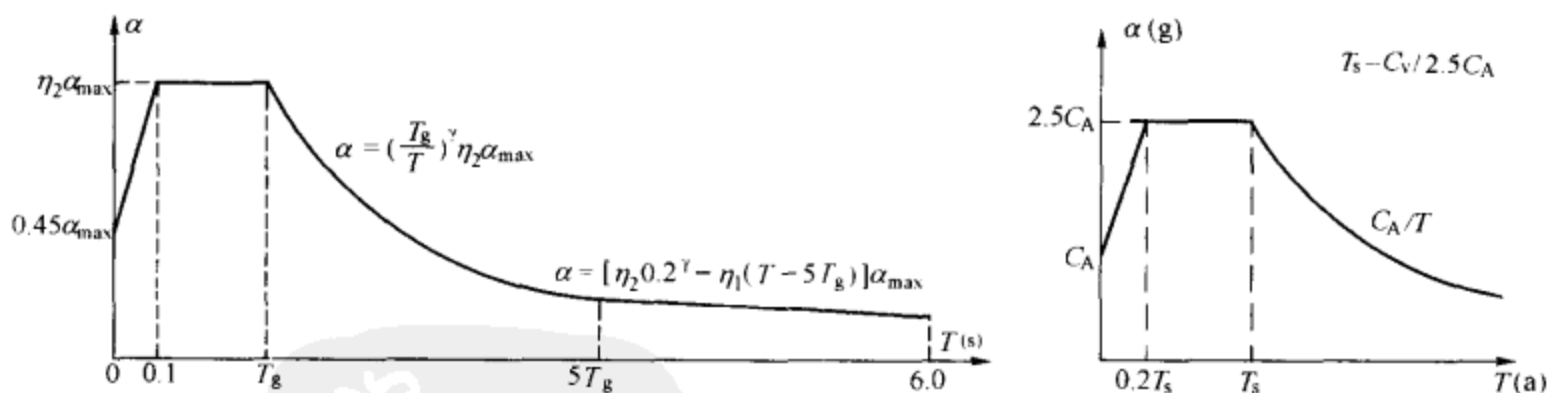


图 19-7 中国规范反应谱和 ATC-40 定义的反应谱

19.1.3 Pushover 分析方法的一般过程

Pushover 分析是基于性能设计的有力工具。基于性能的设计可以使工程师更深入的理解和控制不同荷载水平作用下的结构行为。SAP2000 的非线性版本提供了 Pushover 分析功能。进行 Pushover 分析的一般过程如下：

注意：其中某些步骤是由 SAP2000 自动完成的。

- (1) 建立结构和构件的计算模型;
- (2) 定义框架铰属性并将其指定给框架/索单元;
- (3) 定义钢或混凝土设计可能需要的任意荷载工况和静力与动力分析工况,特别是使用默认铰时;
- (4) 运行设计需要的分析;
- (5) 当混凝土铰属性是基于程序计算的默认值时,必须进行混凝土设计,以确定配筋;
- (6) 当钢铰是基于程序对自动选择框架界面计算的默认值时,必须进行钢设计且接受程序选择的截面;
- (7) 定义 Pushover 分析所需的荷载工况,包括:
 - ①重力荷载和其他可能在施加横向地震荷载前作用在结构的荷载。可能在前面对于设计已经定义了这些荷载工况。
 - ②用来推导结构的横向荷载。若准备使用加速度荷载或模态荷载,不需要任何新的荷载工况,虽然模态荷载需要定义一个模态分析工况。
- (8) 定义 Pushover 分析使用的非线性静力分析工况,包括:
 - ①一系列的一个或多个使用荷载控制的从零开始施加重力和其他固定荷载的工况,这些工况包括阶段施工和几何非线性。
 - ②从此系列开始并施加横向 Pushover 荷载的一个或多个 Pushover 工况,这些荷载应使用位移控制,被监测的位移通常位于结构的顶部,用来绘制 Pushover 曲线。
- (9) 运行 Pushover 分析工况;
- (10) 审阅 Pushover 结果:绘制 Pushover 曲线、显示铰状态的变形形状、力和弯矩图形,且打印或显示需要的结果;
- (11) 按需要修改模型并重复。

应考虑用几种不同的横向 Pushover 工况来代表可能在动力加载时发生的不同顺序的响应,这是很重要的。特别地,应在 X 和 Y 两个方向作用结构,且可能在两者间有角度。对于非对称结构,在正和负方向作用结构可能产生不同的结果。当在一给定的方向作用结构时,可考虑水平荷载在竖向的不同分布,如在此方向的第一和第二模态。

19.1.4 框架非线性铰的定义

屈服和屈服后性能可用离散的自定义的铰来模拟。对桁架一般是定义轴力铰;对梁一般是定义主方向的弯矩铰和剪力铰;对柱一般是定义 PMM 相关铰;节点区一般定义剪力屈服铰;填充板一般是定义剪力破坏铰;剪力墙一般是定义 PM 及剪力相关铰。目前铰只可在框架单元中引进,它们可被指定到一框架单元的任意位置:①作为沿框架(梁、柱、支撑)长度的离散铰;②作为沿单元截面的离散纤维铰;③作为单元内的一系列材料点。材料点或纤维允许更简单的输入,只需要少量的材料参数。然而,离散铰在计算时更快且和 Pushover 技术更兼容。在 SAP2000 中通过离散铰来考虑结构的非线性行为,允许使用非耦合弯矩、扭矩、轴力和剪力的离散铰,还有基于在铰位置轴力和弯矩相互作用的 P-M2-M3 耦合铰。在同一位置可以有不只一种类型的铰,例如,可指定一个 M3(弯矩)和一个 V2(剪力)铰给一框架单元的同一段。默认铰属性基于 FEMA 356。铰只影响在非线性静力和非线性直接积分时程分析中的结

构性能。铰的作用同样适用于索和钢束，虽然这些对象只适用于轴力铰。

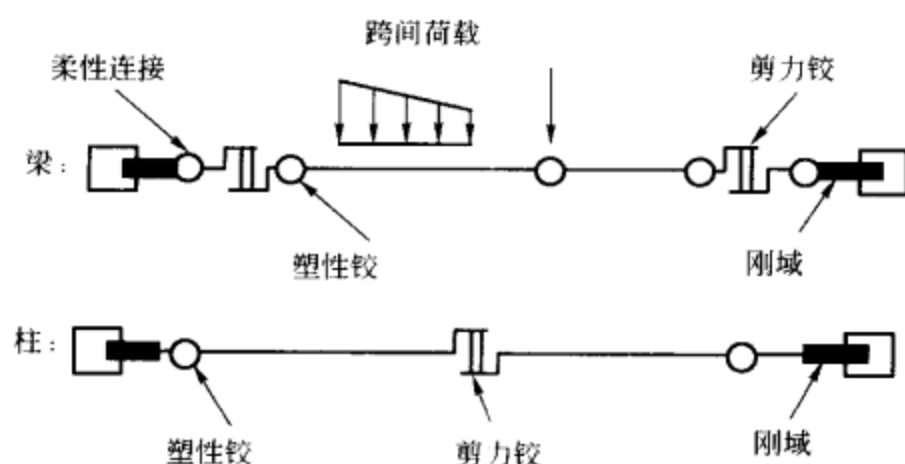


图 19-8 带塑性铰的框架柱和框架梁单元简化模型

(1) 塑性铰属性和长度

一个铰属性是一组命名的刚性-塑性属性，可被指定给一个或多个框架单元。可指定所需的铰的属性。对每一个自由度（轴向和剪切），可指定塑性的力-位移性能；对每个弯矩自由度（弯曲和扭转），可指定塑性弯矩-转动性能。每个铰属性可以具有对六个自由度中任意数目指定的塑性属性。轴力和两个弯矩可通过一个相关作用面来耦合。未进行指定的自由度保持弹性。

每个塑性铰用一个离散点铰来模拟。所有塑性变形，无论是位移还是转动，都发生在点铰内，这意味着需为铰假定一长度，在此长度上对塑性应变或塑性曲率积分。

虽然在 FEMA-356 中给出了指导，但没有简单方法来选择此长度。一般地，它是单元长度的一个分数，且经常与截面高度具有同一数量级，特别对弯曲-转动铰。

可通过插入许多铰来近似模拟沿单元长度分布的塑性。例如，在单元内的相对位置插入 10 个铰，0.05, 0.15, 0.25, ..., 0.95，每个铰具有基于假定 1/10 单元长度的铰长度的变形属性。显然，添加更多的铰会增加计算量，而且如果它们实际上没有屈服，这样做的效果将不显著。

(2) 塑性铰的力-位移曲线

对每一自由度，要定义一个用来给出屈服值和屈服后塑性变形的力-位移（弯矩-转动）曲线。这通过一个有五个控制点 A-B-C-D-E 的曲线来实现，如图 19-9 所示。可指定一个对称曲线，或在正和负方向不同的曲线。点 B 代表铰的屈服。注意在点 A 和 B 间铰内没有变形发生，即铰屈服前被假定为刚性的。所有弹性变形在框架单元内发生。当铰到达点 C 指示的点时，开始失去承载力。点 IO、LS 和 CP 代表铰的能力水平，它们分别对应于直接使用、生命安全和防止倒塌。在任何 Pushover 分析后，应查看当结构位移达到其性能点时，各铰的变形量，来判定结构是否满足指定地震荷载下的结构期望的能力目标。

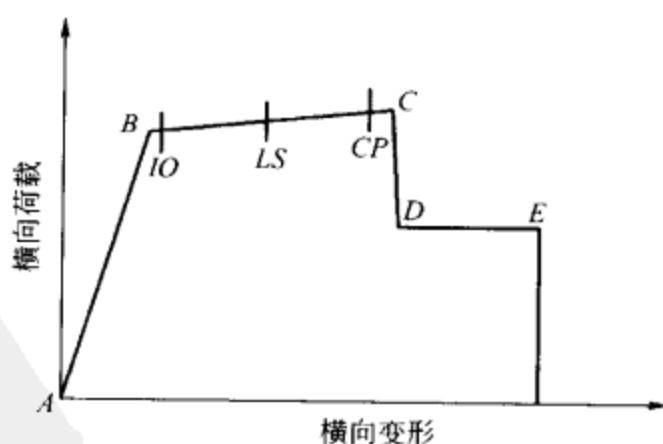


图 19-9 力-位移曲线（弯矩-转角曲线）

此曲线的形状是用于 Pushover 分析的，可使用自定义形状。需要注意以下要点：①点 A 总是原点；②点 B 代表屈服。在上升到点 B，铰内没有变形，无论对点 B 指定何种变形值。在点 B 的位移（转动）将从点 C、D 和 E 的变形中减去。只有超过点 B 的塑性变形将被铰显现；③点 C 代表 Pushover 分析的极限承载力。然而，为其他目的可指定从 C 到 D 的正斜率；④点 D 代表 Pushover 分析的残余强度。但是，为其他目的可指定从 C 到 D 或从 D 到 E 的正斜率；⑤点 E 代表完全失效。超过点 E，铰将荷载降至在 E 点以下水平轴上的点 F（未显示）。若不想铰这样失效，要确认对在点 E 的变形指定一个大值。

可在点 IO（立即使用）、LS（生命安全），和 CP（防止倒塌）指定附加的变形量，将在分析结果中报告这些信息并用于基于性能的设计。它们对结构的性能没有任何影响。在到达点 B 前，所有变形都是线性的并在框架单元自身内发生，而在铰内。超过点 B 的塑性变形发生在铰内，而且在单元内可能产生任意的弹性变形。当铰弹性卸载时，没有任何塑性变形，即平行于斜率 A-B。

当定义铰的力-变形（或弯矩-转动）曲线时，可直接输入力和变形值，或输入归一化值并指定归一化曲线所使用的比例系数。大多数情况下，曲线可用屈服力（弯矩）和屈服位移（转动）来归一化，这样对点 B 的归一化值为（1，1）。然而，可使用任意的比例系数，它们不必是屈服值。当使用默认的铰属性时，程序自动使用屈服值进行比例调整。这些值从框架截面属性计算而得。

注意：没有使用任何从 A 到 B 的变形。这意味着变形的比例系数实际上是用来按比例调整从 B 到 C、C 到 D、和 D 到 E 的塑性变形。

(3) 塑性铰的耦合作用

一般地，铰属性对 6 个自由度的每一个都是不耦合的。但是，可选择指定耦合的轴力/双轴弯矩行为，这被称作 P-M2-M3 或 PMM 铰。在 SAP2000 中不管使用何种材料，拉力总是为正，压力为负，这意味着对于某些材料（如混凝土），相关面看起来将是反的。

对于 PMM 铰，在三维 P-M2-M3 空间指定一个相关（屈服）面，来代表对轴力 P 、次弯矩 M_2 和主弯矩 M_3 的不同组合最先发生屈服的位置。

此表面被指定为一组 P-M2-M3 曲线， P 是轴力（拉为正）， M_2 和 M_3 是弯矩。对于一个给定的曲线，弯矩可以具有固定系数，但这不是必需的。应用下列规则：

- ①所有曲线具有相同数量的点。
- ②对于每条曲线，点按照从最大负值（压）到最大正值（拉）的顺序排列。
- ③所有曲线第一个点的 P 、 M_2 和 M_3 值必须相同，对于最后一个点也是一样的。
- ④当从上面俯视 M2-M3 平面（向受压方向看），曲线应该以逆时针方向来定义。
- ⑤此面必须为凸面。这意味着在任意点相切于此面的平面必须完全在此面外。若定义一个非凸面的表面，则程序将自动增加所有“凹陷”点的半径，直至它们的切面在此面外。在分析时会有一警告信息。
- ⑥可直接定义相互作用面，或让程序使用下列公式之一计算：
 - 钢，AISC-LRFD 公式 H1-1a 和 H1-1b， $\phi=1$

- 钢, FEMA356 公式 5-4
- 混凝土, ACI318-02, $\phi=1$

对于 PMM 铰, 对应于不同的轴力 P 和弯曲角 θ 值, 可指定一条或多条弯矩/塑性-转角曲线。弯曲角在 $M2$ - $M3$ 平面内量测, 0° 是正 $M2$ 轴, 90° 为正 $M3$ 轴。可以指定一个或多个荷载 P 和一个或多个弯曲角 θ 。对于每对 (P, θ) , 弯矩-转动曲线应代表以下试验结果:

- ①施加固定轴力荷载 P ;
- ②对应弯曲角 θ 以固定系数 $(\sin\theta, \cos\theta)$ 增加弯矩 $M2$ 和 $M3$;
- ③测量屈服后产生的塑性转动 R_{p2} 和 R_{p3} ;
- ④在每个测量增量, 计算合成弯矩 $M=M_2 \cdot \sin\theta+M_3 \cdot \cos\theta$ 和投影塑性转动;

$$R_p=R_{p2} \cdot \sin\theta+R_{p3} \cdot \cos\theta$$

- ⑤绘制 $M-R_p$ 关系, 提供这些数据给 SAP2000。

注意: 量测的塑性应变方向可能与弯曲方向不相同, 但投影值是沿着弯矩方向的。而且, 可能测量到不是投影的一部分的轴向塑性变形。然而, 在分析过程中, 程序会基于相互作用 (屈服) 面的法向来重新计算总塑性应变。

在分析过程中, 一旦铰首次达到屈服, 即一旦 P 、 $M2$ 、 $M3$ 的值首次达到相关作用面, 一个净弯矩-转动曲线就会从给定曲线插值到屈服点。这个曲线用来进行铰的余下分析。

如果 P 、 $M2$ 和 $M3$ 值从插值曲线值进行了改变, 曲线就会调整以提供一个能量相等的弯矩-转动曲线。这意味着弯矩-转角曲线之下的面积会保持固定, 因此如果合成弯矩越小, 延性就会越大, 这与截面轴向“纤维”的基本应力应变曲线一致。

当产生塑性变形时, 屈服面按照 $M-R_p$ 曲线的形状改变尺寸, 依赖于所完成的塑性功的大小。可以选择指定此表面是否按在 P 、 $M2$ 和 $M3$ 方向上相等地改变尺寸, 或只在 $M2$ 和 $M3$ 方向上改变尺寸。后者中的轴向变形性能类似完全塑性, 没有硬化或坍塌。轴向坍塌可能在某些铰内更符合实际情况, 但很难计算, 而且如果结构不是足够稳定, 重力荷载将重新分布, 需要进行非线性直接积分。

(4) 纤维 PMM 铰

纤维 P - $M2$ - $M3$ (纤维 PMM) 铰模拟分布贯穿框架单元截面一定数量的代表性轴向“纤维”的轴向性能。每个纤维具有一个位置、附属面积和应力应变曲线。轴向应力在整个截面积分, 计算出 P 、 $M2$ 和 $M3$ 的值, 同样, 可用轴向变形 $U1$ 和转动 $R2$ 和 $R3$ 来计算纤维的轴向应力。

可以定义自己的纤维铰, 显式地指定每个纤维的位置、面积、材料和应力-应变曲线, 或者可以让程序自动生成圆形、矩形和截面设计器框架截面的纤维铰, 见图 19-10。

纤维 PMM 铰比上面描述的耦合 PMM 铰更“符合实际情况”一些, 它自动考虑相互作用, 改变弯矩-转角曲线和塑性轴向应变。然而, 它也需要更多的计算机存储和运行时间。应通过数值试验来确定纤维的数量, 以在精确度和计算效率之间得到最佳平衡。

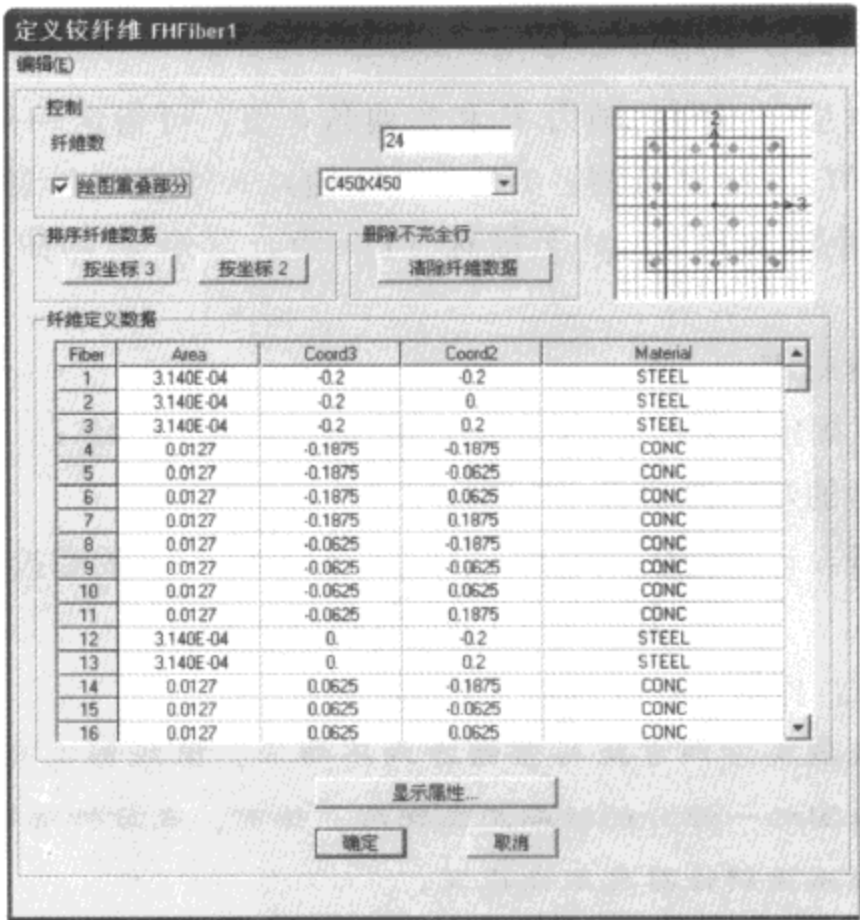


图 19-10 纤维铰定义

19.1.5 默认的、自定义和生成的铰

在 SAP2000 中有 3 种类型的铰属性：默认的铰属性；用户指定的铰属性；生成的铰属性。

只有默认的铰属性和用户指定的铰属性可被指定给框架单元。当这些铰属性（默认的和自定义的）被指定给一框架单元时，程序自动对每一个铰创建一个生成的铰属性。内建默认的钢构件铰属性一般基于 FEMA 356 的表 5.6 和 5.7；内建默认的混凝土构件铰属性一般基于 FEMA-356 的表 9.6、9.7 和 9.12。可查看任意产生的铰属性。

默认的铰属性不能被修改，它们也不能被查看，因为默认铰属性是依赖于截面的。程序不能完全定义默认铰属性，直至它们所应用的截面被确定为止。这样，要查看默认的铰属性的效果，默认属性应先被指定给一个框架单元，然后才可以查看所产生的铰属性。

所产生的铰属性用于进行分析，它们可被查看，但它们不能被修改。产生的铰属性有一个使用“LabelH#”的自动命名规则，Label 是框架单元标签，H 代表铰，# 代表铰号码，程序从铰号码 1 开始，并对每一个施加于框架单元的铰号码连续增加 1。例如，若一个框架单元标签为 F23，施加于框架单元的第二个铰号码为 F23H2。

区分定义的^①和生成的属性的主要原因是因为一般的铰属性依赖于截面。这样必须对模型中不同的框架截面类型定义一组不同的铰属性，这可能意味着要定义很多的铰属性，为了简化此过程，SAP2000 使用默认的铰属性概念。当使用默认的铰属性时，程序将其内建默

① 本文中，“定义的”意味着默认的和自定义的。

认的属性准则与针对每个单元定义的截面属性相结合，产生最终的铰属性。这样不必定义每一个铰，从而大大减少了定义铰属性的工作量。

SAP2000 提供符合 FEMA 356 规范的默认铰属性，分为脆性铰和延性铰，共有六类默认铰属性，即轴力铰、剪力铰、弯矩铰、扭矩铰、轴力弯矩（平面 PM 和空间 P-M-M）铰、纤维铰。纤维铰只适用于延性铰。对于混凝土材料和钢材，塑性铰的力和变形的曲线有所不同。

(1) 默认铰属性

一个铰属性可使用所有的默认铰属性，或者可由指定其一部分属性，其他部分采用默认属性。默认铰属性基于一组简化的假定，可能不适用于所有的结构。开始可使用默认铰属性，并在建模中按需要覆盖其属性。默认铰属性只适用于一些框架截面，包括：①材料必须有一个设计类型，混凝土或钢；②对于混凝土截面：形状必须是长方形或圆形；钢筋必须被定义，或在非线性分析前已经由程序进行了设计；③对于钢截面，形状必须被充分定义：不能使用一般截面和变截面；对于自动选择截面，只有在非线性分析前已经进行设计并已选择了一个特定的截面时才能使用。

对于需要设计的情况，仍然可以给框架单元定义并指定铰，但在运行设计前不应运行任何非线性分析。可对下列自由度使用默认铰属性：轴力（P）；主剪力（V2）；主弯矩（M3）；耦合的 P-M2-M3（PMM）。（图 19-11）

(2) 默认混凝土铰属性

轴力铰： $P_y = A_s f_y$ $P_c = 0.85 A_c f'_c$ ；钢筋在点 B 和 C 之间的斜率取总应变硬化的 10%；对铰长度 Δ_y 的假定基于全长；拉伸点 B、C、D、E 基于 FEMA356 表 6-8，支撑受拉；受压点 B' = P_c，受压点 E' 为 $9\Delta_y$ 。

弯矩铰和 PMM 耦合铰：在点 B 和点 C 间的斜率使用钢总应变强化的 10%； $\theta_y = 0$ ，因为不需要；点 C、D、E 基于 FEMA-356 表 6-7，四排均匀钢筋被平均； M_y 是基于实配的钢筋（如果有的话，否则基于最小配筋率）；除了总是关于原点对称以外，PMM 曲线和单轴 M3 曲线相同；P-M-M 相互作用面由 ACI318-02 和 $\phi = 1$ 计算得到。

剪力铰：曲线关于原点对称；在点 B 和点 C 间的斜率使用钢总应变强化的 10%；

$V_y = 2A_s \sqrt{f'_c} + f_y A_{sv} d$ ；点 C、D、E 基于 FEMA-356 表 6-18 第 iii 条，通过平均两排标记为“常规纵向钢筋”和“均匀横向钢筋”而得。

(3) 默认的钢铰属性

轴力铰：在点 B 和点 C 间的斜率取钢总应变强化的 3%；铰长度假定 Δ_y 为构件长度；初始受压斜率取为与初始拉伸斜率相同；受拉点 C、D、E 基于 FEMA356 表 5-7，支撑受拉；受压点 C'、D'、E' 基于 FEMA356 表 5-7，支撑受压，c 条。

弯矩铰和 PMM 耦合铰：在点 B 和点 C 间的斜率取钢总应变强化的 3%； θ_y 是基于

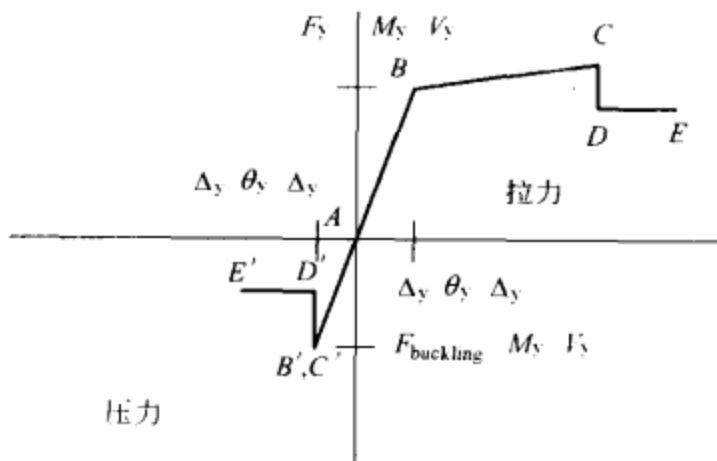


图 19-11 轴向铰、剪力铰、弯矩和 PMM 耦合铰默认属性

FEMA356,公式 5-1 和 5-2, 即对于梁, $\theta_y = \frac{ZF_{ye}l_b}{6EI_b}$, 对于柱, $\theta_y = \frac{ZF_{ye}l_c}{6EI_c} \left(1 - \frac{P}{P_{ye}}\right)$; 点 C, D 和 E 基于 FEMA 356 表 5-6, 对于 $b/2tf < 52/\sqrt{F_{yc}}$ 的情况; PMM 曲线和单轴 M3 曲线相同, 除了其总是关于原点对称外; PMM 相互作用面是从 FEMA 356 公式 5-4 计算而得,

$$Q_{CE} = M_{CE} = 1.18ZF_{ye} \left(1 - P/P_{ye}\right) \leq ZF_{ye}$$

以上各式中: F_{ye} ——预期材料屈服强度;

I ——惯性矩;

l_b ——梁长度;

l_c ——柱长度;

P ——构件轴力;

$P_{ye} = A_g F_{ye}$ ——预期轴向屈服力;

Z ——塑性截面模量;

Q_{CE} ——广义构成预期长度;

M_{CE} ——广义弯矩长度。

剪力铰: 曲线关于原点对称; 在点 B 和点 C 间的斜率取应变强化的 3%; 点 C、D、E 基于 FEMA365 表 5-6, 连梁, a 条。

(4) 框架铰属性数据定义

可以不使用默认的铰属性, 或者基于默认的铰属性自行定义铰属性。执行【定义】>【铰属性】命令, SAP2000 弹出定义框架铰属性对话框, 见图 19-12。

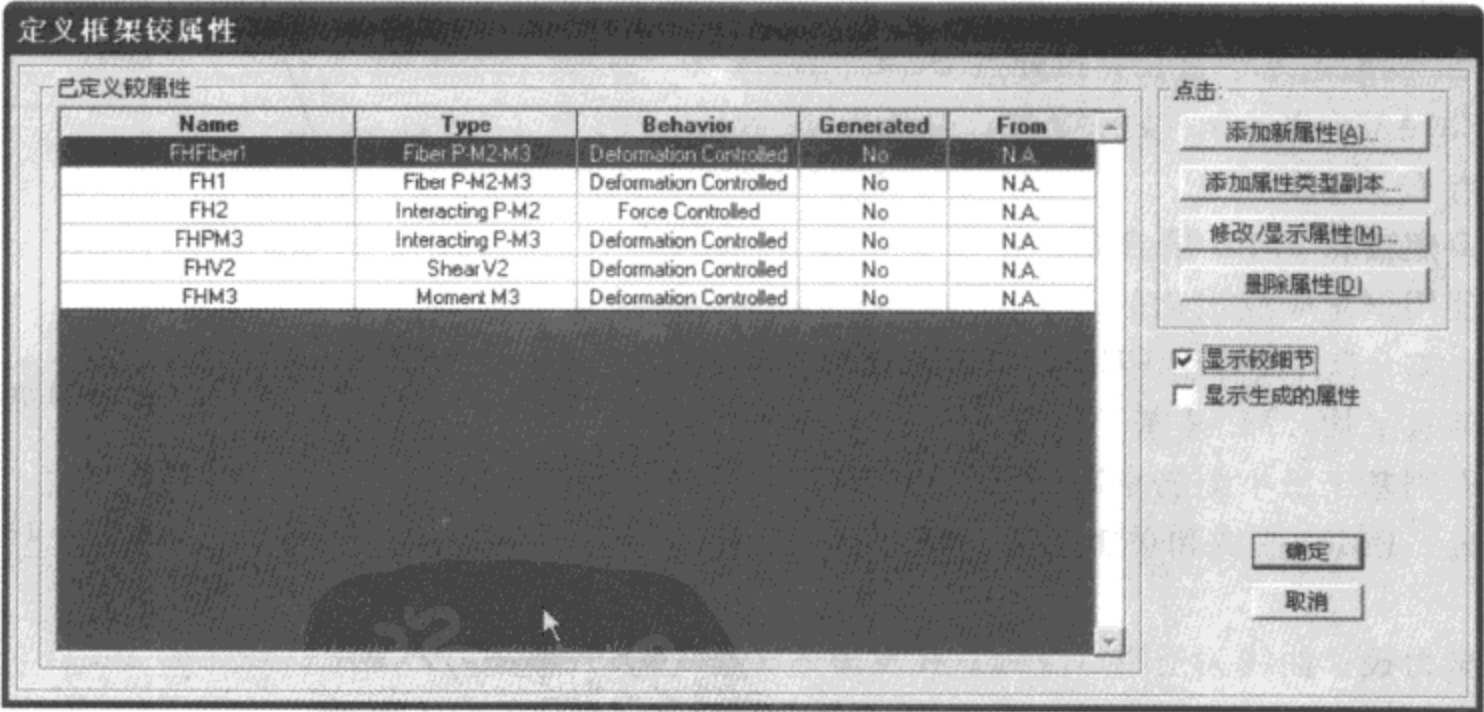


图 19-12 定义框架铰属性

对话框中左侧为定义铰属性区域, 列出了铰属性的一个列表。点击【显示铰细节】可以显示铰类型、行为 (力或变形控制)、是否为程序生成、是否用户自定义铰。点击【显示生成的属性】切换是否显示所有生成的铰。点击【添加新属性】弹出定义铰属性对话框。

点击【修改/显示铰属性】打开相应的铰属性数据对话框，根据需要可进行修改，见图 19-13~图 19-15。

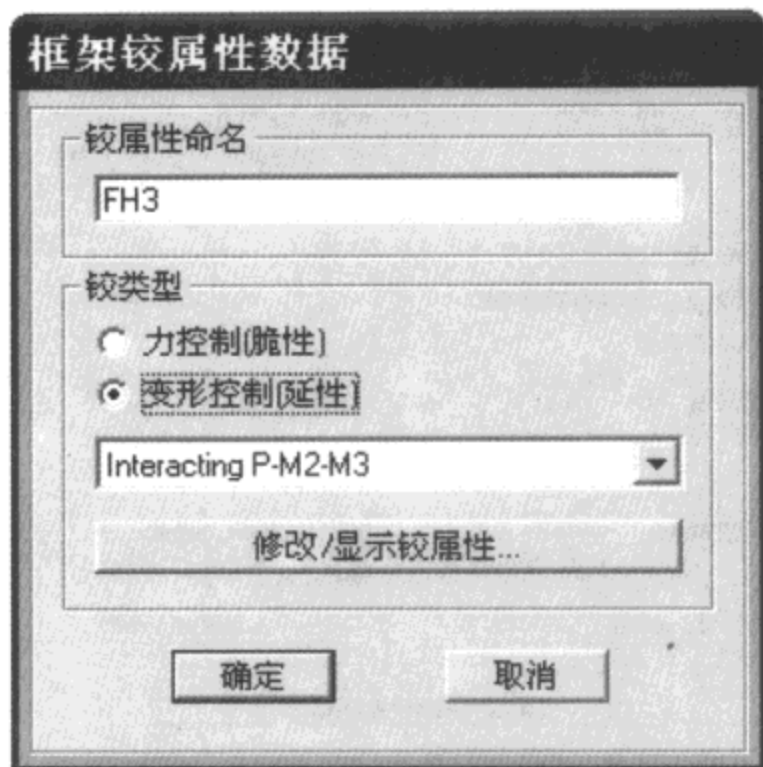


图 19-13 框架铰属性

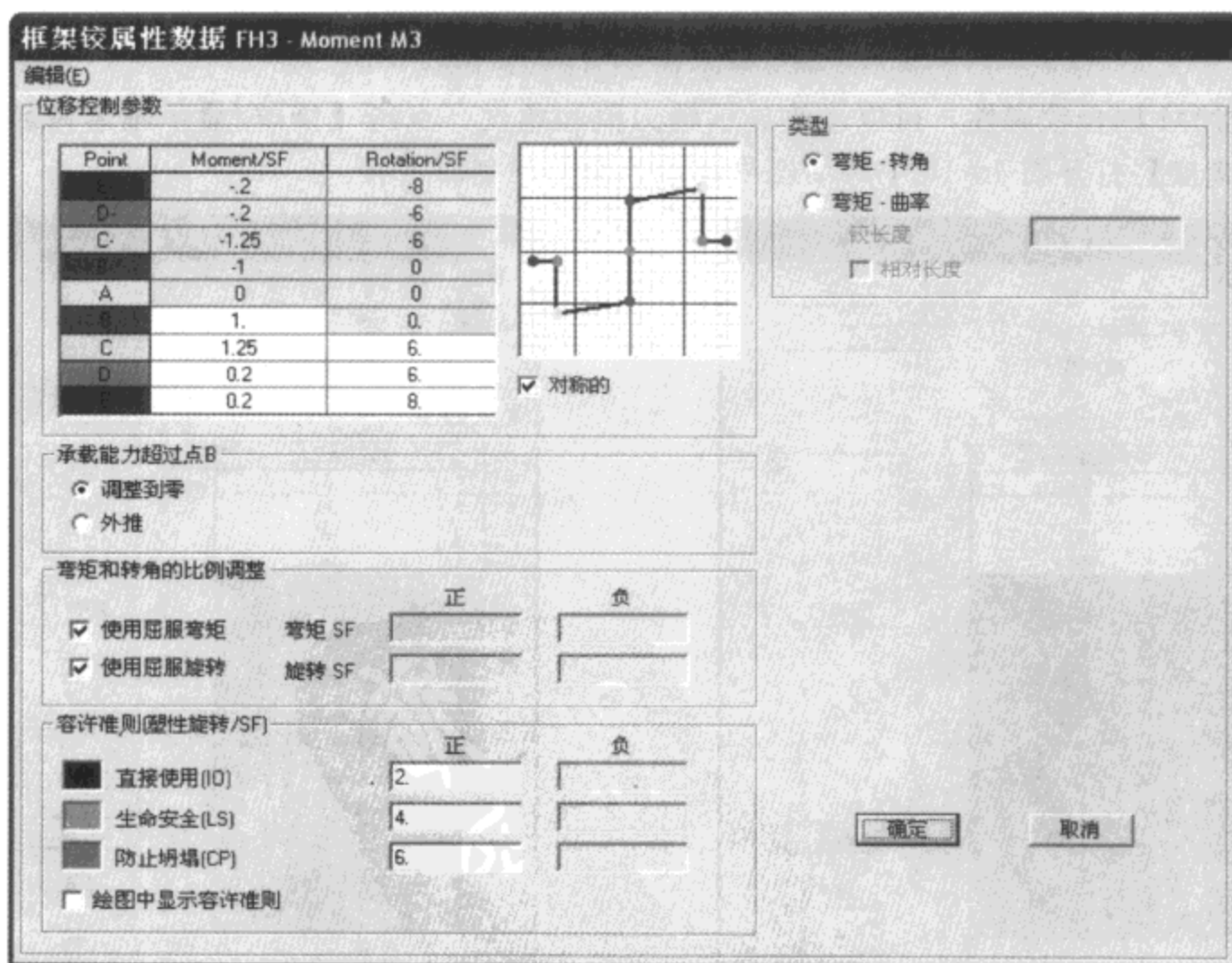


图 19-14 M3 弯矩铰属性

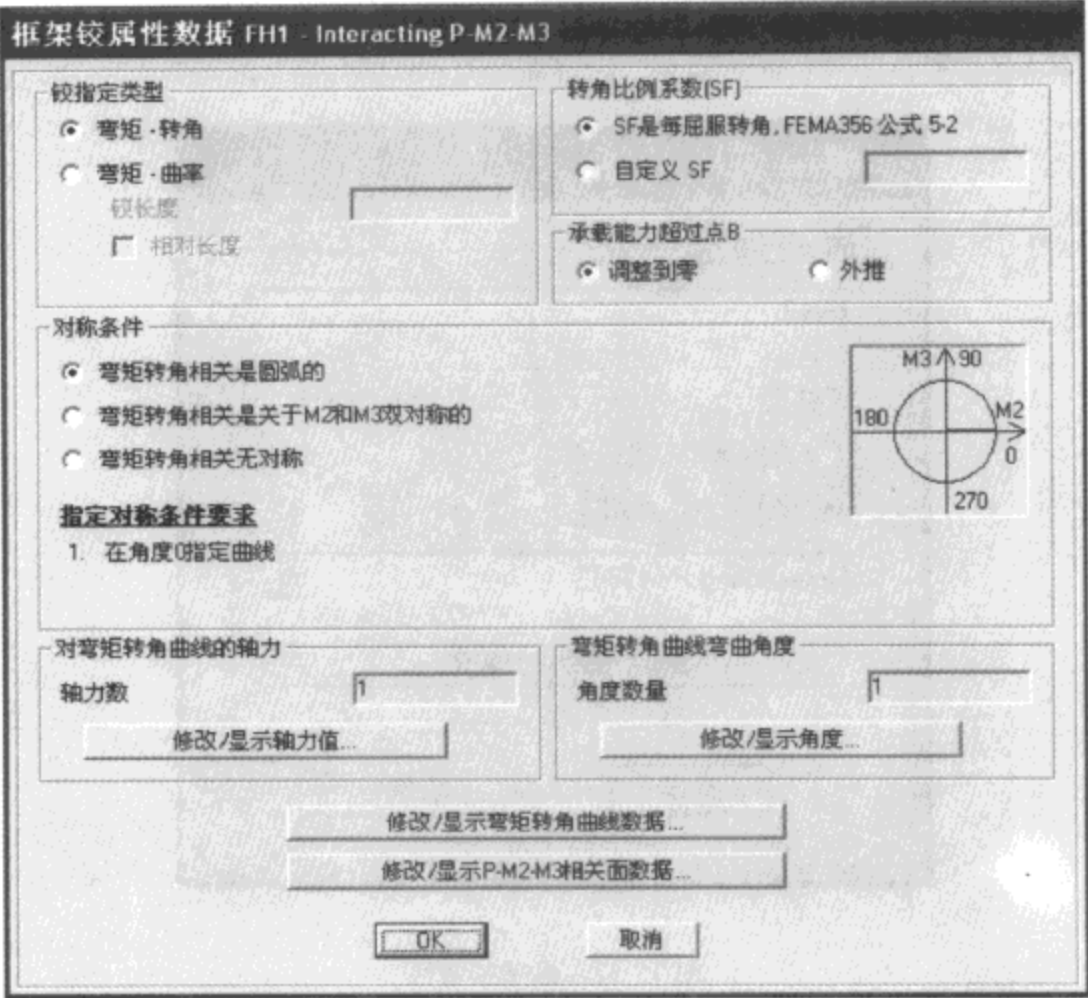


图 19-15 PMM 耦合铰属性

对 PMM 耦合铰属性，可以修改显示轴力值和角度。点击【修改/显示轴力值】或【修改/显示角度】打开图 19-16 中对话框修改相关面的控制面定义。

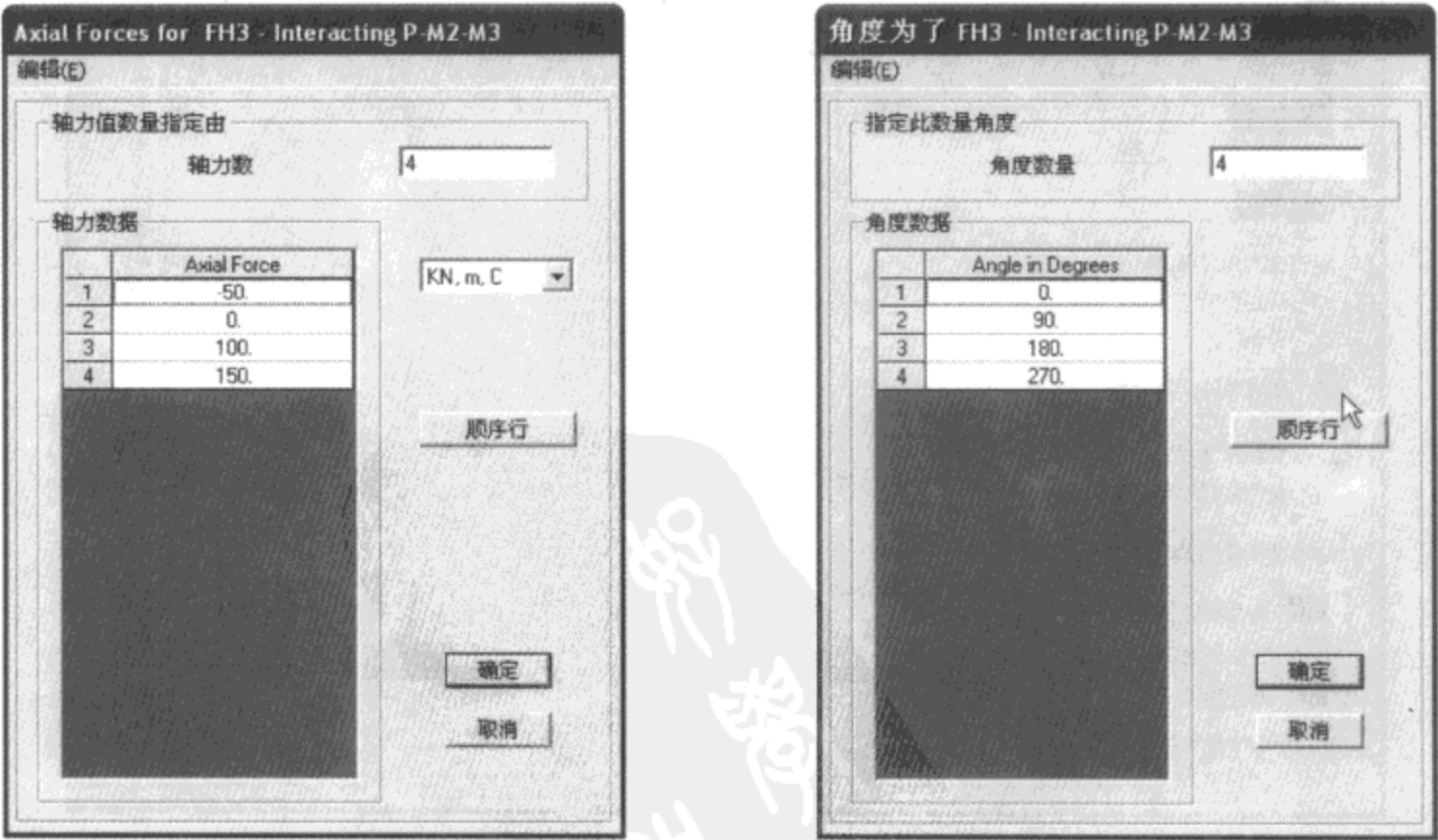


图 19-16 确定相关面轴力和角度属性

对 PMM 耦合铰属性, 点击【修改/显示弯矩转角曲线数据】打开弯矩转角数据对话框。使用选择曲线下拉列表改变控制面并对相应曲线进行修改, 如图 19-17 所示。

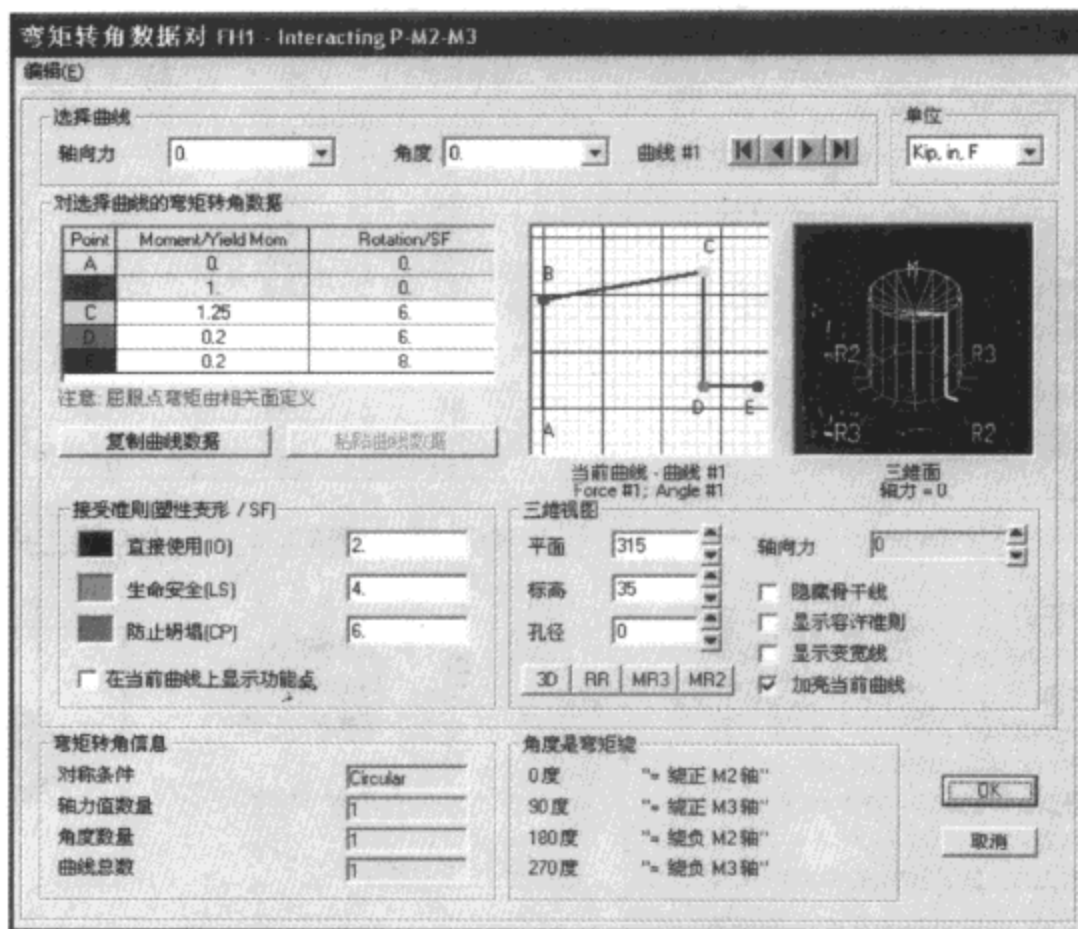


图 19-17 相关面弯矩转角数据

同样的对 PMM 耦合铰属性, 点击【修改/显示 P-M2-M3 相关面】进行默认的设置方式或自定义设置, 见图 19-18。

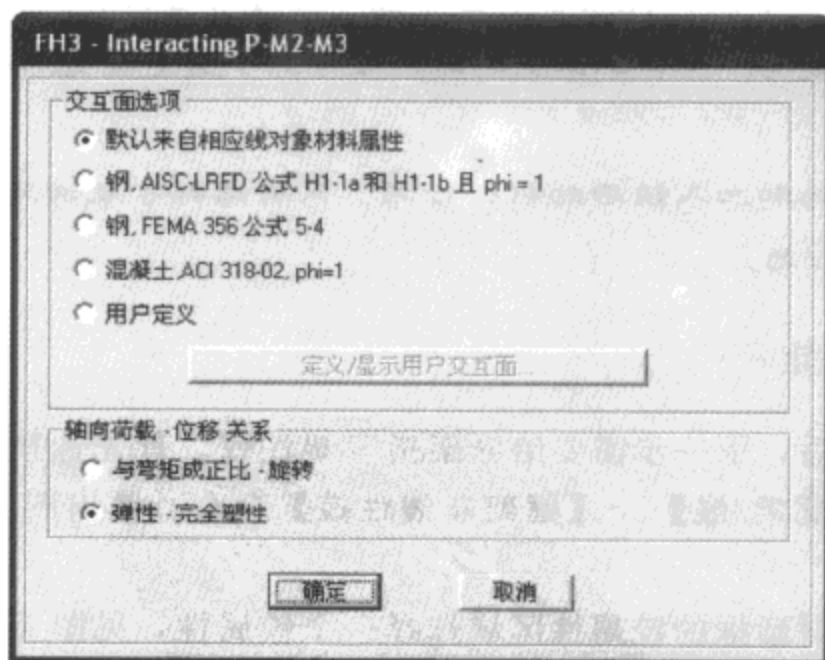


图 19-18 默认铰相关面定义

图 19-19 显示了采用自定义相关面的修改。可以通过修改相关曲线数据, 并用各个控制面的曲线数据形成整个 PMM 屈服面。

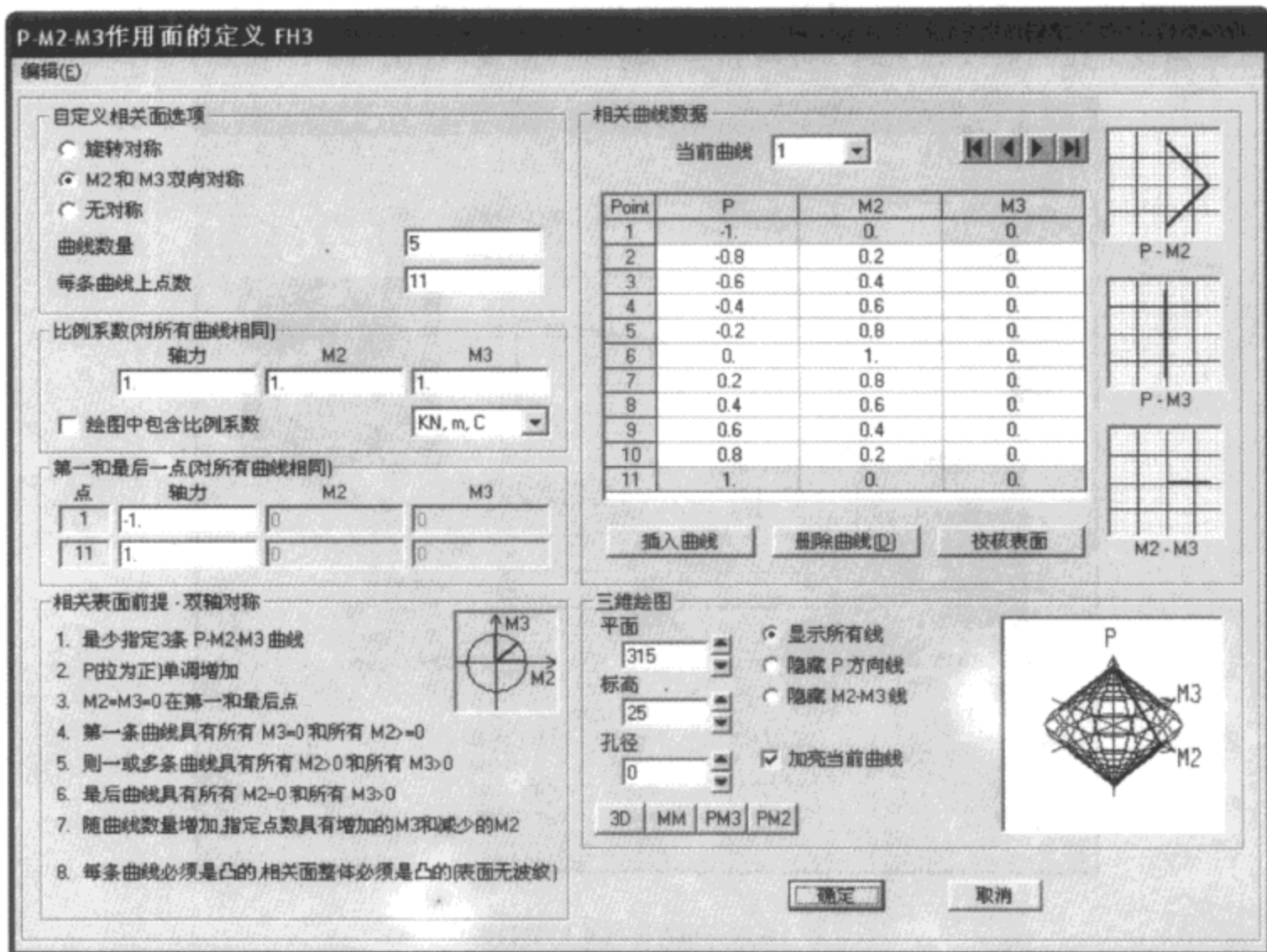


图 19-19 自定义铰相关面定义

注意: 在 SAP2000 中定义的铰行为是刚塑性的, 铰没有弹性行为。即如果在屈服前加载或卸载, 铰内没有任何变形。当框架单元出现塑性行为, 则塑性变形全部在铰内发生, 而框架只发生弹性变形。

工程师要区分铰行为和加入铰后的框架行为, 只有这样才能清楚的了解 SAP2000 产生的形如图 19-9 所示的曲线行为。

19.1.6 非线性铰的指定

塑性铰定义完成之后, 下一步需要给框架指定塑性铰。首先选择要指定铰的框架单元, 然后点击【指定】>【框架/线】>【框架非线性铰】命令, 弹出图 19-20 所示指定框架铰对话框。

进行操作时, 从该对话框的铰属性区域选择一个铰属性, 见图 19-21, 在相对距离栏中输入该铰距框架起始点的关于框架长度的相对距离。再点击【添加】按钮完成一个位置的铰的定义。如要在框架两端都定义铰, 则可重复此操作。如果需要修改某个铰的数据, 先高亮显示这行数据, 则这行数据将自动显示在编辑栏中, 修改数据后, 点击【修改】按钮即可完成数据的修改。对话框下部显示出所指定铰的属性和定义, 并可修改显示指定的自动铰数据。

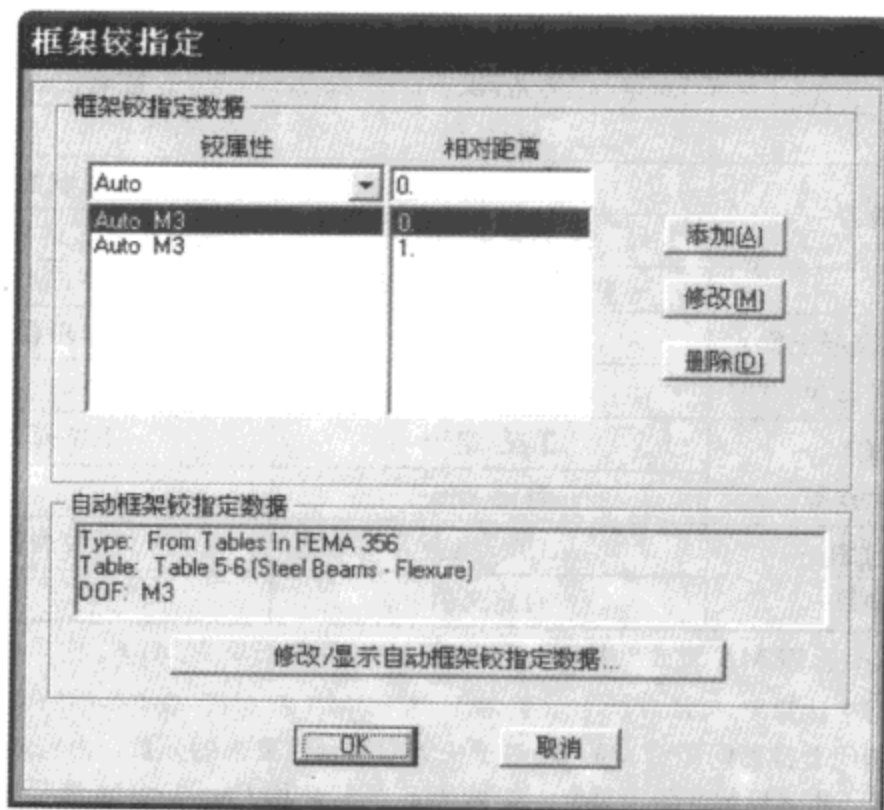


图 19-20 框架铰指定

铰赋值包括铰的属性和该铰沿框架单元的位置。该位置是由沿着单元的全长，从“i”端开始的相对距离来确定，相对距离等于从单元“i”端到铰的距离除以框架单元长。铰可能不在端部偏移内，如果把铰放置在框架单元端部偏移范围内，则铰会自动移到偏移端部。

对话框中相应含义如表 19-6 所示。

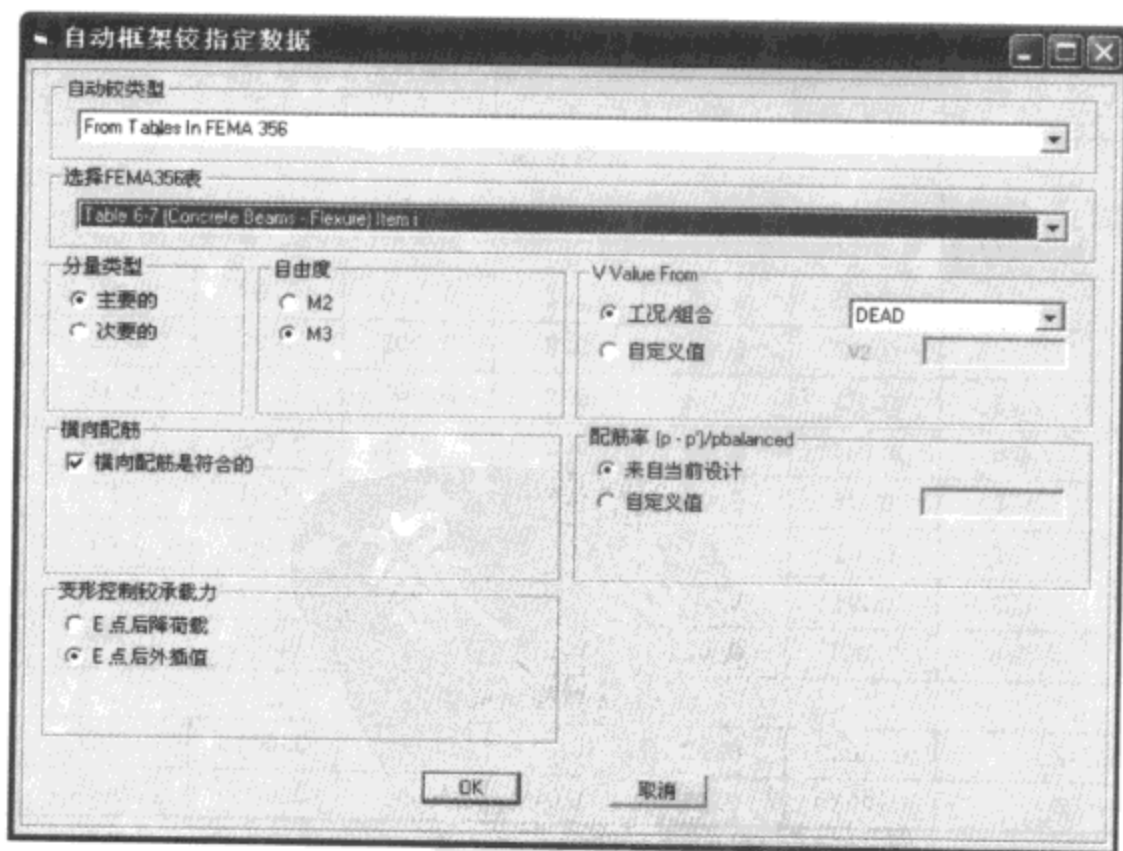


图 19-21 指定框架铰 (Pushover) 对话框

表 19-6

| 分量类型 | 主/次 | 影响铰的 LS 和 CP 容许准则 |
|--|----------|----------------------------|
| 自由度 | M2/M3 | 确定自由度 |
| 变形控制位移角承载力 | E 点后卸载 | 承载力在点 E 降为 0 |
| | E 点后外插值 | 承载力在点 E 外插 (典型的, 平行于线 D-E) |
| 横向配筋 | 横向配筋是符合的 | FEMA 表 6-7 中说明 |
| 配筋率 ($\rho-\rho'/\rho_{balanced}$) (混凝土梁) FEMA 表 6-7 中的一个选项 | 来自当前设计 | 可以用程序上一次设计确定 |
| | 自定义值 | 用户指定 |
| V 值来自 (混凝土梁) FEMA 表 6-7 中的一个参数 | 工况/组合 | 下拉列表中选择分析工况 |
| | 自定义值 | 用户指定 |
| P 和 V 值来自 (混凝土柱) FEMA 表 6-8 中的参数 | 工况/组合 | 下拉列表中选择分析工况 |
| | 自定义值 | 用户指定 |

注：配筋率 $\rho-\rho'/\rho_{balanced}$ 是 FEMA 表 6-7 中的一个选项。P 值用于计算 $P/A_g f'_c$ 比，也是 M2、M3 和 M2-M3 屈服点的轴力值。V 值用于计算 $V/b_w d \sqrt{f'_c}$ 比，P 和 V 是 FEMA 表 6-7、表 6-8 中的参数。横向钢筋是符合的：一个分量是符合的，若闭合箍筋间距 $\leq d/3$ ，且对于中等和高延性要求的分量，由箍筋提供的强度 (V_s) 至少为设计剪力的 3/4，否则，此分量被认为不符合。如果对 P 或 V 使用 Case/Combo 选项，对 $\rho-\rho'/\rho_{balanced}$ ratio 使用来自设计选项，当设计或分析结果改变时铰属性可能变化。因此需要反复进行分析和设计过程直到每次运行结果之间铰属性保持不变。Caltrans Flexural Hinge 选项是美国加州交通署的铰属性定义，可以参考相应的规范。

下面表 19-7~表 19-9 分别给出了 SAP2000 中定义塑性铰使用的 FEMA356 相关表格。

FEMA 356 表 6-7、表 6-8 非线性分析模型参数和容许准则——钢筋混凝土梁、柱 表 19-7

| 条 件 | | | 建模参数 | | 容 许 准 则 | | | | | |
|---------------------------------|----------|-------------------------------|------------|-------|-----------|-----------|--------|--------|--------|-------|
| | | | 塑性转角 弧度 | | 残余 强度比 | 塑性转角 (弧度) | | | | |
| | | | | | | 功能等级 | | | | |
| | | | | | | IO | 分量类型 | | | |
| | | | | | | | 主 | | 次 | |
| | | | a | b | c | | LS | CP | LS | CP |
| i. 抗弯控制柱 | | | | | | | | | | |
| $\frac{\rho-\rho'}{\rho_{bal}}$ | 横向 配筋 | $\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$ | | | | | | | | |
| ≤ 0.0 | C | ≤ 3 | 0.025 | 0.05 | 0.2 | 0.010 | 0.02 | 0.025 | 0.02 | 0.05 |
| ≤ 0.0 | C | ≥ 6 | 0.02 | 0.04 | 0.2 | 0.005 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.04 |
| ≥ 0.5 | C | ≤ 3 | 0.02 | 0.03 | 0.2 | 0.005 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.03 |
| ≥ 0.5 | C | ≥ 6 | 0.015 | 0.02 | 0.2 | 0.005 | 0.005 | 0.015 | 0.015 | 0.02 |
| ≤ 0.0 | NC | ≤ 3 | 0.02 | 0.03 | 0.2 | 0.005 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.03 |
| ≤ 0.0 | NC | ≥ 6 | 0.01 | 0.015 | 0.2 | 0.0015 | 0.005 | 0.01 | 0.01 | 0.015 |
| ≥ 0.5 | NC | ≤ 3 | 0.01 | 0.015 | 0.2 | 0.005 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.015 |
| ≥ 0.5 | NC | ≥ 6 | 0.005 | 0.01 | 0.2 | 0.0015 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.01 |
| ii. 抗剪控制梁 | | | | | | | | | | |
| 箍筋间距 $\leq d/2$ | | | 0.0030 | 0.02 | 0.2 | 0.2 | 0.0015 | 0.0020 | 0.0030 | 0.01 |
| 箍筋间距 $> d/2$ | | | 0.0030 | 0.01 | 0.01 | 0.2 | 0.0015 | 0.0020 | 0.0030 | 0.005 |

注：1. 当对于给定分量，发生 i、ii、iii、iv 中不止一个情况时，使用表中适当的最小值。
 2. 在标题“横向配筋”下，“C”和“NC”是符合和不符合的缩写。一个分量是符合的，若闭合箍筋间距 $\leq d/3$ ，且对于中等和高延性要求的分量，由箍筋提供的强度 (V_s) 至少为设计剪力的 3/4。否则，此分量被认为不符合。
 3. 允许在表中值间的线性插值。

续上表

| 条 件 | | | 建模参数 | | | 容 许 准 则 | | | | |
|----------------------|----------|-------------------------------|--------------|-------|-----------|-----------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 塑性转角 (弧度) | | 残余 强度比 | 塑性转角 (弧度) | | | | |
| | | | | | | 功能等级 | | | | |
| | | | | | | IO | 分量类型 | | | |
| | | | | | | | 主 | | 次 | |
| a | b | c | LS | CP | LS | | CP | | | |
| i. 抗弯控制梁柱 | | | | | | | | | | |
| $\frac{P}{A_g f'_c}$ | 横向 配筋 | $\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$ | | | | | | | | |
| ≤ 0.0 | C | ≤ 3 | 0.02 | 0.03 | 0.2 | 0.005 | 0.015 | 0.02 | 0.02 | 0.03 |
| ≤ 0.0 | C | ≥ 6 | 0.016 | 0.024 | 0.2 | 0.005 | 0.012 | 0.016 | 0.016 | 0.024 |
| ≥ 0.5 | C | ≤ 3 | 0.015 | 0.025 | 0.2 | 0.003 | 0.012 | 0.015 | 0.018 | 0.025 |
| ≥ 0.5 | C | ≥ 6 | 0.012 | 0.02 | 0.2 | 0.003 | 0.01 | 0.012 | 0.013 | 0.02 |
| ≤ 0.0 | NC | ≤ 3 | 0.006 | 0.015 | 0.2 | 0.005 | 0.005 | 0.006 | 0.01 | 0.015 |
| ≤ 0.0 | NC | ≥ 6 | 0.005 | 0.012 | 0.2 | 0.005 | 0.004 | 0.005 | 0.008 | 0.012 |
| ≥ 0.5 | NC | ≤ 3 | 0.003 | 0.01 | 0.2 | 0.002 | 0.002 | 0.003 | 0.006 | 0.01 |
| ≥ 0.5 | NC | ≥ 6 | 0.002 | 0.008 | 0.2 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.005 | 0.008 |
| ii. 抗剪控制柱 | | | | | | | | | | |
| 所有情况 | | | — | — | — | — | — | — | 0.030 | 0.040 |

FEMA 356 表 5-6、表 5-7 非线性分析模型参数和容许准则——钢构件

表 19-8

| 构成/作用 | 建模参数 | | | 容 许 准 则 | | | | |
|---|---|--------------|-----------|----------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| | 塑性转角 (弧度) | | 残余 强度比 | 塑性转角 (弧度) | | | | |
| | | | | 功能等级 | | | | |
| | | | | IO | 分量类型 | | | |
| | | | | | 主 | | 次 | |
| | a | b | c | | LS | CP | LS | CP |
| 梁-受弯 | | | | | | | | |
| a. $\frac{b}{2t_f} < \frac{52}{\sqrt{F_{yc}}}$ 且 $\frac{h}{t_w} < \frac{418}{\sqrt{F_{yc}}}$ | $9\theta_y$ | $11\theta_y$ | 0.6 | $1\theta_y$ | $6\theta_y$ | $8\theta_y$ | $9\theta_y$ | $11\theta_y$ |
| b. $\frac{bf}{2t_f} \geq \frac{65}{\sqrt{F_{yc}}}$ 或 $\frac{h}{t_w} \geq \frac{640}{\sqrt{F_{yc}}}$ | $4\theta_y$ | $6\theta_y$ | 0.2 | $0.25\theta_y$ | $2\theta_y$ | $3\theta_y$ | $3\theta_y$ | $4\theta_y$ |
| 其他 | 对翼缘长细比 (第一项) 和腹板长细比 (第二项) 用 a 和 b 行进行线性插值, 使用结果的下限 | | | | | | | |
| 柱-受弯 | | | | | | | | |
| 对 $P/P_{CL} < 0.20$ | | | | | | | | |
| a. $\frac{b}{2t_f} < \frac{52}{\sqrt{F_{yc}}}$ 且 $\frac{h}{t_w} < \frac{418}{\sqrt{F_{yc}}}$ | $9\theta_y$ | $11\theta_y$ | 0.6 | $1\theta_y$ | $6\theta_y$ | $8\theta_y$ | $9\theta_y$ | $11\theta_y$ |

续上表

| 构成/作用 | 建模参数 | | | 容许准则 | | | | |
|---|---|----------------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | 塑性转角 (弧度) | | 残余 强度比 | 塑性转角 (弧度) | | | | |
| | | | | 功能等级 | | | | |
| | | | | IO | 分量类型 | | | |
| | | | | | 主 | | 次 | |
| | a | b | c | | LS | CP | LS | CP |
| b. $\frac{bf}{2t_f} \geq \frac{65}{\sqrt{F_{yc}}}$ 或 $\frac{h}{t_w} \geq \frac{640}{\sqrt{F_{yc}}}$ | $4\theta_y$ | $6\theta_y$ | 0.2 | $0.25\theta_y$ | $2\theta_y$ | $3\theta_y$ | $3\theta_y$ | $4\theta_y$ |
| 对 $0.2 < P/P_{CL} < 0.5$ | | | | | | | | |
| $\frac{b}{2t_f} < \frac{52}{\sqrt{F_{yc}}}$ 且 $\frac{h}{t_w} < \frac{418}{\sqrt{F_{yc}}}$ | - ³ | - ⁴ | 0.2 | $0.25\theta_y$ | - ⁵ | - ³ | - ⁶ | - ⁴ |
| $\frac{bf}{2t_f} \geq \frac{65}{\sqrt{F_{yc}}}$ 或 $\frac{h}{t_w} \geq \frac{640}{\sqrt{F_{yc}}}$ | $1\theta_y$ | $1.5\theta_y$ | 0.2 | $0.25\theta_y$ | $0.5\theta_y$ | $0.8\theta_y$ | $1.2\theta_y$ | $1.2\theta_y$ |
| 其他 | 对翼缘长细比 (第一项) 和腹板长细比 (第二项) 用 a 和 b 行进行线性插值, 使用结果的下限 | | | | | | | |
| 支撑-受压 | | | | | | | | |
| c. W 或 I 形 | $0.5\Delta_c$ | $8\Delta_c$ | 0.2 | $0.25\Delta_c$ | $5\Delta_c$ | $7\Delta_c$ | $7\Delta_c$ | $8\Delta_c$ |
| h. 圆管 | | | | | | | | |
| 1. $\frac{d}{t} \leq \frac{1500}{F_y}$ | $0.5\Delta_c$ | $9\Delta_c$ | 0.4 | $0.25\Delta_c$ | $4\Delta_c$ | $6\Delta_c$ | $5\Delta_c$ | $8\Delta_c$ |
| 2. $\frac{d}{t} \geq \frac{6000}{F_y}$ | $0.5\Delta_c$ | $3\Delta_c$ | 0.2 | $0.25\Delta_c$ | $1\Delta_c$ | $2\Delta_c$ | $2\Delta_c$ | $3\Delta_c$ |
| 3. $\frac{1500}{F_y} \leq \frac{d}{t} \leq \frac{6000}{F_y}$ | | | | | | | | |
| 受拉支撑 (偏心支撑除外) | $11\Delta_T$ | $14\Delta_T$ | 0.8 | $0.25\Delta_T$ | $7\Delta_T$ | $9\Delta_T$ | $11\Delta_T$ | $13\Delta_T$ |

注: Δ_c 是预期屈曲荷载下的轴向变形; Δ_T 是预期受拉屈服荷载的轴向变形。

FEMA 356 表 6-18 非线性分析模型参数和容许准则——弯曲控制

表 19-9

| 条 件 | | 建模参数 | | | 容 许 准 则 | | | | |
|--------------------|---------------------------------|------------|-------|-----------|----------|-------|-------|-------|-------|
| | | 塑性转角 弧度 | | 残余 强度比 | 塑性转角（弧度） | | | | |
| | | | | | 功能等级 | | | | |
| | | | | | IO | 分量类型 | | | |
| | | 主 | | 次 | | | | | |
| | | a | b | c | | LS | CP | LS | CP |
| iii. 剪力墙连梁 | | | | | | | | | |
| 纵向配筋和横向 配筋 | $\frac{V}{t_w l_w \sqrt{f'_c}}$ | | | | | | | | |
| 具有符合横向配筋 的通常纵筋 | ≤ 3 | 0.025 | 0.050 | 0.75 | 0.010 | 0.02 | 0.025 | 0.025 | 0.050 |
| | ≥ 6 | 0.02 | 0.040 | 0.50 | 0.005 | 0.010 | 0.020 | 0.020 | 0.040 |
| 具有不符合横向配 筋的通常纵筋 | ≤ 3 | 0.020 | 0.035 | 0.50 | 0.006 | 0.012 | 0.020 | 0.020 | 0.035 |
| | ≥ 6 | 0.030 | 0.050 | 0.80 | 0.006 | 0.018 | 0.030 | 0.030 | 0.050 |

19.1.7 Pushover 工况的定义

在给框架单元指定非线性铰之后，下一步要定义 Pushover 工况。点击【定义】>【分析工况】命令，选择分析工况类型为 Static、分析类型为非线性。如图 19-22 所示。

图 19-22 Pushover 分析工况定义

(1) 荷载施加控制

Pushover 分析一般需要多个分析工况。一个典型的 Pushover 分析可能由 3 个工况构成：第一个将施加重力荷载给结构，第二个和第三个可施加不同的横向荷载。

Pushover 工况可以从零初始条件开始，或从前一个 Pushover 工况结束处的结果开始。例如，重力工况从零初始条件开始，而两个横向工况的每一个工况可以从重力工况的结束处开始。因为 Pushover 分析是非线性的，所以将其分析结果和其他线性或非线性分析叠加是不合理的。当按规范要求比较 Pushover 的结果时，需要在 Pushover 工况内施加所有适当的设计荷载组合，这可能需要多种不同的 Pushover 工况来考虑所有规范规定的设计规范荷载组合。

当进行 Pushover 分析时，必须在结构上施加代表惯性力的分布静荷载。一般地，将荷载定义为下面一个或多个的比例组合：①自定义的静荷载工况或组合。②作用于任意的整体 X、Y、Z 方向的均匀加速度。在每一节点的力和分配给节点的质量成比例，且作用在指定的方向。③从指定特征类型或 RITZ 类型振型的振型荷载。在每一节点的力与振型位移、振型角频率平方及分配给节点的质量成比例。力作用于振型位移方向。

对其他类型的分布形式，可以定义 OTHER 类型的静力荷载工况，分布为侧向分布的均匀或倒三角形分布，然后使用此静力荷载工况作为侧向荷载的分布。比例系数在位移控制情况下只表示相对比例，不代表荷载的绝对数值。

(2) 分析控制参数

点击对应施加荷载、结果保存、非线性参数对应的【修改/显示】按钮可以对 Pushover 分析的其他控制参数进行设置，见图 19-23。

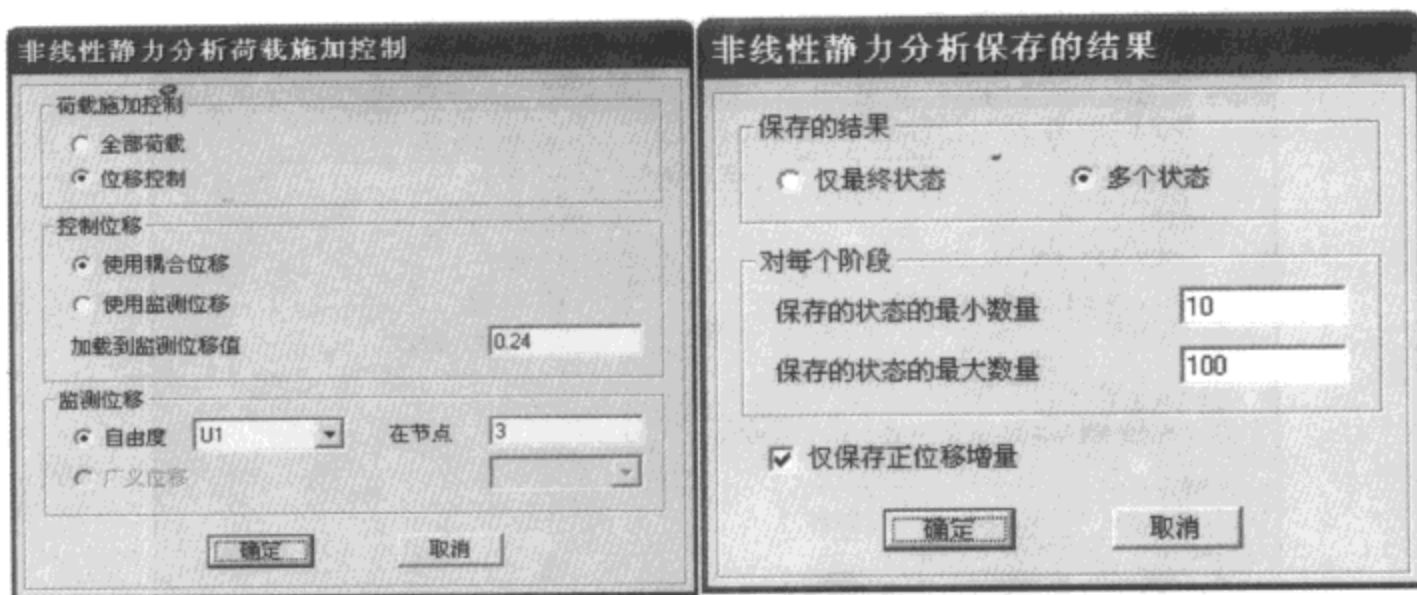


图 19-23 分析工况施加荷载和分析保存参数

在 Pushover 分析中，荷载与指定的荷载样式成比例的施加给结构。指定荷载样式的初始乘数为零，随着 Pushover 分析的进行，此乘数逐步增加，直至到达指定的 Pushover 结束，或在某些情况直至结构不能承受附加的荷载为止。可使用两种不同的方法来控制 Pushover 分析中施加在结构上的荷载：荷载控制和位移控制。每一个 Pushover 工况可使用力控制或位移控制，一般依赖于荷载的物理性质和期望的结构行为去选择。

在力控制时，需施加一定的荷载样式。使用此种荷载控制方法可以简单地将当前力的增量施加给结构。例如，假定当前施加给结构的力为 150kN，在力控制时，SAP2000 可简单施加此荷载的 50kN 的增量于结构。

在已知期望的荷载水平（如重力荷载），且结构可以承受此荷载时，应该使用力控制。若结构因材料屈服或失效，或几何不稳定而不能承受指定荷载，Pushover 分析将停止。

当位移控制时，施加荷载直至在监控点的位移等于预先指定的位移。使用此种控制方法时，SAP2000 先计算需要产生此位移增量的力增量，并施加此力增量至结构。例如，假定结构监控点的当前位移为 3cm，进行位移控制时，SAP2000 可简单地添加 1cm 的增量至此位移，来得到 4cm 的总位移，然后 SAP2000 估计得到此位移所需的力，并施加此力于结构。因为在此荷载增加过程中可能发生结构的屈服或失效，SAP2000 可进行试算和迭代来找到产生期望位移增量的荷载。若结构不稳定，则荷载增量可能为负。

当寻求指定的位移（如在地震荷载中），所施加的荷载预先未知，或当结构期望失去强度或失稳时，应使用位移控制。虽然随着结构承载力的变化，所施加荷载可以增加或减少，但预先存在的荷载（如重力）不会改变。若结构失去重力承载力，Pushover 分析在到达目标位移前将停止。

耦合位移通常是在一个给定的指定荷载作用下，对结构中最敏感位移的测量。它是结构中所有位移自由度的一个加权总和：每个位移分量乘以在该自由度上施加的荷载，并对结果求和（所施加荷载作的功）。若选择使用共轭位移来进行荷载控制，其将被用来决定荷载是

否应被增加或减少。所指定的监控位移将用来设置位移目标，即结构应移动多远。推荐使用耦合位移，即勾选使用耦合位移选项，对分析的收敛有帮助。

在监测位移区域中的监测一行上，定义要监测的点及其自由度位移分量。应选择一个对荷载（即荷载样式中定义的荷载）敏感的监测位移。例如，当荷载作用在方向 UY 上的时候，通常不应该监测自由度 UX，同样不应监测靠近约束的节点。如果可能，监测位移在分析过程中最好是单调增加的。

保存分析结果时，仅保存正位移增量表示 SAP2000 将不保存位移增量为负时的分析结果。

材料非线性参数区域显示材料非线性属性，主要用于非线性时程及收缩徐变，将在后面章节介绍。

几何非线性参数。选中【无】选项时，不考虑结构的几何非线性效应。选择 $P-\Delta$ 选项时，将运行 $P-\Delta$ 迭代，可部分考虑结构的几何非线性效应，计算耗时比第一项多。当结构不是很柔时，建议使用该选项。大位移选项用于出现明显变形的较柔结构（如索结构）；以及屈曲分析。对于一般的结构，建议使用 $P-\Delta$ 选项。建议首先运行分析而不以 $P-\Delta$ 进行（选择无选项），随后增加几何非线性效应。当选择 $P-\Delta$ 和大变形选项时，按照变形后的几何形状建立平衡方程，最为精确，但计算耗时很多，因为所有平衡方程基于变形后的结构，这可能需要大量的反复迭代。当结构很柔时，建议使用该选项，见图 19-24。

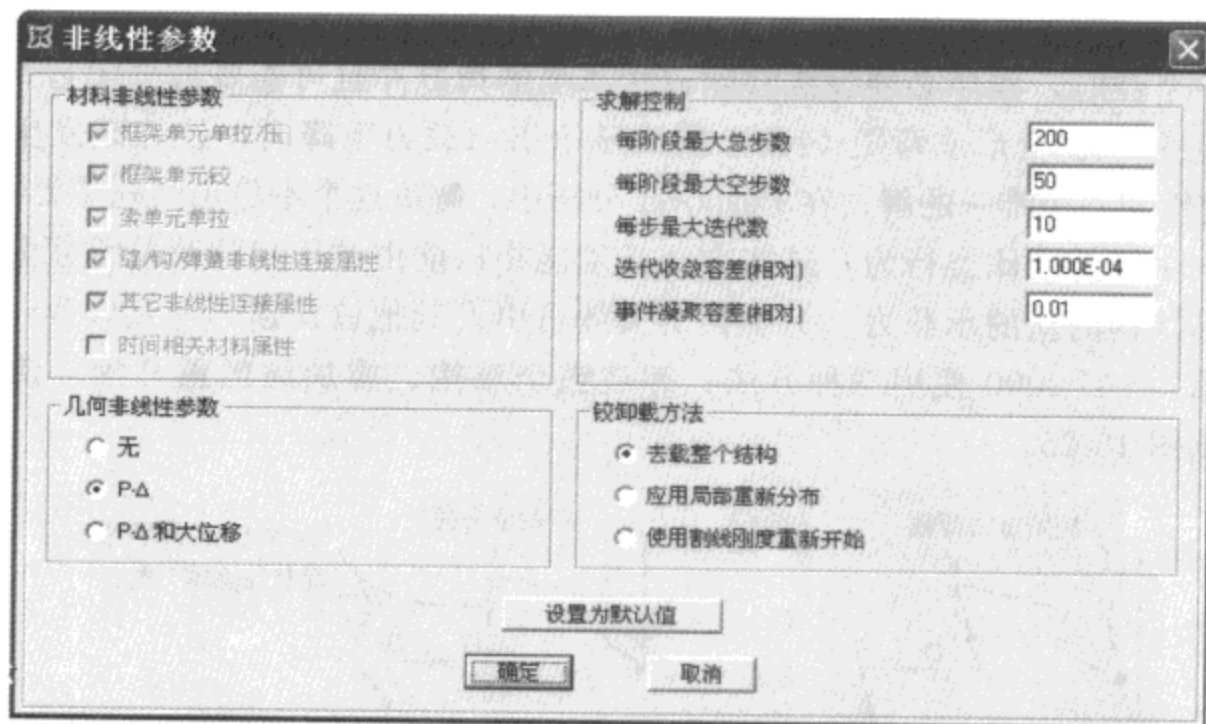


图 19-24 分析工况非线性参数

(3) 求解控制

在每个时间步求解非线性方程。这可能需要重新形成和重新求解刚度矩阵，进行迭代直至收敛。若不能实现收敛，则程序将步分割为更小的步再次运行。

每阶段最大总步数是分析中允许的最多步数，可以包含保存的步和结果未被保存的中间子步。此值对分析时间进行控制。以一个较小值开始，得到分析所用时间的认识。如果分析在最大总步数里没有达到它的目标荷载或位移，可以用比较大数目的步数再一次运行分析，运行一次非线性静力分析的时间大致和总步数成正比。

每阶段最大空步数表示在非线性求解过程中，每步允许的空步数。空步发生于：①一个框架铰试图卸载；②一个事件（屈服、卸载等）引发另一事件；③迭代不收敛和尝试了一较小的步。过多的空步数可能表示由于灾难性的失效或数值敏感而导致求解停止。可设置一定的空步数，这样若收敛困难，求解将结束。如果不想分析由于空步数到达而结束，则设置此值等于最大总步数。

每步最大迭代数用来确保在分析的每一步都达到平衡。在程序试图使用一个较小的子步前，用户可控制在每步允许的迭代数目。在多数情况默认值是适用的。

迭代收敛容差（相对）用来确保在分析的每一步都建立平衡。可设置相对收敛容差来比较作用在结构上的力值和它的误差。对于大变形问题，需要使用比其他非线性类型小得多的收敛容差值，以得到好的结果。尝试减小此值直至得到一致的结果。

事件凝聚容差（相对）是非线性解算法对于框架铰使用“事件到事件”的策略。若模型中有大量的铰，则会产生大量的求解步。事件凝聚容差用来将事件聚合在一起，从而减少求解时间。当一个铰屈服或移至力-位移（弯矩-转动）曲线的另一段时，触发一个事件。若其他的铰接近经历自己的事件时，在事件容差内，它们将被视为好象它们到达了事件，这会引引起在力（弯矩）水平的小量误差，并在这些水平上发生屈服或节段的改变。指定一个较小的事件容差将增加分析的准确性，代价是需要更多的计算时间。

(4) 内力重分配

当卸载一个铰时，程序必须设法移除铰所承受的荷载并且可能要再分配它到剩余的结构上。当应力应变（力-变形或弯矩-转角）曲线显示出承载力下降时，铰卸载发生。在动力分析中提供稳定性和一个唯一的解；在 Pushover 分析中，解决这个问题需要特殊的方法。

有多种方法来处理此类行为，这些方法必须能将以前由铰承担的荷载重新分配至其余的结构，并计算结构的新的承载力。一个铰的失效可引发其他铰快速的连续失效，从而导致结构的整体坍塌。SAP2000 使用三种方法：**卸载整个结构、施加局部重分配、使用割线刚度重新开始**，见图 19-25。

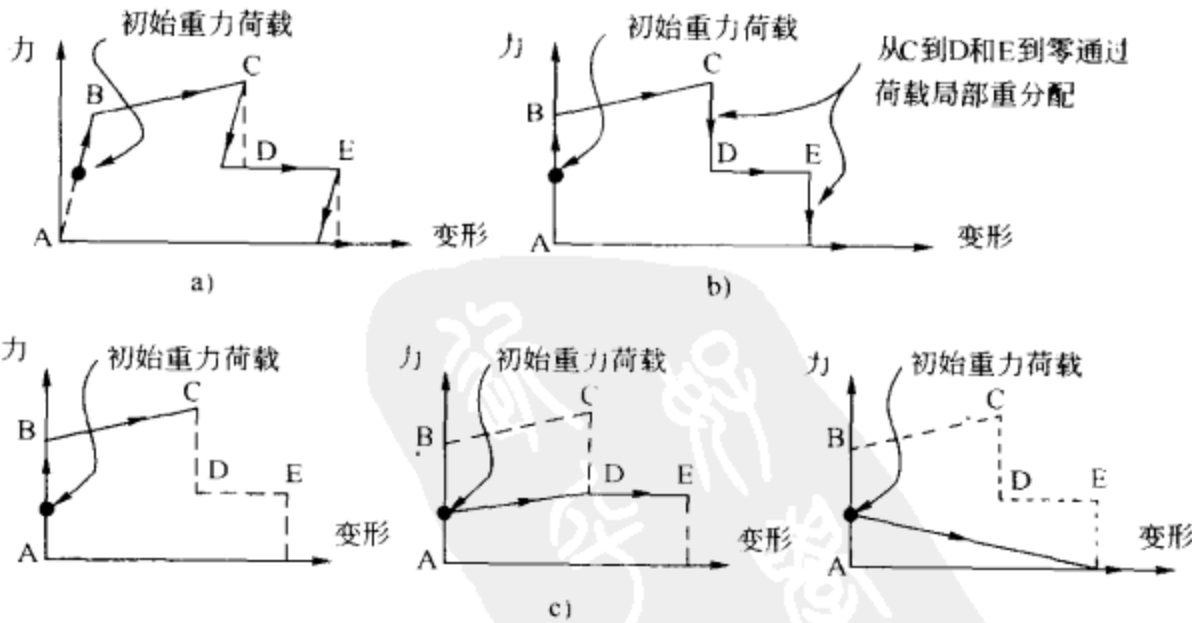


图 19-25 铰卸载方法

a) 卸载整个结构；b) 荷载局部重分配；c) 使用割线刚度重新开始

卸载整个结构。使用卸载整个结构的力重分配方法暂时减少施加于结构的荷载，直至所考虑的铰内荷载达到可接受的水平。当其卸载时，铰的刚度被取作其初始刚度，即假定为刚性的。在铰内的力被减少至期望的水平后，所施加的荷载再次增加。

此方法是三个方法中计算效率最高的，建议首先选用这一方法。如果铰卸载时结构中的荷载没有很明显的减少，该方法会工作得很好；如果在同一个单元中两个铰竞相卸载，该方法将失效（即一个铰需要应用的荷载增加时而另一个铰则要求荷载减少），分析将会停止并显示信息“找不到一个解”，这时应该试一试另外两个方法中的一个。

施加局部重分配。使用施加局部重分配方法在所考虑的铰处施加相等且反向的修正力，并重新在结构内分配这些力。此过程是一个反复迭代的过程，直至所考虑铰的力减少至期望的水平。例如，若一个柱轴向铰受压，且在力-变形曲线上到达点 C，施加局部重分配的方法将在包含该铰的框架单元之外施加等值且反向的修正力。

这个方法与卸载整个截面方法类似，它不是卸载整个的结构，只是卸载含有铰的单元。当一个铰在应力应变曲线的负斜率部分上，而且应用荷载引起应变反转时，程序将使用暂时的、局部的、自平衡的内部荷载以卸载此单元，这将引起铰卸载。在铰卸载之后，暂时的荷载被反转，传递移除的荷载到附近的单元。这个方法是用于模仿局部惯性力稳定一个快速卸载单元。

这个方法通常比第一个方法稳定但需要较多的步数，包括许多非常小的步以及许多空步。空步数上的限制应该通常被设定在允许总步数的 40%~70%。

如果在同一个单元中两个铰竞相卸载，此方法将会失败（即一个铰需要临时荷载增加时而另一个铰要求荷载减少）。在这种情况下，分析将会停止并出现信息“找不到一个解”，可将单元划分以使铰被分开之后可再试一次。检查 LOG 文件以查看哪些单元有问题。

注意：单元长度可能影响由程序自动计算的默认铰属性，因此固定的铰属性应该指定给要分开的那些单元。

使用正割刚度重新开始。使用割线重新开始的力重分配方法，当一个铰到达点 C 或点 E 时，重新开始 Pushover。使用该铰的割线刚度从初始点重新开始 Pushover 分析。

这个方法与其他两种方法不同。任何铰达到应力应变曲线的负斜率部分，已经变为非线性的所有铰使用正割刚度属性而重定形，并且重新开始分析。

每个铰的正割刚度由应力应变曲线上从点 O 到点 X 的割线决定，此处点 O 是在静力非线性工况（通常含由于重力荷载的应力）开始的应力应变点；以及如果斜率是零或正的点 X 是应力应变曲线上的当前点，或是在应力应变曲线的负斜率线段底部末端的点。

当荷载从分析开始被重新应用时，每个铰沿着割线移动直到它达到点 X，在此之后该铰使用给定的应力应变曲线重新开始。

当执行 Pushover 分析而在此静力非线性分析表现逐渐增加振幅的循环荷载并非单调静力增加时，这个方法与 FEMA356 指导方针建议的类似。

由于步数必须以目标位移的平方的增大而增加，所以这个方法在三个方法中是计算效率最低的，但也是收敛性最好的，而且提供的重力荷载也不太大。当一个铰的应力在重力荷载作用下足够大而且从 O 到 X 的割线刚度是负值时，这个方法可能失败。另一方面，这个方法也可给出另外两种由于铰是以很小负斜率（几乎水平）而导致失败情况的解。

19.1.8 查看 Pushover 结果

Pushover 分析之后, 可以获得的分析结果包括: 基底剪力-监测点位移曲线; 基底剪力-监测点位移曲线的数据表格; 铰属性、力位移曲线控制点外的铰的数量。

基底剪力-被监测位移可以 ADRS 格式绘制, 其竖轴为加速度谱, 横轴为位移谱。在此图中可以叠加需求谱和不同阻尼值的反应谱曲线, 一般称为能力谱图。能力谱的表格值 (ADRS 能力和需求曲线), 有效周期和有效阻尼可在屏幕显示、打印输出或保存为文件。

对于 Pushover 工况的每一步, 铰形成的序列和每一铰有颜色的状态可逐步地使用图形界面查看, 包括铰承受的力或弯矩、塑性位移或旋转、铰所处的状态。在图形底部的图签对应于在力-变形曲线上定义的点。当在图形界面显示 Pushover 分析工况下的结构变形时, SAP2000 把铰绘制为彩色的点, 用来表示铰所处的不同状态。不显示未经历任何塑性变形 (A 到 B) 的铰。

使用【分析】>【运行分析】命令, 选择定义的静力非线性分析工况进行 Pushover 分析。当对影响 Pushover 的模型或属性 (如铰) 进行修改时, 必须重新运行分析并得到分析结果。

对于一个非线性静力分析或非线性直接积分时程分析工况, 可获取对这些铰的分析结果。这些结果包括: ①铰承受的力和/或弯矩。对铰没有定义的自由度将输出零值, 即使铰在此自由度上为刚性、承载力为非零值; ②塑性位移和/或转动; ③铰在任意自由度所经历的最极端情形, 此情形不区分是对正变形发生或对负变形发生: A->B B->C C->D D->E >E; ④铰在任意自由度所经历的最极端性能情形, 此情形不区分是对正变形发生或对负变形发生: A->B B->IO IO->LS LS->CP >CP。

当在图形界面显示一个非线性静力分析或非线性直接积分时程分析工况的变形时, 铰被绘制为彩色的点, 用来指示其最极端的情形或状态: B->IO IO->LS LS->CP CP->C C->D D->E >E

对不同的情形使用不同的颜色来指示其情形。未经历任何塑性变形 (A 到 B) 的铰没有显示。

SAP2000 的 Pushover 分析的主要结果之一是结构的静力 Pushover 曲线。静力 Pushover 曲线是一条由静力非线性分析而得出的单一力-位移曲线。在加速度位移反应谱 (ADRS) 对话框中可查看 Pushover 曲线并将其与不同的反应谱相叠加, 从而可在 SAP2000 中执行能力谱分析。

运行静力非线性 Pushover 分析后, 执行【显示】>【显示静力 Pushover 曲线】命令可打开 Pushover 曲线对话框, 如图 19-26 所示, 选择出图类型区域中相应选项确定 Pushover 输出参数。也可以通过【定义】>【Pushover 参数集】定义显示的命名集。

此对话框的区域有: 静力非线性分析工况下拉框, 出图类型选项区, 基底抗剪合力与监控位移复选框, 以及能力谱复选框用于以 ADRS 格式绘制 Pushover 曲线的能力谱选项。

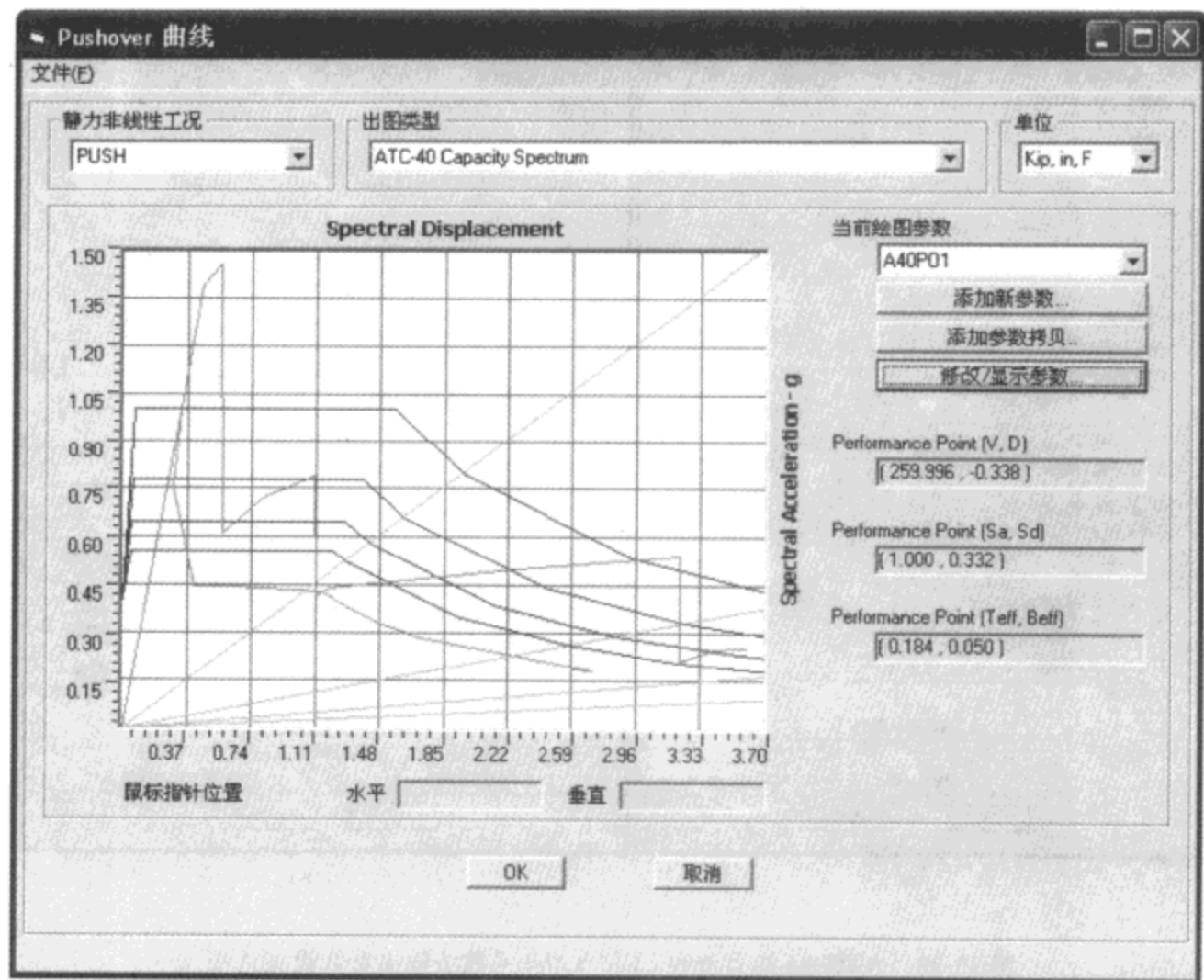


图 19-26 Pushover 结果显示

当显示基底剪力与检测位移时，选择【修改/显示参数】按钮打开基底剪力对检测位移参数对话框（图 19-27）。

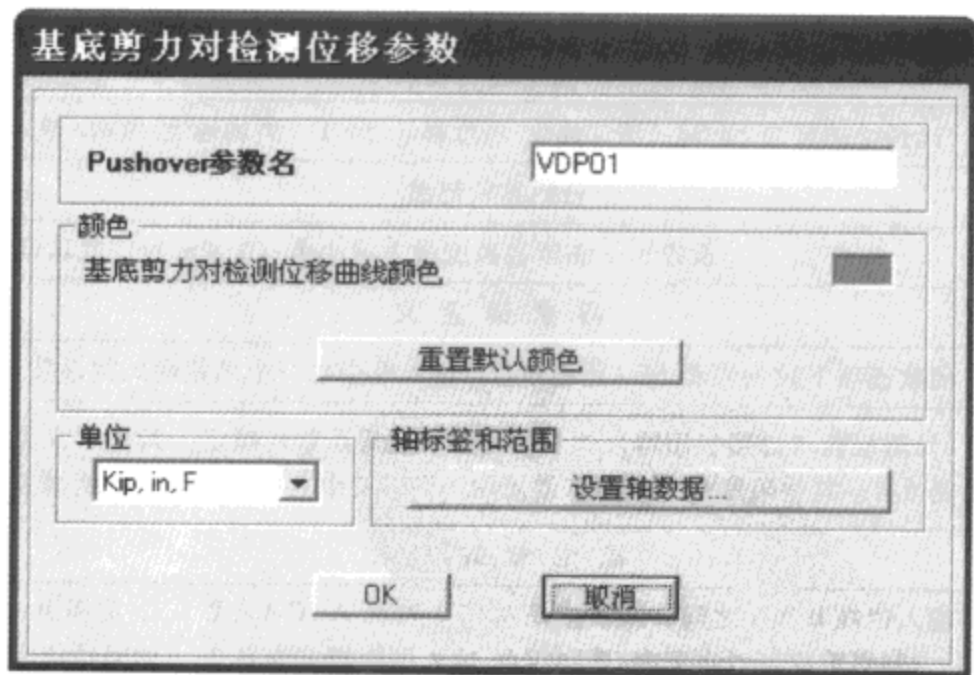


图 19-27 基底剪力和检测位移输出参数设置

ATC-40 能力谱参数对话框 [图 19-28a)] 中的参数说明如表 19-10。

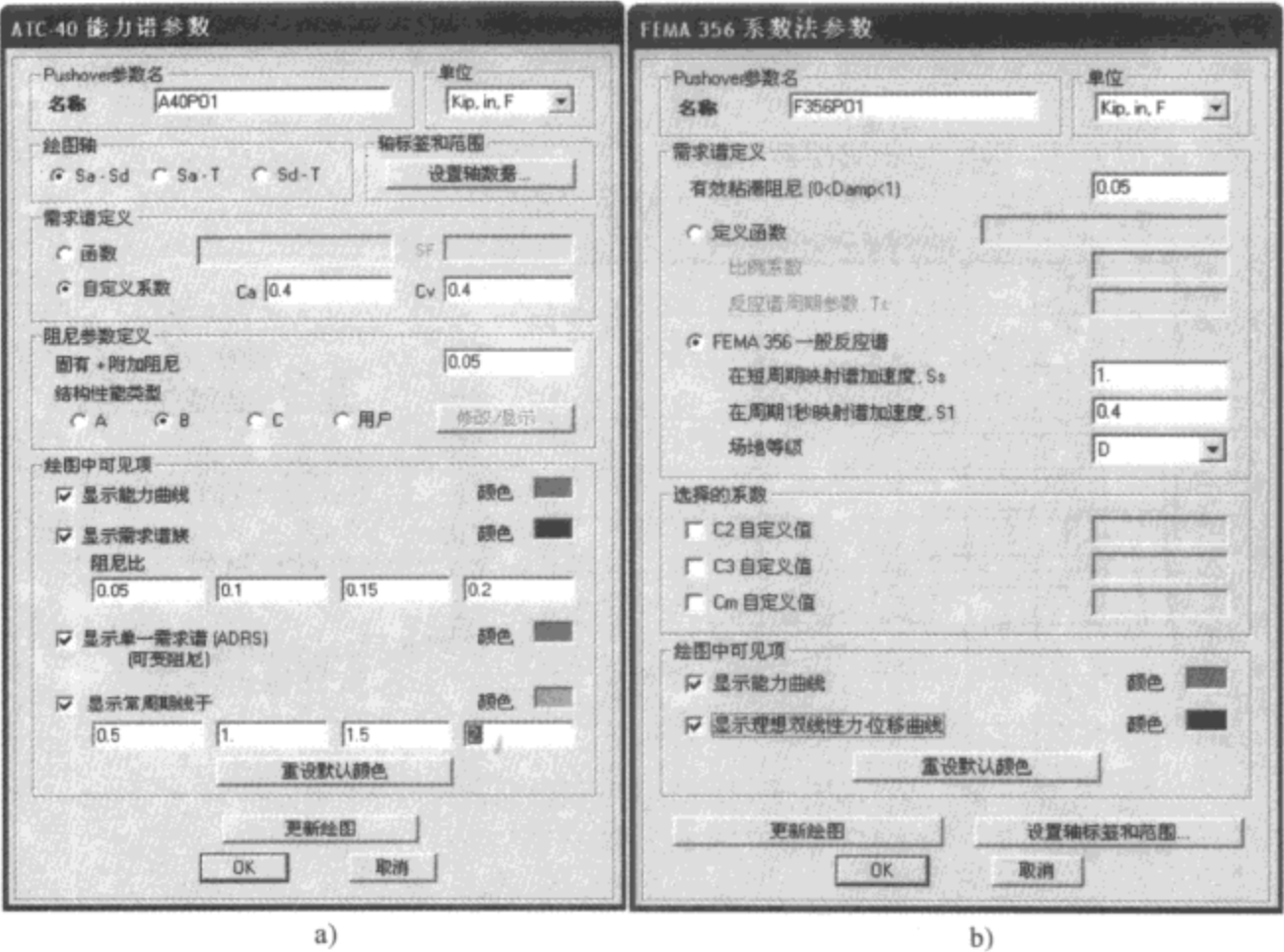


图 19-28 ATC-40 能力谱和 FEMA 356 系数法输出参数设置选项

A7C-40 能力谱参数表 表 19-10

| Pushover 参数名称 | |
|---------------|--|
| 名称 | 程序默认给出一个名称。或者输入一个名称 |
| 单 位 | |
| 下拉列表 | 设置显示 Pushover 曲线的单位 |
| 绘 图 轴 | |
| 复选框 | 选择绘图轴为 Sa-Sd（谱加速度-谱位移），Sa-T（谱加速度-周期）或 Sd-T（谱位移-周期） |
| 轴标签和范围 | |
| 设置轴数据 | 设置水平和垂直范围最大最小值（0 表示程序默认设置） |
| 需 求 谱 定 义 | |
| 函数 | 函数选项下拉列表和 SF（比例系数）输入框指定一个函数和比例系数 |
| 自定义系数 Ca、Cv | 5%阻尼需求谱形状用输入的 Ca 和 Cv（地震系数）确定。具体含义见 ATC-40 第四章。默认值是 0.4。其他阻尼水平的需求谱使用 ATC-40 中 8.2.2.1.1 中谱折减系数从 5%阻尼水平确定 |
| 阻 尼 参 数 定 义 | |
| 固有+附加阻尼 | 输入值在 0 和 1 之间，默认值是 0.05，参见 ATC-40 式 8-8。 β_0 项由 SAP2000 分析自动确定，5%内粘滞阻尼可以在固有/附加阻尼 输入框中指定为 0.05。如果结构中提供附加粘滞阻尼（如不包含在模型中的粘滞阻尼器），此阻尼也应包含在固有+附加阻尼输入框中。例如结构中内部阻尼比为 5%临界阻尼，阻尼器提供附加 7%临界阻尼（尽管没有在结构模型中出现），固有+附加阻尼输入框中应为 $0.05 + 0.07 = 0.12$ |
| 结构性能类型 | 在 阻尼参数区选择结构行为类型选项。A、B、C 与 ATC-40 中 8.2.2.1.1 节定义的结构性能类型相一致 |

续上表

| 绘图可见项 | |
|----------------------|---|
| 显示能力曲线 | 是否显示能力谱曲线 |
| 颜色 | 默认能力谱曲线颜色为绿色，用此按钮修改能力谱曲线显示颜色 |
| 显示需求谱族 | 勾选此复选框在能力曲线上以 ADRS 格式显示需求谱族 |
| 颜色 | 默认需求谱族颜色为红色。用此按钮修改需求谱的颜色 |
| 阻尼比例 | 绘图中可以包含四条需求谱曲线，对应不同的有效阻尼 β_{eff} ，默认的程序使用 $\beta_{eff} = 0.05$ 、 0.1 、 0.15 、 0.2 ，可以修改每条曲线的阻尼比得到相应的曲线。 β_{eff} 必须在 0 和 1 之间， 0 或空输入框表示忽略此条曲线 |
| 显示单一需求谱 (ARDS) (变阻尼) | 勾选项 显示单一需求谱 (变阻尼) 复选框显示需求谱为一条单一曲线 |
| 颜色 | 默认的统一需求谱曲线为黄色。点击此按钮修改需求谱的颜色。需求谱族和单一需求谱 (变阻尼) 可以同时显示或分别显示 |
| 显示常周期线于 | 勾选此复选框显示常周期线。这些线在能力谱绘图中为放射状线。默认周期为 $T = 0.5s$ 、 $1.0s$ 、 $1.5s$ 、 $2.0s$ 。可以修改对应的周期得到对应的周期线。 0 或空表示忽略对应周期线 |
| 重置默认颜色 | 按钮将设置所有颜色为默认颜色。 |

FEMA 356 系数法参数对话框中 [图 19-28b)] 的参数说明如表 19-11。

FEMA 356 系数法参数说明表 表 19-11

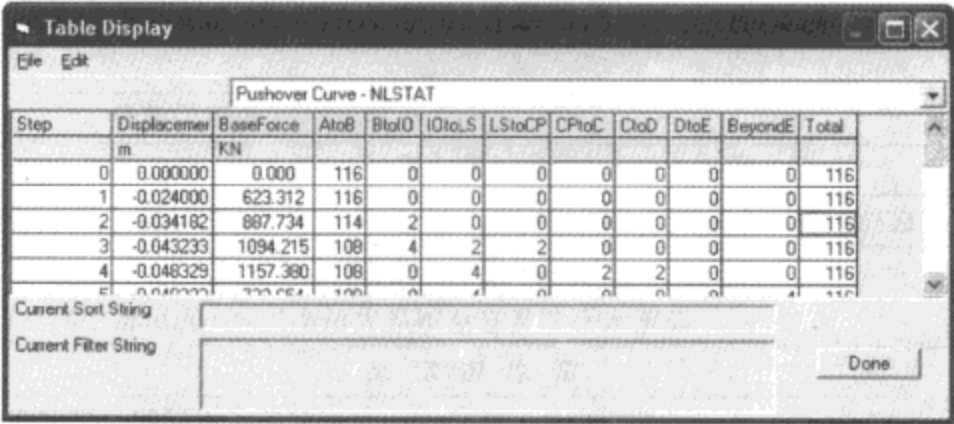
| Pushover 参数名称 | |
|-------------------|--|
| 名称 | 程序默认给出一个名称。或者输入一个名称 |
| 单 位 | |
| 下拉列表 | 设置显示 Pushover 曲线的单位 |
| 绘 图 轴 | |
| 复选框 | 选择绘图轴为 Sa-Sd (谱加速度-谱位移)，Sa-T (谱加速度-周期) 或 Sd-T (谱位移-周期) |
| 轴 标 签 和 范 围 | |
| 设置轴数据 | 设置水平和竖直范围最大最小值 (0 表示程序默认设置) |
| 需 求 谱 定 义 | |
| 有效粘滞阻尼 | 使用默认值或指定一个有效粘滞阻尼值。必须在 $0 \sim 1$ 之间 |
| 定义函数 | 使用自定义函数定义需求谱。从下拉列表中选择函数 |
| 比例系数 | 指定一个应用到函数的比例系数 |
| 反应谱周期参数 Ts | 指定反应谱从常加速度到常速度的周期 |
| FEMA 356 一般反应谱 | 使用此选项使用 FEMA356 一般反应谱定义需求谱 |
| 在短周期映射谱加速度, Ss | 使用默认值或指定短周期处谱加速度的值 |
| 在周期 1s 映射谱加速度, S1 | 使用默认值或指定 1s 周期处谱加速度的值 |
| 选 择 的 系 数 | |
| C2 自定义值 | 选项和输入框。指定 C2 值，如果不勾选，程序自动计算 C2 值 |
| C3 自定义值 | 指定 C3 值，如果不勾选，程序自动计算 C3 值 |
| Cm 自定义值 | 选项和输入框，指定 Cm 值，如果不勾选，程序自动计算 Cm 值 |

续上表

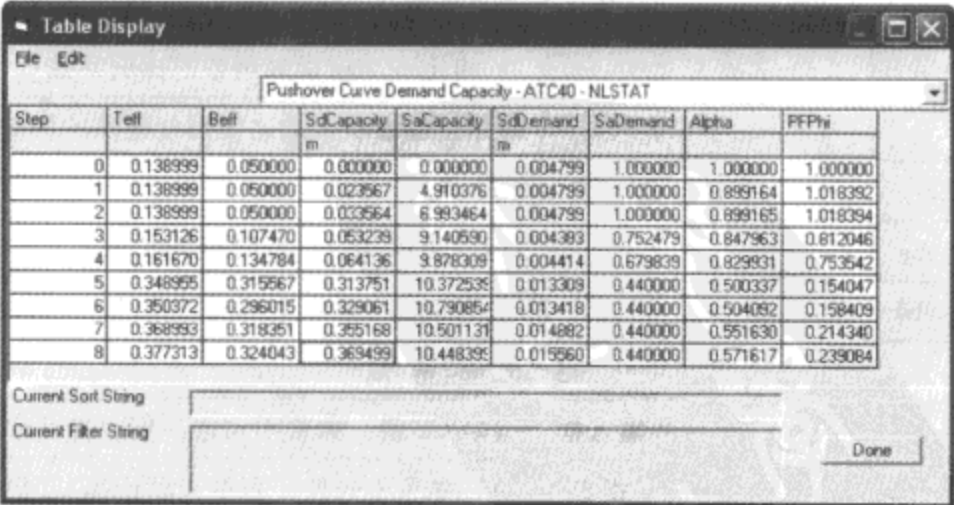
| 绘图可见项 | |
|---------------|------------------------------|
| 显示能力曲线 | 是否显示能力谱曲线 |
| 颜色 | 默认能力谱曲线颜色为绿色，用此按钮修改能力谱曲线显示颜色 |
| 显示理想双线性力-位移曲线 | 勾选此框在绘图区显示理想双线性力-位移曲线 |
| 颜色 | 默认需求谱族颜色为红色。用此按钮修改需求谱的颜色 |
| 重设默认颜色 | 按钮将设置所有颜色为默认颜色 |
| 设置轴标签和范围 | 设置绘图的轴标签和范围 |

SAP2000 也可以显示针对 FEMA 440 等效线性化和 FEMA 440 位移修正输出结果。相应的说明参见联机帮助和 FEMA 440。

可以打印当前显示的 Pushover 曲线，单击 **Pushover 曲线** 对话框顶部的【文件菜单】并选择【打印图形】命令。要显示屏幕上当前显示的 Pushover 曲线的输出表，可单击 **Pushover 曲线** 对话框顶部的【文件菜单】并选择【显示表格】命令，这可显示一个与绘制类型相关的表格 [图 19-29a)、b)]。要将表格打印到打印机或文件，可单击表格左上角的文件菜单并选择打印表格到文件，其中 AtoB、BtoO、IotoLS 等表示过程中出现铰的数目，Teff、Beff 表示有效周期 Teff 和 Beff，SdCapacity、SaCapacity 表示能力谱的 S_d 和 S_a ，SdDemand、SaDemand 表示需求谱的 S_d 、 S_a ，Alpha 表示质量参与系数 α_1 ；PFPhi 表示模态参与系数 γ_1 。



a)



b)

图 19-29 Pushover 曲线表输出结果

点击【显示】>【显示铰结果】打开铰结果对话框如图 19-30 所示，对话框说明见表 19-12。

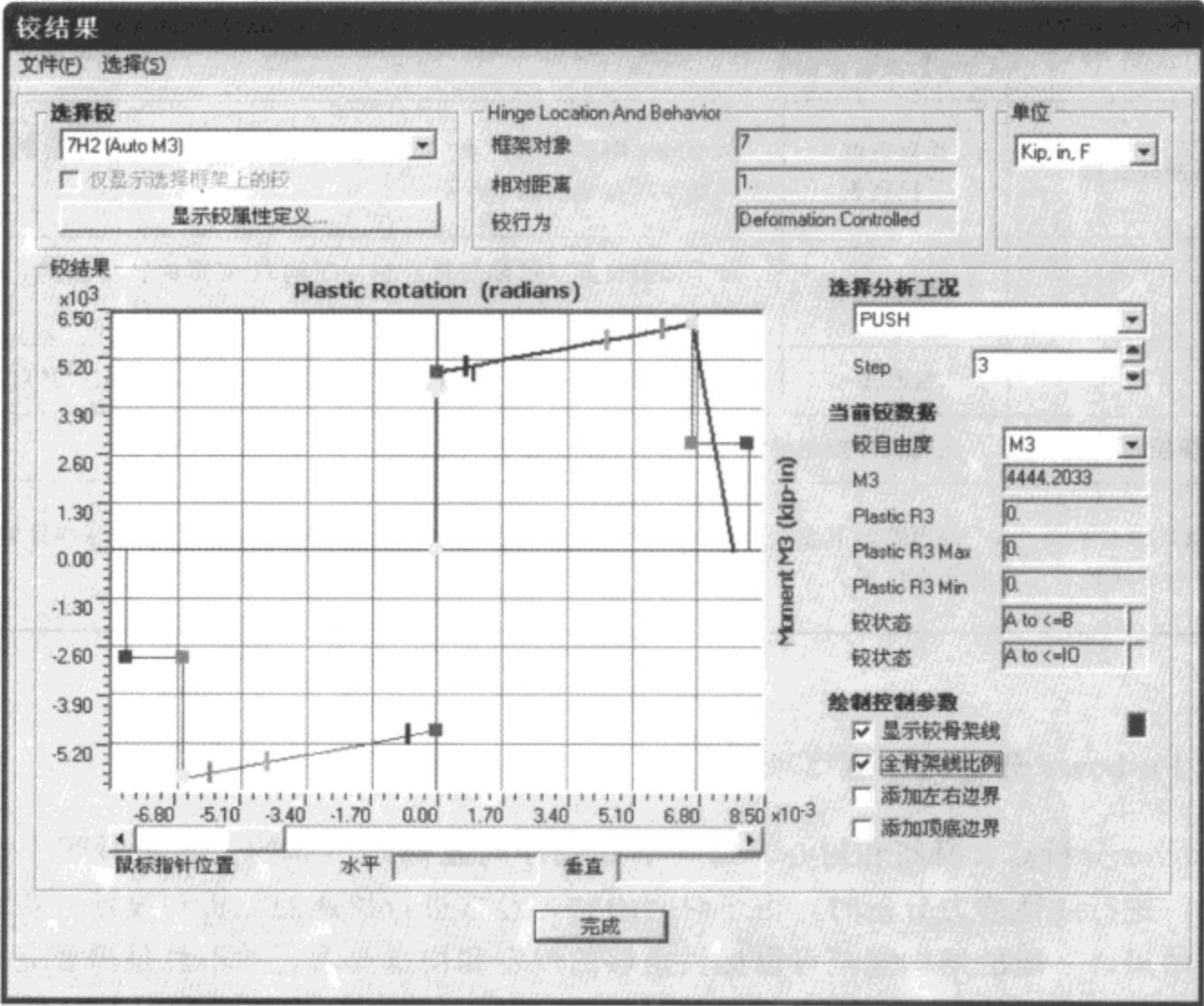


图 19-30 铰输出结果

铰结果对话框说明

表 19-12

| 选择铰 | 下拉列表 | 选择要绘制的铰 |
|------------|-------------------|--|
| | 仅显示选择框架上的铰 复选框 | 如果在【显示】>【显示铰结果】之前选择了框架对象，此复选框选中，只有选择的框架对象上的铰出现在选择铰下拉列表中。注意：对话框中可以使用【选择】>【选择铰】命令选择一个框架对象并筛选选择铰 下拉列表中只包含选择的框架对象中的铰 |
| 铰位置 和行为 | 显示铰属性定义 按钮 | 点击此按钮显示框架铰属性数据对话框。使用对话框中【修改/显示铰属性】按钮显示铰属性数据对话框。可以查看铰属性但不能修改 |
| | 框架对象 显示框 | 被指定铰的框架对象显示 |
| | 相对距离 显示框 | 显示指定到框架/索/钢束的相对距离 |
| 单位 | 铰行为 显示框 | 当定义铰时的铰行为（位移控制或力控制） |
| | 下拉列表 | 使用当前显示单位显示数据或从此下拉列表选择另一个。选择单位对铰结果显示有效 |

| | | | |
|----------------------------|---------------------------------|---|--|
| 铰 结 果 显 示 区 | 在选择铰下拉列表选择的铰将显示在此区域。绘制类型取决于铰的类型 | | |
| | 选择分析工况 | 下拉列表和【Step】滚动按钮 | 使用此下拉列表选择铰绘制的分析工况。使用滚动按钮选择分析步 |
| | 当前铰数据 | 铰自由度下拉列表 | 从 Hinge DOF 下拉列表中选择绘制的自由度。取决于绘制铰的类型，不同显示项在显示框中显示 |
| | | 铰状态 | 显示绘图位置（鼠标指针）相对于荷载-变形曲线中的 A、B、C、D、E |
| | | 铰状态 | 显示绘图位置（鼠标指针）相对于容许准则 IO、LS、CP 点 |
| | 绘图控制参数 | 此复选框控制限制区的图形。含义是自说明的 | |
| | 滚动条和水平、 垂直显示框 | 使用绘图下面滚动条沿铰绘图移动鼠标，或者在显示区移动鼠标，鼠标指针将显示水平和垂直位置 | |

19. 1. 9 Pushover 分析时注意事项

Pushover 分析需要时间和耐心。每一个非线性问题都是不同的。需要时间来摸索最适合的方法。进行线性静力分析时，由于时间限制，经常进行快速的分析和设计，花很少的时间来查看结果，一般的结构规范可以提供足够的规定和构造要求，并不总是需要完全理解结构行为就能够得到一个满意的设计。但 Pushover 的目的在于理解结构的行为，特别是屈服后行为。要完全地进行 Pushover 分析和设计，必须有足够的时间来查看和理解分析结果。

从一个简单的模型开始逐渐建立。确认模型在线性静力荷载和模态分析下按期望来表现。不是在所有地方都从非线性属性开始，而是从最期望的非线性开始，逐步增加它们。当建立一个模型进行 Pushover 分析时，建议先从一个简单模型开始并逐步细化。判断模型在线性静力荷载和振型分析下是否符合预期的结构反应，然后研究线性静力分析结果来辨认结构的关键部位。开始时不要在结构的各处都设置铰，而应该从预期的非线性的部分开始，逐步添加铰。建议以不失去承载力的框架铰属性开始，可以随后修改铰属性或重新设计结构。若使用框架铰，以主要构件的承载力不失效开始模型，随后改变铰模型或重新设计结构。

可能的话，进行没有几何非线性的初始分析。随后加上 P-Δ 效应，以及可能的大变形和其他。以适度的位移目标和有限的步数开始，目的是尽快的进行分析，从相对简单的模型得到经验，当对模型的力学行为有所把握时，可进一步向前推进，并且考虑更极端的非线性行为。

从数学上讲，非线性静力分析不总保证一个单独解。动力分析中惯性力效应限制着结构遵循的路径。但对于静力分析不是这样，特别对于失稳结构中由于材料或几何非线性而失去强度的情况。若非线性静力分析困难加大，建议将其转变成一个直接积分时程分析，且拟静力地施加荷载（非常慢）。

属性或荷载的小变化可能引发非线性反应较大的变化，所以要考虑多种不同的荷载工况，且对于结构属性变化的敏感性进行分析，这是十分重要的。

当性能点不存在时，可以使用下面方法：

- (1) 提高结构能力，如增加强度或刚度，增加结构延性，或者上述的复合；
- (2) 折减地震需求，如增加阻尼、采用隔振器等。

进行 Pushover 分析时需要注意的：

- (1) 不要低估加载或位移形状函数的重要性

荷载或变形形状选择要表示建筑物的主要控制动力模态形状。常见的，可以使用倒三角形荷载表示规范定义的静荷载横向力分布。一般在 Pushover 分析中保持荷载形状不变，使用自适应加载形状也在增加。目前不存在自适应荷载函数的定义和应用的通用准则。加载函数对高层建筑很重要，因为地震反应不是一个单一振型起决定性作用。对此类结构，基于第一振型的加载函数可能在中间层处大大低估地震作用。

- (2) 在对建筑物推覆之前知道性能目标

任何建筑没有破坏时都不能发生无限大位移。因为 Pushover 分析的目的是评估建筑的状态及构件的破坏状态，确定建筑特定的目标行为非常重要。对象行为如“防止倒塌”、“生命安全”、“立即使用”等必须转换为技术术语，如“给定设计谱”。在反应谱中反映“在需求地震状态下”对不同结构构件上指定极限状态。由于 Pushover 分析的目的是评估结构性能以及结构在破坏状态下的组分，因此，了解结构需要达到的性能目标是极为重要的。诸如预防倒塌、生命安全、临近倒塌等性能目标必须被翻译为专用术语，如“一组给定的设计谱”和“承受设计谱体现的地震作用时，各个结构组分容许的极限状态”。没有明确性能目标的 Pushover 分析是无用的。

- (3) 做设计之前不能进行推覆

对结构来说仅仅给出构件的弹性模量、惯性矩、面积等是不够的，Pushover 的特性完全取决于各个构件和连接的力-位移特性，必须能够确定构件屈服特性，如果具体构件的特性未知，则 Pushover 分析也无意义。例如：a) 钢筋混凝土和钢筋的力-位移特性有很大的不同，必须特别注意确定它们的初始刚度、开裂弯矩、屈服弯矩和屈服后特性；b) 对于钢结构，弯矩曲率主要是双线性或三线性的；c) 分析中应该考虑节点板区域可能的失效机制。

- (4) 不要忽略重力荷载

考虑或者忽略重力荷载将显著影响 Pushover 曲线的形状以及构件屈服和失效的次序。例如：①由于钢筋混凝土梁中正负配筋的不对称分布，重力荷载将延迟梁发生屈服和开裂，使得在较小基底剪力作用下，形成刚度更大的结构；②随着重力荷载的增加，结构的极限承载能力通常会减小。同时竖向构件的轴力作用对 PMM 铰的影响不能忽略。

- (5) 除非能模拟失效，否则不要推到破坏之外

Pushover 是对结构进行性能分析，是评估结构破坏前的综合指标评定，而不是模拟结构的倒塌过程。

- (6) 注意配筋形成和搭接长度

对于已建成结构中的钢筋混凝土构件，计算其性能时有必要注意钢筋的搭接长度。如果存在不充分的搭接长度（大量老式建筑中会出现这种情况），必须折减有效钢筋的面积来考

虑不充分搭接的影响。若不这样处理,将过高估计构件的实际承载力,并导致不准确的 Pushover 曲线。

(7) 不要忽略剪力破坏机制

如果结构构件的抗剪能力不足以支持弯曲塑性铰的形成,则在形成塑性铰之前,构件端部将先出现剪切破坏。即使钢筋混凝土构件有充分的抗剪能力,但如果在塑性铰区域的箍筋间距不够密,混凝土也可能在约束不够充分的情况下破碎。如果上述情况发生,塑性承载力立即下降到由纵筋单独提供。用于常规 Pushover 分析的计算机程序,几乎都没有考虑上述两点说明。所以,若计算机程序不能自动考虑上述情况,设计者必须明白这些问题并进行人为的处理。

(8) $P-\Delta$ 效应比想象的更重要

一般情况下,随侧移和柱的轴力增大, $P-\Delta$ 效应也明显增强。在未变形情况下,强柱弱梁的设计方法普遍用来计算柱的抗弯能力。在实际的变形状态下,柱的抗弯能力可能大幅下降,从而背离设计预期的强柱弱梁效果。因此在 Pushover 分析中,柱中塑性铰的出现早于梁的情况也是常见的。

(9) 不要混淆 Pushover 和实时地震加载

Pushover 分析中荷载是单调增加的,而实际情况下地震产生的力的幅值和方向在地震地面运动的过程中是不断变化的,并且 Pushover 荷载和结构的反应是同相的,而实际结构中地震激励和结构反应不一定是同相的,因此 Pushover 分析和实时地震加载反应是不同的。

(10) 三维建筑一般不能用平面推覆进行分析

对于平面严重不对称的结构,或存在大量非正交构件的结构,平面的 Pushover 分析并不适用。这种情况下,需要建立空间模型来进行 Pushover 分析。三维结构可分别沿主方向推覆,也可以在两个正交方向同时进行推覆。

19.2 阶段施工分析

传统的分析方法都是以竣工后的整体结构作为分析对象,将结构荷载一次性施加在结构上进行计算,计算时经常得到与实际情况不符的结果。对高层结构主要是因为:1) 忽略了内外柱及剪力墙等竖向构件竖向位移差的影响;2) 顺序分层施工引起的分层加载的影响。对于桥梁等结构施工过程是分析必须考虑的一个因素,同时还要考虑收缩徐变因素的影响。

阶段施工是一个特殊类型的非线性静力分析,SAP2000 程序需要阶段施工模块来实现此功能。阶段施工允许定义一个阶段序列,在里面能够增加和去除部分结构,选择性地施加荷载到结构的一部分,以及考虑诸如龄期、徐变和收缩的时间等相关的材料性能。阶段施工也被称为逐步施工、顺序施工或分段施工。

阶段施工被认为是一种非线性静力分析类型,因为在分析过程中结构会发生变化。然而,对材料和几何非线性的考虑是可选择的,因为阶段施工是一种非线性静力分析类型,所以它可能是其他非线性静力分析和非线性直接积分时程分析工况序列的一部分,也可能被用作线性分析的刚度基础。

如果从一个阶段施工分析继续进行非线性分析, 或者利用其刚度进行线性分析, 只有阶段分析结束时所建立的结构才会被使用。

SAP2000 中的阶段施工加载用来模拟结构在施工过程中的结构刚度、质量、荷载等不断变化的过程。对每个定义的施工阶段分析一次, 每次分析都是在上一次分析的结果基础上进行的, 它是一种静力非线性分析过程。在程序中施工过程的每个阶段由一组称作有效组的构件来表示, 当从上一个阶段到下一个阶段分析结构发生变化时, 根据定义阶段情况, SAP2000 会首先判断哪些构件是新添加的, 哪些是被删除的以及哪些是没有变化的, 对于这几种不同的构件, 进行不同的操作。

对于添加的对象, 对象从一个初始的无应力状态开始, 它们的刚度与质量立刻被添加到结构上, 并将荷载施加到新添加的对象上。对于移除的对象, 它们的刚度与质量立刻从结构中移除, 并将被移除的对象所承受的所有力转移到剩余结构的连接点上, 在随后的分析过程中再将此转移到连接点的荷载逐渐地从结构中移走。对于没有变化的对象, 对象继续保持它们在先前阶段中的状态。荷载工况中指定的荷载能够有选择地施加到保留的对象上。如果移除一个对象并在随后的一个阶段添加, 它将以其初始的无应力状态重新开始。

顺序施工加载分析的基本参数是通过顺序施工荷载工况定义的。在定义该工况之前, 一般需要先把逐步添加 (或删除) 到结构中的构件定义为一系列的组。

对于每个非线性阶段分析的工况, 可以定义一个阶段序列。分析按照定义的顺序来执行。在一个分析工况中, 可以指定任意数量的阶段。阶段施工也可以从一个分析工况持续到另一个分析工况。

对于每个阶段, 要指定: ①持续时间, 以天为单位。它用于时间相关效应。如果不想在给定阶段考虑时间相关效应, 设置持续时间为零; ②任意数量的、需要在结构上添加的对象组, 或者没有。如果考虑时间相关效应的话, 可以指定对象在添加时的龄期; ③任意数量的、需要在结构上删除的对象组, 或者没有; ④任意数量的、被指定荷载工况加载的对象组, 或者没有。可以指定组内的所有对象都被加载, 或者只对本阶段添加到结构中的组内的对象加载。

显然, 设置阶段施工分析的第一步是定义组。程序默认存在一个内建 “ALL” 的组, 它包括整个结构。当指定阶段施工时, 分析开始于前一个分析工况建立的结构。如果从零开始, 开始时结构没有对象。

每个阶段按照定义好的阶段次序来进行分析, 一个阶段分析包括两部分: ①结构和荷载的改变, 这是瞬时发生的, 即分析可以是逐步的, 但从材料的观点来看不存在时间占用; ②如果指定了非零的持续时间, 时间相关的材料效应将被分析。在这段时间, 结构不改变, 施加的荷载保持不变, 但会发生内部应力重分布。

对于阶段的瞬时部分包括如下分析:

①当添加一组时, 只有在组内的新对象 (不是在结构中已存在的对象) 被添加。对于添加的每一非节点对象, 所有连接至此对象的节点被添加, 即使它们没有被明确的包含在组里。

②删除组时, 只有实际存在于结构的对象被删除。当去除对象时, 其刚度、质量、荷载和内力被从结构中去除, 且用相等的力代替。这些力在分析过程中线性减少至零。当所有连

接的对象被去除时，所有被自动添加的节点将被去除。

③在分析过程中，所有指定的荷载将会线性增加。指定在组内所有对象的荷载只作用在实际存在于结构中的对象，或者是在此阶段被添加的对象。

如果一个对象包括在一个以上的被添加或被去除的组内，对象只能被添加或被去除一次。它是被添加还是被去除，取决于哪个操作最后发生。例如，如果一个对象被包括在 3 个用来添加的组内和 1 个用来去除的组内，对象将被去除，如果它是阶段最后指定的操作。如果一个对象被包括在多于一个将被加载的组内，对象会多次加载。

荷载应用必须通过荷载控制，不允许位移控制。

19.2.1 阶段施工分析工况定义

在分析工况中可定义该阶段施工的基本参数。点击【定义】>【分析工况】命令，选择分析工况类型为 Static，分析类型为非线性阶段施工，如图 19-31 所示。对话框说明见表 19-13。

分析工况名称NLSTAT1设置定义名称

分析工况类型Static

初始条件

- 零初始条件·从零预应力状态开始
- 从上次非线性工况终点状态继续

重要注释: Loads from this previous case are included in the current case

分析类型

- 线性
- 非线性
- 非线性阶段施工

阶段定义

| 阶段号 | 持续(天) | 用户注释 |
|-----|-------|------|
| 3 | 0. | |
| 1 | 0. | |
| 2 | 0. | |
| 3 | 0. | |
| 4 | 0. | |

添加(A)

添加复制

修改(M)

插入(I)

删除(D)

几何选项

- 结构几何指定为最终阶段的几何形态迭代获得初始几何形态

显示阶段

树状显示阶段...

阶段数据 3

| Operation | Group | Age At Add | 荷载类型 | 荷载名称 | 比例系数 |
|---------------------|-------|------------|------|------|------|
| Remove Structure | S4 | | | | |
| Add Structure | S4 | | | | |
| Load Added In Group | | | | | |
| Load All In Group | | | | | |
| Remove Structure | | | | | |

添加(A)

修改(M)

删除(D)

其它参数

保存的结果End of Each Stage修改/显示...

非线性参数Default修改/显示...

确定

取消

图 19-31 阶段施工工况对话框

490

图 19-31 对话框说明



表 19-13

| | | |
|------|--|---|
| 初始条件 | 零初始条件-从零预应力状态开始 | 结构具有零位移和速度，所有单元无预加应力并且没有非线性变形历史 |
| | 从上次非线性工况终点状态继续 | 位移、速度、应力、荷载、能量、非线性变形历史从上一个分析结束继续。从下拉列表选择一个“前面的”分析工况 |
| 阶段定义 | 上移和下移按钮 | 将选中的阶段上移或下移 |
| | 持续（天） | 阶段的持续时间 |
| | 用户注释 | 阶段的注释 |
| | 添加按钮 | 在持续编辑框输入阶段天数。SAP2000 自动指定阶段号 |
| | 添加复制按钮 | 点击已有持续或用户注释项。此阶段的数据将添加到显示列表中 |
| | 修改按钮 | 点击已有持续或用户注释项。阶段数据将出现在每个显示区的顶部编辑框。输入修改值或注释点击【修改】按钮修改持续时间或注释 |
| | 插入按钮 | 加亮一行数据使用【插入】按钮在加亮行上一行插入数据 |
| | 删除按钮 | 点击要删除的阶段定义点击【删除】按钮 |
| 阶段数据 | 使用下拉列表和编辑框指定操作类型和每个施工阶段的荷载。点击阶段定义区选择阶段 | |
| | Operation 下拉列表 | 指定所选择施工阶段的操作（Add Structure 添加结构，Load Added in Group 组中加载，Load All in Group 组中所有对象加载，或 Remove Structure 移除结构）。Load Added in Group 与 Load All in Group 是为了区别相同构件出现在不止一个组中情况 |
| | Group 下拉列表 | 选择阶段包含的组 |
| | Age at Add 编辑框 | 此编辑框只有在 Operation 选择为 Add Structure 有效。输入结构添加时的龄期（添加时已经具有的龄期） |
| | Load Type 下拉列表 | 此下拉列表只有当 Operation 为 Load Added in Group 或 Load All in Group 有效。选择一个静力或加速度荷载 |
| | Load Name 下拉列表 | 此下拉列表只有当 Operation 是 Load Added in Group 或 Load All in Group 时才有效。选择添加到的荷载工况 |
| | Scale Factor 编辑框 | 此下拉列表只有当 Operation 是 Load Added in Group 或 Load All in Group 有效。输入一个对荷载比例系数 |

注：其他参数见前面 Pushover 分析部分说明。

19.2.2 阶段施工分析结果查看

阶段施工加载分析完成后，工程师可以通过类似于显示常规分析的变形和内力方法进行查看，也可以通过数据库显示方式将详细结果列表显示或导出到 Access 数据库。

点击【显示】>【变形形状】选择定义的阶段施工工况，并点击【显示】>【力/应力】命令选择定义的阶段施工工况显示内力，如图 19-32 所示。可以使用屏幕右下角的和按钮在每个施工步间移动。同时可以通过【显示】>【显示表格】给出整个阶段施工内力、位移的详细信息。

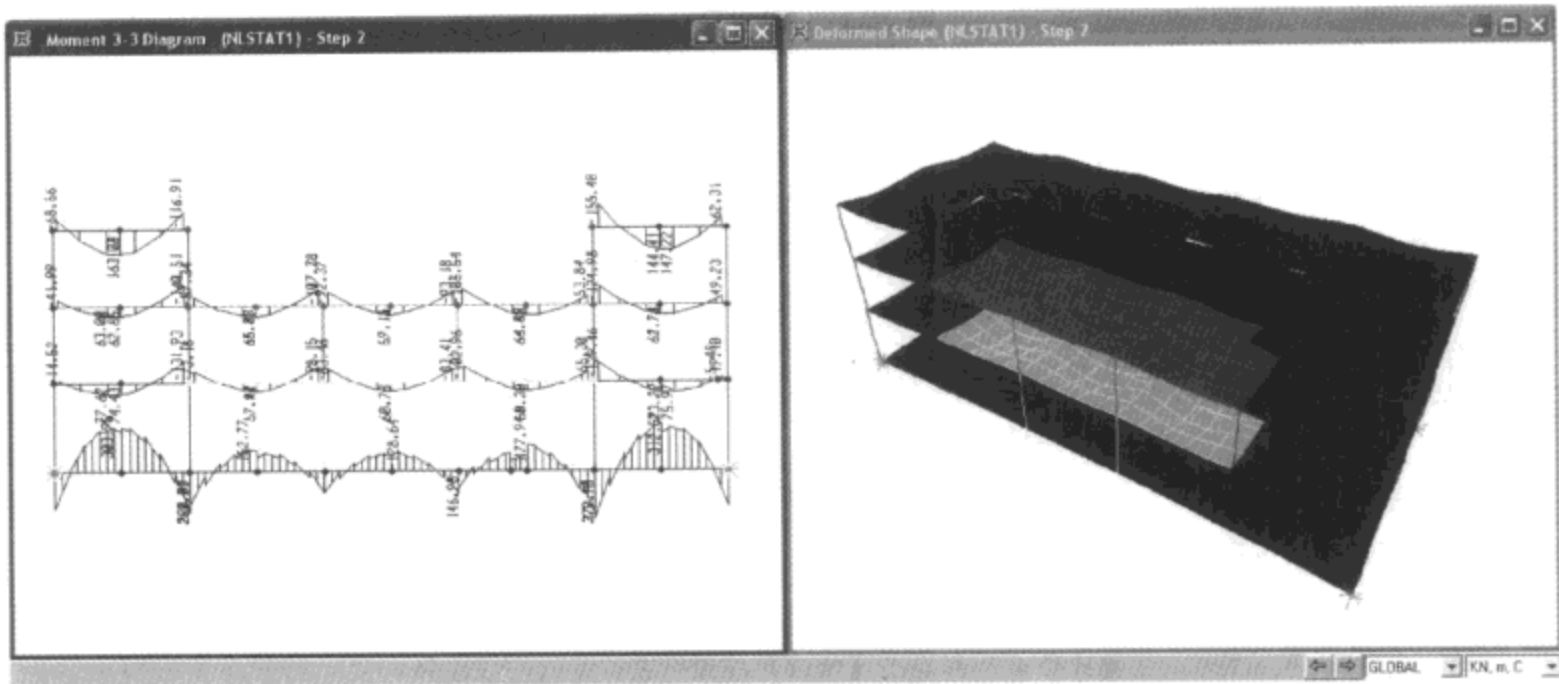


图 19-32 阶段施工内力和变形图

19.3 例题

19.3.1 Pushover 分析例题

为了说明 SAP2000 静力非线性分析 (Pushover) 的功能, 下面给出了一个算例, 该结构是一个平面的钢框架体系。模型、荷载和铰的布置如图 19-33 所示:

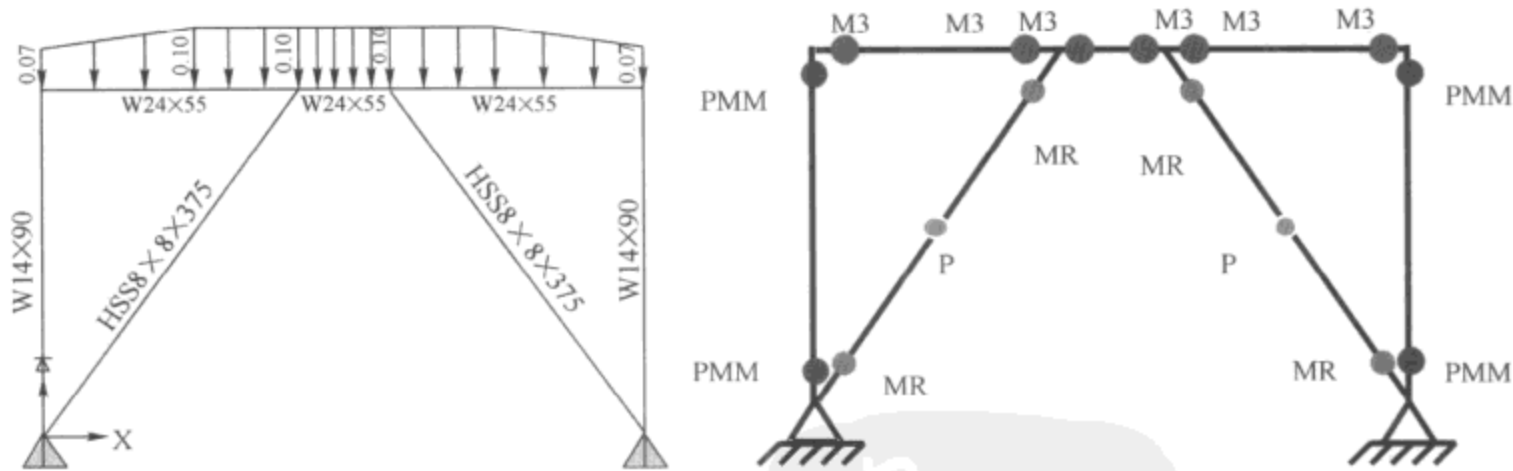


图 19-33 Pushover 分析模型

PMM-PMM 铰; M3-M3 弯矩铰; P-轴力铰; MR-弯矩释放

该模型文件在随本书赠送的光盘中, 文件名称为 EX19-1. SDB, 可以通过该文件了解更详细的模型信息, 也可以通过本例中的弹塑性分析方法学习弹塑性分析方法和过程。但需要指出的是 Pushover 分析是一个比较复杂的功能, 特别是对于大型空间框架体系, 具体问题的具体参数设置需要具体分析, 不一定与本例中一致, 本例主要介绍 Pushover 分析的操作过程。

在本例中使用默认的塑性铰。首先选择模型中的框架单元，点击【指定】>【框架/索/钢束】>【铰】命令，弹出框架铰指定对话框，选择添加【添加】按钮添加铰并选择相应的铰类型。

首先施加重力荷载非线性工况点击【定义】>【分析工况】命令，见图 19-34，添加新工况，分析工况类型选择 **Static**，分析类型选择 **非线性**，荷载类型选择 **Load**，名称选择 **DEAD**，非线性静力分析荷载施加控制选择荷载控制。然后再添加 Pushover 工况，添加新工况，分析工况类型选择 **Static**，分析类型选择 **非线性**，荷载类型选择 **Accel** 加速度，荷载名称选择 **UX**，非线性静力分析荷载施加控制选择位移控制并使用耦合位移，保存多步结果，仅保存正位移增量，考虑 $P-\Delta$ 几何非线性。从上次非线性工况终点状态继续选择非线性重力工况 **GRAV**。

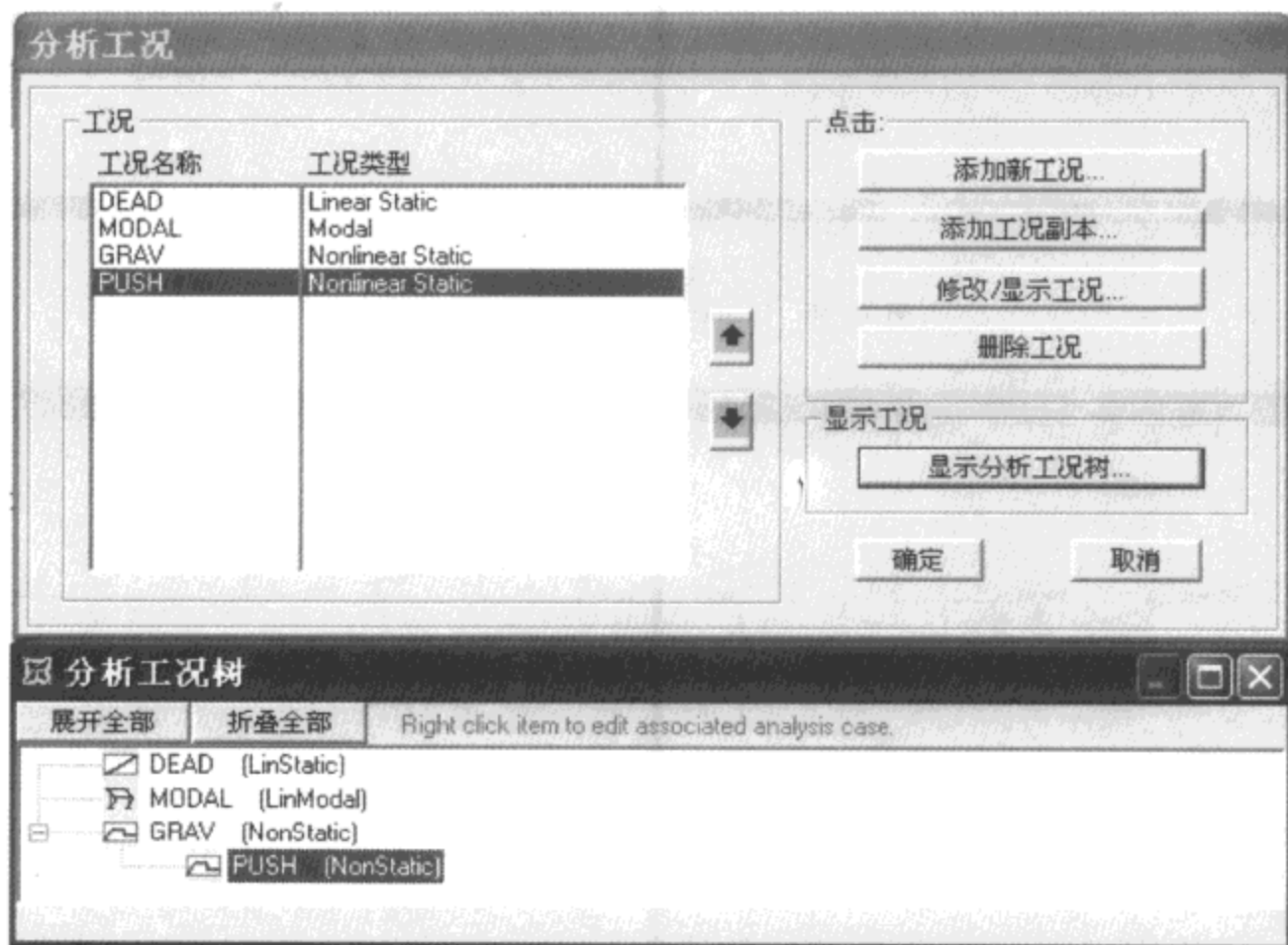




图 19-34 定义静力非线性工况及分析工况树

运行分析后，通过显示菜单中的命令进行结果查看。点击【显示】>【显示变形形状】命令和【显示】>【力/应力】>【框架/索/钢束】命令，选择 PUSH 工况，显示变形和内力图。点击屏幕右下角的  和  按钮，可以逐步查看结构变形、塑性铰出现和发展的过程。如图 19-35、图 19-36 所示为第 14 步和 15 步的结构变形图和弯矩图。

图中显示的结构推覆过程中，圆点部位是出现塑性铰的部位，并且圆点的颜色显示了塑性铰在力-变形关系曲线中的位置，视图中最下面的颜色条分别对应塑性铰力-变形关系曲线中的特定状态点。字母 B、C、D、E 以及 IO、LS、CP 与图中的各点相对应。结构随着塑性铰的不断出现和发展，侧向位移将增大，抗侧能力将降低。第 14 步到 15 步出现铰卸载时弯矩降为零的情况。

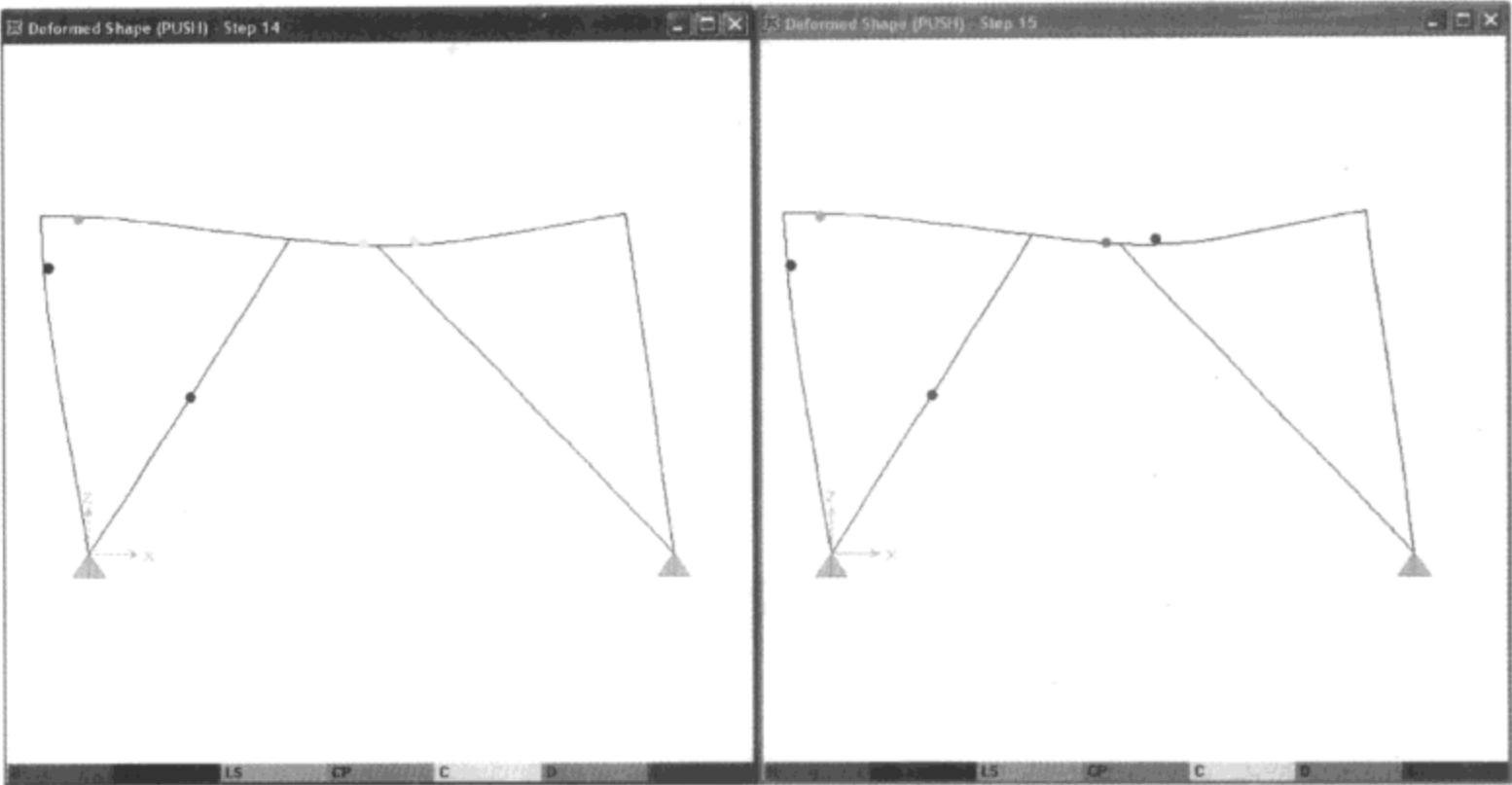


图 19-35 Pushover 分析变形结果显示

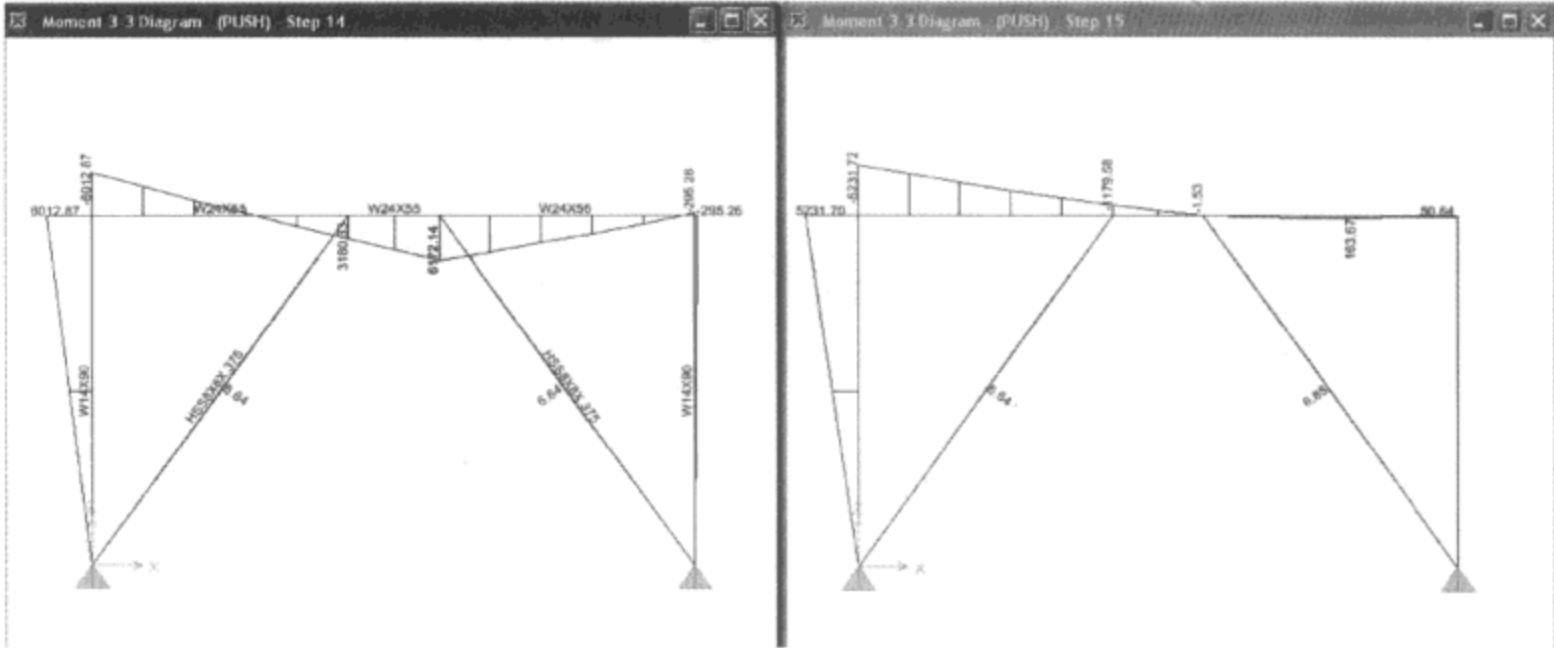


图 19-36 构件内力图

点击【显示】>【显示静力 Pushover 曲线】命令，弹出 Pushover Curve 对话框。该对话框可以显示基底剪力与监测位移曲线、ATC-40 能力谱、FEMA 356 系数法、FEMA 440 等价线性、FEMA 440 位移修正几项结果。首先选择静力非线性工况，然后选择绘图类型。

图 19-37 中横坐标为监测位移 (Displacement)，纵坐标为基底剪力 (Base Reaction)，位移是负值，由右向左变化。可以看到随着监测位移的绝对值不断增加，基底剪力绝对值开始时不断增加，直到达到最大值后，由于第一次铰的出现产生一次突然下降，并在这之后由于结构其他构件的塑性铰不断出现，基底剪力不断下降。

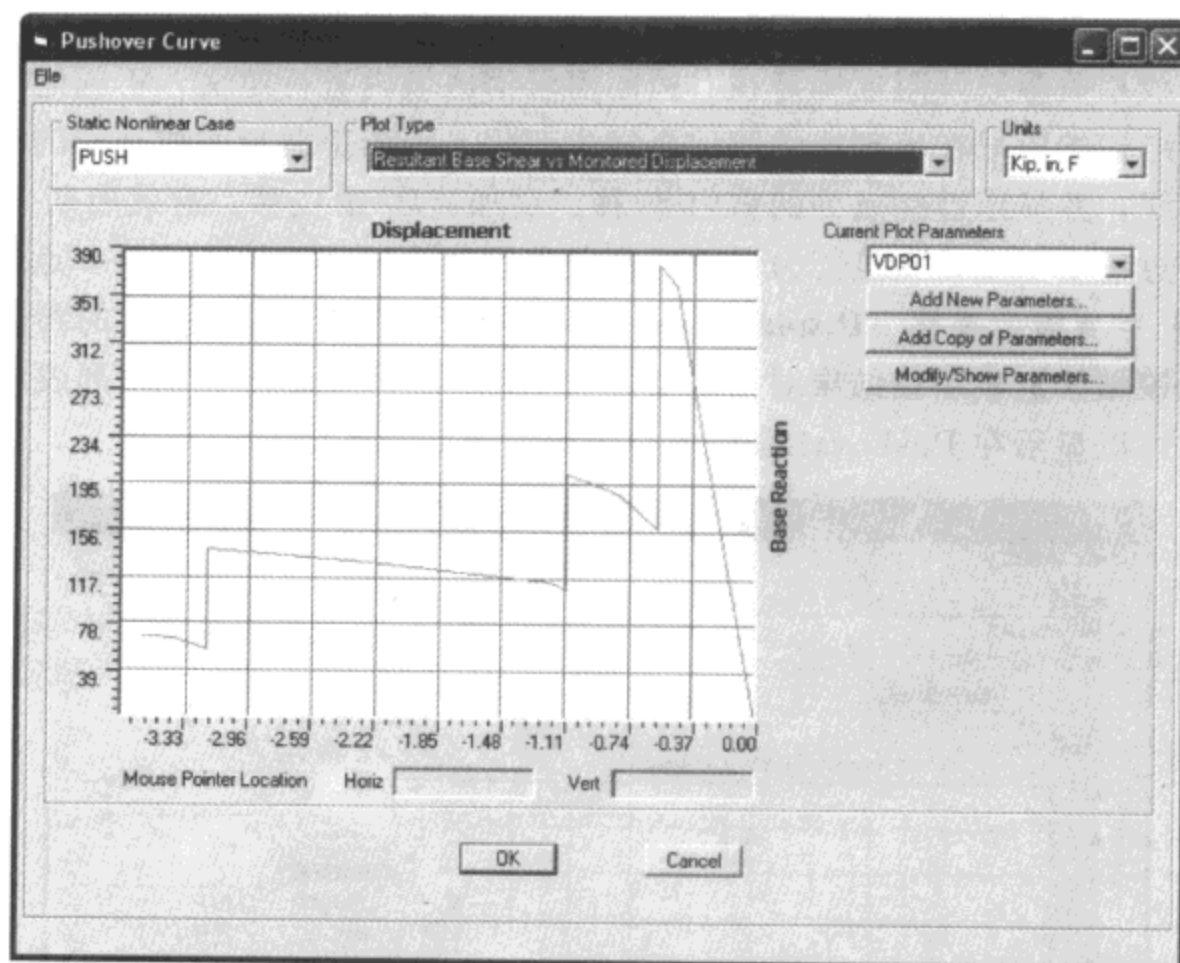


图 19-37 Pushover 分析位移曲线

选择该对话框中绘图类型中的 ATC-40 Capacity Spectrum, 将显示如图 19-38 所示:

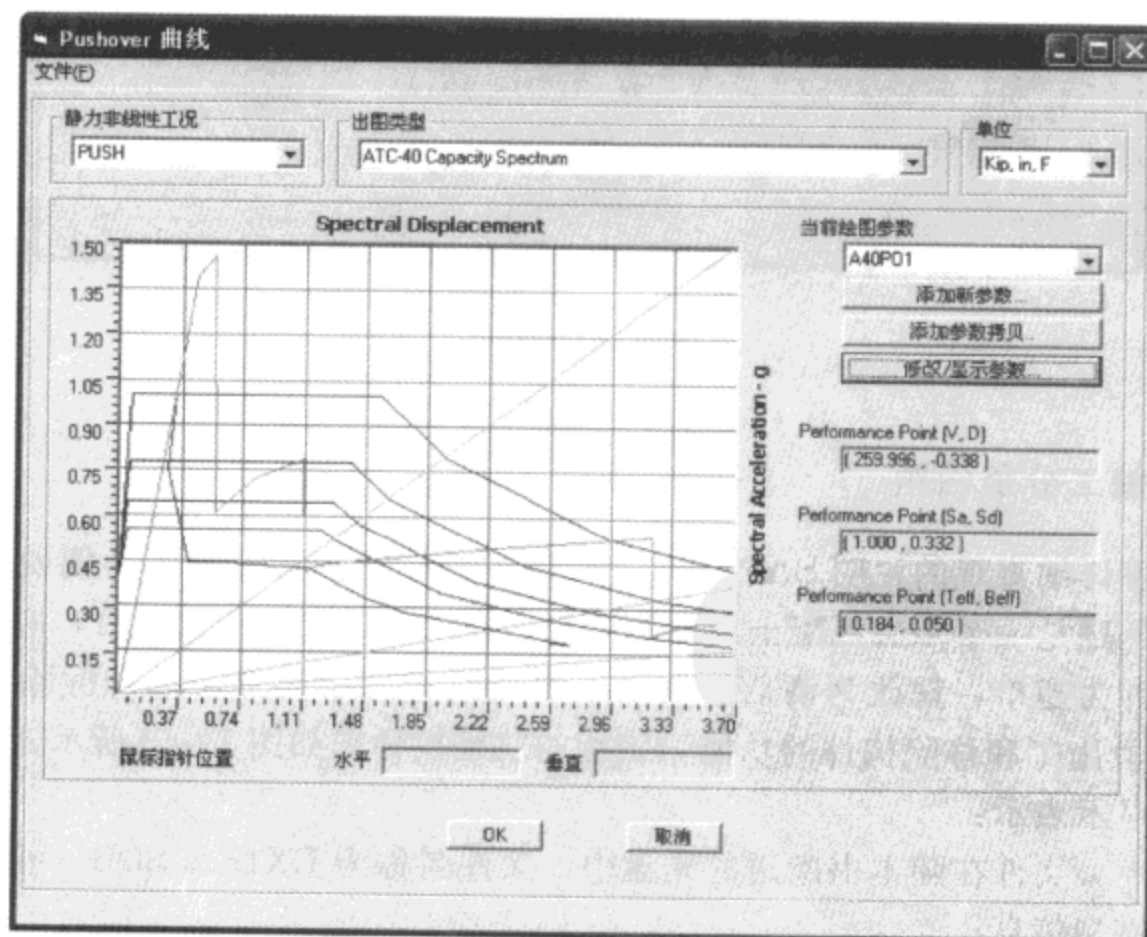


图 19-38 Pushover 分析能力谱曲线

图中显示区域内绿色曲线为结构抗侧能力谱，红色曲线为需求谱曲线，结构需求谱是一族谱线值，谱线相关参数及阻尼比是在右边的需求谱区域内进行定义，不同的曲线之间的阻尼比不相同，结构的阻尼在出现塑性铰后会发生变化，图形中黄色曲线显示的是可变阻尼的单一需求谱曲线，并显示性能点处的剪力-位移、谱加速度-谱位移、有效周期-有效阻尼。在结构推覆分析过程中主要是衡量能力谱曲线和需求谱曲线之间的位置关系。点击对话框中的【文件 (File)】>【显示表格 (Display Table)】命令，可以显示每步相应的参数。运行【显示】>【显示铰结果】显示铰结果对话框如图 19-39 所示。从选择铰下拉列表中选择铰并选择分析工况，可以显示在 Pushover 分析中每个铰的实际情况。

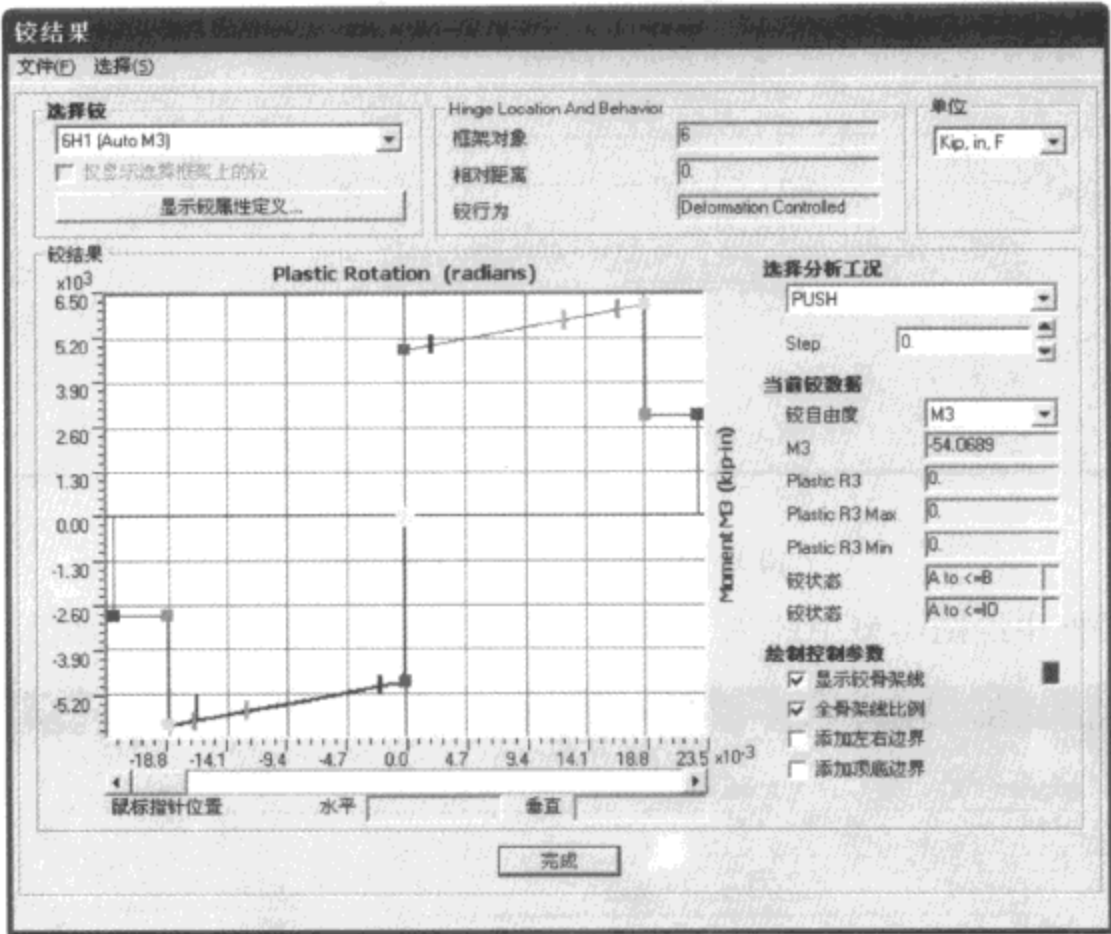


图 19-39 铰结果

19.3.2 阶段施工分析例题

为了能够更详细直观的说明 SAP2000 阶段施工分析的功能，下面举例说明阶段施工的操作过程。本例题是一个多层混凝土纯框架结构，在已经完成土建施工后，应用目的发生变化，工程原设计为超市，现改为酒店，所以需要对该结构的中间部分进行拆除。用本例说明 SAP2000 的阶段施工和移除构件的功能。工程的三维拉伸图如图 19-40 所示，需要拆除的部分按其他颜色显示表示：

该工程的模型文件在随本书赠送的光盘中，文件名称为 EX19-2. SDB，可以通过该文件了解更详细的模型信息。

该模型要拆除的顺序分三步，第一步拆除最上一层；然后拆除第二层；最后拆除第一层。建立几何模型之后将要分部拆除的构件按每步分成相应的组。运行【定义】>【分析工

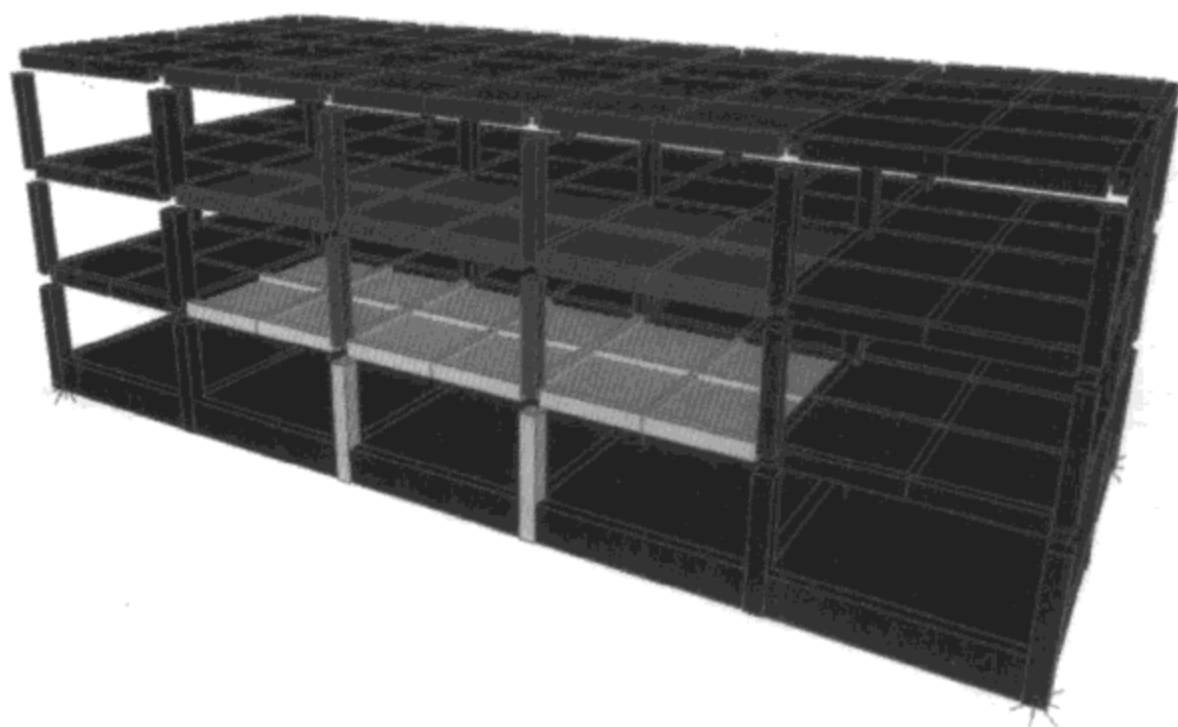


图 19-40 结构模型

况】命令并添加新工况。选择分析工况类型为 **Static**，分析类型为非线性阶段施工。分别添加 4 个阶段，第 1 阶段为添加整个结构并添加恒载和活载，第 2~4 阶段为移除相应分组的结构部分，因为本例题不考虑收缩徐变效应故各个阶段的时间可以定为 0，并保存各阶段结束的结果，如图 19-41 所示。考虑收缩徐变效应阶段施工参见桥梁一章。

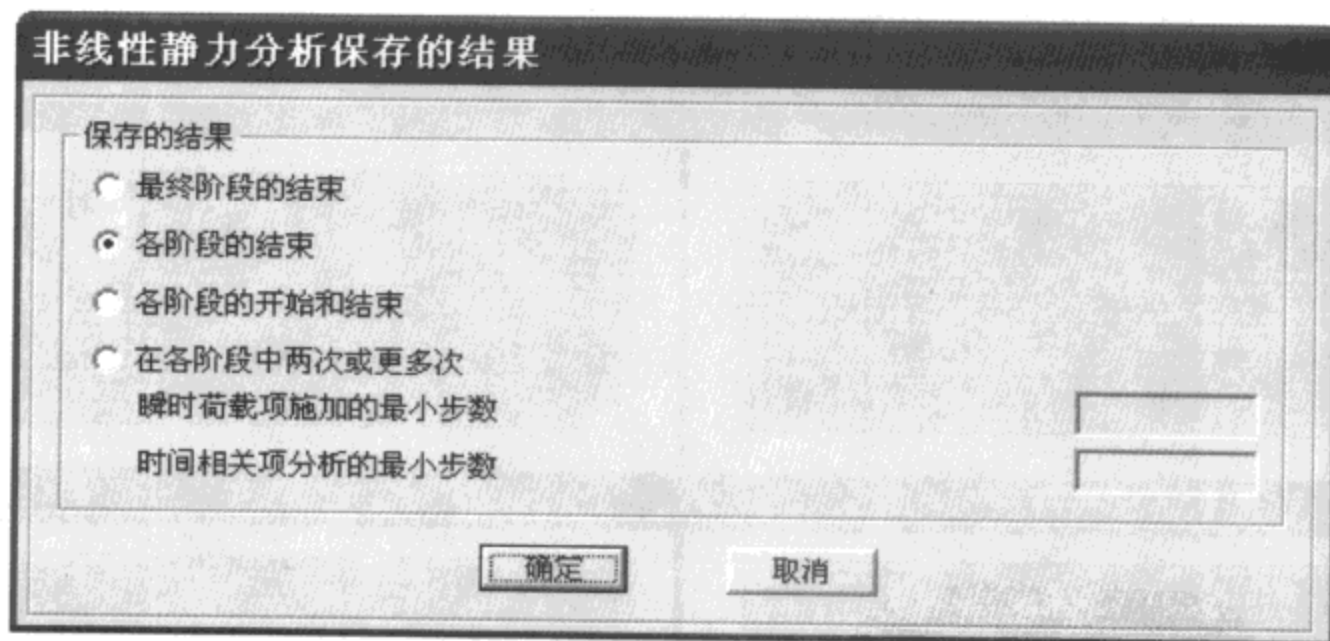



图 19-41 阶段施工分析工况

点击【分析】>【运行分析】，选择定义的阶段施工工况并运行分析。点击【显示】>【显示变形形状】，可以查看各阶段的变形图。点击【显示】>【显示力/应力】>【框架/索/钢束（壳）】，可以显示结构的内力图。点击屏幕右下角的按钮可以逐步查看结构内力变化的过程。

为了比较拆除过程中的分析结果，选择边榀框架立面图查看弯矩结果。图 19-42 显示了拆除过程中弯矩 M_3 的变化过程。

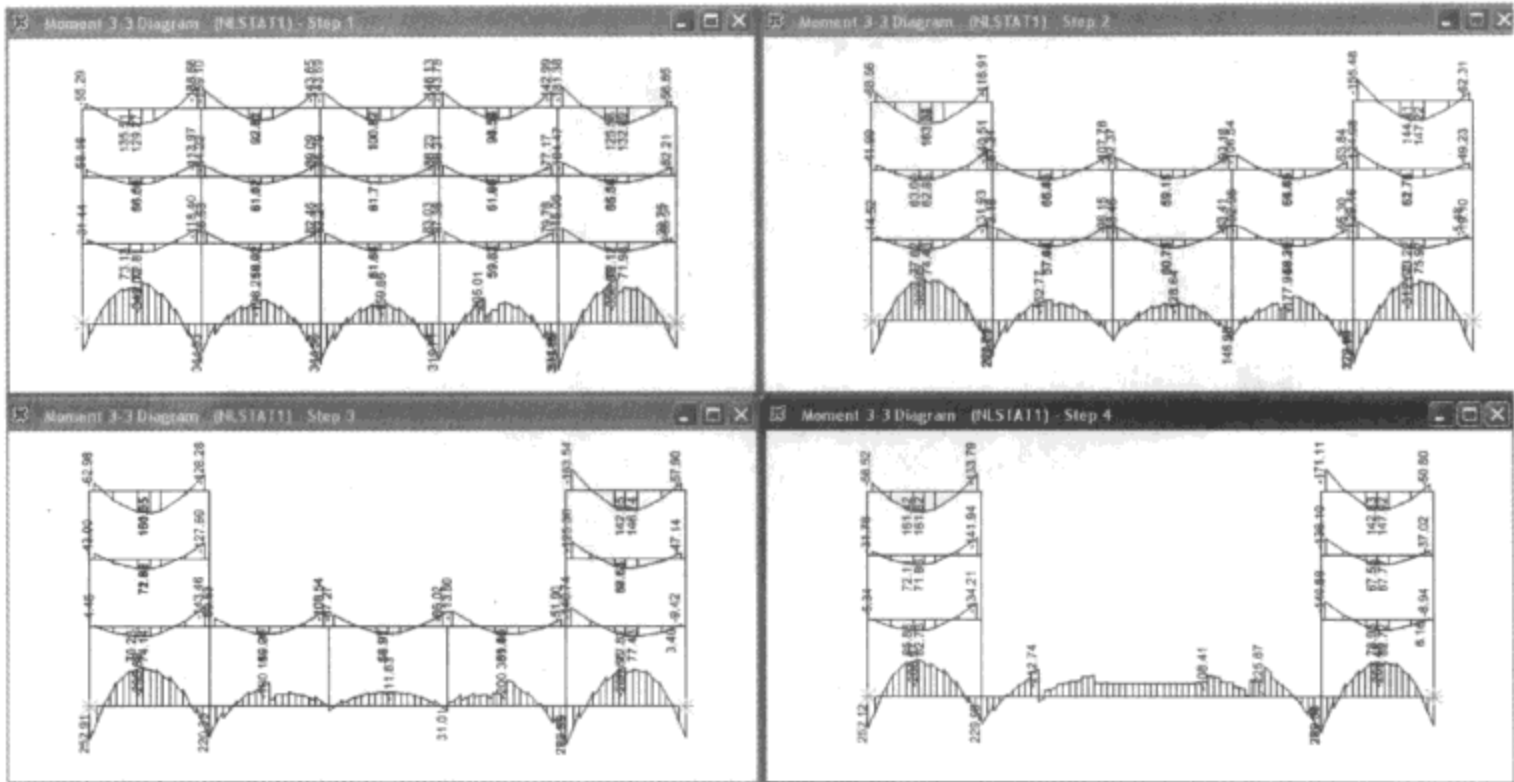


图 19-42 拆除过程梁的弯矩变化

如图中所示：第一步是结构未拆除状态的弯矩图。随着结构构件的拆除，底板处弯矩在中柱下位置由负弯矩逐步变为正弯矩。原来设计的配筋以抵抗负弯矩为主，需要对这些部位进行处理，如加浇一层混凝土并配相应的钢筋。

图 19-43 中显示了拆除过程中底板的最大应力变化过程，可以看出底板中柱位置在拆除过程中应力也有较大的变化，需要对底板进行相应的处理。

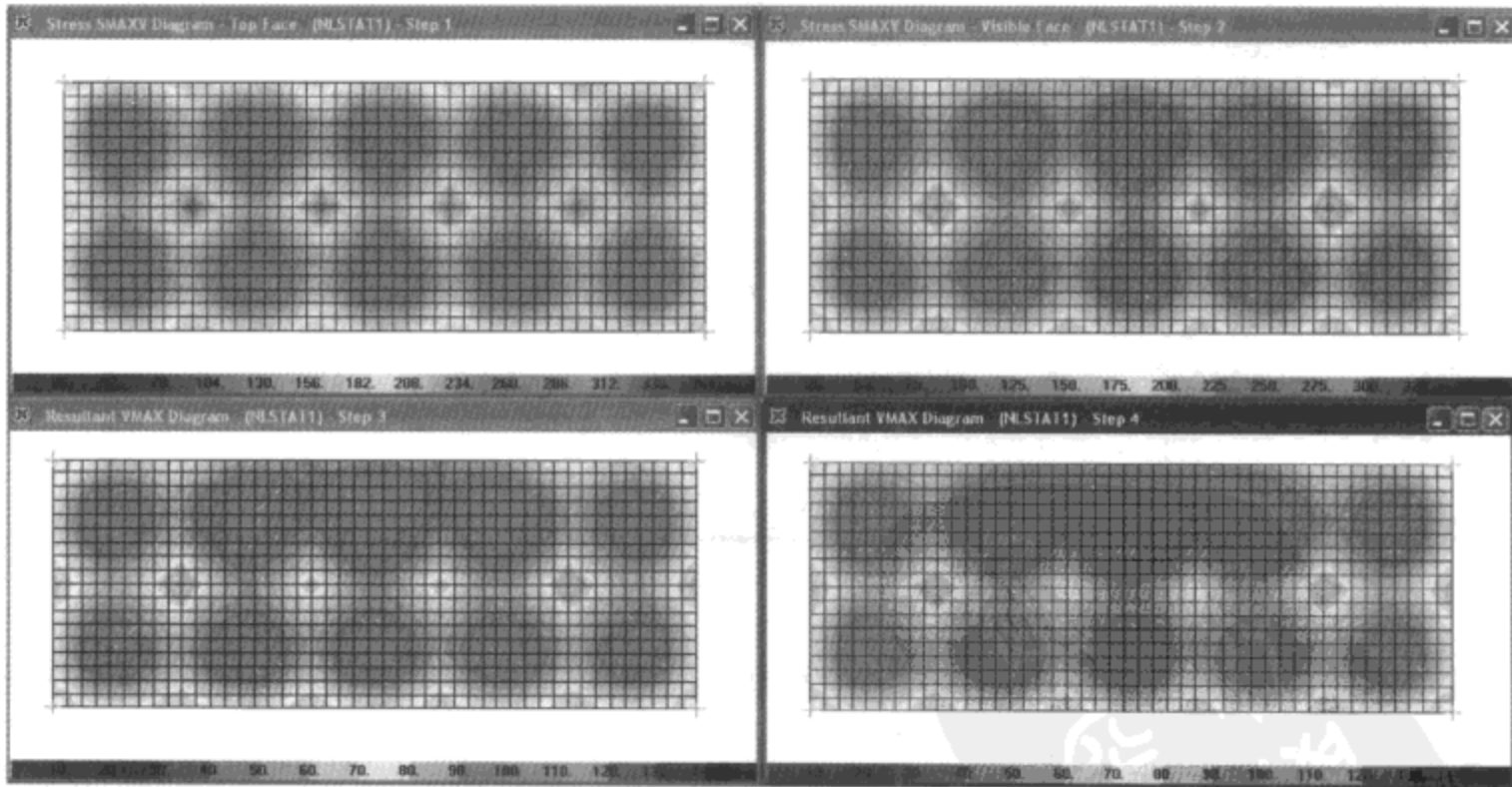


图 19-43 底板应力

显示 M2 查看拆除过程中柱子内力的变化，由图 19-44 可看出原来位置的中柱在拆除过程中变成边柱，内力重新分配导致柱弯矩增大，同时由于边柱与中柱的构造要求不同，需要

对这些柱子进行补强处理。

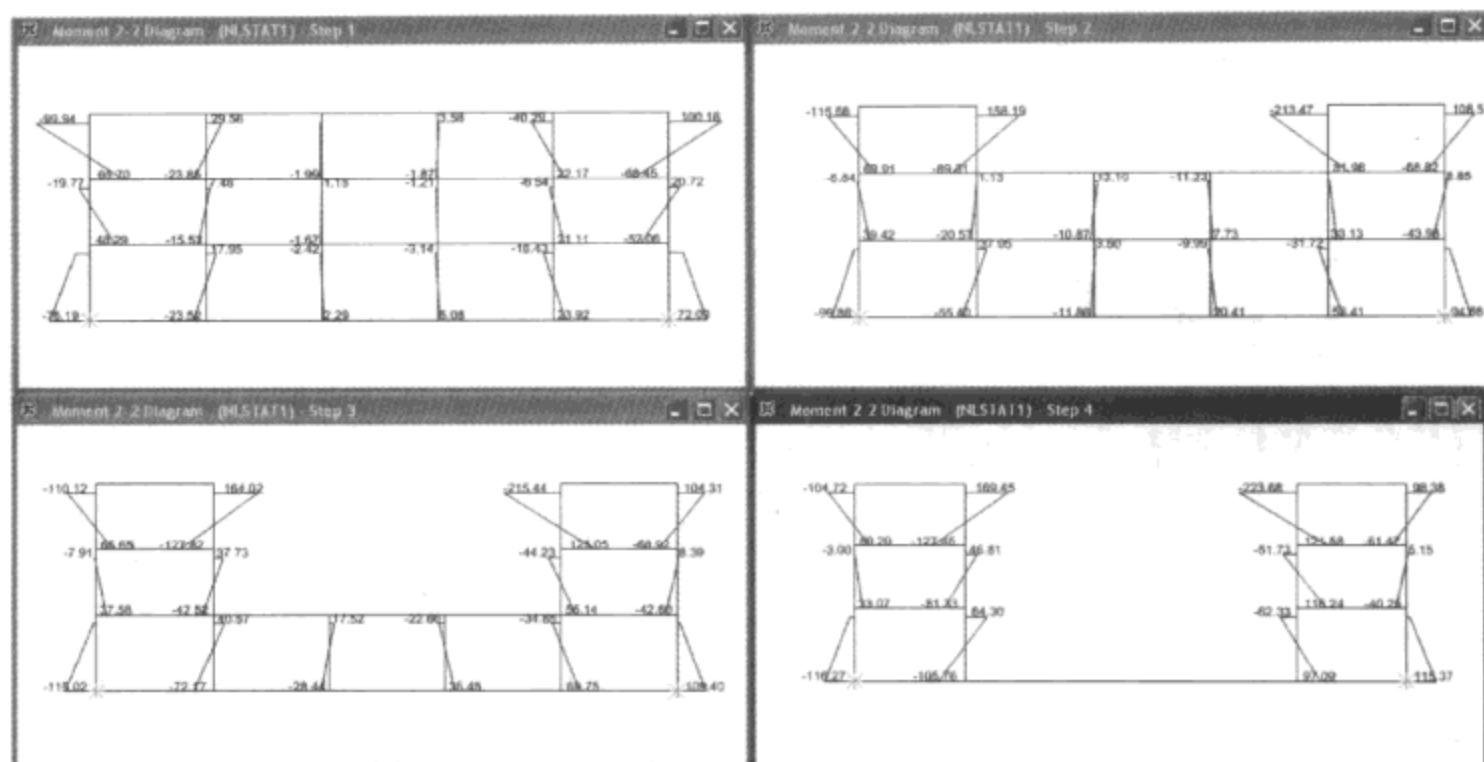


图 19-44 拆除过程中柱子弯矩变化

对于阶段施工分析，除可以进行类似本例的拆除过程分析外，也可以对逐层施工过程进行阶段施工加载分析。需要说明的是实际结构的施工是逐层进行的，因而每层结构的荷载也是随着施工进度逐层自下而上施加的。结构在施工过程中逐层承受荷载，并发生相应的变形，但这种变形不会影响到尚未建成的上层结构，即下层结构的荷载对上层结构的内力与变形没有影响。随着施工的进行，结构的刚度在不断地变化，这样每次计算时只施加一层荷载，而结构刚度矩阵每次都要发生变化。当结构施工完成时，最后的内力和位移分析结果分别为每一次加载计算内力和位移结果的叠加，属于结构和荷载都变化的非线性分析过程。SAP2000 采用了这种准确模拟结构施工过程的计算分析方法，就可以真实模拟阶段施工荷载的过程。

第20章

非线性动力分析

本书前面已经介绍了使用 SAP2000 进行线性动力分析的基本内容，线性动力分析的主要任务是处理结构在多遇地震及一般动力荷载作用下的效应问题，在这阶段，结构并没有进入到塑性发展阶段，因此结构的响应控制在线弹性的范围内。

根据我国规范提出的结构抗震设计中“小震不坏、中震可修，大震不倒”三个设防水准，以及弹性阶段承载力设计和弹塑性阶段变形验算的两阶段设计理论，进入到大震状态（罕遇地震）是允许结构部分构件出现塑性发展的，并且需要程序能够进行一定深度的弹塑性分析并给出相关的效应结果。此外，目前很多实际工程中已经开始使用隔振器、阻尼器等复杂的保护装置，这些装置一般需要使用非线性连接单元去模拟，而线性时程分析不能够考虑非线性连接单元的非线性属性。综上所述，特定工程需要进行相关条件下结构的非线性动力分析，也就要求程序能够完成这一分析。

SAP2000 可以在进行非线性时程分析中考虑结构构件的塑性发展（塑性铰），可以考虑复杂的隔振器、阻尼器等非线性连接单元，也可以完成冲击、爆炸等复杂的动力荷载作用下结构效应分析，本章将结合这些非线性时程分析的具体问题阐述其定义方式及相关需要注意的问题。另外，非线性时程分析本质上仍然是一种动力时程分析，不同之处在于它可以综合考虑结构中的非线性属性，因此部分参数选择和设置方式与线性时程分析是相同的，对于这类问题由于在线性时程分析中已经进行阐述，本章不会重复描述，本章的重点在于使用 SAP2000 进行非线性时程分析时所能够考虑的非线性属性及其意义。

20.1 非线性时程分析工况的定义及相关概念

本章将分别介绍非线性时程分析的相关概念、快速非线性模态积分方法和几种常见的非线性分析类型。下面从非线性时程分析工况的定义出发，阐述非线性时程分析所涉及的几个基本概念。

20.1.1 时程函数的定义

与线性时程分析相同，非线性时程分析首先需要定义时程函数曲线，定义方式与线性时程分析是相同的。如果需要进行罕遇地震作用下结构的非线性分析，需要选择地震波曲线，可以使用程序联机带有的常用地震波形式以及我国规范常用的几种场地状态下地震波曲线，并通过峰值控制来得到罕遇地震的地震时程曲线。

除了罕遇地震作用以外，作用于结构更复杂的动力荷载一般需要提供该作用的数据形式或工程师根据荷载特征构建荷载作用的数据形式，比如一定的冲击荷载作用或爆炸荷载作用。对于这类荷载数据形式的形成和使用方式与线性时程分析中所描述的时程曲线形成的方式相同，对于几种典型动力作用的时程曲线，我们在本章后面相关专题将会再次涉及到。

20.1.2 时程工况的定义

与线性时程分析相同，完成时程函数曲线定义之后，需要定义非线性时程分析工况。当选择【添加新工况】并在分析工况类型下拉菜单中选择 **Time History**，可以弹出时程分析工况定义对话框。非线性分析工况定义对话框与线性时程分析对话框是相同的，见图 20-1。

图 20-1 时程工况定义对话框

如果需要定义的是非线性时程分析，首先需要在分析类型选项中选择非线性分析类型。与线性时程分析相同，需要选择时程分析的类型，关于时程类型在线性时程分析已经进行了全面的阐述，其意义与线性时程分析相同，因此本章就不再赘述。当选择为直接积分时，可以为该工况定义初始条件，初始条件的意义在线性时程分析中已经阐述，并且该节中也描述了在初始条件的定义中需要注意的问题，这里也就不再多说了。

20.1.3 积分方式和阻尼设置

非线性动力分析中结构某些单元的属性随时间的变化可能是非线性的，或结构某一方面效应随时间的变化是非线性的，但是对于每一时刻结构系统的经典力学平衡方程仍然是成立的，因此传统的非线性求解方法仍然是通过每一个时程积分时刻的平衡方程进行求解的。与线性相同，非线性时程分析对于每一时刻的平衡方程的积分方式仍然分为两大类——模态积分和直接积分。对于直接积分方式，非线性时程分析常用的积分方式与线性分析是相同的，这在本书的第十三章线性动力分析中已经介绍过，本章不在重复叙述。对于模态积分方法，SAP2000 程序采用了一种新的求解方法——Fast Nonlinear Analysis Method（快速非线性分析法），将在本章下一节介绍这种方法。

非线性时程分析工况中对于不同的时程类型也需要进行相关的阻尼设置，这一点仍然与线性时程分析定义方式相同，相关内容可以参见第十三章。但是如果在结构中考考虑非线性连接单元时，程序将允许单独定义非线性连接单元的阻尼属性，这些阻尼属性有时是随着时间发生非线性变化的，SAP2000 程序将同时考虑结构非线性连接单元和非线性时程工况的阻尼属性，综合计算结构在动力分析中的阻尼效应。

在非线性时程分析过程中，当选择时程类型为直接积分时，需要考虑并选择时程积分的方式。在非线性时程分析中时间积分可以选择的方式及其意义与线性时程分析相同，相关内容可以参见第十三章。值得一提的是，对于非常大的结构系统，把振型叠加和增量法结合起来对于具有少量非线性构件的系统是很有效的。SAP2000 程序的新版本中已经加入了这种方法。

20.1.4 SAP2000 非线性类型

在使用 SAP2000 进行非线性时程分析之前还需要明确一个概念，即程序中可以考虑结构非线性属性的范围。目前 SAP2000 程序可以考虑的非线性属性根据性质分为四个类型：几何非线性、材料非线性、边界非线性和连接单元的非线性，这些类型也基本涵盖了结构分析所需要考虑的几种非线性类型。但是需要注意，并不是所有非线性时程分析类型都可以考虑这些非线性类型，不同的时程类型所能够考虑的非线性的类型是不一样的，这一点在后面的内容中会进一步说明。

几何非线性主要是指 $P-\Delta$ 效应、几何大变形分析等与结构几何性质相关的非线性。传统意义上的线性静力和动力分析都是以结构小变形假设为基础的，这对于一般结构体系是适用的，但是对于大跨度或柔性结构体系一般就不适用了。几何非线性的主要任务是在这一假设与实际结构相差比较大的情况下，考虑真实大变形的情况。材料非线性主要是指构成建筑结构材料属性所带来的结构非线性，对于建筑结构常用的钢材和混凝土材料，其应力-应变在一定应力范围内的表现基本是线性的，这是我们常规结构分析和设计的基础，而当应力超过这一范围后则会表现出很强的非线性属性，因此结构材料承载力特性总体上就会表现为非线性属性，结构材料的非线性还包括有些时候在结构分析中考虑的单拉或单压结构材料单元。边界非线性指的是边界接触问题，比如常见的缝隙问题和边界连接问题，可以使用 SAP2000 的缝隙单元或钩单元来实现；连接单元的非线性主要是指结构设计中考虑附加的

阻尼器和隔振器等装置的非线性属性，这类结构单元不仅表现为非线性的属性，而且还可以通过滞回曲线的定义考虑单元往复加载过程中的塑性发展和能量耗损的特性。

需要说明的是，对于材料非线性的考虑和实现，SAP2000 目前仅限于框架单元（梁、柱及支撑），并没有给出面单元（比如剪力墙）以及实体单元的塑性破坏模型。此外，对于框架单元的材料非线性是体现在塑性铰属性上的，也就是当单元截面内力大于该截面的承载力极限时，该截面将会卸载直至表现为铰接的形式，这一内容将在后面相关的小节中进行讨论。对于单拉、单压，包括索单元的单拉属性，是需要在框架属性定义中进行相关定义和考虑的。

在一定的单元范围内，SAP2000 对于这四个类型的非线性都能够考虑到，而且均能够在非线性时程分析中进行考虑。但是对于模态积分和直接积分两种积分方式的非线性分析所能够考虑的非线性属性是不一样的。当使用模态积分非线性分析时，只能考虑结构中边界及连接单元的非线性，包括缝、钩、弹簧等非线性连接单元和阻尼器、隔振器等非线性连接单元；而当使用直接积分非线性分析时，可以考虑全部四种类型的非线性形式。

当选择模态积分类型非线性时程分析工况时，程序将默认选择考虑非线性连接单元的非线性，而且这一选择是不能够进行自定义修改的。当选择直接积分类型非线性时程分析时，程序将默认选择考虑所有材料非线性和连接单元非线性，并且也是不能够进行修改，但是对于 $P-\Delta$ 效应和几何大位移的几何非线性，工程师可以选择考虑或不考虑，程序默认是不考虑的。此外需要注意，在两种积分方式中，非线性属性列表中时间相关的材料属性始终不会被选中，由于这一内容涉及到施工阶段混凝土材料属性龄期相关的非线性变化，而这一点在时程分析中是没有意义的，因此非线性时程分析不考虑这一属性。这一属性仅在另一种非线性静力分析——施工顺序加载分析中考虑。

20.2 快速非线性分析(FNA)方法

传统非线性模态积分求解方法是在每个荷载增量时形成完全的平衡方程并进行求解，也就是我们所说的“蛮力方法”（“brute force method”）。这种方法每个时间步长对全部结构系统重新形成刚度矩阵，并在每个时间增量内要求通过迭代来满足平衡要求，因此即使是规模不大的结构也需要耗费大量的时间来计算。

SAP2000 程序，以及 CSI 公司推出的另外一套针对于建筑结构有限元分析和设计软件 ETABS 没有采用“蛮力方法”进行非线性分析，而是使用了一种新的非线性分析方法——Fast Nonlinear Analysis Method（快速非线性分析法），简称 FNA 方法。本节的主要内容是对 FNA 法进行较为全面的介绍，这一新方法的主要优势在于运算速度，一般情况下，它可以比传统方法快几个数量级。下面我们就从基本平衡方程出发，对 FNA 法进行简要的介绍，相关内容也可以从 Wilson 所著的其他程序理论书籍中查阅。

20.2.1 基本平衡方程

虽然解决的是非线性问题，但是对于每一时刻基本力学方程，包括平衡、力-变形和协调性等要求，FNA 法也是满足的。在 t 时刻，结构计算模型精确的力平衡由下列矩阵方程

.....

表示:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) + R_{NL}(t) = R(t) \quad (20-1)$$

对于式 (20-1), 我们可以看出其与结构二阶线性微分方程组 (11-2) 是很相似的, 不同之处是引入了 $R_{NL}(t)$ 项, 该项是来源于非线性单元力总和的整体节点力向量, 是通过在每个时间点上的迭代计算出来的。除此之外, 需要指出的是方程中 K 为弹性刚度矩阵, 因此它忽略了非线性单元的刚度。

对于添加了非线性连接单元的模型, 一般情况下也是需要作一定的线性分析的。在线性分析时, 非线性单元的属性将被忽略, 这时结构模型可能是不稳定的, 因此考虑这一情况, 可在非线性单元的位置添加任意刚度的“有效弹性单元”, 来考虑非线性单元在线性分析工况中的属性。如果在方程 (20-1) 的两边加上这些有效力 $K_e u(t)$, 精确的平衡方程可写为:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + (K + K_e)u(t) = R(t) - R_{NL}(t) + K_e u(t) \quad (20-2)$$

式中 K_e 是任意值的有效刚度。方程 (20-2) 可以改写为下列形式:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + \bar{K}u(t) = \bar{R}(t) \quad (20-3)$$

弹性刚度矩阵 \bar{K} 等于 $K + K_e$, 并且是已知的。有效外部荷载 $\bar{R}(t)$ 等于 $R(t) - R_{NL}(t) + K_e u(t)$, 必须以迭代方式计算。如果对有效弹性刚度进行了较好的估计, 收敛速度就可能加速, 这是因为未知的荷载项 $-R_{NL}(t) + K_e u(t)$ 很小。

在任意时刻, 非线性单元内的 L 个非线性变形 $d(t)$ 可从下面的位移变换方程计算出来, 并且可以推导出非线性变形中与时间相关的变化率 $\dot{d}(t)$:

$$d(t) = bu(t) \quad \dot{d}(t) = b\dot{u}(t) \quad (20-4)$$

如果所有非线性单元中的时程变形和速度是已知的, 在任意时刻非线性单元的非线性力 $f(t)$ 可由每个非线性单元的非线性材料属性精确地计算出来, 并且非线性力只能通过在每个时间点上的迭代来完成。

20.2.2 非线性模态方程的形成

与线性二阶微分方程的求解类似, 求解方程 (20-3) 的第一步是要计算一组 N 个正交荷载相关的 Ritz 向量 Φ , 使其满足下列两个方程:

$$\Phi^T M \Phi = I \quad \Phi^T \bar{K} \Phi = \Omega^2 \quad (20-5)$$

式中 I 为单位矩阵, 而 Ω^2 为对角矩阵, 在该对角矩阵中, 对角项被定义为 ω_m^2 。系统的响应现在可以通过引入下面的矩阵变换用向量来表示:

$$u(t) = Y(t) \quad \dot{u}(t) = \Phi \dot{Y}(t) \quad \ddot{u}(t) = \Phi \ddot{Y}(t) \quad (20-6)$$

把这些方程代入方程式 (20-1) 并在方程式两边同乘以 Φ^T , 这将产生一组可由下面矩阵方程表示的 N 个非耦合方程:

$$I\ddot{Y}(t) + \Lambda\dot{Y}(t) + \Omega^2 Y(t) = F(t) \quad (20-7)$$

其中线性和非线性模态力由下式得出:

$$F(t) = \Phi^T \bar{R}(t) = \Phi^T R(t) - \Phi^T R_{NL}(t) + \Phi^T K_e u(t) \quad (20-8)$$

阻尼矩阵可对角化的假设是和线性微分方程振型叠加法一致的，矩阵 \mathbf{A} 的对角项为 $2\xi_n\omega_n$ ，其中 ξ_n 是振型 n 的阻尼比。在结构中的任何位置上与集中阻尼器相关的力可作为非线性力向量的一部分。

与线性振型叠加法相似，这里也可以考虑与荷载相关的 LDR 方法，如果所用的 LDR 向量数等于自由度 N_d 的总数，式 (20-7) 在时间 t 处就是精确的。因此，如果使用非常小的时间步长并在每个时间步长中都使用迭代，此方法会收敛到精确解。LDR 向量的使用可明显减少所需的振型数量。

因为 $\mathbf{u}(t) = \Phi \mathbf{Y}(t)$ ，非线性单元中的变形可按模态坐标直接表示为：

$$\mathbf{d}(t) = \mathbf{B} \mathbf{Y}(t) \tag{20-9}$$

其中单元变形-模态坐标变换矩阵由下式定义：

$$\mathbf{B} = \mathbf{b} \Phi \tag{20-10}$$

在任意时刻，只要给出了非线性单元的变形与行为历史，就可根据基本的非线性属性以及单元的变形历史来计算非线性单元中的力 $\mathbf{f}(t)$ 。根据虚功基本原理，非线性模态力由下式计算：

$$\mathbf{F}_{NL}(t) = \mathbf{B}^T \mathbf{f}(t) \tag{20-11}$$

有效弹性力也可重写成：

$$\mathbf{F}(t)_e = \Phi^T \mathbf{K}_e \mathbf{u}(t) = \Phi^T \mathbf{b}^T \mathbf{k}_e \mathbf{b} \mathbf{u}(t) = \mathbf{B}^T \mathbf{k}_e \mathbf{d}(t) \tag{20-12}$$

式中 \mathbf{k}_e 是局部非线性单元参考系的有效线性刚度矩阵。

20.2.3

非线性模态方程的求解

在求解模态方程之前，第一个步骤需要计算不考虑非线性单元结构的荷载相关向量 (Load Dependent Vectors)。在开始逐步求解之前，对变形-振型变换矩阵 \mathbf{B} 也同样只需计算一次。一个典型的模态方程是：

$$\ddot{\mathbf{y}}(t)_n + 2\xi_n\omega_n\dot{\mathbf{y}}(t)_n + \omega_n^2\mathbf{y}(t)_n = \overline{\mathbf{f}}(t)_n \tag{20-13}$$

其中 $\overline{\mathbf{f}}(t)_n$ 是模态荷载，并且对于非线性单元而言，它是在同一时间点上的所有其他模态响应的函数。因此，模态方程组必须同时积分，而且需要通过迭代以获得在时间 t 处的所有模态方程的解。根据有关微分方程任意荷载解的求解办法，可以在较小时间增量内使用多项式近似得出荷载的近似解：

$$\ddot{\mathbf{y}}(t)_n + 2\xi_n\omega_n\dot{\mathbf{y}}(t)_n + \omega_n^2\mathbf{y}(t)_n = R_{i-1} + t\dot{R}_{i-1} + \frac{t^2}{2}\ddot{R}_{i-1} + \frac{t^3}{6}\dddot{R}_{i-1} \tag{20-14}$$

在式 (20-13) 的基础上，式 (20-15) 总结了在某一时间步长中对荷载线性或三次变量的模态方程的精确解，并以指数、平方根、正弦和余弦函数表示。

$$\overline{\mathbf{y}}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_i \\ \dot{\mathbf{y}}_i \\ \ddot{\mathbf{y}}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S(t) & C(t) & 1.0 & t & t^2 & t^3 \\ \dot{S}_i(t) & \dot{C}_i(t) & 0 & 1.0 & 2t & 3t^2 \\ \ddot{S}_i(t) & \ddot{C}_i(t) & 0 & 0 & 2.0 & 6t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \end{bmatrix} = \mathbf{B}(t)\mathbf{b} \tag{20-15}$$

根据微分方程的基本理论，并进行一定的公式推导，可以得到式（20-16）：

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_{i-1} \\ y_{i-1} \\ R_{i-1} \\ \dot{R}_{i-1} \\ \ddot{R}_{i-1} \\ \ddot{\dot{R}}_{i-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_D & -\bar{\omega} & 0 & 1.0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0 & 1.0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \omega^2 & 2\xi\omega & 2.0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega^2 & 4\xi\omega & 6.0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2\omega^2 & 12\xi\omega \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6\omega^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \end{bmatrix} \quad (20-16)$$

式（20-16）用矩阵形式表示为：

$$\bar{R}_{i-1} = C^{-1}b \quad (20-17)$$

结合式（20-15），我们就得到了式（20-18）精确解表达形式，并且它同时也是一个强大的递归关系。

$$\bar{y}_i = B(\Delta t)C\bar{R}_{i-1} \quad (20-18)$$

SAP2000 使用了精确分段多项式求解算法，并基于式（20-18）所给出的递归关系，可以以更快的速度完成微分平衡方程的求解。

对于非线性单元而言， $\bar{f}(t)_n$ 是在同一时间点上的所有其他模态响应的函数。因此，模态方程组必须同时积分，而且需要通过迭代以获得在时间 t 处的所有模态方程的解。以上模态方程求解的分段积分法允许较大的时间步长。

20.2.4 FNA 法小结及应用

快速非线性分析（FNA）方法是一种非线性分析的有效方法，在这种方法中，非线性被作为外部荷载处理，形成考虑非线性荷载并进行修正的模态方程。该模态方程与结构线性模态方程相似，因此可以对模态方程进行类似于线性振型的分解处理。然后基于泰勒级数对解的近似表示，使用精确分段多项式积分对模态方程进行迭代求解。最后基于前面分析所得到的非线性单元的变形和速度历史计算非线性力向量，并形成模态力向量，形成下一步迭代新的模态方程并求解。以上就是 SAP2000 程序中 FNA 法的基本思路和步骤，由于本书篇幅所限，SAP2000 所使用的 FNA 法的算法参见软件其他资料。

FNA 方法是简单而又非常有效的方法，特别是 FNA 方法与 LDR 方法结合使用，可以产生一组 LDR 向量以精确捕捉这些力的效应。在 FNA 方法中，通过对一个较小时步长中力的线性变化处理，可以精确求解简化的模态方程组，并且没有引入数值阻尼和使用较大时间步长的积分误差。

使用 FNA 方法时，计算模型必须在结构上是稳定的。因此，程序中，对于非线性连接单元，将同时被赋予非线性属性和使用有效刚度定义的线性属性，以保证结构所有工况的稳定性（这一点在后面还会谈到）。在非线性迭代求解期间，这一有效刚度单元中的力将被移到平衡方程的右边并去除。这些虚拟或有效的刚度单元不会把长周期引入基本模型中，因此会改进许多非线性结构求解的精度和收敛速度。

FNA 方法可以用于非线性结构动力分析求解，同时还可以对静力荷载分析工况进行求解，这时，只是需要将荷载通过若干步缓慢地加到定值，并添加较大的模态阻尼值以抑制结

构在该静荷载作用下的震动。最终的收敛解将处于静力平衡，并且不含有惯性力。需要注意的是，如果要使用此方法求解静力问题，则有必要使用与非线性自由度有关的 Ritz 向量法分析，而不应使用精确特征向量法分析。

使用 SAP2000 可以计算带有隔振、阻尼等非线性连接单元结构的非线性分析。在这类结构中能量的耗损比例是衡量单元效用的重要指标，SAP2000 程序通过把模态阻尼和非线性单元作为时间函数来计算并绘制总输入能量、应变能量、动能和能量的损耗。除此之外，程序还能够计算出能量误差，用户可以评估适当的时间步长。这些功能对于此类非线性分析是非常有用和方便的。

20.3 结构动力弹塑性分析

抗震规范第 3.6.2 条规定“不规则且具有明显薄弱部位可能导致地震时严重破坏的建筑结构，应按本规范有关规定进行罕遇地震作用下的弹塑性变形分析”，并且规定“此时，可根据结构特点采用静力弹塑性分析或弹塑性时程分析方法”。对于静力弹塑性分析经常被称为 Pushover（推覆）分析，原因是该分析主要是在一种侧向静力荷载的作用下，不断提高荷载值直至结构不同部位相继出现塑性铰而卸载导致整体倾覆的过程。Pushover 在本书的上一章中进行了详细阐述，本小节我们主要讨论动力弹塑性分析，也就是在时程分析工况中考虑框架结构材料非线性的分析方法。

20.3.1 动力弹塑性分析的应用范围

静力弹塑性 Pushover 分析是一种静力分析，结构分析将主要考虑侧向荷载作用平面内的响应，并由此判断结构单元的屈服状态。Pushover 分析是从单自由度结构体系发展过来的，因此这一分析从本质上讲只考虑了结构第一振型的动力特征，这对于我们选择何种荷载竖向分布方式是没有关系的。因此对于规则框架结构这一方法是相对比较成熟的，得到的结果一般情况下也是比较合理的。但是对于高阶振型且比较敏感的结构或平面布置比较复杂而产生较大偶然偏心的结构，采用静力 Pushover 分析的结果就不一定合适了。

因此规范规定“需要根据结构特点”来选择结构弹塑性分析方式，如果结构本身的薄弱部位不会在第一振型结构运动中反应出来，或者结构具有较大的扭转效应而没有在 Pushover 分析中得到反应，这时静力 Pushover 分析所提供的罕遇地震下弹塑性结果的可信度就会大大降低。那么对于这类结构我们就需要使用动力弹塑性分析方法来分析罕遇地震作用的位移反应。

SAP2000 所提供的动力时程分析是一个全三维的有限元分析，而且能够考虑计算结构在整个地震作用过程中每一时刻的内力和变形状态值，如果在时程分析过程中考虑框架单元的材料非线性（塑性铰），则非线性时程分析就可以给出结构在罕遇地震作用下构件屈服顺序，发现应力和塑性变形集中的部位，给出整个结构的屈服机制，对结构概念设计提供相应调整意见，这也是进行弹塑性时程分析的意义。

20.3.2 动力弹塑性分析基本过程

动力弹塑性分析首先需要定义框架单元的塑性铰，对于钢结构和混凝土结构程序提供了常用的默认铰属性，工程师根据需要可以对塑性铰进行自定义，关于这一部分内容与静力 Pushover 分析完全相同，此处就不再重复叙述了。

定义塑性铰以后，需要将塑性铰指定给框架单元，指定方式与静力 Pushover 分析完全相同。其原则是对于轴向应力铰一般指定在单元中部，对于其他类型的铰指定在单元的两端。另外，需要指出的是，对于实际工程的弹塑性时程分析需要占用的计算资源比较大，因此建议工程师对于经判断有可能为薄弱部位的单元指定相关塑性铰，而不要对于太多构件单元甚至全部构件指定塑性铰。

指定框架单元的塑性铰后，就可以进行弹塑性时程分析工况的定义了，这类时程工况的定义与一般时程工况定义相同。需要注意的是，如我们在前面对于程序所考虑非线性的讨论，模态积分的时程分析是不考虑结构材料非线性的，在这一类分析工况中不能够考虑框架单元的塑性铰。因此，如果需要进行弹塑性时程分析，在工况定义过程中必须选择直接积分的时程分析类型，这时程序会默认考虑框架塑性铰属性。

在定义时程分析工况以后，可以进行弹塑性时程分析，分析完成之后可以根据我们后面算例给出的结果查看方式进行结果查看和分析。

静力弹塑性铰的属性中卸载方式可以选择卸载整个结构、应用局部重分配和使用正割刚度重新开始三种方法，但是在动力弹塑性分析中程序将默认使用第二种卸载方法，即应用局部重分配。只是含有铰的单元被卸载。当一个铰在应力应变曲线的负斜率部分上，而且应用荷载引起应变反转时，程序将使用暂时的、局部的、自平衡的内部荷载以卸载此单元，这将引起铰卸载。在铰卸载之后，暂时的荷载被反转，传递移除荷载到附近的单元，这个方法模仿了局部惯性力稳定一个快速卸载单元的方式。

20.3.3 动力弹塑性分析需要说明的几个问题

在 SAP2000 中框架塑性铰是刚塑性的，也就是说塑性铰由刚性和塑性两个阶段组成，不存在弹性的阶段。由于没有弹性属性，因此与我们后面将谈到的非线性连接单元不同，添加到框架对象的塑性铰对框架单元的弹性属性没有影响，因此对于结构线性分析，比如结构的模态分析和线性动力分析不会产生影响。

由于塑性铰是刚塑性的，因此塑性铰在屈服之前无论是卸载状态还是重新加载状态，铰内部都不会发生任何变形（体现在塑性铰发展曲线上，是沿着铰发展曲线中与 Y 轴线重合部分变化），所有的弹性变形均发生在框架单元中。当塑性铰屈服以后，塑性铰内部将发生塑性变形，并且在卸载时沿着平行于 Y 轴的直线卸载。

当进行动力弹塑性分析时，由于动力荷载一般体现出一定的周期性，因此塑性铰将出现加载和卸载的反复作用，如果塑性铰在这些反复作用过程中没有达到屈服，则塑性铰不会发生任何变形，也不会产生能量的耗损。当作用的幅值足够大时，塑性铰将达到屈服，而进入塑性变形状态，此后在反复加载过程中，将沿着类似图 20-2 所示的滞回曲线轨迹发展，此时塑性将产生结构的能量耗损。为了能够判断该塑性铰所处的塑性发展阶段，图 20-3 同时

输出了铰曲线和塑性铰骨架曲线。

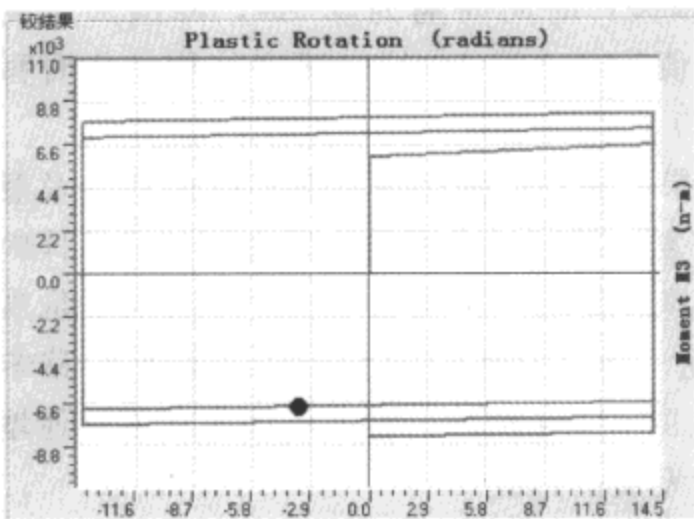


图 20-2 塑性铰曲线

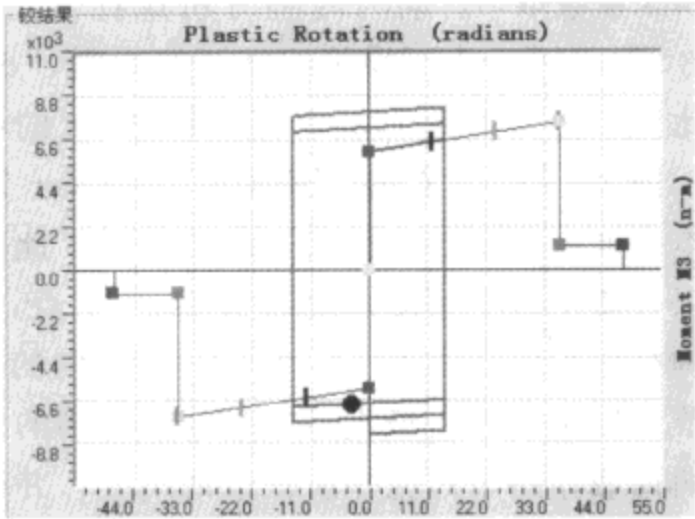


图 20-3 塑性铰+铰骨架曲线

通过图 20-3 可以看出结构塑性铰经过与 Y 轴重合的刚性段后进入到塑性加强段，此后迅速发生作用反转而卸载，并反向加载。因为本算例中我们使用的是比较稳定的正弦波，因此铰的发展趋向于相对稳定的状态，仅在塑性加强段的范围内滞回变化，这是符合理论判断的结果的。

20.3.4 动力弹塑性分析算例

图 20-4 给出了动力弹塑性分析的一个算例，该结构是一个十五层的单榀框架体系，层高均为 3m，对于该结构框架梁两端指定了主轴方向（M3）弯曲铰，框架柱底部指定了 PMM 铰。两种塑性铰皆使用了程序默认铰的属性，本例为混凝土铰，因此使用了 ATC-40 相关规定铰的形式，关于这种铰的卸载曲线形式和其他属性，可以参见前面非线性静力分析相关章节的内容。

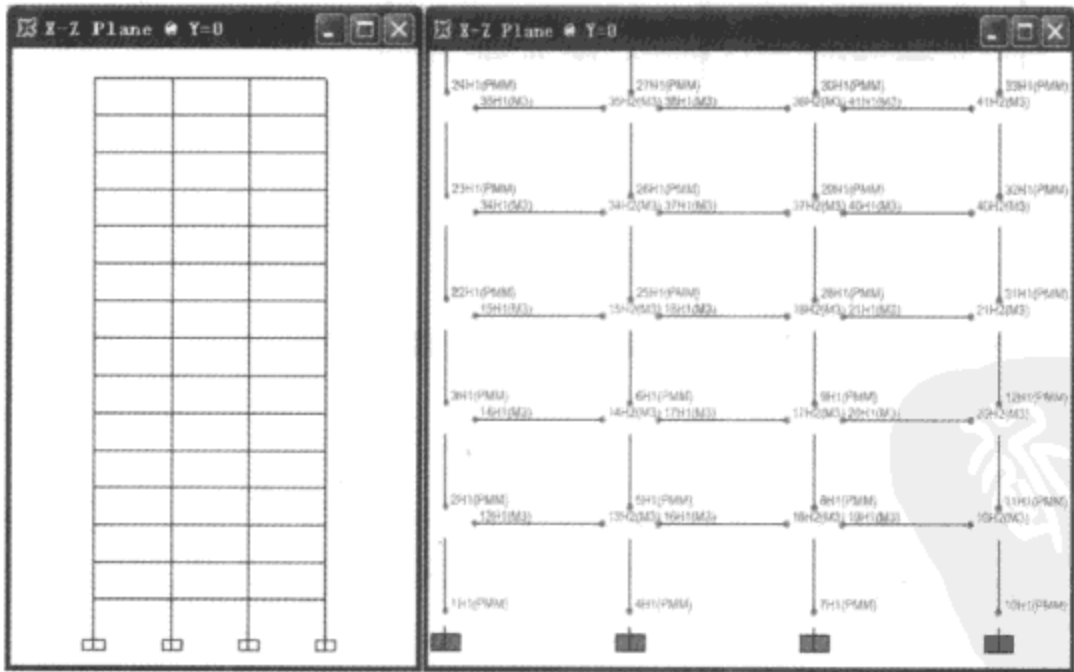


图 20-4 算例模型及铰属性定义方式

对于本算例，基于本书非线性静力分析（Pushover 分析）方法进行了弹塑性静力分析，并基于本章的方法进行了弹塑性动力分析。

动力时程分析工况使用直接积分方法，时间积分方法使用 Hiber-Hughes-Taylor 方法，Alpha 系数取 0。动力时程分析选择使用了某地震波，时间间隔为 0.02s，峰值加速度为 172.96cm/s^2 。为了模拟八度罕遇地震，也就是峰值为 400cm/s^2 的加速度作用，将时程作用比例系数设置为 2.33（注意须在 cm 的单位制下）。

图 20-5 给出了此算例静力 Pushover 分析的结果，图中框架出现的塑性铰的颜色及意义在本书前面的章节中已经进行了阐述，此处不再重复，需要注意的是为了看到结构总体响应效果，图中选中了结构的顶层 64 号节点，输出了其位移值，单位为 mm，我们主要是观察结构推覆方向自由度——X (U1) 方向的位移情况。通过观察结构变形图及定点位移响应细节，推覆式分析最大的特征就是结构的侧向位移是单调递增的，也就是说结构在逐步递增的侧向荷载作用下产生一阶模态的响应，并得到塑性发展的过程。

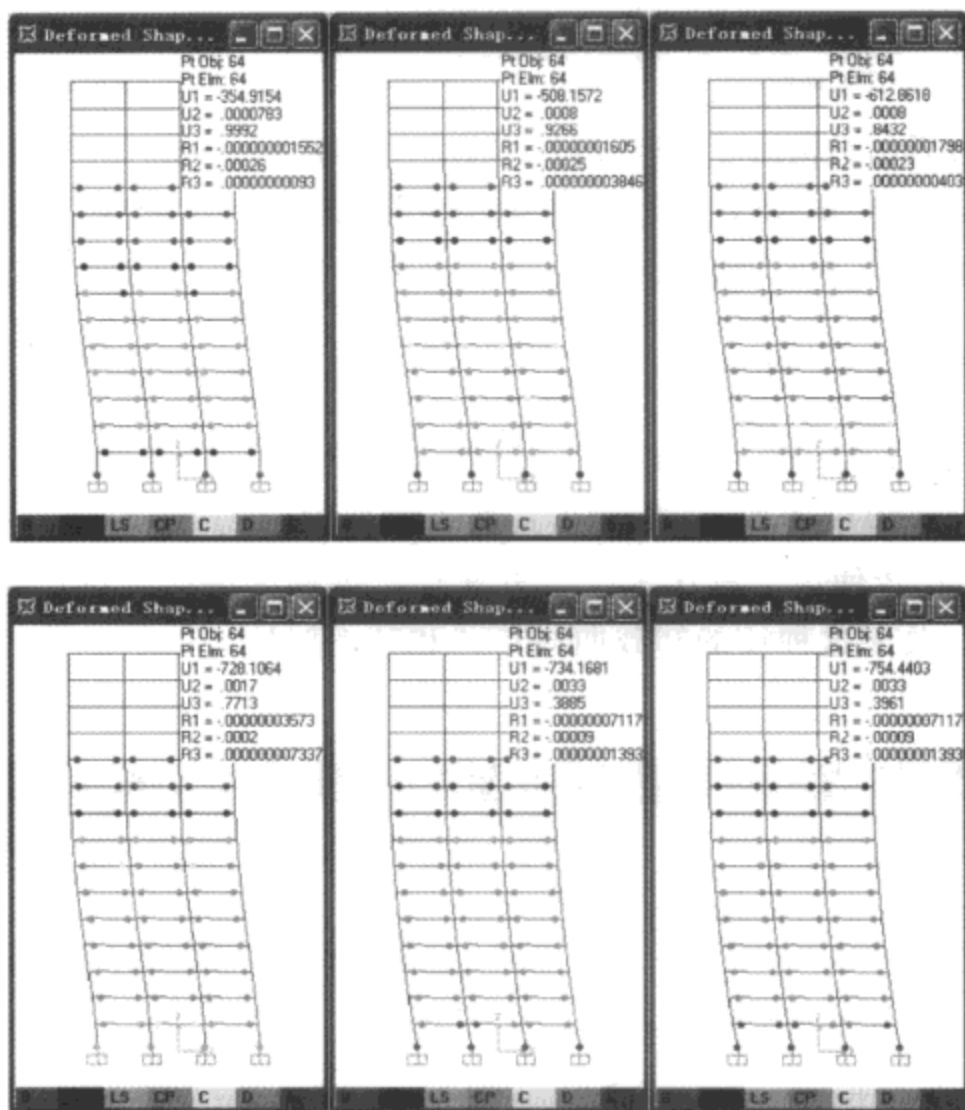


图 20-5 推覆分析结构变形及塑性发展图

图 20-6 给出了结构在动力时程分析过程中铰的塑性发展情况，整个动力分析持续了 10s，为了能够全面反映结构整个动力分析过程中结构弹塑性发展，分别输出了刚刚出现塑性的 3.76s、5.76s、6.76s、7.76s、8.76s、9.76s 结构位移响应及弹塑性发展情况。图 20-6 同样也输出了顶层 64 号节点的位移细节。与结构推覆分析相比，结构的位移响应并不是单调递增的，变形状态也不是一阶，并且在位移响应回落的时候，铰的发展并没有发生逆转。从理论上讲，塑性铰一旦跨过刚性阶段进入塑性阶段，就不可能回到刚性阶段，因此过程是不可逆的。

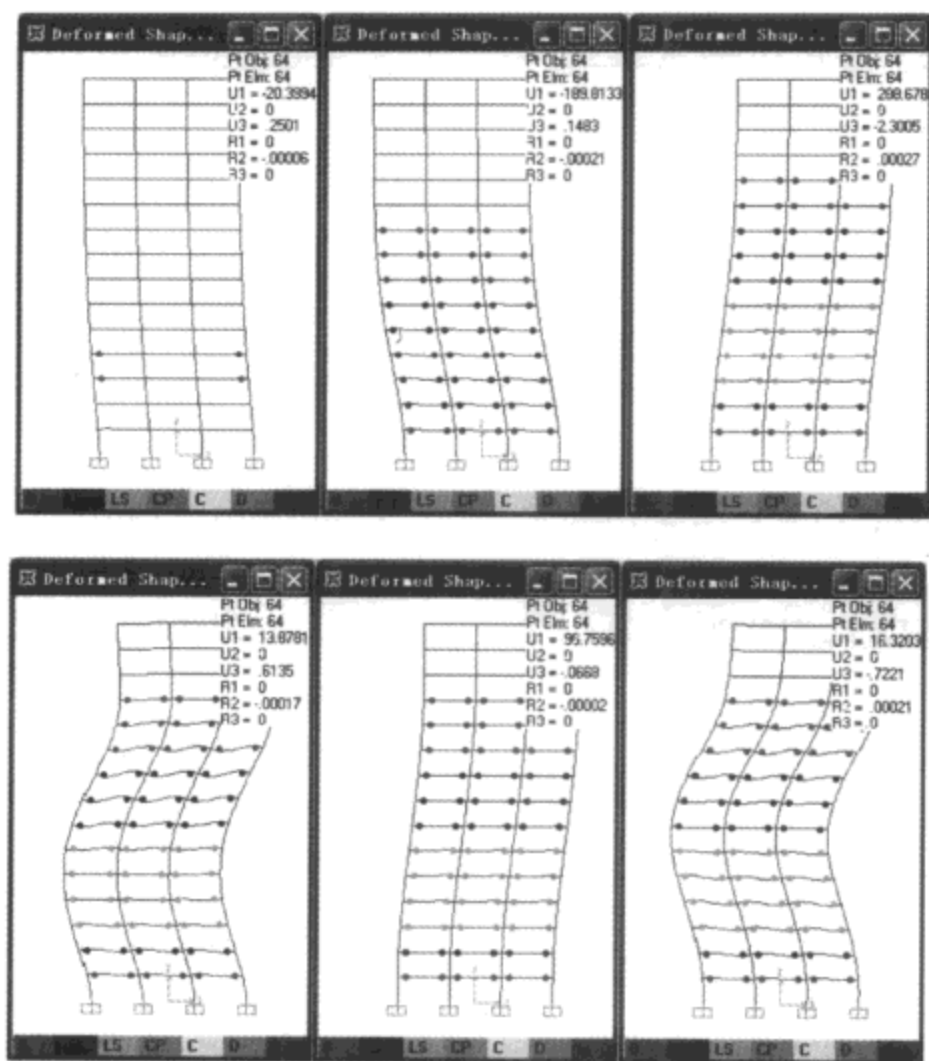


图 20-6 动力时程分析结构变形及塑性发展图

图 20-7 分别输出了推覆分析和动力时程分析作用下结构的结构顶点的位移情况，可以看出与结构变形图相同的结论，推覆分析中结构的变形是单调递增的，而动力时程分析的位移是与结构的动态响应是相关的。

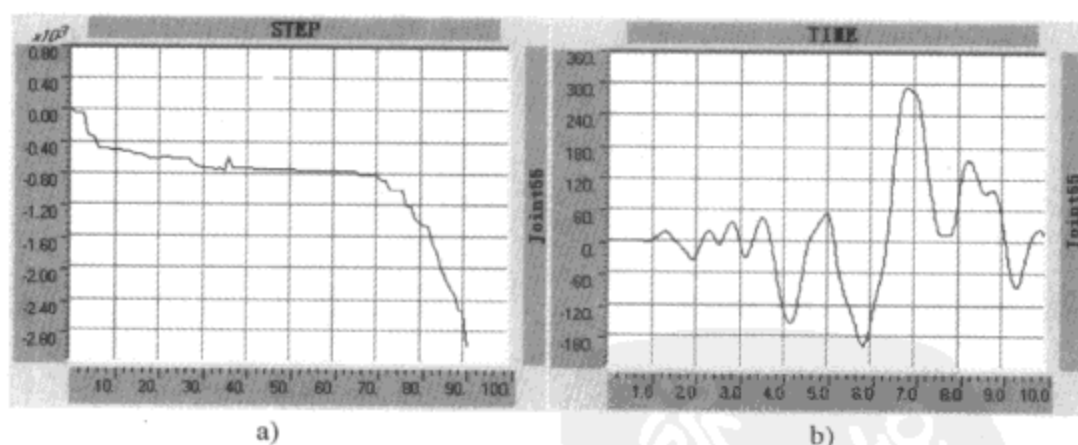
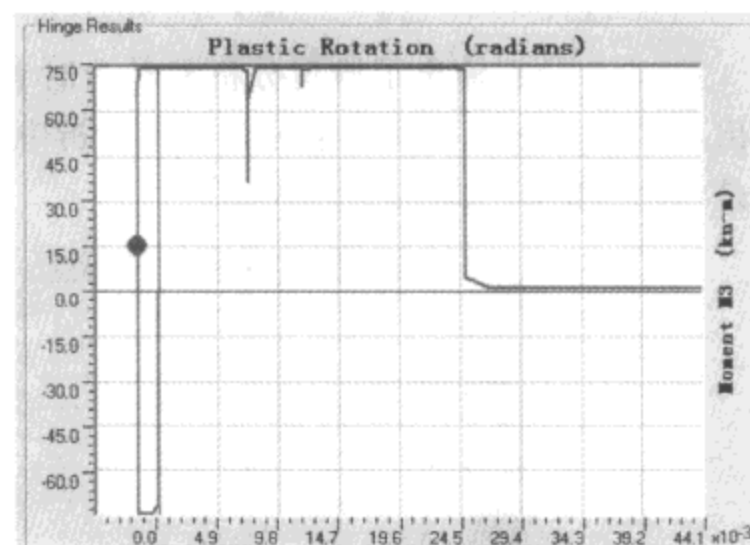
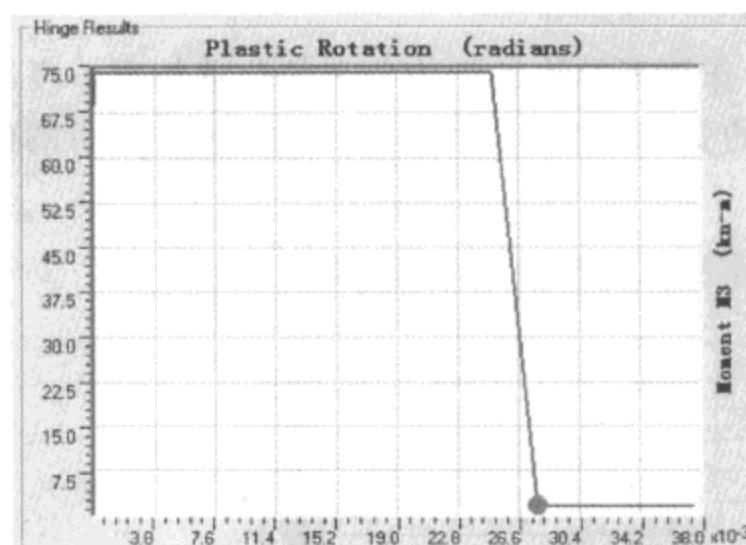
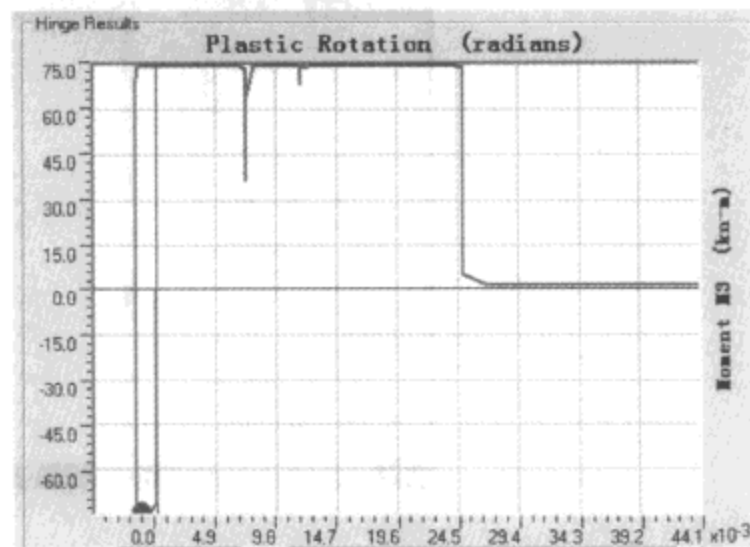
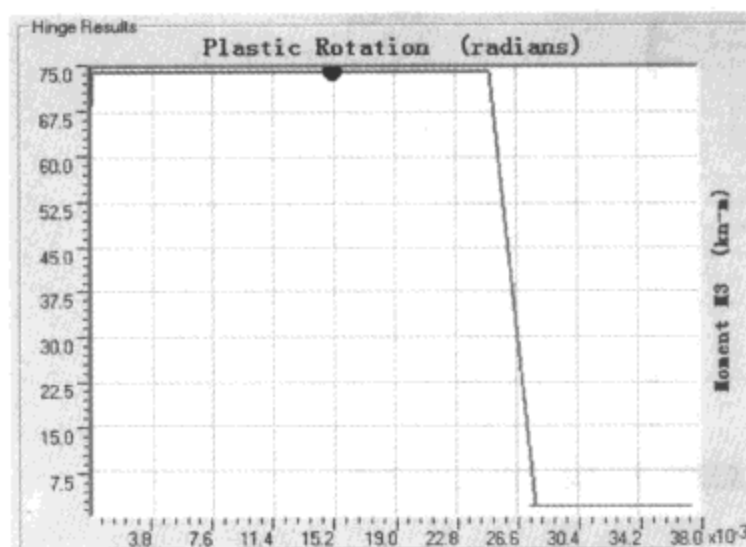
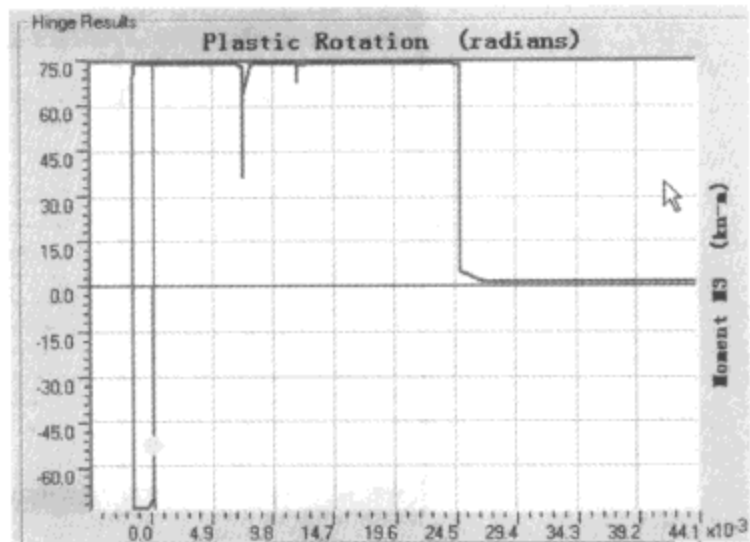
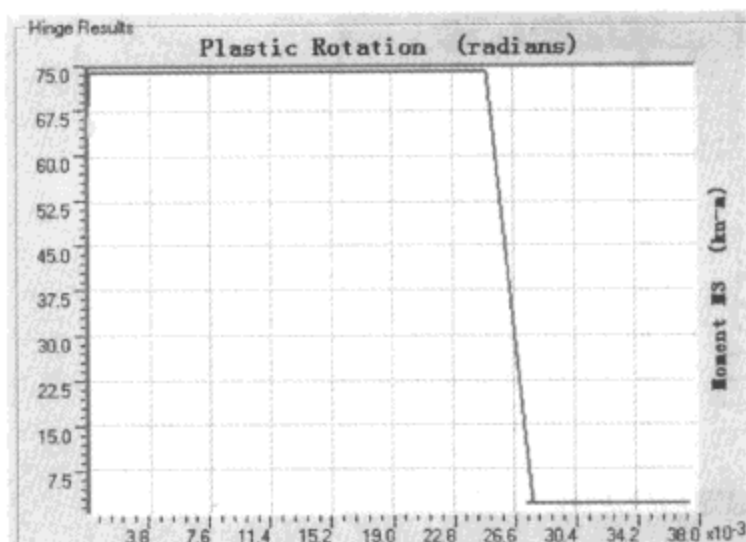


图 20-7 推覆分析及动力时程分析结构顶点位移曲线

a) 推覆分析；b) 动力时程分析

为了能够对比本算例在推覆分析和动力时程分析过程中，塑性铰的表现差异，此处我们选择了四层中间跨梁塑性铰（塑性铰自动编号为 37H2），为 M_3 弯曲形式铰，对铰曲线结果进行了输出比较，如图 20-8 所示，其中图 a) 为静力推覆分析过程中的铰曲线发展，图 b) 为时程分析工况中该铰的曲线形态。



a)

b)

图 20-8 推覆分析及动力时程分析 37H2 (PMM) 铰曲线

a) 推覆分析; b) 动力时程分析

从图 20-8 可以看出,无论是推覆分析还是时程分析,塑性铰都经过了刚性段,这是相同的。不同之处是在推覆分析过程中铰的位移是单调递增的,并且从刚性段顺序发展到加强段及卸载段。而相同的塑性铰,在动力弹塑性分析过程中,铰的变形并不是单调递增的,而是在发展到塑性加强段后发生了滞回,并且卸载过程是刚性的,经过几次卸载加载后才发生了完全卸载,对于弯曲铰而言,也就是成为最终的近似铰接的行为。

结构耗能减震装置的效果已经得到了工程实践的验证，目前采用阻尼器、隔震器装置的结构也越来越多。我国 2002 版新的抗震规范首次将隔震和减震设计作为独立的一章写进规范（见抗震规范第 12 章），并规定了设计要点和相关设计细节，这也说明了这类结构装置的广泛应用和理论设计的逐步成熟。

根据是否存在闭环控制系统，结构耗能减震装置作用于结构的方式可以分为被动控制系统和主动控制系统。抗震规范所提到的主要是被动控制系统，也就是我们所说的结构隔震设计和阻尼器设计。SAP2000 程序可以进行结构被动控制系统的分析和设计，隔震器和阻尼器在程序中是以非线性连接单元的属性出现的，SAP2000 程序提供了目前结构设计中经常使用的几种隔震器和阻尼器单元，这些单元的基本特征与规范所要求的是基本对应的，本节将对这几种单元理论模型进行介绍。

20.4.1 阻尼单元和隔振单元

SAP2000 中提供了 Damper（粘滞阻尼器）、Rubber Isolator（橡胶隔震器）、Friction Isolator（摩擦隔震器）和 T/C Friction Isolator（拉压型摩擦-摆隔震属性）等阻尼隔振单元，本小节将分别介绍几种单元在程序中的形式。

(1) 粘滞阻尼器（Damper）

目前使用的有限元软件，存在几种模拟粘滞阻尼器单元的模型。在 SAP2000 现在的版本中，粘滞阻尼器单元的阻尼属性是基于 Maxwell 的粘弹性模型，这种模型是 Malvern 在 1969 年提出的，它是由一个阻尼单元器单元和弹簧的串联构成的。

在这一模型中，非线性力-变形关系如下：

f = kd_k = c\dot{d}_c^{cexp} (20-19)

式中：k——弹簧常数；

c——阻尼系数；

d_k——在阻尼器的变形；

\dot{d}_c——阻尼器的变形速度；

cexp——阻尼指数，阻尼指数必须是正值，并且取值范围一般在 0.2 和 2.0 之间。弹簧和阻尼变形之和构成总内部变形：

d = d_k + d_c (20-20)

从单元构成和效果来看，粘滞阻尼器单元为一个耗能并具有一定刚度的阻尼弹簧系统。在实际工程使用中，如果需要的是纯阻尼行为，也就是说不希望在总变形中包含弹簧的变形，弹簧的效果可通过使其足够刚性来忽略。当弹簧的刚度足够大时，可以使弹簧-阻尼器的特征时间 \tau=c/k（当 cexp=1），为一个小于加载步大小的量，加载步大小为荷载在其变换的时间间隔，这时在加载步计算中就会屏蔽掉弹簧的效果。但是弹簧刚度的放大不应很大，因为计算机有存储数据方式的限制，这种放大可能会带来其他参数有效数字的丢失而导

致数值计算的错误。

另外，需要指出的是在 SAP2000 中，每个变形自由度的阻尼属性都是相互独立的。如果对一个自由度不指定非线性属性，则这个自由度将使用对话框中定义的有效刚度和有效阻尼属性的线性属性，当然有效刚度和有效阻尼也可以为零的。

(2) 橡胶隔震器 (Rubber Isolator)

SAP2000 所提供的橡胶隔震器是一个双轴的滞回隔震器，它对于 2 个剪切变形的自由度有耦合的塑性属性，而对于其他 4 个变形自由度有线性的有效刚度和有效阻尼属性。对于塑性模型的滞回属性是基于 Wen 和 Park 在 1976 年，及 Wen 和 Ang 在 1986 年所提出的滞回行为定义的。

对于 2 个剪切变形自由度，可以独立的指定线性或非线性的行为，如果 2 个剪切自由度均为非线性，耦合的力-变形关系如下式指定：

$$f_{u2} = r_2 \cdot k_2 \cdot d_{u2} + (1 - r_2) \sigma_{y2} \cdot z_2 \quad (20-21a)$$

$$f_{u3} = r_3 \cdot k_3 \cdot d_{u3} + (1 - r_3) \sigma_{y3} \cdot z_3 \quad (20-21b)$$

式中： k_2 、 k_3 ——弹簧弹性刚度；

σ_{y2} 、 σ_{y3} ——屈服力；

r_2 、 r_3 ——屈服后刚度对屈服前弹性刚度 (k_2 和 k_3) 的比例；

z_2 、 z_3 ——恢复力模型的内部参数，范围为 $\sqrt{z_2^2 + z_3^2} \leq 1$ 。对于这些参数的求解可以参见本书前面单元库的内容。

如果只考虑一个方向的剪切自由度为非线性，则对此自由度上的方程可简化为 Plastic (Wen) 连接单元属性的塑性行为，此时该单元模型等同于 Plastic (Wen) 连接单元中定义为 $\exp=2$ 时的模型。

在 SAP2000 的橡胶隔震单元中，建议使用线性弹簧关系定义其他 4 个自由度的属性，它们包括轴向变形和 3 个弯矩变形。如果需要模拟的是单自由度的塑性单元，而对另一个没有非线性属性的剪切变形，也可以使用线性属性进行定义。所有线性自由度使用的都是对话框中定义的有效刚度和有效阻尼属性的线性属性，当然有效刚度和有效阻尼也可能为零。

(3) 摩擦隔震器 (Friction Isolator)

SAP2000 所提供的摩擦隔震器是一个双轴摩擦摆模型，该模型对于两个剪切变形，沿摆滑移面的径向滑移后刚度、在轴向的缝行为和对于 3 个弯矩变形的线性有效刚度具有耦合的摩擦属性。对于塑性模型的滞回属性是基于 Wen 和 Park 在 1976 年及 Wen 和 Ang 在 1986 年所提出的滞回行为去定义的，摆行为是 Zayas 和 Low 在 1990 年推荐使用的方法。

在这一单元中，摩擦力和摆力直接和单元的轴压力成比例，这一单元不能承受轴拉力。该单元轴力 P 总是非线性的，如下定义：

$$P \equiv f_{u1} = \begin{cases} k_1 d_{u1} & \text{当 } d_{u1} > 0 \text{ 时} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (20-22)$$

并且为了在单元中产生非线性剪力，刚度 k_1 必须为正值。对于每个剪切变形自由度，用户可独立的指定线性或非线性行为，若两个剪切自由度为非线性，对于每个剪切变形，摩擦和摆效果平行作用：

$$f_{u2} = f_{u2f} + f_{u2p} \quad (20-23a)$$

$$f_{u3} = f_{u3f} + f_{u3p} \quad (20-23b)$$

摆的力-位移关系如下定义：

$$f_{u2p} = -p \frac{d_{u2}}{R_2} \quad (20-24a)$$

$$f_{u3p} = -p \frac{d_{u3}}{R_3} \quad (20-24b)$$

其中 R_2 和 R_3 为摆的半径。如果摆的半径设置为零，则摆的计算剪力为零。摩擦力-变形关系如下定义：

$$f_{u2f} = -p\mu_2 z_2 \quad (20-25a)$$

$$f_{u3f} = -p\mu_3 z_3 \quad (20-25b)$$

其中 μ_2 和 μ_3 为摩擦系数， z_2 和 z_3 为内部滞回变量。摩擦系数等参数的一般求解方式参见本书前面单元库的相关章节。

一般情况下，除了轴向非线性属性，以及定义非线性属性的剪切变形自由度，其他的自由度可以使用线性弹簧属性进行定义。所有线性自由度使用相应的有效刚度和有效阻尼，其值可能为零。这一单元对于非线性分析，轴向自由度总为非线性。

摩擦摆隔震器除了应用于结构隔震单元以外，还可以用来模拟两个接触面的缝和摩擦问题，如比较常见的重力式挡土墙、重力式水坝等。

(4) 拉压型摩擦-摆隔震属性 (T/C Friction Isolator)

在前面我们已经提到了对于摩擦摆型隔震器，U1 方向是不能够承受拉力的。因此，SAP2000 还提供了一个考虑轴向拉压摩擦摆隔震器，这就是单元形式中的 T/C Friction Isolator 单元。

与典型摩擦摆隔震器相同，拉压型隔震器的轴向方向在非线性分析时必须考虑非线性属性，而且非线性属性分别需要定义拉力状态和压力状态。两个剪切方向可以定义为线性属性，也可以定义为非线性属性，当定义为非线性属性时，大部分非线性属性根据 U1 方向的拉压状态不同可以进行不同的设置，但是对于刚度属性和滑动面半径属性，则不能够定义不同值。两个方向的剪切非线性属性定义是相互独立的，可以选择定义一个或两个方向非线性属性。单元其他三个方向的弯曲变形自由度均为线性属性，它们与不指定非线性属性的剪切方向一样都可以使用有效刚度和有效阻尼来定义线性属性。

20.4.2 非线性连接单元需要明确几个概念

(1) 线性有效刚度

在前面的非线性阻尼、隔震单元中我们已经看到，对于这些单元并非所有的自由度都需要指定非线性属性，当某个自由度不需要指定非线性属性时，那么在所有线性和非线性分析中，这一自由度使用线性有效刚度。线性有效刚度代表用于所有从零初始条件开始的线性分析的连接/支座单元的总弹性刚度。

对于设置阻尼器和隔震器等非线性连接单元的结构，并非所有的分析工况都是非线性分

析，比如说线性静力分析、模态分析等工况，这些线性分析工况中显然是不能够考虑单元中的非线性属性的，但是如果某些单元的非线性属性不能考虑，可能就会带来结构的不稳定等一系列基本力学问题，因此这时也需要使用非线性单元的线性属性。也就是说，对于所有线性分析工况，非线性单元所表现的是线性属性，所使用的刚度是在线性属性中定义的有效刚度。

在非线性时程分析中，使用直接积分时，结构效应反应了实际的刚度和其他指定的非线性参数，对于结构中设置的非线性连接单元，所体现的属性是所定义的非线性属性。如果使用的是模态积分，分析考虑的非线性单元的属性是在线性属性中所定义的有效刚度。

在实际工程使用中，对于阻尼器单元，有效刚度一般应为零；对于橡胶隔震器和摩擦隔震器，有效刚度应在零和 k 之间（ k 是给定自由度的非线性刚度属性）。若用户对 k 选择了一个人为的大值，要确认使用一个很小的 k_e （有效刚度）值，来避免在非线性模态时程分析中的数值问题。

(2) 线性有效阻尼

与线性有效刚度相对应，在非线单元中需要定义线性有效阻尼。线性有效阻尼的使用与线性有效刚度完全相同，主要用于非线性单元中线性自由度方向阻尼属性，以及所有自由度在线性分析工况的阻尼属性。

线性有效阻尼对于用作反应谱分析的单元和对于线性、周期性时程分析，代表总粘滞阻尼。对于这些类型分析，忽略了实际的非线性属性。有效阻尼可用来代表由于非线性阻尼、塑性或摩擦产生的能量消散。

在动力分析过程中，有效阻尼被转换为阻尼比、假定比例阻尼。这些有效振型-阻尼被加在任意其他工程师直接指定的振型阻尼上。程序将不允许任意振型的总阻尼比超过 99.995%。

振型交叉耦合阻尼项对结构是非常显著的。一个基于有效阻尼属性的线性分析可能高估了结构中存在的阻尼量。非线性时程分析不使用有效阻尼值，因为其直接考虑了单元能量消散，且正确的考虑了振型交叉耦合的效果。对于决定附加的能量消散装置的效果，特别建议非线性时程分析。

(3) 非线性变形荷载

一个非线性变形荷载是一组在结构上的力和（或）弯矩，它们激发连接/支座单元的非线性内部变形。非线性变形是一个已被指定非线性属性的连接/支座的内部变形。

非线性变形荷载用来对 Ritz 向量分析初始荷载向量。它们的目的是，当进行非线性振型时程分析时，产生充足的代表非线性行为的振型。对每一连接/支座单元非线性内部变形，可分别使用非线性变形荷载。

当要求 Ritz 向量分析时，用户可指定程序使用内部的非线性变形荷载，或用户可定义其自己的荷载工况。对于后者，模型中的每一连接/支座单元，用户可能需要最多 6 个此类的荷载工况。

对于单个两节点连接/支座单元，内部的非线性变形荷载图示见图 20-9。每一组力和弯矩是自平衡的。这趋向于将荷载效果局部化，能够产生一组较好的 Ritz 向量。对于单个节点单元，只需要作用于节点 j 的力和/（或）弯矩。对于每一个作用由非线性变形荷载产生

的力或弯矩的自由度，强烈建议有质量或质量弯矩惯性矩存在。

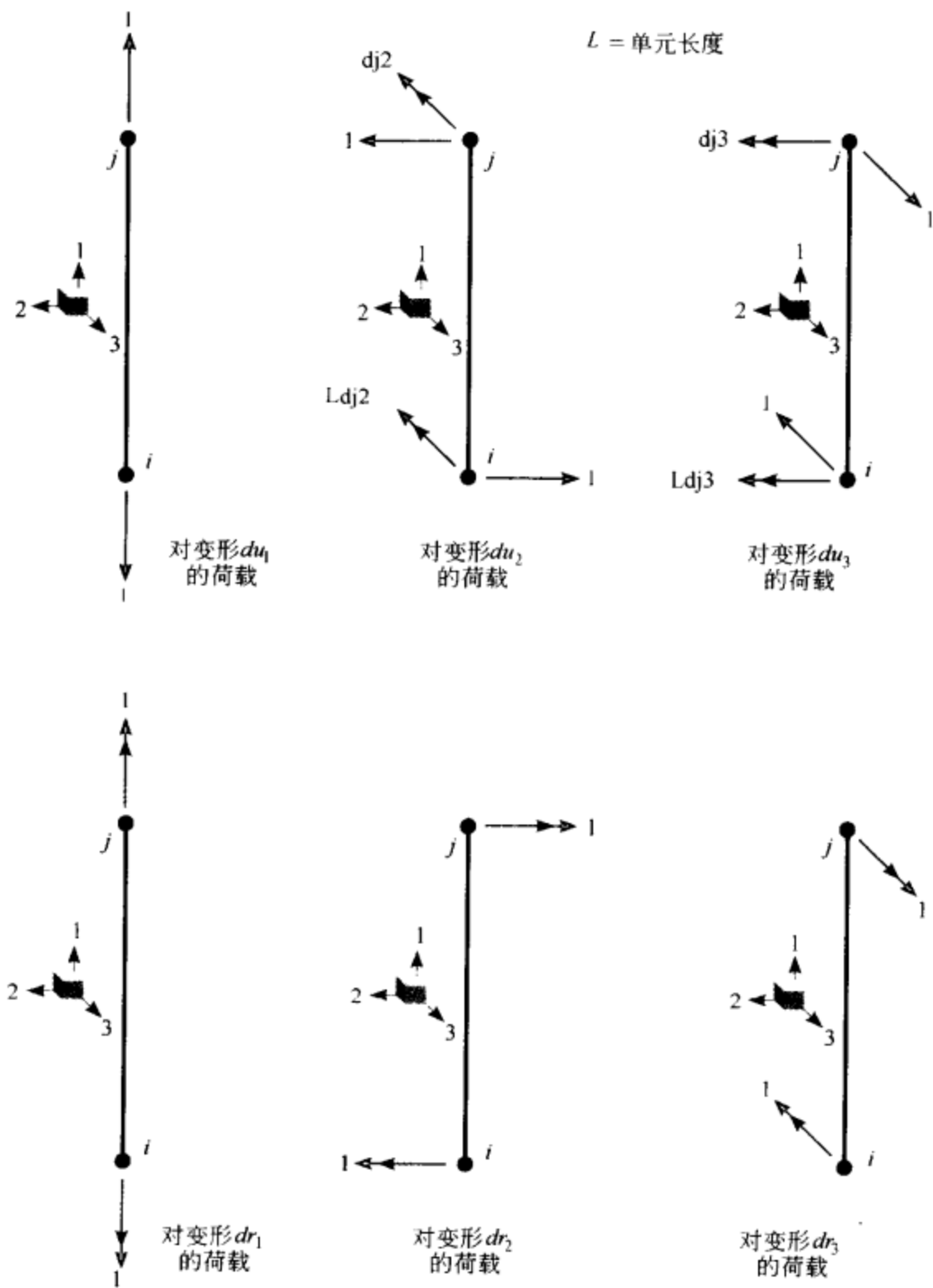


图 20-9 对一个两节点单元的内部建立非线性变形荷载

(4) 基于频域的连接属性

每个连接/支座属性都具有可以选择的基于频域属性的选择，它是线性和非线性属性设置的补充。基于频域的属性只对频域范围类型分析有效，比如稳态分析或功率谱密度分析。

基于频域的属性表现为单元复杂的阻抗。它具有一个表现刚度和惯性影响的实部和一个表现迟滞阻尼影响的虚部。基于单元六个自由度的频域属性可能是耦合或不耦合的，如式(20-26)所示：

$$\begin{Bmatrix} f_{u1} \\ f_{u2} \\ f_{u3} \\ f_{r1} \\ f_{r2} \\ f_{r3} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{u1} & z_{u1u2} & z_{u1u3} & z_{u1r1} & z_{u1r2} & z_{u1r3} \\ & z_{u2} & z_{u2u3} & z_{u2r1} & z_{u2r2} & z_{u2r3} \\ & & z_{u3} & z_{u3r1} & z_{u3r2} & z_{u3r3} \\ & & & z_{r1} & z_{r1r2} & z_{r1r3} \\ & & & & z_{r2} & z_{r2r3} \\ & & & & & z_{r3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_{u1} \\ d_{u2} \\ d_{u3} \\ d_{r1} \\ d_{r2} \\ d_{r3} \end{Bmatrix} \quad (20-26)$$

对称

这里 $z_{u1} = k_{u1} + ic_{u1}$ 是 u_1 自由度的阻抗项，这里 k_{u1} 是刚度/惯性分量， c_{u1} 是阻尼分量， i 是-1 的平方根。其他阻抗项相似。

在公式 20-26 中，等式左边的力项和等式右边的位移项是很复杂的。当变量使用正弦函数时，这些项中，实部表现为 0° 角象限的反应，虚部表现为 90° 角象限的反应。

每个 21 阻抗项可能对于频域是不同的。用户可以定义每个项目作为给定刚度-频率和阻尼-频率上一系列的节点。它不适用于刚度项为负值的区域。

基于频域的属性通常被应用在支承单元，它代表了刚性地基下土区域的远距离发射阻尼影响。

20.4.2 阻尼单元的相关参数

对于阻尼单元，可以分别定义六个方向自由度的线性或非线性属性，当选择为非线属性时，将弹出下面图 20-10 所示的对话框，对话框说明见表 20-1~表 20-4。当选择为线性属性时，对话框中将不出现非线性分析工况使用的属性这一项，这一自由度方向将保持线性的属性。

标 识 表 20-1

| 属性名称 | 所定义连接属性的名称 |
|------|---------------------------|
| 方向 | 该对话框显示修改的自由度方向 |
| 类型 | 非线性连接单元的类型，阻尼器为 Damper 类型 |
| 非线性 | 所定义的方向是否进行非线性属性定义 |

线性分析工况使用的属性 表 20-2

| | |
|------|---------------------|
| 有效刚度 | 线性分析工况该连接单元所使用的刚度属性 |
| 有效阻尼 | 线性分析工况该连接单元所使用的阻尼属性 |

剪 切 变 形 位 置 表 20-3

| | |
|----------|-------------------------|
| 距 J 端的距离 | 单元剪切变形的位置距 J 端的距离（绝对长度） |
|----------|-------------------------|

非线性分析工况使用的属性 表 20-4

| | |
|------|--|
| 刚 度 | 非线性工况所使用的初始刚度属性 |
| 阻尼系数 | 非线性工况所使用的阻尼属性，对应公式 20-19 中 c |
| 阻尼指数 | 非线性工况所使用的阻尼变化指数属性，对应公式 20-19 中 c_{exp} |

图 20-10 阻尼器单元非线性属性定义对话框是典型的 U2 和 U3 方向平动自由度定义对话框，当定义其他四个自由度时，对话框中第三项“剪切变形位置”将不会出现，原因是 U1 方向和其他三个方向的旋转自由度都不存在剪切变形。对于阻尼器单元，有效刚度一般应为零。

20.4.3 隔振单元的相关参数

(1) 橡胶隔震器

对于橡胶隔震单元，可以分别定义 U2 和 U3 两个方向自由度的线性或非线性属性，当选择为非线属性时，将弹出下面图 20-11 所示的对话框，对话框说明见表 20-5～表 20-8。当选择为线性属性时，对话框中将不出现非线性分析工况使用的属性这一项，这一自由度方向将保持线性的属性。

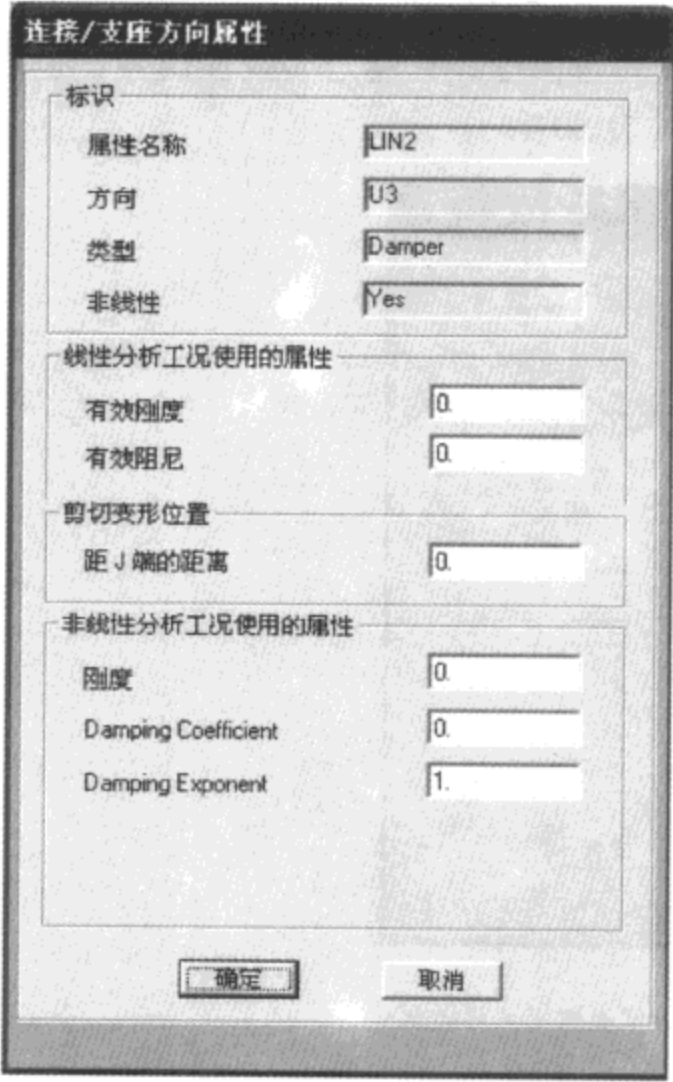


图 20-10 粘滞阻尼器参数定义对话框

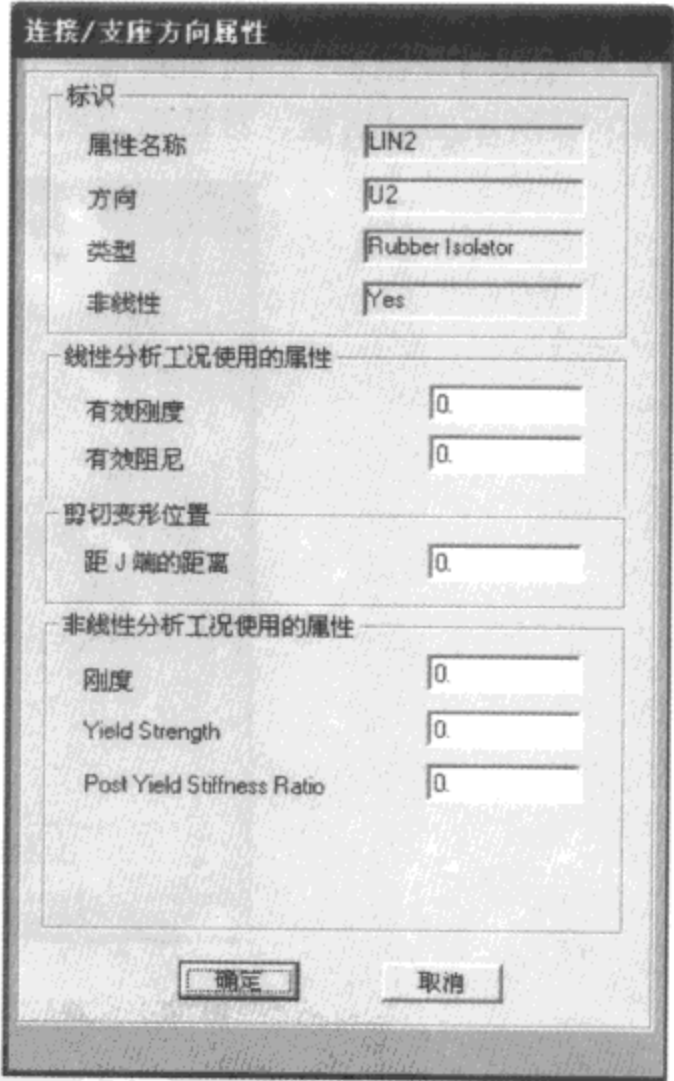


图 20-11 橡胶隔振器 U2、U3 方向非线性参数定义对话框

标识 表 20-5

| | |
|------|----------------------------------|
| 属性名称 | 所定义连接属性的名称 |
| 方向 | 该对话框显示修改的自由度方向 |
| 类型 | 连接单元的类型，橡胶隔震器为 Rubber Isolate 类型 |
| 非线性 | 所定义的方向是否进行非线性属性定义 |

线性分析工况使用的属性 表 20-6

| | |
|------|---------------------|
| 有效刚度 | 线性分析工况该连接单元所使用的刚度属性 |
| 有效阻尼 | 线性分析工况该连接单元所使用的阻尼属性 |

剪 切 变 形 位 置 表 20-7

| | |
|----------|-------------------------|
| 距 J 端的距离 | 单元剪切变形的位置距 J 端的距离（绝对长度） |
|----------|-------------------------|

非线性分析工况使用的属性 表 20-8

| | |
|--------|--|
| 刚度 | 非线性工况所使用的初始刚度属性，对应公式 20-21 中 k_2, k_3 |
| 屈服强度 | 非线性工况所使用的单元屈服强度属性，对应公式 20-21 中 σ_{y2} 和 σ_{y3} |
| 屈服后刚度比 | 单元屈服后刚度与屈服前刚度的比值，对应公式 20-21 中 r_2 和 r_3 |

对于橡胶隔震器 U1 方向和其余三个方向的旋转自由度，只能定义线性属性，也就是如下图所示 20-12 所示的对话框，对话框说明见表 20-9、表 20-10。

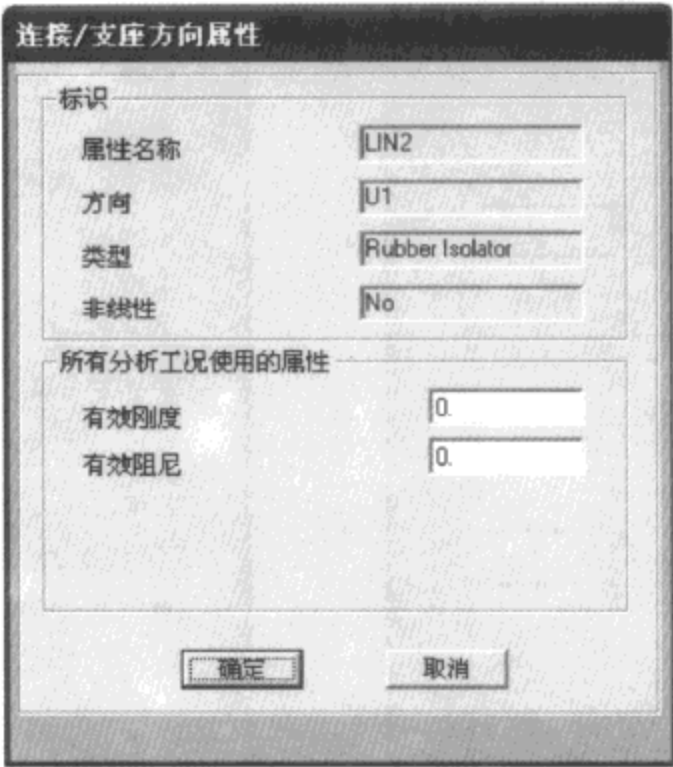


图 20-12 橡胶隔振器 U1 方向参数定义对话框

标 识 表 20-9

| | |
|------|-----------------------------------|
| 属性名称 | 所定义连接属性的名称 |
| 方向 | 该对话框显示修改的自由度方向 |
| 类型 | 连接单元的类型，橡胶隔震器为 Rubber Isolator 类型 |
| 非线性 | 该方向是否进行非线性属性定义，此时这一项一直为 “No” |

所有分析工况使用的属性

表 20-10

| | |
|------|---------------------|
| 有效刚度 | 线性分析工况该连接单元所使用的刚度属性 |
| 有效阻尼 | 线性分析工况该连接单元所使用的阻尼属性 |

(2) 摩擦隔震器

对于摩擦隔震单元，可以分别定义 U2 和 U3 两个方向自由度的线性或非线性属性，当选择为非线属性时，将弹出下面图 20-13 所示的对话框，对话框说明见表 20-11～表 20-14。当选择为线性属性时，对话框中将不出现非线性分析工况使用的属性这一项，这一自由度方向将保持线性的属性。

标 识

表 20-11

| | |
|------|------------------------------------|
| 属性名称 | 所定义连接属性的名称 |
| 方向 | 该对话框显示修改的自由度方向 |
| 类型 | 连接单元的类型，摩擦隔振器为 Frction Isolator 类型 |
| 非线性 | 所定义的方向是否进行非线性属性定义 |

线性分析工况使用的属性

表 20-12

| | |
|------|---------------------|
| 有效刚度 | 线性分析工况该连接单元所使用的刚度属性 |
| 有效阻尼 | 线性分析工况该连接单元所使用的阻尼属性 |

剪切变形位置

表 20-13

| | |
|----------|--------------------------|
| 距 J 端的距离 | 单元剪切变形的的位置距 J 端的距离（绝对长度） |
|----------|--------------------------|

非线性分析工况使用的属性

表 20-14

| | |
|--------|-----------------------------------|
| 刚度 | 非线性工况所使用的刚度属性，对应公式中 k_1 |
| 摩擦系数，慢 | 单元零速度时摩擦系数 |
| 摩擦系数，快 | 单元高速度时摩擦系数 |
| 比率参数 | 公式（20-21）中 r_2 和 r_3 ，用于求 r |
| 滑动面半径 | 摆的半径，对应公式中 R_2 和 R_3 |

当使用摩擦型隔震器时，U1 方向使用的是考虑阻尼影响的缝单元属性（缝单元的缝宽为零），因此在非线性分析工况中，U1 方向必须是非线性属性的，也就是必须使用下面图 20-14 对话框定义非线性属性，对话框说明见表 20-15～表 20-17。在这一对话框中需要定义单元 U1 方向的刚度和阻尼系数值。

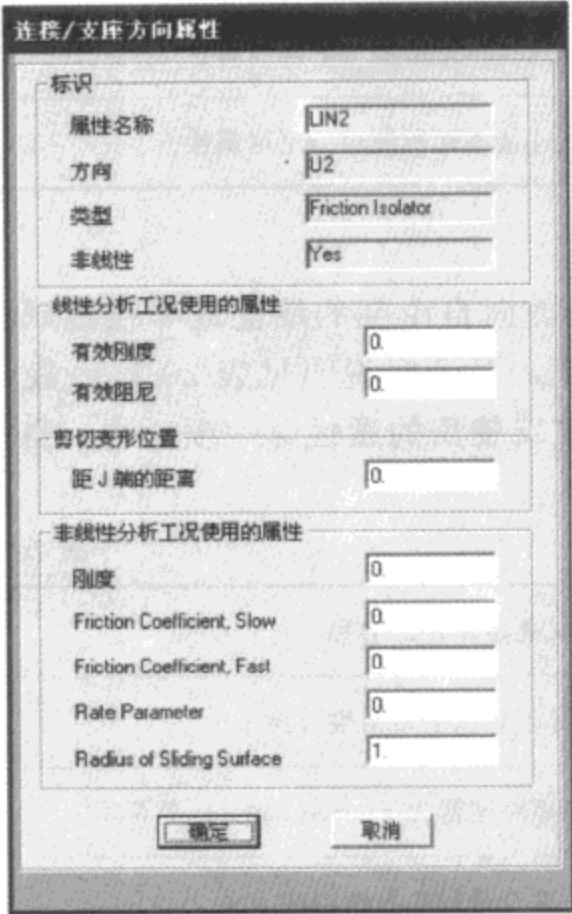


图 20-13 摩擦隔振器 U2、U3 方向非线性参数定义对话框

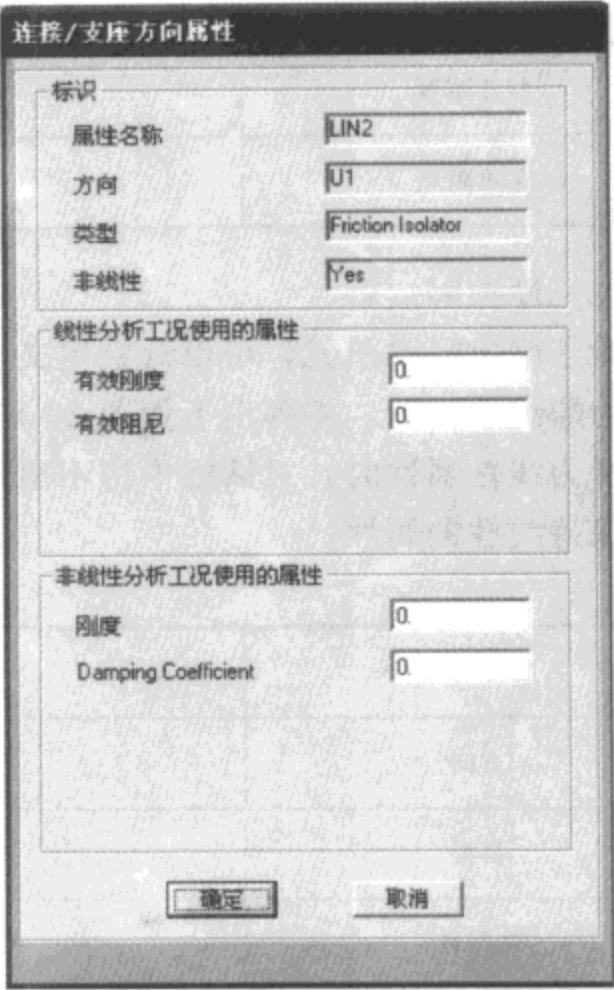


图 20-14 摩擦隔振器 U1 方向参数定义对话框

标 识 表 20-15

| | |
|------|-----------------------------------|
| 属性名称 | 所定义连接属性的名称 |
| 方向 | 该对话框显示修改的自由度方向，此处应该为 U1 |
| 类型 | 连接单元的类型，此处应为 Friction Isolator 类型 |
| 非线性 | 所定义的方向是否进行非线性属性定义 |

线性分析工况使用的属性 表 20-16

| | |
|------|---------------------|
| 有效刚度 | 线性分析工况该连接单元所使用的刚度属性 |
| 有效阻尼 | 线性分析工况该连接单元所使用的阻尼属性 |

非线性分析工况使用的属性 表 20-17

| | |
|-----|-------------------|
| 刚度 | 非线性工况所使用的刚度属性 |
| 阻尼系 | 该方向非线性分析工况所使用的阻尼值 |

在摩擦隔震器单元中，对于其他三个方向的旋转自由度将只允许定义线性属性，也就是通过图 20-15 所示的对话框定义线性属性，对话框说明见表 20-18、表 20-19。

标 识 表 20-18

| | |
|------|------------------------------------|
| 属性名称 | 所定义连接属性的名称 |
| 方向 | 该对话框显示修改的自由度方向 |
| 类型 | 连接单元的类型，摩擦隔振器为 Friction Isolate 类型 |
| 非线性 | 该方向是否进行非线性属性定义，此时这一项一直为 “No” |

所有分析工况
所使用的属性 表 20-19

| | |
|------|---------------------|
| 有效刚度 | 线性分析工况该连接单元所使用的刚度属性 |
| 有效阻尼 | 线性分析工况该连接单元所使用的阻尼属性 |

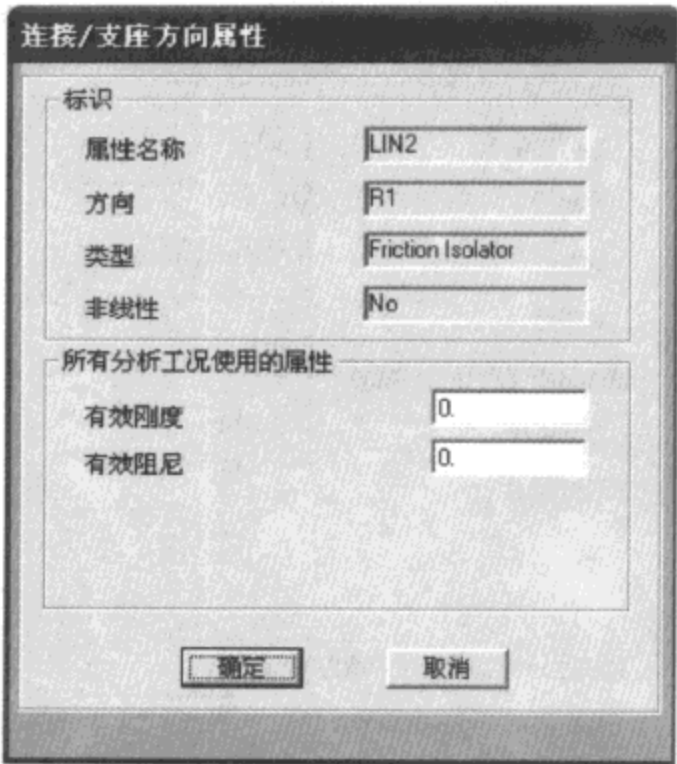


图 20-15 摩擦隔振器旋转自由度参数定义对话框

(3) T/C 型摩擦隔震器

对于 T/C 型摩擦隔震单元，可以分别定义 U2 和 U3 两个方向自由度的线性或非线性属性，当选择为非线性的属性时，将弹出如图 20-16 所示的对话框，当选择为线性属性时，对话框中将不出现非线性分析工况使用的属性这一项，这一自由度方向将保持线性的属性。

T/C 型摩擦隔震器的参数定义（见图 20-16），其与一般摩擦摆隔震器参数定义相同，但是因为这种隔震单元是允许 U1 方向受拉的，因此这一对话框中非线性属性的定义分别给出了 U1 受压和受拉两种情况。单元在两种受力状态下非线性属性是相互独立的，并且定义方式与前面所描述的相同。

与一般摩擦隔震器相同，T/C 摩擦隔震器也需要定义 U1 方向的属性，U1 方向为缝单元属性，并且 U1 方向在非线性分析工况中是始终保持非线性属性的。不同之处是刚度和缝隙宽度对于单元受拉和受压状态将存在不同的属性，如下面图 20-17 所示的对话框，需要分别进行定义。对话框说明见表 20-20～表 20-22。

标 识 表 20-20

| | |
|------|---------------------------------------|
| 属性名称 | 所定义连接属性的名称 |
| 方向 | 该对话框显示修改的自由度方向，此处应该为 U1 |
| 类型 | 连接单元的类型，此处应为 T/C Friction Isolator 类型 |
| 非线性 | 所定义的方向是否进行非线性属性定义 |

线性分析工况使用的属性 表 20-21

| | |
|------|---------------------|
| 有效刚度 | 线性分析工况该连接单元所使用的刚度属性 |
| 有效阻尼 | 线性分析工况该连接单元所使用的阻尼属性 |

连接/支座方向属性

标识

属性名称LIN2

方向U2

类型T/C Friction Isolator

非线性Yes

线性分析工况使用的属性

有效刚度0.

有效阻尼0.

剪切变形位置

距 J 端的距离0.

非线性属性

当 U1 受压时

当 U1 受拉时

刚度0.0.

摩擦系数, 慢0.

摩擦系数, 快0.

比率参数0.

滑动面的半径1.1.

确定

取消

图 20-16 T/C 型摩擦隔振器 U2、U3 方向非线性参数定义对话框

连接/支座方向属性

标识

属性名称LIN2

方向U1

类型T/C Friction Isolator

非线性Yes

线性分析工况使用的属性

有效刚度0.

有效阻尼0.

非线性分析工况使用的属性

Stiffness for Compression0.

Stiffness for Tension0.

Gap Opening for Compression0.

Gap Opening for Tension0.

Damping Coefficient0.

确定

取消

图 20-17 T/C 型摩擦隔振器 U1 方向参数定义对话框

非线性分析工况使用的属性

表 20-22

| | |
|-------|-------------------|
| 受压刚度 | 当单元受压时所使用的刚度属性 |
| 受拉刚度 | 当单元受拉时所使用的刚度属性 |
| 受压缝宽度 | 单元受压时的缝隙宽度 |
| 受拉缝宽度 | 单元受拉时的缝隙宽度 |
| 阻尼系 | 该方向非线性分析工况所使用的阻尼值 |

需要指出的是，T/C 型摩擦隔震器单元，对于 U2 和 U3 某一方向的非线性属性，当 U1 承受压力或 U1 承受拉力时，抗剪刚度是必须相同的，也就是说在 U1 受压属性下输入的刚度将自动的赋予受拉属性，并始终保持相同的值（见图 20-16）。同样，对于滑动面的半径也是一样，滑动面半径 U1 受拉状态的输入框总是灰的，它的值将一直与受压状态输入值相同，并且不能够单独修改。

对于该摩擦隔震器单元的另外三个方向的旋转自由度的定义，只允许定义线性属性，其

定义方式与一般摩擦隔震器单元旋转自由度线性属性定义相同。

20.4.4 阻尼隔振单元应用算例

本节将通过两个算例来分别说明使用 SAP2000 处理具有隔震器和阻尼器的结构的非线性时程分析的基本过程和结果读取对比情况。

隔震器的隔震效果视结构本身的动力特性以及场地条件的不同而不同, 目前的研究表明隔震器对于本身周期小于 1.0s 的建筑物效果比较好, 并且对于硬土地比较合适, 因此隔震器一般对于低层和多层建筑比较合适。有关文献也给出了隔震器对于不同建筑结构类型适用的高度和层数, 对于纯框架结构应少于十层而且低于 30m, 对于框剪结构和纯剪力墙结构一般应少于十二层并低于 40m。由于工作机理不同, 与隔震器相比, 阻尼器在建筑结构的适用范围就比较广泛了, 对结构类型和结构高度原则上没有限制。

(1) 隔震器算例

图 20-18 给出了一个隔震器的算例, 其为一个规则的纯框架多层结构, 结构长 24m, 宽 12m, 共五层, 层高 3m, 对该结构分别进行了设置隔震器和不设置隔震器两种情况模型的分析, 隔振器采用橡胶隔振器。

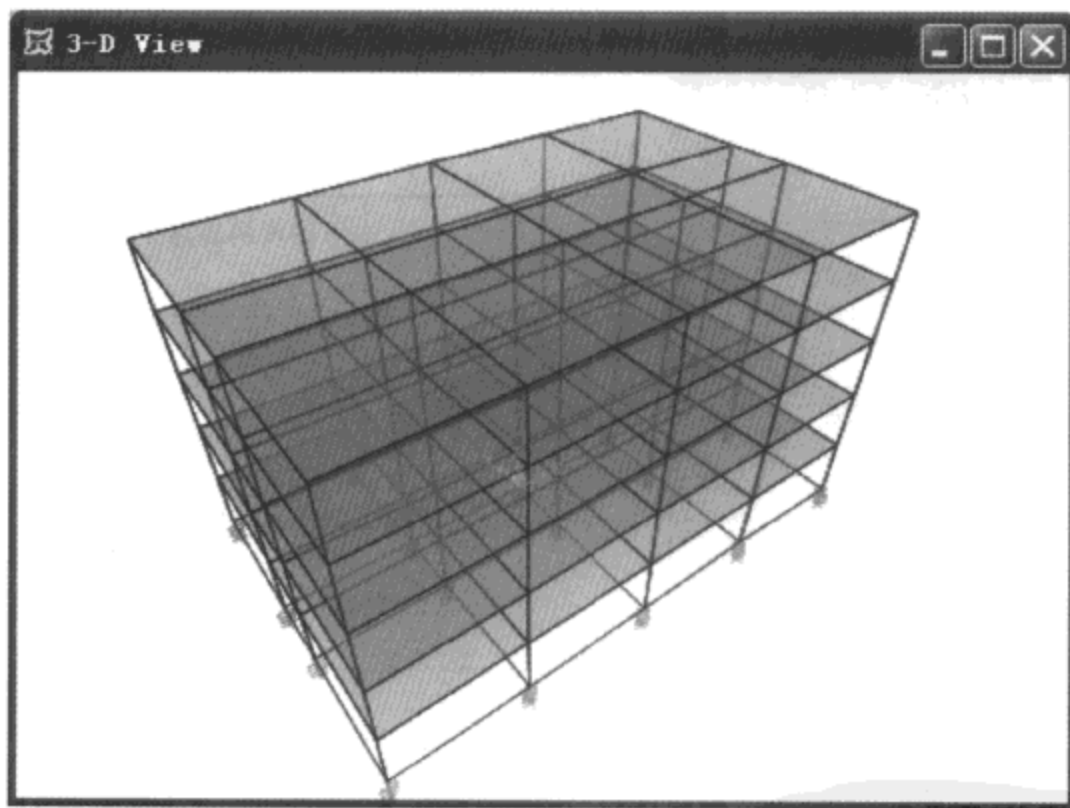


图 20-18 隔振器算例模型

基于前面所提到的隔震器的定义方式, 我们定义三个方向的隔震器属性, 此处局部坐标轴指的是连接单元的局部坐标轴, 见图 20-19, 因此对于连接单元的 U1 方向对应的是结构全局坐标 Z 方向, U2 和 U3 方向分别对应全局坐标 X 和 Y 方向。

对于本算例我们使用的隔震器, U1 方向我们定义为具有一定刚度的线性弹簧, 指定阻尼属性为 0, 参数见图 20-20 所示, U2 和 U3 方向分别指定了非线性属性, 参数见图 20-21 所示。



图 20-19 连接单元局部坐标

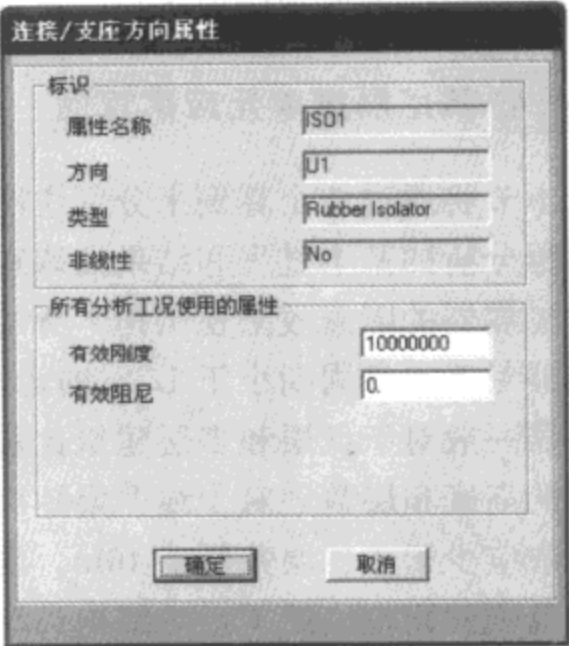


图 20-20 隔振器 U1 方向属性

对于两个模型我们分别进行了分析，并且对结果进行了对比，表 20-23 给出两种模型的模态周期结果，可以看出设置隔振器的结构第一周期延长了一倍以上，且前三个周期均延长了 80% 以上。

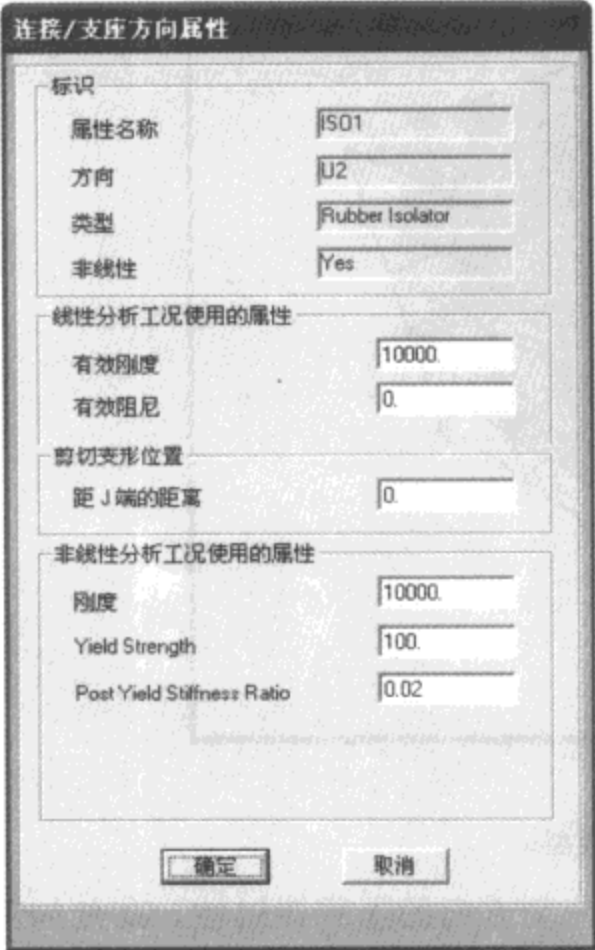


图 20-21 隔振器 U2、U3 方向属性

算例模型周期信息 表 20-23

| 振型序号 | 不设置隔震器 (s) | 设置隔震器 (s) | 相差百分率 (%) |
|------|---------------|--------------|--------------|
| 1 | 0.532 | 1.069 | 101 |
| 2 | 0.531 | 1.028 | 94 |
| 3 | 0.446 | 0.837 | 88 |
| 4 | 0.179 | 0.240 | 34 |
| 5 | 0.179 | 0.238 | 33 |
| 6 | 0.150 | 0.199 | 33 |
| 7 | 0.110 | 0.125 | 14 |
| 8 | 0.109 | 0.125 | 14 |
| 9 | 0.099 | 0.106 | 7 |
| 10 | 0.092 | 0.103 | 11 |

对于该结构，特征周期选择为 0.45s，因此没有设置隔振器时，第一周期是接近特征周期的，地震作用比较大，而且根据我国规范反应谱的特征，在这一范围内，地震作用随着周期的延长下降是很迅速的，为了直观的看到地震作用随隔振器设置与否的变化，表 20-24 给

出了结构地震作用下的层剪力和层倾覆力矩值。

反应谱作用下算例模型层剪力及楼层倾覆力矩信息 表 20-24

| 楼层序号 | 不设置隔震器 | | 设置隔震器 | |
|------|----------|---------------|----------|---------------|
| | 层剪力 (kN) | 楼层倾覆力矩 (kN·m) | 层剪力 (kN) | 楼层倾覆力矩 (kN·m) |
| 1 | 5324 | 56418 | 3019 | 28354 |
| 2 | 5095 | 40817 | 2757 | 19373 |
| 3 | 4474 | 26446 | 2217 | 11903 |
| 4 | 3534 | 14267 | 1632 | 6087 |
| 5 | 2306 | 5166 | 1000 | 2073 |

除了进行典型的地震反应谱分析以外，对于该结构笔者还进行了动力时程分析，并且给出时程地震作用下，结构的层剪力包络最大值，表 20-25 给出了相关结果。

时程作用下算例模型层剪力及楼层倾覆力矩信息 表 20-25

| 楼层序号 | 不设置隔震器 | | 设置隔震器 | |
|------|----------|---------------|----------|---------------|
| | 层剪力 (kN) | 楼层倾覆力矩 (kN·m) | 层剪力 (kN) | 楼层倾覆力矩 (kN·m) |
| 1 | 1534 | 18109 | 709 | 6535 |
| 2 | 1463 | 13692 | 585 | 4394 |
| 3 | 1363 | 9136 | 438 | 2626 |
| 4 | 1129 | 4989 | 286 | 1298 |
| 5 | 727 | 1802 | 138 | 427 |

从表 20-24 和表 20-25 可以看出，设置隔振器对于结构反应谱地震作用和时程作用下的地震作用都降低了 50%左右，倾覆力矩也出现了大幅的降低。

(2) 粘滞阻尼器算例

图 20-22 给出了考虑阻尼器设置的二维框架算例，框架总高度为十层，层高 3m，框架梁柱截面形式相同，其中一榀框架设置了阻尼器，另一榀框架没有设置阻尼器，对于此结构进行了考虑 XZ 平面内自由度的动力时程分析。

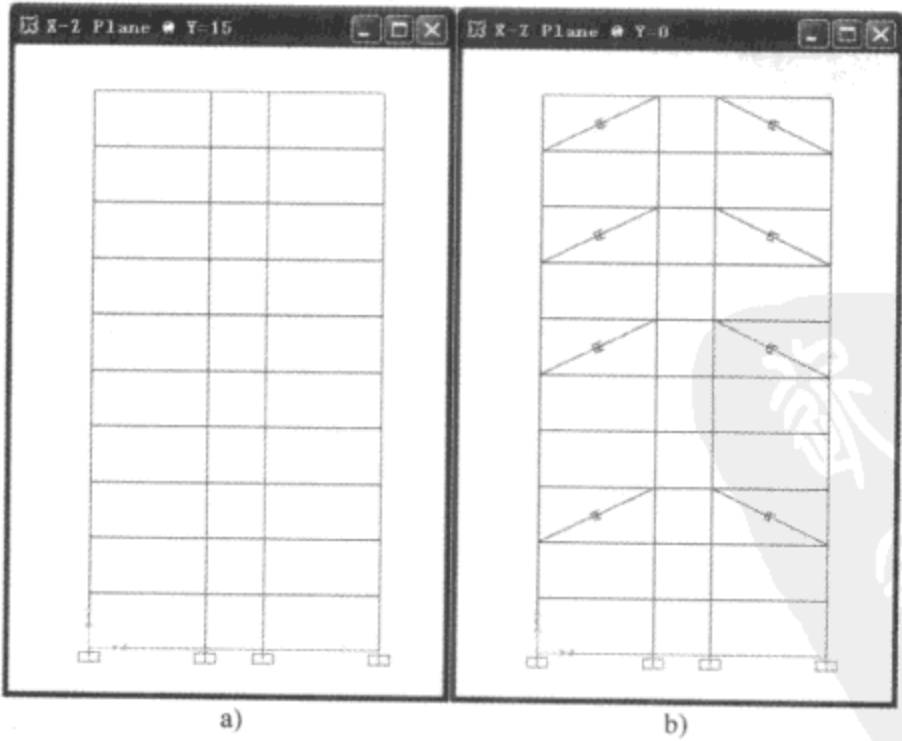


图 20-22 阻尼器算例模型
a) 不设置阻尼器；b) 设置阻尼器

基于以上算例，表 20-26 给出了两榀框架动力时程分析作用下的最大层剪力和倾覆力矩，可以看出，设置阻尼器对于结构楼层剪力降低发挥了比较明显的效果。

时程作用下算例模型层剪力及楼层倾覆力矩信息 表 20-26

| 楼层序号 | 不设置阻尼器 | | 设置阻尼器 | |
|------|----------|---------------|----------|---------------|
| | 层剪力 (kN) | 楼层倾覆力矩 (kN·m) | 层剪力 (kN) | 楼层倾覆力矩 (kN·m) |
| 1 | -22.53 | -420.32 | -5.18 | -134.35 |
| 2 | -20.91 | -351.72 | -5.39 | -120.68 |
| 3 | -20.52 | -286.78 | -5.43 | -100.97 |
| 4 | -20.56 | -226.85 | -4.67 | -81.86 |
| 5 | -16.29 | -173.09 | -3.07 | -63.86 |
| 6 | -13.88 | -125.35 | -1.36 | -49.64 |
| 7 | -11.36 | -84.29 | -0.51 | -39.64 |
| 8 | -8.68 | -50.48 | -0.77 | -31.45 |
| 9 | -5.76 | -24.63 | -1.45 | -20.79 |
| 10 | -2.64 | -7.53 | -1.43 | -9.60 |

为了直观显示阻尼器对于结构侧向位移的控制，表 20-27 给出了时程作用过程中四个时刻的结构定点侧向位移结果，可以看出，设置阻尼器的框架每一个时刻的结构定点侧向位移都得到了有效的抑制。

时程作用算例模型顶层节点位移信息 表 20-27

| 序号 | 时刻 | 顶层侧向位移 (mm) | |
|----|------|-------------|--------|
| | | 不设置阻尼器 | 设置阻尼器 |
| 1 | 0.05 | 0.162 | 0.126 |
| 2 | 0.10 | 0.784 | 0.214 |
| 3 | 0.15 | 1.082 | 0.116 |
| 4 | 0.20 | 0.145 | -0.043 |

20.5 撞击、爆炸问题的模拟

自美国 911 以后，建筑结构抗冲击和爆炸的研究越来越广泛，对于甲类建筑结构和超高层建筑也提出了要具备抵御爆炸和外力冲击的能力。除了民用建筑以外，SAP2000 还广泛的应用在各种工业建筑领域和特殊构筑物方面，对于这些类型的建筑，经常会涉及到撞击、冲击等波动荷载的形式。本节将就如何使用 SAP2000 来解决这类问题展开一定范围的探讨。

20.5.1 撞击、爆炸荷载函数形成

撞击、爆炸荷载是一种动力荷载，但它与一般波动荷载形式又不一样，它是在某一个相对比较短的时间内积聚相对比较大的能量并作用于结构的过程。因此对于这类荷载的函数形成，使用的方法与前面我们所讨论的一般波动荷载或地震时程曲线相同，但最终形成的荷载形式不同。

图 20-23 给出了三种常见的冲击荷载函数曲线形式，其中 a) 为单峰值冲击荷载，荷载

发生在 0.2s，持续的时间为 1s，随后的函数值为 0；b) 也为单峰值冲击荷载，不同之处是冲击荷载作用从零时刻开始，持续的时间为 1s，随后的函数值为 0；c) 也为一个连续峰值冲击荷载作用，而且每一次峰值在加大，持续的时间为 1s（如果需要可以定义不同的持续时间），随后的函数值为 0，如海浪冲击作用就可以近似认为是这种函数形式的冲击荷载作用。

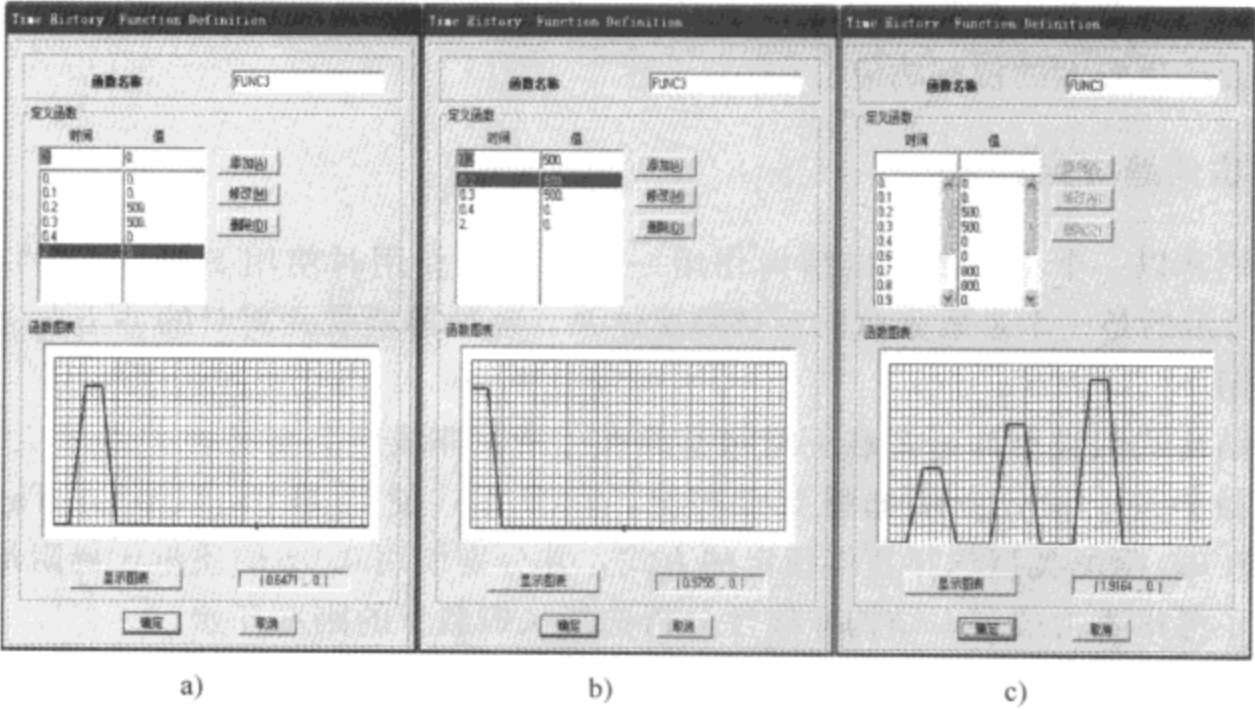


图 20-23 撞击、爆炸和载曲线形式

20.5.2 撞击、爆炸荷载的施加

我们都知道对于结构撞击作用，一般是施力对象与结构构件瞬时接触并将一部动能传递给建筑结构的过程，它与我们处理的常规动力荷载作用所使用的能量传递形式是相似的，都是作用源与结构构件直接作用完成的，不需要介质。但是爆炸荷载则不同，它是由一点或多点爆破源在发生化学反应后体积急剧膨胀而在周围的环境中产生强烈的冲击波，这些冲击波最终作用于结构并在瞬时将大量动能传递给结构构件，因此爆炸作用使用了空气这样一种与传统动力分析完全不同的介质来完成整个荷载的作用过程。

前面我们在线性时程分析中时程曲线的形成部分已经提到，SAP2000 是没有提供波动传递的介质单元和相关属性的，因此也不能够模拟波动在介质中传递的过程。在爆炸分析中，SAP2000 所能够进行的分析是爆炸冲击波开始作用于结构的时刻以后结构响应的情况，因此我们是基于已知的作用于结构的冲击波状态来进行分析的，这一冲击波就是我们在时程函数中所定义的时程曲线的形式。而它是如何从爆破源产生并经过一定介质传递后形成最终的这一曲线状态则不在分析的范围之内。

20.5.3 时程工况的定义及积分方式的选择

对于撞击和爆炸作用，在进行非线性时程分析时，需要在选择积分方式和考虑的非线性属性方面注意相关问题。首先对于这类问题，建议使用直接积分类型的时程分析进行，这样

便于直接得到结构每一时刻真实的响应状态，而不会受到使用模态积分时所考虑模态数量的限制。如果在某种情况下必须使用模态积分来解决时，模态积分所基于的模态分析一定要考虑足够多的振型数量而得到结构每一时刻尽可能精确的响应状态。

对于撞击和爆炸作用非线性时程工况的定义方式与前面我们所谈到的一般非线性时程工况的定义是基本一致，需要注意的一点是对于所考虑的非线性属性的范围定义。在撞击和爆炸作用下，一般需要考虑荷载的 $P-\Delta$ 效应和大位移的几何非线性效应，因为对于这类分析结构中往往会产生较大的位移响应。

20.5.4 冲击问题应用算例

本节我们将以一个小例子给出结构作用一定的冲击作用时使用 SAP2000 的分析方法。如图 20-24 所示的是一个悬索张拉的玻璃幕墙体系，玻璃幕墙受到瞬时的冲击荷载作用，荷载的形式如图 20-25 所示。

对于该结构我们进行冲击荷载下结构非线性分析，非线性类型考虑 $P-\Delta$ 和大位移效应，以及索的单拉效应。积分方法选择直接积分，积分方式使用 Hiber-Hughes-Taylor 方法，Alpha 系数取 0。阻尼类型选择直接指定的方式，并分别使用 0.02 的质量比例阻尼和刚度比例阻尼。为了考虑重力效应，结构非线性分析选择从恒载下的刚度开始。

通过荷载曲线可以看出，冲击荷载作用发生在 0.01s 时刻，持续时间为 0.001s，但是为了观察结构响应的全过程，分析的时间间隔使用 0.001s，输出时段总步数为 300 步，时间长度为 0.3s。图 20-26 给出了每隔 0.05s 结构的变形图。

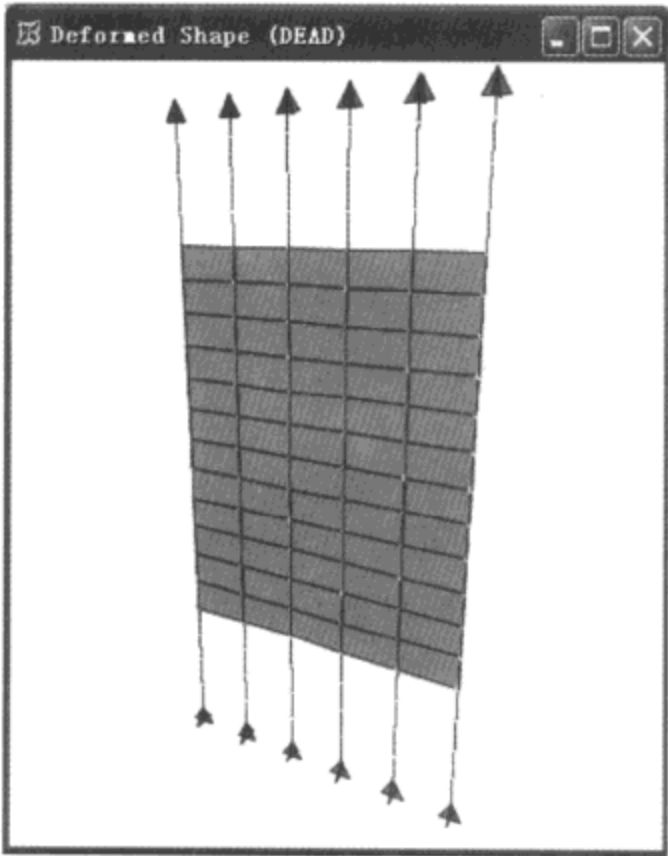


图 20-24 冲击分析算例模型

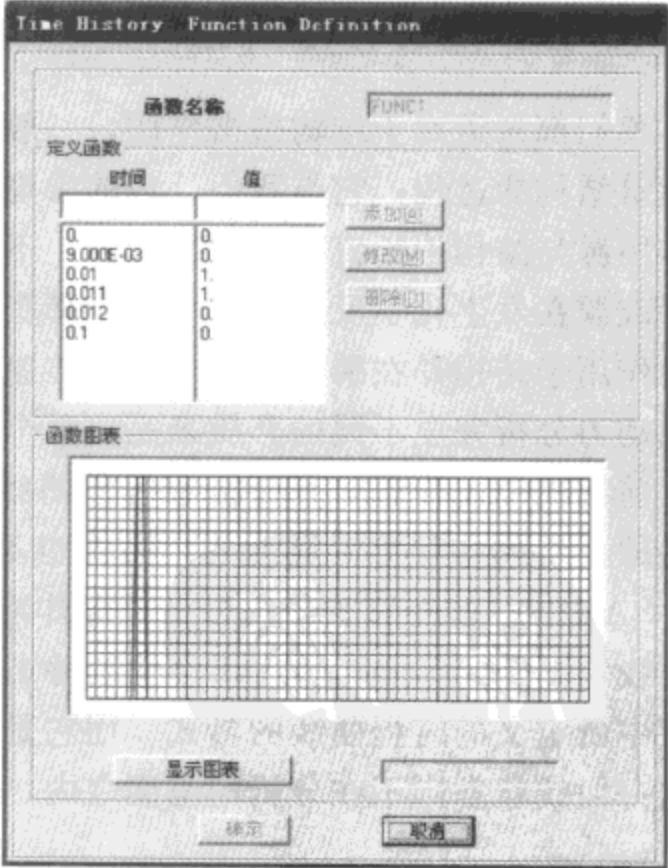


图 20-25 冲击荷载数据

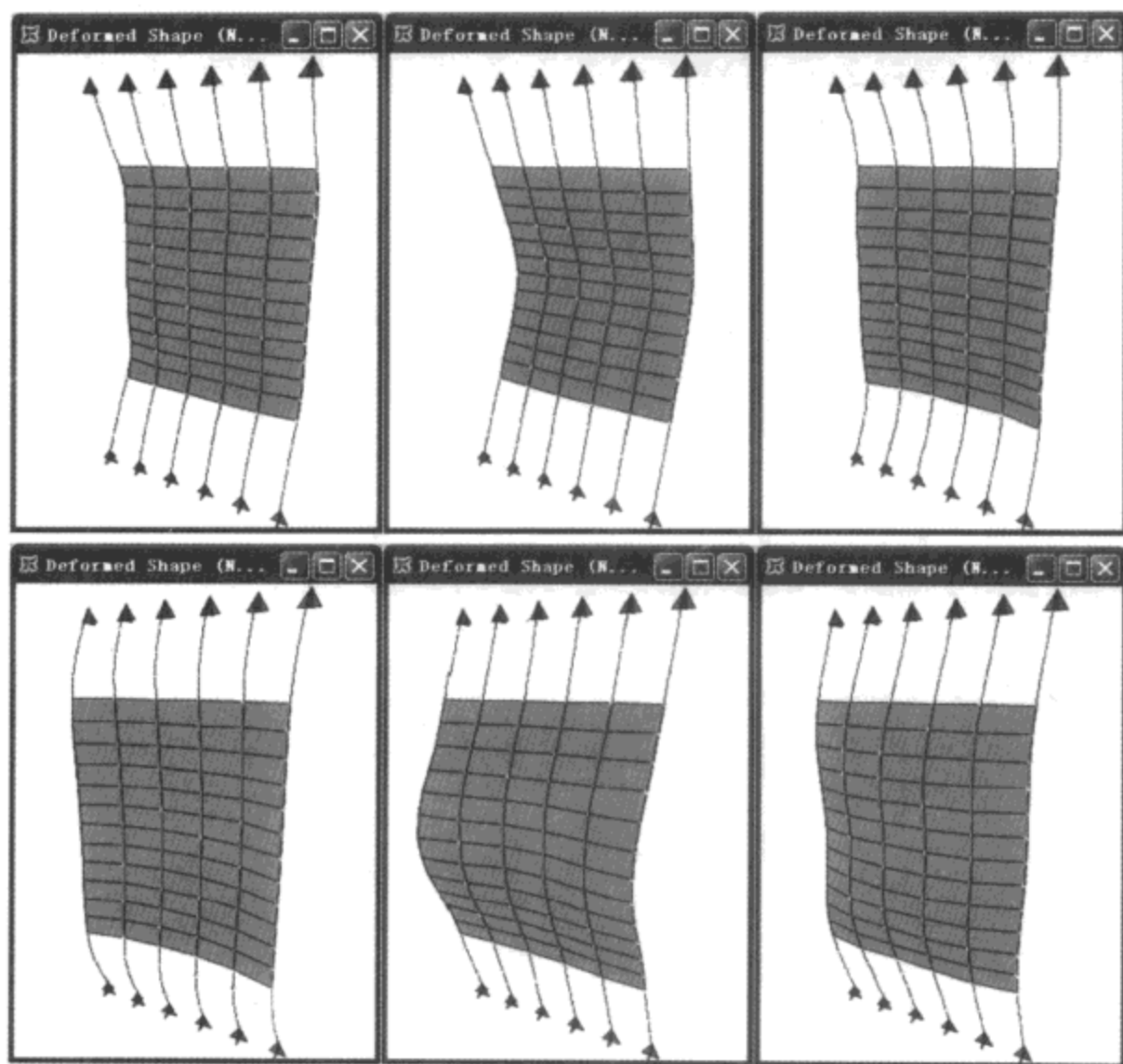


图 20-26 结构在冲击荷载下的变形图

通过变形图可以看出虽然荷载作用在 0.011s 已经结束，但是结构的响应并没有就此中止，并且由于冲击作用比较大，结构具有惯性，结构的变形在后面的 0.05s 不仅没有减小反而继续加大。当到达一个方向的极值后，由于索的拉力作用，整个结构开始回弹，并从 0.17s 开始向反方向运动并达到极值。随后结构将在阻尼作用下，能量慢慢被耗损，变形的幅度越来越小直至为零。

图 20-27 给出了结构每隔 0.05s 结构玻璃表面的应力图，此处给出的结果是面向读者的这一面的最大正应力值，一般实际结构玻璃两个表面的应力值是不相等的，读者可以通过随书光盘的算例进行察看。应力的显示范围为 $-20 \sim 50 \text{ N/mm}^2$ ，图中颜色显示为应力值，橙色为 0，如果使用程序可以看出玻璃的应力与结构的位移响应直接对应，并且整个动力分析过程中变化是连续的。

图 20-28 和图 20-29 分别输出了算例中幕墙中间部位 54 号节点的位移和速度，位移的单位是 mm，速度的单位 m/s，从图中可以看出该节点在冲击作用下最大位移为 200mm，而回弹时最大位移 180mm；瞬间峰值速度达到 3.2m/s。

图 20-30 输出了 54 号节点的加速度变化曲线，单位为 m/s^2 ，我们可以清楚地看到在冲击作用下该点瞬时加速度达到一个非常大的值，接近 1200 m/s^2 ，但是持续的时间比较短，在回弹过程中最大加速度在 300 m/s^2 左右。

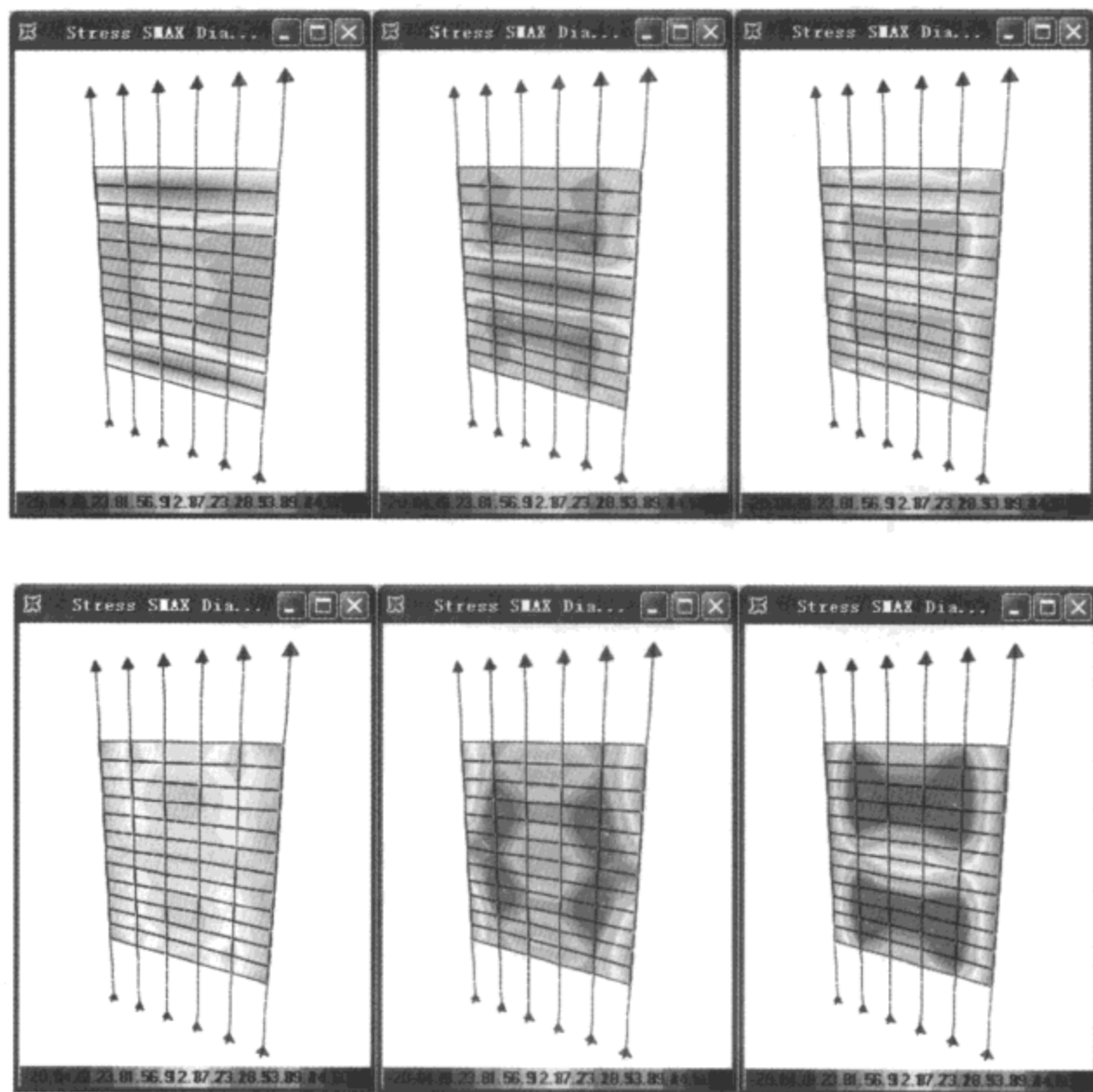


图 20-27 结构在冲击荷载下的应力图

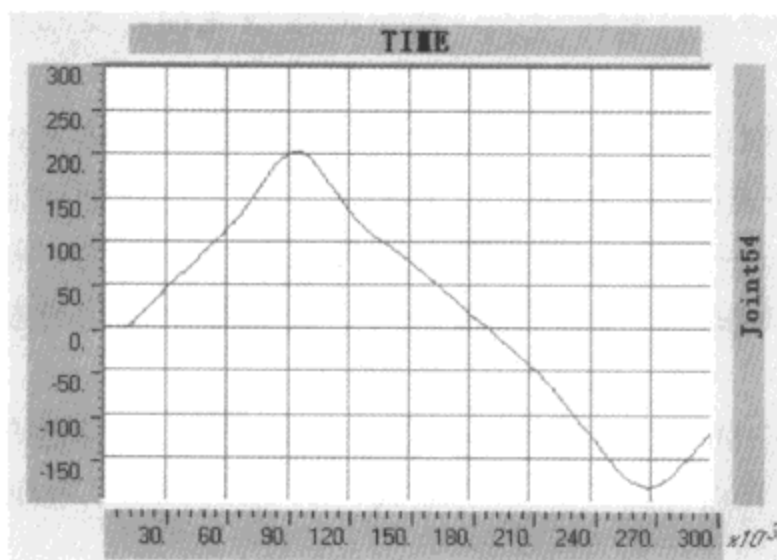


图 20-28 54 节点的位移曲线

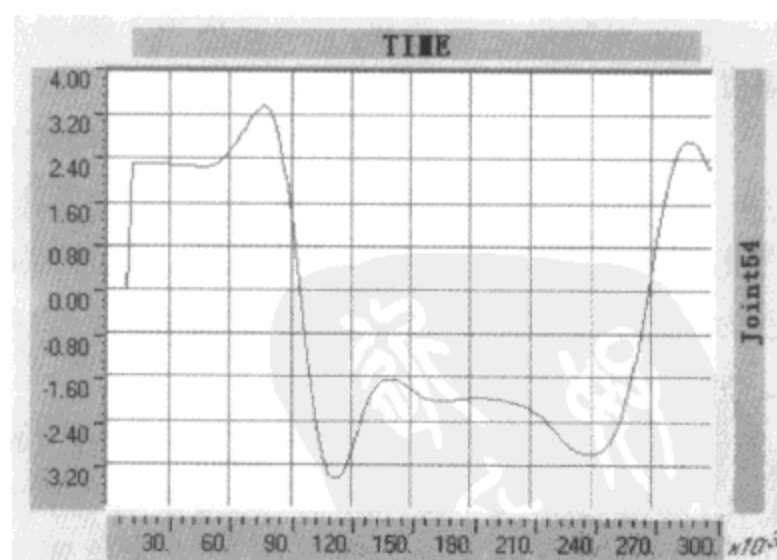


图 20-29 54 节点的速度曲线

图 20-31 输出的是拉索其中一个边界点 F1 方向的反力，单位为 kN，F1、F2 和 F3 三个方向的反力分别对于全局坐标 X、Y 和 Z 方向，对于本算例，冲击作用是沿 X 方向作用的，

因此我们只关心 F1 的反力情况。我们可以看到虽然该反力发生了一定程度的波动，但是由于柔性索的过渡作用，冲击并没有带来反力很大的峰值，最大反力为 300kN 左右。

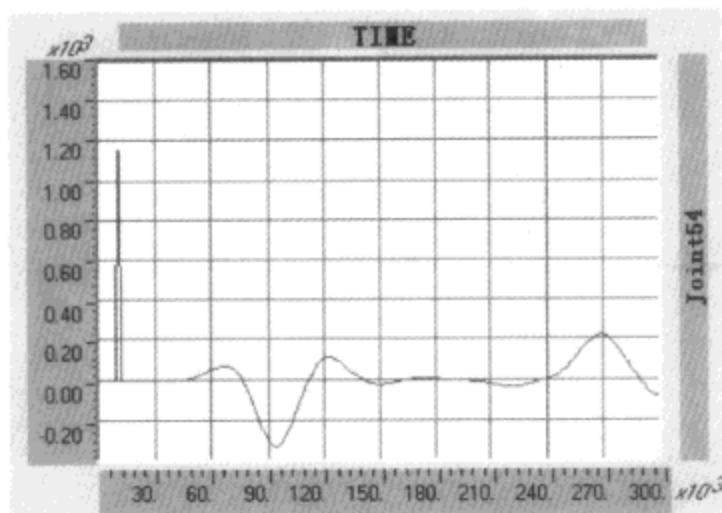


图 20-30 54 节点的加速度曲线

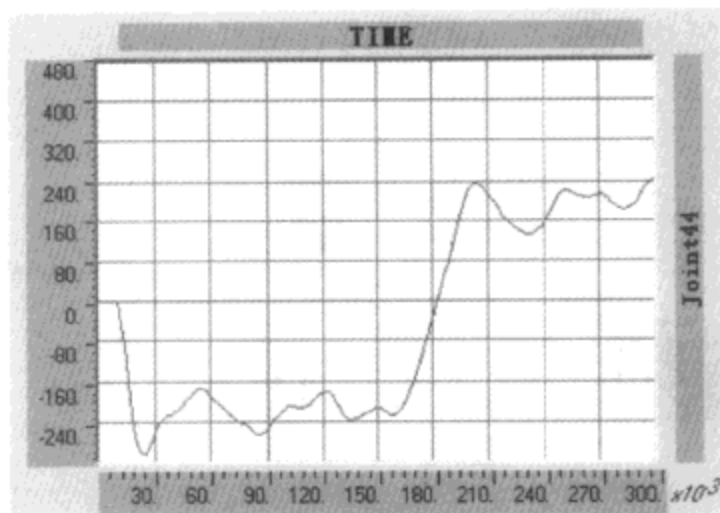


图 20-31 44 节点的 F1 反力曲线

图 20-32 输出了 51 号索单元的轴力曲线，单位为 kN，可以看出拉索受到的轴力一直是拉力作用，而且拉力在发生周期性波动，峰值为 10800kN 左右，随周期性回弹峰值是递减的。图 20-33 输出了第 32 号（紫色虚线）和 50 号（蓝色实线）模拟玻璃的面单元的最大正应力曲线，单位为 MPa，该 32 号单元位于幕墙的中间部位，50 号单元位于幕墙的角部，可以看出 32 号单元在瞬间冲击力作用下达到了一个比较大的应力峰值，随后逐步降低，而角部 50 号单元由于其他单元的柔性过渡作用，没有出现瞬间峰值，但是随后逐步增加并达到了峰值。

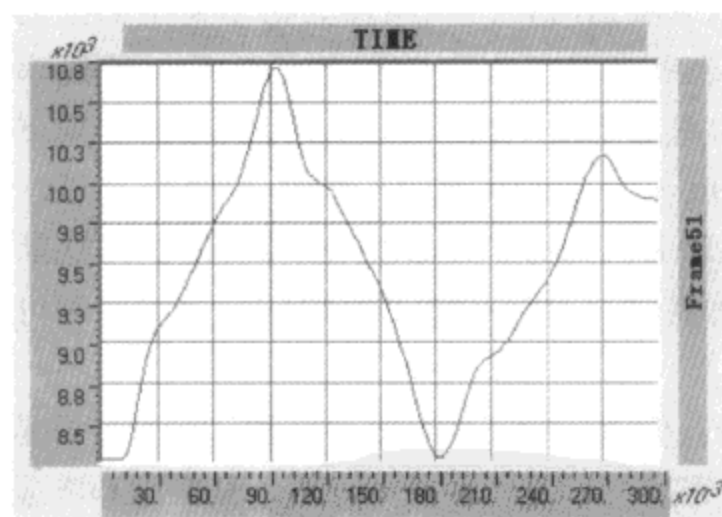


图 20-32 51 号索单元轴力曲线

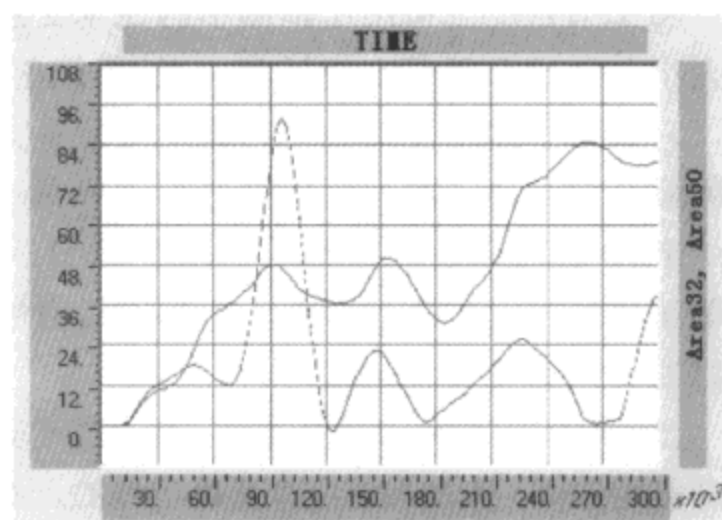


图 20-33 三个玻璃单元最大正应力曲线

第21章

频域分析

SAP2000 中的频域分析主要包括两个类型：稳态分析和功率谱密度分析。稳态分析用于求解结构在随时间简谐变化的激励作用下所发生的响应问题。这种分析是一种确定性的线性分析。求解的方法是分别在若干个频率处求出结构响应量，然后得到一个响应量与频率的关系。这个关系一般通过图形表达，这样就可以直观地在图上确定峰值响应。结构响应可以是位移、内力或应力等。激励大小随时间按正弦或余弦函数变化。例如，稳态分析可以用于求解建筑物中的旋转机械对建筑物的影响，或者是运转中的发动机对车身的影响；稳态分析的结果可以帮助工程师避免共振、疲劳及其他一些受迫振动时的不利情况。

功率谱密度分析用于预测结构在承受连续的随机激励时，结构响应为某个特定幅值的概率大小。激励采用具有统计意义的功率谱密度函数来表示。功率谱密度函数是一种概率函数，它是某个随机变量在单位频率上的平方值。功率谱密度（PSD）是结构在随机激励下响应的概率统计值。功率谱密度分析得到的是 PSD 值与频率的关系，一般通过图形表示。这里的 PSD 值可以是位移 PSD、速度 PSD、加速度 PSD、内力 PSD、应力 PSD 等。某些随机问题很难通过时域进行分析，例如结构对噪音或随机转动的机械转子的响应，这些问题可以通过功率谱密度分析来处理。

虽然稳态分析和功率谱密度分析都属于频域分析，但两者的区别是很明显的。稳态分析是一种确定性分析，激励和响应都是确定性的。而功率谱密度分析是一种概率分析，其激励和响应都是通过统计方式表示的。下面分两节结合例题分别介绍稳态分析和功率谱密度分析的过程。

21.1 稳态分析

本节以一个例题为线索介绍稳态分析的过程。

例题：假定有一个带旋转飞轮的设备，旋转飞轮具有偏心质量。质量为 m ，质心的偏心量为 e ，飞轮绕平行于全局 Y 轴的轴旋转。该机械放置在一两对边简支的钢筋混凝土板上，板宽 1m，板厚 80mm，跨度 6m，板混凝土等级为 C20。求该设备启动过程中，转子转动频

率从 0Hz 逐步增大到 30Hz 过程中引起的结构响应。

整个分析过程可以分为建立模型、定义稳态函数、定义稳态分析工况、分析结果查看等步骤。下面分小节进行叙述。

21.1.1 建立模型

在 SAP2000 中建立一个截面高 80mm，宽 1m 的梁来模拟混凝土板，模型示意如图 21-1 所示。梁左端铰接，右端滑动。转子转动中心离混凝土板距离很小，认为转子产生的离心力是一个作用于梁跨中的集中力。转子本身质量较小，忽略转子转动与梁振动的耦合作用。忽略转动机械除转子外其他部分

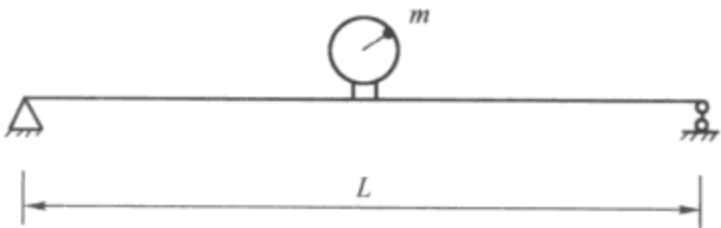


图 21-1 算例模型

的质量。荷载大小为 $em\omega^2$ ，该转子在 X-Z 平面内旋转。将该荷载分解为 X 和 Z 向两个分量。X 方向的荷载分量为 $F_x = em\omega^2 \sin 0^\circ$ 。因此，问题简化为简支梁跨中承受两个简谐荷载的作用，荷载大小为 $em\omega^2$ ，两荷载相位角相差 90° 。经模态分析可知，该楼板水平振动的最低频率为 133.7Hz，因此不考虑水平简谐荷载 ECCX 的作用，而仅考虑竖向简谐荷载 ECCZ 的作用。

由于 SAP2000 中采用的是分布质量模式考虑结构质量，因此需要对该梁进行剖分，以保证振型求解的精度，这也是为了保证求解到所有转子转动频率范围内的结构自振频率。选中该梁，执行菜单【编辑】>【分割框架】命令，将该梁平均分成 8 段。

还需要先在跨中指定集中荷载，该荷载用于反映简谐荷载的作用位置、方向、幅值。本例中， $e=0.1\text{m}$ ， $m=100\text{kg}$ ，荷载幅值为 $em\omega^2$ 。在跨中节点指定一个集中荷载，方向向上，大小为 10N。

21.1.2 定义稳态函数

稳态函数为外荷载随频率变化的函数。稳态函数中不包括相位信息。执行【定义】>【函数】>【稳态】命令，弹出图 21-2 所示的定义稳态函数对话框。

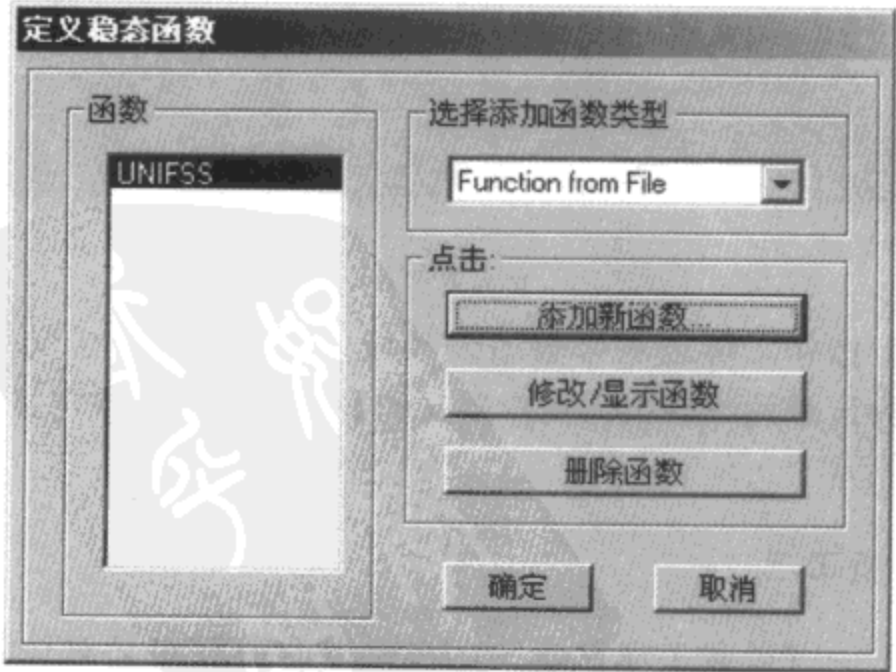


图 21-2 稳态函数引入对话框

该对话框中有一个默认的 UNIFSS 函数，这是一个频率从 0~1、值为 1 的函数。可以通过两种方法定义一个新函数。方法一是在其他软件中准备函数数据，保存为 TXT 或 DAT 等格式；然后点击定义稳态函数对话框中的选择添加函数类型下拉菜单，选择其中的 **Function from file**，将弹出稳态函数定义对话框，如图 21-3 所示。点击该对话框中函数文件区域的【浏览】按钮，选中已准备好的文本文件。具体操作方法与时程函数的定义方式相同。方法二是点击定义稳态函数对话框中的选择添加函数类型下拉菜单，选择其中的 **User Function**，然后在弹出的稳态函数定义对话框中直接输入各个频率处的函数值。

准备一个文本文件 SteadyFunc.txt，见本书附带光盘中的文件 SteadyFunc.txt。将该文件通过上一段介绍的方法一导入到模型中，各选项按照图 21-3 所示方式进行选择。将稳态函数名称命名为 ecc。

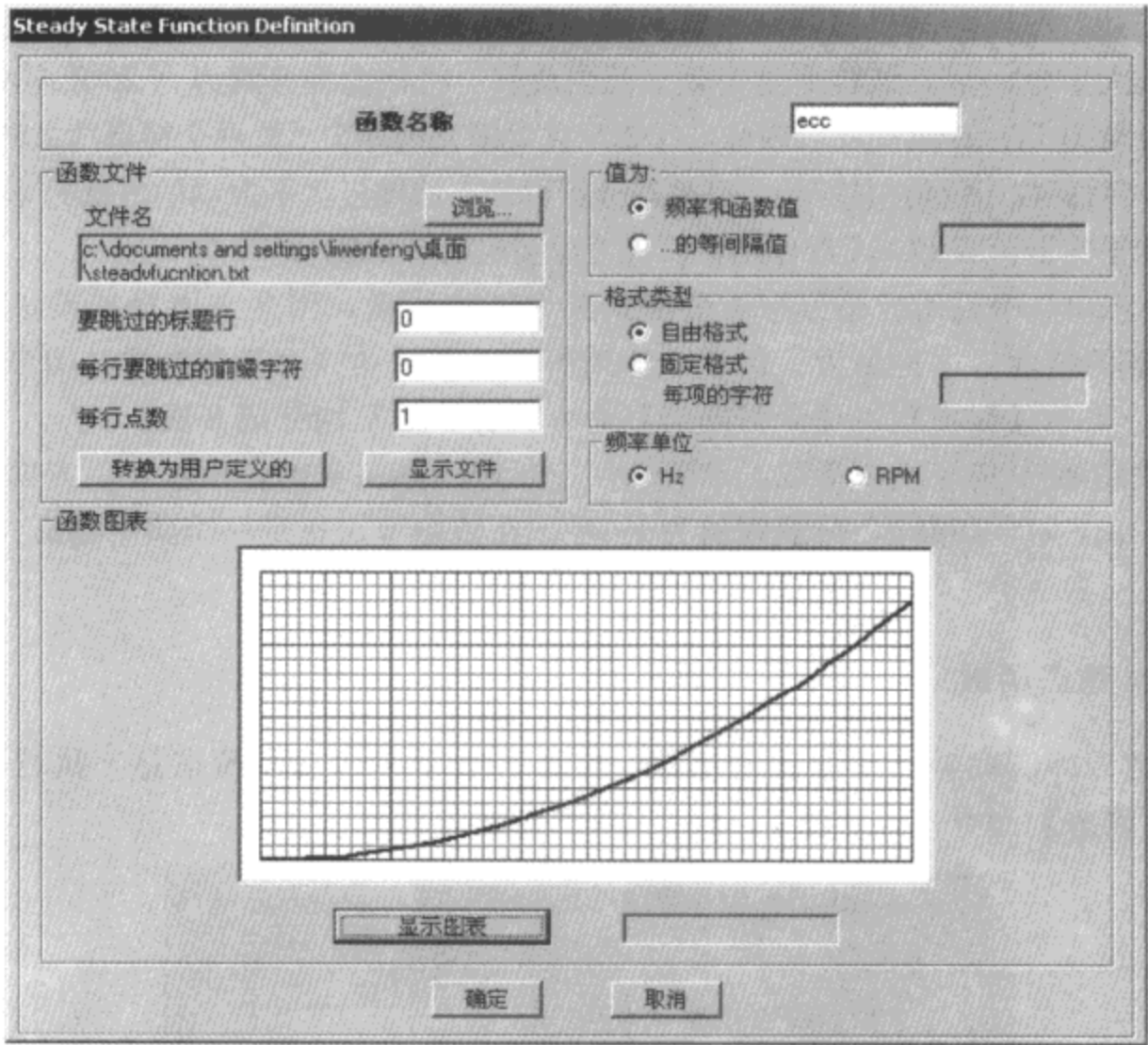


图 21-3 稳态函数定义对话框

点击【显示图表】按钮，可以在函数图表区域以图形显示所定义的功率谱密度函数曲线。然后点击函数文件区域的【转换为用户定义的】按钮，可以将定义的外部文件导入模型文件中。

21.1.3 定义稳态分析工况

执行菜单【定义】>【荷载工况】命令，在弹出的荷载定义对话框中（图 21-4）定义两个类型为 OTHER，名称分别为 ECCZ 的荷载工况。

注意, ECCZ 也定义为其他的类型, 只要自重乘数为零即可。这里, 荷载工况的类型对分析没有影响。



图 21-4 荷载定义对话框

还需要定义一个模态分析的工况, 模态数量定义为 6 个。执行【定义】>【分析工况】命令, 在弹出的分析工况对话框中, 点击选中程序默认生成的 ECCX 静力分析工况, 并点击【修改/显示工况】按钮, 则将弹出分析工况数据-稳态对话框。在该对话框的分析工况类型下拉菜单中选择 Steady State 类型, 按照图 21-5 中的方式定义参数。对话框说明见表 21-1~表 21-4。

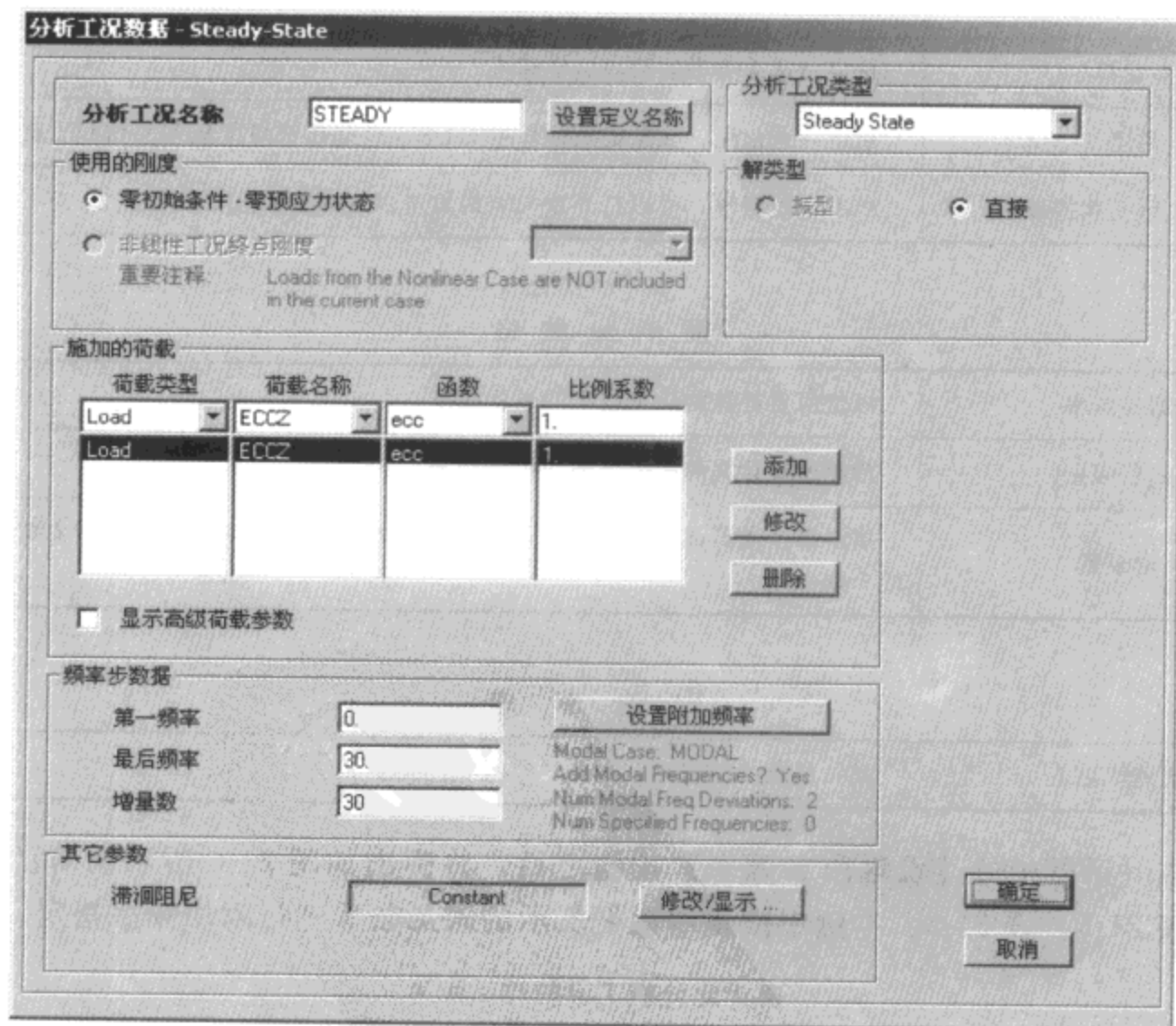


图 21-5 稳态分析工况定义对话框

使用的刚度

表 21-1

| | |
|--------------|----------------------------------|
| 零初始条件-零预应力状态 | 从结构的自然状态刚度开始分析，该自然刚度不包括其他分析得到的刚度 |
| 非线性分析终点刚度 | 从先前的一个非线性分析得到的刚度矩阵开始进行分析 |

施加的荷载

表 21-2

| | |
|----------|---|
| 荷载类型 | 选择要施加一个荷载还是施加一个内置加速度荷载 |
| 荷载名称 | 如果荷载类型为加速度时，可为加速度指定方向。如果荷载类型为荷载时，在这里选择一个已定义的静力荷载 |
| 函数 | 预先定义的稳态函数 |
| 比例系数 | 在此为荷载指定一个比例系数。对于加速度荷载，该比例系数具有单位加速度，应与使用的单位一致。对于荷载工况，该比例系数是无量纲的 |
| 相位角 | 相位角指定了荷载循环中荷载发生的时刻。荷载循环从零度开始，每 360°重复。荷载循环中荷载按照余弦（角-相位）变化，这里角度是荷载循环的当前角，相位是指定的相位角。因此，从相位角 0°开始的荷载呈余弦函数，从相位角 90°开始的荷载呈正弦函数 |
| 坐标系 | 指定加速度类型的荷载的坐标系 |
| 角度 | 指定一个角度，在指定坐标系中 U1 和 U2 是按该角度从 UX 和 UY 旋转得到 |
| 显示高级荷载按钮 | 点击该按钮时，可以打开或关闭相位角、坐标系和角度三项 |

频率步数据

表 21-3

| | |
|------|--|
| 第一频率 | 指定所要计算的频率范围的最低频率 |
| 最后频率 | 指定所要计算的频率范围的最高频率 |
| 增量数 | 指定第一和最高频率间按均匀间距频率增幅增加的步数。用来定义要计算的频率的个数 |

其他参数

表 21-4

| | |
|------|----------|
| 滞回阻尼 | 显示已定义的阻尼 |
|------|----------|

点击该对话框中的【设置附加频率】按钮之后，将弹出如图 21-6 所示的对话框。对话框说明见表 21-5，表 21-6。本例中按该对话框所示的附加频率进行附加频率指定。

源于此分析工况的振动频率

表 21-5

| | |
|------|----------------------------------|
| 振型工况 | 从该下拉菜单中选择一个要从中提取振型并用于稳态分析的振型分析工况 |
|------|----------------------------------|

添 加 选 项

表 21-6

| | |
|-----------|--|
| 添加振型频率 | 如需要基于结构频率进行分析，请选中该复选框。建议采用该选项 |
| 从振型频率增加偏移 | 如用户需要基于结构模态频率附近的频率进行分析，选中该复选框。选中该复选框之后，可创建、修改或删除一个列表，该列表是基于模态频率的包含符号的比例偏移 |
| 添加指定频率 | 如用户需要在感兴趣的频率（例如结构中机械设备的运行频率或结构的敏感装置自振频率）处进行分析，请选中该复选框。选中该复选框之后，可创建、修改或删除一个特定频率列表 |

点击分析工况数据-稳态对话框中其他参数区域中的【修改/显示】按钮，将弹出图 21-7 所示的滞回阻尼对话框。对话框说明见表 21-7。本例中按该图 21-7 所示的参数进行阻尼指定。

滞 回 阻 尼 系 数

表 21-7

| | |
|-------------|--|
| 对所有频率常量滞回阻尼 | 对所有振型的阻尼为常数。当选中该选项时，对话框下部为常量滞回阻尼区域。此处阻尼含义与时程分析中的阻尼含义相同，常量滞回阻尼区域的参数含义请参阅时程分析的相关章节 |
| 对频率插值滞回阻尼 | 点击该选项后，该对话框下部区域变为插值滞回阻尼区域。可以在该区域中对不同频率指定不同阻尼 |

按照上述对话框中的参数设置稳态分析工况之后，即可运行分析了。

21.1.4 分析结果查看

本例关注的是转子从 0Hz 启动，转速逐渐增加到 30Hz 的过程中该楼板跨中的最大竖向振幅和最大弯矩的变化情况。

分析完成之后，执行【显示】>【显示变形形状】命令，在弹出的变形后形状对话框的工况/组合名区域中选择分析工况 STEADY。对话框说明见表 21-8、表 21-9。

工 况/组 合

表 21-8

| | |
|--------|--------------------------------|
| 工况/组合名 | 选择一个稳态分析工况 |
| 量级 | 所有相位角下的位移幅值最大值 |
| 相位角 | 在右侧栏中填入一个相位角，用于输出该相位角对应的最大位移幅值 |

多 值 选 项

表 21-9

| | |
|-----------|------------|
| 包络（最大或最小） | 输出包络值 |
| 频率 | 输出某个频率处的结果 |

按图 21-8 所示设置输出选项，将在屏幕上显示如图 21-9 所示的变形图。该变形图并不

是结构某一个真实状态下的变形图，而是程序将多种相位角和频率下所有结果的包络值直接绘制得到的图形，可以理解为位移包络图。由该图可知，跨中最大竖向位移为 8.9mm。

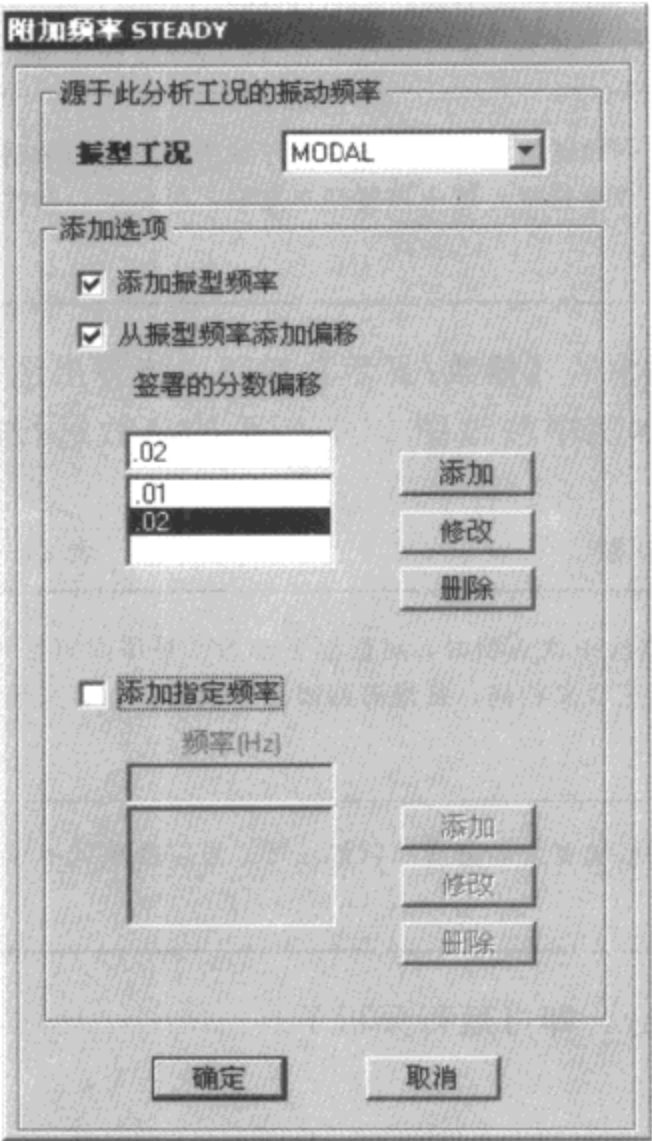


图 21-6 附加频率定义对话框

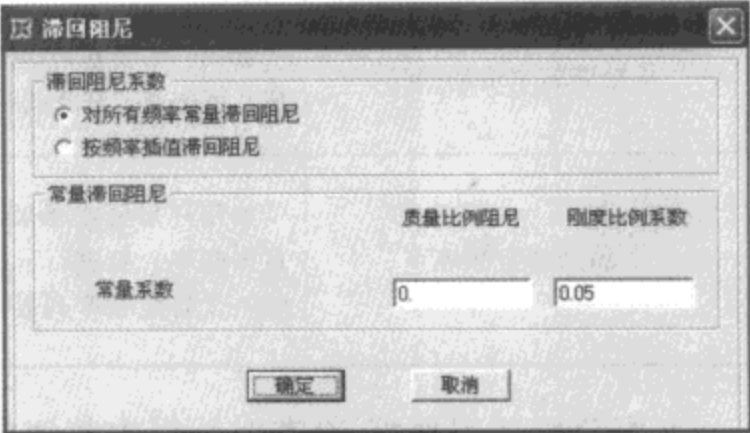


图 21-7 滞回阻尼定义对话框

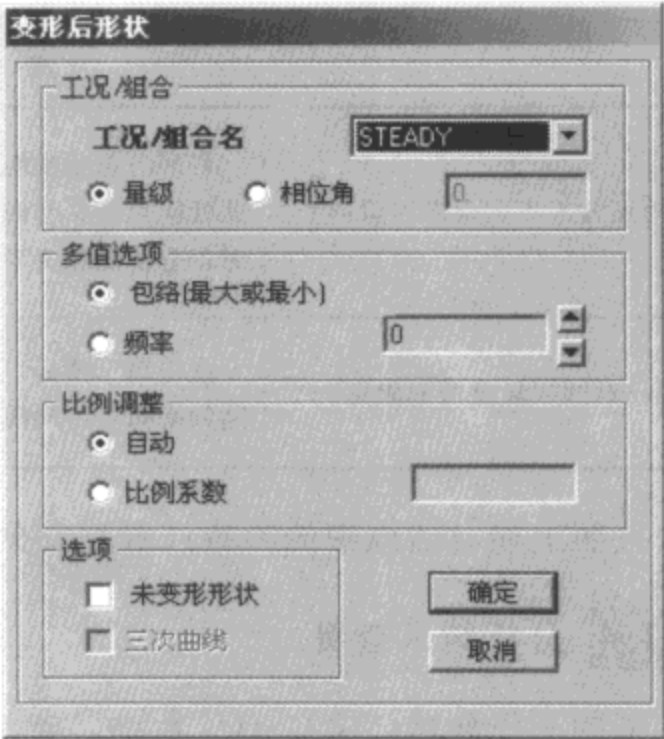


图 21-8 变形形状读取对话框

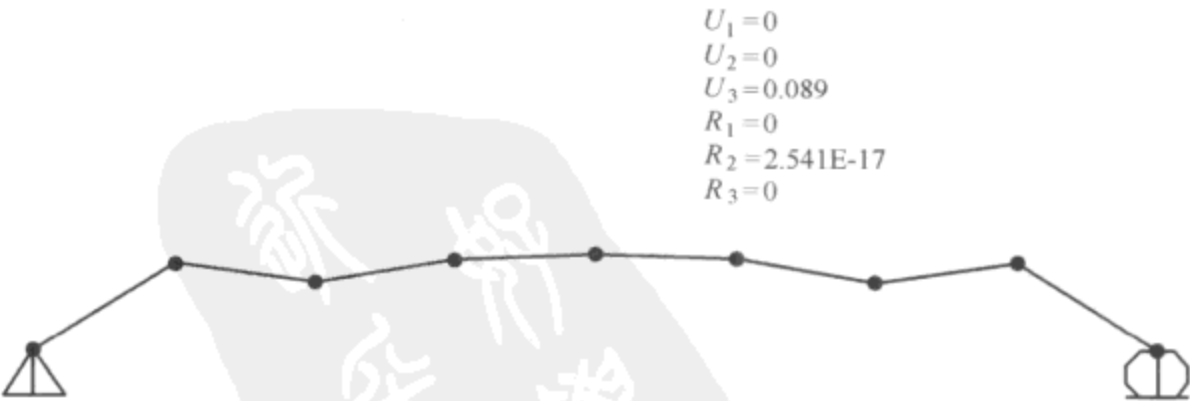


图 21-9 结构变形包络图

要查看结构最大内力，执行【显示】>【显示力/应力】>【框架/索/筋】命令，弹出如图 21-10 所示的对话框。

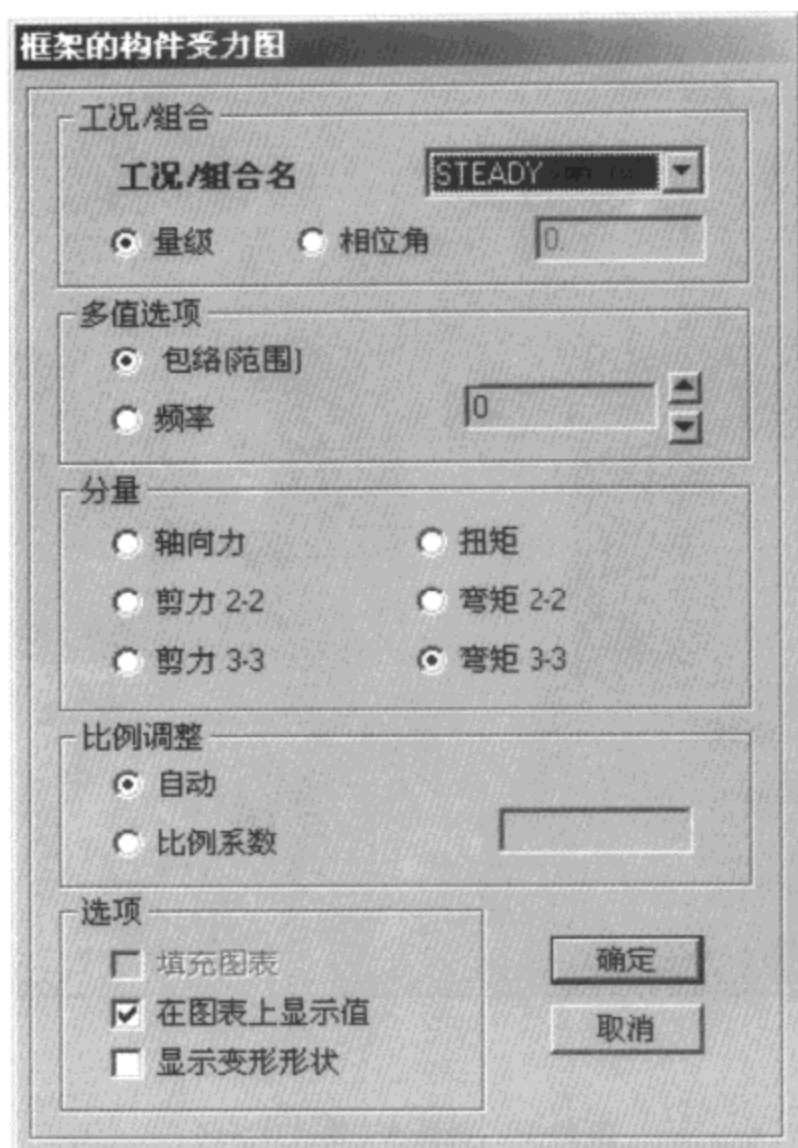


图 21-10 内力输出对话框

该对话框工况/组合、多值选项区域的含义与图 21-8 所示对话框中相应区域含义相同。按该图所示选择输出稳态分析得到的主弯矩值，在屏幕上显示，如图 21-11 所示。由该图可知，最大主弯矩出现在跨中，大小为 $25.66\text{kN} \cdot \text{m}$ 。

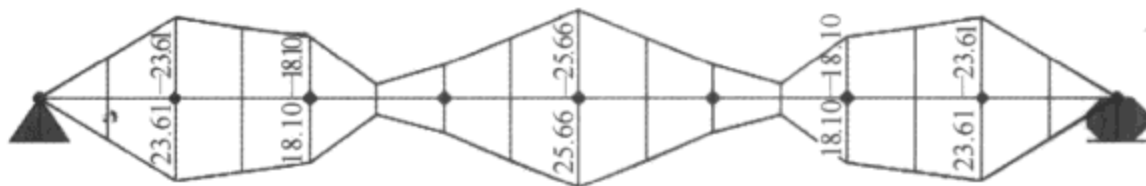


图 21-11 结构内力输出包络图

还可以通过结构响应与频率的关系曲线观察分析结果。选择跨中节点，执行【显示】>【显示绘图函数】命令，将弹出如图 21-12 所示的对话框。

点击该对话框中的【定义绘图函数】按钮，在弹出的对话框中将跨中节点的输出结果设置为 UZ 方向的位移，名称改为 midspan_disp，将其添加到垂直函数区域，点击对话框右下角的【显示】按钮，将显示跨中位移与频率的相关曲线，如图 21-13 所示。

该图即表示设备启动后，转子转动频率从 0Hz 逐渐增大至 30Hz 过程中，跨中竖向位移的变化情况。该曲线横坐标为频率，纵坐标为跨中竖向位移。同时，从该曲线可以观察到，

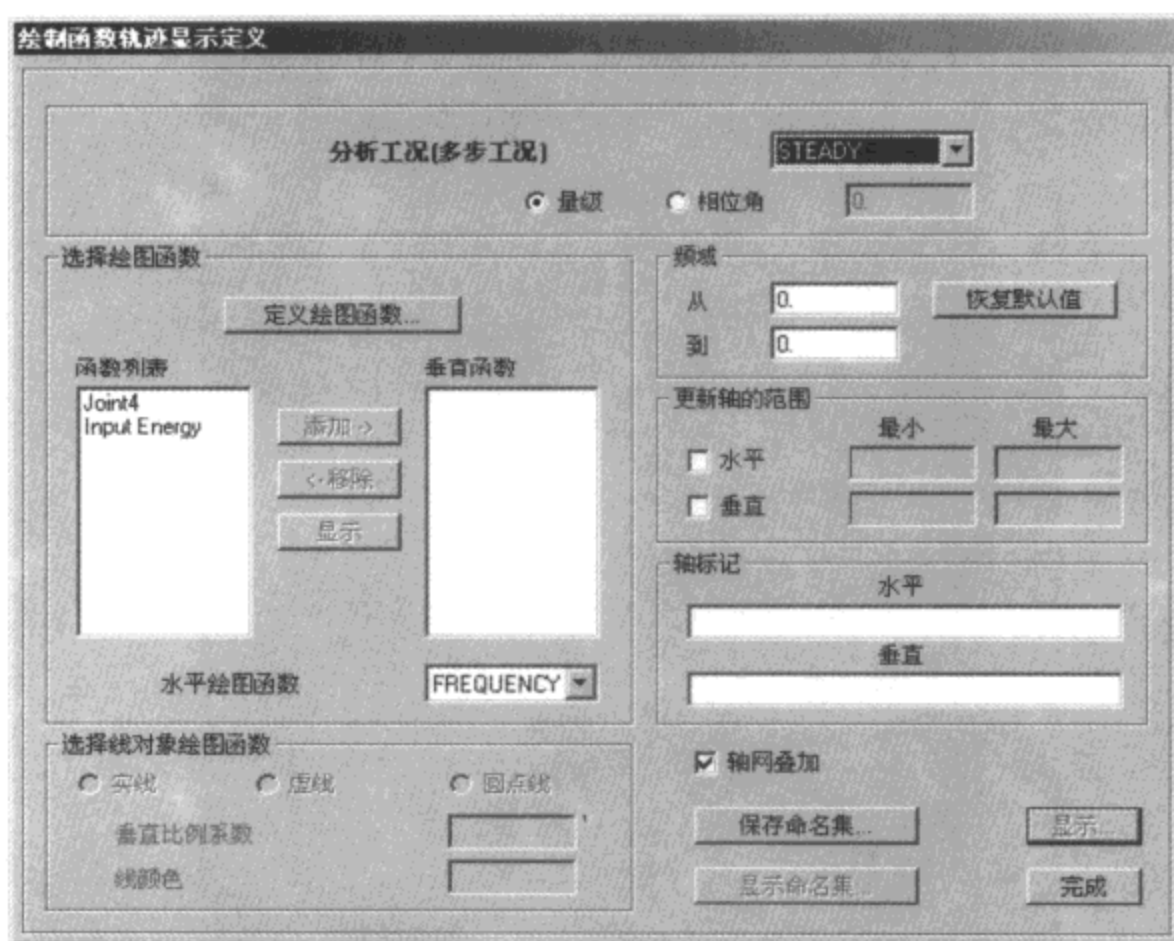


图 21-12 函数轨迹输出对话框

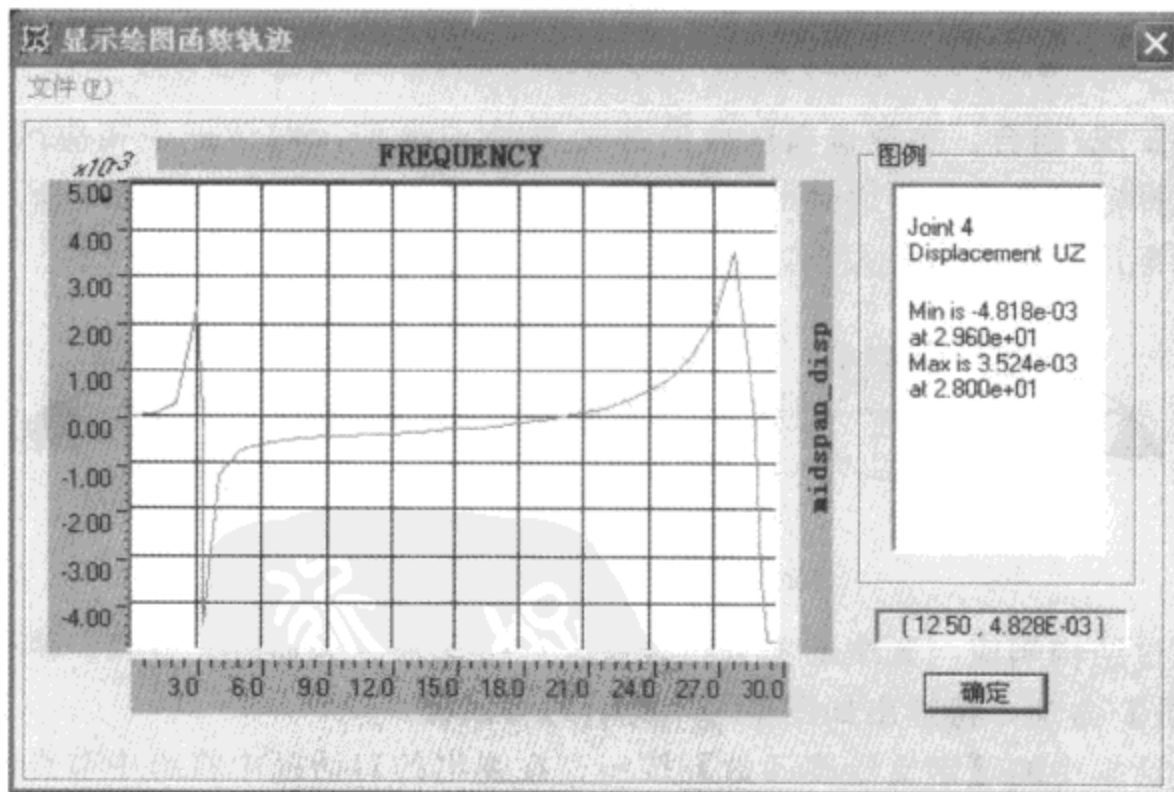


图 21-13 跨中节点位移曲线

设备以 28Hz 频率稳定转动时，板的跨中竖向位移幅值仍维持在一个较高水平，即水平坐标 28Hz 对应的竖向位移约 5.9mm。

按上述操作方法也可以查看跨中弯矩随转子频率变化的情况,如图 21-14 所示。

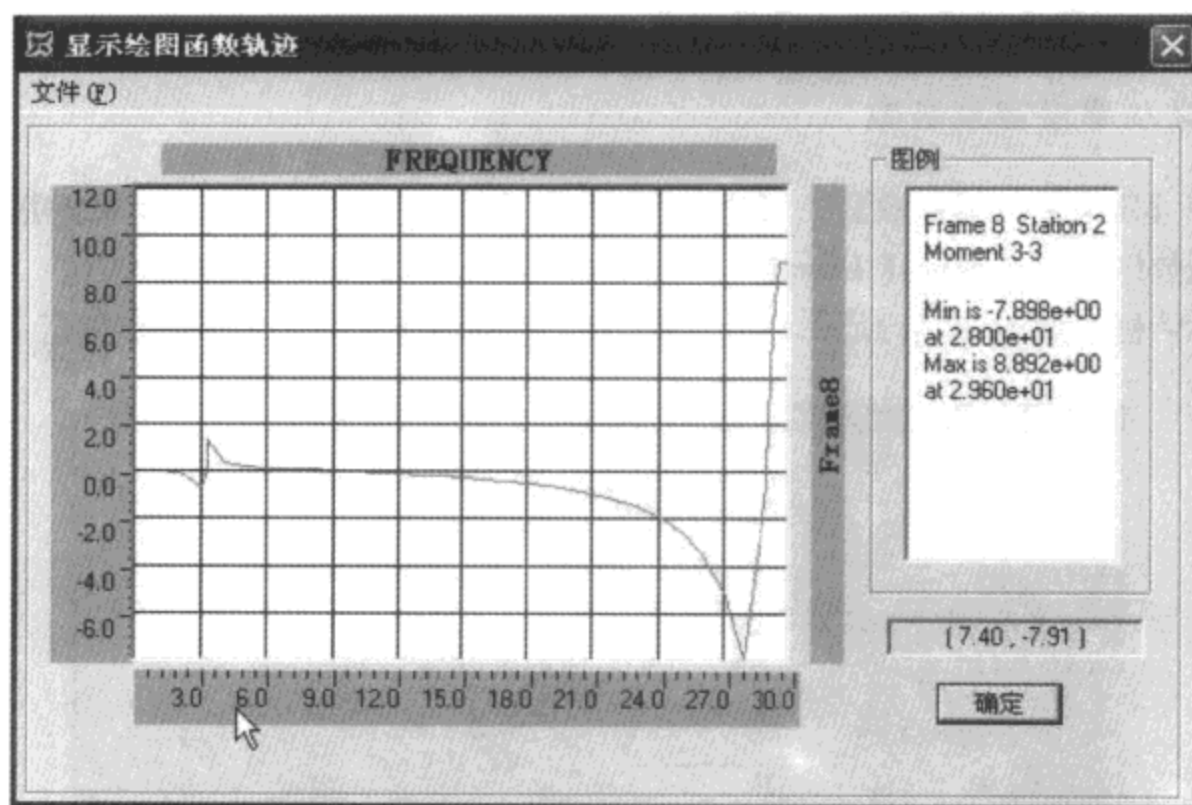


图 21-14 跨中弯矩曲线

21.2 功率谱密度分析

本节以上节例题模型为线索介绍功率谱密度分析的过程。

假定设备进入工作状态后,并不是稳定地以某一频率转动,而是其转动频率随机分布于 0~30Hz 之间。转动频率出现在 20~25Hz 之间的概率为 95%,转动频率出现在其 0~20Hz 和 25~30Hz 之间的概率为 5%。求该设备进入工作状态下,板跨中的竖向位移和弯矩。认为转子频率在三个频段间分别是均匀分布的。

与稳态分析不同的是,功率谱密度分析是一种概率统计分析,求得的结果不是确定性结果,而是数学期望值。本例仍按照建立模型、定义功率谱密度函数、定义功率谱密度分析工况、分析结果查看等几个小节进行叙述。

21.2.1 建立模型

首先定义功率谱密度函数。功率谱密度函数是一种概率函数,它是单位频率上随机变量的平方值。本例中,转子转动离心力为 $em\omega^2$, em 项通过施加的荷载考虑,通过功率谱密度函数考虑 ω^2 项,离心力的功率谱密度函数可以表示为:

$$f_j(\omega) = \omega^4 \begin{cases} 0.05/25\text{Hz} & 0\text{Hz} \leq \omega < 20\text{Hz} \\ 0.95/5\text{Hz} & 20\text{Hz} \leq \omega < 25\text{Hz} \\ 0.05/25\text{Hz} & 25\text{Hz} \leq \omega < 30\text{Hz} \end{cases}$$

按上例方法，设置荷载工况 ECCZ，并在跨中节点指定 ECCZ 竖向向上的荷载 10N。在文本函数中准备功率谱密度函数，文件名为 psd.txt。

21.2.2 定义功率谱密度函数

执行菜单【定义】>【函数】>【功率谱密度】命令，在弹出的定义功率谱密度函数对话框的选择添加函数区域，点击选择 **Function from File**，并点击【添加新函数】按钮，弹出功率谱密度函数定义对话框，如图 21-15 所示。按该图所示方法设置选项，并将函数名称定义为 psd。

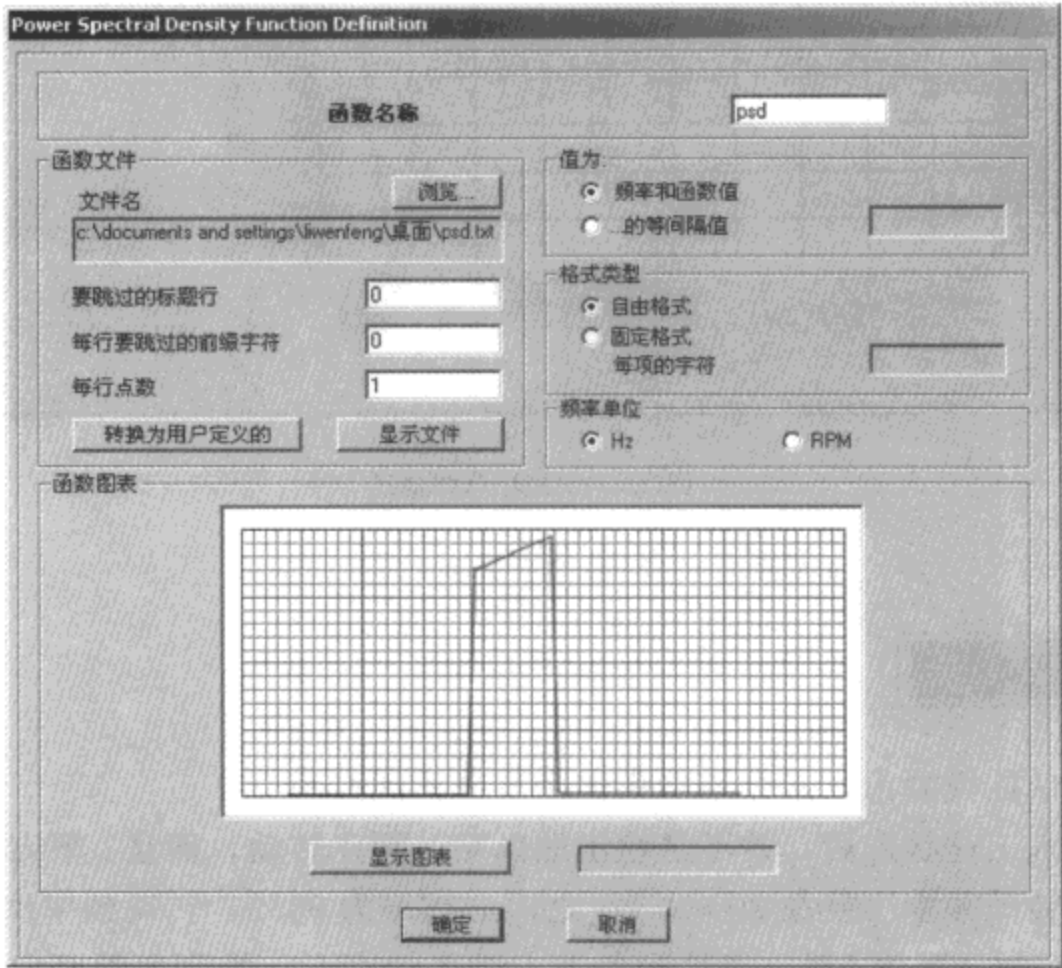


图 21-15 功率谱密度函数定义对话框

点击【显示图表】按钮，可以在函数图表区域以图形显示所定义的功率谱密度函数曲线。然后点击函数文件区域的【转换为用户定义的】按钮，可以将定义的外部文件导入到模型文件中。

21.2.3 定义功率谱密度分析工况

执行菜单【定义】>【分析工况】命令，打开图 21-16 所示的分析工况数据对话框，将该对话框的分析工况类型选为 **Power Spectral Density**，并按图 21-16 所示方式设置选项。

在分析工况数据-Power Spectral Density 对话框中，按照上一节的方式设置附加频率和阻尼。

按照上述对话框中的参数设置功率谱分析工况之后，即可运行分析了。

注意：运行功率谱分析工况的同时，需要运行振型分析工况。

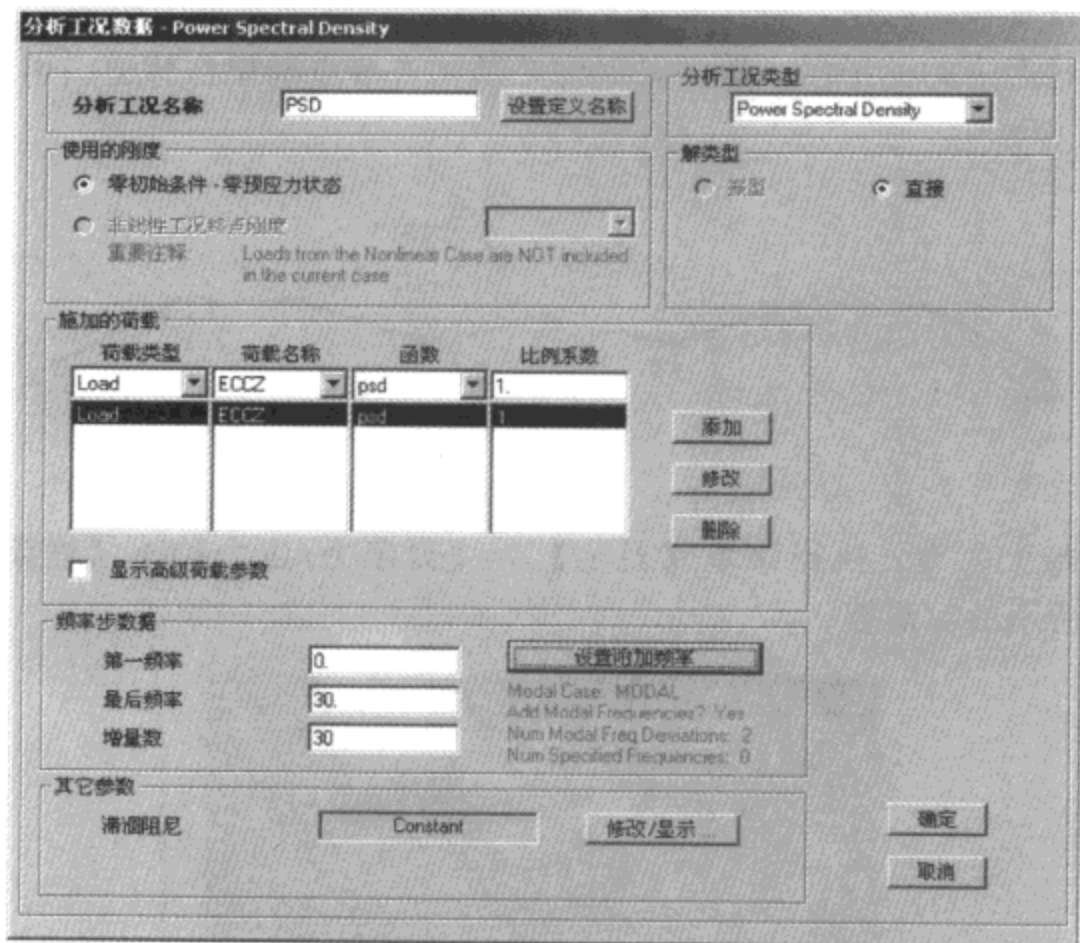


图 21-16 功率谱密度分析工况定义对话框

21.2.4 分析结果查看

分析完成之后, 点击【显示】>【显示变形形状】, 在弹出的变形后形状对话框的工况/组合区域中选择分析工况 PSD, 见图 2-17。

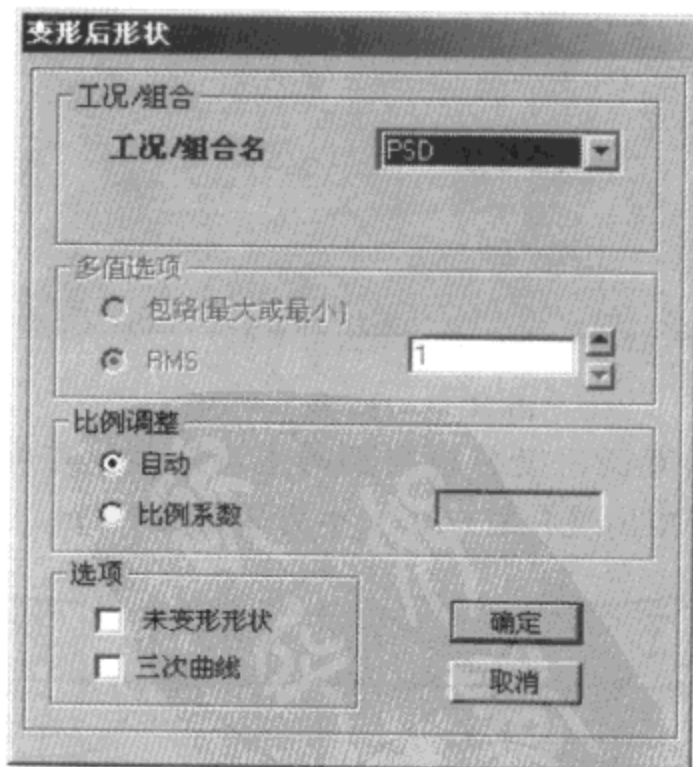


图 21-17 变形形状读取对话框

按上图所示设置输出选项，将在屏幕上显示如图 21-18 所示的变形图。该变形图并不是结构某一个真实状态下的变形图，图中显示的是结构各节点期望位移值。由该图可知，跨中竖向位移约为 0.76mm。

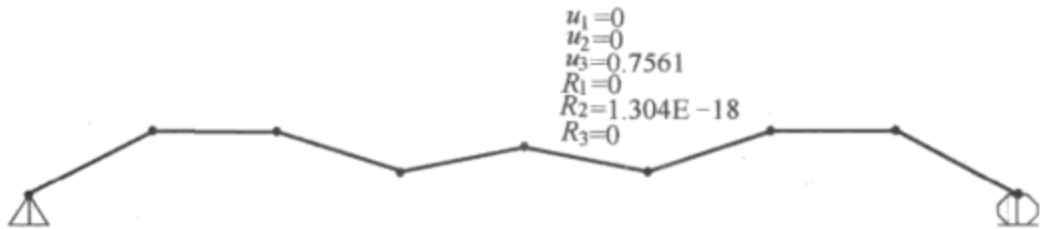


图 21-18 结构的变形包络输出

要查看结构最大内力，执行菜单【显示】>【显示力/应力】>【框架/索/筋】命令，弹出如图 21-19 所示的对话框。

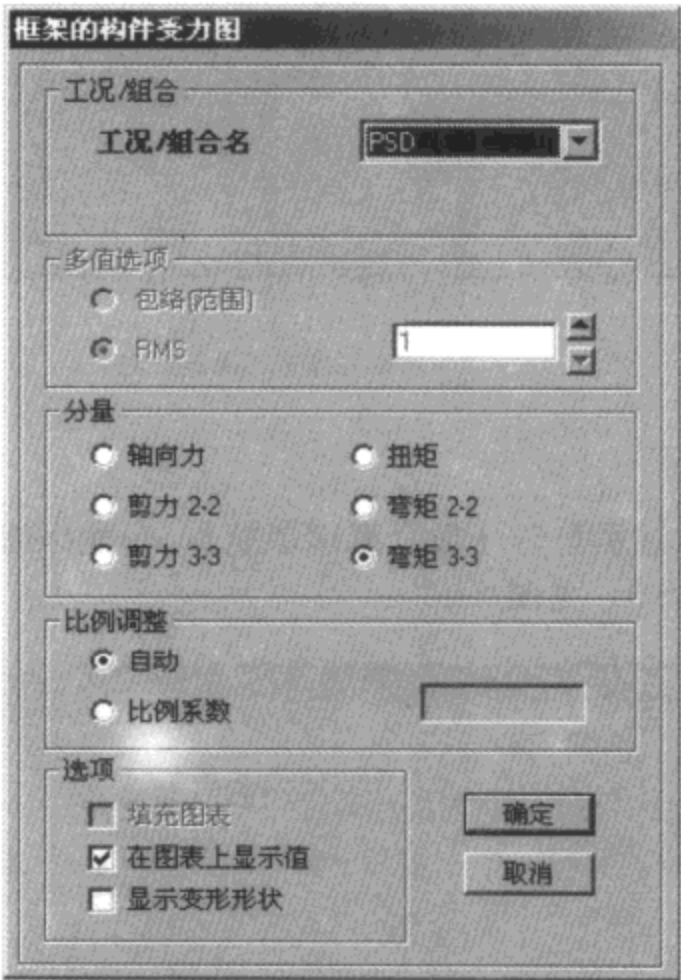


图 21-19 内力输出对话框

按该图所示选择输出功率谱密度分析得到的主弯矩值，在屏幕上显示，如图 21-20 所示。由该图可知，最大主弯矩出现在跨中，大小为 3.27kN·m。

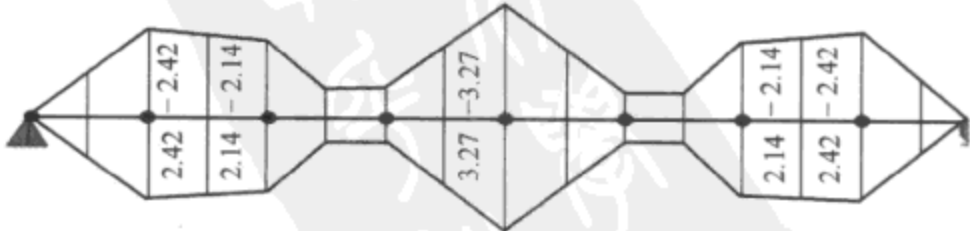


图 21-20 结构弯矩包络输出

稳态分析和功率谱密度分析的结果也可以通过表格形式或文本形式表示。执行菜单【显示】>【显示表格】命令，在弹出的选择显示表格对话框中，选择要输出的内容即可输出表格格式的结果。执行【文件】>【打印表格】命令，在弹出的选择要打印的表格对话框中，选择要输出的内容即可将分析结果输出到文本文件或打印机，这两种输出方式与其他分析类型的分析结果的输出方式相同，不再详细介绍。



第22章

桥梁模块

SAP2000 具有两个桥梁建模工具，一个是桥梁分析 BAG (Bridge Analysis Generator) 模板；另一个为需要单独协议的桥梁模块。与工业与民用建筑不同，桥梁结构通常要进行移动荷载的工况分析，得到结构反应的包络或者某个反应的影响线（面）。而这部分功能与 SAP2000 的桥梁模块息息相关。

本章介绍了桥梁 BAG 模板和桥梁模块，然后利用桥梁模块，建立一座连续桥梁模型，计算其在汽车活载作用下的反应，并对施工阶段进行模拟。

22.1 桥梁 BAG 模板

BAG 模板在 SAP2000 早期版本就已经存在，是桥梁模块的初级形式，它不需要单独的协议。BAG 模板也是采用参数化的形式来建立桥梁模型，但只形成梁单元模型，且它形成的框架截面等存在于 SAP2000 的公用环境中，工程师可以方便的进行修改和指定。

在 SAP2000 程序启动后，选择 **Caltrans-BAG**，进入 BAG 模板。新建一个桥梁模型文件，此时可以从零开始，也可以从文本文件（此文件后缀名为 bag，工程师可以在了解其文件格式后，通过第三方软件如记事本等直接编写）导入。

执行 **【File】 > 【New Model】** 命令，弹出控制信息及地震数据对话框。如图 22-1 所示。

在控制信息对话框中，要输入下列信息：要考虑的振型数量，桥梁每跨添加的节点（影响主梁的梁单元数量），桥墩添加的节点（影响墩对象的梁单元数量），是否在桥台处添加细小单元，是否在铰缝处添加细小单元，设计温度范围等；在地震数据对话框中，要指定谱的修正系数，指定 ATC 32 反应谱的各个系数或者指定谱文件的位置。

执行 **【Define】 > 【Geometry】** 命令来定义桥梁对象的总体几何信息，如图 22-2 所示。

在 **Origin** 对话框中，定义桥梁起点的坐标值及方位；在 **Curve Data** 对话框中定义桥梁

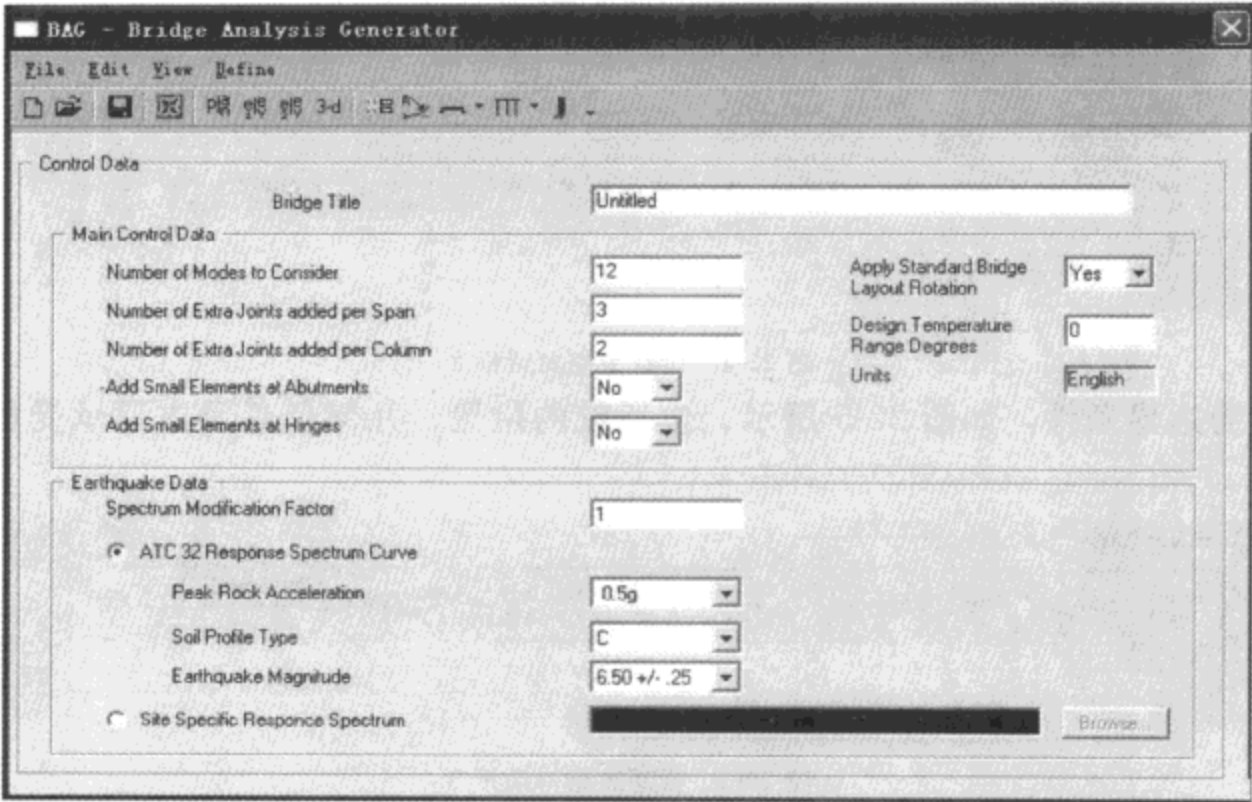


图 22-1 BAG 模板控制数据对话框

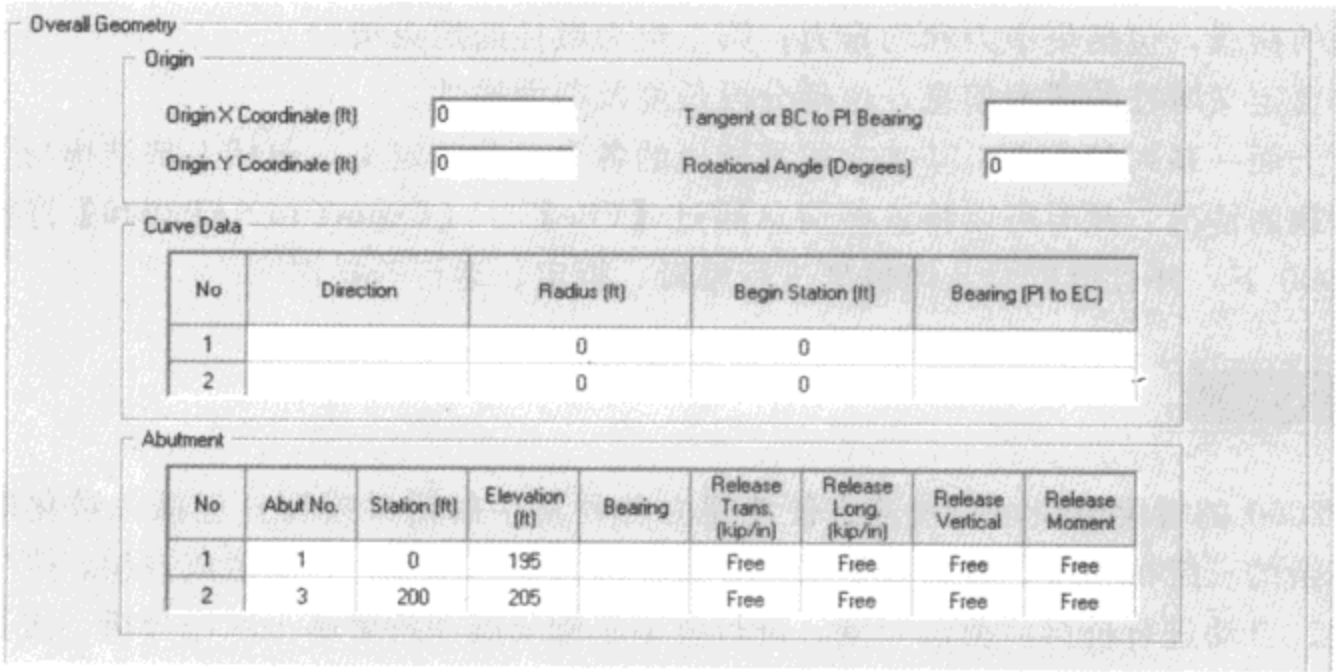


图 22-2 总体几何信息对话框

轴线的数据，在 **Abutment** 对话框中、要定义桥台的编号、沿轴线的位置、标高及节点自由度释放情况。

桥跨的数据有三类，一类为桥跨的几何数据，如图 22-3 所示。包括跨的编号、跨径、主梁截面属性、材料弹模及附加质量。

Deck Span Data 1

| Span No | Span ID | Span Length (ft) | Mom. of Inertia I _z (ft ⁴) | Mom. of Inertia I _y (ft ⁴) | Mom. of Inertia I _x (ft ⁴) | X-Section Area (ft ²) | Modulus E (Ksf) | Structure Depth (ft) |
|---------|---------|------------------|---|---|---|-----------------------------------|-----------------|----------------------|
| 1 | 1 | 100 | 500 | 5000 | 800 | 60 | 0 | 5 |
| 2 | 2 | 100 | 500 | 5000 | 800 | 60 | 0 | 5 |
| 3 | | | | | | | | |

图 22-3 桥跨数据对话框 1

第二类为主梁截面各部分的数据，如图 22-4 所示。包括：上部结构宽度、顶/底腹板厚度、梁格数、翼缘长度及厚度等。

| Deck Span Data 2 | | | | | | | | | |
|------------------|---------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|----|
| Span No | Span ID | Super-Structure Width (ft) | Top Slab Thickness (ft) | Bot Slab Thickness (ft) | No. of Interior Girders | Interior Girder Web Width (ft) | Left Ext. Girder Type (0 to 3) | Left Ext. Girder Web Width (ft) | Le |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 3 | | | | | | | | | |

图 22-4 桥跨数据对话框 2

第三类为边界条件，如图 22-5 所示。包括铰的位置、几何信息及主梁承受的各种荷载情况。

| Deck Span Data 3 | | | | | | | | |
|------------------|---------|---------------------|---|---------------------------|------------------------|------------------------------------|------------------------------|-----------------------|
| Span No | Span ID | Hinge Location (ft) | Hinge X-Section Area (ft ²) | Hinge Overall Length (ft) | Restrainer Length (ft) | Restrainer Area (in ²) | Restrainer Modulus - E (Ksi) | Wind Load on SS (Kil) |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | | | | | | | | |

图 22-5 桥跨数据对话框 3

与桥跨数据类似，下部结构的数据定义也有三组：第一组为几何数据，包括编号、标高、墩柱数量、墩柱间距、模量、墩柱类型、墩柱的截面属性类型及盖梁数据；第二组为墩柱所承受的荷载，包括集中力和均布力；第三组为墩柱的约束情况。

最后要定义墩柱的截面信息，包括分段长度及截面属性。

通过上面一系列的定义，基本完成了桥梁的各个部分的定义，包括上部结构与下部结构及承受荷载的情况。此时可以将这些信息通过【File】>【Export to SAP2000】将模型导入到 SAP2000 下，并且可以对几何模型进行编辑、指定、运行等操作。

22.2 桥梁模块

SAP2000 的桥梁模块可以快速方便地建立各种复杂的桥梁模型，包括参数化的横截面定义、复杂的三维桥轴线、桥台和桥墩、各种预应力钢筋布置、自动生成框架、壳体和实体单元模型、自动进行桥梁活荷载布置、进行桥梁基础隔震和桥梁施工顺序分析、进行大变形悬索桥分析和静力非线性 Pushover 分析等等。SAP2000 的顺序施工模块增加了对任意模型考虑施工顺序的功能，顺序施工分析可以包括与时间相关的效应，如混凝土的徐变和收缩、混凝土的龄期效应、预应力钢筋的松弛效应等。

注意，桥梁模块采用了一种参数建模的方式，这样可以实现模型在不同单元类型之间的转换。大部分工程师定义的参数在 SAP2000 的公用环境中是可以直接查看的，这样也方便工程师来检查模型。如工程师采用自定义的方式来定义桥墩与上部结构的连接情况，在程序中会自动产生一个连接属性。

22.2.1 桥梁向导

桥梁向导提供了使用 SAP2000 桥梁模块一步一步建模过程指导的功能。在进行建模的过程中，桥梁向导简单介绍了各步骤功能。工程师也可以抛开桥梁向导，而直接使用桥梁模

块的各项命令建立桥梁模型。

22.2.2 定义桥轴线

桥轴线可以说是桥梁的主梁中心线,相对来讲,它比 SAP2000 中普遍使用的轴线的作
用更广。它表达了桥梁的平面及竖向布置,同时桥梁的其他构件如桥台、桥墩位置的定义都
要用到轴线的数据。

在定义轴线之前,通常先要对首选项进行确认,首选项包括两个内容:北向方向,工程师
输入的角度用来表征北向箭头与全局坐标系 X 的夹角,默认为 0° ;曲线离散,工程师输入最
大的交角度数来指定桥梁曲线的离散角,值越小,曲线越平滑,默认为 1° 见图 22-6。

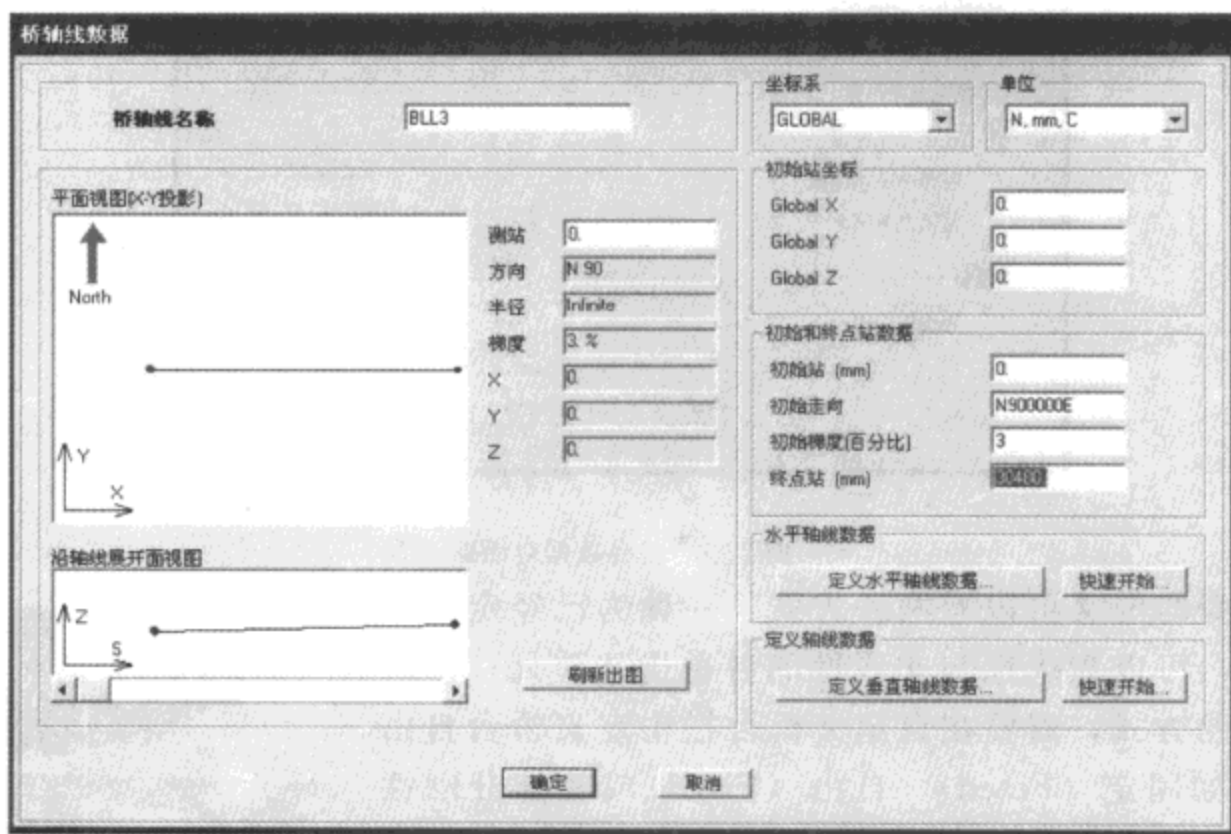


图 22-6 桥轴线对话框

坐标系下拉列表,工程师根据所建立的桥梁模型选择要定义轴线系统的坐标系,包括整
体坐标系和工程师建立的用户坐标系。初始站坐标栏定义了桥梁轴线的起点,默认为所用坐
标系的原点。

起始和终点数据定义了桥梁的一些基本数据,如起点和终点位置、桥梁走向(水平面,
X-Y 投影)、初始梯度(纵轴走向)等。

桥梁的水平轴线与垂直轴线可以采用两种方式进行:一是工程师直接定义;二是利用
现有模板来进行。

22.2.3 定义下部结构

下部结构包括桥台、桥墩及地基。墩、台主要承受上部结构传来的荷载,并通过基础将
此荷载及本身的自重传递到地基上。

桥台除了是支撑桥跨结构的结构物外,又是衔接桥头引道的构筑物。在 SAP2000 中,
桥台具体输入参数如图 22-7 所示。

桥台数据

桥台名称

ABUT1

单位

N, m, C

桥台定义来自:

☐ 连接/支座 属性

☒ 自定义

自定义桥台

| 自由度/方向 | 释放类型 | 刚度 |
|-----------|----------------|----|
| 顺桥向平动(U1) | Partial Fixity | 0. |
| 横桥向平动(U2) | Fixed | |
| 竖向平动(U3) | Fixed | |
| 顺桥向转动(R1) | Free | |
| 横桥向转动(R2) | Fixed | |
| 竖向转动(R3) | Free | |

桥台支座水平位置

☒ 在参考线位置

☐ 在每个主梁位置

☐ 沿桥宽等间距

支座数

横隔板

☐ 包含横隔板

隔板属性

确定

取消

图 22-7 桥台数据对话框

桥台本身的定义可以有两种方式：一种为已经定义好的连接属性，可以为线性与非线性的各种连接单元；第二种为自定义的方式，需要在自定义桥台栏中定义桥台自由度的情况，如固定（Fixed）、自由（Free）或者部分刚性（Partial Fixity），如果为部分刚性，需要指定刚度。

对于常见的简支梁桥而言，当横向、竖向、纵向均为固定约束时，为固定支座；当横向、竖向为固定约束，而纵向自由时，为纵向滑动支座。

桥台支座水平位置 栏定义了桥台支座的位置：在参考线位置处放置，在主梁肋的位置处放置及根据支座数目沿主梁底板宽度平均放置。图 22-8 显示了桥台支座在水平方向的位置。

横隔板 栏为可选项，用来指定主梁在桥台位置处的隔板，工程师可使用隔板厚度编辑栏指定隔板的厚度。注意主梁两端或者工程师定义跨的起始和终端处的隔板是不能通过【桥对象】>【修改/显示相交隔板】来精确定义的。只能通过桥台或者桥墩对象数据来定义。

桥墩一般指多跨桥梁的中间支撑结构物。桥墩的数据主要包括四个部分：一是盖梁，包括盖梁定位、截面、长度；二是墩柱，包括定位、截面、长度等；三是边界情况，包括与上部结构的连接属性、与地基的连接属性；四是横隔板数据。桥墩具体的输入参数如图 22-9 所示：

在墩柱的数据中，程序提供了柱的底部连接有三种形式，一是固定（Fixed），二是铰接（Pinned），三是来自于工程师定义的桥柱支座。桥柱支座数据如图 22-10 所示。

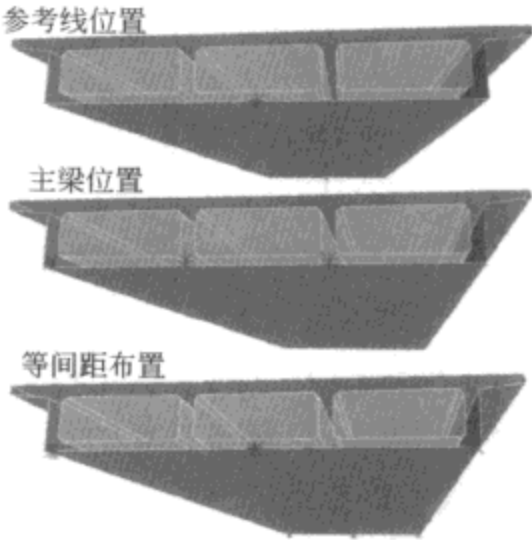


图 22-8 桥台支座水平位置示意图

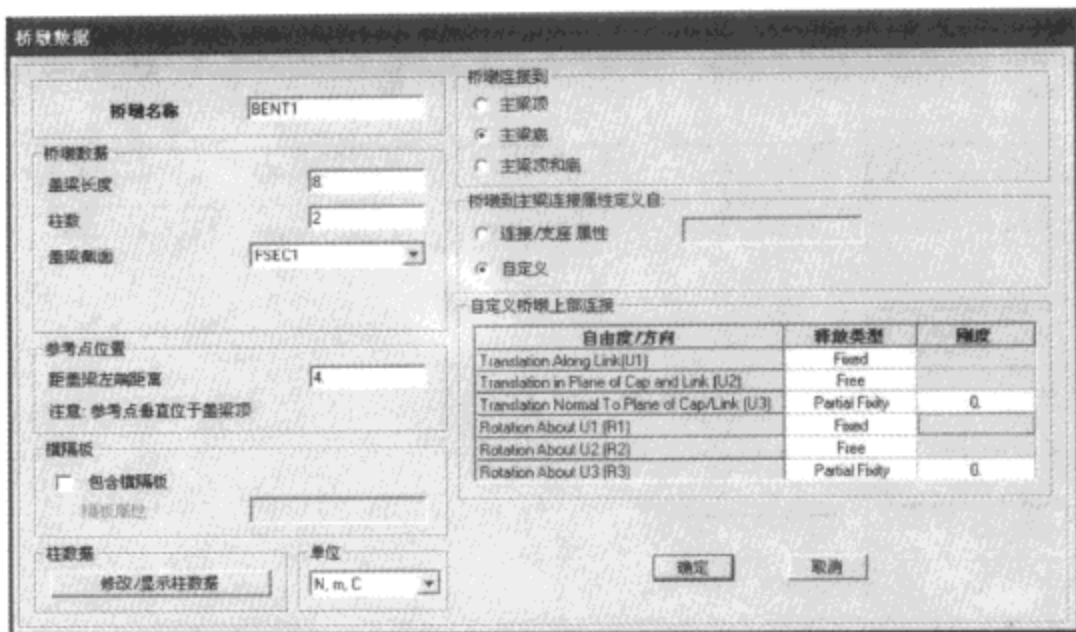


图 22-9 桥墩数据对话框

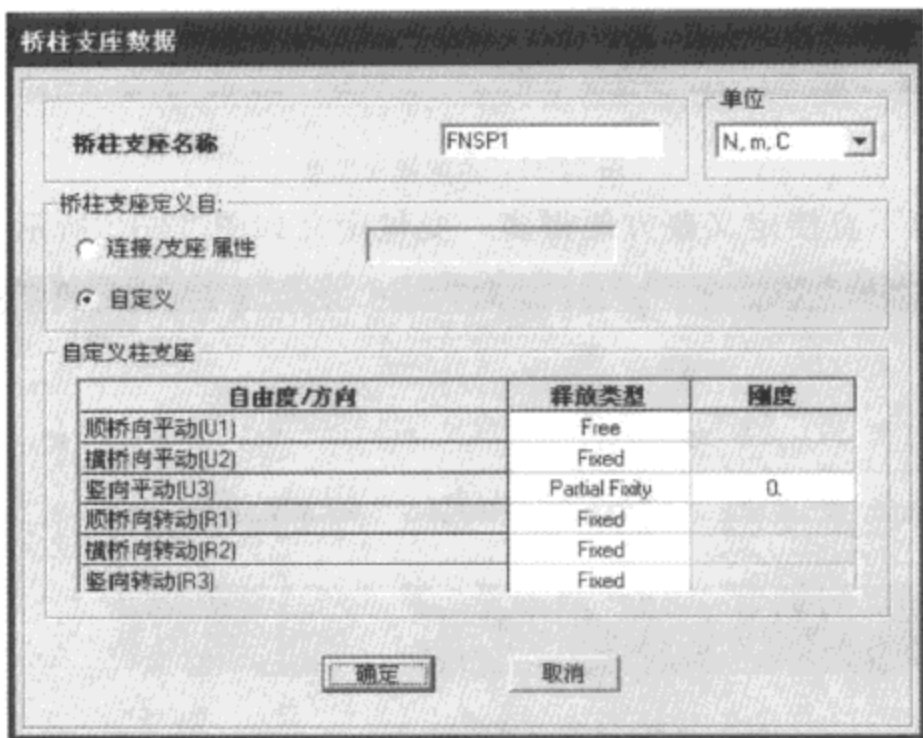


图 22-10 桥柱支座数据对话框

22.2.4 定义上部结构

在桥梁模块中,上部结构包括主梁、铰、伸缩缝等等。如果用桥梁模块来建复杂体系的桥梁的上部结构,如悬索桥的主缆或者斜拉桥的斜拉索等,则可通过 SAP2000 主程序来定义。在这里仅限于桥梁模块来进行描述。

普通的主梁截面基本都可以利用桥梁模块采用参数化的形式来输入,如混凝土箱梁、T 梁、现浇板梁、钢-混凝土组合梁等。截面类型如图 22-11 所示。

一般来说,主梁截面沿纵向是不断变化的。SAP2000 框架单元的截面属性按照一定的规律进行变化,在桥梁模块中这项功能得到了大大的加强。沿桥梁的跨度定义任意一个变量,将这个变量附给主梁截面的任一参数,如高度、宽度、腹板厚度等。注意这里的变量指的是尺寸改变量,即基于截面参数的标准值遵照参变量进行增或减。这种方法比在

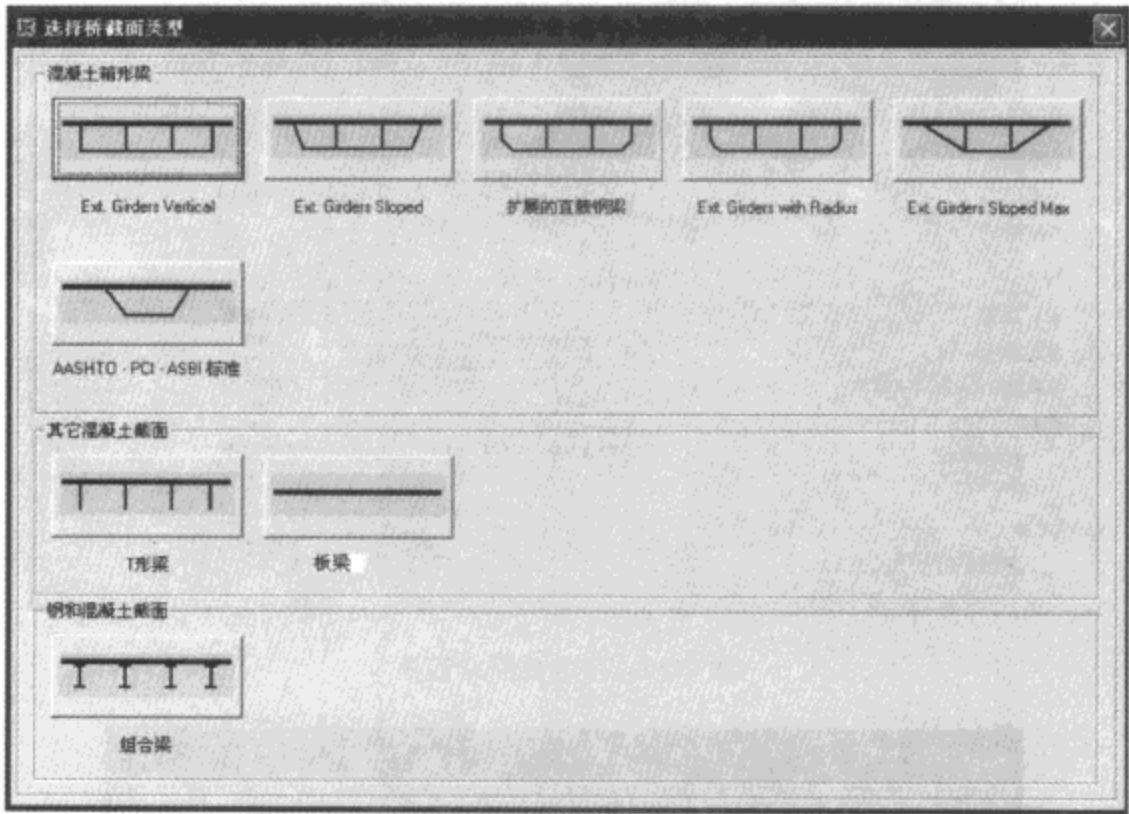


图 22-11 主梁截面类型

SAP2000 的公共环境下直接定义要方便得多。变量定义如图 22-12 所示。

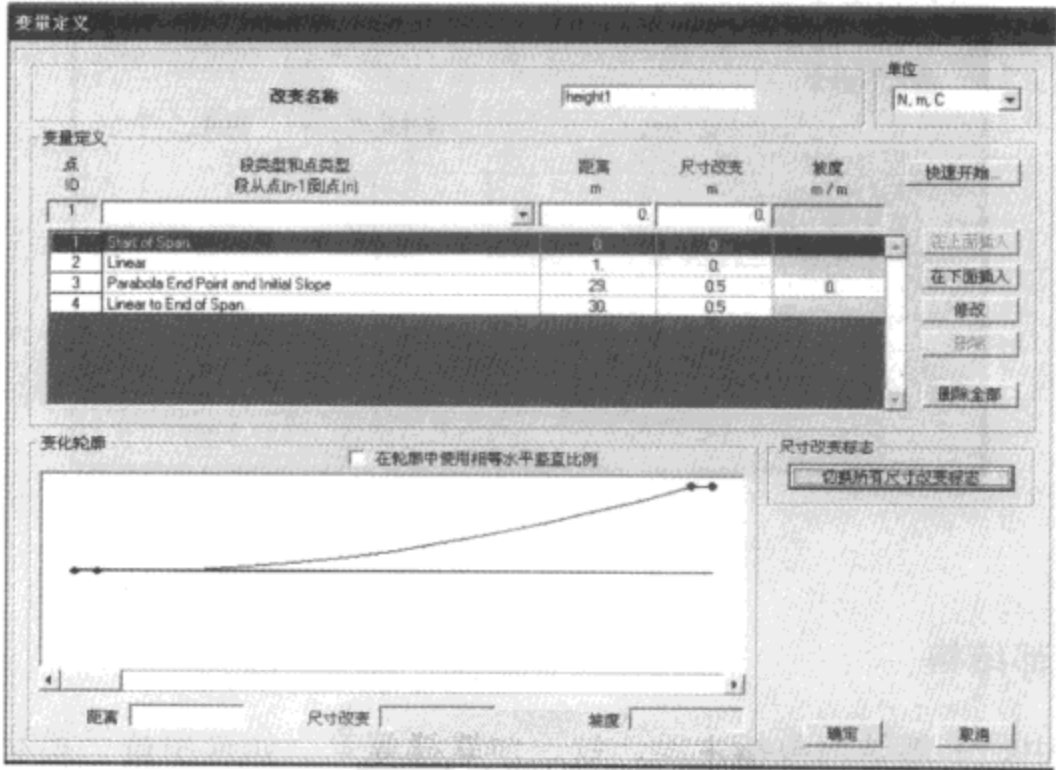


图 22-12 变量数据定义对话框

将此变化的参数在桥对象数据指定给截面，这样工程师就可以方便地模拟沿跨度不断变化的主梁截面。

主梁沿跨度方向可能是连续的，也可能存在不连续的行为，如存在铰或者伸缩缝。这些不连续的行为需要在桥铰（伸缩缝）数据对话框中定义，如图 22-13 所示。

缝数据包含两部分内容：Gap 缝数据和 Hook 缝数据。在默认的情况下，自定义为 Gap 缝，程序自动形成 Gap 连接属性，其中竖向（U3）具有非线性的 Gap 属性；同理自定义 Hook 缝，程序自动形成 Hook 连接属性，连接单元的刚度为模量 $E \times A$ （面积） $\div L$ （长

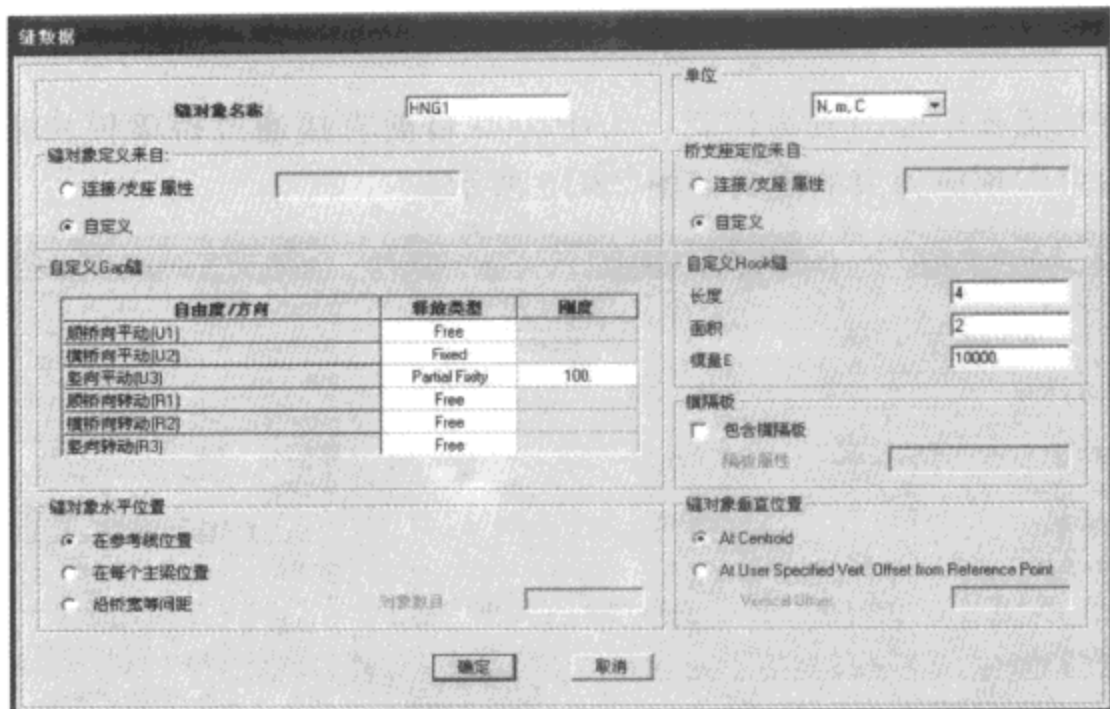


图 22-13 桥铰(伸缩缝)数据对话框

度)。如图 22-13 所示产生的 Hook 单元的 U2 方向的刚度为 $10000 \times 2/4 = 5000 \text{ N/m}$ 。

如果模拟钢构桥中常见的简支挂梁的滑动一端,在自定义 Gap 缝栏内,将 U3 和 U2 设置为 Fixed,其余自由度为 Free。这里的行为与指定框架两端自由度释放类似。若已知牛角支座的刚度也可输入 U3 方向的刚度。

22.2.5 桥对象

当上部结构与下部结构所需参数设置基本完成后,就可以通过定义桥对象组建桥梁模型,在桥对象数据对话框中,可以定义跨径、主梁变化、桥台、桥墩、横隔板、预应力等。如图 22-14 所示:

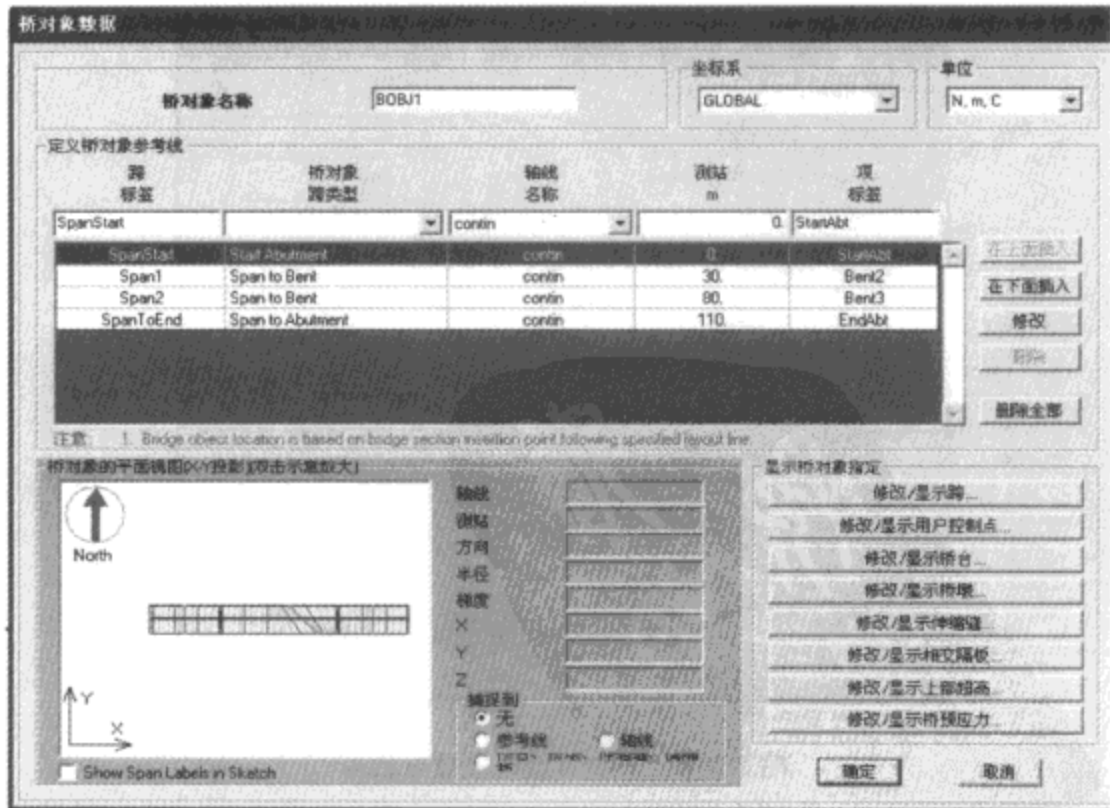


图 22-14 桥对象数据

22.2.6 定义预应力

预应力在桥梁工程中应用较为广泛。SAP2000 目前直接通过桥梁模块来模拟采用后张法施工的预应力束。预应力束的定义如图 22-15 所示。

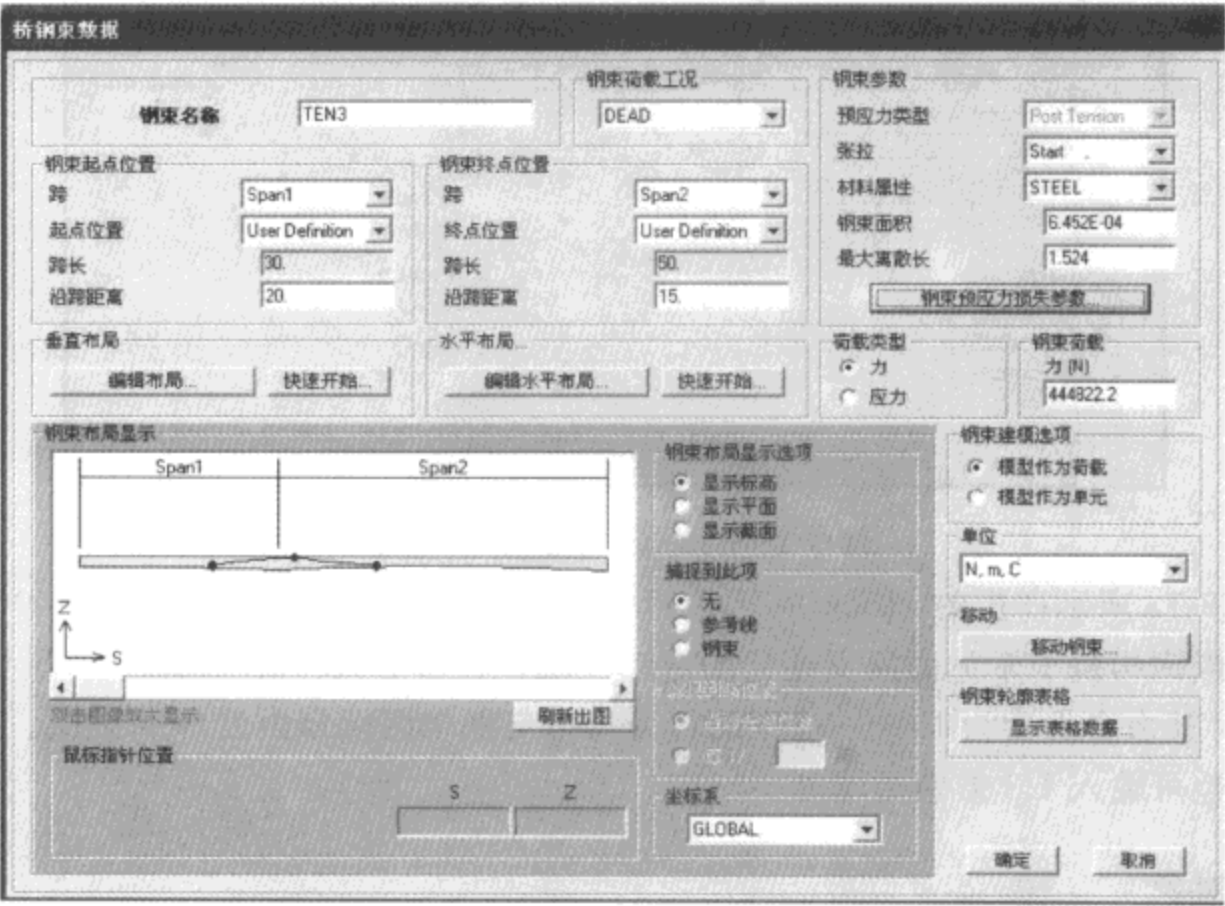


图 22-15 桥钢束数据对话框

预应力束的各项参数主要根据 CEB—FIB 规范，我国的《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》中各种预应力参数的取值与 CEB—FIB 中的值基本一致见图 22-16。



图 22-16 预应力损失参数对话框

在摩擦和锚固损失栏中，Curvature Coefficient (Unitless) 为预应力钢筋与管道壁的摩擦系数 μ ；Wobble Coefficient (m^{-1}) 为管道每米局部偏差对摩擦的影响系数 k ，桥规表 6.2.2

规定了 μ 和 k 的取值; **Anchorage Set Slip (m)** 为锚具变形造成的预应力钢筋的回缩值。

其他损失参数栏中参数只有在将预应力模拟为荷载时才需定义, 如果预应力模拟为单元时, 预应力的其他损失参数在材料模型中体现。 **Elastic Shortening Stress (N/m²)** 为由于混凝土弹性压缩造成的应力损失; **Creep Stress (N/m²)** 和 **Shrinkage Stress (N/m²)** 为由于混凝土的收缩和徐变造成的预应力损失; **Steel Relaxation Stress (N/m²)** 为由于预应力钢筋的应力松弛造成的预应力损失。

22.2.7 桥梁 FEM

通过【更新桥梁模型】的命令, 可以将参数化表示的桥梁对象转换为线对象、面对象或实体对象模型。通过这个操作, 形成了桥梁的有限元模型。由于桥梁模块是采用大量的参数对象来表征, 所以基于桥对象的有限元模型可以在不同的单元类型上进行转换。

22.2.8 定义车辆荷载

在定义车辆荷载之前, 先要定义车道。车辆的设计宽度为 2.5m, 车道的宽度一般为 3.5~3.75m, 车道荷载分布宽度一般为 3m ($1.8+1.3-0.1=3$)。当行车道宽度为 7m 时, 可以布置两条车道。

SAP2000 中车道的定义有两种方式: 一种是根据已经定义好的桥轴线, 二是根据模型中的框架单元。

注意: 框架只是为车道提供起始点, 即框架相当于轴线的作用。

图 22-17 为根据轴线定义车道的对话框。

图 22-17 桥梁车道数据对话框

桥梁车道数据中，要注意车道荷载离散栏内数据的输入，输入的数值影响将来影响线或者影响面的精度，如果想精确分析截面的内力或者应力情况，应尽量使分析截面位置处产生荷载离散点。另外也可给荷载离散加上一些限制条件：离散长度不大于跨度的几分之一，离散长度不大于车道长度的几分之一。

桥梁模块中的汽车荷载的定义有两种方式：一是基于美国和英国的公路桥梁标准规范而编制的标准车辆，包括英国的 HA 荷载（代表英国正常公路交通，用公式表达的活荷载）与 HB 荷载（特种车辆荷载，用若干个单位表示其大小），美国的 H（M）和 HS（MS）荷载；二是工程师自己直接定义一般车辆数据，如图 22-18 所示。一般先将标准荷载转换为工程师定义的形式，再进行编辑。

一般车辆数据

车辆名称

GEN1

使用

☒ 支座车道荷载

☒ 内部垂直支压力

☒ 所有其他反应

浮动轮轴荷载

值

宽度类型

轮轴宽

对车道弯矩

360

One Point

对其它反应

432

One Point

☐ 当计算负跨弯矩时加倍车道弯矩荷载

☐ Use BD 37/01 (2002) for Uniform Load Length Effects

☐ 车辆仅施加到跨(相邻)车道

跨折减系数

荷载平面

荷载立面

荷载

| 荷载长度类型 | 最小值距离 | 最大值距离 | 均匀荷载 | 均匀宽度类型 | 均匀宽度 | 轮轴荷载 | 轮轴宽度类型 | 轮轴宽度 |
|---------------|----------|-------|------|------------|------|------|--------|------|
| Trailing Load | Infinite | | 10.5 | Zero Width | | | | |
| Trailing Load | Infinite | | 10.5 | Zero Width | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

添加(A)

插入(I)

修改(M)

删除(D)

确定

取消

单位

KN, m, C

图 22-18 一般车辆数据对话框

中国公路规范中，汽车荷载由车道荷载和车辆荷载组成。在上图所示的数据栏中定义车道荷载，在荷载栏定义均布荷载，其中荷载长度类型为 Trailing load 或 Leading load，均匀荷载栏中输入规范规定的公路等级的均布荷载 q_k ，比如一级的为 10.5kN/m。此时要注意均匀荷载指的是线荷载值，单位为 kN/m，不论均匀宽度类型为 Lane Width 还是 Fixed Width。车道荷载中集中荷载 P_k 在浮动轮轴荷载中输入。桥梁规范中规定，在计算剪力效应时，集中荷载标准值 P_k 应乘以 1.2（目前 SAP2000 的版本没有贯入中国的规范，故在计算其他反应栏中填入的集中荷载值放大了 1.2 倍）。

中国规范规定在大跨径桥梁上的汽车荷载应考虑纵向折减，随着计算跨径的增大纵向折减系数减小。英国桥梁标准中也有纵向折减的内容：当加载长度小于 30m 时，额定均布荷载定为每延米的加载分车道 30kN；加载长度超过 30m 时，其值由式（22-1）给出：

$$w = 151 \left(\frac{1}{L} \right)^{0.475}$$

式中： L ——加载长度；

w ——每延米每车道上的荷载，kN，
规范规定 w 不得小于 9kN。

当勾选 **Use BD 37/01 (2002) for Uniform Load Length Effects** 时，意味着遵照上述的规定。

在车辆荷载定义完成后，再定义车辆类别，如图 22-19 所示。

22.2.9 定义移动荷载分析工况

定义工况类型为 **Moving Load** 的分析工况。在此工况中要输入包括多车道的折减系数（比例系数）、加载的车道等数据。如图 22-20 所示。

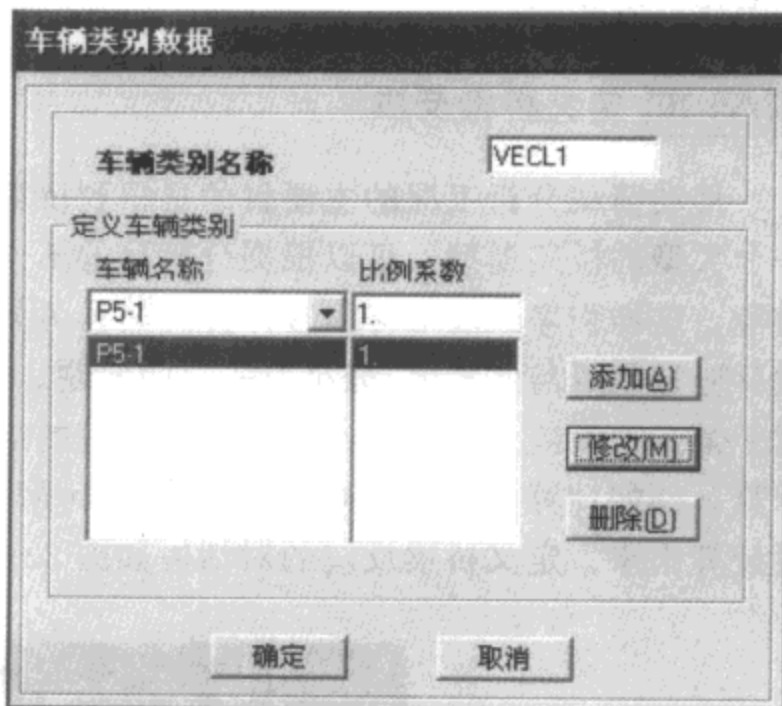


图 22-19 车辆类别数据对话框

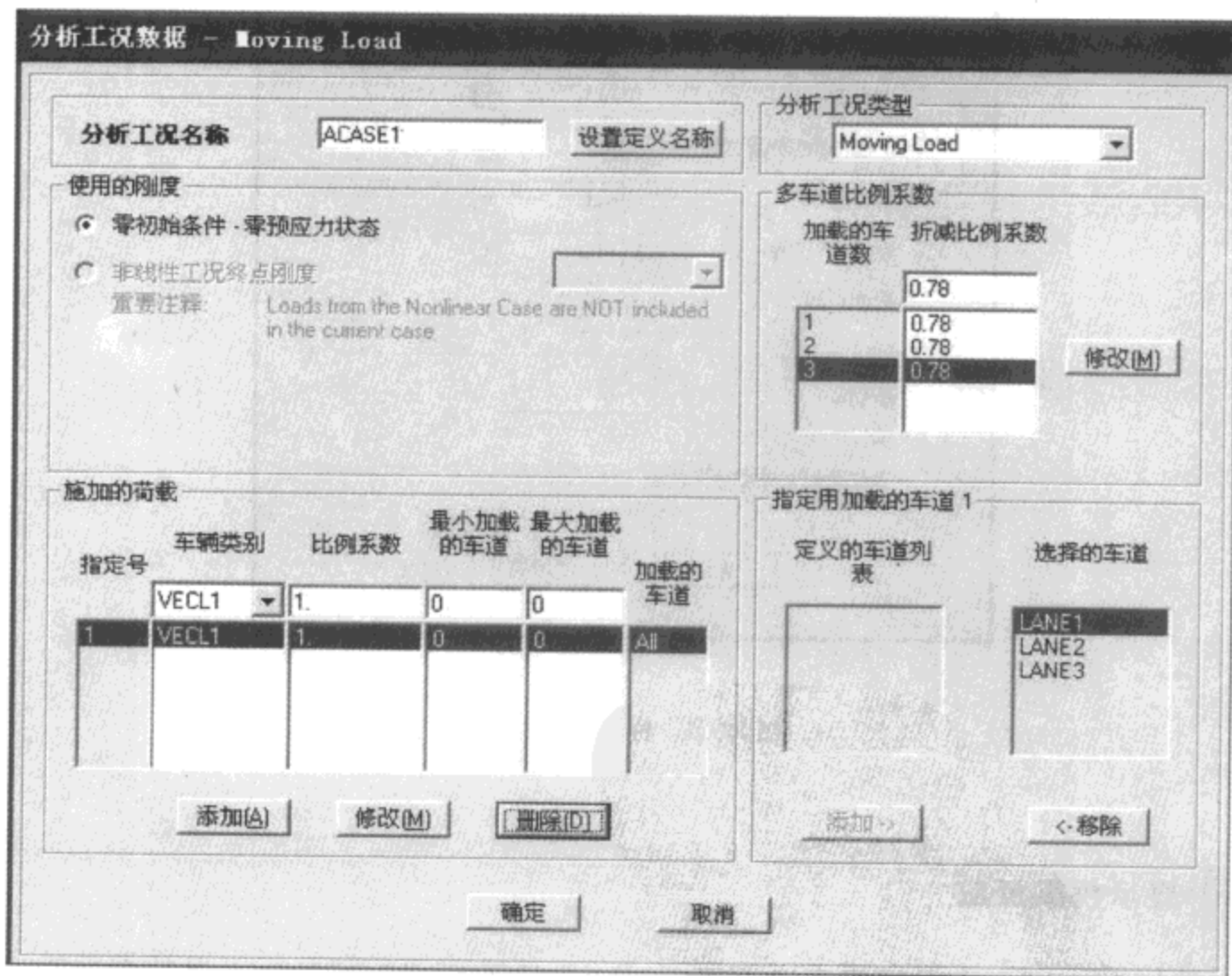


图 22-20 定义移动荷载分析工况数据栏

移动荷载工况分析完成后，能够得出内力或者位移包络的结果，且能显示各对象内力等

影响线或者影响面。

22.2.10 定义桥梁反应

移动荷载分析工况的主要目的是得到桥梁某些反应值的包络。反应值需要工程师指定，一个大型的桥梁模型，可以根据分析目的不同，进行有目的的选择反应量，如位移、框架内力等，这样程序就能节省很多计算时间。另外在计算出某些反应最大/最小值时，伴随着其他反应量是否与此最大/最小值一致的问题。程序为工程师添加了一个一致的复选框，如果对于某一个反应点选一致选项，则此反应的最大/最小值对应的其他内力值或变形值也需要计算。例如计算某个框架对象的最大弯矩 $M3$ ，则相应值包括 P 、 $V2$ 、 $V3$ 、 T 、 $M2$ 也要同时计算出来。定义桥梁反应的对话框如图 22-21 所示。

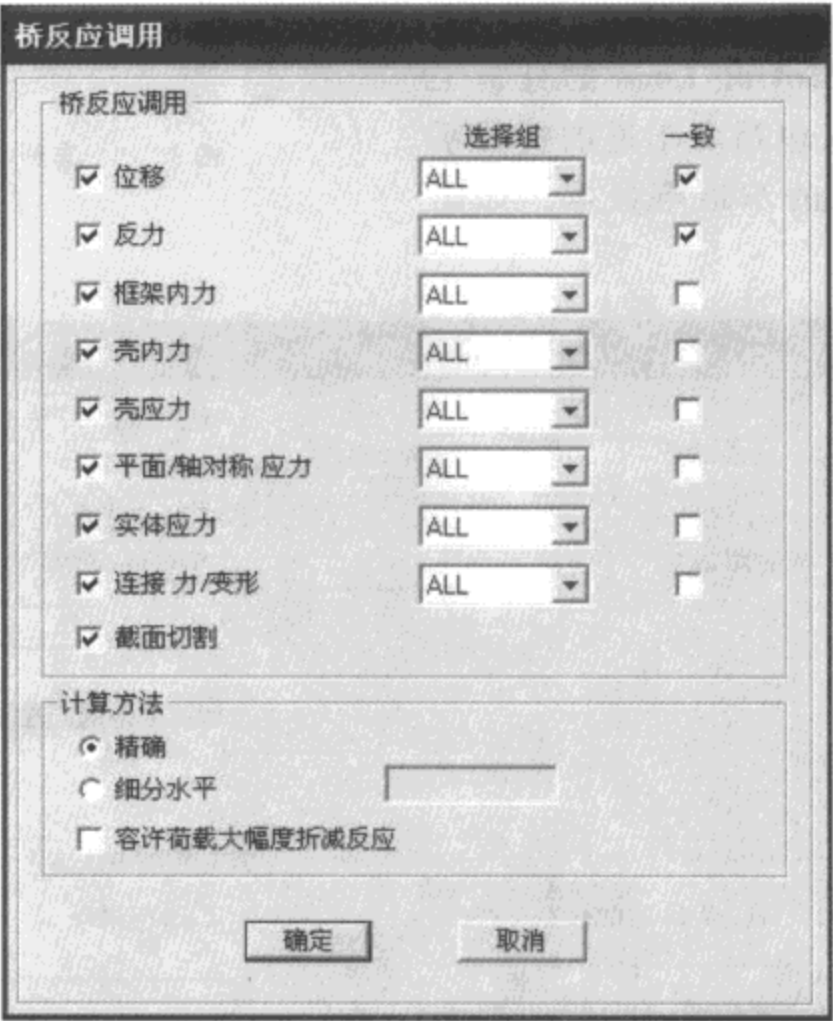


图 22-21 桥梁反应对话框

22.2.11 显示桥梁反应

这里的桥梁反应主要包含两方面的内容：一为伴随移动荷载分析工况的求解带来的影响线或影响面；二为桥梁内力或应力。移动荷载分析完成后，点击【显示】>【显示影响线/面】，弹出图 22-22 所示的对话框。

对于常用的对象，显示的内容如表 22-1 所示：

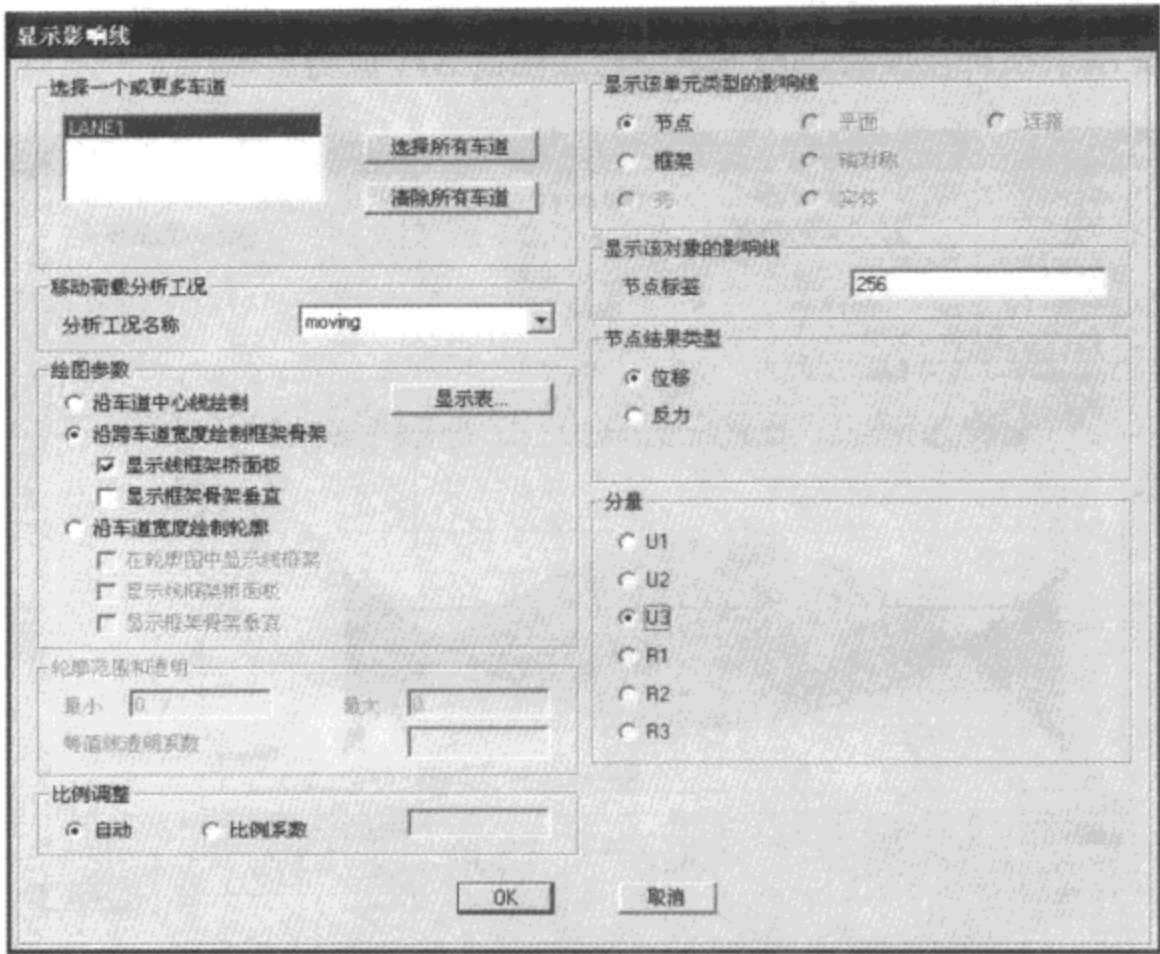


图 22-22 显示节点位移影响线对话框

常用对象显示影响线对话框内容

表 22-1

| 对象类型 | 结果类型 | 分量 |
|------|--------------|---|
| 节点 | 位移 | U1、U2、U3、R1、R2、R3 |
| | 反力 | F1、F2、F3、M1、M2、M3 |
| 框架 | 内力 | P1、V2、V3、T、M2、M3 |
| 壳 | 内力 | F11、F22、F12、M11、M22、M12、V13、V23 VMax、FMax、MMax、FMin、MMin、FVM |
| | 顶部应力 底部应力 | S11、S22、S12、S13、S23 SMax、SMaxV、SMin、SVM |
| 实体 | 应力 | S11、S22、S33、S12、S13、S23 SMax、SMID、SMin、SVM |
| 连接 | 内变形 | U1、U2、U3、R1、R2、R3 |
| | I 端力 J 端力 | P1、V2、V3、T、M2、M3 |

影响线的显示方式有三种，通过显示影响线对话框中绘图参数的三个点复选框来进行选择。

当一个有限元模型建立完成之后，可以在公共环境中进行单元内力/应力或者节点位移的查看。当利用桥梁模块建立一个桥梁模型时，SAP2000 单独为此类模型给出了后处理输

出，即桥梁内力/应力显示对话框，此对话框通过【显示】>【显示桥梁内力/应力】来激活，图 22-23 显示了某桥在恒载作用下顶中与底中的 S11 应力。

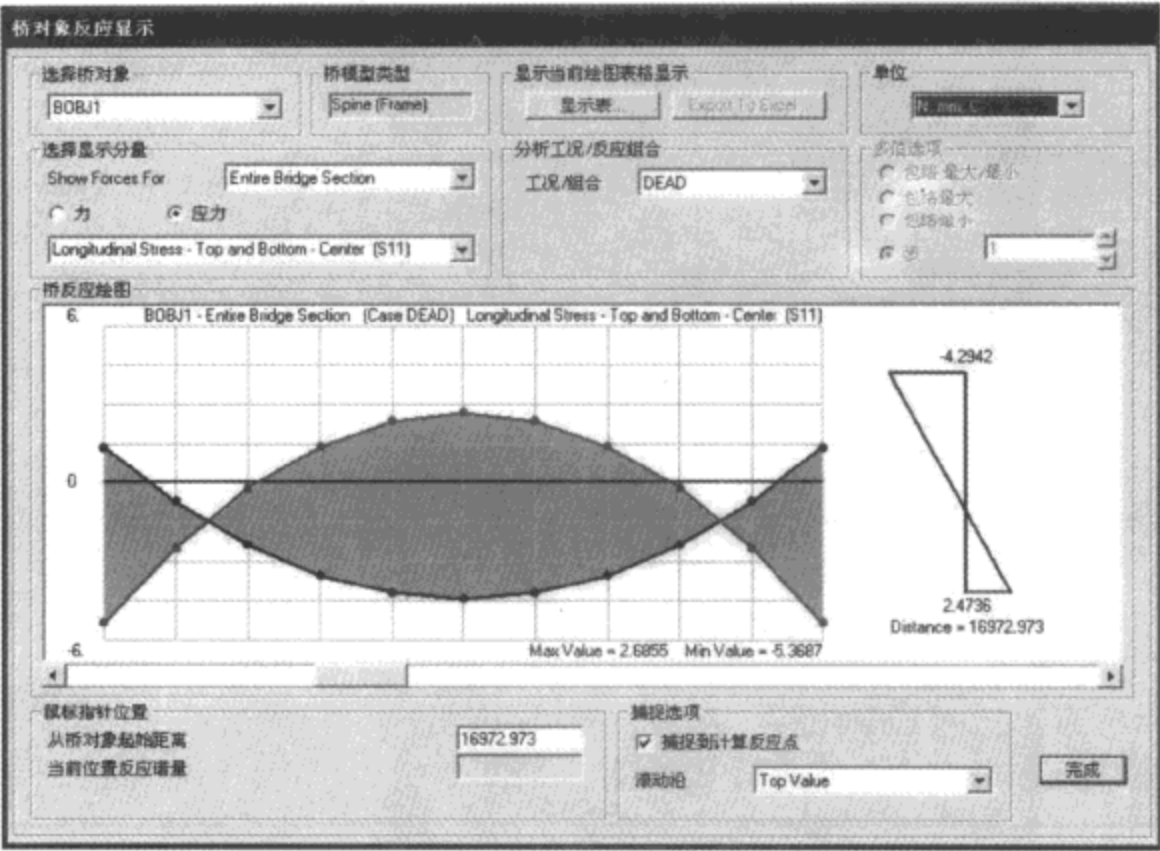


图 22-23 桥梁内力/应力显示对话框

22.3 实例：三跨预应力混凝土变截面连续梁桥分析

这里利用桥梁模块建一个连续梁桥的模型，在建模部分，完成桥梁基本数据的输入，分析部分分为两大类：一类为成桥后各种荷载作用下全桥的反应，另一类为施工阶段的模拟。

22.3.1 基本资料

(1) 概况

三跨预应力混凝土连续梁桥，其跨径组合为 45m+76m+45m，如图 22-24 所示。采用单箱单室截面，单箱顶宽 11m，底宽 6m，两侧悬臂长 2.5m，桥面净宽：净 7.0m+2×1.50m 非机动车道+2×0.25m 栏杆。

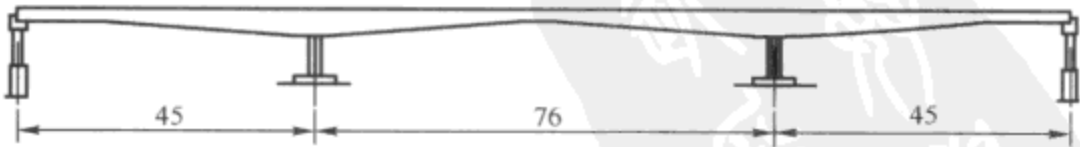


图 22-24 连续梁立面简图（尺寸单位：m）

(2) 技术标准

公路等级：二级

设计时速：60km/h

桥面宽度：桥面净宽 10m，桥梁全宽 11m

设计荷载：公路 II 级

(3) 主要材料

主桥现浇箱梁：C50

下部结构：C30

预应力钢材：低松弛高强度预应力钢绞线应符合 ASTM A416—97 的规定，单根钢绞线直径 15.24mm，公称面积 $A=140\text{mm}^2$ ，标准强度 $R_y=1860\text{MPa}$ ，弹性模量 $E_y=1.95\times 10^5\text{MPa}$ 。

(4) 结构构造

主桥上部结构为三跨预应力混凝土连续箱梁，其跨径组合为 45m+76m+45m，采用单箱单室截面，单箱顶宽 11m，底宽 6m，两侧悬臂长 2.5m，主墩支撑处箱梁中心梁高 4.322m，跨中箱梁中心梁高 2.0m，梁高以平方抛物线变化。箱梁顶面设置双向 1.5%横坡，顶板厚 0.28m，悬臂板端部厚 0.18m，根部厚 0.6m；腹板厚 0.42~0.62m，底板厚 0.25~0.65m，也以平方抛物线变化。横隔板分别设在中支点、边支点，厚度分别为 1.8m 和 1.2m，各横隔板均设置了人洞以便施工。

箱梁零号段长 8m，在支架上浇注。两侧各有 9 个节段，梁段数及梁段长度为 $5\times 3.4\text{m}$ 和 $4\times 4\text{m}$ 。1 号~9 号梁段采用挂篮悬臂浇注施工，悬臂浇注梁段最大控制重量 93t，挂篮控制质量 40t。主桥共有 3 个合龙段，即 2 个边跨合龙段和 1 个中跨合龙段，合龙段长均为 2m，在吊架上浇筑。边跨现浇段长 6m，在支架上浇筑。

(5) 纵向预应力束

纵向预应力钢束共设置了顶板束、中跨底板束、边跨底板、连续束和预备束共五种，均采用两端张拉。顶板束及相应预备束采用 $\phi 15.24-12$ ，设计张拉吨位 234t；底板束及连续束采用 $\phi 15.24-15$ ，设计张拉吨位 293t。

(6) 支座

在图 22-24 中，左墩为固结支座，其余为滑动支座，在悬臂施工过程中，右墩顶支座为固定支座，在合龙后，拆除临时固结与临时支座。

22.3.2 建立模型

在此处主要是指利用桥梁模块，指定桥梁的各个部位尺寸及相关参数。

第一步：定义桥轴线，初始站为 0m，初始走向为 N900000E，终点站为 166m；

第二步：定义桥台，均为滑动支座，桥台处的横隔板厚度为 1.2m；

第三步：定义主梁标准截面，标准截面取为主墩中心处的主梁截面，基本尺寸如图 22-25 所示。

在 SAP2000 中输入的标准梁截面及属性如图 22-26 所示。

第四步：定义桥墩，墩身计算高度为 7.79m，墩宽 7m，厚 2.2m，墩身与主梁，墩与地基为固结，墩处横隔板厚度为 1.8m；

第五步：定义参数变化，这里主要包括三种参数，梁高 HEIGHT，底部厚度 SLAB，腹板厚度 GIRDER，图 22-27 所示为主跨梁高的参数变化；

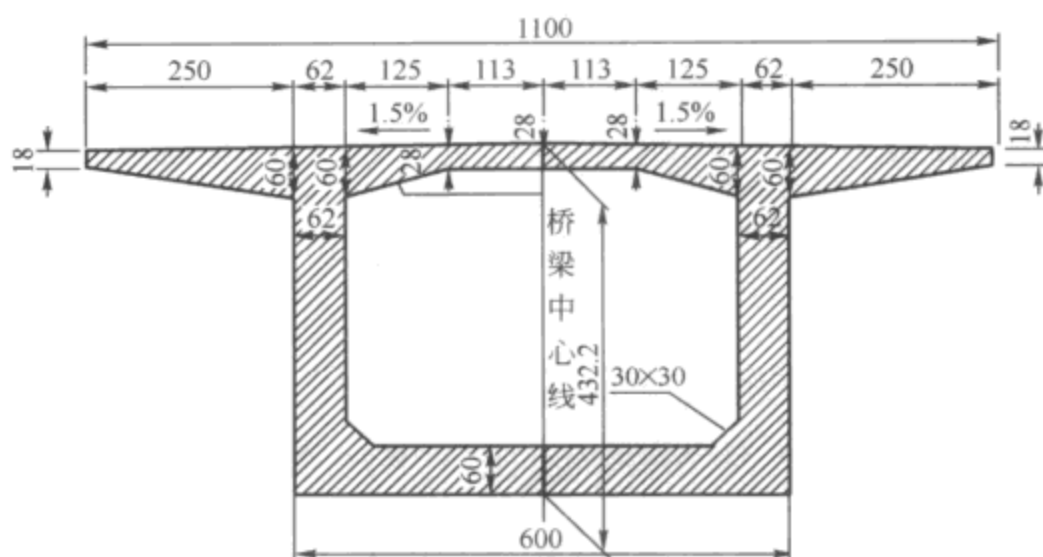


图 22-25 主梁标准截面 (尺寸单位: cm)

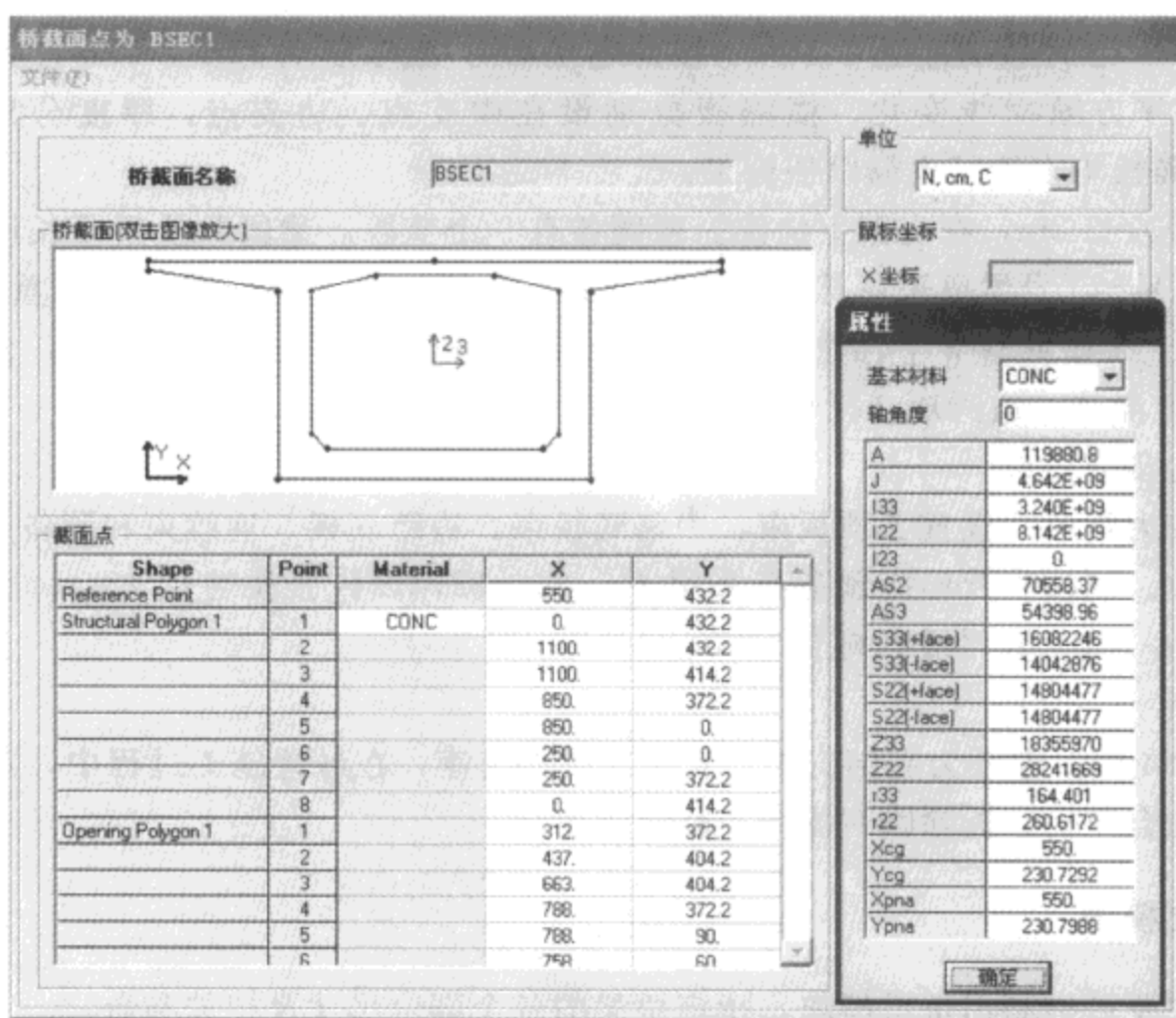


图 22-26 主梁截面属性

第六步：定义桥对象，定义跨径参数为 $45\text{m}+76\text{m}+45\text{m}$ ，根据分阶段施工梁节段的大小，在不同的跨指定工程师控制点（即离散点），如图 22-28 和图 22-29 所示。

此模型中有纵向预应力束 118 根, 通过直接输入、复制等方式, 完成对预应力的输入。其空间分布如图 22-30 和图 22-31 所示。

第七步：将桥梁对象更新为有限元模型，这里选用框架单元，如图 22-32 所示；

第八步：局部修订，这里包括混凝土材料属性的定义。定义盖梁截面及墩截面，更改桥梁对象模型等，再次形成有限元模型。

Variation Definition

Variation Name: HEIGHT2 Units: N, m, C

Variation Definition

| Point ID | Segment Type and Point Type Segment Is From Point(n-1) to Point(n) | Distance m | Dim. Change m | Slope m / m |
|----------|---|---------------|------------------|----------------|
| 1 | Start of Span | 0 | 0 | |
| 2 | Linear | 1.1 | 0 | |
| 3 | Parabola End Point and Final Slope | 38 | -2.322 | 0 |
| 4 | Parabola End Point and Initial Slope | 74.9 | 0 | 0 |
| 5 | Linear to End of Span | 76 | 0 | |

Quick Start...
Insert Above
Insert Below
Modify
Delete
Delete All

Variation Sketch ☐ Use Equal Horizontal And Vertical Scales In Sketch

Dimension Change Sign
Switch Sign of All Dim. Change

Distance: Dim. Change: Slope:

OK Cancel

图 22-27 主梁梁高参数的定义

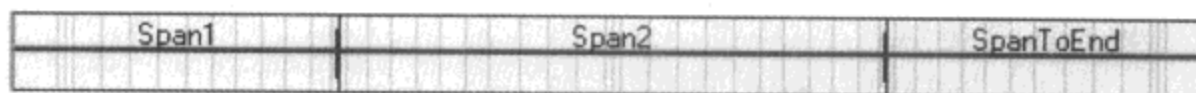


图 22-28 离散点 (平面)



图 22-29 离散点 (立面)

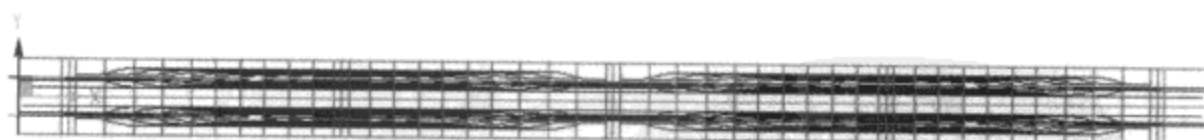


图 22-30 预应力束的平面布置

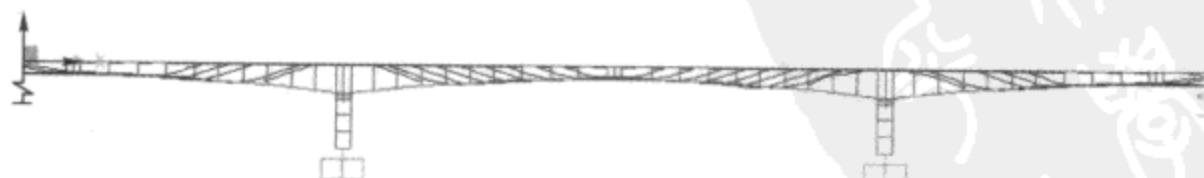


图 22-31 预应力束的立面布置

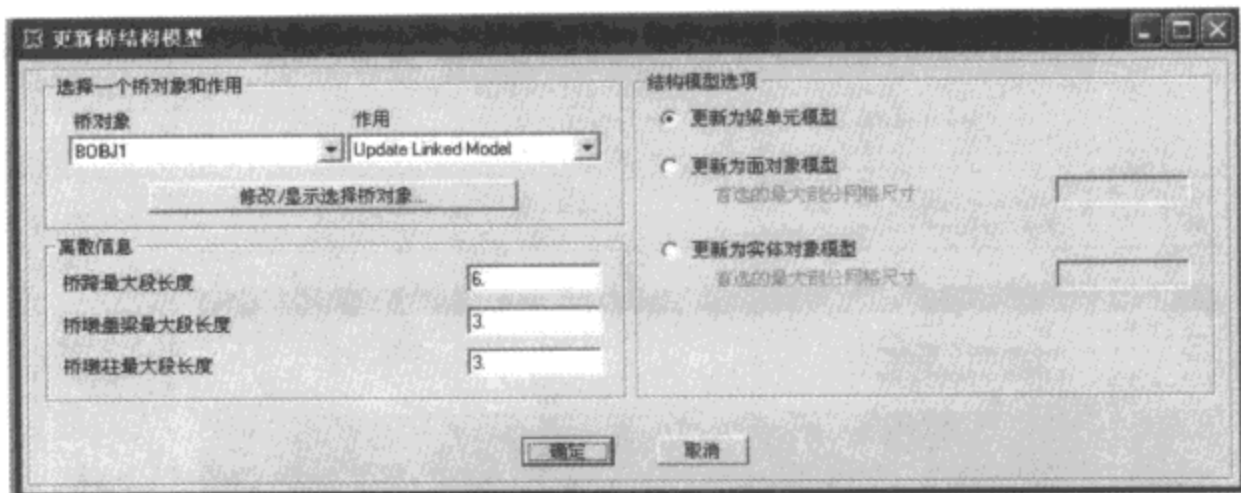


图 22-32 更新桥梁结构模型

22.3.3 全桥分析

这里主要对车辆活荷载进行分析。

(1) 桥梁模块中数据的修改

这里主要是修改右主墩的支座，新建立一个类型为 linear 的连接单元来模拟滑动支座。该单元的 U1 方向固定，其他方向刚度设置为零。

(2) 定义车道

共两车道，车道宽度为 3.5m，关于轴线对称。

(3) 定义车辆与车辆类别

直接输入 General 车辆荷载，如图 22-33 所示。

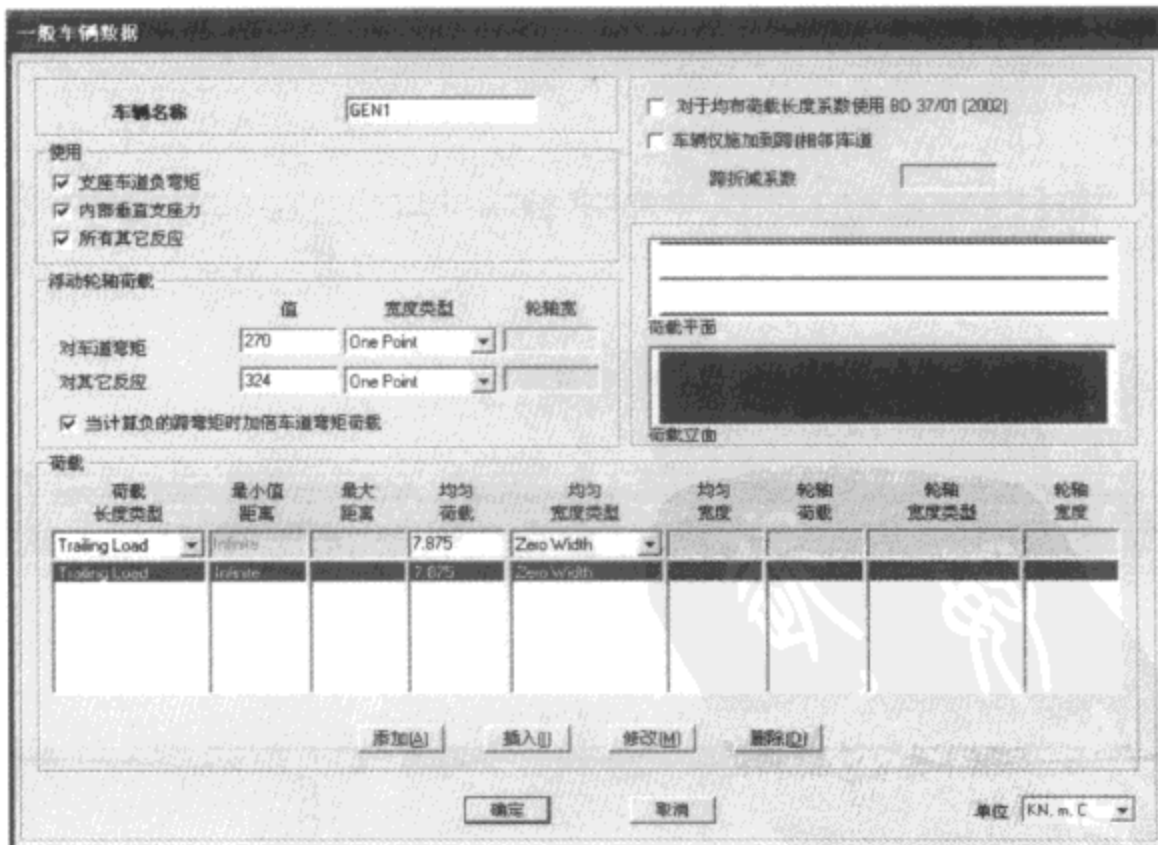


图 22-33 定义车辆数据

(4) 定义分析工况

定义类型为 moving load 的分析工况，由于只有两条车道，所以不必进行横向的折减。

(5) 分析及结果的查看

查看汽车活荷载效应，如图 22-34、图 22-35 所示。



图 22-34 汽车活荷载下弯矩包络图



图 22-35 汽车活荷载下剪力包络图

查看各内力或变形的影响线，如主跨跨中弯矩的影响线，如图 22-36 所示。主跨跨中竖向变形影响线，如图 22-37 所示。

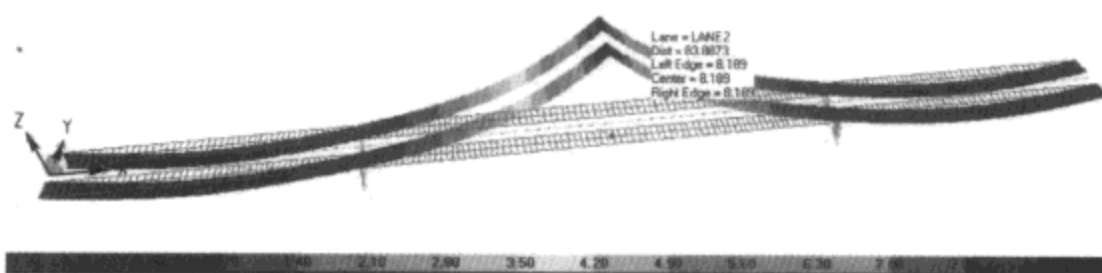


图 22-36 主跨跨中弯矩的影响线（沿车道宽度绘制轮廓）

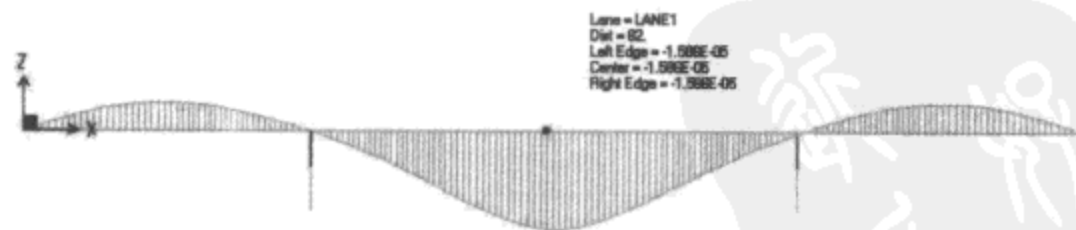


图 22-37 主跨跨中竖向变形的影响线

直接查看桥梁的反应，例如汽车活载作用下的 M3 包络如图 22-38 所示。

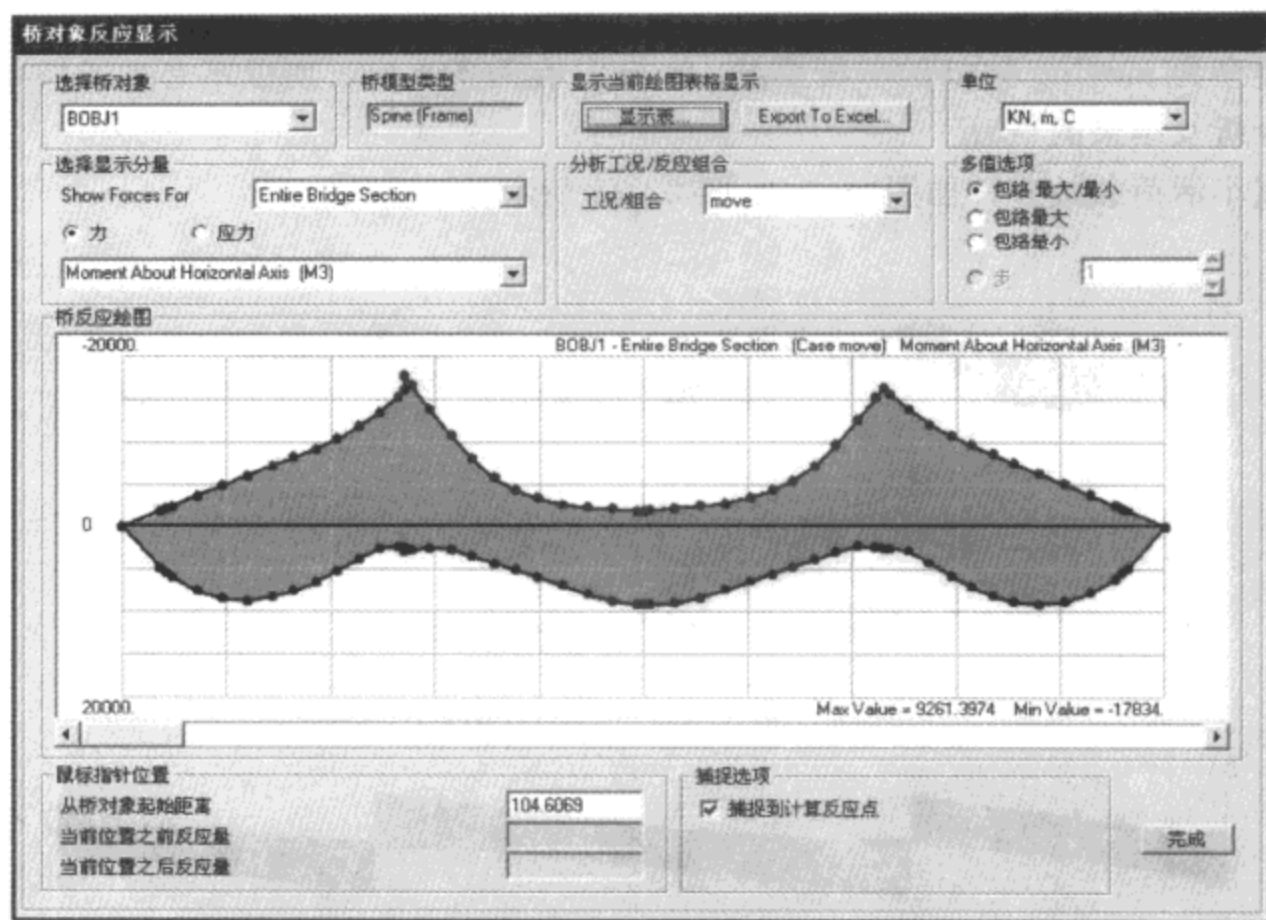


图 22-38 汽车活荷载作用下的 M3 包络

22.3.4 施工阶段分析

(1) 模型修改与指定

在桥梁模块中将桥台与主梁的连接条件改为固结，以避免边跨在支架上的现浇段出现体系不稳定的情况。

添加模拟支架的框架单元，尽量模拟现场的支架刚度，支架顶部不承担弯矩，故要将顶部抗弯自由度释放。支架单元底部节点固结。指定支架单元为组，组名为 zhijia。

预应力束由于在不同的阶段进行张拉，故定义不同的工况，见表 22-2。

表 22-2

| 预应力束类别 | 单元编号 | 张拉工况 | 单元编号 | 张拉工况 |
|--------|-------------|----------|------------|----------|
| 悬臂束 | 39~46 | Tendon0 | 47~54 | Tendon1 |
| | 55~62 | Tendon2 | 63~70 | Tendon3 |
| | 71~78 | Tendon4 | 79~86 | Tendon5 |
| | 87~94 | Tendon6 | 95~102 | Tendon7 |
| | 103~110 | Tendon8 | 111~118 | Tendon9 |
| 备用束 | 3, 12, 6~11 | Tendon10 | 1, 2, 4, 5 | Tendon10 |
| 底部束 | 13~38 | Tendon10 | | |

施工模拟过程中，需要工程师将各个部分分组。图 22-39 显示了半桥各梁段的组归属。

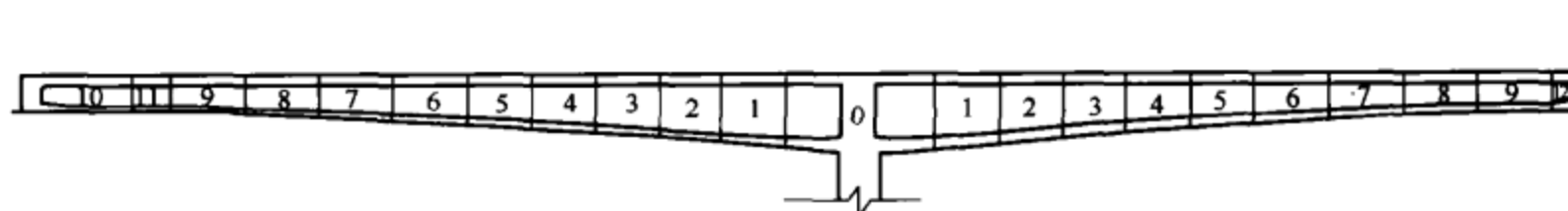


图 22-39 梁段分组

(2) 挂梁的模拟

在这里将挂梁模拟为简单的单节点集中力，力的大小为 400kN。根据不同的施工阶段，共有 9 种荷载工况，工况名称为 temp1~temp9。

(3) 定义分阶段施工

定义类型为非线性阶段施工的静力工况，整个施工过程总共分为 16 个阶段。其中第 15 阶段为考虑混凝土的收缩徐变效应。各个阶段的持续时间和各阶段荷载等情况见表 22-3。

各阶段的持续时间及荷载情况

表 22-3

| 阶段编号 | 持续天数 | 添加/移除结构 | 所加入的荷载 |
|------|------|------------------------|--------------------------|
| 1 | 30 | Add GROUP0 | DEAD+Tendon0+Temp1 |
| 2 | 10 | Add GROUP1 | DEAD+Tendon1-Temp1+Temp2 |
| 3 | 10 | Add GROUP2 | DEAD+Tendon2-Temp2+Temp3 |
| 4 | 10 | Add GROUP3 | DEAD+Tendon3-Temp3+Temp4 |
| 5 | 10 | Add GROUP4 | DEAD+Tendon4-Temp4+Temp5 |
| 6 | 10 | Add GROUP5 | DEAD+Tendon5-Temp5+Temp6 |
| 7 | 10 | Add GROUP6 | DEAD+Tendon6-Temp6+Temp7 |
| 8 | 10 | Add GROUP7 | DEAD+Tendon7-Temp7+Temp8 |
| 9 | 10 | Add GROUP8 | DEAD+Tendon8-Temp8+Temp9 |
| 10 | 10 | Add GROUP9 | DEAD+Tendon9-Temp9 |
| 11 | 10 | Add GROUP10 Add zhijia | DEAD |
| 12 | 10 | Add GROUP11 | DEAD |
| 13 | 10 | Add GROUP12 | DEAD+Tendon10 |
| 14 | 10 | Remove zhijia | |
| 15 | 1000 | | |
| 16 | 10 | | DEAD2 (二期恒载) |

(4) 结果查看

施工工况分析完成之后，可以查看各阶段各组成部分的内力及位移情况。这里只显示考虑混凝土收缩徐变对结构的影响。图 22-40 显示了主跨跨中几个梁段在第 15 阶段起始阶段的弯矩变化。至于其他反应，这里不再赘述。

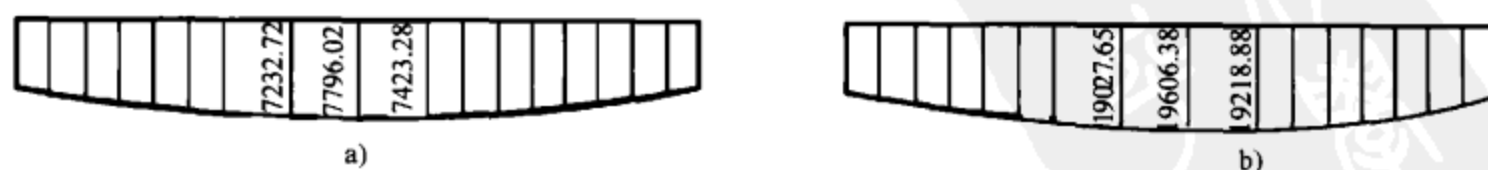


图 22-40 第 15 阶段跨中梁段弯矩示意图 (单位: kN·m)

a) 第 15 阶段起始弯矩图; b) 第 15 阶段结束弯矩图

第六部分

工程应用

随着经济的发展、社会的进步，人们对更大覆盖空间的需求日渐增长。为了获得更大的自由空间和建筑造型，建筑的结构形式逐步趋于复杂化、多样化，许多新技术也更多地得到应用。比如轻型、通透的点支玻璃幕墙和合理、经济的预应力钢结构等，第 23 章、24 章将重点介绍这两类结构形式在 SAP2000 中的实现。同时，在结构设计过程中工程师也不断面临新的难题，比如大悬挑结构的动力分析、复杂高层结构的阶段施工分析、混合结构的合理应用等等，第 25 章、26 章将涉及上述内容，介绍如何利用 SAP2000 来处理复杂高层结构可能遇到的实际问题。此外，大型体育场馆的设计也是工程师们越来越关心的话题，第 27 章将重点介绍 SAP2000 在体育场馆方面的应用。

与民用建筑不同，工业建筑则更注重工业设施对建筑结构的要求，这使得工业建筑的形态更加丰富，荷载情况也更加复杂。SAP2000 对于建立筒仓、球罐、管道等常用的工业建筑模型有着突出的优势，并且也能够模拟工业建筑中常见的吊车荷载、温度荷载、压力荷载、冲击荷载等情况。第 28 章将全面介绍如何利用 SAP2000 对各类典型工业建筑进行建模和分析。

另外，SAP2000 也可以应用于桥梁和水工建筑分析。第 29 章、30 章将分别以斜拉桥和混凝土重力坝为例进行介绍。

简而言之，本书前面五个部分，主要介绍了 SAP2000 的操作方法和功能实现，工程师不仅可学习 SAP2000 的使用方法，也能进一步了解程序的理论技术背景。第六部分将结合较复杂的工程模型，阐述 SAP2000 对于玻璃幕墙、预应力钢结构、高层建筑、高层混合结构、体育场馆、桥梁、重力坝等结构类型的应用，反映这些结构在各种复杂因素影响下的力学特性，为确保结构的安全可靠提出科学的依据，进而也体现了 SAP2000 进行复杂结构静力、动力、线性和非线性分析的强大功能。

第23章

索结构及玻璃幕墙应用

预应力拉索结构采用截面较小的高强钢索,工作状态只承受轴向拉力,能够充分利用钢材的抗拉强度并跨越较大的空间。采用预应力拉索作为支承体系的玻璃幕墙结构能够满足建筑对于大跨度、轻型化、高通透性等外观要求,特别适用于大空间公共建筑。

预应力拉索体系在没有施加预拉力时刚度为零,结构处于不稳定状态。在施加预拉力后,当索发生垂直于索轴线的变形时,通过索中轴力(拉力)的二阶效应形成结构刚度,所以一般情况预拉力大小由索的挠度限值决定,同时采用合适的张拉方案也是非常重要的。

在点支式幕墙拉索结构设计中,除了自平衡体系外,主体结构作为支座承受预应力拉索中的内力,一方面要求主体结构有足够的承载力和刚度,另一方面也须考虑主体结构变形对索和幕墙的附加作用。

本章先对预应力拉索结构作以简单描述,然后介绍在 SAP2000 中对点支拉索玻璃幕墙结构进行建模分析的原理和步骤,最后通过 2 个例子具体说明。

23.1 原理概述

23.1.1 预应力拉索体系与特点

按照索的布置方向和层数,预应力拉索结构可分为单向单层拉索结构、辐射式单层拉索结构、双向单层拉索结构、单向双层预应力拉索结构、辐射式预应力拉索结构、双向双层预应力拉索结构、预应力索网结构。

点支式幕墙一般采用单向单层、双向单层、单向双层或双向双层体系预应力拉索做为支承结构,单层体系的特点是占用建筑净空小,但其跨越长度的能力也较小。双层体系常见的有折线式、再分式、鱼腹式,特点是占用比较大的净空,但其跨越长度的能力较大,其中鱼腹式又包含中间带压杆的自平衡式。对于双层体系,考虑到结构体系的稳定性,通常需要在与承重索垂直的方向上布置稳定索,形成双向布索,单向布索比较少见。另外对于鱼腹式体

系，抵抗不均匀荷载作用的结构形式稳定性较弱。

23.1.2 索的模拟

实际的索和 SAP2000 中的框架单元，在截面属性上存在一些不同，索是柔性的，不能抵抗弯矩作用，在分析时应忽略其抗弯刚度。因此在建模过程中，我们可以用修正截面属性的办法通过框架单元来模拟索，具体做法是将框架截面属性中的围绕 2 轴的惯性矩和围绕 3 轴的惯性矩设为一个较小值。

这里需要注意，将抗弯刚度设为 0 或一个极小值（如 10^{-4} ），可能会带来分析时无法收敛或收敛缓慢等求解困难。

23.1.3 预拉力施加

在 SAP2000 中可以通过施加应变荷载或温度荷载模拟索中的预拉力。

索的弹性模量 E 和应变比 ϵ 有如下关系：

$$N = \epsilon \times E \times A$$

温度和应变比也有如下关系：

$$\epsilon = \alpha \times \Delta T$$

所以：

$$\epsilon = \frac{N}{E \times A}$$

$$\Delta T = \frac{N}{\alpha \times E \times A}$$

式中： α ——材料的线膨胀系数。

在支座固定的情况下降温或施加收缩应变，都将在索中产生拉力。

23.1.4 非线性分析

对于拉索这种柔性体系的分析，需要用到 SAP2000 的非线性分析功能。

SAP2000 的非线性分析包括材料非线性、几何非线性、边界条件和限制等。

对于拉索的分析，通常考虑索的应力-应变关系处于弹性阶段，不考虑材料非线性因素。虽然索只能受拉不能受压，但因为设计中不允许索中出现压力而退出工作，所以一旦分析结果显示索中出现压力，就说明施加的预拉力不够，需要加大初始预拉力。除非在设计中需要考虑部分索失效退出工作的情况，否则是没有必要给索指定拉压限定的，因此也不需要考虑边界条件和限制等情况，只需要考虑几何非线性的因素。

SAP2000 中几何非线性有两种：

P-Δ：平衡方程考虑部分结构的变形形状。拉力趋向于抵抗单元的转动和使结构刚化，压力趋向于增加单元的转动和使结构失稳。

大变形：所有平衡方程以结构变形的形状写成。模拟了大位移和大转动效应，假定所有应变较小，包括了 P-Δ 效应。

基于上述原因,在分析时应该选择几何非线性参数中的 $P-\Delta$ 和大变形选项,同时应将模拟索的框架单元剖分为足够小的单元,以保证在每个单元内的相对转动较小。

对于后面两个例题,考虑到索的抗弯刚度被折减后可以忽略,及索上作用的都是节点荷载,整个索段实际上是折线段而不是弧线段,因此不进行剖分也具有足够的分析精度。

23.1.5 荷载和作用

根据《点支式幕墙规程》(CECS 127—2001) 5.3.1 条规定,结构需要按下式考虑荷载和作用的效应组合:

$$S = \gamma_G S_{GK} + \psi_W \gamma_W S_{WK} + \psi_E \gamma_E S_{EK} + \psi_T \gamma_T S_{TK} \quad (23-1)$$

对于非线性分析,分析结束时的结构状态/刚度矩阵一般不等于结构的初始状态/刚度矩阵,所以各非线性分析工况的结果一般不能叠加。对于荷载和作用的效应组合,必须正确安排非线性分析工况的先后次序,后一个非线性分析工况应从前一个非线性分析工况结束时的状态/刚度矩阵开始,这样可以保证后一个非线性分析工况是在前面的非线性分析工况结果上叠加,因此最后一个非线性分析工况里就包含了前面分析的所有结果,从而得到多个荷载和作用在非线性分析下的效应组合。

23.1.6 主要控制指标和因素

根据《点支式幕墙规程》5.2.7 条规定,索的挠度应控制在 $l/300$ 以内 (l 为支承结构的跨度),同一块玻璃面板各支点位移差值和玻璃面板挠度应控制在 $b/100$ 以内 (b 为玻璃面板的长边长度),索中拉力不大于最小整索破断拉力的 $1/2.5$ 。

23.2 单拉索点支式幕墙

23.2.1 模型描述、建模基本过程

索采用 $\phi 36$ ($1 \times 91/3.2$) 不锈钢索,破断拉力 821.53kN ,施加预拉力 300kN 。玻璃面板尺寸为 $1.2\text{m} \times 1.5\text{m}$,厚度 15mm ,幕墙高度 4.8m ,可变荷载考虑风荷载、地震作用、温度作用(图 23-1)。

索用框架单元模拟,索直径按照截面积 (731.87mm^2) 折算为 30.5mm ,同时将框架截面属性中的围绕 2 轴的惯性矩和围绕 3 轴的惯性矩设为 0.1。

爪件用框架单元模拟,与索连接端释放 M_2 、 M_3 ,玻璃面板用壳单元模拟。

定义一个 **TEMP** 工况,采用降温法施加预拉力,不锈钢的材料参数取: $\alpha = 1.2 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$, $E = 1.35 \times 10^8 \text{kN/m}^2$,所以 $\Delta T = -253.47^\circ\text{C}$;定义一个 **DELTATEMP** 工况,考虑索中温度作用,年度温差取 80°C ,本例假设施工时环境温度处于平均值,仅考虑升温对结构的影响,故取 $\Delta T = 40^\circ\text{C}$ (图 23-2 所示)。



图 23-1 算例模型

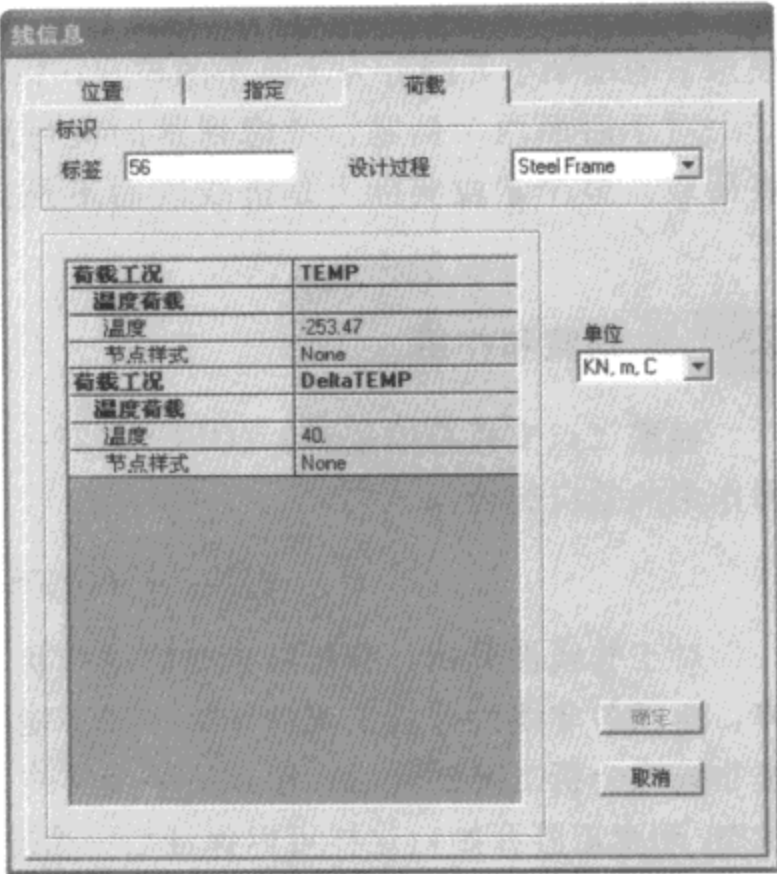


图 23-2 索温度荷载指定

玻璃面板用壳单元模拟，作用在点支式玻璃幕墙风荷载标准值按下式计算：

$$w_k = \beta_{gz} \mu_z \mu_s w_0 \tag{23-2}$$

地面粗糙度取 B，基本风压取 $w_0=0.45\text{kN/m}^2$ ，离地面高度 4.8m 处风压高度变化系数 $\mu_z=1.0$ ，阵风系数 $\beta_{gz}=1.88$ ，风荷载体型系数正压 $\mu_s=0.8$ ，负压 $\mu_s=-1.0$ 计算得到 $w_k=0.846\text{kN/m}^2$ ，小于 1.0kN/m^2 ，故按《点支式幕墙规程》5.3.6 取风荷载标准值为 1.0kN/m^2 。

定义自重工况为 DEAD，风荷载工况为 WIND，地震作用工况为 QY，非线性分析工况顺序如图 23-3 所示。施加预拉力的 TEMP 工况为初始工况，考虑自重的 DEAD 工况随后，这同实际施工中先张拉索再施加结构自重的顺序是符合的。WIND、QY、DELTATEMP 工况接在 DEAD 工况之后，表明这些荷载和作用发生在使用阶段。

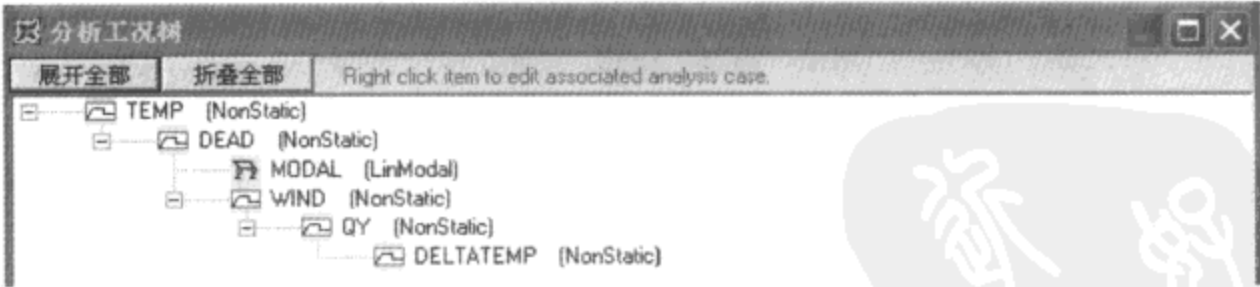


图 23-3 分析工况顺序

23.2.2 结果查看

幕墙第一、二振型如图 23-4 所示，周期分别为 0.138s、0.130s。

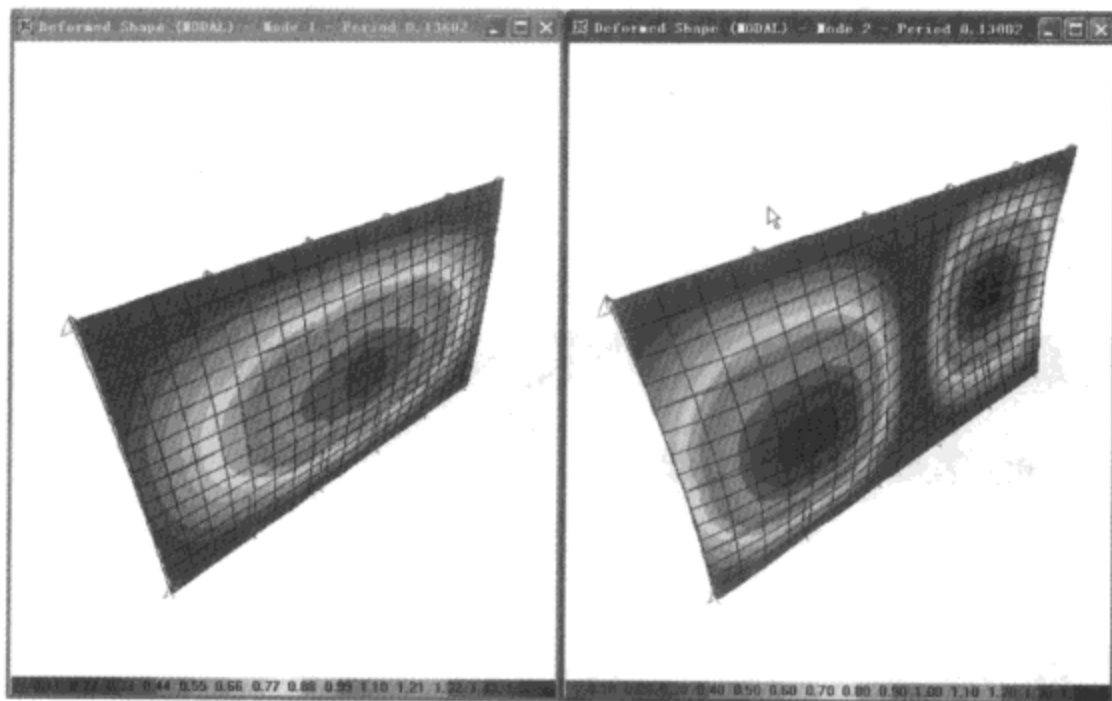


图 23-4 查看振型结果

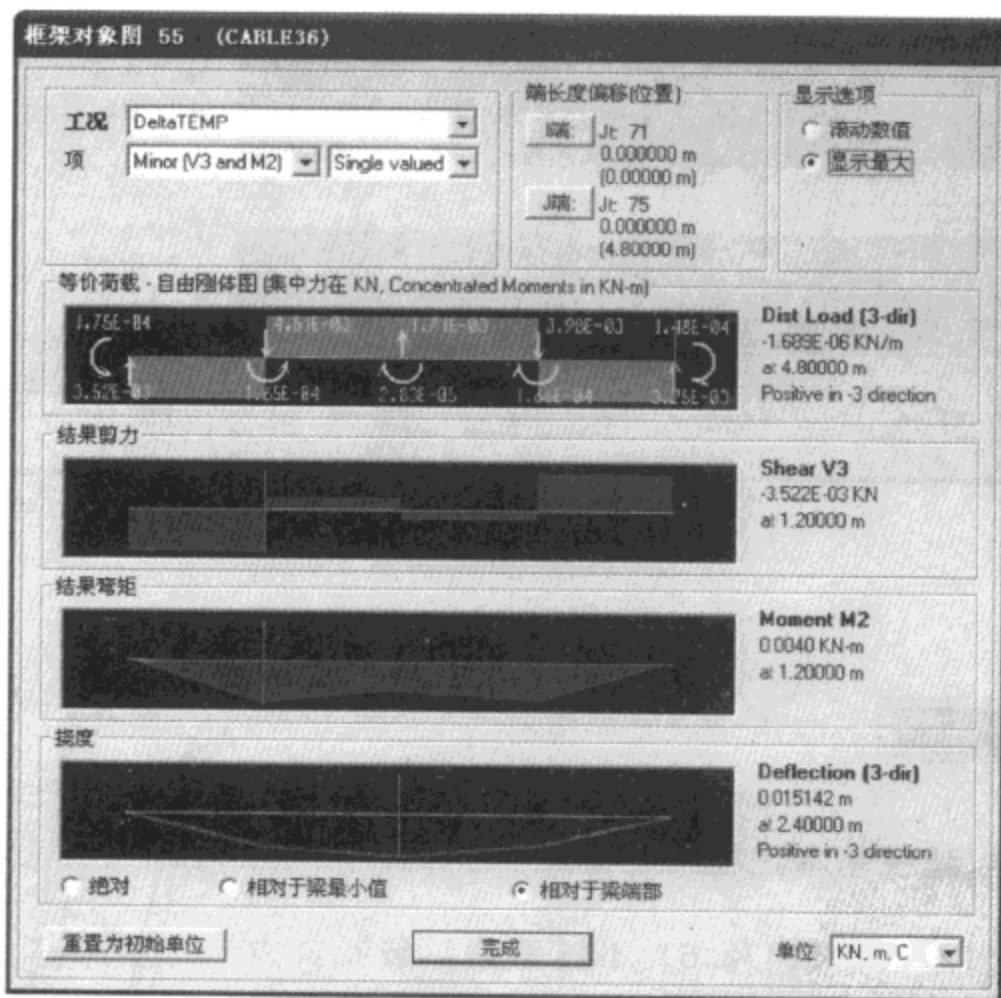


图 23-5 索挠度结果

按照《点支式幕墙规程》索挠度控制在 $l/300$ 以内的要求，正常情况下，单层索玻璃幕墙为挠度控制，故各荷载和作用的荷载系数均取 1，组合系数风荷载取 1，地震作用取 0.6，温度作用取 0.2。按照非线性分析工况的顺序，可知 DeltaTemp 工况对应如下荷载和作用的效应组合：

$$S = S_{GK} + S_{WK} + 0.6S_{EK} + 0.2S_{TK}$$

(23-3)

因为， $15.1\text{mm} < 4800/300 = 16\text{mm}$ ，所以索的挠度满足要求（如图 23-5 所示）。

$\phi 36$ （ $1 \times 91/3.2$ ）不锈钢索破断拉力为 821.53kN，抗拉承载力设计值取破断拉力的 $1/2.5$ ，即 $f = 328.61\text{kN}$ 。

索中最大轴力为 $303\text{kN} < 328.61\text{kN}$ ，抗拉承载力满足（如图 23-6 所示）。

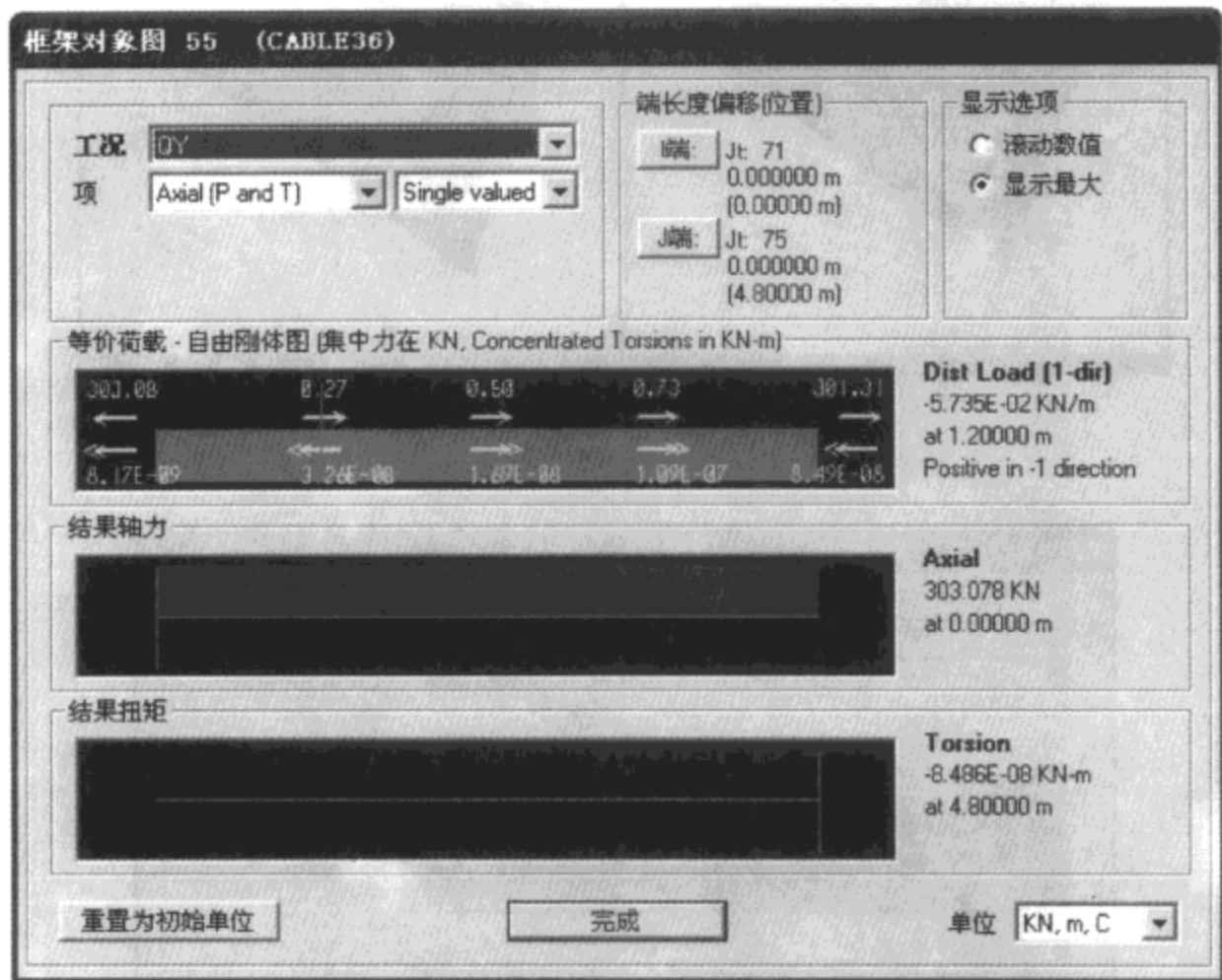


图 23-6 索内力结果

23.3 鱼腹式点支幕墙

23.3.1 模型描述、建模基本过程

鱼腹式索采用 $\phi 24$ （ $1 \times 61/2.6$ ）不锈钢索，破断拉力 363.55kN，施加预拉力 100kN，矢高 1.2m；承受自重的竖直索和水平稳定索采用 $\phi 18$ （ $1 \times 37/2.6$ ）不锈钢索，破断拉力 220.39kN，施加预拉力 20kN。撑杆 $\phi 50 \times 5$ ，玻璃面板尺寸为 $2.1\text{m} \times 2.4\text{m}$ ，厚度 15mm。幕墙高度 16.8m，可变荷载考虑风荷载、地震作用、温度作用（图 23-7 所示）。

爪件、撑杆和索均用框架单元来模拟，模拟方法见本章 23.2 节，鱼腹式索的形状采用抛物线来模拟，建模结合 EX-

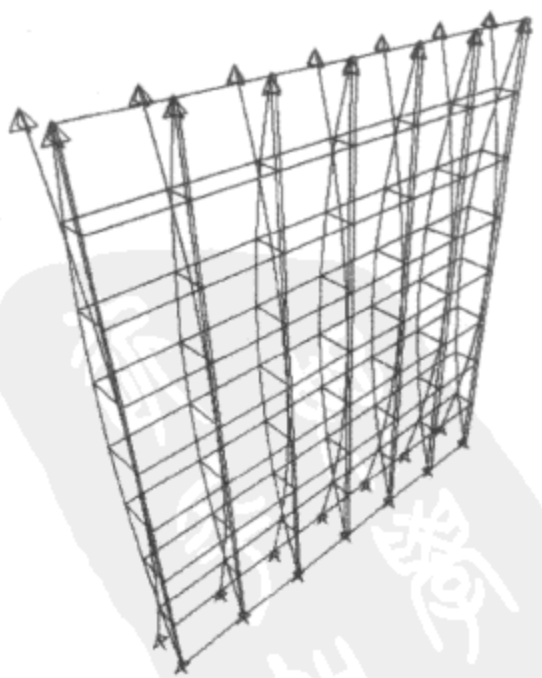


图 23-7 算例模型

CEL 完成，具体做法如下：

在编辑菜单中选择【交互式数据库编辑】命令，得到当前模型中所有信息的树形列表。因为现在需要建立曲线框架的模型，所以如图 23-8 所示选择数据表。如果模型中没有点和线对象，则不会有这两张表，因此可以先绘制一个线对象，让程序自动生成这两张表；或者勾选 **Expose All Input Tables** 让程序生成空表再做编辑。

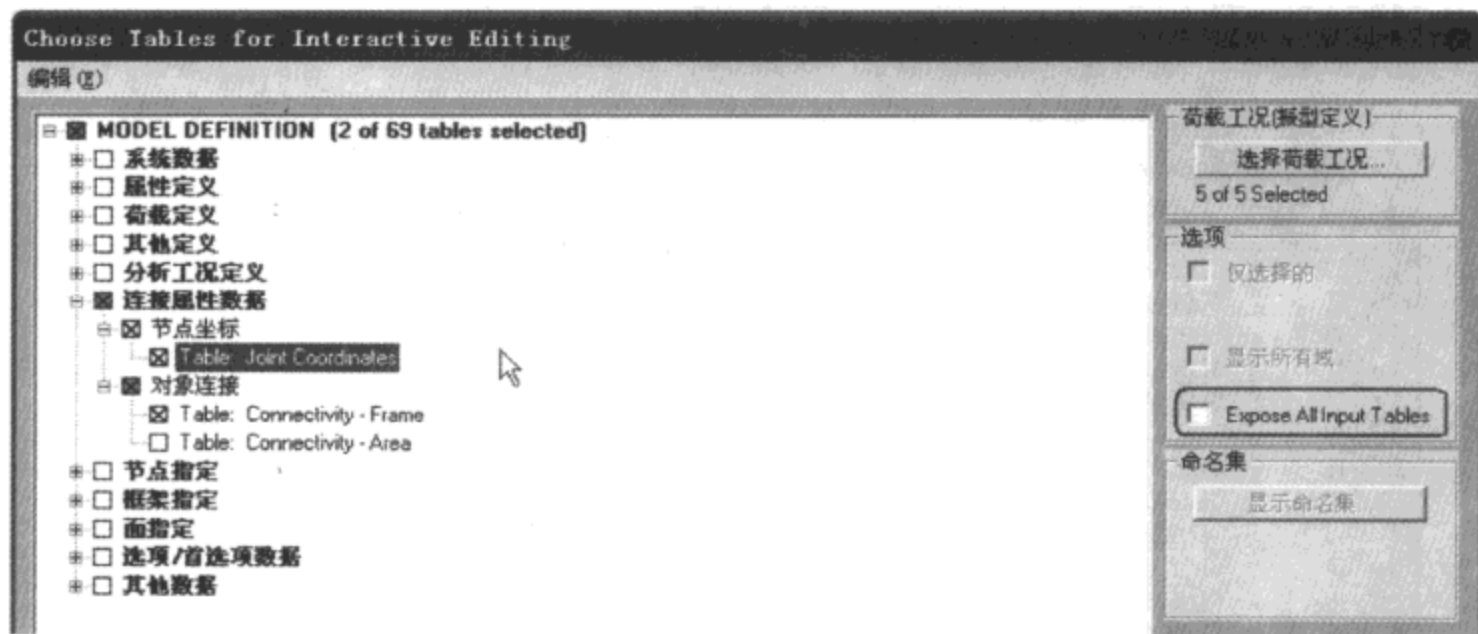


图 23-8 选择数据表

在 **Interactive Database Editing** 窗口中（如图 23-9 所示），**Joint Coordinates** 表记录模型中所有节点的坐标信息，**Connectivity-Frame** 表记录框架单元对应节点的编号。首先需要在 **Joint Coordinates** 表中增加节点，在下拉列表中选择 **Joint Coordinates**，用到 **Excel** 选项，将 **Joint Coordinates** 表输出到 Excel 中。

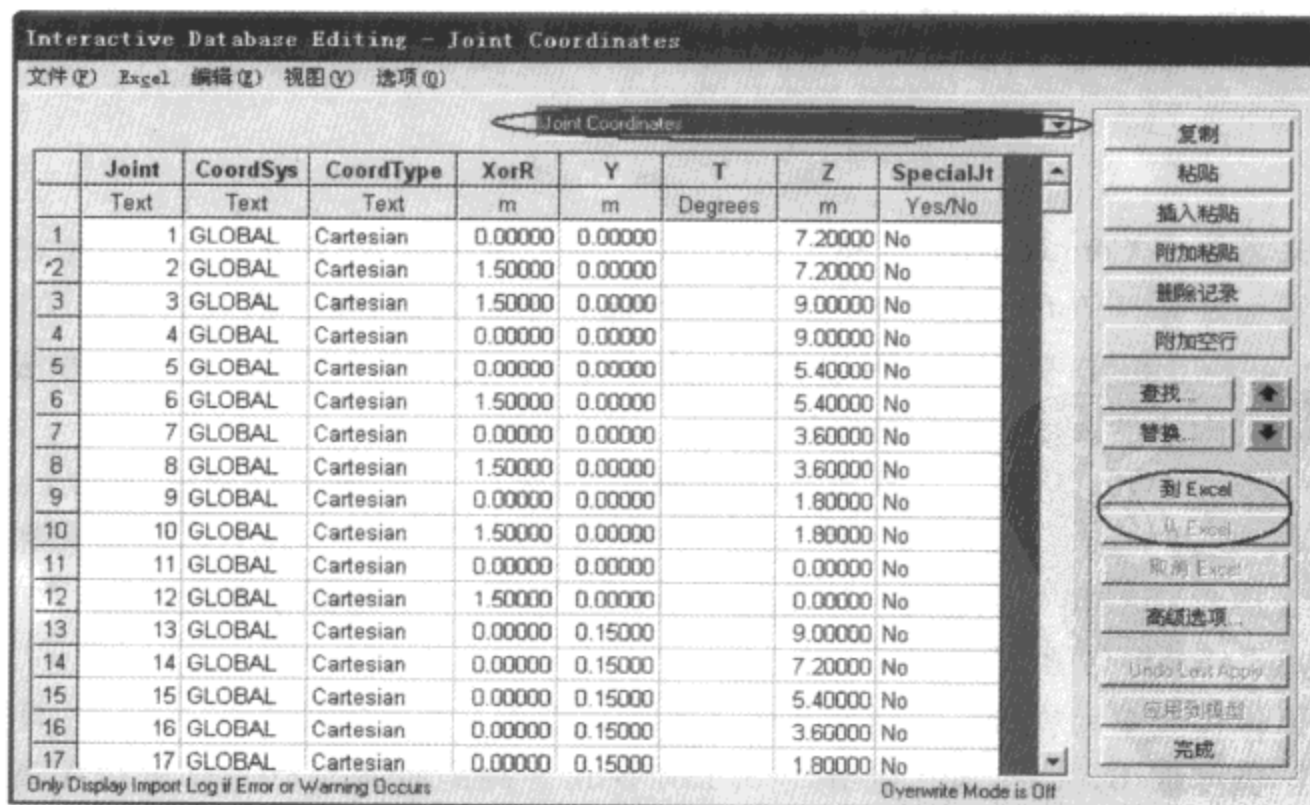
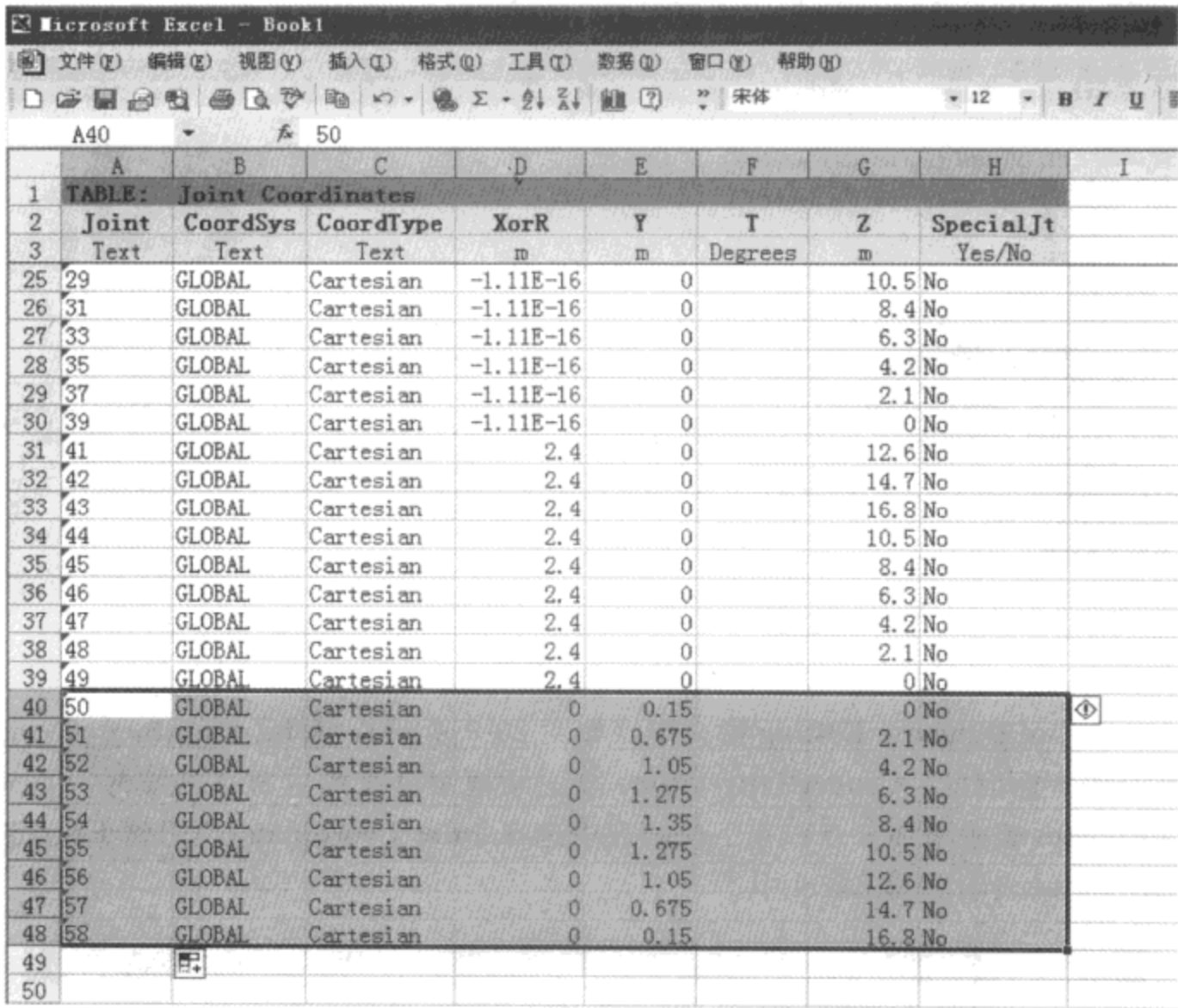


图 23-9 交互编辑

然后在 Excel 中通过构造相应的公式，可以算得全部需要的节点坐标，填写到 **Joint Coordinates** 表中。如图23-10 所示，图中选择区域为根据计算添加的节点，**Joint** 对应节点标签，**X** 或 **R**、**Y**、**T**、**Z** 对应笛卡尔坐标系和柱坐标系下坐标值。添加完数据后回到 SAP2000 在 **Interactive Database Editing** 窗口中使用从 **Excel** 选项将结果传回 SAP2000。



| | A | B | C | D | E | F | G | H | I |
|----|--------------------------|----------|-----------|-----------|-------|---------|------|-----------|---|
| 1 | TABLE: Joint Coordinates | | | | | | | | |
| 2 | Joint | CoordSys | CoordType | XorR | Y | T | Z | SpecialJt | |
| 3 | Text | Text | Text | m | m | Degrees | m | Yes/No | |
| 25 | 29 | GLOBAL | Cartesian | -1.11E-16 | 0 | | 10.5 | No | |
| 26 | 31 | GLOBAL | Cartesian | -1.11E-16 | 0 | | 8.4 | No | |
| 27 | 33 | GLOBAL | Cartesian | -1.11E-16 | 0 | | 6.3 | No | |
| 28 | 35 | GLOBAL | Cartesian | -1.11E-16 | 0 | | 4.2 | No | |
| 29 | 37 | GLOBAL | Cartesian | -1.11E-16 | 0 | | 2.1 | No | |
| 30 | 39 | GLOBAL | Cartesian | -1.11E-16 | 0 | | 0 | No | |
| 31 | 41 | GLOBAL | Cartesian | 2.4 | 0 | | 12.6 | No | |
| 32 | 42 | GLOBAL | Cartesian | 2.4 | 0 | | 14.7 | No | |
| 33 | 43 | GLOBAL | Cartesian | 2.4 | 0 | | 16.8 | No | |
| 34 | 44 | GLOBAL | Cartesian | 2.4 | 0 | | 10.5 | No | |
| 35 | 45 | GLOBAL | Cartesian | 2.4 | 0 | | 8.4 | No | |
| 36 | 46 | GLOBAL | Cartesian | 2.4 | 0 | | 6.3 | No | |
| 37 | 47 | GLOBAL | Cartesian | 2.4 | 0 | | 4.2 | No | |
| 38 | 48 | GLOBAL | Cartesian | 2.4 | 0 | | 2.1 | No | |
| 39 | 49 | GLOBAL | Cartesian | 2.4 | 0 | | 0 | No | |
| 40 | 50 | GLOBAL | Cartesian | 0 | 0.15 | | 0 | No | |
| 41 | 51 | GLOBAL | Cartesian | 0 | 0.675 | | 2.1 | No | |
| 42 | 52 | GLOBAL | Cartesian | 0 | 1.05 | | 4.2 | No | |
| 43 | 53 | GLOBAL | Cartesian | 0 | 1.275 | | 6.3 | No | |
| 44 | 54 | GLOBAL | Cartesian | 0 | 1.35 | | 8.4 | No | |
| 45 | 55 | GLOBAL | Cartesian | 0 | 1.275 | | 10.5 | No | |
| 46 | 56 | GLOBAL | Cartesian | 0 | 1.05 | | 12.6 | No | |
| 47 | 57 | GLOBAL | Cartesian | 0 | 0.675 | | 14.7 | No | |
| 48 | 58 | GLOBAL | Cartesian | 0 | 0.15 | | 16.8 | No | |
| 49 | | | | | | | | | |
| 50 | | | | | | | | | |

图 23-10 编辑节点信息

接下来需要在 **Connectivity-Frame** 表中增加杆件，操作过程与添加节点类似。当两张表的内容都添加好并且传回 SAP2000 后，点击【**应用到模型**】，再点击【**完成**】关闭 **Interactive Database Editing** 窗口，这时可以看到，鱼腹索已经添加到模型中。这种方法简单、准确、快捷，适用于复杂形状的构件/结构建模。

定义一个 **TEMP** 工况，采用降温法施加预拉力，不锈钢的材料参数取： $\alpha = 1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ， $E = 1.35 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$ ，所以鱼腹式索 $\phi 24$ 中 $\Delta T = -190.7^{\circ}\text{C}$ ，竖直索和水平稳定索 $\phi 18$ 中 $\Delta T = -62.96^{\circ}\text{C}$ ；定义一个 **DELTATEMP** 工况，考虑索中温度作用，年度温差取 80°C ，故 $\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$ （图 23-2 所示）。

玻璃面板用壳单元模拟，作用在点支式玻璃幕墙风荷载标准值按式（23-2）计算：
地面粗糙度取 B ，基本风压取 $w_0 = 0.45 \text{ kN/m}^2$ ，离地面高度 16.8 m 处风压高度变化系数 $\mu_z = 1.18$ ，阵风系数 $\beta_{gz} = 1.71$ ，风荷载体型系数正压 $\mu_s = 0.8$ ，负压 $\mu_s = -1.0$ （按墙面取）计算得到 $w_k = 0.908 \text{ kN/m}^2$ ，小于 1.0 kN/m^2 ，故按《点支式幕墙规程》5.3.6 取风荷

载标准值为 1.0kN/m^2 。

23.3.2 结果查看

幕墙第一振型为侧向摆动，第二、三振型如图 23-11 所示，周期分别为 0.236s 、 0.232s 。

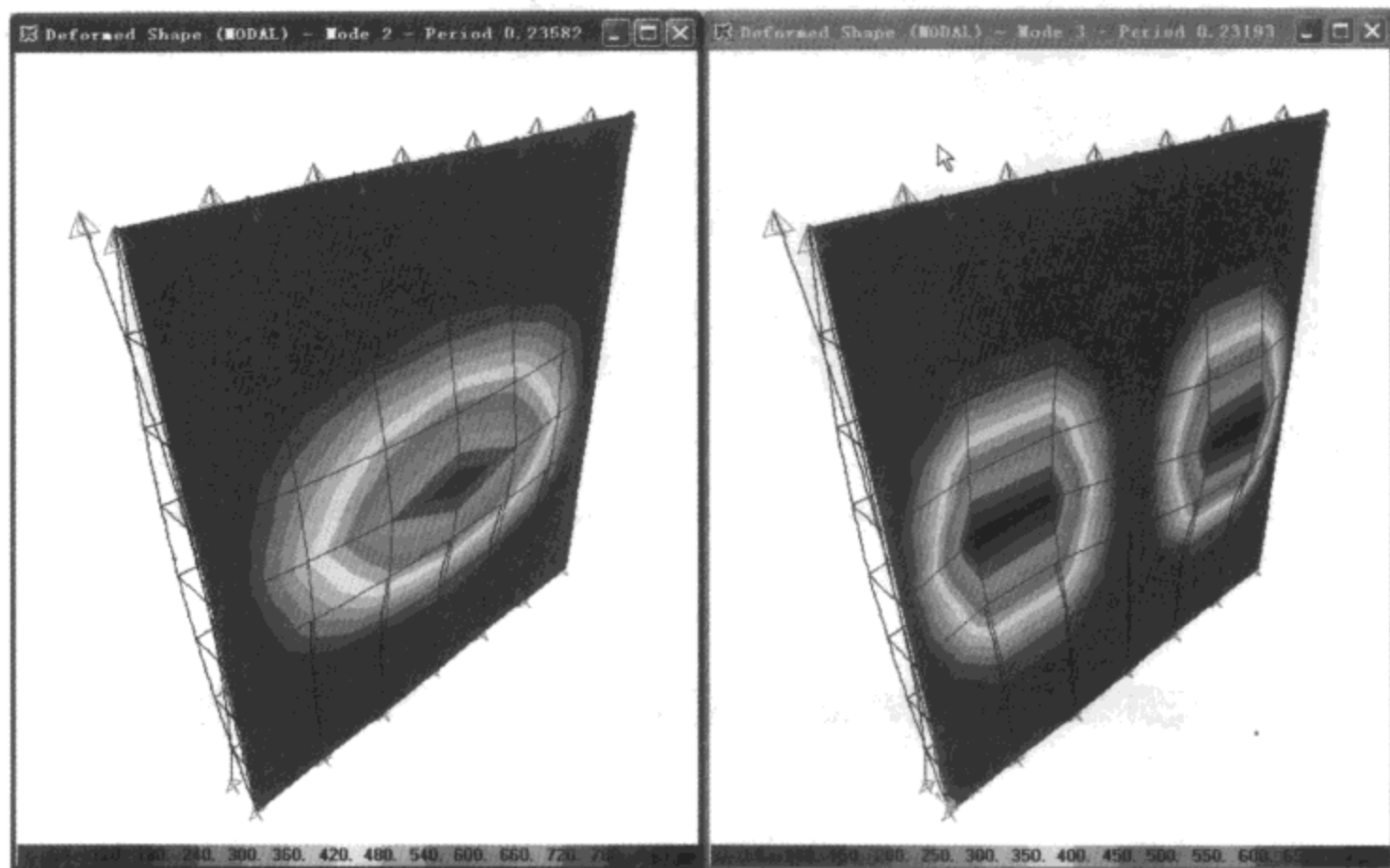


图 23-11 查看振型结果

各荷载和作用的荷载系数及组合系数取法同 23.2 节单拉索点支式幕墙，按照非线性分析工况的顺序，可知 DeltaTemp 工况对应的荷载和作用效应组合公式即为式 (23-2)：

为了快速准确地找到索上发生最大水平位移的节点及其位移值，首先点击【选择】>【选择框架截面】，选择截面 CABLE24、CABLE18，然后点击【视图】或在屏幕空白处按右键，点击【只显示选择对象】，框选屏幕上所有对象，得到了全部索节点的选择集。接下来点击【显示】>【显示表格】，弹出 Choose Tables for Display 窗口，选择【ANALYSIS RESULTS】>【节点输出】>【位移】>【Table: Joint Displacements】，在窗口右上选择分析工况中选择 DELTATEMP 工况，点击【完成】得到 DELTATEMP 工况下选择节点的位移表（图 23-12）：

点击【格式】，弹出修改/显示数据库表格格式窗口，在中间下部表格排序-按这些域排序处，选择 U2 按降序排列（图 23-13），因为这里需要得到的是 U2 方向最大位移。右边上部的数据库表格域布置和过滤处，可以通过在 Operator 域选择合适的操作符、在 Filter Value 域填写对应的操作值来完成简单的数据过滤操作，域之间的逻辑操作是 AND 关系。

Joint Displacements

文件(F) 视图(V) 选项(O) 格式(M)

Units: As Noted

| | Joint Text | OutputCase Text | CaseType Text | StepType Text | U1 m | U2 m | U3 m | R1 Radians | R2 Radians |
|---|------------|-----------------|---------------|---------------|---------|--------|---------|------------|------------|
| ▶ | 2 | DELTATEMP | NonStatic | Max | 0 | 0 | 0 | 020726 | 000186 |
| | 2 | DELTATEMP | NonStatic | Min | 0 | 0 | 0 | 020726 | 000186 |
| | 10 | DELTATEMP | NonStatic | Max | -000277 | 022648 | -000551 | 002426 | 002276 |
| | 10 | DELTATEMP | NonStatic | Min | -000277 | 022648 | -000551 | 002426 | 002276 |
| | 18 | DELTATEMP | NonStatic | Max | 0 | 0 | 0 | 02012 | 000429 |
| | 18 | DELTATEMP | NonStatic | Min | 0 | 0 | 0 | 02012 | 000429 |
| | 19 | DELTATEMP | NonStatic | Max | 0 | 0 | 0 | 003205 | 006325 |
| | 19 | DELTATEMP | NonStatic | Min | 0 | 0 | 0 | 003205 | 006325 |
| | 20 | DELTATEMP | NonStatic | Max | 004589 | 004011 | 000042 | 000522 | 002752 |
| | 20 | DELTATEMP | NonStatic | Min | 004589 | 004011 | 000042 | 000522 | 002752 |
| | 21 | DELTATEMP | NonStatic | Max | 001593 | 010509 | 000231 | 000941 | 002175 |
| | 21 | DELTATEMP | NonStatic | Min | 001593 | 010509 | 000231 | 000941 | 002175 |
| | 22 | DELTATEMP | NonStatic | Max | 000114 | 017316 | 000013 | 005047 | 002207 |
| | 22 | DELTATEMP | NonStatic | Min | 000114 | 017316 | 000013 | 005047 | 002207 |
| | 24 | DELTATEMP | NonStatic | Max | 000121 | 02023 | 001 | 001215 | 002364 |
| | 24 | DELTATEMP | NonStatic | Min | 000121 | 02023 | 001 | 001215 | 002364 |
| | 25 | DELTATEMP | NonStatic | Max | 001594 | 013014 | 00097 | 000404 | 002513 |
| | 25 | DELTATEMP | NonStatic | Min | 001594 | 013014 | 00097 | 000404 | 002513 |
| | 27 | DELTATEMP | NonStatic | Max | 004586 | 004389 | 000245 | 002048 | 002536 |
| | 27 | DELTATEMP | NonStatic | Min | 004586 | 004389 | 000245 | 002048 | 002536 |

记录: 1 of 252

完成

图 23-12 表格方式查看结果

修改/显示数据库表格格式

Format for OutputCase Field

常规

☒ 在报告中包括域

☐ 修改域名

域位置和宽度

域位置: Center

域宽度单位: Millimeters

域宽度: 0.0315

浮点格式

最大字符数:

零容忍:

小数位数:

需要四舍五入的最小数量:

总是使用 E 格式:

Units (Type Text Regular)

按这些单位显示域:

☒ 总是按当前单位显示

设置为程序默认域格式

所选域: 全部域

数据库表格域布置和过滤

| Item | Field Name | Operator | Filter Value |
|------------|------------|----------|--------------|
| 1 Printed | Joint | None | |
| 2 Printed | OutputCase | None | |
| 3 Printed | CaseType | > | |
| 4 Printed | StepType | < | |
| 5 Printed | U1 | >= | |
| 6 Printed | U2 | <= | |
| 7 Printed | U3 | Like | |
| 8 Printed | R1 | Between | |
| 9 Printed | R2 | IsNull | |
| 10 Printed | R3 | NotLike | |

将显示顺序恢复为默认值

清除所有过滤

表格排序 按这些域排序

组织按: U2

然后按:

然后按:

然后按:

然后按:

然后按:

清除排序

应用格式到表格

使用文件的格式

使用程序默认格式

保存数据库表格格式文件

保存表格格式到文件

OK

取消

图 23-13 修改/显示数据库表格格式

点击【OK】后可以发现最大 U2 方向位移发生在节点 155 和节点 89（图 23-14 所示）处， $42.3\text{mm} < 16800/300 = 56\text{mm}$ ，竖向受力索挠度满足要求。

Joint Displacements

文件(F) 视图(V) 选项(O) 格式(M)

Units: As Noted

Joint Displacements

| | Joint Text | OutputCase Text | CaseType Text | StepType Text | U1 m | U2 m | U3 m | R1 Radians | R2 Radians |
|---|------------|-----------------|---------------|---------------|------------|---------|----------|---------------|---------------|
| ▶ | 155 | DELTATEMP | NonStatic | Max | -0.00117 | 0.42286 | -0.00557 | 0.02466 | -0.00006609 |
| | 155 | DELTATEMP | NonStatic | Min | -0.00117 | 0.42286 | -0.00557 | 0.02466 | -0.00006609 |
| | 89 | DELTATEMP | NonStatic | Min | -0.00117 | 0.42286 | -0.00557 | 0.02466 | -0.00006609 |
| | 89 | DELTATEMP | NonStatic | Max | -0.00117 | 0.42286 | -0.00557 | 0.02466 | -0.00006609 |
| | 172 | DELTATEMP | NonStatic | Min | -0.01586 | 0.42163 | 0.00155 | -0.00249 | -0.0001 |
| | 172 | DELTATEMP | NonStatic | Max | -0.01586 | 0.42163 | 0.00155 | -0.00249 | -0.0001 |
| | 106 | DELTATEMP | NonStatic | Max | -0.01586 | 0.42163 | 0.00155 | -0.00249 | -0.0001 |
| | 106 | DELTATEMP | NonStatic | Min | -0.01586 | 0.42163 | 0.00155 | -0.00249 | -0.0001 |
| | 122 | DELTATEMP | NonStatic | Min | -1.375E-16 | 0.41836 | -0.00559 | 0.02471 | 3.682E-16 |
| | 122 | DELTATEMP | NonStatic | Max | -1.375E-16 | 0.41836 | -0.00559 | 0.02471 | 3.682E-16 |
| | 139 | DELTATEMP | NonStatic | Min | 4.551E-16 | 0.41715 | 0.00157 | -0.00247 | 3.491E-16 |
| | 139 | DELTATEMP | NonStatic | Max | 4.551E-16 | 0.41715 | 0.00157 | -0.00247 | 3.491E-16 |
| | 188 | DELTATEMP | NonStatic | Min | -0.00133 | 0.40061 | -0.0056 | 0.02478 | -0.00059 |
| | 188 | DELTATEMP | NonStatic | Max | -0.00133 | 0.40061 | -0.0056 | 0.02478 | -0.00059 |
| | 40 | DELTATEMP | NonStatic | Min | -0.00133 | 0.40061 | -0.0056 | 0.02478 | -0.00059 |
| | 40 | DELTATEMP | NonStatic | Max | -0.00133 | 0.40061 | -0.0056 | 0.02478 | -0.00059 |
| | 205 | DELTATEMP | NonStatic | Min | -0.003172 | 0.39937 | 0.00155 | -0.0025 | -0.00056 |
| | 205 | DELTATEMP | NonStatic | Max | -0.003172 | 0.39937 | 0.00155 | -0.0025 | -0.00056 |
| | 73 | DELTATEMP | NonStatic | Max | -0.003172 | 0.39937 | 0.00155 | -0.0025 | -0.00056 |
| | 73 | DELTATEMP | NonStatic | Min | -0.003172 | 0.39937 | 0.00155 | -0.0025 | -0.00056 |

记录: 1 of 252

完成

图 23-14 节点位移

选择所有 $\phi 24$ 索, 点击【显示】>【显示表格】, 在【Choose Tables for Display】窗口中, 选择 ANALYSIS RESULTS>单元输出>框架输出>位移>【Table: Element Forces - Frames】, 在右上分析工况中不选择 MODAL 工况, 对获得的数据表排序可得 $\phi 24$ ($1 \times 61 / 2.6$) 索中最大轴力 $= 138.6 \text{ kN} < 363.55 / 2.5 = 145.42 \text{ kN}$, 抗拉承载力满足; 同样可得 $\phi 18$ ($1 \times 37 / 2.6$) 索中最大轴力为 $26.5 \text{ kN} < 220.39 / 2.5 = 88.16 \text{ kN}$, 抗拉承载力满足。

第24章

预应力钢结构应用

在钢结构承重体系中，引入人为应力以抵消荷载应力，调整内力峰值，增强结构刚度及稳定性，改善结构其他属性以及利用预应力技术创建新体系的，都可称为预应力钢结构。预应力混凝土结构中预应力的作用是以延缓混凝土中裂缝出现，提高结构刚度为主，而钢结构中施加预应力除提高结构强度、稳定性、刚度外，主要是创建新型结构体系，赋予零刚度结构以必要的刚度，变几何可变体系为几何不变体系。与非预应力钢结构相比，预应力钢结构充分利用了钢材弹性强度的幅值提高结构承载力，改善结构受力状态，节省钢材，提高结构刚度及稳定性以及改善结构其他属性。

随着建筑材料工业的发展，预应力钢结构在形式上有了很多变化，不断地被丰富，应用也越来越广泛。本章拟结合某项目的结构选型过程，取一标准单元进行分析计算，比较拉索预应力钢桁架、斜拉钢桁架和索托钢桁架三种预应力钢结构的受力性能。本章首先对其受力原理进行概述，而后重点阐述其建模与分析过程中的关键问题，最后从分析结果中得出一些有益的结论，供相关工程结构分析设计参考。

24.1 结构受力原理概述

拉索预应力钢桁架是预应力钢结构学科中研究最早、最广泛的一种结构形式。拉索预应力钢桁架是在非预应力桁架结构形式的基础上，沿杆身长度布索或在桁架平面内进行廊内或廊外布索，局部或整体地施加预应力以改善单个或大部分杆件（称为卸载杆）的受力状态以节约钢材。但在引入预应力的同时，结构也会有部分杆件加大内力（称为增载杆），恶化其受力条件并增大材耗。卸载杆的钢材节约与增载杆的材耗增大抵消后才是结构的经济效益，故此类结构的材料节约量并不显著，一般在10%~20%之间。

斜拉式吊挂结构来自于桥梁结构形式，经工程实践检验，斜拉钢屋盖形式以其自重轻、制造工业化程度高，施工快捷得以生存发展。其承重体系由三种构件组成，即主承重结构、吊索及屋盖三部分。因其结构体系以吊索取代立柱，形成了室内无阻挡的大空间，易于满足

各种功能要求, 深受工程界的重视。此结构设计遵守以下原则: 选用合理的主承重结构体系; 确定适宜顶吊点高度; 尽量采用均衡对称的布索方案; 对吊索施加预拉力以保证拉索不会退出工作并对屋盖结构产生有益的卸载效应; 寻求合理的刚度比以降低屋盖结构的内力峰值。

索托钢桁架结构外形酷似斜拉结构, 但其受力却完全不同, 在索和桁架结构连接处, 不采用刚性锚头连接, 也不切断钢索, 而是直接从桁架下弦贯穿过去, 锚固在另一侧的柱顶。索通过安装在下弦杆底部中间的转向块通长布索, 该转向块设计成二力支撑杆, 内带滑轮, 将索的竖直分力传给加固钢板, 索张拉采用对称张拉。将斜拉索改为索托索, 改善了结构的受力状况。索对桁架支托力(竖向力)和水平力之比大于斜拉结构中竖向力与水平力之比, 且避免了斜拉结构中对结构桁架无效而有害的水平力。故索的效率较斜拉结构高了很多, 且降低了对塔高的要求(见图24-1)。

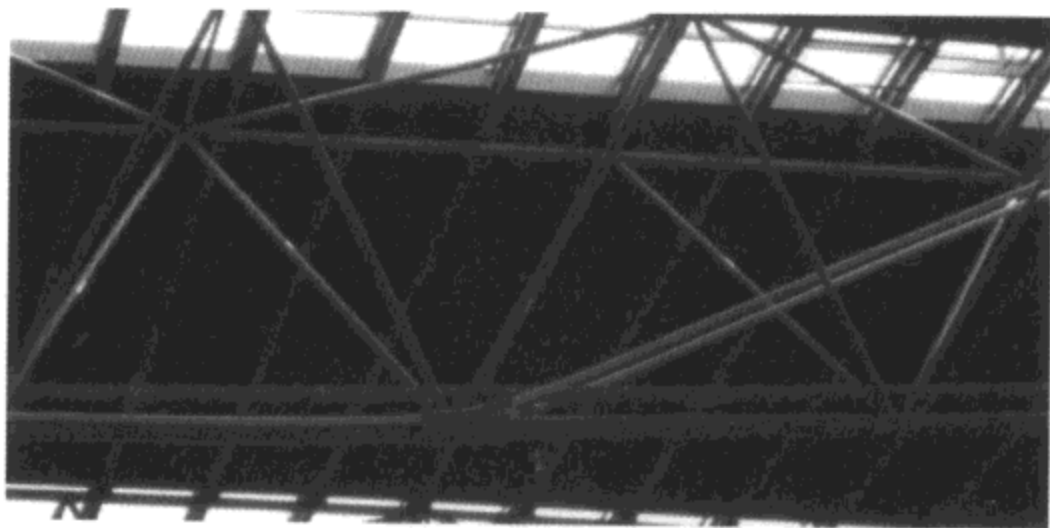


图24-1 芦城体育馆索托结构托点位置

以上三种形式预应力钢结构均以劲性构件——钢桁架作为稳定结构, 通过张拉承重索或对桁架的两端下压产生强迫位移, 使索与钢桁架形成了预应力体系。与柔性悬索结构相比, 索桁架体系具有较大的刚度, 对抵抗不均匀荷载作用的结构形状稳定性有较大幅度的提高。由于刚性桁架的存在, 均不需要施加很大的预张力, 从而使支撑结构的负担得以减轻。与非预应力钢桁架相比, 索桁架体系内的桁架与张紧的索相连, 不易发生整体失稳, 因而所需桁架的高度较小。在预应力阶段, 桁架受到索向上的作用而受拉; 荷载阶段, 索与桁架共同抵抗荷载作用, 桁架在所分担的部分荷载作用下受压, 其中部分压力与预应力阶段的拉力相抵消。以上说明柔索与刚性桁架相互结合, 互相补充, 可以做到比单一的结构更合理、更经济。

值得一提的是, 预应力钢结构易于大跨轻型屋盖结构的实现, 其下部可采用钢管混凝土柱作为承重结构。钢管混凝土柱因钢管和混凝土两种材料在受力过程中的相互作用而具有很多优点。这种相互作用主要可从以下几方面来理解: 首先, 钢管对混凝土的约束作用使混凝土处于复杂受力状态从而使其强度得以提高, 塑性和韧性性能大为改善; 其次, 混凝土的存在可避免或延缓钢管发生局部屈曲, 从而保证其材料性能的充分发挥; 同时在施工中由外钢管充当混凝土的模板, 加快了施工速度; 此外由于核心混凝土的存在, 钢管混凝土结构与钢结构相比更具有较好的耐火性能等。与混凝土柱相比, 钢管混凝土柱的截面较小, 且与上部

钢屋盖结构的节点连接更为方便。当柱承担的弯矩较大时，还可采用格构式钢管混凝土柱将弯矩转化为对单肢柱的拉压力，从而更好地发挥其承载能力，且格构柱也具有较大的刚度。

24.2 建模分析

24.2.1 工程概况

该工程为一单层运动中心项目，跨度为 148m，长度方向为 234m，室内净高为 26m。外观为仿古建筑。结构柱采用三肢格构钢管混凝土柱。屋盖结构考虑到建筑的要求，选择了前述的拉索预应力钢桁架、斜拉钢桁架和索托钢桁架三种预应力钢结构进行比较选型。

一般情况下，确定索的形状问题分为三类：初始几何参量为已知量，预应力分布为未知量；初始几何参量为未知量，预应力分布为已知量；初始几何参量和预应力分布均为未知量。本工程索的几何形状，即高跨比和垂度已经有了明确的要求。为保证结构方案的可比性，应使计算分析基于相同几何形状、相同的荷载、相同的结构刚度（跨中挠度为 $l/350$ ，柱顶水平位移为 $h/450$ ，其中 l 和 h 分别为桁架和柱的计算跨度和长度）、较相同的杆件应力比，并且采用相同的计算方法。因此下文的计算即为采用相同的计算方法，调整索的预拉力和杆件截面尺寸，使结构具有相近的刚度，从而比较三种结构形式的受力性能。

24.2.2 计算模型

采用 SAP2000 计算该工程，采用框架单元模拟钢桁架和钢管混凝土柱，采用索单元模拟索。材料参数见表 24-1。计算中对索单元采用降温法施加索的预拉力并形成结构刚度。

材料参数表 表 24-1

| 材 料 | 重 量 密 度 | 弹 性 模 量 | 泊 松 比 | 线膨胀系数 |
|-----|-----------------------|--------------------------|-------|-----------------------|
| 钢 | 78.5kN/m ³ | 2.06×10 ⁵ MPa | 0.3 | 1.17×10 ⁻⁵ |
| 索 | 78.5kN/m ³ | 1.91×10 ⁵ MPa | 0.3 | 1.17×10 ⁻⁵ |
| 混凝土 | 25.5kN/m ³ | 0.35×10 ⁵ MPa | 0.2 | 0.99×10 ⁻⁵ |

SAP2000 几何非线性选项包括如下内容。

- (1) 无 按结构的未变形形状考虑所有的平衡方程。
- (2) $P-\Delta$ 平衡方程中部分地考虑了结构的变形形状。拉力倾向于抵抗单元的转动并使结构变刚，压力倾向于提供单元的转动并使结构失稳。可能需要一定数量的迭代。
- (3) $P-\Delta$ 和大位移 所有的变形方程都是按照结构变形形状建立的。可能需要大量的迭代。尽管模拟的是大位移和大转动效应，但所有的应变仍假定为小值。

其中，大位移分析用于发生明显变形的索结构，以及屈曲分析，尤其是对于瞬间屈曲和屈曲后行为。索（由框架单元模拟）和其他承受明显的单元内相对旋转的单元应该划分为小的单元以满足单元内应力和应变为小值的要求。对于大多数其他结构， $P-\Delta$ 选项是足够的，

尤其是材料非线性起控制作用时。本文的结构分析中比较了线性分析与采用非线性分析工况考虑 $P-\Delta$ 效应的计算差别。

钢管混凝土格构柱的三角形边长为 2m 和 2.5m，钢桁架端部高 3m，跨中高 8m。由于屋盖钢结构跨度大，自重较轻，对风的作用非常敏感，设计结构的刚度应充分考虑风振的影响，使结构在各种可能的荷载作用下，保证索的动力性能良好，索不会退出工作，具有有效恒定的刚度，并应使其固有频率偏离北京本地的风频率，避免结构发生共振效应。索采用《斜拉桥热挤聚乙稀高强钢丝拉索技术条件》(GB/T 18365—2001) 标准。

建筑结构的安全等级为二级，使用年限为 50 年，重要性系数为 1.0。

计算荷载：屋面恒载 0.5kN/m^2 ，活载 0.5kN/m^2 ；基本风压 0.45kN/m^2 （风振系数 1.2），基本雪压和风压均为 0.40kN/m^2 ；抗震设防烈度为 8 度，设计基本地震加速度值为 $0.2g$ （ g 为重力加速度）、设计地震分组为第一组、场地土类别为 III 类；由于维护结构采用陶粒空心砖自承重，结构抗震计算时尚须在两侧柱顶附加 20000kg 的质量点。柱距确定为 18m（中间 9m 处设抗风柱）。

荷载组合：考虑荷载组合对结构的不利影响，取以下基本荷载组合，如表 24-2～表 24-4 所示。表中活荷载和雪荷载取较大值计算。在选型分析中主要通过表 24-3 中的组合 1 和组合 2 考察结构的刚度。

承载力极限状态荷载组合 表 24-2

| 序 号 | 组 合 | 恒 载 | 活（雪）载 | 负风压 | 正风压 | 升温 | 降温 |
|-----|-----------|------|-----------------|-----------------|-----------------|-----|-----|
| 1 | 恒+活（雪） | 1.35 | 0.7×1.4 | | | | |
| 2 | 恒+活（雪） | 1.2 | 1.4 | | | | |
| 3 | 恒+风上 | 1.0 | | 1.4 | | | |
| 4 | 恒+活（雪）+风下 | 1.2 | 0.7×1.4 | | 1.4 | | |
| 5 | 恒+活（雪）+风下 | 1.2 | 1.4 | | 0.6×1.4 | | |
| 6 | 恒+升温 | 1.0 | | | | 1.4 | |
| 7 | 恒+降温 | 1.2 | | | | | 1.4 |
| 8 | 恒+活（雪）+降温 | 1.2 | 0.7×1.4 | | | 1.4 | |
| 9 | 恒+风上+升温 | 1.0 | | 0.6×1.4 | | 1.4 | |

地震参与的荷载组合 表 24-3

| 序 号 | 组 合 | 恒载 | 活（雪）载 | X 向地震 | Y 向地震 | Z 向地震 |
|-----|-----------|-----|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 南北向地震作用 | 1.2 | 0.6 | 1.3 | | |
| 2 | 东西向地震作用 | 1.2 | 0.6 | | 1.3 | |
| 3 | 竖向地震作用 | 1.2 | 0.6 | | | -1.3 |
| 4 | 南北、竖向地震作用 | 1.2 | 0.6 | 1.3 | | -0.5 |
| 5 | 东西、竖向地震作用 | 1.2 | 0.6 | | 1.3 | -0.5 |

正常使用极限状态荷载组合

表 24-4

| | 组 合 | 恒载 | 活(雪)载 | 负风压 | 正风压 | 升温 | 降温 |
|---|--------|-----|-------|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 恒+活(雪) | 1.0 | 1.0 | | | | |
| 2 | 恒+负风压 | 1.0 | | 1.0 | | | |
| 3 | 恒+正风压 | 1.0 | | | 1.0 | | |
| 4 | 恒+升温 | 1.0 | | | | 1.0 | |
| 5 | 恒+降温 | 1.0 | | | | | 1.0 |

方案 1: 拉索预应力钢桁架结构

在空间钢桁架的下弦内(或体外)放置钢缆索(或钢绞线),预先施加拉力实现预应力。计算模型见图 24-2。用迭代法或直接假定索的初始拉力试算得到拉索的初始拉力为 $2 \times 2700\text{kN}$ 。杆件计算分析结果见表 24-5。桁架跨中挠度为 -415mm ($l/357$) 和 58mm ,柱顶位移为 42mm ($h/714$)。

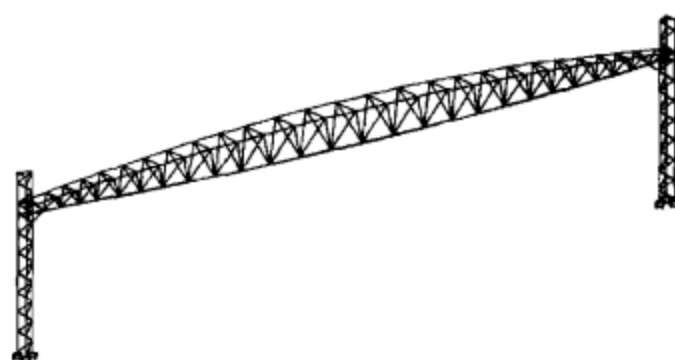


图 24-2 拉索预应力钢桁架结构

钢管混凝土格构柱+拉索预应力钢桁架分析结果

表 24-5

| 构件类别 | 构件名称 | 规格 | 应力比 | 备注 |
|--------|------|--------------------------------|-------|-----------------------------|
| 钢管混凝土柱 | 外侧柱 | $\Phi 400 \times 8$ (C50 混凝土) | 0.591 | Q345B 焊管 |
| | 内侧柱 | $\Phi 700 \times 10$ (C50 混凝土) | 0.502 | Q345B 焊管 |
| | 斜腹杆 | $\Phi 299 \times 12$ | 0.639 | Q345B 焊管 |
| | | $\Phi 245 \times 7$ | 0.346 | |
| 空间桁架 | 上弦杆 | $\Phi 402 \times 16$ | 0.796 | Q345B 焊管 |
| | | $\Phi 351 \times 16$ | 0.816 | |
| | 下弦杆 | $\Phi 450 \times 20$ | 1.000 | Q345B 焊管 |
| | | $\Phi 426 \times 16$ | 0.989 | |
| | | $\Phi 402 \times 16$ | 0.556 | |
| | 腹杆 | $\Phi 299 \times 12$ | 0.675 | Q345B 焊管 |
| | | $\Phi 245 \times 7$ | 0.839 | |
| | | $\Phi 194 \times 6$ | 0.540 | |
| 缆索 | | $\Phi 5 \times 265$ | 0.400 | $\sigma_b = 1670\text{MPa}$ |

建模分析要点

(1) 索单元与框架单元的节点关系

结构中,索与桁架下弦基本处于相同的空间位置上。在模型中可以使相应的索单元与框架单元具有相同的空间位置,节点重合。其节点束缚的定义可参考下例:

例:图 24-3 中的 1 杆和 2 杆是刚性连接,3 杆和 4 杆也是刚性连接,定义 A 点的约束。

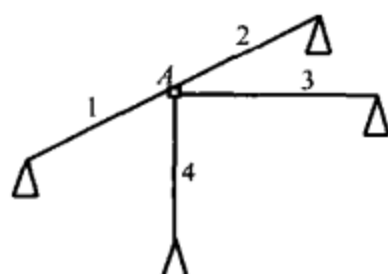


图 24-3 A 节点的约束定义

步骤：

①选择 A 节点>【编辑】>【断开连接】，这样 A 节点变成 4 个节点；

②分别选择属于 1、2 和 3、4 的 2 个节点，合并点。此处选择重合在一起的 4 个节点可以先查看杆件的节点标签号，再用>【选择】>【标签】命令选择；

③选择上步得到的 2 个节点（分别属于 1~2 杆件、3~4 杆件），>【指定】>【节点】>【束缚】，类型选 **Body** 或 **Equal** 都可以，如果觉得在束缚节点时整体坐标轴不合适，可以选 **Local** 类型，勾选上要束缚的自由度。本例中只需释放一个转动自由度。

若认为上述步骤实施较烦琐，可在建模时将索单元与框架单元间保留微小间距，则施加节点束缚就容易得多了。本文即是如此，设置的约束为 **Local** 类型，如图 24-4。其中对于框架单元和索单元，默认局部坐标系的 1 轴方向为沿杆件的方向。

（2）桁架与钢管混凝土柱连接节点的定义

根据节点的连接情况，释放部分杆件端部的弯矩，如图 24-5 所示。

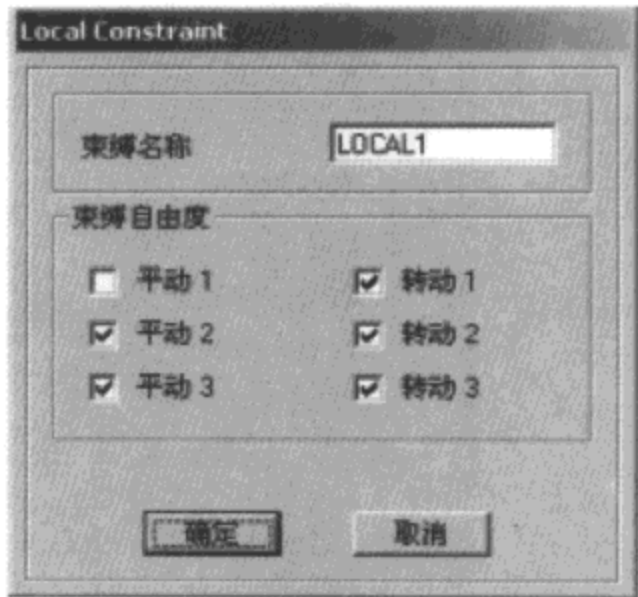


图 24-4 节点束缚定义

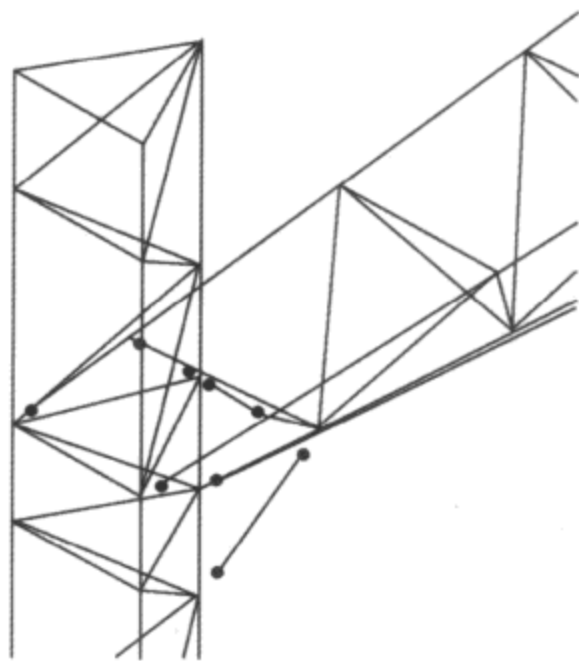


图 24-5 节点束缚定义

（3）关于钢管混凝土

SAP2000 中可以通过截面设计器（SD）来定义钢管混凝土截面。这种钢与混凝土组合截面构件在计算中将等代为单一材料构件，即钢构件或混凝土构件。等代原则是按照刚度相等的原则分别折算等代构件的截面积和惯性矩，在属性数据中可以看到等代构件的截面参数，如图 24-6。在 SAP2000 中，钢管混凝土构件等代为钢构件或混凝土构件计算，其计算结果的差别不大，但软件在统计用钢量和混凝土用量时，把钢管混凝土作为等代的钢或

混凝土构件统计，造成了统计量的不真实，在目前的版本中此问题尚未解决，应予以注意。SAP2000 中暂未提供可用于钢管混凝土构件设计的规程，因此需要配合一定的手算工作。

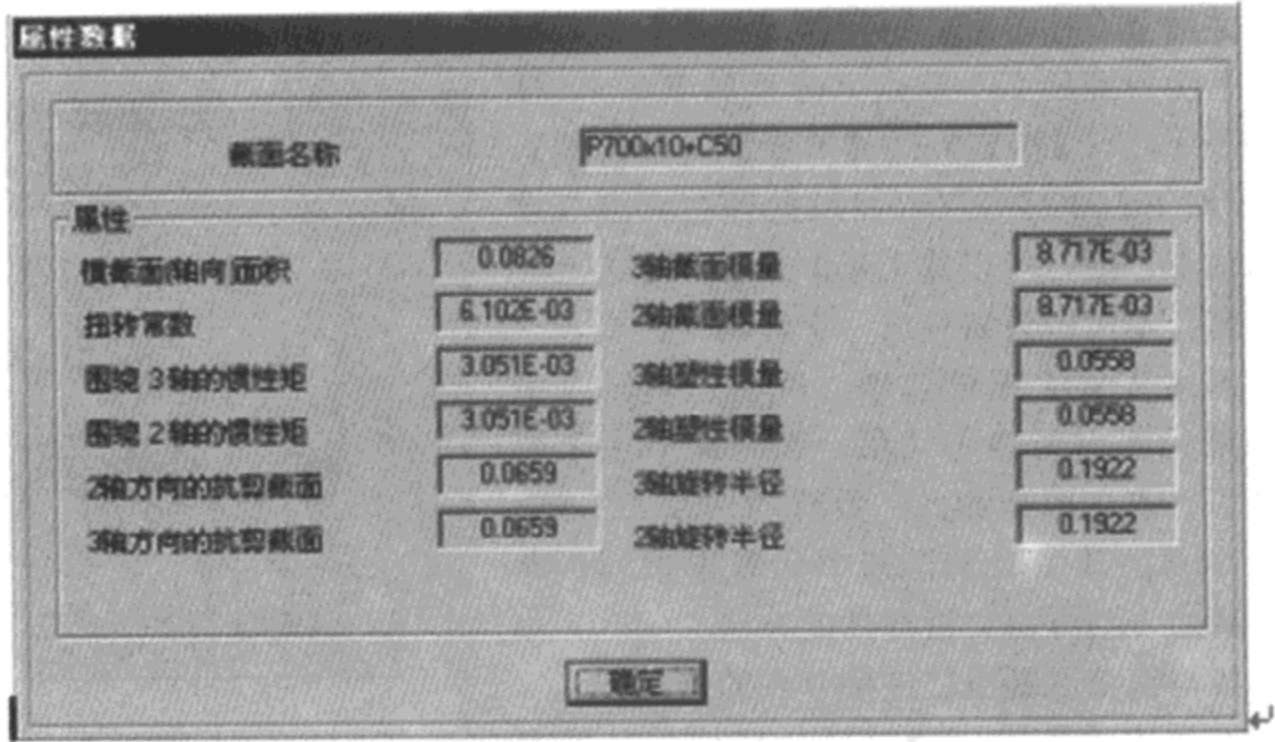


图 24-6 钢管混凝土等代构件属性数据

(4) 线性分析与考虑 $P-\Delta$ 效应的几何非线性分析

对于本例，采用三种计算方法进行计算，见表 24-6。可见由于考虑 $P-\Delta$ 效应，计算结果会有差别，但差别并不大。为计算方便，对此类结构采用线性计算可以满足工程需要。需要指出的是，索在单一荷载工况作用下（例如负风压）可能出现失效的情况，则结构的刚度矩阵变化，线性分析中的叠加原理不再适用，因此若采用线性分析，则需要采取措施克服这种结构刚度变化的影响。可以预先对荷载进行组合形成若干荷载工况后进行计算，不允许索在荷载预组合工况下出现失效，这样就解决了结构刚度变化无法进行荷载效应组合的问题。若允许索在特定荷载预组合工况下出现失效，因线性计算中索单元为等价桁架单元，计算中将失效索模拟为受压杆，不符合索的真实受力，可将模型中的失效索去掉，即索单元变为零刚度，重新生成刚度矩阵进行计算。

计 算 结 果 比 较

表 24-6

| 计 算 方 法 | 恒载与预拉力的施加 | 跨 中 挠 度 | | 柱顶位移 |
|--------------------------|-----------|---------|----|------|
| | | | | |
| 线性分析 | 同时 | 415 | 58 | 42 |
| 考虑 $P-\Delta$ 效应的几何非线性分析 | 先恒载后预拉力 | 417 | 56 | 42 |
| 考虑 $P-\Delta$ 效应的几何非线性分析 | 同时 | 416 | 57 | 42 |

方案 2：斜拉钢桁架结构

工程的建筑要求限制了柱伸出屋面的高度，将斜拉索自柱顶拉向空间钢桁架的下弦以尽

量得到较好的拉索角度，计算模型见图 24-7。同样采用迭代法或直接假定索的初始拉力进行试算，得到索的初始预拉力值为 2300kN。杆件计算分析结果见表 24-7。桁架跨中挠度为 -422mm ($l/351$) 和 65mm，柱顶位移 58mm ($h/517$)。

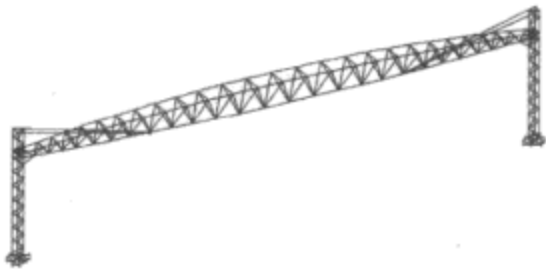


图 24-7 斜拉钢桁架结构

钢管混凝土格构柱+斜拉钢桁架分析结果 表 24-7

| 构件类别 | 构件名称 | 规格 | 应力比 | 备注 |
|--------|------|-------------------|-------|---------------------------|
| 钢管混凝土柱 | 外侧柱 | Φ600×12 (C50 混凝土) | 0.767 | Q345B 焊管 |
| | 内侧柱 | Φ800×10 (C50 混凝土) | 0.764 | Q345B 焊管 |
| | 斜腹杆 | Φ400×20 | 0.768 | Q345B 焊管 |
| | | Φ351×14 | 0.800 | Q345B 焊管 |
| | | Φ245×8 | 0.770 | Q345B 焊管 |
| 空间桁架 | 上弦杆 | Φ351×14 | 0.755 | Q345B 焊管 |
| | 下弦杆 | Φ351×16 | 0.886 | Q345B 焊管 |
| | 腹杆 | Φ245×8 | 0.505 | Q345B 焊管 |
| | | Φ194×6 | 0.826 | Q345B 焊管 |
| 缆索 | | Φ5×223 | 0.370 | $\sigma_b=1670\text{MPa}$ |

建模分析要点

(1) 吊点的定义

对两个吊点分别定义节点束缚，如图 24-8 所示，也可在建模时将索与桁架下弦在吊点处共用一个节点，等同于刚接。

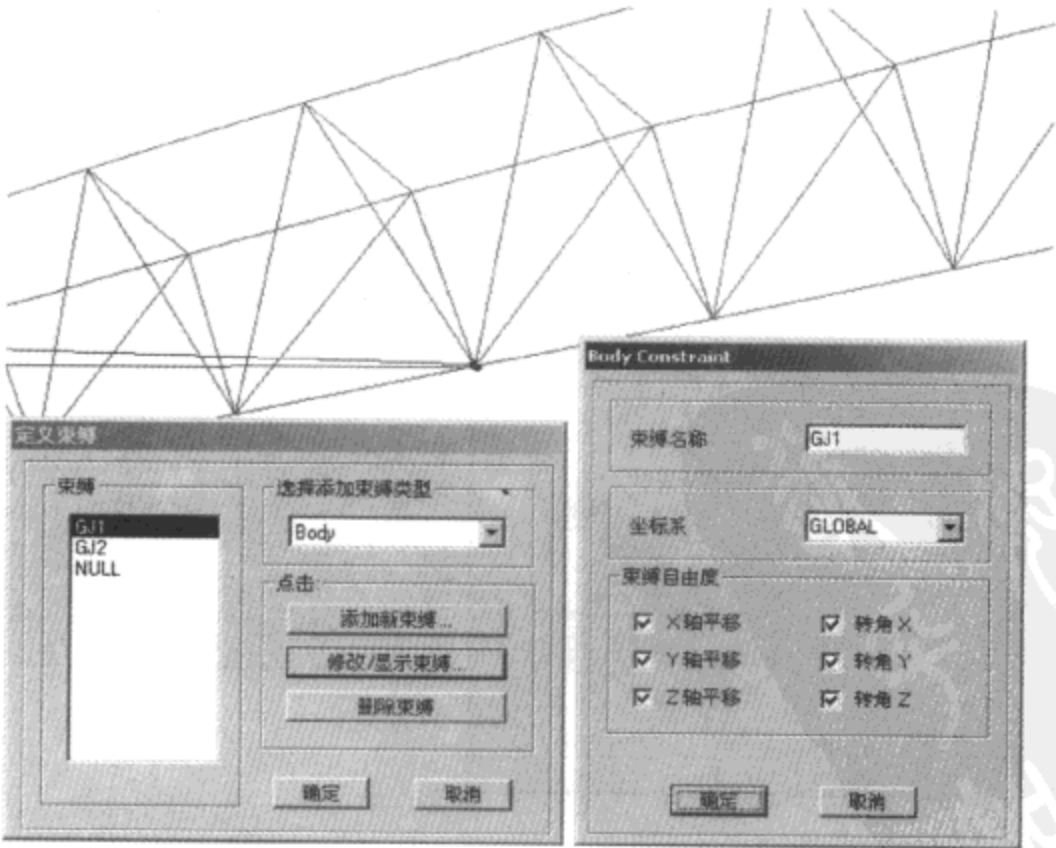


图 24-8 吊点节点束缚定义

(2) 其他要点信息同方案 1。

方案 3：索托钢桁架结构

在桁架下弦设 4 个托点，计算模型见图 24-9。计算得到缆索预拉力为 1300kN。杆件计算分析结果见表 24-8。桁架跨中挠度为 -412mm ($l/359$) 和 124mm，柱顶位移为 60mm ($h/500$)。

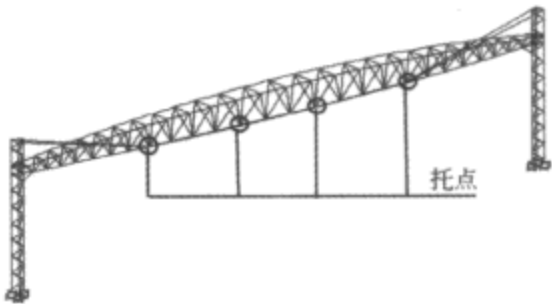


图 24-9 索托钢桁架结构

钢管混凝土格构柱+索托钢桁架结构分析结果 表 24-8

| 构件类别 | 构件名称 | 规格 | 应力比 | 备注 |
|--------|------|-------------------|-------|---------------------------|
| 钢管混凝土柱 | 外侧柱 | Φ500×12 (C50 混凝土) | 0.763 | Q345B 焊管 |
| | 内侧柱 | Φ800×10 (C50 混凝土) | 0.743 | Q345B 焊管 |
| | 斜腹杆 | Φ351×14 | 0.745 | Q345B 焊管 |
| | | Φ273×6.5 | 0.901 | Q345B 焊管 |
| | | Φ245×6.5 | 0.782 | Q345B 焊管 |
| 空间桁架 | 上弦杆 | Φ351×14 | 0.803 | Q345B 焊管 |
| | 下弦杆 | Φ351×16 | 0.809 | Q345B 焊管 |
| | | Φ299×9 | 0.700 | |
| | 腹杆 | Φ245×6.5 | 0.696 | Q345B 焊管 |
| | | Φ194×6 | 0.725 | |
| 缆索 | | Φ5×199 | 0.314 | $\sigma_b=1670\text{MPa}$ |

建模分析要点

(1) 托点的定义

对四个托点分别定义束缚，如图 24-10 所示，即仅允许索与桁架下弦沿 x 向相对滑移。

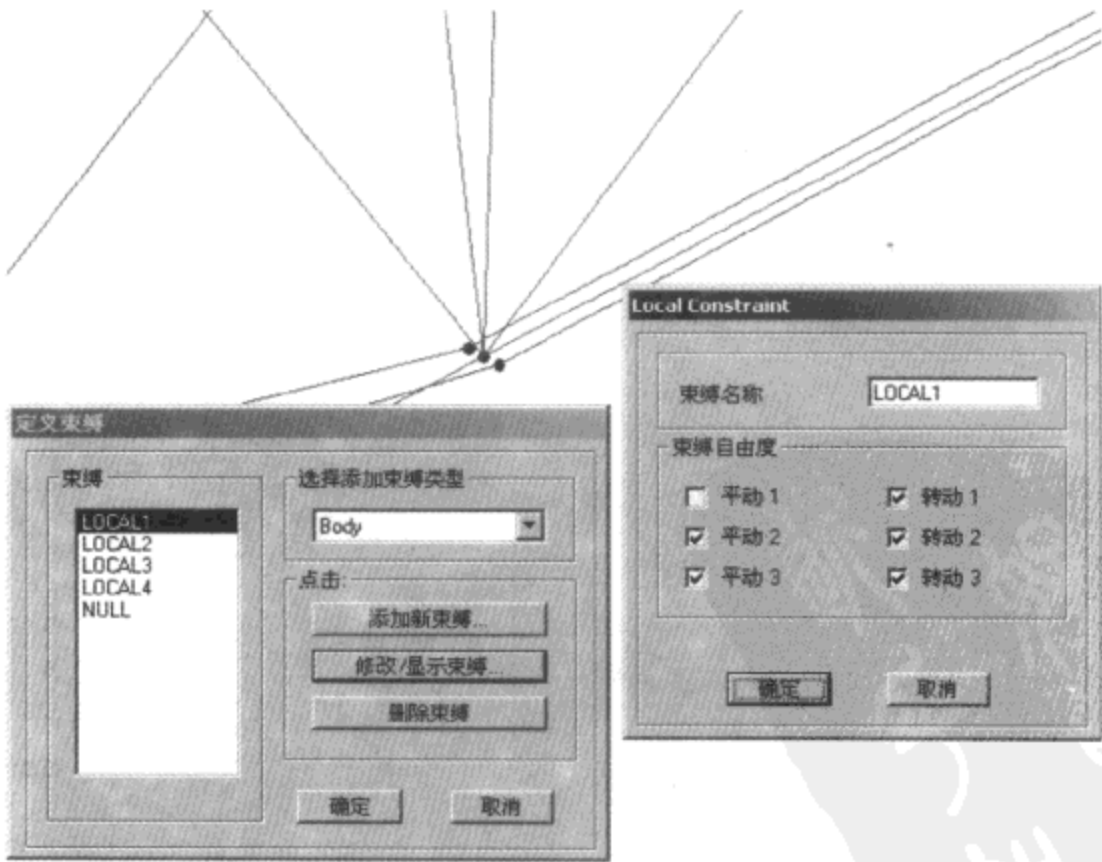


图 24-10 托点节点束缚定义

(2) 其他要点信息同方案 1。

24.3 结果分析

三种结构的自振振型相似，图 24-11 以索托钢桁架结构为例，给出了其前三阶振型，表 24-9 中列出了结构的自振周期。从结构振型模态和周期可见，三种预应力钢结构均可以较好地满足结构要求。表 24-9 还归纳了三种结构的单榀用钢量和优缺点，其中钢管混凝土格构柱+索托钢桁架结构的用钢量最少。

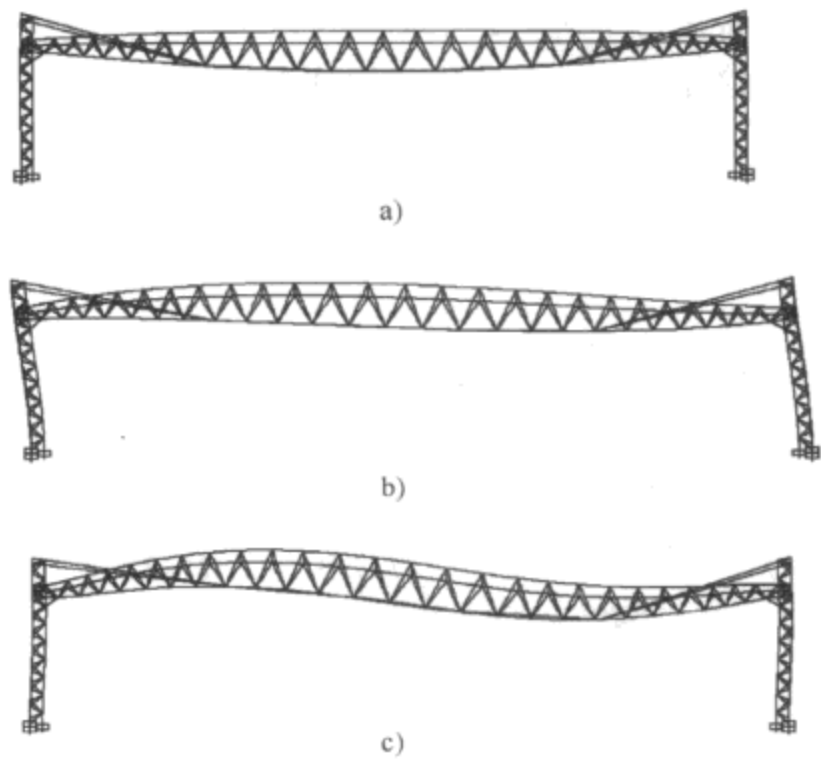


图 24-11 结构自振模态

a) 第一振型（上下振动、一个半波）；b) 第二振型（水平振动、一个半波）；c) 第三振型（水平振动、两个半波）

结构方案比较 表 24-9

| 结 构 形 式 | 用钢量 (kg/m ²) | 自振模态 (s) | | 备 注 |
|-----------------------|--------------------------|---------------------|-------|---|
| 钢管混凝土格构柱 +拉索预应力钢桁架 | 51.9 (单榀) | 第一振型 (上下振动、一个半波) | 1.104 | 结构刚度较好，用钢量较省， 索预拉力对柱影响较小。 索直径大，施工难度大，对 索张拉的控制要求较高 |
| | | 第二振型 (水平振动、一个半波) | 1.074 | |
| | | 第三振型 (水平振动、两个半波) | 0.423 | |
| 钢管混凝土格构柱 +斜拉钢桁架 | 57.0 (单榀) | 第一振型 (上下振动、一个半波) | 1.049 | 结构刚度良好，施工技术成 熟，索用量较少，用钢量较合 理。 索预拉力对柱产生的水平力 大，索直径较大，施工不便 |
| | | 第二振型 (水平振动、一个半波) | 0.950 | |
| | | 第三振型 (水平振动、两个半波) | 0.410 | |

续上表

| 结 构 形 式 | 用钢量 (kg/m ²) | 自振模态 (s) | | 备 注 |
|--------------------|--------------------------|---------------------|-------|--|
| 钢管混凝土格构柱 +索托钢桁架 | 51.3 (单榀) | 第一振型 (上下振动、一个半波) | 1.089 | 结构刚度良好, 索用量少, 用钢量最省。 索预拉力对柱产生的水平力 较大, 对柱的刚度要求较高 |
| | | 第二振型 (水平振动、一个半波) | 1.025 | |
| | | 第三振型 (水平振动、两个半波) | 0.502 | |

本文通过单榀结构分析进行了初步的结构选型, 进一步的分析工作需要建立完整的结构模型, 合理地布置结构支撑体系, 进行结构整体分析。从本文的分析可以得到以下结论:

- (1) 在大跨度结构中, 选择合适的预应力钢结构形式, 通过合理的预应力施加、支撑布置等, 可以使大跨度的空间结构依然具有较好的整体刚度, 且用钢量较省;
- (2) 索托结构是斜拉结构的改进, 提高了索的效率, 减小了锚具用量, 降低了对塔高的要求, 结构更趋合理;
- (3) 在索托结构中, 适当提高索的应力比, 可以较为充分地利用索的承载力, 并且符合建筑的视觉要求 (索的应力比过小, 索体在正常荷载作用下会弯曲)。在结构抗弯性能得到改善的同时, 尽量减小索的拉力, 索体可实现自锚;
- (4) 预应力钢结构体系中, 由于预应力的存在, 一般会增大柱的压力 (如前文所述的斜拉桁架结构和索托结构), 选用钢管混凝土柱可以充分发挥其优良的抗压性能, 又能使结构具有较好的延性。

第25章

复杂高层钢结构分析

25.1 概述

随着计算机的不断发展,采用有限元理论进行结构分析已成为目前最通用而且精度较高的一种方法,有限元的基本思想是将一个复杂的结构整体离散成很多结构小单元,这些单元可以归并为少数几种标准单元,只要建立这几种标准单元的分析方法,即可对各小单元进行分析,然后对复杂结构的全部单元的分析进行集成,就可以得到整体结构的分析结果。

目前,在高层建筑设计中,大都采用三维空间有限元软件进行计算分析,这样可以很好的体现整体空间作用。对于复杂的建筑结构力学模型来说,梁、柱和支撑等构件的力学特征十分明确,因此这些也是较为容易模拟和得到满意精度的单元形式,但是对于剪力墙和核心筒,由于墙肢形状非常复杂,再加上开洞位置的影响,其内力分析变得非常复杂,目前国内较为通用的计算软件解决剪力墙的问题通常建立在三种力学模型的基础上:薄壁杆件模型、墙板模型和墙元模型。SAP2000 是集成环境下基于空间有限元的结构分析与设计程序,因为强大的分析功能、设计功能及结果的可靠性而用于世界上主要的复杂标志性建筑。

25.2 复杂高层结构分析的基本内容

在建立合理的力学计算模型的基础上,复杂高层结构需要重点分析的内容包括结构的模态分析以准确评估结构本身的动力特性;结构在竖向荷载、风荷载以及地震荷载作用下的内力和变形,重要复杂构件的应力分析;考虑分阶段施工过程的内力、变形分析;以及高烈度地震区必要的静力弹塑性或者动力弹塑性分析等。

25.2.1 模态分析

模态分析用于确定结构的振型,通过这些振型我们可以了解结构本身的动力性能,从而判断所分析结构的合理性,而且它还是反应谱分析和模态时程分析中振型分解组合的基础。

模态分析与结构本身的刚度和质量有关，结构的刚度通常与结构的材料、形式、布置等有关关系；结构的质量通常采用等效质量的方式来考虑，我国的结构荷载规范对结构动力分析中的等效质量有专门的规定。对于复杂高层结构来说，结构的抗扭性能是一个重点考虑的方面，而这种抗扭性能就可以通过模态分析的数据来做评价。SAP2000 提供了两种模态分析的方法：特征向量法和 Ritz 向量法。特征向量法是基于自由振动的振型和频率进行求解，忽视荷载的空间分布；Ritz 向量法是与荷载相关的，考虑了动力荷载的空间分布，能得到更精确的结果，更适用于大型的结构系统。两种方法的详细阐述见本书分析功能部分。

25.2.2 竖向荷载

结构承受的竖向荷载通常就是结构的静荷载和活荷载，荷载取值的规定见结构荷载规范，特殊情况需要酌情采用。对于普通的高层结构来说，通常静荷载比活荷载大得多，因而活荷载的考虑相对简单，而对于复杂的高层建筑则还需要对以下两个方面做细致分析。

(1) 活荷载的不利布置：大部分的通用结构分析程序通常无法考虑活荷载的不利布置，所以在计算时选择静荷载和活荷载均为满跨布置。计算分析表明，对于跨度较大的框架结构以及带有较大悬挑部分的结构，活荷载的布置情况对结构的内力产生很大的影响，所以在这些情况下就需要考虑活荷载的不利布置。采用 SAP2000 程序分析复杂高层结构的时候通常的做法是：当活荷载所占比重较小时，采用适当加大框架梁在均布活荷载作用下的内力值的办法来简化考虑；当活荷载所占比重较大时，则需要分别对多种活荷载情况进行计算分析。

(2) 阶段施工分析：在进行高层建筑结构计算的时候，如果将所有的竖向荷载一次性施加到计算模型上，由于各种竖向构件轴压变形量的不同，在水平构件中引起弯矩和剪力。层数越高，这种效应就越大。在建筑的顶层，梁端弯矩有可能改变符号，甚至出现中柱受拉的情况。可见这样的内力计算结果显然是不真实的，其原因是在计算时未考虑到结构施工的实际情况。在实际工程中，竖向构件的变形总是在施工过程中逐渐完成的。例如当施工到某一层的时，其下结构竖向构件已经完成了大部分的竖向变形，只有当层数继续增加，进行围护结构以及装修施工时才可能引起该层竖向构件压缩变形量的不同，并在该层产生附加内力。即使出现了竖向变形的压缩量差异，在施工的过程中也可以采取措施矫正。因而对于复杂高层建筑结构来说考虑分阶段施工分析是必要的。

SAP2000 中阶段施工过程基于非线性静力分析，可以考虑结构的添加和拆除、荷载的施加和去除以及材料随时间变化的收缩徐变效应，它是一种真正体现阶段施工的非线性加卸载及结构组成部分变化的非线性分析过程。在施工过程各阶段分析中总刚度矩阵及荷载向量均随过程变化，与简单的通过分部施加荷载及修正某些构件刚度的近似方法相比较能更准确的模拟施工过程。阶段施工包括荷载及结构变化两种非线性过程，静力叠加原理在这里并不适用，因为分析结果与施工步骤相关，不能采用基于线性分析的阶段施工模拟。关于阶段施工加载的介绍见本书高级分析功能部分。

25.2.3 风荷载

对于高层建筑来说，侧向荷载是非常重要的，我们通常认为建筑物在风荷载的作用下，其迎风面将承受风压力，背风面则承受风吸力。随着建筑层数的增加，风荷载的影响不断加

大，而对于超高层钢结构来说，风荷载对于构件截面和结构的水平位移往往起到了很大的控制作用。在风荷载的作用下，高层建筑会产生顺风向和横风向的振动，对于复杂结构来说，有时候垂直于风荷载作用方向的振动甚至是最剧烈的。风荷载作用的具体取值可以依据荷载规范、《高层建筑混凝土结构技术规程》、《高层民用建筑钢结构技术规程》中的具体规定采用。

虽然风荷载在建筑表面的分布不均匀，但是在结构整体分析计算的时候，为了简单，对普通的高层建筑，迎风面和背风面可以统一地取一个平均的体型系数；而对于复杂的高层建筑则需要做风洞试验来确定建筑物的实际体型系数。

SAP2000 提供了两种计算风荷载的方法，可以给不同的风荷载作用面指定不同的体型风压系数，按规范的相关公式进行计算；也可以通过刚性隔板范围和给定的体型系数来计算。具体的操作方法见本书建模功能部分。

25.2.4 地震作用

地震对建筑物造成的破坏是巨大的。当地震发生的时候，地面产生剧烈的运动，在建筑物中引起惯性力，地震烈度越高，这种惯性力就越大。地震作用的大小还与建筑物的质量和刚度有关，在相同的场地条件下，建筑的总质量越大，地震作用也越大；结构的侧向刚度越大、自振周期越短，地震作用也越大。所以合理的抗震设计成为我们结构工程师需要把握的主要矛盾。

我国的抗震设计规范中采用了“小震不坏，中震可修，大震不倒”的三水准设防指导思想和两阶段的抗震设计方法。两阶段具体指第一阶段为多遇地震作用下的弹性分析，验算构件的承载力、稳定性及结构的层间位移；第二阶段为罕遇地震作用下的弹塑性分析，验算结构的层间位移与结构延性。对于复杂的高层结构来说，第一阶段常用的抗震设计方法有：振型分解反应谱法和弹性时程分析法；第二阶段结构已经进入弹塑性阶段，因此常用的是弹塑性时程分析与静力弹塑性分析方法，以找出结构的薄弱环节，采用合适的抗震构造措施，防止由于局部形成破坏而引起结构的倒塌。

SAP2000 提供了功能全面的地震分析方法，既可以采用常用的底部剪力法和振型分解反应谱法，也可以实现弹性时程分析、弹塑性时程分析以及静力弹塑性 Pushover 分析。相关内容在本书的分析功能和高级分析功能部分均有介绍。

25.2.5 温度应力

对于现代的高层钢结构建筑来说，建筑的内部空间温度变化较小，而建筑的外部则有较大的温差变化，特别是对于某些暴露于室外的结构构件，比如边柱等，随着季节和昼夜气温的变化，边柱将产生轴向的伸长和缩短，于是建筑物的外面和室内的竖向构件之间将会出现竖向的位移差，层数越高，结构形式越复杂，这种变形量就越不可忽略。由于通常的框架梁、柱之间都采用刚接形式，因而温差引起的变形就会产生内力。我们可以采用弹性分析的方法来计算由于温度变化而引起结构内力变化的效应。在 SAP2000 中，可以对框架、壳面、实体施加温度荷载，分析温度变化对结构的影响。

25.2.6 侧向位移限值

高层建筑在风荷载和地震荷载作用下产生了侧向位移，如果出现较大的摆动和扭转，将

会对人体产生很大的影响,使人感觉不舒适。为了保证高层建筑在风力作用下能够提供一个良好的工作和居住环境,需要对平行于风荷载作用方向和垂直于风荷载作用方向的振动最大加速度加以限制,具体限值可以参考《高层建筑混凝土结构技术规程》4.6.6的规定。

高层建筑结构在风荷载和地震作用时必须有足够的侧向刚度,这就要求结构设计时对其侧向位移值应加以限制。侧向位移限值通常有整体相对位移和层间相对角位移两种,其中层间角位移主要是针对高层建筑侧向刚度在竖向的规则性进行限制。SAP2000 可以输出详细的位移结果,其中可以借助广义位移来查看相对位移的大小,具体操作见本书“结果与输出”一章。

25.2.7 结构稳定

对于高层混凝土建筑,结构构件的稳定性通常比较好;对于高层钢结构建筑,需要通过控制受压构件的长细比及板材的宽厚比、高厚比等参数来保证结构构件的整体稳定和局部稳定。从宏观角度上来说,整个结构的稳定性是一个不可忽略的重要方面。

随着建筑层数的增加、高宽比的增加和结构布置复杂程度的提高,当结构在风荷载作用下产生水平位移的时候, $P-\Delta$ 效应造成的附加弯矩和附加位移所占的比重也逐渐加大,此时如果忽略整体结构二阶效应的影响,很可能造成一些构件的实际负担内力超过其设计承载力,从而造成结构的破坏。《高层建筑混凝土结构技术规程》5.4 对结构的重力二阶效应做了专门的规定。

在 SAP2000 中, $P-\Delta$ 效应属于几何非线性问题。只要在分析工况中进行了相应的指定,程序可通过修正结构的几何刚度来考虑 $P-\Delta$ 效应的影响。详细说明见本书分析功能部分。

25.3 复杂高层钢结构有限元分析的关键问题

本节主要结合 SAP2000 和我国设计规范讨论复杂高层有限元分析过程中的一些关键问题,涉及有限元模型的合理建立、特殊单元选取和简化的原则、结构分析的计算方法及分析参数的正确设置等。

25.3.1 建立合理的计算模型

(1) 楼板

在高层钢结构中,大部分的楼板做法都是用圆头焊钉将压型钢板固定于钢梁的上翼缘,把压型钢板作为施工模板,现浇混凝土后形成钢筋混凝土组合楼板体系。

与高层钢筋混凝土结构类似,高层钢结构的组合楼板通常在其自身平面内的刚度很大,因而在进行结构整体计算的时候也引入了“楼板在平面内刚度无穷大,在平面外刚度为零”的假定。在 SAP2000 中可采用隔板束缚 (Diaphragm Constraint) 的方式来实现这个假定。但是对于复杂的高层钢结构来说,因为大支撑的跨层,楼板大开洞,建筑平面不规则,结构错层等情况,使得采用刚性楼板假定将导致内力计算产生较大的误差。所以建立力学模型的时候,要考虑楼板的实际刚度。在 SAP2000 中通常采用壳元来模拟楼板,壳元是由只具有平面刚度的膜单元和只具有弯曲刚度的板单元组成。因此需要根据实际情况考虑组合楼板的

各向差异性、折算厚度以及混凝土开裂等因素,对实际楼板厚度做适当的折减。

(2) 楼板与梁的共同工作

当进行结构弹性分析时,宜考虑现浇钢筋混凝土楼板与钢梁的共同工作,且在设计中应使楼板与钢梁间有可靠连接。当进行结构弹塑性分析时,可不考虑楼板与梁的共同工作。

由于楼板与钢梁通过抗剪栓钉紧密的连接在一起,形成钢筋混凝土-钢组合梁,所以在进行结构整体计算时应该考虑现浇钢筋混凝土楼板与钢梁的共同工作对结构刚度的影响。梁的惯性矩对两侧有楼板的梁宜取 $1.5I_b$,对仅一侧有楼板的梁宜取 $1.2I_b$, I_b 为钢梁惯性矩。所以使用 SAP2000 程序进行有限元分析的时候,应该保证板单元的边界与梁单元在受力和位移上的协调。通常是采用四边形壳单元来模拟楼板,根据结构分析的要求,在每个梁单元围成的封闭区域内布置,遇到剪力墙围成的区域也是同理,可以采用边束缚 (Edge Constraint) 的方法实现边界位移的协调。

(3) 梁、柱、墙单元

在 SAP2000 程序中,对梁和柱单元统一采用框架 (frame) 单元,框架单元可以考虑杆件的弯曲变形、剪切变形以及轴向变形。因此要满足正常条件下梁、柱的受力和变形情况,对于复杂的结构来说根据情况,梁、柱的偏心布置不可忽略。某些需要特殊考虑的梁,如连梁、转换梁等,根据具体情况建议采用壳单元来模拟。

剪力墙与弹性楼板采用的单元类型一致,通常使用薄壳单元,它可以同时考虑面内和面外刚度。在使用薄壳墙单元的时候,根据有限元分析的要求,要保证墙和楼板在交界处变形和受力的协调,所以同样需要引入边束缚的概念,这样可以大大减小单元划分的难度。

注意: SAP2000 中梁、柱、墙单元的属性 (刚度和容重等) 可以根据规范的要求进行相应的调整,如连梁、框架梁刚度等。

(4) 梁柱节点域的考虑

对于高层钢结构建筑,框架梁柱节点域的剪切变形对结构侧移的影响比重有时甚至可以超过 $10\% \sim 20\%$ 。节点域剪切变形对结构水平位移的影响主要取决于梁的抗弯刚度、节点域剪切刚度、梁腹板高度以及梁柱的刚度比。SAP2000 程序中采用刚域系数的概念来考虑节点域对结构整体侧移分析的影响。梁柱节点域剪切变形对结构内力的影响比较小,一般在 10% 以内且通常不需要再对内力进行修正。分析结果还表明,对于带支撑的框架结构,梁柱节点域剪切变形将随着支撑体系侧向刚度的增加而迅速减小。

(5) 柱间支撑与耗能梁段

在高层钢结构设计中,柱间支撑斜杆的两端应为刚性连接,但在结构整体计算时可按两端铰接计算,其端部连接的刚度可以通过支撑杆件的计算长度加以考虑。

偏心支撑的耗能段在大震时将首先屈服,由于受力性能不同,在建模时应将耗能梁段作为独立的单元考虑。在 SAP2000 中可以用非线性连接单元来模拟。

(6) 非结构构件

在高层建筑中存在着诸如围护结构、内隔墙等大量的非结构构件。由于在整体计算模型中通常只考虑非结构构件的荷载效应而不计入其对结构刚度的影响,所以计算所得的周期往往比实际结构的周期长。为了比较准确地计算实际结构在地震作用下的效应,应对主体结构计算所得的周期乘以考虑非结构构件影响的修正系数。《高层民用建筑钢结构技术规程》建

议修正系数采用 0.9, 设计人员可以根据主体结构的形式与采用非结构构件的具体情况对其加以调整。在 SAP2000 的地震分析工况中, 填入相应的周期折减系数即可。

25.3.2 结构分析工况中需注意的问题

(1) 模态分析

在 SAP2000 程序中, 进行结构模态分析的时候, 要将结构的等效质量集中到各个节点上, 如果结构质量来源的设定不正确, 就会造成模态分析结果的误差和反应谱计算的不准确。关于质量来源三种方式的详细叙述详见第 12 章, 这里推荐的做法是采用第二种即“来自荷载”的方式, 具体做法是在材料属性里正确定义材料的容重, 恒载工况中指定自重乘数为 1, 即程序自动计算结构自重, 然后定义其他荷载。需要注意的是对于采用了面单元的楼板, 输入楼面荷载时无需再考虑楼板自重, 若习惯于输入楼面荷载时计入楼板自重, 可以将面单元属性中的容重设置为零, 避免楼板自重的二次计算。关于各荷载系数的取值可以参考抗震规范第 5.1.3 条的规定。

SAP2000 中模态分析的类型包括特征值法和 Ritz 向量法两种, 其中特征值法最为常用, 但是 Ritz 向量法可以考虑激励荷载的空间分布状况, 因而通常可以在较少的振型数下即可得到很大的振型质量参与系数, 设计师可以根据实际工程的情况合理选用分析类型。

(2) 地震作用

《高层民用建筑钢结构技术规程》第 4.3.1 条规定, 高层钢结构建筑抗震设计时, 第一阶段设计应按多遇地震计算地震作用, 第二阶段设计应按罕遇地震计算地震作用。

第一阶段主要采用底部剪力法、振型分解反应谱法和弹性时程分析法进行抗震设计, 对于复杂的高层钢结构来说, 底部剪力法主要应用于考虑竖向地震作用的情况, 程序中即定义类型为 **QUAKE** 荷载工况 (Z 方向); 振型分解反应谱法的相关参数设置, 可以按照规范的要求, 在定义反应谱函数和反应谱分析工况时设定具体的数值; 弹性时程分析分为振型分解的时程分析与直接积分的时程分析两种, 第一种基于模态分析的结果, 计算比较快; 第二种则是常规的时程分析, 应用比较广泛, 具体介绍详见第 13 章。弹性时程分析关键的问题在于地震波的选用和结构阻尼的定义, 如工程上常用的瑞利阻尼。

第二阶段抗震设计主要是弹塑性时程分析和静力弹塑性分析, 主要的作用是找出结构在罕遇地震作用时的薄弱环节, 进而采取适当的构造措施或者重新设计结构保证结构的大震不倒。其中静力弹塑性分析方法对于复杂高层钢结构建筑的适用性还有待进一步研究, 目前常用的是弹塑性时程分析方法。在分析过程上它与弹性时程分析最大的区别就在于构件非线性属性的定义和滞回模型的确定, 在 SAP2000 中可以应用于弹塑性时程分析的材料非线性属性包括: 框架的单拉/压, 索单元的单拉, 框架单元的塑性铰和各种非线性连接单元。

(3) 阶段施工分析

本章第 25.2.2 节提到了阶段施工分析对于复杂高层结构分析的重要性, SAP2000 可以对分阶段施工做线性和非线性分析。这里主要涉及 SAP2000 中非线性阶段施工分析工况的合理设置。

根据结构分析的需要, 通常的阶段施工分析不需要考虑结构整体弹塑性, 而主要考虑的是特殊连接构件, 混凝土收缩徐变、钢筋松弛等与时间相关的属性, 以及结构的几何非线性

性,其中关键的部分是混凝土收缩徐变参数的合理定义,SAP2000中的这部分是基于欧洲CEB—FIP 90 规范的规定来定义的,涉及到的参数主要是CEB—FIP 系数、相对湿度、名义尺寸、收缩系数、收缩开始时间等。CEB—FIP 系数主要是根据水泥种类来定义的,普通和快硬水泥可以取 0.25,而快硬高强水泥则取 0.20;相对湿度根据环境类别取 40%~100%;名义尺寸是一个与环境类别、混凝土截面面积和混凝土与空气接触面积比值有关系的量;收缩系数也取决于水泥的种类,普通和快硬水泥取 5,快硬高强水泥取 8;收缩开始时间根据实际情况来定。

非线性阶段施工工况分析的参数主要包括定义阶段数、阶段施工操作(添加结构,施工荷载,拆除结构)、非线性参数等。定义阶段数通常是根椐施工作业段的实际情况划分的,在模型中注意先将每一阶段的结构部分以及每个阶段的不同构件部分归入不同的“组”,SAP2000 通过“组”的方式来实现施工阶段数据的定义。阶段施工操作中添加结构之后也要相应地添加该操作所增加的荷载和施工中的荷载,而拆除结构则自动将自重卸载了。非线性参数主要包括要考虑的材料非线性和几何非线性的内容,以及非线性分析参数的设定。根据需要还可以选择不同的计算结果保存方式。

25.4 工程实例

本节以类似中央电视台主楼的复杂高层钢结构分析为例,采用 SAP2000 建立三维结构分析计算模型,以说明复杂高层钢结构分析在 SAP2000 中的实现方式。此模型包含外框筒及有代表性的内部结构。楼板采用薄壳单元来模拟,不考虑刚性隔板限制,支撑则在节点处与柱及梁连接。模型中的楼板会在结构中明显开洞的地方开洞。

25.4.1 结构模型概况

模型类似简化的中央电视台主楼,其中最高点为 234m,建筑面积约 40 万 m^2 ,包括地下室及裙楼。主楼包括两座斜塔、连接两座斜塔顶部的 14 层高悬臂结构,以及 9 层裙楼(底部结构)还有布满整个大楼底部的三层地下室。

结构模型总体情况如图 25-1 所示。

计算模型的详细情况包括以下几个方面。

地下室部分:三层的地下室贯穿整个塔楼、裙楼和基座。地下室的结构体系由钢筋混凝土梁柱以及双向板组成,某些柱内会加型钢。地下室四周的挡土墙上升至不同高度,最高到二层。周围的地下室停车场结构大大超出上部建筑。

外筒体:为了提供结构整体的侧向稳定性,斜塔、悬臂与裙楼四周均分布了多个利用三角形结合形成的钢结构外筒体。其中部分钢结构外筒体表面延续至筒体内部,以加强大楼角部及保持钢结构外筒体作用的连续性。周边筒体由水平边梁、柱及斜支撑组成,形成一个由三角形组成的表面。三角表面里的柱构件在两个平面都倾斜 6° 。柱子是钢柱和型钢混凝土柱。支撑和斜支撑构件尺寸及分布都不统一。支撑排列的密度随着支撑内力和整体建筑美学在三角框筒外表面变化。支撑为钢构件,组合楼面由钢梁支承。外筒体由两层高的三角形模块构成,即每隔两层柱、边梁和支撑便交于一起。连接节点每隔一层出现在“刚性层”楼板

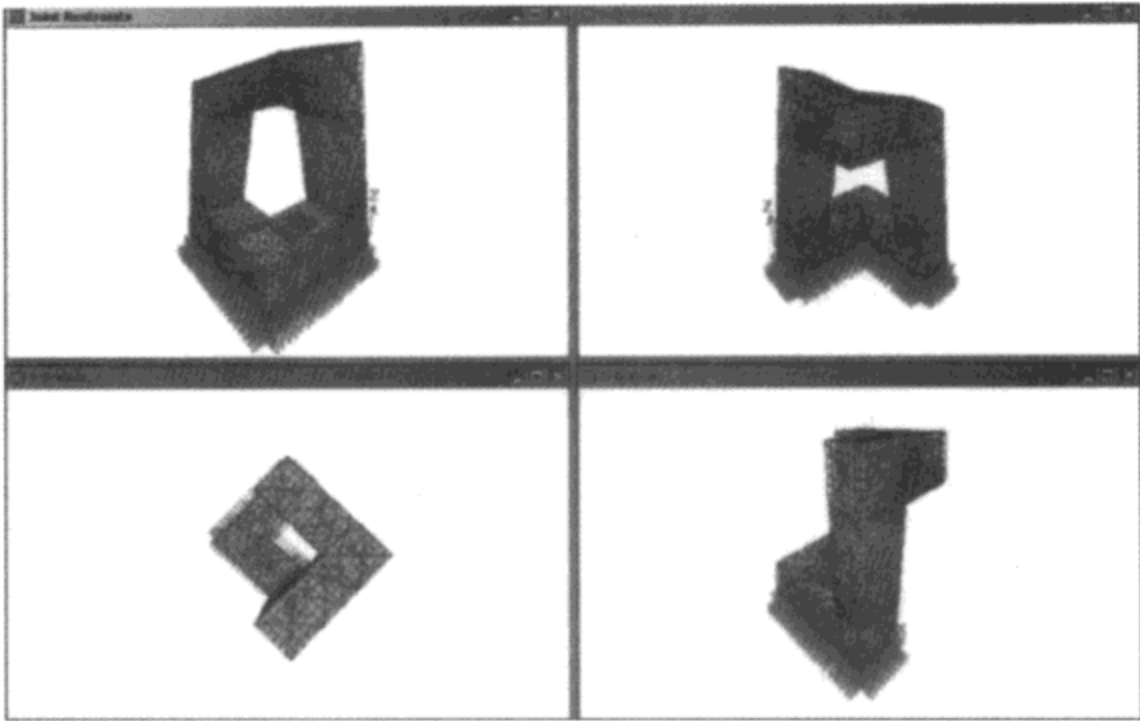


图 25-1 SAP2000 结构计算模型

上。包括塔楼在内，所有核心筒及内柱都是竖直的，他们与外筒体主柱一起作用，为“刚性层”之间的楼板提供稳定性。

塔楼核心筒：塔楼核心筒为钢框架体系，核心筒体横向布置有一定数量的支撑，而纵向就主要依靠弯曲框架的作用。核心筒两个楼层平面之间的侧向约束可以保证两“刚性层”楼板之间楼层的侧向稳定，并将有关荷载传递下去。

其他核心筒：裙楼有许多服务筒体。连接两塔楼的悬臂段有 14 层，里面也有一个服务筒体。这些筒体除了一个是钢筋混凝土结构以外，其他都是钢结构的，有着与上述塔楼核心筒体类似的稳定体系。但是在一层以下钢筒体均转换成混凝土结构，与这些楼层的混凝土体系相一致。

楼板：地下室及首层的楼面，除塔楼处楼面，都是混凝土梁板体系。二层的板，即基座部分的屋顶，也是钢筋混凝土结构的。塔楼楼面，裙楼二层及以上的楼面，以及两塔楼之间的悬臂部分均为钢梁与组合楼板。

内柱：塔楼和悬臂部分塔楼以及悬臂部分的所有内柱都是钢柱。由于塔楼的倾斜，当外部结构因向内倾斜而导致垂直内筒与倾斜外表面之间的跨距缩短时，部分内柱必须在某楼层终止。而与此同时在建筑的另一面，外部结构因向外倾斜使得垂直内筒与倾斜外表面之间的跨距加大时，又需要增加新的柱来保持楼面体系的规则性。因此，这些柱并不是直接下到底部的，而是由转换桁架支承的。基于同样的道理，塔楼和基座内也存在一些吊柱。裙楼的柱有钢筋混凝土柱、钢柱和型钢混凝土柱，首层以上主要是钢柱，而基座的竖向结构系统主要是钢筋混凝土柱和墙。

转换桁架：塔楼内设置了一系列的转换桁架以支承由于垂直内筒与倾斜外表面之间的跨距加大而增加的柱。这些转换桁架将柱的荷载传递到核心筒和外部筒体上，因它通常布置于机电层。两塔楼之间悬臂部分的最低两层也设有转换桁架，悬臂部分的柱荷载通过这些桁架传递至周边筒体。在裙楼处，为了形成演播厅和中央控制区的的开敞空间，同样设有转换桁架

架支承上部楼面的柱。

屋顶：裙楼顶为平屋面，覆盖了裙楼的第9层并与塔楼第10层的楼面相连。这个屋面与建筑顶部的斜屋顶都是周边框筒体系的一部分，为整个建筑提供侧向稳定性。须指出的是倾斜的屋顶在平面上也呈交叉格状，与建筑的立面相似。因此在斜屋面下一层须设置斜的内柱以支撑屋顶的交叉网格。

模型细部情况如图 25-2 所示。

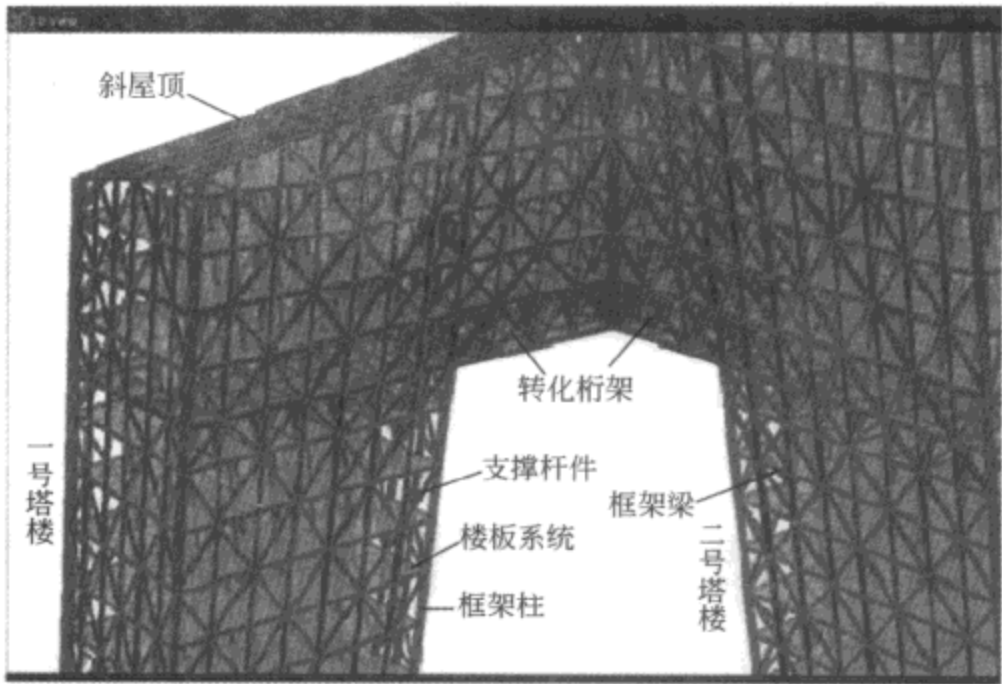


图 25-2 SAP2000 结构计算模型

25.4.2 荷载工况的设置及说明

根据结构分析的需要，本例主要分析结构在恒荷载、活荷载、风荷载、地震荷载作用下结构的反应以及阶段施工过程分析，不考虑温度荷载的影响。

恒荷载、活荷载、风荷载可以参考建筑结构荷载规范及建筑要求。地震作用和调整系数参考抗震设计规范和高层规范的具体规定。根据工程的具体情况 [包括：二类场地，设防烈度为 8 度 (0.20g)]，设计地震分组为一组，结构阻尼比 0.02 来设置反应谱参数和弹性时程分析参数，本例地震分析主要做 X、Y、Z 单向分析，而双向地震分析就体现在荷载组合里。阶段施工荷载根据实际施工技术和条件来确定。荷载工况设置和具体地震分析参数见图 25-3～图 25-6。

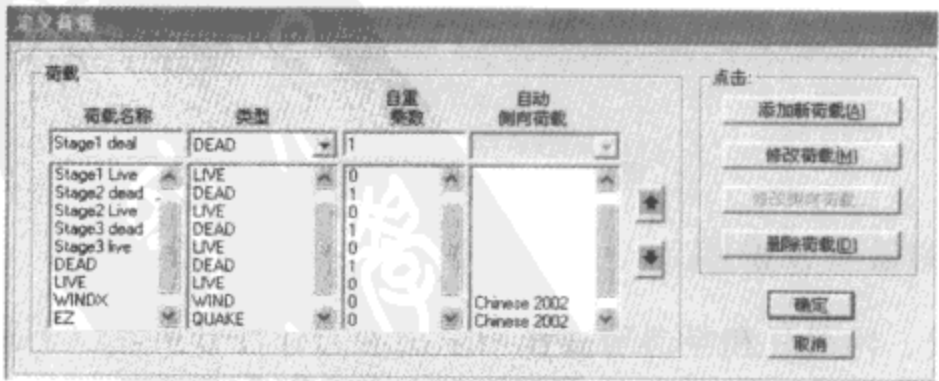


图 25-3 荷载工况的设置

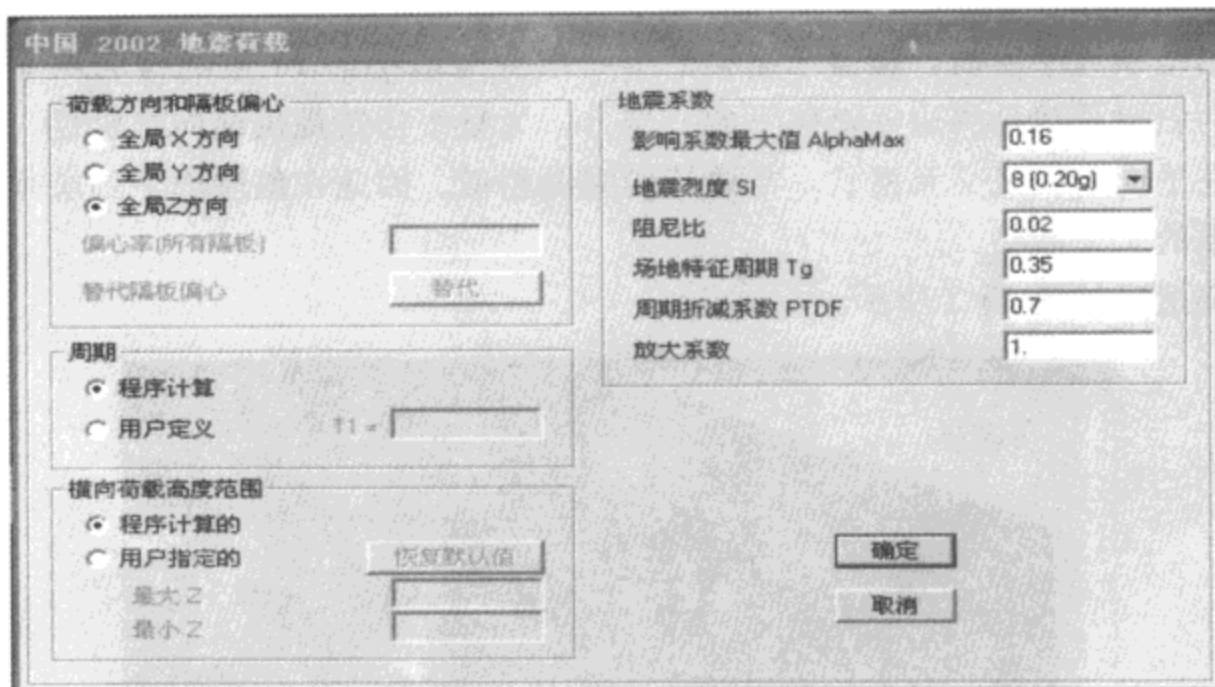


图 25-4 竖向地震作用工况设置

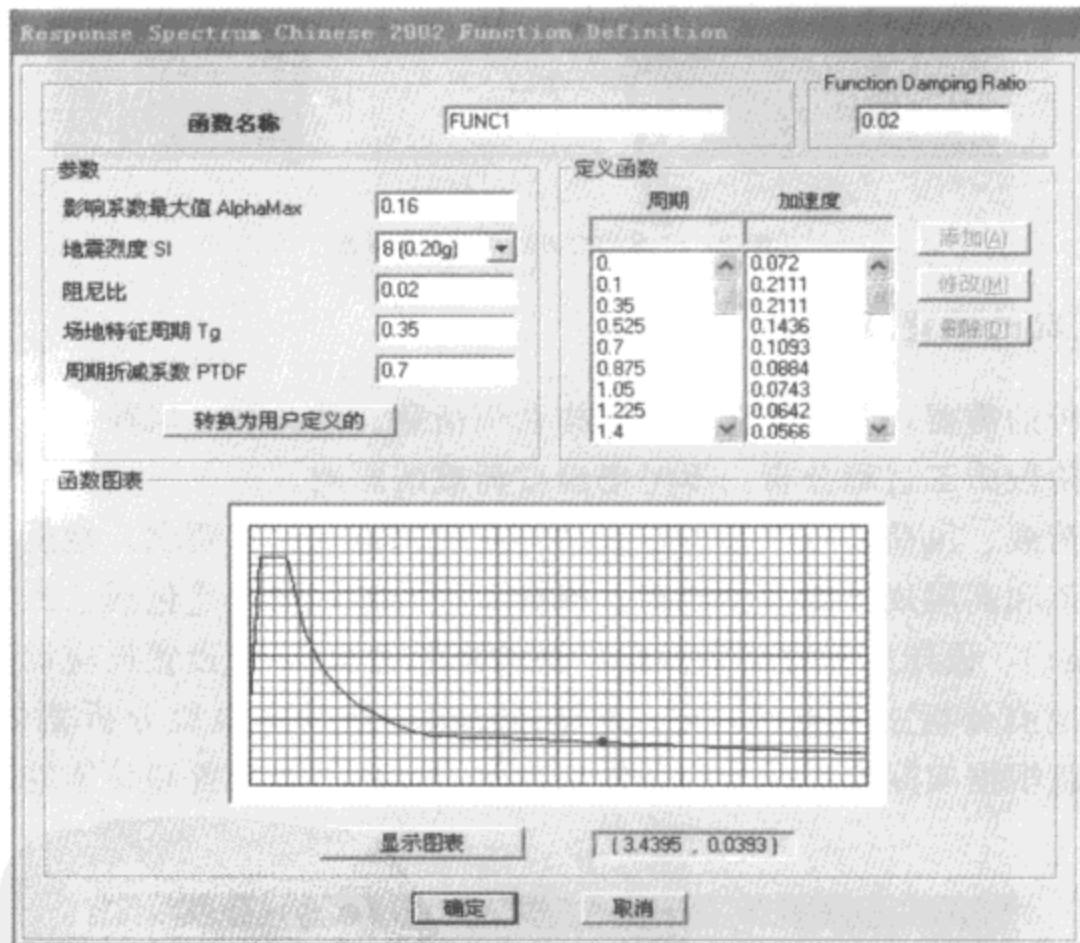


图 25-5 反应谱函数设置

25.4.3 分析工况的设置及说明

恒荷载、活荷载、风荷载和竖向地震作用采用静力弹性分析，以下重点介绍地震分析工况和阶段施工分析工况的设置和说明，总体分析工况的设置见图 25-7。

模态分析采用 RITZ 向量法，其优点是利用较少的振型就可以达到分析所需要的结构振

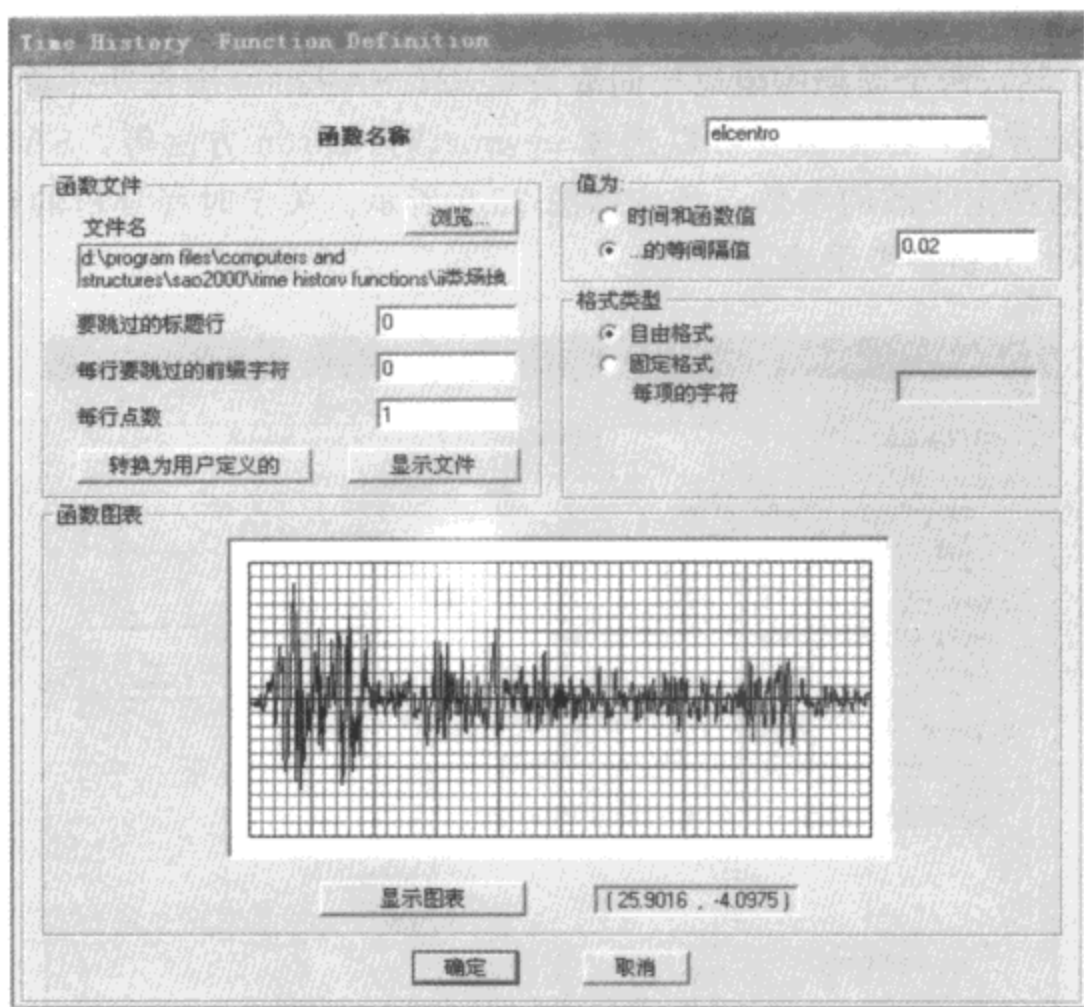


图 25-6 地震波的读取



图 25-7 分析工况

型质量参与系数（水平向大于 90%），本例取 18 个振型进行分析。

复杂高层结构水平地震分析通常采用反应谱法和时程分析方法。在 SAP2000 中反应谱分析工况设置十分简便，本文 X 向的反应谱分析见图 25-8。弹性时程分析又可以选择采用振型叠加和直接积分两种方法，其中振型叠加的时程分析方法更为方便、快速，涉及到的参数也较少，其关键是振型阻尼的设置要正确，通常可以选择所有振型都采用常数阻尼值或者都采用瑞利阻尼形式来表达；直接积分的时程分析方法在计算上不如振型叠加方法快，且涉及的参数也较多。主要参数有：地震波的比例系数，这里的比例系数是重力加速度与地震波峰值调整系数的乘积；时间步数据，主要用于保存计算结果和输出用，输出时段大小乘以输出时段数就等于输入地震波要积分计算的总时间；结构阻尼，通常采用刚度与质量比例阻尼

的形式，如本例选择用周期来指定阻尼，根据实际计算的结果，本例第一周期为 2.89024s；第二周期为 2.3235s，两个周期的阻尼比同取为 0.02，SAP2000 会自动计算质量和刚度部分的系数；时间积分方法，根据需要可以选择 newmark, wilson 方法等，SAP2000 中这些方法默认的参数即为稳定收敛的参数，具体如图 25-9 所示。关于时程分析的理论部分可以参考本书和 SAP2000 分析参考手册。

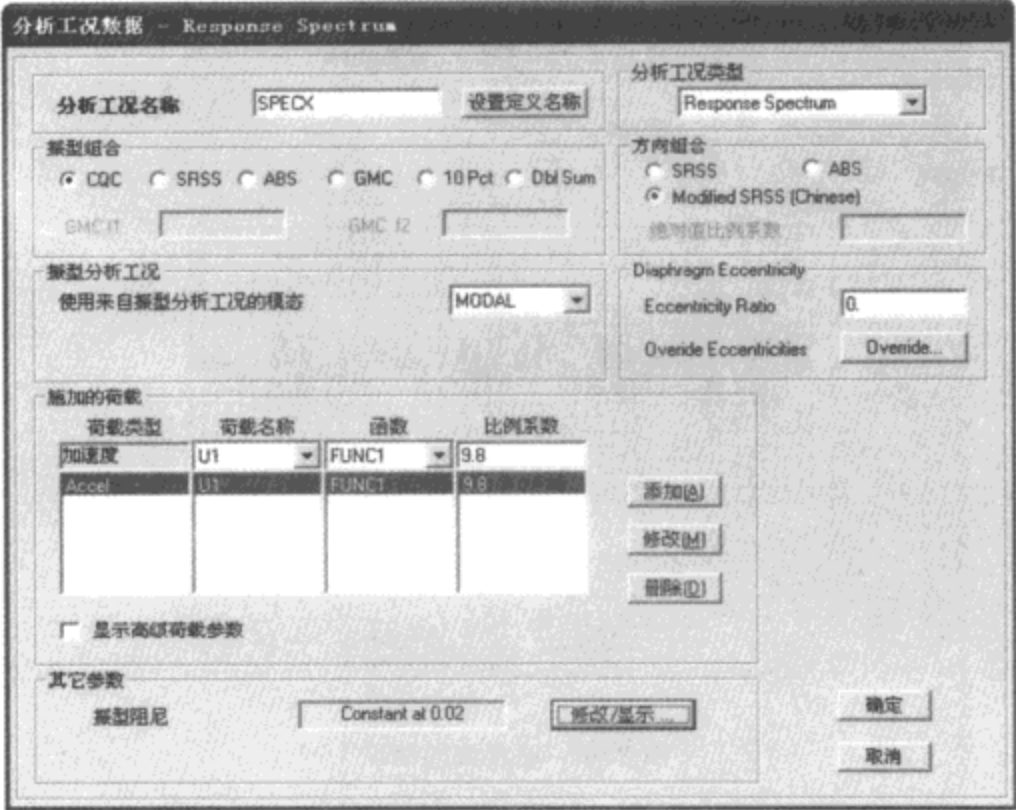


图 25-8 X 向反应谱分析工况

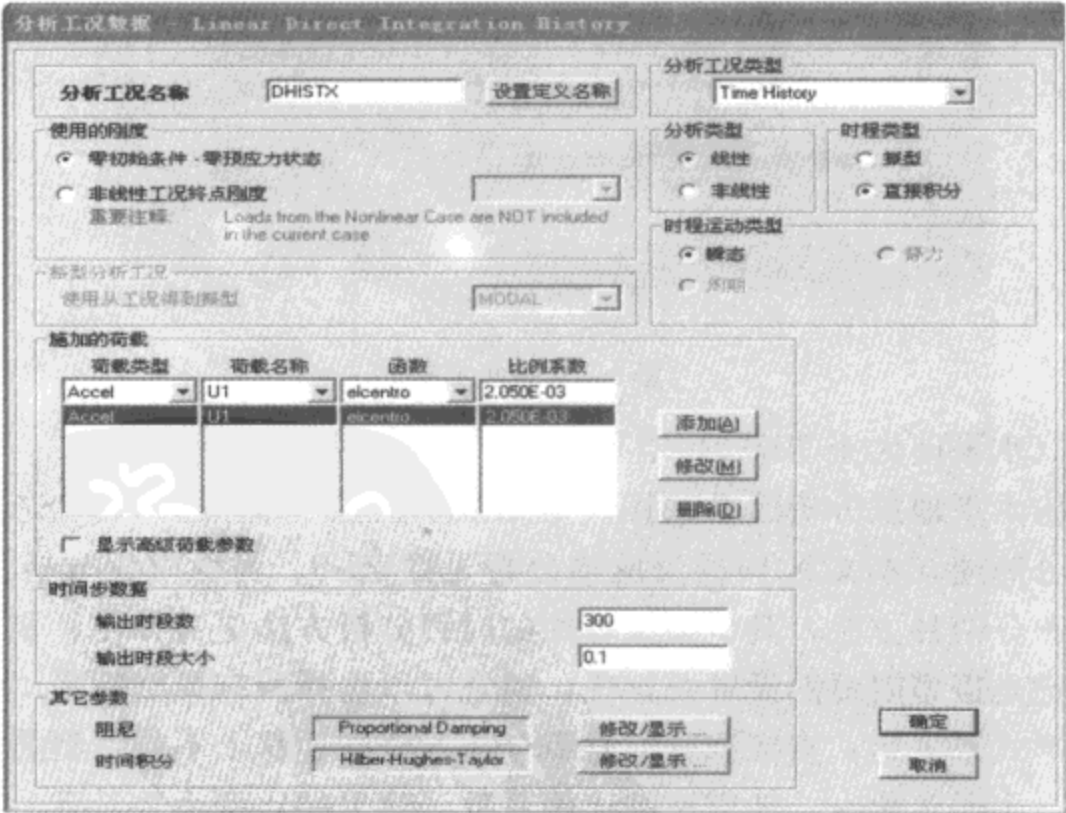


图 25-9 X 向弹性时程分析工况

阶段施工分析：本文将施工阶段简化为三个阶段，第一阶段为群房和双塔建立到悬臂转化处；第二阶段为双塔继续往上直到完成；第三阶段为悬臂施工到完成阶段。模型分组情况详见图 25-10。本文采用非线性施工阶段分析，非线性部分忽略材料的时间效应，仅考虑几何非线性即 $P-\Delta$ 二阶效应。阶段施工分析工况的设置详见图 25-11。

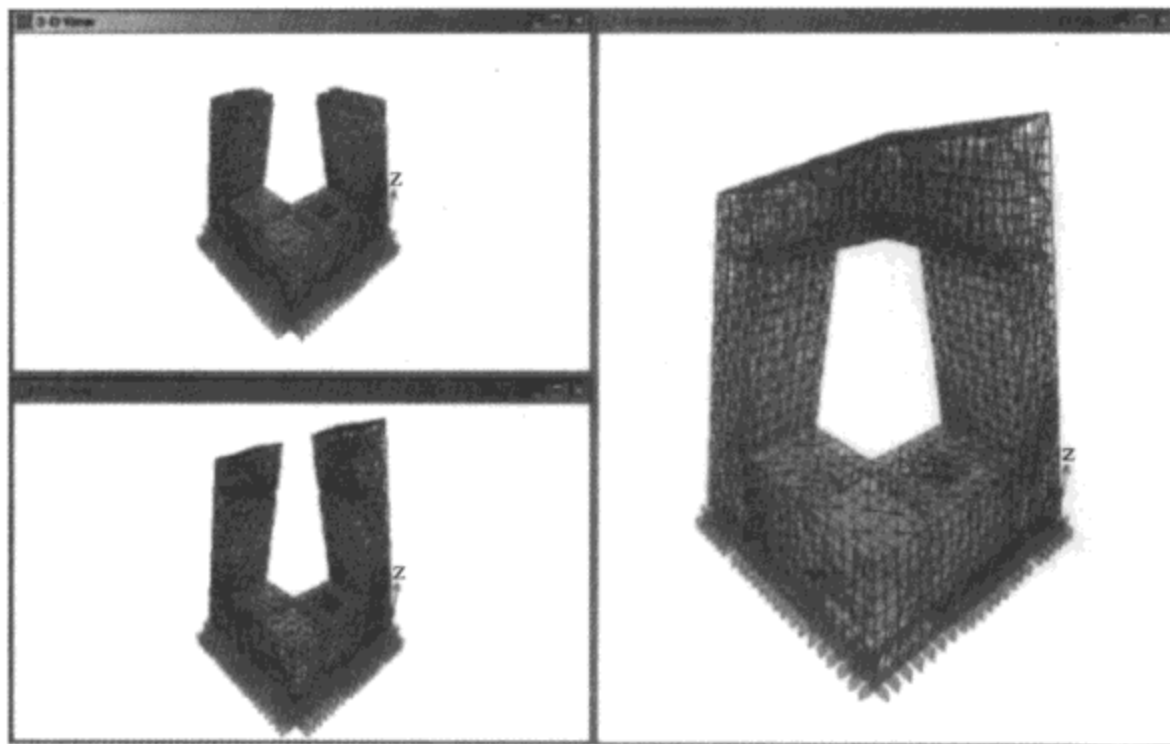


图 25-10 三阶段施工过程

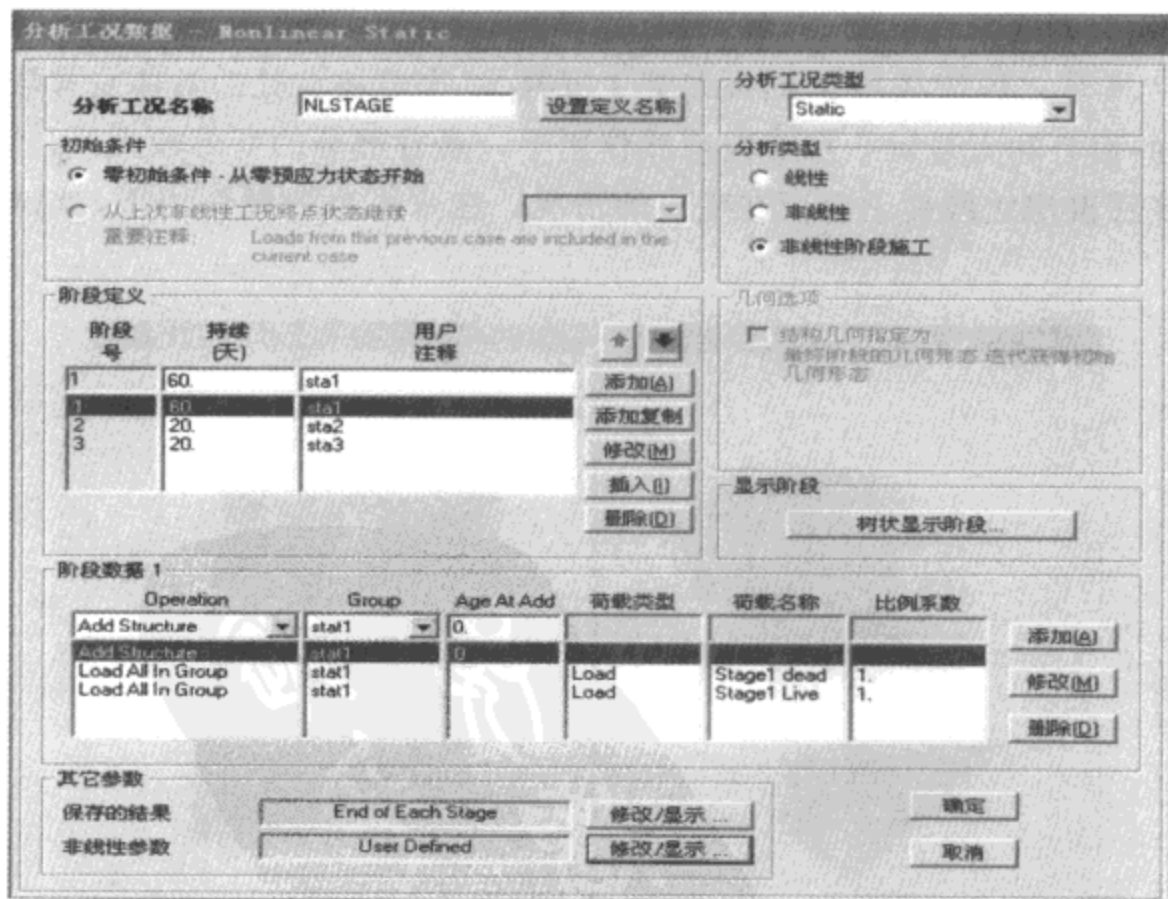


图 25-11 阶段施工分析工况设置

25.4.4 结构分析计算结果

由于整个模型巨大，涉及到的节点和结构单元很多，为了简化分析计算结果，本例选取结构特殊部位的 30 个节点来监控结构的变形，并且只对结构边缘构件的受力特征做介绍性分析，其中 30 个监控节点的布置图和结构边缘构件如图 25-12、图 25-13 所示。

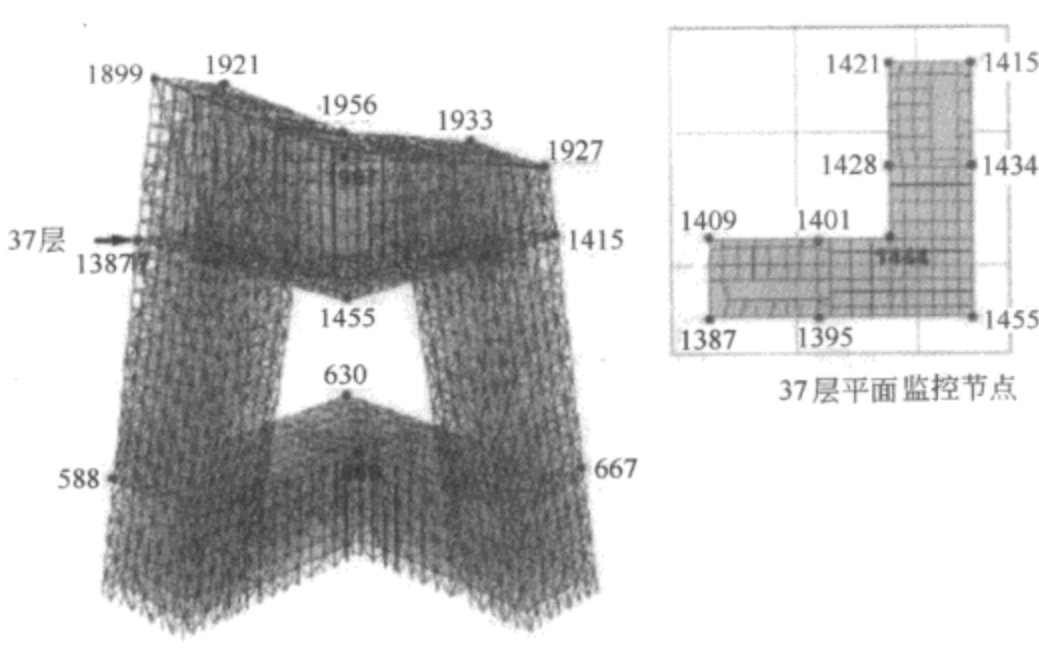


图 25-12 30 个监控节点的布置图

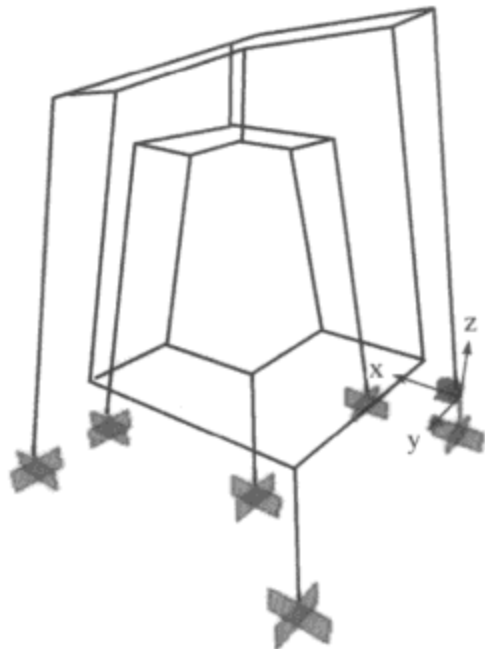


图 25-13 结构的边缘构件

(1) 静力分析

静力分析包括：恒荷载、活荷载、风荷载的计算分析。结构的变形和内力情况可以通过图形查看或者采用表格方式输出，然后根据需要进行整理。其中恒载和 X 向风荷载的结构变形如图 25-14 所示，恒荷载和 X 向风荷载工况在 30 个监控点处的具体变形数值见表 25-1，由于结构本身的偏心和大悬臂，在竖向荷载作用下，悬臂部分的变形较大（最大竖向位移—206mm），且底部群房边缘柱子会存在受拉的情况；在水平风荷载作用下，结构会产生部分的扭转变形。

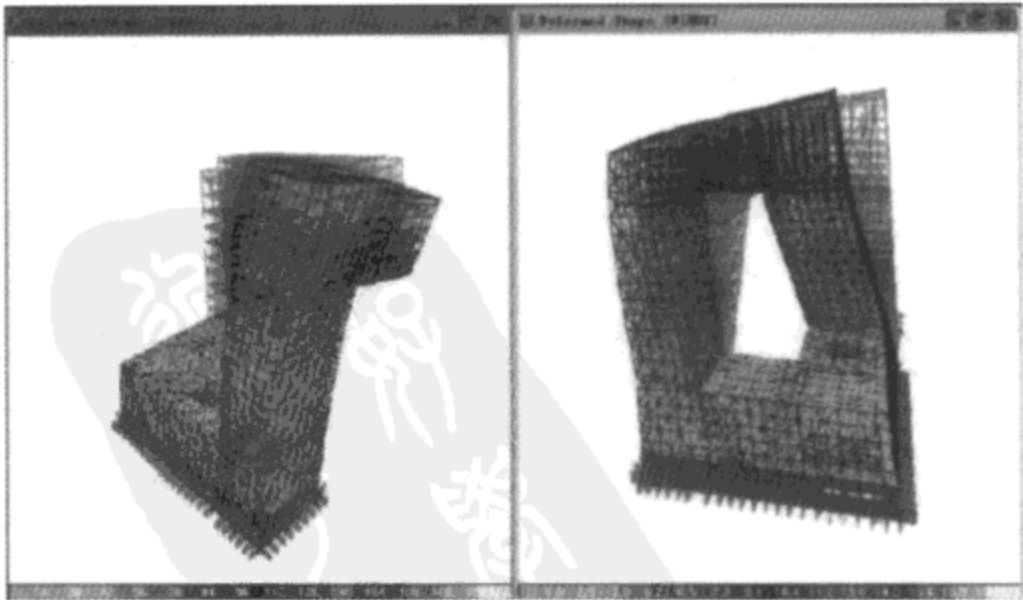


图 25-14 结构在恒载和 X 向风荷载作用下的变形

恒荷载和 X 向风荷载在监控节点处的位移

表 25-1

| 节点编号 | 荷载工况 | X (mm) | Y (mm) | Z (mm) | 荷载工况 | X (mm) | Y (mm) | Z (mm) |
|------|------|---------|---------|----------|-------|--------|----------|--------|
| 588 | DEAD | 12.201 | -4.644 | -4.259 | WINDX | 4.652 | -0.447 | 0.661 |
| 602 | DEAD | 13.664 | -3.452 | -12.584 | WINDX | 4.355 | -0.029 | -0.81 |
| 630 | DEAD | 4.637 | -6.615 | -2.251 | WINDX | 2.455 | -0.703 | 0.017 |
| 652 | DEAD | 4.768 | -7.277 | -9.289 | WINDX | 3.013 | 0.047 | 0.499 |
| 659 | DEAD | 6.249 | -4.073 | -4.186 | WINDX | 3.075 | -0.00172 | -0.186 |
| 667 | DEAD | 4.619 | -5.756 | -6.519 | WINDX | 3.141 | -0.077 | -0.379 |
| 983 | DEAD | 15.297 | -16.155 | -15.13 | WINDX | 10.093 | -1.132 | -0.182 |
| 996 | DEAD | 21.032 | -22.141 | -19.647 | WINDX | 9.709 | -0.861 | 1.355 |
| 1009 | DEAD | 31.956 | -8.624 | -11.83 | WINDX | 10.007 | -0.8 | 0.772 |
| 1023 | DEAD | 36.318 | -11.937 | -27.125 | WINDX | 9.995 | -0.839 | -1.351 |
| 1387 | DEAD | 59.315 | -29.102 | -17.758 | WINDX | 14.776 | -2.033 | 0.36 |
| 1395 | DEAD | 56.725 | -37.75 | -51.665 | WINDX | 14.846 | -2.371 | -2.398 |
| 1401 | DEAD | 61.454 | -36.462 | -36.515 | WINDX | 15.079 | -2.356 | -1.266 |
| 1409 | DEAD | 64.642 | -28.972 | -5.094 | WINDX | 14.992 | -2.052 | 1.205 |
| 1415 | DEAD | 43.554 | -33.128 | -17.604 | WINDX | 15.764 | -2.763 | 0.623 |
| 1421 | DEAD | 42.551 | -40.993 | -2.929 | WINDX | 15.718 | -2.348 | 2.833 |
| 1428 | DEAD | 53.21 | -38.415 | -28.216 | WINDX | 15.131 | -2.289 | 1.307 |
| 1434 | DEAD | 54.806 | -29.459 | -46.015 | WINDX | 15.153 | -2.638 | -0.621 |
| 1444 | DEAD | 57.88 | -35.582 | -75.948 | WINDX | 15.133 | -2.313 | -1.543 |
| 1455 | DEAD | 55.939 | -31.288 | -160.164 | WINDX | 15.002 | -2.466 | -4.789 |
| 1899 | DEAD | 122.239 | -80.55 | -18.872 | WINDX | 17.605 | -4.843 | 0.139 |
| 1907 | DEAD | 121.704 | -85.863 | -61.068 | WINDX | 17.247 | -5.147 | -2.352 |
| 1913 | DEAD | 114.798 | -80.739 | -39.796 | WINDX | 17.161 | -4.893 | -1.003 |
| 1921 | DEAD | 121.193 | -78.965 | -3.899 | WINDX | 17.658 | -4.594 | 1.18 |
| 1927 | DEAD | 66.482 | -59.333 | -17.098 | WINDX | 17.267 | -4.073 | 0.856 |
| 1933 | DEAD | 71.529 | -74.455 | -1.493 | WINDX | 17.744 | -3.838 | 2.92 |
| 1940 | DEAD | 94.047 | -83.517 | -31.489 | WINDX | 17.21 | -4.548 | 0.975 |
| 1946 | DEAD | 91.531 | -74.696 | -52.983 | WINDX | 17.048 | -4.554 | -0.656 |
| 1956 | DEAD | 111.301 | -86.011 | -60.373 | WINDX | 17.077 | -4.977 | -1.095 |
| 1967 | DEAD | 114.174 | -89.664 | -145.486 | WINDX | 16.961 | -5.275 | -4.275 |

(2) 动力分析

①模态分析

根据抗震规范的要求，结构等效质量取全部的恒载和 0.5 倍的活荷载，由于结构的本身较为复杂，因此采用 Ritz 向量法来做模态分析比较好，荷载矢量取 X、Y、Z 三个方向的加速度分量。本例的结构一共分析了 18 个振型，模态分析的结果：X、Y 向平动的有效质量

参与系数都达到了 98%以上 ($>90\%$)，动力特性的具体数据见表 25-2，第一到第六模态的振型如图 25-15~图 25-17 所示，其中第一、二模态以平动为主，第三模态以扭转为主。从表 25-2 中可以看到结构平动振型的作用角度与模型 X 轴成 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ ，且第一振型中扭转成分比较大，这是由于结构本身存在的偏心造成的不利影响。

结构的动力特性 表 25-2

| 模态 | 周期 (s) | X 向平动比例 (%) | Y 向平动比例 (%) | 扭转比例 (%) | 周期比 (T3/T1) | 结构总质量 (t) | 有效质量 (%) |
|----|--------|-------------|-------------|----------|-------------|-----------|-----------|
| 1 | 2.890 | 27.083 | 32.540 | 41.377 | 0.672 | 109792.4 | X: 98.874 |
| 2 | 2.323 | 51.743 | 44.658 | 3.599 | | | |
| 3 | 1.942 | 14.151 | 4.515 | 81.333 | | | |
| 4 | 0.911 | 21.676 | 41.429 | 36.894 | | | |
| 5 | 0.790 | 54.477 | 35.060 | 10.463 | | | |
| 6 | 0.778 | 64.080 | 18.282 | 17.638 | | | |
| 7 | 0.710 | 0.038 | 10.107 | 89.855 | | | Y: 98.822 |
| 8 | 0.650 | 29.794 | 20.318 | 49.888 | | | |
| 9 | 0.590 | 19.950 | 75.021 | 5.029 | | | |
| 10 | 0.538 | 44.875 | 39.252 | 15.873 | | | |
| 11 | 0.460 | 47.595 | 3.029 | 49.376 | | | |
| 12 | 0.392 | 22.061 | 55.506 | 22.433 | | | |
| 13 | 0.376 | 2.264 | 57.168 | 40.568 | | | |
| 14 | 0.330 | 62.049 | 9.552 | 28.399 | | | |
| 15 | 0.281 | 84.094 | 11.618 | 4.288 | | | |
| 16 | 0.229 | 7.604 | 85.858 | 6.539 | | | |
| 17 | 0.206 | 52.994 | 3.598 | 43.407 | | | |
| 18 | 0.150 | 49.942 | 3.142 | 46.916 | | | |

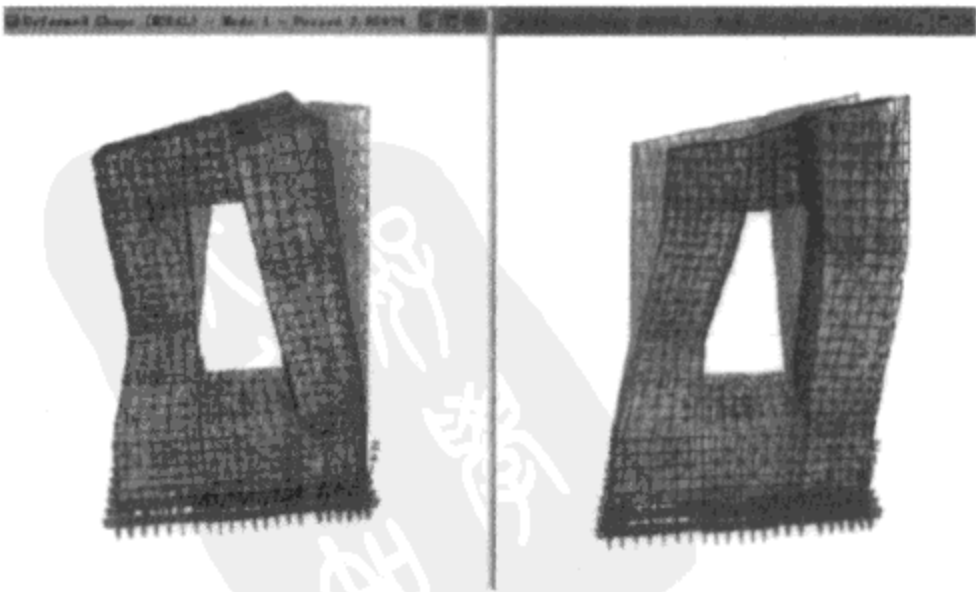


图 25-15 模态 1、2 振型

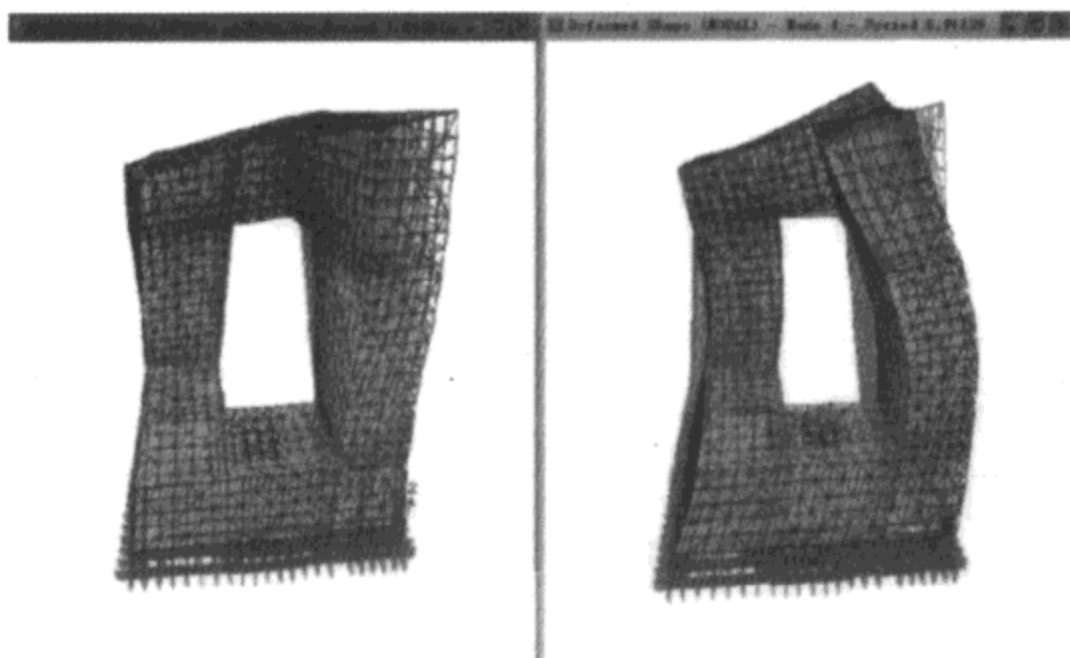


图 25-16 模态 3、4 振型

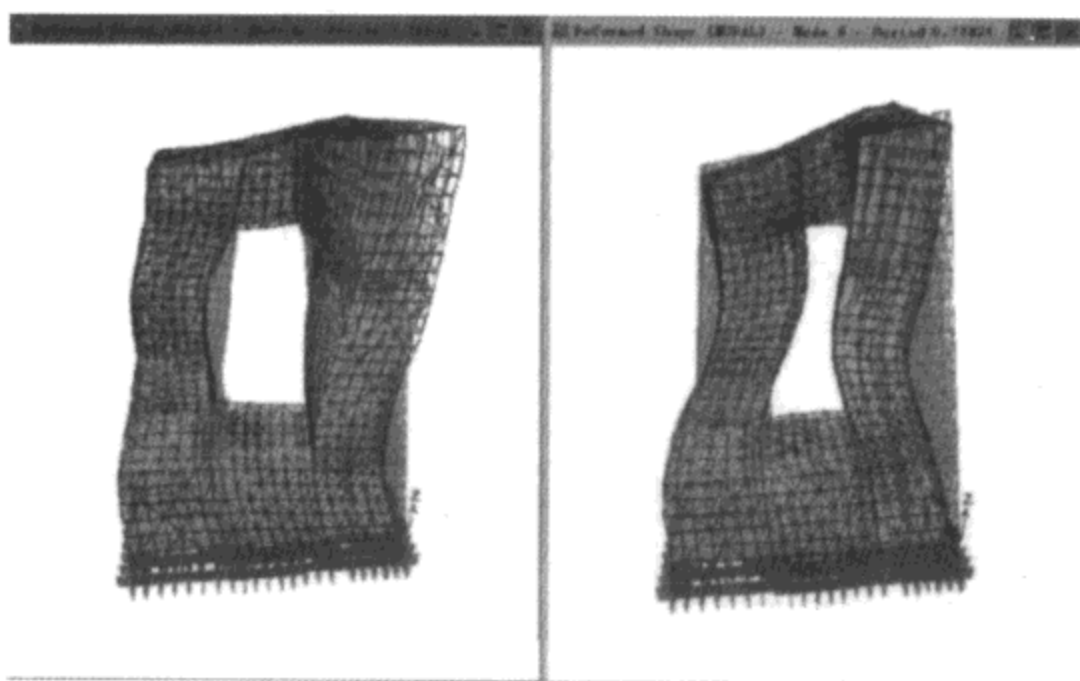


图 25-17 模态 5、6 振型

②反应谱分析

本例采用了弹性楼板，单向地震分析时不考虑偶然偏心的影响。X、Y 向反映谱分析结构在监控节点处的位移和总体结构的变形图分别如表 25-3 和图 25-18 所示。从反应谱分析结果中可以得到：该结构的平动方向并非与 X、Y 平行，因此需要采用双向地震反应组合来计算内力和变形，在 SAP2000 中工程师还可以根据平动振型的角度，在反应谱分析工况高级设置中定义单向分析最危险的激励角度；由变形图中可以看出结构侧向刚度变化过渡较为均匀，无明显突变，结构没有突出的薄弱层；基底剪重比为：X 向，8.40%、Y 向，7.01%；层间位移角以及位移比等均满足规范要求，Z 向地震分析略。

反应谱分析结构在监控节点处的位移

表 25-3

| 节点编号 | 荷载工况 | X (mm) | Y (mm) | Z (mm) | 荷载工况 | X (mm) | Y (mm) | Z (mm) |
|------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| 588 | SPECX | 19.904 | 15.651 | 3.812 | SPECY | 19.443 | 17.679 | 3.499 |
| 602 | SPECX | 18.453 | 14.122 | 4.077 | SPECY | 17.395 | 15.866 | 3.704 |
| 630 | SPECX | 13.769 | 13.044 | 0.500 | SPECY | 11.838 | 15.337 | 0.412 |
| 652 | SPECX | 15.474 | 17.356 | 3.744 | SPECY | 13.916 | 19.247 | 3.606 |
| 659 | SPECX | 15.641 | 14.445 | 1.235 | SPECY | 13.651 | 16.346 | 1.107 |
| 667 | SPECX | 14.955 | 19.414 | 3.303 | SPECY | 12.622 | 20.874 | 3.116 |
| 983 | SPECX | 32.830 | 45.090 | 5.566 | SPECY | 31.203 | 46.962 | 5.292 |
| 996 | SPECX | 35.241 | 41.650 | 8.154 | SPECY | 34.535 | 44.649 | 7.536 |
| 1009 | SPECX | 43.767 | 33.751 | 6.184 | SPECY | 42.591 | 36.848 | 5.282 |
| 1023 | SPECX | 40.082 | 35.172 | 8.536 | SPECY | 39.063 | 38.445 | 7.958 |
| 1387 | SPECX | 69.609 | 58.722 | 5.704 | SPECY | 68.571 | 62.847 | 5.096 |
| 1395 | SPECX | 70.462 | 60.985 | 12.995 | SPECY | 69.355 | 66.297 | 13.828 |
| 1401 | SPECX | 64.484 | 61.015 | 9.065 | SPECY | 64.415 | 66.307 | 8.291 |
| 1409 | SPECX | 64.043 | 58.976 | 14.994 | SPECY | 64.112 | 63.132 | 17.032 |
| 1415 | SPECX | 54.351 | 69.658 | 4.067 | SPECY | 52.577 | 73.098 | 4.204 |
| 1421 | SPECX | 54.116 | 65.542 | 13.308 | SPECY | 52.371 | 70.540 | 13.955 |
| 1428 | SPECX | 58.251 | 66.003 | 8.634 | SPECY | 58.300 | 70.923 | 7.752 |
| 1434 | SPECX | 58.388 | 70.178 | 11.446 | SPECY | 58.428 | 73.520 | 12.495 |
| 1444 | SPECX | 64.798 | 65.925 | 11.103 | SPECY | 64.631 | 70.756 | 11.829 |
| 1455 | SPECX | 71.844 | 71.422 | 37.936 | SPECY | 70.580 | 74.686 | 43.140 |
| 1899 | SPECX | 86.867 | 83.614 | 5.870 | SPECY | 88.710 | 91.463 | 6.233 |
| 1907 | SPECX | 85.084 | 77.861 | 13.318 | SPECY | 86.877 | 86.485 | 14.249 |
| 1913 | SPECX | 77.116 | 75.725 | 7.615 | SPECY | 79.135 | 83.966 | 6.850 |
| 1921 | SPECX | 80.027 | 81.967 | 16.748 | SPECY | 82.173 | 89.572 | 19.345 |
| 1927 | SPECX | 63.798 | 74.990 | 4.224 | SPECY | 62.269 | 80.027 | 4.469 |
| 1933 | SPECX | 66.179 | 73.304 | 14.288 | SPECY | 64.709 | 80.144 | 14.818 |
| 1940 | SPECX | 71.893 | 74.402 | 6.576 | SPECY | 73.226 | 81.879 | 5.821 |
| 1946 | SPECX | 70.678 | 76.881 | 11.378 | SPECY | 71.726 | 82.634 | 12.554 |
| 1956 | SPECX | 76.381 | 75.009 | 7.232 | SPECY | 78.312 | 82.888 | 7.399 |
| 1967 | SPECX | 82.947 | 78.557 | 33.702 | SPECY | 84.280 | 85.329 | 38.298 |

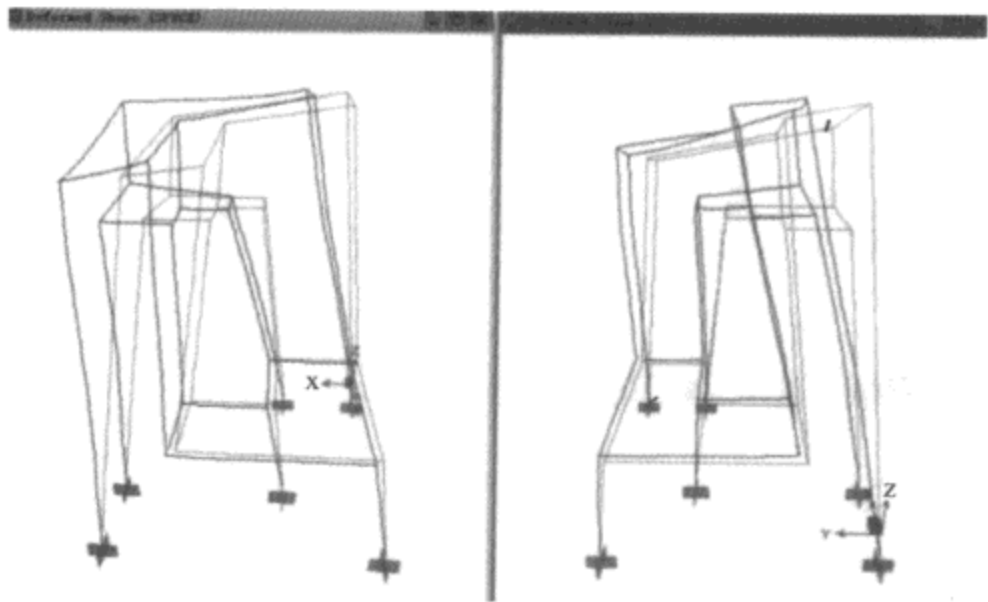


图 25-18 X, Y 向反应谱分析结构变形图

③弹性时程分析

本例只取一条地震波进行弹性时程分析，关于时程分析地震波选取的原则和参数要求，可以参考高层相关规范。本例时程分析的结果：时程分析的 X 向最大基底剪力为反应谱分析的 1.15 倍，Y 向最大基底剪力约为反应谱分析的 1.056 倍；时程分析的节点位移在反应谱分析的 80%~90% 之间，在 SAP2000 中工程师还可以根据平动振型的角度，在时程分析工况高级设置中定义单向分析最危险的激励角度。总体而言，时程分析的计算结果与反应谱分析的结果基本吻合，符合设计规范的有关要求。

(3) 阶段施工分析

对于复杂高层来说，阶段施工分析是工程设计和施工控制的重要内容。本例采用非线性施工过程分析，将整个结构分成三个大的施工阶段，三个阶段分析过程中的变形如图 25-19 所示，施工过程中结构竖向体系主要构件的轴力变化如图 25-20 所示（简化为边缘构件表示）。施工过程中监控节点的包络位移见表 25-4。由于结构本身的偏心在施工的过程中结构在竖向荷载作用下就会产生较大的位移，从轴力图中可以看到离塔身较远的柱子出现了拉力，因此在设计的过程中对重点部位要求特殊设计。

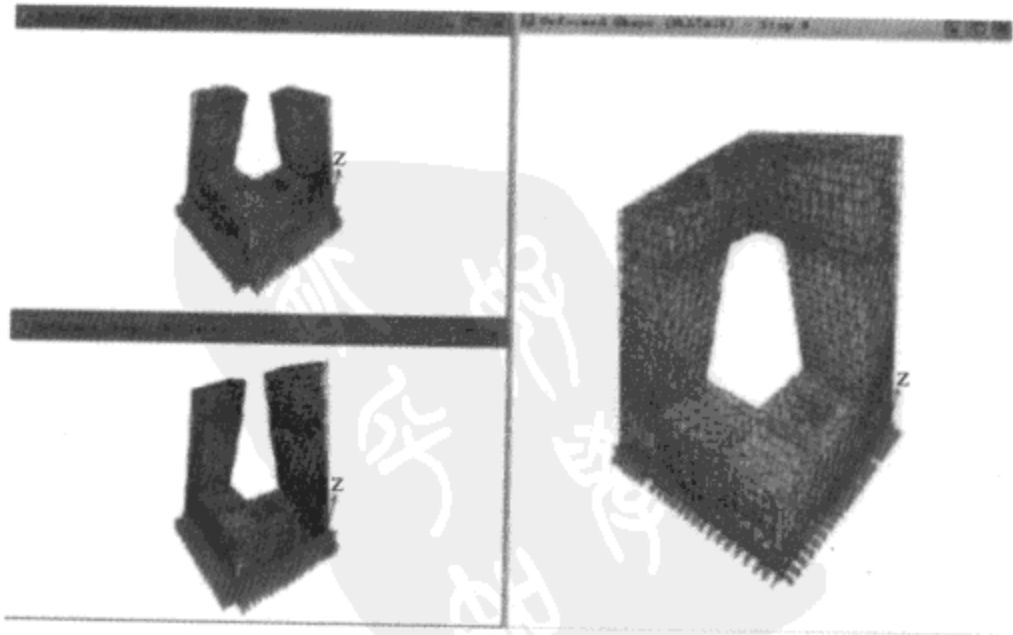


图 25-19 阶段施工过程变形图

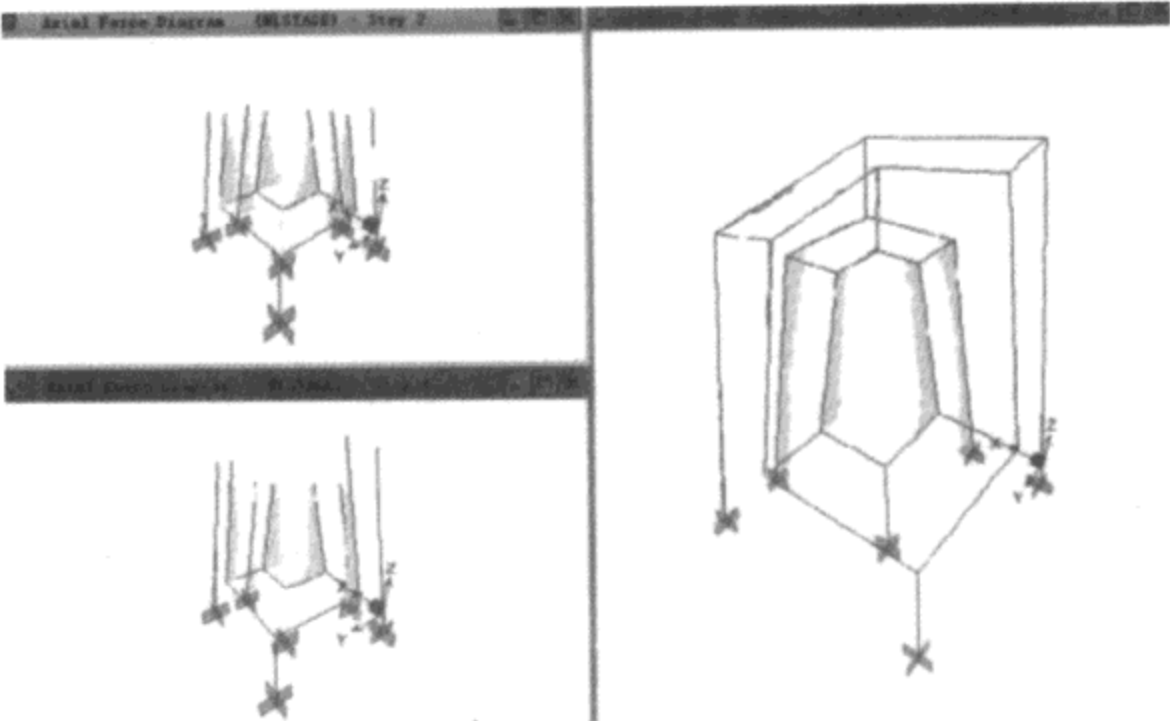


图 25-20 阶段施工过程中边缘构件轴力图

阶段施工过程中监控节点的包络位移 表 25-4

| 节点编号 | 荷载工况 | 包络标记 | X (mm) | Y (mm) | Z (mm) |
|------|---------|------|---------|---------|---------|
| 588 | NLSTAGE | Max | 28.728 | 20.015 | 4.572 |
| 588 | NLSTAGE | Min | 15.320 | 11.944 | -1.462 |
| 602 | NLSTAGE | Max | 36.237 | 13.561 | -11.731 |
| 602 | NLSTAGE | Min | 18.001 | 10.220 | -27.763 |
| 630 | NLSTAGE | Max | 7.172 | -10.082 | -2.904 |
| 630 | NLSTAGE | Min | 5.782 | -12.136 | -3.045 |
| 652 | NLSTAGE | Max | -16.536 | -21.449 | -12.619 |
| 652 | NLSTAGE | Min | -21.884 | -34.520 | -23.526 |
| 659 | NLSTAGE | Max | 10.135 | -7.613 | -5.074 |
| 659 | NLSTAGE | Min | 7.841 | -9.034 | -5.089 |
| 667 | NLSTAGE | Max | -12.676 | -22.628 | 1.608 |
| 667 | NLSTAGE | Min | -18.668 | -33.258 | -1.949 |
| 983 | NLSTAGE | Max | -34.984 | -44.120 | -1.931 |
| 983 | NLSTAGE | Min | -69.062 | -84.672 | -7.298 |
| 996 | NLSTAGE | Max | -38.780 | -42.220 | -25.083 |
| 996 | NLSTAGE | Min | -70.753 | -88.498 | -54.794 |
| 1009 | NLSTAGE | Max | 80.140 | 82.483 | 1.724 |
| 1009 | NLSTAGE | Min | 31.259 | 33.633 | -6.874 |
| 1023 | NLSTAGE | Max | 90.678 | 71.380 | -22.589 |
| 1023 | NLSTAGE | Min | 34.251 | 30.886 | -62.386 |
| 1387 | NLSTAGE | Max | 141.183 | 168.398 | -11.048 |
| 1387 | NLSTAGE | Min | 39.799 | 55.086 | -18.384 |

续上表

| 节点编号 | 荷载工况 | 包络标记 | X (mm) | Y (mm) | Z (mm) |
|------|---------|------|----------|----------|----------|
| 1395 | NLSTAGE | Max | 137.560 | 143.743 | -17.947 |
| 1395 | NLSTAGE | Min | 39.075 | 48.823 | -66.355 |
| 1401 | NLSTAGE | Max | 155.625 | 144.278 | -27.027 |
| 1401 | NLSTAGE | Min | 43.916 | 48.907 | -91.229 |
| 1409 | NLSTAGE | Max | 157.588 | 168.848 | -22.645 |
| 1409 | NLSTAGE | Min | 44.148 | 55.111 | -61.397 |
| 1415 | NLSTAGE | Max | -55.159 | -57.741 | -11.975 |
| 1415 | NLSTAGE | Min | -130.899 | -149.916 | -16.203 |
| 1421 | NLSTAGE | Max | -55.059 | -55.788 | -22.613 |
| 1421 | NLSTAGE | Min | -130.398 | -152.789 | -47.814 |
| 1428 | NLSTAGE | Max | -57.779 | -55.671 | -30.446 |
| 1428 | NLSTAGE | Min | -128.430 | -151.733 | -79.325 |
| 1434 | NLSTAGE | Max | -57.865 | -57.273 | -21.556 |
| 1434 | NLSTAGE | Min | -128.755 | -146.016 | -67.284 |
| 1444 | NLSTAGE | Max | 41.035 | 0.000 | 0.000 |
| 1444 | NLSTAGE | Min | 0.000 | -34.351 | -52.302 |
| 1455 | NLSTAGE | Max | 40.588 | 0.000 | 0.000 |
| 1455 | NLSTAGE | Min | 0.000 | -31.827 | -136.938 |
| 1899 | NLSTAGE | Max | 185.639 | 185.690 | 0.000 |
| 1899 | NLSTAGE | Min | 0.000 | 0.000 | -19.852 |
| 1907 | NLSTAGE | Max | 181.498 | 154.565 | 0.000 |
| 1907 | NLSTAGE | Min | 0.000 | 0.000 | -65.334 |
| 1913 | NLSTAGE | Max | 185.520 | 148.643 | 0.000 |
| 1913 | NLSTAGE | Min | 0.000 | 0.000 | -76.603 |
| 1921 | NLSTAGE | Max | 193.119 | 179.277 | 0.000 |
| 1921 | NLSTAGE | Min | 0.000 | 0.000 | -51.763 |
| 1927 | NLSTAGE | Max | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 1927 | NLSTAGE | Min | -96.212 | -129.259 | -7.891 |
| 1933 | NLSTAGE | Max | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 1933 | NLSTAGE | Min | -99.711 | -144.303 | -30.367 |
| 1940 | NLSTAGE | Max | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 1940 | NLSTAGE | Min | -101.089 | -157.634 | -56.981 |
| 1946 | NLSTAGE | Max | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 1946 | NLSTAGE | Min | -97.444 | -146.334 | -55.953 |

续上表

| 节点编号 | 荷载工况 | 包络标记 | X (mm) | Y (mm) | Z (mm) |
|------|---------|------|---------|---------|----------|
| 1956 | NLSTAGE | Max | 96.680 | 0.000 | 0.000 |
| 1956 | NLSTAGE | Min | 0.000 | -85.113 | -38.022 |
| 1967 | NLSTAGE | Max | 101.305 | 0.000 | 0.000 |
| 1967 | NLSTAGE | Min | 0.000 | -89.010 | -122.294 |

25.4.5 小结

本工程属于体形特别不规则的复杂钢结构高层。由于在结构设计中采用了较为合理的结构设计，并对结构转化等特殊部位采用了有效的构造措施，从而减小了体形不规则带来的不利影响，使得结构传力清晰，并且具有较好的抗震性能，计算结果满足我国现行规范和规程的要求。

25.5 本章小结

本章阐述了高层复杂结构分析的基本内容及相关问题，并对此类结构的有限元分析方法进行了要点说明。同时以某复杂高层钢结构为例，应用 SAP2000 建立了接近实际的分析模型，并重点介绍了程序对于该模型的地震分析（分别采用振形分解反应谱法和时程分析法）和阶段施工分析（考虑几何非线性的影响）。充分演示了 SAP2000 处理此类结构问题的方法和功能。但是，限于篇幅，文中采用了较为简化的结构计算模型和分析方式，并未做更为细致的工作，如风荷载、温度效应的分析以及动力、静力弹塑性分析寻找结构可能存在的薄弱环节等。对于上述具体分析，工程师仍然可以借助 SAP2000，按照具体的设计要求建立合理的结构模型，根据规范要求进行各种分析参数的设置，然后进行结构分析以及结果的分析、判断和整理。

本章工程结构模型信息及相关计算设计参数都基于现有的公开资料。为了演示说明程序功能，作者对模型本身采取了较大幅度的简化，不代表工程实际情况。结构模型的分析设计过程演示，旨在阐明 SAP2000 的相关功能，体现程序在工程中的应用，供读者参考。



第26章

复杂高层混合结构

自 20 世纪 80 年代开始，特别是上世纪 90 年代至今，一批现代高层建筑以全新的面貌呈现在人们面前。业主和建筑师为在建筑艺术、建筑造型以及建筑功能、用途等方面体现其创新，设计了众多体型复杂和内部空间多变的高层建筑。经过近几十年的研究和工程实践，结构工程师发挥其创造才能，尽可能地解决了结构设计的各种技术难题，陆续发展了多种复杂高层建筑结构体系，这些结构的结构形式包括钢筋混凝土结构、钢结构以及钢-混凝土混合结构等等。从发展趋势上讲，复杂结构体系采用钢-混凝土混合结构将逐渐增多。但是，这些建筑结构一般都是不规则的，有些甚至是特别不规则的，经受过强震作用检验的结构为数较少。因此，试验研究及数值模拟计算成为结构工程师顺利进行结构设计的有力保障。

本章主要针对目前出现的几种复杂高层建筑结构体系进行介绍，并结合一个具体工程实例及其数值分析结果讨论其在设计、计算分析过程中应注意的问题。

26.1 转换层结构

在高层建筑结构的底部，当上部楼层部分竖向构件（剪力墙、框架柱等）不能直接连续贯通落地时，应设置结构转换层，在结构转换层布置转换结构构件，这类结构称为带转换层的高层建筑结构。近年来，带转换层结构的高层建筑越来越多，有些通过转换构件实现建筑造型沿竖向的收进或外挑，有些则为了实现斜柱与直柱的转换，而且转换层位置也越来越高。

带转换层的结构属于竖向构件不连续及竖向刚度突变的复杂结构体系，转换层上、下楼层构件的内力、位移均容易发生突变，对抗震十分不利。研究成果表明，影响带转换结构抗震性能的因素主要有转换层设置高度、转换层上下楼层侧向刚度比、转换层上下等效刚度比等。转换层位置越高，转换层上下层间位移角包络、剪力分配和传力途径突变越明显；转换层与其上一层侧向刚度比减小，其剪力比也减小；转换层与其上层的等效刚度比增大，其对应层间位移角及剪力比均增大，对其抗震性能有重要影响。

针对上述研究成果,在设计中应着重针对上述因素进行控制。首先,应限制转换层设置的高度;其次,有效控制侧向刚度比以达到控制转换层附近的层间位移角及内力突变的目的;再者,控制转换层上部与下部结构的等效侧向刚度比,使其尽量接近于1,且不大于1.3。

在进行数值分析时,应注意以下问题:

(1) 对于带转换层的结构,必须将转换结构作为整体结构的一个重要部分采用符合实际受力及变形状态的计算模型进行三维空间整体结构的计算分析。必要时,应采用三维有限元程序(如SAP2000等)对转换结构进行局部补充计算;

(2) 当进行转换结构的局部模型计算时,必须取转换层上下两层结构进入计算模型,同时应注意对构件的轴线位置按照实际的空间位置进行偏置,并应考虑节点刚域的影响以及模型边界条件应符合实际的工作状态;

(3) 当高位转换时,还应注意对整体结构进行重力荷载下的施工模拟计算;

(4) 抗震设计时,转换层的地震剪力应乘以1.15的增大系数;8度抗震设防时,转换构件应考虑其上竖向荷载代表值的10%作为附加竖向地震作用力,且此附加竖向地震作用应考虑上下两个方向。

26.2 连体结构

连体结构是指两幢或几幢高层建筑之间由架空连接体相互连接,以满足建筑造型及使用功能要求的特殊结构形式。连接体的跨度有几米长的,也有几十米长的,且可以沿建筑物竖向布置一个或多个。根据连接体与塔楼的连接方式,可将连体结构大致分为强连接方式及弱连接方式两类:强连接是指当连接体结构包含多层楼盖,且连接体结构刚度足够,能实现将主体结构连接成为协调受力、变形的整体连接形式;反之,当连接无法协调其两侧结构的共同工作及协调受力时,则视为弱连接形式,连接体可以采用一端与结构铰接,一端采用滑动支座的连接方式或者两端均做成滑动支座的方式。

可见,无论是强连接方式还是弱连接方式,连体结构均是通过连接体将不同结构连在一起,体型比一般结构复杂,因此连体结构受力比一般单体结构或多塔楼结构更为复杂,其变形及受力具有如下特点:

(1) 较之其他体型的结构,连体结构扭转振动变形较大,扭转效应显著。具体表现为:当风或地震作用时,结构除产生平动变形外,还将产生扭转变形,扭转效应随连体结构的不对称性的增加而加剧。即使对于对称双塔连体结构,也会由于连接体楼板发生变形,两塔楼除有同向平动外,还有可能产生两塔楼的相向运动,且该振动形态是与整体结构的扭转振型相耦合的。在实际工程中,由于地震响应在不同塔楼之间存在一定差异,很有可能发生两塔楼的相向运动,此时对于连体结构的受力相当不利。而且,对于多塔连体结构,因体型更为复杂,其振动形态也将更为复杂,扭转效应变得更加明显;

(2) 连接体部分受力相当复杂。连接体是连体结构的关键部位,一方面,连接体部分要协调两侧结构的变形,在水平荷载作用下承受较大的内力;另一方面,当其本身跨度较大时,除竖向荷载作用外,竖向地震作用亦会相当显著。

(3) 连接体两端结构的连接方式对连体结构的影响显著。当采用强连接时, 连接体与两端塔楼或刚接或铰接, “强制” 两端塔楼结构及连体结构整体变形协调, 共同受力。一般情况下, 连接体同塔楼连接处受力较大, 构造处理较为复杂; 当采用弱连接时, 连接体与两端塔楼采用滑动支座连接, 此时应注意科学、可靠地预计滑动支座的滑移变形量, 避免连接体滑落及连接体同塔楼发生碰撞对主体结构造成破坏。

可见, 强连体结构设计的关键问题是保证连接体与塔楼可靠连接, 共同受力, 工作重点围绕如何保证连接体与塔楼整体共同工作及该特殊体型结构的计算分析及设计方面开展; 弱连体结构的关键问题则是如何准确模拟滑动支座的性质, 确定支座最大变形量。二者在计算分析时应注意以下问题:

(1) 对连体结构应采用三维有限元程序进行分析, 连接体部分采用弹性楼盖假设, 进行整体建模的内力与变形;

(2) 抗震计算时, 应考虑平扭耦联计算结构的扭转效应, 振型数不应小于 15, 多塔楼结构的振型数不应小于塔楼数的 9 倍, 且计算振型数应使振型参与质量不小于总质量的 90%;

(3) 应采用时程分析方法进行补充计算;

(4) 应进行竖向地震作用的计算分析, 并在设计中考考虑竖向地震 (反应谱) 的效应影响。《高层建筑混凝土结构技术规程》中第 10.5.2 条及条文说明中规定, 8 度抗震设计时, 连体结构的连接体竖向地震作用标准值可取连体部分重力荷载代表值的 10%。但是, 应当指出的是, 实际工程中连体结构应根据其自身的重要性确定其竖向地震的考虑方法, 可采用按中震弹性进行设计, 并补充考虑竖向地震作用为主的组合;

(5) 在连体结构高层建筑的风荷载计算分析过程中, 应注意风荷载作用的取值问题。可将单幢建筑的体型系数乘以相互干扰的增大系数, 作为设计条件, 必要时宜进行风洞试验;

(6) 对弱连接方式, 应针对支座非线性性质进行非线性时程分析。

26.3 体型收进结构

体型收进, 又称竖向收进, 是高层建筑中常见的现象, 主要的表现形式有结构上部的收进和带裙房的结构在裙房顶的收进。体型收进是结构竖向不规则的典型。

从结构受力角度看, 这类复杂结构体系竖向刚度存在突变, 结构高阶振型的影响较大。数值模拟研究表明: 在结构体型收进的部位, 柱的弯矩和剪力都有较大的突变, 同时由于裙房与主塔楼的偏心布置, 扭转作用明显, 如果此部分构件设计不好, 就会造成地震作用下体型收进处的构件过早破坏, 导致结构破坏严重, 甚至倒塌; 而且裙房顶板与主塔楼连接处在小震作用下主拉应力就已接近混凝土的抗拉强度, 在地震作用下会产生较严重的破坏。

此外, 有些结构在体型收进时会造成结构的偏心, 如大底盘与塔楼的偏心布置, 成为偏心收进。计算研究表明: 随着偏心程度的增加, 结构的扭转效应逐渐增大, 裙房周边柱的内力有显著的增加, 离塔楼远的裙房角柱在底层内力放大较多, 而离塔楼近的裙房角柱在顶层内力放大较多。

在结构设计中, 对于体型收进结构应注意以下问题:

(1) 结构体型收进会造成竖向刚度的不连续,在体型收进处结构的层间位移会有突变,竖向构件的内力也会明显增大,对结构抗震不利;而且,结构层间位移和构件内力的突变与收进的程度有关,收进愈大,结构的突变愈严重,内力则放大越多。因此设计中应加强竖向构件的配筋,保证在地震作用下不丧失竖向承载能力。

(2) 在大底盘多塔楼结构中,塔楼的底层是内力突变的部位,应特别加强,尤其注意避免这一层的刚度小于上一层刚度,从而造成薄弱层。

(3) 结构收进如果造成偏心,底部结构会因扭转效应的影响而使内力加大,底部结构的周边构件应加强配筋,裙房顶部应适当加厚,配筋也应加强。

此外,结构体型收进如果能够满足《高层建筑混凝土结构技术规程》中对体型收进结构的限制条件,则其抗震性能削弱不多;但如果无法满足规范限制条件,如出现收进较多,设置部分较高,收进程度较大或偏心收进等比较严重的情况,采用一般的分析方法往往无法掌握结构的受力特征,这时应补充进行时程分析和弹塑性分析的计算,验证结构抗震性能,发现结构的薄弱部位,并予以加强。

26.4 悬挑结构

与体型收进结构相反,悬挑结构则是结构上部体型大于下部体型,但同样属于竖向不规则结构。悬挑结构体型不规则,会因受竖向地震作用的影响,对高层建筑主体部分附加较大的倾覆力矩。而且其自身结构冗余度低,设计中应给予足够重视,应注意以下问题:

(1) 薄弱层问题

悬挑结构的上部结构的刚度大于下部结构,意味着下部结构可能形成薄弱层,设计中应加强下部结构的侧向刚度和构件承载力,满足规范对结构竖向规则性的要求,即楼层侧向刚度不宜小于相邻上部楼层侧向刚度的70%或其上相邻三层侧向刚度平均值的80%;A级高度高层建筑的楼层层间抗侧力结构的受剪承载力不宜小于其上一层受剪承载力的80%,不应小于其上一层受剪承载力的65%;B级高度高层建筑的楼层层间抗侧力结构的受剪承载力不应小于其上一层受剪承载力的75%。此外,由于上部结构质量大于下部结构,结构受高振型的影响比较严重,计算分析时应选用足够数量的振型数,并补充进行时程分析,对结构的层间力和层间位移进行对比,校核反应谱法计算结果是否安全,并发现结构的薄弱部位。

(2) 扭转效应

悬挑结构上部结构的质量大,扭转惯性矩就大,而结构下部的平面尺寸小,造成结构整体的抗扭刚度相对较小,扭转效应一般会比较显著,设计时应注意提高结构抗扭刚度,限制扭转效应。并应满足规范对于结构扭转为主的第一自振周期 T_1 与平动为主的第一自振周期 T_2 之比:A级高度高层建筑不应大于0.9,B级高度高层建筑、混合结构高层建筑及复杂高层建筑不应大于0.85的要求。对在考虑偶然偏心影响的地震作用下,楼层竖向构件的水平位移和层间位移,对于A级高度高层建筑不宜大于该楼层平均值的1.2倍,且不应大于该楼层平均值的1.5倍;对于B级高度高层建筑、混合结构高层建筑及复杂高层不宜大于该楼层平均值的1.2倍,且不应大于该楼层平均值的1.4倍。

(3) 竖向地震效应

设计中必须考虑悬挑部位的竖向地震作用，并可以采用竖向反应谱法或竖向时程分析的方法进行计算。

(4) 关键部位及关键构件的设计

悬挑部分的根部是悬挑结构最关键部位，因为悬挑部分结构冗余度很低，没有多道防线，一旦发生悬挑根部破坏，悬挑部分的结构会折断而倒塌。因此，对于承受悬挑部分重量的主要构件，包括悬挑部分根部的梁和悬挑部分受拉的斜撑，宜进行大震下的强度验算，保证大震不坏。支撑悬挑结构根部的竖向构件也是比较关键的构件，应适当提高安全度。

26.5 钢-混凝土混合结构

所谓混合结构，就是由不同材料的构件共同组成的结构，如砖与混凝土混合而成的砖混结构，钢（或其他组合构件）与钢筋混凝土组成的钢-混凝土混合结构。本章着重探讨的混合结构专指钢-混凝土混合结构。这种混合结构目前应用最多的就是钢筋混凝土筒体（或型钢混凝土筒体）与钢或型钢混凝土、钢管混凝土框架组成的结构。这样的结构利用钢筋混凝土筒体刚度大的特点，以钢筋混凝土或型钢混凝土的剪力墙或筒体承担主要的侧向力，而钢或其他组合构件的强度高，主要承担竖向荷载，这样就充分发挥了各种材料的长处。

混合结构通过合理的结构布置，充分利用了钢筋混凝土结构抗侧刚度大的特点，保证了结构在侧向荷载下具有足够的刚度，同时也利用了钢或其他组合构件承载力高的特点，减小了结构构件占用的建筑面积，可以说是充分利用了各种结构材料的特点，提高了结构的性能。混合结构同时具备了钢结构和钢筋混凝土结构的优点，抗震性能好，造价合理，因此，近年来在国内应用广泛，尤其是在最近设计的高层、超高层建筑中得到了广泛的应用。

组合构件因承载力高、延性好，除应用在混合结构中，也经常在复杂钢筋混凝土高层建筑中采用，是带转换层的高层建筑结构中转换梁、框支柱、落地剪力墙等关键构件的合理选择，成为钢筋混凝土高层建筑中关键部位最常用的加强方案。

混合结构用于高层、超高层建筑结构，其结构分析存在一定的难度，这些难度主要是由两方面原因造成的，其一是混合结构自身在结构分析中存在的难点，另一方面是因为采用混合结构的高层、超高层建筑本来就存在复杂性。研究清楚这些难点，对复杂高层建筑中的混合结构分析是至关重要的。以下是在计算分析中应重视的几个问题。

26.5.1 阻尼问题

阻尼是动力分析的一大特点，也是动力分析中的一个易于引起困惑之处，由于它只是影响动力响应的衰减，所以出了错也不容易觉察。在钢-混凝土混合结构中，结构阻尼的本质和表现均相当复杂，在进行动力分析过程中可以通过如下几种方法进行考虑：

(1) 瑞利（Rayleigh）阻尼

瑞利阻尼，又被称为比例阻尼，是目前最常用也是比较简单的一种阻尼形式。它是大多

数动力分析中考虑的首选阻尼，其精度对许多实际工程应用也是足够的。其数学形式如下：

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (26-1)$$

$$\zeta_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2} \quad i = 1, 2 \quad (26-2)$$

式中：[M] ——质量矩阵；
 [K] ——刚度矩阵；
 ζ_i ——阻尼比；
 ω_i ——角频率；
 [C] ——结构的阻尼矩阵；
 α 、 β ——质量矩阵及刚度矩阵系数。

通过联立结构两个自振频率的阻尼比（式 26-2）确定。可以看出，这种形式阻尼的本质是通过确定两个频率点上质量阻尼系数（ α ）与刚度阻尼系数（ β ），并使得二者之和产生的等效阻尼与已知的结构总阻尼比 ζ 效应相等。

在一般进行结构分析时，钢结构往往取 2% 的阻尼比，钢筋混凝土结构则取 5% 的阻尼比，而在混合结构中需要根据结构形式的不同进行分别考虑：对于钢（型钢混凝土、钢管混凝土）框架-钢筋混凝土核心筒结构，结构阻尼比可取为 4%；对于矩形钢管混凝土结构可取为 3.5%。

瑞利阻尼在 SAP2000 中，可以在时程计算工况定义对话框中进行输入，同时程序提供了多种输入方式，非常方便。值得说明的是，瑞利阻尼既可以做直接积分法的分析，也可以在振型叠加法的分析中使用。

（2）振型阻尼比

在采用振型叠加法进行动力分析过程中，结构阻尼还可以通过对结构振型指定阻尼比的方法进行考虑。假设已知结构模态阻尼比 ζ_i 后，则与输入的模态阻尼比对应的阻尼矩阵用下式求出：

$$\{\phi_i\}^T [C_\zeta] \{\phi_i\} = 4\pi f_i \zeta_i \quad (26-3)$$

式中： $\{\phi_i\}$ ——第 i 个振型向量；
 f_i ——对应的模态频率。

需要指出的是公式（26-3）只有理论意义，在振型叠加计算中是直接使用定义的振型阻尼比从而得到结构的阻尼矩阵并进行动力计算的。

在 SAP2000 中，程序对振型阻尼比提供了全面的输入方法，可以对不同振型输入不同的阻尼比。该功能还可以解决实际工程中存在的一些特殊混合结构（如部分钢筋混凝土结构、部分钢结构）的复杂阻尼问题，可以根据不同部分结构振型的不同采用不同阻尼比，非常简便。

（3）材料阻尼

与上述两种阻尼不同的，材料阻尼是材料的特性之一，又称滞回阻尼，其最显著的特点

是与结构响应频率无关，即与结构模态无关。表 26-1 中列出了一些常见材料的材料阻尼系数。

常见材料的材料阻尼系数 表 26-1

| 材 料 | 纯铝 | 钢 | 铅 | 铸铁 |
|------|---------------|-------------|--------------|------------|
| 阻尼系数 | 0.00002~0.002 | 0.001~0.008 | 0.008~0.014 | 0.003~0.03 |
| 材 料 | 天然橡胶 | 硬橡胶 | 玻璃 | 混凝土 |
| 阻尼系数 | 0.1~0.3 | 1.0 | 0.0006~0.002 | 0.01~0.06 |

下面给出材料阻尼系数与黏性阻尼比之间的关系：

假设在单自由度情况，质量 m 做简谐振动时， $\zeta \cdot k = c \cdot \omega$ (c 是对应的粘性阻尼系数)，因此得到 ξ 对应的阻尼比为：

$$\zeta = \frac{c}{c_{cr}} = \xi \cdot k \cdot \sqrt{\frac{m}{k}} \cdot \frac{1}{2\sqrt{km}} = \frac{\xi}{2} \tag{26-4}$$

在 SAP2000 中，可以在材料定义对话框中进行定义。需要指出的是该阻尼在程序中仅对反应谱及振型叠加法有效。

26.5.2 25%剪力调整问题

对于抗震设计，型钢混凝土框架-钢筋混凝土筒体各层框架柱所承担的地震剪力值在《高层建筑混凝土结构技术规程》中有较为详细的规定，这里需要指出的是：在 SAP2000 中，验算是否满足上述要求可以将结构中框架柱按楼层分别定义成截面切割 (sectioncut)，并输出其层剪力及框架承担的剪力。

26.5.3 组合构件的输入问题

由钢-混凝土组合而成的结构构件是混合结构的特点之一，也是在结构分析模型中必须进行模拟的关键问题。

在 SAP2000 中，可以通过程序中提供的截面设计器进行这种组合构件的输入。该截面设计器能够方便的生成用户自己的框架截面属性：用户可以创建任意几何形状和不同材料组合的截面。基本分析集合属性（面积、惯性矩、扭转常数）能够计算出来并应用于分析之中，而且，截面设计器还可以计算非线性框架铰的属性。

需要注意的是：

- (1) 应在进入截面设计器之前定义好所使用的材料；
- (2) 在进行截面编辑中，当有两个同材料的截面重叠时，应同时选中上述两截面并进行 merge 操作，以消除其重叠部分的重复计算。
- (3) 更改所使用的材料性质后，退出截面编辑器，程序不会自动将组合截面的性质进行更新，解决办法是再进入一次截面编辑器。

26.6 复杂高层结构算例分析

26.6.1 工程概况

北京当代万国城北区工程地上总建筑面积约为 160000m^2 ，由九个最高 21 层的塔楼及其他建筑组成，包括一个中心影院和地下停车库，塔楼主要用于住宅用途。九个塔楼（以字母 T 表示）在结构顶部通过连廊（以字母 B 表示）连接成环形系统，并且多个塔楼顶部带有较大的悬挑结构，如图 26-1 所示。

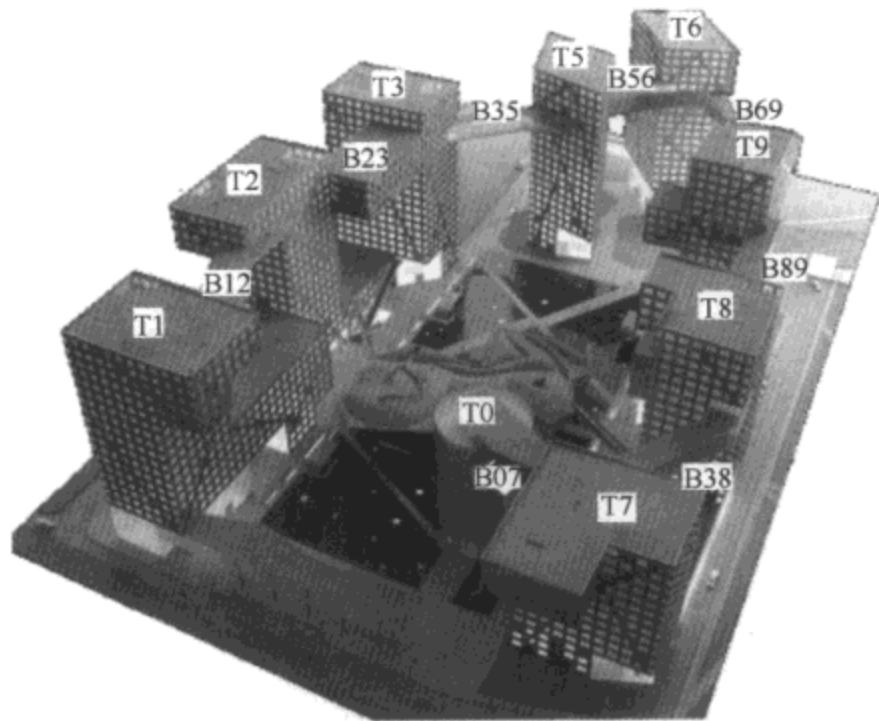


图 26-1 北京当代万国城工程示意图

26.6.2 悬挑及体型收进部分的设计

本工程中 T1、T2、T7、T8 及 T9 结构均存在长度较大的悬挑结构，平均约为 10m ，超过了规范中悬挑的最大建议尺寸。针对结构悬挑及体型收进的情况，采取了以下措施：

(1) 悬挑部分采用钢结构

为降低悬挑部分自重，减小悬挑结构对整体结构的影响，悬挑部分结构采用钢结构。梁、柱采用 H 型钢，楼板采用压型钢板混凝土楼板。

(2) 悬挑部分增设斜撑，塔楼增设斜撑和十字型剪力墙

如图 26-2 所示，为承受悬挑部分重力荷载产生的倾覆力矩，在悬挑部分增设钢斜撑，将倾覆力矩传递到塔楼上；在塔楼相应的部位也增设型钢混凝土斜撑，使塔楼整体承受倾覆力矩。在塔楼内除设置核心筒外，还设置了十字型剪力墙，提高塔楼整体的刚度和抗倾覆能力。

(3) 进行竖向地震验算

根据规范规定，对 8 度区的长悬臂结构要进行竖向地震的验算。本工程进行了竖向反应谱和竖向地震时程分析，竖向地震峰值取水平地震的 0.65 倍，并考虑了竖向地震与水平地震的组合（包括水平地震为主的组合和竖向地震为主的组合）。

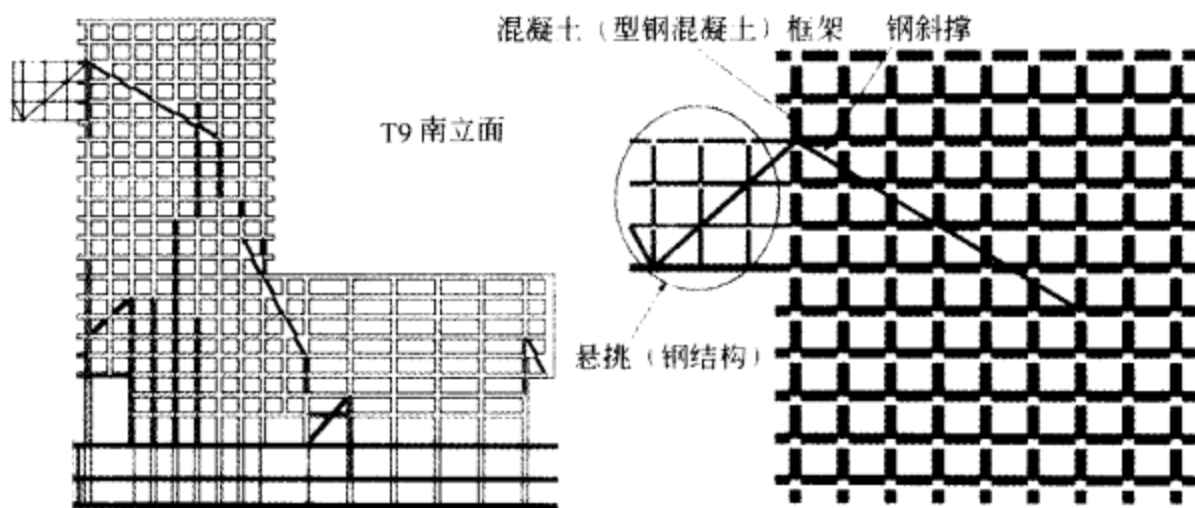


图 26-2 悬挑结构及体型收进 (T9) 布置示意

(4) 提高悬挑部分和支撑悬挑结构的构件抗震设防标准

考虑到悬挑结构的冗余度低,在设计过程中提高了悬挑结构的抗震设防标准。悬挑部分的结构按中震弹性计算,即在验算悬挑部分的构件时,按中震弹性地震力(水平地震和竖向地震)与竖向荷载进行组合,考虑荷载分项系数,材料强度取设计值。直接支撑悬挑结构的构件按中震不屈服设计,即按中震弹性地震力与竖向荷载进行组合,不考虑荷载分项系数,材料强度取标准值。

(5) 体型收进处结构加强

根据以往的研究成果和本工程的弹塑性分析结果,高位、大比例的体型收进对结构的抗震性能是不利的,要保证结构在收进处刚度的延续,以及收进处构件具有足够的延性和承载力。对体型收进位置高,而且是偏心的收进,在收进位置的上下设置了额外的斜撑,尽量避免收进处结构刚度的突变。同时在结构计算时,也将收进的楼层指定为薄弱层,进行地震剪力的放大,提高构件的承载力。

26.6.3 连体部分的设计

万国城北区工程 9 个塔楼通过连廊连为整体,成为一个非常复杂的连体结构,如图 26-3 所示。连廊 B12、B23、B35、B56、B78、B89、B69 跨度依次约为 40.4m、33.9m、34.2m、24.8m、33.9m、44.4m、54.5m,设置高度在距地面 35.05~58.05m 范围内。

设计中采取了以下措施:

(1) 设置隔震支座

在连廊的两端都设置了隔震支座,将连廊与塔楼隔开,塔楼只承受连廊的竖向荷载和隔震后很小的地震作用。通过设置摩擦摆式隔震支座(FPB, Friction Pendulum Bearings),有效地减小了各个塔楼的相互影响,并且有效地减小了连廊造成的整体结构的质量偏心和扭转作用。其中隔震支座的曲面半径为 2.24m,支座周期为 3s,动摩擦系数为 4%,支座最大变形能力为 $\pm 500\text{mm}$ 。

为确定连廊隔震后的性能,建立了包括 8 个塔楼(T1~T9)及七个连廊(B12~B89)的整体计算模型,进行了地震作用下的时程分析。同时将时程分析中连廊和塔楼的相互作用

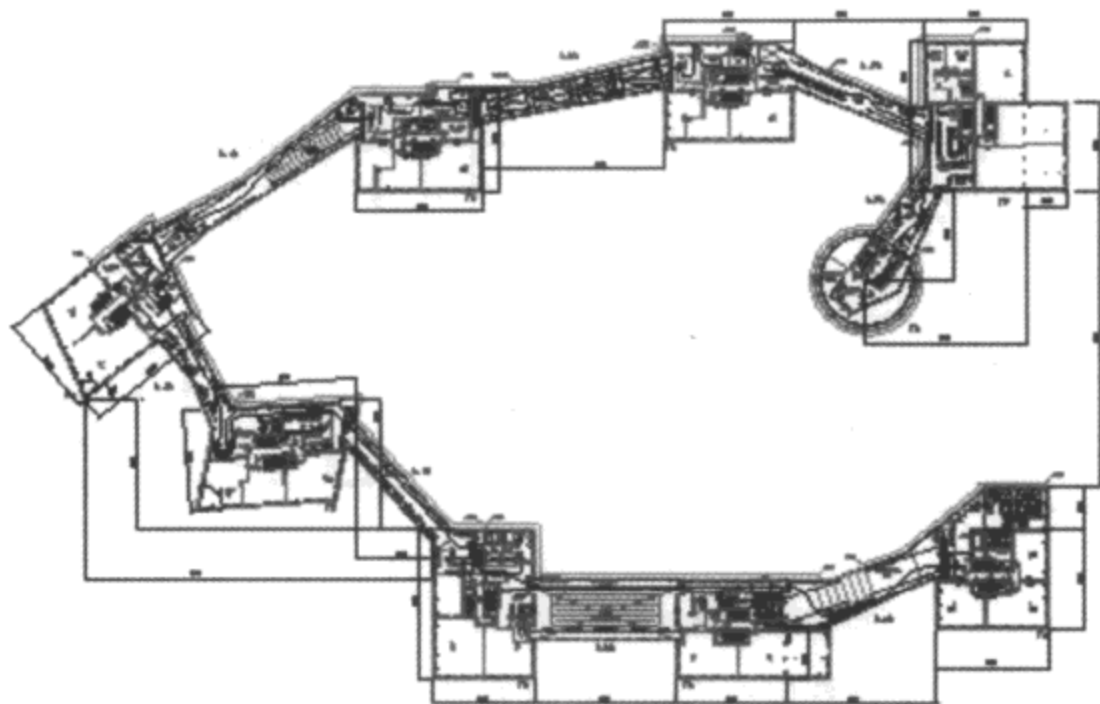


图 26-3 万国城工程连体结构平面布置图

分别施加到连廊和塔楼上作为地震作用进行构件设计。

(2) 进行地震验算

隔震支座只能减小水平地震的作用，对竖向地震的影响没有效果，所以在进行连廊设计时，进行了竖向地震的时程分析和反应谱计算，竖向地震的峰值取水平地震峰值的 0.65 倍。

同时，为了确定隔震支座地震下的最大变形，防止大震作用下连廊发生跌落，也不会与主体结构发生碰撞，需要进行了水平地震作用下的时程分析。

如图 26-4 为八个塔楼及 7 个连廊的 SAP2000 整体模型。



图 26-4 连体结构整体分析模型

在计算模型中，结构的梁、柱及斜撑等采用梁单元模拟，剪力墙采用壳单元模拟，连接体（空中连廊）与主体结构之间的隔震支座则采用双线性的非线性隔震支座 (ISOLATOR1) 模型进行模拟；结构阻尼采用振型比例阻尼形式，阻尼比根据结构类型的

不同分别采用：主体钢筋混凝土结构 5%，悬挑及连廊的钢结构 2%。参照《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2001）的相关规定，根据本工程建筑场地类别和设计地震分组选用 El-Centro 波（E-W 分量）、Olympia 波以及一条人工波作为水平地震输入，选用 El-Centro 波（竖向分量）、Petrolia 波（竖向分量）及人工波作为竖向地震输入，进行整体结构在 X、Y 及竖向多遇地震（水平地震峰值缩放为 0.07g，竖向地震峰值缩放为 0.0455g）与罕遇地震（水平地震峰值缩放为 0.4g，竖向地震峰值缩放为 0.26g）作用下的动力响应时程分析，时程积分方法采用 FNA，该方法为 SAP2000 专为隔震支座、非线性阻尼支撑等局部非线性构件提供的快速、高效分析功能。

26.6.4 计算分析结果的讨论

(1) 隔震支座位移量分析

如图 26-5、图 26-6 所示，在 X 及 Y 方向多遇地震作用下，所有连廊隔震支座的最大变形分别为 3.6cm（连廊 B56 支座 T5S，El-Centro 波）及 4.2cm（连廊 B35 支座 T3N，El-Centro 波），三条波的平均值为 2.9cm 及 3.2cm（位置同上）。

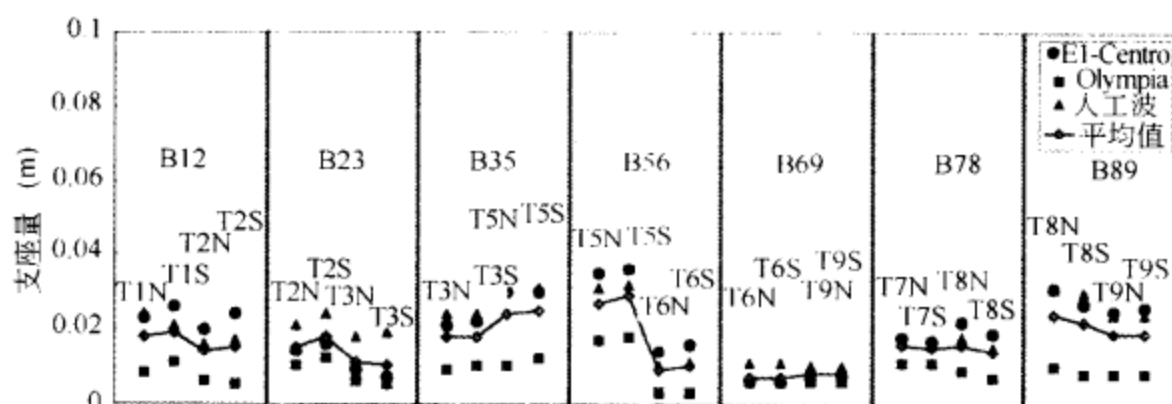


图 26-5 X 方向多遇地震作用下各连廊隔震支座最大变形

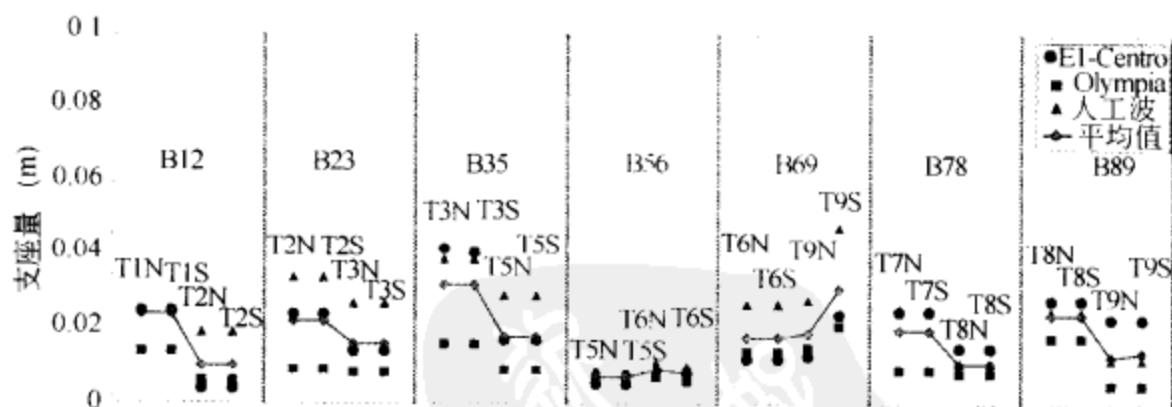


图 26-6 Y 方向多遇地震作用下各连廊隔震支座最大变形

如图 26-7、图 26-8 所示，在 X 及 Y 方向罕遇地震作用下，所有连廊隔震支座的最大变形分别为 39.5cm（连廊 B35 支座 T3S，人工波）及 40.6cm（连廊 B69 支座 T9S，人工波），三条波的平均值为 32.4cm 及 31.2cm（位置同上）。

图 26-9、图 26-10 为竖向地震作用下各支座轴力与其重力荷载代表值之比，其中：多遇

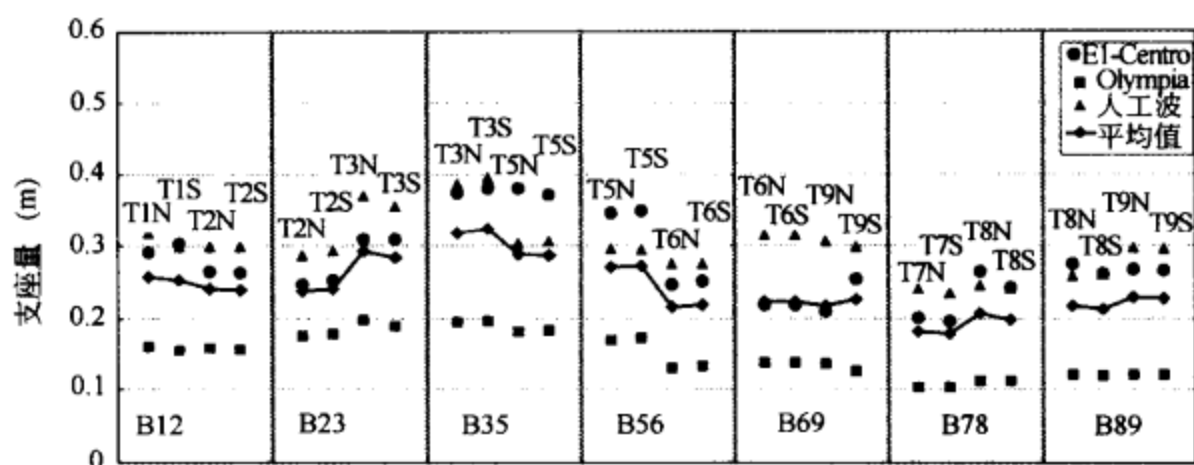


图 26-7 X 方向罕遇地震作用下各连廊隔震支座最大变形

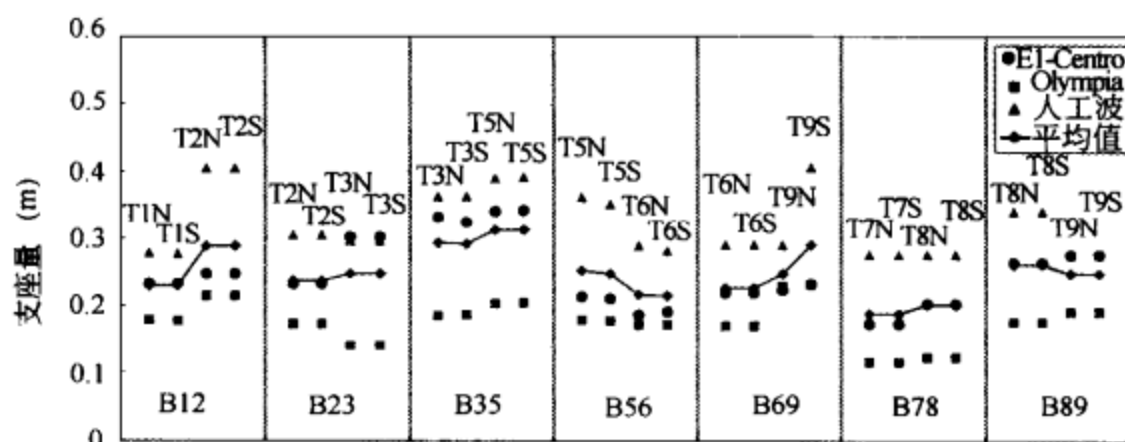


图 26-8 Y 方向罕遇地震作用下各连廊隔震支座最大变形

地震作用下，隔震支座的最大竖向地震效应为重力荷载代表值的 22.2% (T2N, Petrolia 波)，最大平均值为 16.2% (T2N)；罕遇地震作用下，隔震支座的最大竖向地震效应为重力荷载代表值的 126.7% (T2N, Petrolia 波)，最大平均值为 92.3% (T2N)。可见，隔震支座有可能进入受拉状况，因此，需要选择均有一定抗拉能力的 FPB 支座。

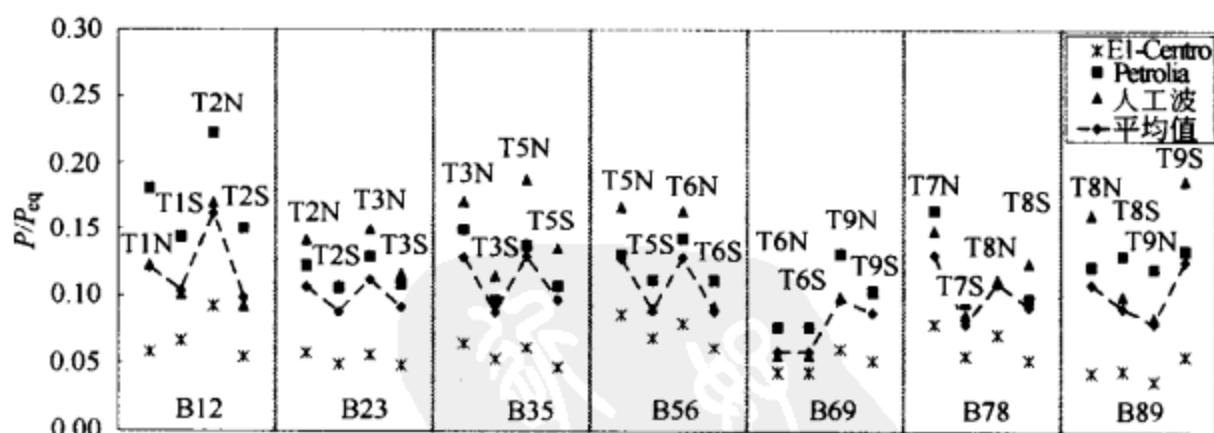


图 26-9 竖向多遇地震各隔震支座最大竖向效应

(2) 连廊竖向地震效应分析

(3) 隔震系统对主体结构的影响分析

① 对主体结构自振特性的影响

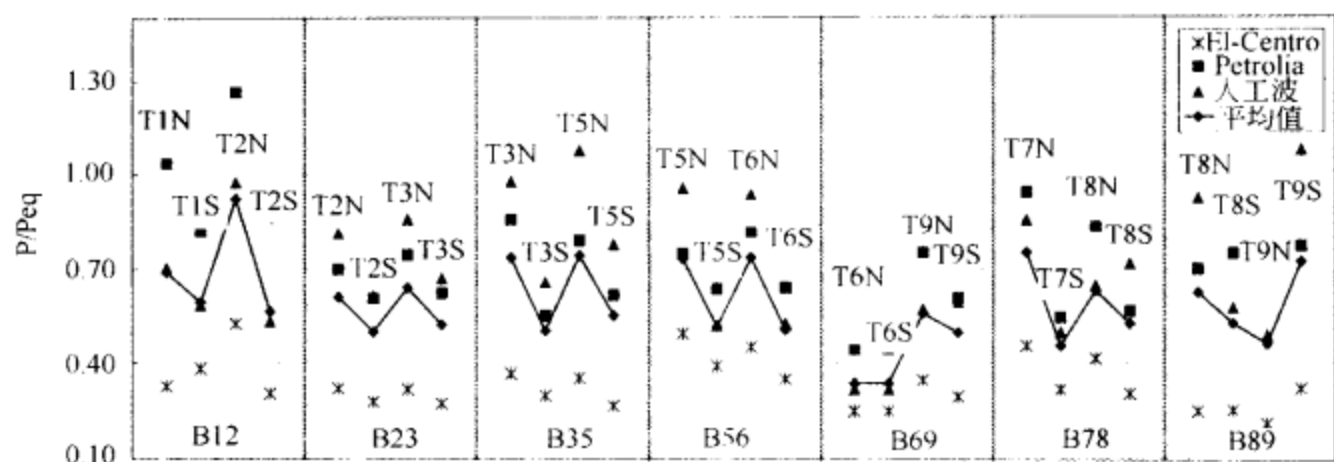


图 26-10 竖向罕遇地震各隔震支座最大竖向效应

表 26-2 所列为在有/无连廊情况下，主体结构前三阶自振特性的对比。可以看出，由于采用了弱连接方式，连廊对主体结构的刚度及质量贡献非常有限，因此对于主体结构的自振特性亦基本没有影响。但是值得说明的是，由于采用了隔震支座，有连体与无连体结构相比，振型出现顺序有所不同，其前 21 阶均为各连廊结构及其相互组合的平动振型，从第 22 阶才逐渐出现主体结构的振型。

有连廊及无连廊主体结构周期对比

表 26-2

| 形式及编号 | | 结构名 | T1 | T2 | T3 | T5 | T6 | T7 | T8 | T9 |
|-------|---|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 无连体 | 1 | | 1.37 | 1.33 | 1.27 | 1.30 | 1.30 | 0.80 | 1.25 | 1.42 |
| | 2 | | 1.11 | 1.09 | 1.11 | 0.95 | 1.01 | 0.71 | 1.06 | 1.07 |
| | 3 | | 0.83 | 1.03 | 1.04 | 0.91 | 0.92 | 0.63 | 0.90 | 0.88 |
| 有连体 | 1 | | 1.37 | 1.33 | 1.28 | 1.30 | 1.30 | 0.80 | 1.25 | 1.42 |
| | 2 | | 1.11 | 1.09 | 1.11 | 0.95 | 1.01 | 0.71 | 1.06 | 1.07 |
| | 3 | | 0.83 | 1.04 | 1.05 | 0.91 | 0.92 | 0.63 | 0.90 | 0.88 |

②连廊对主体结构层剪力的影响

下面对有连廊结构与无连廊结构主体结构层剪力及基底剪力进行对比分析，考察隔震后连廊结构对主体结构的影响。为了节省篇幅，仅给出三条波平均值的分析结果。

由图 26-11、图 26-12 可以发现，与无连体结构相比，多遇及罕遇地震作用下连廊的存在对主体结构其所在层的层剪力有微小的减小或增大作用，但均未超过 6%；可见连体结构对主体结构有一定的影响，但由于采用了隔震措施，上述影响有限。

如图 26-13、图 26-14 所示为有连廊与无连廊结构基底剪力的比值，其中 T2 与 T3、T7 与 T8 均为双塔楼结构。可以发现，与无连体结构相比，多遇及罕遇地震作用下主体结构的基底剪力均有所减小，这表明，隔震支座的设置增大了整体结构的阻尼效应，因而减小了整体结构的地震响应。

(4) 采用隔震支座后的其他相关问题

①主体结构及连廊结构的结构设计方法

由以上计算及分析结果可以看出，在多遇及罕遇地震作用下，拟采用的隔震支座均可以

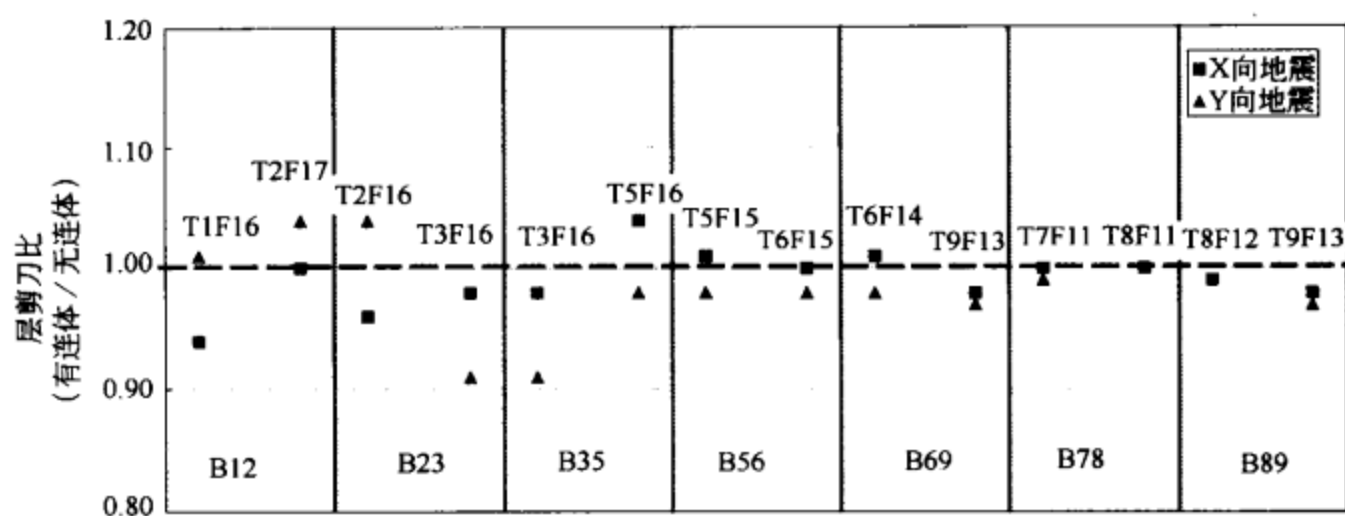


图 26-11 有/无连廊多遇地震主体结构连廊位置层剪力比

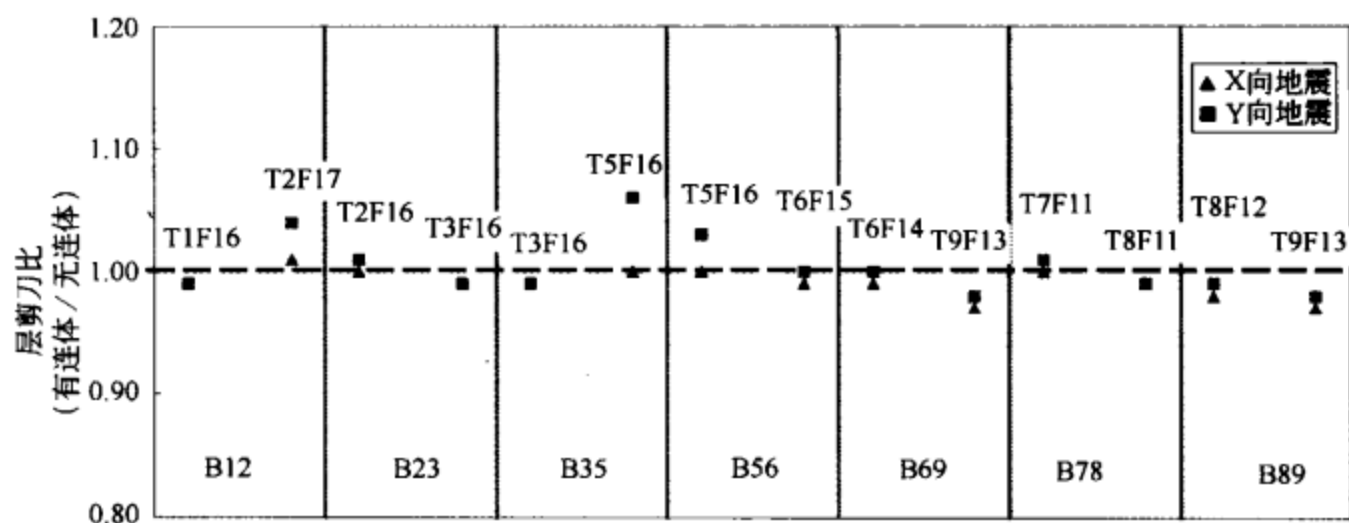


图 26-12 有/无连廊罕遇地震主体结构连廊位置层剪力比

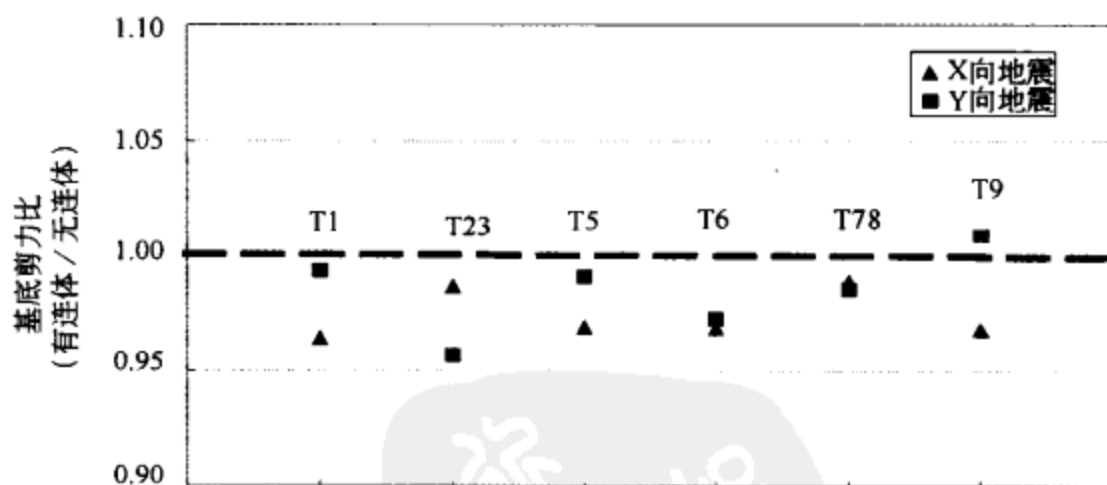


图 26-13 有/无连廊多遇地震主体结构基底剪力比

满足设计要求，同时也并未对主体结构产生过大的影响。但是考虑到工程及各塔楼结构的复杂性，对于主体及连廊结构的结构设计采用如下方式：

a. 主体结构

如前所述，空中连廊与主体结构连接时需要移除部分框架柱，必然导致此处楼层的刚度

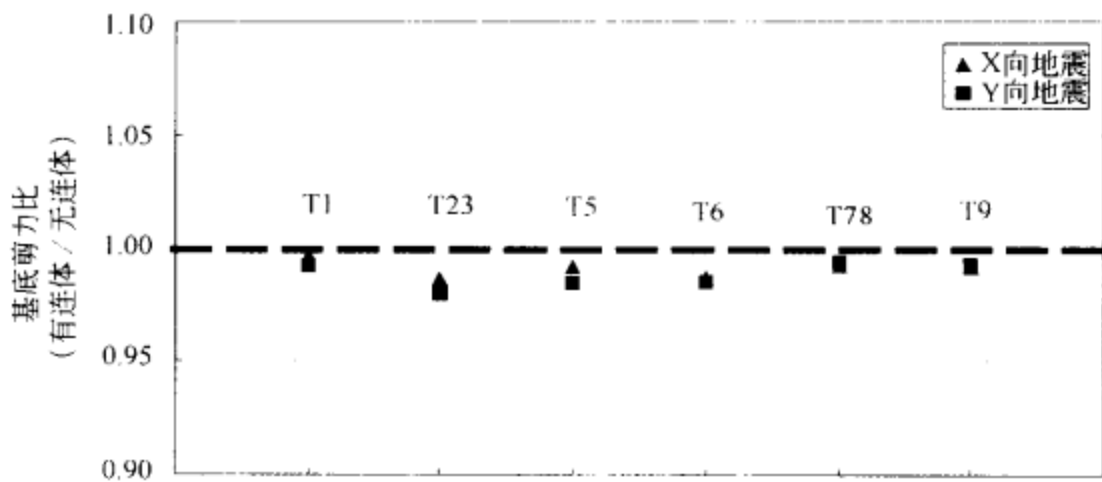


图 26-14 有/无连廊罕遇地震主体结构基底剪力比

变化，因此设计中将此位置楼层的地震剪力放大 15% 后再进行具体构件强度设计。同时，对于支撑隔震支座的主体结构局部构件，设计中采用大震不屈服的性能水准进行设计，并根据大震时程分析的内力进行构件验算。

b. 连廊结构

为了完全发挥隔震支座的效能，显然对于连廊钢结构应适当提高其抗震性能目标。因此在该部分的结构设计中采用中震弹性的抗震性能目标进行设计。

② 防撞及防跌落措施

本工程的连体结构设置位置较高，为了避免在极端情况下隔震支座发生超过设计能力的变形，并与主体结构发生强烈撞击或发生跌落，需要采取相应的防撞及防跌落措施。具体措施如下：

a. 主体结构上，在连廊主梁相应位置设置 50mm 厚橡胶垫，并在对应连廊主梁端部焊接端板，以增大在主梁与橡胶垫发生碰撞时的接触面积；

b. 连廊每侧隔震支座均采用凹形布置，使得连廊与两个塔楼连接的四个隔震支座相互之间自然形成一具有限位功能的闭合区域；此外在每个支座位置的主体结构框架梁（柱）与空中连廊桁架主梁之间均设置一道安全拉索，以加强连廊的防跌落安全储备。

③ 支座复位措施

FPB 隔震支座滑动面为弧面，因而自动具有一定的复位能力。同时，为了日常的维护方便，设计中还预留了必要的工作空间。

第27章

体育场馆

随着我国经济水平的提高，居民对体育文化设施的需求逐步增大，同时我国举办的大型国际性的体育活动、文化活动、商业活动也日益增多，这就使得各类体育场馆工程及大型公共建筑的兴建数量也逐渐增多。从结构设计角度来，为了满足这些大型公共建筑功能要求，就需要我们提供既安全又经济的结构方案。

目前体育馆结构多采用混凝土框架-钢屋盖、混凝土框架-钢支撑-钢屋盖、混凝土框架剪力墙-钢屋盖等结构体系。从计算角度讲，主要的问题有：整体结构力学属性的模拟、大跨屋盖支座力学属性的模拟、预应力索的模拟、温度应力的模拟以及混凝土和钢构件计算长度的选取或确认等。

本章主要针对大型体育场馆结构，从计算机软件的角度介绍结构分析设计的软件实现方法及采用 SAP2000 进行结构设计时需要注意的一些问题。

本章涉及的范围较宽，限于篇幅，对软件操作流程不做详细描述，如果读者对本章例题的软件操作部分不清楚，请参阅前面的相关章节。

27.1 体育场馆结构的计算

一个工程结构的计算过程，按步骤可以分为计算模型的建立、模型的分析、结构构件的设计三个步骤。本节将对这三个方面分别进行叙述。

27.1.1 计算模型的建立

计算模型建立的过程就是从几何和力学属性上模拟结构及其所承受荷载的过程。在 SAP2000 中，结构的几何关系可以采用其本身的图形平台建立，也可以采用其他软件建立并导入到 SAP2000 中。采用 SAP2000 本身的图形平台可以非常方便的完成整个几何关系的确定过程。在建立模型时，需要充分利用 SAP2000 提供的各种方便的建模命令，例如：编辑菜单中的带属性复制、拉伸、移动、剪短/延长框架命令，视图菜单下的只显示选择对

象命令, 以及各种选择命令和组的操作等, 为快速建立复杂模型提供了强有力的支持。用户可以在 SAP2000 的图形界面上直接对模型几何属性进行查看和修改。例如, 右键点击某个节点, 在弹出的点信息对话框中, 可以直接修改该节点的编号、节点坐标。用户可以在创建模型的同时赋予构件相关的力学属性, 也可以在建立几何模型之后, 修改模型中的构件尺寸或定义一些特殊的属性。对于体育场馆之类的大跨度结构而言, 需要模拟的构件主要有楼板、梁、柱、剪力墙、支撑、支座、屋盖结构杆件和索等。下面将分别叙述这些构件的模拟方法:

(1) 楼板的模拟

模拟楼板和剪力墙时, 需要采用 SAP2000 中的属性为壳的面对象。SAP2000 中的壳属性面对象的类型又分为壳、膜、板。壳既有面内刚度、又有面外刚度, 模拟剪力墙和楼板时一般采用壳。膜只有面内刚度, 没有面外刚度。SAP2000 与 ETABS 中膜属性相同, 但是 ETABS 中为膜提供了自动剖分和自动导荷载的算法, 而 SAP2000 中的膜不能进行此类分析, 所以其使用范围比 ETABS 的膜小得多, 实际上对于只有面内刚度的结构单元, 如索膜结构中的膜对于 SAP2000 是适用的。板只有面外刚度、没有面内刚度, 这种属性主要针对桁架结构中弦杆相连的板。桁架结构中, 如果工程师希望上弦杆件轴力不由与其相连的楼板承担, 即可采用板属性的单元。

在 SAP2000 V10 中, 模拟普通的混凝土楼板时, 一般采用膜属性或壳属性的单元。楼板在初步整体计算时, 可以不进行剖分, 但在进行构件设计时, 需要对楼板进行剖分, 剖分之后, 可以认为楼板上的荷载通过剖分生成的节点“传递”到了次梁或框架梁上。这个过程相当于是采用几个集中荷载模拟连续荷载。剖分细度由工程师仔细确定, 准则是: 当更细的剖分不会影响梁的配筋量时, 即可认为剖分细度足够。采用壳属性的单元模拟楼板时, 框架梁的刚度不再需要进行人为放大, 并且在 SAP2000 V10 中增加了壳单元导荷载功能, 可根据需要剖分单元。

体育馆结构中的看台板一般对整体刚度的影响很小, 在整体建模时可以作为荷载施加在看台斜梁上。这些看台板对看台斜梁的侧向稳定有一定帮助, 在整体分析时, 如果没有这些看台板, 看台斜梁可能会出现很多局部振型, 工程上的做法有下面两种: 一是可以在看台斜梁之间人为建立一些防止局部振型的单元, 这些单元的刚度尽量取小; 二是直接增大斜梁的面外刚度, 考虑看台板对斜梁面外刚度的贡献, 笔者推荐后者。

(2) 墙的模拟

剪力墙要采用壳属性的单元模拟。与 ETABS 不同的是, SAP2000 在默认情况下对面对象不提供边约束 (EDGE CONSTRAINT), 因此, 为保证计算精度, 需要在模型建立之后, 选择所有的面对象 (包括楼板、斜板、墙), 对这些面对象指定边约束。

默认情况下, 所有的面对象是不进行剖分的。为提供侧向荷载下的分析精度, 对模拟剪力墙的面对象一般也需要进行剖分。剖分细度的准则是: 当更细的剖分对结构侧向刚度没有明显影响时, 即认为剖分细度足够。侧向刚度可以通过侧向力下的结构侧移观察到。一般而言, 对普通层高的建筑结构, 剖分尺寸控制在 1~2m 时, 基本可以满足工程精度的要求。在初步分析时, 可以不进行剖分, 这样可以明显减少计算时间。

目前的抗震设计中, 允许连梁在小震下出现明显的开裂和刚度退化。在 SAP2000 中, 为反映连梁的刚度退化, 需要选择模型连梁的壳单元, 并指定壳单元的刚度修正。

(3) 梁、柱、支撑、屋盖构件的模拟

一般采用线单元（框架对象）模拟梁、柱、支撑等一个方向上尺寸较大、另两个方向上尺寸较小的结构构件。需要注意的是，建立模型时梁和斜梁的插入点默认为截面形心，如图 27-1a) 所示。因此，在建立模型之后，需要选择所有的梁和斜梁，将其插入点指定为 8 (top center)，即梁截面的顶部中点连接到节点处。修改后的梁、斜梁位置如图 27-1b) 所示。



图 27-1 梁的插入点

当采用壳属性的面对象模拟与框架梁相连的楼板时，框架梁不需要再进行刚度放大。对于屋盖结构，当杆件两端为铰接时，可以通过构件端部释放来实现铰接。某些情况下，构件端部设置为铰接时，可能在局部出现机构。为避免这种情况的发生，也可以通过构件抗弯和抗扭刚度地修正来模拟铰接，例如可将构件抗弯和抗扭刚度修正为原来的 1%。

SAP2000 为用户提供了很多方法来对结构属性进行控制，上面提到的刚度属性修正就是其中的一例。构件的属性可以在构件截面定义处完成，也可以对所选中的一批构件完成。在既有建筑结构的抗震加固工程中，会遇到混凝土保护层碳化的模拟问题。例如，某柱截面为 $500\text{mm} \times 500\text{mm}$ ，混凝土碳化深度为 15mm ，保护层厚度为 25mm ；为在构件设计时不考虑碳化区的强度，将柱截面设置为 $470\text{mm} \times 470\text{mm}$ ，同时将保护层厚度设置为 10mm ；为保证构件刚度与原截面基本一致，再对该截面的各个刚度值乘以相应的放大系数，使之与原来的 $500\text{mm} \times 500\text{mm}$ 截面的刚度基本一致；同时将该截面的质量也进行相应放大，做到与原构件保持一致。

(4) 屋盖结构的模拟

屋盖结构的模拟包括几个方面，如屋面板的模拟、索的模拟、支座的模拟等等。下面分别进行讨论。

对于轻屋盖，目前在整体计算时一般不考虑屋面板的作用。屋面荷载可以通过如下几种方式施加：对于桁架体系，一般将屋面荷载（如杆件自重、风荷载、雪荷载、活荷载、悬挂、装饰等）手工折算出来，施加在檩条上；对于网架、网壳等体系，无法方便地直接施加在杆件上，在 SAP2000 中，利用本身的图形平台进行屋面荷载模拟，需要在计算模型中采用刚度很小或为零的面对象模拟实际的屋面板，并将屋面荷载施加在这些面对象上。对于某些荷载，如螺栓球自重，其与结构整体自重有一定相关性，而不易通过几何模型模拟其自重时，可以通过增大屋盖杆件自重来模拟，如将杆件所用的材料自重放大 15%~20%，也可在屋盖杆件上施加一定比例的自重荷载。

对于重屋盖，屋面板一般与上弦杆件共同工作。这时可以采用壳属性或板属性的面单

元模拟屋面板。当屋面板为混凝土板时，需要注意对施工过程的控制，在施工过程中，混凝土板浇筑之后、未形成一定的刚度和强度之前，混凝土板并不能参与整体刚度，这一点与整体计算模型不一致，因此需要进行施工过程验算（与组合梁的验算类似）。另外，由于混凝土板正常工作时可能带有裂缝，对于这种现象可以通过对混凝土板的刚度折减来模拟。

在体育场馆结构或其他大型公共建筑结构中，经常用到张弦桁架、索塔结构等。这些结构体系中，索可以采用 SAP2000 中的索单元模拟，也可以通过框架单元模拟。对于张弦桁架等结构体系，多数情况下索的预拉力并不大，其作用仅是为了在施工中绷紧索并保证上吸风作用下索不退出工作；另外，这些索的作用类似于桁架结构中的下弦拉杆，其几何非线性行为不明显。采用框架单元模拟索时，首先定义一种索的材料属性，然后定义一个实心圆形截面模拟索截面。可以对索指定两端铰接或将其抗弯抗扭刚度修正得较小。事实上，由于索的几何特性，即使不设置铰接，其抗弯和抗扭刚度对分析结果一般也没有明显影响。也可以对索指定拉压比限定，当采用拉压比限定时，需要将分析工作设定为非线性分析才能起作用。事实上，通过分析结果可以较为明确地查看各种荷载下，尤其是上吸风作用下索是否退出了工作，因此当确认索在荷载作用下不会退出工作时，可以不对其指定拉压比限定，并通过线性分析工况来完成分析。索的预拉力可以通过负温度施加，索预拉力荷载可以单独作为一种荷载工况，也可以直接对索施加荷载工况为恒载的负温度荷载。索初始拉力的确定有一个试算的过程，首先对索施加负温度荷载，进行分析之后查看索实际内力值是否达到要求。如不满足，则修改负温度值，重新施加负温度荷载。

(5) 支座模拟

支座模拟是体育馆结构中较为复杂且较为关键的一个方面。在支座模拟时，首先要明确支座本身的力学属性，多数的支座允许在跨度方向上转动，按平动自由度支座可分为铰接、滑动、弹性固定（即弹簧连接）等类型。支座的铰接和滑动可以通过对柱子指定顶部的弯矩和剪切释放来实现。当支座为弹簧连接时，可以采用连接单元模拟弹簧，通过连接单元的刚度值反映弹簧支座的刚度。

模型建好后，便需要对模型施加荷载。体育馆结构涉及的荷载有恒载、活载、风载、地震荷载、温度荷载等。与一般高层建筑结构不同的是，某个风荷载工况中可能同时包括水平风荷载和屋盖的竖向风荷载，而且要考虑温度荷载的作用。

对于风荷载，可以手工计算出其各个高度的荷载值并施加在外围构件和屋盖上，也可以通过虚面的方法施加，即在结构外围受风面设置刚度极小或为零的面对象，然后对这些面对象指定风压系数。温度荷载不能自动参与荷载组合，需要手工定义或修改荷载组合，将温度荷载工况包括在荷载组合中。

27.1.2 结构模型的分析

结构计算模型建立之后，需要定义或检查分析工况、荷载组合，然后运行分析并查看分析结果。本节主要讨论体育场馆结构分析中常见的几个问题。

(1) 分析工况的定义

对于带有大跨钢屋盖的结构，其振型分析时常出现大量屋盖本身的局部振型，导致需要

.....

计算大量振型才能满足整体振型质量参与系数的要求。对于这种情况，建议采用 Ritz 向量法进行振型分析。

某些情况下，可能需要考虑施工过程才能准确地确定最终的结构内力状态。例如，在抗震加固时新增设剪力墙，新增加的剪力墙只承担了其构件自重、附加恒载和活载，而不承担结构自重。

(2) 分析结果的合理性

工程师需要仔细查看分析过程对话框、分析运行日志和分析结果，以保证分析结果的合理性。分析过程中的信息和警告被存储于一个与计算模型名相同的“.log”文件中，当该文件中出现“THE STRUCTURE IS UNSTABLE OR ILL-CONDITIONED !!”时，表示该分析结果很可能是不合理的。造成这种警告的一般原因是节点或构件在某个自由度上有自由度而没有刚度，例如结构几何可变体。在结构 $P-\Delta$ 分析或大位移分析不收敛时，也会出现这种警告，如图 27-2 所示。

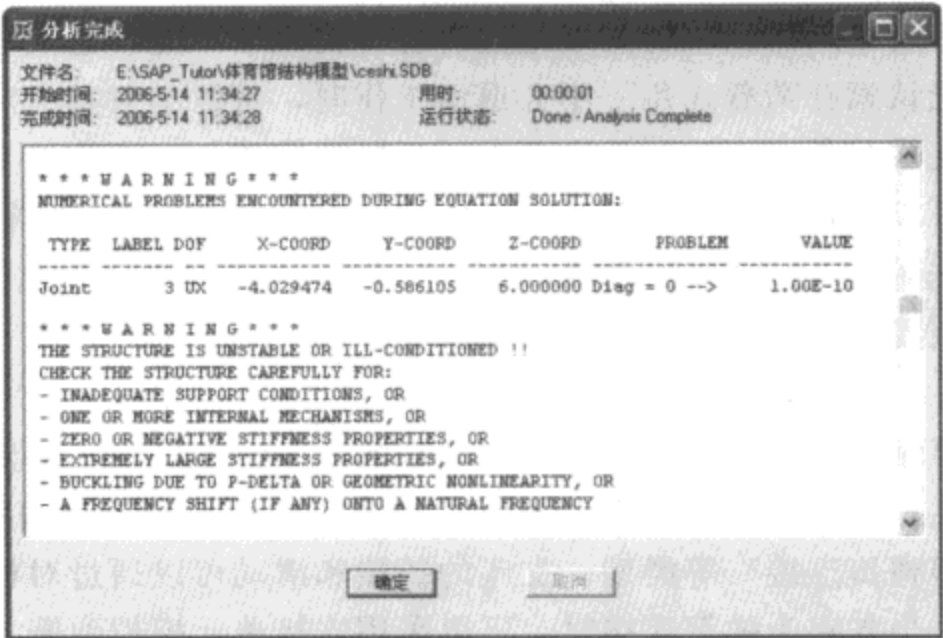


图 27-2 分析完成示意图

当某个自由度上刚度为零或小于零时，程序根据需要将这个刚度值设置为一个极小值，因此这个位置处出现一个极大的位移。通过查看结构变形图，一般可以判断出现刚度奇异的位置。通过查看分析运行日志的警告中节点编号和位置也可找到出现问题的地方。

(3) 分析结果的使用

由于 SAP2000 本身没有楼层的概念，因此计算中不考虑建筑结构规范中关于楼层方面的内力调整，例如：薄弱层地震内力放大、框剪结构中框架承担的最小地震剪力调整、剪重比调整等。这些就需要工程师自行判断并针对构件设计内力进行调整。

由于没有楼层概念，与楼层相关的整体分析结果也需要通过表格或图形自行统计和查看，例如层间位移、层间剪力等。采用广义位移、截面切割等工具可以简化这种操作。SAP2000 的分析结果可以方便地输出到 Excel、Access 等文件中，工程师也可以针对这些表格中的数据进行二次处理，提取所需要的计算结果。

27.1.3 结构构件的设计

SAP2000 仅对线对象进行设计,对楼板、墙、斜板不进行设计。下面讨论钢构件和混凝土构件的设计。

(1) 钢构件设计

体育馆结构中,屋盖一般由钢构件组成。可以采用 SAP2000 的钢构件设计功能进行设计。在构件设计之前,需要检查设计首选项和覆盖项是否合适。

SAP2000 中构件计算长度通过两个参数反映,即无支撑长度比和有效长度系数,其具体含义参见前面的章节,构件计算长度系数即为这两个参数的乘积。一般情况下,屋盖构件的这两个参数均为 1.0,即计算长度系数默认为 1.0。如果需要修改计算长度,可以通过这两个参数进行修改。对于檩条,不需要考虑其面外稳定问题时,可以将其覆盖项中的次方向无支撑长度比设置为一个小值,如 0.1。

SAP2000 覆盖项中的**是否轧制截面? (Is Rolled Section?)**一项默认为 **Yes**,即默认采用轧制截面,当采用焊接截面时,需要修改此项为 **No**。例如,对于管结构,当采用焊管时,即需要将此项改为 **No**,这样程序才能将截面判别为 B 类截面。

如果要进行构件优化设计,则需要在分析之前就定义自动选择截面。优化设计时,当进行一遍设计之后,点击**【设计】>【钢构件设计】>【校核分析和设计截面】**命令,可以知道本次优化设计中,改变了多少个构件截面。如果发现本次优化设计中仍有一批构件截面被改变了,则需要重新运行分析并重新设计。

对于索,可以直接提取其构件设计内力来进行设计。例如,取索的破断力,除以索的最大设计内力,得到的系数大于等于安全系数(如 2.5)即可。

(2) 混凝土构件设计

对混凝土梁柱,可以采用 SAP2000 的构件混凝土框架设计功能进行设计。SAP2000 可以根据其抗震等级进行构件级别的内力放大。如果需要的话,与楼层相关的整体地震内力调整需要由工程师在 SAP2000 中自行完成。

混凝土柱的设计也涉及计算长度问题。由于体育馆结构和其他大型公共建筑的体系较为复杂,工程师需要确认程序默认采用的柱计算长度是否正确。采用图形方式查看无支撑长度比和有效长度系数可以较为方便的查看计算长度的选取。点击**【设计】>【混凝土框架设计】>【显示设计信息】**,在弹出**显示混凝土设计结果**对话框中的设计输入下拉菜单中,选择 **Unbraced Length L-ratio** (无支撑长度比)和 **Effective Length K-Factors** (有效长度系数),点击**【确定】**后可以在图形上方便地查看程序自动判别的这两个系数是否合理。

在既有体育馆的加固工程中,由于柱截面一般较小,其计算长度对柱配筋影响较为明显。对于看台斜梁下的柱子,由于既有体育馆结构中看台斜梁一般较高,柱子的计算长度中应扣除看台斜梁的高度,且柱设计内力最好是取自梁底。而程序对于柱与斜梁相连的情况,根据连续性原则自动生成端部偏移量为零,而不是所希望的梁高。这时,需要工程师对该柱的端部偏移,该端部偏移长度为梁高,这样,在进行构件设计时,程序会取柱底至梁底的高度为柱的长度,设计内力也只会取至梁底而不是柱顶节点处。

注意: SAP2000 的构件内力显示和构件设计内力会取至端部偏移的位置。默认情况下,

SAP2000 中的端部偏移为 0，这一点与 ETABS 正好相反；ETABS 中，默认情况下端部偏移位置取至梁底（对于柱）和柱边（对于梁）。如果用户需要修改设计内力的取值位置，不希望按照节点区内的内力进行构件设计，可以修改端部偏移长度。

27.2 体育场馆模型示例

27.2.1 工程概况

以某体育馆抗震加固工程为例，介绍 SAP2000 在体育馆结构中的应用。

某体育馆，平面为圆形，绕中心轴极对称，共 48 榀。模型如图 27-3a) 所示。屋盖为双层车辐式悬索。图中长度单位为 m。场地类别 II 类，设计地震分组为 1 组。抗震设防烈度为 7 度。

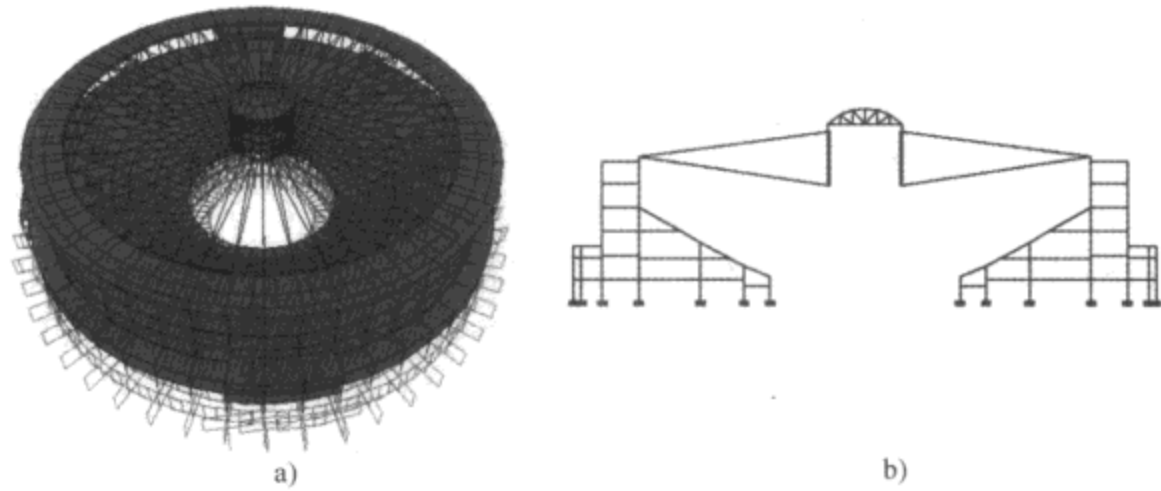


图 27-3 模型示意图
a) 三维视图；b) 部面图

27.2.2 创建计算模型

首先，在 SAP2000 中建立整体模型，采用柱面坐标进行建模；采用框架单元模拟梁、柱、看台斜梁；采用壳单元模拟楼板，看台板作为荷载施加在看台斜梁上；采用等截面的实心圆截面模拟屋面双层悬索；采用负温度模拟索的预拉力；在分析中考虑几何非线性。建立模型如图 27-5 所示。图 27-3b) 为模型中某一剖面。为更清楚地显示该结构的布置，图 27-4 给出了该模型的 1/4 部分，图中未显示楼板和施加荷载用的屋面板。

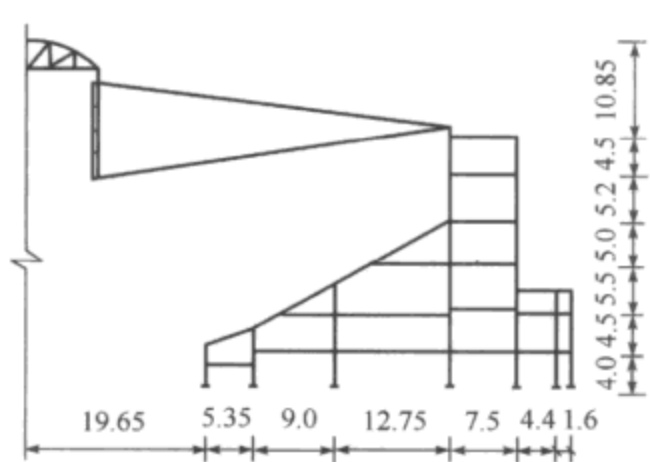


图 27-4 1/4 剖面详图

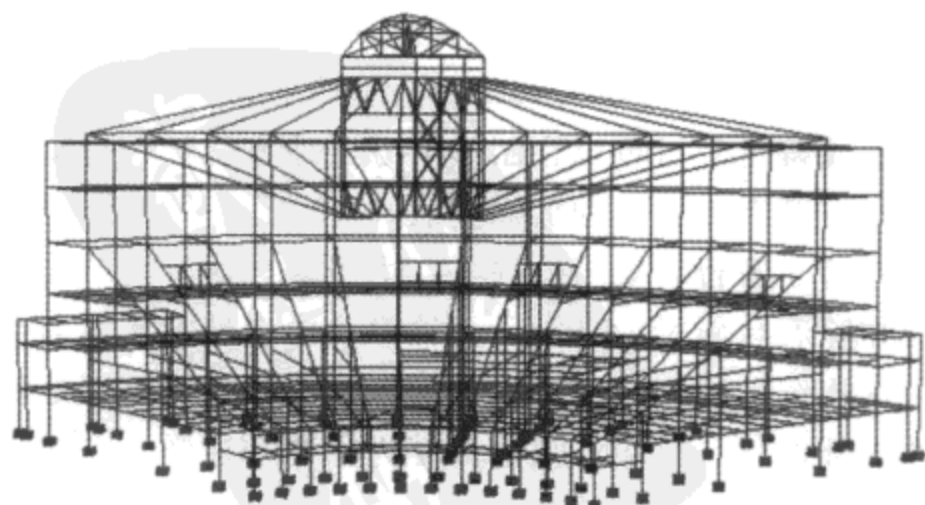


图 27-5 工程模型

楼板荷载作为面荷载均布于楼板上；外墙和内隔墙的荷载作为线荷载施加在梁上；屋面荷载作为面荷载均布于屋面板上。以恒载工况对索施加负温度荷载，达到索内力实际值。通过【定义】>【质量源】命令，将质量算法设定为 100%恒载加 50%活载。

27.2.3 定义分析工况

为在反应谱分析中真实模拟结构状态，定义一个名称为 MASS 的非线性分析工况，定义方式如图 27-6 所示。此工况用于模拟重力荷载代表值下的结构状态。将 MASS 分析工况的非线性参数设置为考虑几何大变形。点击图中其他参数区域的非线性参数右侧的【修改】/【显示】按钮，弹出如图 27-7 所示的非线性参数对话框。

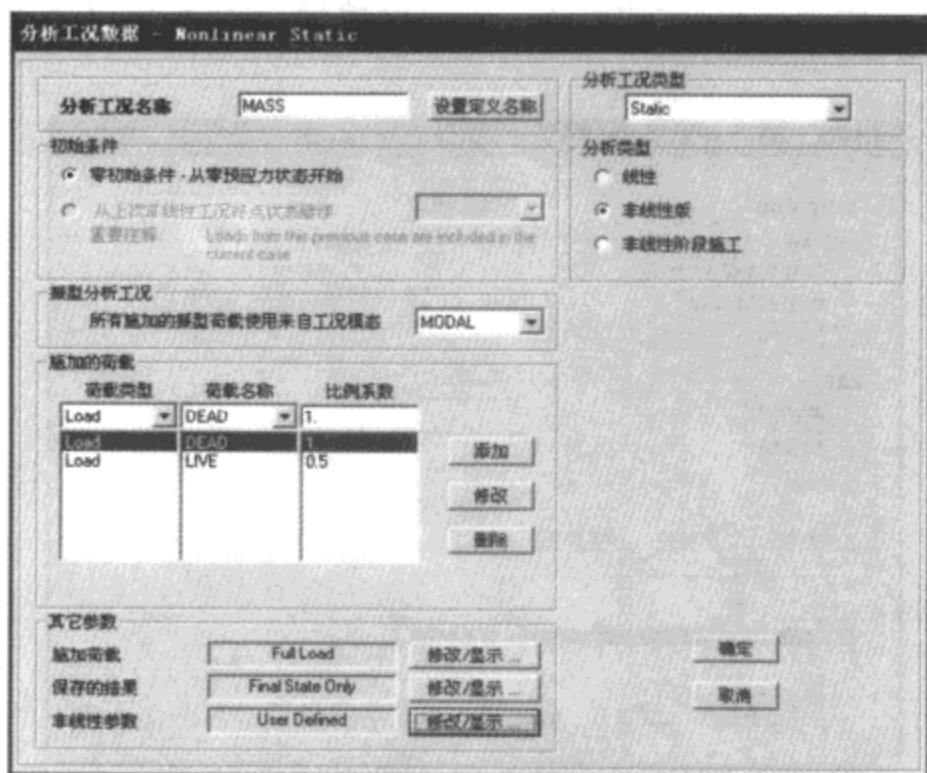


图 27-6 分析工况数据

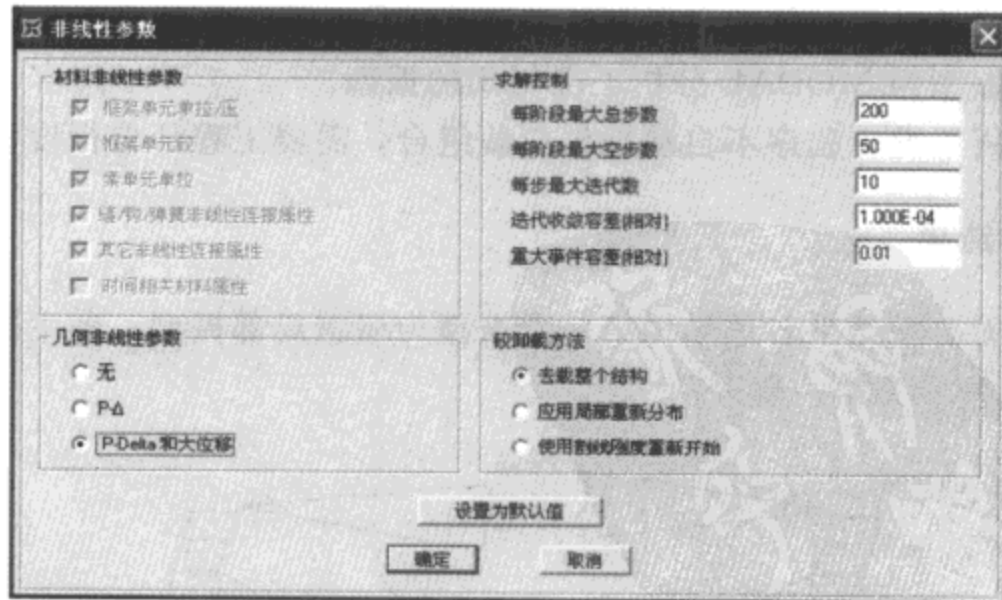


图 27-7 非线性参数

点击选择图 27-7 所示对话框几何非线性参数区域的 **P-Δ** 和 **大位移** 选项。将恒载工况和活荷载工况的分析类型改为非线性的，并考虑几何大变形的影响。具体操作是，在恒载或活荷载分析工况数据对话框的非线性参数区域中，点击 **修改/显示** 按钮，在弹出的非线性参数对话框的几何非线性参数区域中，选择 **P-Δ** 和 **大位移**。

该分析工况从 MASS 分析工况得到刚度开始采用 Ritz 向量法进行分析，对程序默认的振型分析工况进行修改，初始向量取为 **UX**、**UY** 及 **RZ**。为满足有效质量系数大于 90% 的要求，将振型数设置为 90 个，振型分析的名称仍为 MODAL，参数设置如图 27-8 所示。为考虑水平地震效应和扭转效应，将 **Accel UX**、**Accel UY**、**Accel RZ** 设置为初始迭代向量；为考虑竖向地震效应，将 **Accel UZ** 也设置为初始迭代向量。目标动力参与系数均设置为 90%。注意，需要在振型分析完成之后，才能根据振型质量参与系数确定所采用的振型数量是否足够。

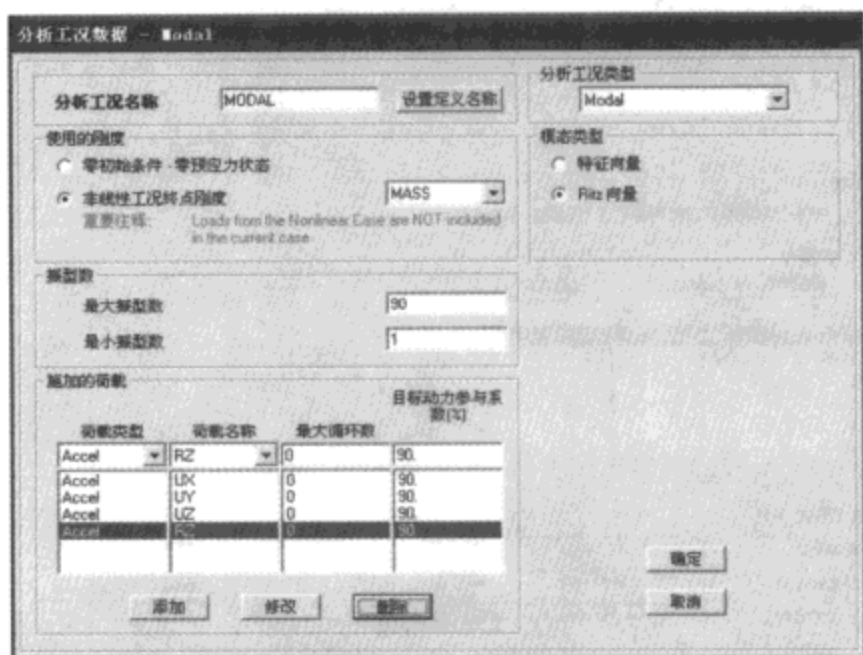


图 27-8 分析工况数据

定义反应谱函数和反应谱分析工况用于计算地震力。

对该结构进行弹性时程分析，以考察结构薄弱部位。采用振型叠加的线性时程分析方法进行分析。采用的振型为 MODAL 分析工况得到的振型。

对于非线性分析工况，程序不自动提供荷载组合，需要工程师自行设置。

27.2.4 查看分析结果

运行分析并查看分析结果。该结构第一阶振型为屋盖局部振型，各主振型之间还夹杂有局部振型。图 27-9 所示为第一阶平动主振型。

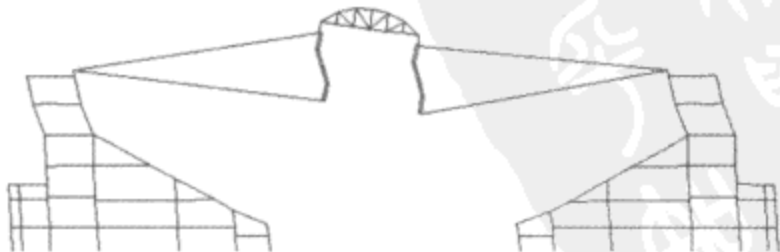
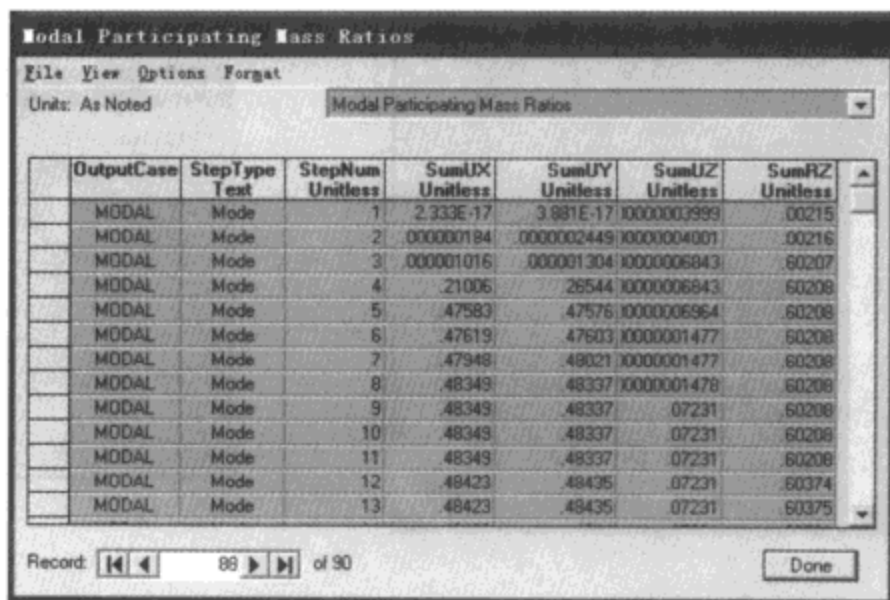


图 27-9 第一阶平动主振型

点击菜单【显示】>【显示表格】，在弹出的选择输出表格对话框中，选择【分析结果】>【结构输出】>【振型信息】>【表格】：振型参与质量系数一栏，在弹出的表格中，查看 SumUX, SumUY, SumRZ 的最下一行的数值是否大于 0.9，以判断有效质量系数的要求是否满足，如图 27-10 所示。



| OutputCase | StepType | StepNum | SumUX Unitless | SumUY Unitless | SumUZ Unitless | SumRZ Unitless |
|------------|----------|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| MODAL | Mode | 1 | 2.333E-17 | 3.981E-17 | 1000000.3999 | .00215 |
| MODAL | Mode | 2 | .00000184 | .0000002449 | 1000000.4001 | .00216 |
| MODAL | Mode | 3 | .000001016 | .000001304 | 1000000.6843 | .60207 |
| MODAL | Mode | 4 | .21006 | .26544 | 1000000.6843 | .60208 |
| MODAL | Mode | 5 | .47583 | .47576 | 1000000.6964 | .60208 |
| MODAL | Mode | 6 | .47619 | .47603 | 1000000.1477 | .60208 |
| MODAL | Mode | 7 | .47948 | .48021 | 1000000.1477 | .60208 |
| MODAL | Mode | 8 | .48349 | .48337 | 1000000.1476 | .60208 |
| MODAL | Mode | 9 | .48349 | .48337 | .07231 | .60208 |
| MODAL | Mode | 10 | .48349 | .48337 | .07231 | .60208 |
| MODAL | Mode | 11 | .48349 | .48337 | .07231 | .60208 |
| MODAL | Mode | 12 | .48423 | .48435 | .07231 | .60374 |
| MODAL | Mode | 13 | .48423 | .48435 | .07231 | .60375 |

图 27-10 振型质量参与系数

该结构为对称结构，查看地震力下的层间位移角时，首先查看柱子的变形情况，选择变形最大的柱查看其地震力下的位移，并根据柱两端位移差与层高之比基本可以确定层间位移角。该结构在地震力下的变形如图 27-11 所示。

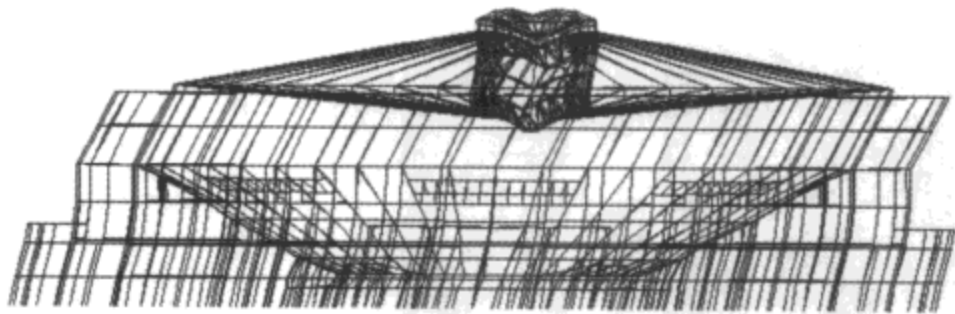


图 27-11 结构在地震力作用下的变形

可以采用截面切割查看地震作用下结构各层的层间剪力。首先显示结构在地震力下的变形图，点击【绘图】>【绘制截面切割】命令，并在变形图的各楼层层间按下鼠标左键拖出一条切割线，即弹出截面切割应力与力对话框，如图 27-12 所示。

该对话框中合力区域的力即为地震力作用下三个方向的层间剪力。计算求得剪重比，确认是否满足规范要求。也可查看结构底部反力，直接计算得到结构底层的剪重比进行校核，如果不满足规范要求，可对地震输入进行放大。

对于时程分析的结果，首先确定时程分析是否满足抗震规范 5.1.2-3 的规定，即多条地震波作用下的平均底部剪力不小于反应谱分析得到的底部剪力的 80%，单条波作用下的底部剪力不小于反应谱分析得到的底部剪力的 65%。可以通过表格方式输出时程分析结果，点击【显示】>【显示表格】命令，可以在弹出的对话框中选择底部剪力并输出。也可以通过时程结果曲线形象地输出时程分析结果。点击【显示】>【显示绘图曲线】，在弹出的绘

制函数轨迹显示定义对话框中，点击【定义绘图曲线】按钮，将弹出如图 27-13 所示的绘图函数对话框。在该对话框的选择添加函数类型下拉菜单中，选择“Add Base Functions”，并点击【区域的统计绘图函数】按钮，在弹出的基底函数对话框中，选择【基底抗剪 X】按钮。即可定制输出 X 方向底部剪力在时程波作用下的曲线，如图 27-14 所示。

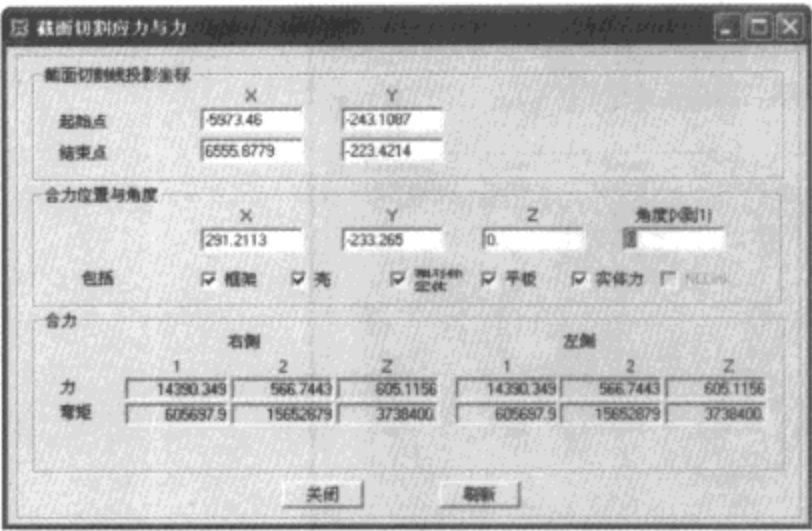


图 27-12 截面切割应力与力

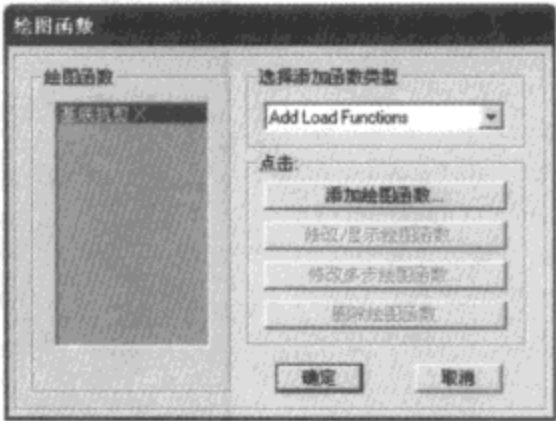


图 27-13 绘图函数

如果要考察地震波传至屋盖支座处的放大作用，可以查看时程分析的反应谱结果。先点击选择一个支座节点，执行【显示】>【显示反应谱曲线】命令，将弹出的反应谱生成对话框，如图 27-15 所示。

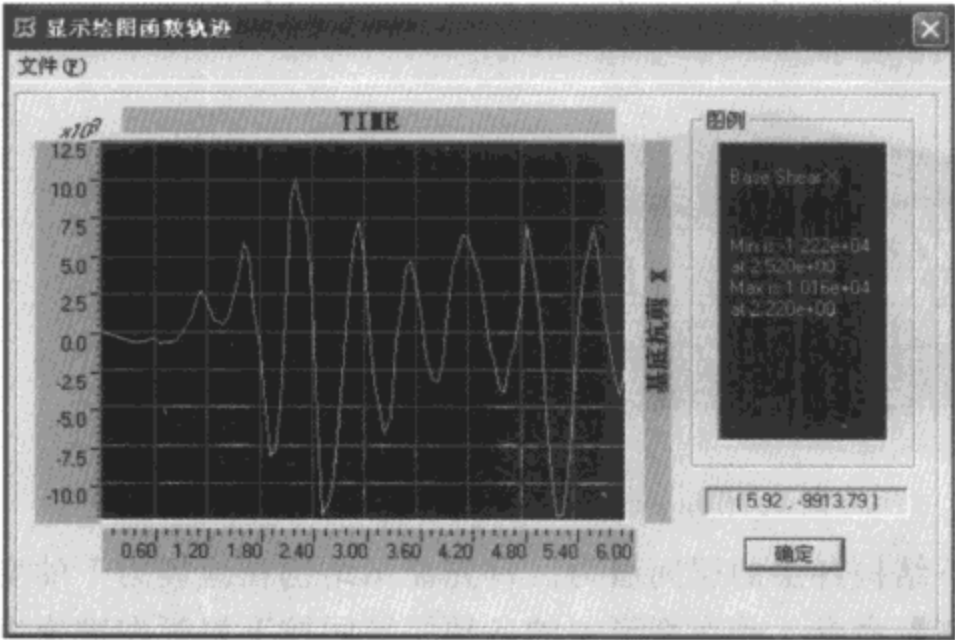


图 27-14 显示绘图函数轨迹

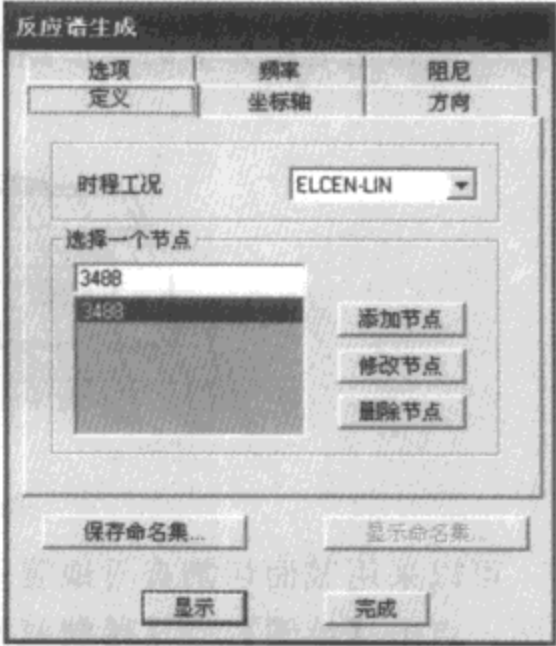


图 27-15 反应谱生成

在该对话框中设置阻尼比、地震力响应的方向等，然后点击【显示】按钮，即可显示该节点在时程波作用下的反应谱曲线，如图 27-16 所示。该曲线对应的峰值加速度与输入时程波对应的峰值加速度之比即为结构主体对地震波的放大系数。

采用时程分析结果对结构薄弱层进行判断时，可查看时程分析得到的变形图，并与反应谱分析得到变形分布规律进行对比。对时程分析得到结果明显大于反应谱分析结果的楼层和构件进行加强。也可采用时程分析的结果进行构件配筋设计。此时需要工程师自行设置荷载组合，如图 27-17 所示。

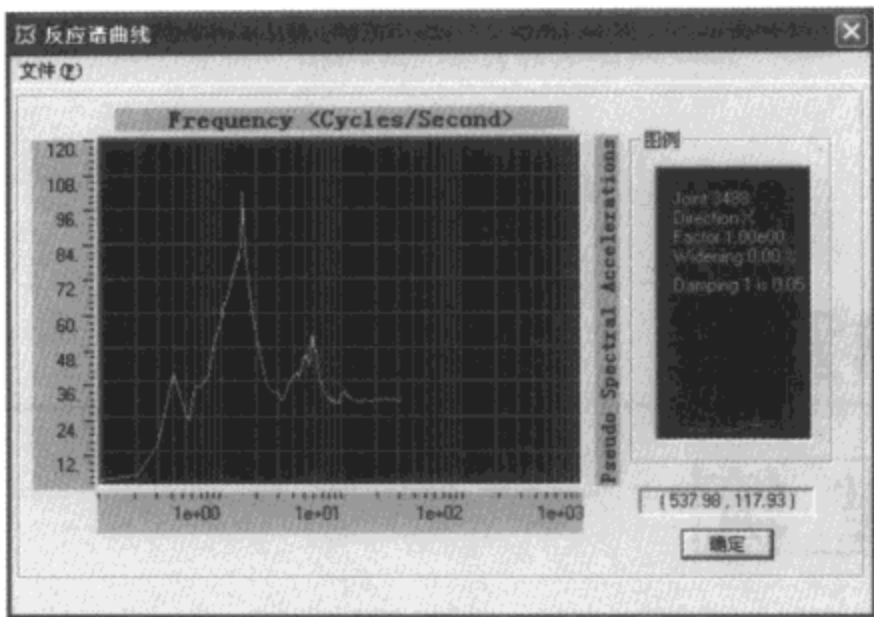


图 27-16 反应谱曲线

27.2.5 构件设计与加固

确认分析结果无误并满足规范要求后，进行构件设计，并与原设计进行对比。根据实际检测结果、计算分析结果等各种数据，确定加固部位和加固方法。如加固方法对结构刚度有影响时，需要根据加固方案对加固后的结构进行重新分析和构件设计，并同时加固方式、加固位置、加固量等进行校核。

进行基础设计或加固时，需要输出结构各个支座节点的反力。需要注意的是，默认情况下，SAP2000 中节点反力是按照节点局部坐标输出的；而默认情况下，节点局部坐标 1、2、3 轴分别对应着整体坐标系中的 X、Y、Z 轴。本例中，需要对支座节点的局部坐标进行调整，采用输出基础设计所需要的反力。选择支座节点，点击【指定】>【节点】>【局部轴】命令，弹出如图 27-18 所示的节点局部轴对话框。在对 Z 轴旋转右侧栏中输入旋转的角度，即可调整节点反力输出的方向。

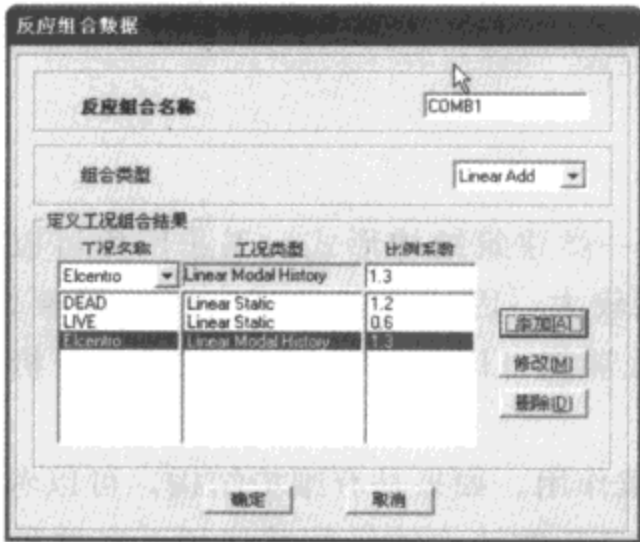


图 27-17 反应组合数据

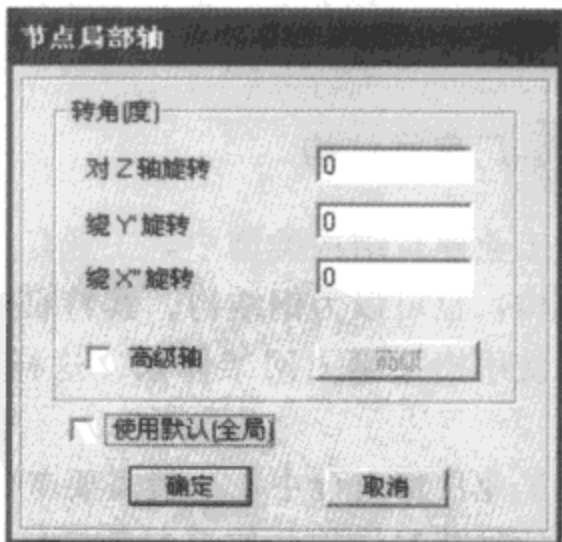


图 27-18 节点局部轴

在进行大跨屋盖支座节点设计或加固时，需要提取屋盖支座反力。在 SAP2000 中，可以通过设置一端长度较小的框架单元来模拟支座并提取屋盖支座反力。该框架单元的局部坐标方向需要调整的与支座方向一致。

第28章

工业建筑

与一般民用公共建筑和住宅建筑相比，工业建筑所涉及的范围更广泛一些。按行业划分，包括石油、化工、钢铁和煤炭等；按结构体系划分包括仓储类、空间桁架类、实体类及组合类型结构体系。对不同行业环境和工艺要求及不同结构体系类型，结构分析的侧重点和需要解决的难点都是不尽相同的。本章将从不同的行业出发，初步阐述使用 SAP2000 解决相关行业结构分析所涉及的基本方法和技巧。

28.1 概念阐述

工业建筑的主要用途是辅助完成相关工业生产活动，对于不同领域的工业建筑，其形态会存在比较大的差别，应用有限元程序进行分析设计时所主要面对的关键问题也不同。应用 SAP2000 程序可以完成大部分工业建筑的分析设计，本小节将就典型的工业结构进行相关阐述。

28.1.1 厂房类结构

在工业建筑结构类型中，工业厂房是最常见的一类建筑结构形式。工业厂房可以为混凝土结构，也可以为钢结构。其特征是一般跨度比较大，因此可能采用大跨度屋架体系，也可能使用桁架梁或网架体系。这样的结构体系通常都可以使用 SAP2000 进行分析和设计。

在工业厂房设计中，一般需要考虑地震和风荷载作用。如果是有维护结构，可以考虑维护结构的风荷载作用。如果是开敞结构，则需要考虑开敞结构的风荷载作用。在这种情况下，可以直接使用 SAP2000 进行开敞结构风荷载施加，也可以将风荷载进行折算后直接施加在框架单元或节点位置。除此以外，工业厂房一般会存在吊车梁，并需要施加吊车荷载。SAP2000 可以模拟施加吊车梁荷载，并完成吊车移动荷载的全面分析。有些工业厂房由于生产的需求可能会产生内部空间，或内部空间与外部空间较大的温度差值，这时可能需要指

定结构的温度荷载或温度梯度荷载。

28.1.2 筒仓类结构

筒仓类结构是工业建筑中另外一种非常常见的结构形式，它的功能主要是储存大体积的液体（如油、化学试剂、水等）、气体（如天然气）或粉末颗粒状固体（比如粮食等）。这类结构一般为混凝土或钢结构的筒仓，筒仓作用在一定强度的基础上或框架支座上。

在使用 SAP2000 处理这一类结构时，首先需要注意其一般为轴对称结构，因此可以使用程序相关建模技巧进行快速建模。其次，对于附属部分可以使用框架单元来模拟，对于筒仓本身需要使用壳元去模拟，一般情况下这种结构体系不需要考虑壳面的平面外剪切变形，因此不需要使用厚壳单元，可以使用薄壳单元，并且单元需要进行一定细度的剖分，可以通过剖分的细度来控制计算精度和计算时间。

筒仓类结构一般需要考虑地震作用和风荷载作用，需要考虑内部液体或固体对结构侧壁及底面的压力，压力根据性质可以分为自重下产生的压力或气体膨胀压力，气体膨胀压力作用在每个位置的压强值大致是相等的，而自重下产生的压强则会随着高度不同而发生变化。在必要的时候需要考虑液体或固体的冲击荷载作用，而对于一些特殊工业用途的仓储结构则可能需要考虑温度梯度荷载。

28.1.3 高炉类结构

高炉类结构是比较特殊的一类结构体系，一般情况下出现在炼钢厂。这一类结构一般也是由大体积的壳体组成的，多为一定壁厚的钢结构壳，与筒仓类结构不同，它的高度和体积一般比筒仓类结构大，而且由于生产的需求一般在壳壁不同的位置将会设置不同尺度的洞口，比如进风口、出钢口等。这一类的结构的建模和分析会比筒仓类结构更加复杂。

在高炉结构的有限元分析中，对于壳壁上的洞口，根据洞口直径的大小不同而相异：有些比较小的洞口对于结构影响比较小，不会产生壳上的应力集中或应力变化，因此可以忽略；对于大的洞口，则会产生较大的影响而不能忽略。高炉类结构需要考虑炉内压力荷载，而且不同的标高位置压强可能是不同的。由于高炉工业生产的需求，炉内空气与炉外空气一般会产生比较大的温度差值，因此在炉体应力分析中一般需要考虑温度梯度荷载，并且不同的标高位置温度梯度可能是不同的。

28.1.4 水池类结构

水池类结构也是工业建筑中一种典型结构类型，一些民用建筑中也会涉及到水池类结构。水池结构一般模型比较简单，但是结构分析相对来讲比较复杂，特别是如果考虑结构和土体之间的相互作用则分析会更加复杂。

水池类结构根据体形一般分为圆型水池和方形水池，根据所处位置和其受力状态分为地下水池和地上水池，两种情况存在着比较大的差异，地上水池主要考虑池内不同体积的液体对于结构的分析和设计影响，而地下水池则既需要考虑池内充满液体的情况，也需要考虑池

.....

内为空时，土对结构的压力作用的工况。除此以外，地下和地上水池都需要考虑土体对水池池底的边界约束条件，有时需要考虑地基的不均匀沉降。

使用 SAP2000 可以处理以上所提到的两种类型的水池，对于内部液体的压应力状态和外部土体的压应力状态可以同时或分别进行考虑。当需要考虑土对水池边界约束条件时，可以将土模拟为弹簧单元，弹簧刚度使用土的刚度进行模拟，可以使用 SAP2000 中的弹簧单元进行考虑。

28.1.5 石油化工类结构

石油化工类结构是工业建筑中比较特殊的一类结构体系，在这一类结构体系中，工业设备和建筑结构之间往往会比较复杂地组合在一起，从模型特征方面讲，设备模型与建筑结构部分的模型会有很大的区别，两个部分的荷载属性也会有很大的区别。除此以外，设备和结构相连接的部位往往是整个结构的关键部位，是否能够真实模拟实际结构的连接属性也是非常关键的问题。

在石油、化工以及煤炭等工业设计院的结构设计中，设备的体积和自重一般比较大，设备不同的几何形状和质量分布状态决定了其自身的动力特性，因此在建筑设计过程中，是否能够真实地考虑设备的动力属性，并且真实考虑结构与设备的共同作用就显得比较重要了。

使用 SAP2000 可以对这类结构进行比较真实的处理。SAP2000 程序可以通过相关功能分别建立设备部分和结构部分的模型，通过很简便的方法就可以将二者组装成整体模型。SAP2000 对结构进行分析时，能够真实考虑结构体系不同类型的作用及相互结合，进行结构整体的有限元分析并输出所需细节。

28.1.6 核工业类结构

核工业类结构是一类比较特殊的工业结构体系，目前看来，数量还不太多。随着社会经济发展，对于低污染能源的需求，并且随着核电技术的不断进步和成熟，这类工业结构的数量会不断地增加。核工业结构安全要求与一般的工业结构存在着比较大的差别，一般工业结构是允许结构在一定条件下结构构件发展到塑性状态，但是核工业类结构是不允许的。一般的结构在正常使用状态下是允许结构出现一定限度的裂缝，但在核工业结构中，特别是反应炉主体却是绝对不允许的。

对核工业类结构配套设施可能需要使用相关单元进行分析和设计，但对于反应炉本身则是一个大体积的构件，一般是混凝土材料，需要应用实体元进行模拟，SAP2000 提供了实体单元，可以完成核工业整体结构的分析设计。

28.1.7 复杂结构

工业建筑结构中，有些结构可能并非由一种简单的几何形式所组成。这时应用程序的复制、拉伸等工具也很难完成结构整体建模，对于不同几何体相交的结合部位，需要更复杂的过程或借助于其它工具来完成建模。

常见的几何相交结构中，有一部分是市政工程所需要的管类结构，这一类结构可以使用本书前面所提到的模板来快速生成一部分模型，包括一些常见的相交连接形式和底部节点支承形式（见图 28-1）。另一部分为一些几何维度较大的壳体工业设备结构，比如说钢铁企业所常见的炉体，由于工业生产的需求有可能需要进气口、通风口、工业介质流出通道的开洞或引管，这时就需要使用柱面与结构主体部分进行相交得到连接部分的几何模型。

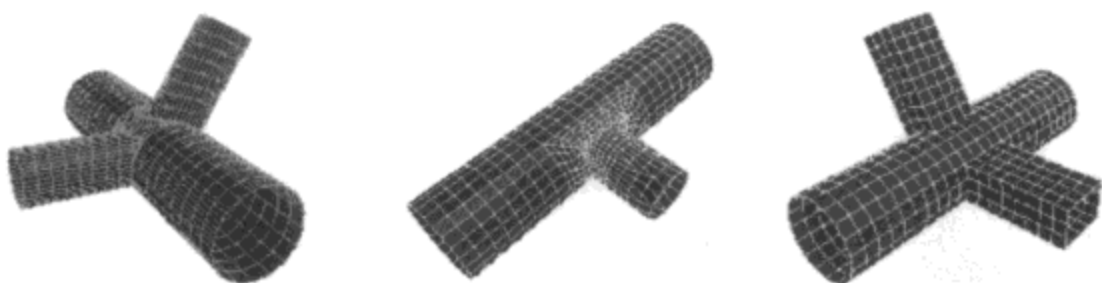


图 28-1 SAP2000 提供的管道连接模板

对于这一类结构体系的建模，当具有模型细节的空间坐标数据时，可以使用 SAP2000 复制旋转等功能得到两个单独几何模型，然后使用 SAP2000 空间绘制功能，根据模型细节坐标数据，将模型一步一步绘制完成。但是建筑所提供的模型数据一般包含两种体系的几何数据和位置关系，对于交线或交面数据却很少直接提供，因此这种方法虽然简单直接，在实际工程中并不一定能够实现。

在 SAP2000 建立这一类模型，更多的是建议大家使用相关辅助工具来建立模型。首先可以使用工程师最熟悉的 AutoCAD 来辅助完成。AutoCAD 可以使用相关几何信息直接建立各种形式的几何模型，并且使用几何模型之间进行的布尔运算完成模型之间的组合工作，可以在模型中直接生成两个几何模型的交线或交面，并将其导入到 SAP2000，然后根据这些交线和交面的数据辅助完成模型的建立工作。

SAP2000 可以与其它有限元程序进行数据交换，比如 IGES.igs、CIS/2 STEP 以及 Frameworks Plus 等文件格式。关于这方面问题，可以通过本书其它章节进行了解。SAP2000 程序并没有给出几何体布尔运算的功能，但对于专业的建模软件，或者对于市政、管道类结构更专用的软件一般是可以进行这一运算的，因此对于复杂几何体的相交结构，可以借助于专业几何建模软件或其它专业软件来完成模型的建立，并将模型数据转化为通用结构数据，SAP2000 程序就可以将该格式的模型数据读入，并完成进一步的有限元分析。

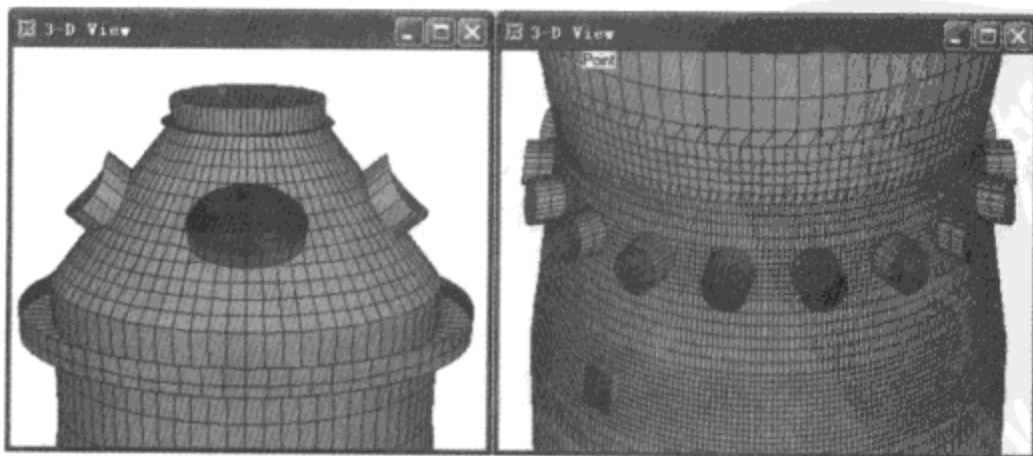


图 28-2 某炉体结构局部

图 28-2 给出了某钢铁行业的大型炉体工程的局部，可以看到不同的细节部分都涉及到几何体相贯问题。这一模型就是使用 Ansys 进行了几何建模并完成布尔运算后，将模型数据通过 IGES.igs 的格式导入到 SAP2000 中，而后完成相关分析的。

28.2 工业建筑结构分析中的几个关键问题

在使用 SAP2000 处理工业结构时，所碰到的问题从性质上讲可能与民用结构是完全不同的，而且不同类型的工业结构需要考虑的关键问题也不同。本节将选择几种典型的工业结构，阐述使用 SAP2000 进行有限元分析时所需要重点处理的问题。

28.2.1 吊车荷载的施加

在厂房类结构设计中，对于模型建立和一般荷载作用下的结构分析不会存在太多问题，可以根据本书前面所谈到的基本方法进行很好的解决，因此这里就不再多说了。本小节主要处理厂房中大家比较关心的吊车梁荷载在 SAP2000 程序中的实现。

由于工厂生产的需要，厂房类结构中经常会存在吊车荷载，吊车荷载分为水平荷载和竖向荷载。水平荷载根据作用方向分为纵向水平荷载和横向水平荷载。在应用 SAP2000 进行结构分析时，吊车水平荷载可以根据规范等效静荷载方式施加到排架柱相应位置，而竖向荷载可以通过移动静荷载进行施加。此处我们主要介绍通过桥梁辅助工具定义吊车竖向移动荷载的具体施加方法。

吊车竖向荷载在 SAP2000 中是借助桥梁荷载方式来完成，吊车荷载与桥梁车辆荷载同属于移动荷载，但一般情况下吊车荷载比车辆荷载简单，定义吊车荷载需要的步骤如下：

1. 定义吊车轨道

定义车道的目的是定义移动荷载所作用的轨迹，定义吊车荷载时可以把它理解为定义小车轨道。定义车道时，将弹出如图 28-3 对话框。

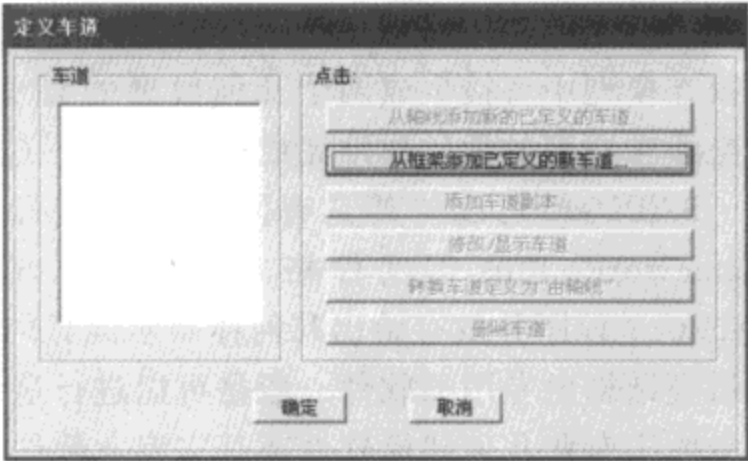


图 28-3 添加车道对话框

在对话框中选择【从框架添加已定义的新车道】定义车道，将弹出下图 28-4 对话框。

在图 28-4 对话框中可以定义吊车荷载的移动轨迹，首先需要基于吊车梁框架编号确定吊车的基本移动轨迹，然后使用中心线偏移来定义吊车荷载的偏移布置（实际工程中一般不存在偏移，所以一般为 0），对于吊车荷载车道宽度影响可以忽略不计，因此第三项车道宽度一般为 0。

2. 定义小车荷载

通过定义车辆荷载来定义小车竖向荷载值，因为与桥梁设计不同，因此吊车荷载一般选择使用添加一般车辆荷载进行添加，选择此项添加车辆荷载时将弹出如下图 28-5 对话框。

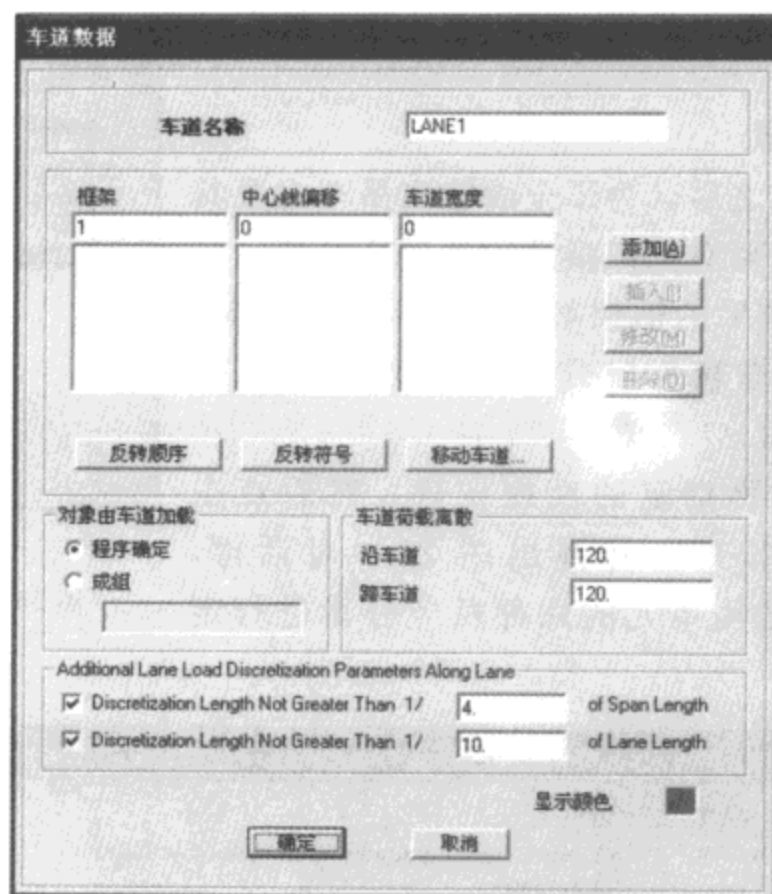


图 28-4 定义车道对话框

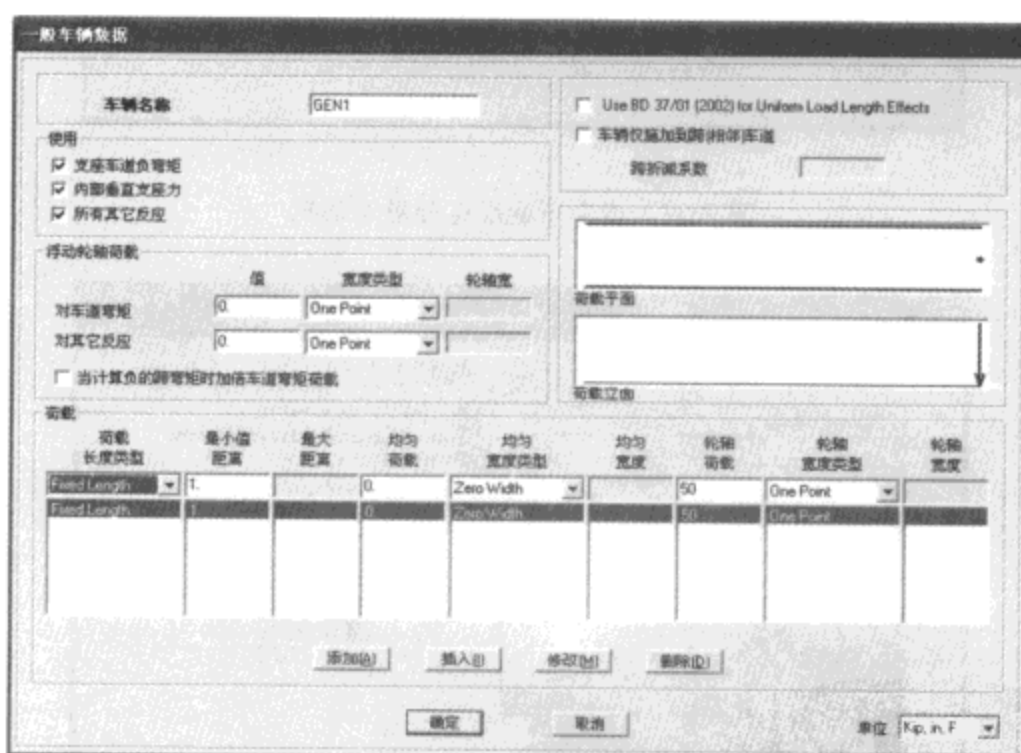


图 28-5 定义车辆荷载对话框

可以通过上面对话框中轮轴荷载来定义移动小车荷载，关于该对话框中各项的含义及使用在本书桥梁使用一章有详细描述。

3. 定义车辆类别

限于桥梁荷载施加的使用要求，吊车荷载的实现需要定义车辆类别（图 28-6）。

因为不存在桥梁规范所需要的多种车辆类别的定义，为了施加车辆荷载，只需要如上面

对话框，选择已经定义好的吊车荷载的车辆名称，将比例系数定义为 1 就可以了。

4. 指定车辆反应分量

在车道荷载定义完成之后，为了全面输出吊车梁及其它结构对象的影响线，需要对框架指定车辆反应分量，具体过程是选择需要输出结果的框架梁，使用【指定框架/索/钢束荷载】命令中【车辆反应分量】选项进行定义，此时将弹出图 28-7 对话框。

在图 28-7 中选择需要指定的反应位置，然后点击【指定选择覆盖类型】按钮，将弹出图 28-8 对话框，在该对话框中，可以对结构单元的六种反应分量进行定义。

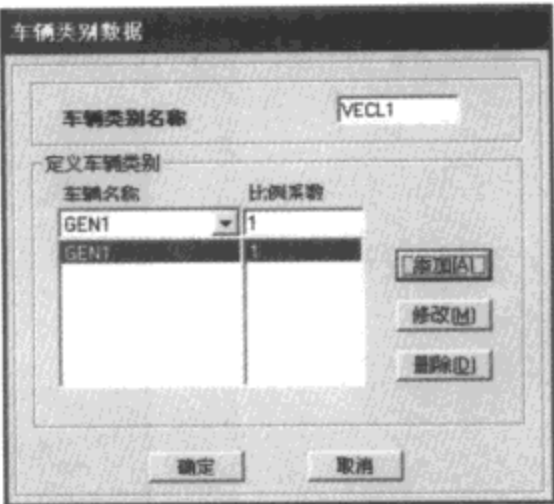


图 28-6 定义车辆类别对话框

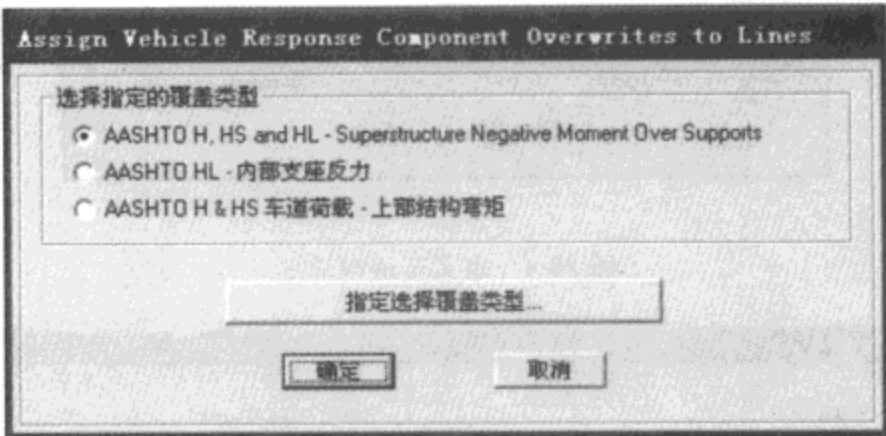


图 28-7 指定车辆反应分量对话框

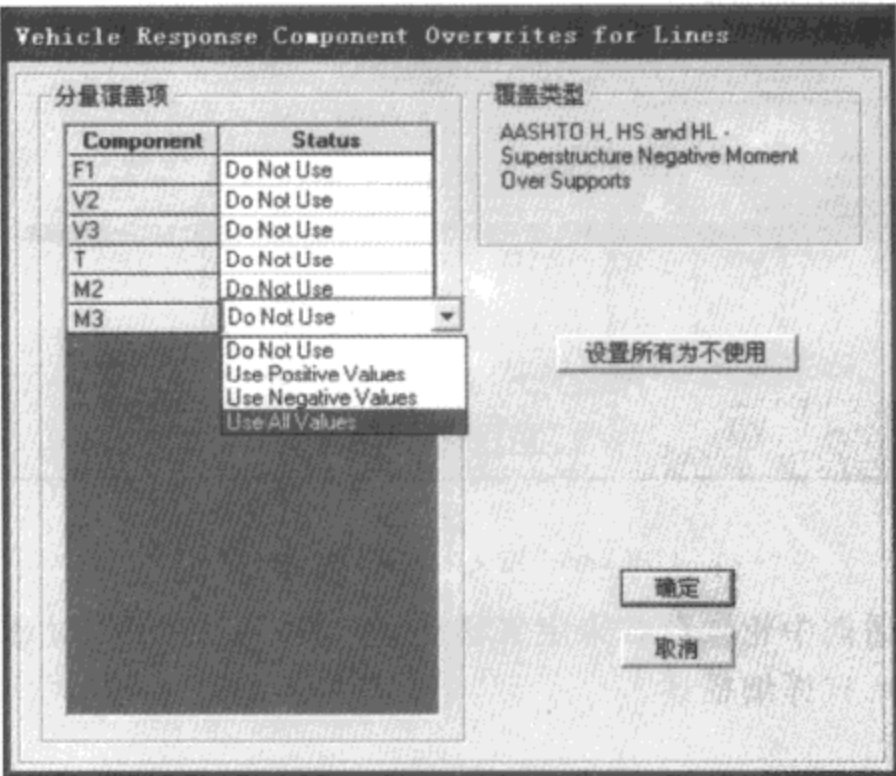


图 28-8 车辆反应分量覆盖项对话框

如图 28-8 所示, 每一项都可以选择 “Do Not Use”、“Use Positive Values”、“Use Negative Values” 和 “Use All Values” 四项, 分别表示 “不进行输出”、“输出正值”、“输出负值” 和 “输出所有值”, 可以根据需要选择输出的类型。

5. 定义移动荷载分析工况

上面的工作完成之后, 为了在结构中实施移动荷载分析, 需要在定义分析工况中添加定义移动荷载分析工况。也就是图 28-9 所看到的对话框, 该对话框中各项定义方式和意义与桥梁模块中是完全相同的, 因此可以参阅本书相应章节。

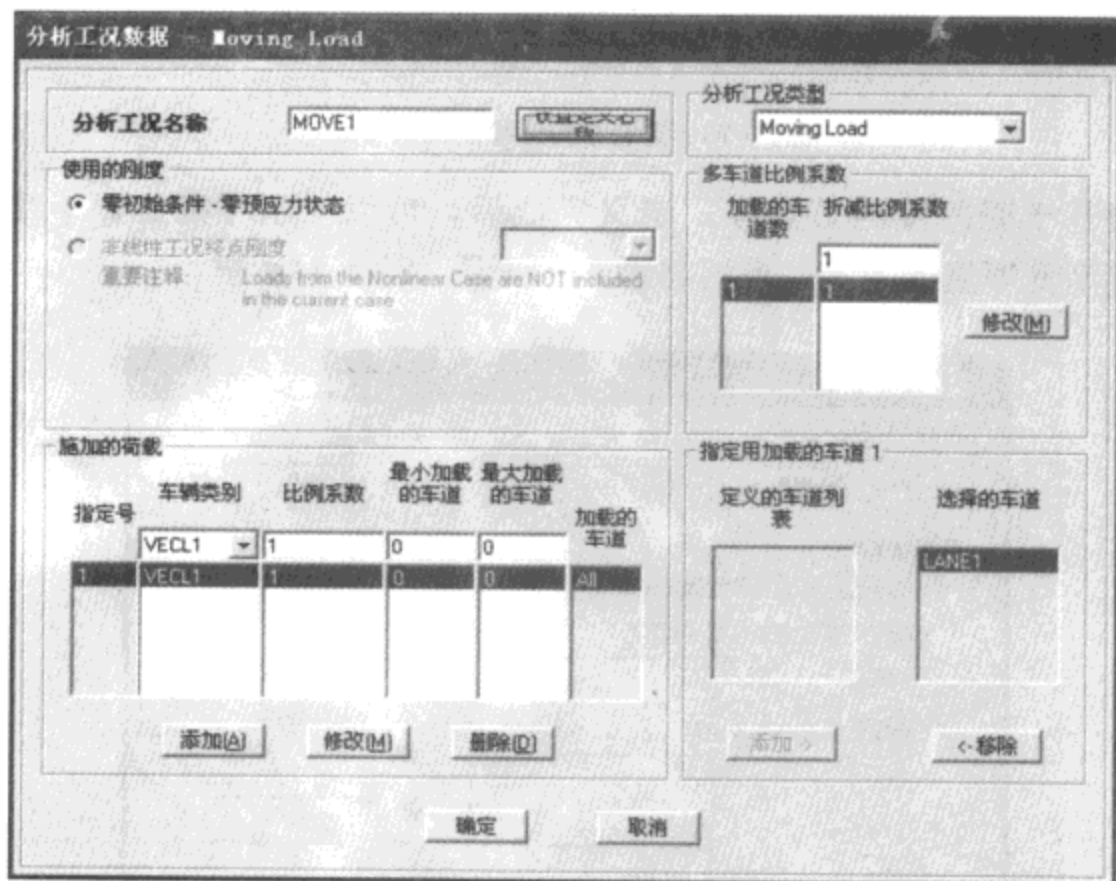


图 28-9 定义移动荷载分析工况对话框

28.2.2 筒仓及高炉类结构建模技巧

筒仓类结构一般都是轴对称体系, 因此使用 SAP2000 程序相应技巧可以大大提高建模的效率, 这些技巧包括各种复制功能、低维度对象向高维度对象的扩展生成 (包括节点拉伸成线、线拉伸成面) 功能等。比如说下面图 28-10, 我们可以先通过立面绘制出筒仓的剖面线, 然后通过线拉伸成面的命令, 通过旋转拉伸形成筒仓的几何模型, 然后再使用截面定义命令将筒仓截面指定给结构模型。

如果工业设备本身已经具备 CAD 或其它通用格式的模型数据, 也可以使用 SAP2000 对于数据共享情况来建立工业设备部分的模型。SAP2000 程序可以导入 DXF 文件和 CSI/2 STEP 数据文件和 IFC 数据文件等模型文件格式。

一般筒仓类结构的厚度是均匀的, 有些情况下厚度可能是不均匀的, 此时其厚度一般随标高的增加而逐渐变小。因此这对于筒仓类结构建模是一个难点, 可以使用 SAP2000 程序中厚度覆盖项功能对厚度进行控制定义, 当厚度随坐标渐变时, 也可以进行分析得到函数关系并使用程序节点样式功能进行方便的定义。节点样式的意义和定义方式参见本书其它章节

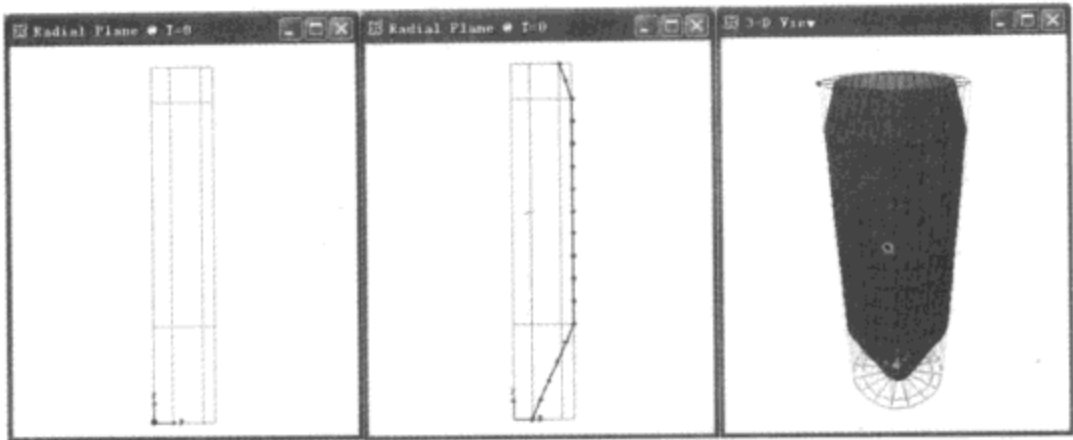


图 28-10 筒仓结构建模技巧示意图

的详细说明，当基于壳厚度的节点样式定义完成后，可以使用【指定】>【面厚度覆盖项(壳)】命令进行渐变厚度的定义，此时将弹出如下图 28-11 对话框。

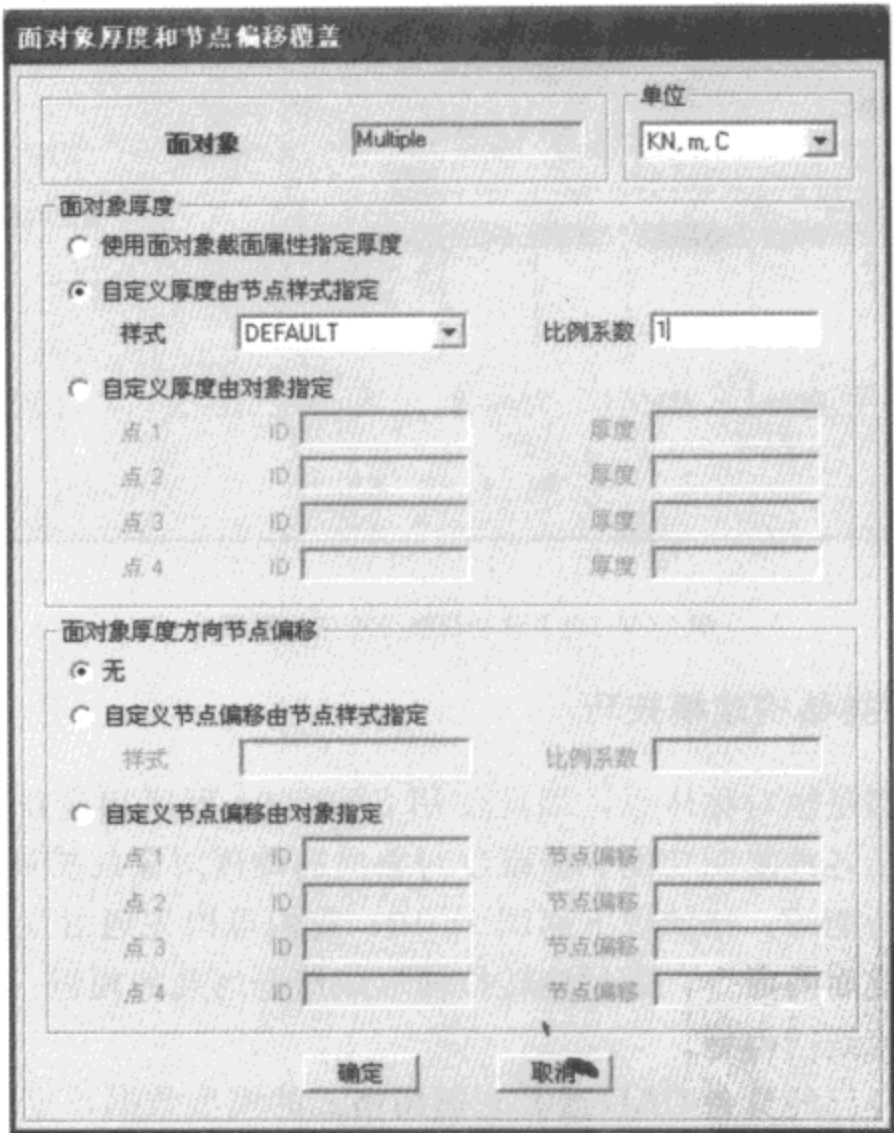


图 28-11 面厚度和节点样式偏移指定对话框

使用图 28-11 对话框，选择【自定义厚度为节点样式指定】，并选择【已经定义的节点样式】即可。当厚度渐变使用节点样式定义并不方便时，可以使用壳单元四个角点控制，这时需要选择【自定义厚度由对象指定】。

28.2.3 水池类结构中压力荷载及土体约束作用的定义

1. 自重产生压力荷载的定义方式

水池类结构的水压一般是自重下产生的压强作用，压强作用是一个关于水深的线性函数。土体的压力也是土的重度相关线性函数，水压和土压荷载使用一般静荷载的定义方式是很难准确施加的。在 SAP2000 中提供节点样式函数定义方式，其意义是基于节点坐标定义一组函数关系，并在相关结构对象属性或荷载定义中使用相关函数。图 28-12 给出了池壁所受地下水压力荷载示意图。

首先我们可以得到该荷载关于全局坐标 Z 轴的函数关系，然后使用 SAP2000 的节点样式定义工具进行节点样式的定义（图 28-13），对于图 28-12 中池壁土压力所产生的压强 $P=50-10\times Z$ （全局坐标原点在池底位置），可以使用坐标节点样式定义为如图 28-14 所示的数据方式。

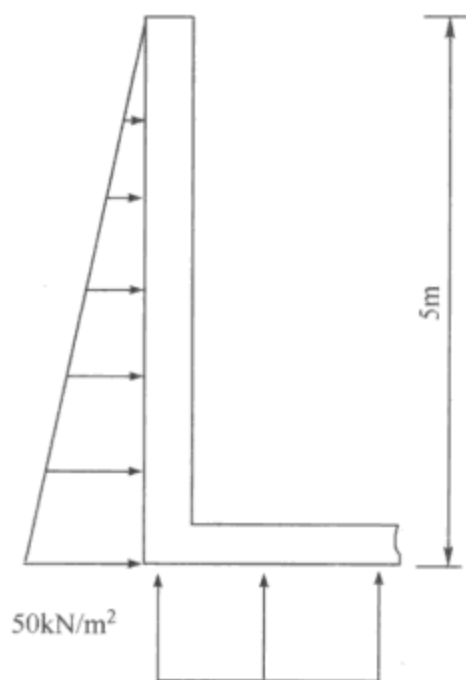


图 28-12 水池壁水压力示意图

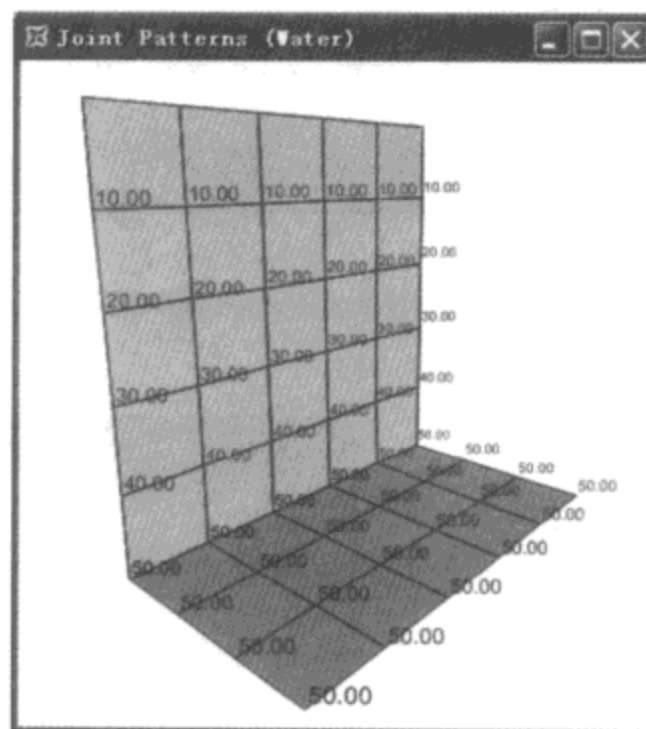


图 28-13 节点样式定义水压力

当然 SAP2000 对于这种由自重所引起的压力作用，给出了更为直接的定义方式：

图 28-15 所示对话框中， Z 坐标给出的是压力零点的标高，Wt per Unit Vol 给出的是产生该压力物质的容重值，Restriction 给出了显示值的范围：使用全部数据、仅正值或仅负值。最后在压力静荷载定义位置使用该节点样式定义静荷载的变化属性（如图 28-16）。

在图 28-16 所示对话框中，可以通过面的名称切换选择受压面的名称，可以通过节点样式乘数来控制最终压力荷载值，压力值等于节点样式的值乘以乘数值。

2. 结构弹性土约束方式的模拟

在一般建筑上部结构分析和设计过程中，可以假定地基对结构施加的是一定位置的固定约束条件，我国规范也给出了建筑结构底部嵌固位置的确定方式，所以一般不需要考虑土和

结构的相互作用。但是对于建筑结构的基础设计，或一些工业建筑结构，例如水池、坝体等结构形式，则经常需要涉及结构与土体的相互作用问题。

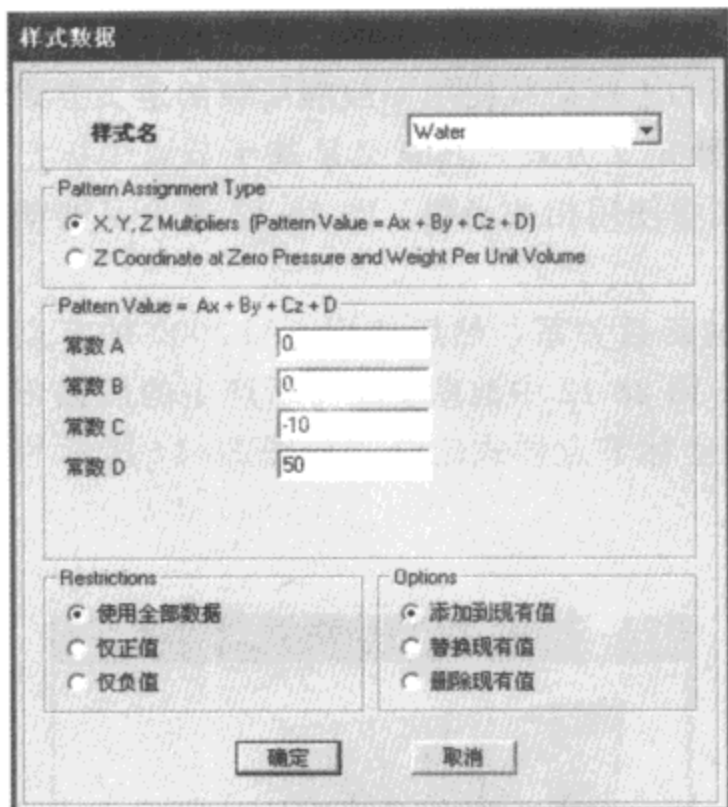


图 28-14 节点样式定义对话框 (1)

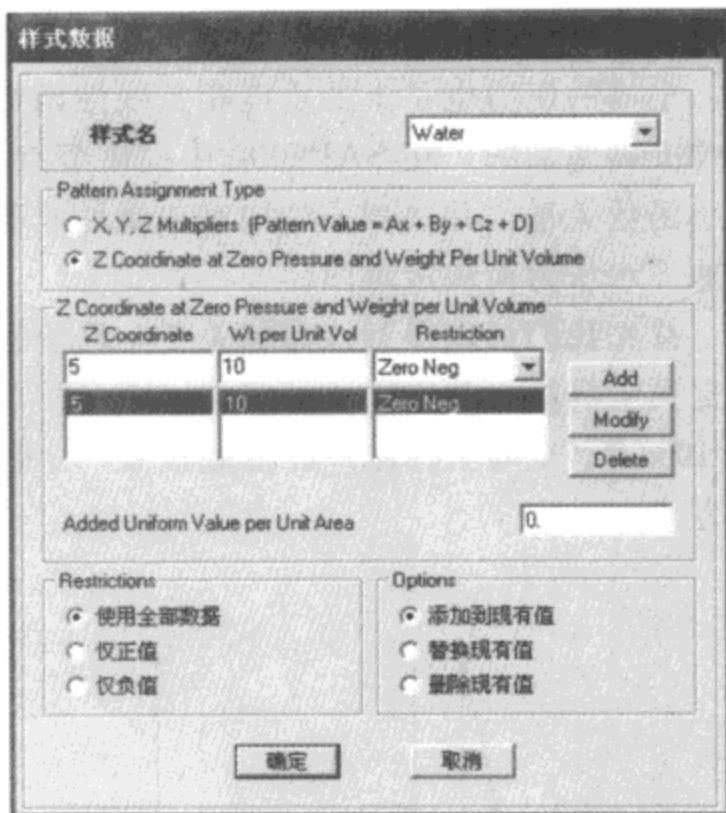


图 28-15 节点样式定义对话框 (2)

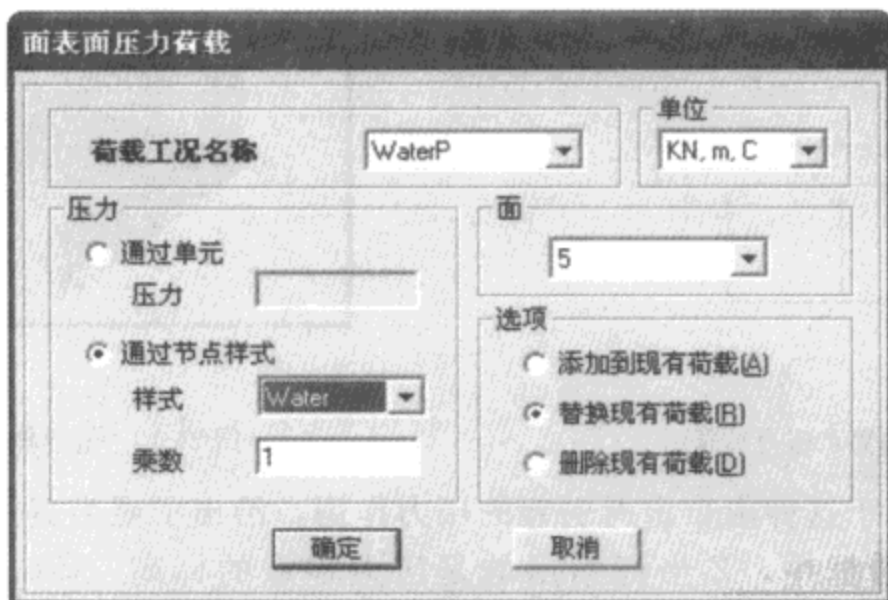


图 28-16 表面压力荷载定义对话框

从真实的单元形式来讲，土体是一种非常复杂的非线性单元形式，它的密度及重度不均匀并富含空隙、具有一定限度的塑性压缩能力、压缩过程中弹性模量不恒定等特有的属性。因此真实的模拟土和结构相互作用是十分复杂的问题。在 SAP2000 中，基于目前的功能，可以使用线性弹簧或非线性（多线性连接单元）连接单元考虑。对于面对象弹簧以及非线性连接单元的定义方式，本书的其它章节中已经涉及，这里就不再重复，一般情况，使用这些功能可以满足一定精度的土体约束结构的有限元分析。

3. 一个水池结构的算例

此处给出一个无盖水池的算例模型（图 28-17 所示），该水池长 28.6m，宽 12.3m。长方向中间由池壁分隔为大小相等的两个正方形部分，水池深 6.15m，池壁顶部与室外地坪平齐，因此水池需要考虑土体侧向压力作用。

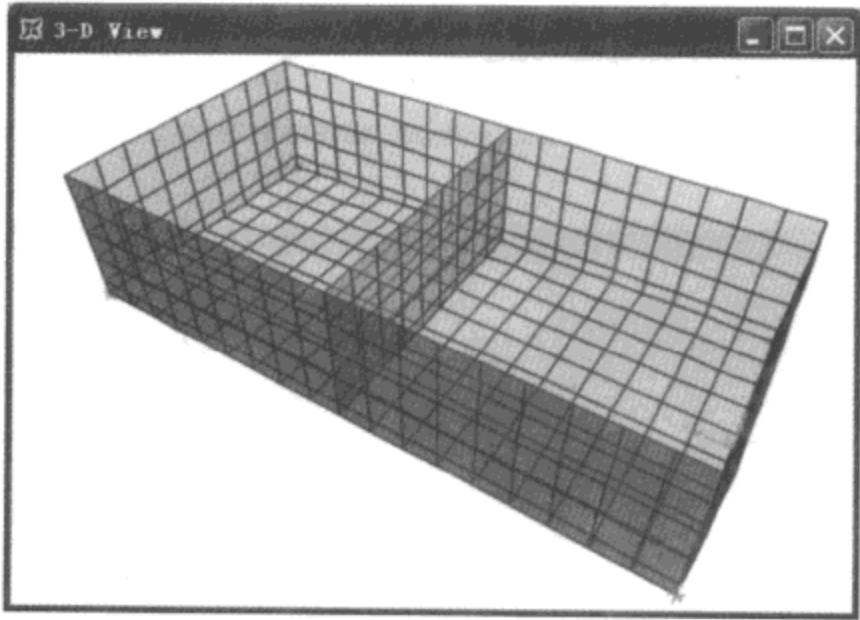


图 28-17 水池算例模型

对于图 28-17 所示水池，我们需要考虑两部分均注满水的受力状态；一部分注满水，而另一部分空置时的受力状态以及两部分均没有水时，水池在自重及侧向土压力作用下的工况。图 28-18 分别给出了四个工况的变形图。

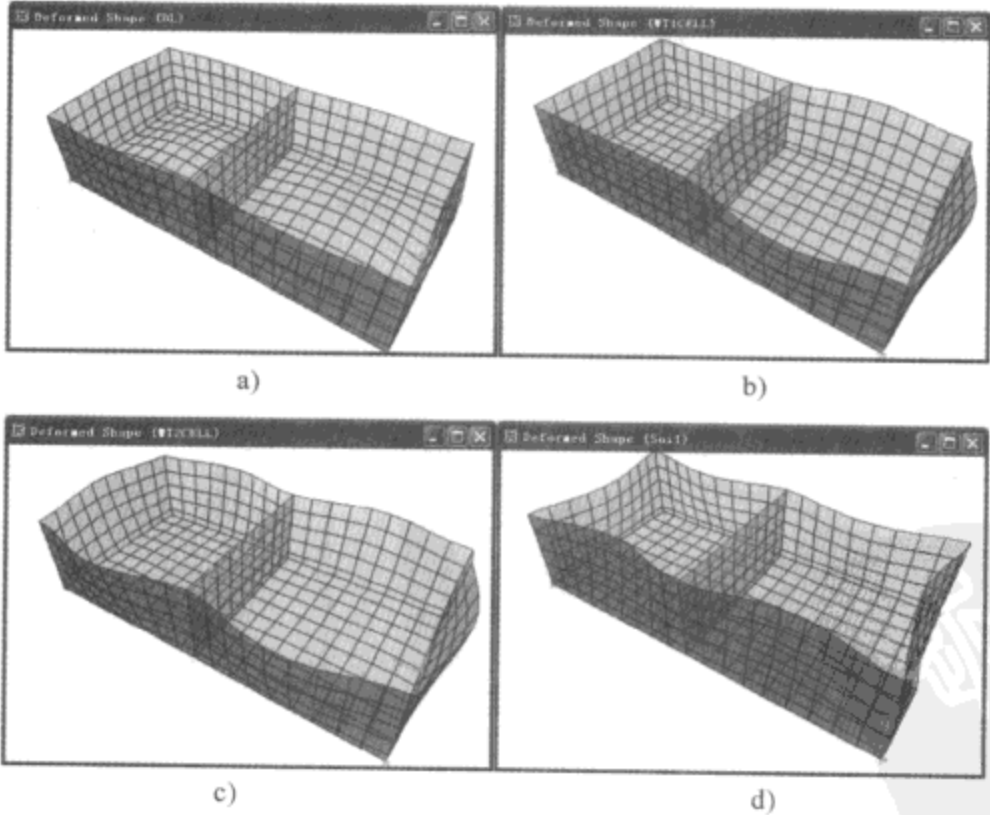


图 28-18 几种工况下的变形图

a) 恒载作用；b) 单池水压作用；c) 全池水压作用；d) 土压作用

图 28-19 给出了水池在几种荷载组合状态下的最大正应力分布状态：

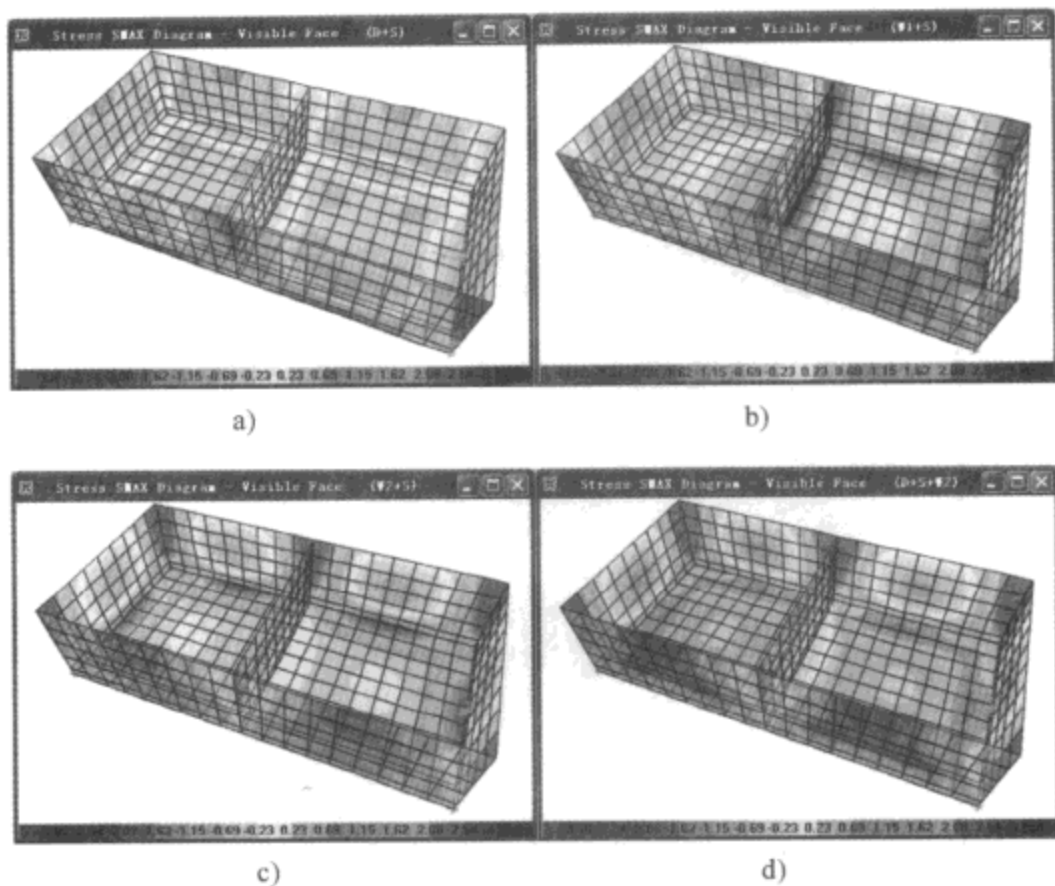


图 28-19 几种工况下的变形图

a) 恒载与土压作用；b) 单池水压与土压作用；c) 全池水压与土压作用；d) 恒载、全池水压与土压作用

28.2.4 石化类结构建模技巧和细部处理

石化类结构一般情况下是由建筑结构和工业设备两种不同体系组成的，在使用 SAP2000 对其进行建模时，最好的方式是将两种体系进行分块建模，如图 28-20 所示。对于建筑结构部分使用常规的建模方式可以很方便地完成，对于工业设备部分就需要使用 SAP2000 所提供的更复杂的建模方式：如各种复制功能、低维度对象向高维度对象的扩展生成（包括节点拉伸成线、线拉伸成面）等。

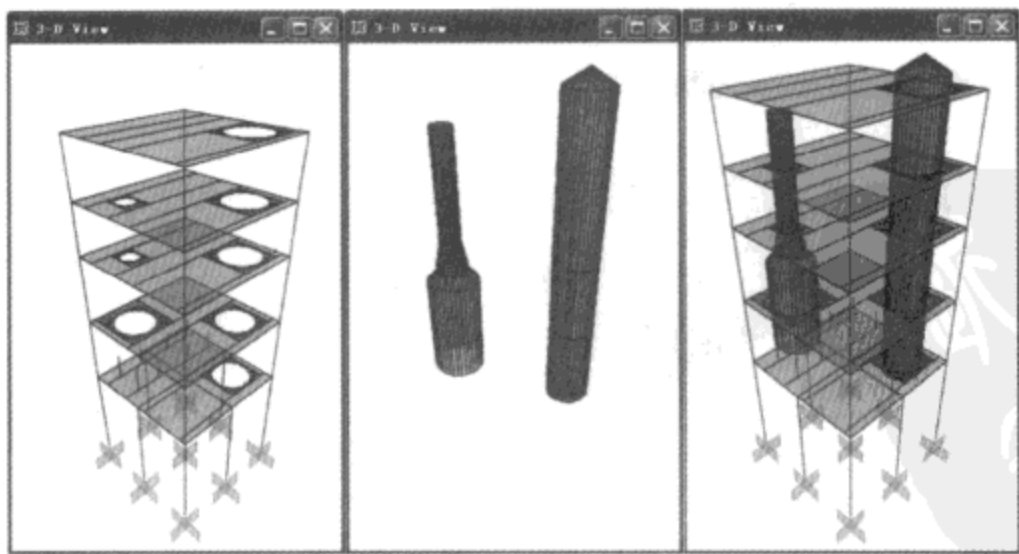


图 28-20 SAP2000 中模型组装

需要注意的是在建模中,设备和建筑结构部分连接部位处的圆洞厚楼板是很难直接使用 SAP2000 的绘制命令完成的,因为它涉及到局部异性楼板建模和剖分问题,如下图 28-21 所示。对这部分模型, SAP2000 提供了直接的模板输入功能,可以使用【编辑】>【从模板中添加到模型】命令来进行操作,这时将弹出【新模型初始化】对话框,选择“管和板”结构体系,选择异形开洞楼板进行插入即可。

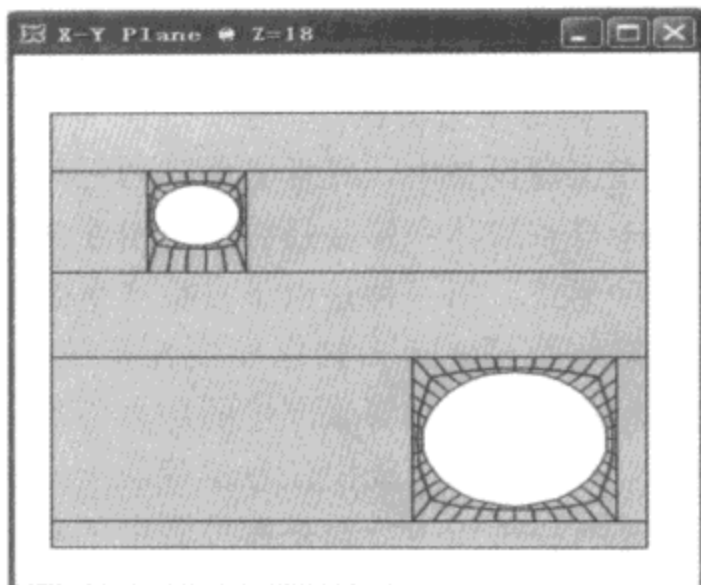


图 28-21 楼板开洞部分模型

两部分模型建立好以后,可以使用程序导入模型功能将两个模型组装成为一个模型,一般情况下是将设备模型导入到建筑结构模型。在导入组装时需要考虑两个模型的单位制情况,导入时所使用的单位应该与被导入的模型初始单位一致。当然为了避免组装时发生单位制不同问题,一般情况下最好两部分模型使用相同的初始单位制。

在导入模型过程中还需要注意坐标关系,程序在默认情况下将把被导入模型的原点导入到现有模型的原点,也就是保持两个模型各个节点位置原有坐标不变。另外,程序还可以设置该原点导入到现有模型的指定坐标位置,通过这一坐标的设置就可以将设备模型一次性准确地导入到建筑模型的准确位置并完成组装。当然,根据习惯不同,也可以先将模型导入,然后再使用相关移动编辑命令移动到准确位置。

模型组装之后,还需要对设备与建筑结构之间的连接部位进行细部处理。一般情况下,设备的体积和自重都比较大,因此它与结构的连接部位往往是需要加强的,比如有时设备直接通过楼板与结构相连,需将局部的板厚加大很多,必要时也需将临近的梁柱截面进行相关调整。

一般情况下工业设备的高度比较高,可能会穿过建筑结构若干楼层,有时设备和结构每一楼层之间会使用一些弹性连接,或使用具有一定减振作用的阻尼器相连。当然也存在设备与结构之间不做任何连接的情况,这时如果结构与设备之间有一定的预留变形空间,一般情况下可以不考虑结构之间的碰撞问题;如果预留空间比较小,并且结构和设备之间存在比较大的柔性变形,这时可能需要考虑结构与设备的碰撞问题。

在 SAP2000 中,可以使用程序中提供的连接单元来模拟体系连接细节中的弹性连接、阻尼器连接、以及结构之间的碰撞连接。我们可以使用非线性 Damper 单元来模拟阻尼器单元,可以根据设备厂家提供的参数来控制阻尼参数。在动力分析中,程序将真实地考虑阻尼器的耗能作用。对于碰撞模拟问题,我们使用的是缝隙单元形式,当缝隙的宽度降为零以后,结构相关节点之间将发生接触,单元内部将产生压力,并将压力传递到结构构件和设备体系中。

作用在建筑结构和设备部分的荷载一般情况下会有较大的区别:建筑结构上会作用相关附加恒载、活载和其它荷载形式;而工业设备上一般作用内部压力荷载、温度梯度荷载以及保温层、内部构筑物等荷载形式。因此需要分别对建筑结构和工业设备施加不同类型的荷载形式。

28.2.5 工业设备上常见荷载的施加

1. 内部压力荷载

在工业设备中，经常会碰到的一种荷载形式为压力荷载，它是设备和管道中的液体或气体由于自重或体积膨胀趋势而作用在侧壁上的静荷载。因此内部压力荷载也可以根据特征分成几种形式，第一种是由于自重产生的压力荷载，这种压力类似于水池工程中的水压荷载与结构系统全局坐标 Z 轴存在线性函数关系，因此可以使用相同的节点样式方法进行施加；另一种是由于体积膨胀产生的压力荷载，此时自重影响在整个压强中所占比例非常小，可以忽略，可以认为系统中任意位置的压强是相等的，因此可以直接使用均匀压力静荷载进行施加；还有一种压力荷载是在设备中不同标高范围内压强体现出不同值，比如炼钢高炉中由于炉体本身的高度是非常大的，在生产中不同高度范围内的气体密度和温度都不相同，因此在不同的标高范围内部压力是不同的，此时可以通过分段指定的方法在 SAP2000 中进行这类压力值的指定。

2. 温度及温度梯度荷载

温度荷载和温度梯度荷载是另外一种常见的工业荷载类型。在 SAP2000 中可以对框架线单元、壳单元和实体单元指定温度荷载和温度梯度荷载（如图 28-22 所示）。

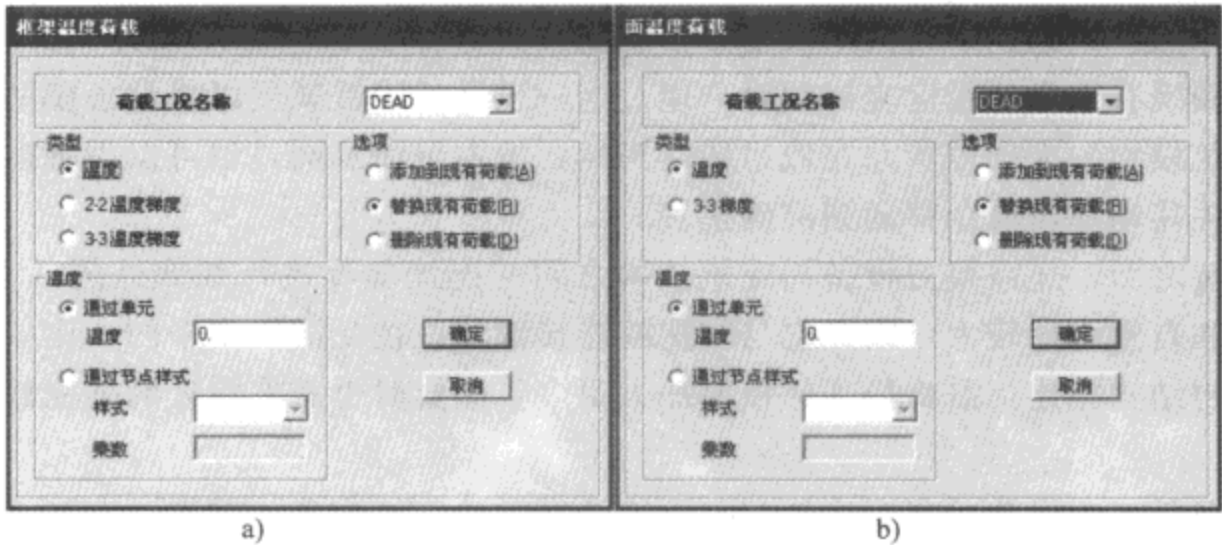


图 28-22 温度及温度梯度荷载指定对话框
a) 框架对象；b) 面对象

我们可以对框架单元和壳面单元直接指定均匀温度荷载，也可以使用节点样式来控制结构不同位置不同的温度荷载值，但此时框架单元截面内两个主轴方向以及壳面单元中厚度方向（3 轴）的温度变化是均匀的，这也是在 SAP2000 中温度荷载和温度梯度荷载之间的核心区别。当需要指定框架单元截面内两个主轴方向、以及壳面单元中厚度方向（3 轴）的温度变化为不均匀时，所需要进行的温度梯度荷载的指定。这两种荷载最直观的区别是温度荷载指产生轴向（框架单元）或面内（壳面单元）拉压应力或变形，而温度梯度荷载还可以产生结构弯曲变形或弯曲应力。也可以使用节点样式指定不同位置结构对象某一方向的不同温度梯度值。

对于实体单元，因为它具有三个主轴方向真实的几何维度尺寸，因此不需要温度梯度来定义。可以通过单元对于实体单元指定单元内均匀的温度荷载，也可以通过节点样式来定义不同位置实体单元温度变化值，从而得到结构不均匀温度变化所产生的全部响应结果（如图

28-23 所示)。

3. 流体冲击荷载

有时工业设备中需要考虑流体冲击荷载，与流体压力静荷载相比，需要考虑流体对于设备的动力冲击作用。流体与一般的单元形式不同，在 SAP2000 中，没有提供模拟流体的有限元单元形式，因此无法模拟流体在设备中流动及其与设备之间的动力相互作用。

在使用 SAP2000 程序进行有限元分析时，需要考虑流体冲击作用时，可以使用相关近似方法进行模拟。当流体对设备的冲击作用动力特征比较明显时，可以使用 SAP2000 时程作用及分析去模拟，此时需要知道冲击作用的峰值及周期变换情况，当然一般使用正弦曲线和余弦曲线模拟就可以了。当不需要考虑冲击的动力效应时，可以采用冲击荷载放大系数法，也就是通过将静力荷载放大一定的比例系数来考虑冲击作用。

4. 预应力荷载

工业设备和厂房结构体系中，还可能需要考虑预应力荷载形式，预应力的施加是通过结构中某些结构对象的预变形来实现的，其主要目的是控制结构在使用状态下的变形响应。预应力作用给结构对象带来的预变形可能是轴向变形，也可能是剪切变形或弯曲变形，这些都可以在 SAP2000 程序中进行模拟。

在 SAP2000 中，可以对结构对象（框架单元、壳面单元和实体元）施加应变，这一应变可以真实直接地模拟结构预应力荷载作用。对于框架可以考虑主轴方向的主应变和主轴与两个次轴方向的剪切应变和三个方向的弯曲应变 [图 28-24a)]。对于壳面单元，可以考虑面内两个方向的主应变、面内剪切应变；面内两个方向的弯曲应变、两个主轴耦合弯曲应变以及平面外两个主轴方向的剪切应变 [图 28-24b)]。对于实体单元，可以考虑三个主轴方向的主应变和三个主轴之间的剪切应变（见图 28-25）。

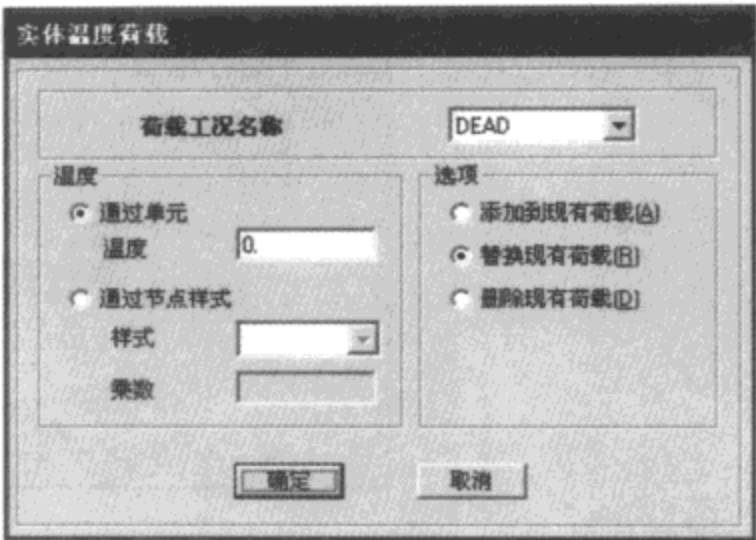


图 28-23 指定实体对象温度荷载对话框

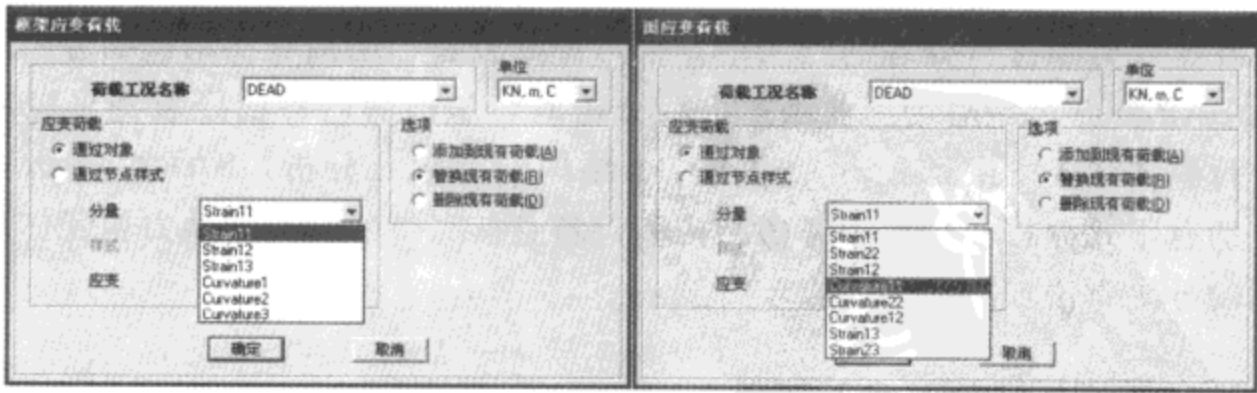


图 28-24 指定应变荷载对话框
a) 框架对象；b) 面对象

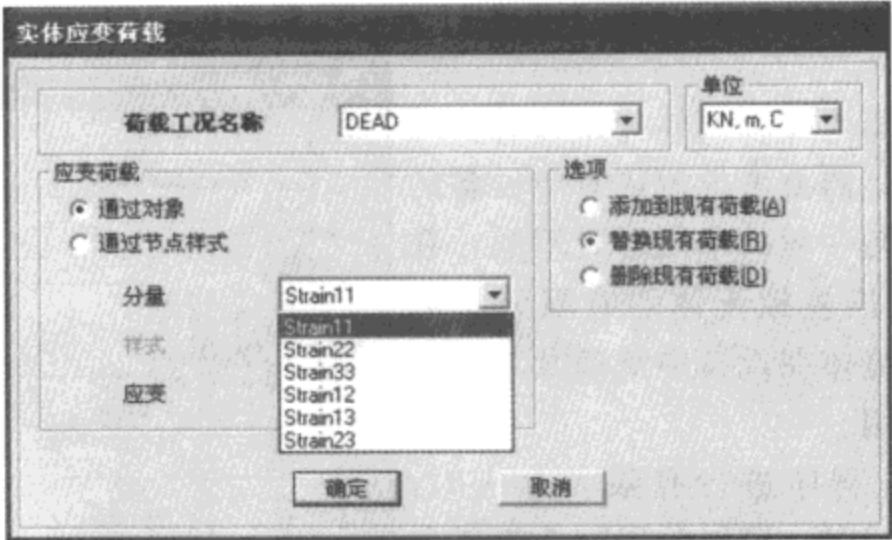


图 28-25 指定实体对象应变荷载对话框

28.2.6 系统总体分析及结果评价

SAP2000 可以就整个结构系统进行综合分析，与民用建筑相比较，结构系统综合分析在工业建筑的有限元分析中更为重要，因为在工业建筑中，往往会出现设备与一般类结构体系组成复杂系统的情况，特别是对于上文所提到的石化类结构。

目前在相关领域的工业设计中，往往建筑结构的设计与设备的设计是在不同部门完成的。一般土建室负责建筑结构的模型处理和分析设计，而工艺室完成设备的模型及分析和设计，因此工艺室除了对相关工艺进行设计外，还承担了设备体系安全度方面的分析和设计。在整个结构系统的设计过程中，工艺完成设备的设计并将相关设备作用荷载提交给土建室，土建室基于已有建筑结构模型，将设备等效荷载直接作用于结构相关连接部位，然后完成建筑结构部分的分析和设计。

从上面的工作流程可以看出，工业设备的设计并没有考虑结构为其提供的实际边界条件，而建筑结构的设计也没有考虑设备对于建筑结构动态响应的影响。唯一联系二者的交互信息是设备的等效荷载，而这一等效荷载往往是基于设备与结构连接部位的刚性约束得到的，因此这一等效荷载很难给出一个精确的结果。整个分析过程忽视了结构与设备整体协调变形，实际上工业设备质量和刚度分布一般比较复杂，这对建筑结构动力特性的影响是非常大的，因此在这种分块进行处理的方式中，很难得到设备和结构真实精确的分析结果。

在使用 SAP2000 程序对于工业系统进行分析时，从前面内容已经看到可以对这类复杂结构体系进行整体建模和细部处理。对于整个结构的有限元分析，SAP2000 所完成的是整个结构系统的有限元分析，分析中考虑结构和设备直接完整的静力和动力相互作用，因此是更真实准确的分析方法。

28.3 工业结构算例分析

工业结构的类型比较多，本章前面给出了一些类型工业结构使用 SAP2000 程序遇到的问题和解决方法，结合这些问题，本节给出两种类型的工业结构算例，供读者参考。

28.3.1 筒仓类结构算例

本节首先给出一个筒仓类结构模型算例，该结构主体为三个相同形状的储液罐，其直径为5m，高为9.2m，壁厚0.3m，罐底厚度为0.8m。储液罐坐落于单层混凝土框架上，框架高4.5m，双向跨度5.8m，支撑板与罐底厚度相同，其值为0.8m（如图28-26所示）。

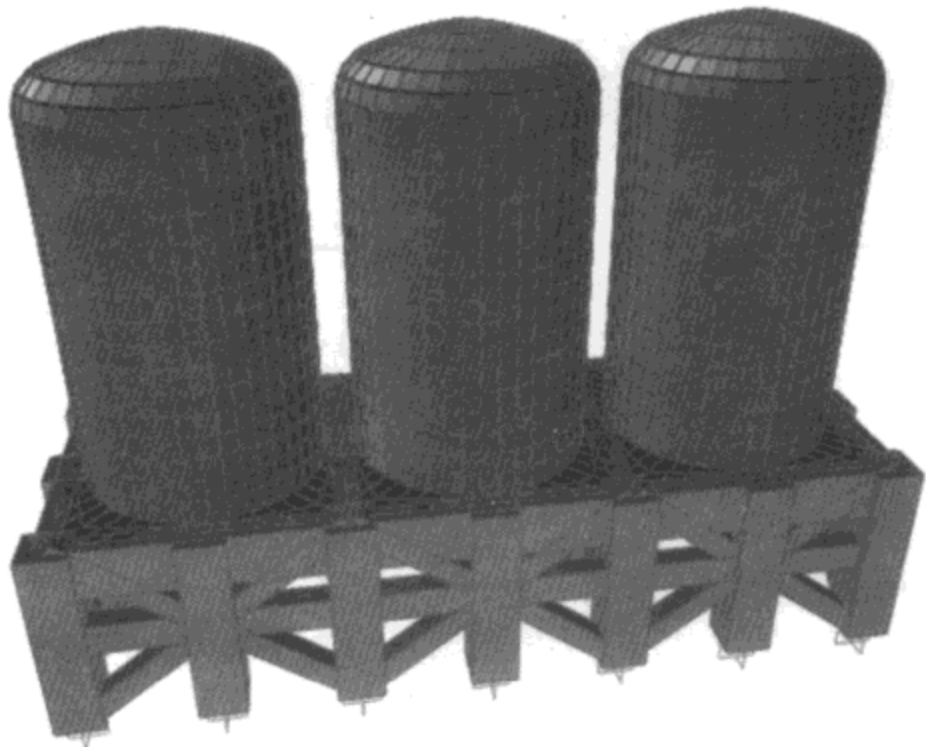


图 28-26 模型算例三维图

1. 模型处理

对于该筒仓结构，框架部分可以使用 SAP2000 平面和三维建模方式进行建立，罐体部分可以使用本章所给出的技巧（使用线旋转拉伸成面）进行方便的建立。比较复杂的部分是支撑楼板位置，因为楼板是矩形的，它的剖分要考虑与圆型罐体的单元节点连接，如果直接使用矩形楼板剖分是很难实现的。这时为了实现这一点可以使用 SAP2000 编辑命令中从模板中添加模型的功能，选择“管和板”模板，将带有圆洞的矩形板和圆形板进行组合（见图28-27）。

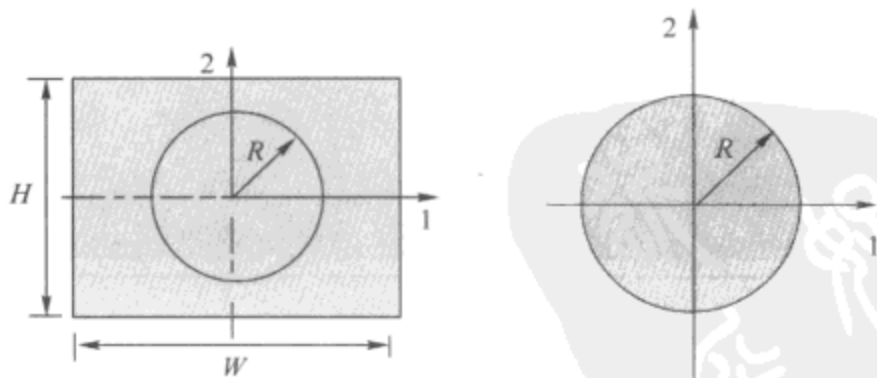


图 28-27 模型底板开洞及罐体底板示意图

需要注意的是圆洞和圆板的 R 为罐体的半径，即 2.5m，将两个部分进行适当的剖分，然后组合形成如图 28-28 的厚板模型。

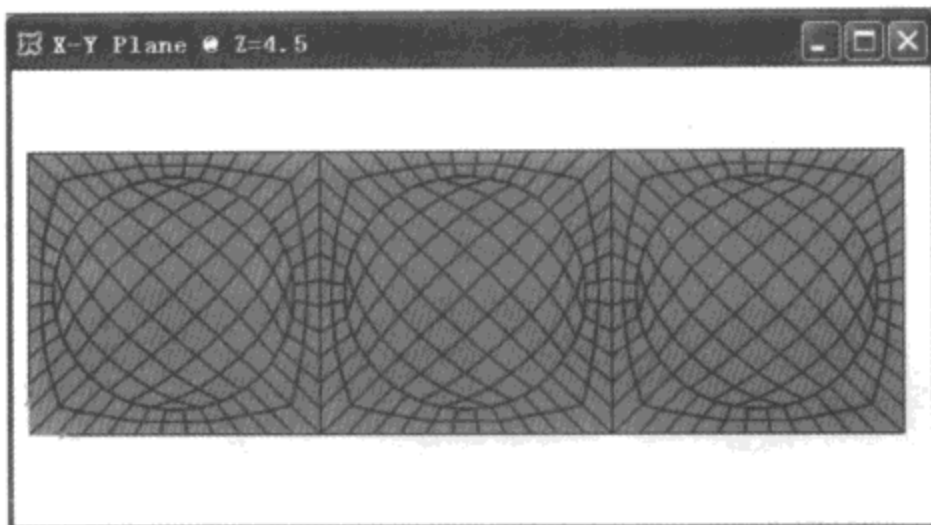


图 28-28 模型底板及剖分示意图

我们可以看到圆板与圆洞的边界部分大部分节点并没有匹配，因此需要使用程序中面单元的自动线约束功能，以保证有限元分析中面单元节点的连续性。

2. 荷载施加

本算例考虑以下几种荷载：

- (1) 地震作用：地震烈度 8 度，最大影响系数为 0.16；场地特征周期 0.4s；
- (2) 风荷载作用：地面粗糙度 B 类，基本风压 0.45kN/m^2
- (3) 内部液体压力荷载，内部液体重度为 10kN/m^3 （见图 28-29）；
- (4) 温度梯度：考虑罐体内部与外部温差为 50 度。

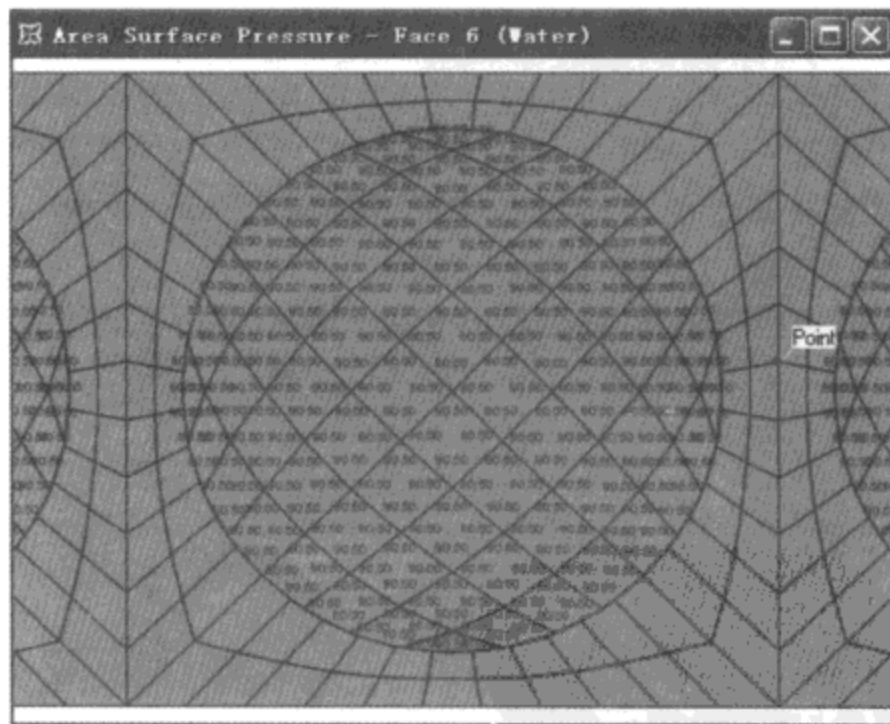


图 28-29 模型液体内部压力底板部分定义

需要注意的是对于该结构，地震和风荷载作用需要考虑结构罐体充满液体和完全空置两种状态，不考虑罐内液体流动的减震效果。由于结构是柱面体系，并且结构没有明显的刚性隔板，因此风荷载使用面对象进行施加，使用的体型系数如图 28-30 所示。

3. 分析结果

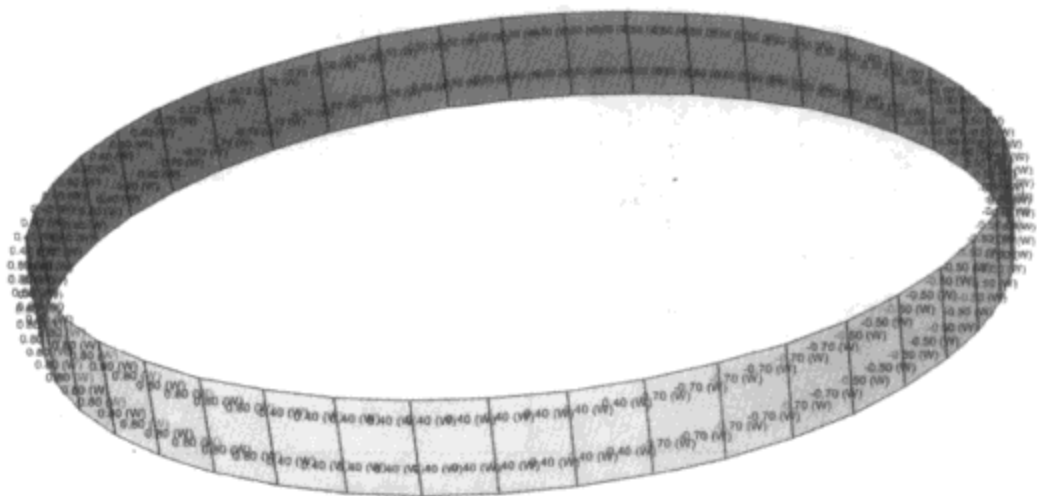


图 28-30 模型风荷载体形系数定义示意图

(1) 模态分析

对该结构的模态分析，我们使用两个模型考虑了两种情况（罐体中充满液体和空置）的模态分析。表 28-1 给出了两种情况下结构前十二个振型所对应的周期。

两种情况的模态信息 表 28-1

| 振型序号 | 充满液体时 | 空置时 | 振型序号 | 充满液体时 | 空置时 |
|------|----------|----------|------|----------|----------|
| | 周期 (s) | 周期 (s) | | 周期 (s) | 周期 (s) |
| 1 | 0.271803 | 0.063328 | 7 | 0.091523 | 0.032135 |
| 2 | 0.248433 | 0.055203 | 8 | 0.090513 | 0.030772 |
| 3 | 0.245403 | 0.05469 | 9 | 0.084641 | 0.028916 |
| 4 | 0.230549 | 0.051023 | 10 | 0.084414 | 0.021357 |
| 5 | 0.227335 | 0.048545 | 11 | 0.083957 | 0.020323 |
| 6 | 0.221626 | 0.047243 | 12 | 0.083405 | 0.019668 |

罐体内是否存在液体对结构自重影响是非常大的，因此两种模型的自振周期相差是非常大的，从表 28-1 可以看出，每个振型周期基本相差 4~5 倍，由此带来结构地震作用的影响是不容忽视的。

虽然两种情况下结构的振型周期相差是比较大的，但是结构体系比较简单，无论是否充满液体，结构的质量都是集中在上部罐体部分，因此结构的振型形状是比较相近的。图 28-31 给出了结构在罐体空置状态下前四个振型图。

(2) 地震作用下结构响应

对于地震作用下的响应我们也考虑了储液罐中充满液体和空置两种状态，为了综合比较分析结果，这里给出了框架部分（包括斜撑）的地震作用响应、罐体以及底部承台板的应力状态（见图 28-32）。

从表 28-2 给出框架部分的地震作用响应可以看出，结构在两种状态下的地震响应相差是

框架部分地震作用响应 表 28-2

| 项 目 | X 方向剪力 | Y 方向剪力 | X 方向倾覆力矩 | Y 方向倾覆力矩 |
|------|---------|---------|----------|----------|
| 充满液体 | 8752.08 | 9762.86 | 7853.67 | 11367.42 |
| 空置时 | 715.93 | 809.69 | 638.32 | 928.21 |

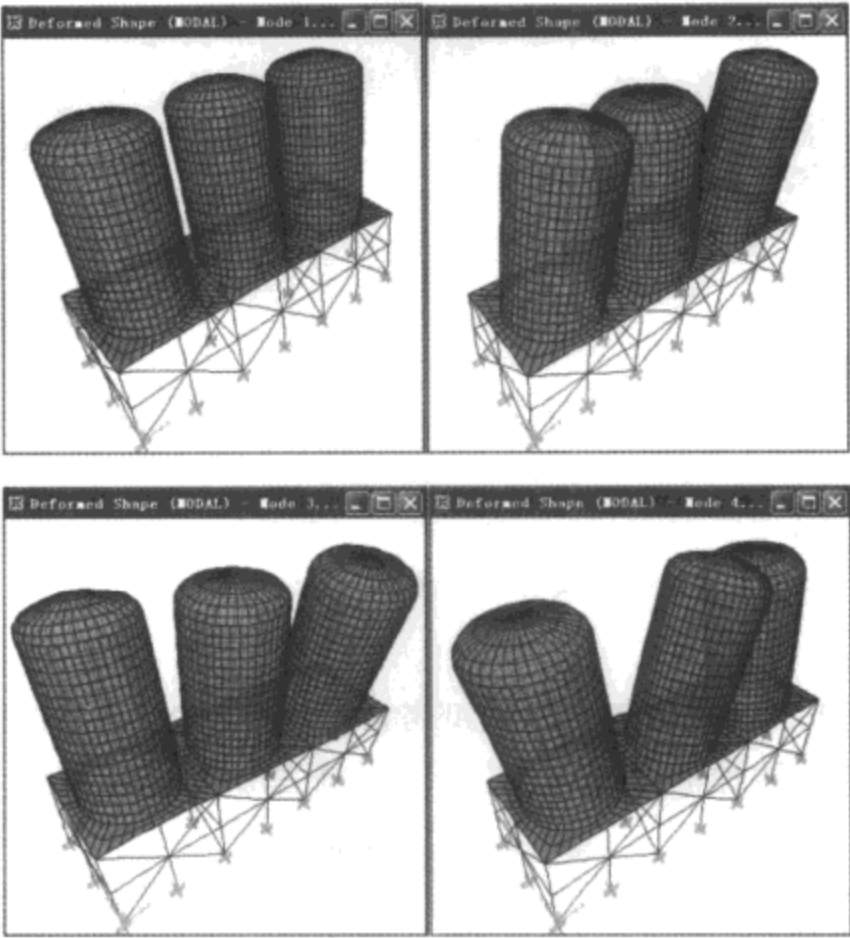


图 28-31 算例前四阶振型图

巨大的，考虑液体充满时地震作用下的剪力和倾覆力矩比空置时大了十倍以上。这主要是源于两个方面：一个方面是由于两种结构的模态分析结果之差异，两种情况下的第一振型周期都没有超过场地特征周期 $T_g=0.4s$ ，并且在空置状态下结构的第一周期只有 $0.06s$ ，小于 $0.1s$ ，因此根据我国规范反应谱曲线的信息，可以知道两种状态下结构的地震影响系数存在比较大的差异，而且是充满液体状态比空置状态大。另一方面，在充满液体时结构的质量也远远大于空置时的质量（在程序中使用的是附加质量来考虑的），这也导致了地震作用的差异。

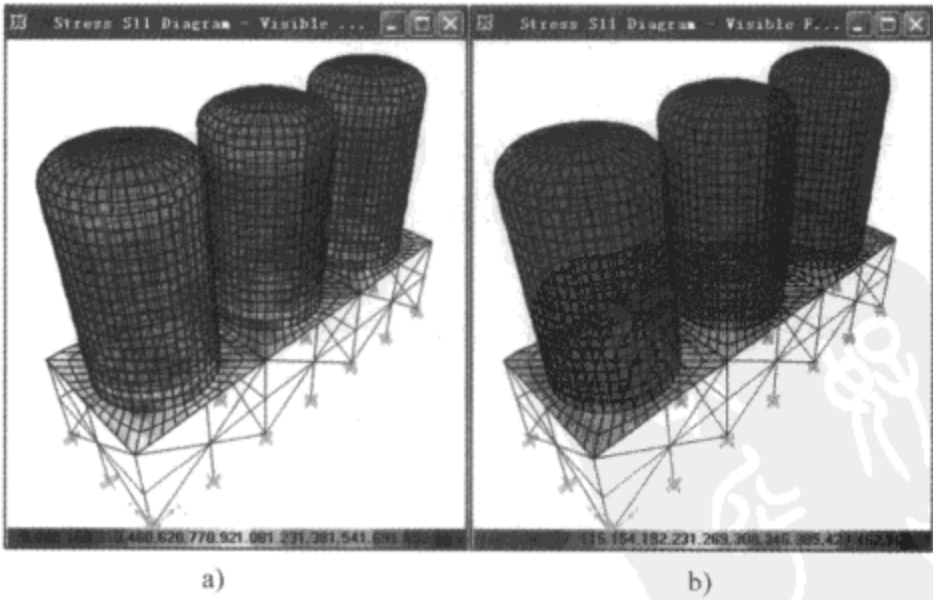


图 28-32 算例水平双向地震作用下最大主应力图
a) 第一种情况；b) 第二种情况

从图 28-32 给出的结构两种状态下罐体和承台板的应力状态可以看出,两种状态的应力值相差是比较大的。从结构整体来看,结构罐体部分应力是相对较小的,应力极值主要发生在承台板部位,因此我们单独将底板提出来进行了相关比较分析。

第一种情况底部承台板的应力状态 (图 28-33):

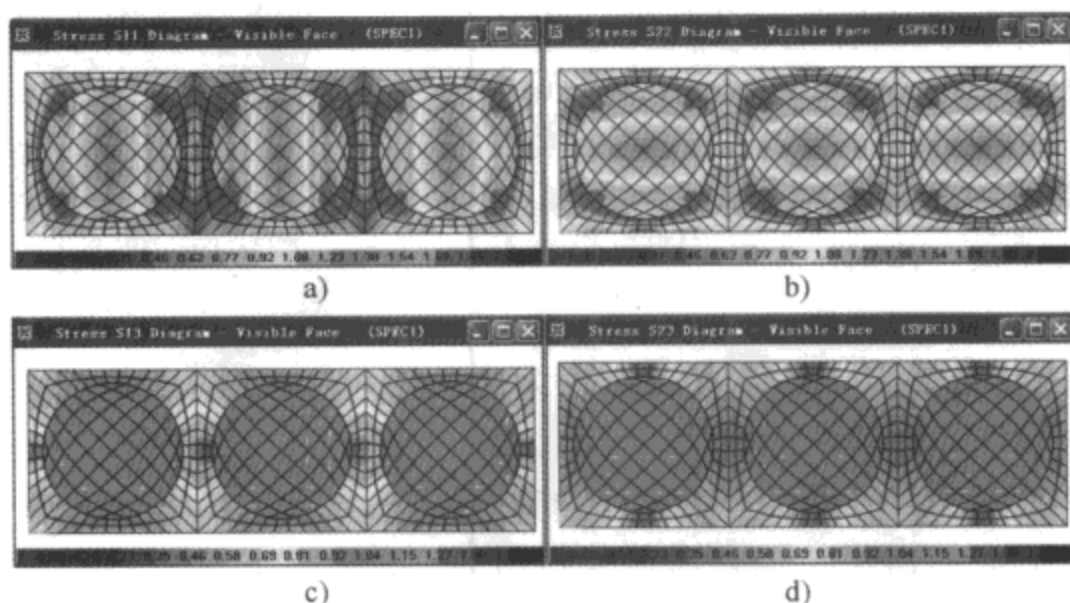


图 28-33 模型 1 地震作用下底板正应力和剪应力图

a) S11; b) S22; c) C13; d) S23

第二种情况底部承台板的应力状态 (图 28-34):

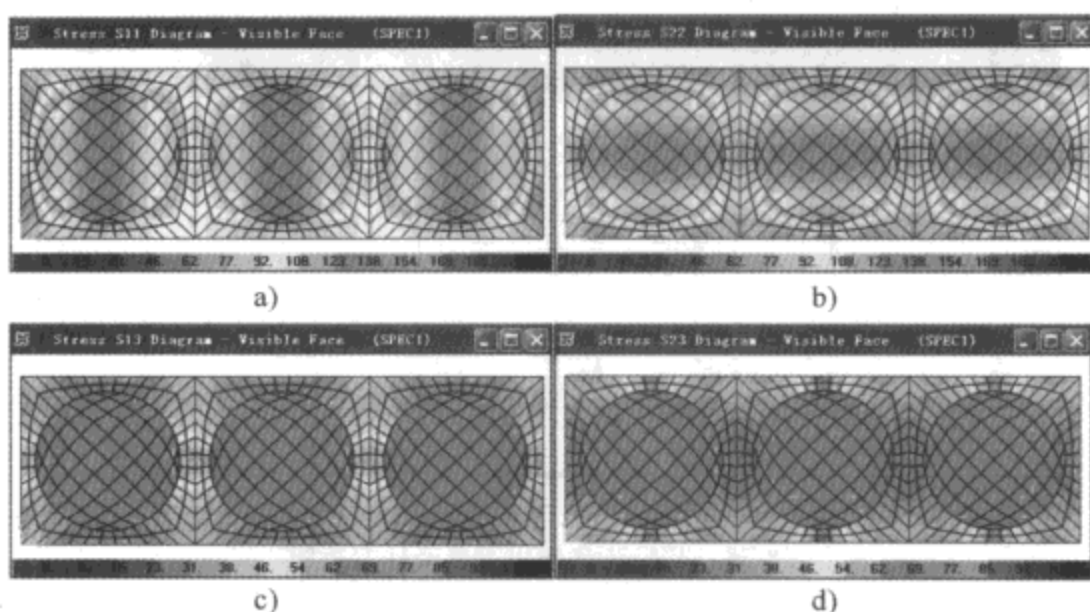


图 28-34 模型 2 地震作用下底板正应力和剪应力图

a) S11; b) S22; c) S11; d) S22

从上面图 28-33 和图 28-34 可以看出在两种情况下,水平地震作用下承台板应力分布特征是相似的,正应力极值主要出现在罐体和承台板相交的圆环范围内,并且是在罐体底板范围以外,而剪应力主要发生在承台板罐体与框架梁之间,二者距离越短的位置剪应力越大,这也是符合这一结构的基本特征的。

虽然分布特征相似,但是两种状态下,两个方向正应力和两个方向的剪应力绝对值相差却是比较大的,相同位置两种状态下的应力值相差在 4~5 倍之间,应力极值相差为 5 倍。与框架部分的效应相同,罐体充满液体时应力值大,其原因与我们前面所描述的相同。

对此算例结构体系地震作用分析,从动力学角度讲,在一定的地震频率作用下,罐体内

部液体可能会发挥减震的效果，可能会对结构抗震更有利，这一点在一些其它专业文献中也有过讨论。这种作用的发挥取决于液体自振周期与地震作用周期的相近程度，而液体的自振周期与液体的深度有关，因此从结构最不利条件设计角度出发，并不应该考虑这一作用。此外，液体充满整个罐体时是对结构最不利的状态，这时液体的流动自振将受到限制而很难发挥作用，在本算例计算分析时没有考虑这一作用。

(3) 风荷载作用下结构效应

该结构罐体高度比较高，罐体直径比较大，迎风面积较大，故需要对风荷载作用下的效应进行考虑。由于结构的对称性，我们只考虑 X 方向风荷载作用，图 28-35 给出了结构在风荷载作用下的变形图。

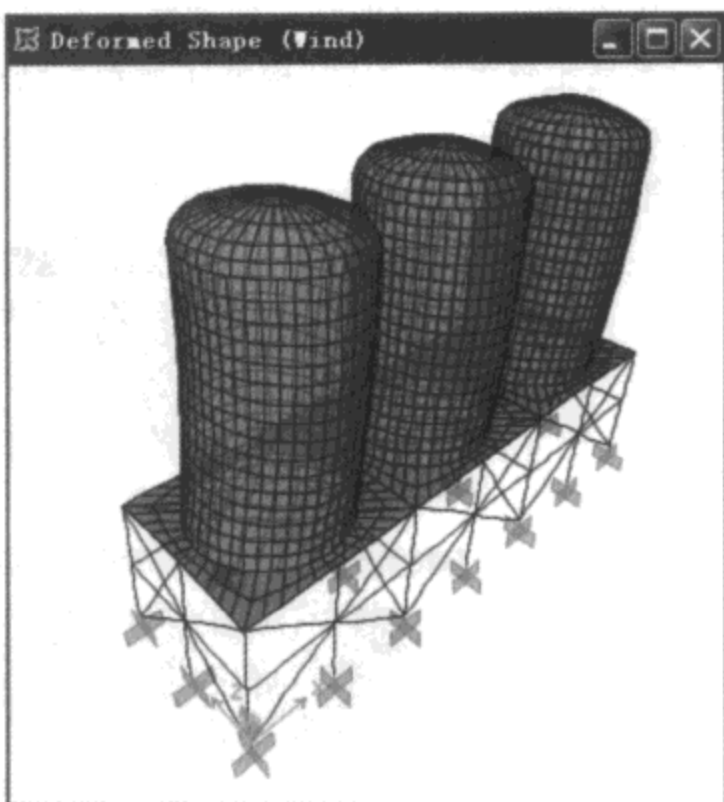


图 28-35 模型 X 方向风荷载作用变形图

图 28-36 给出了结构在风荷载作用下南立面框架柱弯矩图，另一个立面框架柱弯矩与此相同。从图中可以看到，风荷载作用下框架部分的弯矩是比较小的，特别是与地震作用下结构的效应相比，风荷载几乎是忽略的。

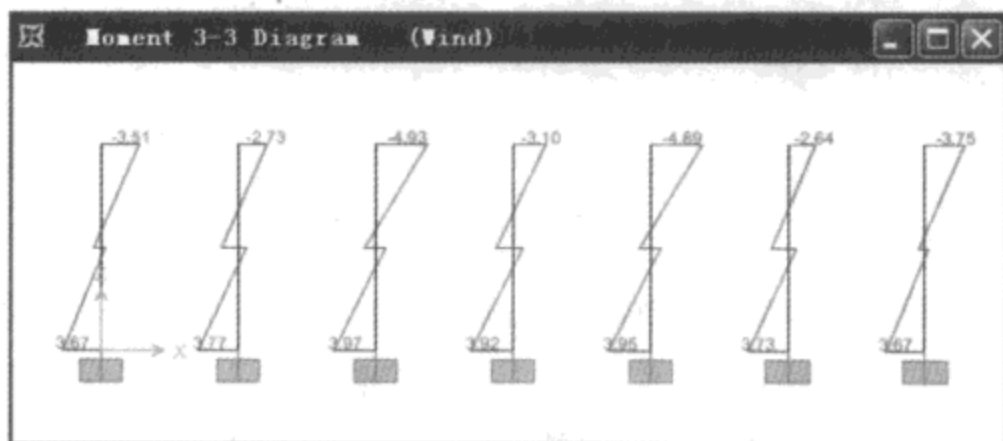


图 28-36 X 风荷载作用下框架柱弯矩图

图 28-37 给出了结构在风荷载作用下的正应力和剪应力分布状态，罐体和承台板的正应力和剪应力都比较小，正应力极值没有超过 0.1MPa，剪应力极值没有超过 0.01MPa，因此不起控制作用。

从风荷载的分析结果可以看出，相对于比较大的地震作用荷载和水压力荷载，风荷载的作用效应是比较小的。因此风荷载在这一结构的设计中不起控制作用。

(4) 水压力作用下结构效应

在罐体内储存一定的液体时，将产生对结构体系、特别是罐体和承台板较大的液体压力作用，而且这一压力作用随着液体量的增加而增大，这里我们给出了罐体内充满液体的压力作用结果。

图 28-38 给出了南立面框架柱在罐体空置状态下（恒载作用下）和充满液体状态下（恒

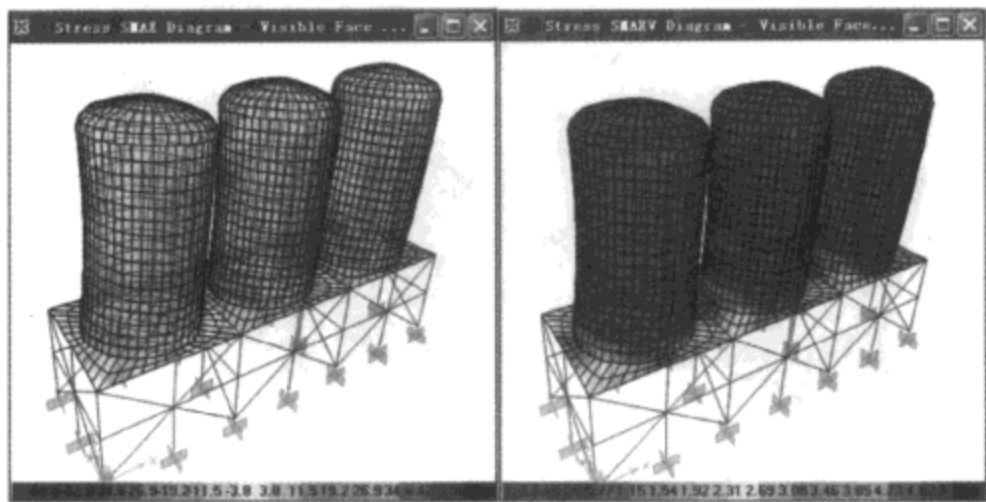


图 28-37 X 风荷载作用下结构应力图

载+静水压力作用)轴力值,由图 28-38 可以看出由于液体压力作用使框架柱的轴力平均增加了百分之五十以上。对于框架部分的设计,可以考虑在上部附加恒载来考虑液体的自重作用,在 SAP2000 程序中可以通过节点样式施加真实液体压力状态,液体压力可以真实地反映液体自重对于下部框架部分的内力影响。

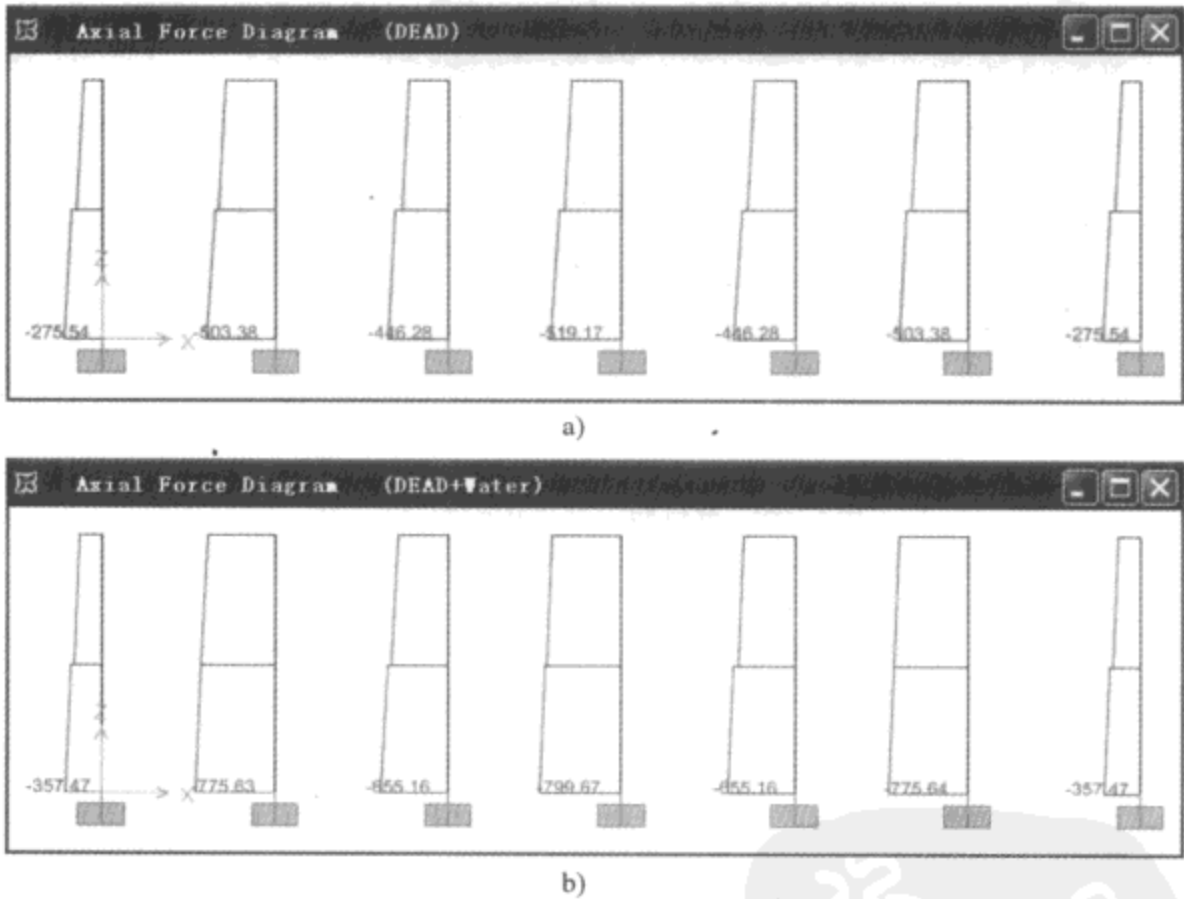


图 28-38 自重及液体压力作用下框架柱轴力图

a) 罐体空置时框架柱轴力图; b) 罐体充满液体时框架柱轴力图

下图 28-39 给出了罐体和承台板部分壳体在静水压力作用下的最大正应力和最大剪应力:

由于罐体本身是轴对称体系,静水压力带来的罐体部分的剪应力是比较小的,极值发生在罐体底部,为 0.15MPa;而正应力发生在距底部四分之一高度位置好,因为底板的约束作用并非发生在底板连接部位,极值为 0.67MPa。而相对而言底板的正应力和剪应力是比较大的。因此,此处单独输出了承台板在静水压力和恒载综合静力作用下的应力分布状态,如图 28-40。

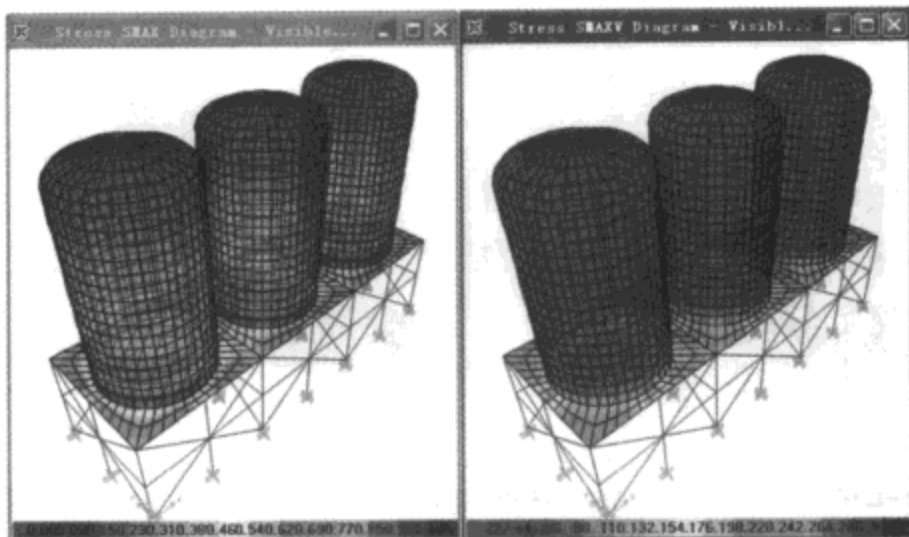


图 28-39 液体压力作用下结构最大正应力和剪应力图

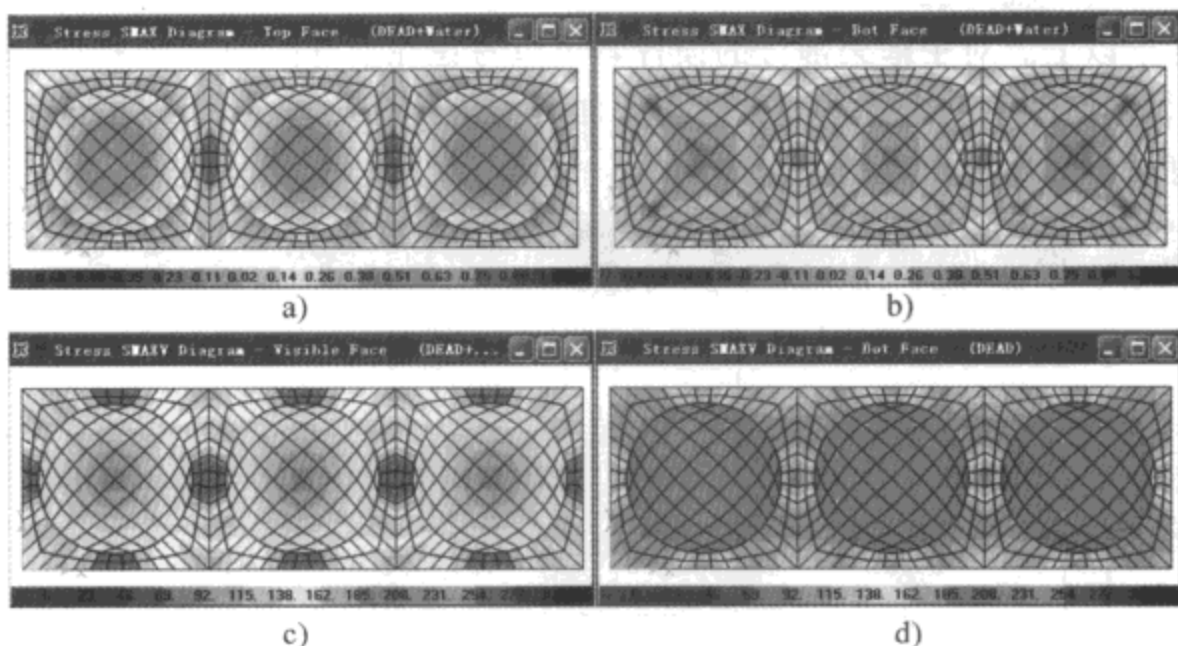


图 28-40 静荷载作用下结构底板应力图

a) SMAX-顶面; b) SMAX-底面; c) SMAXV-顶面; d) SMAXV-底面

图 28-40a) 和图 28-40b) 给出了静载作用下的承台板上下表面正应力分布状态, 上表面罐体范围内为压应力, 极值在 -0.6MPa 左右; 罐体与框架梁之间为拉应力, 极值在 1.8MPa 左右; 下表面罐体范围内为拉应力, 极值在 0.9MPa 左右; 罐体与框架梁之间为压应力, 极值在 -0.4MPa 左右。图 28-40c) 和图 28-40d) 给出了静载作用下承台板的剪应力分布状态, 为了对比结果同时输出了单独恒载作用下剪应力的分布状态, 可以看出两者的应力分布状态是相近的, 极值出现在罐体与框架梁之间的部位, 但是绝对值相差较大, 单独恒载作用下剪应力极值为 0.29MPa ; 恒载与水压力荷载作用下剪应力极值为 0.56MPa , 两种情况相比大致差了一倍左右。

28.3.2 石化类结构算例

为了说明 SAP2000 对石化类工业结构分析计算的处理, 我们给出如下某工程算例。该工程为化工类建筑, 由框架结构和工业设备组成。框架部分高 78.38m , 共十一层, 其中底

部三层为混凝土结构，四层以上为钢结构。设备总高为 45m，由钢壳体组成，壁厚 12mm~16mm 不等。设备内部有附加恒载作用，考虑附加恒载的设备部分总重量为 3540kN，设备通过局部厚板作用于三层混凝土框架上。图 28-41a) 为框架部分三维模型；b) 为设备部分的三维模型；c) 给出了结构体系三维模型。

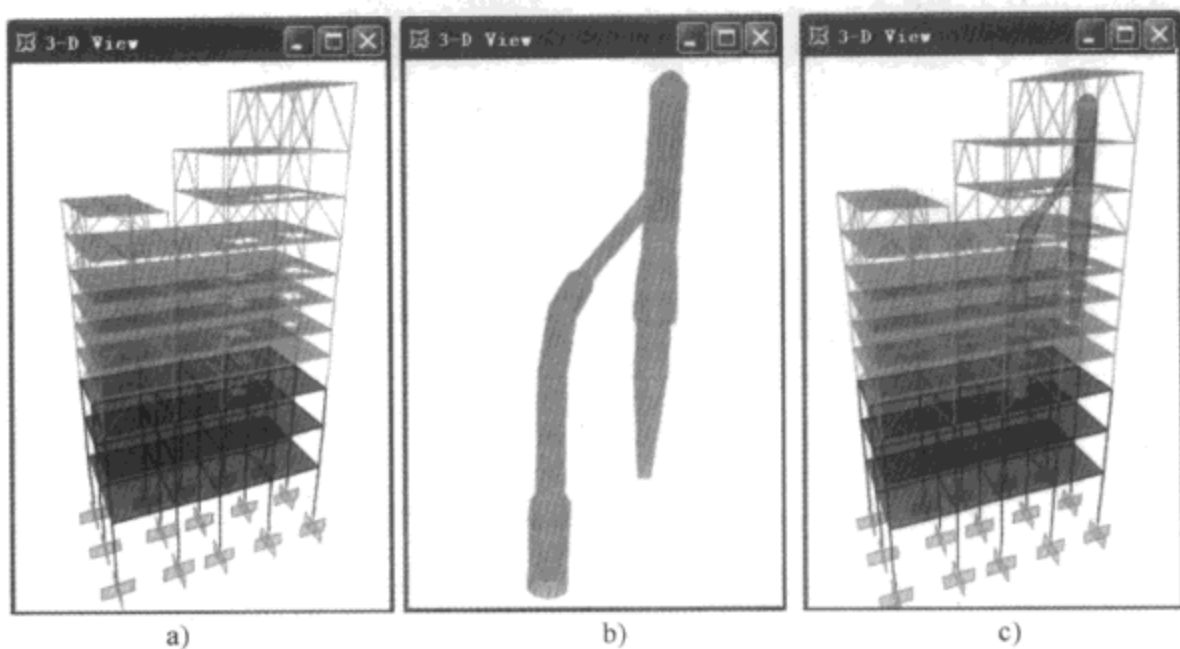


图 28-41 石化类结构算例模型三维图

a) 框架部分模型；b) 设备部分模型；c) 组合后算例模型

1. 建模及模型组装

对此模型，可以使用我们前面所描述的分块建模然后组装的方法得到。框架部分比较简单，可以直接在程序的三维建模空间来完成，设备部分相对比较复杂，需要注意直径的变化和连接部位的处理。

当两部分的模型建好以后，可以使用程序将两个模型组装成为一个模型，一般情况下是将设备模型导入到建筑结构模型。

2. 结构及设备连接部位的处理和分析

在本算例中，设备直接通过楼板与结构相连，局部的板厚进行了加大，如图 28-42，该部分局部板厚为 1.2m。

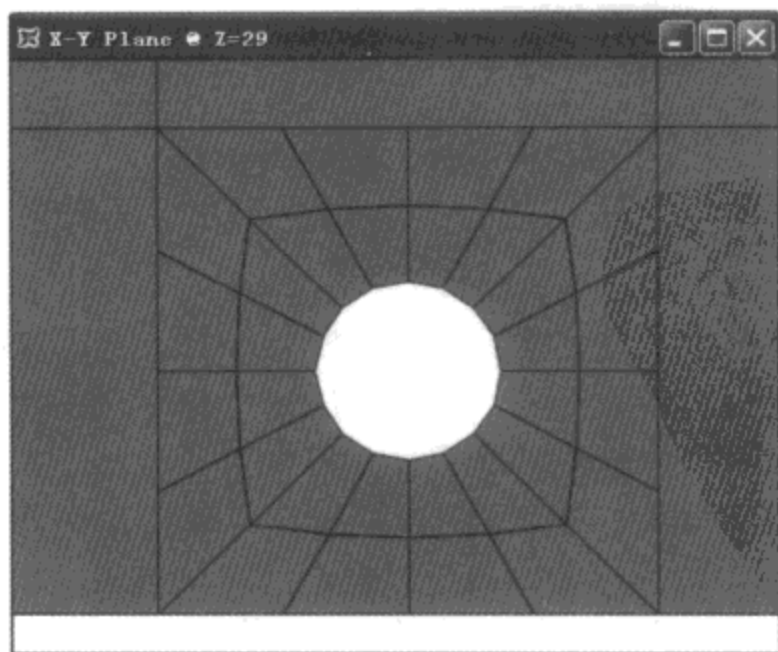


图 28-42 连接厚板局部模型

与算例中模型相似，工业设备的高度可能会比较高，穿过建筑结构若干楼层，设备与结构之间在大部分楼层位置不做任何连接，结构与设备之间有一定的预留变形空间，这样，可以不考虑结构之间的碰撞问题（见图 28-43）。

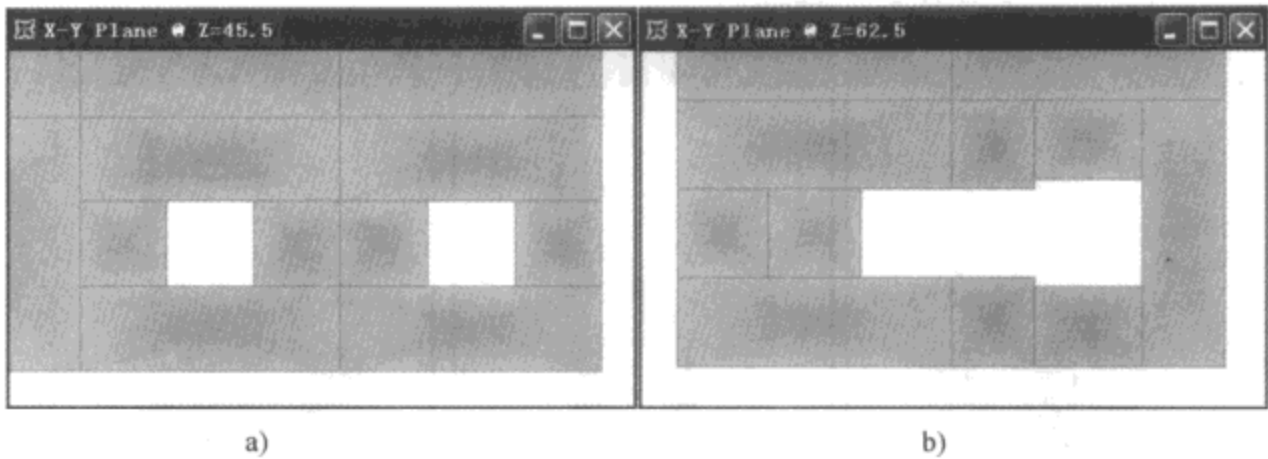


图 28-43 设备穿越楼板处局部模型

由于设备本身质量分布存在很大的偏心，在悬挑部位中间部位使用双向两拉杆与框架梁相连（如图 28-44 所示），拉杆两端为铰接。在该标高位置使用恒力杆与结构相连，根据恒力杆的特性在模型中直接使用荷载进行模拟（如图 28-44 所示）。

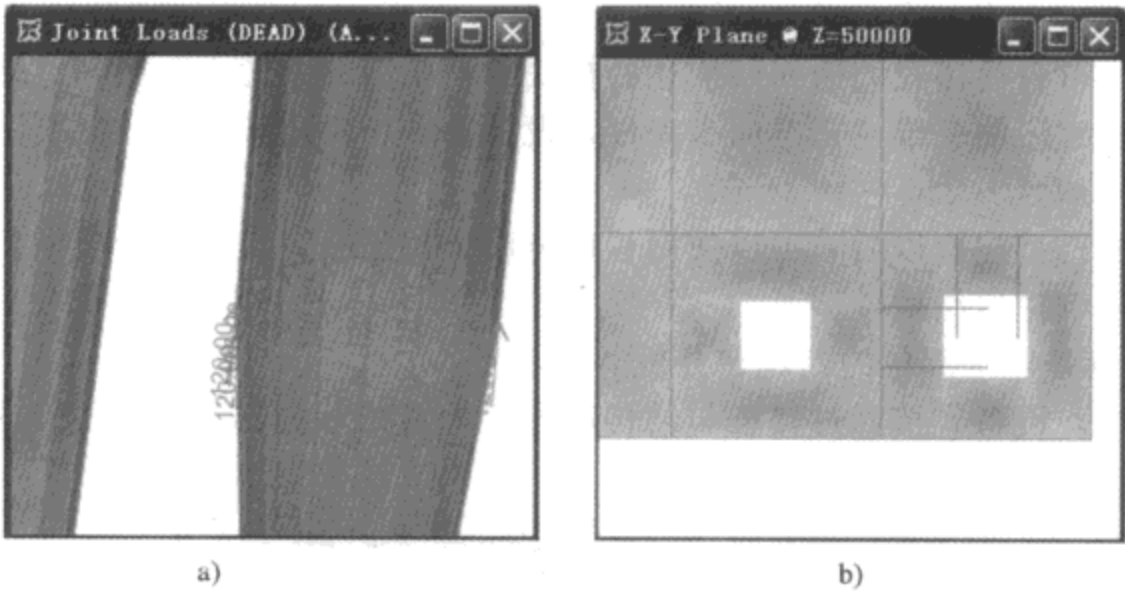


图 28-44 组合结构体系细部处理

3. 结构及设备作用的定义

本算例考虑了以下荷载作用：

- (1) 地震作用：地震烈度 8 度，最大影响系数为 0.16，考虑竖向地震作用。
- (2) 风荷载作用：场地类别为 B 类，基本风压 0.45kN/m^2 。
- (3) 设备内部压力荷载，内部液体重度为 10kN/m^3 。
- (4) 设备部分温度梯度荷载：考虑设备内部与外部温差为 50 度。

4. 分析及结果讨论

与结构体系相关作用定义完成之后，可以进行结构体系的整体分析。为了综合比较传统等效荷载方法和 SAP2000 整体分析方法结果的差异，在本算例中我们使用 SAP2000 进行三

种模型的分析：考虑设备等效荷载的传统方法（简称 M1）、设备部分单独分析设计的模型（简称 M2）和整体体系综合分析模型（M3）。

在本算例中，我们比较了模态分析结果，水平地震作用和竖向地震作用结果。因为风荷载对于该结构不起控制作用，并且风荷载所使用的方法一般为规范所使用的静荷载计算方法，除结构第一振型的周期值影响外，对于两种方法（M1 和 M3）不会产生明显差异，因此我们没有对其进行比较。

(1) 模态分析结果

此处给出了模态分析前十个振型所对应的周期值（表 28-3），可以看出，模型 M1 和模型 M2 两个方向平动周期是很接近的，实际上从振动学角度讲这对于整个结构是不利的。而模型 M1 与模型 M3 相比，前三个振型周期最大相差不大，最大差异为 3.6%，但是对于后面的振型则相差比较大，第四、第五振型相差达到 50% 左右。主要原因是模型 M3 考虑了设备为主的两个平动振型，这在等效荷载模型中是不能给出的。

模态分析结果（周期，单位：s）表 28-3

| 振 型 序 号 | M1 | M2 | M3 |
|---------|------|------|------|
| 1 | 1.75 | 1.78 | 1.82 |
| 2 | 1.66 | 1.75 | 1.71 |
| 3 | 1.55 | 0.81 | 1.56 |
| 4 | 0.75 | 0.77 | 1.46 |
| 5 | 0.73 | 0.31 | 1.26 |
| 6 | 0.70 | 0.24 | 0.74 |
| 7 | 0.67 | 0.12 | 0.72 |
| 8 | 0.65 | 0.10 | 0.70 |
| 9 | 0.56 | 0.10 | 0.67 |
| 10 | 0.53 | 0.09 | 0.65 |

SAP2000 程序对于整个结构的模态分析并不是对于两个系统的简单叠加，而是真实考虑了两个系统的相互作用，这可以通过图 28-45 给出了结构的前八阶振型图看出。

(2) 地震作用下楼层效应

表 28-4 给出了两个模型水平地震作用下的层剪力和倾覆力矩（此处只考虑结构主体部分楼层），将模型 M1 每层的层剪力和倾覆力矩与模型 M3 的相比，可以发现模型 M3 各楼层都是偏大的，最大相差在 7.5% 左右，可以看出考虑水平地震作用使用等效荷载方法进行的结构设计是偏于保守的。

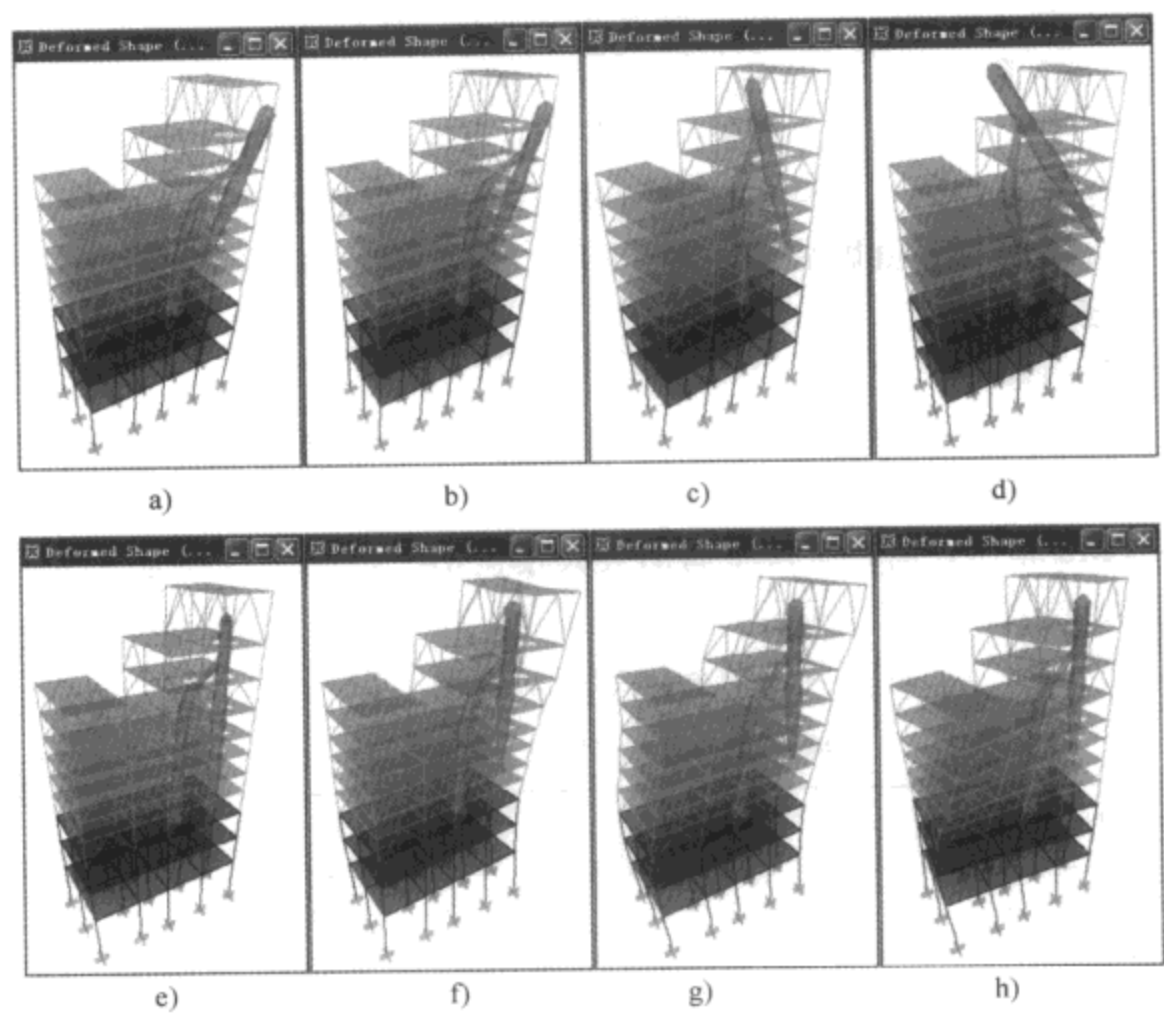


图 28-45 结构模态变形图（前 8 振型）

结构体系水平及竖向地震作用下效应

表 28-4

| 楼层位置 | 水平地震作用 | | | | 竖向地震作用 | |
|------|-------------|----------------|-------------|----------------|--------------|--------------|
| | M3 | | M1 | | M3 | M1 |
| | 层剪力 (kN) | 倾覆力矩 (kN·m) | 层剪力 (kN) | 倾覆力矩 (kN·m) | 层地震力 (kN) | 层地震力 (kN) |
| 1 | 8439 | 329941 | 8960 | 340920 | 5345 | 8588 |
| 2 | 7852 | 234865 | 8322 | 239405 | 5117 | 8182 |
| 3 | 6561 | 169417 | 6865 | 169734 | 4724 | 6845 |
| 4 | 4510 | 115039 | 4819 | 119882 | 3795 | 4984 |
| 5 | 3471 | 87298 | 3669 | 90124 | 3471 | 4048 |
| 6 | 3379 | 68525 | 3537 | 70670 | 2956 | 3317 |
| 7 | 2905 | 51521 | 3005 | 52589 | 2533 | 2789 |
| 8 | 2285 | 37134 | 2457 | 39408 | 2214 | 2359 |

由于结构体系比较复杂，而且处于 8 度区，除了考虑水平地震所用外，尚需要考虑竖向地震作用。表 28-4 后半部分给出了两个模型的竖向地震作用，我们可以看出模型 M1 与模型 M3 相比地震作用是偏大的，而且楼层位置越低偏差越大，最大相对偏差达到 60%。这可以说明考虑竖向地震作用，应用等效荷载的设计方法时，计算结果是显著偏大的。

(3) 连接部位

这一结构体系的设备和结构主要是通过底部厚板进行连接的, 需要考虑连接厚板的应力分布情况。图 28-46 和图 28-47 分别给出了恒载作用下和水平地震作用下厚板的剪切应力分布状态。通过分析可以看出两种模型的应力分布形式是相近的, 但是应力的极值却相差 3~8 倍, 模型 M1 和模型 M3 相比结果偏小很多, 因此偏于不安全。

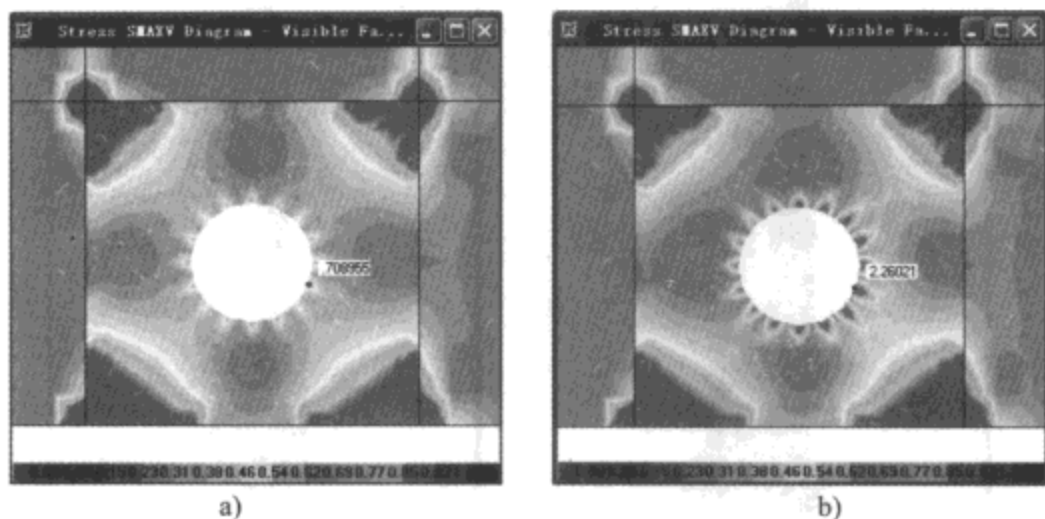


图 28-46 恒载作用下连接板剪切应力

a) M1; b) M3

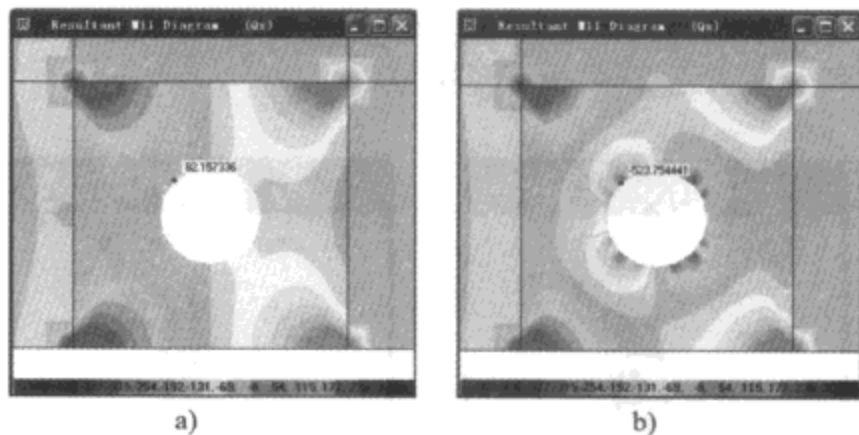


图 28-47 水平作用下连接板剪切应力

a) M1; b) M3

(4) 设备部分的设计

使用 SAP2000 程序可以直接进行这类工业结构设备部分的设计, 考虑对整个结构体系进行整体分析所得设备部分的结果与传统方法 (单独进行设备部分的分析) 的结果一般会存在比较大的差别, 我们给出模型 M2 和模型 M3 设备部分的分析结果如图 24-48 所示。

除了整体动力荷载作用外, 本例设备部分尚需考虑内部压力荷载和温度梯度荷载作用, 对于两种模型的算法 (模型 M2 和模型 M3), 仅作用在设备部分的这些静荷载形式上是自平衡的, 理论上可以确定不会产生较大的结果差异, 因此本文并没有给出这些荷载作用下的分析结果。

针对设备设计, 我们分别给出了模型 M2 和模型 M3 两个模型在水平地震作用 (图 28-48) 和竖向地震作用下 (见图 28-49) 设备部分的应力分布情况。从结果我们可以看出, 两种作用下两个模型的应力分布状态是相近的, 但是模型 M2 对于设备单独分析的应力结果普遍比模型 M3 中相同作用下设备的应力结果偏大, 极值相差 2~3 倍, 因此基于模型 M2 的应力结果进行设计是偏于保守的。

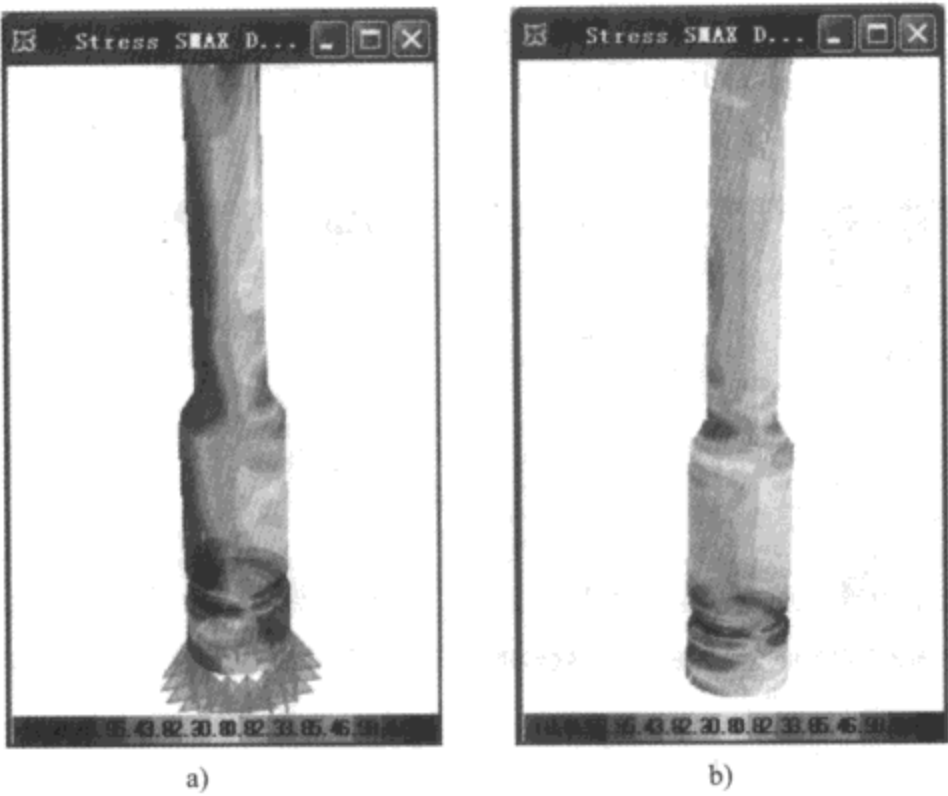


图 28-48 水平地震作用下设备正应力
a) M2; b) M3



图 28-49 竖向地震作用下设备正应力
a) M2; b) M3

第29章

斜拉桥的分析应用

斜拉桥是由桥塔、主梁、索三部分组成的一种组合体系桥梁，属于高次超静定的结构。由桥塔引出的斜拉索对梁是一个多点的弹性支承，使主梁受力类似于多跨的连续梁，大大减少主梁的弯矩。由于斜拉索的存在，索将主梁荷载以轴压力的方式传递给桥塔，而主梁承受着由斜拉索传来的竖向支承反力与斜拉索水平分力产生的轴向压力。一般来讲，主梁与桥塔均处在偏心受压的受力状态下。与悬索桥相比，斜拉桥竖向刚度及抗扭刚度均较强，抗风稳定性要好一些。诚然斜拉桥与其它桥梁相比，包含着较多的设计变量，在其设计计算过程中，如果不利用有限元技术，设计大跨度的斜拉桥几乎是不现实的。

本章应用 SAP2000 本身的计算特点，就斜拉桥的主要计算问题进行大致的探讨。

29.1 斜拉桥主要组成部分在 SAP2000 中的模拟

29.1.1 主梁模型

现有的桥面系模型通常的做法分为两类：第一类是把桥面系模拟为一个梁系模型，常用的桥面系梁系模型包括单主梁模型、Ⅱ形模型、双主梁模型和三主梁模型等，通常梁系模型用在全桥模型的分析中；第二类是采用壳或者实体单元来模拟，这种方式多用于细部分析。随着计算机硬件水平的提高，目前在很多桥梁的全桥分析中，主梁直接采用壳单元或者实体单元。采用壳单元模型建模最为方便，与梁单元模型相比，没有了刚度与质量的变换过程，但耗费机时，对计算机的硬件要求较高。一般来讲做全桥模型基本都采用梁单元模型。

下面主要介绍一下主梁用梁单元系的情况：

单主梁模型

单主梁模型（图 29-1 所示）的中间轴线通过主梁截面的扭转中心。把主梁的拉伸刚度 EA 、竖向抗弯刚度 EI_y 、横向抗弯刚度 EI_z 和自由扭转刚度 EI_d 以及分布质量 m 和质量惯性矩 I_m 都集中在中间轴线上。双索面斜拉桥的主梁则通过短刚臂和斜拉索连接形成“鱼

骨式”模型。这种模型的优点是主梁的刚度系统和质量系统是正确的，缺点无法考虑主梁的约束扭转刚度的贡献。对于自由扭转刚度较小的开口截面（例如叠合梁截面），这种模型会直接影响起重要作用的桥面扭转频率的精度，给正确评价大桥的气动稳定性带来一定困难。

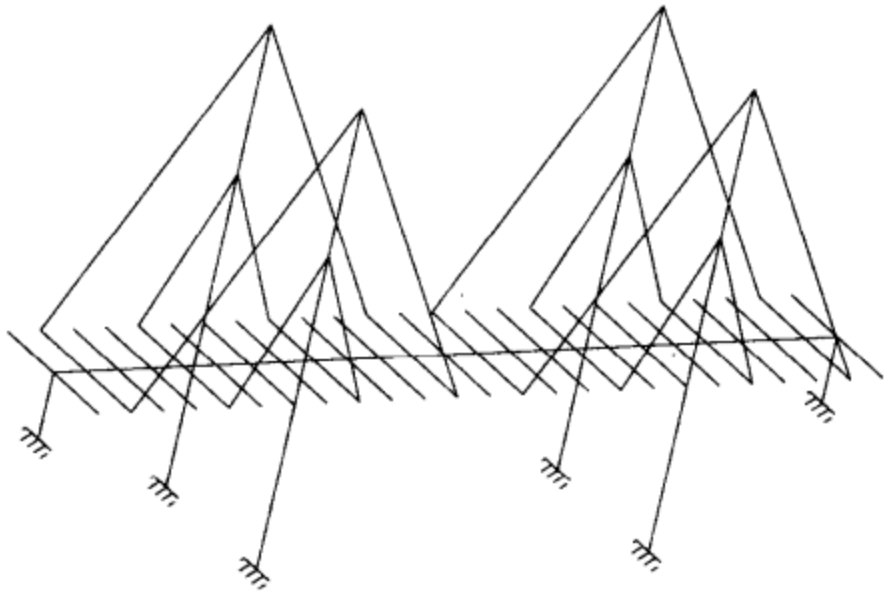


图 29-1 单主梁模型

单主梁模型适用于主梁为自由扭转刚度较大的闭口（单室或多室）箱梁截面。

II 形模型

II 模型（图 29-2 所示）把桥面系的刚度系统和质量系统分开处理，刚度集中在中间节点上，节点布置在截面的剪切中心处，而质量分散在左右两个质点上，质点的横向间距取两片边主梁的中心距，质点的竖向位置设置在通过截面质心的水平线上，节点和质点之间用水平刚臂和竖向刚臂连接，形成 II 型。这种模式由于质量分布在两侧，因而能自动形成转动惯量。该模型把刚度系统和质量系统放在各自的位置上，能比较正确地反映截面实际受力状况，但节点数和杆件数太多，计算量工作量大，且同样由于刚度集中在一个节点上，无法考虑翘曲刚度的影响。

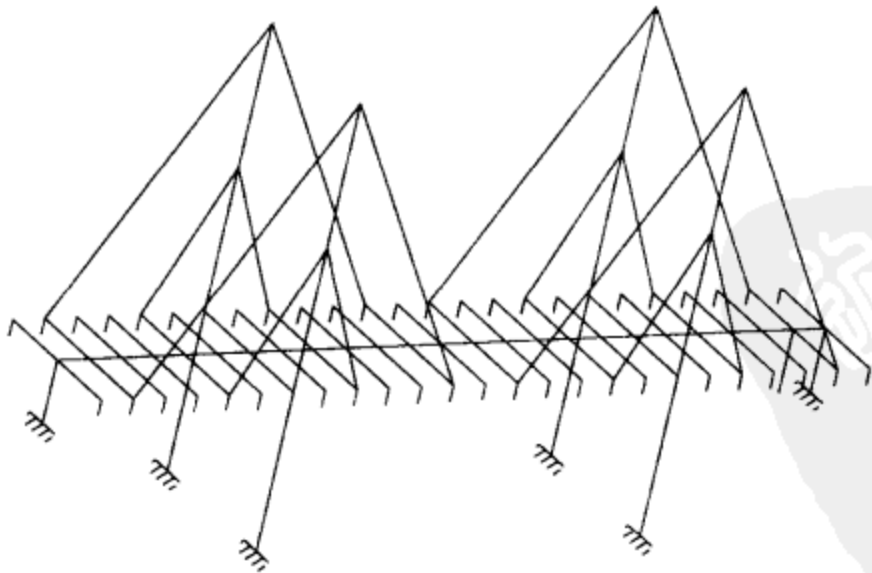


图 29-2 II 形模型

II 形模型适用于 II 形主梁或由分离式主梁和桥面板组成的组合截面。

双主梁模型

双主梁模型（图 29-3 所示）由两根主梁组成，中间用横梁联系，主梁间距取两索面距离，横梁的间距取索距。每片主梁的面积和竖向弯曲惯矩分别为全断面值的一半，侧向刚度采用挠度相等原理计算等代刚度。横梁刚度采用实际刚度，桥面系质量堆聚在两侧主梁和中间梁上，通过调整它们之间质量分布的比值，使平动质量和转动质量满足要求。这种模型的横梁刚度与实际比符合，可以由两根边梁提供一定的桥面约束扭转刚度，其节点数、杆件数少，计算量小，但这种模型的缺点在于用刚性横梁连接的平面框架对侧向而言是一种剪切型结构，由于有强大的桥面板作用实际截面基本为弯曲线，因而无法正确描述桥面的侧向抗弯刚度，引起桥面侧向弯曲变形的失真。有时由于斜拉桥桥面侧向弯曲和扭转之间强烈对起重要作用的桥面扭频的准确性产生进一步影响。

双主梁模型适用于具有分离边箱梁的半开口主梁截面。

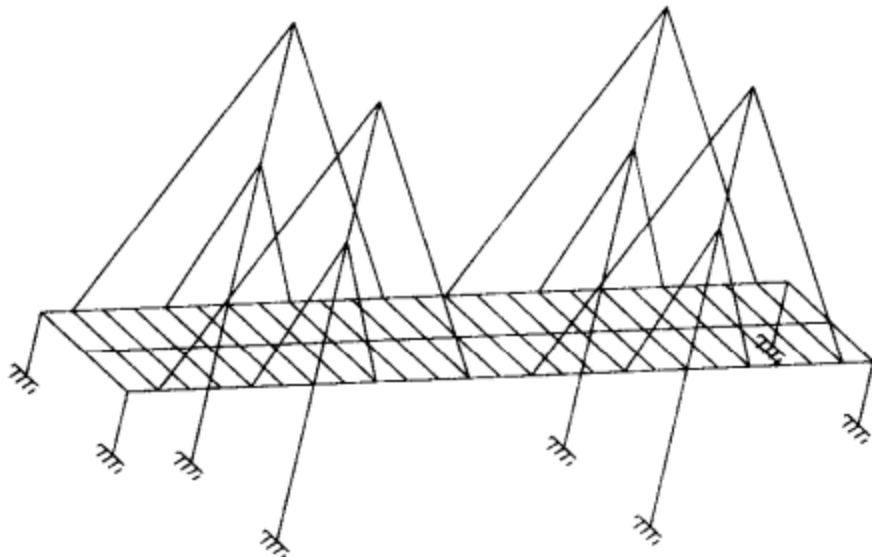


图 29 3 双主梁模型

三主梁模型

三主梁模型（图 29-4 所示）是针对上述三种模型的缺点而提出的，这种梁模型是由位于桥轴线上的中梁（1 号）和位于索面处的两根边梁（2 号）共同组成一个构架式主梁模型，三根主梁之间通过刚性横梁连接，该模型根据一定等效原则把桥面系的刚度和质量合理地分配到中梁和两根边梁上，并据此原则，确定模型中每根主梁的截面性质和质量分布，详见表 29-1。表中有关符号的意义如下（其中 $i=1$ 代表中梁， $i=2$ 代表边梁）：

- | | |
|---------------------|--------------------------|
| A ——桥截面面积； | A_i ——中梁或边梁截面面积； |
| I_x ——桥截面竖弯惯性矩； | I_{xi} ——中梁或边梁竖弯惯性矩； |
| I_z ——桥截面侧弯惯性矩； | I_{zi} ——中梁或边梁侧弯惯性矩； |
| I_d ——桥截面自由扭转惯性矩； | I_{di} ——中梁或边梁自由扭转惯性矩； |
| I_w ——桥截面约束扭转惯性矩； | M_i ——中梁或边梁单位长度质量； |
| M ——桥面单位跨长质量； | b ——中梁和边梁之间的距离； |
| I_M ——桥面单位跨长转动惯量。 | |

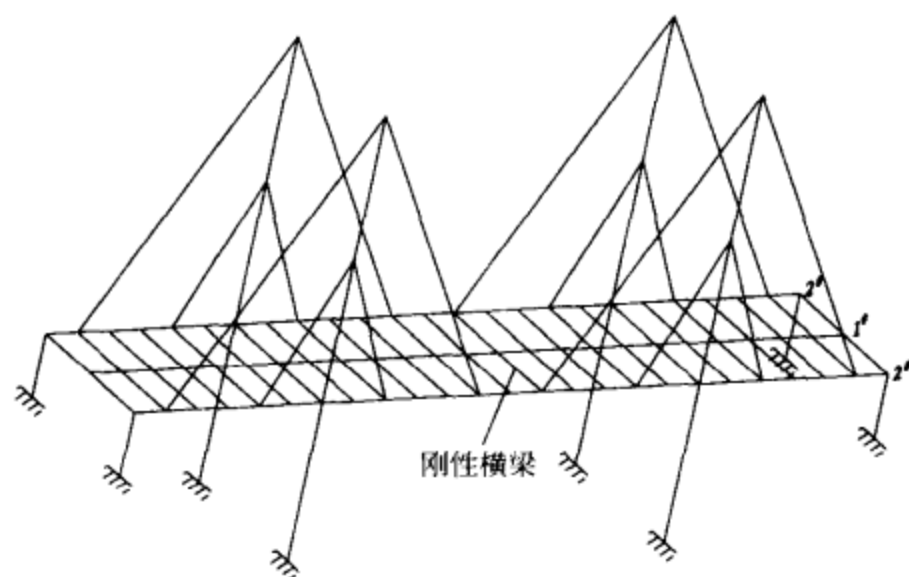


图 29-4 三主梁模型

表 29-1

| 等效原则 | 有关公式 | 主梁截面性质和质量分布 |
|---------------------|--|---|
| 纵向刚度等效 和侧向刚度等效 | $A_1 = A, A_2 = 0$ $I_{x1} = I_x, I_{x2} = 0$ | $A_1 = A, A_2 = 0$ $I_{x1} = I_x, I_{x2} = 0$ |
| 竖向刚度等效 和约束扭转刚度等效 | $I_{x1} + 2I_{x2} = I_x$ $2I_{x2}b^2 = I_w$ | $I_{x1} = I_x - \frac{I_w}{b^2}$ $I_{x2} = \frac{I_w}{2b^2}$ |
| 自由扭转刚度等效 | $I_{d1} + 2I_{d2} = I_d$ | $I_{d1} = I_d$ $I_{d2} = 0$ |
| 质量系统等效 | $M_1 + 2M_2 = M$ $2M_2b^2 = I_M$ | $M_1 = M \frac{I_M}{b^2}$ $M_2 = \frac{I_M}{2b^2}$ |

三主梁模型是目前较完善的一种桥面系模型，它克服了上述三种模型的缺点，提供适当的刚度和质量分配来满足等效原则，正确地考虑了约束扭转刚度的贡献，这种模型比上述其它模型能较精确地计算出斜拉桥的扭转频率，对于自由扭转刚度较小的主梁截面有着重要的意义，但这种模型的节点数和单元数较多，部分杆件会出现面积和惯性矩为零的情况，采用有限元程序计算时会遇到麻烦，不便于计算。

三主梁模型适用于带分离边箱的半开口主梁截面，特别是自由扭转刚度较小的开口截面：如带实心边梁的板式截面以及 I 字型边梁和桥面板相结合的开口主梁截面。

29.1.2 拉索的模拟

从文献上看，斜拉索建模有以下三种方法：等效弹性模量法、多段直杆法和曲线索单元法。

等效弹性模量法

拉索的非线性影响可通过修正弹性模量来考虑拉索瞬时刚度的方法加以解决，这样，可

使问题线性化。计算中将索简化为一直线杆单元，以索的弦长作为单元的长度，它的修正弹性模量随拉力大小而变化。修正弹性模量可由 Ernst 公式（公式 29-1）求得：

$$E_{eq} = \frac{1}{1 + \frac{G^2 \cos^5 \alpha E_g A_g}{12H^3}} = \mu E \quad (29-1)$$

- 式中：E——斜拉索的材料弹性模量；
G——斜拉索（包括索套）的总重；
 α ——拉索水平方向倾角；
H——索力在水平方向的分力；
 E_g ——高强钢丝的弹性模量；
 A_g ——高强钢丝总面积。

采用这种计算模型不能得到斜拉索的非线性响应。但是就目前斜拉桥跨度而言，对整个结构特性，由索引起的非线性影响很小，故索的弹性模量通常不予折减，而将索看作为线弹性单元来处理。在施工阶段，由于索的拉力不足，垂度较大，应该计入垂度对弹性模量的影响。

多段直杆法

斜拉索的模型也可以使用悬索桥主缆静力和动力计算模型，这种模型包含一系列无质量、铰接的直线连杆，其轴向刚度采用 Pugsley 提出的重力刚度，斜拉索的质量集中在连杆的结点上。无限数量的连杆能够精确地模拟斜拉索的自然状态，而通常小数量的连杆就能给出满意的结果。

曲线索单元法

斜拉索模型建立的第三种方法是曲线单元法。上文提到可以用很多简单的连杆单元来描述斜拉索，但这种方法还是不能精确地表示索的几何形状。为此，可以将斜拉索划分成一个或多个曲线单元，其单元刚度矩阵由多项式或拉格朗日插值函数通过考虑斜拉索在共同结点位移和可能变位的连续性而形成。在建立这种模型时，假定索单元只在其横截面上产生法向应力，并且该法向应力在横截面上均匀分布，在索变形时其横截面积保持不变。使用这种模型最方便的方法是采用包括有非线性分析的通用有限元程序来进行计算。

29.1.3 边界条件的模拟

边界条件模拟应和结构的支承条件相符：如支座的形式、基础的形式等。对于支座，如果只关心结构的整体行为，忽略下部结构的影响，可以直接利用 SAP2000 的节点约束来模拟约束条件：如固定，滑动等。如果关心支座本身的弹性行为，可用框架或者弹性连接单元来进行模拟。桥梁支座中常用的橡胶支座也可以用上面的方式来进行模拟。如果关心支座在动力分析中的耗能情况，建议工程师根据支座的力学行为采用相应的非线性连接单元来进行模拟：如 Rubber Isolator 等。

29.1.4 关于地基与结构的相互作用

在现代桥梁结构设计中，广泛采用桩基，这里主要以桩为例说明地基与结构的相互作用。

如果不考虑上部与下部结构的相互作用，即桩在横向位移为零处按固接来计算：

$$l = \frac{\pi}{2\beta}$$
$$\beta = \sqrt[4]{\frac{E_x}{4EI}} \tag{29-2}$$

式中： l ——第一横向位移零点距地面的距离；
 E_x ——土的横向弹性模量， $E_x = k_x b_0$ ；
 E ——桩的弹性模量；
 I ——桩的横向弹性模量。

在计算出固接点位置后，工程师就可以将此位置指定边界条件：如固接等。

如果考虑桩—土—结构的相互作用，在工程设计中，广泛采用质—弹性理论。关于此理论的具体细节参看李国豪主编的《桥梁结构稳定与振动》。一般来说，这个方法可以考虑土介质的层理性、非线性和土的阻尼特性等。至今对土介质在动力条件下的非线性特性还缺乏足够的试验，在实际应用中，还是假定土介质是线弹性的连续介质。图 29-5 为桩基桥梁动力计算力学图示。

在桩基计算模型中，用三维梁单元模拟实际的桩基础，用线性连接单元（Linear Link）或者点弹簧（或线弹簧）模拟桩周围土抗力的影响。线性连接单元具有质量属性，具有 6 个方向（U1、U2、U3、R1、R2、R3）刚度，且刚度可以是耦合的。一般在用 Linear Link 模拟桩基土相互作用时，质量设置为零，且各方向刚度不是耦合的。弹簧单元没有质量，6 个方向的刚度也可以耦合，一般的用只具有单方向刚度的点弹簧来模拟桩—土作用，此时通过计算可以得到点弹簧的受力情况。众所周知，模拟桩土作用的弹簧只能受压力，如果计算得到点弹簧处于受拉状态，可以解锁将此点弹簧删除，调整周围弹簧的刚度。重复上述操作直至弹簧处于受压状态。关于 Linear Link 与弹簧的具体性质参看本书相应章节。

假设用点弹簧来模拟桩—土的相互作用。土弹簧的所代土体根据土层的性质、厚度而定，土弹簧的设置位置根据土层深度确定。在取用土层的土抗力系数 m 时，动力计算下的系数可采用静力计算值的 2~3 倍。依据《公路桥涵地基与基础设计规范》（JTJ 024—85）的附录——基础按 m 法的计算。根据勘测的工程地质状况图反应的土的分层情况，计算出水平弹簧的刚度 $K = \text{土的比例系数 } m \times \text{基础的计算宽度 } b \times \text{边界元的深度 } h$ 。竖向边界元的刚度 $K = (\sum \text{钻孔桩的极限摩阻力} \times \text{桩周} \times \text{土层厚度}) / \text{边界元长度}$ 。由于桩土之间的相

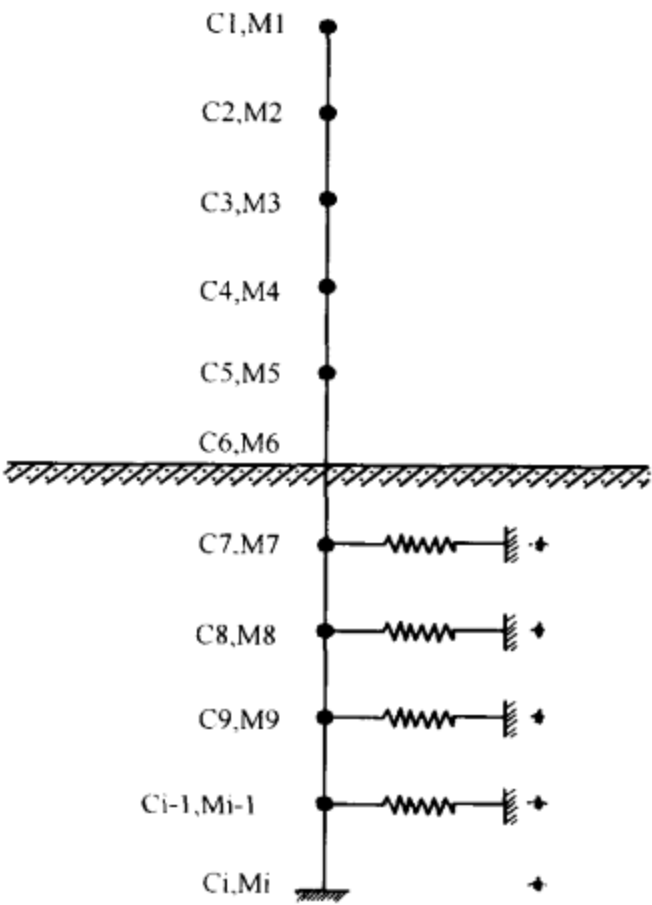


图 29-5 桩基桥梁动力计算力学图示

对位移可能超过极限摩阻力对应的相对位移，故在对结构进行试算后，需要对竖向边界元的刚度 K 进行修正。

29.1.5 拉索等部件在 SAP2000 中的处理方法

在 SAP2000 中，通常用一根直线框架单元来模拟斜拉索。为了模拟柔性索不承担弯矩，通常的做法是将索截面的抗弯及抗扭惯矩进行折减，模型中使用的惯矩为正常截面的 1% 左右或者更小。不推荐使用索单元两端的弯矩释放。在工程设计阶段，也不推荐通过对索指定拉/压比限定来模拟只承受拉力的索对象。毕竟当采用拉/压比限定时，需要将分析工作设定为非线性分析才能起作用。而在工程设计中大量应用线性分析工况及其工况组合，使用拉压比限制会大大增加分析及后处理的工作量。而事实上，即使不将索指定为单拉单元，其在大部分组合工况下均不会出现索力为压力的情况，所以不指定索为单拉单元也是符合实际的。

由于索力的存在造成索侧向刚度的增大，这是所有索结构在分析时都不能忽略的现象。在 SAP2000 中索力的施加有三种方法：一是直接施加 $p\Delta$ 力，这种行为直接影响单元的行为；二是指定索的初应变；三是通过降温法来实现。后两种方法的索力必须存在于荷载工况内，这样在做动力分析时如果要考虑到索侧向刚度的增加，这就要求模态分析使用的刚度来自于添加索力的那一分析工况的终点刚度。

在应用鱼骨式模型做全桥分析时，如何来模拟横隔板为刚臂呢？通常做法有两种：一种是指定节点束缚，如采用 Body 类型；另外一种是自己单独定义一个框架单元，通过控制截面或者单元长度来使该单元的轴向刚度，抗弯刚度等远大于周围杆件的刚度。第二种方法需要注意的是，刚臂单元的材料密度要很小，由于 SAP2000 本身质量凝聚的问题不建议取为零，而提倡材料密度取小，原则是保证恒载及动力分析时结构总质量与实际质量相差不大。刚度的增大与质量密度的减小的程度因模型的不同而有较大差异，建议工程师通过试算来确定此系数的大小。

29.2 斜拉桥分析中的计算问题

大位移效应

在荷载作用下，斜拉桥上部结构的几何变形显著，从有限元的角度来说，节点坐标、各单元长度、倾角等等几何特性都随之产生了较大的改变，此时结构的刚度矩阵成为几何变形的函数，平衡方程 $F=KU$ 不再是线性关系，小变形假设中的叠加原理不再适用，计算中将结构的参考坐标系选择在变形后的位置上，让节点坐标随结构一起变化，从而将平衡方程直接建立在变形后的结构上，解决了大位移非线性的影响。

计算大变形效应显著的结构，需要在 SAP2000 程序中激活几何非线性参数中的大位移效应。

$P\Delta$ 效应

斜拉索拉力使主梁和桥塔处于弯矩和轴力的共同作用下，这些构件即使在材料满足线性的情况下也会呈现非线性特性。计算中应考虑弯矩与轴力的相互影响这一因素。

29.3 斜拉桥合理索力的确定方法

斜拉索类似于预应力作用（体外预应力），目前大跨径的斜拉桥在施工过程中通常采用悬臂法：即以主塔为中心，主梁与斜拉索对称逐段的悬臂施工，直至合龙成桥。在施工过程中，斜拉索逐段的分次张拉。结构体系受力状态不断变化，索、梁、塔间相互影响，斜拉索索力的微小变化可能给主梁内力带来显著的变化。随着斜拉桥跨径的增大及柔性梁的应用，斜拉索对梁的内力影响越来越显著，斜拉索已成为控制全桥受力是否合理的关键。如何确定合理的索力，使斜拉桥处于合理的受力状态，已经成为斜拉桥设计中的关键问题。

由于可以通过拉索索力的调整来改变结构受力状态，所以斜拉桥的设计与施工的自由度很大。确定合理的成桥恒载索力使斜拉桥设计中关键的一步，为了寻求合理的成桥受力状态，国内外许多学者对斜拉桥的索力优化问题进行了研究。主要方法可以归纳为三大类：指定受力状态法（刚性支承连续梁法、零位移法）、无约束最小能量法（弯曲能量最小法、弯矩最小法）、有约束索力优化法（用索量最小法、最大偏差最小法）。建立有限元模型，计入恒荷载、活荷载，预应力等荷载作用，运用索力优化理论计算出一组达到设计目标要求的斜拉索索力。

有了理想成桥索力作为最终目标，下一步就是要根据具体的施工顺序确定在施工各个阶段的索力。斜拉桥的施工是一个体系不断变化的过程，在这个过程中，结构的索力和变形都在不断的变化。为了实现设计给出理想的成桥状态，需要设计一套合理的施工过程，制订拉索张拉和调整方案，以满足桥梁在成桥状态和运营阶段的受力要求并实现设计所预测的结构长期变形的特性。按照拟定的施工顺序运用不同的计算方法对结构施工全过程进行模拟仿真计算，得到各阶段内力变形及斜拉索的初拉力，保证成桥后达到合理的设计状态。确定斜拉桥合理施工索力方法有：倒退分析法、正装—倒拆迭代法。

倒退分析法

倒退分析以成桥状态 $t=t_0$ 时刻的内力状态作为参考状态，以设计成桥线形为参考线形，对结构进行虚拟倒拆并逐段进行分析，计算每次卸除一个施工阶段对剩余结构影响的计算方法。对于线性结构，用倒退分析结果进行理想施工，保证每一阶段都不出现偏差，就可以在 $t=t_0$ 时刻达到成桥状态。因此从理论上讲，倒退分析可直接用于指导线性结构的设计施工，并作为能力控制的参数。

单一的倒退分析可有前进分析的逆过程来实现。首选以最终的成桥状态的结构作为计算对象，描述结构所有单元、约束边界、预应力索，并讲全部恒载作用于结构，通过恒载的优化确定成桥状态结构的最优受力状态，并将位移赋零，在此基础上，逐阶段对结构进行倒拆分析。得到位移和内力状态表示：要使成桥状态结构满足倒拆前的状态，本阶段已建结构所必须具备的状态。不难理解，当计入徐变等的时效影响，用单一的倒退分析确定斜拉桥的施工状态，就会遇到前进分析与倒退分析的状态不闭合的问题。

对于大跨径的混凝土斜拉桥，施工计算中如不考虑混凝土收缩徐变的影响，计算结果将发生较大的偏差。但是混凝土这种随时间变化的效应与结构的形成过程有关，原则上倒退分析无法进行计入徐变的影响。一般可以应用迭代法来解决这个问题。即第一轮倒退计算时不计入混凝土的时间效应，然后以倒退计算结果进行正装计算，逐阶段计算混凝土的收缩徐变

影响。在进行第二轮倒退计算时,按阶段叠加到正装计算时相应阶段混凝土收缩、徐变影响。如此反复迭代,直至计算结果收敛。

正装-倒拆迭代法

该方法先按倒拆计算,不计入各种非线性问题,然后根据其结果计入非线性等影响因素进行正装计算,并将各阶段的几何非线性、混凝土收缩徐变等影响存储;再进行一次倒拆计算。这时将上次正装计算的非线性等影响量带入,得到新的结果。如此反复迭代计算,即可得到较合理的施工状态。此种方法工作量巨大,若对施工中某些参数进行调整,再计算合理的施工状态时,应用难度增大。

29.3.1 简单算例:某斜拉桥全桥状态下的索力调整

某预应力钢筋混凝土斜拉桥-连续梁桥,跨度为 $(20+32+32+20)$ m,桥梁宽度 10m,双向单车道,塔墩梁固结。结构布置(未显示预应力束)如图 29-6 所示。

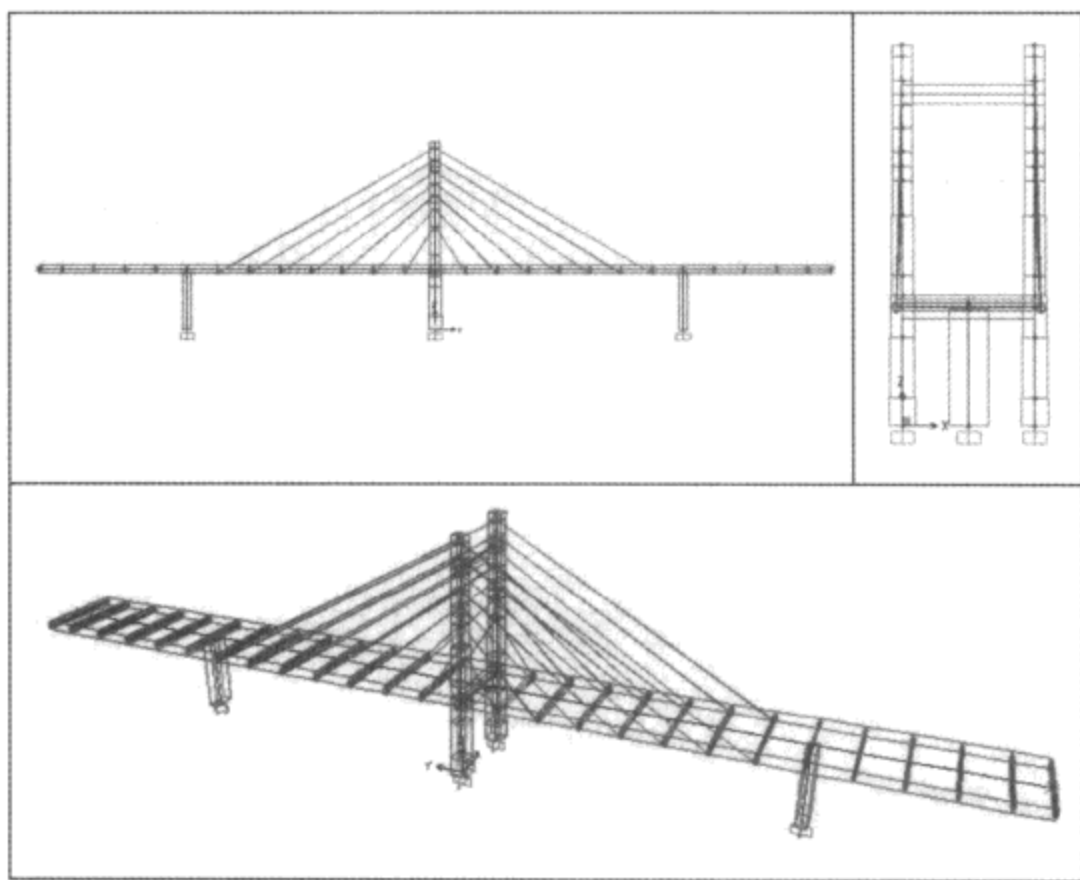


图 29-6 结构布置

主要材料

主梁桥塔的材料为 C50,弹性模量为 3.45×10^5 MPa。斜拉索采用 OVM 拉索体系,钢绞线拉索标准强度为 1860 MPa,公称直径 15.24 mm,公称面积 140 mm^2 ,计算弹性模量 2.0×10^5 Pa。拉索的容许承载力为 $0.4 \times 1860 \times 140 \times 7 = 729.12 \text{ kN}$ 。主梁预应力钢绞线,标准强度为 1860 MPa,公称直径为 15.24 mm,公称面积为 140 mm^2 ,弹性模量 $E_y = 1.95 \times 10^5$ MPa,张拉控制应力为 1395 MPa。中腹板布置三束 $13\phi 15.24$,边腹板 6 束 $13\phi 15.24$ 。

桥面铺装层为 12 cm 的 C40 混凝土+6 cm 的沥青混凝土铺装,主梁单位长度的荷载为

.....

$(0.12 \times 25000 + 0.06 \times 20000) \times 10 = 42 \text{ kN/m}$ 。

模型的输入

主梁、塔、墩均采用框架单元，主梁截面箱梁部分在桥梁模块中输入得到截面属性，然后添加 General 截面，输入物理属性，主梁端头部位在截面设计器中输入。整个主梁共有三种截面：GIRDERCS、GIRDERBS、GIRDERAB（AS 截面与 BS 截面间过渡截面）。

图 29-7 以标准截面 GIRDERAS 为例，显示了其在 SAP2000 内的输入界面及截面属性

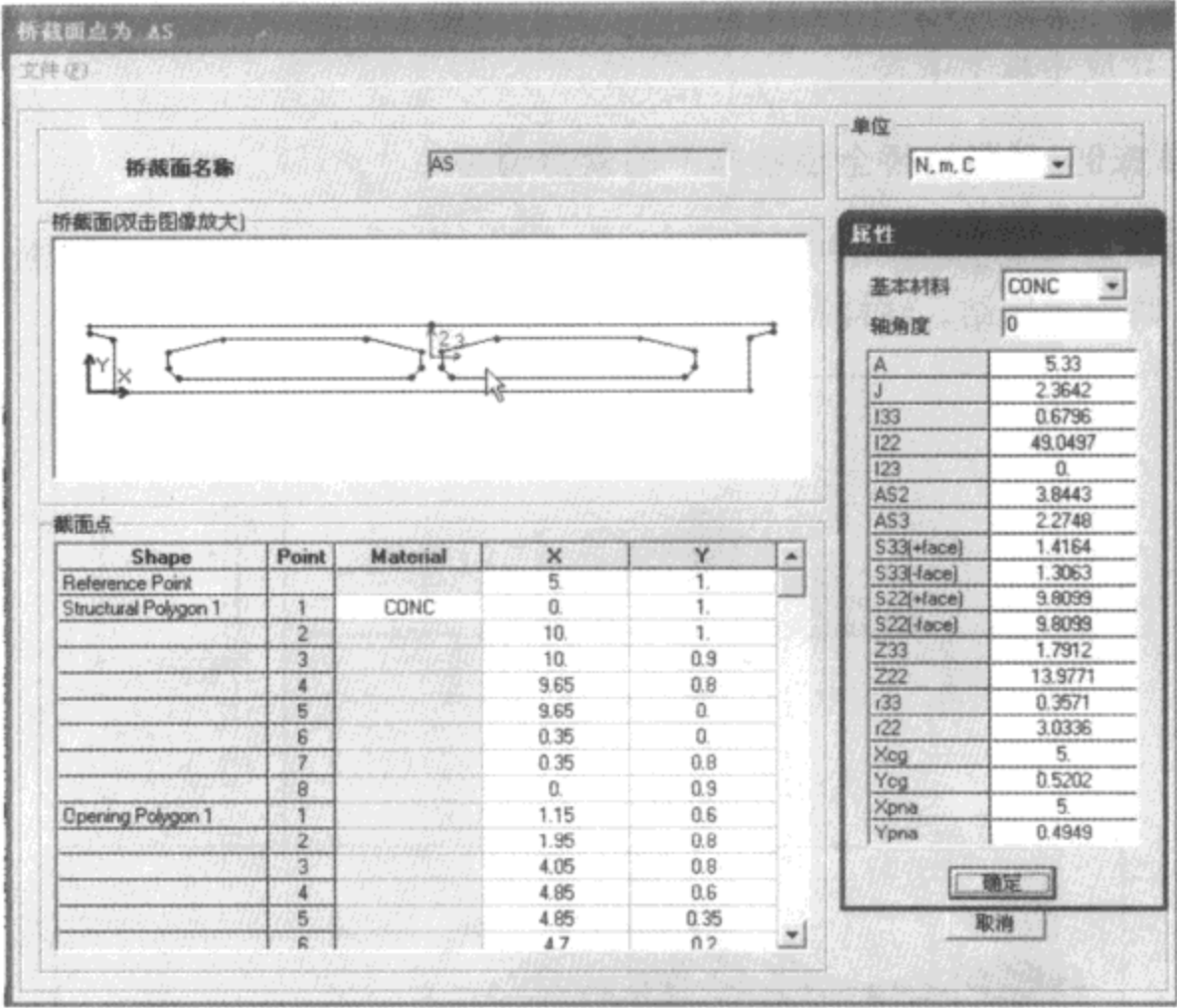


图 29-7 主梁标准截面 AS 及物理属性

拉索采用框架单元模拟，圆形截面，直径 35.3mm，截面抗弯属性修正系数为 0.01，与主塔和主梁进行刚性连接，由于索长度不大，必考虑弹模折减。

此模型不关心支座的受力行为，故此模型中未模拟支座，通过束缚来模拟支座连接点的力学行为。

预应力以荷载方式来处理，两端同时张拉，两端应力为 1395MPa。

加载

Dead 工况中，在主梁单元上添加 42kN/m 的均布线荷载以模拟二期恒载。

调索

在恒载、预应力及二期恒载作用下，作为简单算例，通过调整索力使主梁弯矩分布合理，且索力大致均匀。（此处调索原则比较单一，实际结构考虑为多个原则：如主塔的内力或应力，墩的内力，主梁变形等。最终索力的确定需要权衡多方面的因素，目的是使结构安全、经济、受力合理。）

这里通过降温法来模拟索力：

$$N = \alpha EA \times \Delta T$$
 (29-3)

式中： α ——拉索材料的热膨胀系数，本模型中 α 为 $1e-5$ ；

E ——拉索材料的弹性模量， $2e5MPa$ ；

A ——拉索面积，为 $7 \times 140 = 980mm^2$ ；

ΔT ——降低温度。

限制条件：1. 拉索的极限拉力为 $729kN$ ；2. 恒载下最终索力不超过极限索力的 85% ，为 $620kN$ ；3. 主梁的弯矩不超过承载力的 80% 。

最终的成桥阶段的张拉索力如表 29-2 所示。

换算弹性模量及降低的温度 表 29-2

| 索 编 号 | 张 拉 索 力 | 恒载下最终索力 | 极 限 索 力 | 恒载下的限制索力 |
|-------|---------|---------|---------|----------|
| S1 | 480 | 615 | 729 | 620 |
| S2 | 450 | 615 | 729 | 620 |
| S3 | 450 | 614 | 729 | 620 |
| S4 | 480 | 615 | 729 | 620 |
| S5 | 530 | 620 | 729 | 620 |
| S6 | 575 | 616 | 729 | 620 |
| S7 | 620 | 618 | 729 | 620 |

注：1. 索的编号为 S1~S7，索的下锚点距离主塔越远，索号越大；
2. 力的单位均为 kN。

29.4 斜拉桥的模态分析

模态分析是动力分析的基础，是工程师检查模型刚度是否合理以及检查质量大小及其分布是否合理的有利工具。当模型存在连接错误时，模态分析也是检查模型的有效手段。

结构的模态分析可以定性地分析结构的动力特性，分析振型与频率，判断结构的抗风与抗震能力。由于斜拉桥的构造很很复杂，对每一个部件都单独做模态分析是不可取的也是不必要的，通常只对所关心的部件所关心的振型进行分析。如分析主梁的抗风能力，衡量的标准是观察扭转与竖弯频率的比值，比值越大主梁的临界风速越大，即主梁在风载下越稳定。

判断结构的抗震性能，一是看结构的频谱分析是否均匀，振型过渡是否连续，再者看其周期是否远离土的卓越周期。

29.4.1 简单算例

某单塔双索面无背索斜拉桥，塔轴线与桥面成 58 度交角，塔轴线在横断面上为半椭圆，图 29-8 所示。在初步设计阶段通过模态分析来检查此结构的刚度情况。

模型中所有部件均用框架单元来模拟，考虑拉索位置对主梁及塔内力的影响，加入了一系列的刚臂。

索的编号为 S1~S7（从塔根开始）。采用降温法来模拟索力，拉索材料的膨胀系数为 $1e-5$ ，根据索力换算出温度值（参考温度为 0 度），表 29-3 为根据成桥下索力对各索换算后

的弹性模量及降低的温度情况。

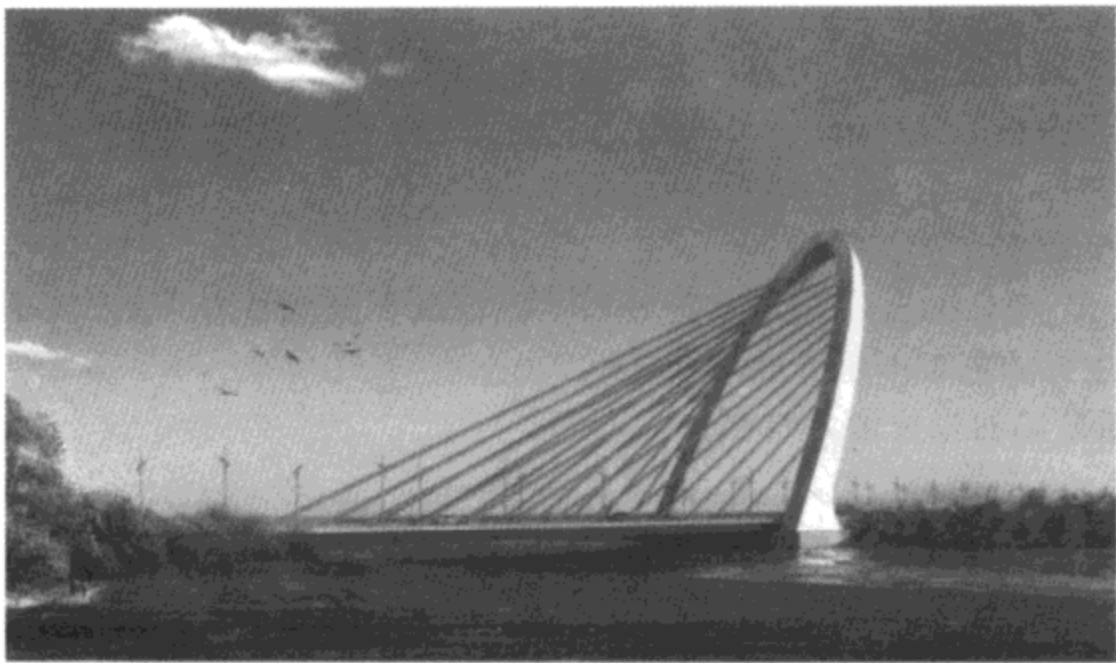


图 29-8 某无背索斜拉桥的效果图
换算弹性模量及降低的温度

表 29-3

| 索 号 | 索 力 | 角 度 | 换 算 弹 模 | 降 低 温 度 |
|-----|------|--------|-----------|---------|
| S1 | 1280 | 26. 34 | 1. 92E+08 | 253 |
| S2 | 1300 | 27. 72 | 1. 93E+08 | 256 |
| S3 | 1320 | 29. 42 | 1. 93E+08 | 259 |
| S4 | 1335 | 31. 53 | 1. 94E+08 | 261 |
| S5 | 1343 | 34. 24 | 1. 94E+08 | 262 |
| S6 | 1240 | 37. 32 | 1. 94E+08 | 242 |
| S7 | 1235 | 42. 69 | 1. 95E+08 | 240 |

注：表中基本单位为 kN，m。

索力在 DEAD 工况里施加，在 Dead 的分析工况，选为静力非线性工况，激活 $p-\Delta$ 效应与大位移效应，其它非线性参数取为默认值，如图 29-9 所示。

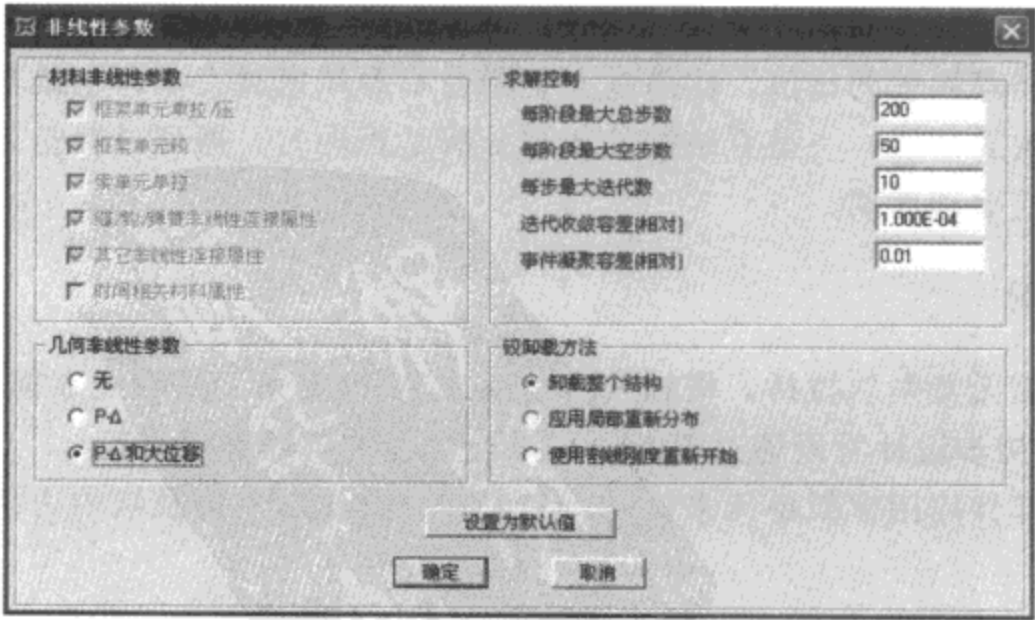


图 29-9 非线性参数设置

在模态分析采用 Ritz 向量分析方法，通过较少数目的振型得到较大的质量参与系数，施加的荷载为三个平动加速度，计算模态时的刚度为 DEAD 工况的终点刚度，如图 29-10 所示。

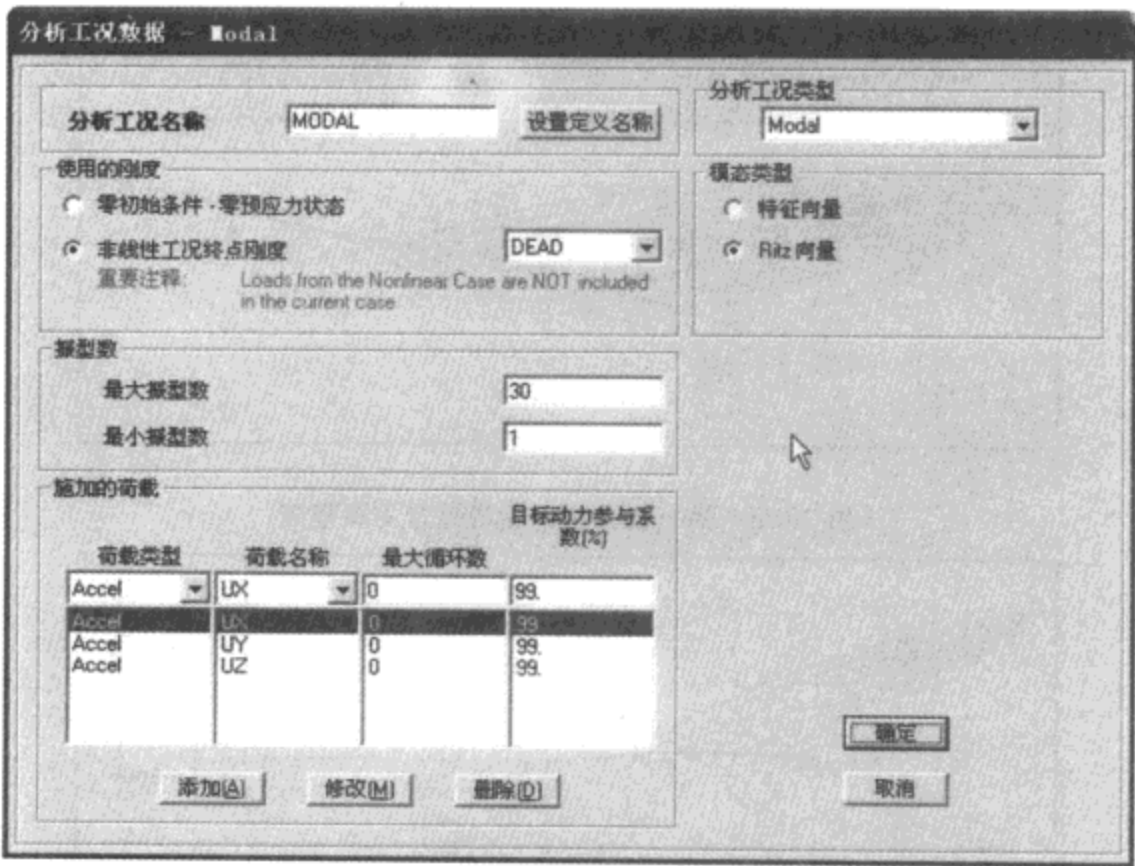


图 29-10 模态分析工况设置

运行程序后，得到此桥的动力特性如表 29-4，相应的，图 29-11～图 29-13 给出了桥的前几阶振型。

分析得到的桥动力特性 表 29-4

| 阶 数 | 频 率 (Hz) | 振 型 特 点 | 阶 数 | 频 率 (Hz) | 振 型 特 点 |
|-----|----------|----------|-----|----------|--------------------|
| 1 | 0.92783 | 主塔纵弯主梁竖弯 | 7 | 4.5692 | 主梁二阶反向竖弯 (边跨反向) |
| 2 | 1.1062 | 主塔侧弯 | 8 | 5.2827 | 主塔二阶纵弯 |
| 3 | 1.6326 | 主梁一阶竖弯 | 9 | 6.2178 | 主塔二阶扭转 |
| 4 | 2.4277 | 主塔扭转 | 10 | 6.4468 | 主梁纵向拉伸 |
| 5 | 3.3863 | 主塔侧弯 | 11 | 6.513 | 主梁二阶竖弯 (边跨同向) |
| 6 | 3.863 | 主梁二阶竖弯 | 12 | 7.3369 | 主梁主跨横弯 |

通过模态分析可以看出，此桥的前两阶及第四、第五振型均为主塔的振动，说明此桥有别于常规的斜拉桥。常规斜拉桥前几阶振型多为主梁的各种振动，如纵飘、横弯、竖弯等。因此建议修改主塔刚度，或者改变主塔的几何形式。

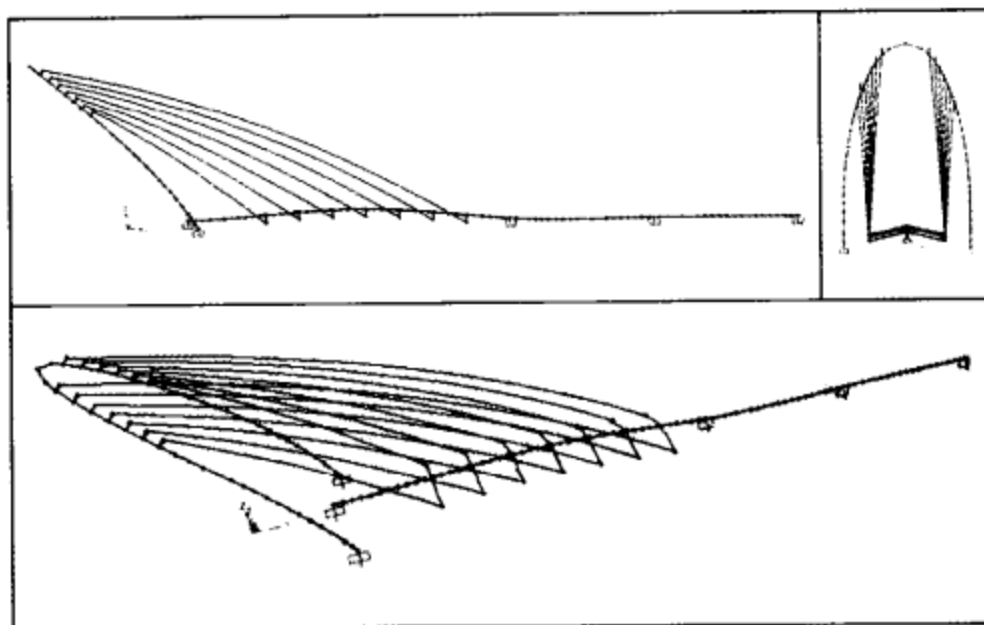


图 29-11 第一阶振型：主塔纵弯主梁竖弯

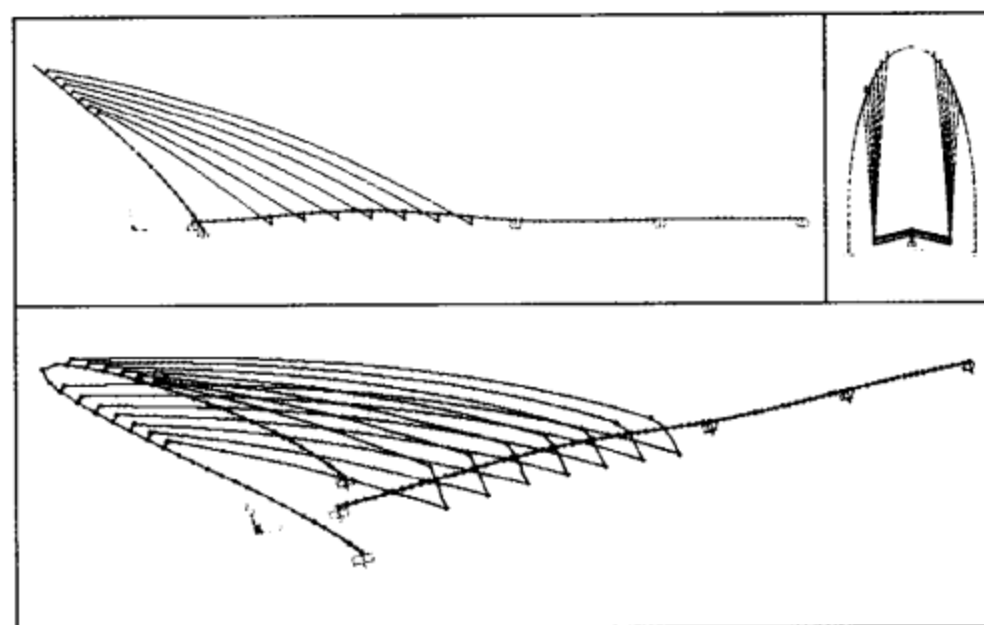


图 29-12 第二阶振型：主塔侧弯

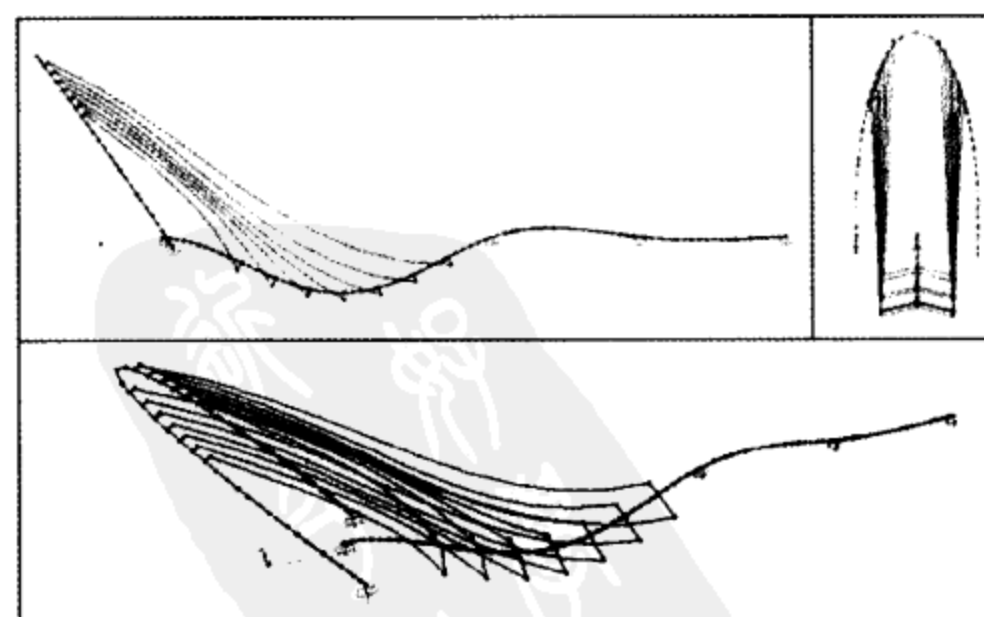


图 29-13 第三阶振型：主梁一阶竖弯

第30章

混凝土重力坝

30.1 概述

SAP2000 用于分析水工建筑物有其自身的优势, 可以对这类结构进行静力及动力分析, 考虑静水压力、扬压力、淤沙压力、地震、温度场、重力场、渗流场等作用。也可以模拟大坝的逐步施工, 考虑施工期间材料、温度随时间的变化。本章主要介绍如何利用 SAP2000 对混凝土重力坝进行有限元分析, 包括三维模型的建立、单元的选取、地震荷载的输入等。

30.1.1 重力坝的工作原理

混凝土重力坝是目前在工程中采用较多的一种坝型, 具有安全可靠、设计施工技术简单、对地形和地质条件的适应性好、施工导流和永久性泄洪问题容易解决等优点。重力坝一般做成上游面近似垂直的三角形断面, 主要依靠坝体的重量, 在坝体和地基接触面间产生抗剪强度或摩擦力, 来抵抗水库的水推力, 以达到稳定的要求。另一方面依靠坝体自重产生的压应力来抵消由于水压力所引起的坝体上游侧面拉应力, 以满足坝身强度的要求。

由于重力坝地基承受很大的压力作用, 对地基的要求比一般的土石坝要高, 但比拱坝的要求低, 因此重力坝一般修建在岩基上。坝体材料和地基内的渗流会产生渗透压力。另外, 重力坝是大体积混凝土, 施工时混凝土的水化发热和散热、硬化收缩, 将引起坝体内温度和收缩应力, 可能使坝体产生裂缝。并且, 坝体内的应力分布一般不均匀, 较多部位的压应力通常不是很大, 没有充分发挥材料的性能。

30.1.2 重力坝的荷载

作用在重力坝上的荷载主要有: 上下游坝面上的静水压力、扬压力、溢流坝反弧段上的动水压力、淤沙压力、浪压力、设备自重、地震荷载等等。

以下着重介绍静水压力、扬压力和地震荷载。

1. 静水压力

根据静水力学原理,作用在坝面上的静水压力分为水平和垂直两个方向,其大小主要与水位高度有关。

$$\text{静水水平力: } P_1 = \frac{1}{2} \gamma H_1^2 \quad P_2 = \frac{1}{2} \gamma H_2^2$$

$$\text{静水垂直力: } P_3 = \frac{1}{2} \gamma m H_1^2 \quad P_4 = \frac{1}{2} \gamma n H_2^2$$

式中, H_1 、 H_2 分别为上、下游水深, γ 为水的重度, m 、 n 分别为上下游坝面坡度(图 30-1)。

2. 扬压力

坝体、坝基中都存在着孔隙,这导致在水库蓄水后,在上、下游水位差的作用下,库水会经过坝体及坝基渗向下游,不但造成库容损失,还会引起渗透压力,使坝体的有效重量减小。库水经坝基向下游渗透时,渗透水流沿程受到阻力,造成水头损失,如图 30-1 所示。上游坝踵处的扬压力强度为 γH_1 ,下游坝趾处的扬压力强度为 γH_2 。通常假定从坝踵到坝趾呈直线变化。途中矩形部分是下游水深 H_2 形成的上举力,即浮托力;三角形部分是由上下游水位差形成的渗透水流产生的上举力,即渗透压力。坝底扬压力是托浮力和渗透压力之和(图 30-1)。

3. 地震荷载

一般情况下,水工建筑物抗震计算应考虑地震作用:即建筑物自重和其上的荷载所产生的地震惯性力、地震动土压力和水平向地震作用的动水压力。对于一般情况下的混凝土重力坝,可只计入顺河流方向的水平向地震作用。

《水工建筑物抗震规范》明确规定了设计地震加速度和设计反应谱(如图 30-2)。

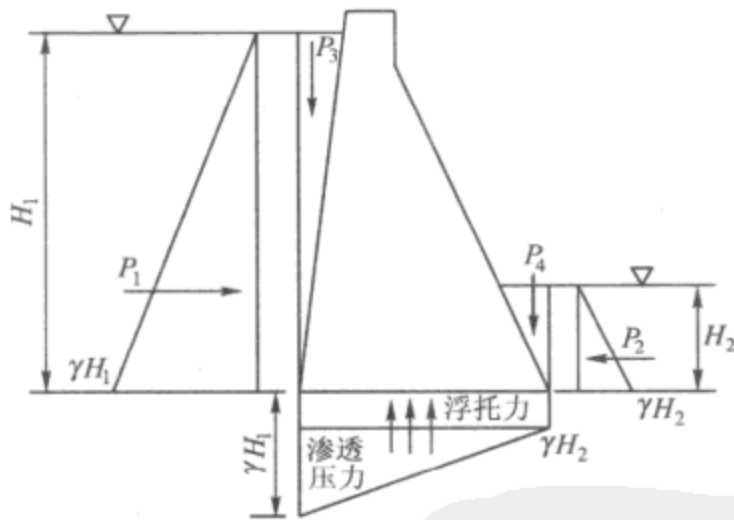


图 30-1 静水压力及扬压力示意图

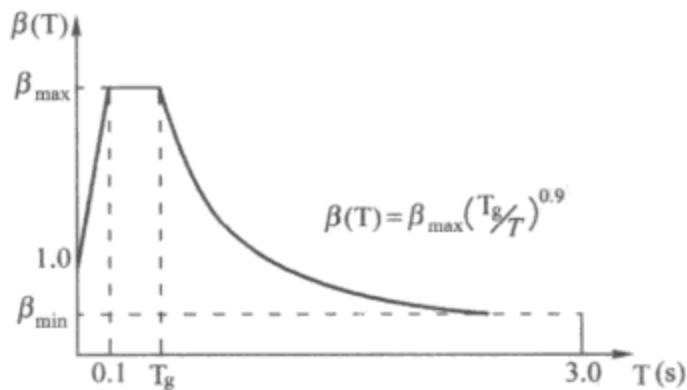


图 30-2 水工建筑物设计反应谱

30.2 SAP2000 相关技术的应用

30.2.1 平面单元

多数重力坝具备平面应变问题的特点,即坝体纵深方向平行于坐标轴且尺度较大,沿纵深方向截面相等,坝体受到的外力都平行于横截面,且在其平面内构成平衡力系。因此建立

重力坝模型时，可以选择 SAP2000 提供的平面单元。平面单元是一个三节点或四节点单元，用来模拟平面应变或平面应力问题。因此，对于三维的重力坝问题，在 SAP2000 中采用平面单元，可将其等效为二维问题。这样处理不但简化了建模过程，也能够加快求解。关于平面单元的详细介绍可参见本书的“单元库”一章。

30.2.2 实体单元

对于不符合平面应变问题的重力坝模型可以采用实体单元来模拟。在 SAP2000 中，每个实体单元有六个四边形面和八个节点，如图 30-3 所示。图中面 1、面 2、…、面 6 的位置由八个节点的相对关系决定。静水压力等荷载即是在这六个面中相关的面上施加外压力荷载。因此在建立重力坝模型时，注意首先采用完全相同的方式绘制面对象，保证形成面对象的各点具备相同的相对关系，从而使得随后通过拉伸形成的实体具有相同的节点关系。这样在对实体单元施加表面压力时，才能统一指定给相同的表面。

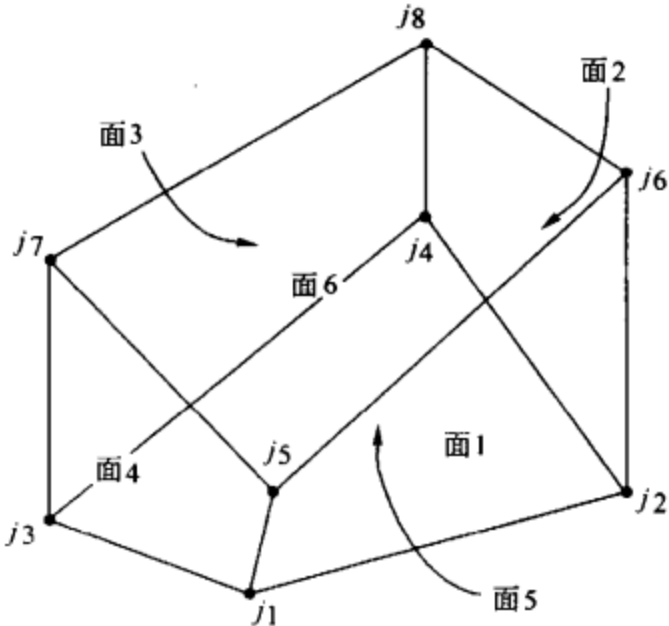


图 30-3 实体单元的节点与面的关系

30.2.3 节点样式

从计算简图中可以看出，无论是静水压力还是扬压力，都沿作用面呈一定的梯度变化。根据这一特点，在 SAP2000 中采用节点样式对其进行模拟。定义节点样式，即命名一组标量数值，每个数值对应结构上的一个节点并与该节点的坐标值有关，各个节点上数值的变化规律与这些节点上即将施加的荷载变化规律一致。以重力坝下游的水平静水压力为例（图 30-4）。水平面处压力为零，水平面以下各点的压力仅与水的重度和水深有关，即 $p = \gamma (H_2 - Z_j)$ 。因此，在定义节点样式 $V = Ax + By + Cz + D$ 时，由于压力梯度仅与 Z 坐标有关，故 $A = B = 0$ ， $C = -1$ ， $D = H_2$ 。接下来定义静水压力 P_2 时，可指定荷载来自该节点样式，并输入乘数 γ ，因此各点的静水压力即 $p = \gamma (H_2 - Z_j)$ 。这样即可实现在选定实体表面施加线性分布的静水压力。

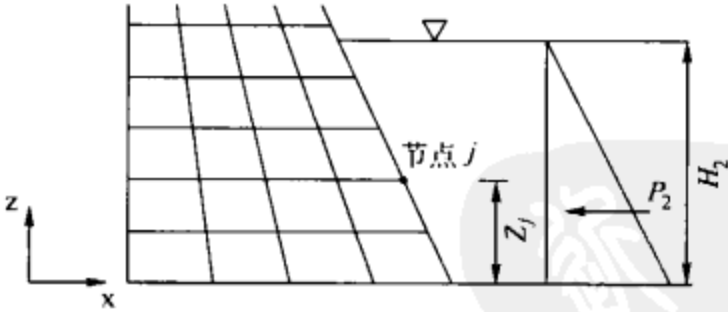


图 30-4 利用节点样式定义静水压力

注意：节点样式被指定到所选中的节点上，但其本身不会引起结构响应。必须应用到施加于结构的压力的指定中，用来描述结构上压力的变化情况。

30.2.4 反应谱分析

反应谱法是一种拟动力方法。SAP2000 中的反应谱分析首先是基于设计反应谱曲线，然后基于模态分析得到的振型，从而求得对应于每一个振型的作用效应，再通过振型叠加得到总的地震作用效应。反应谱方法考虑了地面运动的强弱、场地土的性质以及结构动力特性对地震力的影响，因此可近似地反应地震对结构的作用。

根据《水工建筑物抗震规范》对水工建筑物设计反应谱的规定，可确定程序用于分析的反应谱曲线（见图 30-2）。SAP2000 中，已加入多个国家规范对建筑结构的设计反应谱曲线，水工建筑物的反应谱曲线虽然不能直接在程序中找到，但可采用从文件中添加的方式进行自定义。

对于混凝土重力坝，其刚度矩阵由坝体和基岩两部分组成。在进行地震分析时，我们只需要识别坝体部分的质量自由度，因此修正基岩部分的材料密度，从而近似采用无质量基础模型，将地震力施加于大坝上。此时，由于并未修正基岩部分的材料重度，所以重力荷载的相关结果不会改变。

30.3 算例分析

30.3.1 问题描述

某混凝土重力坝，断面如图 30-5 所示，坝高 65m，上游坡面垂直，下游坡面系数 $n=0.6$ ，坝顶宽 15m，坝长 100m。下游水位 20m。具体材料如下：

- (1) 大坝：弹性模量 $E=2.85\times10^4\text{MPa}$ ，泊松比 $\nu=0.167$ ，密度为 2400kg/m^3 。
- (2) 基岩：弹性模量 $E=2.9\times10^4\text{MPa}$ ，泊松比 $\nu=0.3$ ，密度为 2600kg/m^3 。

根据《水工建筑物抗震规范》，对于重力坝，设计反应谱最大值的代表值 $\beta_{\max}=2$ ，场地特征周期 $T_s=0.2\text{s}$ ，由图 30-2 可确定反应谱曲线。

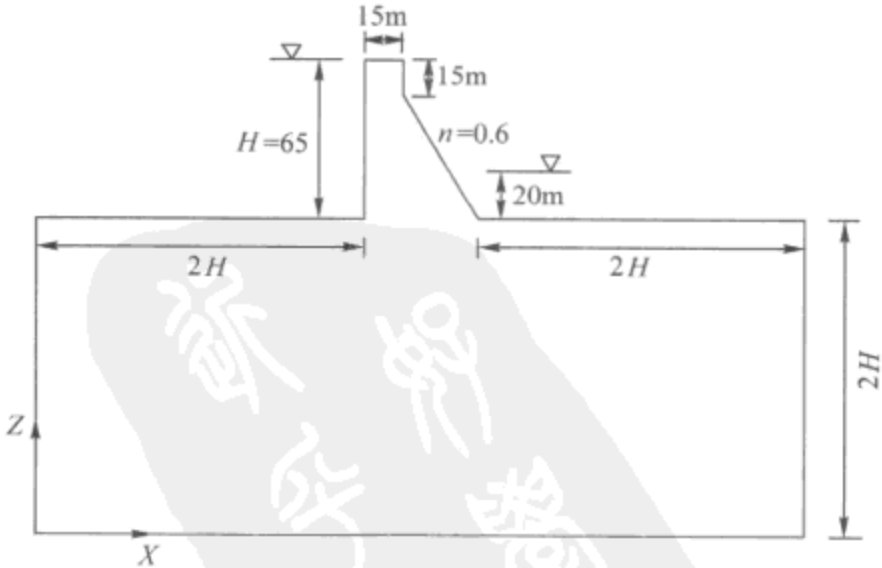


图 30-5 混凝土重力坝示意图

30.3.2 建模及求解分析

1. 确定求解范围

根据圣维南原理,若基岩的范围取得越大,则基础边界约束条件的变化情况对坝体中的应力和位移的影响越小。当基岩尺寸达到一定范围后,坝体的应力和位移几乎不受计算范围的影响。据此,通过比较分析,取坝基深度为2倍坝高,坝基上游和下游均取2倍坝高。

根据确定的求解范围,输入主要的轴线间距,建立轴网,用于空间定位。

2. 定义材料

点击【定义】>【材料】命令,在弹出的对话框中添加用于坝体和基岩的材料。如图30-6所示,在【材料属性数据】对话框中,输入具体的材料属性参数。注意,在SAP2000中,可以分别输入材料的密度和重度,因此当采用无质量基础模型时,只需将坝基的材料密度折减到一个较小值(如乘以 10^{-3}),仍采用实际的坝基重度,以考虑重力荷载的影响。

材料属性数据

材料名称: dam

显示颜色: 颜色:

材料类型: ☒ 各向同性 ☐ 正交各向异性 ☐ 各向异性 ☐ Uniaxial

设计类型: 设计: Concrete

分析属性数据: 密度: 2.4 重度: 24 弹性模量: 28500000 泊松比: 0.167 热膨胀系数: 1.170E-05 剪切模量: 12210797

设计属性数据(Chinese 2002): Concrete Strength Grade, fcu,k: 27579.032 Bending Reinf. Yield Stress, fyk: 413685.5 Shear Reinf. Yield Stress, fyks: 275790.32 ☐ 轻质混凝土 Shear Strength Reduc. Factor: 1.0

高级材料属性数据: 基于时间属性 材料阻尼属性 应力-应变曲线定义

确定 取消

图 30-6 定义材料

3. 单元定义及绘制

由于本算例模型不具备平面应变问题的特点,因此采用实体单元来模拟。定义两种实体单元,命名为“dam”和“found”,分别用于大坝和基岩,如图30-7所示。

绘制模型时,先绘制面单元,然后拉伸生成实体单元。在xz视窗,首先绘制坝体部分,再拉伸生成大坝实体模型,如图30-8所示。将坝体部分的所有单元指定为一“组”,命名为“dam”。使用类似的方法

实体属性数据

属性: dam found

点击: 添加新属性... 修改/显示属性(M) 删除属性(D)

确定 取消

图 30-7 定义实体单元

法绘制基岩，并将基岩部分的所有单元指定为一“组”，命名为“found”。接下来，按“组”选择大坝和基岩部分，分别指定其单元属性为“dam”和“found”。这样，大坝的几何模型基本形成，如图 30-9 所示。注意，这里使用了关于“组”的操作，其目的是让操作过程更加方便、准确。

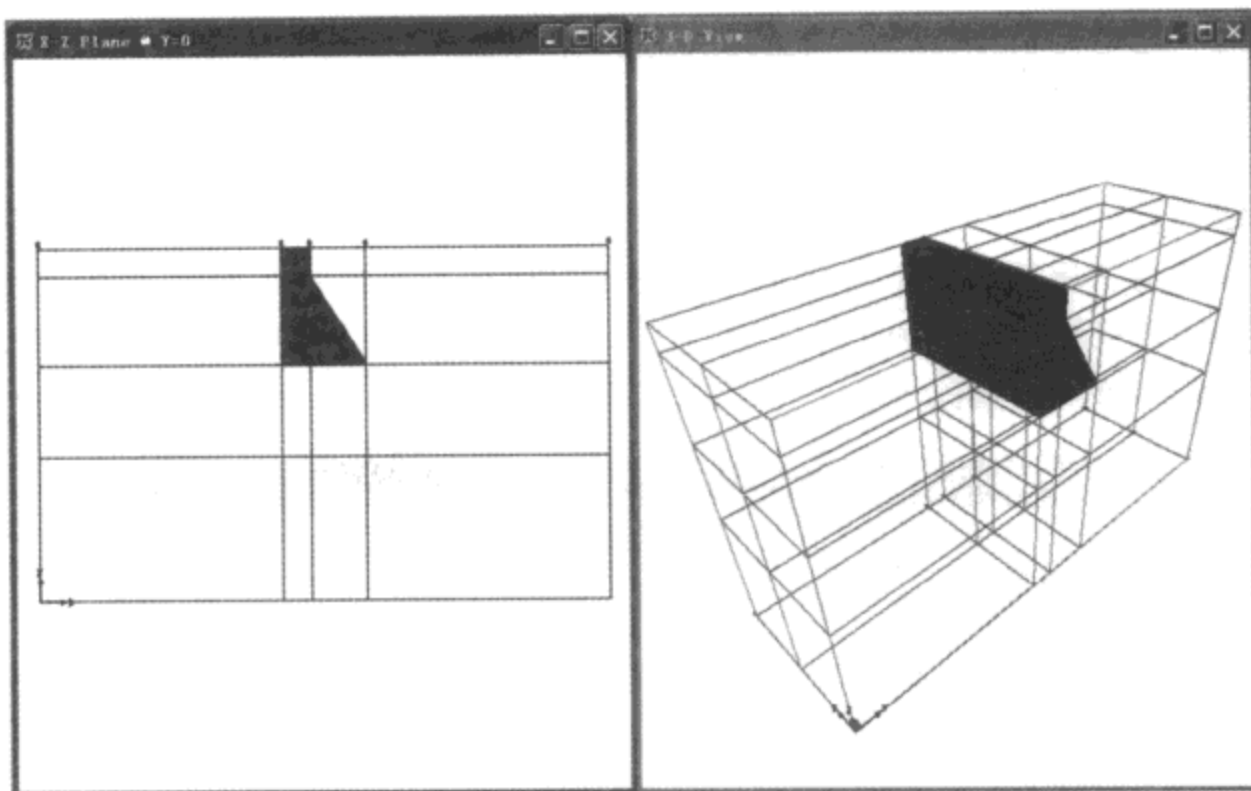


图 30-8 绘制坝体部分

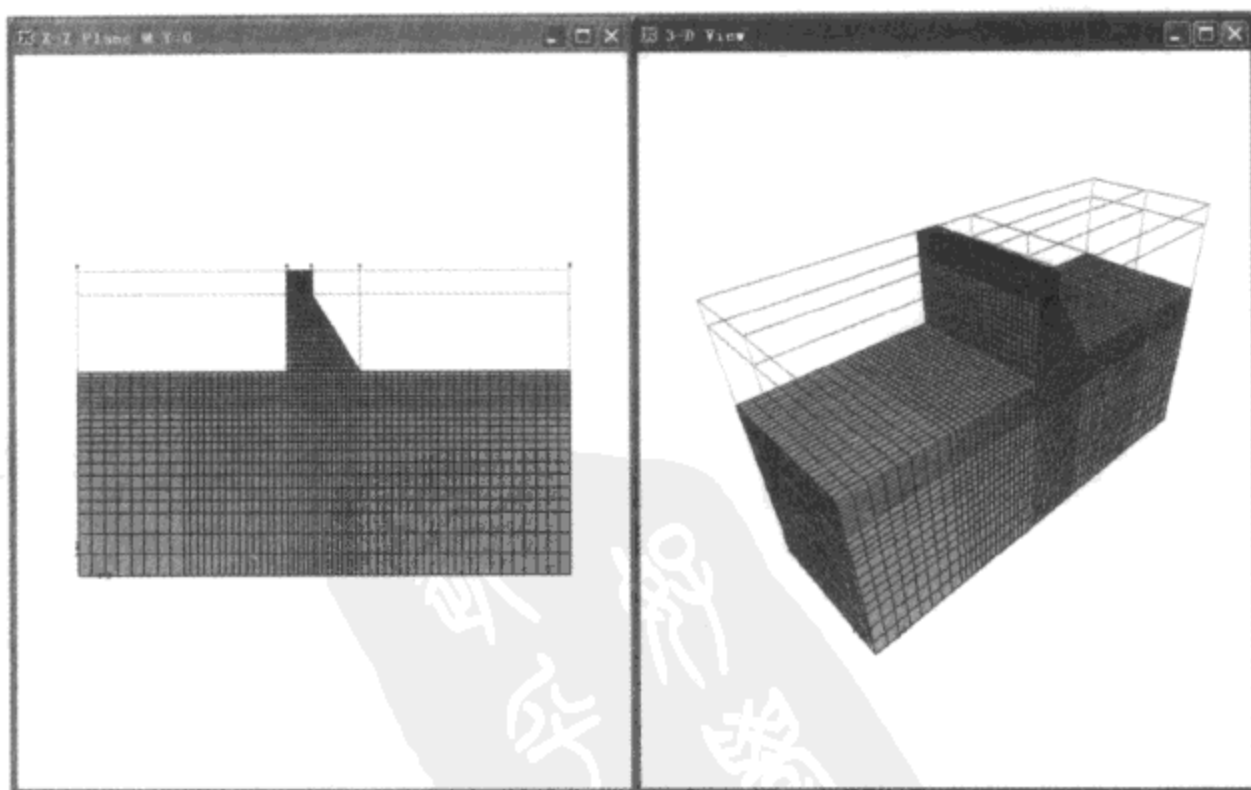


图 30-9 混凝土重力坝模型

4. 施加约束

根据边界条件,在顺流方向即 x 方向的两个侧面,约束 x 方向的位移;沿 y 方向的两个侧面,约束 y 方向的位移,底面所有的自由度都被约束。具体操作时,可选择相应面上的所有节点,然后点击命令【指定】>【节点】>【约束】,在弹出的对话框中勾选需约束的自由度即可。

5. 定义静荷载工况

点击命令【定义】>【荷载工况】,根据需要定义荷载工况。如图 30-10 所示,需要考虑的静荷载工况主要有:自重、静水压力、扬压力,分别对应的名称为 DEAD、W1、W2。由于三种工况都属于恒载,在类型一栏均设定为 DEAD。另外,DEAD 工况的自重乘数设为 1,这表明结构自重由程序自动计算,并计入 DEAD 工况。

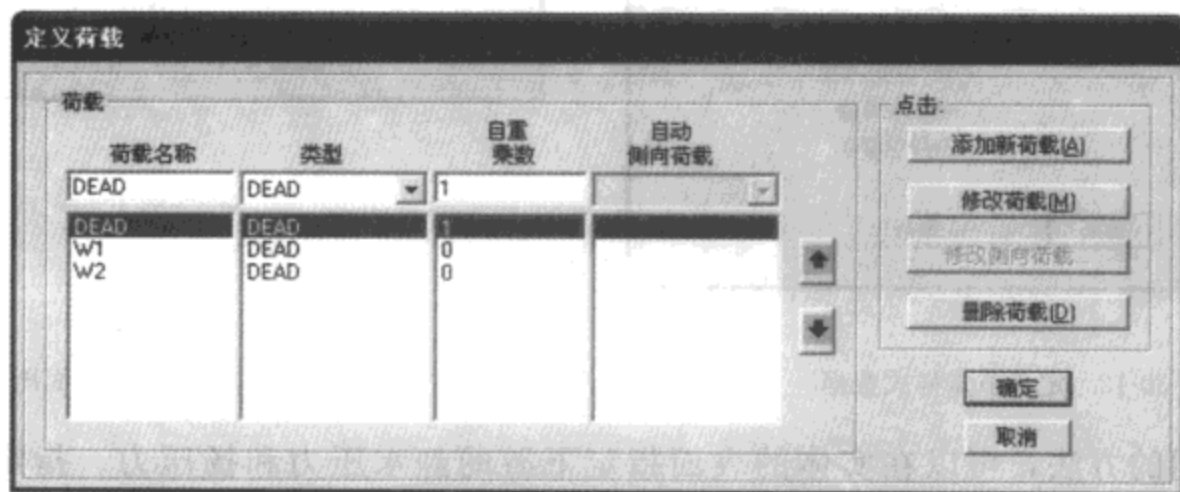


图 30-10 定义荷载工况

6. 施加水压力

水压力包括静水压力和扬压力,都需要借助【节点样式】来施加到结构上。

以上游静水压力为例,首先点击【定义】>【节点样式】,添加需要的节点样式名称(图 30-11)。然后选择上游坝面上的所有节点,点击命令【指定】>【节点样式】,在图 30-12 所示的对话框中选择相应的样式名,根据水压力的分布情况输入常数 A、B、C、D 的值,点击【确定】。接下来,选择上游坝面上的所有实体单元,点击命令【指定】>【实体荷载】>【表面压力】,弹出如图 30-13 所示的对话框。选择相应的荷载工况名称,并选择压力的来源方式为【通过节点样式】,在其下拉菜单中选择刚指定的节点样式名称,并输入乘数值,确保每个节点上节点样式的标量值与乘数的乘积为该节点上的静水压力值。

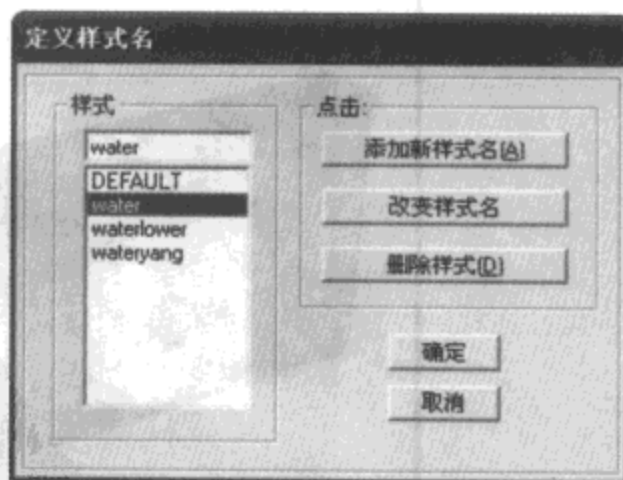


图 30-11 定义节点样式名称

注意: 施加实体上的表面压力时,需要指定压力作用的表面,即面 1、面 2、……或面 6。这六个面的具体位置可以通过实体的绘制方法来判断,也可以通过多次试加表面压力来推断。

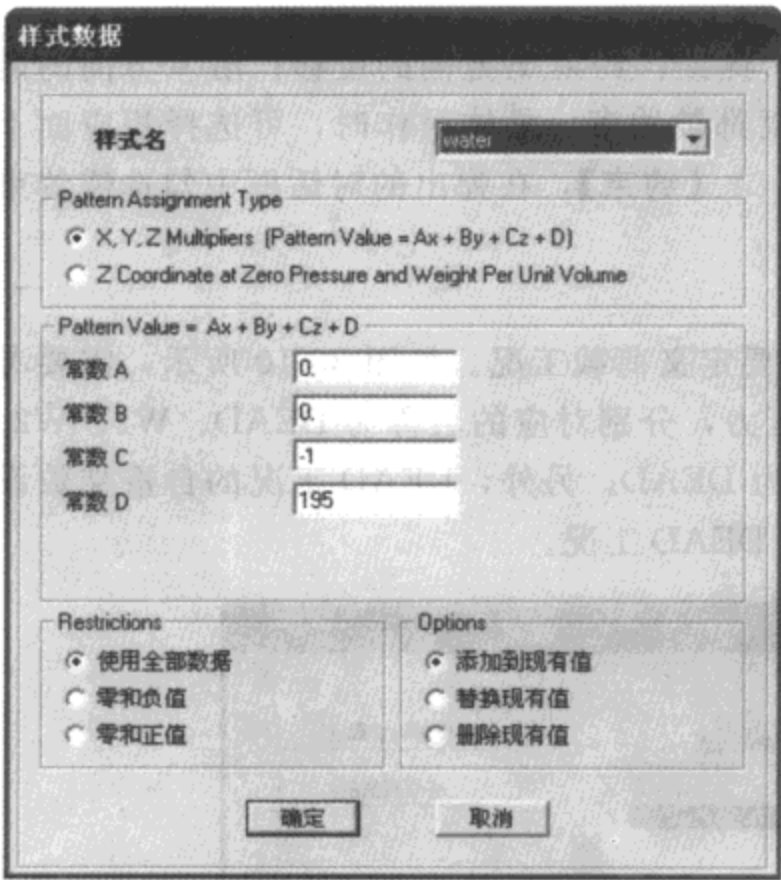


图 30-12 定义节点样式数据

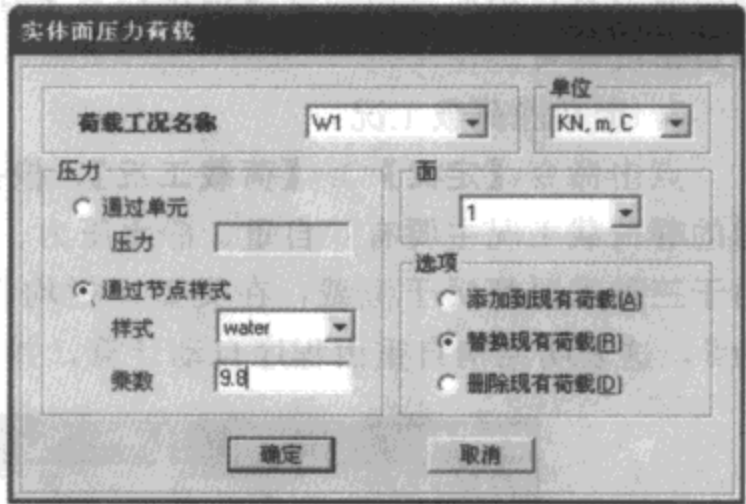


图 30-13 指定实体表面压力

使用相同的方法，可以在实体的表面指定下游的静水压力和扬压力。指定完毕后，可以通过命令【显示】>【显示荷载指定】>【实体】来查看。图 30-14 即显示了作用在坝体不同表面上的压力，分别是上游的静水压力（左图）、下游的静水压力（右上图）和扬压力（右下图）。

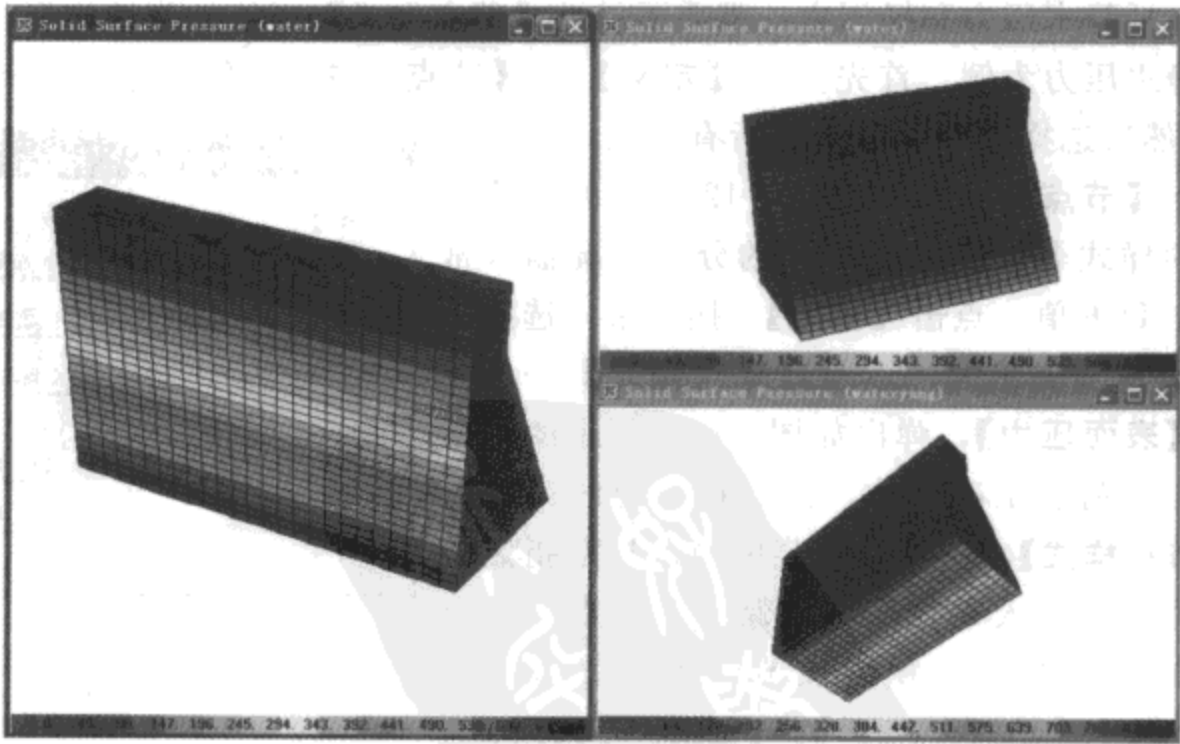


图 30-14 显示大坝表面压力

7. 定义反应谱工况

首先根据已知的反应谱曲线，制作该反应谱的文本文件。如图 30-15 所示，文本文件中包括两组数据，分别是周期和对应的谱值。然后采用自定义反应谱函数的方法，将该反应谱引入 SAP2000 中。即点击命令【定义】>【函数】>【反应谱】，在【选择添加函数类型】一栏中选择“Spectrum from file”，即“从文件添加”。在弹出的对话框中指定文件的路径，即可显示相应的反应谱曲线。完成对话框中所有设定以后，点击【确定】。该反应谱即被成功地引入程序中（如图 30-16）。

接下来，定义反应谱工况。点击命令【定义】>【分析工况】，在弹出来的对话框中点击【添加新工况】按钮。再在分析工况数据对话框中选择分析工况类型为“Response Spectrum”（图 30-17），即出现定义反应谱工况的对话框，框中各个参数的含义详见前面的相关章节。本例中，振型组合采用 CQC 方法，地震荷载的作用方向沿着顺河流方向，即 U1 方向，阻尼比为 0.05。

此外，模态分析是程序默认生成的分析工况。点击【定义】>【分析工况】，选择名为“MODAL”的分析工况，点击按钮【修改】/【显示工况】。本例中，采用 Ritz 方法计算振型，最大振型数取为 20。如图 30-18 所示。

| | |
|------|-------------|
| 0 | 1 |
| 0.1 | 2 |
| 0.4 | 2 |
| 0.42 | 1.025728991 |
| 0.44 | 0.983670354 |
| 0.46 | 0.945093863 |
| 0.48 | 0.909577855 |
| 0.5 | 0.876766581 |
| 0.52 | 0.846357764 |
| 0.54 | 0.818092871 |
| 0.56 | 0.791749445 |
| 0.58 | 0.767135 |
| 0.6 | 0.744082116 |
| 0.62 | 0.72244447 |
| 0.64 | 0.702093602 |
| 0.66 | 0.682916255 |
| 0.68 | 0.664812184 |
| 0.7 | 0.647692332 |
| 0.72 | 0.631477302 |
| 0.74 | 0.616096078 |
| 0.76 | 0.601484941 |
| 0.78 | 0.587586554 |
| 0.8 | 0.574349177 |
| 0.82 | 0.561725998 |
| 0.84 | 0.549674556 |
| 0.86 | 0.538156247 |
| 0.88 | 0.527135891 |
| -- | ----- |

图 30-15 反应谱文本文件片断

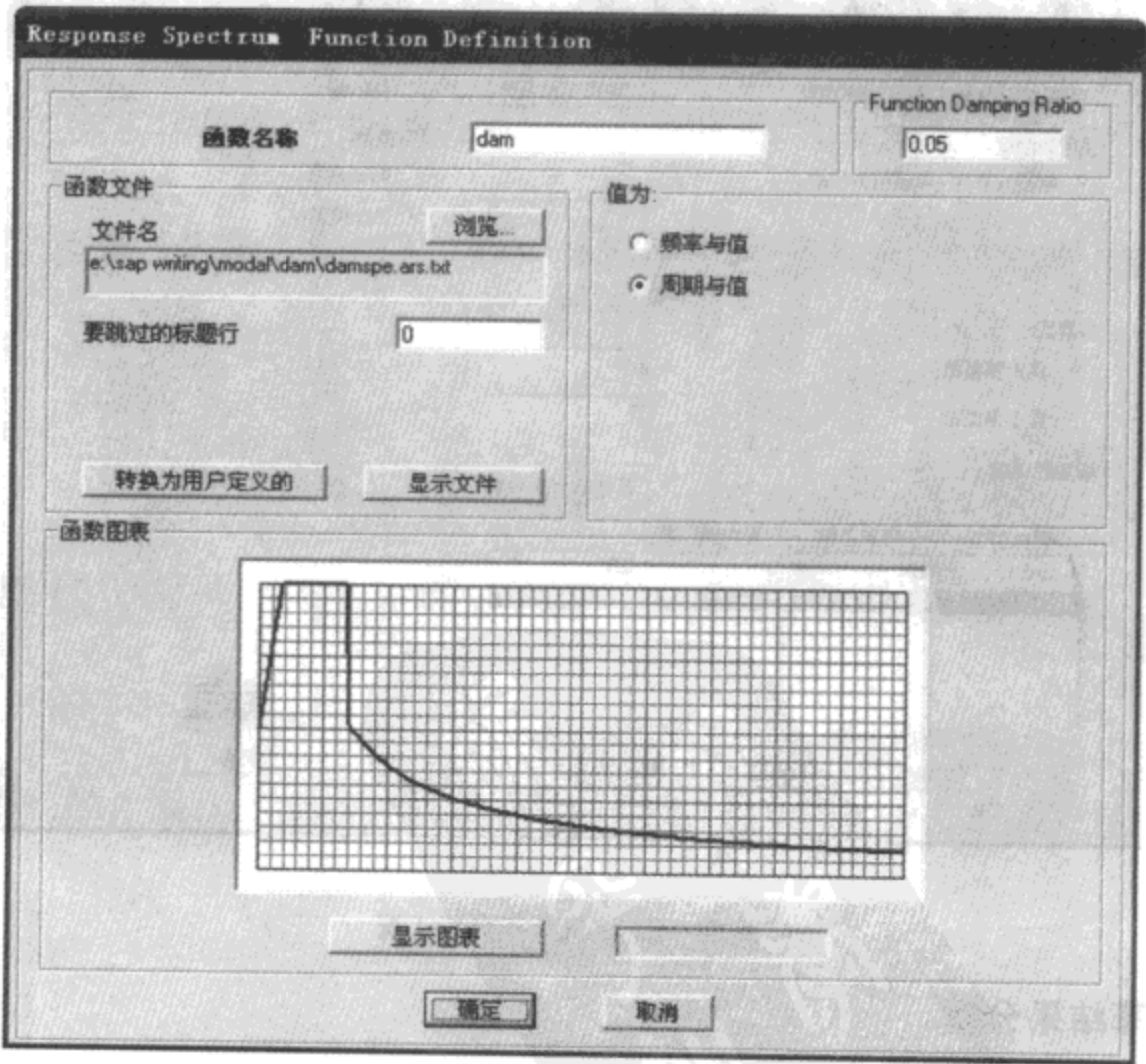


图 30-16 自定义反应谱函数

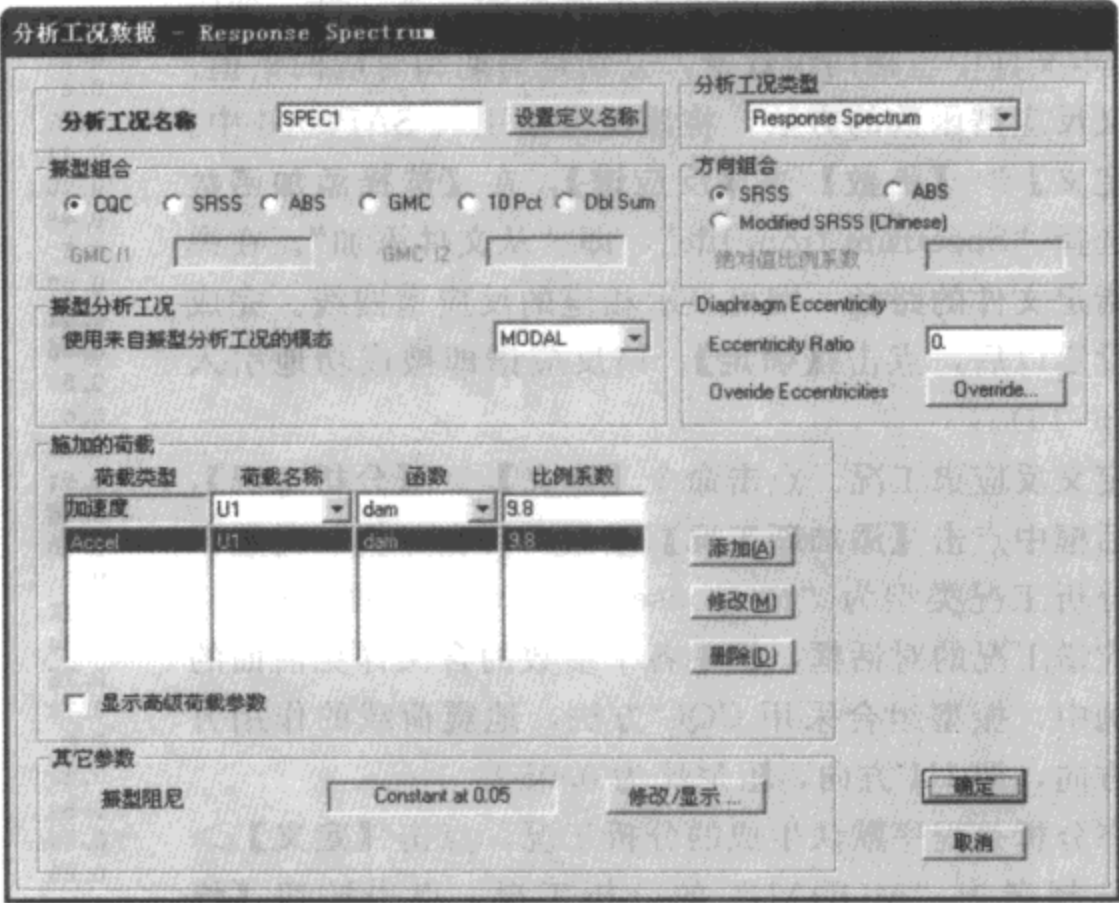


图 30-17 定义反应谱工况

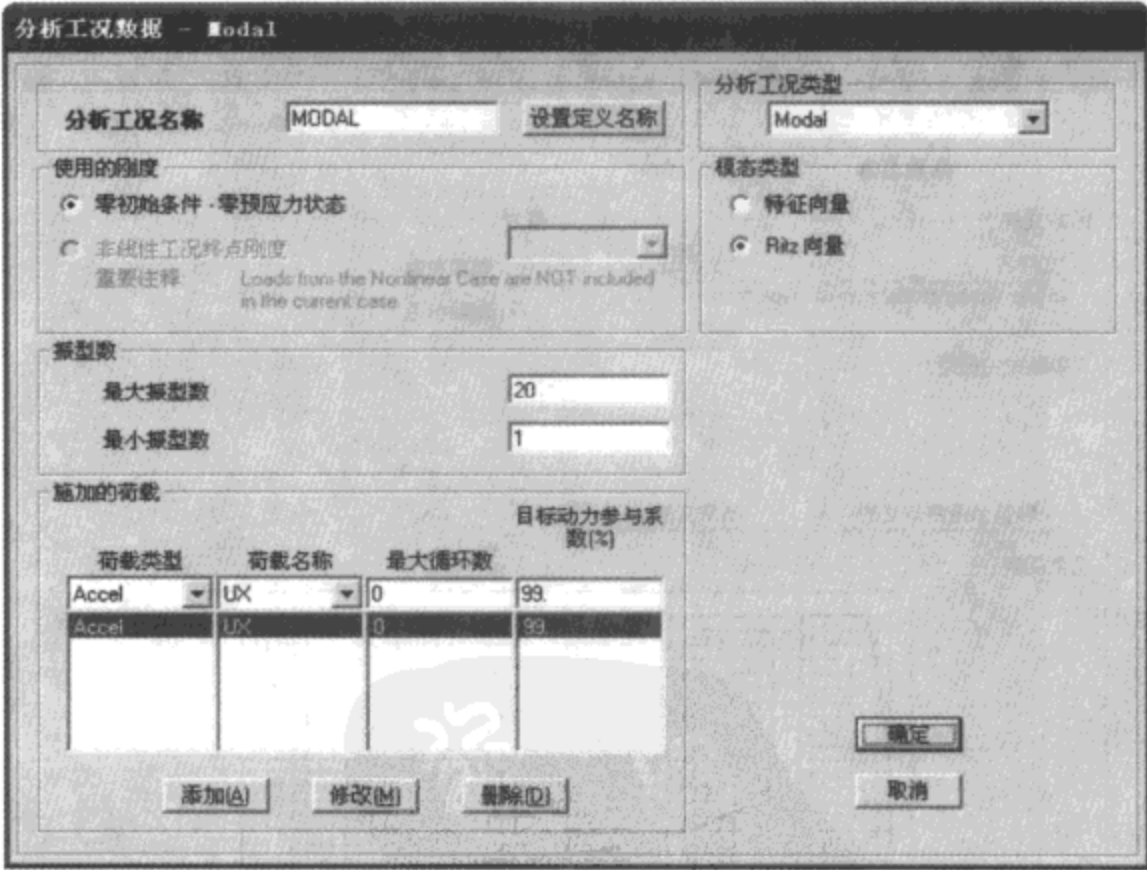


图 30-18 编辑模态分析工况

30.3.3 计算结果分析

1. 静力分析结果

通过定义荷载组合可以查看自重、静水压力、扬压力共同作用下，大坝的变形和内力。

在图 30-19 的变形图中，鼠标移至坝体上任一点，即可查看该点的位移值。通过比较可知，坝顶处的水平位移较大，坝趾处的沉降略大于坝踵处的。

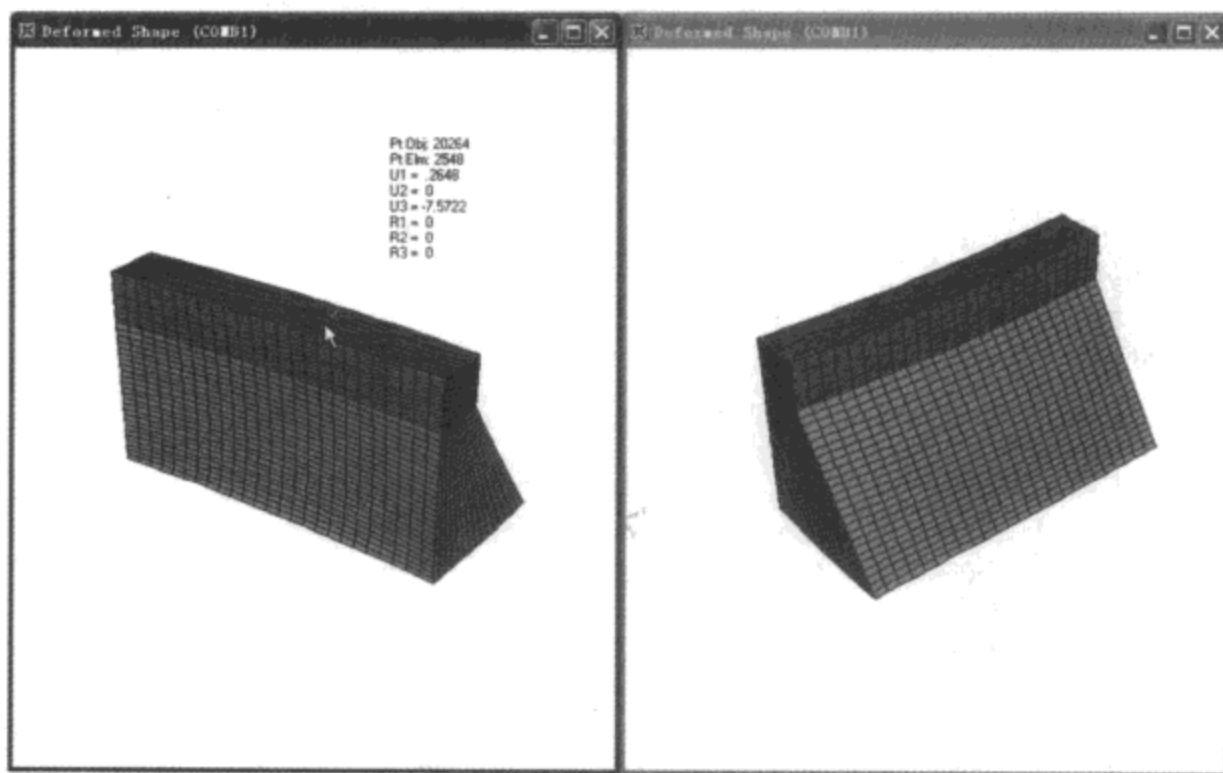


图 30-19 静荷载作用下坝体变形

图 30-20 显示了最大主应力的分布情况。大坝上游的坝踵处存在较大的应力，但还未出现拉应力，说明本例中，静外荷载对大坝的作用偏小。

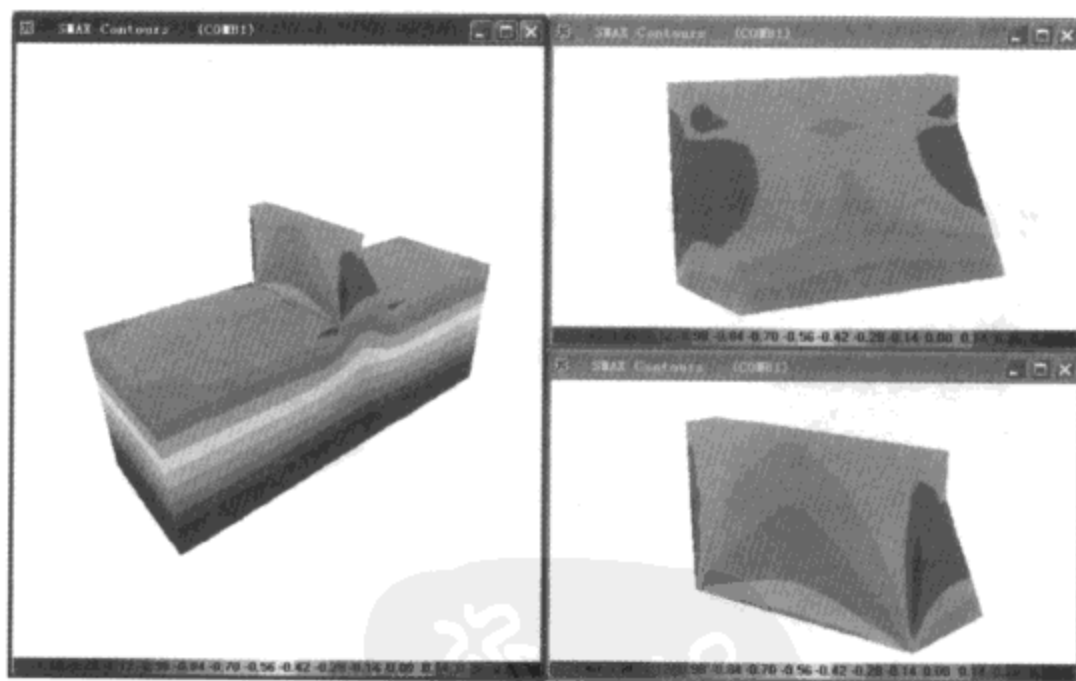


图 30-20 静荷载作用下的最大主应力

2. 模态分析结果

采用 Ritz 方法进行自振分析。图 30-21 为 SAP2000 表格输出的振型分析结果。图 30-22 为前 4 阶振型的变形情况。

3. 反应谱分析结果

图 30-23 和图 30-24 分别给出了沿大坝长度方向（Y 方向）和高度方向（Z 方向）的应

Modal Periods And Frequencies

文件(F) 视图(V) 选项(O) 格式(M)

Units: As Noted Modal Periods And Frequencies

| | OutputCase Text | StepType Text | StepNum Unitless | Period Sec | Frequency Cyc/sec |
|---|--------------------|------------------|---------------------|---------------|----------------------|
| ▶ | MODAL | Mode | 1 | 0.98955 | 10.106 |
| | MODAL | Mode | 2 | 0.81571 | 12.259 |
| | MODAL | Mode | 3 | 0.62271 | 16.059 |
| | MODAL | Mode | 4 | 0.42423 | 23.572 |
| | MODAL | Mode | 5 | 0.38446 | 26.01 |
| | MODAL | Mode | 6 | 0.34913 | 28.643 |
| | MODAL | Mode | 7 | 0.2972 | 33.648 |
| | MODAL | Mode | 8 | 0.29074 | 34.395 |
| | MODAL | Mode | 9 | 0.28313 | 35.319 |
| | MODAL | Mode | 10 | 0.25368 | 39.42 |
| | MODAL | Mode | 11 | 0.23386 | 42.76 |
| | MODAL | Mode | 12 | 0.22269 | 44.905 |
| | MODAL | Mode | 13 | 0.19497 | 51.291 |
| | MODAL | Mode | 14 | 0.18603 | 53.756 |
| | MODAL | Mode | 15 | 0.16623 | 60.157 |
| | MODAL | Mode | 16 | 0.13796 | 72.483 |
| | MODAL | Mode | 17 | 0.11294 | 88.541 |
| | MODAL | Mode | 18 | 0.09716 | 102.92 |
| | MODAL | Mode | 19 | 0.05287 | 189.16 |
| | MODAL | Mode | 20 | 0.03966 | 252.12 |

记录: 1 of 20 完成

图 30-21 模态结果的表格输出

力图，由图可知，较大的应力出现在下游坝中部靠近坝顶位置处及上游坝踵处。故这些位置的混凝土容易先开裂。

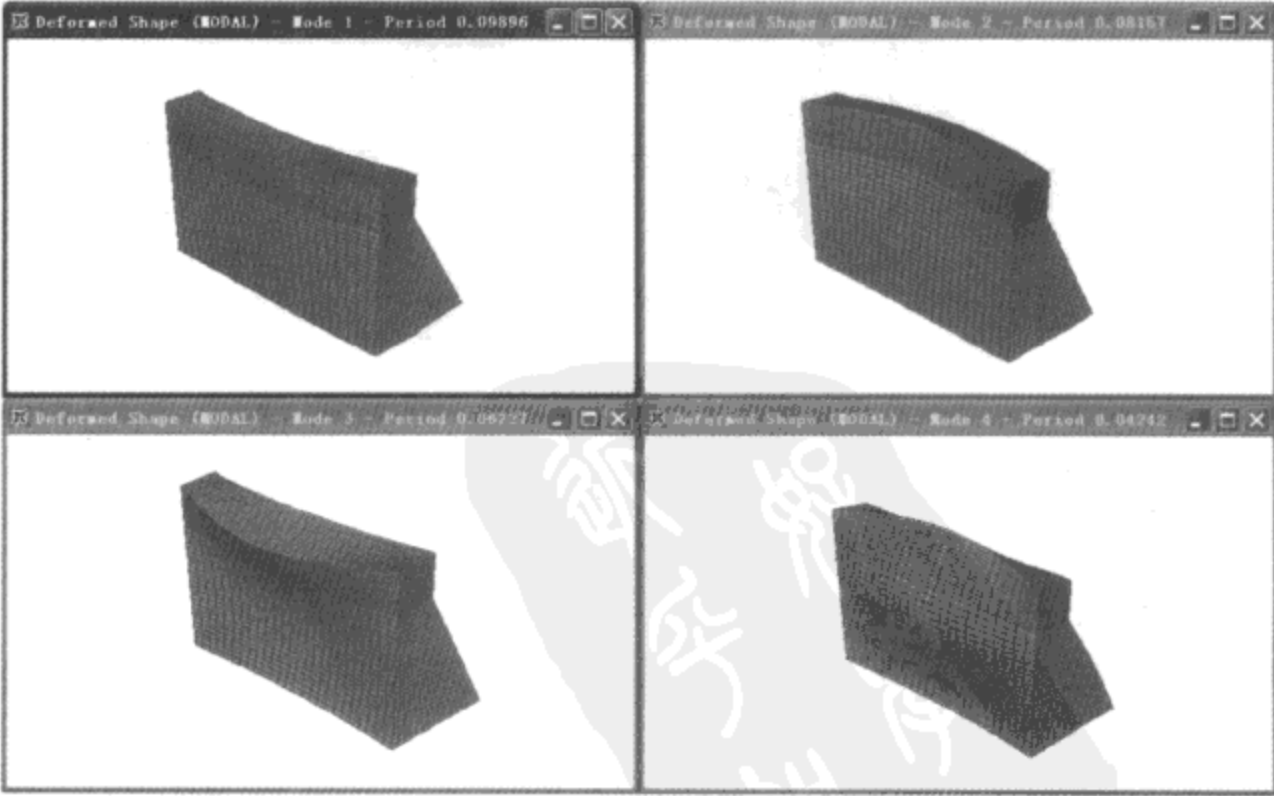


图 30-22 前 4 阶振型（左上：第一阶、右上：第二阶、左下：第三阶、右下：第四阶）

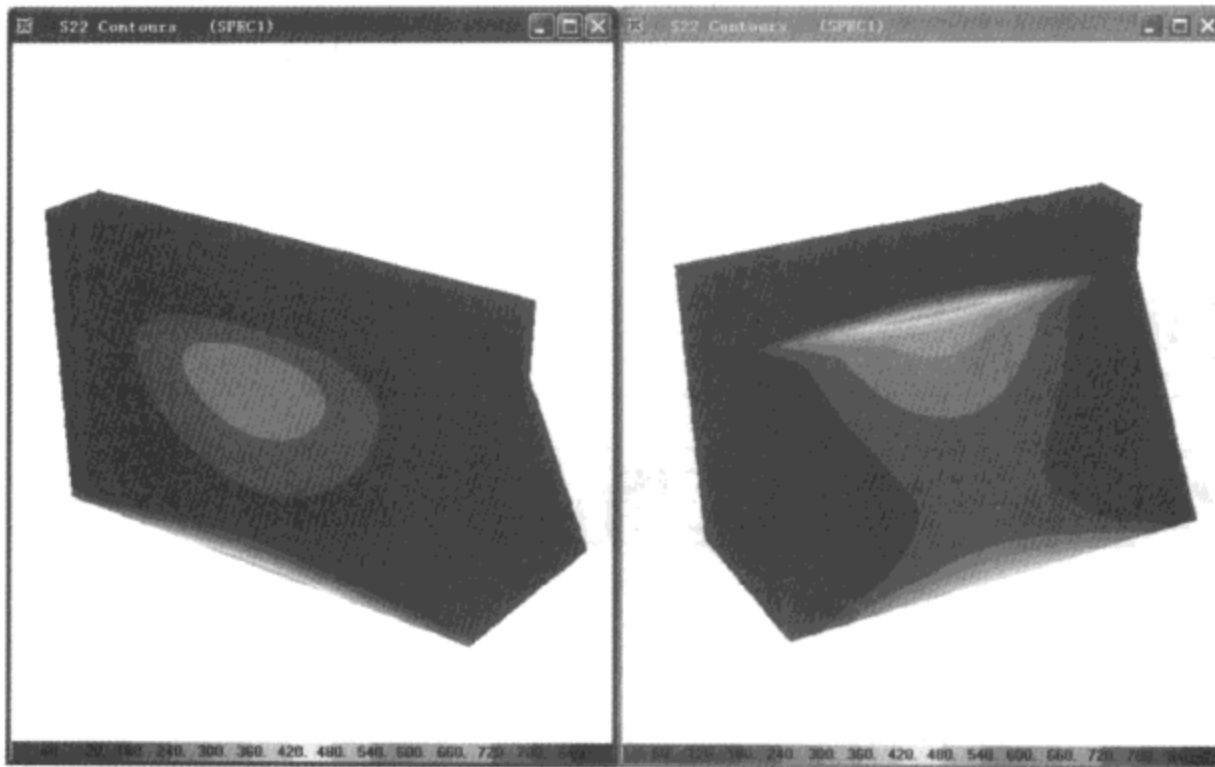


图 30-23 坝体 Y 向应力图

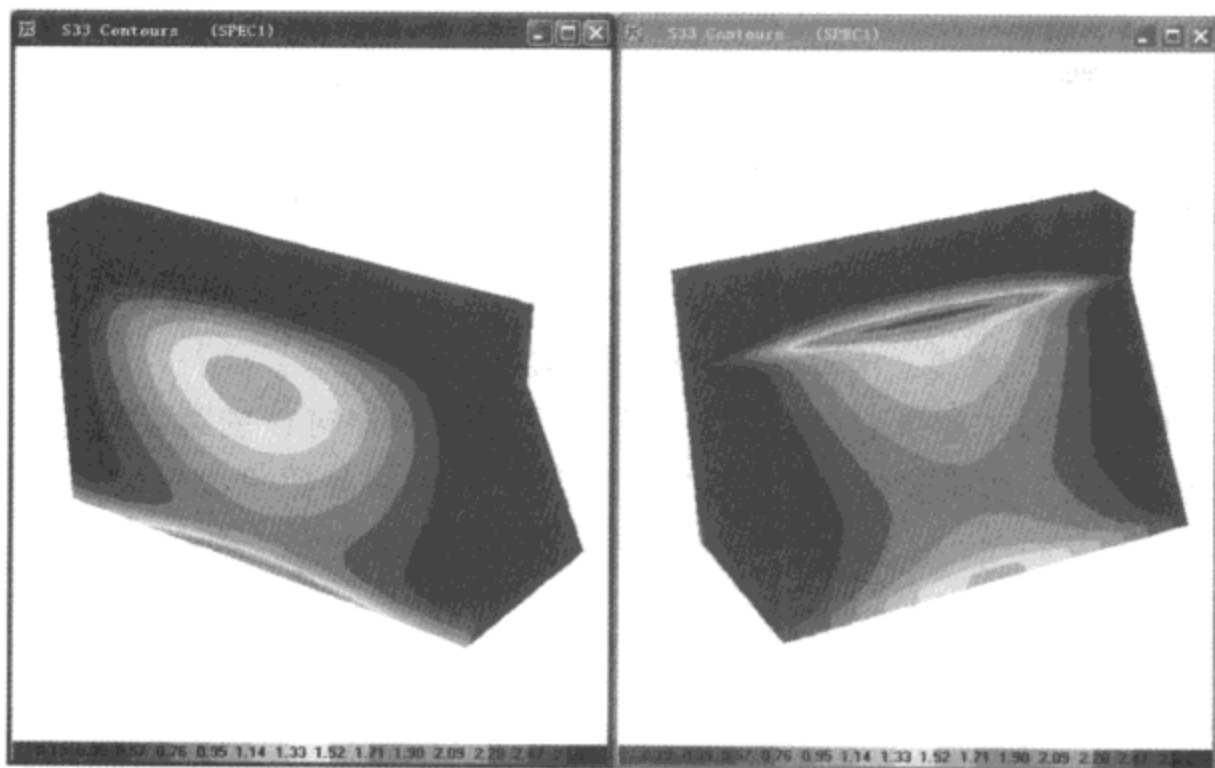


图 30-24 坝体 Z 向应力图

附录 A

SAP2000 V10安装指南

SAP2000 通过 License 来进行软件使用授权,本附录介绍了 SAP2000 V10 的安装过程和 License 的工作方式,并对安装过程中常见问题作了详细解答。

A. 1 SAP2000 安装

A. 1.1 系统要求

SAP2000 可以运行在 Win98/NT /2000/XP 操作系统上,对 CPU、内存、硬盘容量、显卡无特别要求,CPU 越快、内存越大则计算所费时间越短。

SAP2000 网络版并不要求专门的服务器,服务器端程序可以安装在任意一台接入局域网的计算机上。如果不使用服务器进行分析计算的话,则服务器只进行 License 管理和验证工作。

A. 1.2 安装前注意事项

SAP2000 安装分为程序安装(见 A. 1.3)、License 认证(见 A. 1.5)两步。如果 License 是采用绑定加密锁的方式(参考 A. 2.1 License 类型),还需要进行加密锁驱动安装(见 A. 1.4)。单机版和网络版安装的不同点在 License 认证这一步,另外网络版在程序安装这一步可以选择两种安装方案:

- (1) 在所有将要使用 SAP2000 的计算机上进行完整的程序安装;
- (2) 只在服务器上进行完整的程序安装,在客户机上安装必要的支持文件,这种方案实际上是所有客户机使用服务器的资源(CPU、硬盘、内存等)进行计算。

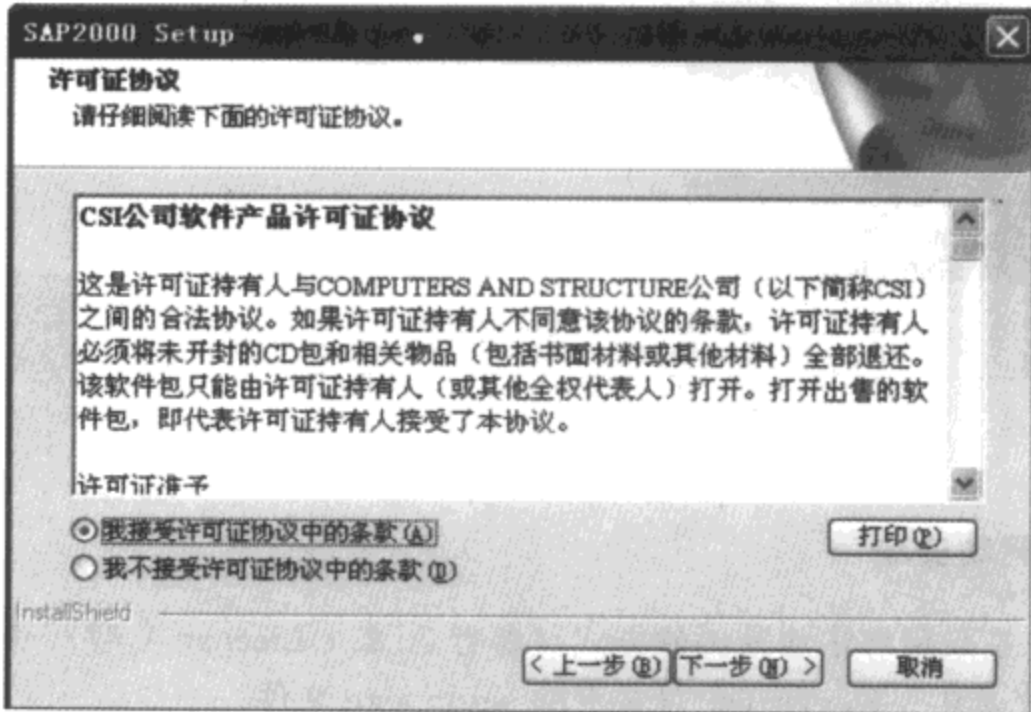
在进行 SAP2000 安装前,请确认以下几点以保证安装的顺利进行:

- (1) 请将正式 License 文件(lservrc)妥善备份;
- (2) 如果加密锁为 USB 接口,在加密锁驱动安装过程中请不要将其插在计算机上;
- (3) 网络版中服务器与客户机之间的通讯基于 TCP/IP 协议,并需要通过 UDP 端口

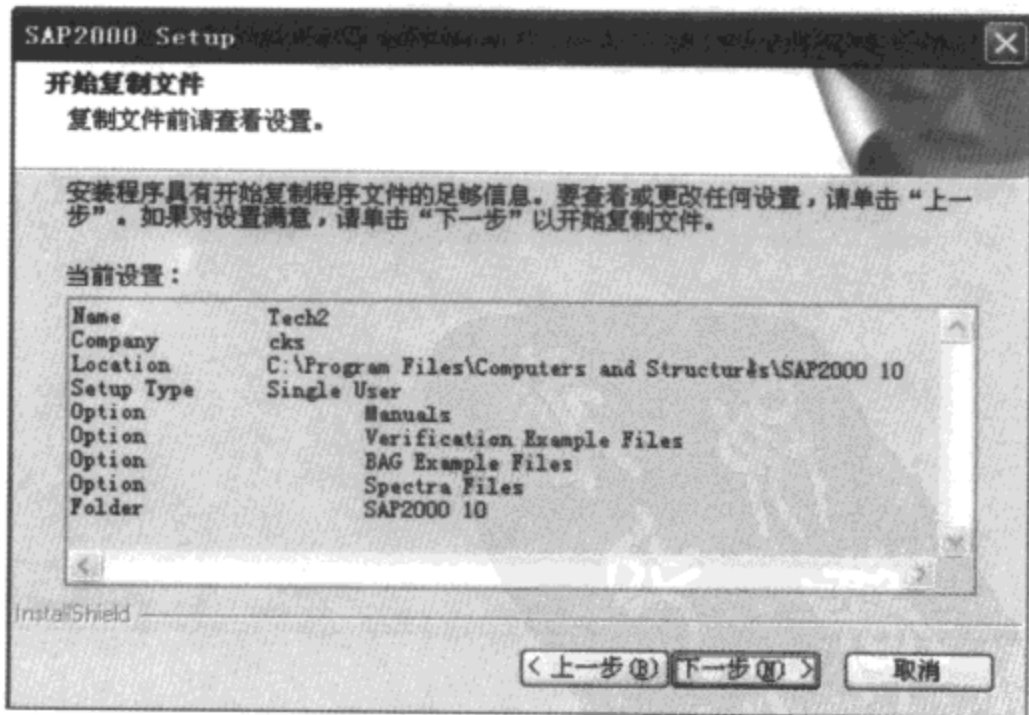
5093 进行通讯，请确保此端口没有被屏蔽。

A. 1.3 程序安装

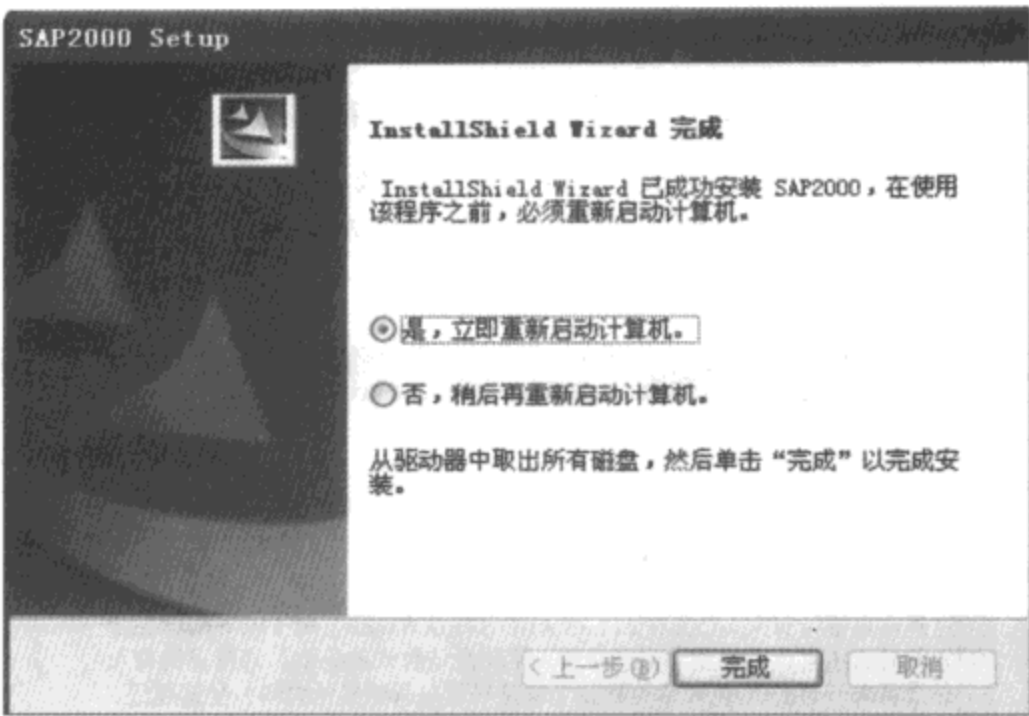
将 SAP2000 安装光盘放入 CD-ROM 中或直接运行 setup.exe 文件，都将运行安装程序，点击【下一步】按钮，当出现如下画面时，仔细阅读许可证协议，如选择【我接受许可证协议中的条款 (A)】则视为用户接受了 SAP2000 许可证协议。



若用户接受了许可证协议，则进入安装准备阶段，按照安装程序要求输入客户信息、选择安装路径和程序文件夹而后点击【下一步】开始安装。



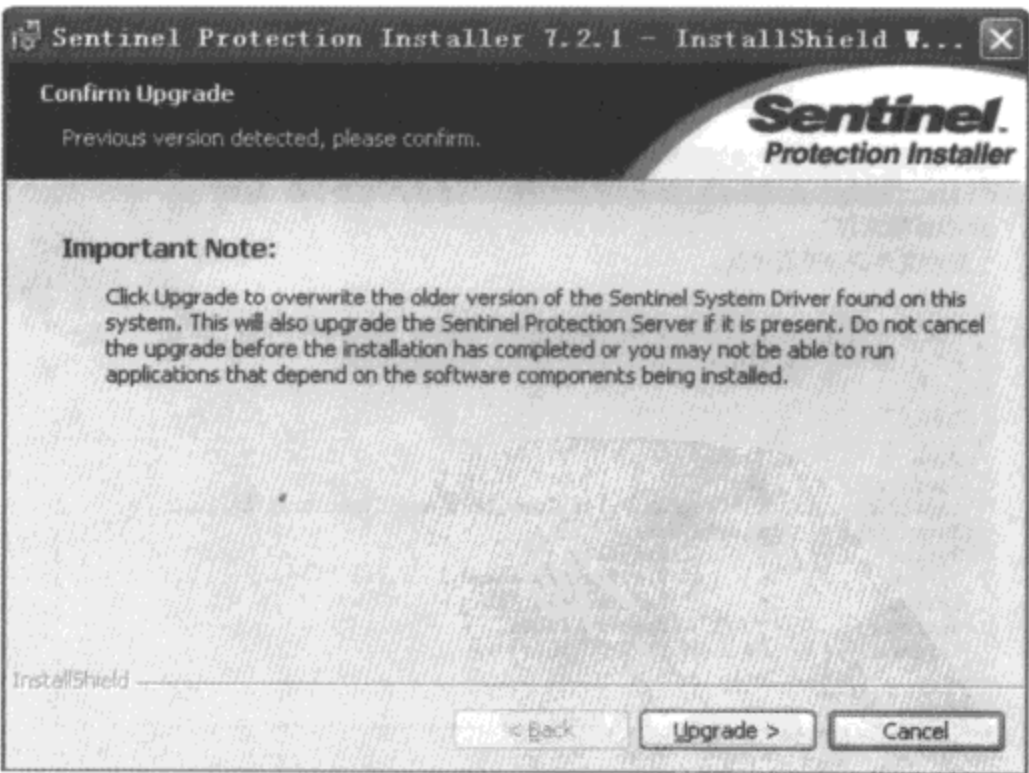
点击【完成】并重新启动计算机完成单机版程序安装。



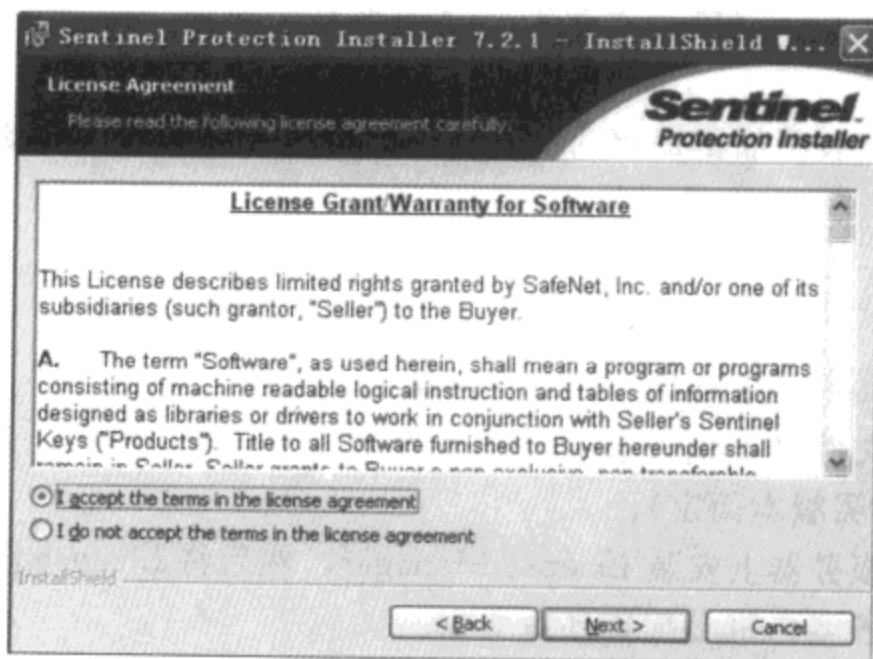
A. 1. 4 加密锁驱动安装

如果 License 是采用绑定加密锁的方式（参考 A. 2. 1 License 类型），需要安装加密锁驱动程序，请运行光盘中 \KeyDriver 目录下的 setup.exe 文件。

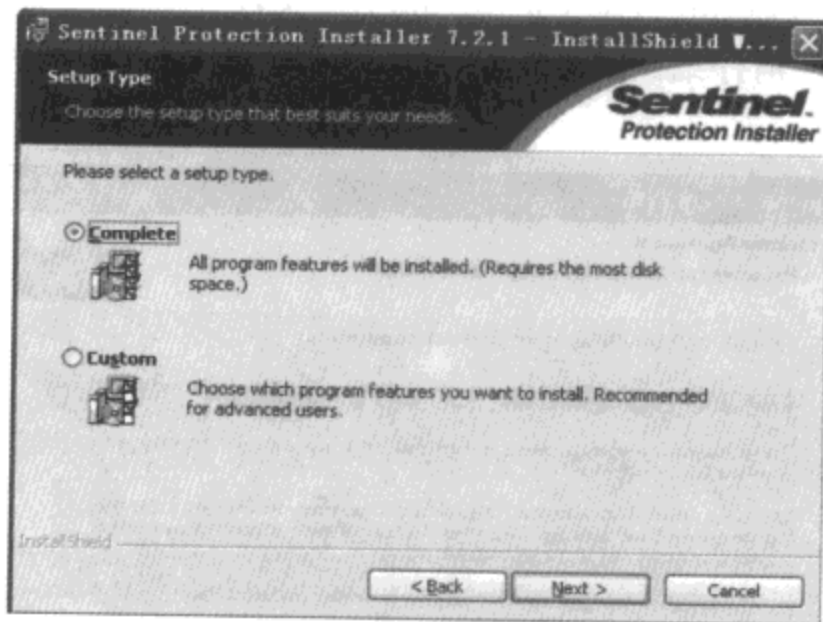
如果计算机中存在 Sentinel Protection 较早版本，将会提示：



点击【Upgrade】或第一次安装时都将出现以下画面，请仔细阅读许可协议。如选择 “I accept the terms in the license agreement” 则视为用户接受了许可协议。



选择安装类型为【Complete】(如下图所示), 按程序提示完成安装过程。



加密锁安装后, 应该能够:

- (1) 在【控制面板】—【添加或删除程序】中找到“Sentinel Protection Installer x. x. x”(x. x. x 为版本号, 例如 7. 2. 1);

(2) 在【控制面板】—【管理工具】—【服务】中找到“Sentinel Protection Server”，并且其状态为“已启动”。

如果不是这样，则表明加密锁驱动安装不正确或相应服务没有启动，请重启计算机或重新安装加密锁驱动。

A. 1.5 License 认证

SAP2000 的 License 文件为 lservrc (无后缀)。

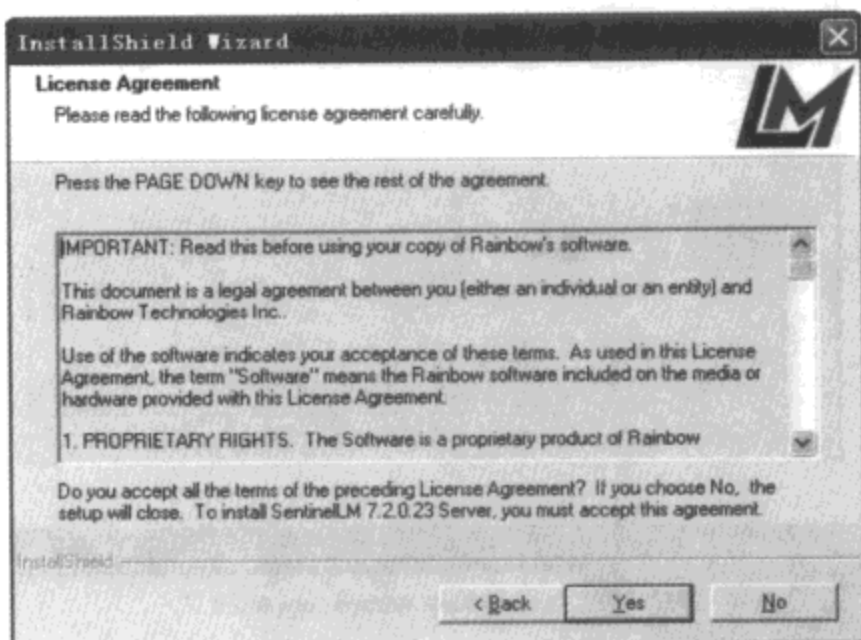
单机版只需将该文件拷贝到安装目录下就完成了 License 注册，即可使用 SAP2000 全部/大部分功能（视购买版本而定）。

网络版需要先在服务器上安装 License Manager，然后将 License 注册到 License Manager 中，最后视情况在各客户机上配置环境变量。

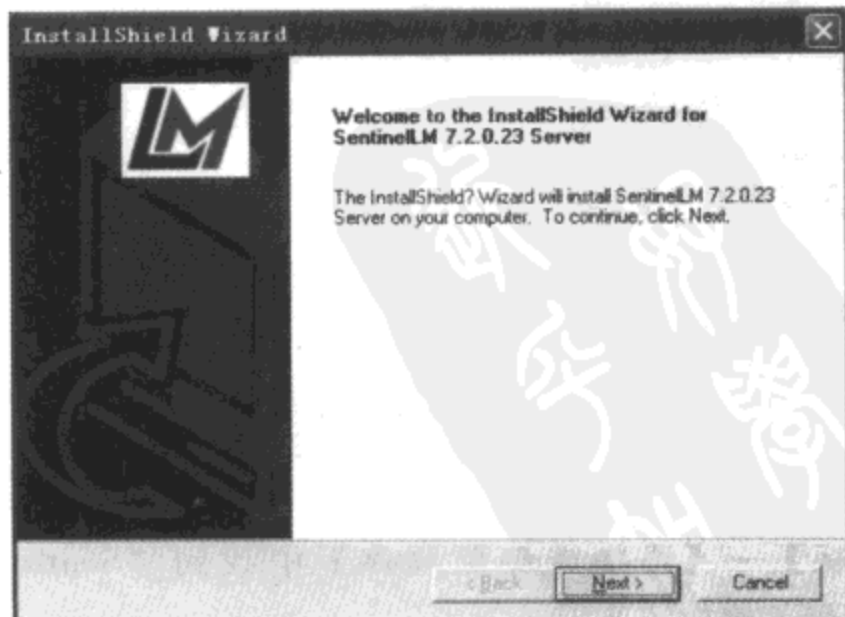
1. License Manager 安装

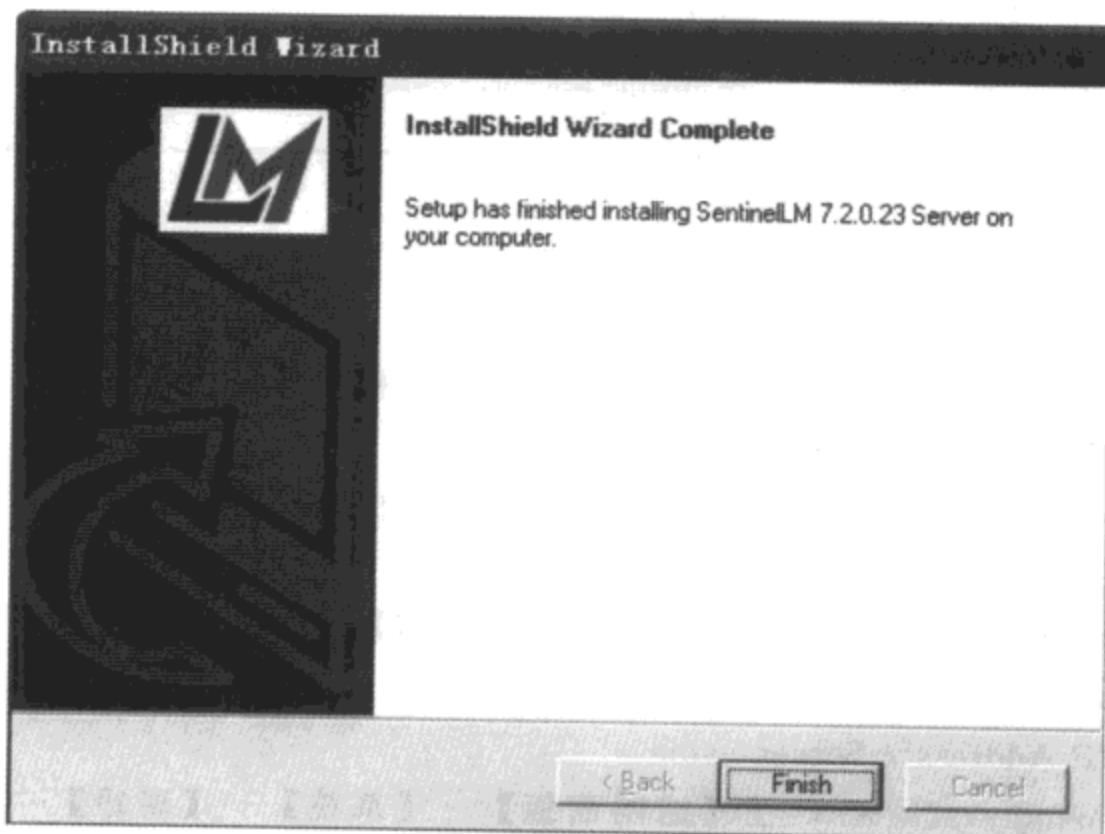
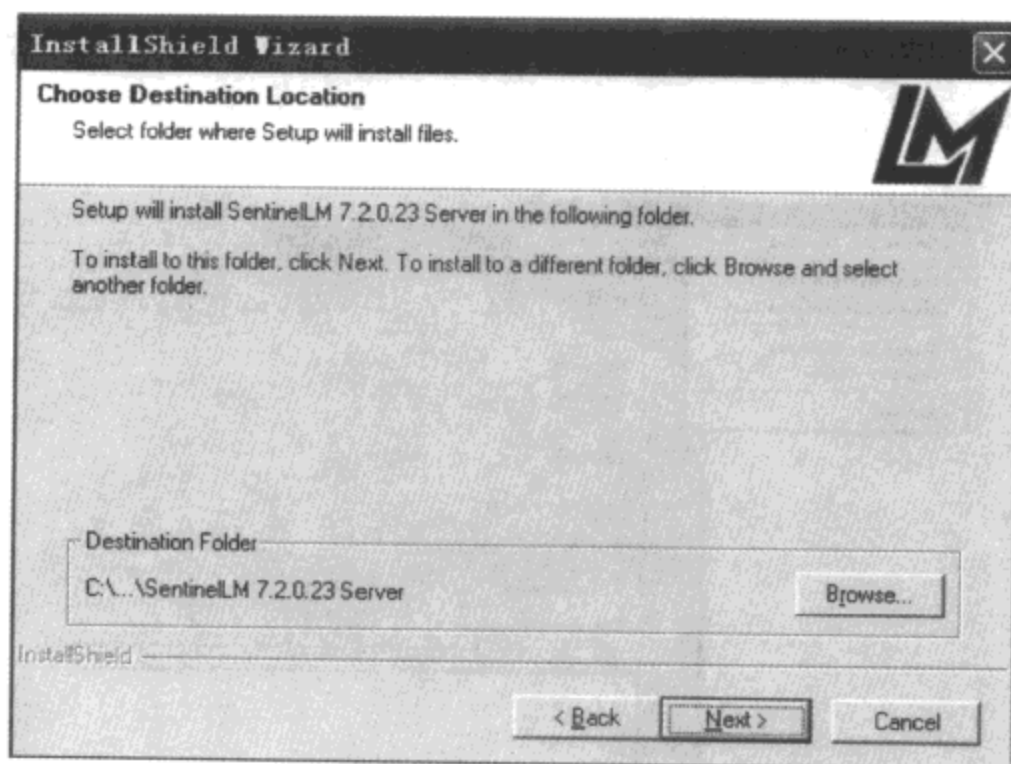
运行 \LM\Server\Setup 目录下的 setup.exe 文件。

当出现以下画面时，请仔细阅读许可协议，如选择【Yes】则视为用户接受了许可协议，此时方可继续安装。



指定安装路径后，按“Next”开始安装，如下图。





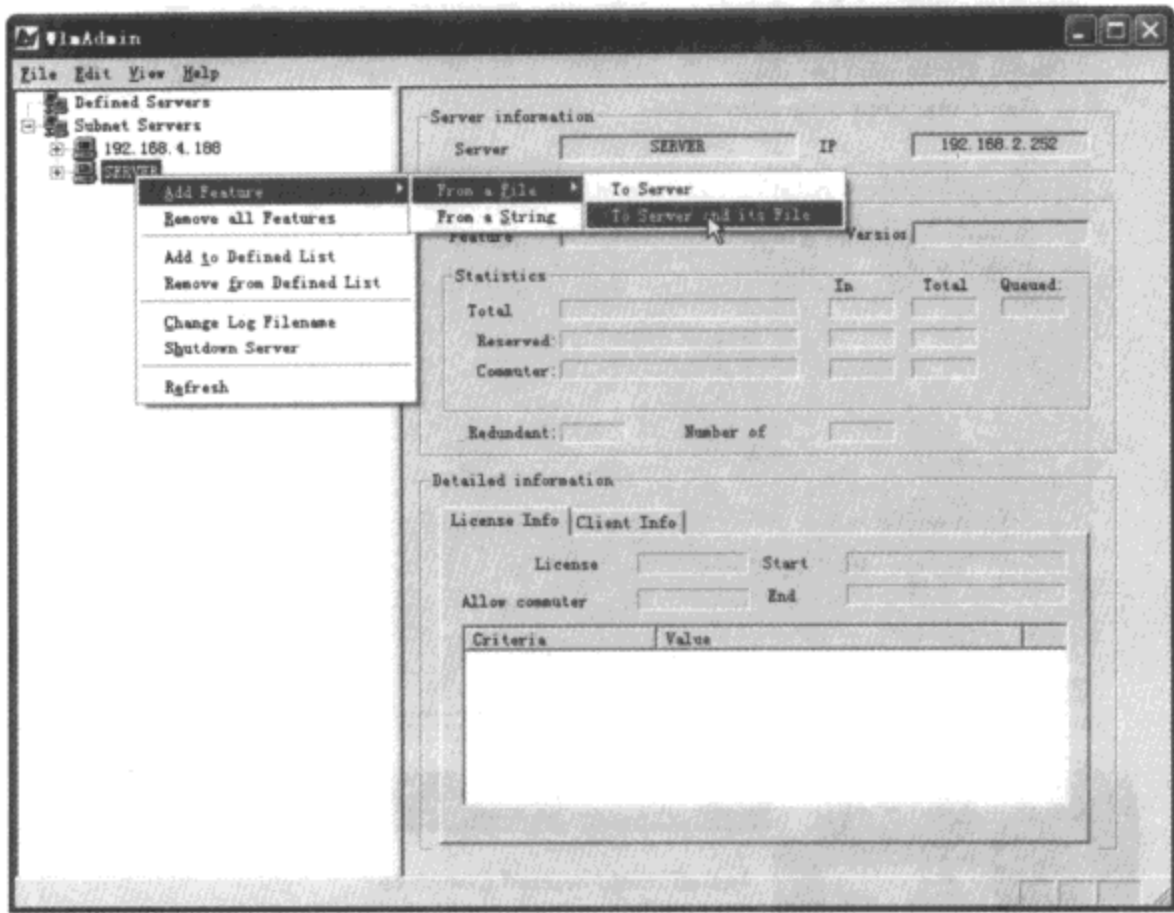
License Manager 安装后，应该能够：

- (1) 在“控制面板” — “添加或删除程序”中找到“SentinelLM x. x. x. x Server”（x. x. x. x 为版本号，例如 7.2.0.23）；
- (2) 在“控制面板” — “管理工具” — “服务”中找到“SentinelLM”，并且其状态为“已启动”。

如果不是这样，则表明 License Manager 安装不正确或相应服务没有启动，请重启计算机或重新安装 License Manager。

2. 注册 License

运行 SAP2000 安装目录下的 Wladmin.exe，展开“Subnet Servers”，局域网中所有安装了 License Manager 并启动“SentinelLM”服务的计算机都列在这一项下面。在合适的计算机名或 IP 地址上按右键后，出现如下图选择：



这时将弹出打开文件窗口，选择需要注册的 License 文件，点击“打开”即完成 License 文件的注册。

3. 客户机环境变量设置

如果客户机与服务器不在同一个子网中，或者客户机找不到服务器，可以通过在客户机设置环境变量 **LSFORCEHOST** 来解决：

(1) 对于 Windows98，在 Autoexec. bat 文件中添加如下一行：

SET LSFORCEHOST=IP Address / Server name

(2) 对于 Windows NT，在【控制面板】—【系统】—【环境】中新建一个变量：

变量名=LSFORCEHOST

变量值= IP Address / Server name

(3) 对于 Windows2k/XP，在【控制面板】—【系统】—【高级】中点击【环境变量】，新建一个变量：

变量名=LSFORCEHOST

变量值= IP Address / Server name

以上 IP Address / Server name 为服务器 IP 地址/计算机名称，如果局域网使用动态 IP，则应以计算机名称作为变量值。

A. 2 License 的工作方式

A. 2.1 License 类型

SAP2000 的 License 分为 2 种类型：绑定设备 (Disk ID Hexadecimal) 和绑定加密锁 (Sen-

tinell Computer ID)。绑定设备的 License 与计算机的 Disk ID 对应，运行时不需要加密锁，但是只能用于固定的某台计算机上，如果将 License 拷贝到其它计算机则不产生作用；绑定加密锁的 License 与加密锁对应，购买时配一个 USB 或并口接口加密锁，运行时需要插上加密锁，将 License 拷贝到任意一台计算机并插上相应的加密锁就可以在该台计算机上运行 SAP2000。

License 并不区分是单机版（Standalone）还是网络版（Network）。对于单机版，使用时需要将 License 拷贝到安装目录下；对于网络版，需要将 License 注册到 License Manager 中。

A. 2. 2 License 使用

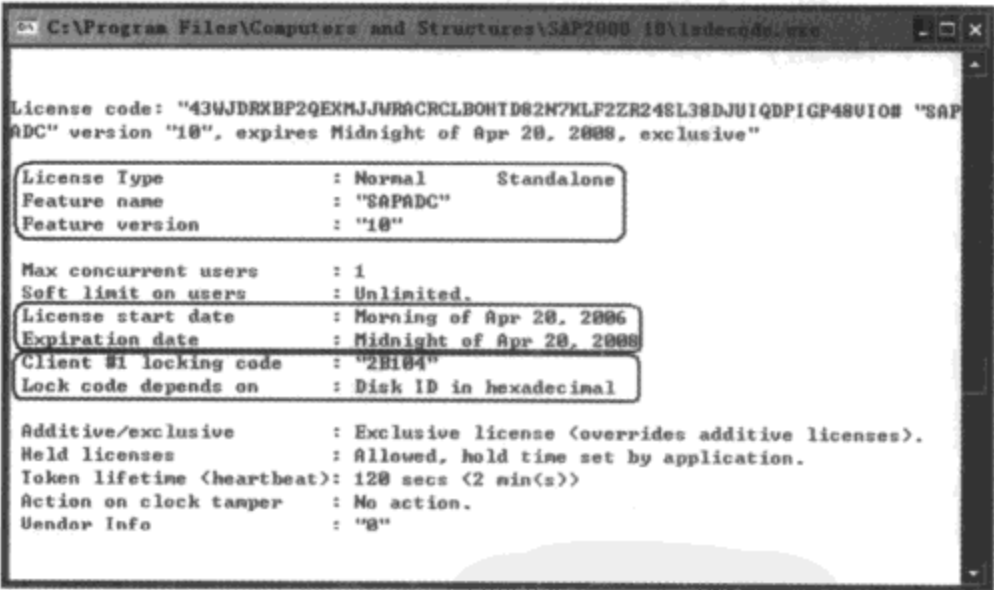
SAP2000 的 License 包含在 lservrc 文件中，每一行对应一个 License。

对于单机版，将 lservrc 文件放在安装目录下即可正常使用 License。

对于网络版，在将 License 注册到 License Manager 中后，同在一个局域网内的客户机无须在本机上拷贝 lservrc 文件都可以共享这些 License，只要同时运行在客户机上的 SAP2000 程序数不超过 License 总数即可。

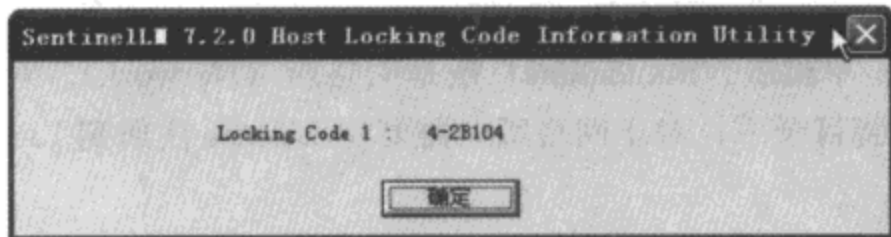
A. 2. 3 License 合法性判别

在获得一个 lservrc 文件后，有时需要核查该文件中包含的 License 是否是合法的。这时可以先通过运行 SAP2000 安装目录下的 lsdecode.exe 来参看 License 的属性，然后运行安装目录下的 echoid.exe 或 wechoid.exe 来参看与 License 对应的 DiskID 或 ComputerID 是否正确。运行 lsdecode.exe 结果如下：



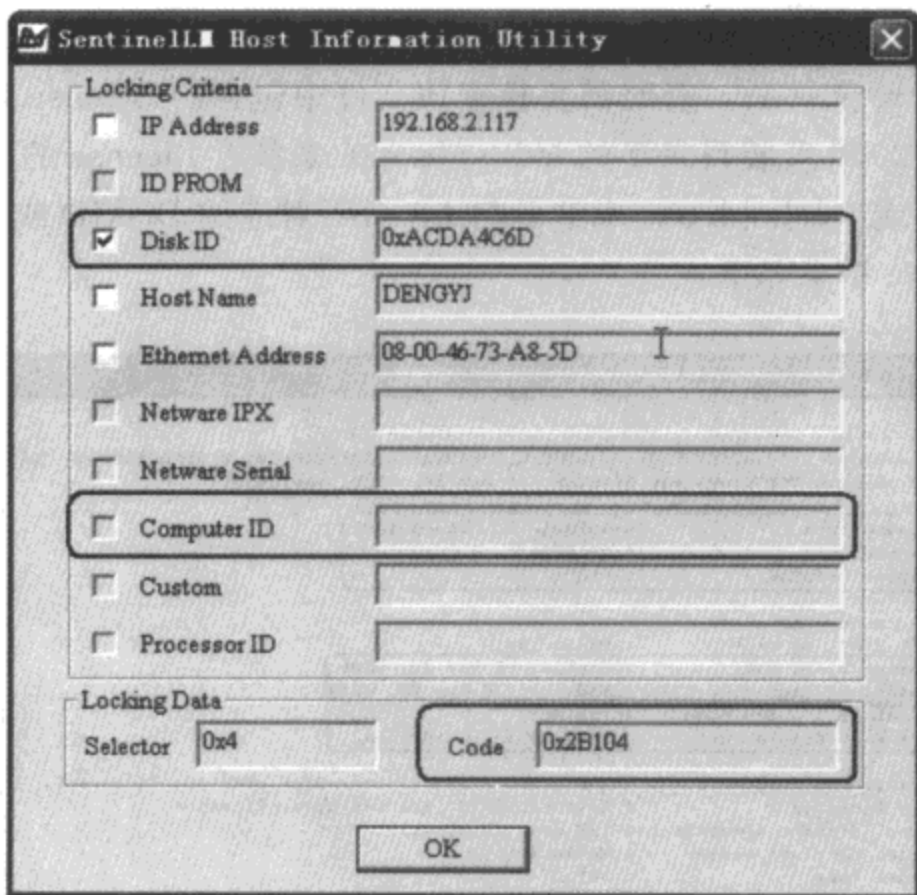
| | |
|------------------------------------|---|
| License Type | Normal：正式 License Standalone：单机使用；Network：网络使用 |
| Feature version | 版本号 |
| License start date&Expiration date | License 的有效期 |
| Client #1 locking code | 16 进制表示的 License 对应 ID 号码 |
| Lock code depends on | License 类型 Disk ID in hexadecimal：License 绑定设备 Sentinel Computer ID：License 绑定加密锁 |

在这里检查 License 版本号是否是正式的，有效期是否过期，并确认 License 类型。如果 License 类型是绑定设备，运行 echoid.exe，弹出如下窗口：



该窗口中的“Locking Code 1”是设备对应的 ID 号码，这个 ID 和 lsdecode.exe 中获得的 ID 一致，说明目前使用的 License 与此台计算机是匹配的。

也可以运行 wechoid.exe，如果 License 类型是绑定设备，只保留“Disk ID”前面的勾；如果 License 类型是绑定加密锁，则只保留“Computer ID”前面的勾，右下角显示 16 进制的 ID 号码。注意开头的“0x”为 16 进制识别符，不算在 ID 号码之内。



如果购买时指定的 License 类型是绑定加密锁，但“Computer ID”前面的框是灰色，则说明可能存在以下问题：

- (1) 未安装加密锁驱动或安装不正确；
- (2) USB/parallel 端口设置不正确；
- (3) 加密锁没插上或接触不好。

最后正确的结果应是 lsdecode.exe 获得的 ID 和 wechoid.exe (echoid.exe) 获得的 ID 相符，如不相符，请联系北京金土木软件技术有限公司或区域销售代表更换 License。

A.3 常见问题处理

A.3.1 License Not Found

发生这个错误表明 SAP2000 在运行时无法验证 License 的合法性，其原因主要可以分为以下三个方面：

- (1) 网络连接方面的原因；
- (2) 加密锁驱动安装的原因；
- (3) License 认证的原因。

当发生这样错误时，建议按照下列步骤进行检查，其中单机版略过有关网络连接和 License Manager 方面的步骤，License 为绑定设备类型时略过有关加密锁方面的步骤：

- (1) License 文件 (lservrc) 是否合法？

参考 A.2.3 License 合法性判别。

- (2) License 文件 (lservrc) 是否拷贝到 SAP2000 安装目录下？
网络版略过。

- (3) License 是否注册到 License Manager 中？

- (4) License Manager 是否安装？

- (5) License Manager 服务 (SentinelLM) 是否启动？

3~5 步参考 A.1.5 License 认证，单机版略过。

- (6) 加密锁驱动是否安装？

- (7) 加密锁服务是否启动？

6~7 步参考 A.1.4 加密锁安装。

- (8) 客户机和服务器之间网络连接是否正常（可以相互 ping 通）？

- (9) 客户机和服务器之间是否有防火墙（软件 & 硬件），并且屏蔽了 UDP 端口 5093？

- (10) 客户机是否正确设置了环境变量 LSFORCEHOST？

- (11) 如果服务器为动态 IP，改为固定 IP 是否可以解决问题？

其中 8~11 步适用于网络版，单机版略过，其中 10 步参考 A.1.5 License 认证之 3. 客户机环境变量设置。

A.3.2 不显示中文界面

如果进入 SAP2000 后发现是处在英文界面下，可以在帮助菜单下，选择最后一项命令【语言切换】(Change Language to Chinese/English)，将界面切换成中文。

如果该命令是灰色的，则先退出 SAP2000 程序，进入操作系统安装目录（因操作系统不同而不同，Windows2000 为 C: \ WINNT，Windows XP 为 C: \ Windows），找到 SAP2000v10.ini 文件，用写字板程序打开，将第二行中代表版本的相应字符串复制到第三行等号后面。例如：

[License]

； Optional-choose one for ProgramLevel-ANY/BASIC/PLUS/ADVANCED/BASICC/

.....



PLUSC /ADVANCEDC/ADVANCEDI

ProgramLevel= ADVANCEDC

以上字符串中代表中文版的如下：

| | |
|-----------|-----------------|
| BASICC | SAP2000 基础版（中文） |
| PLUSC | SAP2000 增强版（中文） |
| ADVANCEDC | SAP2000 高级版（中文） |

保存 SAP2000v10.ini 文件后重新进入 SAP2000 则界面将切换到中文。



参 考 文 献

- [1] Ray W. Clough, Edward L. Wilson Early Finite Element Research at Berkeley. The Fifth U. S. National Conference on Computational Mechanics, 1999.
- [2] ATC. 1996. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. Volume 1, ATC-40 Report. Applied Technology Council. Redwood City, California.
- [3] FEMA 356 The Seismic Rehabilitation of Buildings. Federal Emergency Management Agency, 2000.
- [4] FEMA 273 NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings. Federal Emergency Management Agency, 1997.
- [5] FEMA 274 NEHRP Commentary of the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings. Federal Emergency Management Agency, 1997.
- [6] FEMA 440 NEHRP Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures. Federal Emergency Management Agency. Prepared by Applied Technology Council (ATC-55 Project), 2005.
- [7] Ray Clough, Joseph Penzien. Dynamics of Structures. Second Edition (Revised). Computers & Structures Inc., 2003.
- [8] Edward L. Wilson. 结构静力与动力分析. 北京金土木软件技术有限公司, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [9] Computers & Structures, 北京金土木软件技术有限公司. CSI 分析参考手册. 2006.
- [10] R. D. 库克. 有限元分析的概念与应用. 第二版. 北京: 科学出版社, 1981.
- [11] 王勖成, 邵敏. 有限单元法的基本原理和数值方法, 第二版. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- [12] 姚玲森. 桥梁工程: 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [13] 中华人民共和国行业标准. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 (JTG D62—2004). 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [14] 中华人民共和国国家标准. 建筑结构荷载规范 (GB 50009—2001). 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [15] 中华人民共和国国家标准. 建筑抗震设计规范 (GB 50011—2001). 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [16] 中华人民共和国国家标准. 混凝土结构设计规范 (GB 50010—2002). 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [17] 中华人民共和国国家标准. 钢结构设计规范 (GB 5001—2003) 北京: 中国计划出版社, 2003.

.....

- [18] 陆赐麟等. 现代预应力钢结构. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [19] 钟善桐. 预应力钢结构. 哈尔滨: 哈尔滨工业出版社, 1986.
- [20] 韩林海. 钢管混凝土结构. 北京: 科学出版社, 2004.
- [21] 北京金土木软件技术有限公司, Computers & Structures Inc. SAP2000 中文版——集成化的通用结构分析与设计软件: 用户手册. 2004.
- [22] 北京金土木软件技术有限公司网站: www.bjcks.com



[G e n e r a l I n f o r m a t i o n]

书名 = S A P 2 0 0 0 中文版使用指南

作者 = 北京金土木软件技术有限公司，中国建筑标准设计研究院编著

页数 = 7 1 4

出版日期 = 2 0 0 6

出版社 = 人民交通出版社

S S 号 = 1 1 7 2 9 7 6 1

D X 号 = 0 0 0 0 0 6 1 1 0 3 5 0

| | |
|---------|---------------------------------|
| 封面页 | |
| 书名页 | |
| 版权页 | |
| 前言页 | |
| 目录页 | |
| * * * * | 第一部分 S A P 2 0 0 0 基本概念 * * * * |
| 第 1 章 | S A P 2 0 0 0 中文版概述 |
| | 1 . 1 集成化的环境 |
| | 1 . 2 强大的分析功能 |
| | 1 . 3 一体化的设计功能 |
| 第 2 章 | 集成化用户界面及基本概念 |
| | 2 . 1 集成化用户界面组成 |
| | 2 . 2 菜单命令 |
| | 2 . 3 工具栏 |
| | 2 . 4 显示窗 |
| | 2 . 5 状态条 |
| | 2 . 6 鼠标的使用 |
| | 2 . 7 基本概念 |
| | 2 . 7 . 1 对象 |
| | 2 . 7 . 2 对象模型和分析模型 |
| | 2 . 8 基本过程 |
| | 2 . 9 例题 |
| * * * * | 第二部分 建模功能 * * * * |
| 第 3 章 | 坐标系与轴网 |
| | 3 . 1 轴网 |
| | 3 . 1 . 1 新建轴网 |
| | 3 . 1 . 2 整体坐标系和附加坐标系 |
| | 3 . 1 . 3 一般轴网系统 |
| | 3 . 2 参考线 |
| 第 4 章 | 单元库 |
| | 4 . 1 S A P 2 0 0 0 中的自动边束缚功能 |
| | 4 . 2 S A P 2 0 0 0 的单元特点及其分类 |
| | 4 . 3 线单元 |
| | 4 . 3 . 1 框架单元 |
| | 4 . 3 . 2 预应力筋 / 束单元 |
| | 4 . 4 面单元 |
| | 4 . 4 . 1 板壳对象 |
| | 4 . 4 . 2 平面单元 |
| | 4 . 4 . 3 轴对称实体单元 |
| | 4 . 5 体单元 |
| | 4 . 6 连接单元 |
| | 4 . 6 . 1 线性连接 |
| | 4 . 6 . 2 多段线弹性连接单元 |
| | 4 . 6 . 3 多段线性塑性连接单元 |
| | 4 . 6 . 4 粘滞阻尼单元 |
| | 4 . 6 . 5 缝单元 |
| | 4 . 6 . 6 钩单元 |
| | 4 . 6 . 7 W e n 塑性单元 |
| | 4 . 6 . 8 橡胶隔振单元 |
| | 4 . 6 . 9 摩擦摆隔振单元 |
| | 4 . 6 . 1 0 拉 / 压限制隔振单元 |
| | 4 . 7 不同单元类型之间的连接 |
| 第 5 章 | 材料与截面 |
| | 5 . 1 材料定义 |

| | | |
|-------|-----------|---------------------|
| | 5 . 1 . 1 | 一般材料定义 |
| | 5 . 1 . 2 | 材料高级属性定义 |
| 5 . 2 | | 框架截面定义 |
| | 5 . 2 . 1 | 导入截面 |
| | 5 . 2 . 2 | 一般截面定义 |
| | 5 . 2 . 3 | 变截面定义 |
| | 5 . 2 . 4 | 自动截面选择列表定义 |
| | 5 . 2 . 5 | 截面设计器定义截面 |
| 5 . 3 | | 面截面定义 |
| | 5 . 3 . 1 | 壳截面定义 |
| | 5 . 3 . 2 | 平面截面定义 |
| | 5 . 3 . 3 | 轴对称实体单元定义 |
| 5 . 4 | | 实体单元截面定义 |
| 第 6 章 | | 对象绘制与修改 |
| | 6 . 1 | 捕捉功能 |
| | 6 . 2 | 点对象（节点）的绘制 |
| | 6 . 3 | 线对象的绘制 |
| | 6 . 3 . 1 | 绘制直线框架 |
| | 6 . 3 . 2 | 绘制曲线框架 |
| | 6 . 3 . 3 | 绘制钢束 |
| | 6 . 3 . 4 | 绘制索 |
| | 6 . 3 . 5 | 绘制次梁 |
| | 6 . 3 . 6 | 绘制支撑 |
| | 6 . 3 . 7 | 绘制线对象的辅助功能 |
| | 6 . 4 | 面对象的绘制 |
| | 6 . 4 . 1 | 绘制壳面 |
| | 6 . 4 . 2 | 绘制斜面 |
| | 6 . 5 | 实体单元的绘制 |
| | 6 . 6 | 重定形命令 |
| | 6 . 7 | 组的操作 |
| | 6 . 8 | 选择功能 |
| | 6 . 8 . 1 | 基本选择操作（点选、窗选、相交线选择） |
| | 6 . 8 . 2 | 按照性质选择 |
| | 6 . 8 . 3 | 按照编号选择 |
| | 6 . 8 . 4 | 辅助选择功能（全选、清除选择、反选） |
| | 6 . 9 | 对象信息查看 |
| | 6 . 9 . 1 | 点信息 |
| | 6 . 9 . 2 | 线信息 |
| | 6 . 9 . 3 | 面信息 |
| | 6 . 9 . 4 | 实体信息 |
| 第 7 章 | | 荷载工况和施加 |
| | 7 . 1 | 定义静力荷载工况 |
| | 7 . 2 | 自动地震荷载工况 |
| | 7 . 3 | 反应谱工况 |
| | 7 . 4 | 自动风荷载工况 |
| | 7 . 5 | 波浪荷载 |
| | 7 . 6 | 车道荷载 |
| | 7 . 7 | 节点样式 |
| | 7 . 8 | 集中荷载 |
| | 7 . 8 . 1 | 给点对象施加集中荷载 |
| | 7 . 8 . 2 | 给线对象施加集中荷载 |
| | 7 . 9 | 分布荷载 |
| | 7 . 9 . 1 | 面均布荷载 |
| | 7 . 9 . 2 | 线均布荷载 |

| | | |
|---------|-----------|---------------------------------|
| | 7 . 1 0 | 风荷载 |
| | 7 . 1 1 | 温度荷载 |
| | 7 . 1 2 | 地面位移荷载 |
| | 7 . 1 3 | 应变荷载 |
| | 7 . 1 4 | 表面压力荷载 |
| | 7 . 1 5 | 孔隙压力荷载 |
| | 7 . 1 6 | 预应力荷载 |
| | 7 . 1 7 | 荷载的显示 |
| 第 8 章 | 特殊功能指定 | |
| | 8 . 1 | 节点约束 (r e s t r a i n t) |
| | 8 . 2 | 节点束缚 (c o n s t r a i n t) |
| | 8 . 3 | 节点区 |
| | 8 . 3 . 1 | 节点区的指定 |
| | 8 . 3 . 2 | 节点区输出约定 |
| | 8 . 3 . 3 | 节点区变形和内力输出 |
| | 8 . 4 | 插入点 (线单元、面单元偏心) |
| | 8 . 4 . 1 | 线单元插入点的指定 |
| | 8 . 4 . 2 | 面单元插入点的指定 |
| | 8 . 5 | 线对象端部偏移 (刚域) |
| | 8 . 5 . 1 | 端部偏移的作用 |
| | 8 . 5 . 2 | 线对象端部偏移的指定 |
| | 8 . 5 . 3 | 端部偏移的显示输出 |
| | 8 . 6 | 线对象端部释放 |
| | 8 . 7 | 对象的局部坐标轴 |
| | 8 . 7 . 1 | 默认局部坐标轴方向 |
| | 8 . 7 . 2 | 局部坐标轴的显示 |
| | 8 . 7 . 3 | 局部坐标轴的修改 |
| | 8 . 8 | 拉压比限定 (单拉单压构件) |
| | 8 . 9 | 单元剖分 |
| | 8 . 9 . 1 | 线对象自动框架细分 |
| | 8 . 9 . 2 | 面对象自动网格剖分 |
| | 8 . 9 . 3 | 实体对象自动网格剖分 |
| 第 9 章 | 视图功能 | |
| | 9 . 1 | 显示窗口的设定 |
| | 9 . 2 | 三维、二维视图定义及控制 |
| | 9 . 2 . 1 | 三维视图的定义及显示 |
| | 9 . 2 . 2 | 二维视图的定义及显示 |
| | 9 . 2 . 3 | 定义新视图 |
| | 9 . 2 . 4 | 显示定义的新视图 |
| | 9 . 3 | 视图显示控制 |
| | 9 . 3 . 1 | 显示内容控制 |
| | 9 . 3 . 2 | 显示范围控制 |
| | 9 . 3 . 3 | 视图缩放控制 |
| | 9 . 4 | 颜色显示控制 |
| | 9 . 4 . 1 | 显示颜色控制 |
| | 9 . 4 . 2 | 输出颜色控制 |
| | 9 . 5 | O p e n G L 视图功能 |
| | 9 . 6 | 生成 A V I 视频功能 |
| | 9 . 6 . 1 | 多步动画视频 |
| | 9 . 6 . 2 | 循环动画视频 |
| | 9 . 7 | 其他基本视图设置功能 |
| | 9 . 8 | S A P 2 0 0 0 中的 O p e n G L 视图 |
| 第 1 0 章 | 快速建模及导入导出 | |
| | 1 0 . 1 | 模板建模功能 |

- 1 0 . 1 . 1 新模型初始化模板
 - 1 0 . 1 . 2 用模板添加结构到现有模型
- 1 0 . 2 A u t o C A D 导入导出
 - 1 0 . 2 . 1 导入 A u t o C A D . d x f 文件
 - 1 0 . 2 . 2 导出 A u t o C A D . d x f 文件
- 1 0 . 3 模型组装及 A c c e s s 、 E x c e l 辅助功能
 - 1 0 . 3 . 1 模型组装
 - 1 0 . 3 . 2 A c c e s s 、 E x c e l 辅助功能
- 1 0 . 4 S A P 2 0 0 0 交互式数据库编辑功能
- 1 0 . 5 \$ 2 K 文本文件及从 E T A B S 中导入模型
 - 1 0 . 5 . 1 \$ 2 K 、 S 2 K 文本文件
 - 1 0 . 5 . 2 从 E T A B S 中导入模型
- 1 0 . 6 与其他程序软件数据接口
 - 1 0 . 6 . 1 由 S A P 2 0 0 0 导入其他软件的模型
 - 1 0 . 6 . 2 由 S A P 2 0 0 0 导出到其他软件

***** 第三部分 分析功能 *****

第 1 1 章 分析工况

- 1 1 . 1 定义分析工况
- 1 1 . 2 分析类型简介
 - 1 1 . 2 . 1 线性分析
 - 1 1 . 2 . 2 非线性分析
- 1 1 . 3 几何非线性
 - 1 1 . 3 . 1 几何刚度
 - 1 1 . 3 . 2 重力 P - 效应
 - 1 1 . 3 . 3 大位移
 - 1 1 . 3 . 4 初始静力非线性工况
- 1 1 . 4 施加荷载
- 1 1 . 5 工况组合
- 1 1 . 6 分析顺序
- 1 1 . 7 运行分析工况
 - 1 1 . 7 . 1 设置分析选项
 - 1 1 . 7 . 2 运行分析

第 1 2 章 模态分析及反应谱分析

- 1 2 . 1 模态分析
 - 1 2 . 1 . 1 模态分析的基本理论
 - 1 2 . 1 . 2 S A P 2 0 0 0 模态分析中质量源定义
 - 1 2 . 1 . 3 特征向量法和 R i t z 向量法
 - 1 2 . 1 . 4 质量参与系数和荷载参与系数
 - 1 2 . 1 . 5 算例
- 1 2 . 2 反应谱分析
 - 1 2 . 2 . 1 反应谱分析的基本理论与方法
 - 1 2 . 2 . 2 振型组合的基本理论与方法
 - 1 2 . 2 . 3 方向组合基本方法
 - 1 2 . 2 . 4 中国规范反应谱分析在 S A P 2 0 0 0 中的实现

第 1 3 章 线性动力分析

- 1 3 . 1 线性时程分析的基本理论
 - 1 3 . 1 . 1 时间积分方式
 - 1 3 . 1 . 2 阻尼参数设置
- 1 3 . 2 时程曲线的输入
 - 1 3 . 2 . 1 地震时程曲线的选取
 - 1 3 . 2 . 2 任意动荷载时程曲线的输入
- 1 3 . 3 线性时程分析工况的定义
 - 1 3 . 3 . 1 时程类型
 - 1 3 . 3 . 2 时程运动类型

| | | |
|---------|-------------|------------------|
| | 1 3 . 3 . 3 | 初始条件 |
| | 1 3 . 3 . 4 | 荷载作用施加 |
| | 1 3 . 3 . 5 | 时间步数据 |
| | 1 3 . 3 . 6 | 阻尼参数 |
| 1 3 . 4 | | 线性时程分析结果的读取与输出 |
| | 1 3 . 4 . 1 | 时程轨迹的显示 |
| | 1 3 . 4 . 2 | 反应谱曲线的输出 |
| 第 1 4 章 | | 结果与输出 |
| 1 4 . 1 | | 分析结果图形输出 |
| | 1 4 . 1 . 1 | 显示变形形状 |
| | 1 4 . 1 . 2 | 显示力 / 应力 |
| 1 4 . 2 | | 分析、设计结果数据表格显示 |
| | 1 4 . 2 . 1 | 表格显示内容 |
| | 1 4 . 2 . 2 | 设置表格格式 (|
| 1 4 . 3 | | 分析、设计结果数据文件输出 |
| | 1 4 . 3 . 1 | 打印表格输出 |
| | 1 4 . 3 . 2 | 导出数据文件 |
| | 1 4 . 3 . 3 | 定义命名集 |
| 1 4 . 4 | | 特殊输出 |
| | 1 4 . 4 . 1 | 截面切割与广义位移 |
| | 1 4 . 4 . 2 | 定制书写报告器 |
| * * * * | 第四部分 | 设计功能 * * * * |
| 第 1 5 章 | | 荷载组合 |
| 1 5 . 1 | | 默认荷载组合与荷载组合的定义 |
| 1 5 . 2 | | 用户自定义组合 |
| 第 1 6 章 | | 混凝土框架结构设计及壳设计 |
| 1 6 . 1 | | 混凝土框架结构设计的一般过程 |
| 1 6 . 2 | | 设计首选项及设计组合 |
| 1 6 . 3 | | 交互式设计 |
| 1 6 . 4 | | 中国规范相关信息 |
| | 1 6 . 4 . 1 | 刚度调整系数 |
| | 1 6 . 4 . 2 | 竖向荷载作用下梁弯矩调整 |
| | 1 6 . 4 . 3 | 结构周期比验算 |
| | 1 6 . 4 . 4 | 框架构件的抗震等级 |
| | 1 6 . 4 . 5 | 框架构件的内力调整 |
| 1 6 . 5 | | 设计结果输出 |
| | 1 6 . 5 . 1 | 图形输出 |
| | 1 6 . 5 . 2 | 各荷载组合工况设计结果及细节输出 |
| | 1 6 . 5 . 3 | 表格输出 |
| | 1 6 . 5 . 4 | 文本输出 |
| 1 6 . 6 | | 壳设计 |
| 第 1 7 章 | | 钢结构设计和优化过程 |
| 1 7 . 1 | | 钢结构设计过程 |
| 1 7 . 2 | | 自动选择截面列表的设置 |
| 1 7 . 3 | | 钢结构设计首选项 |
| 1 7 . 4 | | 钢结构设计条件设定 |
| | 1 7 . 4 . 1 | 设定设计组 |
| | 1 7 . 4 . 2 | 选择设计组合 |
| | 1 7 . 4 . 3 | 查看 / 修改钢构件的覆盖项 |
| | 1 7 . 4 . 4 | 设定自动优化目标 |
| 1 7 . 5 | | 钢结构自动优化设计及交互式设计 |
| | 1 7 . 5 . 1 | 自动优化设计 |
| | 1 7 . 5 . 2 | 交互式钢框架设计 |
| 1 7 . 6 | | 设计结果显示输出 |

- 17.6.1 设计结果屏幕图形显示输出
- 17.6.2 设计结果屏幕表格显示输出
- 17.6.3 设计结果的其他输出方式

***** 第五部分 高级分析功能 *****

第18章 屈曲分析

- 18.1 概述
- 18.2 线性屈曲
 - 18.2.1 技术背景
 - 18.2.2 定义屈曲分析工况
 - 18.2.3 屈曲分析结果显示
 - 18.2.4 例题
- 18.3 非线性屈曲
 - 18.3.1 技术背景
 - 18.3.2 三铰拱非线性屈曲分析算例

第19章 Pushover分析及阶段施工分析

- 19.1 Pushover分析
 - 19.1.1 Pushover与FEMA 356及ATC-40概述
 - 19.1.2 UBC规范反应谱与中国规范反应谱参数转换
 - 19.1.3 Pushover分析方法的一般过程
 - 19.1.4 框架非线性铰的定义
 - 19.1.5 默认的、自定义和生成的铰
 - 19.1.6 非线性铰的指定
 - 19.1.7 Pushover工况的定义
 - 19.1.8 查看Pushover结果
 - 19.1.9 Pushover分析时注意事项
- 19.2 阶段施工分析
 - 19.2.1 阶段施工分析工况定义
 - 19.2.2 阶段施工分析结果查看
- 19.3 例题
 - 19.3.1 Pushover分析例题
 - 19.3.2 阶段施工分析例题

第20章 非线性动力分析

- 20.1 非线性时程分析工况的定义及相关概念
 - 20.1.1 时程函数的定义
 - 20.1.2 时程工况的定义
 - 20.1.3 积分方式和阻尼设置
 - 20.1.4 SAP2000非线性类型
- 20.2 快速非线性分析(FNA)方法
 - 20.2.1 基本平衡方程
 - 20.2.2 非线性模态方程的形成
 - 20.2.3 非线性模态方程的求解
 - 20.2.4 FNA法小结及应用
- 20.3 结构动力弹塑性分析
 - 20.3.1 动力弹塑性分析的应用范围
 - 20.3.2 动力弹塑性分析基本过程
 - 20.3.3 动力弹塑性分析需要说明的几个问题
 - 20.3.4 动力弹塑性分析算例
- 20.4 结构耗能减震装置的模拟
 - 20.4.1 阻尼单元和隔振单元
 - 20.4.2 非线性连接单元需要明确的几个概念
 - 20.4.2 阻尼单元的相关参数
 - 20.4.3 隔振单元的相关参数
 - 20.4.4 阻尼隔振单元应用算例
- 20.5 撞击、爆炸问题的模拟

| | | |
|---------------|----------------------|-----------------|
| | 2 0 . 5 . 1 | 撞击、爆炸荷载函数形成 |
| | 2 0 . 5 . 2 | 撞击、爆炸荷载的施加 |
| | 2 0 . 5 . 3 | 时程工况的定义及积分方式的选择 |
| | 2 0 . 5 . 4 | 冲击问题应用算例 |
| 第 2 1 章 | 频域分析 | |
| 2 1 . 1 | 稳态分析 | |
| 2 1 . 1 . 1 | 建立模型 | |
| 2 1 . 1 . 2 | 定义稳态函数 | |
| 2 1 . 1 . 3 | 定义稳态分析工况 | |
| 2 1 . 1 . 4 | 分析结果查看 | |
| 2 1 . 2 | 功率谱密度分析 | |
| 2 1 . 2 . 1 | 建立模型 | |
| 2 1 . 2 . 2 | 定义功率谱密度函数 | |
| 2 1 . 2 . 3 | 定义功率谱密度分析工况 | |
| 2 1 . 2 . 4 | 分析结果查看 | |
| 第 2 2 章 | 桥梁模块 | |
| 2 2 . 1 | 桥梁 B A G 模板 | |
| 2 2 . 2 | 桥梁模块 | |
| 2 2 . 2 . 1 | 桥梁向导 | |
| 2 2 . 2 . 2 | 定义桥轴线 | |
| 2 2 . 2 . 3 | 定义下部结构 | |
| 2 2 . 2 . 4 | 定义上部结构 | |
| 2 2 . 2 . 5 | 桥对象 | |
| 2 2 . 2 . 6 | 定义预应力 | |
| 2 2 . 2 . 7 | 桥梁 F E M | |
| 2 2 . 2 . 8 | 定义车辆荷载 | |
| 2 2 . 2 . 9 | 定义移动荷载分析工况 | |
| 2 2 . 2 . 1 0 | 定义桥梁反应 | |
| 2 2 . 2 . 1 1 | 显示桥梁反应 | |
| 2 2 . 3 | 实例：三跨预应力混凝土变截面连续梁桥分析 | |
| 2 2 . 3 . 1 | 基本资料 | |
| 2 2 . 3 . 2 | 建立模型 | |
| 2 2 . 3 . 3 | 全桥分析 | |
| 2 2 . 3 . 4 | 施工阶段分析 | |
| * * * * | 第六部分 工程应用 * * * * | |
| 第 2 3 章 | 索结构及玻璃幕墙应用 | |
| 2 3 . 1 | 原理概述 | |
| 2 3 . 1 . 1 | 预应力拉索体系与特点 | |
| 2 3 . 1 . 2 | 索的模拟 | |
| 2 3 . 1 . 3 | 预拉力施加 | |
| 2 3 . 1 . 4 | 非线性分析 | |
| 2 3 . 1 . 5 | 荷载和作用 | |
| 2 3 . 1 . 6 | 主要控制指标和因素 | |
| 2 3 . 2 | 单拉索点支式幕墙 | |
| 2 3 . 2 . 1 | 模型描述、建模基本过程 | |
| 2 3 . 2 . 2 | 结果查看 | |
| 2 3 . 3 | 鱼腹式点支幕墙 | |
| 2 3 . 3 . 1 | 模型描述、建模基本过程 | |
| 2 3 . 3 . 2 | 结果查看 | |
| 第 2 4 章 | 预应力钢结构应用 | |
| 2 4 . 1 | 结构受力原理概述 | |
| 2 4 . 2 | 建模分析 | |
| 2 4 . 2 . 1 | 工程概况 | |
| 2 4 . 2 . 2 | 计算模型 | |

| | | |
|---------|-------------|-------------------|
| | 2 4 . 3 | 结果分析 |
| 第 2 5 章 | | 复杂高层钢结构分析 |
| | 2 5 . 1 | 概述 |
| | 2 5 . 2 | 复杂高层结构分析的基本内容 |
| | 2 5 . 2 . 1 | 模态分析 |
| | 2 5 . 2 . 2 | 竖向荷载 |
| | 2 5 . 2 . 3 | 风荷载 |
| | 2 5 . 2 . 4 | 地震作用 |
| | 2 5 . 2 . 5 | 温度应力 |
| | 2 5 . 2 . 6 | 侧向位移限值 |
| | 2 5 . 2 . 7 | 结构稳定 |
| | 2 5 . 3 | 复杂高层钢结构有限元分析的关键问题 |
| | 2 5 . 3 . 1 | 建立合理的计算模型 |
| | 2 5 . 3 . 2 | 结构分析工况中需注意的问题 |
| | 2 5 . 4 | 工程实例 |
| | 2 5 . 4 . 1 | 结构模型概况 |
| | 2 5 . 4 . 2 | 荷载工况的设置及说明 |
| | 2 5 . 4 . 3 | 分析工况的设置及说明 |
| | 2 5 . 4 . 4 | 结构分析计算结果 |
| | 2 5 . 4 . 5 | 小结 |
| | 2 5 . 5 | 本章小结 |
| 第 2 6 章 | | 复杂高层混合结构 |
| | 2 6 . 1 | 转换层结构 |
| | 2 6 . 2 | 连体结构 |
| | 2 6 . 3 | 体型收进结构 |
| | 2 6 . 4 | 悬挑结构 |
| | 2 6 . 5 | 钢 - 混凝土混合结构 |
| | 2 6 . 5 . 1 | 阻尼问题 |
| | 2 6 . 5 . 2 | 2 5 % 剪力调整问题 |
| | 2 6 . 5 . 3 | 组合构件的输入问题 |
| | 2 6 . 6 | 复杂高层结构算例分析 |
| | 2 6 . 6 . 1 | 工程概况 |
| | 2 6 . 6 . 2 | 悬挑及体型收进部分的设计 |
| | 2 6 . 6 . 3 | 连体部分的设计 |
| | 2 6 . 6 . 4 | 计算分析结果的讨论 |
| 第 2 7 章 | | 体育场馆 |
| | 2 7 . 1 | 体育场馆结构的计算 |
| | 2 7 . 1 . 1 | 计算模型的建立 |
| | 2 7 . 1 . 2 | 结构模型的分析 |
| | 2 7 . 1 . 3 | 结构构件的设计 |
| | 2 7 . 2 | 体育场馆模型示例 |
| | 2 7 . 2 . 1 | 工程概况 |
| | 2 7 . 2 . 2 | 创建计算模型 |
| | 2 7 . 2 . 3 | 定义分析工况 |
| | 2 7 . 2 . 4 | 查看分析结果 |
| | 2 7 . 2 . 5 | 构件设计与加固 |
| 第 2 8 章 | | 工业建筑 |
| | 2 8 . 1 | 概念阐述 |
| | 2 8 . 1 . 1 | 厂房类结构 |
| | 2 8 . 1 . 2 | 筒仓类结构 |
| | 2 8 . 1 . 3 | 高炉类结构 |
| | 2 8 . 1 . 4 | 水池类结构 |
| | 2 8 . 1 . 5 | 石油化工类结构 |
| | 2 8 . 1 . 6 | 核工业类结构 |

| | | |
|---------|-------------------------------|-------------------------------|
| | 2 8 . 1 . 7 | 复杂结构 |
| 2 8 . 2 | 工业建筑结构分析中的几个关键问题 | |
| | 2 8 . 2 . 1 | 吊车荷载的施加 |
| | 2 8 . 2 . 2 | 筒仓及高炉类结构建模技巧 |
| | 2 8 . 2 . 3 | 水池类结构中压力荷载及土体约束作用的定义 |
| | 2 8 . 2 . 4 | 石化类结构建模技巧和细部处理 |
| | 2 8 . 2 . 5 | 工业设备上常见荷载的施加 |
| | 2 8 . 2 . 6 | 系统总体分析及结果评价 |
| 2 8 . 3 | 工业结构算例分析 | |
| | 2 8 . 3 . 1 | 筒仓类结构算例 |
| | 2 8 . 3 . 2 | 石化类结构算例 |
| 第 2 9 章 | 斜拉桥的分析应用 | |
| 2 9 . 1 | 斜拉桥主要组成部分在 S A P 2 0 0 0 中的模拟 | |
| | 2 9 . 1 . 1 | 主梁模型 |
| | 2 9 . 1 . 2 | 拉索的模拟 |
| | 2 9 . 1 . 3 | 边界条件的模拟 |
| | 2 9 . 1 . 4 | 关于地基与结构的相互作用 |
| | 2 9 . 1 . 5 | 拉索等部件在 S A P 2 0 0 0 中的处理方法 |
| 2 9 . 2 | 斜拉桥分析中的计算问题 | |
| 2 9 . 3 | 斜拉桥合理索力的确定方法 | |
| | 2 9 . 3 . 1 | 简单算例：某斜拉桥全桥状态下的索力调整 |
| 2 9 . 4 | 斜拉桥的模态分析 | |
| | 2 9 . 4 . 1 | 简单算例 |
| 第 3 0 章 | 混凝土重力坝 | |
| 3 0 . 1 | 概述 | |
| | 3 0 . 1 . 1 | 重力坝的工作原理 |
| | 3 0 . 1 . 2 | 重力坝的荷载 |
| 3 0 . 2 | S A P 2 0 0 0 相关技术的应用 | |
| | 3 0 . 2 . 1 | 平面单元 |
| | 3 0 . 2 . 2 | 实体单元 |
| | 3 0 . 2 . 3 | 节点样式 |
| | 3 0 . 2 . 4 | 反应谱分析 |
| 3 0 . 3 | 算例分析 | |
| | 3 0 . 3 . 1 | 问题描述 |
| | 3 0 . 3 . 2 | 建模及求解分析 |
| | 3 0 . 3 . 3 | 计算结果分析 |
| 附录 A | S A P 2 0 0 0 V 1 0 安装指南 | |
| A . 1 | S A P 2 0 0 0 安装 | |
| | A . 1 . 1 | 系统要求 |
| | A . 1 . 2 | 安装前注意事项 |
| | A . 1 . 3 | 程序安装 |
| | A . 1 . 4 | 加密锁驱动安装 |
| | A . 1 . 5 | L i c e n s e 认证 |
| A . 2 | L i c e n s e 的工作方式 | |
| | A . 2 . 1 | L i c e n s e 类型 |
| | A . 2 . 2 | L i c e n s e 使用 |
| | A . 2 . 3 | L i c e n s e 合法性判别 |
| A . 3 | 常见问题处理 | |
| | A . 3 . 1 | L i c e n s e N o t F o u n d |
| | A . 3 . 2 | 不显示中文界面 |

参考文献