

## 算例 6-009

### 连接 – 动态塑性连接

#### 问题描述

本例使用单自由度结构测试一个动态塑性连接单元。为连接单元受拉及受压定义分段线性力 - 变形特征关系。受拉定义的力 - 变形特征与受压特征不同。定义一个非线性静力分析工况将连接单元压到 12 in 正位移。然后定义从上一个分析工况开始的非线性工况将连接单元推到 12 in 负位移，总共 24 in。不同位移下结果连接力与定义的力 - 位移特征相比较。

SAP2000 模型由一个标记为节点 1 的节点和一个连接单元组成。模型在 XZ 平面创建。只有  $U_z$  自由度在分析中有效。动态塑性连接单元在节点 1 作为单节点连接单元。即连接单元的一端连接到地面，另一端连接到节点 1。连接单元的方向为 1 轴正向与全局坐标轴 Z 正向平行。这是单节点连接单元的缺省方向。对连接单元只定义  $U_1$  自由度属性。

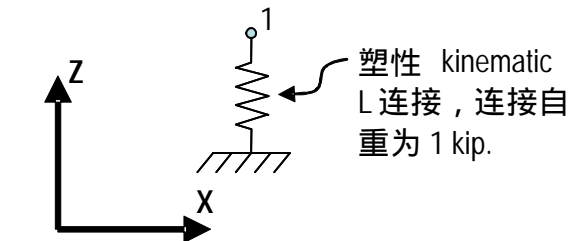
只有连接单元的非线性属性与这个例子有关，因为这是唯一用到的非线性工况。连接的非线性力 - 位移特征在下页的表和图中定义。

连接的重量为 1 kip。这是作用在连接上的唯一荷载，作为重力荷载施加在 Z 方向。

本例中使用两个位移控制非线性静力分析工况。命名为 NLSTAT1 和 NLSTAT2。NLSTAT1 从零作为起始条件然后推到正的 12 in 变形。NLSTAT2 从 NLSTAT1 终点开始然后推连接单元从正 12 in 到负 12 in。

#### 几何，属性与荷载

PROGRAM NAME: SAP2000  
REVISION NO.: 0



### 荷载

自重被施加为重力荷载

### 激活自由度

$U_z$  only

### 连接属性( $U_1$ DOF)

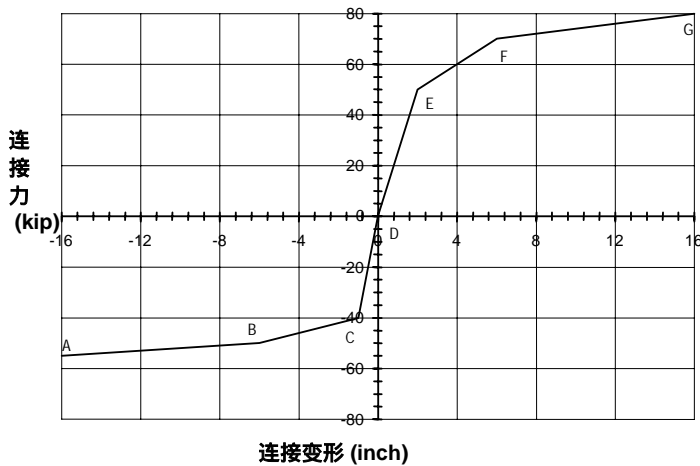
连接属性

没有应用

剪力距离

不会应用于零长度连接

非线性属性



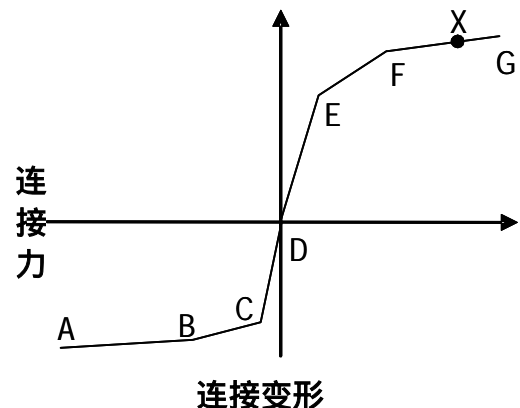
节点	变形(in)	内力(kip)
A	-16	-55
B	-6	-50
C	-1	-40
D	0	0
E	2	50
F	6	70
G	16	80

请看后面的连接力 - 连接变形曲线

### 连接单元的滞回特征

动态塑性连接单元的滞回特征在 SAP2000 的分析参考手册中有详细描述。本节描述与本例有关的特性。

考虑右图中力 - 位移关系。D-E 和 D-C 段代表线性变形。E-F、F-G、C-B、B-A 段代表塑性变形。对弹性变形，加载和卸载沿同一路径。对塑性变形，卸载路径与加载路径不同。

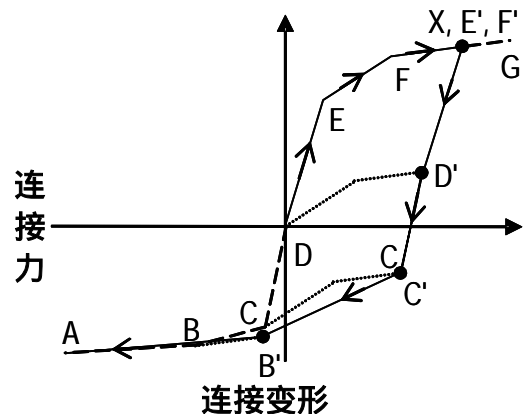
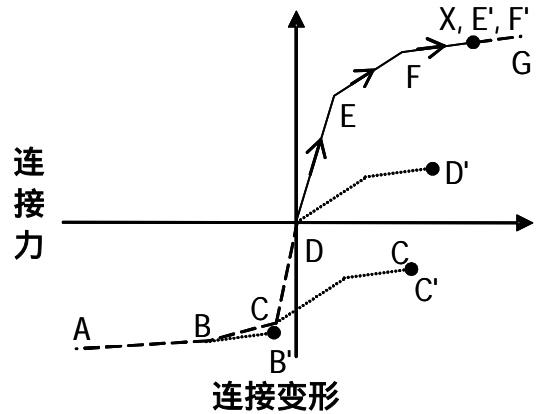


假设荷载是正的且从零点 D 开始并沿路径 D-E-F-G 直到到达点 X。在点 X 荷载沿反向加载。

当荷载通过点 E 并且继续到点 F，沿着段 E-F 随荷载点 E 是随荷载“受拉”的，当荷载到达点 F 时，点 E' 和 F 在同一位置。同样的，当荷载通过点 F 并进一步到点 X，点 E' 和 F 随荷载沿段 F-G 是随荷载“受拉”的，当荷载到达点 X 时，点 E' 和 F' 在同一位置。

当点 E 是“受拉”的，它分别“拉”点 C 和 D 沿同一路径到点 C' 和 D'。同样的，当点 F 是“受拉”时，它沿同样路径“拉”点 B 到点 B'。如右面第一个图所示。

当荷载反向时，它沿路径 X-D'-C'-B'-A 并沿 B-A 定义的坡继续。如右面第二个图所示。



## SAP2000 测试的技术特点

- 动态塑性连接
- 位移控制静力非线性分析
- 连接重力荷载

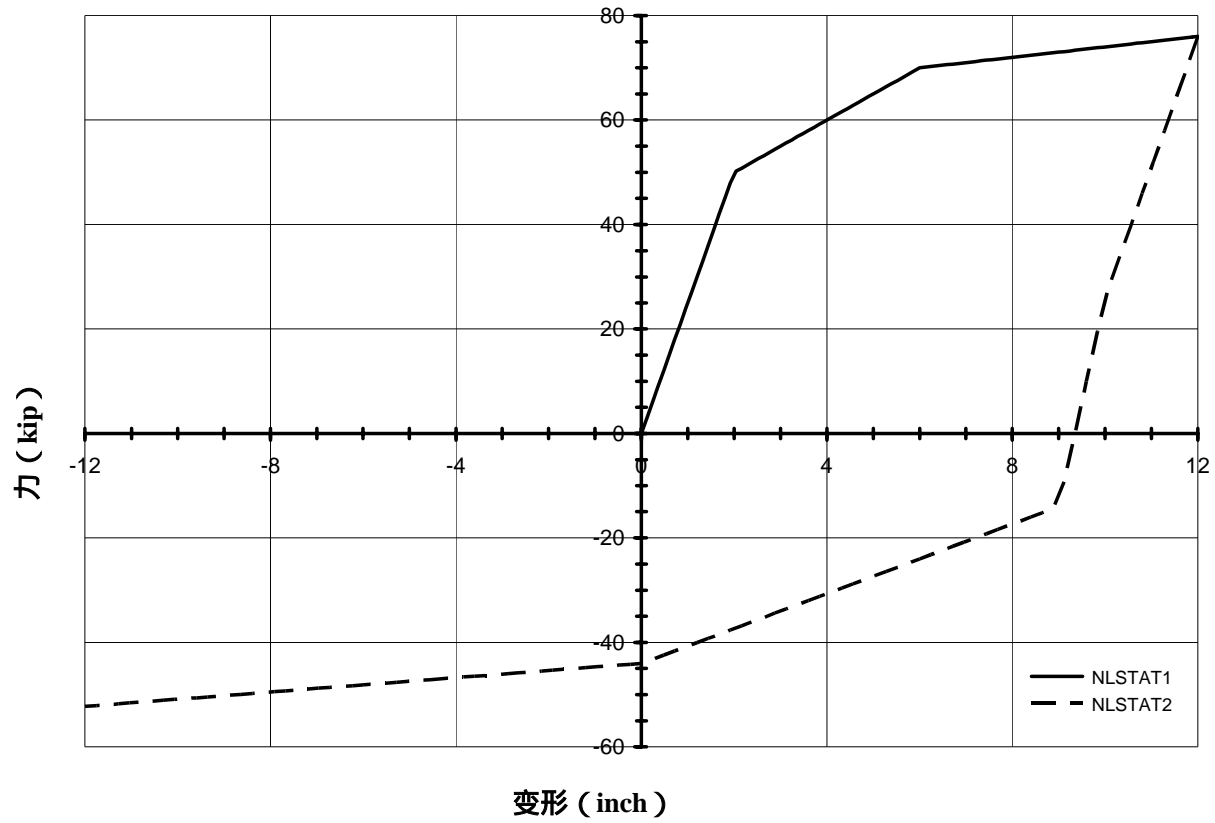
## 结果比较

独立结果从定义的连接力 - 变形特征和滞迴特性手算得到。

输出结果	连接变形	分析工况	SAP2000	手算结果	误差百分比
指定工况下指 定位移的连接 力  kips	1.2 in	NLSTAT1	30	30	0%
	4.2 in	NLSTAT1	61	61	0%
	12 in	NLSTAT1	76	76	0%
	11.52 in	NLSTAT2	64	64	0%
	9.6 in	NLSTAT2	10	10	0%
	2.4 in	NLSTAT2	-36	-36	0%
	-12 in	NLSTAT2	-52.25	-52.25	0%

下图显示 SAP2000 中分析工况 NLSTAT1 和 NLSTAT2 结果连接力和变形图。

PROGRAM NAME: SAP2000  
REVISION NO.: 0



文件: Example 6-009

结论

SAP2000 结果和独立计算结果完全一致。

## 手算

The force at any deformation is calculated in a piecewise fashion working along each linear segment of the force-deformation plot.

The force is calculated as:

$$\text{Force} = \text{Force at beginning of segment} + \left( \text{Desired Deform.} - \text{Deform. at beginning of segment} \right) \left( \frac{\text{Force at end of segment} - \text{Force at beginning of segment}}{\text{Deform. at end of segment} - \text{Deform. at beginning of segment}} \right)$$

### Segment D-E

Calculate force at 1.2" deformation

$$F_{1.2"} = 0^k + (1.2" - 0) \left( \frac{50^k - 0^k}{2" - 0} \right)$$

$$\boxed{F_{1.2"} = 30^k}$$

### Segment E-F

Calculate force at 4.2" deformation

$$F_{4.2"} = 50^k + (4.2" - 2.0") \left( \frac{70^k - 50^k}{6" - 2"} \right)$$

$$\boxed{F_{4.2"} = 61^k}$$

## Segment F-G

Calculate force at 12" deformation

$$F_{12"} = 70^k + (12" - 6") \left( \frac{80^k - 70^k}{16" - 6"} \right)$$

$$F_{12"} = 76^k$$

## Segment X-D'

Calculate force at 11.52" deformation

$$F_{11.52} = 76^k + (11.52" - 12") \left( \frac{26^k - 76^k}{10" - 12"} \right)$$

$$F_{11.52} = 64^k$$

## Segment D'-C'

Start Force = 26<sup>k</sup>

End Force = 26 - 40 = -14<sup>k</sup>

Start Deform. = 10"

End Deform = 10" - 1" = 9"

Calculate force at 9.6" deformation

$$F_{9.6"} = 26 + (9.6" - 10") \left( \frac{-14^k - 26^k}{9" - 10"} \right)$$

$$F_{9.6"} = 10^k$$

Segment C'-B'

$$\text{Start force} = -14^k$$

$$\text{End force} = -50^k + 6^k = -44^k$$

$$\text{Start Deform} = 9"$$

$$\text{End Deform} = -6" + 6" = 0"$$

Calculate force at 2.4" deformation

$$F_{2.4"} = -14^k + (2.4" - 9") \left( \frac{-44^k - (-14^k)}{0" - 9"} \right)$$

$$F_{2.4"} = -36^k$$

PROGRAM NAME: SAP2000REVISION NO.: 0Segment B'-A

Start force = -44 k

End Force = -55 k

Start Deform = 0"

End Deform = -16"

Calculate force at -12" deformation

$$F_{-12} = -44 + (-12 - 0) \left( \frac{-55 - (-44)}{-16 - 0} \right)$$

$$F_{-12} = -52.25 \text{ k}$$