

## 算例 6-006

### 连接单元 – 具有线性速度指数的 SUNY BUFFALO 阻尼器

#### 问题描述

本问题源于 Scheller 和 Constantinou 1999 一书 (“SUNY Buffalo 报告”) 的第 5 节。本例是一个二维三层抗弯框架，对角线位置设置有流体粘滞阻尼器，该阻尼器的力-速度特性为线性。该模型承受水平地震激励，采用 S00E 指数的 1940 El Centro 记录（参见本例后面的“地震记录”部分）。将 SAP2000 的振型周期、层间侧移率和层间力-变形关系与振动台实验结果进行了比较。该实验结果记录于 SUNY Buffalo 报告中。

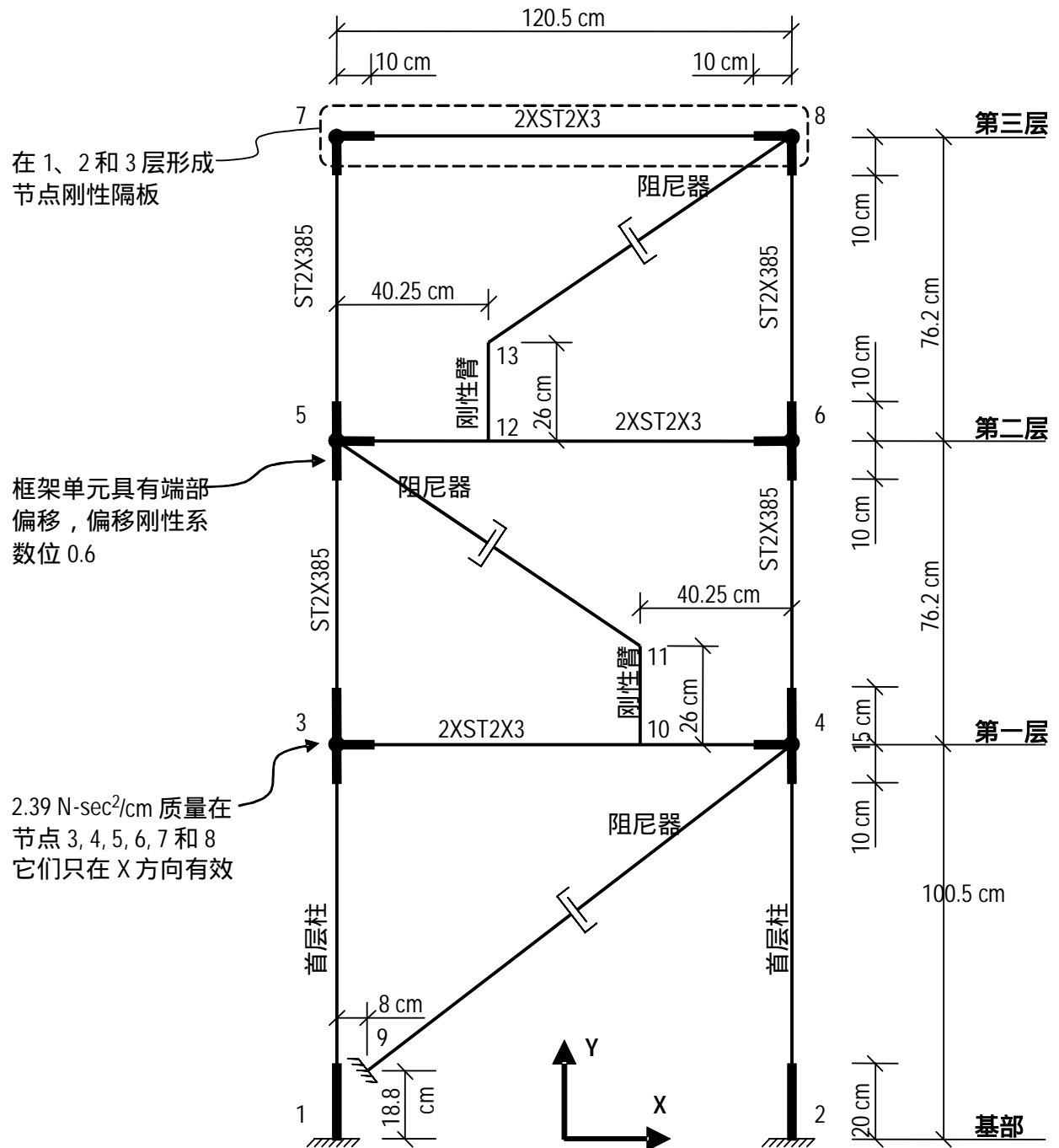
下一页的图中绘出了 SAP2000 的模型。代表各层重量（包括从属梁柱的重量）的质量集中于梁柱节点。这些质量大小为  $2.39 \text{ N-sec}^2/\text{cm}$ ，只作用于 X 方向。另外，为阻尼单元指定了一个小的质量， $0.002 \text{ N-sec}^2/\text{cm}$ 。这个小的质量可以帮助非线性时程分析解收敛。

在各层上都施加了刚性隔板约束。

梁和柱作为框架单元模拟，指定了端部长度偏移和刚性区系数。刚性区系数取为典型的 0.6，端部长度偏移如图所示。假定将阻尼底端连接到一层和二层梁的框架单元为刚性的。这一点可以通过在 SAP2000 中将这些单元的刚度设为比其它单元高几个数量级的截面属性。参见本例后面的“框架单元属性”，可获得更多信息。

阻尼器模拟为两节点，阻尼类型的连接单元。在该模型中进行了线性和非线性分析，所以提供了阻尼的线性和非线性属性。参见本例后面的“阻尼属性”和“采用的分析工况”，可获得更多信息。

## 几何特性和属性



PROGRAM NAME: SAP2000  
REVISION NO.: 0

## 框架单元属性

SAP2000 中的框架单元具有如下的材料属性：

$$E = 21,000,000 \text{ N/cm}^2$$

$$\nu = 0.3$$

SAP2000 中的框架单元具有如下的截面属性：

1STCOL

$$A = 9.01 \text{ cm}^2$$

$$I = 14.614 \text{ cm}^4$$

$$A_v = 4.42 \text{ cm}^2$$

ST2X385

$$A = 6.61 \text{ cm}^2$$

$$I = 5.95 \text{ cm}^4$$

$$A_v = 2.02 \text{ cm}^2$$

2XST2X3

$$A = 13.22 \text{ cm}^2$$

$$I = 11.9 \text{ cm}^4$$

$$A_v = 2.02 \text{ cm}^2$$

STIFF

$$A = 10,000 \text{ cm}^2$$

$$I = 100,000 \text{ cm}^4$$

$$A_v = 0 \text{ cm}^2 \text{ (不考虑剪切变形)}$$

## 阻尼器属性

SAP2000 中的阻尼单元具有如下的属性：

线性 (k 与 c 并联)

$$k = 0 \text{ N/cm}$$

$$c = 160 \text{ N-sec/cm}$$

非线性 (k 与 c 串连)

$$k = 1,000,000 \text{ N/cm}$$

$$c = 160 \text{ N-sec/cm}$$

$$\text{exp} = 1$$

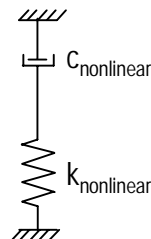
对于线性和非线性分析，所用到的阻尼器阻尼系数为  $c = 160 \text{ N-sec/cm}$ 。该值采用了一系列实验的平均值。如 Scheller and Constantinou 1999 一书所述，阻尼系数范围为 135 到 185。在 SAP2000 模型中，取所有阻尼器的阻尼系数为其平均值， $160 \text{ N-sec/cm}$ 。

## 采用阻尼器的线性和非线性分析

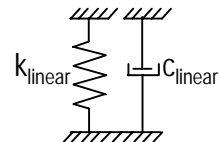
本例中采用了线性和非线性分析工况。重要的是要理解线性分析和非线性分析中阻尼单元的特性是不同的。

对于非线性分析，阻尼单元与弹簧单元串连，采用指定的非线性弹簧刚度和阻尼系数。与之形成对比的是，在线性分析中，阻尼与弹簧并联，采用指定的线性弹簧刚度和阻尼系数，如右图所示。

为获得阻尼单元的纯阻尼特性，本例将线性有限阻尼  $k_{\text{linear}}$  设置为足够为零。对于非线性分析，将非线性刚度  $k_{\text{nonlinear}}$  设置为带阻尼支撑的刚度的近似值。



非线性分析中的  
阻尼器属性



线性分析中的  
阻尼器属性

PROGRAM NAME:	SAP2000
REVISION NO.:	0

如果需要阻尼单元的纯阻尼特性，如本例所描述的，可以将弹簧刚度  $k_{\text{nonlinear}}$  设置为足够大，以使弹簧效应可以被忽略。弹簧刚度应该足够大，以使弹簧阻尼器单元的特征时间，由  $\tau = c/k_{\text{nonlinear}}$  确定，大约比  $1/\omega_n$  小二到三个数量级。应当注意不能使  $k_{\text{nonlinear}}$  过大，因为会导致数值敏感。

对于本例：

$$\tau = \frac{c}{k_{\text{nonlinear}}} = \frac{160}{1,000,000} = 0.00016 \text{ 秒}$$

因此， $\tau$  约比 0.01 秒荷载步长小两个数量级，1,000,000 N/cm 看来是获得纯阻尼特性的合理值。

**重要提示：**在带阻尼系统的线性模态时程分析中（和反映谱响应分析中），只用到了阻尼矩阵的对角项。忽略了非对角交叉耦合项。对所有其它带阻尼系统分析时采用了阻尼矩阵的全部项。因此在线性模态时程分析（和反应谱响应分析）时，应当非常小心。而且，这些解只能作为近似解。一般而言，非线性分析只用来进行带阻尼单元的最终设计。

## 采用的分析工况

本例中运行了五种不同的分析工况，如下表所示。

分析工况	描述
MODAL	针对里兹向量的模态分析。要求取 99 个振型。程序将自动计算出最多取 10 个振型即可，并将振型数减少为 10 个。初始向量是加速度 $U_x$ 和所有的连接单元非线性自由度。
MHIST1	采用 MODAL 分析工况模态的线性模态时程线性工况，该工况包括振型 1、2、3 中的模态阻尼。
NLMHIST1	采用振型分析工况得到的振型进行的非线性模态时程分析工况。该工况包括振型 1、2、3 中的模态阻尼。
DHIST1	线性直接积分时程分析工况。该工况包括成比例的阻尼。
NLDHIST1	非线性直接积分时程工况。该工况包括成比例的阻尼。

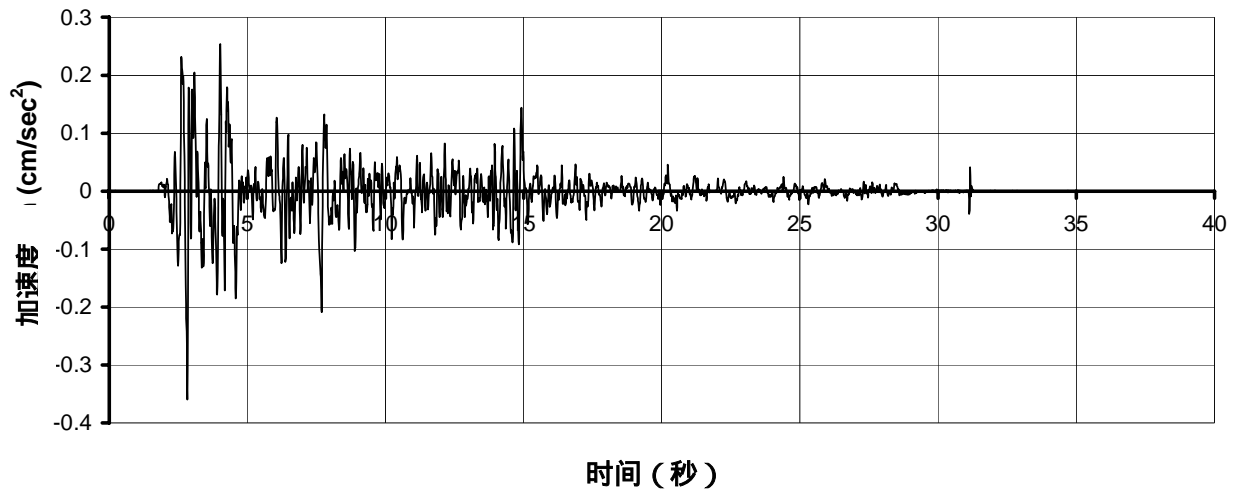
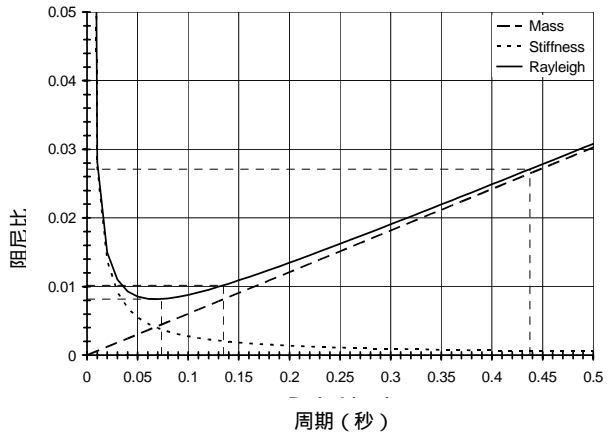
对振型 1、2、3 的模态时程分析分别采用 2.71%、1.02%、1.04% 的模态阻尼。如 Scheller and Constantinou 1999 一书所述，这些模态阻尼是由无阻尼器框架实验得到的。

直接积分时程分析采用与质量和刚度成比例的阻尼，对第一振型为 2.71%，对第二振型为 1.02%。右图中的实线表示了本例中用到的成比例阻尼。

## 地震记录

下图表示了本例中所用的地震记录。如 Scheller and Constantinou 1999 一书所述，这是按比例系数 2 进行时间压缩的 1940 El Centro 记录的 S00E 部分。之所以进行压缩是为了满足振动台实验中用到的四分之一尺寸模型的相似性要求。

文件 EQ6-006.txt 中提供了该地震记录。该文件每行有一个加速度值，单位为  $g$ 。按照 0.01 秒的等间距给出了加速度值。



## 所测试的 SAP2000 技术要点：

- 线性速度指数的阻尼连接
- 框架端部长度偏移
- 节点质量指定
- 里兹向量振型分析
- 线性模态时程分析
- 非线性模态时程分析
- 线性直接积分时程分析
- 非线性直接积分时程分析
- 广义位移

## 结果比较

本例的独立结果是 Scheller and Constantinou 1999 一书的第 5 节 61 到 73 页给出的实验结果。

下表列出了 SAP2000 和实验得到的振型周期。

振型周期	分析工况	SAP2000	独立实验	差值百分比
振型 1 sec	MODAL	0.438	0.439	0%
振型 2 sec		0.135	0.133	+2%
振型 3 sec		0.074	0.070	+6%

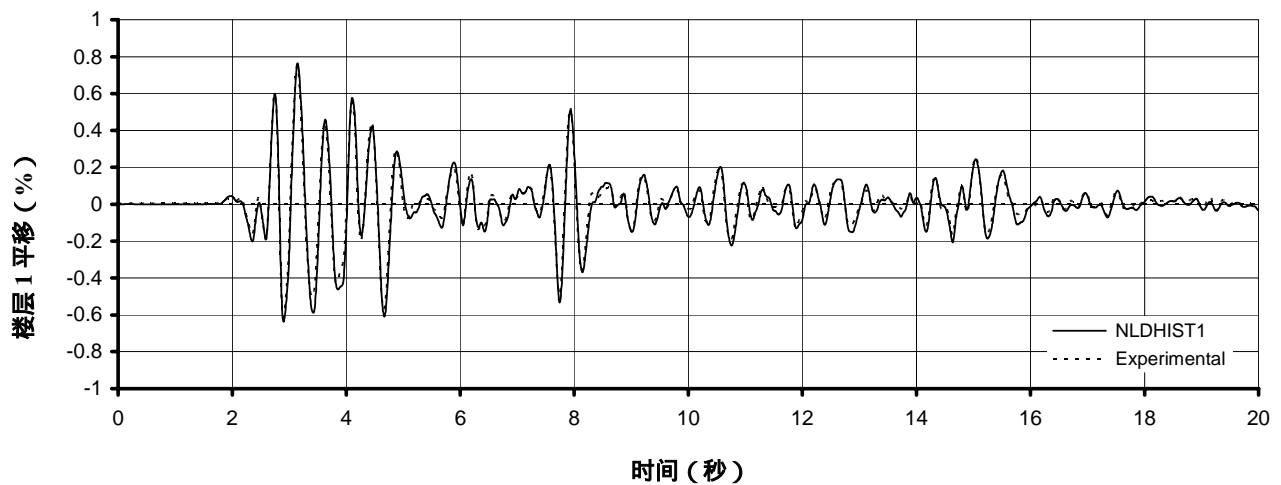
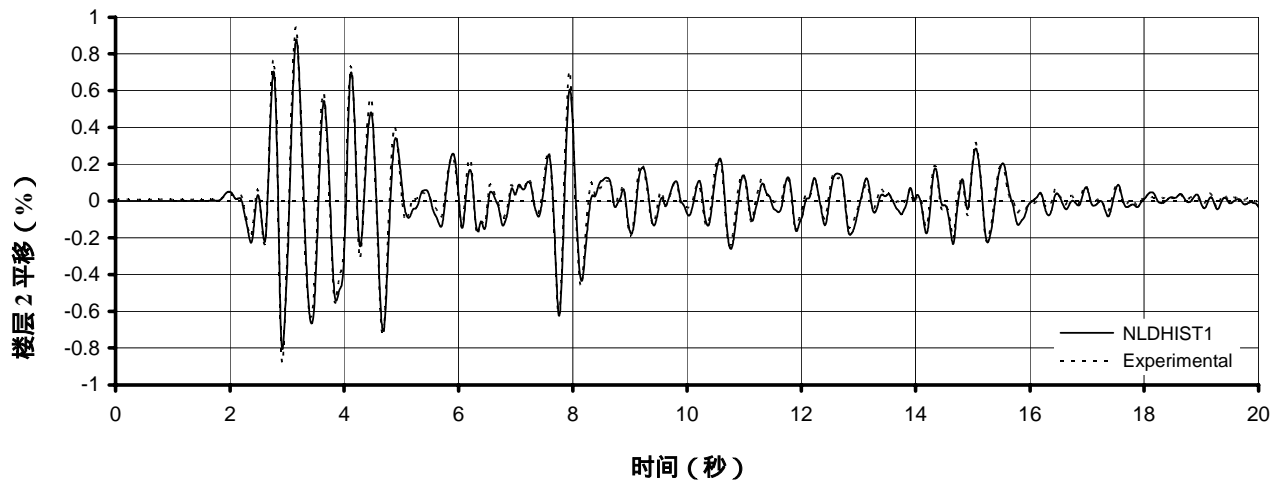
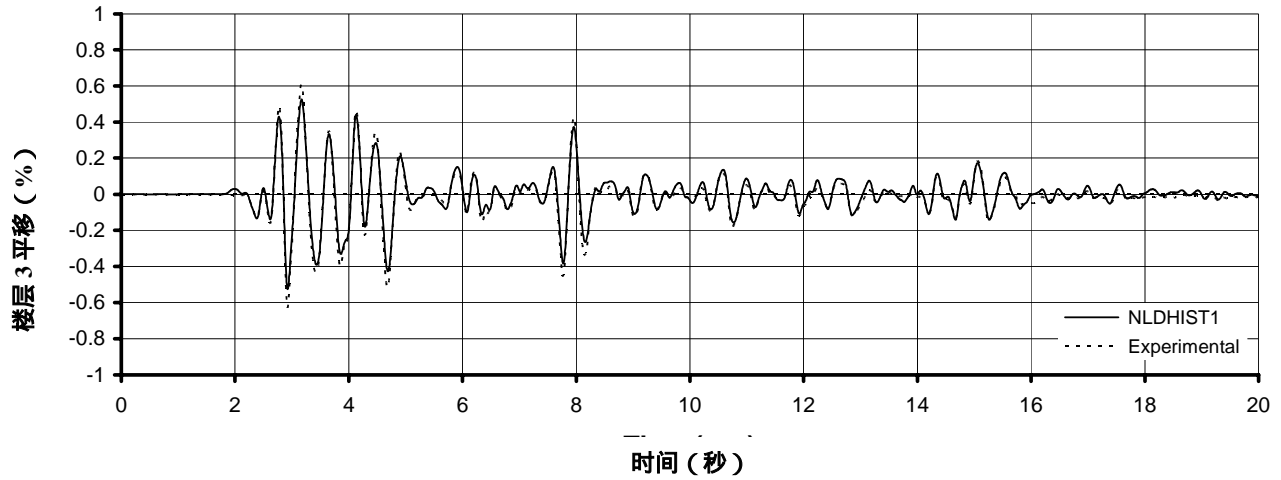
下面的三个图绘出了 NLDHIST1 分析工况下 SAP2000 分析结果和实验结果中的三个层的层侧移-时间关系。对其它时程分析工况也给出了类似的结果。

将节点 5 的位移减去节点 7 的位移并除以楼层高度 76.2cm，再乘以 100 转换为百分值，就得到了楼层 3 的层间侧移率。类似地，将节点 2 的位移减去节点 3 的位移并除以楼层高度 76.2cm，再乘以 100 转换为百分值，就得到了楼层 2 的层间侧移率。将节点 3 的位移除以非刚性楼层高度 81.3cm，再乘以 100 转换为百分值，就得到了楼层 1 的层间侧移率。SAP2000 的层间侧移率由其广义位移得到。



# Software Verification

PROGRAM NAME: SAP2000  
 REVISION NO.: 0



下表比较了四种时程分析工况下 SAP2000 和实验得到的各楼层的最大和最小层间侧移率。

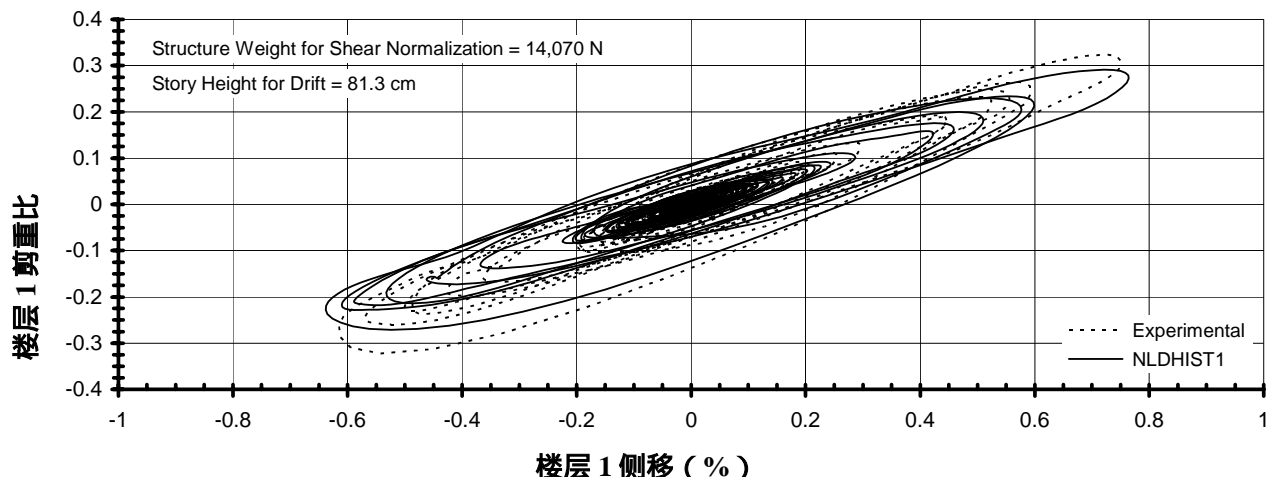
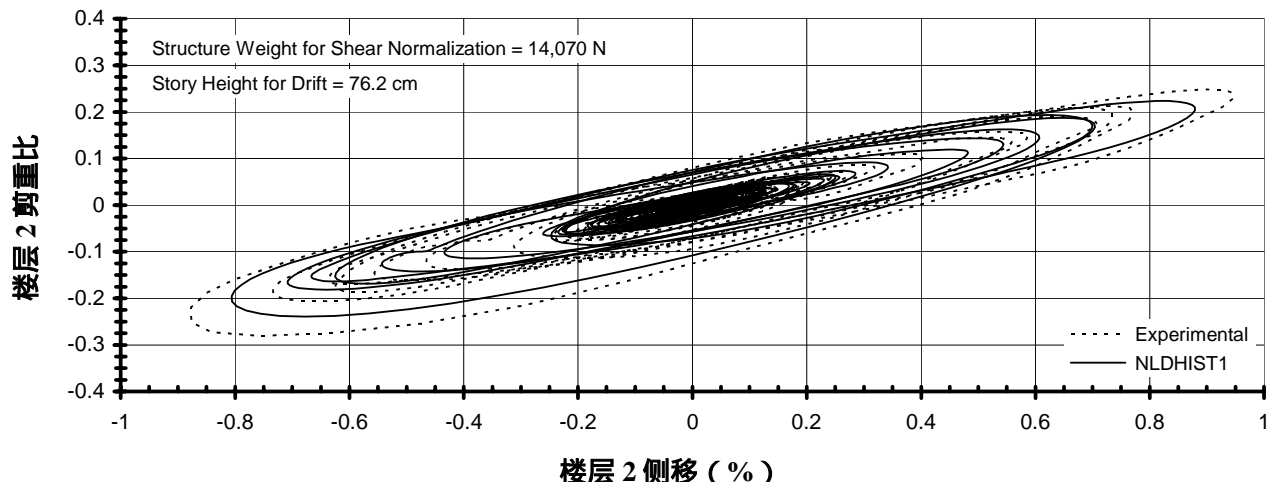
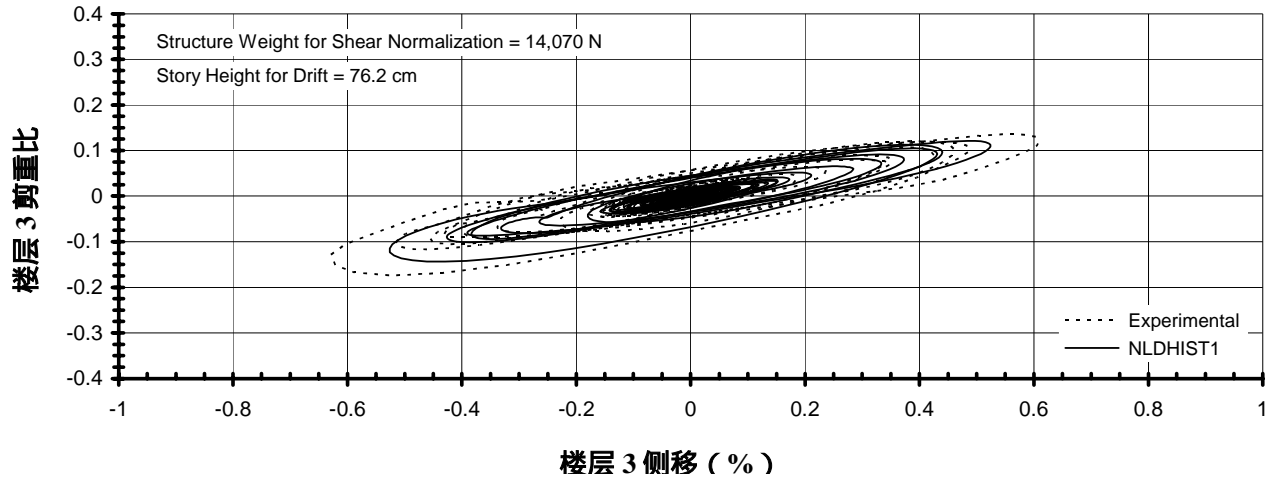
输出参数	分析工况	楼层	SAP2000	独立实验	差值百分比
最大层间侧移率	MHIST1	楼层 1	0.734	0.750	-2%
		楼层 2	0.877	0.947	-7%
		楼层 3	0.538	0.608	-12%
	NLMHIST1	楼层 1	0.764	0.750	+2%
		楼层 2	0.879	0.947	-7%
		楼层 3	0.524	0.608	-14%
	DHIST1	楼层 1	0.764	0.750	+2%
		楼层 2	0.879	0.947	-7%
		楼层 3	0.524	0.608	-14%
	NLDHIST1	楼层 1	0.764	0.750	+2%
		楼层 2	0.879	0.947	-7%
		楼层 3	0.524	0.608	-14%
最小层间侧移率	MHIST1	楼层 1	-0.589	-0.615	-4%
		楼层 2	-0.789	-0.878	-10%
		楼层 3	-0.551	-0.629	-12%
	NLMHIST1	楼层 1	-0.639	-0.615	+4%
		楼层 2	-0.807	-0.878	-8%
		楼层 3	-0.526	-0.629	-16%
	DHIST1	楼层 1	-0.638	-0.615	+4%
		楼层 2	-0.806	-0.878	-8%
		楼层 3	-0.526	-0.629	-16%
	NLDHIST1	楼层 1	-0.638	-0.615	+4%
		楼层 2	-0.806	-0.878	-8%
		楼层 3	-0.526	-0.629	-16%

## Software Verification

---

PROGRAM NAME: SAP2000  
REVISION NO.: 0

下一页的三个图绘出了 NLDHIST1 分析工况下 SAP2000 分析结果和实验结果中的三个层的层侧移-正则化层剪力关系。对其它时程分析工况也给出了类似的结果。将 SAP2000 的层剪力除以 14,070 N 使其正则化。



下表比较了四种时程分析工况下 SAP2000 和实验得到的各楼层的最大和最小正则化层剪力。

输出参数	分析工况	楼层	SAP2000	独立实验	差值百分比
最大正则化层剪力	MHIST1	楼层 1	0.256	0.324	-21%
		楼层 2	0.204	0.248	-18%
		楼层 3	0.112	0.136	-18%
	NLMHIST1	楼层 1	0.291	0.324	-10%
		楼层 2	0.223	0.248	-10%
		楼层 3	0.121	0.136	-11%
	DHIST1	楼层 1	0.276	0.324	-15%
		楼层 2	0.223	0.248	-10%
		楼层 3	0.121	0.136	-11%
	NLDHIST1	楼层 1	0.291	0.324	-10%
		楼层 2	0.223	0.248	-10%
		楼层 3	0.121	0.136	-11%
最小正则化层剪力	MHIST1	楼层 1	-0.208	-0.322	-35%
		楼层 2	-0.190	-0.280	-32%
		楼层 3	-0.122	-0.174	-30%
	NLMHIST1	楼层 1	-0.271	-0.322	-16%
		楼层 2	-0.239	-0.280	-15%
		楼层 3	-0.144	-0.174	-17%
	DHIST1	楼层 1	-0.234	-0.322	-27%
		楼层 2	-0.238	-0.280	-15%
		楼层 3	-0.143	-0.174	-18%
	NLDHIST1	楼层 1	-0.271	-0.322	-16%
		楼层 2	-0.239	-0.280	-15%
		楼层 3	-0.144	-0.174	-17%

PROGRAM NAME:	<u>SAP2000</u>
REVISION NO.:	<u>0</u>

线性模态时程分析工况 MHIST1 的层剪力的忽略阻尼矩阵非对角交叉耦合项引起的误差比本例其它工况的结果中这种误差明显很多。

MHIST1 分析工况中给出的楼层 1 的层剪力不包括楼层 1 阻尼器的力。因为对于线性模态时程分析，与阻尼器相关的阻尼转化成了模态阻尼并叠加到了指定的其它模态阻尼中。如果在楼层 1 阻尼器下有一个刚性框架单元，与其它层的刚性单元类似，则应取三个框架单元的力即可考虑所有的剪力。但是，由忽略非对角交叉耦合项引起的误差并不能被消除。

## 计算模型文件:Example 6-006

### 结论

与独立结果比较，SAP2000 的结果可以接受。通过图形可以更清楚地比较这些结果。

线性模态时程分析（分析工况 MHIST1）的结果与其它分析工况结果略有不同，这是因为线性模态时程分析只采用阻尼矩阵的对角项，而忽略了所有非对角交叉耦合项。其它分析采用了阻尼矩阵的所有项。这个由忽略非对角交叉耦合项耦合项引起的误差会改善与某些实验结果的对比，但也会使其它项的对比结果更不理想。

一般而言，我们建议只进行带阻尼单元的模型的线性模态时程分析作为快速的初步校核，而采用其它工况进行最终分析。