

## 算例 6-007

### 连接单元 – 具有非线性速度指数的 SUNY BUFFALO 阻尼器

#### 问题描述

本问题源于 Scheller and 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 1940 El Centro 记录的 S00E 部分（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“Discussion of Nonlinear Damper Stiffness Used in SUNY Buffalo Report”，可获得更多信息。

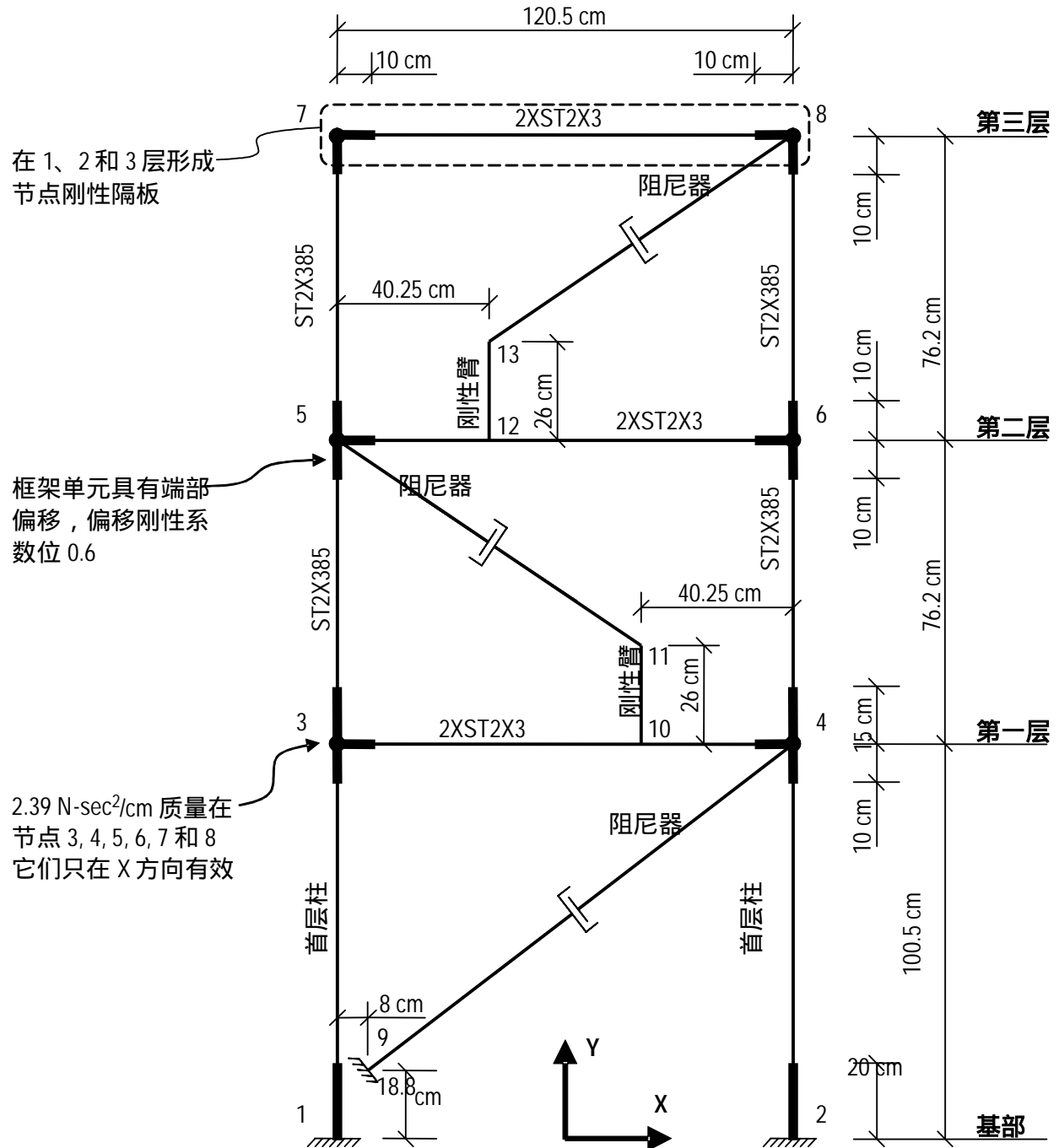
该问题采用了线性模态时程分析和非线性直接积分时程分析。参见本例后面的“采用的分析工况”，可获得更多信息。

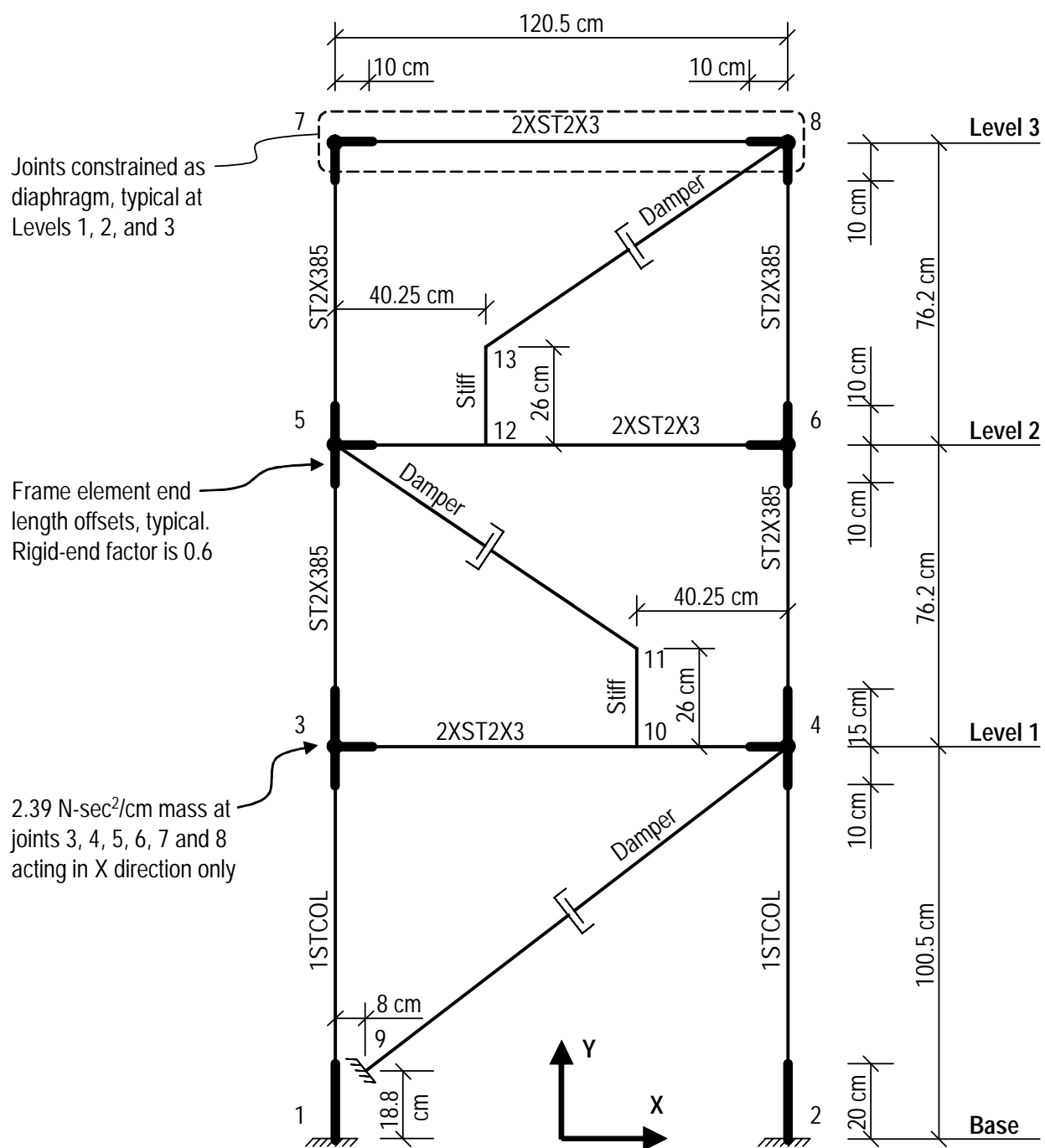
## Software Verification

---

PROGRAM NAME: SAP2000  
REVISION NO.: 0

几何特性和属性





框架单元属性

SAP2000 中的框架单元具有如下的材料属性：

$$\begin{aligned} E &= 21,000,000 \text{ N/cm}^2 \\ \nu &= 0.3 \end{aligned}$$

SAP2000 中的框架单元具有如下的截面属性：

1STCOL

$$\begin{aligned} A &= 9.01 \text{ cm}^2 \\ I &= 14.614 \text{ cm}^4 \\ A_v &= 4.42 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

ST2X385

$$\begin{aligned} A &= 6.61 \text{ cm}^2 \\ I &= 5.95 \text{ cm}^4 \\ A_v &= 2.02 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

2XST2X3

$$\begin{aligned} A &= 13.22 \text{ cm}^2 \\ I &= 11.9 \text{ cm}^4 \\ A_v &= 2.02 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

STIFF

$$\begin{aligned} A &= 10,000 \text{ cm}^2 \\ I &= 100,000 \text{ cm}^4 \\ A_v &= 0 \text{ cm}^2 \text{ (不考虑剪切变形)} \end{aligned}$$

## 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)

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

$$c = 0 \text{ N-sec/mm}$$

非线性 (k 与 c 串连)

$$k = 2,000 \text{ N/mm}$$

$$c = 220 \text{ N-sec/mm at Level 3}$$

$$= 235 \text{ N-sec/mm at Level 2}$$

$$= 300 \text{ N-sec/mm at Level 1}$$

$$\text{exp} = 0.5$$

阻尼系数按照按 Scheller and Constantinou 1999 一书的实验取值。参见本例后面的“SUNY Buffalo 报告中采用的非线性阻尼刚度”，可获得更多信息。

## SUNY Buffalo 报告中采用的非线性阻尼刚度

SAP2000 中用到的 SUNY Buffalo 报告(Scheller and Constantinou 1999)明显地低估了层间位移。我们相信这个明显的差异是由于 SAP2000 的 SUNY Buffalo report (Scheller and Constantinou 1999) 模型与实际实验模型不符。我们相信 SAP 的 SUNY Buffalo SAP 模型中的非线性刚度 k 不合适。

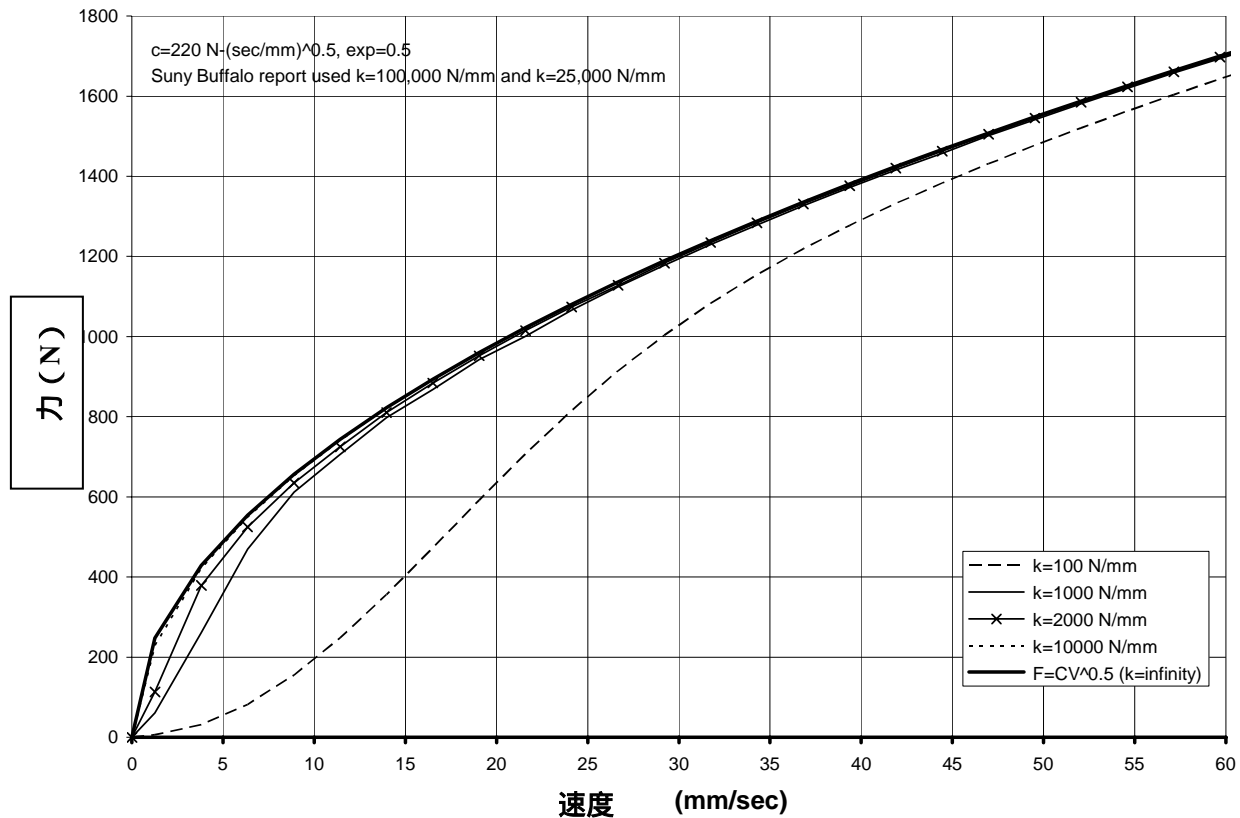
将 k 值设置为 100,000 N/mm 和 25,000 N/mm 分别运行 SAP2000 的 SUNY Buffalo 模型。这些阻尼刚度大约比本例中用到的 2000 N/mm 刚度大 10 到 50 倍。本节将描述为什么我们相信刚度为 2,000 N/mm 是更合适的值。

SUNY BUFFALO 报告给出了几个阻尼力-速度关系。这些关系表明这些阻尼经测试其性能可以描述为：

$$F = C|v|^{0.5} \text{sign}(v)$$

除了大约 15 mm/sec 速度以下，力-速度关系基本是线性的。在前面的方程中，如果  $v < 0$ ， $\text{sign}(v) = -1$ ；如果  $v > 0$ ， $\text{sign}(v) = +1$ ；如果  $v = 0$ ， $\text{sign}(v) = 0$ 。

下图绘出了一个阻尼的力-速度关系，该阻尼的  $c = 220 \text{ N} \cdot (\text{sec}/\text{mm})^{0.5}$ ，速度指数为 0.5，阻尼刚度  $k$  值为变化量。对于  $c = 235 \text{ N} \cdot (\text{sec}/\text{mm})^{0.5}$  和  $c = 300 \text{ N} \cdot (\text{sec}/\text{mm})^{0.5}$  的阻尼可以绘出类似的图。



如果该图是基于阻尼速度线性增加得出。这是采用了位移时程得到的。该时程中定义了阻尼器一端的单位位移以及和时间值平方成正比的函数。采用了名为 Example 6-007 Damper Study 的模型以获取图像的数据。

在图中， $F=cv^{0.5}$  线是  $k$  取无限大的情况。 $k=10,000$  N/mm 线和  $F=cv^{0.5}$  线本质上是一致的。因此，对于 10,000 N/mm 或更大的刚度，用  $F=cv^{0.5}$  即可很好地模拟阻尼器。SAP2000 的 SUNY Buffalo 报告模型采用的  $k$  值为 100,000 N/mm 和 25,000 N/mm。这两个模型与实验中得到的阻尼特性不一致，因为它们的力-速度关系在 15 mm/sec 速度以下从  $F$  线偏移。

在本例中，我们选择了阻尼刚度  $k$  为 2,000 N/mm。该值在 15 mm/sec 速度以下可使力-速度关系从  $F=cv^{0.5}$  线偏移，在 15 mm/sec 速度以上与  $F=cv^{0.5}$  线吻合的很好。

参见本例后面的“与阻尼刚度相关的结果敏感性研究”部分，可获得更多信息。

## 采用的分析工况

本例中运行了三个分析工况。如下表所示。

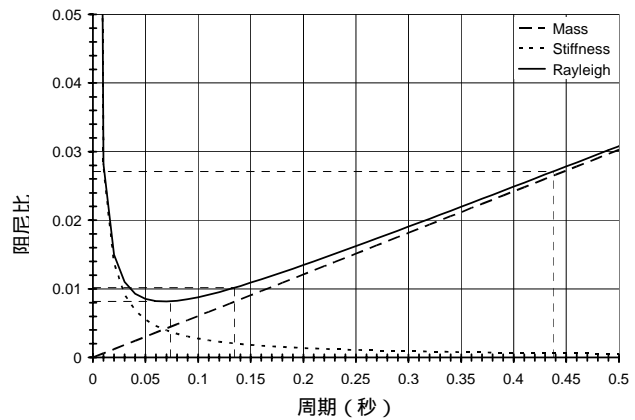
分析工况	描述
MODAL	针对里兹向量的模态分析。要求取 99 个振型。程序将自动计算出最多取 10 个振型即可，并将振型数减少为 10 个。初始向量是加速度 $U_x$ 和所有的连接单元非线性自由度。
NLMHIST1	采用 MODAL 分析工况模态的线性模态时程非线性工况，该工况包括振型 1、2、3 中的模态阻尼。
NLDHIST1	非线性直接积分时程分析工况。该工况包括成比例的阻尼。

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。



PROGRAM NAME: SAP2000  
REVISION NO.: 0

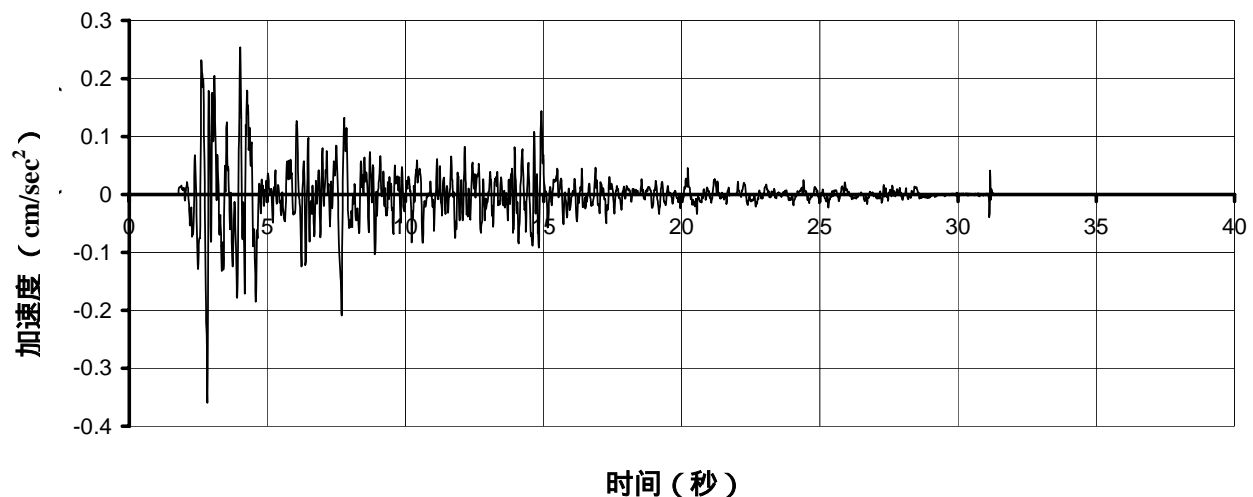
直接积分时程分析采用与质量和刚度成比例的阻尼，对第一振型为 2.71%，对第二振型为 1.02%。右图中的实线表示了本例中用到的成比例阻尼。



## 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 EQ6-007.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：

- 非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
  
- 非线性模态时程分析
  
- 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。

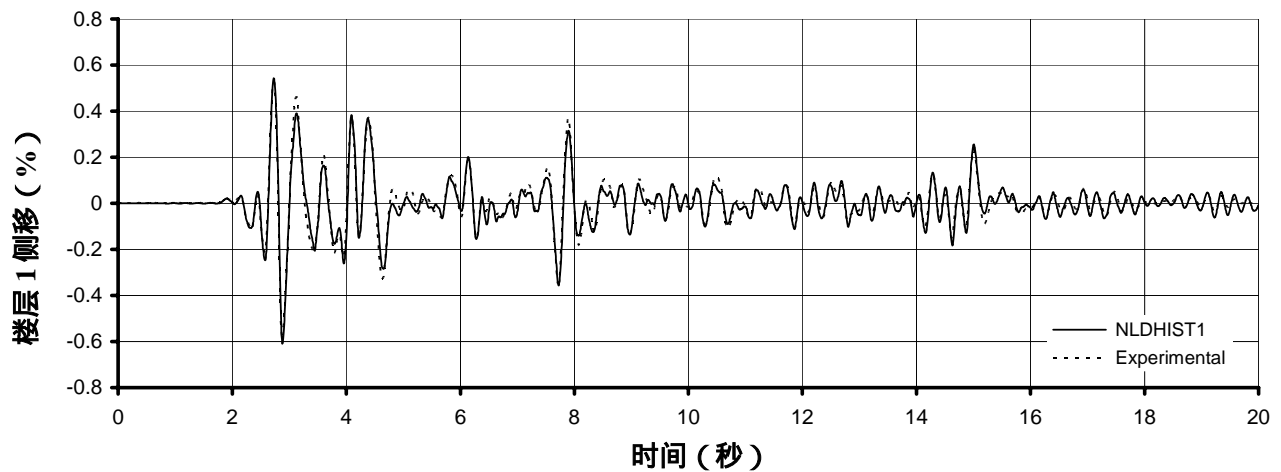
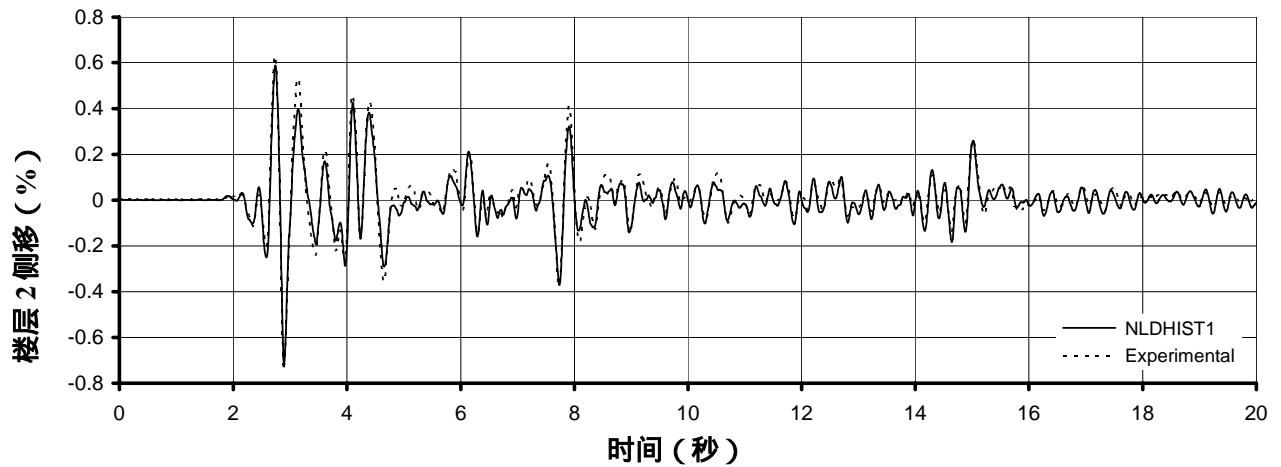
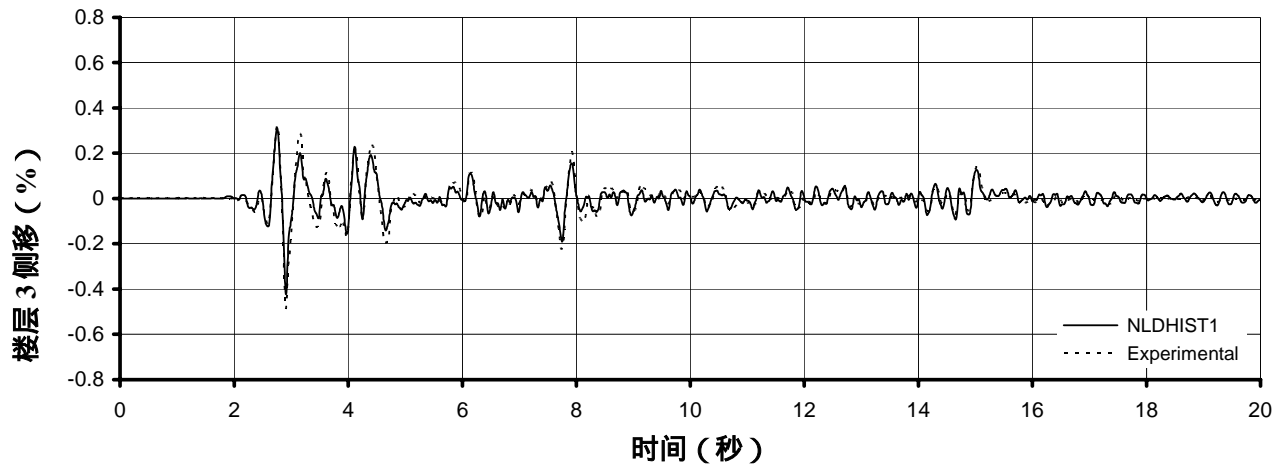
振型周期	分析工况	SAP2000	独立实验	差值百分比
振型 1 sec	MODAL	0.438	0.439	0%
振型 2 sec		0.135	0.133	+2%
振型 3 sec		0.074	0.070	+6%

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

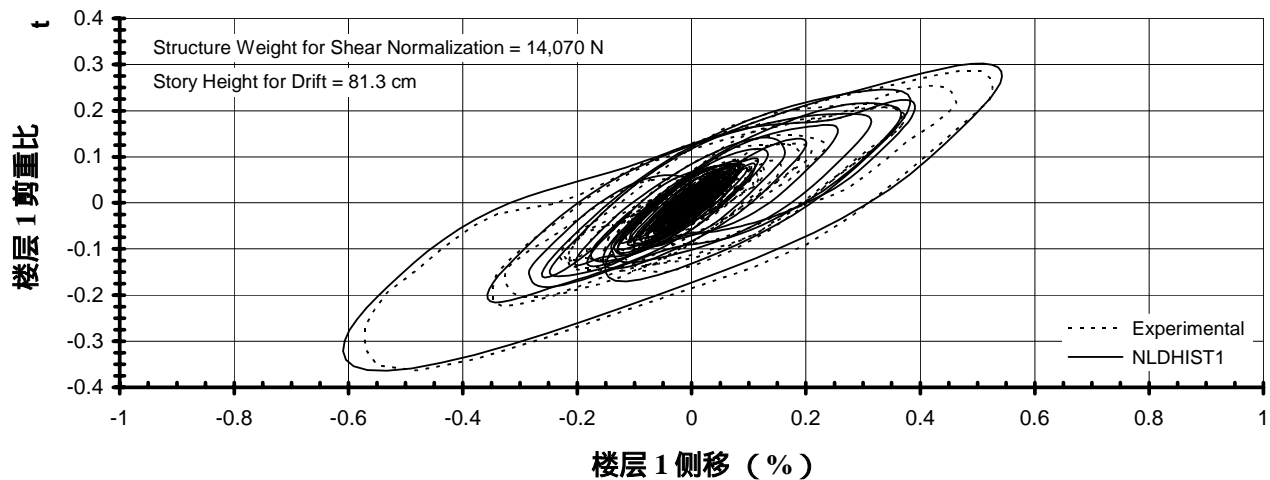
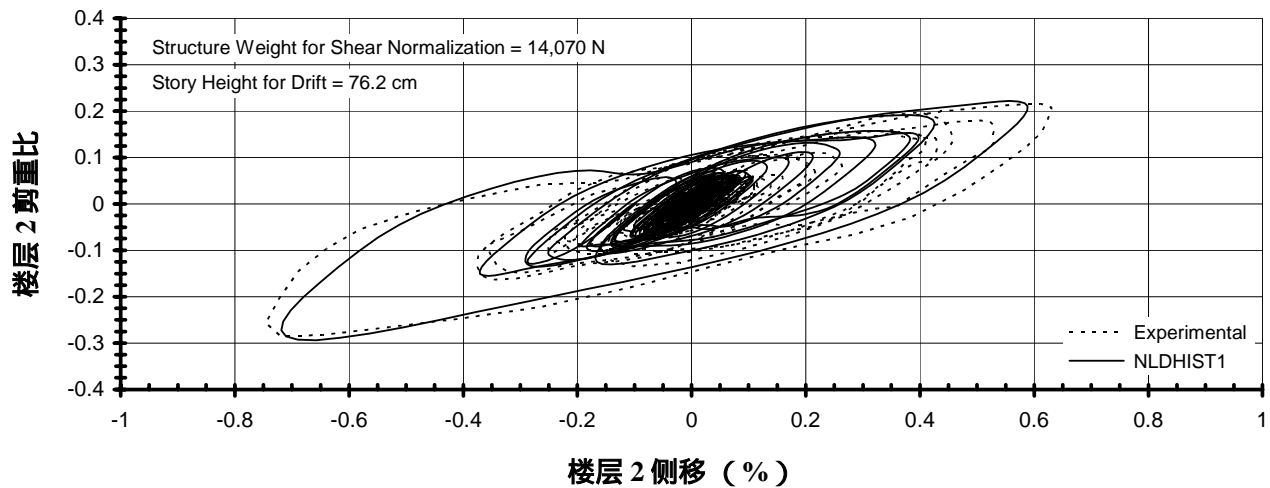
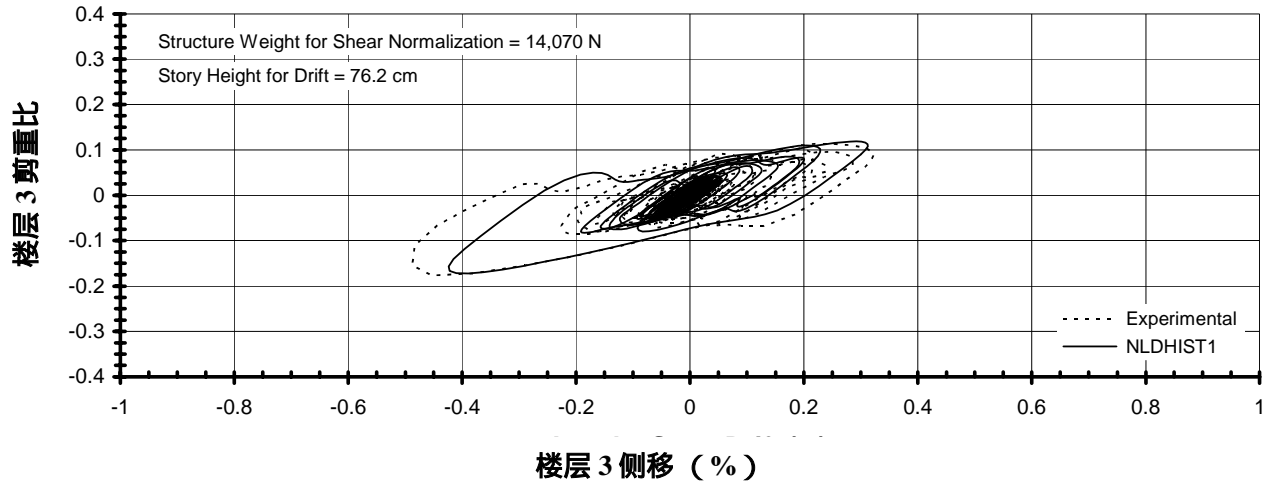
PROGRAM NAME: SAP2000  
REVISION NO.: 0



下表比较了两种时程分析工况下 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	NLMHIST1	楼层 1	0.542	0.526	+3%
		楼层 2	0.589	0.631	-7%
		楼层 3	0.313	0.323	-3%
	NLDHIST1	楼层 1	0.543	0.526	+3%
		楼层 2	0.588	0.631	-7%
		楼层 3	0.312	0.323	-3%
最小层间侧移率	NLMHIST1	楼层 1	-0.610	-0.572	+7%
		楼层 2	-0.719	-0.746	-4%
		楼层 3	-0.424	-0.488	-13%
	NLDHIST1	楼层 1	-0.610	-0.572	+7%
		楼层 2	-0.719	-0.746	-4%
		楼层 3	-0.424	-0.488	-13%

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。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。



下表比较了两种时程分析工况下 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	NLMHIST1	楼层 1	0.302	0.287	+5%
		楼层 2	0.223	0.216	+3%
		楼层 3	0.119	0.115	+3%
	NLDHIST1	楼层 1	0.302	0.287	+5%
		楼层 2	0.222	0.216	+3%
		楼层 3	0.119	0.115	+3%
最小正则化层剪力	NLMHIST1	楼层 1	-0.364	-0.363	0%
		楼层 2	-0.294	-0.285	+3%
		楼层 3	-0.173	-0.177	-2%
	NLDHIST1	楼层 1	-0.364	-0.363	0%
		楼层 2	-0.294	-0.285	+3%
		楼层 3	-0.172	-0.177	-3%

## 与阻尼刚度相关的结果敏感性研究

本例得到的结果对阻尼刚度  $k$  是敏感的。下表列出了实验结果与不同  $k$  值得到的结果之间的差值百分比。

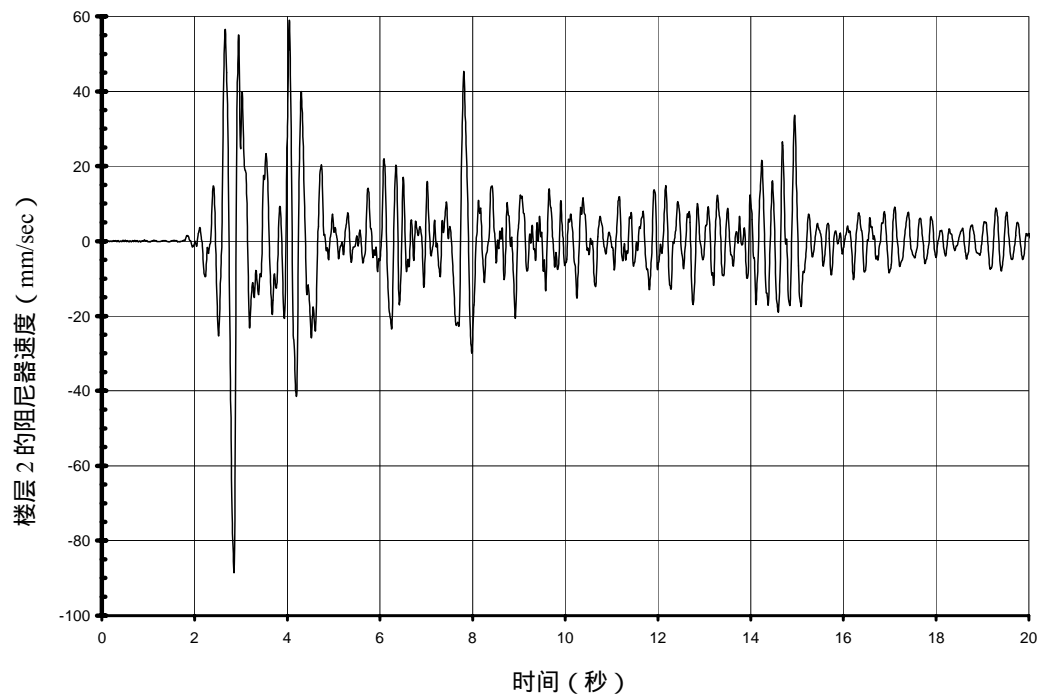
阻尼刚度 $k$	楼层	最大层间侧移率	最小层间侧移率	最大正则化层剪力	最小正则化层剪力
1,000 N/mm	楼层 1	+24%	+31%	+23%	+17%
	楼层 2	+13%	+20%	+21%	+22%
	楼层 3	+21%	+14%	+21%	+19%
2,000 N/mm	楼层 1	+3%	+7%	+5%	0%
	楼层 2	-7%	-4%	+3%	+3%
	楼层 3	-3%	-13%	+4%	-2%
3,000 N/mm	楼层 1	-4%	-1%	-3%	-7%
	楼层 2	-14%	-12%	-4%	-4%
	楼层 3	-13%	-23%	-4%	-10%

k 值取 1000 N/mm 得到的结果与实验结果的差值为+13%到+31%（大于实验结果）。采用 1000 N/mm 的 k 值将导致低阻尼（与实验结果相比）。

k 值取 3000 N/mm 得到的结果与实验结果的差值为-1%到-23%（小于实验结果）。采用 3000 N/mm 的 k 值将导致高阻尼（与实验结果相比）。

k 值取 2000 N/mm（本例中采用的刚度）得到的结果与实验结果的差值为-13%到+7%（小于实验结果）。采用 3000 N/mm 的 k 值将导致高阻尼（与实验结果相比）。

下图显示了二层阻尼器的速度-时间关系。也得到了其它的相似的图。本例结果对阻尼器 k 值敏感的原因是阻尼器的速度基本上是+20 mm/sec 到 -20 mm/sec，除了少数峰值。在该图中及前文“SUNY Buffalo 报告中采用的非线性阻尼刚度”一节中描述了在这些低速度下的阻尼器性能。



**计算模型文件:** Example 6-007, Example 6-007 Damper Study

## 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。

SAP2000 的 SUNY Buffalo 模型给出了阻尼器的力-速度关系得到了与实验得到的阻尼器力-速度关系不同的非线性阻尼刚度  $k$ 。这也说明了为什么 SAP2000 的 SUNY Buffalo 模型明显低估了位移。

从本例中得到的结果对阻尼器刚度  $k$  是敏感的。例如，采用 2,000 N/mm 的  $k$  值与采用 1,000 N/mm 的  $k$  值约有 20% 的差异。因此，当采用非线性速度指数的阻尼器时，获取阻尼器的力-速度的精确性能是很重要的，尤其在低速度时。