

算例 6-011

连接单元 – 带摩擦摆阻尼器的 SUNY BUFFALO 七层建筑

问题描述

本问题源于 Scheller and Constantinou 1999 一书 (“SUNY Buffalo 报告”) 的第 4 节, 第 43 至 59 页。该模型为一个采用摩擦摆隔震系统进行隔震的七层建筑。该模型承受水平地震激励, 该激励是系数化的 1940 El Centro 地震记录。参见本例后面的 “地震记录” 一节, 可获得更多信息。将 SAP2000 得到的基底剪力与第 1 层位移的关系, 以及阻尼器力-变形关系, 与振动台实验结果进行了对比。

本例第 3、4 页的图所示为本例的 SAP2000 模型。建筑总重 (包括梁柱的从属重量) 估计为 47.5 kips。第一层重量为 7.6 kips。第二至六层的重量为 6.7 kips; 第七层的重量为 6.4 kips。与建筑总重量相关的重力荷载作用于摩擦摆单元顶节点上。对外围的阻尼器施加了 7.92kips 的重量, 对内部的阻尼器施加了 15.83kips。

代表各层重量的质量集中于整个建筑高度上的梁柱节点。六分之一楼层质量集中于该层的外部节点, 三分之一楼层质量集中于内部节点。这些质量只在 U_x 和 U_z 方向是激活的。另外, 为阻尼单元指定了一个小的质量, $0.0002 \text{ k-sec}^2/\text{cm}$ 。这个小的质量的数值比典型的节点质量低两阶, 所以对整体动力分析没有影响。这些小质量可以帮助模态时程分析解收敛。

在七层的各层上施加了刚性隔板约束。在阻尼器顶部没有施加刚性隔板约束。

如第 3 页的图所示, 采用框架单元模拟梁柱, 并对其指定了端部偏移和刚性区系数。对于所有梁柱的刚性区系数都是 0.45。所有的梁柱的低端 (恰好在阻尼器上方) 有 4.5in. 的端部偏移, 在高端有 5.5in. 的端部偏移。本例第 4 页给出了框架截面的属性。

采用两节点，零长度连接单元模拟摩擦摆阻尼器。给阻尼器提供了线性和非线性属性。对线性模型分析工况采用线性属性，对非线性时程分析工况采用非线性属性。参见本例后面的“摩擦摆阻尼器属性”，可获得更多信息。

模型中采用摩擦摆阻尼器时的分析结果有时会出现高频振动。在实验结果中还没有观测到高频振动。这是本例的特殊情况。模型的高频振动是摩擦摆中固有的竖向缝隙单元的瞬时开合的结果，或者作为一种更轻微的情况，是摩擦摆的竖向粘结/滑动行为造成的。

可以通过指定时程分析工况中合适的阻尼或者通过在模型的阻尼器层引入竖向阻尼。在本例中考虑了这两种方法。

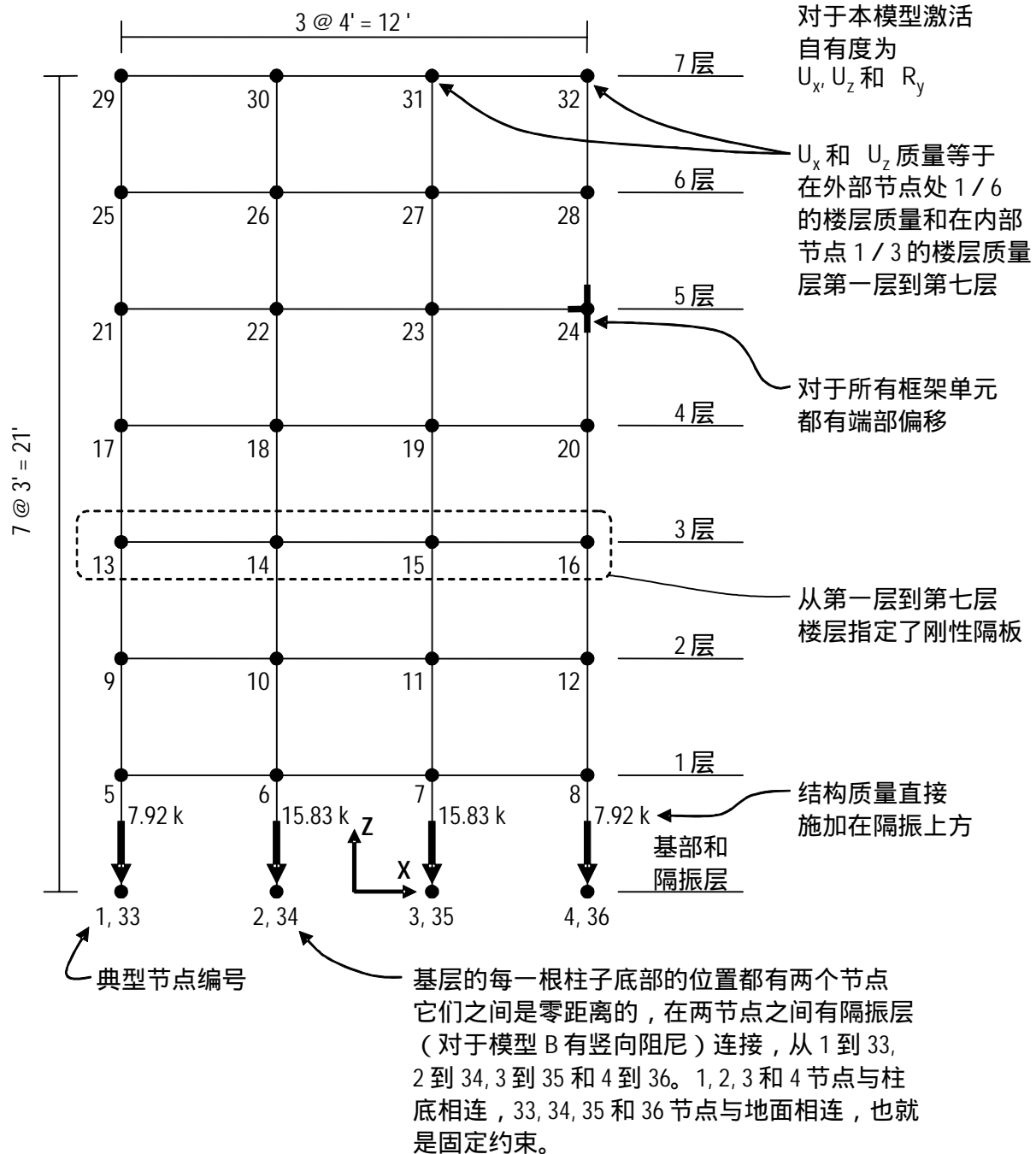
本例生成了两个模型。除了模型 A 在阻尼器层没有竖向阻尼器而模型 B 在阻尼器层有竖向阻尼器以外，这两个模型是一样的。模型 B 中的阻尼器单元非线性性能与 SUNY Buffalo 报告中的属性一致。

本例中考虑了非线性模型时程分析工况合直接积分时程分析工况。参加本例后面的“采用的分析工况”，可获得更多信息。

Software Verification

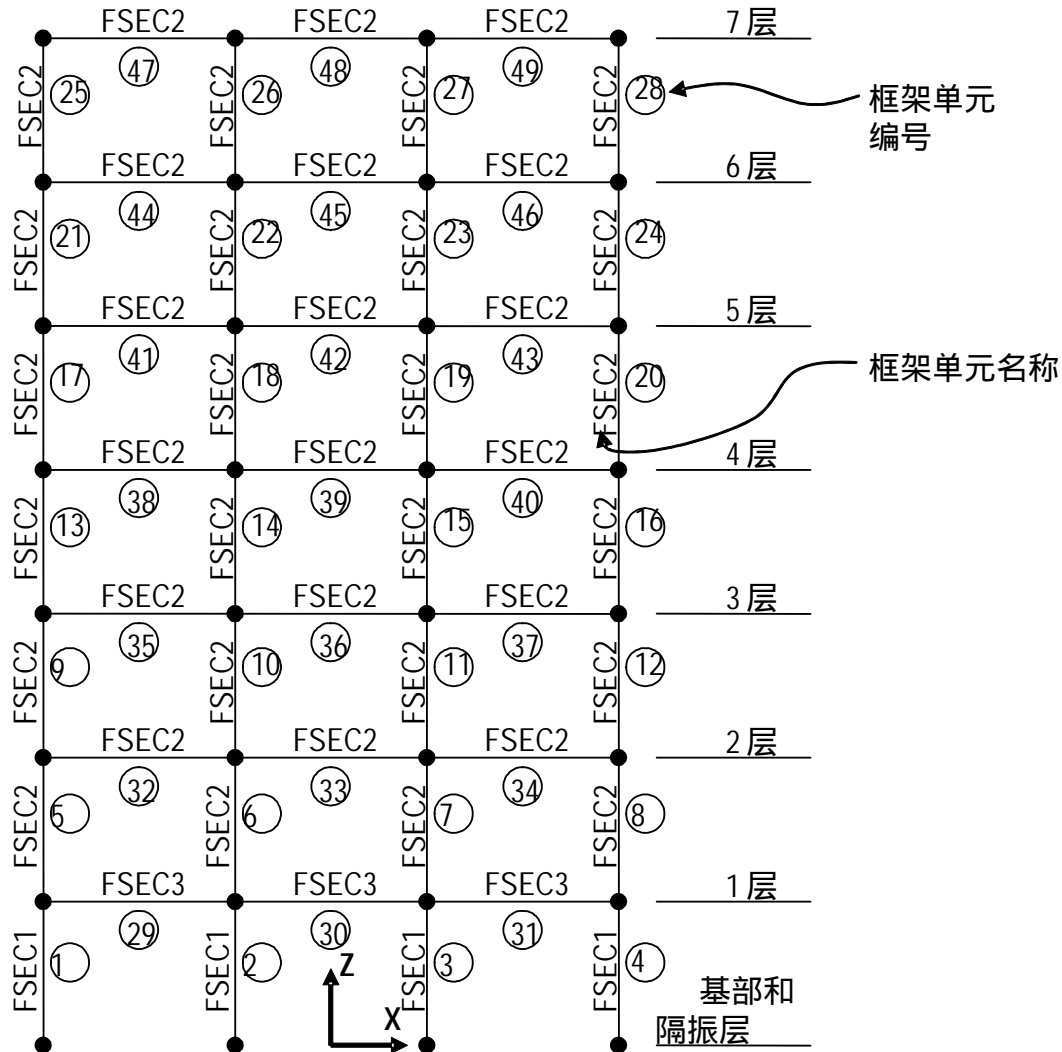
PROGRAM NAME: SAP2000
REVISION NO.: 1

几何特性和属性



Software Verification

PROGRAM NAME: SAP2000
REVISION NO.: 1



截面名称	面积 $A \text{ (in}^2\text{)}$	弯曲内力 $I \text{ (in}^4\text{)}$	剪切面积 $A_v \text{ (in}^2\text{)}$
FSEC1	7.46	12.18	4.375
FSEC2	3.34	5.04	1.02
FSEC3	5.58	13.58	2.608

采用的分析工况

下面两个表描述了本例中各模型用到的分析工况。

模型 A

分析工况	描述
RITZ	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 43 个振型即可，并将振型数减少为 43 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。
MGRAV	通过斜坡函数将重力荷载施加到阻尼器的非线性模态时程分析工况。NLMHIST1A 和 NLMHIST2A 是从该工况的结束状态开始的。
DGRAV	将重力荷载施加到阻尼器单元的非线性静力分析工况。NLDHIST1A 直接积分时程分析工况是从该工况的结束状态开始的。
NLMHIST1A	采用 RITZ 分析工况振型的非线性模态时程分析工况，从 MGRAV 分析工况的最终状态开始。该工况包括比例化的阻尼，该阻尼近似（而非精确）地等于 Scheller and Constantinou 1999 中采用的 0.59% 模态阻尼。模型 A 中的 NLDHIST1 分析工况采用了相同的模态定义。参见本节后面的“模型 A 时程分析的比例化阻尼”，可获得更多信息。
NLMHIST2A	采用 RITZ 分析工况振型的非线性模态时程分析工况，从 MGRAV 分析工况的最终状态开始。该工况中所有模型的阻尼为 0.59% 模态阻尼，除了第 40、41、42 和 43 振型（与阻尼器竖向激励相关的振型），对这些振型指定了 99.9% 的模态阻尼。

PROGRAM NAME: SAP2000
REVISION NO.: 1

模型 A

分析工况	描述
NLMHIST3A	采用 RITZ 分析工况振型的非线性模态时程分析工况，从 MGRAV 分析工况的最终状态开始。该工况中所有模型的阻尼为 0.59%模态阻尼，没有设置模态阻尼覆盖项。
NLDHIST1A	采用 RITZ 分析工况振型的直接积分时程分析工况，从 DGRAV 分析工况的最终状态开始。该工况包括比例化的阻尼，该阻尼近似（而非精确）地等于 Scheller and Constantinou 1999 中采用的 0.59%模态阻尼。模型 A 中的 NLMHIST1 分析工况采用了相同的模态定义。参见本节后面的“模型 A 时程分析的比例化阻尼”，可获得更多信息。

模型 B

分析工况	描述
RITZ	同模型 A。
MGRAV	同模型 A。这是通过斜坡函数将重力荷载施加到阻尼器的非线性模态时程分析工况。NLMHIST1B 和 NLMHIST2B 是从该工况的结束状态开始的。
DGRAV	同模型 A。将重力荷载施加到阻尼器单元的非线性静力分析工况。NLDHIST1B 直接积分时程分析工况是从该工况的结束状态开始的。
NLMHIST1B	采用 RITZ 分析工况振型的非线性模态时程分析工况，从 MGRAV 分析工况的最终状态开始。该工况包括比例化的阻尼，该阻尼近似地等于 Scheller and Constantinou 1999 中采用的 0.59% 模态阻尼。模型 B 中的 NLDHIST1 分析工况采用了相同的模态定义。参见本节后面的“模型 B 时程分析的比例化阻尼”，可获得更多信息。
NLMHIST2B	采用 RITZ 分析工况振型的非线性模态时程分析工况，从 MGRAV 分析工况的最终状态开始。该工况中所有模型的阻尼为 0.59% 模态阻尼，没有设置模态阻尼覆盖项。
NLDHIST1B	采用 RITZ 分析工况振型的直接积分时程分析工况，从 DGRAV 分析工况的最终状态开始。该工况包括比例化的阻尼，该阻尼近似（而非精确）地等于 Scheller and Constantinou 1999 中采用的 0.59% 模态阻尼。模型 B 中的 NLMHIST1 分析工况采用了相同的模态定义。参见本节后面的“模型 B 时程分析的比例化阻尼”，可获得更多信息。

Software Verification

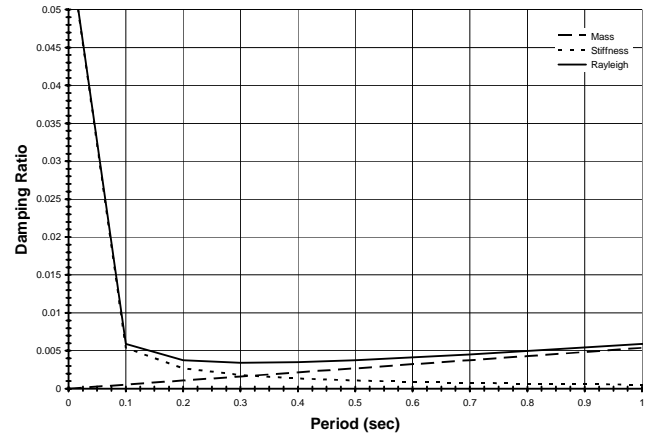
PROGRAM NAME: SAP2000
REVISION NO.: 1

在模型 A 中，为获取与阻尼器竖向激励相关的振型，将阻尼设置为大值。这与模型 B 的情况不同，模型 B 中在阻尼器层包括竖向阻尼器单元。

在非线性直接积分时程工况中，采用了 0.0005 秒的最大子步长，将 Hilber-Hughes-Taylor 积分因子，alpha 设置为 -1/3。

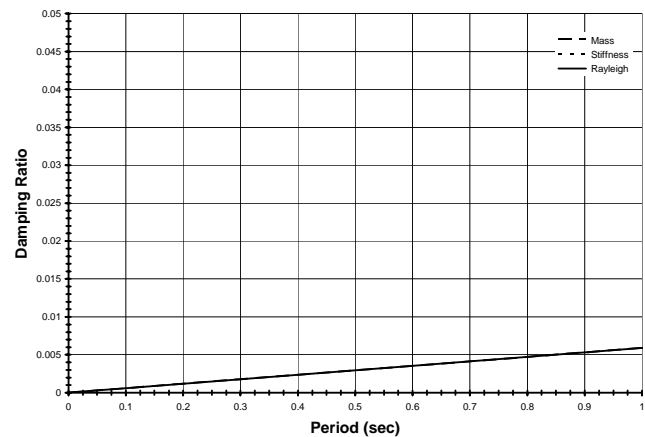
模型 A 用于时程分析的比例化阻尼

模型 A 中，非线性直接积分时程分析工况 NLDHIST1A 和非线性模态时程分析工况 NLMHIST1A 采用了与质量和刚度成比例的阻尼。对所有分析工况的比例化阻尼为 0.59%，除了高频（低周期）应该设为高阻尼以外。对模型 A，通过将周期为 1 秒和 0.1 秒的阻尼设置为 0.59%来设置比例化阻尼。这将获得质量比例系数 0.0674 和刚度阻尼系数 $1.707E-04$ 。右图中绘出了得到的阻尼。



模型 B 用于时程分析的比例化阻尼

模型 B 中，非线性直接积分时程分析工况 NLDHIST1A 和非线性模态时程分析工况 NLMHIST1A 采用了与质量和刚度成比例的阻尼。对所有分析工况的比例化阻尼为 0.59%，除了高频（低周期）应该不能设为高阻尼以外。对模型 A，通过将周期为 1 秒的阻尼设为 0.59%，将周期为 0 秒的阻尼设置为 0 来设置比例化阻尼。这将获得质量比例系数 0.0741 和刚度阻尼系数 0。右图中绘出了得到的质量比例化阻尼。

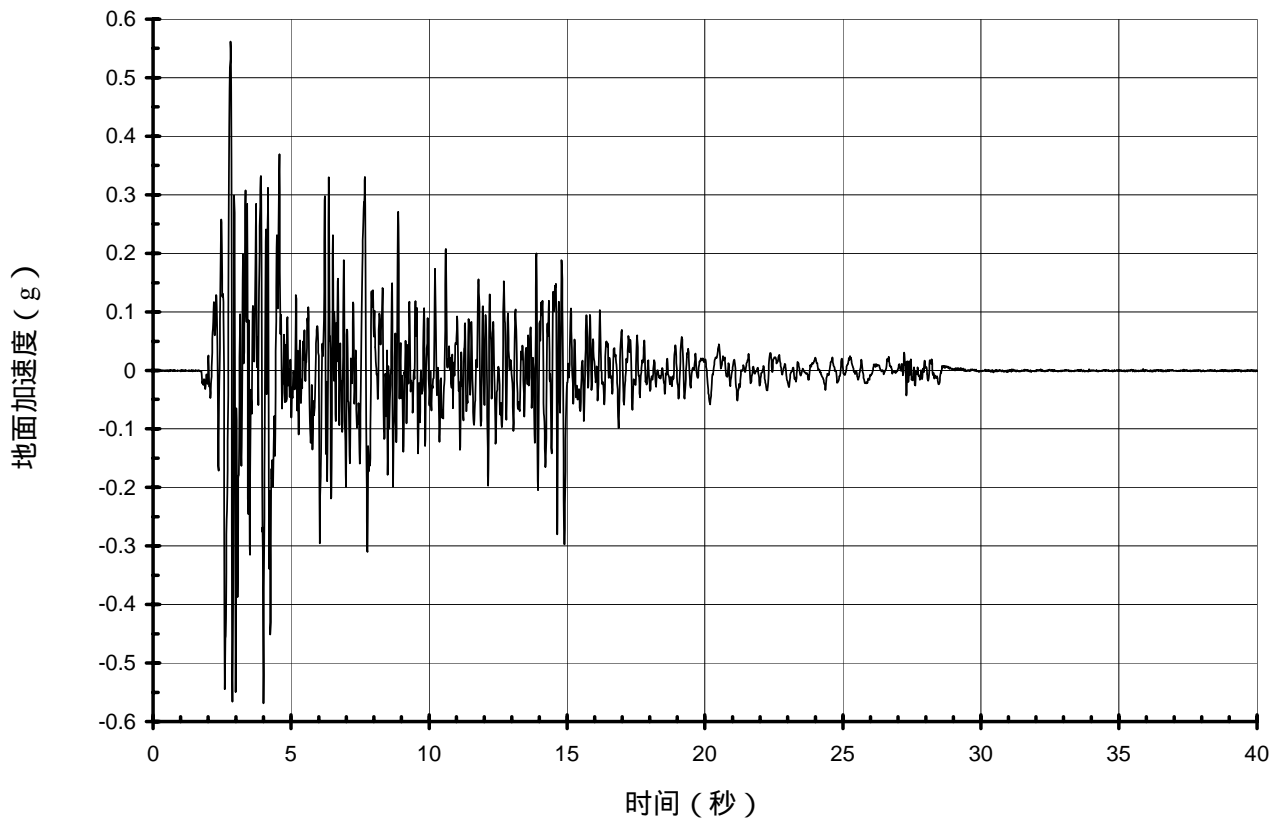


地震记录

下图表示了本例中所用的地震记录。这是 1940 El Centro 记录的 S00E 部分，将其峰值按比例缩放为 $0.57g$ 。这是地震记录水平的两倍。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，按比例系数 2 进行了时间压缩。

文件 EQ6-0011.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。

在 SAP2000 中，将地震记录乘以系数 386.22 将 g 转化为 in/sec^2 。



PROGRAM NAME: SAP2000

REVISION NO.: 1

摩擦摆阻尼器属性

本节描述了模型中采用的摩擦摆连接单元的属性。所有连接单元的方向设定为局部坐标 1 轴的正向平行于全局坐标 Z 的正向，局部坐标 2 轴的正向平行于全局坐标 X 的正向，局部坐标 3 轴的正向平行于全局坐标 Y 的正向。为外围和内部连接单元指定了不同的属性。

外围摩擦摆连接单元的属性为：

线性分析属性：

$$k_e U_1 = 20,000 \text{ k/in}$$

$$k_e U_2 = 1.05 \text{ k/in}$$

$$k_e R_3 = 10,000 \text{ k-in/radian}$$

非线性分析属性：

$$k U_1 = 20,000 \text{ k/in}$$

$$k U_2 = 31.6667 \text{ k/in}$$

$$\text{摩擦系数, 慢 } U_2 = 0.04$$

$$\text{摩擦系数, 快 } U_2 = 0.06$$

$$\text{速度系数 } U_2 = 1.0897 \text{ sec/in}$$

$$\text{滑移面弧度 } U_2 = 9.75 \text{ in}$$

内部摩擦摆连接单元的属性为：

线性分析属性：

$$k_e U_1 = 20,000 \text{ k/in}$$

$$k_e U_2 = 2.10 \text{ k/in}$$

$$k_e R_3 = 10,000 \text{ k-in/radian}$$

非线性分析属性：

$$k U_1 = 20,000 \text{ k/in}$$

$$k U_2 = 63.3333 \text{ k/in}$$

$$\text{摩擦系数, 慢 } U_2 = 0.04$$

$$\text{摩擦系数, 快 } U_2 = 0.06$$

$$\text{速度系数 } U_2 = 1.0897 \text{ sec/in}$$

$$\text{滑移面弧度 } U_2 = 9.75 \text{ in}$$

本例中采用的 $k_e U_1$ 属性 20,000 k/in 与 Scheller and Constantinou 1999 SAP2000 模型 (值为 0.0001 k/in) 不同。

竖向阻尼属性

模型 B 中的阻尼单元非线性属性与 Scheller and Constantinou 1999 中所采用的属性不同。基于为建筑总重 47.5 kips 和竖向刚度 80,000 kip/in (四个隔离器 , 每个 20,000 kip/in) 提供了阻尼系数 0.10 , 确定阻尼系数 c 。因此 ,

$$4c = 2\xi\omega m = 2\xi\sqrt{\frac{k}{m}}m = 2\xi\sqrt{km} = 2\xi\sqrt{\frac{kW}{g}}$$
$$c = \frac{\xi}{2}\sqrt{\frac{kW}{g}} = \frac{0.10}{2}\sqrt{\frac{80,000 * 47.5}{386}} = 5 \text{ kip-sec/in}$$

为需要阻尼单元的纯阻尼特性 , 将弹簧刚度 k 设置为 10,000 kip/in。这意味着弹簧-阻尼器系统的特征时间 (由 $\tau = c / k = 5 / 10000 = 0.0005 \text{ sec}$ 确定) 大约比加载步长 (本工况中为 0.01 秒) 小一到两个数量级。该特征时间应该可以得出纯阻尼行为。

阻尼器地线性特征设为零 , 以使阻尼器对模态分析没有影响。

所测试的 SAP2000 技术要点

- 摩擦摆连接单元
- 阻尼连接单元
- 零长度 , 两节点连接单元
- 隔板约束
- 框架端部长度偏移
- 里兹向量模态分析
- 非线性模态时程分析
- 非线性直接积分时程分析
- 节点质量

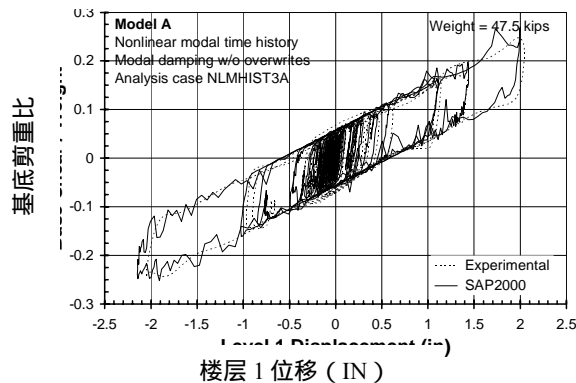
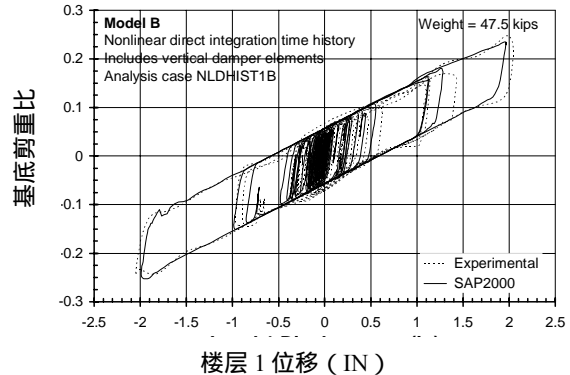
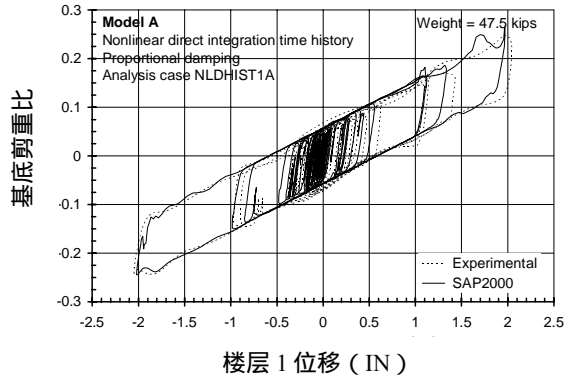
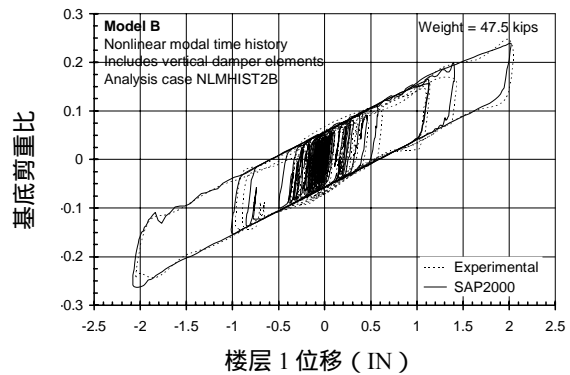
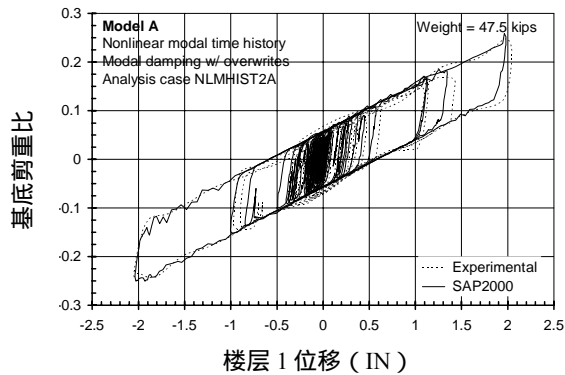
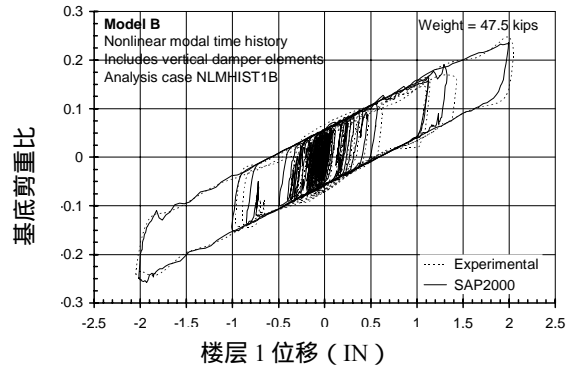
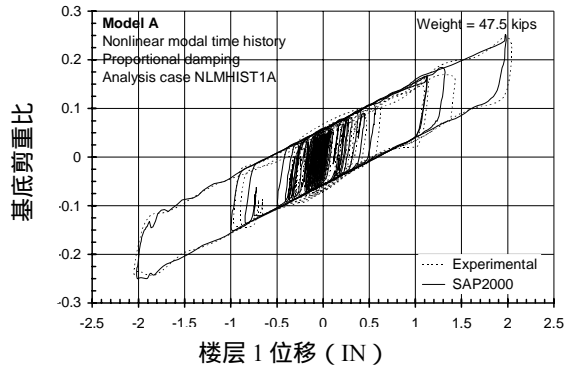
结果比较

独立结果为 Scheller and Constantinou 1999 一书第 4 节第 43 至 59 页给出的振动台实验结果。

本例 14 页的图绘出了模型 A 的四种时程工况下的基底剪力与第一层位移的关系，该模型的四种时程工况没有附加阻尼器单元。模型 B 的三个时程工况没有附加阻尼器单元。

第 14 页下部中间的图是关于模型 A 的 NLMHIST3A 工况的。注意到模型 A 在阻尼器层没有竖向阻尼器单元，分析工况 NLMHIST3A 中所有模型的阻尼为 0.59% 模态阻尼，对高频没有增加的阻尼。该图显示出响应中的真实的高频振动。注意在其它图中，都具有一定的增加的高频阻尼（如模态阻尼，质量和刚度比例化阻尼，或附加竖向阻尼器单元），这些图出现的高频振动明显减少。在所有工况中，峰值相应值与实验结果吻合的很好。第 15 页的表中给出了这些结果的比较情况。

第 14 页左上角的图绘出了的 NLMHIST1A 工况下的基底剪力与第一层位移的关系，该工况为包含比例化阻尼的非线性模态时程分析。左边从上数第三个图表明了 NLDHIST1A 工况下的基底剪力与第一层位移的关系，该工况为包含比例化阻尼的非线性直接积分时程分析。这两种工况中指定的比例化阻尼相同。NLDHIST1A 的图中的高频振动比 NLMHIST3A（左上）图中的高频振动少得多，但比 NLMHIST3A（底部中间）图中的多得多。NLMHIST1A 和 NLDHIST1A 的区别在于在非线性模态和直接积分时程分析工况中采用的比例化阻尼的差别。



输出参数	模型	分析工况	SAP2000	独立结果	差值百分比
楼层 1 最小位移 (in)	A	NLMHIST1A	-2.020	-2.053	-2%
		NLMHIST2A	-2.034		-1%
		NLMHIST3A	-2.147		+5%
		NLDHIST1A	-2.020		-2%
	B	NLMHIST1B	-2.017		-2%
		NLMHIST2B	-2.081		+1%
		NLDHIST1B	-1.988		-3%
楼层 1 最大位移 (in)	A	NLMHIST1A	1.982	2.043	-3%
		NLMHIST2A	1.981		-3%
		NLMHIST3A	2.000		-2%
		NLDHIST1A	1.968		-4%
	B	NLMHIST1B	1.996		-2%
		NLMHIST2B	2.021		-1%
		NLDHIST1B	1.967		-4%
最小基底剪力/重量	A	NLMHIST1A	-0.250	-0.245	+2%
		NLMHIST2A	-0.251		+2%
		NLMHIST3A	-0.252		+3%
		NLDHIST1A	-0.245		0%
	B	NLMHIST1B	-0.258		+5%
		NLMHIST2B	-0.263		+7%
		NLDHIST1B	-0.253		+3%
最大基底剪力/重量	A	NLMHIST1A	0.253	0.248	+2%
		NLMHIST2A	0.258		+4%
		NLMHIST3A	0.270		+9%
		NLDHIST1A	0.266		+7%
	B	NLMHIST1B	0.237		-4%
		NLMHIST2B	0.240		-3%
		NLDHIST1B	0.235		-5%

在包含比例化阻尼的非线性模态时程分析工况中，将比例化阻尼转化成了基于分析初始刚度的模态阻尼。当分析进行时，阻尼不会改变。

在包含比例化阻尼的非线性直接积分时程分析工况中，当结构刚度发生变化时，阻尼的刚度比例化部分会变化。如果在分析中刚度变为零，相关的刚度比例化阻尼也变为零。

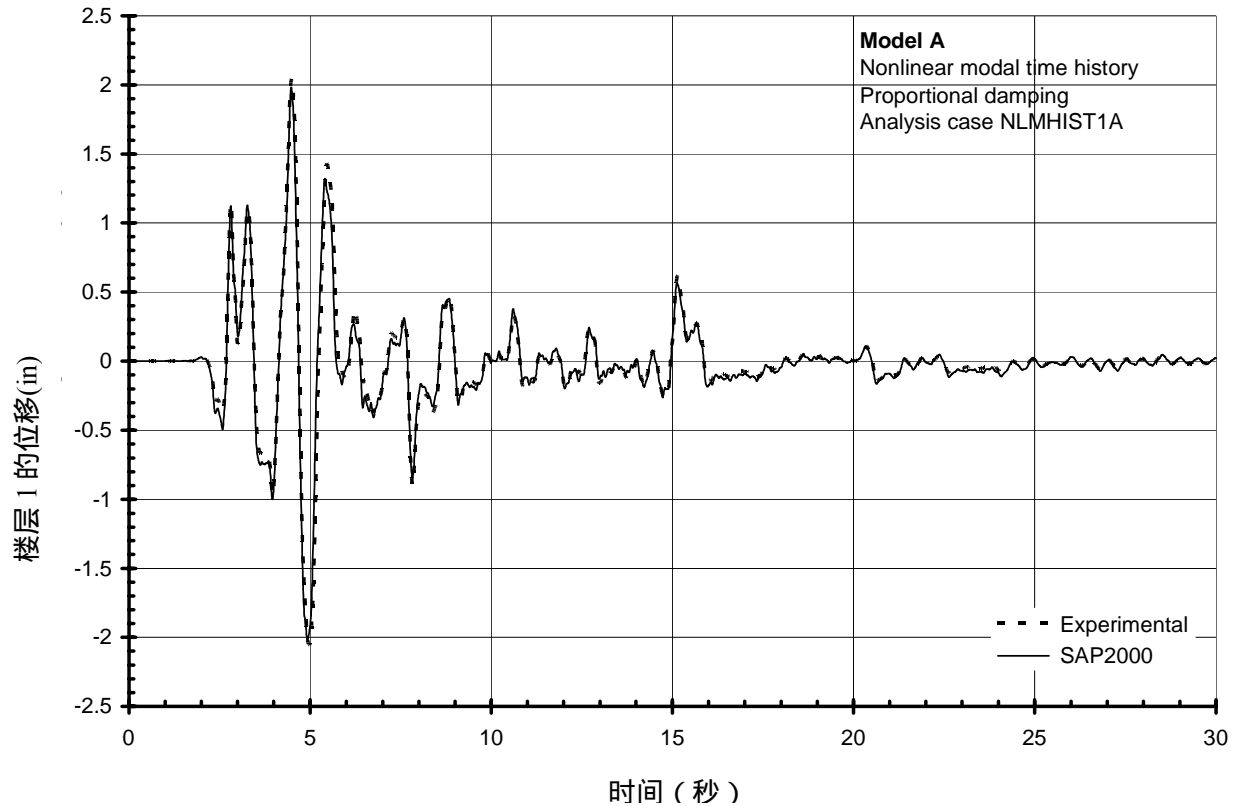
本例中，分析工况 NLMHIST1A 具有基于分析初始状态的阻尼。对于这些情况，阻尼器处于受压状态，没有滑移。因此，阻尼器没有非零竖向和水平刚度。在整个分析过程中，阻尼器具有竖向和水平刚度比例化阻尼。

在分析中，分析工况 NLDHIST1A 的阻尼发生变化。当阻尼器处于受压状态，没有滑移时，阻尼器有竖向和水平刚度比例化阻尼。当阻尼器开始滑移时，水平刚度比例化阻尼消失。当阻尼器抬升时（滑移过程中），阻尼器的竖向和水平刚度比例化阻尼都消失了。

所以，在整个分析过程中，分析工况 NLDHIST1A 比 NLMHIST1A 工况的阻尼小。这就是 NLDHIST1A 图比 NLMHIST1A 图有更多高频振动的原因。

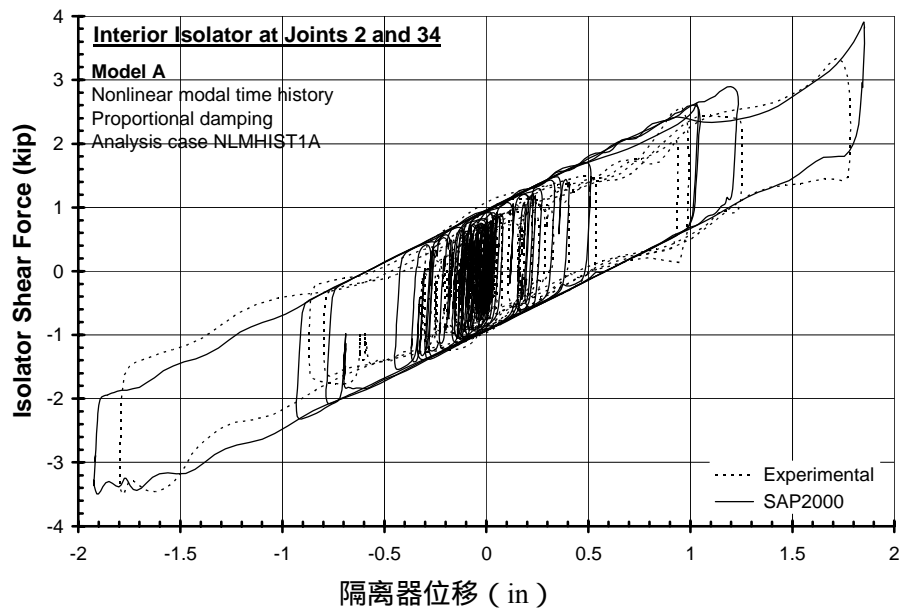
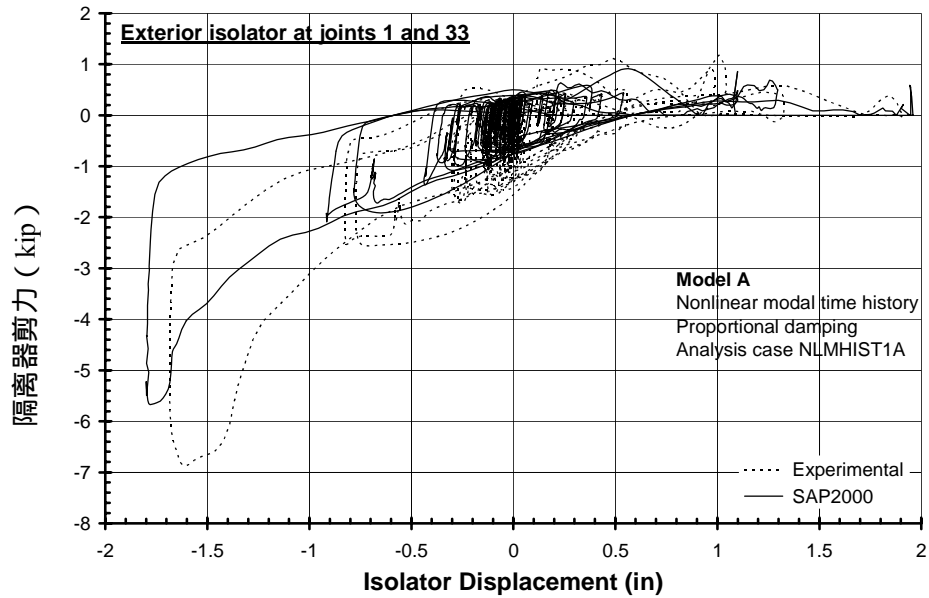
NLMHIST2A 图中出现了 NLMHIST1A 图中所没有的小的高频振动。注意到 NLMHIST1A 采用了质量和刚度比例化阻尼，如前一节“模型 A 用于时程分析的比例化阻尼”所述。NLMHIST2A 中所有模态阻尼为 0.59%，除了对四个高振型指定了 99.9% 的模型阻尼，这四个高振型的周期约为 0.0004 秒。NLMHIST1A 的比例化阻尼在周期 0.1 秒时提供了 0.59% 的阻尼，当周期减小到 0.0004 秒时，提供了约 1.34% 的阻尼。在整个从 0.1 秒到 0.0004 秒的过程中（而不像是 NLMHIST2A 中仅有的 0.0004 秒周期），阻尼减小。因此，NLMHIST1A 比 NLMHIST2A 有更多高频阻尼。这就是 NLMHIST1A 图比 NLMHIST2A 图有更多高频振动的原因。如果 NLMHIST2A 工况在 0.1 秒和 0.0004 秒之间提供更高的阻尼，NLMHIST2A 的结果将与 NLMHIST1A 的结果更加相似。

下图将 NLMHIST1A 分析工况与实验结果的位移-时间关系进行了比较。该比较结果与其它分析工况类似。



下图绘出了分析工况 NLMHIST1A 的外围和内部阻尼器力-变形图。外围阻尼器位于节点 1 和 33，内部阻尼器位于节点 2 和 34。

如 Scheller and Constantinou 1999 一书中所述：“支座上承受的重力荷载（实验过程中）不能准确的获得，它们可能与[SAP2000]分析中采用的值完全不同”。这可以解释实验与 SAP2000 结果中外围阻尼器的力-变形关系的差别。



下表将 NLMHIST1A 分析工况的阻尼器的力-变形关系与实验值进行了比较。对于其它含高频阻尼的时程分析工况可以获取类似的结果。

输出参数	模型	分析工况	SAP2000	独立结果	差值百分比
外围隔震器 (节点 1 和 33) 最小变形 (in)	A	NLMHIST1A	-1.799	-1.686	+7%
		NLMHIST2A	-1.814		+8%
		NLMHIST3A	-1.959		+16%
		NLDHIST1A	-1.796		+7%
	B	NLMHIST1B	-1.808		+7%
		NLMHIST2B	-1.855		+10%
		NLDHIST1B	-1.772		+5%
外围隔震器 (节点 1 和 33) 最大变形(in)	A	NLMHIST1A	1.961	1.909	+3%
		NLMHIST2A	1.976		+4%
		NLMHIST3A	2.015		+6%
		NLDHIST1A	1.945		+2%
	B	NLMHIST1B	1.981		+4%
		NLMHIST2B	2.004		+5%
		NLDHIST1B	1.951		+2%
外围隔震器 (节点 1 和 33) 最小剪力 (kip)	A	NLMHIST1A	-5.672	-6.872	-17%
		NLMHIST2A	-5.726		-17%
		NLMHIST3A	-5.922		-14%
		NLDHIST1A	-5.782		-16%
	B	NLMHIST1B	-5.683		-17%
		NLMHIST2B	-5.834		-15%
		NLDHIST1B	-5.543		-19%
外围隔震器 (节点 1 和 33) 最大剪力 (kip)	A	NLMHIST1A	0.911	1.183	-23%
		NLMHIST2A	0.904		-24%
		NLMHIST3A	3.416		+189%
		NLDHIST1A	1.088		-8%
	B	NLMHIST1B	0.933		-21%
		NLMHIST2B	0.919		-22%
		NLDHIST1B	0.894		-24%

输出参数	模型	分析工况	SAP2000	独立结果	差值百分比
内部隔震器 (节点 2 节点 34) 最小变形 (in)	A	NLMHIST1A	-1.924	-1.796	+7%
		NLMHIST2A	-1.940		+8%
		NLMHIST3A	-1.959		+9%
		NLDHIST1A	-1.923		+7%
	B	NLMHIST1B	-1.925		+7%
		NLMHIST2B	-1.983		+10%
		NLDHIST1B	-1.892		+5%
内部隔震器 (节点 2 节点 34) 最大变形 (in)	A	NLMHIST1A	1.854	1.786	+4%
		NLMHIST2A	1.853		+4%
		NLMHIST3A	1.873		+5%
		NLDHIST1A	1.835		+3%
	B	NLMHIST1B	1.871		+5%
		NLMHIST2B	1.896		+6%
		NLDHIST1B	1.843		+3%
内部隔震器 (节点 2 节点 34) 最小剪力 (kip)	A	NLMHIST1A	-3.493	-3.498	0%
		NLMHIST2A	-3.564		+2%
		NLMHIST3A	-3.787		+8%
		NLDHIST1A	-3.429		-2%
	B	NLMHIST1B	-3.542		+1%
		NLMHIST2B	-3.504		0%
		NLDHIST1B	-3.384		-3%
内部隔震器 (节点 2 节点 34) 最大剪力 (kip)	A	NLMHIST1A	3.909	3.346	+17%
		NLMHIST2A	3.973		+19%
		NLMHIST3A	4.412		+32%
		NLDHIST1A	4.036		+21%
	B	NLMHIST1B	3.859		+15%
		NLMHIST2B	3.811		+14%
		NLDHIST1B	3.785		+13%

关于 SUNY BUFFALO 报告的注释

SUNY Buffalo 报告 (Scheller and Constantinou 1999) 指出通过采用摩擦摆阻尼器轴向线性有效刚度 $k_e U_1$ 的极小值, 可以获得可接受的结果。SUNY Buffalo 报告采用的 $k_e U_1$ 值为 0.0001 kip/in。校验算例中, 为了获得可接受的结果, 采用了 $k_e U_1$ 的真实值 20000 kip/in。

SAP2000 阻尼器系统位移与实验结果的比较结果优于 SUNY Buffalo 报告的结果。在该报告第 50 页的 4-4 节, 阻尼器系统位移被定义为第一层与地面的相对位移, 即阻尼器位移加上第一层柱位移。在校验手册中的图中, 该位移被称为第一层位移。

当绘出 SAP2000 的阻尼器位移与基底剪力的关系图时, 会发现该图与 SUNY Buffalo 的图很相似。因此, 该报告某些比较项中, 实验位移为第一层位移, 而 SAP2000 位移为阻尼器层位移。这或许可以解释为什么在本校验手册中的比较结果更理想。

直接积分时程分析的求解参数

本例中的直接积分时程分析是采用 0.0005 秒的最大子步尺寸运行的。曾试算了 0.005 秒最大子步尺寸, 发现会导致比 0.0005 秒最大子步尺寸更大的位移。试算 0.00005 秒最大子步尺寸, 会得到与 0.0005 秒最大子步尺寸相同的位移。因此, 可以认为 0.0005 秒最大子步尺寸对本例是合适的。

类似地, 本例中的非线性直接积分时程分析是采用 $1E-4$ 的相对迭代容差运行的。试算了一个更小的相对迭代容差, 发现会得到相同的结果。所以可以认为 $1E-4$ 的容差是足够的。

一般而言, 应该对于非线性分析进行这里所描述的参数研究。这有助于获得正确的结果。

计算模型文件: Example 6-011a, Example 6-011b

结论

总体上, SAP2000 与独立结果的比较可以接受。对于没有阻尼单元和高频附加阻尼的分析工况 NLMHIST3A, 关于阻尼器力-变形曲线峰值的比较结果不好。如果增加了额外的与高频相关的阻尼, 则可改善比较结果。

PROGRAM NAME:	<u>SAP2000</u>
REVISION NO.:	<u>1</u>

对于非线性模态时程分析工况，采用比例化阻尼和附加阻尼器可以明显地减小带摩擦摆阻尼器的高频振动。

对于非线性直接积分时程分析工况，采用比例化阻尼和附加阻尼器可以明显地减小带摩擦摆阻尼器的高频振动。但是，重要的是，由于当阻尼器被抬升时阻尼的刚度比例部分为零，而且此时阻尼的刚度比例部分可以有效地防止高频行为，所以比例化阻尼不能完全消除振动。因此，如果采用线性直接积分时程分析，与采用比例阻尼相比，在分析工况中增加阻尼单元可以更有效地减小结果中地高频振动。