

## 算例 6-010

### 连接 – SUNY BUFFALO 八层建筑带橡胶隔离器

#### 问题描述

本例在文献 Scheller and Constantinou 1999 (“the SUNY Buffalo report”) 中第 2 部分, 5 到 23 页。这是一个八层建筑用橡胶支撑做隔震器。模型承受一对比例的 1971 San Fernando 水平地震记录。SAP2000 的结果中上部结构相对于隔震体系的位移、上部结构加速度、隔离器力、变形与使用计算机程序 3D-BASIS-ME (见 Tsopelas, Constantinou and Reinhorn 1994) 的结果进行比较。

SAP2000 模型在下面三页的图中显示。上部结构用一个线性连接单元杆模拟。上部结构杆连接节点 23、55 至 62。楼层质量集中在偏心节点 46 到 54 上。隔离系统以上的每层楼使用隔板约束与上部结构质量相连。分析中只有自由度  $U_x$ 、 $U_y$ 、 $R_z$  有效。上部结构假设有 3% 的振型阻尼, 隔离系统有 0% 的振型阻尼。

节点 1 到 45 定义了模型中 45 个橡胶隔离器的位置。这些节点用体约束限制到节点 46。节点 101 到 145 如节点 1 到 45 分别在同一位置, 并且完全约束 (固接到地)。具有零长度的连接单元属性连接节点 1 到 45 和 101 到 145。模型中所有连接单元的属性在本例后面 “连接单元属性” 部分给出。

本例中 SAP2000 模型与文献 Scheller and Constantinou 1999 报告中不同如下。首先, 本校验例子对杆上部结构使用线性连接单元而不是报告中的阻尼单元。线性连接单元更简单和恰当, 但当报告写成时还没有这种单元。

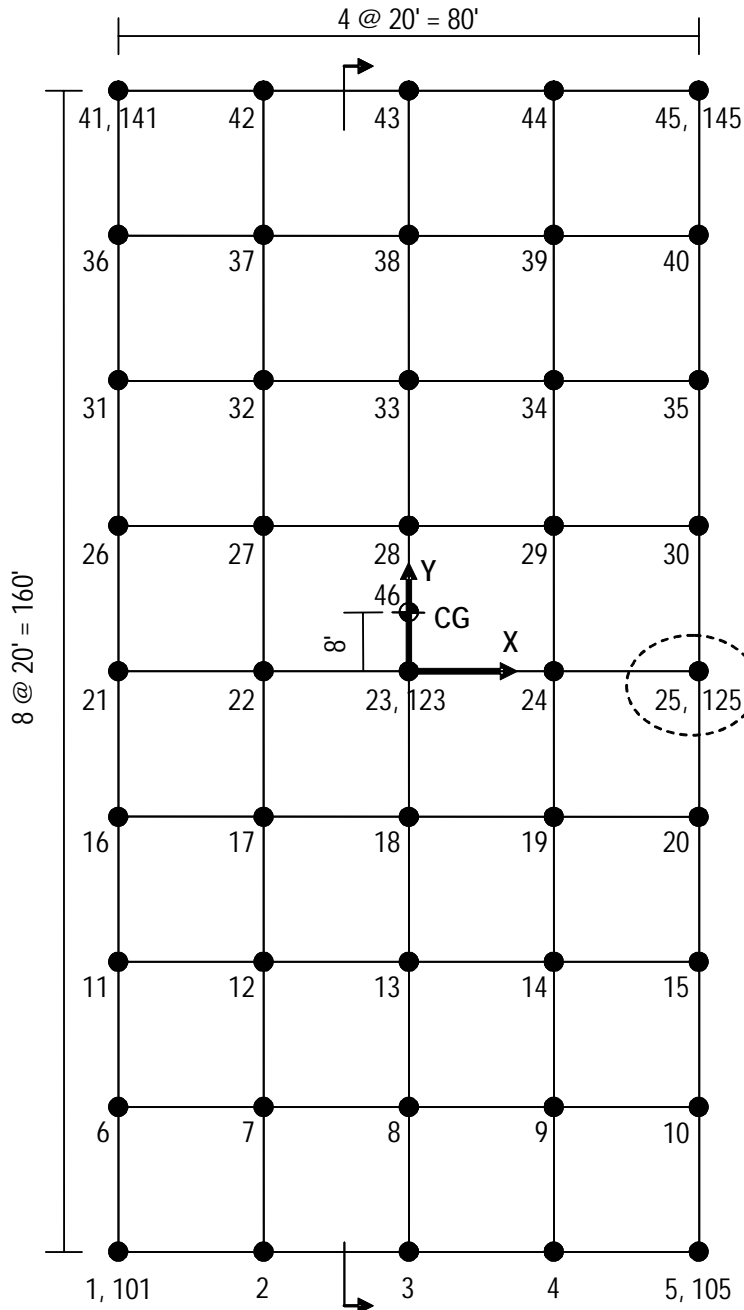
其次, 校验例子对隔离器使用实际线性有效刚度 6.55 kip/in, 而不是报告中的微小有效刚度。这在本例后面 “橡胶隔离单元的线性有效刚度” 中详细解释。



## Software Verification

PROGRAM NAME: SAP2000  
REVISION NO.: 0

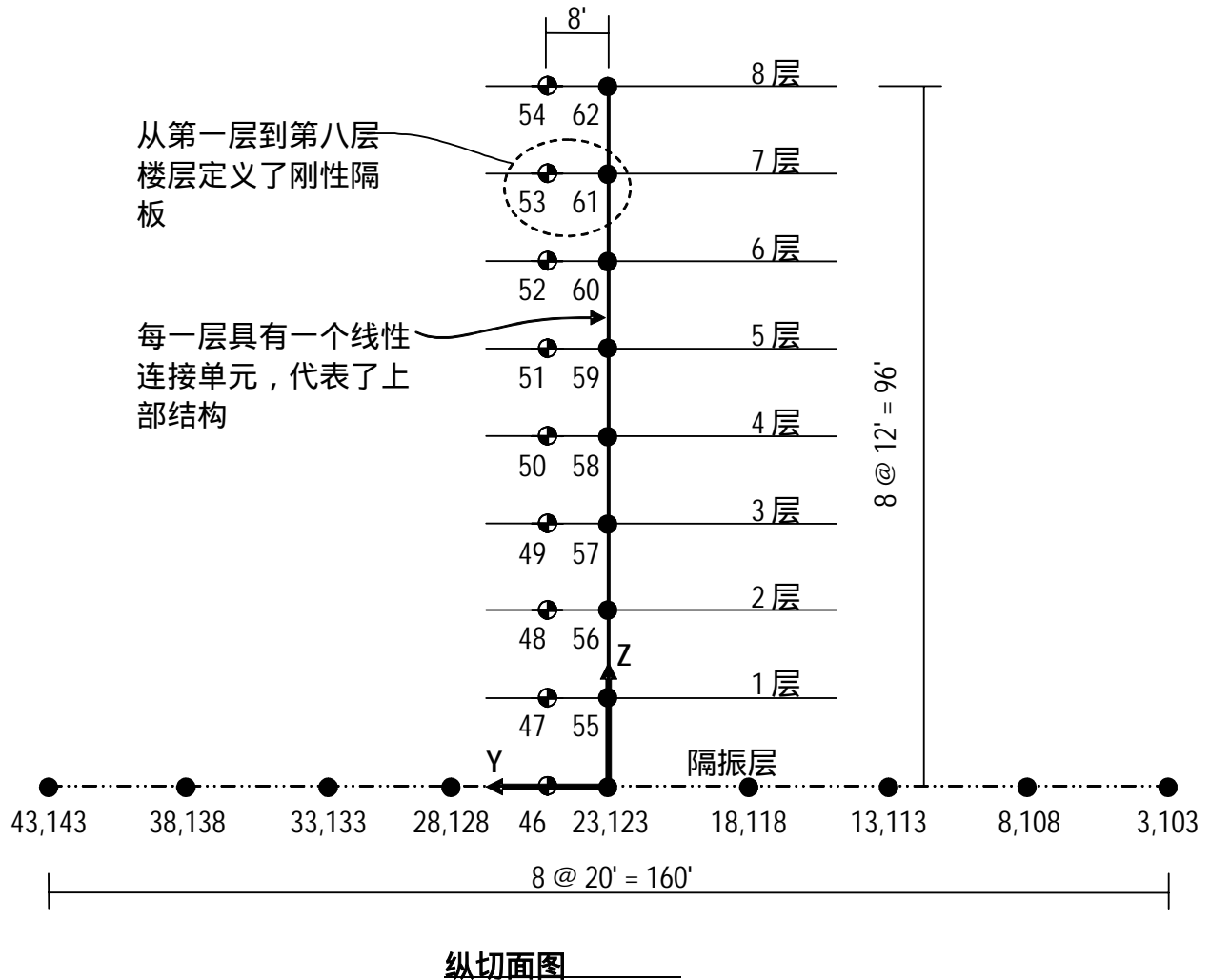
几何和属性

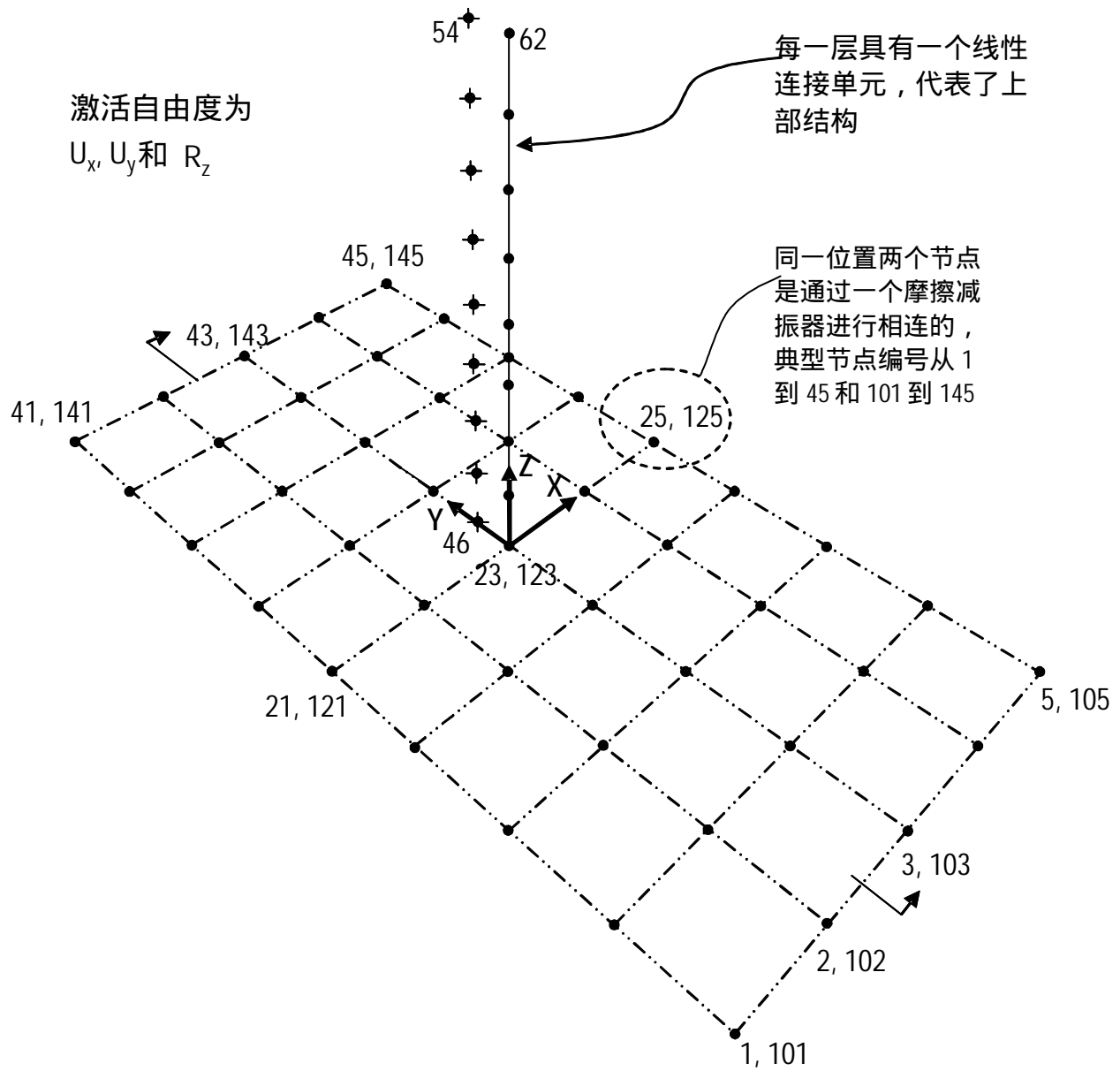


同一位置两个节点  
 是通过一个摩擦减  
 振器进行相连的，  
 典型节点编号从 1  
 到 45 和 101 到 145

注意：节点 1 到节点  
 46 使用了相应形状的  
 边界约束

**隔振层平面图**





## 使用的分析工况

本例运行三个不同分析工况。它们在下表中描述。注意 3D-BASIS-ME 模型对与上部结构关联的所有振型使用 3% 振型阻尼。3D-BASIS-ME 中没有振型阻尼与隔离系统关联。

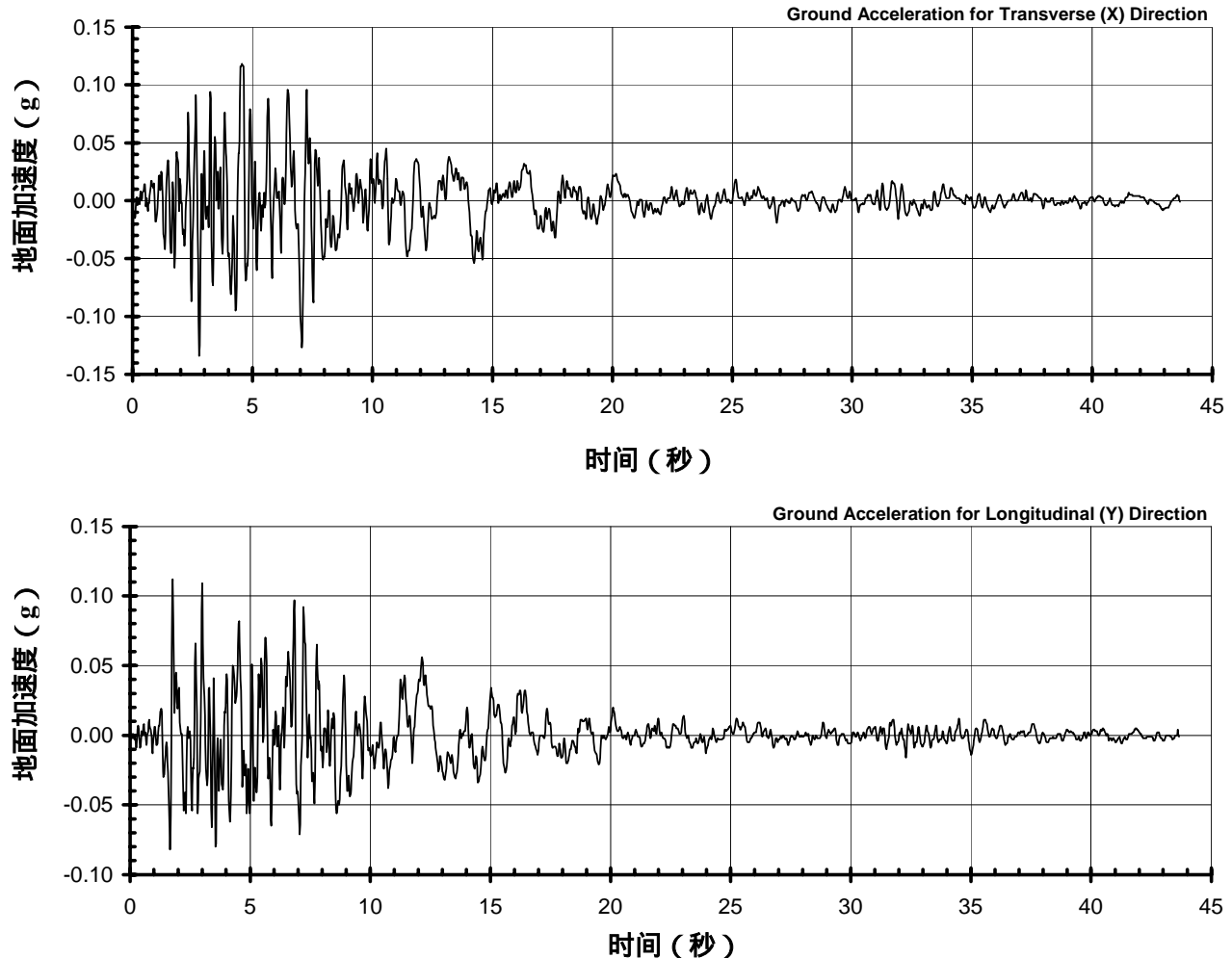
分析工况	描述
RITZ	里兹 Ritz 向量振型分析工况。需要 99 个振型。程序可以自动确定最大 27 个振型因此将振型数降为 27。初始向量为 $U_x$ 加速度、 $U_y$ 加速度、所有的连接单元非线性自由度。
NLMHIST1	非线性振型时程分析工况使用 RITZ 分析工况的振型。此工况在所有的振型中具有 3% 振型阻尼，除了振型 1、2、3 指定 0%，它们与隔震系统有关。更多信息参见本例后面“橡胶隔离单元的线性有效刚度”部分。
NLDHIST1	非线性时程直接积分工况。这个工况包括比例阻尼，这个阻尼与振型时程分析相似，但不完全一致。更多信息参见本例后面“直接时间积分时程中比例阻尼”部分。

注意内置的上部粘滞阻尼（关键阻尼的 3%）在 3D-BASIS-ME 中计入方法与 SAP2000 非线性时程分析及非线性直接时间积分不同。因此可以预期对每一个时程分析结果（3D-BASIS-ME 一个，SAP2000 两个）有微小差别。

## 地震记录

下图显示本例中使用的地震记录。是 1971 San Fernando 地震测站 211 水平地动加速度记录。地震记录在文件 EQ6-010-trans.txt 和 EQ6-010-long.txt 中。这些文件每行有一个加速度值。加速度值按 0.02 秒间隔等距分布。单位是 g。

在 SAP2000 中，象 SUNY Buffalo 报告中描述的那样，两个分量中都乘以系数 2.345，并乘以 386.22 从 g 转换到 in/sec<sup>2</sup>。南北和东西分量在模型的横向和纵向分别施加。



### 连接单元属性

这部分说明模型中使用的连接单元属性。模型中所有的连接单元方向为局部 1 轴的正方向与全局 Z 轴正向平行，局部 2 轴正向与全局 X 轴正向平行，局部 3 轴与全局 Y 轴正向平行。

上部连接单元有一个有效刚度  $k_e$ ，对剪切自由度，剪切弹簧离 J 端距离  $D_J$ 。对自由度  $U_2$ ,  $U_3$  和  $R_1$  指定属性。

在隔离器层和 3 层 ( 属性名称 LINST123 )

$$\begin{aligned}k_e U_2 &= 3401.8 \text{ k/in} \\D_J U_2 &= 72 \text{ in} \\k_e U_3 &= 3401.8 \text{ k/in} \\D_J U_3 &= 72 \text{ in} \\k_e R_1 &= 3.996 \text{ E+09 k-in/radian}\end{aligned}$$

在 3 层和 6 层之间 (属性名称 LINST456)

$$\begin{aligned}k_e U_2 &= 2551.3 \text{ k/in} \\D_J U_2 &= 72 \text{ in} \\k_e U_3 &= 2551.3 \text{ k/in} \\D_J U_3 &= 72 \text{ in} \\k_e R_1 &= 2.997 \text{ E+09 k-in/radian}\end{aligned}$$

在 7 层和 8 层之间 (属性名称 LINST78)

$$\begin{aligned}k_e U_2 &= 1700.9 \text{ k/in} \\D_J U_2 &= 72 \text{ in} \\k_e U_3 &= 1700.9 \text{ k/in} \\D_J U_3 &= 72 \text{ in} \\k_e R_1 &= 1.998 \text{ E+09 k-in/radian}\end{aligned}$$

橡胶隔离器连接单元有一个线性有效刚度  $k_e$  , 非线性初始刚度  $k$  , 非线性屈服强度  $F_y$ , 屈曲后强度比  $r$ 。  $k_e$  更多信息参见后面 “ 橡胶隔离器单元的线性有效刚度 ” 部分。在  $U_2$  和  $U_3$  自由度上指定且两者一样。橡胶隔离器属性名称 BILIN , 属性为 :

$$\begin{aligned}k_e &= 6.55 \text{ k/in} & F_y &= 12.8 \text{ k} \\k &= 25.6 \text{ k/in} & r &= 0.1887\end{aligned}$$



### 橡胶隔离器单元线性有效刚度

本例使用计算的隔离器有效刚度  $k_e$ , 6.55 kip/in。文献 SUNY Buffalo report 在 SAP2000 模型中使用自定义的小的人工有效刚度 0.0001 kip/in 匹配 3D-BASIS-ME 结果。报告进一步显示当在 SAP2000 模型中使用实际有效刚度 6.55 kip/in 时，报告中的结果低估了 3D-BASIS-ME 结果。

**计算的有效隔离器刚度 6.55 kips/in 是近似值，如校验例子所示，当 SAP2000 模型与 3D-BASIS-ME 模型相等价时，与 3D-BASIS-ME 结果匹配。**

需要指出 3D-BASIS-ME 模型在上部结构中具有 3% 振型阻尼，在隔离系统没有振型阻尼。因此，为使 SAP2000 模型和 3D-BASIS-ME 模型一致，必须对所有振型具有 3% 阻尼，除了振型 1、2、3，它由隔离系统行为控制。因此为了和 3D-BASIS-ME 模型等价，SAP2000 中振型 1、2、3 阻尼设定为 0%，其它设为 3%。

对隔离器使用线性有效刚度 6.55 kip/in 时，SUNY Buffalo 报告中 SAP2000 模型低估了 3D-BASIS-ME 结果，因为 SAP2000 模型对所有振型（包括振型 1、2、3）使用同样 3% 阻尼。因此 SAP2000 模型与 3D-BASIS-ME 不完全等价。

当 SUNY Buffalo 报告中 SAP2000 模型对隔离器使用有效线刚度 0.0001 kip/in 时，结果与 3D-BASIS-ME 结果一致。对隔离器有效刚度使用 0.0001 kip/in 时，使得隔震振型分别为（振型 1、2、3）528、512、435 秒。注意整个地震持续时间大约 44 秒，很明显很少的能量被振型 1、2、3 吸收。因此使相应的阻尼大约是 0%，这和 3D-BASIS-ME 相协调一致。

还有，推荐使用实际有效刚度并调整和隔离振型相关联的振型阻尼。而不是使用一个虚构的小有效刚度。

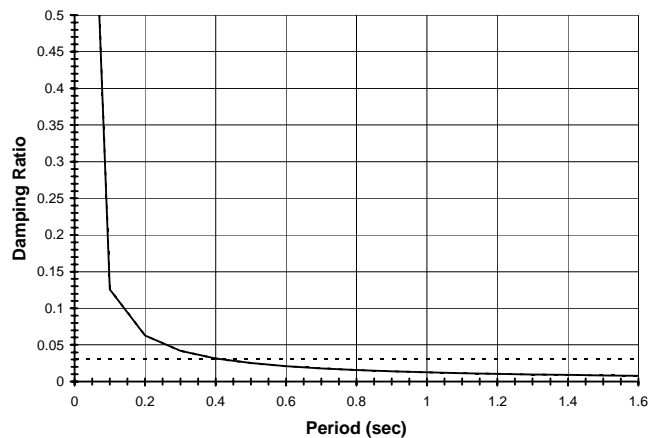
注意前面的讲述只对非线性振型时程分析工况。与非线性直接时间积分工况无关。隔震器的线性有效刚度只在线性工况。在本校验手册中，唯一的线性分析工况是振型分析工况 RITZ。非线性振型时程和非线性时程直接积分工况都使用隔震器的非线性属性，不是线性属性。然而，非线性振型时程使用基于隔震器线性有效刚度。因此，非线性振型时程分析工况间接

受到隔震器线性有效刚度影响，但非线性直接积分工况不受线性隔震器属性影响。

## 直接积分时程比例阻尼

非线性直接时程积分分析工况 NLDHIST1 使用比例质量刚度阻尼。对这种分析工况，主要是找出合适的比例阻尼近似所有振型的 3% 阻尼，除了隔震振型（振型 1、2、3），它们有 0% 阻尼。隔震振型近似周期 2 秒，上部结构周期范围近似从 0.06 到 0.60 秒。

对本例，比例阻尼仅仅指定为刚度比例质量系数等于零，刚度比例系数等于 0.0040。右图中实线画出使用的比例阻尼结果。虚线显示常 3% 阻尼。



## SAP2000 测试的技术特点

- 橡胶隔离器连接
- 线性连接
- 零长度，两点连接单元
- 隔板约束
- 里兹向量振型分析
- 非线性时程分析
- 非线性时程直接积分
- 广义位移

## 结果比较

独立结果用计算机程序 3D-BASIS-ME 得到(参见文献 Tsopelas, Constantinou and Reinhorn 1994).

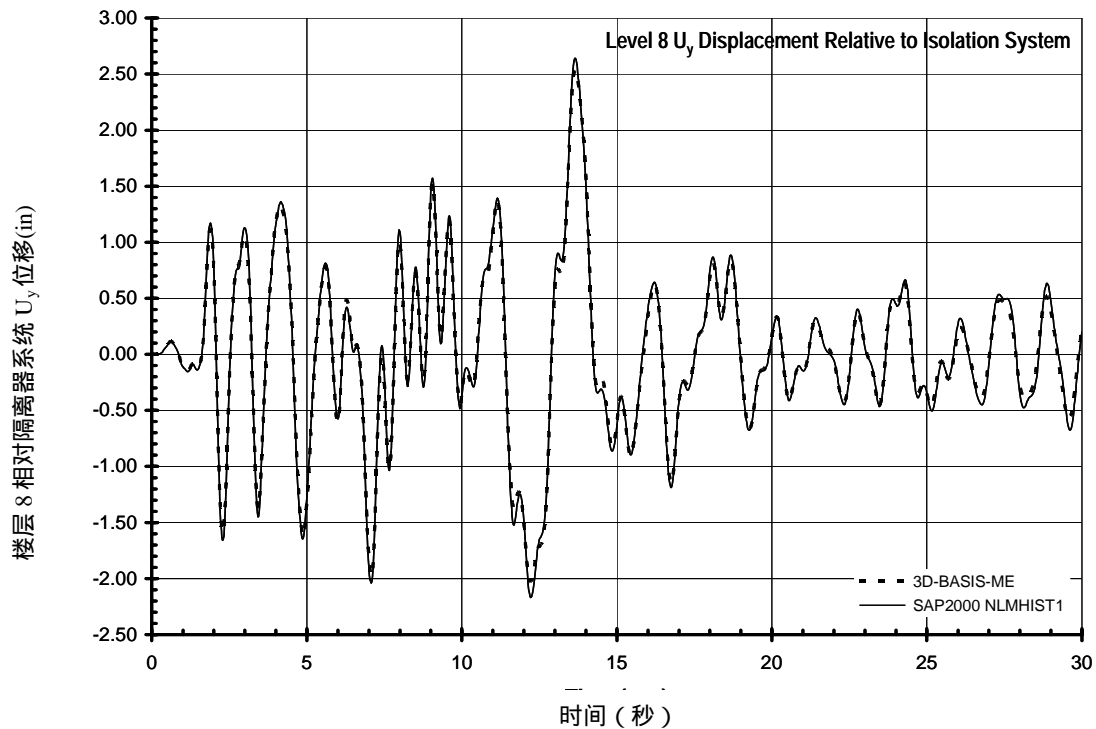
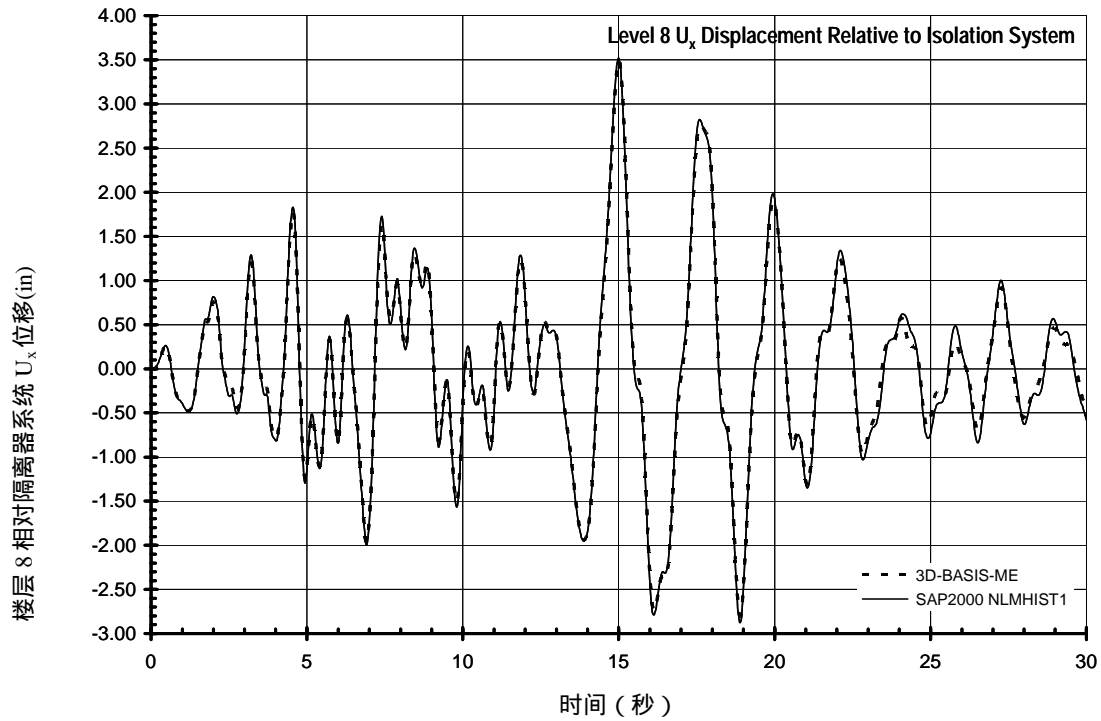
下面的八个图绘出从 3D-BASIS-ME 和 SAP2000 分析工况 NLMHIST1 (非线性振型时程) 结果。SAP2000 中 NLDHIST1 工况 (非线性直接时程分析) 分析结果类似。绘出下列图：

- 第 8 层相对隔震系统 X 方向直接位移
- 第 8 层相对隔震系统直接位移 Y 方向
- 第 8 层相对隔震系统 Z 方向转角
- X 方向基底剪力
- 第 3 层 X 方向绝对加速度
- 第 3 层 Y 方向绝对加速度
- X 方向连接 23 力 - 变形
- Y 方向连接 23 力 - 变形

SAP2000 中，第 8 层相对于隔震系统的位移和转角由广义位移确定。广义位移定义为从节点 62 的位移或转角减去节点 23 的。

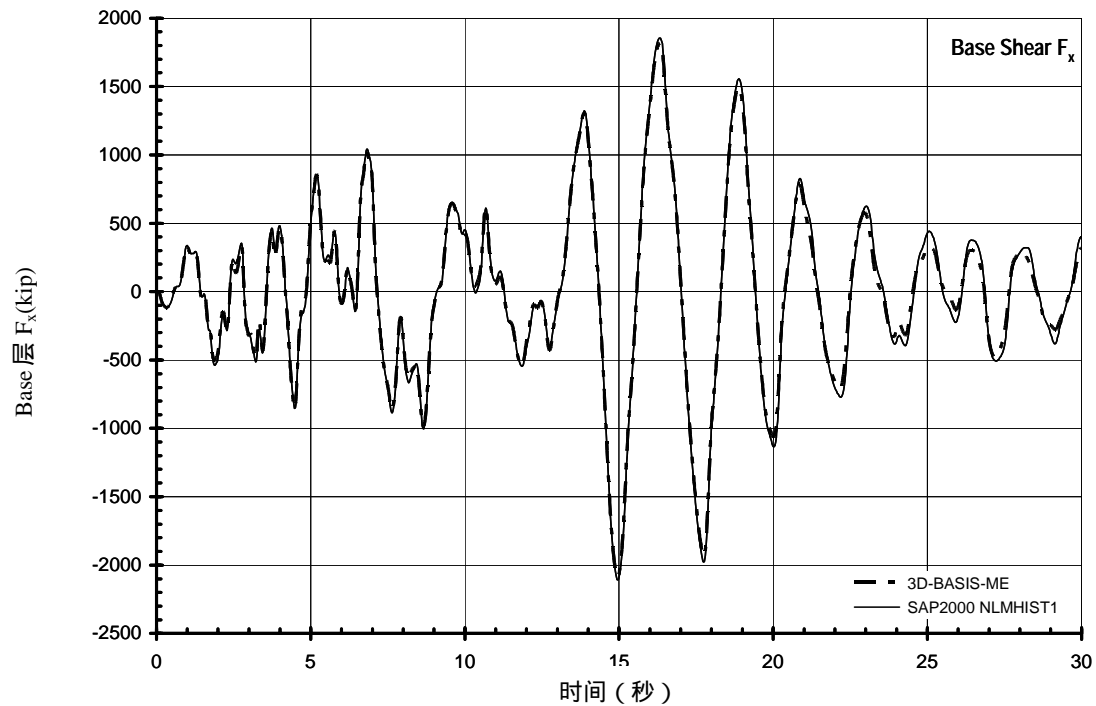
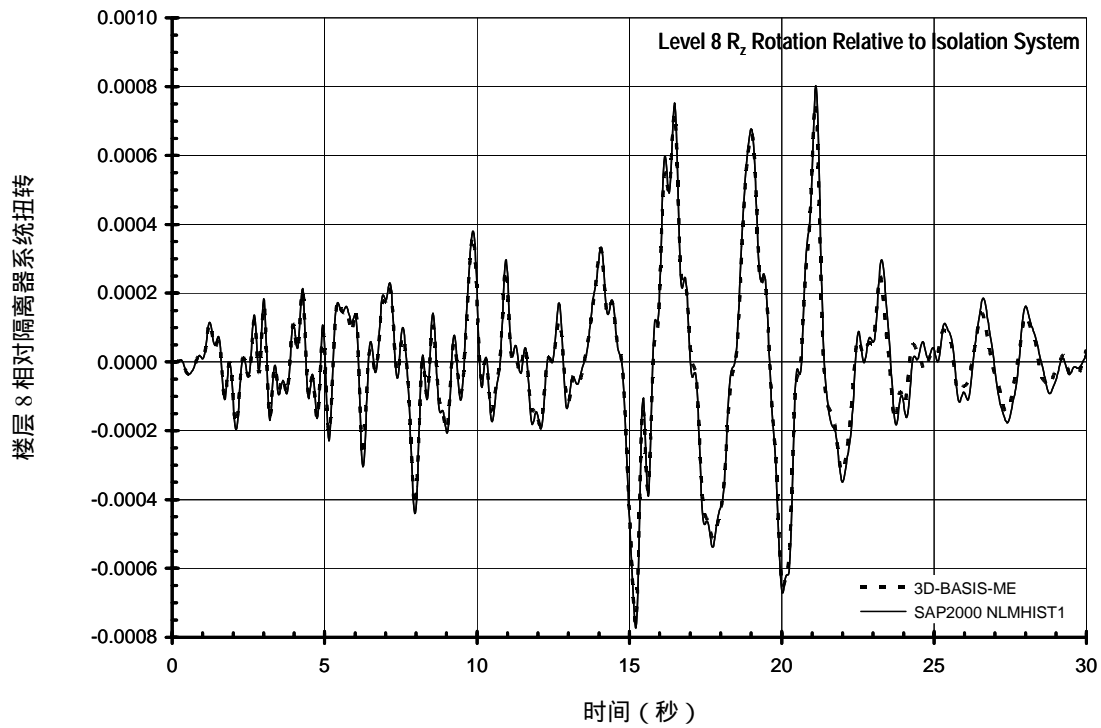
# Software Verification

PROGRAM NAME: SAP2000  
 REVISION NO.: 0



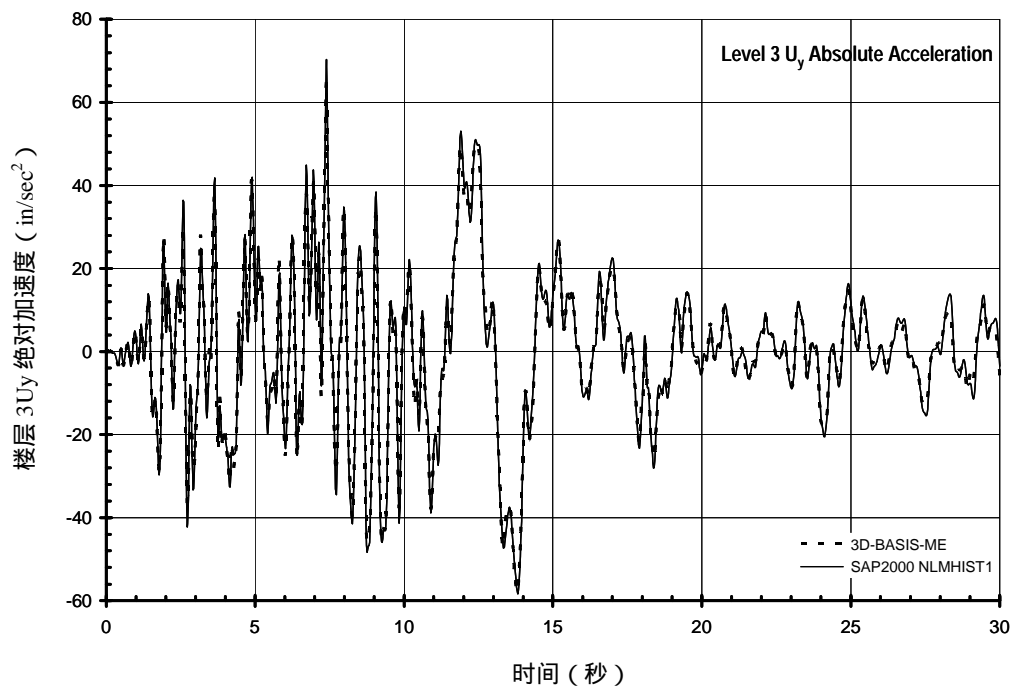
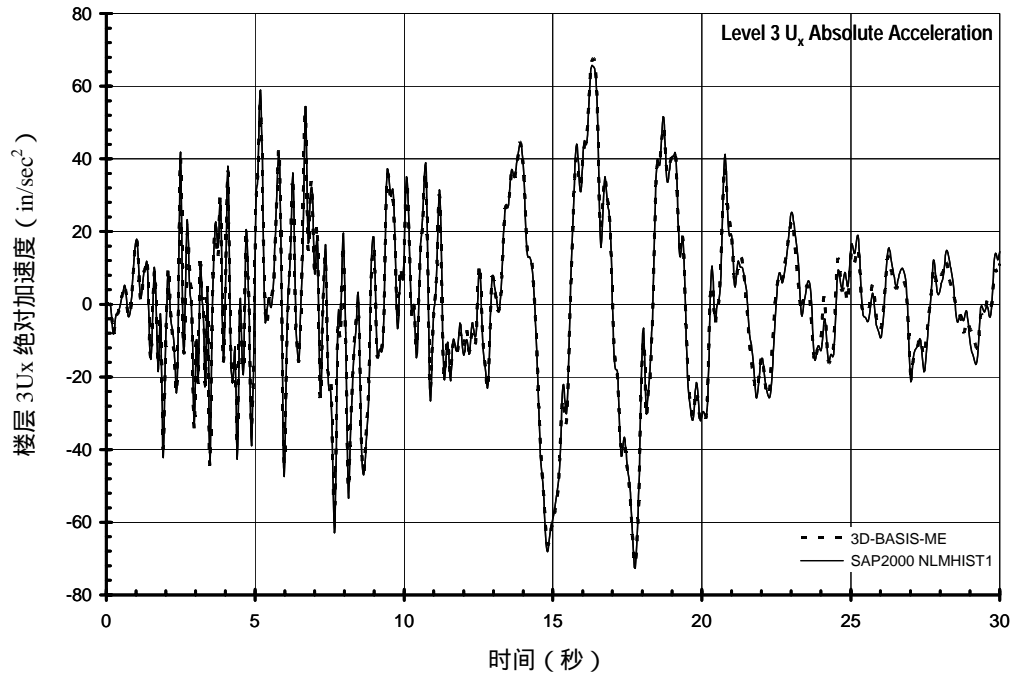
# Software Verification

PROGRAM NAME: SAP2000  
 REVISION NO.: 0



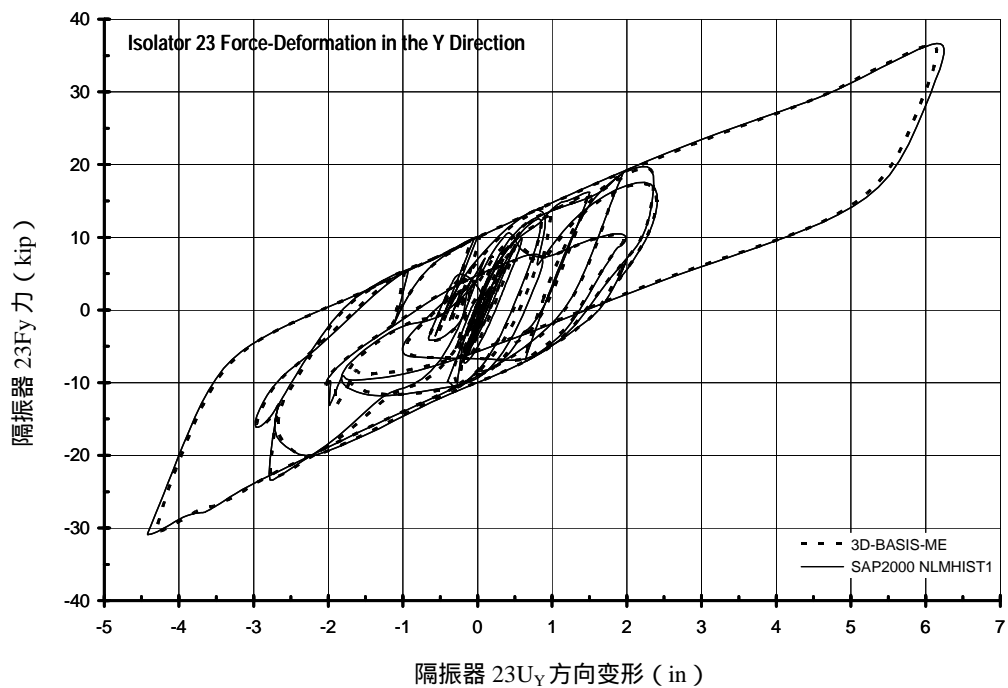
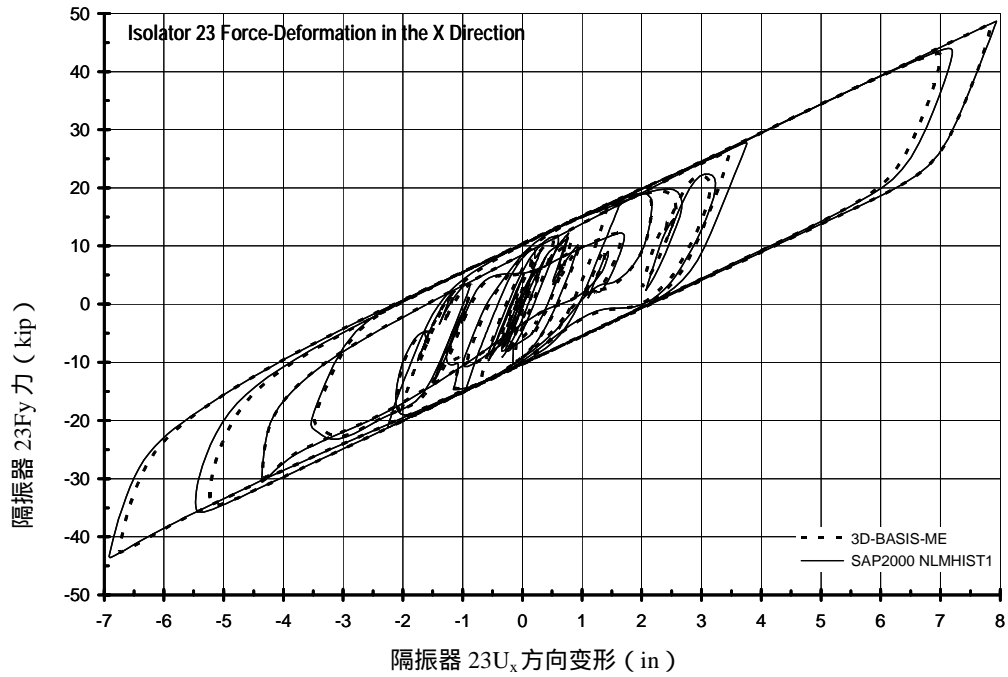
# Software Verification

PROGRAM NAME: SAP2000  
 REVISION NO.: 0



# Software Verification

PROGRAM NAME: SAP2000  
 REVISION NO.: 0



下表比较前面图中输出项的最大最小值。对振型时程分析工况 NLMHIST1 和 直接时程分析工况 NLDHIST1 都进行比较。

输出参数	方向与 Dir Max/Min	分析工况	SAP2000	独立结果 3D-BASIS-ME	误差百分比
第 8 层相对于 隔离系统位移 (in)	U <sub>x</sub> Max	NLMHIST1	3.521	3.494	+1%
		NLDHIST1	3.504		0%
	U <sub>x</sub> Min	NLMHIST1	-2.875	-2.804	+3%
		NLDHIST1	-2.911		+4%
	U <sub>y</sub> Max	NLMHIST1	2.642	2.538	+4%
		NLDHIST1	2.729		+8%
	U <sub>y</sub> Min	NLMHIST1	-2.167	-2.029	+7%
		NLDHIST1	-2.211		+9%
第 8 层相对于 隔离系统转角 (rad)	R <sub>z</sub> Max	NLMHIST1	0.00080	0.00075	+7%
		NLDHIST1	0.00077		+3%
	R <sub>z</sub> Min	NLMHIST1	-0.00077	-0.00076	+1%
		NLDHIST1	-0.00076		0%
X 方向基底 剪力 (kip)	F <sub>x</sub> Max	NLMHIST1	1854	1818	+2%
		NLDHIST1	1873		+3%
	F <sub>x</sub> Min	NLMHIST1	-2109	-2089	+1%
		NLDHIST1	-2091		0%



PROGRAM NAME: SAP2000  
REVISION NO.: 0

输出参数	方向与 Max/Min	分析 工况	SAP2000	独立 3D-BASIS-ME	误差百分比
第 3 层 3 (节点 57) 绝对加速度 (in/sec <sup>2</sup> )	U <sub>x</sub> Max	NLMHIST1	65.76	67.73	-3%
		NLDHIST1	70.03		+3%
	U <sub>x</sub> Min	NLMHIST1	-72.71	-71.47	+2%
		NLDHIST1	-72.85		+2%
	U <sub>y</sub> Max	NLMHIST1	70.36	64.96	+8%
		NLDHIST1	61.60		-5%
	U <sub>y</sub> Min	NLMHIST1	-58.35	-57.78	+1%
		NLDHIST1	-57.65		0%
隔离器 23 剪力 (kip)	F <sub>x</sub> Max	NLMHIST1	48.66	48.17	+1%
		NLDHIST1	48.18		0%
	F <sub>x</sub> Min	NLMHIST1	-43.55	-42.68	+2%
		NLDHIST1	-43.54		+2%
	F <sub>y</sub> Max	NLMHIST1	36.65	36.38	+1%
		NLDHIST1	36.53		0%
	F <sub>y</sub> Min	NLMHIST1	-30.91	-30.54	+1%
		NLDHIST1	-30.78		+1%
隔离器 23 变形 (in)	U <sub>x</sub> Max	NLMHIST1	7.935	7.845	+1%
		NLDHIST1	7.828		0%
	U <sub>x</sub> Min	NLMHIST1	-6.916	-6.746	+3%
		NLDHIST1	-6.905		+2%
	U <sub>y</sub> Max	NLMHIST1	6.247	6.150	+2%
		NLDHIST1	6.200		+1%
	U <sub>y</sub> Min	NLMHIST1	-4.419	-4.304	+3%
		NLDHIST1	-4.400		+2%

PROGRAM NAME: SAP2000  
REVISION NO.: 0

文件: Example 6-010

## 结论

对隔震结构使用不同模型和求解技术，SAP2000 结果与独立计算 3D-BASIS-ME 结果比较是符合的。结果比较在图形中的对比很清楚。