

# 基础隔震建筑变刚度保护装置

杨 林<sup>1</sup>, 周锡元<sup>1</sup>, 苏幼坡<sup>2</sup>, 常永平<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学 工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京 100022;

2. 河北理工大学 河北省地震工程研究中心, 河北 唐山 063009)

**摘 要:** 为了防止橡胶支座在低频激励下失稳破坏, 按照多质点结构分析模型推导了不附加、右侧、左侧附加弹簧的运动方程及偏置方程, 编制了相应的分析程序. 通过在隔震层增设变刚度隔震保护装置作为第 2 道防线, 进行了 5 层框架的变刚度隔震保护模拟地震振动台试验. 理论分析和试验结果表明, 变刚度隔震保护装置能有效改变结构动力特性, 减小隔震层的变形, 使之限制在允许的范围内, 从而防止了橡胶垫失稳破坏, 同时还能使上部结构的层间剪力不明显增大.

**关键词:** 基础隔震; 叠层钢板橡胶支座; 变刚度

**中图分类号:** TU 352

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0254-0037(2006)02-0126-07

中低层的砌体房屋采用叠层钢板橡胶支座进行基础隔震, 可以较大地提高抗震能力<sup>[1-3]</sup>, 但也存在一些不足. 当隔震建筑遭遇地震波中的低频成分时仍存在发生类共振或共振的可能性. 由于隔震层的刚度仅为上部结构层间刚度的 1%, 甚至更小, 变形将集中发生在隔震层. 出于经济方面的考虑, 橡胶支座直径不可能用得太大, 地震时的水平位移就有可能超过其变形极限, 导致失稳现象发生<sup>[4-9]</sup>. 文献[5]提出了一种增加变刚度隔震保护装置的措施, 不仅可用于限制橡胶支座的水平变形, 控制上部结构地震反应, 且费用不高, 不失为一种可供选择的新途径. 作者对这一途径作了进一步的理论分析, 研制了附加弹簧与隔震层的联结装置, 应用这种装置实现了变刚度保护控制, 进行了振动台模型试验, 从试验和理论分析方面证实了变刚度保护装置的效果. 该措施特别适用于一般的多层建筑和别墅等具有较小橡胶支座的小型建筑. 这类建筑由于上部结构质量较轻, 为延长隔震建筑的周期, 只能使用直径较小的橡胶支座, 相应的水平变形能力也比较小.

## 1 基本原理

变刚度隔震保护装置的设置见图 1、图 2, 分别表示附加限位弹簧前后隔震层和保护装置的情况. 图中, 距离  $d$  为变刚度隔震保护装置的设计预留距离. 其变刚度思想来源于对地震位移反应谱的观察和分析. 事实上, 不同的地震位移反应谱常常具有相同的特性, 即随着自振周期的增大, 位移反应的谱值也随之增大. 因此, 建议在距离隔震层一定位移处设置弹簧保护装置和与其串联的限位挡板, 总称为变刚度隔震保护装置. 变刚度隔震保护装置恢复力与位移本构关系(考虑右侧附加)如图 3 所示. 其中, 设  $k_2$  为隔震层刚度;  $k_b$  为附加弹簧的刚度. 当隔震层的水平变形达到  $d$  时, 附加弹簧便和隔震层永远连接在一起, 并和橡胶支座一起运动, 不再分开, 此时隔震层刚度变为  $k_2 + k_b$ . 作者提出的变刚度隔震保护装置在遭遇多遇地震或高频地震动时, 将不与隔震层发生附加, 能够充分发挥橡胶支座的隔震性能. 当隔震建筑遭遇罕遇地震或长周期地震作用而使橡胶支座变形超过允许位移时, 附加的变刚度保护装置才和隔震层橡胶支座连接在一起, 随同橡胶支座一起运动, 通过改变隔震建筑物的自振周期, 避开场地卓越周期, 将隔震层的变形限制在允许范围以内. 由于本装置通过 1 次附加改变隔震层刚度, 因此有效地抑制了硬碰撞高频

收稿日期: 2005-10-21.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50178007); 北京市重点实验室开放研究课题资助项目(00434).

作者简介: 杨 林(1978-), 男, 河北唐山人, 博士生.

振动对上部结构的不利影响。

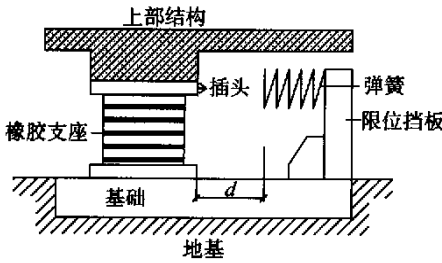


图 1 附加弹簧前的隔震保护装置示意图  
Fig.1 Pre-affixation schematic diagram

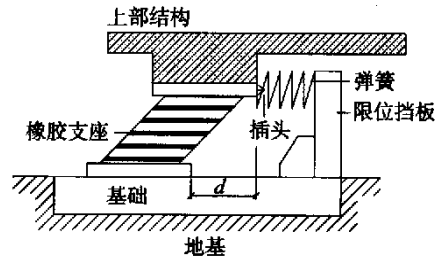


图 2 附加弹簧后的隔震保护装置示意图  
Fig.2 Post-affixation schematic diagram

## 2 力学模型

图 4 所示为考虑土-结构平动相互作用的力学模型。其中,  $m_i, k_i, c_i (i = 3, \dots, n)$  为上部结构各层的质量、刚度和阻尼;  $m_2, k_2, c_2$  为隔震层的质量、刚度和阻尼;  $m_1, k_1, c_1$  为基础的质量、地基土的等效刚度和等效阻尼; 变刚度隔震保护装置的质量很小, 可以忽略不计;  $k_b$  由其与隔震层的刚度之比  $N$  来确定, 即  $k_b = Nk_2$ 。上部结构的层间刚度取双折线恢复力模型, 叠层橡胶垫支座和弹簧力学模型可简化为线弹性模型。

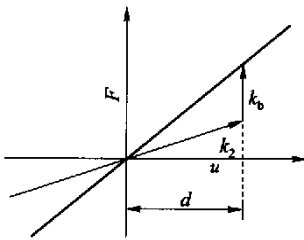


图 3 隔震层恢复力模型  
Fig.3 Restoring force model of isolated layer

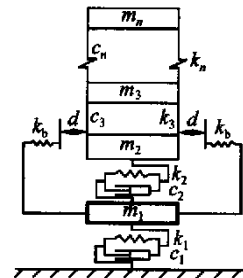


图 4 力学模型  
Fig.4 Mechanical model

## 3 系统运动方程

当  $-d \leq x_2(t) \leq d$  时, 变刚度隔震保护装置将不发挥作用, 其运动方程为

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = -M\ddot{X}_g \quad (1)$$

其中,  $M$  为  $n \times n$  阶质量对角阵;  $C, K$  为  $n \times n$  阶三对角阵;  $X, \dot{X}, \ddot{X}$  分别为  $n$  阶位移、速度、加速度矢量;  $\ddot{X}_g$  为输入地震加速度。

当  $x_2(t) > d$ , 也就是当隔震层的层间位移大于预留距离  $d$  时, 隔震层将与右侧变刚度隔震保护装置附加。运动方程可写为

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + \overline{K}X = -M\ddot{X}_g + K_b D \quad (2)$$

其中  $\overline{K}$  为等效刚度矩阵, 并有

$$\overline{K} = K + K_b \quad (3)$$

$$K_b = \begin{bmatrix} k_b & -k_b & \cdots & 0 \\ -k_b & k_b & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{Bmatrix} d \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

当  $x_2(t) < -d$ , 也就是当隔震层的层间位移小于预留距离  $d$  时, 隔震层将与左侧变刚度隔震保护装置附加. 运动方程可写为

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + \overline{K}X = -M\ddot{X}_g - K_b D \quad (5)$$

式(1)、(2)、(5)都是二阶线性微分方程, 适用于不同的运动状态. 因此, 文中所讨论的变刚度保护系统具有分段线性的特征, 可用标准的求解方法完成数值计算, 但要注意满足状态转换过程中的连续条件.

### 4 隔震层零点偏移

图5为右侧单边附加偏置弹簧时引起的零点偏移示意图, 此处将隔震层简化成一质点  $m_2$  进行分析. 当质点  $m_2$  移位到  $d$  时, 偏置的  $k_b$  将永远与  $k_2$  (可将隔震层水平刚度  $k_2$  视为一弹簧刚度) 联结在一起. 当外力撤除以后, 质点将在2个弹簧力作用下偏移至新的平衡位置  $x$ . 根据力的静力平衡条件, 有

$$xk_2 = (d - x)Nk_2 \quad (6)$$

由此可得

$$x = Nd / (1 + N) \quad (7)$$

图6所示曲线即为  $x/d$  与  $N$  的关系曲线.

由此求得的零点偏移即是加上偏置弹簧以后的平衡位置, 它可以用来检验时程分析结果, 其中  $x$  值即是地震结束时的残余位移. 存在这样的残余位移并不是期望的, 当然希望它不要太大, 因此应该控制  $N$  的值不要太大.

如图7所示, 当2边对称布置相同刚度的偏置弹簧时, 假设质点  $m_2$  首先和右边的偏置弹簧挂上并发生偏移  $x$ . 若挂上右侧偏置弹簧的质点  $m_2$  向左运动时位移仍然超过  $d$ , 则与左侧弹簧挂上. 按照同样的考虑, 挂上左边的偏置弹簧后的平衡位置  $y$  可从力的平衡条件式

$$(k_2 + Nk_2)(x + y) = (d - y)Nk_2 \quad (8)$$

中解出. 则

$$y = [dN - x(1 + N)] / (1 + 2N) \quad (9)$$

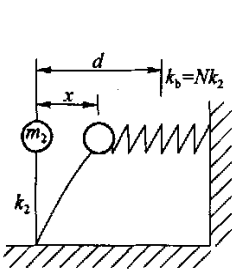


图5 右侧零点偏移示意图  
Fig.5 Schematic diagram of right migration

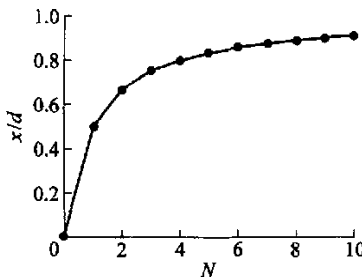


图6  $x/d$  与  $N$  关系曲线图  
Fig.6 Relation curve between  $x/d$  and  $N$

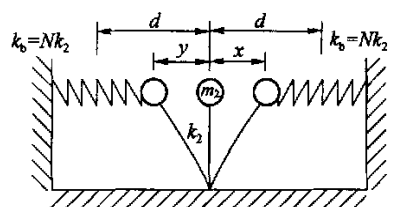


图7 两侧零点偏移示意图  
Fig.7 Schematic diagram of migration on both sides

将式(7)代入式(9), 得

$$y = 0 \quad (10)$$

式(10)说明当2边对称布置偏置弹簧时, 若2边弹簧均能挂上, 则当地震结束时隔震层不存在残余位移, 橡胶支座恢复到原来的平衡位置.

## 5 振动台试验

振动台试验在北京工业大学北京市工程抗震与结构诊治重点实验室进行,采用 MTS 公司生产的  $3\text{ m} \times 3\text{ m}$  的水平单向振动台。台面质量:6 t;最大承载质量:10 t;空载时最大加速度:2.5 g;满载时最大加速度:1.0 g;最大位移:127 mm;最大速度:600 mm/s;最大扭矩: $3 \times 10^4\text{ kg}\cdot\text{m}$ ;频率范围:0.1~50 Hz。

结构模型平面尺寸为  $1.1\text{ m} \times 1\text{ m}$ ,总高为 3 m,共 6 层,层高 0.5 m,平面尺寸为  $1.196\text{ m} \times 1.196\text{ m}$ 。模型由各种型钢焊接组成。柱为  $\text{L} 75 \times 10$  的等边角钢,梁为 10# 普通槽钢。所有钢材均用普通 3# 钢。为了防止倾覆及橡胶垫发生提高,只使用 1~4 层并添加配重。各层配重如下:隔震层质量 880 kg,第 1、2 层质量均为 980 kg,第 3 层质量为 850 kg,第 4 层质量为 370 kg,模型总质量为 4 060 kg。本试验钢框架模型比例为 1:4,其相似关系为:几何尺寸为 1/4;应力为 1/1;质量为 1/16;弹性模量为 1/1;位移为 1/4;加速度为 1/1;时间为 1/2。试验共采用了 4 个叠层橡胶支座作为模型的隔震支座,橡胶支座尺寸见图 8。支座总高度 88 mm,内径 50 mm,外径 75 mm,第 1 形状系数 5.63,第 2 形状系数 3.17,剪切模量 0.6 MPa,竖向刚度 1 245 kN/mm,水平刚度 0.5 kN/mm。

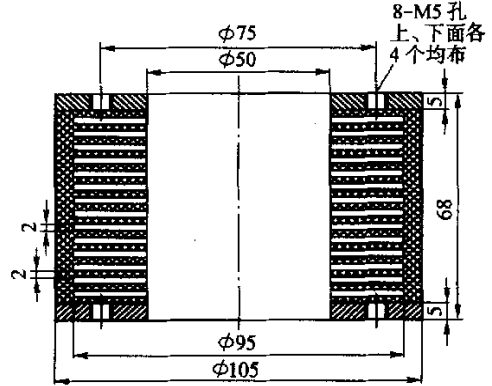


图 8 橡胶支座尺寸

Fig. 8 Size diagram of rubber bearing

本试验中,作者自行设计了 1 套变刚度隔震保护装置,包括插头、插槽、弹簧。其中插槽里面包括销子和紧固弹簧(见图 9)。弹簧刚度为  $1 \times 10^3\text{ kg/cm}$ 。最后将变刚度装置部件组合安装,其整体装配图如图 10 所示。保护装置与橡胶支座的设计中  $d$  取为 2 cm。

最后将变刚度装置部件组合安装,其整体装配图如图 10 所示。保护装置与橡胶支座的设计中  $d$  取为 2 cm。

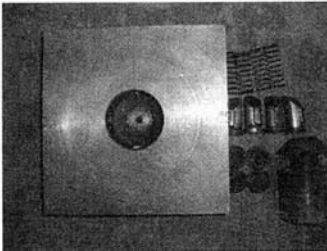


图 9 保护装置整体分解图

Fig. 9 Disassembled diagram of the device

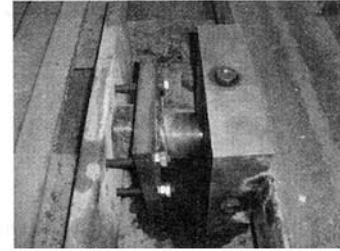


图 10 装置安装组合图

Fig. 10 Assembled diagram of the device

本试验采用了 1 套独立于振动台系统的振动测试系统。它由 5 套位移传感器、7 套加速度传感器、数据采集系统和计算机组成,用来测量并记录钢框架各层及隔震层的位移响应,而且可以在线显示测试结果。该系统用于试验结果的分析。

试验中输入 1940-05-18 El-Centro N-S 方向的地震加速度时程作为振动台振动的驱动信号。试验包括下列内容:

- 工况 1 模型右侧设置变刚度隔震保护装置,  $N$  为 1, El-Centro N-S 地震波加速度峰值 0.6 g。
- 工况 2 模型右侧设置变刚度隔震保护装置,  $N$  为 0.5, El-Centro N-S 地震波加速度峰值 0.6 g。
- 工况 3 模型左、右侧同时设置变刚度隔震保护装置,两侧  $N$  均为 0.5, El-Centro N-S 地震波加速度峰值 0.6 g。
- 工况 4 模型未设置变刚度保护装置设置,进行叠层橡胶垫隔震试验, El-Centro N-S 地震波加速度峰值 0.6 g。

### 6 试验结果分析与讨论

经测试,上部结构框架自振频率为 14.286 Hz,阻尼比 0.02;叠层橡胶垫隔震模型自振频率为 3.571 Hz,阻尼比为 0.05.

试验研究表明:隔震层位移不仅能显示橡胶支座的变形状态,还能反应变刚度隔震保护装置的控制效果及附加弹簧位移情况.图 11 为隔震层与弹簧位移各工况时程曲线.为防止隔震层橡胶支座失稳,根据有关试验结果,在本试验中隔震层允许位移取 30 mm.按照表 1 中的相似关系,原型结构的相应位移为 120 mm.

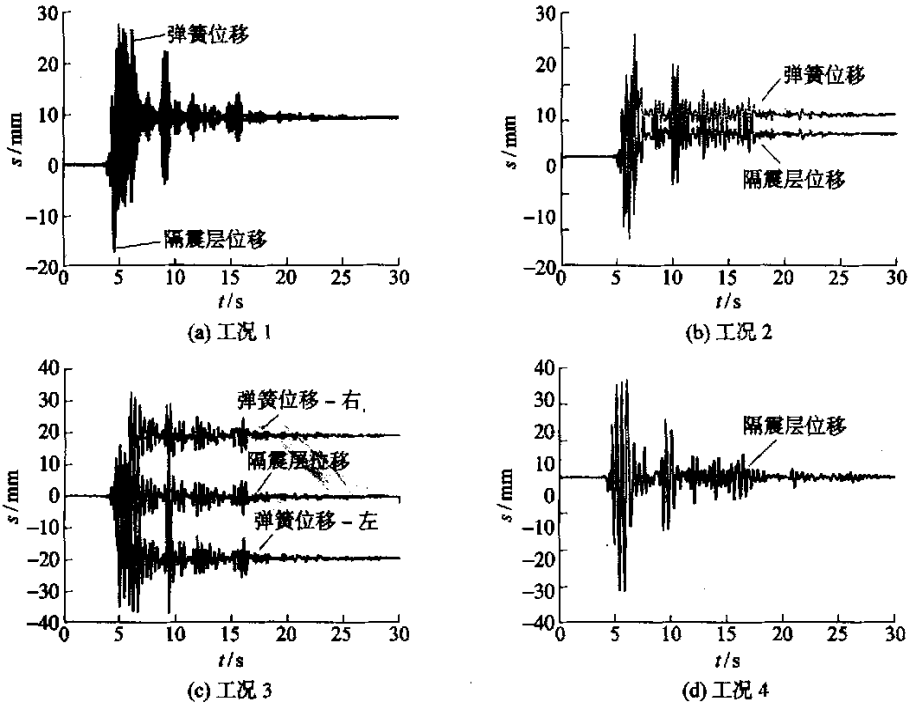


图 11 隔震层与弹簧位移各工况时程曲线

Fig. 11 Time history displacement curve of isolated layer and spring

变刚度隔震保护装置不仅要控制隔震层的过大变形,而且还要将上部结构的最大层间位移控制在允许位移范围内.也就是说控制上部结构的最大层间剪力,使其不显著增大并且小于结构允许的最大层间剪力值.该试验模型层间设计允许位移为 0.4 cm,则上部结构第 1 层设计允许剪力为 171.2 kN.

本文运用 Fortran77 语言采用 Wilson- $\theta$  法编制了相应的分析程序 PROTECT.FOR,  $\theta$  取 1.4. 其理论计算与试验分析结果见表 1.

### 7 结论

- 1) 变刚度隔震保护装置振动控制系统的总体设计是合理可行的,变刚度隔震保护装置的各组成部分及相互间的连接方式都达到了预期的设计目标.
- 2) 表 1 中表明理论分析和试验结果相一致,证明了作者提出的理论分析方法是正确可行的.
- 3) 由表 1 中工况 1~3 的试验与理论分析可知:隔震层最大位移随变刚度隔震保护装置刚度的增大而减小,且均未超过隔震层允许位移;上部结构最大层间剪力则随变刚度隔震保护装置刚度的增大也只是

表1 理论与试验结果对比

Tab.1 Contrast of theoretical and experimental results

工况	隔震层最大层间位移/mm				上部结构最大层间剪力/kN			
	理论		试验		理论		试验	
	模型	原型	模型	原型	模型	原型	模型	原型
1	25.240	100.960	24.014	96.056	94.599	1 513.584	89.441	1 431.056
2	27.760	111.040	26.540	106.160	72.525	1 160.400	68.351	1 093.616
3	25.390	101.560	24.220	96.880	89.469	1 431.504	74.179	1 186.864
4	31.850	127.420	31.310	125.240	52.682	842.912	52.644	842.304
工况	橡胶支座偏离平衡位置位移/mm				左、右侧弹簧偏离平衡位置位移/mm			
	理论		试验		理论		试验	
	模型	原型	模型	原型	模型	原型	模型	原型
1	10.000	40.000	9.232	36.928	10.000	40.000	9.351	37.404
2	6.667	26.668	6.598	26.392	13.333	53.332	12.004	48.016
3	0.000	0.000	0.386	1.544	20.000	80.000	18.957	75.828
4	31.855	127.420	31.313	125.252	20.000	80.000	19.085	76.340

略有增大,但最大值均未超过设计允许剪力。

4) 由表1中工况4数据结果可知:在未设置变刚度隔震保护装置的情况下,振动台输入的地震波周期和隔震模型周期相近,模型结构发生类共振,因此隔震层的位移增大,远远超过了隔震层允许位移,橡胶支座已出现失稳破坏。

5) 由表1各工况数据结果可知,右侧设置与左右侧同时设置变刚度隔震保护装置其控制效果相当,因此,实际工程中只需在结构一侧设置变刚度保护装置,即可有效地实现变刚度的控制效果。

6) 如果采用变刚度隔震方案保护隔震支座和上部结构的安全,实际工程中对变刚度隔震保护装置本身的参数(如弹簧刚度、弹性变形等)还应该进行深入研究和设计,并在此基础上开发出适合于实际隔震建筑应用的高性能机构。

7) 本文中的试验只考虑了单向输入,尚未考虑扭转作用和竖向地震的影响。有关多维地震作用的问题也还有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] KELLY J M. The analysis and design of elastomeric bearings for application in bridges[R]. Buffalo: MCEER, 1998.
- [2] 俞茂宏, 马国伟, 王一兵, 等. 砖混建筑结构基础隔震分析[J]. 建筑结构学报, 1996, 17(4): 52-59.  
YU Mao-hong, MA Guo-wei, WANG Yi-bing, et al. Analysis of base isolation of brick masonry building structure[J]. Journal of Building Structures, 1996, 17(4): 52-59. (in Chinese)
- [3] BRUCE F M, CARLOS E V. Seismic analysis of base-isolated san bernardino county building[J]. Earthquake Spectra, 1992, 8(4): 12-16.
- [4] KELLY J M, BEUCKE K E. A friction damped base isolation system with fail-safe characteristics[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1983, 11(1): 33-56.
- [5] ZHOU Xi-yuan, HAN Miao, YANG Lin. Study on protection measures for seismic isolation rubber bearings[J]. ISET Journal of Earthquake Technology, 2003, 40(2): 137-160.
- [6] 韩森, 周锡元. 基础隔震建筑软碰撞保护分析[J]. 建筑科学, 1999, 15(1): 14-20.  
HAN Miao, ZHOU Xi-yuan. Analysis of soft-collision safety for base isolated buildings[J]. Building Science, 1999, 15(1): 14-20. (in Chinese)
- [7] 周锡元, 韩森, 曾德民, 等. 具有软着陆保护的橡胶支座隔震体系[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(5): 1-10.  
ZHOU Xi-yuan, HAN Miao, ZENG De-min, et al. Rubber bearing isolation system with soft landing protection[J]. Journal

of Building Structures, 2000, 21(5): 1-10. (in Chinese)

- [8] 杨林, 周锡元, 苏幼坡, 等. 基础隔震建筑简化软碰撞保护与变刚度保护的对比分析基础[J]. 工程抗震与加固改造, 2005, 27(5): 37-44.

YANG Lin, ZHOU Xi-yuan, SU You-po, et al. Contrastive analysis of simplified soft-collision and stiffness variable protection for base isolated buildings[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2005, 27(5): 37-44. (in Chinese)

- [9] 韩淼, 王秀梅. 基础隔震层软碰撞限位试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2005, 27(3): 70-71.

HAN Miao, WANG Xiu-mei. Experimental study on soft pounding limiting deformation of base isolating layer[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2005, 27(3): 70-71. (in Chinese)

## Variable Stiffness Protection Device of Rubber Bearings in Seismic Isolated System

YANG Lin<sup>1</sup>, ZHOU Xi-yuan<sup>1</sup>, SU You-po<sup>2</sup>, CHANG Yong-ping<sup>2</sup>

(1. Beijing Key Lab of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2. Earthquake Engineering Research Center, Hebei Polytechnic University, Tangshan, Hebei 063009, China)

**Abstract:** This article deduced the equation of motion for non-affixation of spring, right affixation of spring and left affixation of spring on the basis of the multi-particle structural analytic model, and developed the computer program to prevent the failure of rubber bearing under low-frequency excitation. A shaking table test of a five-floor steel-frame model was completed successfully in Beijing University of Technology. The results showed that the variable stiffness isolated protection device can effectively reduce the horizontal deformation to prescribed limits, and can prevent the rubber bearings from failure because the dynamic character of the structure has been changed, and can make the interlayer shear forces in the super-structure increase slightly.

**Key words:** base isolation; laminated rubber bearing; stiffness