

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.06.006

钢筋沥青隔震墩振动台试验及地震响应有限元分析

尚守平, 周 浩

(湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082)

摘 要:在足尺钢筋沥青隔震墩砌体房屋的正弦激励振动台试验的基础上,用有限元分析软件 ANSYS 建立适当的空间模型并对其进行数值模拟。将分析结果与足尺模型振动台试验结果进行比较,结果表明:有限元分析结果与试验结果基本一致,证明了本有限元在钢筋沥青隔震墩分析中的适用性。在此基础上,用本有限元程序分别对隔震和非隔震有限元模型进行地震响应分析,得出相关结论:相同地震波作用下隔震层的位移随输入幅值的增大而增大;隔震模型的顶部加速度幅值与第 1 层层间位移幅值小于非隔震模型,表明隔震层在地震波作用下隔震性能良好,大幅度降低了上部结构的底部剪力。

关键词:隔震;钢筋沥青隔震墩;振动台试验;地震响应分析;隔震性能

中图分类号:TU375

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2014)06-038-07

Shaking table test and finite element analysis of seismic response in reinforced asphalt isolation pier

SHANG Shouping, ZHOU Hao

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Sinusoidal excitation shaking table test of full-scale reinforced asphalt isolation pier masonry building is carried out, and ANSYS is applied to set appropriate space finite element model, and then numerical simulation is given to the isolation pier. Comparison of both results of numerical simulation and shaking table test indicates that they agree well with each other. The result shows the applicability of finite element in reinforced asphalt isolation pier analysis. Seismic response analysis is given to the isolation and non-isolation model, and the result shows displacement of isolation layer is increased with the increase of input amplitude under same seismic excitation. The acceleration amplitude at the top of structure and story displacement of isolation model is less than that of non-isolation model, which indicates that the isolation layer has an excellent performance under seismic action, and it reduces the shear force of upper structure.

Key words: isolation; reinforced asphalt isolation pier; shaking table test; seismic response analysis; isolation performance

基础隔震是一种有效的防震减灾技术^[1-3],它是将隔震装置放置于房屋的基础与上部结构之间,由于隔震装置的刚度远小于上部结构的层间刚度,故在地震作用下上部结构的响应会大大减小,从而减小上部结构在地震作用下的损伤程度。以往的隔震技术^[4-7]要么构造复杂,要么造价高昂,难以在实际工程中普遍推广,因此急需一种廉价高效的实用隔震技术。

收稿日期:2013-12-04

基金项目:国家十二五科技支撑计划资助项目(2011BAJ08B00)

作者简介:尚守平(1953-),男,湖南大学教授,博士,主要从事土与结构动力相互作用、结构加固、隔震研究,
(E-mail)sps@hnu.edu.cn。

钢筋沥青隔震墩就是这样一种新型的基础隔震技术,它主要包括混凝土上墩、混凝土下墩、混凝土侧墩、隔震钢筋以及沥青油膏^[8-9]。其中,隔震钢筋是主要的受力构件,以受压和受弯为主;混凝土上墩和下墩用来固定隔震钢筋的两端,确保隔震钢筋的可靠工作;在罕遇地震作用下,隔震层位移较大时,上部结构可坐落在混凝土侧墩上,以保证结构不至于倒塌;沥青油膏用来保护隔震钢筋免受侵蚀。

研究对一足尺钢筋沥青隔震墩砌体房屋模型进行了正弦激励振动台试验^[9],对试验模型进行了不同频率和不同加速度幅值的正弦激励,获得结构在正弦激励作用下的隔震效果。随着计算机技术的不断发展,有限元分析已经成为隔震结构理论研究的重要手段之一^[10]。采用 ANSYS 建立适当的隔震模型对钢筋沥青隔震房进行分析,将计算结果与试验结果进行比较分析,验证计算模型的合理性和有效性。在此基础上,分别对隔震和非隔震有限元模型进行地震响应分析,验证隔震模型在地震作用下的隔震性能。

1 足尺模型试验

1.1 试验目的和模型概况

试验以 2 层足尺砌体隔震房屋为研究对象,测取振动台面和第 1 层楼面的加速度响应值,并以 1 层楼面加速度幅值与振动台面加速度幅值的比值来衡量隔震层的隔震效果。

试验采用 2 层足尺砌体模型,长宽高分别为 4.2、3.0、2.8 m。采用厚度为 240 mm 的眠墙,采用吊装预制空心平板作为楼面板及屋面板。隔震模型如图 1 所示。

隔震墩采用 C30 混凝土,尺寸为 200 mm×240 mm×600 mm。试验总共采用了 38 个隔震墩,角部的 4 个隔震墩为单排 2 根钢筋,其余均为单排 3 根钢筋。隔震墩竖向钢筋采用直径为 8 mm 的 HRB400 级热轧钢筋,自由长度为 300 mm,根数为 110 根。隔震墩均匀布置,间距 200 mm,4 个角部集中布置。隔震墩平面布置图如图 2 所示。



图 1 隔震模型图

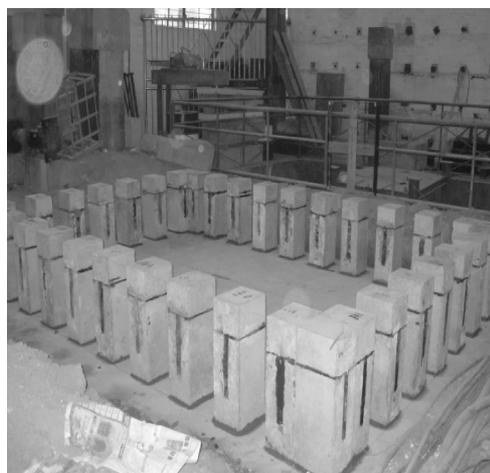


图 2 隔震墩平面布置图

1.2 试验方案

由于实验室没有能激励足尺模型的机械振动台,采用隔震墩和混凝土刚性板作为振动台面,以电液伺服脉动疲劳试验机为激励装置,对足尺模型进行激励。作为振动台面的隔震墩共 38 个,隔震墩为单排 4 根直径为 8 mm 的 HRB400 级热轧钢筋,竖向钢筋总数量为 130 根。振动台面和试验机分别见图 3 和图 4 所示。

试验加载方式为位移控制形式的正弦波形,输入单边控制幅值为 6~12 mm,输入频率为 1~3 Hz。数据采集系统包括放大器、采集仪和 DASP 信号分析系统,量测系统采用拾振器。试验中,分别在振动台面、各层楼面及屋面处各放置 1 台拾振器用来记录试验过程中各测点指定方向的加速度响应。



图 3 振动台面



图 4 试验机

2 有限元分析与试验对比

2.1 模拟单元

试验模型由隔震层和上部结构组成,隔震层的受力构件为竖向钢筋,上部结构为混凝土预制空心平板和砖砌体墙。采用 ANSYS 进行有限元分析,钢筋采用 beam188 单元进行模拟,上部砖砌体墙采用 solid65 单元,混凝土预制空心平板采用 shell63 单元。

2.2 材料本构模型及参数

钢筋的本构关系采用双线性随动强化模型,采用 Mises 屈服准则和随动强化准则,考虑材料的包辛格效应。采用的本构关系模型,按式(1)计算

$$\left. \begin{aligned} \text{当 } 0 \leq \epsilon_s \leq \epsilon_y \text{ 时, } \sigma_s &= E_s \epsilon_s \\ \text{当 } \epsilon_y < \epsilon_s \leq \epsilon_u \text{ 时, } \sigma_s &= f_y k \\ \text{当 } \epsilon_s > \epsilon_u \text{ 时, } \sigma_s &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

上部结构采用弹性材料进行模拟,混凝土预制空心平板用 shell63 单元进行模拟,等效折算后的质量等于上部结构混凝土预制空心平板的质量。有限元模型中,板采用双边支承,与实际情况一致。有限元模型图和隔震钢筋布置如图 5、图 6 所示。

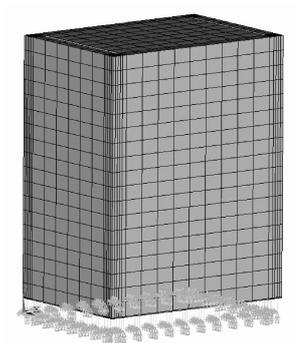


图 5 隔震模型图

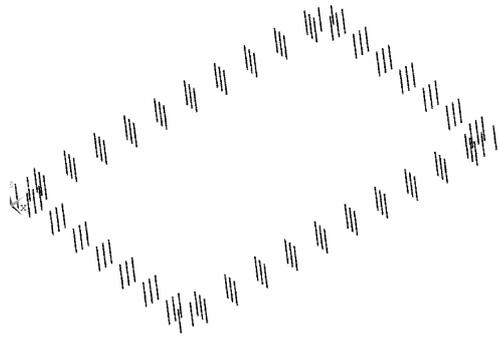


图 6 隔震钢筋布置图

钢筋的屈服强度采用平均实测强度值 $f_{yk} = 477.2 \text{ MPa}$ [9],弹性模量取 $E_s = 200 \text{ GPa}$,极限应变取 0.01,泊松比取 0.3。上部结构采用弹性材料进行模拟,混凝土板的弹性模量为 $E_c = 21 \text{ GPa}$ 、密度为 2488 kg/m^3 、泊松比取 0.2;砖砌体的弹性模量为 2400 MPa ,密度为 1885 kg/m^3 ,泊松比取 0.15。根据振动台实验研究 [11-12],阻尼比取振动台试验中测得的平均阻尼比 $\xi = 0.198$ 。

实际模型中,隔震墩中的隔震钢筋与上墩、下墩均为刚性连接。有限元建模中,由于砖墙体采用实体单元进行模拟,每个节点只有 3 个方向的平动自由度,而隔震钢筋采用梁单元进行模拟,节点有 3 个方向平动

和3个方向转动共6个自由度,所以隔震钢筋与上部结构连接时每根钢筋采用2个节点进行耦合才能模拟刚接。

2.3 分析方法

对结构进行瞬态动力分析,文中采用完全法^[13]。完全法采用完整的系统矩阵计算瞬态响应,可考虑各种类型的非线性特性。积分时间步长为试验中拾振器拾取数据的时间步长,定义荷载为斜坡荷载,打开考虑时间积分效应,根据结构的特性采用瑞雷阻尼来定义结构的阻尼,写入荷载步的最后一个子步结果。

在瞬态分析中,第1个荷载步先关闭时间积分效应,施加重力荷载;然后打开时间积分效应,考虑加速度累计效应,用以考虑重力作用对结构的影响。

2.4 对比分析

通过DASP信号分析系统对收集的数据进行分析处理,得到模型实测基频为1.11 Hz左右,在不同幅值的激励作用下测得的频率有一定的波动。有限元分析得到的基频为1.06 Hz,与实测基频基本相近。

试验中,通过拾振器测取了振动台面和一层楼面的加速度响应。有限元分析中,以试验测取的振动台面加速度响应作为有限元模型的外部激励,经过计算得到有限元模型一层楼面的加速度响应,将结果列于表1中(其中起震层加速度为实测的振动台面的加速度,计算结构加速度为有限元分析得到的一层楼面的加速度,实际结构加速度为实测的一层楼面的加速度。工况代号为:加载频率—单边位移控制幅值,加速度的单位为 m/s^2)。

表1 有限元分析结果与试验研究结果对比

工况	起震层加速度 幅值 a_z	实际结构加速度 幅值 a_1	计算结构加速度 幅值 a_2	a_1/a_z	a_2/a_z	误差/%
1—6	0.610	0.209	0.223	0.343	0.366	6.7
1—12	1.790	0.690	0.630	0.385	0.352	8.6
2—6	0.192	0.075	0.068	0.391	0.354	9.5
2—8	1.490	0.359	0.411	0.241	0.276	14.5
2—10	1.058	0.284	0.311	0.268	0.294	9.7
2—12	1.635	0.414	0.455	0.253	0.278	9.9
3—6	1.148	0.171	0.159	0.149	0.139	6.7
3—8	1.510	0.299	0.321	0.198	0.213	7.6
3—10	1.640	0.312	0.288	0.190	0.176	7.4
3—12	1.744	0.432	0.396	0.248	0.227	8.5

从分析结果可知,有限元模型计算得到的加速度响应与实际结构加速度响应基本相近,说明采用有限元对钢筋沥青隔震墩砌体房屋进行时程分析是可行的。但也有一定的误差,经过分析,主要有以下影响因素:1)在有限元分析中,考虑了主要受力构件钢筋及试验测得的阻尼的影响。而实际的隔震墩有侧墩和沥青滑移垫层,在振动过程中,除了结构的物理非线性外还有部分接触非线性,这是分析中没有模拟的,也是导致计算结果误差的一个主要原因。2)在试验研究中,每次工况下所得到隔震装置的阻尼不是一个定值。而在有限元分析中,采用了平均阻尼值,所以也会引起计算结果的偏差。

3 隔震与非隔震地震响应分析对比

3.1 非隔震有限元模型

非隔震模型与隔震模型相比,除少了1层隔震层外,其他部分与隔震模型一致。根据《建筑抗震设计规

范》(GB50011—2010)^[14],砌体结构的阻尼比一般为 0.05,取非隔震模型的阻尼比 $\xi=0.05$ 。非隔震模型如图 7 所示。

3.2 地震波的选择

选用 EL-Centro 波、Taft 波和上海人工波。根据设计规范,分别取 7 度多遇、8 度多遇、7 度罕遇和 8 度罕遇所对应的幅值 35、70、220、400 cm/s^2 对模型进行时程分析,计算时间为 15 s(下文中 EL-Centro 波、Taft 波和上海人工波分别用 el、taft 和 rgb 表示,7 度多遇、8 度多遇、7 度罕遇和 8 度罕遇分别用 7dy、8dy、7hy 和 8hy 表示)。

3.3 隔震与非隔震模型的动力特性

对结构进行模态分析,以求得结构的动力特性。文中采用分块兰索斯法,该方法的计算精度高,速度很快^[13]。计算中分别提取了隔震与非隔震模型的前六阶模态,如表 2 所示。

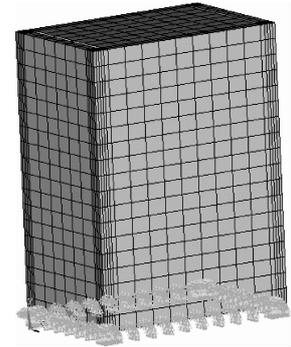


图 7 非隔震模型

表 2 结构的前六阶模态周期

模态	第 1 阶	第 2 阶	第 3 阶	第 4 阶	第 5 阶	第 6 阶
隔震	1.063 4	1.065 0	1.148 7	15.926	20.478	21.739
非隔震	12.913	16.859	22.282	22.723	25.502	27.327

从隔震与非隔震模型的模态分析中可知,隔震结构的基频远小于非隔震模型的基频,大大延长了结构的自振周期,从而有效的减小结构所遭受的地震作用^[15]。

3.4 隔震层位移

为研究钢筋混凝土隔震房在地震作用下的性能,在分析结果中提取了隔震层的位移幅值,如图 8 所示。

从计算结果可以看出,在同一条地震波作用下隔震层的位移随着加速度幅值的增大而增大。在相同幅值不同地震波作用时隔震层的位移值不同,上海人工波作用时的响应最小,其次是 EL-Centro 波, Taft 波作用时的隔震层位移最大。在 7、8 度多遇地震作用时,隔震层的位移较小,基本保持在 1.1 cm 内;在 8 度罕遇地震作用时隔震层的位移分别为 5.93、6.71、7.28 cm,隔震层的位移较大,大大减小了地震能量向上部结构的传播。在实际地震动中,由于隔震墩有侧墩,隔震层的位移还取决于竖向钢筋与侧墩的间距。当隔震层的位移过大时,上部结构会坐落在侧墩上,对隔震层的位移有一定的限制作用,实际的隔震系统包含了复杂的接触非线性,这也是罕遇地震作用时隔震层位移的计算结果与实际结果可能产生偏差的重要原因。

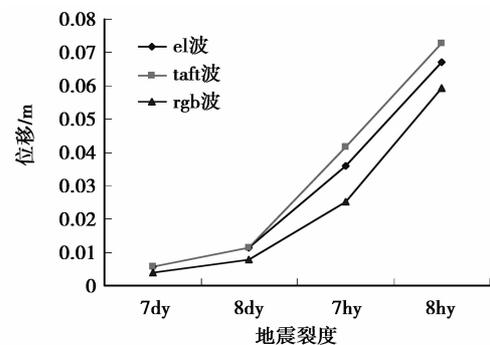


图 8 隔震层位移幅值图

3.5 加速度响应及层间位移对比

在地震作用下,结构的加速度响应和层间位移响应是结构响应的重要指标,隔震结构与非隔震结构顶部加速度的响应幅值对比如图 9 所示、一层层间位移的响应幅值对比如图 10 所示。

在 7、8 度多遇地震烈度下,EL-Centro 波作用时,隔震模型顶部加速度幅值为非隔震模型顶部加速度幅值的 0.59; Taft 波作用时约为 0.69; 上海人工波作用时为 0.30~0.31。在 7、8 度罕遇地震烈度下,EL-Centro 波作用时,隔震模型顶部加速度幅值为非隔震模型顶部加速度幅值的 0.33~0.40; Taft 波作用时为 0.30~0.49; 上海人工波作用时为 0.18~0.24。

在 7、8 度多遇地震烈度下,EL-Centro 波作用时,隔震模型一层层间位移幅值为非隔震模型一层层间位移幅值的 0.74~0.75; Taft 波作用时为 0.73~0.78; 上海人工波作用时约为 0.55。在 7、8 度罕遇地震烈度

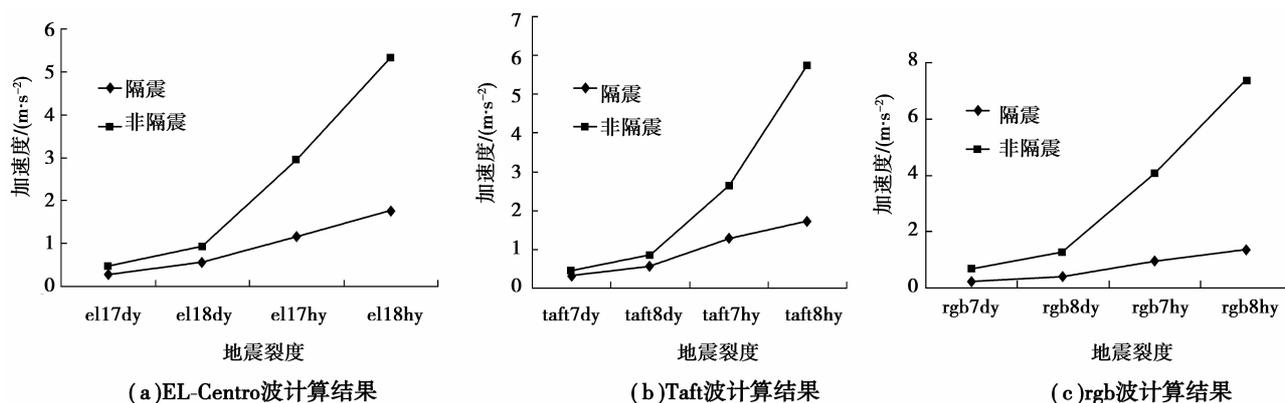


图9 隔震与非隔震模型顶部加速度幅值对比图

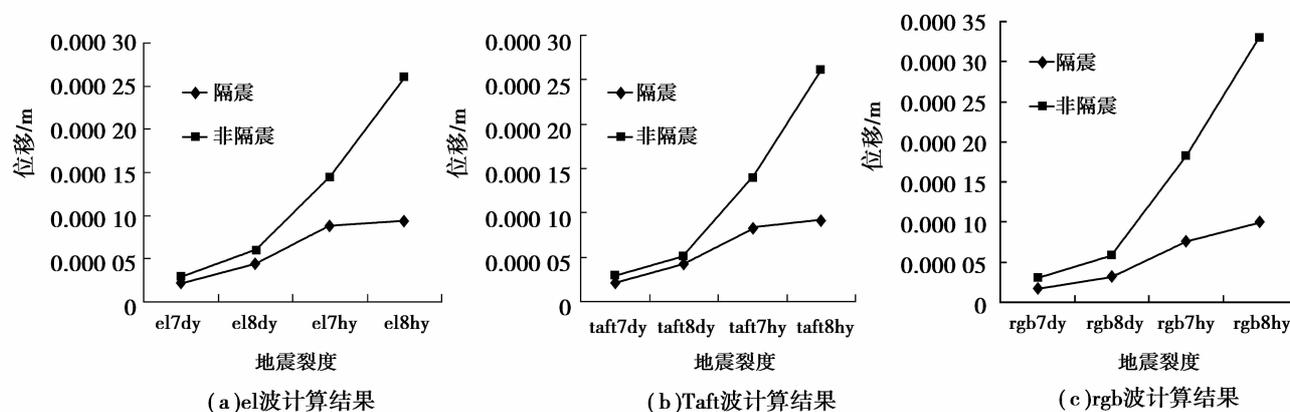


图10 隔震与非隔震模型底层层间位移幅值对比图

下,EL-Centro波作用时,隔震模型一层层间位移幅值为非隔震模型一层层间位移幅值的0.36~0.61;Taft波作用时为0.35~0.59;上海人工波作用时为0.3~0.42。

根据计算结果可以看出,在相同地震波作用下,罕遇地震作用时隔震层的隔震效果比多遇地震作用时更好。这是因为罕遇地震作用时,隔震层会进入弹塑性阶段,此时隔震层的耗能能力比弹性阶段更强。

4 结论

1)通过足尺钢筋沥青隔震墩砌体房屋的振动台试验和有限元分析结果可知,钢筋沥青隔震墩对加速度幅值有很大的衰减作用,大幅度降低了上部结构的底部剪力。

2)地震波作用下,隔震层的位移分析指出了隔震层的位移幅值,这对于隔震房屋的防震缝宽度设置有一定的参考作用。

3)在地震波作用下,通过对隔震模型与非隔震模型结构顶部加速度幅值和一层层间位移幅值的比较可以看出,钢筋沥青隔震层对地震波的隔震效果也是非常好的。

参考文献:

- [1] 韩森,王秀梅.基础隔震技术的研究现状[J].北京建筑工程学院学报,2004,20(2):11-13.
HAN Miao,WANG Xiumei. The present situation of base-isolation technology[J]. Journal of Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture,2004,20(2):11-13.
- [2] 陆鸣,田学民,王笃国,等.建筑结构基础隔震技术的研究和应用[J].震灾防御技术,2006,1(1):31-38.

- LU Ming, TIAN Xuemin, WANG Duguo, et al. Research and application of building structure base isolation technology[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2006, 1(1): 31-38.
- [3] Naeim F, Kelly J M. Design of seismic isolated structures from theory to practice[M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 1999: 123-142.
- [4] Matsagar V A, Jangid R S. Seismic response of base-isolated structures during impact with adjacent structures[J]. *Engineering Structures*, 2003, 25(10): 1311-1323.
- [5] Shakib H, Fuladgar A. Response of pure-friction sliding structures to three components of earthquake excitation[J]. *Computers & Structures*, 2003, 81(4): 189-196.
- [6] Lu L Y, Chungb L L, Wuc L Y, et al. Dynamic analysis of structures with friction devices using discrete-time state-space formulation[J]. *Computers & Structures*, 2006, 84(15/16): 1049-1071.
- [7] Ashkezaria G D, Aghakouchaka A A, Kokabi M. Design, manufacturing and evaluation of the performance of steel like fiber reinforced elastomeric seismic isolators[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 197(1/3): 140-150.
- [8] 尚守平, 郜志远, 徐梅芳. 新型隔震墩在农村民居中的应用[J]. *施工技术*, 2011, 40(6): 58-61.
SHANG Shouping, GAO Zhiyuan, XU Meifang. Application of a new type of seismic isolation pier in rural residential buildings[J]. *Construction Technology*, 2011, 40(6): 58-61.
- [9] 尚守平, 黄群堂, 沈戎, 等. 钢筋-沥青隔震墩砌体结构足尺模型试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2012, 33(3): 132-139.
SHANG Shouping, HUANG Quntang, SHEN Rong, et al. Full-scale experimental research on steel asphalt isolation pier[J]. *Journal of Building Structures*, 2012, 33(3): 132-139.
- [10] 杨林, 常永平, 周锡元, 等. FPS 隔震体系振动台试验与有限元模型对比分析[J]. *建筑结构学报*, 2008, 29(4): 66-72.
YANG Lin, CHANG Yongping, ZHOU Xiyuan, et al. Contrastive analysis of shaking table test and finite element model on friction pendulum isolated system[J]. *Journal of Building Structures*, 2008, 29(4): 66-72.
- [11] 刘可. 基础隔震的试验研究[D]. 长沙: 湖南大学博士学位论文, 2010.
- [12] 尚守平, 姚菲, 刘可. 一种新型隔震层的构造及其振动台研究[J]. *土木工程学报*, 2001, 44(2): 36-41.
SHANG Shouping, YAO Fei, LIU Ke. Study of the structure of a new type of isolation layer and shaking table test[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2001, 44(2): 36-41.
- [13] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [15] Lee D M. Base isolation for torsion reduction in asymmetric structures under earthquake loading [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1980, 8(4): 349-359.

(编辑 陈移峰)