

滑动摩擦摆式隔震装置振动台试验研究

刘彤^{1,2}, 文祝¹, 孟庆利¹, 贾彬¹

(1.西南科技大学土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621000; 2.中国工程物理研究院培训中心, 四川 绵阳 621900)

摘要: 博物馆展陈文物出于“展陈美观”等要求主要以浮放为主, 在地震作用下存在巨大的安全隐患, 现有博物馆展陈文物的防震保护措施主要是各类隔震装置的应用. 以某博物馆为例考虑所在场地和建筑物的结构动力特性, 确定隔震装置可能受到的地震作用; 再分别利用 WS-Z30 单向小型精密模拟地震振动台和三向六自由度地震模拟振动台, 对自主设计并制作的滑动摩擦摆式隔震装置进行振动台试验, 通过传导比等参数测试其水平向动力性能和三向地震作用下的隔震效能.

关键词: 隔震装置; 结构动力特性; 振动台试验; 传导比

中图分类号: TU352.12

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)06-0814-05

Experimental study on vibration isolation of sliding friction pendulum device

LIU Tong^{1,2}, WEN Zhu¹, MENG Qingli¹, JIA Bin¹

(1.School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, China;
2.Training Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: In China, the museum exhibition cultural relics because of the requirements of beautiful exhibition, so they are mainly based on the float. In the earthquake, there is a huge security risk, and the existing Museum exhibition of cultural relics protection measures are mainly used in various types of seismic isolation device. Taking a museum as an example, this paper considers the structural dynamic characteristics of the ground and the building, and the seismic action of the isolation device may be determined. This paper designed and fabricated the sliding friction pendulum isolation device, respectively using WS-Z30 unidirectional small precision vibration table and three directions, six degrees of freedom shaking table test, Test the horizontal dynamic performance and isolation efficiency through the transmission ratio and other parameters.

Key words: isolation device; structural dynamic characteristics; shaking table test; transmission ratio

我国历史悠久、文化底蕴丰富, 传承了数量庞大的珍贵文物, 通常出于“展陈”和“美观”的要求, 众多珍贵文物主要以浮放形式展陈于各个博物馆. 历次震害调查和理论研究表明, 除了殃及博物馆展陈文物的次生灾害, 在地震作用下, 展陈文物会偏心转动、滑动、摇晃和倾覆等, 从而导致文物的震损, 如 1999 年台湾集大地震^[1]以及 2008 年汶川大地震^[2]时, 因此而毁坏的博物馆文物占较大的比例. 我国传统的防震保护措施主要是安置固定法^[3], 即通过“卡、扎、吸、捆、粘”等方式将展陈文物固定在基础上, 但这些方法或多或少存在损害文物或者抗震保护效果差的问题.

调研相关文献, 日本、美国等国家对于既要满足博物馆展陈文物防震保护要求, 又要保证展陈品质的研究主要是滑块式、滚轴式、滚轮式、滚珠式等各类隔震装置^[4], 其中很多展陈文物隔震装置的原理是 Zayas 等人于 1985 年在美国加州大学伯克利分校研发的摩擦摆系统/支座(Friction

Pendulum System, 简称 FPS)^[5-7]. 虽然 FPS 应用在工程上的优点很多^[8], 但是考虑到展陈文物的防震保护特点, 将 FPS 应用于博物馆展陈文物的防震保护还有许多问题值得考虑.

1 滑动摩擦摆式隔震装置

1.1 博物馆展陈文物防震保护特点

本文进行博物馆展陈文物隔震装置的研究, 不深入研究地震作用下展陈文物的运动状态, 但值得注意的是吴来明等在进行博物馆展陈文物的防震保护研究中关于陈列文物的地震安全性分析时^[9], 给出了浮放文物在遭遇地震时产生滑移运动的条件判别式:

$$(g - 0.65 \times A_H) \cdot f \leq A_H \quad (1)$$

和产生倾覆运动的条件判别式:

$$A_H \cdot (h/2) \geq (1/2)l \cdot (g - 0.65 \times A_H) \quad (2)$$

式中: g 为重力加速度; A_H 为文物所在位置的水平方向最大加速度; f 为文物与支承面之间的静摩擦系数; h 为文物的重心至底面的高度; l 为文

物的重心在水平面上的投影点至底面边缘的最小距离.

由式(1)和(2)可知, 在静摩擦系数 f 和文物尺寸一定的前提下, 展陈文物发生滑动、倾覆主要是因为文物所在位置的水平方向最大加速度 A_H 过大, 因此减小展陈文物水平方向响应加速度是防震保护的关键.

结构的响应位移和响应加速度是矛盾而统一的, 减小响应加速度必然会增大响应位移, 反之同理. 博物馆展陈文物为了“展陈美观”, 展陈文物周围一般有一定空间允许一定的位移, 因此结合展陈文物的保护要求设计出尽可能减小其响应加速度峰值, 同时又能满足其响应位移限值要求的隔震装置是合理的.

1.2 基于 FPS 原理的改进

对于建筑、桥梁等工程结构, 符合现代技术改革的隔震定义为: 为结构提供灵活性, 同时限制由地震引起的运动的振幅. 借鉴同样的思路, 对于展陈文物隔震装置, 由于响应加速度对于浮放物的震害的影响更大, 所以这类隔震装置的隔震效果应该体现在: 尽量减小响应加速度的同时满足位移限值的要求.

FPS 构造简单, 稳定性高, 特有的球面弧滑动面使其具有自复位功能, 且对任意方向激励的隔震效果相同^[10-11]. 其近似周期公式为:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \quad (3)$$

其中: L 为摆长, g 是当地重力加速度. 可以通过改变 FPS 的摆长对其自振周期进行控制, 从而实现延长结构的自振周期, 避开地震作用的卓越周期, 进而减小地震响应的目的. 但是, 如上节所述展陈文物不同于工程结构, 其允许的水平方向响应加速度很小, 使用 FPS 能一定程度延长结构的自振周期, 但不能进一步减小水平方向的响应加速度.

因此, 本文在保留 FPS 的基础上对其进行改进, 为进一步降低水平向响应加速度增加滑动机制如图 1 所示. 质量较小的滑块下接摩擦摆, 滑块与基础能在水平方向相对滑动, 因此将此系统叫做滑动摩擦摆. 如图 1 可以比较直观地发现, 滑块相对于基础在水平方向滑动, 能有效地控制响应加速度, 虽然会一定程度增大响应位移, 但是放置展陈文物的展台允许位移一般也较大, 能

通过设计满足要求, 且残余位移过大的问题对于展陈文物不重要. 此外, 滑动摩擦摆保留了摩擦摆, 因此也具有良好的自恢复性以及良好的滞回耗能性能.

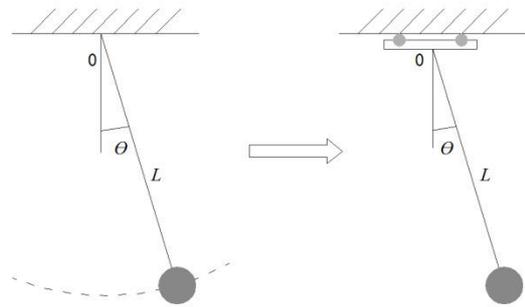


图 1 原理模型的改进

Fig. 1 Improvement of principle model

本文重点进行振动台试验研究, 不详细讨论隔震装置的制作及论证, 根据滑动摩擦摆的原理模型制作出滑动摩擦摆隔震装置如图 2 所示.

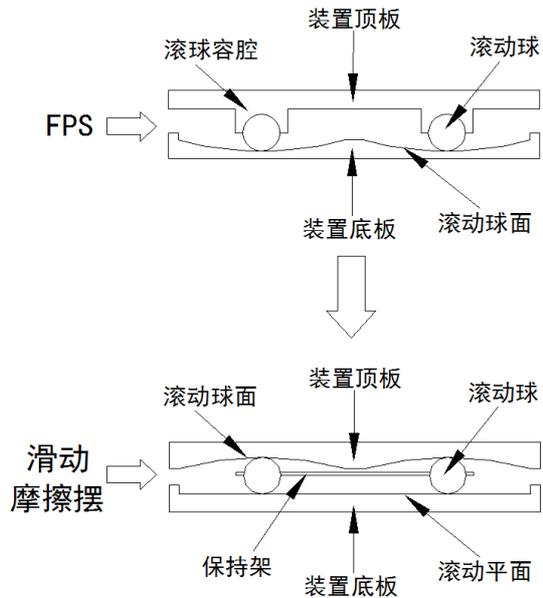


图 2 滑动摩擦摆式隔震装置

Fig. 2 The sliding friction pendulum isolation

2 博物馆现场振动测试

本文主要对滑动摩擦摆式隔震装置进行振动台试验, 通过试验数据分析其动力性能和隔震效能. 查阅相关文献, 许多学者对各类隔震装置进行了数值模拟或振动台试验, 通常输入简谐波和随机波, 以传导比或峰值比来评价隔震装置的隔震性能^[12-13]. 但是众多文献中, 考虑简谐波频率范围时没有具体的依据, 随机波一般选用典型地震动, 只考虑了随机波本身的代表性, 没有考虑建筑物所在场地条件或者结构动力特性对隔震性能的影响.

2.1 确定随机波频谱特性

实际上, 隔震装置是放置在建筑物中的, 建筑物及其所在场地对隔震装置所受地震作用的影响不可忽略, 因此评定隔震装置的隔震性能首先需要了解建筑物的结构动力特性, 进而确定其可能遭受的地震作用, 才能有效分析其隔震性能.

本文以成都某博物馆为例, 该博物馆设计场地类别为 II 类, 参考划分频带范围如表 1 所示, 首先考虑场地特性从地震记录库中选取了条适用于 II 类场地土且很具有代表性的典型地震记录 EL centro 地震动.

表 1 地震反应谱特征周期 T 与划分频带范围

Tab.1 Characteristic period of seismic response spectrum and frequency band range

场地	I	II	III	IV
特征周期 T_g/s	0.20	0.30	0.40	0.65
频带范围/s	0.15~0.25	0.25~0.35	0.35~0.50	0.50~0.80

然后, 利用 DH5907A 无线桥梁模态测试分析系统, 采集博物馆由于地脉动引起的结构振动, 通过地面和不同楼层之间做传递函数的方法测出结构的基频如表 2 所示, 测试现场如图 3 所示.

表 2 博物馆的基频

Tab.2 The fundamental frequency of the museum

位置	方向	自振频/Hz	
整体结构	X	2.93	
	Y	4.9	
文物陈	二层	竖向	8.2
列层	一层	竖向	11.03



图 3 博物馆振动测试现场

Fig.3 The vibration test of the museum

由于博物馆地上只有三层, 在弹性范围内, 因此结构的动力响应主要由基频决定^[14]. 查阅地

震记录库发现, 2008 年汶川地震时记录的卧龙地震动的三向卓越频率与此博物馆的三向基频很接近, 如表 3 所示. 所以本文其次考虑博物馆的结构动力特性选取了卧龙地震动作为随机波输入.

表 3 频率对比

Tab.3 Frequency comparison

	博物馆三向基频/Hz	卧龙波三向卓越频率/Hz
X	2.93	2.39
Y	4.9	4.44
Z	11.03	10.22

2.2 确定随机波的幅值

查阅相关资料, 该博物馆抗震设防烈度为 7 度, 峰值加速度如表 4 所示.

表 4 加速度峰值调整表 (m/s²)

Tab.4 The peak acceleration adjustment table (m/s²)

设防烈度	7	8	9
多遇地震	0.35 (0.53)	0.70 (1.06)	1.40
罕遇地震	2.20 (3.20)	4.40 (6.40)	6.20

因此确定选取典型地震动对应的小震、中震和大震的加速度峰值分别为 0.036 g、0.1 g 和 0.23 g. 除此之外, 由表 2 可知地震动经过博物馆的滤波作用后传递到展陈文物的作用一般以低频为主, 水平向卓越频率范围是 3~5 Hz, 所以输入的简谐波 0~20 Hz 应该尽量丰富, 而且应该特别关注 3-5 Hz 时隔震装置的动力响应.

3 振动台试验

3.1 水平向动力性能测试

首先利用 WS-Z30 单向电磁振动台对滑动摩擦摆式隔震装置进行水平动力性能试验如图 4 所示.

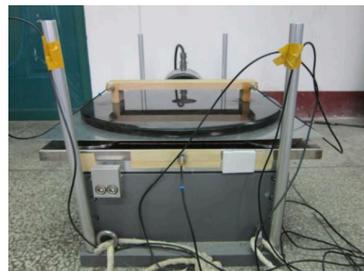


图 4 单向振动台试验现场

Fig.4 Test site for unidirectional shaking table

输入 0.5~20 Hz 频率简谐波, 采集振动台台面输入加速度时程和隔震装置台面响应加速度时程数据并进行分析 (以 1.5 Hz 为例) 如图 5 所示.

对两种隔震装置在不同频率简谐波输入时的加速度时程数据进行处理, 根据传导比公式:

$$TR = \ddot{x}_{\max} / \ddot{x}_{g\max} \tag{4}$$

其中: \ddot{x}_{\max} 是隔震装置响应加速度幅值, $\ddot{x}_{g\max}$ 是振动台台面输入加速度幅值. 各频率简谐波输入

时的振动台台面输入加速度幅值和隔震装置响应加速度幅值的确定均基于多组波峰和波谷绝对值的平均值, 最终计算出隔震装置在各个频率简谐波输入情况下的传导比, 绘制出传导比曲线如图 6 所示.

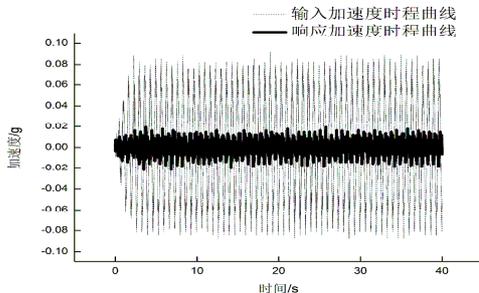


图 5 输入和响应加速度时程对比曲线
Fig.5 The contrast of the input and output acceleration time history curve

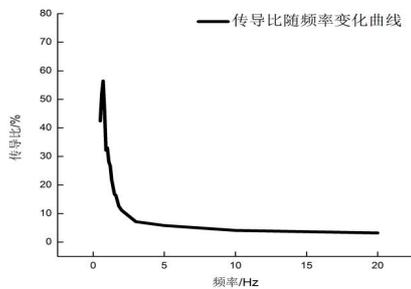


图 6 传导比随频率变化曲线
Fig.6 Transmission ratio versus frequency curve

在 0.5~20 Hz 的简谐波输入下, 滑动摩擦摆式隔震装置的传导比小于 56.44%, 当激振简谐波频率大于 2 Hz 的时候, 隔震装置的传导比低于 11.18%且随激振简谐波频率的增加而持续降低并逐渐趋于稳定.

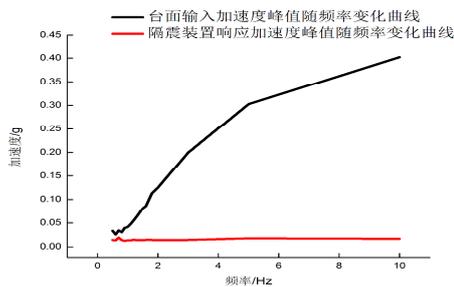


图 7 输入和响应加速度峰值随频率变化曲线
Fig.7 The peak acceleration of the input and output with the frequency curve

由图 7 可知, 滑动摩擦摆式隔震装置的水平向响应加速度峰值平稳并控制在一定水平, 对于针对展陈浮放文物的防震保护进一步减小水平向响应加速度幅值很有意义.

3.2 地震模拟振动台试验

为了测试滑动摩擦摆式隔震装置在模拟地震动作用下的隔震效果, 本次试验使用中国工程物

理研究院的三向六自由度液压振动台进行模拟地震动试验, 试验现场如图 8 所示.

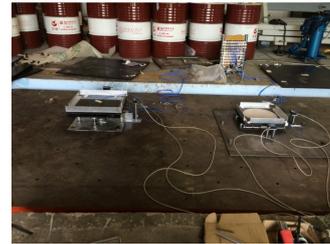


图 8 地震模拟振动台试验现场
Fig.8 Test site for earthquake simulation shaking table

本次试验进行了五种工况的随机波输入, 分别是 PGA=0.036 g、0.1 g 的 EL centro 波输入, 以及 PGA=0.23 g、0.1 g 和 0.036 g 的卧龙波输入, 根据试验数据 (以 PGA=0.23 g 的卧龙波工况为例) 处理得到振动台输入加速度时程和隔震装置响应的加速度时程曲线对比如图 9 所示, 隔震装置水平向的响应位移时程曲线如图 10 所示.

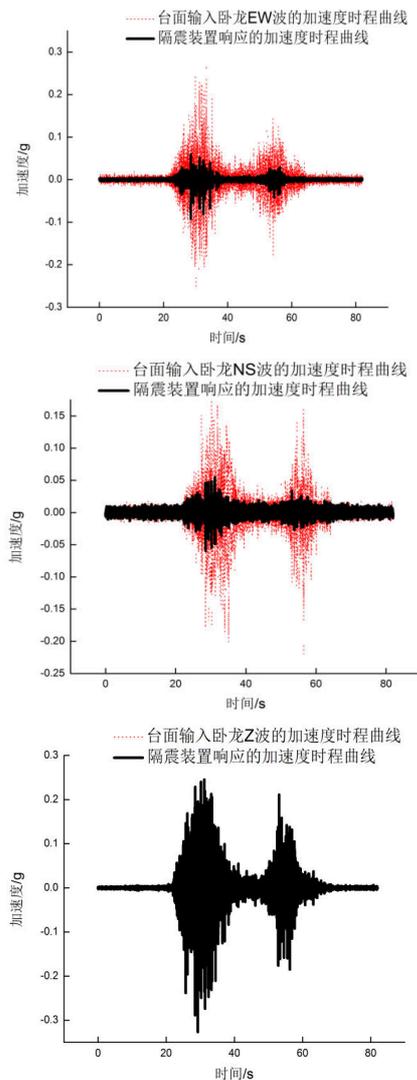


图 9 三方向输入和响应加速度时程对比曲线
Fig.9 Three direction of the input and response acceleration time history curve

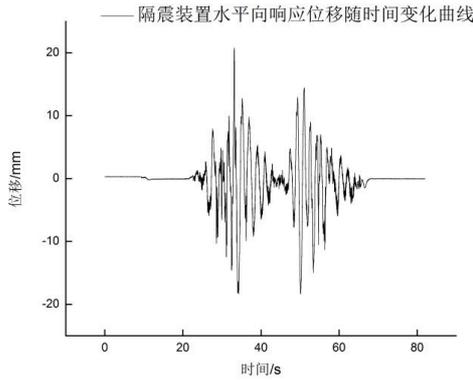


图10 水平向响应位移时程曲线

Fig.10 The response of horizontal displacement curve

将各个随机波输入工况中各个方向的振动台输入加速度峰值和对应的隔震装置响应的加速度峰值,以及统计如表5所示。

$$\text{峰值比} = \frac{\text{隔震装置响应的加速度峰值}}{\text{台面输入的加速度峰值}} \times 100\% \quad (4)$$

表5 输出和输入加速度峰值以及峰值比

Tab.5 The input and output of the peak acceleration and peak ratio

名称	幅值	方向	输入/g	输出/g	峰值比/%
EL centro 波	PGA=0.036g	X	0.035 51	0.010 721	30.19
		Y	0.037 27	0.02	53.66
		Z	0.040 164	0.055 36	137.83
	PGA=0.1g	X	0.106 89	0.018 5	17.31
		Y	0.100 51	0.027 23	27.09
		Z	0.135 041	0.187 7	138.99
卧龙波	PGA=0.036g	X	0.041 02	0.02	48.76
		Z	0.034 3	0.022 05	64.29
卧龙波	PGA=0.1g	X	0.125 55	0.033 54	26.71
		Y	0.091 8	0.020 82	22.68
		Z	0.141 2	0.188 4	133.43
	PGA=0.23g	X	0.251 8	0.08	31.77
		Y	0.219 6	0.058 8	26.78
		Z	0.245	0.327	133.47

由表5可知,滑动摩擦摆式文物隔震装置的两个水平向峰值比变化趋势相同,即对于同种输入模拟地震动而言,隔震装置的两个水平向峰值比随着输入模拟地震动峰值的增加而由0.5左右减小到0.2~0.3的水平;对于不同种输入模拟地震动而言,随着输入模拟地震动由PGA=0.036g变化到PGA=0.1g,隔震装置的两个水平向峰值比减小到原来的一半。滑动摩擦摆式文物隔震装置竖向的峰值比有所增大,在各个随机波输入的工况中均为1.3~1.4,且随输入模拟地震动峰值增大的变化不大。

将各个随机波输入工况中隔震装置水平方向的响应位移幅值统计如表6所示。

由表6可知,滑动摩擦摆式文物隔震装置的水平向响应位移随着同种输入模拟地震动的峰值的增加而增加,但对于各个幅值的卧龙波输入小

于20.6 mm,对于各个幅值的EL centro波输入小于41.31 mm。

表6 水平方向响应位移幅值

Tab.6 The horizontal displacement response amplitude

名称	幅值	位移幅值/mm
EL centro 波	PGA=0.036g	18.27
	PGA=0.1g	41.31
卧龙波	PGA=0.036g	4.28
	PGA=0.1g	9.84
	PGA=0.23g	20.6

4 结语

通过利用WS-Z30单向小型精密振动台和三向六自由度地震模拟振动台,对自主设计并制作的滑动摩擦摆式隔震装置进行振动台试验发现:

(1) 滑动摩擦摆式隔震装置对于1 Hz左右及以上频率的谐波激振的响应加速度较小且稳定在0.01 g左右;当激振简谐波频率大于2 Hz的时候,隔震装置的传导比低于11.18%且随激振简谐波频率的增加而迅速降低并逐渐趋于稳定,所以滑动摩擦摆式隔震装置对于低频激振的动力响应效果较好,有利于展陈文物的防震保护。

(2) 在模拟地震动的试验中,滑动摩擦摆式隔震装置对于中、大震两种工况的峰值比仅为对应小震工况的一半,相应的水平向响应位移也控制在了一定范围,分别是20.6 mm和41.31 mm,防震保护效果明显。

参考文献 References

[1] 李丽芳. 台湾博物馆文物防震防灾工作的省思[J]. 博物馆学季刊, 2000, 14(4): 89-104.
LI Lifang, The province of the Taiwan Museum's cultural relics and disaster prevention[J]. Museum Quarterly, 2000, 14(4): 89-104.

[2] 周乾, 闫维明. 汶川地震可移动文物震害研究[J]. 文物保护与考古科学, 2010, 22(3): 36-43.
ZHOU Qian, YAN Weiming. Analysis of damage to free-standing cultural relics caused by the Wenchuan earthquake[J]. Science of Conservation and Archaeology, 2010, 22(3): 36-43.

[3] 吴来明, 王忠良, 高华平等. 博物馆文物的防震保护研究(一): 传统抗震措施与现代隔震技术[J]. 文物保护与考古科学, 2001, 13(2): 46-52.
WU Laiming, WANG Zhongliang, GAO Huaping, et al. Researches on protection from earthquake of cultural relics in museum(1): Traditional antishock methods and modern isolating techniques[J]. Science of Conservation and Archaeology, 2001, 13(2): 46-53.

(下转第862页)

- [3] 陈清军, 张婷, 陈志海, 等. 长周期随机地震作用下超大跨斜拉桥的行波效应分析. 湖南大学学报: 自然科学版, 2014, 41(4): 1-9.
CHEN Qingjun, ZAHNG Ting, CHEN Zhihai, et al. Traveling wave effect analysis of super-long-span cable-stayed bridge under long-period stochastic seismic excitation [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2014, 41(4): 1-9.
- [4] 王统宁, 刘建新, 于永波. 近断层地震动作用下减隔震桥梁空间动力分析[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(5): 20-31.
WANG Tongning, LIU Jianxin, YU Yongbo. Spatial dynamic analysis of isolated bridges subjected to near-field ground motion [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(5): 20-31.
- [5] 于永波. 减隔震桥梁的空间动力分析及动力试验: [D]. 西安: 长安大学, 2004.
YU Yongbo. 3-dimension dynamic analysis of isolation bridge and dynamic testing [D]. Xi'an: Chang'an University, 2004.
- [6] 叶鑫. 近场长周期地震动对减隔震连续梁桥的地震响应的研究[J]. 公路工程, 2014, (1): 135-139.
YE Xin, LI Xue-hong, XU Xiu-li, etc. Analysis of isolated continuous girder bridges' seismic response under the near-fault long-period ground motion [J]. Highway Engineering, 2014, (1): 135-139.
- [7] 范立础, 王志强. 桥梁减隔震设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
FAN Lichu, WANG Zhi-qiang. Isolation Design of Bridges [M]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [8] 李黎, 叶志雄, 吴璟. 隔震连续梁桥地震作用下梁间碰撞响应的研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(7): 100-104
LI Li, YE Zhixiong, WU Jing. Analysis on seismic pounding response of isolated continuous girder bridge under earthquake excitation [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(7): 100-104.
- [9] 许智星. 长周期地震作用下隔震连续梁桥的地震反应特性研究: [D]. 福州: 福州大学, 2014.
XU Zhixing. Study on seismic response characteristics of isolated continuous girder bridges subjected to long-period ground motions [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2014.
- [10] 段文中. 地震作用下钢筋混凝土梁桥间碰撞响应分析及防止措施研究: [D]. 西安: 西安理工大学, 2007.
DUAN Wenzhong. Analysis of seismic response including pounding effect and shock attenuation measure for reinforced concrete bridge [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007.

(编辑 吴海西)

(上接第 818 页)

- [4] 周乾, 闫维明, 纪金豹. 馆藏浮放文物隔震装置的开发与应用[J]. 防灾减灾工程学报. 2013, 33(02): 147-154.
ZHOU Qian, YAN Weiming, JI Jinbao. Development of isolation devices for free-standing museum cultural relics [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(02): 147-154.
- [5] ZAYAS V, LOW S, MAHIN S. The FPS earthquake resisting system[R]. Technical Report UCB/EERC-87/01, University of California at Berkeley, 1987.
- [6] ZAYAS V, LOW S, BOZZO L, et al. Feasibility and performance studies on improving the earthquake resistance of new and existing buildings using the friction pendulum system[R]. Technical Report UBC/EERC-89/09, University of California at Berkeley, 1989.
- [7] ZAYAS V, LOW S, MAHIN S. A simple pendulum technique for achieving seismic isolation [J]. Earthquake Spectra, 1990, 6.
- [8] 龚健, 周云. 摩擦摆隔震技术研究和应用的回顾与前瞻 (I)—摩擦摆隔震支座的类型与性能[J]. 工程抗震与加固改造. 2010, 32(3): 1-10.
GONG Jian, ZHOU Yun. State of art and prospect of the research and application of friction pendulum isolation technology (I)—Types and performance of friction pendulum bearings [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2010, 32(3): 1-10.
- [9] 吴来明, 王忠良, 高华平, 等. 博物馆文物的防震保护研究(三): 陈列文物的地震安全性分析[J]. 文物保护与考古科学, 2002, 14(s): 139-151.
WU Laiming, WANG Zhongliang, GAO Huaping, et al. Researches on protection from earthquake of cultural relics in museum (3): Analyzing for earthquake security of exhibiting cultural relics [J]. Science of Conservation and Archaeology, 2002, 14(S): 139-151.
- [10] SU L, AHMADI G, TADJBAKHSI I. A comparative study of performance of various base isolation systems, part I: Shear beam structures [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1989, 18(1).
- [11] CONSTANTINOUC M C, Mokha A, Reinhorn A M. Teflon bearings in base isolation II: Modeling [J]. J. Structural Engineering, ASCE, 1990, 116(2).
- [12] ÖNEM G, TÜZÜN C, ERDIK M, et al. Earthquake protection of museum displays by a low cost base isolation system [C] // 4th World Conference on Structural Control and Monitoring, La Jolla, U.S.A.: 2006.
- [13] MYSLIMAJ B, GAMBLE S, CHIN Quee D, et al. Base isolation technologies for seismic protection of museum artifacts [C] // Proceedings of the 2003 IAMFA Annual Conference in San Francisco, California: 2003.
- [14] 赖明等. 地震作用和结构抗震验算. 见: 建筑抗震设计规范 (GBJ11-89) 修订编制背景资料. 1998.8.
LAI Ming, et al. Seismic action and structural seismic checking. Building seismic design code (GBJ11-89) to amend the preparation of background information. 1998.8.

(编辑 吴海西)