

长周期地震动作用下隔震梁桥碰撞效应研究

孙 颖¹, 陈天海¹, 卓卫东¹, 谷 音¹, 许智星²

(1.福州大学土木工程工学院, 福建 福州 350108; 2.福建省建筑科学研究院, 福建 福州 350025)

摘要:以五跨一联设置铅芯橡胶支座与摩擦摆隔震支座的隔震连续梁桥为研究对象,通过建立三维空间有限元模型,分析探讨了在近场与远场长周期地震动作用下,伸缩缝刚度及伸缩缝宽度变化对两种隔震连续梁桥梁端碰撞效应的影响。研究结果表明:无论是远场长周期地震动作用亦或是近场长周期地震动作用下,伸缩缝宽度对结构最大碰撞力及中碰撞次数均有不同程度的影响,伸缩缝宽度越宽,最大碰撞力越小且碰撞次数也随之降低;伸缩缝刚度变化仅对结构的最大碰撞力有影响;对比两种隔震结构碰撞效应分析结果可知,FPB 隔震结构的碰撞程度低于 LRB 隔震结构。

关键词:长周期地震动;碰撞效应;隔震梁桥;伸缩缝刚度;伸缩缝宽度

中图分类号:U445.7

文献标志码:A

文章编号:1006-7930(2015)06-0858-05

Research on the collision effect of isolated girder bridges under long-period ground motion

SUN Ying¹, CHEN Tianhai¹, ZHUO Weidong¹, GU Yin¹, XU Zhixing²

(1.Civil Engineering of Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;2. Fujian Academy of Building Research, Fuzhou 350025, China)

Abstract: The isolated continuous girder bridge with lead rubber bearings (LRB) or friction pendulum bearings (FPB) was taken as the research object to analyze the collision effect under near-fault or far-fault long-period ground motion. The parameters analysis including the stiffness of expansion joint and width of expansion joint have been done based on the 3D FEM. The results show that whatever the type of long-period ground motion, it has different effect of width of expansion joint on the force and times of collision, and the force and times were decreasing with the increase of width of expansion joint. The changing of stiffness of expansion joint had effect on maximum collision force only. Compared with two isolated structures, the collision effects of FPB structure were lower than LRB structure.

Key words: long-period ground motion; collision effect; isolation continuous girder bridges; stiffness of expansion joint; width of expansion joint

长周期地震动对桥梁结构的影响主要表现为共振(或类共振)现象^[1-2]。对于桥梁结构而言,具有长周期振动特点的结构除大跨径结构(斜拉桥、悬索桥等)之外,还有一类结构同样具有长周期振动特性,即在常规地震动作用下抗震性能良好的减隔震桥梁。此类结构通过人为增设减隔震装置达到了延长结构固有周期的目的,从而避开常规地震动的卓越周期,达到降低结构地震反应的目的。但当结构遭遇长周期地震动作用时,仍面临着如位移过大、碰撞等巨大考验。截止目前,针对长周期地震动作用对桥梁结构地震反应的影响的研究主要集中在几个方面:一是针对桥梁结构自身为长周期结构地震反应特点研究,此类研究主要针对大跨径结构如斜拉桥^[3]开展;二是针对隔震桥梁在长周期地震动作用下结构地震反应特点开展研究,此类研究的重点表现为隔震装置的减震效率以及桥梁结构自身地震反应特点(内力、位移)的变化情况。研究结果表明:在长周期脉冲型地震作用下,隔震支

座的减震效果有一定的下降,梁体纵桥向位移有所增长,易造成相邻梁体的碰撞甚至发生落梁,因此,建议近断层地区桥梁不宜采用铅芯橡胶隔震支座^[4-6]。由此可见,长周期地震动作用对隔震梁桥地震反应有较为明显的影响,特别是上部结构的位移反应,这在一定程度上放大了结构出现碰撞的概率,但目前的研究尚未设计到长周期地震动作用对隔震梁桥碰撞效应的影响。因此,本文以隔震梁桥为研究对象,重点探讨长周期地震动作用下隔震梁桥的碰撞反应以及伸缩缝装置参数变化对结构碰撞反应的影响程度。

1 有限元模型的建立及地震动输入

1.1 基本参数

五跨一联的连续梁桥上部结构跨径布置为 5×40 m,采用单箱单室箱梁截面,梁高 2.4 m,顶板宽 12.5 m,底板宽 6.25 m,腹板厚度自端部 0.8 m 线性变化至跨中 0.45 m。主梁采用 C50 混凝土。为

考虑上部结构邻跨间的碰撞, 本文在基准桥两侧各增加一跨 32 m 简支箱梁. 中墩及主梁连接处的桥墩均采用花瓶式桥墩, 墩高 15 m, 材料为 C40 混凝土, 桥墩断面右顶部 6.0 m×3.0 m 圆端形截面变化至墩底断面为 4.5 m×3.0 m 圆端形截面, 截面在墩顶以下 6.4 m 范围内变化. 结构布置图如图 1 所示.

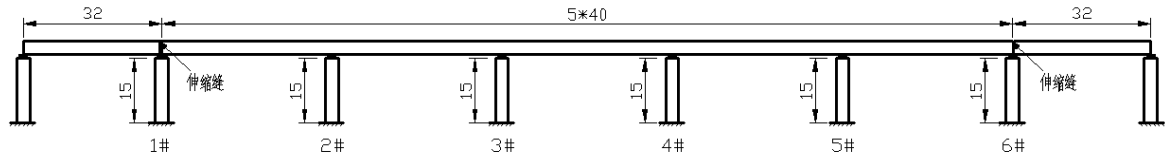


图 1 桥梁总体布置图 (单位: m)
Fig.1 General arrangement of bridge (Unit: m)

1.2 有限元模型的建立

本文采用 SAP2000 通用有限元软件建立基准桥分析模型. 其中, 梁体采用空间弹性梁单元模拟, 单元质量以集中质量形式模拟, 刚度定义为无裂缝时刚度; 桥墩采用空间梁单元模拟, 与主梁类似, 其刚度取无缝时刚度, 不考虑其非线性变形, 结构的非弹性变形仅发生在隔震装置^[7]. 为简化计算, 外部边界条件取为墩底固结.

为考虑碰撞效应而在主梁梁端增设的简支梁, 则通过节点束缚分别与基准桥桥墩墩顶相连, 纵桥向设置为滑动连接; 此处伸缩缝则采用缝单元模拟可能产生的碰撞效应, 其行为描述如下:

$$f = \begin{cases} k(d + open) & d + open < 0 \\ 0 & d + open \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中: *open* 为初始缝宽度, 设置为最大伸缩量 80 mm. *k* 为弹簧常数, 取碰撞梁体的轴向刚度^[8].

本文的研究对象为隔震桥梁, 所采用的隔震装置为铅芯橡胶支座 (LRB) 与摩擦摆隔震支座 (FPB). LRB 支座的滞回曲线理论上选用双线性模型进行模拟, 程序中采用 Wen 模型予以实现, 其滞回性能如图 2 所示. LRB 支座在 1#~6#墩墩顶各布设两个, 其具体型号及相关参数如表 1 所示.

摩擦摆支座采用程序中提供的摩擦摆动支座的非线性连接单元进行模拟, 该单元在剪切变形上与摩擦塑性耦合, 具有在剪切方向上的滑移后刚度,

在轴向上具有缝行为, 单元不能承受轴拉力. 其力学行为模式如图 3 所示. 摩擦摆支座的参数取值如表 2 所示.

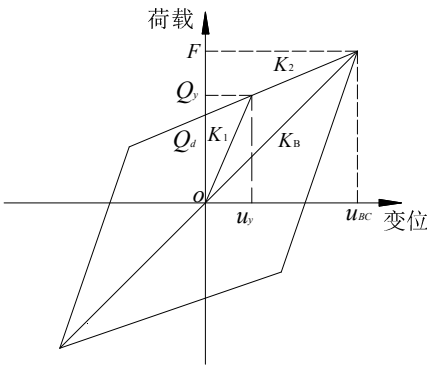


图 2 LRB 滞回曲线简化双线性模型
Fig.2 Simplified bilinear model of hysteretic behavior of LRB

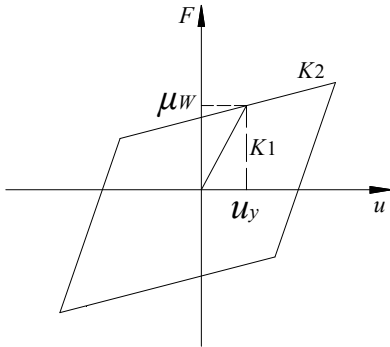


图 3 摩擦摆支座滞回性能模型
Fig.3 The model of hysteretic behavior of FPB

表 1 LRB 支座参数
Tab.1 The parameters of lead rubber bearings

支座位置	支座型号	铅芯屈服力/kN	屈服前刚度/kN·mm ⁻¹	屈服后刚度/kN·mm ⁻¹	水平等效刚度/kN·mm ⁻¹	等效阻尼比
1#、6#	J4Q670×670×217G1.0	216	14.6	2.2	3.1	16.7
2#~5#	J4Q970×970×269G1.0	486	22.5	3.5	4.9	17.5

表 2 FPB 支座参数
Tab.2 The parameters of friction pendulum bearing

支座位置	μ _{max}	μ _{min}	滑动半径/ m	初始刚度/kN/mm	等效刚度/kN/mm	等效阻尼比
1#、6#墩	0.06	0.03	2	54	1.83	11.7
2#~5#墩	0.06	0.03	2m	117	3.98	11.7

1.3 地震动输入

基准桥在近场及远场地震动作用下的碰撞反应已在文献[9]中进行了讨论. 由分析结果可知, 长周期地震动较易使隔震连续梁桥相邻跨发生碰撞. 本文从其中挑选碰撞反应较为明显的4条长周期地震动记录作为本文的地震动输入(见表3), 探讨伸缩缝参数变化对结构碰撞效应的影响.

表3 长周期地震动记录
Tab.3 The records of long-period ground motion

类型	编号	地震事件	台站	PGV/PGA
近场	1	Chi-Chi	TCU052	0.47 s
	2	Chi-Chi	TCU063	0.56 s
远场	3	Chi-Chi	ILA049	0.23 s
	4	Chi-Chi	TTN008	0.31 s

2 伸缩缝宽度变化对碰撞的影响

伸缩缝宽度的选择, 应考虑上部结构在气温变化、混凝土收缩与徐变等影响下的伸缩量. 然而在长周期地震作用下, 隔震连续梁桥的梁体位移被放大^[9], 此时, 伸缩缝宽度的设置还要考虑梁间发生碰撞时, 伸缩缝宽度对碰撞响应(最大碰撞力、总碰撞次数)的影响. 本文选取基准桥的1#墩最为分析对象, 取伸缩缝宽度为4 cm、6 cm、8 cm、10 cm、12 cm等5个宽度值, 来模拟分析不同宽度对结构地震反应的影响. 图4~图5分别绘出了伸缩缝宽度变化对最大碰撞力及总碰撞次数的影响规律.

由图可知, 远场长周期地震动作用对 LRB 隔震梁桥的碰撞影响较大, 而 FPB 隔震结构的碰撞反应则对近场长周期地震动更为敏感. 从定量角度来看, 在同等强度地震动作用下, FPB 隔震结构的最大碰撞力低于 LRB 隔震结构约 1/2. 此外, 从碰撞力的变化趋势来看, 伸缩缝宽度增大对 LRB 隔震结构碰撞力的影响较 FPB 隔震结构明显. 从碰撞次数的变化规律来看, FPB 隔震结构在减小碰撞次数的效果方面优于 LRB 隔震结果, 且其受伸缩缝宽度的影响较小.

总之, 无论是是在近场长周期地震动作用亦或是远场长周期地震动作用下, 伸缩缝宽度的变化可使结构的碰撞响应发生较大改变. 较大的伸缩缝宽度值, 可有效减小主梁的碰撞力和碰撞次数, 当宽度值取的足够大时, 甚至可以避免碰撞的发生. 从减少碰撞发生的角度来看, FPB 隔震结构对伸缩缝宽度的要求明显低于 LRB 隔震结构.

在实际应用中, 伸缩缝宽度的设置还要考虑梁体正常使用状态下的运动. 伸缩缝宽度过小时, 就

不能满足桥梁在地震作用下的位移需求, 甚至无法满足正常使用阶段下因温度、徐变作用所产生的伸缩量; 较大的缝宽虽然可以满足主梁运动时所需的位移, 而且可以有效减少主梁的碰撞次数和碰撞力, 然而过大的缝宽在实际中并不适用, 原因在于过大的间隙会影响桥梁的平顺性, 因此伸缩缝宽度的设置应综合考虑桥梁正常使用状态的要求同时还要根据所采用的隔震装置的类型兼顾其地震反应的需求.

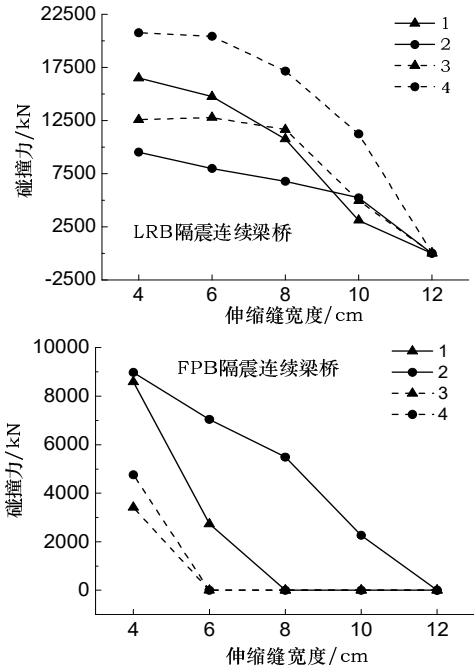


图4 伸缩缝宽度变化对最大碰撞力的影响

Fig.4 Effect of width of expansion joint on maximum collision force

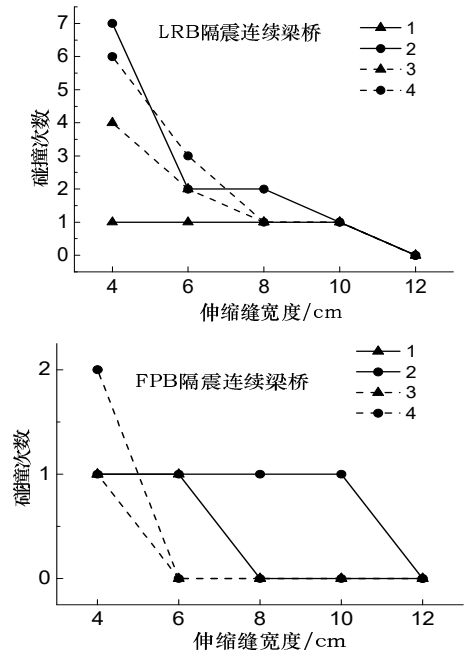


图5 伸缩缝宽度变化对总碰撞次数的影响

Fig.5 Effect of width of expansion joint on total collision times

3 伸缩缝刚度变化对碰撞力的影响

由于梁体位移增大产生碰撞效应,对梁间伸缩缝的碰撞弹簧刚度取值仅会直接影响到碰撞力的计算结果^[9],因此,本文主要讨论伸缩缝刚度变化对结构碰撞力的影响.在进行该分析时保持伸缩缝宽度 0.08 m 不变,将文献[8]提及的截面碰撞刚度按式(1)进行修正^[10]:

$$k = (\alpha EA)/L \quad (2)$$

其中: EA 取为 2.7×10^8 kN; α 为控制截面刚度取值的系数,其取值范围在 0.2~1.0 之间^[10].

根据文献[9]对基准桥碰撞效应的初步分析结果可知,LRB 隔震结构在 1.3 节中四条地震动作用下的碰撞效应明显,但对 FPB 隔震结构来说,当伸缩缝宽度保持在 8 cm 时,仅 2 号地震动作用下结构出现碰撞,因此,在本文仅考虑在 2 号地震动记录作用下伸缩缝刚度变化对 FPB 隔震结构碰撞效应的影响.图 6 给出了刚度修正系数 α 变化对最大碰撞力的影响规律.

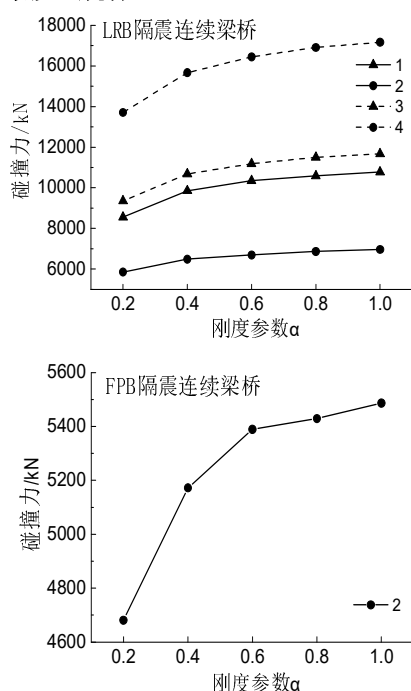


图 6 伸缩缝刚度变化对最大碰撞力的影响
Fig.6 Effect of stiffness of expansion joint on maximum collision force

显而易见,伸缩缝碰撞刚度的变化,可以使结构的碰撞响应发生一定改变.无论是远场长周期地震动作用还是近场长周期地震动作用,碰撞力均随伸缩缝刚度的增大而增大,LRB 隔震结构的最大增幅为 25%,FPB 隔震结构的最大增幅为 17%;由最大碰撞力数值来看,在相同长周期地震动作用下,FPB 隔震结构的最大碰撞力仅为 LRB 隔震结构的

79%. 相比可知,FPB 隔震支座在降低结构碰撞力方面的性能优于 LRB 隔震支座.

此外,碰撞力的大小与碰撞刚度有直接的关系.规律显示,减小碰撞刚度可以显著减小碰撞力带来的影响.因此,在不改变主梁刚度且能达到减小碰撞力的目的要求下,在伸缩缝间设置压缩刚度较小的缓冲材料不失为一种有效的方法.

4 结论

本文以设置 LRB 隔震支座及 FPB 隔震支座的五跨一联连续梁桥为研究对象,探讨了伸缩缝参数变化对结构最大碰撞力及碰撞次数的影响,并得到以下结论:

(1)伸缩缝宽度对长周期地震动作用下隔震结构的最大碰撞力及总碰撞次数有较为明显的影响,伸缩缝宽度越大,最大碰撞力及总碰撞次数越低;

(2)伸缩缝宽度的设置应综合考虑桥梁结构正常使用状态以及地震作用下的碰撞反应;

(3)伸缩缝刚度对最大碰撞力有明显的影响,在不改变主梁刚度的前提下,可在伸缩缝处增设压缩刚度较小的缓冲材料以达到降低碰撞力的目的;

(4)综合隔震连续梁桥在长周期地震动作用下伸缩缝参数变化对上部结构最大碰撞力及总碰撞次数的影响规律可知,设置 FPB 隔震支座的连续梁桥其最大碰撞力及总碰撞次数均小于设置 LRB 隔震支座的连续梁桥,即在降低碰撞风险的方面 FPB 隔震支座优于 LRB 隔震支座.

本文虽然针对隔震连续梁桥开展了部分碰撞效应研究,由于所选用的长周期地震动数量有限,研究对象单一,因此所得结论具有一定的局限性,还有待后续研究予以验证.

参考文献 References

- [1] 杨伟林,朱升初,洪海春,等.汶川地震远场地震动特征及其对长周期结构影响的分析[J].防灾减灾工程学报, 2009, 29(4):473-478.
YANG Weilin, ZHU Chusheng, HONG Haichun, et al. Characteristics of far-field ground motion of Wenchuan earthquake and the effect on long-periodic structures [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29 (4): 473-478.
- [2] 王博,白国良,代慧娟. 典型地震动作用下长周期单自由度体系地震反应分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(5): 190-196.
WANG Bo, BAI Guoliang, DAI Huijuan. Seismic response analysis of long-period SDOF system under typical ground motions [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(5): 190-196.

- [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影响研究[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] CONSTANTINOU 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)