

微动测试技术在古建筑拱桥结构检测中的应用^①

范岩旻, 车爱兰, 陈 峰, 曹永康

(上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要:在古桥梁建筑结构保护中,无损高精度检测一直是一个重要的研究课题。为识别古桥梁拱桥的结构损伤问题,以上海青浦迎祥桥为研究对象,采用全站仪对桥梁结构的变形进行观测及分析,评价桥梁的变形及受力状态;采用微动测试技术,获取结构的损伤动力特性参数,包括固有频率及振动模态。通过分析现有桥梁的模态分布,观测振动模态的突变位置确定结构损伤位置,比较结构的变形特性,对结构的损伤程度进行评价。

关键词:古建筑拱桥;损伤识别;微动测试;固有模态

中图分类号: U446

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)02-0606-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0606

Application of Microtremor Measurement Techniques to Detection of Structural Damage of an Ancient Arch Bridge

FAN Yan-min, CHE Ai-lan, CHEN Feng, CAO Yong-kang

(School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: There are vast territorial and crisscrossing rivers in China. During thousands of years, the Chinese people have built hundreds of thousands of bridges. With diverse structures composed of various materials, these bridges, which are treasures of Chinese architecture, represent, to some extent, the history of Chinese culture. These ancient bridges, though witnessing extreme weather, have been, and are being, damaged due to construction limitations, long time of loading, and the continuous dynamics of erosion and other natural and human factors. Given this situation, it is critical to protect these ancient bridges with detection technology that does not damage the bridges. For the protection of ancient bridge structures, high precision detection technology that does not damage the detected targets has been an important research topic. To identify damages to ancient bridges with arch-bridge structures, the Shanghai Yingxiang Bridge in the Qingpu District is analyzed in this study. The structural features are analyzed and the deformed part of the structure is determined with the help of a total station device to evaluate the deformation and stress states of the bridge. Furthermore, with the application of micro-motion testing technology, the dynamic characteristic parameter of the structural damage, which includes the intrinsic frequency and vibration mode, is determined. After the analysis of the mode distribution of existing bridges and the observation of mutation of the vibration mode, quantitative evaluation of the structural damage is performed by comparing the deformation features of the structure after locating where the structural damage has occurred. Based on the experimental analysis of this study and consider-

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 上海市自然科学基金项目(13ZR1419900)

作者简介: 范岩旻(1994—), 男, 上海人, 本科生, 现主要从事振动测试技术研究。

通讯作者: 曹永康(1969—), 男, 副教授, 博士, 主要从事建筑文化遗产保护的理论与实践研究。E-mail: ykcao@sjtu.edu.cn

ing the structural characteristics and the present situation of the damage, the observation point is set. The location and form of the damage is qualitatively delimited and the three modal distributions of the Yingxiang Bridge are obtained using microtremors. Comparing the three natural frequencies of the numerical results with the microtremor measurements, the significant weaknesses in the whole structure are determined. There is some damage to the Yingxiang Bridge. According to the measurement results, the bridge pier D is damaged most seriously. This indicates that the concrete curing of the middle bridge pier caused the imbalance of stiffness. The Yingxiang Bridge needs reinforcement by concrete, with large amounts in the middle pier of the bridge, to ensure sufficient stiffness to load bearing. In conclusion, microtremor measurements are useful in the detection of damage to ancient arch-bridges.

Key words: ancient arch bridge; damage identification; microtremor measurement; natural mode

0 引言

中国地域广阔,河道纵横交错,在历史的长河中,中华民族建造了数以万计的桥梁,其结构多样,材质丰富。古桥梁历经百年风雨,在长期诸多载荷的作用、自然的风化作用以及其他人为、自然突发性外力的作用下,面临着损伤和损伤积累问题^[1]。这些损伤的积累有可能导致结构的使用性能降低或发生结构破坏。为保证古桥梁结构的安全,需要建立既不会对结构本身产生不良影响又方便快捷的检测和识别结构损伤的方法,以便尽早地探测结构损伤的出现、发生损伤的位置及程度,对结构进行实时修复,避免灾难性事故的发生。

中国古桥梁大多为石材、木材及砖砌及其混合结构,桥梁在承重的同时也受到水流的作用以及水质的侵蚀。在经受了各种地震等自然灾害和船撞击等人为损坏的情况下,结构的损伤形态非常复杂,不仅表现在外部材料破损,结构变形,结构内部也存在损伤。目前传统的桥梁检测手段如钻孔取芯、内部应变检测等,基于文物保护的原则,在古桥梁检测中存在局限性^[2];而其他的无损检测方法如超声波、射线检测法等由于多数古桥梁结构以及损伤形态复杂,检查的结构部位难以接近^[3]。另外由于原始资料的缺失,无法进行原始设计数据和实际情况的对比,很难有效地对结构内部损伤进行定位和定性。

微动测试不需要人为施加震源,其扰动来源是大地深处的微小震动,对结构本身几乎无影响;另外微动测试设备轻巧、操作简单,便于在大型复杂结构中应用^[4]。通过一定的分析手段可以良好地推断建筑结构的振动特性(特征值、阻尼系数及振动模态等)^[5]。本文通过微动观测和传统结构测量相结合的方法,对古桥进行结构损伤评价。

1 基于结构动力特性的损伤识别方法

结构损伤即结构的刚度或质量的损伤,会导致结构的动态特性,如固有频率、固有模态和阻尼等发生变化^[6]。一般来说,结构损伤的存在会使结构整体固有频率降低,模态阻尼比升高,因此通过固有频率、阻尼比和模态振型的变化可以判断结构损伤^[7]。结构固有频率反映结构整体性能,但不太适合反映结构局部损伤反映。相对结构固有频率而言,结构的固有振型包含更多的损伤信息,特别是对结构损伤能够更加准确地定位^[8]。利用结构振型的变化对结构损伤进行识别易于对结构损伤定位,但也存在测量的振型不完整和测量误差较大,损伤程度的定量评价等问题^[9]。

古桥梁建筑大多为石材或木材,其承压结构内部多有裂缝,损伤情况较为复杂,并且古桥梁结构原始资料缺失,部分进行过局部修复,结构参数不明确。这些都给结构损伤定位定量带来了很大的困难。本文采用微动测试的方法,对古桥梁结构进行损伤评价,具体分析步骤如下:

(1) 根据桥梁结构的特点,尽可能全面布设检测点。对于简支梁结构,布设于主要承重构件处。通过微动测试,获得结构的固有频率及固有模态。

(2) 采用全站仪等测量设备对桥梁结构进行变形观测,获得变形参数。根据桥梁结构特点进行变形及受力特性分析。

(3) 根据各观测点的模态分布,评价响应突变位置,对损伤进行定位。

(4) 由于结构的自振频率和振型是结构参数如质量和刚度的函数,所以将测试得到的结构动力特性与结构变形特性进行比较,从而评价损伤程度。

2 迎祥桥损伤现状

2.1 迎祥桥概况

迎祥桥位于在金泽南首(今上海市青浦区金泽镇),于元至元年间(1335—1340)兴建,是江南著名的元式桥梁。明朝天顺六年(1462)重建,清朝乾隆三十三年(1748)修缮,公元 2000 年再次修缮。该桥近似现代的公路桥,当代桥梁专家称其为“连续简支”梁桥的鼻祖。

迎祥桥为五跨简支梁,石柱式砖、木、石混合结构。全长约 34.5 m,桥墩跨度约24.5 m,桥面宽2.45 m,中孔跨径约 6.4 m,两侧跨径不一,约 4~5 m。桥柱用青石铺成,石柱架条石作为横梁,横梁上密排楠木,桥面两边外侧、覆贴水磨方砖,以保护木梁,如图 1 所示。迎祥桥整体结构较规则,荷载传递路径简单、合理,桥体受力较均匀。



图 1 迎祥桥全貌

Fig.1 Overview of the Yingxiang Bridge

迎祥桥经过数次修缮,承压结构发生了很大变化,桥墩的变化尤为显著。为减小桥墩石柱间的不均匀沉降,修缮中将角钢固定于桥墩侧面,将各石柱连接为一整体。并将条石横向架设于桥墩各石柱之上,作为横梁以支撑桥面及通行带来的荷载。在与楠木搭接处,为充分利用楠木的受力截面,对条石上表面进行了挖凿处理,以满足楠木近似圆形的剖面,达到准确贴合。由于船舶通行时对中间桥墩的撞击,中间两个桥墩发生断裂,后期增设了辅助混凝土支护,如图 2 所示。

虽然迎祥桥设计科学合理,结构精巧坚固,但历经 600 多年风雨,该桥已出现了诸多结构、外观等方面的问题:(1) 桥面出现两条纵向裂缝,说明青砖下受力砖石已经出现不同程度的损坏;(2) 楠木虽为千年不朽的珍贵木材,但桥面底部环境潮湿,搭接处较为阴暗,使得楠木端部出现了一定程度的腐蚀现象;由于木材横、纵向受力特征迥异,沿木材纵向出现了一定程度的裂缝,特别是东侧的木梁腐蚀严重;(3) 桥墩下土质不均,桥墩间存在较为严重的不均匀沉降,进一步导致了木梁、桥面受力不均,出现裂



图 2 迎祥桥后期加固

Fig.2 Post-reinforcement of the Yingxiang Bridge

缝;石柱间受力、沉降不均匀,存在倾斜、横向大裂缝。

2.2 变形测量及分析

测量仪器采用尼康 NPL-350 型全站仪。高程测量测点布置在桥墩上边缘、跨中及桥两端。根据建筑测绘结果,以桥下某一面为零标高,测得桥墩、桥面的标高如图 3 所示。根据标高测量结果,将桥梁南北两侧的高程及其二次曲线绘制于图 4。可以看到桥梁横向(南北方向)变形分布不同,两侧出现不同程度的不均匀沉降现象,有可能导致桥面的纵向断裂。在跨中附近出现较为明显的拐点,可以认为跨中桥墩不均匀沉降量较大,与周围桥墩刚度相差亦比较大,易导致该部位的应力集中。

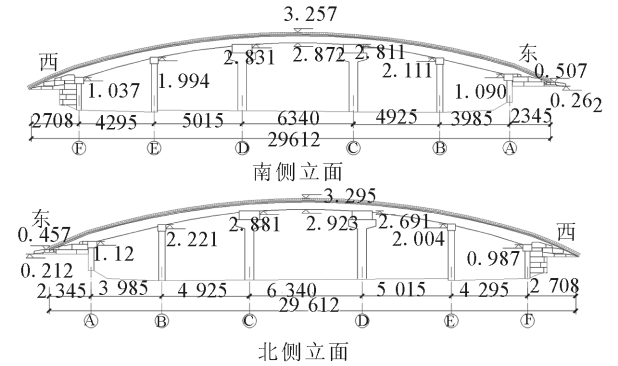


图 3 迎祥桥标高示意图(单位:m)

Fig.3 Elevation of the Yingxiang Bridge (unit:m)

3 迎祥桥微动测试

3.1 试验设备

采用日本东京测振株式会社生产的网络型三分量速度型地震仪(CV-374AV),其仪器参数如表 1 所示。其他设备包括笔记本电脑和供电电瓶(12

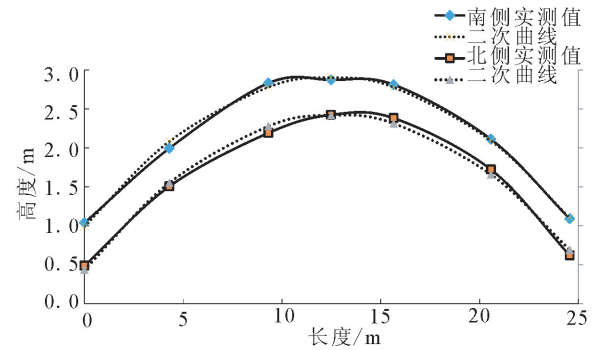


图 4 结构南北侧标高分布

Fig.4 Distribution of elevations in the south and north of the structure

V)。数据采集系统如图 5 所示。

3.2 测点布设及数据采集

根据迎祥桥拱桥结构的特点,将微动测试点布设在各个桥墩上部的桥面上,共布置 6 个测点,实施多点同时观测(图 6)。

表 1 速度型地震仪主要参数指标

Table 1 Main parameters of the seismometer	
采样频率/Hz	100、200、500、1 000
AD 分辨率/bit	24
分辨率/($\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.25(25 μkine)
通道间的偏差/($\text{m} \cdot \text{s}$)	1 以内
记录时间	1 分单位、可变长、最大 10 分
时刻同步/ppm	± 0.62 以内 (针对 GPS)
尺寸/($\text{mm} \times \text{mm} \times \text{mm}$)	180(W) $\times$ 120(D) $\times$ 100(H)、不含突出部
重量/kg	1.5 以下

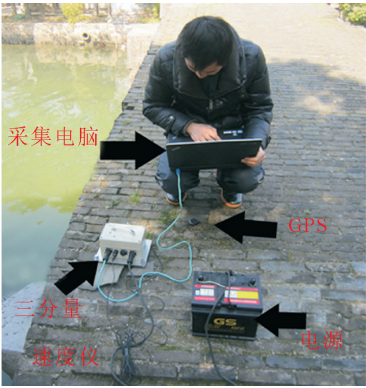


图 5 数据采集系统

Fig.5 Data collection system

本次检测数据采集以正东方向为“x”轴,正南方向为“y”轴,沿桥墩纵向竖直方向为“z”轴。测试时为避免走动等干扰,所有人员撤离桥面。采样间隔 0.004 s,采集时间 45 min。图 7 为采集到的波形例。可以看到,由于拱桥桥面的坡度问题,数据波形存在规律性干扰,总体来说数据平稳。

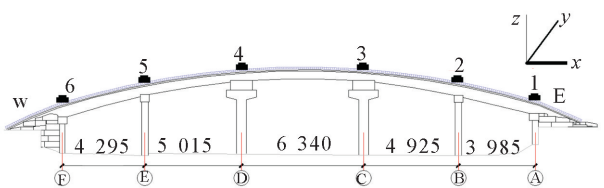


图 6 测点布置图(单位:m)

Fig.6 Measurement points (unit:m)

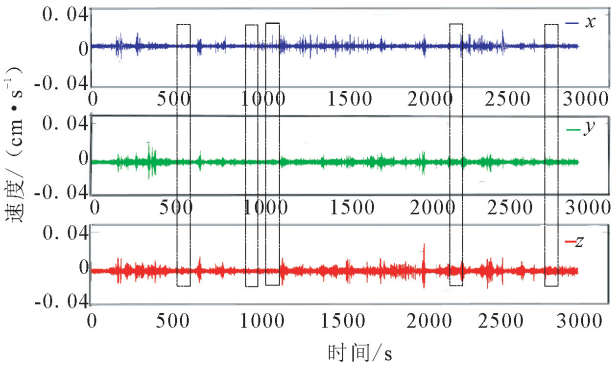


图 7 采集波形例(测点 4)

Fig.7 Recorded waves (point-4)

3.3 数据处理及结果

首先,从 45 min 观测数据中筛选出 5 段噪音少、振幅平稳的数据段,每组数据时间长 60 s,如图 7 所示;然后,对每组数据进行快速傅里叶(FFT)分析,计算观测数据的傅里叶谱,对傅里叶谱加 Han-ning 窗口 10 次,进行平滑化(Band=约 0.1 Hz)之后,对 5 组数据的傅里叶谱进行加权平均,作为此观测点的傅里叶谱;最后,根据傅里叶谱曲线读取卓越频率及其对应的谱峰值。图 8 为测点 4 在南北、东西方向的频谱分布,图中的实线为频谱的平均值。图 9 为各观测点在南北、东西方向的傅里叶谱平均值。可以看出各个观测点数据均呈现一致的卓越特性,即结构的 1,2,3 次特征值。一次固有频率约为 4.5 Hz,二次固有频率约为 6.3 Hz,三次固有频率约为 7.2 Hz。结构南北方向的卓越特征明显大于东西方向。

读取各卓越频率对应的卓越频谱,以桥墩 F 为坐标原点,绘制对应不同特征值的频谱分布,可以认为是结构的固有模态分布,如图 10 所示。可以看到,结构的 1、2、3 阶固有模态呈非对称分布形式,由于中间两桥墩(C、D)的刚度较大,导致其两侧的模态分布复杂。特别是桥梁东侧的桥墩 B 响应明显大于桥梁西侧,可以认为东侧的桥墩刚度明显降低。这与实际现场观测结果一致,B 桥墩上部的木梁腐蚀最严重,其桥墩结构与桥墩 E 差距亦较大。

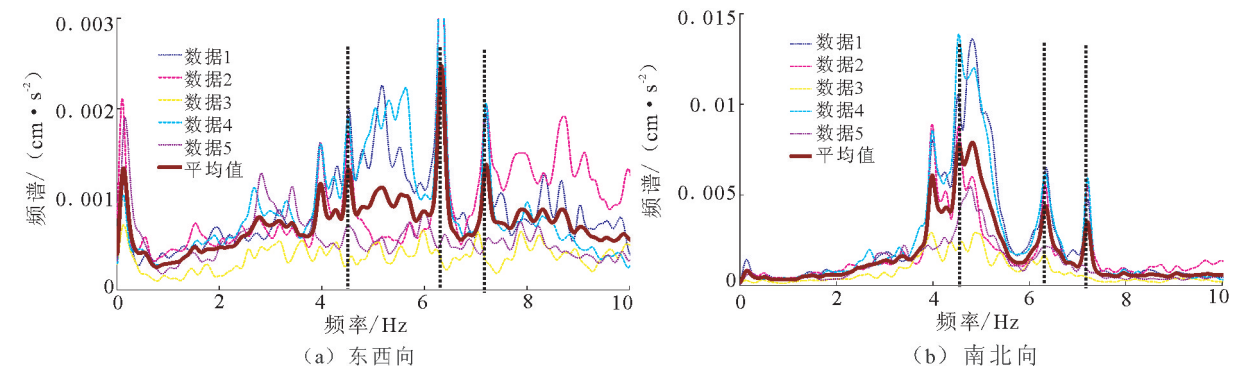


图 8 FFT 频谱(测点 4)

Fig.8 Distribution of the FFT spectrum (point-4)

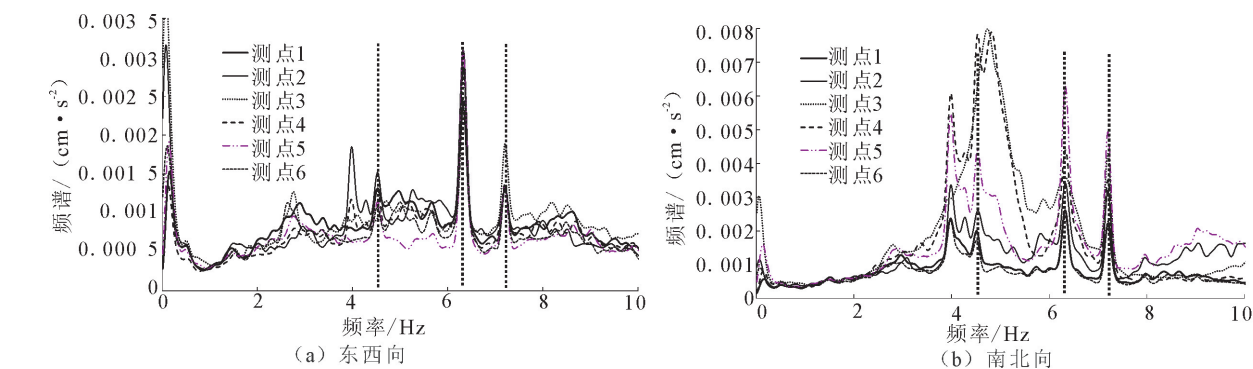


图 9 各测点频谱分布

Fig.9 Distribution of the FFT spectrum at each point

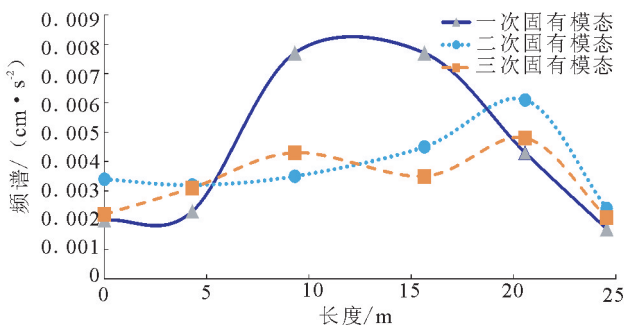


图 10 迎祥桥模态分布

Fig.10 Model distribution of the Yingxiang Bridge

4 结论

(1) 利用对结构不产生影响的微动测试技术,测试结构的动态响应,将结构的振动模态作为损伤识别参数,通过观测振动模态的突变位置确定结构损伤位置。

(2) 对上海青浦迎祥桥结构进行微动测试,在考虑结构特性及残损现状的基础上布设观测点,充分把握结构的整体损伤状况,通过 FFT 频谱分析得到结构的 1, 2, 3 次特征值及振动模态。

(3) 通过比较结构变形观测结果与微动测试固有模态分布,分析结构损伤机理。迎祥桥各部位有着不同程度的损伤,以东侧桥墩周边损伤最为严重,该损伤可以认为是中间桥墩的后期混凝土支护引起了刚度分布的不均衡导致的。

参考文献(References)

[1] 梁思成.中国建筑史[M].北京:文化出版社,1951.
LIANG Si-cheng.A History of Chinese Architecture[M].Beijing:China Cultural Publishing House,1951.(in Chinese)

[2] 张启伟.大型桥梁健康监测概念与监测系统设计[J].同济大学学报,2001,29(1): 65-69.
ZHANG Qi-wei.Conception of Long-span Bridge Health Monitoring and Monitoring System Design[J].Journal of Tongji University,2001,29(1):65-69.(in Chinese)

[3] 王俊青.桥梁无损检测技术的现状研究[J].山西建筑,2013,39(28):143-145.
WANG Jun-qing. Research on Status of Undamaged Test Techniques on Bridge[J].Shanxi Architecture, 2013, 39(28): 143-145.(in Chinese)

[4] 张卫华.常时微动测试在抗震设计上的应用[J].华南地震, 2007,27(3):96-99.

ZHANG Wei-ha. The Application of Geomagnetic Pulsation Test to Aseismic Design[J].South China Journal of Seismology, 2007, 27(3): 96-99. (in Chinese)

[5] 高怀志,王君杰.桥梁检测和状态评估研究与应用[J].世界地震工程, 2000, 16(2): 57-64.

GAO Huai-zhi, WANG Jun-jie. A Review of Research of Detective and Evaluation Technology for Bridges[J].World Information on Earthquake Engineering, 2000, 16(2): 57-64. (in Chinese)

[6] 吴志坚,车爱兰,王兰民,等.常时微动测试在汶川地震甘肃灾区建筑结构震害调查中的应用[J].西北地震学报, 2009, 31(1): 86-90.

WU Zhi-Jian, CHE Ai-Lan, WANG Lan-min, et al. Application of Micro Tremor Observation on Disaster Investigation of the 2008 Wenchuan Earthquake for Building Structures in the Quake-hit Areas of Gansu Province[J].North Western Seismological Journal, 2009, 31(1): 86-31. (in Chinese)

[7] 邓焱,严普强.梁及桥梁应变模态与损伤测量的新方法[J].清华大学学报, 2000, 40(11): 123-127.

DENG Yan, YAN Pu-qiang. New approach for Strain Modal Measurement and Damage Detection of Bridges[J].Journal of Tsinghua University, 2000, 40(11): 123-127. (in Chinese)

[8] 宗周红,褚福鹏,牛杰.基于响应面模型修正的桥梁结构损伤识别方法[J].土木工程学报, 2013, 46(2): 115-122.

ZONG Zhou-hong, ZHU-hu Peng, Niu Jie. Damage Identification Methods of Bridges Structures Using Response Surface Based on Finite Element Model Updating[J].China Civil Engineering Journal, 2013, 46(2): 115-122. (in Chinese)

[9] Ailan Che, Xiurun Ge, Yueming Li. Use of Non-destructive Techniques in Chinese Traditional Timbers[J].Structures and Building, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 2012. DOI: 10.1680/stb.



(上接 593 页)

[8] 中华人民共和国国家标准编写组. GB 50111-2006 铁路工程抗震设计规范[S].北京:中国计划出版社, 2006.

The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB 50111-2006 Code for Seismic Design of Railway Engineering[S]. Beijing: China Planning Press, 2006. (in Chinese)

[9] Building Seismic Safety Council(BSSC). NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 273) [S]. Washington D C: BSSC, 1997.

[10] European Standard 1998 Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance Part 5: Foundations, Retaining Structures and Geotechnical Aspects[S]. CEN/TC, 1998. (in Chinese)

[11] J H Wood, D G Elms. Sismic Design of Bridge Abutments and Retaining Wall[R]. Wellington: Road Research Unit, Transit New Zealand, Road Research Unit Bulletin, 84 Volume 2 ISSN 0549-0030, 1990.

[12] 张建经,冯君,肖世国.刘昌清支挡结构抗震设计的两个关键技术问题[J].西南交通大学学报, 2009, 3(44): 321-326.

ZHANG Jian-jing, FENG Jun, XIAO Shi-guo, et al. Discussions on Two Key Technical Problems for Seismic Design of Retaining Structures[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 3(44): 321-326. (in Chinese)

[13] 张建经,韩鹏飞.重力式挡墙基于位移的抗震设计方法研究——大型振动台模型试验研究[J].岩土工程学报, 2012, 34(13): 416-423.

ZHANG Jian-jing, HAN Peng-fei. Research on Displacement-based Aseismic Design Method of Gravity Retaining Walls——Large Scale Shaking Table Tests Research[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(4): 416-423. (in Chinese)

[14] Newmark N M. Effect of Earthquakes on Dams and Embankments[J]. Geotechnique, 1965, 15(2): 139-159.

[15] Z Cai, R J Bathurst. Deterministic Sliding Block Methods for Estimating Seismic Displacements of Earth Structures[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1996, 15(4): 255-268.

[16] William B Jorner, David M Boore. Peak Horizontal Acceleration and Velocity from Strongmotion Records Including Records from the 1979 Imperial Valley, California, Earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1981, 71(6): 2011-2038.

[17] X Zeng, R S Steedman Rotating Block Method for Seismic Displacement of Gravity Retaining Walls [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Asce, 2000, 126(8): 709-717.