

汶川灾后重建的隔震建筑远程实时监测*

陈洋洋, 谭平, 陈建秋, 周福霖

(广州大学工程抗震研究中心//减震控制与结构安全国家重点实验室(培育), 广东 广州 510405)

摘要: 开发并实施了汶川灾后重建的隔震建筑远程实时监测系统, 对汶川灾后重建的汶川第一小学教学楼(非隔震)、汶川第二小学教学楼(隔震)和映秀安置房(隔震及非隔震)三个代表性隔震工程实施了远程实时监测, 在汶川5.12大地震近5周年之际, 该监测系统已正常运行满1年, 成功对上述结构受到的震中位于四川地区的几次小型地震响应进行了监测并给出典型测试记录和初步分析结果。该工作有望构建我国隔震结构理论验证与隔震工程实测分析新的研究平台, 同时为未来可能的隔震结构强震作用下的实时监测做好技术准备。

关键词: 汶川灾后重建; 隔震建筑; 远程实时监测

中图分类号: TU528.572 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2013)04-0076-07

Remote Real-Time Monitoring for Seismic Isolated Buildings in the Wenchuan Post-Disaster Reconstruction

CHEN Yangyang, TAN Ping, CHEN Jianqiu, ZHOU Fulin

(Earthquake Engineering Research and Test Center, State Key Laboratory for Seismic Reduction, Control and Structural Safety (Cultivation), Guangzhou 510405, China)

Abstract: The development and implementation of the remote real-time monitoring system for base-isolated buildings in the Wenchuan post-disaster reconstruction is presented. The education building of Wenchuan No. 1 Primary School, the education building of Wenchuan No. 2 Primary School, and the Yingxiu Settlement Buildings are under real-time structural monitoring by the system. The Wenchuan 5.12 Earthquake has past for almost 5 years and the system has been normally working for 1 year. It has been successfully recorded and preliminarily analyzed for the monitoring structures under several small earthquakes. The system can be regarded as a working platform for further research on isolated structure theory and isolation engineering measurement analysis. It can also be preparatory technical work for base-isolated structure monitoring under possible violent earthquake.

Key words: Wenchuan post-disaster reconstruction; isolated building; remote real-time monitoring

在汶川5.12大地震的灾后恢复重建工作中, 建筑结构隔震技术作为技术援建的重要内容之一得到推广应用。为了提高结构的抗震安全性和经济性, 以汶川第一幼儿园、汶川第二小学、映秀小学、汶川疾病预防控制中心、映秀安置房、七盘沟安置房为代表的一批学校、医疗机构和安置房等重

要建筑物均采用了隔震设计, 这对隔震技术的工程经验总结和进一步研究具有重要意义。

目前, 世界上已建成隔震建筑近万栋, 我国已建成的隔震建筑也已达一千多栋, 隔震技术发展迅速、日臻成熟。国内外学者和工程师在隔震技术的理论分析、模型试验、产品研发、结构与施工

* 收稿日期: 2012-12-18

基金项目: 国家973重点基础研究发展计划资助项目(2011CB013606); 国家十二五科技支撑计划资助项目(2012BAJ07B02); 国家自然科学基金青年资助项目(11102045); 广东省自然科学基金博士启动资助项目(S2011040004039)

作者简介: 陈洋洋(1981年生), 男; E-mail: chenyangyang2007@gmail.com

等方面做了大量工作并取得很多重要成果^[1]。同时,作为验证隔震技术有效性的重要参考,地震监测研究以及隔震建筑在实际地震中的表现也备受关注^[2-3],研究隔震结构在实际地震作用下的反应过程是提高结构分析和设计水平的一种非常好的手段^[4]。因此,对地震作用下的隔震结构反应进行监测成为隔震技术研究的重要工作之一,目前日本和美国取得的强震下隔震建筑地震响应实测数据和研究成果已达几十例^[5-11],成为考察隔震技术有效性的宝贵资料。

然而,我国至今对隔震建筑结构进行实际地震监测的研究成果还较少,强震下的实测记录更不多见。2000年在云南省抗震培训中心的学员宿舍隔震楼设置了地震监测系统^[12],测得的结果表明,在地震作用未能使隔震层克服初始屈服点的情况下,7层钢筋混凝土结构顶层的水平加速度响应相比基础在1倍左右,并无明显放大,这很可能是由于隔震层初始刚度小于普通钢筋混凝土结构层刚度所达到的隔小震效果。同时,由于无竖向隔震,顶层竖向加速度相比基础放大了2.725倍。2005年在福建省防震减灾中心大楼设置了地震观测系统^[13-15],对两次典型地震实测结果的分析表明,由于所测得的振动幅值很小(顶层加速度峰值仅为 3.15 cm/s^2),在地震作用未能使隔震层克服初始屈服点的情况下,隔震层并未充分发挥功能,12层的钢筋混凝土结构的减震效果不明显。但相比几次小震下的测试结果,地震作用越大隔震效果越明显。同样,该系统也尚未见实际强震作用下的实测记录。2010年在广东科学中心E区采用隔震设计的钢结构也安装了支座监测系统^[16],尚未经实际强震的检验和记录。

至2011年汶川5.12大地震满三周年之际,汶川灾区的灾后重建工作已经基本完工,汶川也成为我国新的隔震建筑推广应用地区之一,为了进一步推进我国隔震技术的工程应用和深入研究,建立有利于考察隔震结构理论与实际差异的研究平台,有必要对灾区已有的代表性隔震建筑进行全面的实时监测。因此,广州大学工程抗震研究中心进行了汶川隔震建筑远程实时监测系统的研发、设计和工程实施,实现了对汶川第一小学(非隔震)、汶川第二小学(隔震)和映秀安置房(隔震及非隔震)结构的远程实时监测,监测系统于2011年底完成现场安装调试工作,在汶川5.12大地震近5周年之际,该系统已成功运行满1年,对上述结构受到的震中位于四川和云南地区、震级为3~5.7级的

7次中小型地震响应进行了监测,为未来可能的强震监测也做好的技术准备。本文从研发、构成、布设和典型实测结果对该汶川灾后重建隔震建筑的远程实时监测系统介绍和总结,为进一步完善该实测平台和今后的深入研究工作奠定基础。

1 汶川隔震建筑远程实时监测系统

借鉴国内外的最新技术经验^[17-19],我们基于NI(美国国家仪器公司)的CompactRIO硬件平台和LabVIEW软件平台开发了一套结构远程监测系统,分别在汶川第一小学教学楼(非隔震)、汶川第二小学教学楼(隔震)和映秀安置房(隔震及非隔震)设立现场监测站,布设三向高灵敏度数字地震仪,构建终端采集子站,并通过虚拟局域网技术实现在广州抗震中心监控室的远程实时监测。

汶川二小教学楼是五层钢筋混凝土框架结构(图1),隔震层设置在基础以上,采用弹性滑板支座和铅芯橡胶支座进行隔震设计。为了对隔震建筑和非隔震建筑进行实测对比研究,我们在距离汶川二小不足1km的汶川一小教学楼也布设的监控系统,汶川一小教学楼同样是五层钢筋混凝土框架结构,采用传统抗震设计。另外,对映秀安置房也布设了监测系统,分别监测上部结构基本相同的隔震砌体结构房屋和传统抗震砌体结构房屋,映秀安置房隔震房屋是采用村镇小型化橡胶支座结合石墨滑移层的复合隔震技术。



图1 三个监测子站所在地

Fig. 1 Locations of the three monitoring substations

分别在隔震建筑的基础(或隔震层底板)、隔震层顶及顶层楼板分别布设三向加速度传感器

(图 2), 对传统抗震结构的基础 (或首层地面)、顶层楼板分别布设三向加速度传感器。考察结构地震作用下的响应位置的地震反应, 为后续评估和研究工作做好准备。

整个系统共采用三向加速度数字地震仪 9 个, 采集子站 3 套, 现场服务器 3 台, 远程服务器 1 台, 外加 2 个位移传感器对支座徐变进行监测, 主要硬件见表 1、图 3 和图 4。

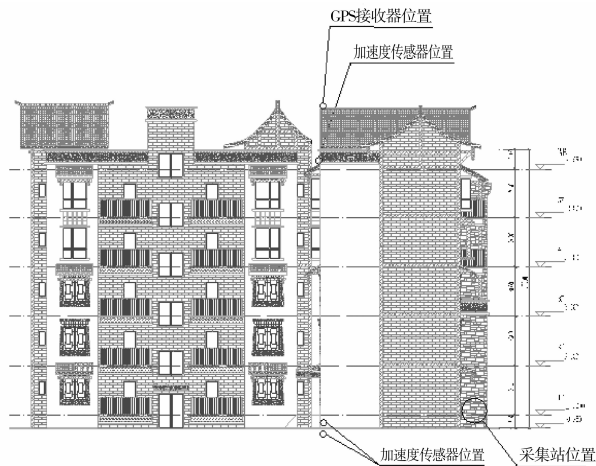


图 2 隔震建筑测点布设示意图

Fig. 2 Sketch of measuring points for seismic isolated building

表 1 监测设备汇总表

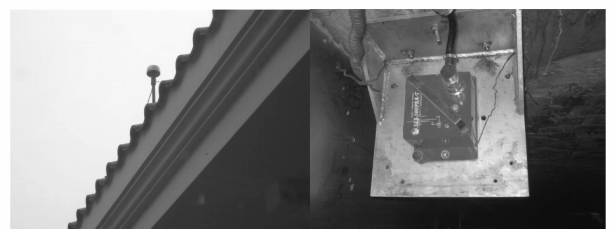
Table 1 Summary sheet of monitoring equipments

	内容	型号	数量
映秀安置房	16 通道地震数据采集站 (带 GPS 同步系统)	15 通道加速度测试, 1 通道位移测试	1
	三向加速度传感器	TSA-100S	4
	不间断电源	山特 UPS C1K (S)	2
	12 通道地震数据采集站 (带 GPS 同步系统)	9 通道加速度测试, 3 通道位移测试	1
汶川二小	三向加速度传感器	SLJ-300FBA-T	3
汶川一小	隔震支座徐变监测位移传感器	MTA-3E-5KW	2
	不间断电源	山特 UPS C1K (S)	1
	8 通道地震数据采集站 (带 GPS 同步系统)	8 通道加速度测试	1
共用	三向加速度传感器	SLJ-300FBA-T	2
	不间断电源	山特 UPS C1K (S)	1
各采集子站与广州抗震中心服务器组网, 要求具有固定 IP 地址			

3 个采集子站是基于 NI 公司的 CompactRIO 模块化组件整合而成的数字采集仪, 设置足够的通道数满足三个测试地点的测点数的需要。三个采集子站分别通过接收 GPS 信号获得统一的绝对时间信号, 实现采集同步, 统一设定加速度信号采样周期为 0.02 s, 实时采集数据第一时间由每个采集子站配备服务器储存和管理, 避免了第一时间进行远程传输数据量过大, 网络可靠性低的缺点, 各子站均配置了后备继电器, 断电状态下能继续维持 24 小时数据采集和存储。三台服务器都接入互联网, 设定防火墙并与位于广州大学抗震中心的远程服务器达成 VPN 虚拟局域网协议。基于 NI 的 LabVIEW 平台开发了实时监测软件 (图 5), 日常运营期间, 通过远程登录即实现对系统的实施监测 (图 6), 对感兴趣的实时或历史数据可选择直接下载。



隔震层加速度传感器



屋面GPS接收器

屋面加速度传感器

图 3 加速度传感器和 GPS 接收器

Fig. 3 Acceleration transducer and GPS receptor



图 4 现场长期采集子站与服务器

Fig. 4 Located long-term acquisition substation

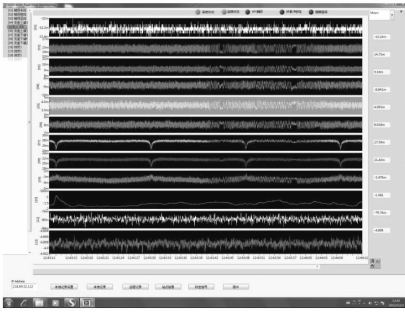


图 5 远程实时监测软件界面

Fig. 5 Software interface of the remote real-time monitoring software

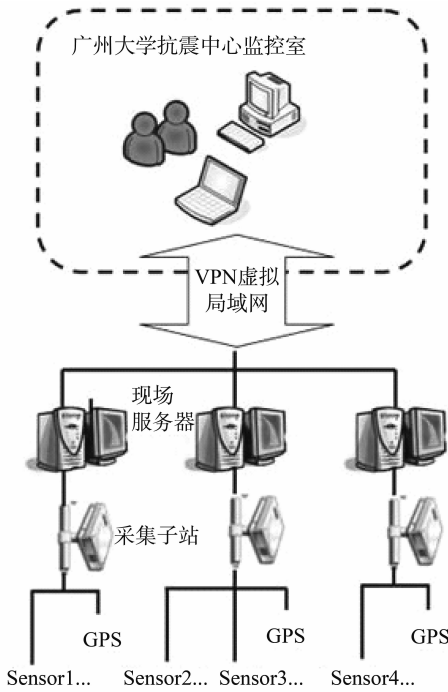


图 6 远程监测系统的网络架构

Fig. 6 Network structure of the remote monitoring system

2 汶川灾后重建隔震建筑的地震响应监测

本监测系统于 2011 年底完成了现场安装和调试，并开始运营，从 2011 年 12 月至今，已成功监测了隔震建筑小地震作用下的反应超过 7 次，历次地震震级处于 3 到 5.7 级之间，其中震中位于汶川境内的地震都不大于 4 级，所监测的建筑物基础加速度响应峰值基本都在 1 gal 到 13 gal 之间。

表 2 给出了 2012 年 7 月 2 日 6 时 17 分，汶川一小和汶川二小在地震作用下结构反应，该地震为 3.9 级，震中位于汶川县和茂县交界，震源深度 21 km。从表 2 可以看出，基础的加速度峰值最大达到 8.48 gal，该地震作用未能使隔震层屈服，屋面加速度峰值相比基础加速度峰值都有不同程度的放大。但总体上看，隔震结构屋面相对基础的加速度放大率仍然明显低于传统抗震结构，这是由于弹性滑板支座与铅芯橡胶支座组合的隔震层的屈服前刚度低于传统钢筋混凝土结构层刚度。

表 2 2012 年 7 月 2 日汶川县、茂县交界 3.9 级地震监测结果

Table 2 Seismic monitoring result for the M. 3.9 Earthquake at the border of Wenchuan country and Mao country on July 2, 2012

测试方向	测试地点	基础	隔震层 顶板	屋面	屋面相对基 础的放大率
长轴向 加速度 峰值/gal	汶川一小(抗震)	6.4		19.04	2.97
	汶川二小(弹性 滑板支座、铅芯橡 胶支座隔震)	6.27	4.36	11.25	1.79
短轴向 加速度 峰值/gal	汶川一小(抗震)	5.23		12.31	2.35
	汶川二小(弹性 滑板支座、铅芯橡 胶支座隔震)	8.48	7.72	7.21	0.85
竖向加 速度峰 值/gal	汶川一小(抗震)	4.77		7.53	1.58
	汶川二小(弹性 滑板支座、铅芯橡 胶支座隔震)	7.17	9.06	8.53	1.19

表 3 给出了 2011 年 12 月 6 日 22 时 03 分，系统测到的映秀安置房结构地震响应，该地震为 3.8 级，震中位于汶川县内，震源深度 19 km。从表 3 可以看出，基础加速度峰值最大达到 2.02 gal，隔震结构的响应与非隔震结构的响应相差不大，这是由于该隔震设计采用了石墨层滑移隔震，理论上在未克服隔震层静摩阻力之前，隔震层刚度与传统抗震结构基本一致，所以隔震与非隔震结构在这一阶段的响应是基本一致的，这样的设计有利于在小震不坏的前提下，提高抗风能力。

限于篇幅，下面仅由图 7 至图 12 列举 2012 年 7 月 2 日汶川 3.8 级地震作用下汶川二小和汶川一小的加速度响应时程。

表 3 2011 年 12 月 6 日汶川县 3.8 级地震监测结果

Table 3 Seismic monitoring result for the M. 3.9

Earthquake at Wenchuan country on December 6, 2011

测试方向	测试建筑	基础	隔震层顶板	屋面	屋面相对基础放大率
长轴向 加速度 /gal	映秀安置房(抗震)			3.74	1.85
	映秀安置房(村镇小型橡胶支座、石墨层滑移隔震)	2.02	1.17	3.10	1.53
短轴向 加速度 /gal	映秀安置房(抗震)			3.74	3.86
	映秀安置房(村镇小型橡胶支座、石墨层滑移隔震)	0.97	0.98	3.84	3.97
竖向 加速度 /gal	映秀安置房(抗震)			1.64	1.46
	映秀安置房(村镇小型橡胶支座、石墨层滑移隔震)	1.12	1.19	1.51	1.35

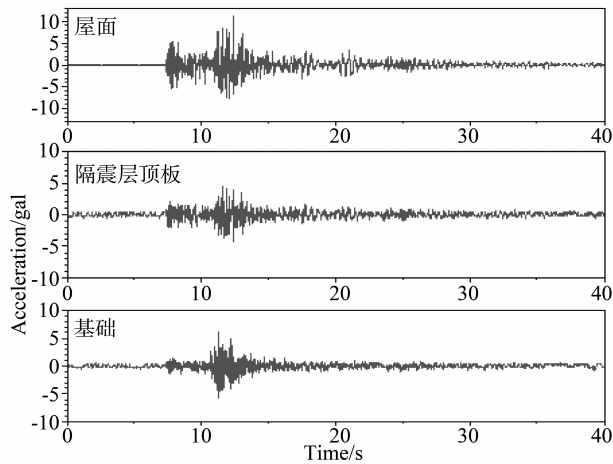
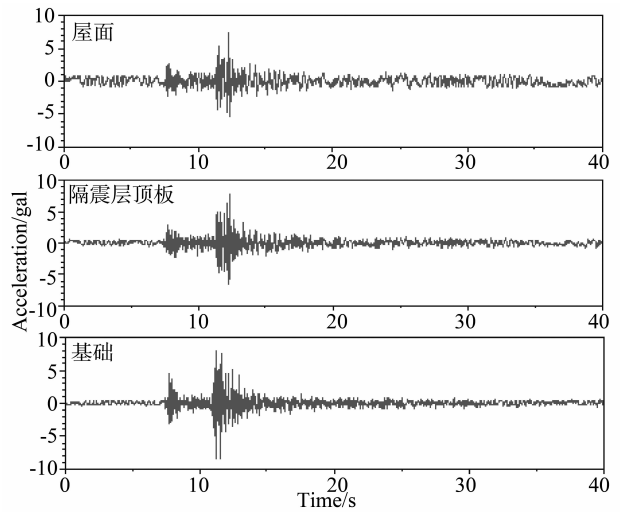
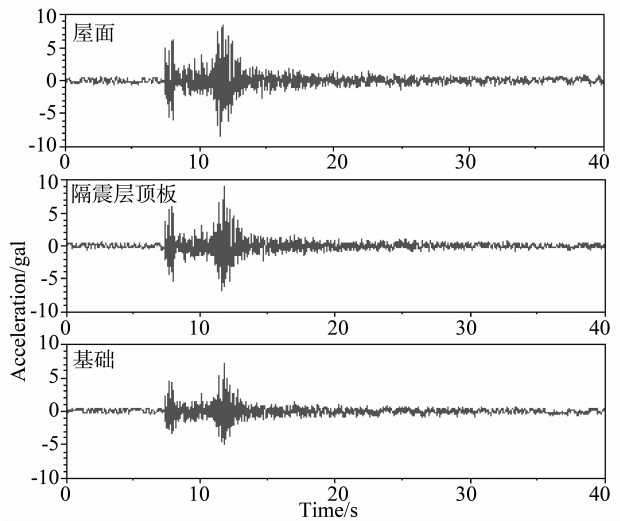
图 7 汶川二小隔震结构地震加速度响应
(建筑平面长轴向)Fig. 7 Acceleration response of seismic isolation structure
in the second primary school of Wenchuan
(long axis direction in building plane)图 8 汶川二小隔震结构地震加速度响应
(建筑平面短轴向)Fig. 8 Acceleration response of seismic isolation structure
in the second primary school of Wenchuan
(short axis direction in building plane)

图 9 汶川二小隔震结构地震加速度响应(竖向)

Fig. 9 Acceleration response of seismic isolation structure
in the second primary school of Wenchuan
(vertical direction)

3 结论

本文介绍了汶川灾后重建的隔震建筑远程实时监测系统的开发与实施,对汶川灾后重建的汶川第一小学教学楼(非隔震)、汶川第二小学教学楼(隔震)和映秀安置房(隔震及非隔震)三个代表性工程成功实施了小地震作用下的远程实时监测并给出典型测试记录的初步分析结果。得到如下结论:

1) 本文基于 NI 的 CompactRIO 模块化硬件平台和 LabVIEW 软件开发平台构建的结构实时监测系统,结合互联网 VPN 技术,可以实现对隔震结

构远程结构的实时监测,系统运营 1 年效果良好。

2) 该监测系统从 2011 年 12 月开始运营至今,已成功监测了隔震建筑在小地震作用下的结构反应超过 7 次,历次小地震作用均未使隔震结构隔震层屈服,实测结构总体分析表明,在 1gal 到 13 gal 量级的小震作用下:采用弹性滑板支座与铅芯橡胶支座组合的钢筋混凝土隔震结构,屋面相对基础的水平加速度放大率也明显低于传统抗震结构,这是由于的隔震层的屈服前刚度低于传统钢筋

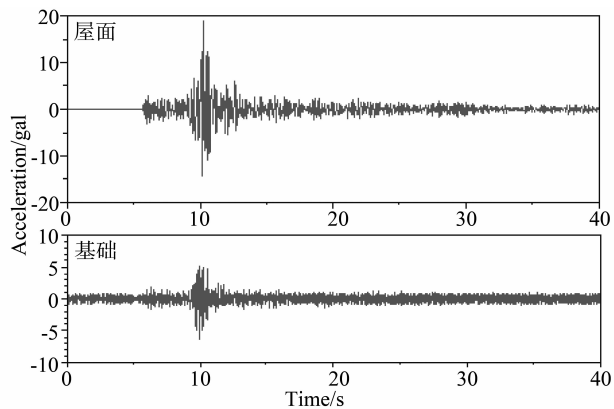


图10 汶川一小抗震结构地震加速度响应
(建筑平面长轴向)

Fig. 10 Acceleration response of anti seismic structure
in the first primary school of Wenchuan
(long axis direction in building plane)

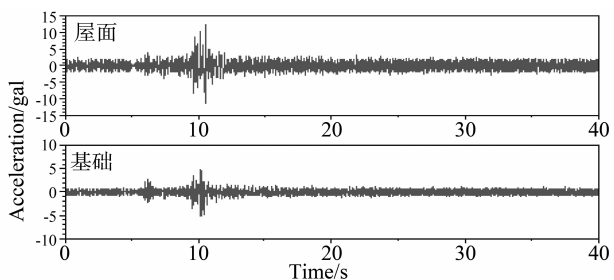


图11 汶川一小抗震结构地震加速度响应
(建筑平面短轴向)

Fig. 11 Acceleration response of anti seismic structure
in the first primary school of Wenchuan
(short axis direction in building plane)

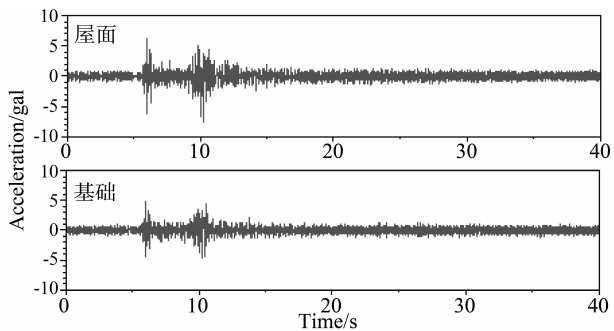


图12 汶川一小抗震结构地震加速度响应(竖向)
Fig. 12 Acceleration response of anti seismic structure
in the first primary school of Wenchuan
(vertical direction)

震结构与传统抗震结构在此阶段的地震响应无明显差别,这在保证小震不坏的前提下有利于隔震结构的抗风设计。

3) 本系统可以继续再现有 LabVIEW 软件平台上深入开发新的结构监测功能,试验新的结构监测算法,研究隔震结构动力特性,验证隔震结构理论。同时也可以基于 CompactRIO 模块化硬件平台继续设计加入新的板卡,扩充新的传感设备,加入新的监测子站,为未来可能的各类型隔震减震结构强震作用下的实时监测研究做好技术准备。

参考文献:

- [1] 周福霖. 工程结构隔震减震研究进展[M]. 北京:地震出版社,2004.
- [2] 谢礼立,于双久. 强震观测与分析原理[M]. 北京:地震出版社,1982.
- [3] KELLY J. Seismic isolation of civil buildings in the USA [J]. Progress in Structural Engineering and Materials, 1998, 1(3):279-285.
- [4] 周雍年. 强震观测的发展趋势和任务[J]. 世界地震工程, 2001, 17(4):19-26.
- [5] CELEBI M. Successful performance of a base-isolated hospital building during the 17 January 1994 Northridge Earthquake [J]. The Structural Design of Tall Buildings, 1996, 5:95-109.
- [6] KASHIMA T, ITOU A, FUJITA H. Dynamic behavior of 9-story base isolated building during the 2003 off Tokachi Earthquake, Japan [C] // Proceeding of Third UJNR Workshop on Soil-Structure Interaction, California, USA, 2004.
- [7] KANI N, TAKAYAMA M, WADA A. Performance of seismically isolated buildings in Japan. - Observed records and vibration perception by people in buildings with seismic isolation[C] // Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, California, USA, 2006.
- [8] MORITA K, TAKAYAMA M. Performance of seismic isolated buildings due to 2005 West off Fukuoka Earthquake in Japan[C] // Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008.
- [9] HIJIKATA K, TAKAHASHI M, AOYAGI T, et al. Behavior of a base isolated building at Fukushima Dai-Ichi Nuclear Power Plant during the Great East Japan Earthquake [C] // Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, Tokyo, Japan, 2012.
- [10] 日本建筑学会. 日本建筑学会大会学术讲演梗概集(北陆)[C]. 2010.

混凝土结构层刚度。而对于采用村镇小型橡胶支座结合石墨滑移层隔震的砌体结构而言,在这种量级的小震作用下,由于隔震层未克服初始摩阻力,隔

- [11] 张强,刘文光,何文福,等. 隔震结构的强震观测及数值响应分析效果[J]. 结构工程师,2012,28(3):109-116.
- [12] 崔建文,赵永庆,付正新,等. 隔震及超高层建筑的地震反应观测[J]. 地震研究,2002,25(2):173-185.
- [13] 韦永祥. 基于强震和风振记录分析隔震结构的动力特性[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2007.
- [14] 金星,韦永祥,陈学良,等. 隔震建筑结构的强震观测与初步分析[J]. 地震工程与工程振动,2007,27(6):181-188.
- [15] 金星,韦永祥,张红才,等. 基于强震观测的隔震结构地震反应分析[J]. 地震工程与工程振动,2009,29(2):19-28.
- [16] 范雁,张季超,许勇. 广东科学中心 E 区隔震支座监测预警指标研究与应用[J]. 工程力学,2010,29(2):19-28.
- [17] 贾瑞武,彭光正,范伟. 基于 LabVIEW 平台和网络的计算机远程在线监控[J]. 北京理工大学学报,2002,22(1):76-80.
- [18] 邹卫华,尹宁宁. 基于 LabVIEW 的远程数据采集的实现[J]. 哈尔滨理工大学学报,2008,13(6):87-90.
- [19] 高东伟,李宏男,任亮,等. 基于虚拟仪器技术的结构健康监测系统开发[J]. 系统仿真学报,2009,21(10):2889-2894.

~~~~~  
(上接第 75 页)

- [5] 郑辉. 基于小波分频与直方图均衡的图像增强算法[J]. 现代电子技术,2010,16:149-150.
- [6] 柳薇,陈冬丽. 基于多小波变换的图像编码算法研究[J]. 中山大学学报:自然科学版,2011,50(5):50-53.
- [7] 郭昌. 小波变换与 HMT 模型的图像插值算法[J]. 中山大学学报:自然科学版,2012,51(3):55-59.
- [8] 张志龙. 一种保持图像细节的直方图均衡新算法[J]. 计算机工程与科学,2006,28(5):36-38.
- [9] 冈萨雷斯. 数字图像处理[M]. 北京:电子工业出版社,2007:93-94.
- [10] 陈文飞,廖斌,许雪峰,等. 基于 Piecewise 直方图均衡化的图像增强方法[J]. 通信学报,2011,32(9):153-160.
- [11] 何昕,李晓华,周激流. 一种自适应多阈值直方图均衡方法[J]. 计算机工程,2011,37(17):206-207.
- [12] YOON Byoungwoo, SONG Woojin. Image contrast enhancement based on the generalized[J]. Journal of Electronic Imaging, 2006,16(3):1-8.
- [13] ZHANG Xuming, YIN Zhouping, XIONG Youlun, et al. Impulse noise suppression using two-state switching mean filter[C] // International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems, 2007:421-424.