

水平初位移条件下实际隔震结构现场测试

吴应雄^{1,2}, 陈 骁¹, 邵奕夫¹, 廖文彬³

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 福建福大建筑设计有限公司, 福建 福州 350002;
3. 厦门中福元建筑设计研究院, 福建 厦门 361005)

摘 要: 已建成的隔震建筑仅有小部分经受过地震考验, 由被动控制特点可知, 隔震层的动力特性缺乏跟踪调节和控制能力。现场测试了1栋基础隔震幼儿园建筑, 检验实际隔震结构的动力特性和抗震性能。隔震层由20个LNR500和26个LRB400橡胶支座组成, 测试了水平初位移75 mm(LRB400的109%剪应变)条件下的动力特性, 展示了实现水平位移条件的方法及试验所得主要结果。水平位移的实现通过混凝土反力墙、顶杆及液压泵系统配合完成, 将建筑推开位移, 顶杆爆破卸载使建筑做自由振动。试验结果表明: 隔震结构的自振周期比抗震结构显著延长; 隔震层滞回曲线饱满; 顶杆卸载后隔震层瞬间基本复位, 残余变形在48 h内逐渐消除; 各楼层动力响应控制效果明显, 顶层加速度约放大1.27倍。

关键词: 基础隔震; 水平位移; 动力特性; 复位性能; 滞回特性

中图分类号: TU352.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2015)06-0100-07

Field Test for A Base Isolation Structure Under the Condition of Horizontal and Initial Displacement

WU Yingxiong^{1,2}, CHEN Xiao¹, SHAO Yifu¹, LIAO Wenbin³

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

2. Fujian Fuda FU Architectural Design Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350002, China;

3. Xiamen Zhongfuyuan Institute of Architectural Design and Research, Xiamen, Fujian 361005, China)

Abstract: Only a few isolated structures have been subjected to the test of earthquakes, due to the technical characteristics of passive control, isolation layer lack the ability of instantaneous adjustment and control. The field testing has been conducted on a kindergarten building with base isolation to analyze the dynamic characteristics and seismic performance of the actual isolated structures. This isolation layer is composed of 20 LNR and 26 LRB, its dynamic characteristics has been tested under the conditions of 75 mm horizontal initial displacement (109% shear strain of LRB400). From the test, the method of achieving horizontal displacement conditions was demonstrated and the main test results were obtained. Horizontal displacement conditions were achieved by combining the joint force of concrete reaction wall, mandrel and hydraulic pump design system. First, the construction was pushed to the designed displacement of 75 mm, and then the mandrel was instantaneously burst and uninstalled to put the construction to the state of one-time one-way free vibration. The results showed that the vibration period of the isolation structure was significantly longer than the seismic structure; isolation layer hysteretic curve was full; isolation layer substantially instantaneously reset after mandrel uninstalling, residual deformation gradually eliminated within 48h; dynamic response damping effect of each floor was noticeable, acceleration responses at the top floor magnified approximately 1.27 times.

Keywords: base isolation; horizontal displacement; dynamic characteristics; reset performance; hysteretic characteristics

近十几年来,结构隔震技术应用在我国发展迅速,全国已建成约 5 千栋的隔震建筑。国内外仅有少量隔震建筑经受过地震考验,例如 2013 年中国雅安地震,作为当地隔震建筑示范工程的芦山县人民医院,经受住了强震考验,展现其优越的抗震性能;我国广东潮汕和甘肃陇南等地区的几栋隔震建筑也经历过实际地震的检验^[1-2]。这些少量隔震建筑的观测记录表明,建筑达到隔震设计目标,其抗震能力满足规范要求。然而,绝大部分的隔震建筑没有受到地震考验,又由被动控制特点可知,隔震层的动力特性缺乏跟踪调节和控制能力。因此,有必要通过现场测试来验证实际的隔震结构动力特性和抗震性能。

国内外对隔震建筑在水平初位移推移条件下的测试和分析较少,魏陆顺等^[3]对福建防震减灾指挥中心隔震建筑进行 10 mm 的初位移测试和分析,获得结构前 3 阶频率、振型和阻尼比,得到隔震层在小变形时的滞回耗能和楼层加速度响应,测试结果表明,隔震结构的卓越周期长于抗震结构,结构各阶振型的阻尼比较大;吴应雄等^[4]对厦门某卫生院底层柱顶隔震的医技楼进行初位移为 32 mm 的测试,结果表明:环境激振作用下,隔震结构与抗震结构自振周期近似相等;初位移条件下,隔震结构的基本周期较抗震结构略有延长;隔震层能迅速恢复到初始位置。Franco Braga、Michelangelo Laterza 等^[5-6]使用机械装置对意大利 Basilicata 大学一栋大楼进行水平初位移为 20 mm(对应支座剪应变 20%)的释放试验,测试结果表明:环境振动条件下,隔震结构与非隔震结构动力特性相近;当隔震层发生较小变形时,结构的第一周期较环境振动下的周期长约 1.21 倍,且有较大的阻尼比。

以上实际隔震建筑的测试普遍存在一定局限性,主要是推移的水平初位移值过小,LRB 的铅芯还未参与工作,不能正确反映结构的动力特性;另一方面,液压千斤顶卸载时间相对较长,使得隔震橡胶支座的位移回复缓慢,这样的测试方法显然不够真实。因此,为了得到更加真实的隔震结构动力特性,本次现场试验对推移后的卸载方式进行重新的构思与设计。在卸载前,利用混凝土顶杆代替液压千斤顶支撑上部结构,并瞬间爆破支撑顶杆,使建筑做自由振动。此外,为解决水平位移推移值过小的局限,本试验将隔震层水平位移顶开至 75 mm,得到结构的自振特性,进一步分析可得到结构的复位性能以及滞回耗能水平。

1 工程概况

厦门市某幼儿园建筑,建筑主体结构三层,局部四层。地下为隔震检修层。东西(X向)长度 65.70 m,南北(Y向,Y正向是为北向)宽度 21.70 m,结构总高度 14.95 m,钢筋混凝土框架结构,框架抗震等级三级,建筑抗震设防乙类;场地类别Ⅱ类,特征周期 0.35 s;基本风压 0.80 kN/m²。建筑抗震设防烈度 7 度,设计基本地震加速度 0.15g,设计地震分组第二组,结构采用基础隔震技术。建筑外立面如图 1 所示,建筑的平面图和Ⅰ-Ⅰ剖面分别如图 2、图 3 所示。动力推移测试工作在建筑主体完成后于 2014 年 2 月进行。



图 1 建筑外立面图

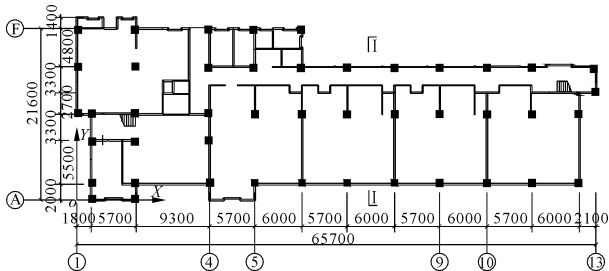


图 2 底层平面图(单位:mm)

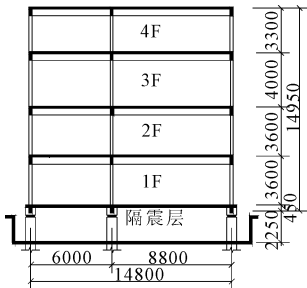


图 3 Ⅰ-Ⅰ剖面图(单位:mm)

2 隔震层设计与橡胶支座性能

建筑总重量 5.67×10^5 kN,隔震层由 46 个隔震橡胶支座组成,分别是 20 个 LNR500 和 26 个 LRB400。隔震层提供的总屈服剪力^[7]为 1 170 kN,

支座平均面压 7.56 MPa, 支座平面布置与施工现场安装分别见图 4 和图 5。表 1 给出了所用的两种支座规格与力学参数。

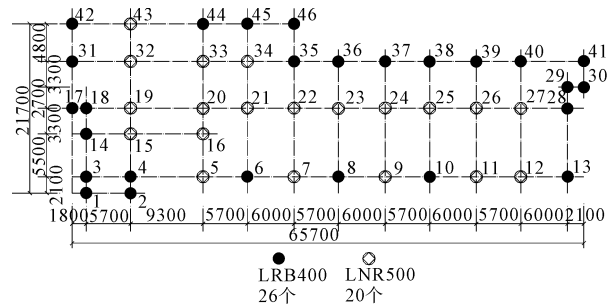


图 4 隔震橡胶支座平面布置图



图 5 隔震橡胶支座施工安装

隔震层施工前,对 LRB400 和 LNR500 进行第三方见证下的检测,水平剪切性能的水平力一位移见图 6。

表 1 隔震橡胶支座规格与力学参数

支座型号	支座类别	橡胶总厚度/mm	橡胶剪切弹性模 G /($\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$)	屈服前刚度/($\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$)	水平等效刚度 K_h /($\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$) (屈服后刚度 K_d /($\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$))		等效阻尼比		屈服力 Q_d /kN
					$\gamma = 100\%$	$\gamma = 250\%$	$\gamma = 100\%$	$\gamma = 250\%$	
LRB 400	铅芯橡胶支座	68.6	0.392	10.44	1.435(0.870)	1.019(0.699)	0.26	0.18	45
LNR 500	普通橡胶支座	96.0	0.392	—	0.937(/)	0.890(/)	0.05	0.05	—

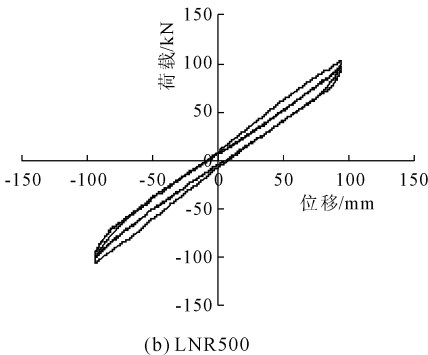
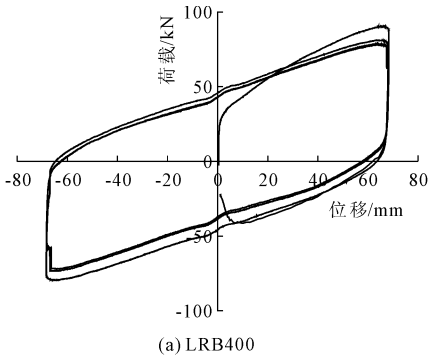


图 6 LRB400 和 LNR500 水平力一位移图

3 现场测试设计

3.1 现场测试仪器及相关装置

试验所用仪器设备和数据分析处理软件包括:DH612 传感器、电测位移计、液压千斤顶与液压泵系统、计算机、动态信号采集分析系统、模态分析软件和位移动态采集分析软件。DH612 传感器用来测试楼层的振动信号,包括速度与加速度;电测位移计安装在隔震层的中柱,测点对应图 4 中 21~24 号隔震支座上支墩柱位置。将电测位移计测试的隔震层位移变化通过导线传至位移动态采集分析软件;液压千斤顶与液压泵系统系动力加载装置,使隔震层产生水平位移。数据采集中心主要包括数据采集箱与计算机,计算机用来加载上述的动态信号采集分析系统、模态分析软件和位移动态采集分析软件。图 7

是传感器的现场布置,图 8 是隔震层的数据采集仪器,位移测试计如图 9 所示。



图 7 DH612 传感器现场布置

3.2 传感器布置

由于建筑竖向规则,测点布置于①轴和⑫轴靠北面的楼层边角位置,各层东西向分别布置一对加

速度传感器和一对速度传感器。对传感器进行编号,如表 2 所示,最终通过导线连通到半地下室的数

据采集中心,采集结构位移复位前后的加速度与速度时程曲线。传感器沿楼层的布置如图 10 所示。



图 8 数据采集仪器

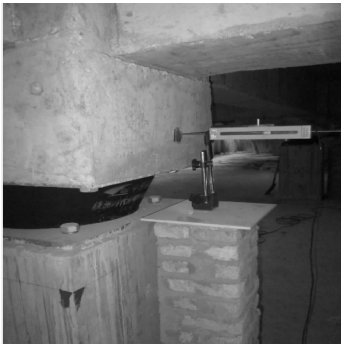


图 9 位移测试计

表 2 各楼层传感器编号

楼层位置	1 层西向	2 层西向	3 层西向	4 层西向	1 层东向	2 层东向	3 层东向	4 层东向
加速度传感器	sensor 1	sensor 3	sensor 5	sensor 7	sensor 9	sensor 11	sensor 13	sensor 15
速度传感器	sensor 2	sensor 4	sensor 6	sensor 8	sensor 10	sensor 12	sensor 14	sensor 16

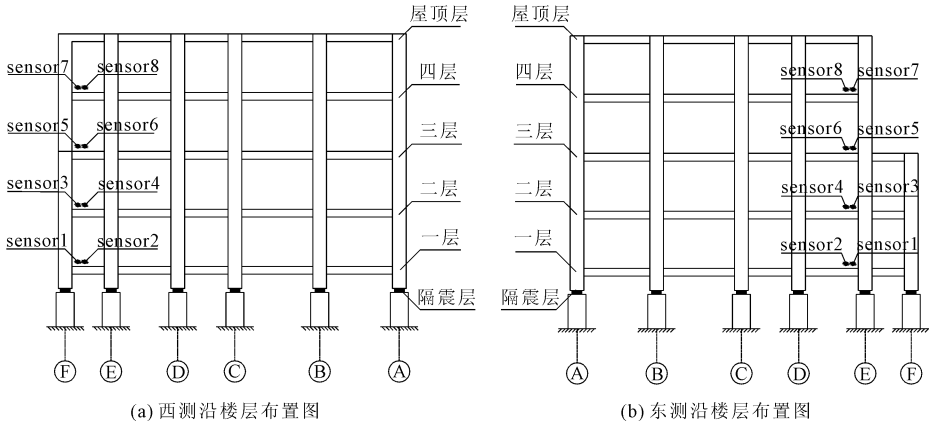


图 10 传感器布置图

3.3 水平位移加载及卸荷装置设计

试验前估算隔震层的初始等效水平刚度,推算出将建筑推开一定位移所需施加的水平力,预先在建筑北面浇筑 4 座反力墙,分别与④、⑤、⑨、和⑩轴对应。共采用 12 台极限载荷为 60 t 的液压千斤顶,每座反力墙配置 3 台。试验前预先将液压千斤顶就位并顶靠在反力墙上,加载液压千斤顶使上部结构缓慢产生水平位移。当推移到设定位移时,将事先浇筑好尺寸为 180 mm×180 mm×600 mm 的 C30 素混凝土顶杆布置在千斤顶侧上方的位置,每座反力墙布置 4 根,总共采用 16 根顶杆。图 11 展示了反力墙的平面布置图,图 12 给出了荷载施加与支撑装置图。

液压千斤顶卸载后,混凝土顶杆完全替代液压千斤顶工作。此时,上部结构的水平位移完全由 16

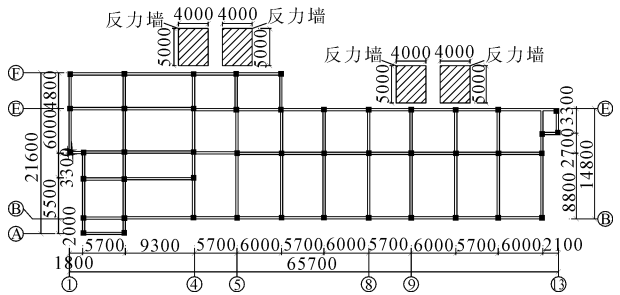


图 11 反力墙平面布置图

根顶杆支撑。在顶杆上事先预留的孔洞中安装乳化炸药,通过对顶杆瞬间的爆破,使顶杆瞬间破坏并退出工作,在一定的水平位移条件下做自由振动。此时,通过预先安装在建筑各层东西向两端的传感器记录建筑物自由振动时的加速度时程曲线。水平位移条件下的推移测试位移达 75 mm,能够使 LRB 的剪应变达 100% 以上,相当于中震作用水平。液压

千斤顶工作图见图 13;图 14 为推移顶杆正在安装并代替液压千斤顶工作。图 15 展示了推移顶杆爆破导线的布置。

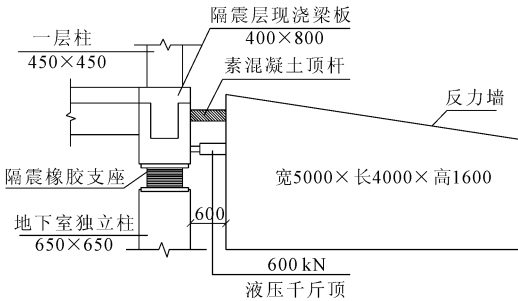


图 12 荷载施加与顶杆支撑装置图



图 13 液压千斤顶工作实物图



图 14 推移顶杆安装图



图 15 推移顶杆爆破导线布置

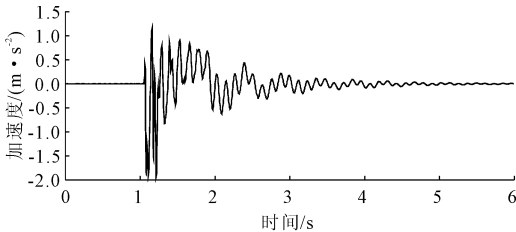
3.4 数据采集及分析

在推移试验前,事先对结构在环境激励条件下进行测试,得出环境激励条件下结构的前 2 阶自振周期及阻尼比^[8-9]。结构在水平位移条件下,通过 DH612 传感器采集位移复位瞬间前后的振动信号,将导线连通到计算机中的动态数据采集系统,经过放大并滤波后由 A/D 转换器将现场的动态振动信息转变成数字信号,得到数据文件并导入模态分析软件,经 FFT 快速傅立叶变换,运用基于传递率的模态分析方法^[10],经频谱分析得到结构的自振特性,测试结果详见 4 节。

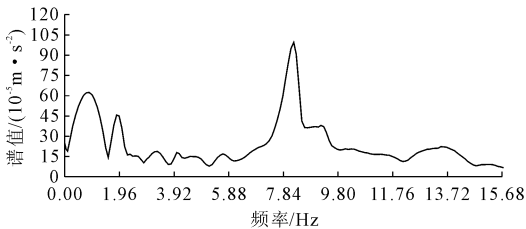
4 水平位移测试结果与分析

4.1 测试结果与分析

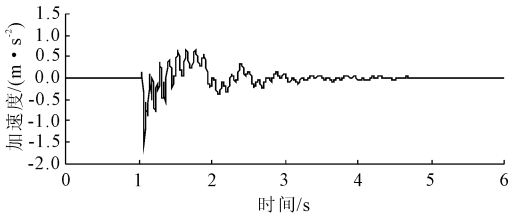
通过对支撑顶杆瞬间爆破,使结构在 75 mm 水平位移条件下按自振周期作自由振动,利用各层传感器采集自由振动信号,将动态信号导入数据采集软件得出各楼层的加速度衰减曲线,分析频谱特性。图 16 给出采集推移方向(Y 方向)一层和四层在复位前后 6 s 的加速度自由衰减曲线和相应频谱图。



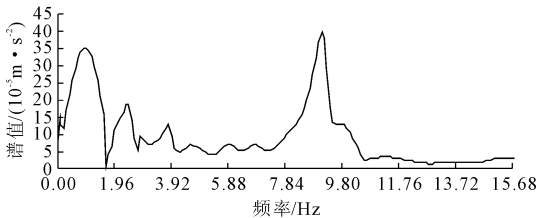
(a) 初位移75mm四层加速度衰减曲线



(b) 初位移75mm四层频谱图



(c) 初位移75mm一层加速度衰减曲线



(d) 初位移75mm一层频谱图

图 16 初位移 75 mm 时程曲线与频谱图

表 3 对隔震结构各个楼层的加速度(g)与抗震模型的数值进行对比并得出楼层相应的减震率。

表 3 水平位移推移 75 mm 下隔震结构加速度与抗震模型对比及减震率

楼层	加速度/ g		减震率/ $\%$
	抗震结构	隔震结构	
4	0.989	0.195	77.8
3	0.698	0.173	75.2
2	0.569	0.169	70.3
1	0.423	0.154	63.6

注:减震率=(抗震模型数值-隔震模型数值)/抗震模型数值。

从表 3 可知,隔震结构相比抗震结构,减震效果显著,隔震结构的减震率随着楼层的上升不断增大;抗震结构顶层加速度放大达 2 倍以上;相比之下,隔震结构对各个楼层的地震响应控制水平较好,顶层加速度峰值相比底层约放大 1.27 倍;另外速度传感器测试得到的各楼层的速度峰值较接近,顶层速度峰值约放大 1.20 倍。

在模态分析软件中建模,设置模型测点,对各测点数据进行快速傅里叶变换(FFT)得到结构前三阶自振周期及阻尼比。结果清楚的表明:瞬间释放会激起结构三种不同属性的震动频率。第一种与隔震自身模态有关,这种情况,隔震结构将作单自由度体系运动,另外两种则与上部结构的具体模态激励有关联^[11]。各测点测得的结构前 2 阶自振周期、阻尼比分析结果见表 4~表 5。

表 4 各测点测得的前三阶自振周期和阻尼比

加速度测点	自振周期/ s		阻尼比/ $\%$	
	1 阶	2 阶	1 阶	2 阶
1 层东	1.216	0.417	21.35	11.41
1 层西	1.214	0.413	22.41	10.13
2 层东	1.221	0.416	21.25	11.15
2 层西	1.202	0.413	22.54	10.13
3 层东	1.221	0.417	23.25	11.41
3 层西	1.214	0.414	22.41	10.15
4 层东	1.216	0.416	23.35	11.35
4 层西	1.202	0.414	22.54	11.17

将以上表格数据进行线性平均加权处理,将结构在环境激励、初位移条件下的自振特性与 ETABS 有限元分析软件中的抗震模型进行对比,得到最终结果如表 5 所示。

从表 4、表 5 表明,隔震结构在环境激励条件下的自振特性与抗震结构相比,二者的前三阶自振周期十分接近,隔震结构的阻尼比略小于抗震结构,该隔震结构在正常使用条件时的动力特性与抗震结构

相近,可推测该隔震结构在正常使用状态下具有和抗震结构相似的性能;在 75 mm 水平位移条件下,一阶振型阻尼为 22.39%,比 LRB400 在 100%剪应变时的设计值小,总体表现出较良好的耗能水平;隔震结构自振周期相比抗震结构与环境激励延长较多,一阶自振周期与后二者的比值达 3 倍以上,可以推测出该隔震结构在中震水平以上地震时的优越减震性能。

表 5 结构前 2 阶自振特性分析结果

模态	自振周期/ s		阻尼比/ $\%$	
	1 阶	2 阶	1 阶	2 阶
抗震结构	0.416	0.221	5.00	5.00
环境激励	0.390	0.279	3.95	2.02
75mm 水平位移	1.281	0.421	22.39	10.86

4.2 隔震层的滞回特性

上部结构产生水平位移并达到设定值后,安装混凝土顶杆并替换液压千斤顶后将其瞬间爆破,得出结构在水平推移与爆破整个过程内的荷载—位移关系曲线如图 17 所示。

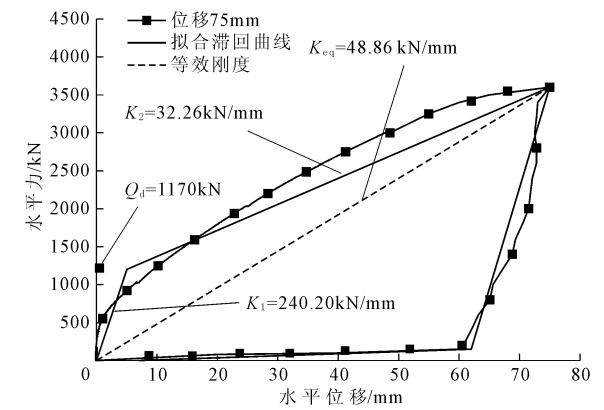


图 17 水平位移下隔震层滞回耗能曲线

由图 17 可以看出,爆破释放的瞬间,曲线下降的斜率较陡,这是由于结构在极短时间内失去顶杆提供的水平支撑力。与液压千斤顶缓慢卸载的形式有所不同,上部结构尚未完全复位就已基本失去水平支撑,并且复位时间不受液压千斤顶卸载时长的影响和控制,从图中可以看出整个力与位移曲线形成了饱满的滞回环,表现出隔震层十分优良的滞回耗能能力。该滞回曲线与理论分析的结果相符合^[12],屈服前后曲线接近线性。此外,铅芯隔震橡胶支座所特有的黏滞弹塑性特性在隔震层饱满的滞回曲线中得以体现,隔震层对地震能量的吸收与消耗主要依靠铅芯隔震橡胶支座。

4.3 隔震层复位性能

在 75 mm 工况的水平位移条件下,结合位移测试计采集的动态数据,隔震层在 1 s 内基本复位,爆破瞬间位移复位量为 62.86 mm,占总位移推移量 75 mm 的 83.81%。随着时间的延长,隔震层的残余位移量 12.14 mm 逐渐缩小,并在 48 h 之后残余量缩小至忽略不计。

5 结 论

(1) 环境激励条件下的自振特性与抗震结构相比,发现二者前三阶自振周期十分接近,阻尼比略小于抗震结构,可推测该隔震结构在正常使用情况下,其动力性能与抗震结构有较好的一致性。

(2) 楼层顶层加速度峰值放大倍数为 1.27 倍,相比抗震模型,顶层加速度明显得到有效的控制,充分展示了隔震层在较大的变形下能够起到良好的吸收地震能量、控制上部结构楼层地震响应的效果。

(3) 推移 75 mm 位移量释放测得结构基本周期为 1.281 s,相比抗震结构与环境激励条件的基本周期延长较多,与后两者的比值达 3 倍以上,可以推测该隔震结构在中震水平以上地震时优越的减震性能;结构一阶阻尼比为 22.39%,比 LRB400 在 100% 剪应变时的设计值小,总体表现出较良好的耗能减震水平。

(4) 推移 75 mm 位移量时,隔震橡胶支座瞬间的位移复位量为 62.86 mm,占总推移值的 83.81%,隔震层在 1 s 内基本复位,12.14 mm 的残余位移量逐渐缩小,在 48 h 之后缩小至忽略不计。

参考文献:

[1] 祁 皓.层间隔震技术评述[J].地震工程与工程振动,

2004,24(6):114-120.

- [2] 吴应雄,祁 皓,颜学渊.某层间隔震实际工程动力测试与分析[J].福州大学学报:自然科学版,2011,39(6):930-935.
- [3] 魏陆顺,周福霖,陈建秋,等.隔震结构特性测试研究[J].振动与冲击,2007(3):150-152.
- [4] 吴应雄,祁 皓,颜学渊.某首层柱顶隔震结构动力特性测试研究[J].地震工程与工程振动,2011,31(6):147-152.
- [5] Forni M, Martelli A, Spadoni B, et al. Dynamic tests on seismically isolated structure mock-ups and validation of numerical models[C]//Proceedings of International Meeting on Earthquake Protection of Buildings. Italy, 1991.
- [6] Franco Braga, Michelangelo Laterza. Field testing of low-rise base isolated building[J]. Engineering Structures, 2004, 11(11):1599-1610.
- [7] 周 云,张季超,唐玉果,等.广东科学中心 E 区隔震支座的优化布置分析[J].地震工程与工程振动,2009,29(4):183-191.
- [8] 韩建平,王洪涛,刘云帅,等.环境激励下基础隔震结构的主要动力特性研究[J].振动与冲击,2011,30(11):266-271.
- [9] 韩建平,王洪涛,李 林.无填充墙基础隔震 RC 框架在环境激励下的动力特性[J].地震工程与工程振动,2012,32(4):182-187.
- [10] 李飞燕,邵奕夫,吕加成,等.环境激励条件下底层柱顶隔震结构特性测试[J].工业建筑,2015,33(12):183-191.
- [11] 吴应雄.某工程底层柱顶隔震结构抗震性能评价[J].水利与建筑工程学报,2015,13(5):41-46.
- [12] Bixio A R, Dolce M, Nigro D, et al. Repeatable dynamic release tests on a base-isolated building[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2001, 5(3):369-393.