

尹志勇,孙海峰,景立平,等.农居工程地基砂垫层隔震体系性能试验研究[J].地震工程学报,2019,41(1):101-107.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.101

YIN Zhiyong, SUN Haifeng, JING Liping, et al. Experimental Study on the Performance of Sand Cushion Isolation System in the Foundation of a Rural Residential Project[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(1): 101-107. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.101

农居工程地基砂垫层隔震体系性能试验研究

尹志勇^{1,2}, 孙海峰³, 景立平^{1,2}, 徐鲲鹏^{1,2}, 李纵横^{1,2}

(1. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 3. 黑龙江省地震局, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要:砂垫层具有取材方便、造价低、施工简便的特点,为了更好地在农居工程建设中推广应用地基砂垫层隔震技术,通过制作农村房屋结构模型,进行地基砂垫层隔震体系与无隔震体系的大型振动台试验,研究了地基砂垫层隔震体系的隔震性能。基于结构加速度反应、结构位移反应和结构应变反应三个方面,对比分析无隔震试验和地基砂垫层隔震试验的结果,研究地基砂垫层隔震体系的隔震性能。结果表明:地基砂垫层隔震体系能够有效地减小上部结构的地震加速度反应、层间位移反应和应变反应,具有良好的隔震效果;输入地震动的量级是影响地基砂垫层隔震体系隔震效果的一个重要因素。

关键词:农居工程;地基隔震;砂垫层隔震;振动台试验;隔震试验

中图分类号: TU352

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)01-0101-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.101

Experimental Study on the Performance of Sand Cushion Isolation System in the Foundation of a Rural Residential Project

YIN Zhiyong^{1,2}, SUN Haifeng³, JING Liping^{1,2}, XU Kunpeng^{1,2}, LI Zongheng^{1,2}

(1. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Agency, Harbin 150080, Heilongjiang, China;

2. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, China Earthquake Agency, Harbin 150080, Heilongjiang, China;

3. Earthquake Agency of Heilongjiang Province, Harbin 150090, Heilongjiang, China)

Abstract: The sand cushion exhibits the characteristics of convenient material selection, low cost, and simple construction. To better promote and apply the sand cushion isolation technology to the foundation of rural building construction, large-scale shaking table tests of foundations with sand cushion isolation systems and non-isolation systems were performed to study the performance of the foundation isolation system with a sand cushion by making the structural model of the rural houses. Based on the structural acceleration response, structural displacement response, and structural strain response, the seismic isolation performance of the foundation isolation system with a sand cushion was studied by comparing the non-isolation and isolation test results of the cushion isolation system. The results exhibited that the foundation isolation system with a sand cushion can effectively reduce the seismic acceleration response, story drift response, and strain response of the superstructure and achieve a good isolating effect. The magnitude of the input ground motion

收稿日期: 2018-07-08

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划攻关项目(XH16010); 黑龙江省地震局局内科研项目: 砂垫层隔震技术在我省农居地震安全中应用研究; 黑龙江省重点城市群抗震性能普查项目

第一作者简介: 尹志勇(1993-), 男, 博士研究生, 主要从事岩土工程和地震工程研究。E-mail: iemyzy@163.com。

is an important factor that influences the isolation effect of the foundation system with a sand cushion.

Keywords: rural residential project; foundation isolation; sand cushion isolation; shaking table test; isolation test

0 引言

我国是一个地震多发的国家,地震灾害带来了大量的人员伤亡和巨大的经济损失。我国农村人口众多,农民的抗震意识薄弱,受限于经济条件差,农村地区建造的房屋抗震能力比较差。在地震发生时,农村地区往往遭受更为严重的经济损失和人员伤亡。因此,研究适合农居工程建设的减隔震技术意义重大。

近年来,国内外很多学者主要集中在基础隔震方向研究了很多适合在农村地区推广的减隔震技术,地基隔震方向研究相对较少。基础隔震方向:曹万林等^[1-2]提出了设置石墨-玻璃丝布板-石墨复合隔震层以及玻璃珠-石墨隔震层的方法,通过振动台试验验证这两种方法都可以达到减小上部结构地震反应的目的;尚守平等^[3-4]将竖向钢筋设置在沥青隔震层,形成了沥青-钢筋隔震层,该隔震层减震效果好且可以限制滑移位移,目前该隔震技术已应用在农居工程建设中。李英民等^[5]提出沥青-砂垫层的隔震层设置方法,该方法依靠捆绑橡胶束来限制滑移位移,实现了对地震时滑移位移量的控制。张海龙等^[6]对以二硫化钼作为摩擦材料带限位器的滑移隔震结构进行了地震作用有限元分析。国外学者 Ahmad 等^[7-8]通过振动台对比试验,对在砌体结构与基础之间设置粗干砂摩擦材料的基础滑移隔震体系的隔震性能进行了研究。地基隔震方向:窦远明等^[9]以地基为研究对象,用刚体试块代替上部砌体结构,通过小型振动台试验研究了地基砂垫层隔震技术的隔震效果。岁小溪等^[10]同样以刚体质量块代替结构,用废弃橡胶颗粒-砂混合物材料作为地基隔震层,通过小型振动台试验得出橡胶-砂隔震层具有良好的隔震效果。本文在已有研究的基础上,通过农居房屋地基砂垫层隔震试验与无隔震试验大型振动台对比试验,从结构地震反应入手,对地基砂垫层隔震体系的隔震性能进行了研究。

1 试验模型设计与制作

试验在中国地震局工程力学研究所地震模拟实验室完成,采用本课题组研制的叠层剪切型模型土箱,如图 1 所示。叠层剪切箱主体尺寸为 3.70 m×2.40 m×1.70 m,底座尺寸为 4.18 m×2.82 m×0.12 m,采用 15 层口字形钢管框架叠合而成,每层

钢框架由四根口字形钢管焊接,口字形钢管截面尺寸为 100 mm×100 mm,壁为 3 mm。

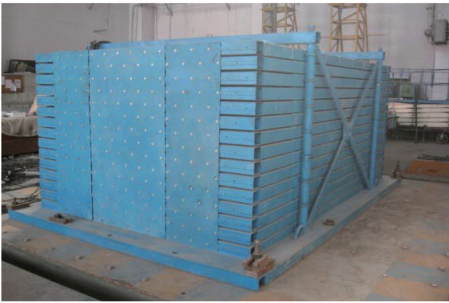


图 1 叠层剪切箱

Fig.1 Laminar shear container

本文试验模型涉及土体和结构两种主要的材料,其中土体材料包括黏土和砂土,黏土为某施工场地基坑开挖的粉质黏土;砂土类别为粗砂,其颗粒级配累计曲线如图 2 所示。模型试验相似理论要求同一物理量的相似比应保持一致,由于土的复杂性和特殊性,很难使土与结构在模型试验中满足一致相似关系,因此本文试验模型主要考虑结构的相似比。考虑到实验室振动台的尺寸限制,结构模型设计为 1/4 缩尺比例的一层砌体结构模型,设置构造柱和圈梁等抗震构造措施,其中构造柱截面尺寸为 90 mm×90 mm,圈梁截面尺寸为 90 mm×50 mm。为使得试验模型墙体的材料与原型结构墙体的材料尽量保持一致,将原型结构砖砌块按比例切割,原型结构砖砌块尺寸为 235 mm×115 mm×45 mm,切割后模型砖的尺寸为 56 mm×26 mm×21 mm,结构模型制作如图 3 所示。根据 Bokingham π 定理,选取长度 L 、弹性模量 E 、密度 ρ 为三个基本量,考虑到振动台的承

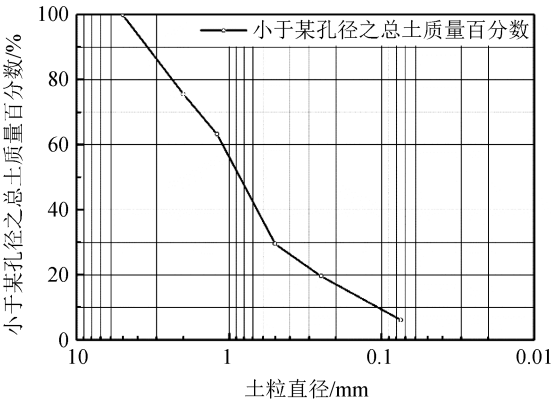


图 2 砂土颗粒级配累积曲线

Fig.2 Distribution curve of grain sizes of sand soil

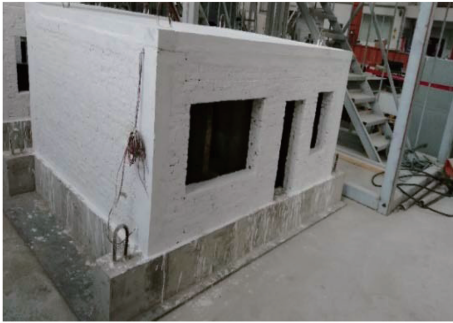


图 3 结构模型制作

Fig.3 Structural model construction

载能力限制,采用欠人工质量模型,推导出各个物理量的相似关系如表 1 所列。

表 1 结构模型相似比

Table 1 Similarity ratio of structural model

物理量	相似比
长度 L	1/4
弹性模量 E	1
应变 ε	1
应力 σ	1
密度 ρ	2
时间 t	0.35
频率 ω	2.83
加速度 a	2

2 试验方案

2.1 传感器布置

为了更好地对比分析两个试验中地震波在土层中的传播情况,两个试验土层中的加速度传感器布置情况一致。随埋深的变化分别布置加速度传感器,上部结构中在基础和楼板处分别布置两个三向加速度传感器,如图 4 只给出了地基砂垫层隔震试验加速度传感器及位移传感器的布置图,字母 A 表示埋设在土中的加速度传感器,字母 SA 表示布置在结构上的加速度传感器,字母 D 表示位移传感器。图 5 给出了构造柱钢筋表面应变片布置图,字母 SG 表示贴在钢筋表面的应变片。

2.2 加载工况

本次试验选用一条人工波作为输入波,命名为人工波 1。输入波根据相似关系进行压缩后的时程曲线和傅里叶谱如图 6 所示,地震波的输入次序如表 2 所列。

3 试验结果与分析

3.1 结构加速度反应

输入不同加速度设计幅值时楼板处加速度时程

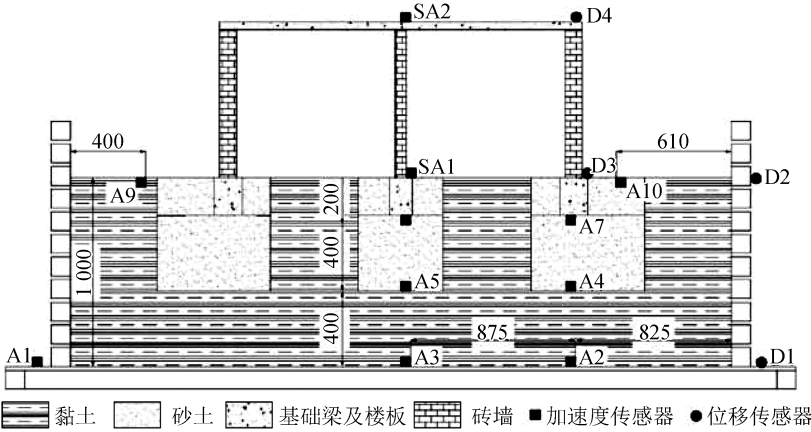


图 4 地基砂垫层隔震试验加速度及位移传感器布置图

Fig.4 Layout of acceleration and displacement sensors for sand cushion isolation test in the foundation

曲线如图 7 所示,其中图(a)为无隔震试验结果,图(b)为地基砂垫层隔震试验的结果。输入不同加速度设计幅值时楼板处加速度峰值变化情况如图 8 及表 3 所示,其中减震率的计算式为:

减震率=

$$\frac{\text{无隔震试验地震反应}-\text{隔震试验地震反应}}{\text{无隔震试验地震反应}} \times 100\%$$

从图 7、图 8 及表 3 可以看出:

(1) 随着输入地震动量级的增大,楼板处加速度

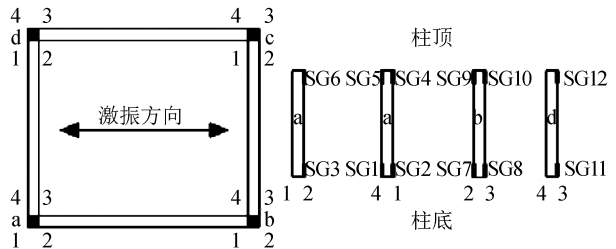


图 5 构造柱钢筋表面应变片布置图

Fig.5 Layout of strain gauges on the steel surface of constructional column

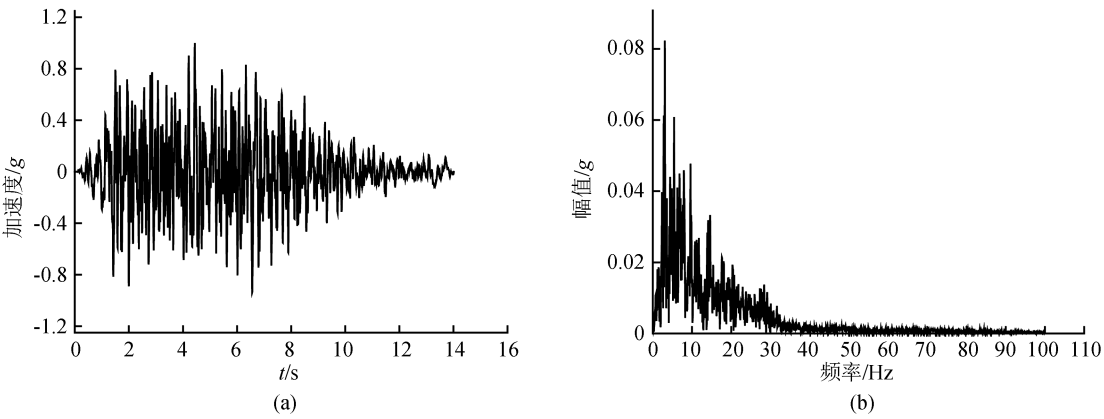


图 6 加速度时程曲线以及傅里叶谱

Fig.6 Acceleration time history curve and Fourier spectrum

表 2 地震荷载加载顺序

Table 2 Loading sequence of seismic loads

序号	幅值/g	加载波形	方向
1	0.07	白噪声	三向
2	0.10	人工波 1	Y
3	0.07	白噪声	三向
4	0.20	人工波 1	Y
5	0.07	白噪声	三向
6	0.40	人工波 1	Y
7	0.07	白噪声	三向

反应也随之增大；

(2) 输入不同量级的地震动，两个试验的楼板处加速度反应峰值大小关系为：地基砂垫层隔震试

验小于无隔震试验，且减震率最高可达到 33.9%；

(3) 随着输入地震动量级的增大，地基砂垫层隔震试验归一化加速度峰值也随之增大，说明输入地震动的量级对地基砂垫层的隔震效果具有一定的影响。

3.2 结构位移分析

输入不同幅值的人工波 1 时，得到结构的层间位移时程曲线如图 9 所示，左侧为无隔震试验结果，右侧为隔震试验结果。图 10、表 4 都给出了两个试验分别输入不同幅值的人工波 1 时结构的层间位移峰值的变化曲线，其中表 4 还给出了以层间位移峰值为隔震效果指标的减震率。

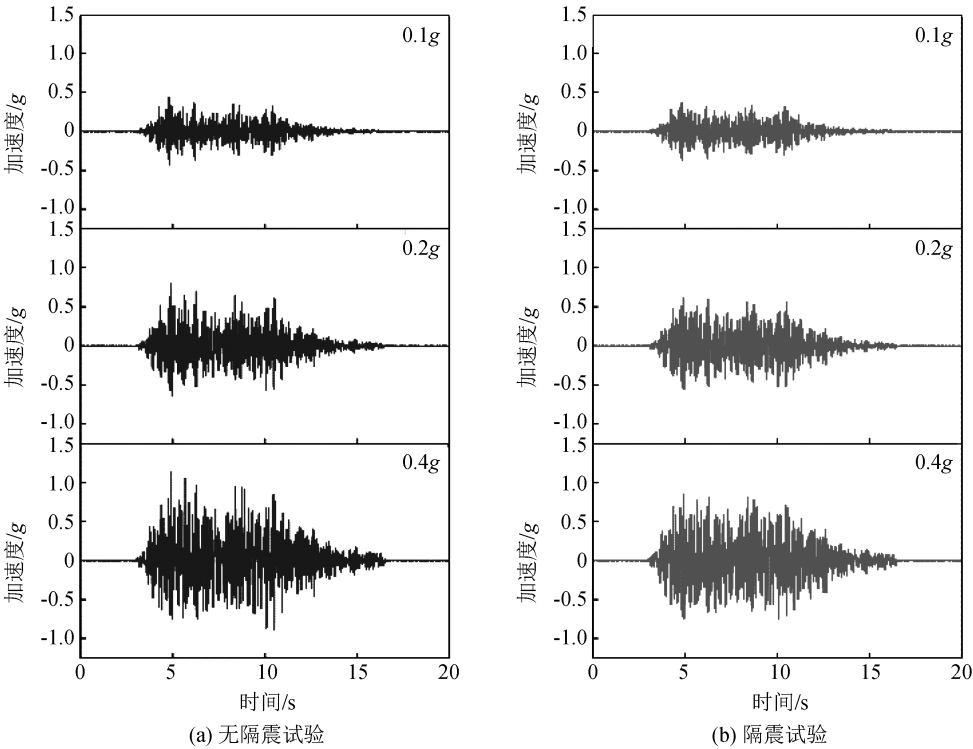


图 7 楼板处加速度时程曲线

Fig.7 Acceleration time-history curves at floors

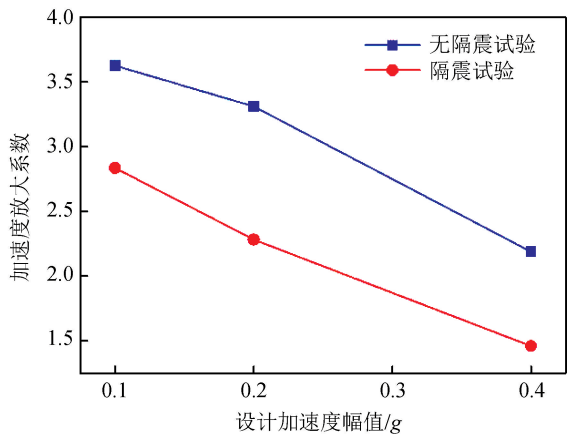


图 8 楼板处加速度放大系数变化曲线

Fig.8 Acceleration amplification factor change curves at floors

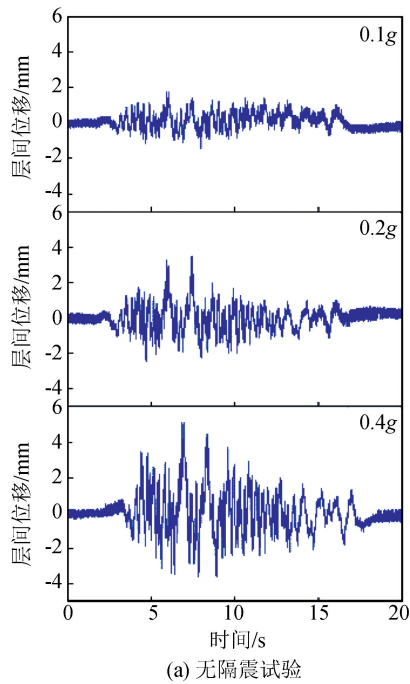


表 3 楼板处加速度峰值			
Table 3 Peak acceleration at floors			
试验工况 及减震率	输入地震动幅值/g		
	0.1g	0.2g	0.4g
隔震试验	0.276	0.435	0.548
无隔震试验	0.356	0.614	0.829
减震率/%	22.4	29.1	33.8

从图 9、图 10 及表 4 可以发现：

(1) 随着输入地震动幅值的增大，一层砌体结构层间位移峰值也随之增大；

(2) 输入小震、中震及大震强度的人工波 1 时，隔震试验层间位移峰值结果都要比无隔震试验的结果要小，说明地基砂垫层隔震体系能有效地减小上

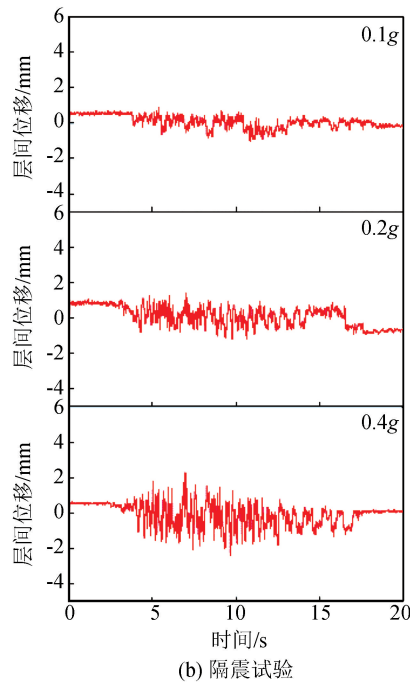


图 9 结构层间位移时程曲线

Fig.9 The time history curves of story drift

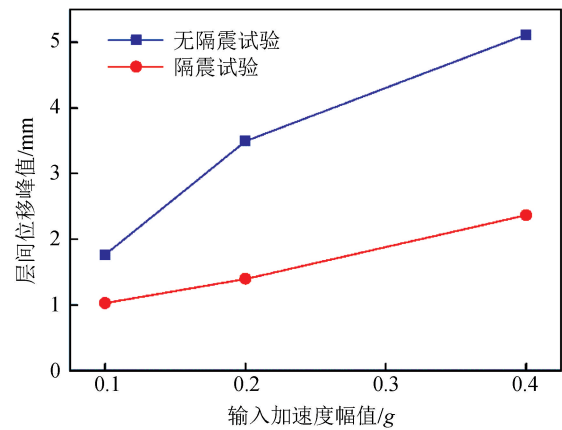


图 10 层间位移峰值变化曲线

Fig.10 Change curves of peak story drift

表 4 层间位移峰值			
Table 4 Peak story drift			
试验工况 及减震率	输入地震动幅值/g		
	0.1g	0.2g	0.4g
无隔震试验	1.764	3.496	5.115
隔震试验	1.028	1.399	2.368
减震率	41.7%	60.0%	53.7%

部结构的层间位移反应，起到了减隔震的作用；

(3) 输入小震、中震及大震强度的人工波 1，地基砂垫层减隔震体系的减震率分别可以达到 41.7%、60% 和 53.7%，输入的地震动强度不同，地基砂垫层隔震体系的减震率不同，说明地震动强度对地基砂垫层隔震体系的隔震性能存在一定影响。

3.3 结构应变分析

选取构造柱柱底、柱顶编号分别为 SG2 和 SG4 的应变片数据,构造柱钢筋表面应变峰值随输入地震波量级大小的变化情况如图 11 以及表 5 所示,其中表 5 仅给出 SG2 应变片峰值变化情况。

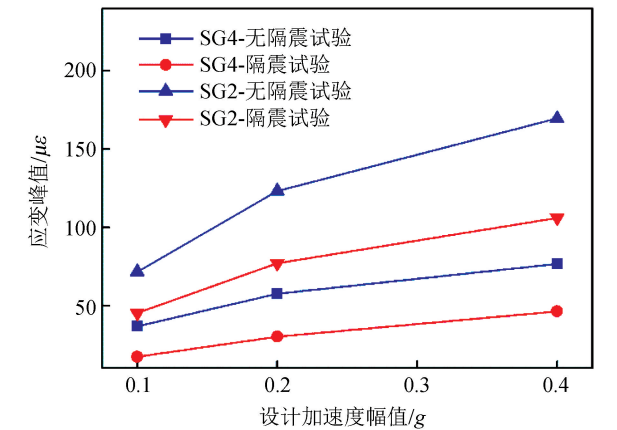


图 11 构造柱钢筋表面应变峰值变化曲线
Fig.11 Peak strain change curves of the steel surface of constructional column

表 5 构造柱钢筋表面应变峰值 (SG2)
Table 5 Peak strain of the steel surface of constructional column (SG2)

试验工况	台面加速度 /g	钢筋应变峰值/με	减震率 /%
无隔震试验	0.12	71.60	36.9
隔震试验	0.13	45.17	
无隔震试验	0.26	123.05	37.4
隔震试验	0.28	77	
无隔震试验	0.55	169.53	37.4
隔震试验	0.62	106.08	

从图 11 以及表 5 可以看出:

(1) 随着输入地震动量级的增大,柱底和柱顶钢筋表面的应变峰值也随之增大;

(2) 输入不同量级的地震动,柱顶钢筋表面应变峰值小于柱底应变峰值;

(3) 输入不同量级的地震动,两个试验的柱底、柱顶钢筋表面的应变峰值大小关系为:地基砂垫层隔震试验小于无隔震试验,且减震率可达到 37% 左右。

4 结论

本文对无隔震试验和地基砂垫层隔震体系大型振动台试验的试验结果进行了整理,通过分析结构加速度反应、结构位移反应以及结构应变反应三个方面,研究了地基砂垫层隔震体系的隔震性能,得出

如下结论:

- (1) 输入不同量级的地震动,地基砂垫层隔震体系能够有效减少上部结构的地震加速度反应、层间位移反应以及构造柱钢筋的应变反应,地基砂垫层隔震体系具有良好的隔震效果;
- (2) 地震动强度是影响地基隔震体系隔震性能的因素之一:输入地震动量级大小不同,地基砂垫层隔震体系的减震率也不同,总体上随着地震动强度的增大,地基砂垫层的减震率也随之变大。

参考文献 (References)

[1] 曹万林,周中一,王卿,等.农村房屋新型隔震与抗震砌体结构振动台试验研究[J].振动与冲击,2011,30(11):209-213.
CAO Wanlin,ZHOU Zhongyi,WANG Qing,et al.Experimental Study on Base Vibration Isolation and Anti-seismic Masonry Structure in Rural Areas by Shaking Table Test[J].Journal of Vibration and Shock,2011,30(11):209-213.

[2] 曹万林,叶炜,张玉山,等.玻璃珠-石墨基础滑移隔震砌体结构工作性能试验研究[J].自然灾害学报,2015,24(5):37-46.
CAO Wanlin,YE Wei,ZHANG Yushan,et al.Experimental Study on Working Performance of the Base Sliding Isolated Masonry Structure with Glass Beads-graphite Layer[J].Journal of Natural Disasters,2015,24(5):37-46.

[3] 尚守平,周志锦,刘可,等.一种钢筋-沥青复合隔震层的性能[J].铁道科学与工程学报,2009,6(3):13-16.
SHANG Shouping,ZHOU Zhijin,LIU Ke,et al.The Research on the Steel-Asphalt Isolation Lay[J].Journal of Railway Science and Engineering,2009,6(3):13-16.

[4] 尚守平,朱博闻,吴建任,等.钢筋-沥青复合隔震层实际工程应用研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2013,40(7):1-8.
SHANG Shouping,ZHU Bowen,WU Jianren,et al.Research on Steel-Asphalt Isolation Layer in Practical Engineering[J].Journal of Hunan University (Natural Science),2013,40(7):1-8.

[5] 李英民,卜长明,夏洪流,等.砌体墙片滑移和固结振动台试验对比研究[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(8):3228-3236.
LI Yingmin,BU Changming,XIA Hongliu,et al.Experimental Comparative Study on Shaking Table Test of Low-rise Masonry Wall with Sliding Absorption System and Solid System[J].Journal of Central South University (Science and Technology),2012,43(8):3228-3236.

[6] 张海龙,展猛,王社良.层间滑移隔震结构地震作用有限元分析[J].地震工程学报,2016,38(4):558-563.
ZHANG Hailong,ZHAN Meng,WANG Sheliang.Finite Element Analysis of the Seismic Response of an Interlayer Sliding Isolation Structure[J].China Earthquake Engineering Journal,2016,38(4):558-563.

[7] AHMAD S, GHANI F, RAGHIB ADIL M. Seismic Friction Base Isolation Performance Using Demolished Waste in Masonry Housing[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(1):146-152.

[8] AHMAD S, MASOOD A, HUSAIN A. Seismic Pure Friction Base Isolation Performance Using Demolished Waste in Two-storey Masonry Building[J]. Journal of the Institution of Engineers (India): Civil Engineering Division, 2011, 91(2):10-17.

[9] 窦远明, 刘晓立, 赵少伟, 等. 砂垫层隔震性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(1):125-128.

DOU Yuanming, LIU Xiaoli, ZHAO Shaowei, et al. An Experimental Study of Isolation Performance of Sand Cushion[J]. Journal of Building Structures, 2005, 26 (1):125-128.

[10] 岁小溪. 橡胶颗粒-砂混合物的隔震性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.

SUI Xiaoxi. The Study on Seismic Isolation Performance of Granulated Rubber-Sand Mixture[D]. Changsha: Hunan University, 2009.

(上接第 93 页)

XEI Dingyi. Past, Present and Future of Loess Mechanical Properties and Application Research[J]. Underground Space, 1999, 19(4):273-284.

[20] 姚志华, 陈正汉. 膨胀土增湿和干燥过程中的细观结构变化研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2009, 7(3):1-4.

YAO Zhihua, CHEN Zhenghan. Study on Meso-structure Changes of Expansive Soils during Wetting-Drying Cycles[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2009, 7(3):1-4.

[21] 李丽, 张坤, 张青龙, 等. 干湿和冻融循环作用下黄土强度劣化特性试验研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(4):1142-1149.

LI Li, ZHANG Kun, ZHANG Qinglong, et al. Experimental Study on the Loess Strength Degradation Characteristics under the Action of Dry-Wet and Freeze-Thaw Cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(4):1142-1149.

[22] 袁志辉. 干湿循环下黄土的强度及微结构变化机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.

YUAN Zhihui. Research on Change Mechanism of Strength and Microstructure of Loess under Wetting-Drying Cycle[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.