

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2019.02.014

两种村镇隔震结构动力特性强震演变规律的 振动台试验对比研究

邹蕊月¹, 郭军林^{1,2}, 李英民³, 袁康^{1,2}, 白宏思^{1,2}(1. 石河子大学 水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832000; 2. 石河子大学 新疆兵团高烈度寒区建筑抗震
节能技术工程实验室, 新疆 石河子 832000; 3. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400015)

摘要: 本文介绍了普通抗震结构、采取砂垫层隔震技术、砂垫层-基础滑移复合隔震技术的三个双层砌体结构 1/4 缩尺模型的振动台试验研究结果。这篇研究以结构自振频率、周期、阻尼比及阵型等为指标,通过不同输入地震强度下动力特性对比研究,总结隔震结构的工作机理及动力特性强震演变规律,评价两种隔震技术的隔震效果。结果表明:随输入地震强度增大,自振频率先保持不变后减小,阻尼比先减小后增大,砂垫层隔震结构阵型和复合隔震模型阵型的变化趋势与破坏现象相吻合。动力特性变化表明两种隔震结构的耗能能力较好,隔震效果较好。

关键词: 村镇建筑; 动力特性; 振动台试验; 隔震技术

中图分类号: TU352.1+2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2019)02-0234-08

Shaking table test comparative study on the evolution law of dynamic characteristics in strong earthquake for two kinds of rural isolation structure

ZOU Ruiyue¹, GUO Junlin^{1,2}, LI Yingmin³, YUAN Kang^{1,2}, BAI Hongsi^{1,2}(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China; 2. Xinjiang
Production & Construction Groups Engineering Laboratory for Seismic and Energy-Saving Building in High
Earthquake Intensity and Cold Zone, Shihezi University, Shihezi 832000, China; 3. School of Civil
Engineering, Chongqing University, Chongqing 400015, China)

Abstract: This paper presents the results of a shaking table test investigating on the three 1/4 scale models of the two-storey masonry structure in which the sand cushion isolation technology, sand cushion-based slipping composite isolation technology and the other traditional technology are adopted. The study performs the comparative results of dynamic characteristics at different input seismic intensities concerning the natural frequency, cycle, damping ratio and formation of the structure and concludes the working mechanism for isolation structure and evolution law of dynamic characteristics in strong earthquakes to evaluate the isolation effect of the two isolation technologies. The test results indicate that with the increase of input seismic intensity, the natural frequency changes from constant to reduction, and that the damping ratio changes from decrease to increase, with the trends of the vibration mode of sand cushion isolation structure and the composite isolation model displaying a good agreement with the failure phenomena. The change of dynamic characteristics indicates that both the two technologies have a good performance in terms of the energy dissipation capacity and that the isolation is effective.

Key words: rural buildings; dynamic characteristics; the shaking table test; isolation technology

收稿日期: 2018-05-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51368054);兵团向南发展创新专项资助项目(2017DB011);石河子大学校级科研资助项目(ZZZ201603)

作者简介: 邹蕊月,女,硕士生,研究方向为工程结构抗震。E-mail:949729447@qq.com

通讯作者: 郭军林,男,讲师,研究方向为村镇建筑减隔震技术。E-mail:guo_education@163.com

近年来,我国地震频发,村镇建筑损毁严重^[1],研发因地制宜的村镇建筑实用抗震性能提升技术迫在眉睫,其中简易的村镇建筑隔震技术广受关注。曹万林^[2-3]提出一种钢筋-钢珠基础滑移隔震层,李英民^[4]提出一种沥青-砂滑移隔震层,Ahmad^[5-6]研究了滑移层摩擦系数对基础滑移隔震效果的影响,尚守平^[7]提出了一种钢筋-沥青复合隔震层,Tsang^[8]提出了废旧轮胎橡胶-土混合隔震层隔震的概念。以上隔震技术皆可提升村镇建筑抗震性能,也体现了村镇建筑“因地制宜、就地取材、简单有效、经济实用”的抗震原则^[9]。

而在我国北方地区多同时处于高地震烈度区,以及气候寒冷或严寒地区,村镇建筑同时遭受地震及地基冻胀双重灾害,砂垫层隔震技术及复合隔震技术在考虑消能减震的同时能与消除冻胀^[10]相结合,适用性较强。在砂垫层隔震技术方面,窦远明等^[11]、李海涛^[12]、邹颖娴^[13]对砂垫层隔震性能进行了试验研究,得到了各种因素对砂垫层隔震效果的影响规律。复合隔震技术方面,袁康等^[14-17]提出一种将基底砂垫层和基础滑移隔震相结合的砂垫层-基础滑移复合隔震技术。

本文针对砂垫层及砂垫层-基础滑移复合隔震技术,建立缩尺模型,与普通抗震结构模型进行振动台对比试验,通过不同输入地震强度下自振频率、周期、阻尼比等动力特性强震演变规律对比研究,总结隔震结构的工作机理,评价两种隔震技术的隔震效果。

1 隔震构造及机理

对于砂垫层隔震结构而言,其构造见图 1(a),在基础底部铺设具有换填冻土和隔震功效的砂垫层,垫层的粒径级配需满足地基承载力和隔震的要求^[18]。其隔震机理为通过砂垫层作为柔性地基对地震动输入的内部塑性变形耗能和阻尼耗能作用,减少上部结构的地震能量输入,减轻建筑结构的损坏。

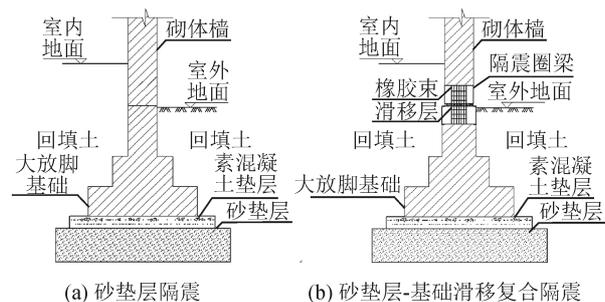


图 1 隔震构造图

Fig. 1 Isolation construction

对于砂垫层-基础滑移复合隔震结构,在上述砂垫层隔震构造的基础上,在室外地坪处设置中间铺设滑移隔震层的基础圈梁(上下两层组成),沿基础梁长度方向每隔一定距离设置限位橡胶束贯穿上、下圈梁见图 1(b)。隔震机理为:在小震作用下,基础滑移层未开始工作,仅砂垫层发挥隔震功效;在大震作用下,当底部剪力大于上部结构最大静摩擦力时,两层基础圈梁中部的滑移层开始依靠摩擦滑移消耗能量,基础圈梁一分为二,上部结构随上层圈梁一起整体滑动,橡胶束发挥限位作用,砂垫层和基础滑移层形成串联复合隔震体系共同消能减震,有效减轻上部结构损伤。

2 振动台试验概况

本试验在重庆大学多功能地震模拟振动台试验室进行,振动台为美国 MTS 公司设计制造的三向六自由度模拟地震振动台,试验为对比模型试验。

2.1 模型概况

模型按照新疆石河子市场地条件(8度 0.2g 区)设计,包括 3 栋 2 层的砌体结构房屋,分别为普通抗震结构砌体房屋 MA(Model of Aseismic Structure)、砂垫层-基础滑移复合隔震结构砌体房屋 MC(Model of Composite Isolation)及砂垫层隔震结构砌体房屋 MS(Model of Sand Cushion Isolation)。考虑到村镇自建房普遍存在构造柱和圈梁布置缺失的现象,试验中三种模型皆未设置圈梁、构造柱,以便对比隔震结构与普通结构在相同构造措施下的抗震性能。

模型采用欠人工质量模型,相似比取 $S_a = 2.0$,弹性模量相似常数取 $S_E = 1$,按照 1/4 比例缩尺,见图 2。模型总高为 1.575m,平面尺寸为 1.725m × 1.05m,女儿墙砌筑高度为 150mm,墙体厚度为 60mm,模型砖尺寸为 56mm × 53mm × 25mm,灰缝厚度为 2.5mm,楼板采用 30mm 厚预制板并配以双层双向 8# @55 镀锌铁丝。

本试验定义模型结构纵墙方向为 X 向,横墙方向为 Y 向,高度方向为 Z 向。

2.2 隔震措施

基础滑移隔震层构造:模型 MC 底部基础圈梁为上、下两层,分两次浇筑而成,在上、下层圈梁接触面布置滑移层。上、下圈梁(此模型下圈梁等同于下底板)分别制作,将橡胶束按照尺寸要求安置其中,橡胶束的规格为 80 mm × 30 mm × 110 mm,橡胶束在圈梁中的布置见图 3。

砂隔震垫层构造:有砂箱模型 MC 和模型 MS,

表1 试验加载工况

Tab.1 Loading schedule of the test

工况	实际输入	输入波形	输入方向	工况	实际输入	输入波形	输入方向	工况	实际输入	输入波形	输入方向
S1		白噪声		S23	0.20g	El-centro	X+Y	S36		白噪声	
S5	0.10g	El-centro	X	S24	0.20g	人工波	X+Y	S37	0.62g	El-centro	X
S7	0.10g	人工波	X	S25	0.30g	El-centro	X	S38	0.62g	人工波	X
S11	0.10g	El-centro	Y	S26	0.30g	人工波	X	S39	0.62g	El-centro	Y
S13	0.10g	人工波	Y	S27	0.30g	El-centro	Y	S40	0.62g	人工波	Y
S14		白噪声		S28	0.30g	人工波	Y	S41		白噪声	
S16	0.10g	El-centro	X+Y	S29	0.30g	El-centro	X+Y	S42	0.80g	El-centro	X
S17		白噪声		S30	0.30g	人工波	X+Y	S43	0.80g	El-centro	Y
S18	0.20g	El-centro	X	S31		白噪声		S44		白噪声	
S19	0.20g	人工波	X	S32	0.44g	El-centro	X	S45	1.02g	El-centro	X
S20	0.20g	El-centro	Y	S33	0.44g	人工波	X	S46	1.02g	El-centro	Y
S21	0.20g	人工波	Y	S34	0.44g	El-centro	Y	S47	1.24g	El-centro	X
S22		白噪声		S35	0.44g	人工波	Y				

3 试验现象

随着地震输入的增大,三种模型分别出现了不同程度的损伤,直至破坏(见图6),标志性的裂缝发展工况如下。

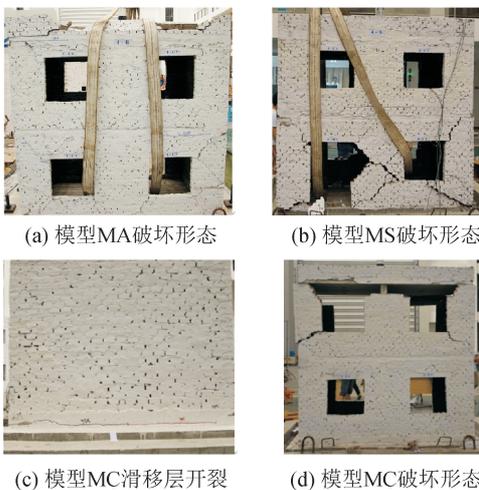


图6 模型破坏形态图

Fig.6 Failure modes of the model

1) 模型 MA 在工况 S13(0.10g)时横墙出现水平裂缝并迅速贯通,纵墙门窗角出现细微裂缝,模型轻微破坏;工况 S28(0.30g)时模型纵墙墙角和横墙角部出现大量裂缝,二层窗角破坏严重,模型严重破坏;工况 S35(0.44g)时横墙裂缝严重、纵墙窗边裂缝发展迅速,模型濒临倒塌。

2) 模型 MS 直到工况 S39(0.62g)无任何裂缝,模型完好无损;在工况 S43(0.8g)模型横墙突然发生贯穿斜裂缝,纵墙首层楼板上部出现水平裂缝,模

型中度破坏;在工况 S46(1.02g)模型窗间墙突然发生交叉裂缝,窗边墙发生大位移错位,墙角大面积坍塌,因模型横墙发生剪切破坏退出工作。

3) 模型 MC 在工况 S35(0.44g)前无任何裂缝,处于弹性状态,到工况 S36 基底滑移层开始工作,出现细微裂缝,工况 S39(0.62g)时滑移层裂缝四周贯通,工况 S43(0.80g)时模型沿滑移层滑动,模型完好无损,工况 S46(1.02g)时滑移层发生错位,顶层出现裂缝,工况 S47(1.24g)时破坏特征主要体现在顶层楼板与纵墙墙体的水平脱离和横墙的斜裂缝破坏及顶层横墙发生严重错位使模型退出工作。

4) 模型 MC 模型在 7 度中震(0.44g)前结构依靠砂垫层隔震及自身抗震,7 度大震(0.62g)后结构依靠滑移层滑移隔震,最终在 9 度大震(实际加速度为 1.24g)退出工作,说明砂垫层-基础滑移复合隔震技术具有较好的隔震能力,但模型整体性尚待加强,应在考虑隔震的同时适当设置圈梁、构造柱等增强结构整体性的措施,模型 MS 在 7 度大震(0.62g)前,依靠砂垫层隔震,模型保持完好,随后模型逐渐破坏,最终在 8 度大震(1.02g)时发生破坏退出工作,说明砂垫层隔震技术具有一定效果。

4 结构的动力特性分析

根据模型裂缝发展情况,在试验开始前和 S13、S16、S21、S30、S35、S40、S43 等工况后对模型结构利用白噪声扫描,每个白噪声激励工况完成后暂停试验,进行观察记录。通过对激励工况下各测点的加速度的频谱特性、传递函数^[21]进行分析,得到模型结

构的自振频率、周期、阻尼比以及振型等。传递函数曲线峰值处对应的频率值即模型结构的自振频率,三种模型在标志性工况下的传递函数曲线见图 7(图中采用“模型-加载工况-加载方向”来描述,如“MA-S14-X”表示普通抗震结构模型在工况 S14 下 X 向的传递函数曲线),自振频率见图 8。利用半功率法得到了三种结构模型的阻尼比示于图 9。随地震强度提高,频率减小越慢,阻尼比减小过程越长,耗能效果越好。由于 MS 和 MC 为带砂箱结构,MA 不带砂箱,且在加载过程中砂垫层发挥隔震作用等因素,故不带砂箱和带砂箱结构不能直接进行比较,下文分别进行论述。

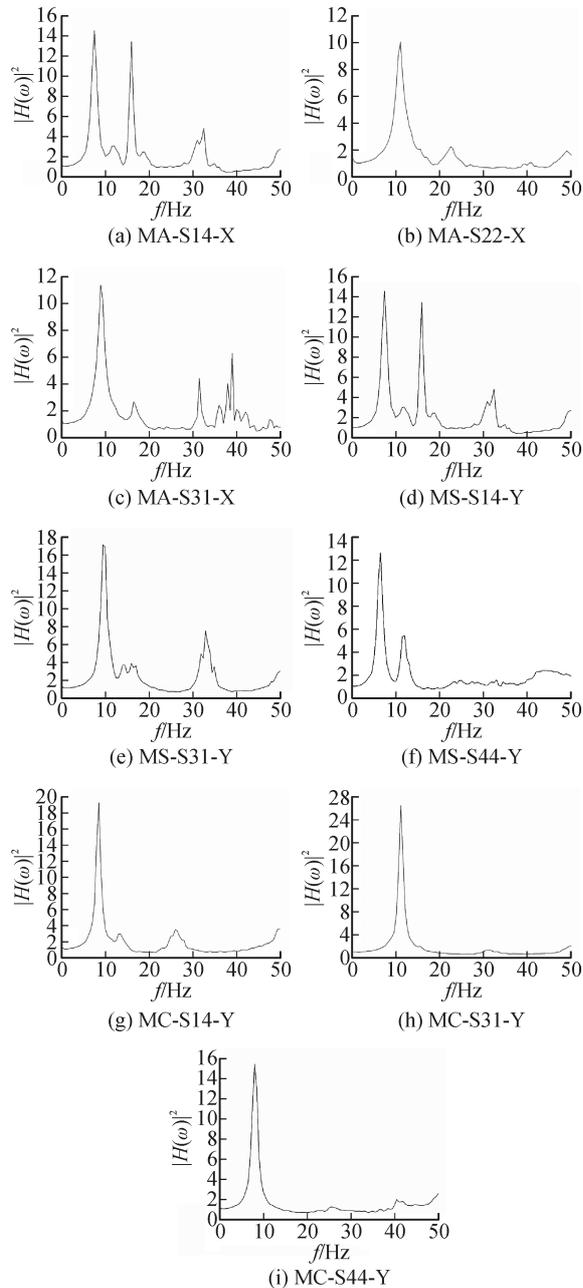


图 7 三种模型标志性工况下的传递函数曲线
Fig. 7 Transfer function curve of the three models under the symbolic working conditions

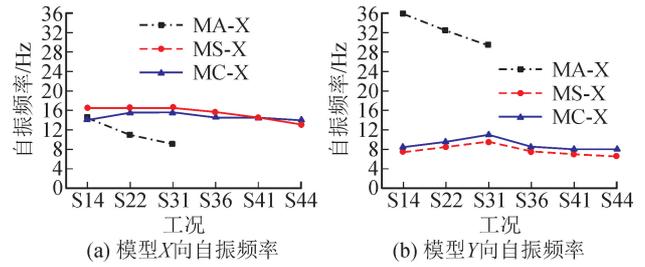


图 8 模型结构自振频率
Fig. 8 Model natural frequency

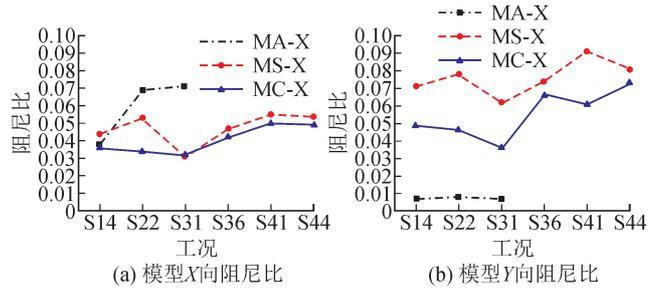


图 9 模型结构阻尼比
Fig. 9 Model structure damping ratio

4.1 频率与周期分析

三种模型 X 向、Y 向的结构自振频率随输入地震强度的变化情况见图 8。由图 8 可知如下结果。

1) 模型 MA 的自振频率逐渐减小,原因为输入地震强度增大导致结构模型的破坏加剧;模型 Y 向的频率大于 X 向且模型 X 向的频率平均下降 21.16%、Y 向下降 9.45%,这是由于模型 X 向开洞较多,故而结构 X 向刚度小于 Y 向;在经过 7 度中震(工况 S35)作用后,由于模型未设置构造柱,首层墙角发生严重破坏,结构退出工作。

2) 模型 MS 的 X 向自振频率先保持不变后下降,说明在输入地震强度较小时由于砂垫层的耗能作用,结构未出现裂缝,刚度未退化,自振频率保持不变;随着输入强度继续增大,砂垫层内部发生塑性变形耗能导致结构整体刚度下降,自振频率减小;模型在工况 S36 下 X 向刚度较工况 S31 退化约 12%,Y 向刚度退化约为 38.5%,且由于砂箱 X 向刚度更大,X 向自振频率大于 Y 向自振频率。

3) 模型 MC 在工况 S41 之前的自振频率的变化规律和模型 MS 大致相同,在此之前模型 MC 同样是依靠砂垫层的耗能作用来减小地震作用;工况 S41 后自振频率保持不变,说明工况 S36 后滑移层开始工作,工况 S41 时模型上部沿滑移层滑动,上部结构未发生破坏,结构刚度不再继续下降。

4) 7 度大震(工况 S36)时模型 MC 的 X 向自振频率小于模型 MS,是由于此时模型 MC 滑移层

出现裂缝,结构整体刚度小于模型 MS 整体刚度;在 8 度大震(工况 S44)作用时,复合隔震结构的频率平均大于砂垫层隔震结构 11.4%,表明砂垫层隔震结构内部损伤程度大于复合隔震结构,与试验现象较为吻合。

4.2 阻尼比分析

三种结构模型 X 向、Y 向的结构阻尼比随输入地震强度变化情况见图 9。由图 9 可知如下结果。

1) 模型 MA 的阻尼比是逐渐增大的,在工况 S35 后模型结构退出工作,说明随着输入地震强度的增大,结构发生破坏,结构不断通过自身的塑性变形来耗能,直至退出工作。

2) 模型 MS 的阻尼比大致变化趋势是先减小后增大。随着地震作用的加强,模型底部的砂垫层先被振密实,阻尼比逐渐减小;随后砂垫层内部出现非线性塑性耗能,且模型结构发生破坏,刚度退化较为明显,阻尼比进一步增大(工况 S41 的 X 向阻尼比比工况 S36 增大 14.5%)。

3) 模型 MC 的阻尼比是先减小后增大,减小原因和模型 MS 一致,随后滑移层裂缝逐渐增多且砂垫层内部出现非线性塑性耗能,其耗能能力增强,阻尼比增大。

4) 由图 9(b)可看出,模型 MC 的阻尼比小于模型 MS。由于模型 MC 主要依靠砂垫层与滑移层形成的复合隔震体系消耗地震能量,而模型 MS 只依靠砂垫层隔震,且出现损伤更早更严重,故其阻尼比更大。

4.3 振型分析

将白噪声工况下加速度折算为位移后,确定各模型在一层及二层楼板处的最大位移,设定与砂垫层接触的下底板处位移为 0,二层楼板处位移为 1,确定一层楼板位移与二层楼板处的比例关系,便得到模型振型。三个试验模型 MA、MC、MS 在代表性工况下 X、Y 向第一阶振型见图 10。由图 10 可知如下结果。

1) 模型 MA 的 X、Y 向振型在加载初期表现为剪切型,随着输入强度的增大转变为弯曲型,到加载后期,由于首层出现明显的变形集中,振动形态转变为剪切型;工况 S31 首层的 Y 向振幅是 X 向振幅的 1.45 倍,表明模型 MA 的 Y 向破坏更加严重。

2) 模型 MS 的 X、Y 向振型随着输入地震强度的增大,逐渐由初期的剪切型转变为弯曲型,进入到破坏阶段后又转变为剪切型(工况 S42 下模型首层层间位移角为 1/337,顶层的层间位移角为 1/617);特别注意到工况 S45 下模型首层的振幅达到了最大

值,表明此时结构底部的刚度发生的严重退化。

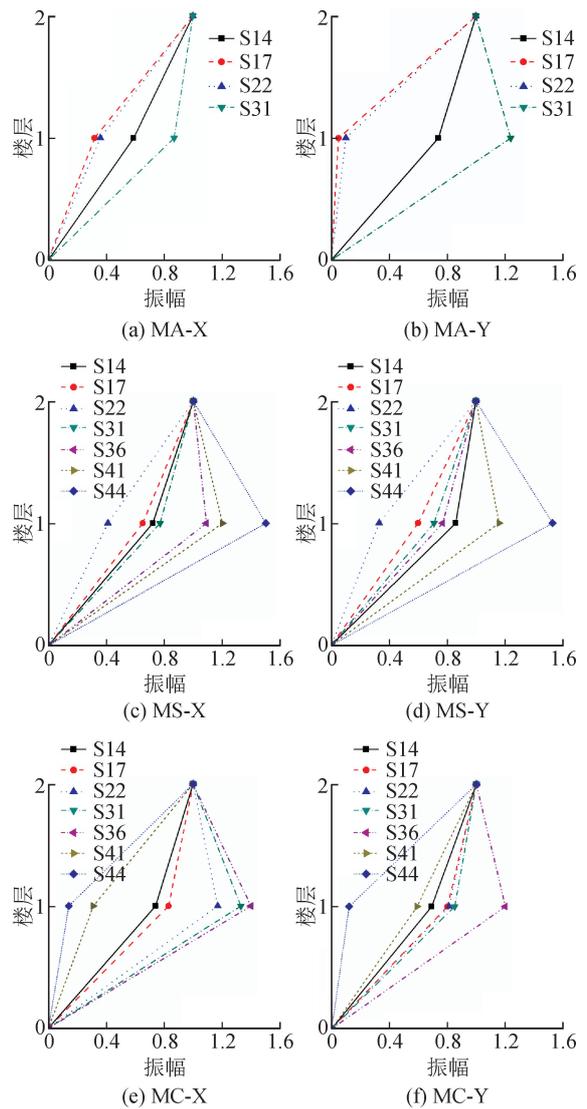


图 10 模型结构第 1 阶振型
Fig. 10 First-order formation of models

3) 模型 MC 的 X、Y 向振型在加载初期基本表现为剪切型,底层的振幅随着输入地震强度的增大而增大,加载进入后期,随着顶层层间位移的增大,逐渐由剪切型转变为弯曲型;特别地,工况 S42 一阶振型接近线性分布,此时首层层间位移角为 1/490,顶层层间位移角为 1/465,此时基础滑移层裂缝贯通,使得上部结构实现了预期的滑移耗能,最终由于顶层横墙发生严重错位而退出工作,其振型变化情况和试验现象基本吻合。

5 结论

从上述对模型试验现象和动力特性演变规律的对比分析,可得出以下几点结论。

1) 砂垫层-基础滑移隔震结构模型在 7 度中震(0.44g)前结构依靠砂垫层隔震,7 度大震(0.62g)

后砂垫层与基础滑移层形成复合隔震体系,最终在9度大震(1.24g)发生弯曲破坏,其自振频率先不变后减小,阻尼先减小后增大,振型由剪切型逐渐转为弯曲型,复合隔震结构可以实现不同地震水准下不同的消能隔震机制。

2) 砂垫层隔震结构模型在7度大震(0.62g)前保持完好,在8度大震(1.02g)时退出工作,其自振频率先保持不变后下降,阻尼比先减小后增大,振型经历由剪切型到弯曲型,再到剪切型的变化过程,砂垫层隔震结构可以依靠砂垫层减小上部地震作用。

3) 对比三种结构模型,普通结构破坏较早,自振频率减小及刚度退化较快,而隔震结构的裂缝出现和破坏阶段皆相对较晚,模型自振频率减小、刚度退化,皆具有较好的隔震效果。其中砂垫层—基础滑移复合隔震模型破坏阶段最晚,体现出更为优越的隔震能力,其破坏表现为上层破坏的弯曲型形态,故应考虑适当设置圈梁、构造柱,以确保上部结构在滑动过程中的整体性。

参考文献:

- [1] 王毅红,卜永红,韩岗,等. 中国村镇民居的建造习惯与抗震性能评析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2011, 31(3):60-67.
WANG Yihong, BU Yonghong, HAN Gang, et al. Assessing on construction habituation and seismic behavior of village and town buildings in China[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2011, 31(3):60-67.
- [2] 曹万林,戴租远,叶炜,等. 村镇建筑低成本隔震技术研究现状与展望[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(6):38-46.
CAO Wanlin, DAI Zuyuan, YE Wei, et al. Research and prospect of low-cost isolation techniques for rural buildings[J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(6): 38-46.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] AHMAD S, GHANI F, ADIL M R. Seismic friction base isolation performance using demolished waste in masonry housing [J]. Construction and Building Materials. 2009, 23(1): 146-152.
- [6] 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: 10-17.
- [7] 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 Railways Science and Engineering, 2009, 6(3):13-16.
- [8] TSANG H. Seismic isolation by rubber-soil mixtures for developing countries [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2008, 37(2):283-303.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ161-2008 镇(乡)村建筑抗震技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ118-2011 冻土地区建筑地基基础设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.
- [11] 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 isolating properties of sand cushion[J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(1):125-128.
- [12] 李海涛. 村镇建筑砂垫层隔震性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2011.
LI Haitao. Study on properties of rural isolated structure of sand cushion[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [13] 邹颖娴. 砂石垫层的隔震性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2006.
ZOU Yingxian. Study of isolating character for sand gravel cushion[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2006.
- [14] 袁康,李英民,王玉山,等. 抗冻胀复合隔震建筑体:中国, CN203583969U[P]. 2014-05-07.
- [15] 袁康,郭军林,李英民. 村镇建筑新型简易滑移隔震体系拟静力试验研究[J]. 工业建筑, 2015, 45(11): 30-34.
YUAN Kang, GUO Junlin, LI Yingmin. Quasi-static test of new kind of simple sliding seismic isolation system for rural buildings [J]. Industrial Construction,

- 2015, 45(11): 30-34.
- [16] 郭军林,袁康,李英民. 改性砂浆-橡胶束滑移隔震墙试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(增刊 2): 230-236.
GUO Junlin, YUAN Kang, LI Yingmin. Experimental research on sliding isolation walls using modified mortar and rubber beam[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(S2): 230-236.
- [17] 田弯. 高烈度寒冷地区村镇建筑简易复合隔震技术数值分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
TIAN Wan. Numerical analysis of simple composite isolation technology for rural masonry buildings in cold areas with high seismic intensity [D]. Chongqing: Chongqing university, 2015.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ79-2012 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [19] 李英民,刘立平. 工程结构的设计地震动[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [21] 卢俊龙,何明胜,田洁. 填充墙 MTMD 减震结构优化参数分析[J]. 西安理工大学学报, 2013, 6(1): 27-31.
LU Junlong, HE Mingsheng, TIAN Jie. The parameter analysis of vibration attenuation structure optimization of in-filled wall MTMD[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2013, 6(1): 27-31.

(责任编辑 王绪迪)

(上接第 223 页)

- [10] 孟祥翔,刘伟奇,冯睿,等. 双自由曲面 LED 均匀照明准直透镜设计[J]. 光子学报, 2014, 43(8): 10-15.
MENG Xiangxiang, LIU Weiqi, FENG Rui, et al. Design of LED collimator for uniform illumination with double freeform surfaces[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(8): 10-15.
- [11] 李庆扬,王能超,易大义. 数值分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [12] 潘浩,陈国庆,杜伯钧. 基于三次样条的双自由曲面 LED 匀光透镜设计[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(3): 197-204.
PAN Hao, CHEN Guoqing, DU Bojun. Design of double freeform surface lens for LED uniform illumination based on cubic splines[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(3): 197-204.
- [13] 朱民,楼俊,潘玉珏,等. 基于新型 LED 准直系统的自由曲面均匀照明设计[J]. 光学学报, 2018, 38(4): 300-305.
ZHU Min, LOU Jun, PAN Yujue, et al. Design of freeform surface with uniform illumination based on new LED collimation system [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 300-305.
- [14] WANG Guangzhen, WANG Lili, Li Fuli, et al. Collimating lens for light-emitting-diode light source based on non-imaging optics [J]. Applied Optics, 2012, 51(11): 1654-1659.
- [15] 刘国强,赵恒,华灯鑫,等. 基于自由曲面设计的 LED 光源系统光束准直研究[J]. 西安理工大学学报, 2018, 34(1): 87-91.
LIU Guoqiang, ZHAO Heng, HUA Dengxin, et al. Collimation of LED light source based on freeform surface[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2018, 34(1): 87-91.

(责任编辑 王绪迪)