

农村建筑岩土隔震系统振动台试验研究

孙海峰¹, 尹志勇², 宾佳³, 景立平^{4,5}, 陈锦焯¹, 杨宇轩¹

(1. 黑龙江科技大学 建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 湖南文理学院 芙蓉学院, 湖南 常德 415000; 3. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412700; 4. 中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 5. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:基于玻璃珠-砂垫层的岩土隔震系统(geotechnical seismic isolation system based on glass bead-sand cushion, GSI-GBSC)在一层砌体结构农村房屋上表现出良好的隔震性能,然而其对于二层及以上农村建筑的隔震效果尚不明确。该文对一组两层砌体建筑的1/4比例模型进行了振动台测试:第1种为二层砖砌体结构模型(无隔震模型),第2种为具有GSI-GBSC隔震系统的二层砖砌体结构模型(隔震模型),对2种模型的加速度和位移响应进行了评估与比较,并与已有研究中一层农村建筑试验结果进行了对比分析。研究表明,GSI-GBSC隔震系统中的玻璃珠-砂垫层容易发生滑移错动,导致隔震模型的地基土与上部结构之间产生了相对滑移,进而降低了上部结构的地震反应。在不同加速度峰值输入工况下,隔震模型上部结构以平动为主,而无隔震模型上部结构位移响应随着输入加速度峰值的增大而增大,且各层水平位移峰值的差距逐渐变大。此外,还发现隔震模型上部结构层间变形显著减小。具体而言,当输入加速度峰值为0.2、0.4 g时,隔震模型结构顶部的加速度响应相比较无隔震模型减小程度分别达28%、36%。总体而言,GSI-GBSC隔震系统对一层和二层农村砌体结构均具备较好的隔震效果,但增大结构的重量和高宽比,会使砂土-玻璃珠滑移层的滑移性能有所降低,GSI-GBSC隔震系统的隔震效果也会略有下降。

关键词:隔震;岩土隔震;振动台试验;砌体结构;砂垫层

中图分类号:TU4; TU352

文献标志码:A

Shaking table test study on geotechnical isolation system of rural buildings

SUN Haifeng¹, YIN Zhiyong², BIN Jia³, JING Liping^{4,5}, CHEN Jinxuan¹, YANG Yuxuan¹

(1. School of Architectural Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150080, China; 2. Furong College, Hunan University of Arts and Science, Changde 415000, China; 3. College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412700, China; 4. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 5. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China)

Abstract: The geotechnical isolation system based on glass beads and sand cushion (referred to as GSI-GBSC) has exhibited good seismic isolation performance on a one-story masonry building, but its effectiveness for two-story or higher rural buildings remains not determined. This study carried out a shake table test on a 1/4-scale model of a two-story masonry building. The first model was a two-story brick masonry structure without seismic isolation (the non-isolated model), and the second model was a two-story brick masonry structure equipped with the GSI-GBSC seismic isolation system (the isolated model). The acceleration and displacement responses of the two models were evaluated and compared, and compared with the results of the one-story rural building test conducted in previous

收稿日期:2024-06-30; 修回日期:2024-09-12

基金项目:湖南省自然科学基金项目(2024JJ7299);黑龙江科技大学引进高层次人才科研启动基金项目(HKDQDJ202426);国家自然科学基金项目(52308500)

作者简介:孙海峰(1981—),男,高级工程师,博士,主要从事岩土地震工程与工程结构抗震研究。E-mail:sunhaifeng3639@163.com

通信作者:尹志勇(1993—),男,讲师,博士,主要从事岩土地震工程与工程结构抗震研究。E-mail:iemyzy@163.com

studies. The results indicate that the glass-bead-sand-pad layer in the GSI-GBSC seismic isolation system tends to slip and slide, resulting in relative slippage between the foundation soil and upper structure of the isolated model. This ultimately reduces the seismic response of the upper structure. Under different peak acceleration input conditions, the upper structure of the isolated model was observed to move predominantly in a horizontal direction. In contrast, the displacement response of the non-isolated model increases as peak acceleration input values increase, leading to an increasing gap between horizontal displacement peaks in each layer. Furthermore, it was found that inter-story deformation in the isolation model is significantly reduced. Specifically, when peak acceleration input values are $0.2 g$ and $0.4 g$ respectively, it was observed that acceleration responses at top structures were 28% and 36% lower in comparison to those from non-isolated models. In summary, it can be concluded that while GSI-GBSC isolation system demonstrates good effects on one-story and two-story rural masonry structures, however, increasing weight and height-to-width ratio will reduce its effectiveness.

Key words: seismic isolation; geotechnical seismic isolation; shaking table test; masonry structure; sand cushion

0 引言

砖砌体建筑是我国农村地区最常见的结构类型,然而,这类建筑抗震能力差,不仅会危及人们的生命安全,还会导致财产损失,造成巨大的经济负担。根据震害调查数据,在近几年发生的九寨沟 7.0 级地震^[1]、漾濞 6.4 级地震^[2]、泸定 6.8 级地震^[3]中,大量农村地区的砖砌体结构房屋都遭受了严重破坏。因此,针对农村建筑开展隔震技术研究,以提高建筑结构的抗震性能,具有重要的意义。

隔震技术是提高现有和新建结构抗震性能的实用方法之一^[4]。由于砌体结构对抗剪能力较差,因此低成本的基础隔震技术是减轻地震作用的有效途径之一^[5-6]。基于摩擦的滑移隔震也是一种低成本的地震耗能技术,它涉及在底座或基础水平上设置具有低摩擦系数的滑动界面,如大理石、砾石和石墨粉、玻璃珠-石墨^[7-11]。通过在上部结构和下部结构之间引入滑动界面,将上部结构与下部结构解耦,可以降低上部结构的地震响应。近年来,岩土隔震技术引起了广泛关注,它涉及在围绕结构基础使用低模量材料形成隔震层,如橡胶砂^[12-13]、砂垫层^[14-15]。理论计算方面:SENETAKIS 等^[16]和 PITILAKIS 等^[17-18]基于岩土隔震系统开展了数值模拟计算,研究结果均表明,岩土隔震系统对上部结构的水平地震反应和竖向地震反应均有显著的隔震效果。试验方面:XIONG 等^[19]和 BANDYOPADHYAY 等^[20]对以橡胶砂作为隔震层材料的岩土隔震系统开展了振动台试验,研究结果表明,岩土隔震体系具有良好的隔震效果。

岩土隔震系统的隔震有效性在理论和试验方面均已得到验证,对于农村建筑有必要引入这种具有实际应用前景的隔离系统。景立平等^[21]提出了一种基于玻璃珠-砂垫层的岩土隔震系统(geotechnical seismic isolation system based on glass bead-sand cushion, GSI-GBSC),并对 1 层农村砌体结构房屋进行了振动台试验,结果表明:在地震作用下,具有 GSI-GBSC 隔震系统试验模型的上部结构与地基土之间产生了滑移,减少了地震能量向上部结构传递,有效降低了上部结构的地震反应,表现出良好的隔震效果,可见砂土-玻璃珠滑移层的滑移性能对 GSI-GBSC 隔震系统的隔震效果影响显著。农村地区大部分的房屋均为 1 层或 2 层等低矮建筑,上部结构重量和高宽比的增加对 GSI-GBSC 隔震系统滑移性能和隔震效果的影响均尚未可知。鉴于此,本文通过制作农村地区常见的 2 层砌体结构模型,开展了有、无 GSI-GBSC 隔震系统的振动台试验,对 2 组试验的结果进行对比分析,探究 GSI-GBSC 隔震系统对 2 层农村砌体结构房屋的隔震性能,并分析上部结构重量和高宽比增大对 GSI-GBSC 隔震系统隔震性能的影响。

1 振动台试验

1.1 GSI-GBSC 隔震系统

GSI-GBSC 隔震系统由砂垫层、滑移层和回填土组成,其构造见图 1。砂垫层的厚度一般为 300~500 mm,压实系数不小于 0.94。滑移层由玻璃珠嵌入到砂垫层表面而形成,位于结构基础和砂垫层之间。本研究中采用的玻璃珠外形为球形、表面光滑,互相之间能够滚动,具有很好的自由流动性,在地震作用下更

容易出现滑动,与结构基础之间的摩擦系数为0.3~0.4。回填层由砂土组成,砂垫层采用的是普通河砂,而不是纯净砂,成本低适用于农村建筑。

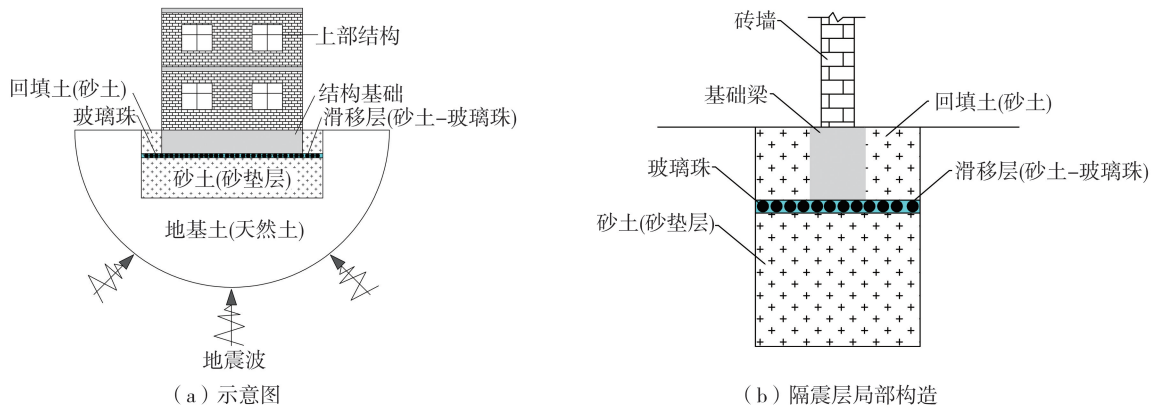


图1 GSI-GBSC 隔震系统

Fig.1 GSI-GBSC isolation system

1.2 模型设计与制作

1.2.1 模型设计

结构模型的原型选取位于中国东北的农村砌体结构房屋,试验中对2种模型进行对比,无隔震模型(无岩土隔震的2层砖砌体结构)和隔震模型(有岩土隔震的2层砖砌体结构),结构模型布局见图2。2层砌体结构模型的总高度为1650 mm,平面尺寸为1800 mm×1425 mm,外墙厚度为90 mm,内墙厚度为60 mm。

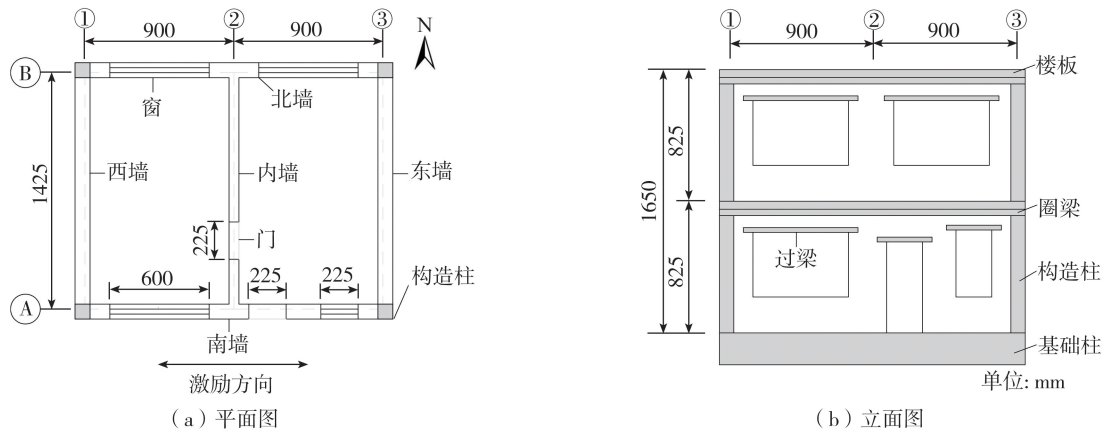


图2 结构模型平面图及立面图

Fig.2 Structural model plan and elevation diagram

1.2.2 相似关系

试验模型包括结构模型和土体模型,结构模型的相似关系见表1。选取长度比例尺 $S_l = 0.25$,弹性模量比例尺 $S_E = 1.00$,加速度比例尺 $S_a = 2.00$ 作为基本相似参数。按各层重力荷载代表值的比例,在各楼板上均匀设置相应比例的配重。需要注意的是,在土体或土-结构动力相互作用的振动台试验中,由于土是离散颗粒组成的特殊结构,土体的重力相似关系很难满足。因此,在试验中未考虑土体模型的相似关系。

表1 结构模型相似比

Table 1 Similarity ratio of structural model

特性	物理量	相似关系	相似比	特性	物理量	相似关系	相似比
几何参数	长度	S_l	0.250	材料参数	应变	$S_e = S_\sigma / S_E$	1.000
	位移	$S_{ld} = S_l$	0.250		密度	S_ρ	2.000
	面积	$S_{ar} = S_l^2$	0.063	动力参数	时间	$S_T = S_l (S_\rho / S_E)^{0.5}$	0.350
	体积	$S_v = S_l^3$	0.016		频率	$S_f = (S_E / S_\rho)^{0.5} / S_l$	2.828
材料参数	弹性模量	S_E	1.000	质量	$S_m = S_\rho S_l^3$	0.031	
	应力	$S_\sigma = S_E$	1.000	加速度	$S_a = S_E / (S_l S_\rho)$	2.000	

1.2.3 模型材料

结构模型材料主要包含砖块、微粒混凝土、砂浆和钢筋。模型砖块由标准砖切割形成,尺寸为 56 mm × 26 mm × 21 mm,砂浆厚度为 3~5 mm。楼板和圈梁的混凝土强度等级为 C20,楼板钢筋采用双层 4 mm 镀锌铁丝网,间距为 55 mm。地基土模型材料主要包含玻璃珠、天然土和砂土,其材料性质详见文献[21]。

1.2.4 模型制作

模型制作示意图见图 3。为便于对比,隔震模型和无隔震模型的上部结构保持一致。首先,制作 200 mm 高的基础梁,并绑扎好构造柱钢筋。其次,在基础梁上砌筑 1 层砖墙,绑扎 1 层圈梁钢筋并支模浇筑。然后,吊装 1 层楼板,砌筑 2 层砖墙,绑扎 2 层圈梁钢筋并支模浇筑。最后,吊装 2 层楼板,养护刷白灰。

无隔震模型的地基土模型为 1000 mm 厚天然土,隔震模型的地基土模型在 1000 mm 厚的天然土基础上开挖并回填一个 400 mm 厚的砂垫层和一个滑动层。首先,在振动台上安装好土箱^[22],并按照分层压实的方法制备 1000 mm 厚度的天然土地基,每层土厚度为 200 mm,尽可能保持土层上下均匀一致。其次,在 1000 mm 的地基土中向下开挖出深度为 600 mm 的基槽,之后在基槽内均匀铺设 400 mm 厚的砂土并夯实。最后,在砂土表面铺满一层玻璃珠,并用平直木板将玻璃珠均匀嵌入砂土,形成玻璃珠-砂垫层滑动层,并静置 48 h。土体模型完成后,将结构模型吊装到地基土模型上。最后,在基础埋深范围内回填砂土。

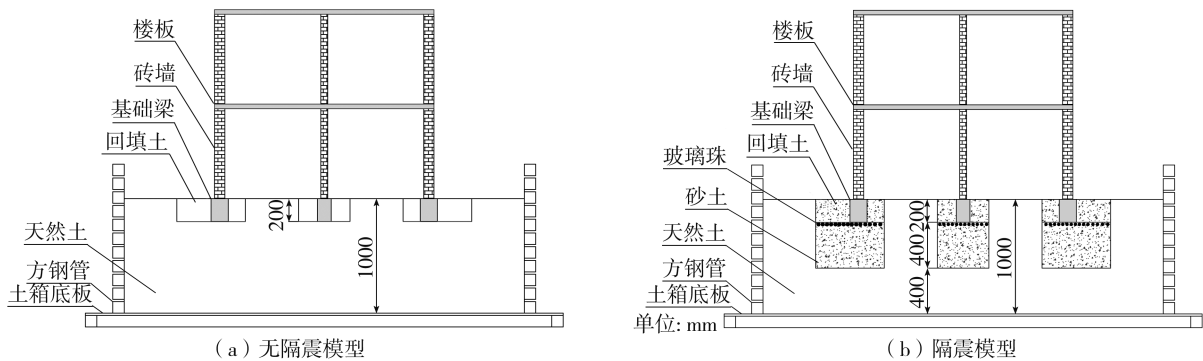


图 3 模型制作示意图

Fig. 3 Schematic diagram of model making

1.3 传感器布设方案

试验中分别使用加速度计、拉线位移计观察测试过程中的加速度、位移。加速度计位于 2 种模型的土箱底部、地基土、结构基础和楼板,分别用字母 A 和 SA 表示,见图 4。拉线位移计沿 Y 方向布置在土箱的不同高度处和结构模型基础和楼板,以字母 D 表示。

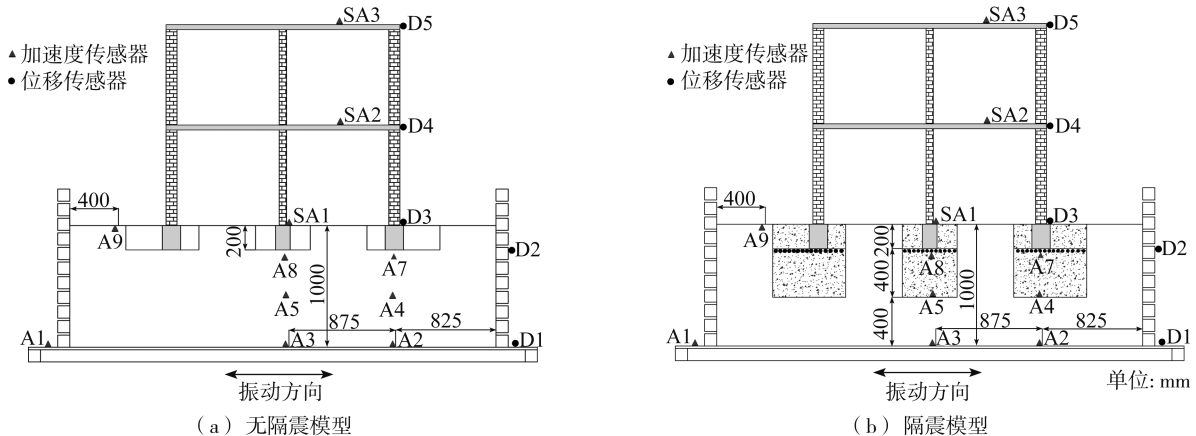


图 4 模型的传感器布设

Fig. 4 Layout of test sensors

1.4 加载方案

选取 El Centro 地震波的南北分量作为模型的输入地震动。输入地震动的加速度时程及其傅里叶谱见图 5。输入地震动峰值 (peak input acceleration, PIA) 范围从 0.1~0.4 g,包括白噪声在内共有 5 种加载工况。试验加载工况见表 2。

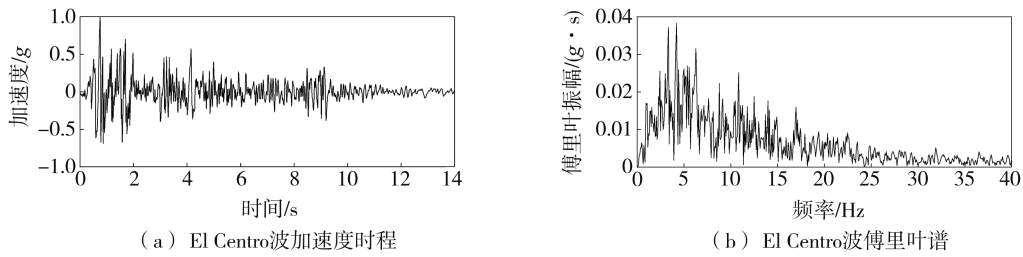


图5 输入地震动加速度时程及其傅里叶谱

Fig. 5 Input ground motion acceleration time history and its Fourier spectrum

表2 地震动加载工况

Table 2 Seismic loading conditions

序号	输入波	输入幅值/ g	加载方向
C1	白噪声	0.07	三向
C2	El Centro	0.10	水平
C3	El Centro	0.20	水平
C4	El Centro	0.40	水平
C5	白噪声	0.07	三向

2 试验结果与分析

2.1 试验现象

随着输入地震幅值的增加,2种模型的破坏模式表现出不同的特征。试验观察如下结果:

对于无隔震模型,在 $0.4g$ 地震动加载下,南墙和北墙沿振动方向的门窗角沿对角线开裂,出现斜裂缝(图6),窗间墙沿出现贯穿裂缝,墙体发生剪切破坏,整个结构呈现出剪切变形特征。在所有加载工况中,无隔震模型的回填土基本没有发生破坏,砖墙上门窗洞口等薄弱部位出现了裂缝。

对于隔震模型,在 $0.2g$ 地震动加载前,上部结构和滑移层未出现明显的相对滑移现象,说明耗能和隔震主要依靠砂垫层。在加载 0.2 、 $0.4g$ 地震动加载时,上部结构与滑移层之间均有滑移运动现象,但 $0.4g$ 地震动加载时,滑移运动更明显,回填砂土在结构基础挤压作用下发生破坏出现了裂缝,见图7。在所有加载工况中,隔震模型结构由于上部结构与滑移层之间的相对滑动而完好无损,说明与无隔震模型相比,GSI-GBSC隔震系统对于2层农村砌体结构房屋具有良好的隔震效果。

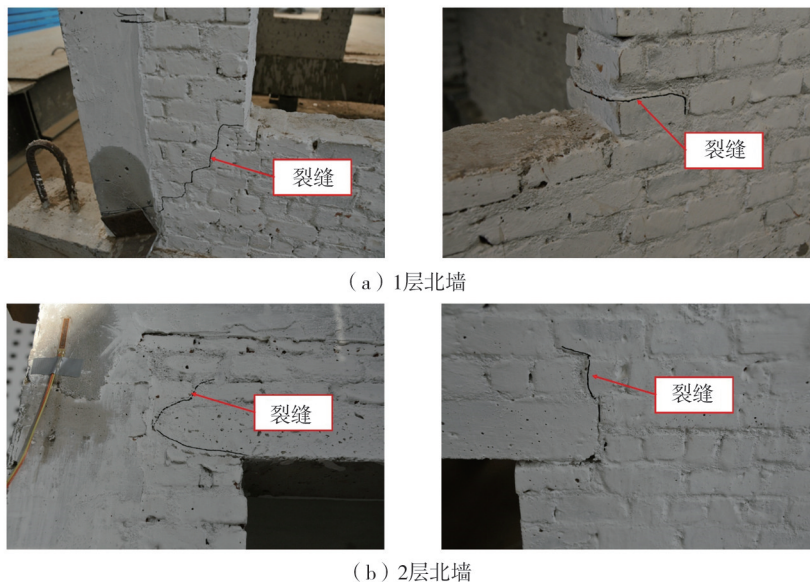


图6 无隔震模型的上部结构典型破坏现象

Fig. 6 Typical failure phenomenon of the upper structure of the non-isolated model

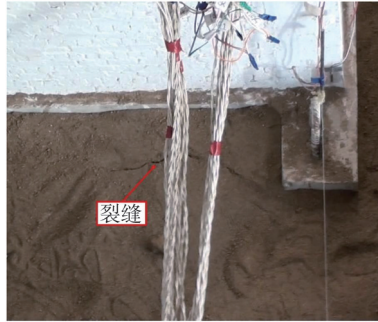


图 7 隔震模型回填土破坏现象

Fig. 7 Backfill failure phenomenon of isolation model

2.2 位移反应

不同加速度峰值工况下隔震模型的地基土与结构之间的相对位移曲线,见图 8。不同加速度峰值工况下隔震模型和无隔震模型上部结构层间变形,见图 9。不同加速度峰值工况下隔震模型和无隔震模型各层水平位移峰值,见图 10。

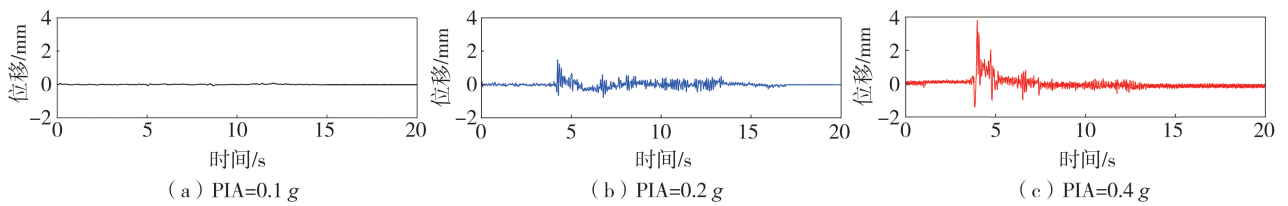


图 8 隔震模型地基土与结构基础之间的相对位移曲线

Fig. 8 Relative displacement curves between the foundation soil and the structural foundation of the isolation model

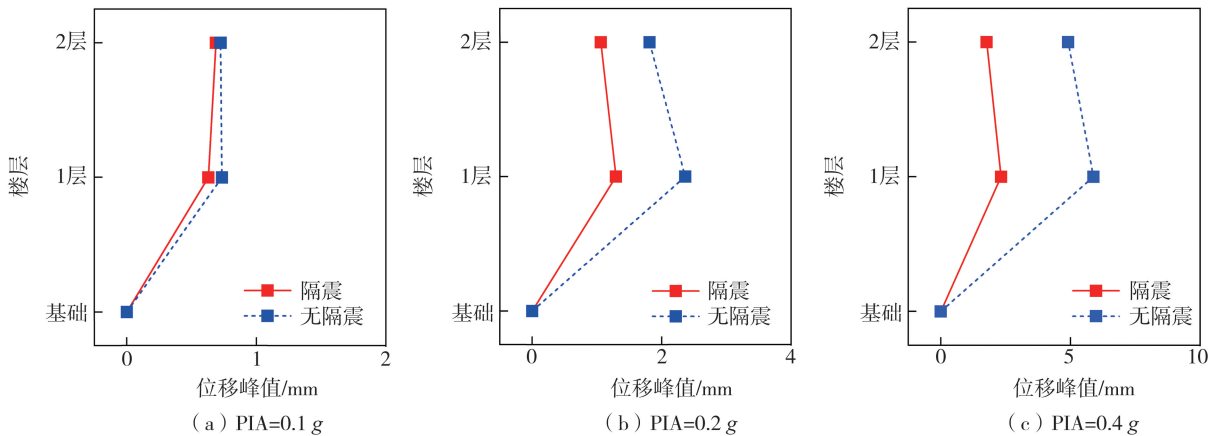


图 9 上部结构层间变形

Fig. 9 Interlayer deformation of the upper structure

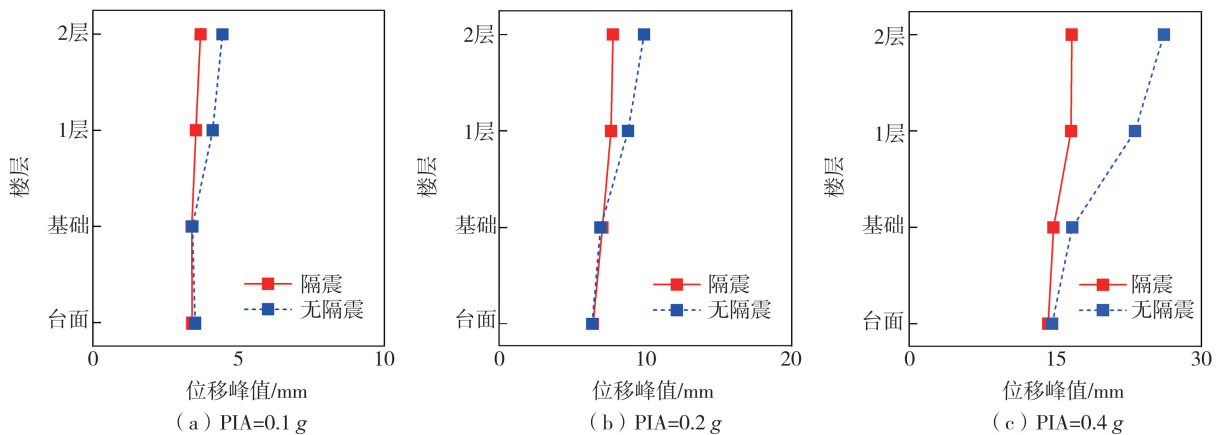


图 10 上部结构水平位移峰值

Fig. 10 Peak horizontal displacement of the upper structure

由图8可知,由于隔震垫层中玻璃珠易于滑动的原因,当输入加速度峰值为0.2、0.4 g时,隔震模型的地基土与上部结构之间产生了相对滑移,这与试验中观察到的现象一致,并且输入加速度峰值越大滑移位移越大。0.4 g地震动加载工况,本文 GSI-GBSC 隔震系统的相对位移峰值为 3.49 mm,而同一地震动强度加载工况下,文献[21]中 GSI-GBSC 隔震系统相对位移峰值为 6.21 mm。由此可见,2层结构模型(本文)相对1层结构模型(文献[21]),增大了上部结构重量及高宽比,对 GSI-GBSC 隔震系统的砂土-玻璃珠滑移层的滑移性能有所降低。

由图9可知,当输入加速度峰值为0.1 g时,隔震模型与无隔震模型的上部结构层间变形很接近;当输入加速度峰值为0.2 g和0.4 g时,由于隔震模型发生相对位移的原因,造成隔震模型的上部结构层间变形小于无隔震模型,隔震模型有效降低了上部结构的层间变形。

由图10可知,隔震模型上部结构在不同加速度峰值输入工况下,上部结构各层的位移峰值差别均较小,上部结构以平动为主;无隔震模型上部结构位移响应随着输入加速度峰值的增大各层水平位移峰值差距逐渐增大,结构顶部水平位移峰值大于结构底部。

2.3 加速度反应

不同加速度峰值工况下隔震模型和无隔震模型上部结构各层加速度峰值见图11。由图可知,隔震模型和无隔震模型的结构加速度响应随楼层增大逐渐增大,但随着输入加速度峰值增大,隔震模型相对于无隔震模型的结构各层加速度响应显著减小,隔震系统的隔震效果良好。

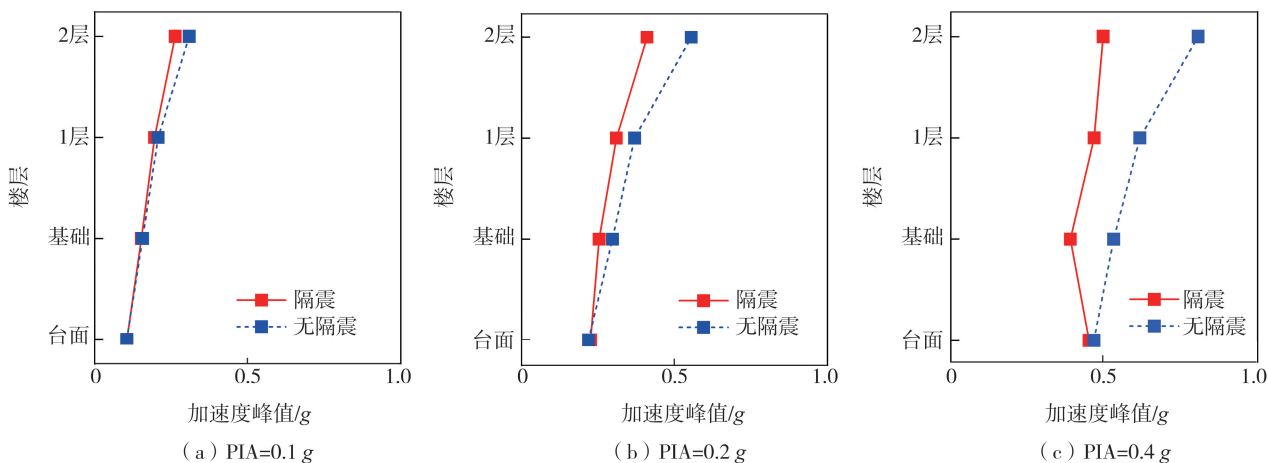
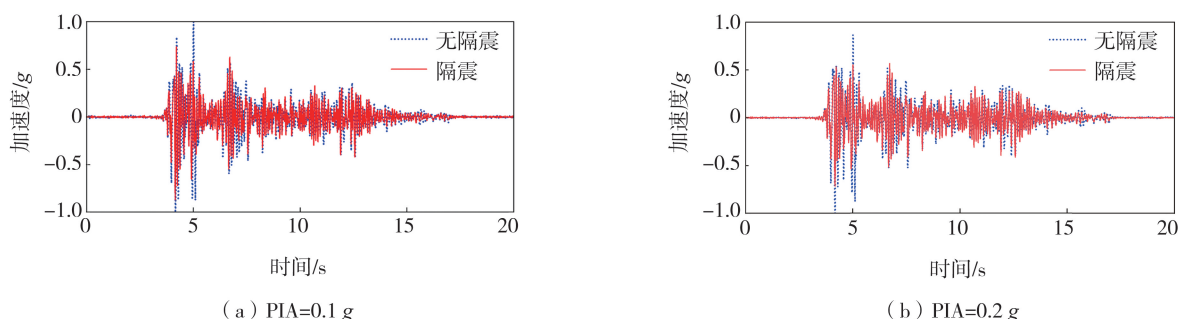


图11 上部结构各层加速度峰值

Fig. 11 Peak acceleration of each floor of the upper structure

结构顶部归一化后的加速度时程曲线见图12。由图可知,隔震模型的结构顶部加速度响应小于无隔震模型的结构顶部加速度响应,随着输入加速度峰值的增大,隔震模型的结构顶部加速度响应减小程度逐渐增大,当输入加速度峰值为0.2、0.4 g时,隔震模型2层砌体结构模型的结构顶部加速度响应相比较无隔震模型减小程度分别达28%和36%,隔震效果良好。文献[21]中具有 GSI-GBSC 隔震系统的1层砌体结构模型的结构顶部加速度峰值相比较无隔震模型分别减小了29%和50%。可见,相比较1层砌体结构,GSI-GBSC 隔震系统对于2层砌体结构顶部加速度反应的降低效果稍差。



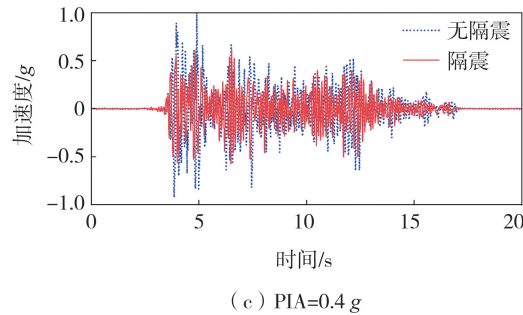


图 12 结构顶部归一化加速度时程曲线

Fig. 12 Normalized acceleration time history curves at the top of the structure

3 结论

本文制作了2层砌体结构农村建筑试验模型,对隔震模型和非隔震模型进行了地震模拟振动台试验,得到以下结论:

1) GSI-GBSC 隔震系统中玻璃珠-砂垫层易于滑移错动,当输入加速度峰值为 0.2、0.4 g 时,隔震模型的地基土与上部结构之间产生了相对滑移,降低了上部结构的地震反应,这与观察到的隔震模型上部结构无肉眼可见裂缝,而无隔震模型未出现裂缝现象一致。

2) 综合考虑结构层间变形和结构各层水平位移峰值,在不同加速度峰值输入工况下,隔震模型上部结构以平动为主,无隔震模型上部结构位移响应随着输入加速度峰值的增大且各层水平位移峰值差距逐渐增大,而隔震模型上部结构层间变形显著减小。

3) 隔震模型相对于无隔震模型的结构各层加速度响应显著减小,当输入加速度峰值为 0.2、0.4 g 时,隔震模型的结构顶部加速度响应相比较无隔震模型减小程度分别达 28%、36%。

4) 2层砌体结构相比较1层砌体结构,由于结构的重量和高宽比增大,GSI-GBSC 隔震系统的砂土-玻璃珠滑移层的滑移性能有所降低,且 GSI-GBSC 隔震系统对上部结构的地震反应的减小程度稍有降低。总言之,GSI-GBSC 隔震系统对1层和2层农村砌体结构均有较好的隔震效果,但增大结构的重量和高宽比,GSI-GBSC 隔震系统的隔震效果稍有降低。

参考文献:

- [1] 张令心,朱柏洁,陶正如,等.九寨沟7.0级地震房屋震害现场调查及其破坏特征[J].地震工程学报,2019,41(4):1053-1059.
ZHANG Lingxin, ZHU Baijie, TAO Zhengru, et al. Field investigation and failure characteristics of buildings damaged by the 7.0-magnitude earthquake in Jiuzhaigou[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(4): 1053-1059. (in Chinese)
- [2] 戴必辉,陶忠,徐国林,等.云南漾濞 M_s 6.4级地震震中区农房震害调查[J].世界地震工程,2021,37(3):9-18.
DAI Bihui, TAO Zhong, XU Guolin, et al. Investigation of seismic damage to rural houses in the epicenter area of Yangbi M_s 6.4 earthquake in Yunnan[J]. World Earthquake Engineering, 2021, 37(3): 9-18. (in Chinese)
- [3] 潘毅,袁家聪,林拥军,等.泸定6.8级地震农村居住建筑震害调查与分析[J].防灾减灾工程学报,2023,43(6):1200-1214.
PAN Yi, YUAN Jiacong, LIN Yongjun, et al. Seismic damage investigation and analysis of rural residential buildings in M_s 6.8 Luding earthquake[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(6): 1200-1214. (in Chinese)
- [4] D'AMATO M, GIGLIOTTI R, LAGUARDIA R. Seismic isolation for protecting historical buildings: A case study[J]. Frontiers in Built Environment, 2019, 5: 87.
- [5] AVINASH A R, KRISHNAMOORTHY A, KAMATH K, et al. Sliding isolation systems: Historical review, modeling techniques, and the contemporary trends[J]. Buildings, 2022, 12(11): 1997.
- [6] TSIAVOS A, SEXTOS A, STAVRIDIS A, et al. Low-cost hybrid design of masonry structures for developing countries: Shaking table tests[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 146: 106675.
- [7] BIBI T, ALI A, NAEEM A, et al. To investigate different parameters of economic sliding based seismic isolation system[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2024, 28(3): 659-688.
- [8] NANDA R P, SHRIKHANDE M, AGARWAL P. Low-cost base-isolation system for seismic protection of rural buildings[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2016, 21(1): 04015001.
- [9] KUMAR M, WHITTAKER A S, CONSTANTINOU M C. Characterizing friction in sliding isolation bearings[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2015, 44(9): 1409-1425.

- [10] 曹万林, 张玉山, 叶炜, 等. 玻璃珠-石墨基础滑移隔震系统滑移性能试验研究[J]. 世界地震工程, 2017, 33(2): 119-126.
CAO Wanlin, ZHANG Yushan, YE Wei, et al. Experimental study on sliding performance of a base sliding isolation system with glass beads-graphite[J]. World Earthquake Engineering, 2017, 33(2): 119-126. (in Chinese)
- [11] 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. (in Chinese)
- [12] TSANG H H. Seismic isolation by rubber-soil mixtures for developing countries[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2008, 37(2): 283-303.
- [13] TSANG H H, LO S H, XU X, et al. Seismic isolation for low-to-medium-rise buildings using granulated rubber-soil mixtures: Numerical study[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2012, 41(14): 2009-2024.
- [14] 孙海峰, 尹志勇, 景立平, 等. 输入地震动对砂垫层岩土隔震系统隔震效果的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(6): 222-230.
SUN Haifeng, YIN Zhiyong, JING Liping, et al. Influence of input ground motion on the isolation effect of geotechnical seismic isolation system based on sand cushion[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(6): 222-230. (in Chinese)
- [15] 尹志勇, 景立平, 孙海峰, 等. 农村房屋地基砂垫层隔震系统振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(6): 30-37.
YIN Zhiyong, JING Liping, SUN Haifeng, et al. Experimental study on sand cushion isolation system for foundations of rural house by shaking table test[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(6): 30-37. (in Chinese)
- [16] SENETAKIS K, ANASTASIADIS A, TREVLOPOULOS K, et al. Dynamic response of SDOF systems on soil replaced with sand/rubber mixture. Proceedings of the ECOMAS Thematic Conference on Computation Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Rhodes, Greece, June 22-24, 2009.
- [17] PITILAKIS K, TREVLOPOULOS K, ANASTASIADIS A, et al. Seismic response of structures on improved soil[C]//Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics, Leuven, Belgium, July 4-6, 2011.
- [18] PITILAKIS K, KARAPETROU S, TSAGDI K. Numerical investigation of the seismic response of RC buildings on soil replaced with rubber-sand mixtures[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 79: 237-252.
- [19] XIONG W, LI Y Z. Seismic isolation using granulated tire-soil mixtures for less-developed regions: Experimental validation[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2013, 42(14): 2187-2193.
- [20] BANDYOPADHYAY S, SENGUPTA A, REDDY G R. Performance of sand and shredded rubber tire mixture as a natural base isolator for earthquake protection[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2015, 14(4): 683-693.
- [21] 景立平, 尹志勇, 孙海峰, 等. 基于玻璃珠-砂垫层的岩土隔震系统振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(7): 1458-1467.
JING Liping, YIN Zhiyong, SUN Haifeng, et al. Shaking table test of geotechnical seismic isolation system based on glass bead-sand cushions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(7): 1458-1467. (in Chinese)
- [22] 孙海峰, 景立平, 王宁伟, 等. 振动台多功能叠层剪切箱研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12): 2498-2506.
SUN Haifeng, JING Liping, WANG Ningwei, et al. Development of multifunctional laminar shear container for shaking table test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(12): 2498-2506. (in Chinese)