

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220212001

土工袋隔震农村民居现场激振测试及效果评价*

刘斯宏, 鲁洋, 方斌昕, 陈爽

(河海大学水利水电学院, 江苏南京 210098)

摘要: 为验证土工袋垫层在城乡中低层民居中的减隔震效果, 在地震多发区金沙江白鹤滩水电站坝址附近的民居点修建了中国首幢含有土工袋隔震垫层的农村民居。土工袋隔震垫层主要由土工编织袋包裹建筑级配砂堆叠而成, 具有就地取材, 价格低廉、施工简单等技术优势, 适用于广大农村地区的中低层房屋建筑。现场大型原位激振试验结果表明: 经过土工袋垫层处理后, 地基结构三向峰值加速度的绝对值和隔震系数较未处理时均显著减小, 验证了原位条件下土工袋垫层房屋基础具有良好的隔震效果, 有望在实际地震来临之时保障民居免遭严重损失, 为城乡综合隔震减灾提供新技术思路。

关键词: 土工袋; 垫层; 农村民居; 减隔震; 激振试验

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)05-0972-07

Full-scale Experimental Study on Effectiveness of Soilbag Cushion Used as Seismic Isolation in Building Engineering

LIU Sihong, LU Yang, FANG Binxin, CHEN Shuang

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: For validation on effectiveness of soilbag cushion used as seismic isolation in low-rise building engineering in the urban and rural areas, a real building built with soilbags isolation cushion layer was constructed. Then, a large-scale in-situ test was performed on the building. The experimental results show that soilbags cushion structure has good seismic isolation performance. Also, the advantages of low cost and a simple construction procedure make it particularly suitable for low rise houses in rural areas. The real project is the first building in China to adopt the new type of soilbags seismic isolation. The filled material is the sand commonly used in the construction of the house, and the overall cost does not increase. Based on the real building, the test preliminarily verified the effectiveness of the soilbags isolation layer under the in-situ condition based on an excitation test, which provides a new beneficial reference for the seismic isolation and disaster reduction of buildings in urban and rural areas.

Keywords: soilbags; cushion; rural buildings; seismic isolation; vibration test

* 收稿日期: 2022-02-12; 修回日期: 2022-07-06

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFE0128900)、国家自然科学基金(52109123)资助

作者简介: 刘斯宏(1964—), 男, 教授, 博导。主要从事土石坝工程、土工袋技术研究。E-mail: sihongliu@hhu.edu.cn

通讯作者: 鲁洋(1991—), 男, 副研究员。主要从事水工岩土和土工袋技术研究。E-mail: luy@hhu.edu.cn

0 引言

我国地震频度高、强度大、分布广、灾害重,历次大震造成灾区尤其是乡镇灾区大片房屋倒塌和重大人员伤亡,亟需通过经济高效的基础减隔震技术创新和推广应用,提升我国乡镇中低层房屋建筑的抗震能力。目前,基础隔震技术在国内外重大工程中应用广泛,其中,具有代表性的是在基础和上部结构之间设置橡胶隔震支座^[1-5],但该技术造价较高,施工工艺复杂,不太适合在经济不发达的乡镇地区中推广应用。近年来,学者们相继提出一些适用于乡镇地区房屋的低成本隔震技术,最为典型的是在基础上部铺设一定厚度的砂垫层^[6],以形成滑动摩擦的隔震层。并针对砂垫层隔震性能开展了一系列理论、试验和数值模拟研究,系统证实砂垫层具有良好的隔震性能,但也指出砂垫层在地震作用下由于缺乏约束,容易产生局部滑移,稳定性有所降低^[7-11]。

土工袋技术^[12]是一种新型的地基处理技术,其原理是利用外力作用下在袋子中产生的张力,约束袋内土体,相当于为袋内土体提供一个附加黏聚力,从而增加土体强度。研究表明:土工袋应用于地基基础,除了具有明显的加固作用外,还具有阻尼大和成本低等特点,是一种理想的减隔震材料,在柔性挡墙抗震、交通减振降噪和建筑基础隔震等领域具有潜在的技术和经济优势^[13-23]。开展原位减隔震足尺试验,是综合考量、验证减隔震措施效果最为直接的方法。实际上,土工袋在交通岩土减振领域已报道多个成功案例,相关沟槽回填和多维隔振测试验证了土工袋在交通降噪方面的有效性^[21-23],但对于土工袋用于房屋基础的大型原位隔震试验研究还有待实施。

本文基于现场原位条件,开展土工袋垫层隔震效果原位激振试验,以验证土工袋垫层的隔震效果,有望在我国西部以及“一带一路”沿线地震多发国家和地区的房屋基础工程中得到应用,为农村民居抗震安全提供技术支撑。

1 房屋结构及监测系统设计

1.1 民居房屋建筑结构

本文设计的足尺隔震民用建筑位于金沙江

白鹤滩水电站坝址附近的水库移民安置区。民居建筑结构为一层砖混结构,层高4 m,平面尺寸7 m × 7 m。基础为钢筋混凝土整浇筏板基础,混凝土强度等级为C30,墙体厚度为24 cm,采用实心黏土砖砌筑而成。这是金沙江白鹤滩水电站水库大寨镇移民安置区内代表性房屋建筑结构之一。如图1所示,上部房屋建筑结构施工前,采用3层土工袋垫层对原房屋地基基础进行减隔震设计施工。

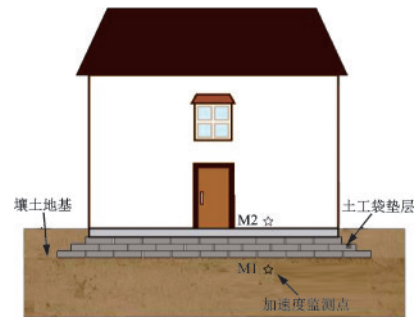


图1 土工袋隔震民居建筑示意

Fig.1 Schematic diagram of a residential building with soil-bags isolation

作为基础隔震层的土工袋袋体材料为聚丙烯(PP),母材的经向和纬向抗拉强度分别为19.33 kN/m和16.50 kN/m,经向和纬向伸长率分别为27.01%和21.72%。经紫外线照射200 h后的老化试验显示,母材强度变化不大,经向伸长率略有降低,表明所选用的土工编织袋具有良好的抗老化功能。为便于就地取材,土工袋袋内装填材料与实际房屋施工常用材料保持一致,选用工地现有的建筑级配砂。前期研究表明,砂土颗粒间的摩擦耗能是土工袋垫层减隔震效果的主要贡献原因之一,且对袋内填充砂土的级配并无特别要求,袋内装填砂土时,土工袋具有较好的阻尼耗能特性^[24]。

考虑到土工袋隔震措施具有操作便利,对现代化施工机械的要求不高,即使在村镇地区的一般施工条件下也易于施工应用,因此本次示范工程主要采用人工进行土工袋装袋。实际装袋时根据选用中砂的堆积密度换算体积,定制便携式装袋桶(图2(a)),每次装填至与装袋桶高度齐平时,抹平多余填料后使用手提式缝包机封口。整平后的土工袋单体尺寸约为40 cm × 40 cm × 10 cm(图2(b))。



(a) 土工袋装袋 (b) 土工袋单体

图2 土工袋制作与成型照片

Fig.2 Photos of used soilbags

1.2 减隔震民居施工过程

如图3(a)所示,土工袋隔震层铺设形式采用十字交错型,铺设三层土工袋,隔震层厚度大约为0.3 m,考虑到土工袋减隔震机制主要通过袋内材料的黏滞阻力、层间摩擦耗能以及袋体间空隙阻隔地震波传递三方面,铺设过程中土工袋袋体间预留2 cm左右的缝距,保证土工袋隔震层在地震作用时能够充分发挥变形耗能及间隙阻断地震波传递等作用。整体铺设完后对土工袋垫层进行适当碾压。各层土工袋铺设完成后碾压整平后,在土工袋隔震层上部铺设约10 cm厚的砂垫层找平,作为土工袋隔震层与上部筏板基础间的过渡层;待砂垫层整平后根据设计要求浇筑一层10 cm厚的素混凝土,可为后续的筏板基础浇筑提供较为平整的持力层,且有助于筏板基础与下部结构具有较好的界面黏结作用。待养护完成后进行钢筋混凝土筏板基础的浇筑,最后砌筑上部房屋结构,形成最终的建筑物(图3(b))。



(a) 土工袋垫层 (b) 房屋主体完工

图3 土工袋垫层隔震房屋实物

Fig.3 Photos of building with soilbags isolation

1.3 采集和监测系统布置

土工袋铺设过程中,在对应位置布置三向加速度传感器,通过记录监测点沿高度方向的加速度变化情况,分析土工袋隔震层在中低层房屋减隔震作用中的适用性。具体监测点位置分布情况如图4所示,在房屋的土工袋隔震层下部 M1(地坪以下

1.4 m)和筏板基础与地坪上部 M2处布置加速度传感器,以对比地震响应通过隔震层后的衰减效果。

此外,考虑到实际地震具有随机性的特点,在现场开展了激振试验,以验证减隔震效果。在房屋一侧同一距离设置两组对照点,一组铺设土工袋隔震层模拟有隔震层的工况,另一组就地采用壤土回填模拟无隔震层的情况。在深度0.45 m处布置加速度传感器 M4与 M5,分别对应房屋内土工袋隔震层底部以及室外相应深度处的壤土回填地基对照点,在对照点连线中点位置1.4 m深度处布置测点 M3。

试验布置的加速度传感器为 YT-600A 三轴固定式倾角传感器,精度为 1/3 000 g,量程 3 g,具有高精度、低功耗的特点,采用 NB-IOT 无线通信方式,具有 GPS 北斗定位功能,太阳能供电。考虑到降雨或周围排水入渗可能造成的传感器信号采集问题,对每个加速度传感器外加保护盒,并进行灌胶处理,对信号线采用 PVC 管进行保护,传感器及其现场埋设如图4(a)所示。施工完成后于房屋内安装加速度传感器对应的数据采集盒,并进行采集系统的信号接收调试,将信号传输至云平台(图5(a)),该平台基于物联网、大数据和云计算技术,可实现监测数据的可视化和云存储,可提供实时灵活的远程控制 and 监测。地震响应自动化实时监测云平台的加速度采集与监测系统工作示意图如图5(b)所示。

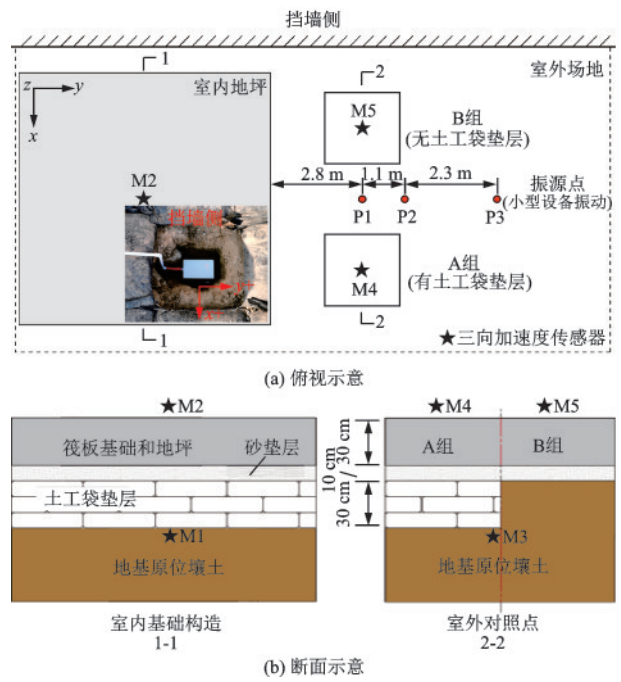


图4 监测点布置示意

Fig.4 Layout of the monitoring points



(a) 监测云平台界面



(b) 加速度采集与监测系统工作示意图

图5 地震响应自动化实时监测云平台

Fig.5 Automatic monitoring cloud platform of seismic response

2 现场原位激振试验

由于现场未发生地震,尚无实测地震波数据,实际地震条件下的隔震效果有待长期监测数据验证。本试验拟基于原位条件开展激振试验,待房屋整体结构施工完毕后,结合对照组的激振试验结果对该房屋的隔震效果进行评估。如图6所示,采用小型激振设备在房屋远处施加一个点振源P,以M3位置为基准点,振源分别设置为距室外对照组0 m、

1.1 m 和 2.3 m 三个位置(即图中标注的水平距离 L),分别对应图中的P1,P2及P3点。每次在上面三个位置分别激振持时约10 s,同时记录对应各测点的加速度响应情况,绘制加速度变化时程曲线。其中M1、M2测点因数据较小未达到传感器阈值,未连续采集,仅根据平台定时回传数据得到对应峰值加速度。



(a) 激振器

(b) 激振点位置

图6 现场激振试验

Fig.6 Field vibration test

3 分析与讨论

3.1 加速度响应过程

由于现场测试振源采用激振法产生随机振动的方法,产生的地面振动与实际地震动存在一定差异,受到现场测试条件的限制,测试精度可能受到一定影响,但总体来看,并不影响对减隔震效果的评价和判断,诸多学者也均采用该方法来初步验证隔震效果^[25]。图7分别给出了P1、P2与P3三个激振点下横向(a_x)、纵向(a_y)和竖向(a_z)的加速度时程曲线。可以看出, x,y,z 三个方向的加速度表现出相似的规律性,即随着振源与测点之间距离的增

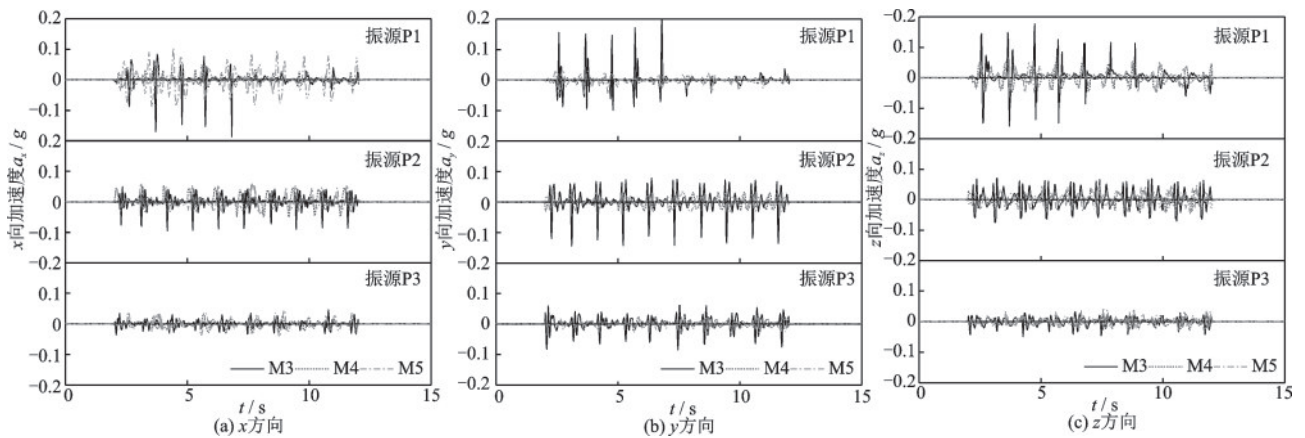


图7 三个振源点激振条件下三向加速度时程曲线

Fig.7 Time-history curves of three-directional acceleration under different excitation points

大,不同测点的加速度数值均呈现逐渐减小的变化趋势。

3.2 隔震效果评价

根据各测点的实测加速度时程曲线,对各测点的加速度峰值进行汇总,见表1~3。以布置在埋深为1.4 m处的加速度传感器M1、M3测点数据作为基准,将其余各点测得的加速度分别与对应室内外基准点测得的加速度相除,得到的系数定义为隔震系数 β (即加速度折减系数)。 β 越小,表

示减隔震效果越好。图8统计了三个测点三向(x,y,z)的峰值加速度与振源距离之间的关系,以及折减系数随振源距离的变化情况。可以看出,土工袋垫层地基结构和现场原位壤土地基结构中的峰值加速度基本均随着振源与试验点之间距离的增大而逐渐减小。并且当振源与试验点之间的距离相同时,土工袋地基结构中各向的峰值加速度均小于壤土地基结构中的峰值加速度。因此,在相同工况下,经土工袋处理过的地基结构具有良好的隔震消能效果。

表1 加速度峰值(x向)

Table 1 Peak acceleration (x)

振源	距离/m	室内测点			室外测点				
		峰值加速度/ g		折减系数	峰值加速度/ g			折减系数	
		M1	M2		M3	M4	M5	土工袋	回填土
P1	0	-0.00 089	-0.00 075	0.843	-0.18 573	+0.04 604	+0.10 395	0.248	0.560
P2	1.1	+0.00 092	-0.00 089	0.967	-0.09 477	+0.05 381	+0.06 269	0.568	0.662
P3	2.3	+0.00 076	-0.00 071	0.934	+0.04 551	-0.03 598	+0.04 515	0.791	0.992

表2 加速度峰值(y向)

Table 2 Peak acceleration (y)

振源	距离/m	室内测点			室外测点				
		峰值加速度/ g		折减系数	峰值加速度/ g			折减系数	
		M1	M2		M3	M4	M5	土工袋	回填土
P1	0	-0.00 061	-0.00 047	0.770	+0.25 225	+0.02 228	-0.05 337	0.088	0.212
P2	1.1	+0.00 073	+0.00 053	0.726	-0.14 399	-0.03 458	+0.03 560	0.240	0.247
P3	2.3	-0.00 061	+0.00 053	0.869	-0.08 505	-0.02 786	-0.03 408	0.328	0.401

表3 加速度峰值(z向)

Table 3 Peak acceleration (z)

振源	距离/m	室内测点			室外测点				
		峰值加速度/ g		折减系数	峰值加速度/ g			折减系数	
		M1	M2		M3	M4	M5	土工袋	回填土
P1	0	-0.00 139	+0.00 078	0.561	+0.17 676	+0.05 408	+0.05 797	0.306	0.328
P2	1.1	+0.00 094	-0.00 089	0.947	-0.07 411	-0.04 485	+0.04 919	0.605	0.664
P3	2.3	+0.00 111	-0.00 106	0.955	-0.04 915	-0.02 936	+0.04 537	0.597	0.923

此外,从图8中的峰值加速度折减系数与振源距离之间的关系可以发现,随着振源与试验点之间距离的不断增大,土工袋地基结构与壤土地基结构中的加速度折减系数也均表现出逐渐增大的规律,且土工袋地基结构中的各向加

速度折减系数均比壤土地基结构中的加速度折减系数要大。再次证实:采用土工袋垫层后能够很大程度上消减地震作用,土工袋垫层处理过的地基相对于未被处理时具有良好的隔震消能作用。

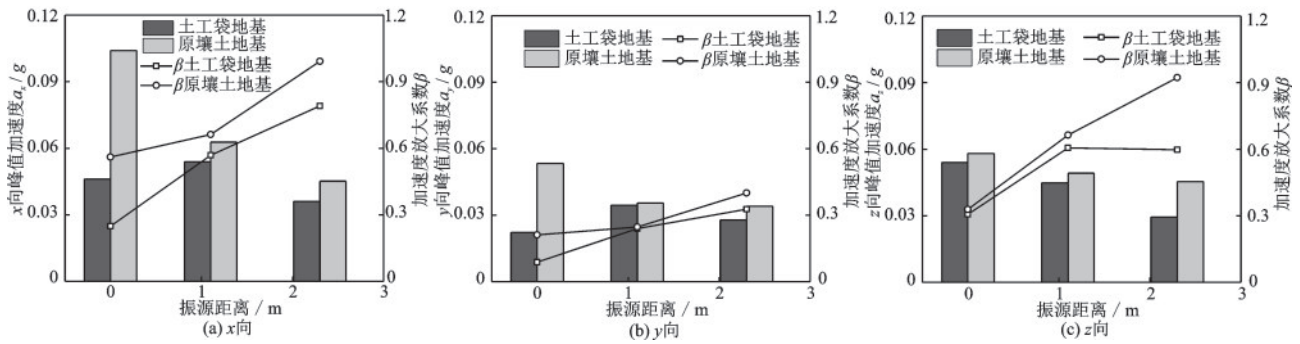


图8 峰值加速度及隔震系数对比

Fig.8 Comparison of peak acceleration and isolation coefficient

4 结论

现场激振试验结果表明经过土工袋垫层处理过的房屋地基结构具有良好的隔震消能效果,具体表现如下:

(1)当振源与试验点之间距离相同时,经过土工袋垫层处理过的地基结构的三向(x 向、 y 向、 z 向)峰值加速度均小于未被处理过的壤土地基结构的峰值加速度,说明土工袋地基结构具有一定的减振消能效果。

(2)随着振源与试验点之间距离的不断增大,土工袋地基结构中三向峰值加速度的折减系数均小于壤土地基结构,表明经过土工袋垫层处理过的房屋地基结构始终要比原地基结构的减隔震消能效果好。

因此,采用土工袋垫层这种新型隔震技术,使得普通农村民居的建造成本基本不增加,且有望在实际地震来临之时保障民居免遭严重损失。

参考文献:

[1] 徐忠根,周福霖.我国首栋橡胶垫隔震住宅楼动力分析[J].世界地震工程,1996,(1):38-42.
Xu Z G, Zhou F L. Dynamic analysis of the first rubber bearing isolated dwelling of our country[J]. World Earthquake Engineering, 1996, (1): 38-42. (in Chinese)

[2] 唐家祥,李黎,李英杰,等.叠层橡胶基础隔震房屋结构设计与研究[J].建筑结构学报,1996,17(2):37-47,79.
Tang J X, Li L, Li Y J, et al. Design and research of base-isolated building with laminated rubber bearings[J]. Journal of Building Structures, 1996, 17(2): 37-47,79. (in Chinese)

[3] 朱宏平,谭平,叶昆.极罕遇地震作用下铅芯橡胶隔震支座基础隔震结构抗震性能研究[J].建筑结构学报,2019,40(10):122-131.
Zhu H P, Tan P, Ye K. Investigation of seismic performance of LRB base-isolated structures subjected to extremely rare earthquakes[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(10): 122-131. (in Chinese)

[4] Kelly J M, Konstantinidis D A. Mechanics of rubber bearings for seismic and vibration isolation[M]. West Sussex: John Wiley & Sons, 2011.

[5] Murota N, Suzuki S, Mori T, et al. Performance of high-damping rubber bearings for seismic isolation of residential buildings in Turkey[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 143(6): 106620.

[6] 李立.建筑物的滑动隔震-隔震技术的研究与应用[M].北京:地震出版社,1991:50-68.
Li L. Research and application of sliding isolation technology of building[M]. Beijing: Earthquake Publishing House, 1991: 50-68. (in Chinese)

[7] 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 Y M, Liu X L, Zhao S W, et al. An experimental study of isolating properties of sand cushion[J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(1): 125-128. (in Chinese)

[8] Patil S J, Reddy G R, Shivshankar R, et al. Seismic base isolation for structures using river sand[J]. Earthquakes and Structures, 2016, 10(4): 829-847.

[9] 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 H F, Yin Z Y, Jing L P, 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 Vibration, 2021, 41(6): 222-230. (in Chinese)

- [10] 徐文杰, 袁康, 李英民, 等. 砂垫层隔震村镇建筑抗震性能振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(18): 132-139.
Xu W J, Yuan K, Li Y M, et al. Shaking table tests on the seismic performances of rural buildings with isolated sand cushion[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(18): 132-139. (in Chinese)
- [11] Dhanya J S, Boominathan A, Banerjee S. Performance of geo-base isolation system with geogrid reinforcement [J]. International Journal of Geomechanics, 2019, 19(7): 04019073.
- [12] Matsuoka H, Liu S H. A new earth reinforcement method using soilbags[M]. Balkema: Taylor & Francis, 2005.
- [13] 方斌昕, 刘斯宏, 鲁洋, 等. 土工袋竖向承载及循环压缩特性试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(1): 210-218.
Fang B X, Liu S H, Lu Y, et al. Experimental study of bearing and vertically cyclic compression behaviors of soilbags[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023, 58(1): 210-218. (in Chinese)
- [14] 李玲君, 刘斯宏, 徐小东, 等. 袋内材料对土工袋动力特性参数影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 131-136, 142.
Li L J, Liu S H, Xu X D, et al. Experimental study of effects of soil fills on dynamic characteristics parameters of soil-bags[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(1): 131-136, 142. (in Chinese)
- [15] Liu S H, Gao J J, Wang Y Q, et al. Experimental study on vibration reduction by using soilbags[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2014, 42(1): 52-62.
- [16] Liu S H, Jia F, Chen X L, et al. Experimental study on seismic response of soilbags-built retaining wall[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2020, 48(5): 603-613.
- [17] 陈爽, 贾凡, 刘斯宏, 等. 错缝堆叠土工袋层间界面的循环剪切特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(增1): 2945-2953.
Chen S, Jia F, Liu S H, et al. Experiments on the cyclic shear behavior of the interface between staggered stacking soilbags[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(Sup1): 2945-2953. (in Chinese)
- [18] 王柳江, 刘斯宏, 赵志杰, 等. 土工袋界面动力特性的循环直剪试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(6): 1625-1634.
Wang L J, Liu S H, Zhao Z J, et al. Experimental study on dynamic behaviour for soilbag interface using cyclic direct shearing test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(6): 1625-1634. (in Chinese)
- [19] 刘斯宏, 贾凡, 陈笑林, 等. 土工袋挡墙振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(增2): 4338-4347.
Liu S H, Jia F, Chen X L, et al. Shaking table model test on a retaining wall of soilbags[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(Sup2): 4338-4347. (in Chinese)
- [20] 刘斯宏, 高军军, 王艳巧. 土工袋减振隔振机制分析及试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 325-332.
Liu S H, Gao J J, Wang Y Q. Mechanism analysis and experimental study of vibration reduction and isolation effect of geotextile bag[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(2): 325-332. (in Chinese)
- [21] 刘斯宏, 高军军, 王子健, 等. 土工袋技术在市政沟槽回填中的应用研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 765-771.
Liu S H, Gao J J, Wang Z J, et al. Application of soilbags to urban trench backfill[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 765-771. (in Chinese)
- [22] Sheng T, Bian X C, Liu G B, et al. Experimental study on the sandbag isolator of buildings for subway induced vertical vibration and secondary air-borne noise[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2020, 48(4), 504-515.
- [23] Ding G Y, Wu J L, Wang J, et al. Experimental study on vibration reduction by using soilbag cushions under traffic loads[J]. Geosynthetics International, 2018, 25(3): 322-333.
- [24] 陈爽, 鲁洋, 刘斯宏, 等. 土工袋单元体的循环剪切特性试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(2): 98-104.
Chen S, Lu Y, Liu S H, et al. Experimental study on the cyclic shear characteristics of single soilbag[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(2): 98-104. (in Chinese)
- [25] 尚守平, 周浩, 朱博闻, 等. 钢筋沥青隔震层实际工程应用与推广[J]. 土木工程学报, 2013, 46(增2): 7-12.
Shang S P, Zhou H, Zhu B W, et al. Application and promotion of reinforced-asphalt seismic isolation layer[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(Sup2): 7-12. (in Chinese)

(本文编辑:周小潭)