

土工袋挡土墙动力特性影响因素试验

李玲君¹, 刘斯宏², 徐小东², 张雨灼²

(1. 江苏省交通规划设计院股份有限公司, 江苏 南京 210014; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了解土工袋挡土墙这一新型柔性挡土墙的动力特性, 通过小型振动台模型试验, 研究了地震三要素(输入加速度、振动频率、振动持续时间)以及土工袋大小对以天然河砂为填料的土工袋挡土墙动力特性的影响, 分析了水平位移、动土压力以及加速度的变化规律。试验结果表明, 输入加速度越大, 振动频率越低, 土工袋挡土墙位移与动土压力系数越大, 加速度响应则随着输入加速度和振动频率的增大而增大, 而振动持续时间对土工袋挡土墙的动力特性影响不大; 与普通大小的土工袋相比, 由大土工袋构筑的挡土墙抗震性能略差, 但施工方便快捷, 效率较高, 可应用于抗震要求较低的地区或者工期较紧的工程。

关键词: 土工袋挡土墙; 动力特性; 地震加速度; 振动频率; 动力持时; 振动台模型试验

中图分类号: TU476⁺.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2015)06-0041-06

Tests on factors of dynamic characteristics of retaining walls constructed with soilbags//LI Lingjun¹, LIU Sihong², XU Xiaodong², ZHANG Yuzhuo² (1. Jiangsu Province Communications Planning and Design Institute Limited Company, Nanjing 210014, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to understand dynamic characteristics of the new-type flexible retaining walls constructed with soilbags, small-scale shaking table model tests were conducted on retaining walls constructed with soilbags filled with natural sands. The effects of three elements of earthquakes, input accelerations, vibration frequencies, and vibration durations, as well as the size of soilbags, on the retaining walls were investigated, and change patters of horizontal displacements, dynamic earth pressures, and accelerations were analyzed. The results show that displacements of retaining walls and pressure coefficients of dynamic earth increase with the increase of input accelerations and the decrease of vibration frequencies, while the acceleration response increases with the increase of both input accelerations and vibration frequencies. However, the effects of vibration durations on dynamic characteristics are relatively small. In addition, compared with retaining walls constructed with normal-size soilbags, the seismic performance of retaining walls constructed with larger bags is slightly poorer. However, larger soilbags can be used in areas with lower seismic requirements or projects with tight schedules because of their ease of construction and high efficiency.

Key words: retaining walls constructed with soilbags; dynamic characteristic; earthquake acceleration; vibration frequency; power duration; shaking table model test

挡土墙作为防止土体坍塌的永久或临时性建筑物,广泛应用于土木建筑、水利水电、铁道桥梁交通、水土保持和矿山坑道等工程建设中。常见的挡土墙主要有两类:一类是以混凝土或浆砌石为主要材料的重力式、悬臂式等传统刚性挡土墙,该类挡土墙形式简单、施工方便,但在受到地震荷载作用时,墙体既不能转动,也不能产生相对墙后土体的位移,较易发生破坏^[1-2];另一类是采用土工合成材料的加筋土挡土墙,该类挡土墙具有一定的柔性和变形适应能

力,在一定范围内可承受较大的地基变形,其良好的抗震性能在近几年的多次大型地震中得到了较好的验证^[3]。

近年来,许多学者致力于加筋土柔性挡土墙的研究,尤其是加筋土挡土墙抗震性能的研究,如 El-Eman 等^[4-10]开展了一系列加筋土挡土墙振动台和离心模型试验,实测了振动作用下加筋土挡土墙的动力响应;刘华北等^[11-12]使用有限元方法建立了数值模拟模型,理论分析了筋材的长度、性质、布置形

基金项目:国家自然科学基金(51379066);江苏高校优势学科建设工程项目(YS11001)

作者简介:李玲君(1990—),女,江苏南京人,硕士,主要从事土石坝工程、基础减振隔震研究。E-mail:798478638@qq.com

通信作者:刘斯宏(1964—),男,浙江江山人,教授,主要从事土石坝工程、岩土工程等研究。E-mail:sihongliu@hhu.edu.cn

式以及回填土的密实度和挡土墙尺寸等对加筋土挡土墙动力响应特性的影响。目前,加筋土技术日趋成熟,对加筋土挡土墙的受力与变形的影响研究较为深入,其在工程建设中的应用日益广泛。刘斯宏等^[13-20]对土工袋增强机理、工程特性等进行了研究,结果表明,土工袋利用袋子的张力以提高袋内土体的强度,对土体而言是一种加筋,因而可将土工袋直接应用于构筑挡土墙。土工袋挡土墙作为一种新型的加筋土挡土墙结构,不仅具有常规加筋土挡土墙的优势,如造价低廉、施工方便、地基适应性好,同时具有一定的柔性,在墙后土压力作用下能够产生一定的变形,可有效地减小墙后土压力,有利于挡土墙的稳定。目前,日本已有若干土工袋挡土墙的工程实例^[15],国内也有所应用,如湖南邵阳修建了一座5级袋装碎石重力式挡土墙(每级高4.5 m)^[21-22]。但总的来说土工袋柔性挡土墙作为一种新型的结构形式,其应用尚属于起步阶段,人们对其动力特性鲜有研究。

本文通过土工袋柔性挡土墙小型振动台试验,研究地震三要素即输入加速度、振动频率、振动持续时间(动力持时),以及土工袋大小对土工袋柔性挡土墙动力特性的影响,从水平位移、动土压力以及水平加速度三方面分析土工袋挡土墙的抗震性能。

1 试验设计

1.1 试验装置

试验在DY-600-5电动式小型振动台上进行,振动台主要由信号发生器、功率放大器、激励电源、振动台体和测量与控制系统5个部分组成,最大负载3 kN,最大加速度 490 m/s^2 ,最大速度 1 m/s ,最大位移 51 mm 。采集系统选用东华测试DH5922系列的动态信号测试分析装置(16通道),系统不确定度小于或等于0.3%,放大器频率响应范围为 $0\sim 100\text{ kHz}$ 。

1.2 模型设计及数据采集

试验所采用的刚性模型箱尺寸为 $120\text{ cm}\times 45\text{ cm}\times 50\text{ cm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),由钢板、有机玻璃、角钢等焊接

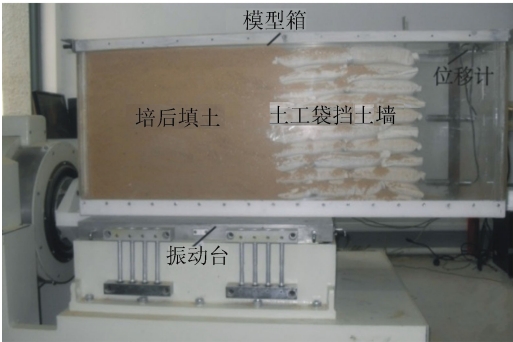


图1 模型试验装置

而成,底面用螺栓固定于振动台台面上,如图1所示。模型箱底面采用5 mm厚的钢板,四面采用厚度为10 mm的钢化有机玻璃,以观察挡土墙的破坏形式。模型箱底部铺设3 mm厚的聚氯乙烯泡沫板以防波的反射干扰,并在泡沫板表面设置1层砂纸以减小挡土墙与底板间的滑动;在与挡土墙相反的一端侧壁设置厚10 mm的海绵垫,以减少边界条件对变形产生的影响;在模型箱长度方向两侧壁的内表面涂上1层润滑硅脂,并覆盖1层塑料薄膜,以减小模型箱两侧壁的摩擦影响。

土工袋挡土墙长45 cm、宽40 cm、高45 cm,由2种规格($20\text{ cm}\times 20\text{ cm}\times 4.5\text{ cm}$ 和 $20\text{ cm}\times 10\text{ cm}\times 4.5\text{ cm}$)的土工袋交错布置、垂直堆放而成(共10层)。土工袋原材料为聚丙烯(PP),每平方米质量为70 g,经、纬向拉伸强度分别为 11.6 kN/m 与 5.2 kN/m ,经、纬向伸长率均小于25%。土工袋内土体与墙后填土均为某一天然河砂,内摩擦角为 35.4° ,黏聚力为 3.25 kPa ,含水率为3.26%,密度为 1.75 g/cm^3 。

试验中采集的数据包括:挡土墙水平位移、动土压力、加速度,其模型布置见图2。具体布置情况如下:①沿挡土墙外侧高度方向布置3个拉线式位移计(精度 0.01 mm ,最大量程 25 mm)。②在土工袋挡土墙墙后沿高度方向布置5个应变式动土压力计(直径 25 mm ,高度 8 mm ,灵敏度 $2.0\sim 1.0\text{ mV/V}$,量程 50 kPa),以测试水平动土压力值。试验时用双面胶将动土压力计竖直固定在土工袋的侧面,使得受力面保持竖直。③在墙后填土中沿高度方向布置5个DH201-100压阻式加速度计(电荷灵敏度 $0.03\sim 0.06\text{ mV/ms}^2$,安装谐振频率 $0\sim 3\text{ kHz}$,使用频率 $0\sim 1.5\text{ kHz}$,工作温度 $-20\sim 80^\circ\text{C}$,质量约为 2 g ,最大量程为 1000 m/s^2)。为减小测试误差,将加速度计用玻璃胶固定在一个方盒中,实现加速度计与周边土体协同运动。④在振动台台面固定一个加速度计以量测振动台输入加速度(振源加速度)。

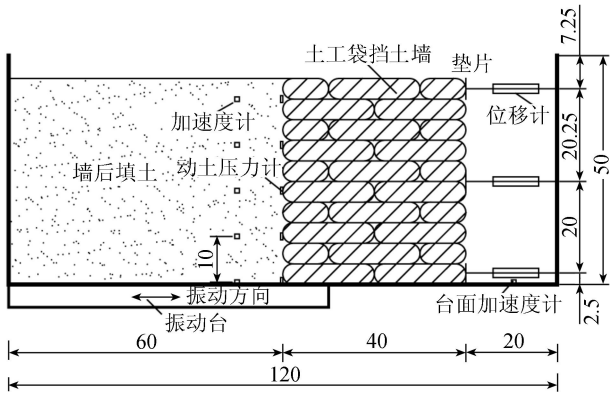


图2 模型布置示意图(单位:cm)

1.3 装样过程

首先,在模型箱内构筑土工袋挡土墙(土工袋上下层交错排列,每铺设1层,用小型平板碾压实1次,压实密度约为 1.75 g/cm^3);模型挡土墙构筑完成后,采用与土工袋袋内填充材料相同的天然河砂进行墙后回填,分层填筑、分层压实。分层的高度与量测仪器(动土压力计及加速度计)埋设高度一致,填土的压实密度为 1.75 g/cm^3 。河砂填至挡土墙高度后,将位移计、动土压力计和加速度计数据清零,以消除埋设过程的影响。

1.4 加载工况

地震时地面水平向运动加速度一般比竖向运动加速度大,而结构物抵抗竖向荷载的能力通常比抵抗侧向变形的能力强,因此,很多情况下,主要是考虑水平向地震作用的影响,本试验也仅考虑水平向的振动作用。由于本试验使用的小型电动振动台无法模拟实际的地震波,故试验采用正弦波形,台面振动时程曲线见图3,进行不同输入加速度峰值($0.1\text{ g}\sim 0.4\text{ g}$)、振动频率($6\sim 12\text{ Hz}$)以及动力持时($1\sim 50\text{ s}$)的振动台试验。

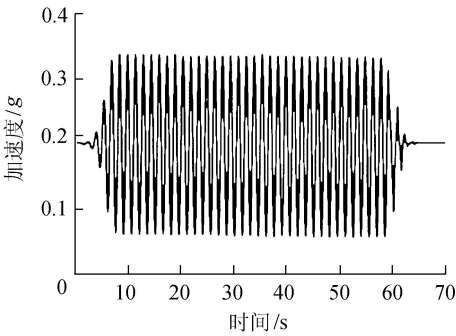


图3 输入振动波时程曲线

为了研究土工袋大小对挡土墙动力特性的影响,进行了相同条件下大土工袋挡土墙的振动台试验。大土工袋挡土墙断面尺寸与普通土工袋挡土墙断面尺寸相同,均为 $45\text{ cm}\times 40\text{ cm}\times 45\text{ cm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),由 $40\text{ cm}\times 40\text{ cm}\times 11\text{ cm}$ 的土工袋垂直堆放而成(共4层)。

2 试验结果及分析

挡土墙的动力响应包括位移、动土压力、动应变、速度和加速度响应等,其中位移、动土压力和加速度响应及其分布规律是评价挡土墙地震动力特性的基本资料。挡土墙在地震作用下发生背离墙后填土方向的位移,此时挡土墙所受土压力将减小。在试验开始前先对动土压力计测量值进行归零处理,试验中测得的土压力值为振动引起的土压力值的增量,称为动土压力。动土压力与挡土墙的变形及测点在挡土墙内的埋深有关,为了更好地说明动土压力沿墙高的变化,定义动土压力系数为动土压力与该测点静土压力的比值。加速度响应以加速度放大倍数来表示,即各高程测点振动加速度最大值相对于输入加速度的比值。

2.1 输入加速度的影响

图4为振动频率 6 Hz 、动力持时 50 s 时,不同输入加速度情况下土工袋挡土墙外侧水平位移、动土压力系数及加速度放大倍数沿墙高的分布。由图4可知:①在水平振动下,挡土墙的水平位移顶部大、底部小,类似于悬臂梁的水平晃动。这是由于输入加速度沿墙高有放大效应,因此,挡土墙水平位移最大值出现在墙体顶部,而墙趾处外凸变形受到基础限制增长缓慢,远小于挡土墙顶部的水平位移。②随着输入加速度的增大,振动的强度越来越大,土工袋挡土墙的水平位移也逐渐增大。当输入加速度不大于 0.2 g 时,土工袋挡土墙位移较小,墙体顶部水平位移不到 0.5 mm ;当输入加速度增大至 0.3 g 时,土工袋挡土墙水平位移增大至 2.2 mm ,墙趾处位移依然不到 1 mm ;随着输入加速度继续增大,位移增长幅度越来越大,当输入加速度为 0.4 g 时,挡土墙顶部位移迅速增大至 9.3 mm ,而挡土墙墙趾处位移仅约为 1 mm 。③墙后动土压力系数分布总体上与挡土墙的位移分布一致,即顶部大、底部小,且

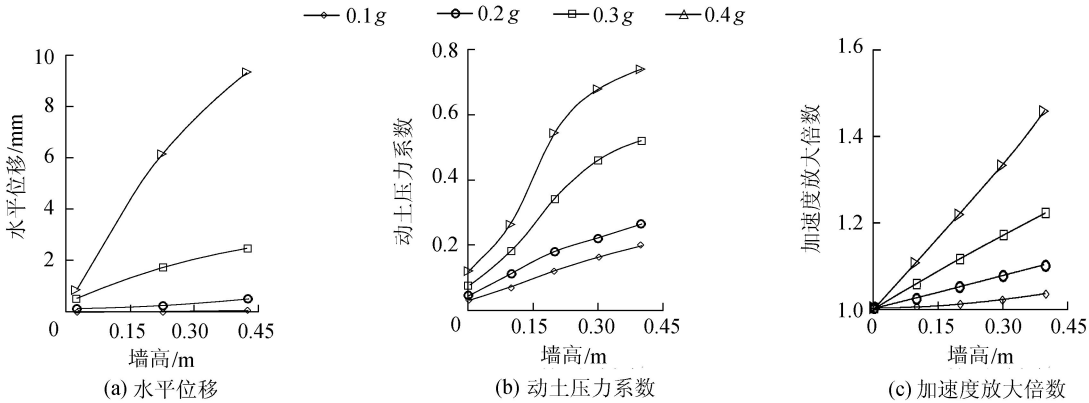


图4 不同输入加速度下挡土墙的动力响应

动土压力系数随着输入加速度的增大而增大,其原因因为挡土墙上部变形较大,填土松动,动土压力系数相应较大,而挡土墙下部位移较小,动土压力系数增长较慢。④加速度放大倍数随着墙高和输入加速度的增大而增大。台面输入的振动波沿挡土墙向上传播时,经过反射、折射与叠加作用,使加速度响应在墙顶显著增大。

2.2 振动频率的影响

图5为输入加速度0.3g、动力持时50s时,不同的振动频率情况下土工袋挡土墙水平位移、动土压力系数及加速度放大倍数沿墙高的分布。可见:①土工袋挡土墙的水平位移随着振动频率的增大而减小,且频率对挡土墙中上部水平位移影响较显著,对墙趾处位移影响不大。当输入的振动频率较低时,振动台来回振动的幅度相对较大,使得墙体发生较大的变形,而随着振动频率的增大,振幅逐渐减小,挡土墙的水平位移也随之减小。当振动频率为6Hz时挡土墙顶部水平位移达2.5mm,是频率为12Hz时的3倍。②动土压力系数分布总体上与土工袋挡土墙的位移分布相对应,随着频率的增大而减小。其理由为土工袋挡土墙的水平位移在振动频率低时较显著,填土也更为松动,导致动土压力系数相应较大,例如振动频率为6Hz时,挡土墙顶部动土压力系数达0.52,约为频率为12Hz时的2倍。③土工袋挡土墙的加速度放大倍数随着振动频率的增大而增大。振动频率较高时,加速度放大倍数增长趋势显著,越接近墙顶处,加速度放大倍数差距越明显,振动频率为12Hz时,挡土墙顶部加速度放大倍数达1.7,而振动频率6Hz时,挡土墙顶部加速度放大倍数不足1.2。

2.3 动力持时的影响

地震动力持时是影响结构破坏的重要参数,为了研究该参数对土工袋挡土墙动力特性的影响,对模型底部输入水平加速度为0.3g、周期为1s的正

弦波,观测土工袋挡土墙顶部水平位移、加速度放大倍数与动力持时的关系,见图6。可见,动力持时对土工袋挡土墙的影响主要集中于振动初期,振动开始的10s内土工袋挡土墙顶部位移急剧增大至2.2mm,此后挡土墙顶部水平位移增长较小,维持在2.5mm左右,加速度放大倍数也呈现相同的趋势。这也反映出在振动过程中随着地震动能量的增加,挡土墙损伤在不断地累积,振动结束后墙顶位移并没有减小,表明位移为永久性位移。

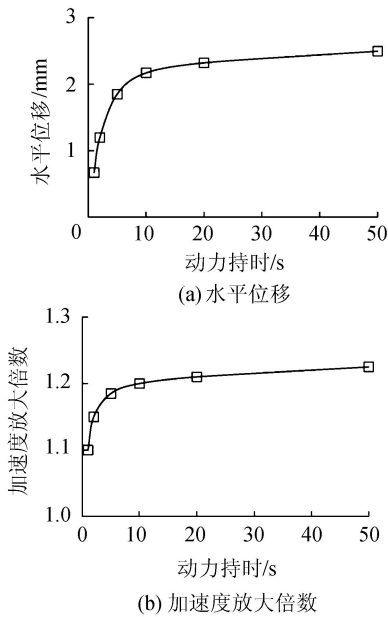


图6 挡土墙顶部水平位移及加速度放大倍数的时程分布曲线

2.4 土工袋大小的影响

图7为振动频率6Hz,动力持时50s时,不同输入加速度情况下,由两种不同尺寸的土工袋构筑的挡土墙水平位移沿墙高的分布。可见,不同输入加速度下,普通土工袋构筑的挡土墙水平位移均小于大土工袋挡土墙。当输入加速度不大于0.2g时,两种挡土墙的水平位移均不超过1.2mm,大土工袋挡土墙略大些;随着输入加速度增大至0.3g,两种挡

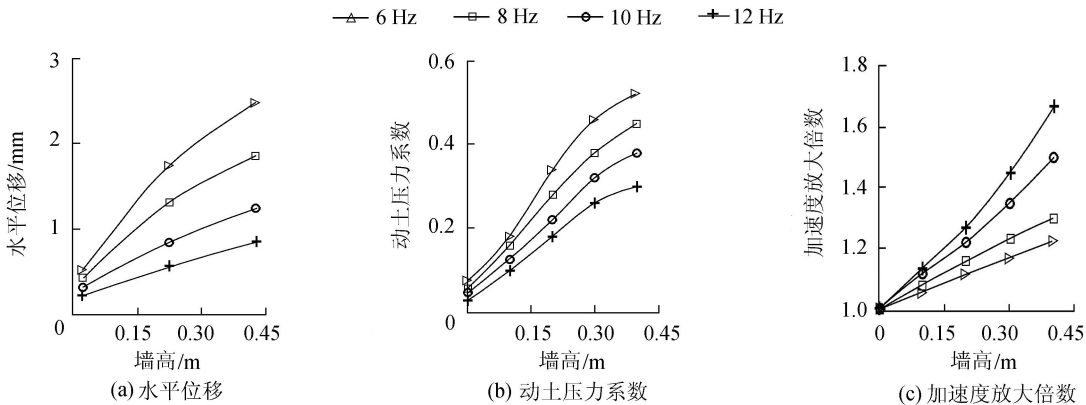


图5 不同振动频率下挡土墙的动力响应

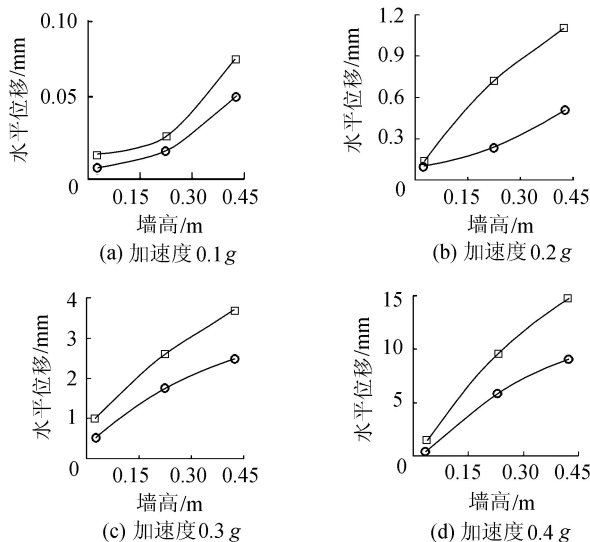


图7 不同输入加速度下两种挡土墙外侧水平位移沿墙高的分布

土墙的位移逐步增大,大土工袋挡土墙顶部水平位移达 3.8 mm,而普通土工袋挡土墙位移不足 2.5 mm;当输入加速度达 0.4g 时,大土工袋挡土墙中上部位移过大,顶部土工袋开始滑落,出现局部倒塌,而此时普通土工袋挡土墙顶部位移不足 10 mm,仍然维持稳定。两种挡土墙的动土压力系数与加速度放大倍数沿墙高的分布规律与水平位移类似,均是土工袋构筑的挡土墙动土压力系数与加速度放大倍数比普通土工袋挡土墙大。因此,与土工袋构筑的挡土墙相比,普通土工袋挡土墙抗震性能更好,主要由于以下原因:①普通土工袋挡土墙袋与袋之间、层与层之间的联结作用比土工袋挡土墙更紧密;②普通土工袋本身由袋发生拉伸与收缩变形而引起的能量耗散,以及由袋内土颗粒之间的摩擦错动而引起的能量耗散比土工袋更多;③普通土工袋挡土墙袋与袋之间的空隙允许土工袋在水平向振动作用下发生小幅度的变形滑移。虽然土工袋挡土墙抗震性能略差,但是其施工简便快捷,效率较高,可以用于抗震要求较低的地区或者工期较紧的工程。

3 结 论

a. 输入加速度越大,振动频率越低,土工袋挡土墙中上部变形越显著,而挡土墙底部变形受输入加速度和频率的影响较小。动力持时对土工袋挡土墙的动力特性影响不大。

b. 与普通土工袋相比,采用土工袋构筑的挡土墙抗震性能略差,但其施工简便,效率较高,可以用于抗震要求较低的地区或者工期较紧的工程。

参考文献:

- [1] 张建经,韩鹏飞.重力式挡土墙基于位移的抗震设计方法研究:大型振动台模型试验研究[J].岩土工程学报,2012,34(3):416-423. (ZHANG Jianjing, HAN Pengfei. Displacement-based aseismic design method for gravity retaining walls: large scale shaking table tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(3): 416-423. (in Chinese))
- [2] 朱宏伟,姚令侃,蒋良潍.考虑变形影响的重力式挡土墙地震土压力分布[J].岩土工程学报,2013,35(6):1035-1044. (ZHU Hongwei, YAO Lingkan, JIANG Liangwei. Distribution of seismic earth pressure on gravity retaining walls considering influence of deformation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6): 1035-1044. (in Chinese))
- [3] TATSUOTA F, TATEYAMA M, KOSEKI J. Behavior of geogrid-reinforced soil retaining walls during the Great Hachinohe Earthquake [C]//Proceedings of 1st International Symposium on Geotechnical Earthquake Engineering. Lewistown: ASCE, 1995: 55-60.
- [4] EL-EMAN M M, BATHURSTR J. Experimental design, instrumentation and interpretation of reinforced soil wall response using a shaking table[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2004, 4(4): 13-32.
- [5] EL-EMAN M M, BATHURSTR J. Influence of reinforcement parameters on the seismic response of reduced-scale reinforced soil retaining walls [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2007, 25(1): 33-49.
- [6] LING H I, LIU H, MOHRI Y. Parametric studies on the behavior of reinforced soil retaining walls under earthquake loading [J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2005, 131(10): 1056-1065.
- [7] LING H I, MOHRI Y, LESHCHINSKY D, et al. Large-scale shaking table tests on modular-block reinforced-soil retaining walls [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2005, 131(4): 465-476.
- [8] 杨果林,李海深,王永和.加筋土挡土墙动力特性模型试验与动力分析[J].土木工程学报,2003,36(6):105-110. (YANG Guolin, LI Haishen, WANG Yonghe. Model test on reinforced earth retaining wall under cyclic loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(6): 105-110. (in Chinese))
- [9] 李海深,杨果林,邹银生.加筋土挡土墙动力特性分析[J].中国公路学报,2004,17(2):28-32. (LI Haishen, YANG Guolin, ZOU Yinsheng. Analysis of dynamic character of reinforced earth retaining wall [J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(2): 28-32. (in Chinese))

- [10] 王祥,周顺华,顾湘生,等.路堤式加筋土挡土墙的试验研究[J].土木工程学报,2005,38(10):119-128. (WANG Xiang, ZHOU Shunhua, GU Xiangsheng, et al. An experimental study on the reinforced retaining wall for embankment[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(10):119-128. (in Chinese))
- [11] 刘华北.水平与竖向地震作用下土工格栅加筋土挡土墙动力分析[J].岩土工程学报,2006,28(5):594-599. (LIU Huabei. Analysis on seismic behavior of geogrid-reinforced retaining wall subjected to horizontal and vertical excitations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(5):594-599. (in Chinese))
- [12] 程火焰,周亦唐,钟国强.加筋土挡土墙地震动力特性研究[J].公路交通科技,2004,21(9):16-20. (CHENG Huoyan, ZHOU Yitang, ZHONG Guoqiang. Study on the seismic properties of the reinforced soil retaining wall[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(9):16-20. (in Chinese))
- [13] 刘斯宏,松冈元.土工袋加固地基新技术[J].岩土力学,2007,28(8):1665-1670. (LIU Sihong, MATSUOKA H. A new earth reinforcement method by soilbags[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8):1665-1670. (in Chinese))
- [14] MATSUOKA H, LIU Sihong. A new earth reinforcement method using soilbags [M]. London: Taylor & Francis Group, 2006.
- [15] 刘斯宏,汪易森.土工袋技术及其应用前景[J].水利学报,2007,38(增刊1):644-648. (LIU Sihong, WANG Yishen. Reinforcement mechanism of soilbags and its applications[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(Sup1):644-648. (in Chinese))
- [16] 刘斯宏,白福青,汪易森.膨胀土土工袋浸水变形及强度特性试验研究[J].南水北调与水利科技,2009,7(6):54-58. (LIU Sihong, BAI Fuqing, WANG Yishen. Experimental study on wetting induced deformation and strength characteristics of soilbag filled with expansive soil [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(6):54-58. (in Chinese))
- [17] 刘斯宏,汪易森.岩土新技术在南水北调工程中的应用研究[J].水利水电技术,2009,40(8):61-66. (LIU Sihong, WANG Yishen. Application of new geotechnologies to South-to-North Water Diversion Project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(8):61-66. (in Chinese))
- [18] 刘斯宏,王柳江,李卓.土工袋加固软土地基现场荷载试验的数值模拟[J].水利水电科技进展,2012,32(1):78-82. (LIU Sihong, WANG Liujiang, LI Zhuo. Numerical simulation of in-situ loading tests on a soilbag-reinforced soft foundation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(1):78-82. (in Chinese))
- [19] 刘斯宏,王艳巧,金远征.土工袋基础减隔震试验[J].水利水电科技进展,2012,32(1):87-90. (LIU Sihong, WANG Yanqiao, JIN Yuanzheng. Experimental study on vibration reduction and isolation of bases with soilbag [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(1):87-90. (in Chinese))
- [20] 高军军,刘斯宏,王柳江.竖向荷载作用下土工袋的有限元数值模拟[J].河海大学学报:自然科学版,2014,42(6):524-528. (GAO Junjun, LIU Sihong, WANG Liujiang. Numerical simulation of a soilbag under vertical loads by FEM [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2014, 42(6):524-528. (in Chinese))
- [21] 马石城,张勋武,李锋.袋装水泥土材料的力学性能试验研究[J].湘潭大学自然科学学报,2007,29(3):97-102. (MA Shicheng, ZHANG Xunwu, LI Feng. Experimental study of mechanical properties of sacked cemented-soil [J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2007, 29(3):97-102. (in Chinese))
- [22] 孙见松.一种袋装碎石重力式挡土墙的设计理论与应用研究[D].湘潭:湘潭大学,2011. (收稿日期:2014-07-24 编辑:骆超)

+++++
(上接第30页)

- [12] 贾国珍,余俊华,王涛,等.淹没丁坝坝后水流结构 PIV 试验研究[J].水电能源科学,2012,30(3):84-86. (JIA Guozhen, SHE Junhua, WANG Tao, et al. PIV measurement of flow structure behind submerged spur dike [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(3):84-86. (in Chinese))
- [13] WEITBRECHT V. Influence of dead-water zones on the dispersive mass transport in rivers [D]. Karlsruhe: Karlsruhe Institute of Technology, 2004
- [14] 乐培九,李旺生,杨细根.丁坝回流长度[J].水道港口, 1999(2):3-9. (YUE Peijiu, LI Wangsheng, YANG Xigen. Length of whirlpool behind dikes [J]. Journal of Water and Harbor, 1999(2):3-9. (in Chinese))
- [15] 白静,方红卫,何国建.非淹没丁坝绕流的三维大涡模拟研究[J].力学学报,2013,45(2):151-157. (BAI Jing, FANG Hongwei, HE Guojian. Study of non-submerged groin turbulence flow in a shallow open channel by LES [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2013, 45(2):151-157. (in Chinese)) (收稿日期:2014-09-04 编辑:熊水斌)