

土工袋柔性挡土墙模型试验研究

薛向华, 刘斯宏, 樊科伟, 杨明山, 马超

(河海大学 水利水电学院, 南京 210098)

摘要: 使用土工袋构筑而成的挡土墙具有一定的柔性, 可以通过一定的变形, 有效地减小墙后土压力, 增加挡土墙的安全性。土压力大小与墙体的变位模式有着密切关系, 且是进行挡土结构物断面设计和稳定验算的重要荷载。通过对土工袋柔性挡土墙模型的设计和试验观测, 发现: 墙体的位移模式和墙后填土的破坏模式是由平动和转动两种模式组成的; 土工袋柔性挡土墙模型的土压力竖向分布接近库伦主动土压力; 土压力沿水平方向的传递规律为由内到外递减。最后, 根据试验结果分析解释了土压力削减的原因, 并建立了相应的力平衡关系式。

关键词: 土工袋; 柔性挡土墙; 模型试验; 位移模式; 破坏模式; 土压力

中图分类号: TU472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)03-0081-04

Model Test on Retaining Wall Constructed with Soilbags

XU E Xiang hua, LIU Si hong, FAN Ke wei, YANG Ming shan, MA Chao

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

Abstract: The retaining wall composed of soil bag has certain flexibility and can have lateral distortion under the pressure, which can reduce the pressure effectively and increase the safety of retaining wall. Earth pressure is an important load for the section design and stability check of retaining structures, and it is directly relevant to the wall displacement mode. A model test was performed on a retaining wall constructed with soilbags, which showed that (1) the deformation mode of the wall and the failure mode of the backfill soil are composed of translational and rotary modes; (2) The vertical distribution of earth pressure of the retaining wall composed of soilbags is close to Coulomb active earth pressure; and (3) the earth pressure decreases from the inside out along the horizontal direction. A force balance equation was established to explain the horizontal decreasing of the earth pressures within the retaining wall.

Key words: soilbag; flexible retaining wall; model test; deformation mode; failure mode; earth pressure

近年来, Matsuoka 与刘斯宏等^[1-6]对土工袋的增强机理、工程特性和设计方法等进行了深入的研究, 对土工袋的性能(袋子材料、尺寸大小、强度表示、质量指标等)进行了标准化, 并将土工袋技术应用于房屋地基加固、堤防建设、路基加固、膨胀土边坡处理及构筑挡墙等工程领域。用土工袋构筑而成的挡墙具有一定的柔性, 在墙后土压力作用下, 墙体能够发生一定的变形, 可有效地减小墙后土压力, 大大增加挡土墙的安全性。土压力是进行挡土结构物断面设计和稳定验算的重要荷载, 其大小和分布规律不仅受挡土墙变位量大小影响, 还与墙体的变位模式有着密切关系^[7-10]。

目前, 有关土工袋柔性挡土墙的相关研究还处于初步探索阶段。本文设计了一个土工袋柔性挡土墙模型试验, 用于研究土工袋挡土墙墙后填土的破坏模式及墙后

土压力的竖向分布与在墙体内沿水平方向的传递规律, 为进一步深入研究土工袋柔性挡土墙的结构特性和设计提供参考。

1 模型试验概况

试验在一个透明的有机玻璃制作而成的模型箱内进行, 模型箱内部尺寸为 180 cm × 80 cm × 100 cm (长 × 宽 × 高), 如图 1 所示。土工袋柔性挡土墙宽 60 cm, 高 80 cm, 由两种规格(20 cm × 20 cm × 5 cm 和 20 cm × 10 cm × 5 cm)的土工袋交错布置、垂直堆放而成。土工袋为 70 g/m² 的聚丙烯(PP)编织袋。拉力试验测试得到的经、纬向拉力强度分别为 11.6 kN/m 与 5.2 kN/m, 其经纬向伸长率小于 25%。编织袋内土体与墙后填土均为某一天然河砂, 其物理力学参数

收稿日期: 2013-12-02 修回日期: 2014-03-21 网络出版时间: 2014-05-08

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.03.018.html>

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

作者简介: 薛向华(1987-), 男, 河南安阳人, 硕士研究生, 主要从事土工袋技术及挡土墙、土石坝研究。E-mail: xxianghua@126.com

通讯作者: 刘斯宏(1964-), 男, 浙江江山人, 教授, 博士, 从事土石坝、粒状体力学、地基加固方面的研究。E-mail: sihongliu@hhu.edu.cn

见表 1。

为了量测土工袋柔性挡土墙后以及墙内土压力大小,在墙后及墙体内布置了 24 个 LY-350 型应变式微型土压力计,其主要技术指标见表 2,埋设位置如图 1 和图 2 所示。试验中所测的均为水平向土压力,故试验时用双面胶将微型土压力计竖直固定在土工袋侧面的平展部分,以保持其竖直。

在模型箱填土部分的内壁和外壁每隔 5 cm 设置一条竖向的标示线:外壁标示线固定,内壁标示线嵌在砂土层且可随填土的移动而移动。试验中通过量测内外标示线的相对位移便可以得到填土的水平位移,进而分析填土的破坏模式和土工袋挡土墙的位移模式。

试验前,在模型箱底面贴上一层粗糙的砂纸,以防止试验过程中试样沿模型箱底面滑动;将模型箱两侧壁的内表面清洗干净,涂上一层润滑硅脂,然后覆盖一层塑料薄膜,以减小模型箱两侧壁的摩擦影响。模型箱内的土工袋模型挡墙上下层交错排列,土工袋铺设前需击实压密,土工袋间缝隙用试验砂土充填。在铺设过程中,按照设计方案位置埋设土压力计和设置位移计,待土工袋柔性挡土墙和土压力计埋设完毕后,将土压力计和位移计数据清零,排除埋设过程中的影响。

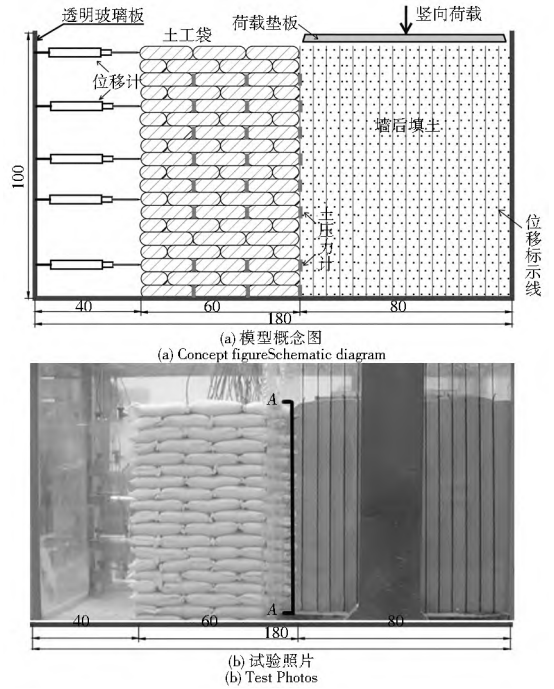


图 1 试验模型概念图和试验照片(单位: cm)

Fig. 1 Schematic diagram of model test and test photos (unit: cm)

表 1 天然河砂的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of natural sand

参数	D_{10}/mm	D_{30}/mm	D_{40}/mm	D_{60}/mm	D_{90}/mm	C_u	C_c	$\rho(g \cdot cm^{-3})$	c/kPa	$\varphi(^{\circ})$
参数值	0.2	0.32	0.36	0.4	0.75	2	1.28	1.75	3.25	35.4

注: D_{10} 、 D_{30} 、 D_{50} 、 D_{60} 和 D_{90} 为颗粒筛分中小于某粒径的土粒含量分别为 10%、30%、50%、60%和 90%时所对应的粒径; C_u 为不均匀系数, $C_u = D_{60}/D_{10}$; C_c 为曲率系数, $C_c = (D_{30})^2 / (D_{60}D_{10})$ 。



图 2 墙后土压力计的埋设(A-A 断面)

Fig. 2 Buried soil pressure gauge behind the wall

表 2 土压力计的主要技术指标

Table 2 Main technical specification of soil pressure gauge

型号	测量范围 / kPa	精度 (%)	外形尺寸 $\Phi \times H/mm$	接线方式	阻抗 / Ω	绝缘电阻 / M Ω
LY-350	0~100	≤ 0.05	28×5	输入 \rightarrow 输出 AC \rightarrow BD	350	≥ 200

试验开始后,在墙后逐渐将河砂填至挡土墙高度(填土密度与袋内土体一致,为 $1.75 g/cm^3$),记录每个土压力计的读数;然后在墙后填土表面放置一个尺寸为 $70 cm \times 60 cm$ (长×宽)的加载板,用油压千斤顶在荷载垫板上加压形成竖向均布荷载。加载过程中,通过布置的土压力计和位移计来记录墙后和墙内土压力大小及墙体的位移,并观察土工袋柔性挡土墙变形以及墙后填土的位移标示线的相对位移。当挡墙外侧位移或填土变形达到墙高的 1% 时,停止加载。整

个过程用数码相机拍摄记录。

2 试验结果与分析

2.1 墙体和填土的位移模式

图 3 为竖向荷载为 $7.2 kPa$ 时墙后填土的水平位移,其中图 3(a)为试验照片,图 3(b)是根据量测数据扩大 5 倍后绘制而成的。从图 3(b)可以看出,土工袋柔性挡土墙后填土在竖向荷载作用下,除最顶部由于和加载板的摩擦导致位移较小外,上部 1/3 墙高的土体几乎是平动,而墙体下部 2/3 的部分为绕墙趾的转动。分析认为,土体的这种位移破坏模式与土工袋柔性挡土的柔性变形以及土工袋单体强度有密切关系。由于土工袋具有一定的柔性,导致挡墙上部土工袋在墙后土压力增大的情况下产生较大的变形,上部土体的位移较大,接近平移模式;随着挡墙深度的增加,墙体下部土工袋由于承受上部土工袋的压重导致其单体强度逐渐增加,柔性变形减弱;最底部的土工袋接近于刚性,在受到土压力的时候几乎不产生变形。因此,土工袋柔性挡土墙墙后填土的变位模式可以简化为:上部接近于水平平动、中下部近似为绕墙趾的转动。可以预测,随着墙后填土表面竖向荷载的增加,墙体位移也会不断增加,最终墙后填土会沿与水平面呈一定夹角的某一平面发生滑动,如图 3(b)中的潜在滑裂面。

2.2 土压力的竖向分布

当土工袋柔性挡土墙体发生一定的变形后,作用在墙

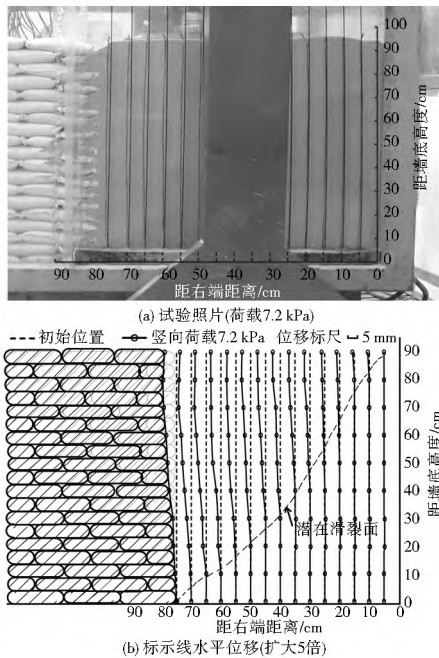


图3 墙后填土的水平位移模式

Fig. 3 The Horizontal displacement mode of backfill soil

背上的应力得到了一定的释放,使墙背应力减小;同时,土工袋挡土墙墙身的强度及变形模量自上至下逐渐增大,其柔性自上至下逐渐减小,墙体柔性变形对墙后土压力的影响程度减小。

图4为不同竖向荷载下土工袋挡土墙墙后土压力的竖向分布以及相应竖向荷载下的库伦主动土压力。可以看出,墙后土压力沿墙高呈非线性分布,但由于底部的约束,土压力最大值并不在墙底部,而是接近墙底的下部;在相同竖向荷载下,墙后土压力与库伦主动土压力接近,且土工袋挡土墙上部柔性变形大,墙后土压力小于库伦主动土压力,而下部土工袋挡土墙柔性减弱,所受土压力大于库伦主动土压力,因而土压力合力作用点偏向于墙体的下部,有利于墙体的稳定。

2.3 土压力的水平传递

图5表示墙后土压力在墙体内沿水平方向的传递原理,其中, F_1 为挡土墙与填土接触面的墙背土压力, F_2 和 F_3 为两列土工袋接触面之间的墙内土压力。图6给出试验不同竖向荷载下的土工袋挡土墙墙后及墙内土压力沿挡土墙高度的分布,可以看出,侧向土压力在水平方向上从靠近填土

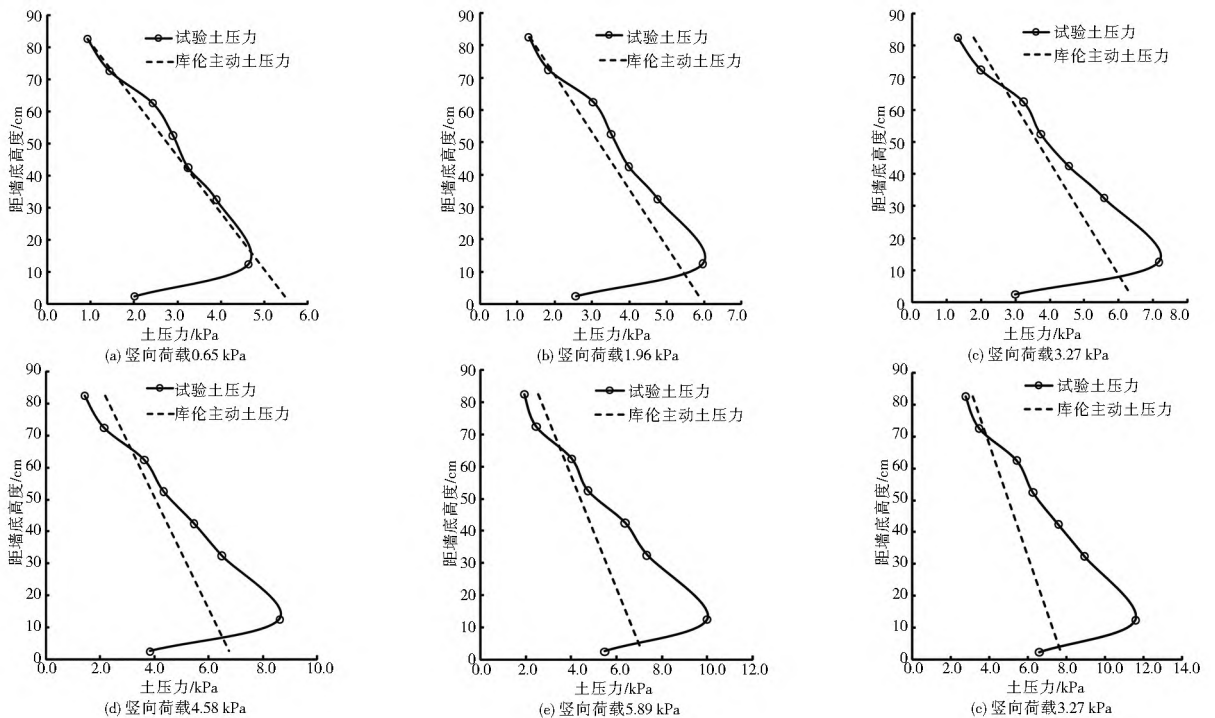


图4 不同竖向荷载下墙后土压力竖向分布

Fig. 4 Vertical distribution of earth pressure behind the wall under different vertical loads

到墙外逐渐减小,即 $F_1 > F_2 > F_3$ 。墙后土压力在墙体外的水平削减主要是由土工袋的层间摩擦引起的。根据图5所示的受力简图,有以下力的平衡关系式:

$$F_1 - F_2 = F_2 - F_3 = f_1 + f_2 \quad (1)$$

式中: f_1 与 f_2 分别为土工袋上、下层间的摩擦力。

图7为与图6对应的墙后与墙内土压力的差值分布。可见,挡墙上部土工袋由于所受压重荷载较小,土工袋层间摩擦较小,土压力削减值较小。随着竖向荷载的增加,墙后和墙内土压力的差值也在不断增加。在不同竖向荷载下,沿墙高基本满足 $F_1 - F_2 \approx F_2 - F_3$ 。

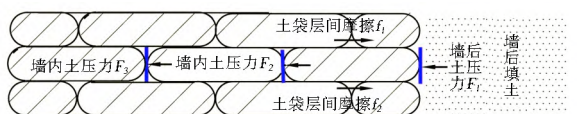


图5 土压力在墙内的水平传递

Fig. 5 The horizontal transfer of earth pressure within the wall

3 结论

通过土工袋柔性挡土墙模型试验,研究了土工袋柔性挡土墙的土压力分布以及墙后填土的位移模式,主要的结论如下。

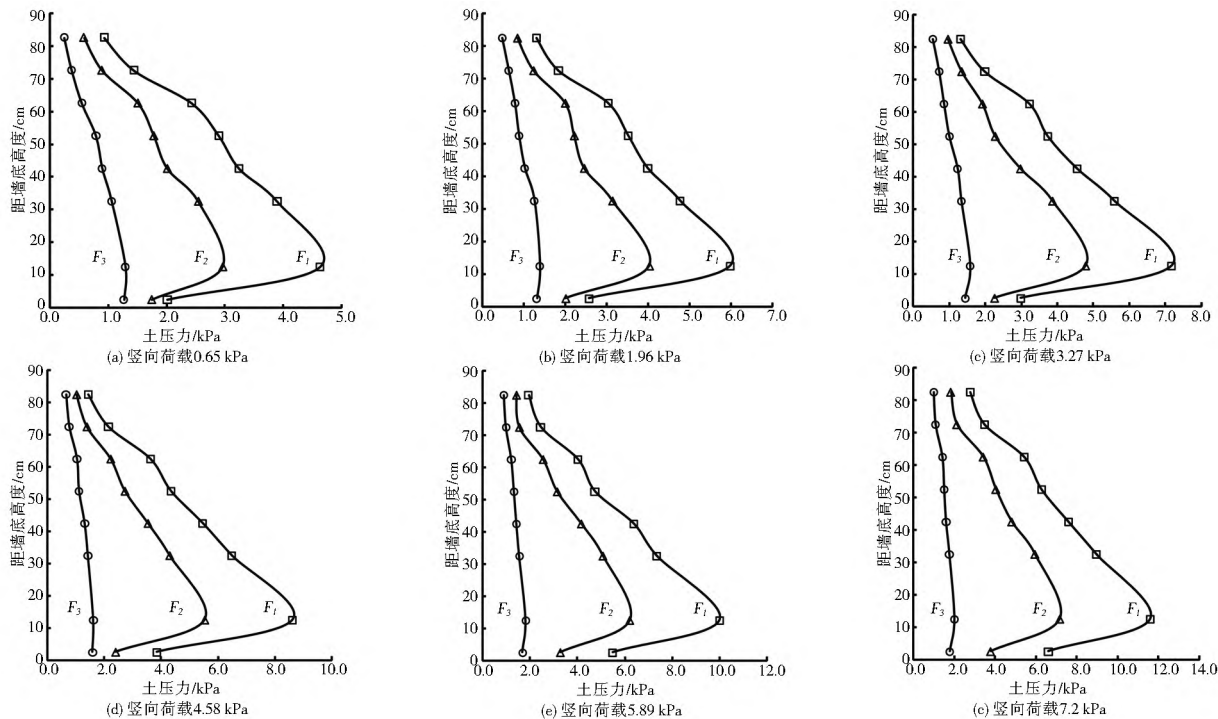


图 6 不同竖向荷载下墙后和墙内土压力的竖向分布

Fig. 6 Vertical distribution of earth pressure behind and within the wall under different vertical loads

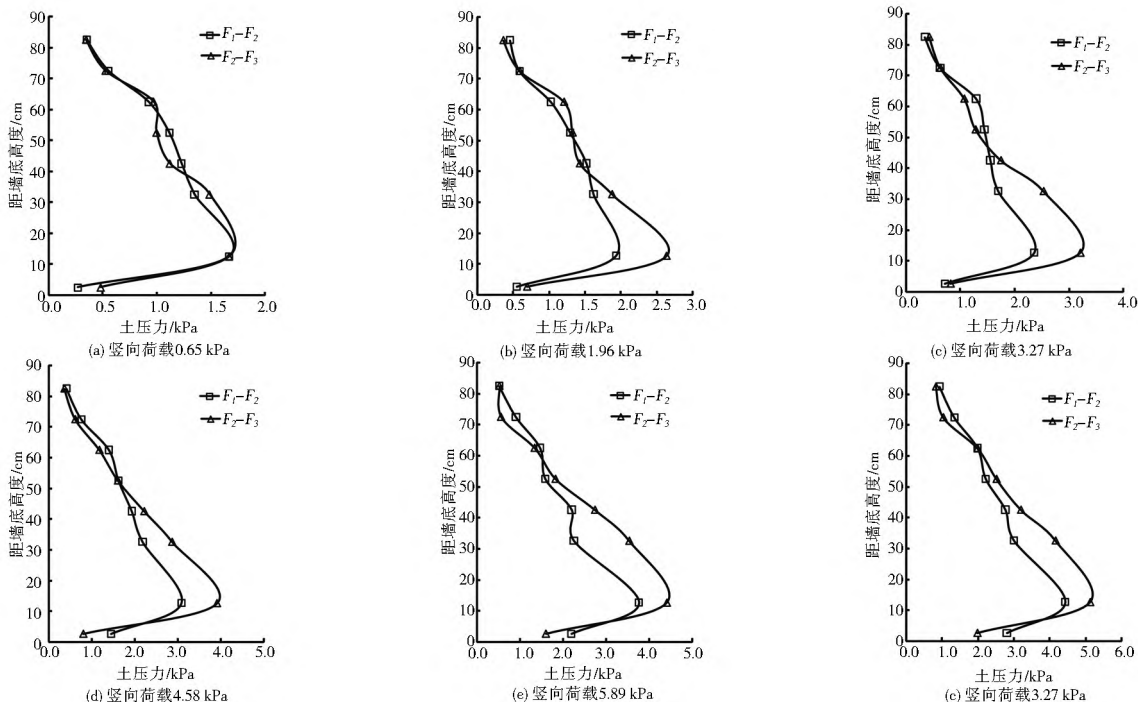


图 7 墙后与墙内土压力差值沿墙高分布

Fig. 7 Vertical distribution of the difference of earth pressures behind and within the wall

(1) 土工袋柔性挡土墙墙后填土的变位上部接近于水平平动、下部近似为绕墙趾的转动。

(2) 土工袋挡土墙墙后土压力接近于库伦主动土压力, 且由于墙体具有一定的柔性, 且随着高度的增加, 柔性变形越大, 土压力值减少越快, 最终上部土压力小于库伦土压力, 合力作用点下移。

(3) 土工袋挡土墙由于土工袋层间的摩擦作用, 墙后土压力从墙内向墙外递减。由此推断, 随着土工袋列数的增加, 远离填土墙体所受土压力逐渐减小, 墙体最外层的位移

和变形也逐渐减小, 甚至减小为零。

参考文献 (References):

[1] Matsuoka H, Liu Sihong. A New Earth Reinforcement Method Using Soilbags [M]. Taylor & Francis Group: London, 2006.
 [2] 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 Hajime. A New Earth Reinforcement Method by Soilbags [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1665-1670. (in Chinese))

(下转第 142 页)

- (3): 21-23. (in Chinese))
- [7] 付杰, 牛瑞卿. 三峡库区老蛇窝滑坡变形规律数据挖掘[J]. 人民长江, 2012, 43(23): 6-9. (FU Jie, NIU Ruiqing. Analysis on Data mining of Deformation Laws of Laoshewo Landslide in Three Gorges Reservoir area [J]. Yangtze River, 2012, 43(23): 6-9. (in Chinese))
- [8] 殷坤龙, 汪洋, 唐中华. 降雨对滑坡的作用机理及动态模拟研究[J]. 地质科技情报, 2002, 21(1): 75-78. (YIN Kunlong, WANG Yang, TANG Zhonghua. Mechanism and Dynamic Simulation of Landslide by Precipitation [J]. Geological Science and Technology Information, 2002, 21(1): 75-78. (in Chinese))
- [9] 朱冬林, 任光明, 聂德新, 等. 库水位变化对水库滑坡稳定性影响的预测[J]. 水文地质工程地质, 2002, (3): 6-9. (ZHU Donglin, REN Guangming, NIE Dexin, et al. Effecting and Forecasting of Landslide Stability with the Change of Reservoir Water Level [J]. Hydrological Geology and Engineering Geology, 2002, (3): 6-9. (in Chinese))
- [10] 彭良泉, 王钊. 对边坡稳定性分析中危险水力条件的研究[J]. 人民长江, 2003, 34(5): 39-41. (PENG Liangquan, WANG Zhao. Research on Dangerous Hydrological Condition in Slope Stability Analysis [J]. Yangtze River, 2003, 34(5): 39-41. (in Chinese))
- [11] 时卫民, 郑颖人. 库水位下降情况下滑坡稳定性评价[J]. 工程勘察, 2004, (1): 27-35. (SHI Weimin, ZHENG Yiren. Stability Evaluation of Landslide Under Reservoir Water Level Drawdown Condition [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2004, (1): 27-35. (in Chinese))
- [12] 贾淑霞. 湖北省三峡库区滑坡勘查评价几个问题的商榷[J]. 湖北地质, 2004, 16(4): 44-46. (JIA Shuxia. Some Question in the Assessment and Investigation of the Landslides in the Three Gorges Reservoir [J]. Hubei Geology & Mineral Resources, 2004, 16(4): 44-46. (in Chinese))
- [13] 殷坤龙, 汪洋, 唐中华. 降雨对滑坡的作用机理及动态模拟研究[J]. 地质科技情报, 2002, 21(1): 75-78. (YIN Kunlong, WANG Yang, TANG Zhonghua. Mechanism and Dynamic Simulation of Landslide by Precipitation [J]. Geological Science and Technology Information, 2002, 21(1): 75-78. (in Chinese))

(上接第 84 页)

- [3] 刘斯宏, 汪易森. 土工袋技术及其应用前景[J]. 水利学报, 2007, (增刊): 644-648. (LIU Sihong, WANG Yisen. Reinforcement Mechanism of Soilbags and Its Applications [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, (Supp.): 644-648. (in Chinese))
- [4] 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 Yisen. 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))
- [5] 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 Yisen. Application of New Geotechnologies to South to North Water Diversion Project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(8): 61-66. (in Chinese))
- [6] 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 Lirjiang, 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))
- [7] 王元战, 李蔚, 黄长虹. 墙体绕基础转动情况下挡土墙主动土压力分布[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 208-211. (WANG Yuanzhan, LI Wei, HUANG Changhong. Distribution of Active Earth Pressure with Wall Movement of Rotation about Base [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2): 208-211. (in Chinese))
- [8] 章瑞文, 徐日庆, 郭印. 挡土墙墙后土体应力状态及土压力分布研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(1): 111-115. (ZHANG Ruwen, XU Riqing, GUO Yin. Study on Soil Stress State and Earth Pressure Distribution Behind Retaining Wall [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2008, 42(1): 111-115. (in Chinese))
- [9] MILLIGAN W E. Soil deformations near anchored sheet pile walls [J]. Geotechnique, 1983, 33(1): 41-55.
- [10] 高江平, 俞茂宏, 胡长顺, 等. 加筋土挡墙土压力及土压力系数分布规律研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5): 582-584. (GAO Jiangping, YU Maohong, HU Changshun. Study on the Distributive Rule of the Earth Pressure and Its Coefficient of the Reinforced earth Wall [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(5): 582-584. (in Chinese))