

DOI: 10.11779/CJGE201412015

土工袋柔性挡墙位移模式及土压力研究

刘斯宏¹, 薛向华², 樊科伟¹, 徐思远¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河南省水利勘测设计研究院有限公司, 河南 郑州 450016)

摘要: 用土工袋构筑而成的挡土墙具有一定的柔性, 在墙后土压力作用下, 墙体能够发生一定的变形, 墙后土压力分布及大小与刚性挡土墙大不相同。设计并进行了土工袋柔性挡土墙模型试验, 通过试验观测了墙体的位移模式和墙后填土的破坏模式, 研究了土压力沿墙体高度方向及墙体水平方向的分布; 运用水平微分单元法推导了主动平衡状态下土工袋柔性挡土墙土压力的计算公式, 土压力理论计算值与模型试验实测值基本吻合; 进行了模型试验用土工袋层间摩擦试验, 建立了土压力与土工袋层间摩擦力的平衡关系式, 分析了土压力沿土工袋墙体水平方向的传递规律。

关键词: 土工袋; 挡土墙; 位移模式; 土压力; 模型试验

中图分类号: TU458

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)12-2267-07

作者简介: 刘斯宏 (1964-), 男, 博士, 教授, 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。

Earth pressure and deformation mode of a retaining wall constructed with soilbags

LIU Si-hong¹, XUE Xiang-hua², FAN Ke-wei¹, XU Si-yuan¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Henan Water & Power Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450016, China)

Abstract: The retaining wall constructed with soilbags is relatively flexible and may deform under the action of the lateral earth pressure. The distribution and value of the lateral earth pressure are quite different from those of a rigid retaining wall. Model tests are performed on a retaining wall constructed with soilbags to investigate the deformation mode of the wall and the failure mode of the back-filled soil. The distribution of the earth pressures along the height of the wall and the horizontal transfer within the retaining wall are investigated. An equation for calculating the earth pressure on the retaining wall of soilbags is derived from the force equilibrium of a differential element. The earth pressures calculated by the derived equation agree roughly with the experimental measurements. The frictions between the soilbags are experimentally investigated, and are used to explain the horizontal decrease of the earth pressures within the retaining wall.

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

0 引言

挡土墙作为防止土体坍塌的永久或临时性建筑物, 应用范围十分广泛, 几乎所有的工程, 如水利水电、土木建筑、铁道桥梁交通、防御工程、水土保持和矿山坑道工程等建设中都要用到。挡土墙通常有两类: 一类是传统的以混凝土或砌石为主要材料的刚性挡土墙; 另一类为采用土工合成材料的加筋土挡土墙, 通常由土工格栅等加筋带与填土交替铺设而成, 具有一定的柔性和变形适应能力。近年来, Matsuoka 等^[1]、刘斯宏等^[2-6]对土工袋增强机理、工程特性等进行了较为深入的研究, 在此基础上将土工袋直接应用于构筑挡土墙。土工袋挡土墙是一种新型的加筋土挡墙结构, 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, 有利于挡土墙的稳定。目前, 在日本已有若干土工袋挡土墙的工程实例^[3], 国内也有所应用, 如马石城等^[7]、孙见松^[8]课题组在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)。

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。许多学者对刚性挡土墙土压力与变位模式的关系进行了大量研究, 如文献[9~15]研究了刚性挡土墙在平动、绕基

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

收稿日期: 2014-04-15

础转动和绕墙顶转动等典型变位模式下极限平衡状态的土压力分布,文献[16~19]提出了刚性挡土墙任意位移模式下非极限状态土压力的计算方法。对于以土工格栅水平加筋材为主的加筋土挡墙,土压力的研究也有一定进展。高江平等^[20]通过对加筋土挡墙模型试验,研究了确定加筋土挡墙土压力系数的新方法,并指出在超载作用下,加筋土挡墙模型的墙背土压力沿墙高呈现出上部较小、中上部大、下部又变小的分布规律;陆培毅等^[21]、应宏伟等^[22]、许伟强等^[23]分别运用模型试验和理论分析的方法研究了加筋土柔性挡土墙在鼓形变位模式下的非线性土压力分布,给出了相应的计算方法。

对于土工袋柔性挡土墙,目前仅有一些工程实例,还没有对其进行过系统的研究。本文进行了一个土工袋柔性挡土墙模型试验,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水平方向的传递规律,并对模型试验位移模式下的土压力计算方法进行探讨。

1 土工袋挡墙模型试验

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。土工袋挡墙长 80 cm,宽 60 cm,高 95 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。土工编织袋原材料为聚丙烯(PP),质量为 70 g/m²;纵、横向抗拉强度分别为 11.6 kN/m 与 5.2 kN/m,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中砂,其物理力学参数为: D_{10} 为 0.2 mm, D_{30} 为 0.32 mm, D_{50} 为 0.36 mm, D_{60} 为 0.4 mm, D_{90} 为 0.75 mm, $C_u=2$, $C_c=1.28$, ρ 为 1.75 g/cm³, $c=3.25$ kPa, $\phi'=35.4^\circ$ 。

为了量测土工袋挡土墙墙后及墙内土压力大小,从而得到墙后及墙内侧向土压力的竖向分布和水平传递规律,在墙后及墙体内布置了 24 个 LY-350 型应变式微型土压力计(外径 28 mm、厚 5 mm),测量范围 0~100 kPa,精度误差 $\leq 0.05\%$,埋设位置如图 1 所示(需要注意的是试验中所测的均为水平向土压力,故土压力计的受力面应保持竖直,试验时用双面胶将微型土压力计竖直固定在土工袋的侧面)。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,外壁标示线固定在模型箱的有机玻璃上,内壁标示线嵌在砂土表层且可随填土的变位而相应移动。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,进而分析墙后填土的破坏模式和土工袋

挡土墙的位移模式。在土工袋挡土墙表面不同高程处设置 5 个水平位移计。

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,同时在模型箱两侧壁的内表面涂上一层润滑硅脂,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,土工袋间缝隙用试验砂土充填;土工袋模型挡墙和土压力计埋设完毕后,将土压力计和位移计数据清零,以消除埋设过程中的影响;土工袋模型挡墙完成后,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/cm³),在此过程中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×60 cm(长×宽)的加载板,用油压千斤顶在荷载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,注意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,挡墙外侧位移达到墙高的 1% 时,停止加载,并用数码相机拍下整个过程。

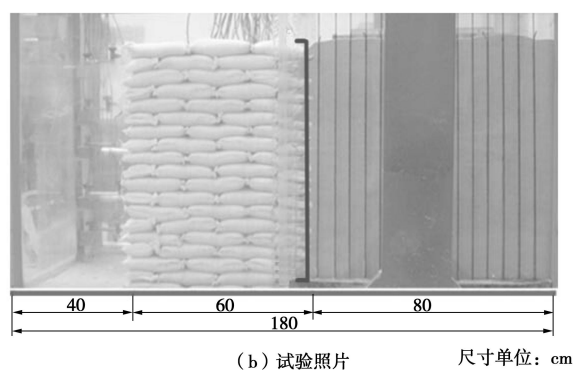
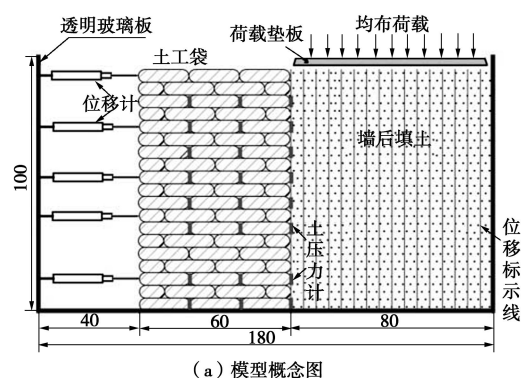


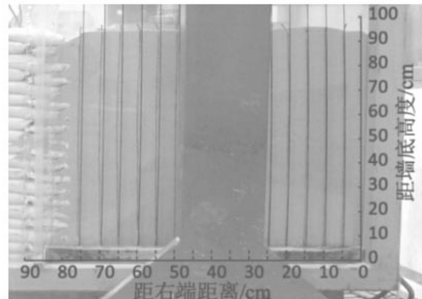
图 1 土工袋挡墙模型试验概念图和照片

Fig. 1 Schematic view and photo of model tests

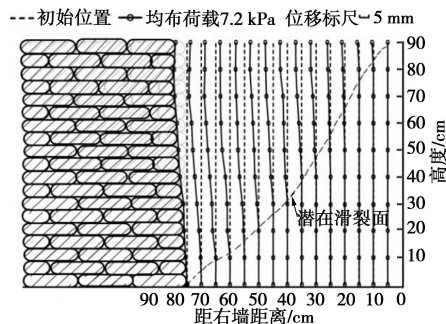
2 墙后填土位移模式

图 2 为墙后填土表面均布荷载为 7.2 kPa(此时挡墙外侧位移达到墙高的 1%)时的水平位移,其中图 2

(a) 为试验照片, 图 2 (b) 根据标示线量测得到的变形扩大 5 倍后绘制而成。从图中可以看出, 土工袋挡土墙后填土在竖向荷载作用下, 除最顶部由于加载板的摩擦导致位移较小外, 上部 2/5 墙高的土体近似为平动, 墙体下部 3/5 的部分近似为绕墙趾的转动。



(a) 试验照片 (均布荷载 7.2 kPa)



(b) 标示线水平位移 (扩大 5 倍)

图 2 墙后填土的变形情况

Fig. 2 Deformation of backfilled soil

这种位移模式与土工袋挡墙的柔性变形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, 使得上部土体的位移较大, 接近平移模式; 而随着挡墙深度的增加, 墙体下部土工袋承受上部土工袋的压重变大, 土工袋单体强度逐渐增加, 其柔性减弱。底部的土工袋刚性逐渐增大, 在受到土压力的时候不易变形, 从而导致墙体在墙后土压力作用下变形从墙顶部向下逐渐递减, 最终导致土工袋挡墙下部产生类似于刚性墙体绕墙趾转动的位移模式。因此, 土工袋挡土墙墙后填土的变位模式可以简化为:

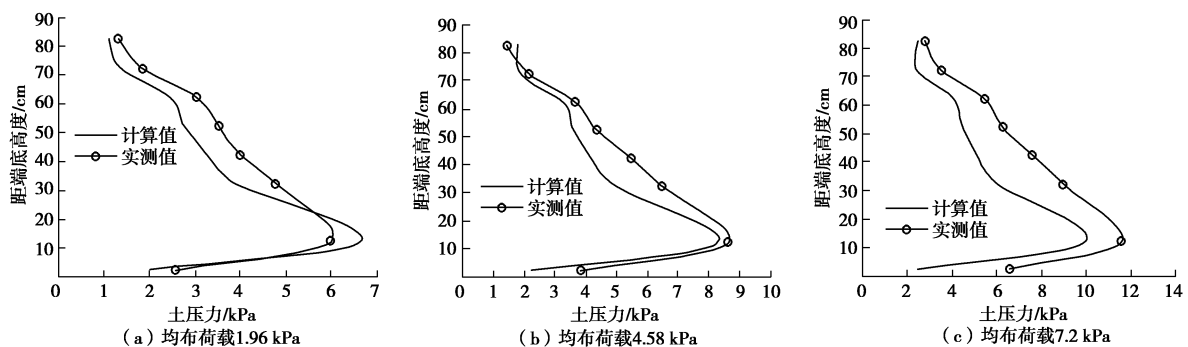


图 4 不同均布荷载下土工袋挡墙墙背土压力分布

Fig. 4 Distribution of earth pressures on backfilled soil under different uniformly distributed loads

上部接近于水平平动、下部近似为绕墙趾的转动, 如图 3 所示。

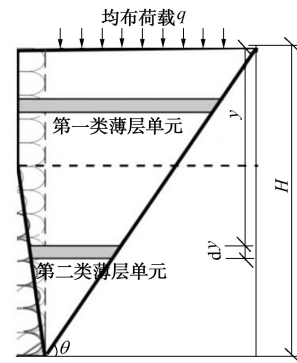


图 3 土工袋挡墙墙后填土位移模式

Fig. 3 Deformation mode of backfilled soil behind retaining wall of soilbags

3 墙后土压力竖向分布和计算分析

图 4 为墙后填土表面在不同均布荷载下土工袋挡墙墙背土压力的竖向分布, 图中带点的实线为试验量测值、实线为按水平薄层分析法的计算值 (后述)。由图 4 可知, 墙后土压力沿墙高呈非线性分布, 土压力最大值并未发生在墙底部, 而是接近墙底的下部。土压力合力作用点偏向于墙体的下部, 有利于墙体的稳定。

对于非线性分布的土压力, 可以采用水平薄层法进行计算分析。文献[9~19]采用该方法得到了刚性挡土墙分别在典型变位模式以及任意位移模式下的非线性土压力分布。由于土工袋挡墙墙后土压力分布为非线性, 本文也采用水平薄层分析法进行计算。对于图 3 所示的土工袋挡墙墙后填土变位模式, 取墙后土楔体为隔离体, 并根据实际试验情况进行如下假定: ①挡土墙竖直, 墙高为 H , 墙后填土表面水平; ②滑动面为一通过挡土墙基底的完整平面, 与水平面的夹角假定为库仑滑裂面倾角^[24], 即 $\theta = \arctan(\tan\phi + \sqrt{\tan^2\phi + \tan\phi / \tan(\phi + \delta)})$, ϕ 为土体的内摩擦角; δ 为墙土间的摩擦角, 取 $\delta = 2\phi/3$; ③ ϕ' 为水平薄层单元

之间的等效摩擦角, 由相邻水平薄层单元间错动趋势程度决定。相邻水平薄层单元间错动趋势程度越大, φ' 越大。挡土墙上部 2/5 墙高土体的位移模式近似为平动, 薄层单元间的摩擦角 $\varphi' = 0^\circ$; 下部 3/5 的墙体刚性较大, 墙后填土呈现近似于绕墙趾转动的位移模式, 微分单元认为达到极限破坏, 其间的摩擦角 $\varphi' = \varphi$ 。④由于挡土墙变形相对挡土墙高度而言很小, 变形前后土楔体表面作用的均布荷载 q 不变。

根据图 3 所示的墙后土体位移模式, 土楔体可划分为两类典型的薄层单元, 如图 5 所示。

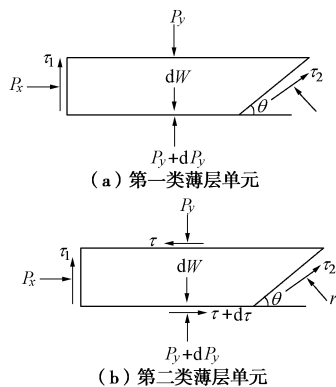


图 5 水平薄层受力分析

Fig. 5 Analysis of forces acting on thin-layer elements

对图 5(b)所示第二类薄层单元进行受力分析(第一类只需令 $\tau = 0$ 即可), 薄层单元体厚度为 dy , 距离墙顶为 y 。作用于单元体上的力有: 单元体顶面的竖向应力 P_y , 底面竖向反力 $P_y + dP_y$, 挡土墙的水平反力 P_x , 水平薄层单元层间等效摩擦力 τ , 墙土间摩擦力 τ_1 , 滑动面上的摩擦力 τ_2 , 滑动面上的法向反力 r , 以及微分单元体的自重 dW , γ 为砂土重度。由薄层单元力的平衡条件可得:

水平方向 $\sum X = 0$, 即

$$P_x dy + \tau_2 \frac{dy}{\sin \theta} \cos \theta - r \frac{dy}{\sin \theta} \sin \theta - \tau(H-y) \cot \theta + (\tau + d\tau)(H-y-dy) \cot \theta = 0 \quad (1)$$

整理式 (1) 得

$$P_x \tan \theta + \tau_2 - r \tan \theta - \tau H - y + (H-y) d\tau / dy = 0 \quad (2)$$

令竖直方向 $\sum Y = 0$, 即

$$P_y(H-y) \cot \theta + dW - (P_y + dP_y)(H-y-dy) \cot \theta - \tau_1 dy - \tau_2 \frac{dy}{\sin \theta} \sin \theta - r \frac{dy}{\sin \theta} \cos \theta = 0 \quad (3)$$

$$\text{式中, } dW = \frac{[(H-y) \cot \theta + (H-y-dy) \cot \theta] dy}{2} \gamma$$

整理式 (3) 得

$$\frac{dP_y}{dy} = \gamma + \frac{1}{(H-y)} [P_y - r - (\tau_1 + \tau_2) \tan \theta] \quad (4)$$

令 $P_x = K_a P_y$, $\tau_1 = P_x \tan \delta$, $\tau_2 = \gamma \tan \varphi$, $\tau = P_y \tan \varphi'$, 由式 (2)、(4) 得

$$\frac{dP_y}{dy} = (1 - AK_a) \frac{P_y}{(H-y)} + B\gamma \quad (5)$$

$$\text{式中, } A = \frac{\cos(\theta - \varphi - \delta) \cos \varphi' \tan \theta}{\sin(\theta - \varphi + \varphi') \cos \delta}, \quad B = \frac{\sin(\theta - \varphi) \cos \varphi'}{\sin(\theta - \varphi + \varphi')}。$$

根据边界条件 $y=0$, $P_y=q$, 求解方程 (5) 可得

$$P_y = \left(q + \frac{B\gamma H}{2 - AK_a} \right) \left(\frac{H-y}{H} \right)^{AK_a-1} - \frac{B\gamma}{2 - AK_a} (H-y) \quad (6)$$

式中, K_a 表示墙体水平反力 P_x 与薄层单元上竖向应力 P_y 的比值, 有别于通常意义下的主动土压力系数。Paik^[25]考虑由于墙土摩擦作用而引起墙后土体小主应力偏转, 给出薄层单元上水平反力和竖向平均应力之间的关系:

$$K_a = \frac{P_x}{P_y} = \frac{3(m \cos^2 \omega + \sin^2 \omega)}{3m - (m-1) \cos^2 \omega} \quad (7)$$

式中, ω 为墙侧土体单元的小主应力平面与水平面的夹角, Paik 建议主动状态下取 $\omega = \arctan \left[\frac{(m-1) + \sqrt{(m-1)^2 - 4m \tan \delta}}{2 \tan \delta} \right]$, 其中, $m = \tan^2(45^\circ + \varphi/2)$ 。

由式 (6) 计算出 P_y 值后, 结合式 (7) 便可得到水平土压力 P_x 。图 4 中的实线为计算得到的墙后非线性分布的水平土压力。可见, 计算得到的土压力分布规律与实测结果基本吻合, 但量值稍小些。挡土墙土压力计算是一个非常复杂的问题, 建立精确的数学模型求解是比较困难的。本文按水平薄层法计算墙后非线性分布的土压力采用了墙后填土最终的位移模式, 未考虑其随均布荷载增大而逐渐变化的过程, 以及未考虑薄层单元水平反力和竖向平均应力比值 K_a 的变化对土压力分布的影响, 因此计算结果与实测数据之间存在一定差异, 有待进一步研究与改进。本文土压力计算所采用的 2/5 墙高处为平动和转动两种模式转换的位置是基于本次模型试验得到的。而准确合理地确定这一模式转换的位置还需进一步的试验研究。根据目前的试验可以推测其转换位置与挡墙的刚度有关, 挡墙的刚度越小(柔性大), 平动部分所占比例越大。

4 墙内土压力水平传递和计算分析

图 6 为试验得到的墙后填土在不同均布荷载作用下, 土工袋挡墙墙后及墙内土压力沿挡墙高度的分布, 图中 F_1 为挡土墙与填土的接触面上墙后土压力, F_2

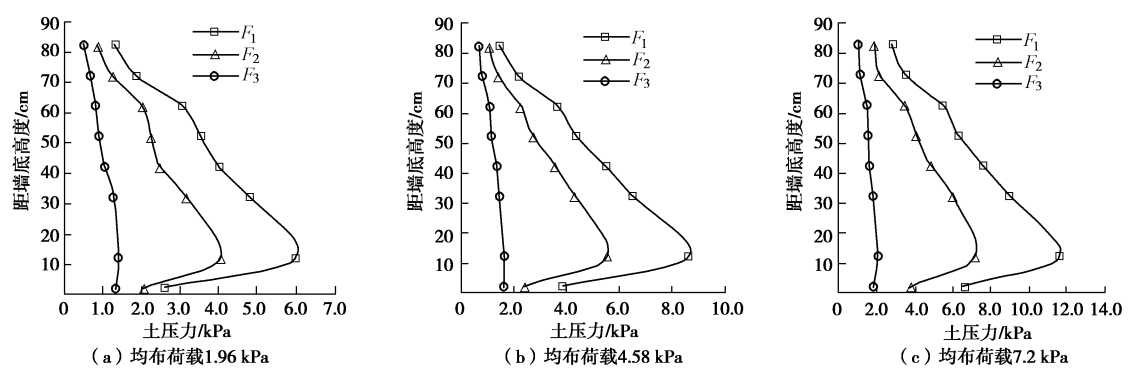


图 6 不同均布荷载下墙背和墙内土压力的竖向分布

Fig. 6 Distribution of earth pressures behind and within retaining wall under different evenly distributed loads

和 F_3 分别为两列土工袋接触面之间的墙内土压力 (参见图 7)。由图 7 可知, 侧向土压力在土工袋挡墙内从靠近填土到墙外逐渐减小, 即 $F_1 > F_2 > F_3$ 。

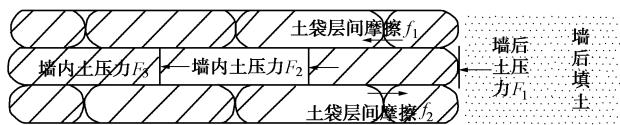


图 7 土压力在土工袋墙体内的水平传递

Fig. 7 Transfer of earth pressure within wall of soilbags

墙后土压力在土工袋墙体内从内向外逐渐递减主要是由于土工袋的层间摩擦引起。图 8 为与图 6 对应的墙后与墙内土压力的差值分布。可见, 在不同均布荷载作用下, 通过每列土工袋递减的土压力值基本相等, 即 $F_1 - F_2 \approx F_2 - F_3$ 。对于挡墙上部土工袋, 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; 随着土工袋层压重荷载的增加 (从墙顶到墙底), 墙后和墙内土压力的差值也在不断增加。

为测定土工袋层间摩擦, 进行了图 9 (a) 所示的拉拔试验。试验中发现, 土工袋组合体在水平受拉过程中, 尾部的土工袋水平向挤压变形最大, 往前则逐渐减小, 最前端土工袋基本没有水平向挤压变形。这种现象在竖向压力增大的情况下有所减弱, 这是因为土工袋单体强度随竖向压力增大而提高所致, 与土工袋挡墙底部土工袋变形小相吻合。图 9 (b) 为不同竖向压力 P 下水平拉力与水平位移的关系, 图 9 (c) 为由最大水平拉力 T_{\max} 除以相应的竖向压力 P 而得的等效摩擦系数。试验结果表明: 当竖向压力 (上部压重)

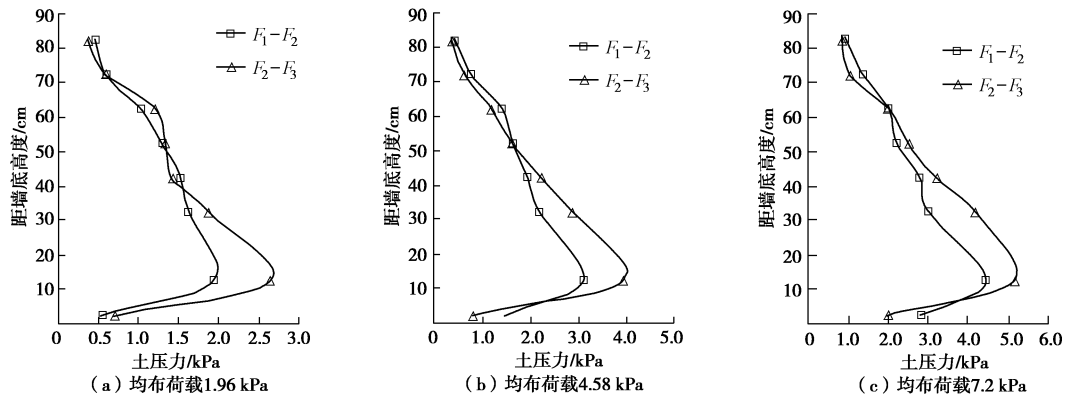


图 8 墙后与墙内土压力差值沿墙高分布

Fig. 8 Distribution of earth pressure differences between adjacent soilbags

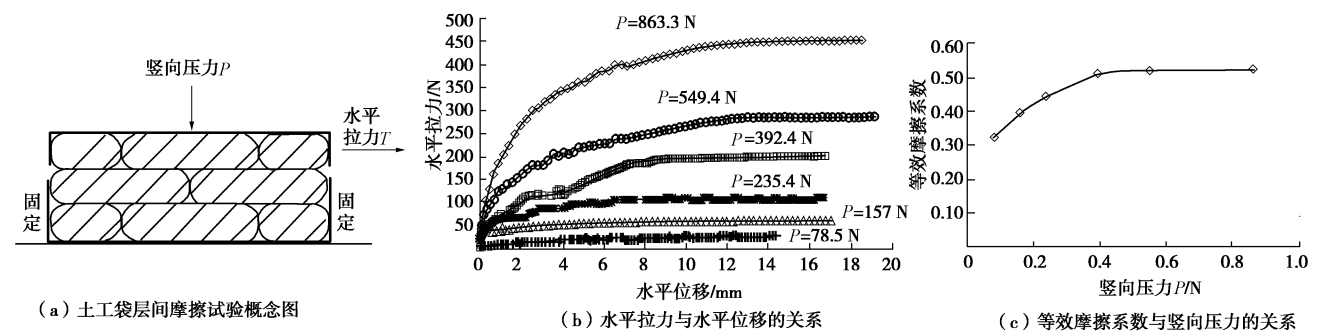


图 9 土工袋层间摩擦试验

Fig. 9 Tests on interface friction of soilbags

较小时,土工袋层间等效摩擦系数随着竖向压力的增加而增加;当上部压重增加到一定值后,土工袋层间等效摩擦系数增加缓慢,基本趋于稳定。土工袋层间摩擦不仅与袋子本身的摩擦有关,而且还与土工袋的堆放方式、竖向压力大小和土工袋的变形等有密切关系,要准确测定相对比较复杂,有待进一步研究确定。

根据试验得到的土工袋层间等效摩擦系数,可以计算得到土工袋挡墙模型土工袋层间摩擦力。由于等效摩擦系数为由最大水平拉力计算而得,相当于土工袋层间的滑动摩擦。当墙后填土表面均布荷载较小时,所产生的墙后及墙内土压力较小,不足以引起土工袋层间滑动;当均布荷载增加到 7.2 kPa 时,挡墙外侧位移达到墙高的 1%,土工袋层间的静摩擦力逐渐增大到最大静摩擦而开始滑动。图 10 为土工袋层间按等效摩擦系数计算得到的滑动摩擦值与均布荷载 7.2 kPa 时墙后土压力实测值的对比。可见,土工袋层间摩擦计算值与土压力实测值基本一致,验证了土工袋挡墙墙后土压力通过土工袋层间摩擦传递的结论。

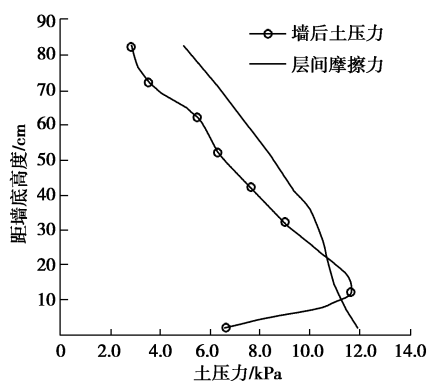


图 10 墙背土压力和土工袋层间摩擦力的分布 (均布荷载 7.2 kPa)

Fig. 10 Distribution of earth pressure behind retaining wall and frictional force between soilbag layers

5 结 论

通过模型试验与计算分析,研究了土工袋柔性挡土墙的土压力沿墙体高度方向及墙体水平方向的分布,主要的结论如下: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土工袋柔性挡土墙土压力为非线性分布,可以运用水平微分单元法进行计算分析,计算结果与模型试验实测值基本吻合;③土工袋层间等效摩擦系数随着竖向压重的增加而增加,但其增加的幅度随着竖向压重的增加逐渐减小,最终基本趋于稳定;④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。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。

致 谢: 本文试验得到王柳江、高军军、鲁洋、傅乾龙、杨明山、马超、李栋等的大力协助,在此表示衷心感谢!

参考文献:

- [1] MATSUOKA H, LIU Si-hong. A new earth reinforcement method using soilbags[M]. London: A A Balkema Publishers-Taylor & Francis, 2005.
- [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 Si-hong, MATSUOKA H. A new earth reinforcement method by soilbags [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1665 - 1670. (in Chinese))
- [3] 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): 644 - 648. (LIU Si-hong, WANG Yi-shen. Reinforcement mechanism of soilbags and its applications[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(S0): 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 Si-hong, BAI Fu-qing, WANG Yi-shen. 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 Si-hong, WANG Yi-shen. 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 Si-hong, WANG Liu-jiang, 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] 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 Shi-cheng, ZHANG Xun-wu, 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))
- [8] 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. (SUN Jian-song. The study of design theory and application of a gravity retaining wall

- constructed with soilbags filled with crushed stones[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2011. (in Chinese))
- [9] FANG Y S, ISHIBASHI I. Static earth pressure with various wall movements[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1986, **112**(3): 317 - 333.
- [11] 梅国雄, 宰金珉. 考虑位移影响的土压力近似计算方法[J]. 岩土力学, 2001, **22**(1): 83 - 85. (MEI Guo-xiong, ZAI Jin-min. Earth pressure calculating method considering displacement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, **22**(1): 83 - 85. (in Chinese))
- [12] 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**(1): 208 - 211. (WANG Yuan-zhan, LI Wei, HUANG Chang-hong. Distribution of active earth pressure with wall movement of rotation about base[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(1): 208 - 211. (in Chinese))
- [13] 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 Rui-wen, XU Ri-qing, 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))
- [14] 龚慈. 不同位移模式下刚性挡土墙土压力计算方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005. (GONG Ci. Earth pressure against rigid retaining wall of different movement modes[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese))
- [15] 卢坤林, 杨扬. 考虑位移影响的主动土压力近似计算方法[J]. 岩土力学, 2009, **30**(2): 553 - 557. (LU Kun-lin, YANG Yang. Preliminary study of active earth pressure under nonlimit state[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(2): 553 - 557. (in Chinese))
- [16] 王仕传, 程桦. 绕墙趾转动挡土墙主动土压力的确定[J]. 岩土力学, 2011, **32**(7): 2139 - 2145. (WANG Shi-chuan, CHENG Hua. Determination of active earth pressure behind retaining wall rotating about wall toe[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(7): 2139 - 2145. (in Chinese))
- [17] 黄斌, 杨洪, 何晓民. 非极限状态主动土压力的研究[J]. 长江科学院院报, 2007, **24**(4): 46 - 49. (HUANG Bin, YANG Hong, HE Xiao-ming. Research on active earth pressure under non-limit state[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2007, **24**(4): 46 - 49. (in Chinese))
- [18] 卢坤林, 朱大勇, 杨扬. 任意位移模式刚性挡土墙土压力研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(1): 370 - 375. (LU Kun-lin, ZHU Da-yong, YANG Yang. Study of earth pressure against rigid retaining wall with arbitrary displacement modes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(1): 370 - 375. (in Chinese))
- [19] 张永兴, 陈林. 挡土墙非极限状态主动土压力分布[J]. 土木工程学报, 2011, **44**(4): 112 - 119. (ZHANG Yong-xing, CHEN Lin. Active earth pressure on retaining wall under non-limit state[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, **44**(4): 112 - 119. (in Chinese))
- [20] 胡俊强, 张永兴, 陈林, 等. 非极限状态挡土墙主动土压力研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(2): 381 - 387. (HU Jun-qiang, ZHANG Yong-xing, CHEN Lin, et al. Active earth pressure on retaining wall under non-limit state[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(2): 381 - 387. (in Chinese))
- [21] 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 Jiang-ping, YU Mao-hong, HU Chang-shun. 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))
- [22] 陆培毅, 严驰, 顾晓鲁. 砂土基于室内模型试验土压力分布形式的研究[J]. 土木工程学报, 2003, **36**(10): 84 - 88. (LU Pei-yi, YAN Chi, GU Xiao-lu. Sand model test on the distribution of earth pressure[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, **36**(10): 84 - 88. (in Chinese))
- [23] 应宏伟, 蔡奇鹏. 鼓形变位模式下柔性挡土墙的主动土压力分布[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(12): 1805 - 1810. (YING Hong-wei, CAI Qi-peng. Distribution of active earth pressure against flexible retaining walls with drum deformation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(12): 1805 - 1810. (in Chinese))
- [24] 许伟强. 土工格室柔性挡墙主动土压力计算方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2010. (XU Wei-qiang. Research on calculating methods of active earth pressure for geocell flexible retaining[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese))
- [25] 应宏伟, 蒋波, 谢康和. 考虑土拱效应的挡土墙主动土压力分布[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(5): 717 - 722. (YING Hong-wei, JIANG Bo, XIE Kang-he. Distribution of active earth pressure against retaining walls considering arching effects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(5): 717 - 722. (in Chinese))
- [26] PAIK K H, SALGADO R. Estimation of active earth pressure against rigid retaining walls considering arching effect[J]. Géotechnique, 2003, **53**(7): 643 - 653.