

DOI: 10.11779/CJGE201610017

土工袋层间摩擦特性试验研究

刘斯宏, 樊科伟, 陈笑林, 贾凡, 毛航宇, 林亚伟

(河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 土工袋层间摩擦是土工袋柔性挡土墙设计中应该考虑的关键因素, 其大小直接决定了土工袋挡墙的内稳定性。通过铝棒土工袋的摩擦试验说明柔性土工袋层间摩擦与刚性体间摩擦特征的不同, 进行了不同袋内材料、土工袋排列方式以及运行环境(水上或水下)等条件下的土工袋层间摩擦试验。结果表明: 土工袋层间摩擦力随着袋体沿受力方向变形的增大而逐渐增大, 当层间发生整体滑动时达到最大值, 并趋于稳定; 土工袋层间摩擦不仅与编织袋体的摩擦有关, 而且受袋内材料粒径大小及排列方式的影响; 土工袋浸泡于水下时, 由于水的润滑作用使得编织袋间的摩擦作用减小, 袋内材料为细颗粒的土工袋层间摩擦作用减小, 而袋内材料为粗颗粒的土工袋层间摩擦变化不大。

关键词: 土工袋; 摩擦试验; 层间摩擦; 袋内材料; 排列方式; 水下

中图分类号: TU41 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)10-1874-07

作者简介: 刘斯宏(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 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。

Experimental studies on interface friction characteristics of soilbags

LIU Si-hong, FAN Ke-wei, CHEN Xiao-lin, JIA Fan, MAO Hang-yu, LIN Ya-wei

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

Abstract: The stability of retaining walls constructed with soilbags is closely related to their interlayer friction. The difference of the interlayer friction of flexible soilbags from that of rigid bodies is investigated through the tests on the bags filled with aluminum rods. A series of laboratory tests are conducted to study the influences of the materials filled into bags, the inter-layered arrangements of soilbags and the water on the interlayer friction of soilbags. It is indicated from the experimental results that (1) The frictional force between two flexible soilbags increases with the interlayer displacement of soilbags, and reaches the maximum value at the beginning of the whole slippage between two soilbags and then tends to be stable; (2) The interlayer friction of soilbags is influenced by the bag friction, the grain sizes of filling materials and the interlayer arrangements of soilbags; (3) Owing to the lubricating effect of water on bags, the interlayer friction of the soilbags filled with fine materials decreases when they are placed underwater. However, the interlayer friction of soilbags filled with coarse materials is slightly influenced by water.

Key words: soilbag; friction test; interlayer friction; filling material; interlayer arrangement; underwater

0 引言

土工袋是指将土、石等材料装入袋子后形成的袋装物。长期以来, 土工袋被广泛地应用于防洪抢险、截流围堰以及修建一些简易道路、人防掩体工事等。近年来, Matsuoka 与刘斯宏等^[1-6]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, 具有常规加筋土挡墙的优势^[7], 即造价低, 可因地制宜, 就地取材, 节约占地; 施工简便, 工期短; 能够营造自然的生态景观, 环境友好; 具有一定的柔性, 抗震性能好。研究表明^[8], 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, 土压力减小的幅度逐渐增大, 外侧墙体所受的土压力及产生的变形逐渐减小。因此, 土工袋层间摩擦性能是土工袋柔性挡土墙设计中应该考虑的关键因素。

土工袋层间摩擦性能类似于常规加筋土挡墙中加筋材与填料的界面特性, 它直接决定了加筋土挡墙的内稳定性。目前, 国内外学者对加筋土挡墙中加筋材与填料的界面特性进行了大量的研究。研究表明, 加筋材料的性质、尺寸、填料性质、试验条件等对加筋材与填料的界面特性有较大的影响 (Lee 等^[9]、Ling

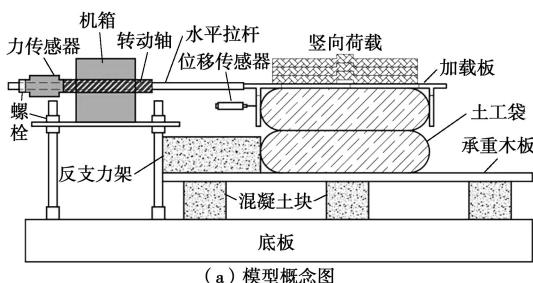
等^[10], HsiehLing 等^[11]、吴景海等^[12]、伊光志等^[13]、Mizyal 等^[14]、Yidiz 等^[15]、徐超等^[16]、李萍等^[17])。但是, 目前对土工袋层间摩擦性能的研究还相对较少。潘洋^[18]试验研究了编织袋与编织袋、编织袋与砂以及编织袋充砂后袋间的摩擦系数; 蓝日彦等^[19]通过直剪试验研究了碎石、砂土、红土等作为袋内材料对土工袋袋间摩擦特性的影响, 结果表明碎石土工袋层间摩擦作用最大, 但未分析其原因; 朱君星等^[20]使用大型土工“似直剪仪”进行了不同含水率和法向压力下的尾矿土工编织袋层间摩擦试验, 结果表明低含水率状态下的尾矿土工编织袋层间摩擦作用比高含水率状态下要大, 而在含水率不变的情况下, 土工编织袋层间摩擦作用随着法向压应力增大而基本保持不变。以上研究对土工袋层间摩擦影响因素考虑的不够全面, 且对其研究结果的合理解释还有待于进一步深入。

本文首先通过铝棒土工袋的摩擦试验说明柔性土工袋层间摩擦与通常刚体间摩擦概念的不同, 然后进行了土工袋不同袋内材料、排列方式以及运行环境(水上或水下)等条件下土工袋层间摩擦试验, 研究了各个因素对土工袋层间摩擦特性的影响, 并进行了较为详细的解释。研究结果可为土工袋挡墙的设计提供重要的参考依据。

1 试验装置、材料及方案

1.1 试验装置

土工袋摩擦试验所用装置为自主研制, 主要由水平张拉、竖向加载以及量测3个系统组成, 如图1所示。水平张拉系统主要由电机驱动的水平向转动轴及拉杆组成, 用4根竖向螺杆固定于底板上, 通过调节螺杆的高度使转动轴与加载板位于同一水平面上。转动轴的水平移动速率为2 mm/min, 其左端与一个BLR-1型称重传感器相连, 称重传感器测量范围为0~30 kN, 精度误差≤0.05%。拉杆与两端带有挡板的加载板相连, 在加载板上堆放一定数量的每块重50kg的砝码作为竖向荷载; 在加载板左侧挡板上设置一个位移传感器, 最大量程为51 mm, 用以量测土工袋的水平位移。称重传感器及位移传感器连接至UCAM-60B静态数据采集仪上进行数据采集。



(b) 试验照片

图1 土工袋摩擦试验装置示意图和照片

Fig. 1 Schematic view and photo of friction tests on soilbags

1.2 试验材料

试验所采用的土工编织袋原材料为聚丙烯(PP), 每平方米重量为84 g, 拉力试验测试得到的经、纬向拉力强度分别为7.7 kN/m与5.7 kN/m, 经、纬向伸长率分别为27.6%与25.7%。

由于土工袋挡墙具有因地制宜、就地取材的优点, 土工袋袋内材料可以是各种不同的土石料。本文采用天然河沙、开挖壤土(含天然固结颗粒)、堆石料3种不同粒径大小的土石料作为袋内材料进行试验, 3种袋内材料的颗粒级配曲线如图2所示。

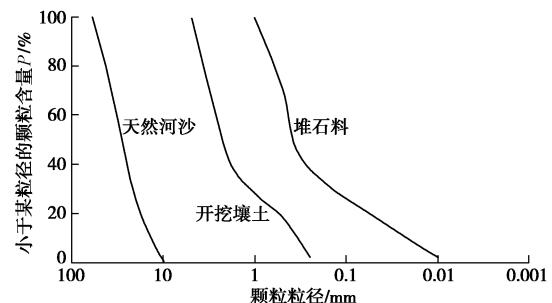


图2 3种袋内材料颗粒级配曲线

Fig. 2 Gradation curves of three materials filled in bags

1.3 试验方案

影响土工袋层间摩擦特性的因素主要有土工袋袋内材料、排列方式以及运行环境(水上或水下)。表1为依据这3种因素的不同组合而确定的试验方案。对于试验工况1, 分别以天然状态下河沙、壤土、堆石料3种不同的土石料作为袋内材料, 上下层土工袋层叠无缝排列; 试验工况2以天然状态河沙作为袋内材料, 研究层叠无缝、横向交错、纵向交错、纵横十字交错4种不同土工袋排列方式的影响, 如图3所示; 试验工况3主要研究土工袋浸泡在水下时土工袋层间的摩擦特性, 袋内材料分别取河沙、壤土、堆石料3种, 上下层土工袋层叠无缝排列。试验中采用的土工袋大小约为40 cm×40 cm×10 cm。

试验时, 先在底板上按照预设的高度水平放置一块厚承重木板, 在其上按照试验方案设置规定数量及排列方式的土工袋, 然后在上层土工袋上水平放置加

载板, 加载板两端挡板需紧密贴合土工袋两端部, 在加载板上堆放预定数量的砝码, 启动电机带动转动轴向左运动, 每 5 s 记录一次拉力传感器和水平位移传感器的数值, 绘制水平拉力与水平位移的关系曲线。当相邻两次量测得到的水平拉力值波动在称重传感器精度范围之内时, 停止试验。在进行水下土工袋层间摩擦试验时, 在承重木板上放置一块铁制薄框, 并蓄满水, 保证土工袋层间接触面浸入水下。

表 1 土工袋层间摩擦试验方案

Table 1 Programs of friction tests on soilbags

试验工况	影响因素	袋内材料	上下层排列方式	状态
1	袋内材料	河沙、壤土、堆石料	层叠无缝	天然状态
2	排列方式	河沙	层叠无缝、横向交错、纵向交错、十字交错	天然状态
3	水	河沙、壤土、堆石料	层叠无缝	水下

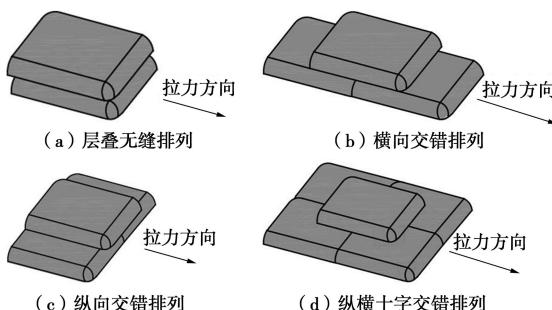


图 3 土工袋上下层 4 种不同排列方式

Fig. 3 Four interlayer arrangements of soilbags

2 土工袋层间摩擦特征

摩擦是一种普遍存在的物理现象, 有静摩擦与动摩擦之分。静摩擦是指物体间有滑动趋势而尚未滑动时的滑动摩擦, 动摩擦是指物体间有相对滑动时的滑动摩擦。对于刚性物体而言, 动摩擦近似于最大静摩擦, 物体间相对滑动开始后动摩擦力保持不变^[21]。本文所研究的土工袋具有一定的柔性, 袋体在受到外力作用后会产生形变, 土工袋层间摩擦特征与普通刚性物体间的摩擦特征肯定会有有所不同。

为了说明柔性土工袋层间与刚性物体间摩擦特征的不同, 进行了以铝棒为袋内材料的土工袋层间摩擦试验, 如图 4 所示。铝棒的比重 $G_s=2.69$, 接近于一般土颗粒的比重(约 2.65), 而且试验时可以在铝棒堆积体的表面画上标线, 用以观察铝棒堆积体在受力过程中的运动轨迹, 因此铝棒是一种理想的二维土颗粒

模型材料。试验采用的土工袋模型长 300 mm、高 60 mm, 由编织袋包裹长 60 mm 的铝棒而成。袋内铝棒有两种直径, 分别为 1.5 mm 和 3.0 mm, 其面积混合比为 3:2。两个铝棒土工袋直立叠放, 在其表面上间距为 3 cm 的横、竖标线。下层土工袋左侧紧靠一个固定端, 在上层土工袋顶面放置一块木制加载板, 在其上用铁板施加 0.235 kN 的竖向荷载, 然后水平推动木制加载板, 使得上、下层土工袋间发生错动, 如图 4 (a) 所示。图 4 (b) 为根据试验照片绘制得到的竖向标线错动情况。可以看出, 上、下层铝棒土工袋间错动位移沿受力方向(从右到左)逐渐减小, 也就是说土工袋层间滑动并不是同时产生, 而是受力端首先受到挤压, 局部产生滑动, 随着水平推力的增大沿受力方向依次发生滑动。与之相对应, 水平推力 F 随着受力端水平位移的增大而逐渐增大, 当上、下层土工袋整体发生滑动时, 水平推力趋于一个稳定值, 如图 5 中曲线 A 所示。为了与刚性物体间摩擦进行比较, 将试验用的编织袋分别紧密包裹在两块铁板上, 进行同样的摩擦试验, 图 5 中曲线 B 为其实验结果。可见, 曲线 B 与曲线 A 的形态明显不同, 两块裹有编织袋的铁板受到一定大小的水平推力后, 整体发生滑动, 发生滑动后水平推力保持不变。曲线 B 所对应的水平推力为编织袋体间的摩擦力, 曲线 A 中的水平推力最终趋近于该值。由试验结果计算得到编织袋体间的摩擦系数为 0.404。参照刚体摩擦系数的定义, 本文定义土工袋层间等效摩擦系数 μ 为

$$\mu = \frac{F_{\max}}{P} \quad , \quad (1)$$

式中, F_{\max} 为曲线 A 的最大水平力, P 为施加的竖向荷载。铝棒土工袋层间等效摩擦系数为 0.413, 略大于编织袋体间的摩擦系数, 其原因后述。

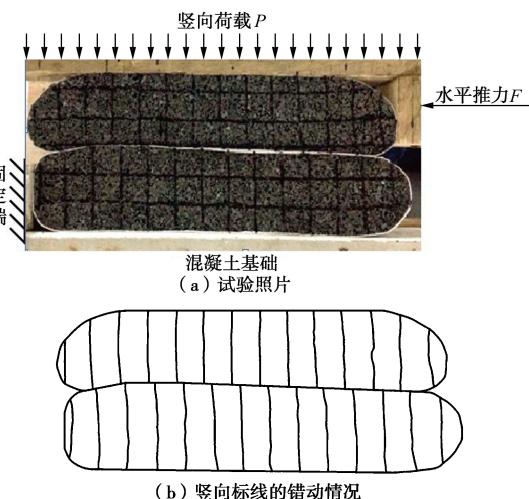


图 4 铝棒土工袋摩擦试验

Fig. 4 Friction tests on two bags filled with aluminum rods

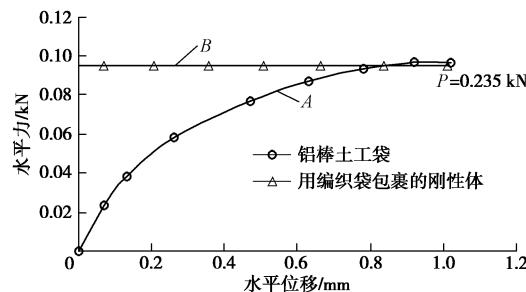


图 5 编织袋体间及铝棒土工袋层间摩擦对比

Fig. 5 Comparison of interlayer frictions between bags and soil bags filled with aluminum rods

3 试验结果及分析

3.1 袋内材料的影响

以天然河沙、开挖壤土、堆石料作为袋内材料制作而成的土工袋分别简称为“河沙袋”、“壤土袋”和“堆石袋”。对于每种土工袋，进行了竖向荷载分别为0.75, 1.25, 1.75, 2.25 kN的4次层间摩擦试验，均采用层叠无缝排列方式(工况1)，图6为其试验结果。与铝棒土工袋的结果相类似，3种土工袋在同一竖向荷载下，水平力随着水平位移的增加而增大，逐渐趋于一稳定值；对于每种土工袋，最大水平力随着竖向荷载的增大而增大。图7为由式(1)计算得到的4种不同竖向荷载下3种土工袋层间等效摩擦系数 μ 。可以看出，随着竖向荷载的增加，河沙袋和壤土袋层间等效摩擦系数变化不大，而堆石袋层间等效摩擦系数略有增大。4种竖向荷载下3种土工袋层间等效摩擦系数的平均值大小顺序依次为：堆石袋($\mu=0.619$)>壤土袋($\mu=0.534$)>河沙袋($\mu=0.442$)，说明袋内材料粒径越大，土工袋层间等效摩擦越大。袋内材料粒径较大时，会在袋子表面形成一定的凹凸，这种凹凸在上、下层土工袋之间形成一种咬合作用，导致层间摩擦作用增大，即层间等效摩擦系数增大，这也就是上述铝棒土工袋层间等效摩擦系数略大于编织袋体间摩擦系数的原因。袋内材料粒径越大，土工袋层间凹凸不平的现象越明显，如图8所示。随着竖向荷载的增加，土工袋层间凹凸不平形成的咬合作用会增大。试验的3种土工袋中，由于堆石的粒径最大，因此堆石土工袋层间等效摩擦系数最大，且随着竖向荷载的增加而增大。

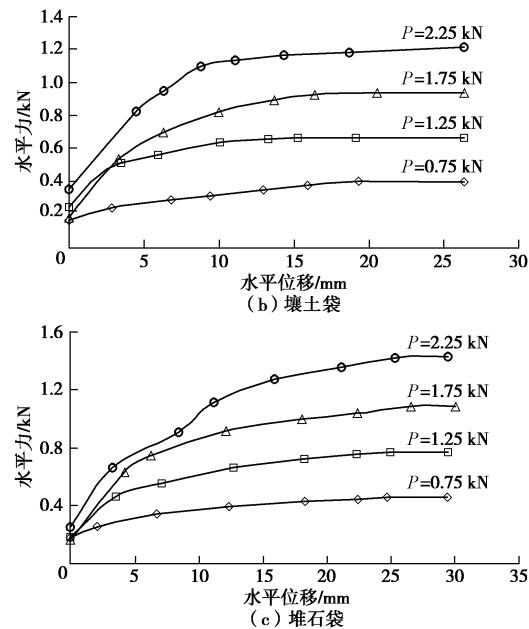
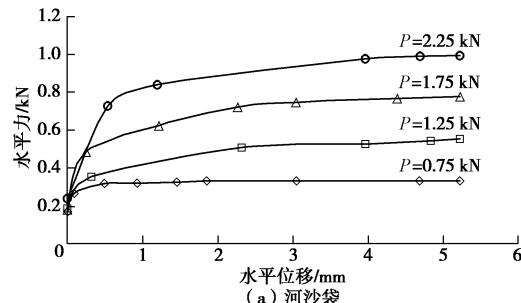


图 6 不同袋内材料的土工袋层间摩擦试验结果

Fig. 6 Results of friction tests on interlayer soilbags filled with different kinds of materials

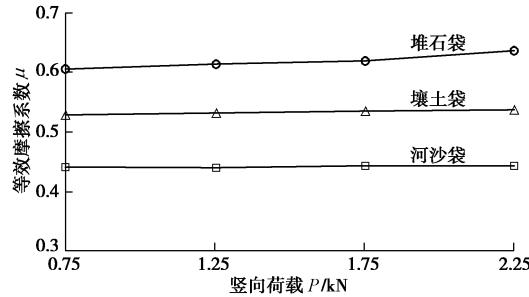


图 7 不同袋内材料土工袋层间等效摩擦系数

Fig. 7 Equivalent friction coefficients of interlayer soilbags filled with different kinds of materials

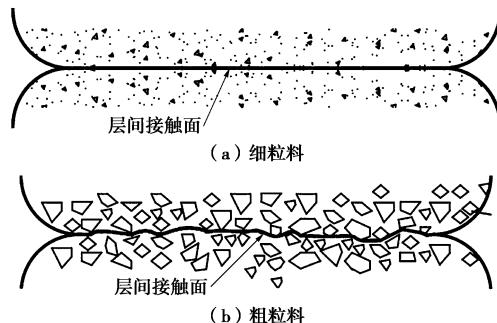


图 8 不同粒径袋内材料的土工袋层间咬合作用示意图

Fig. 8 Schematic view of interlocking between two soilbags with different grain sizes of filled materials

3.2 土工袋排列方式的影响

土工袋层间摩擦不仅与袋内材料的粒径有关，而且与土工袋的排列方式有关。对河沙袋进行了工况2下的试验，即分别进行层叠无缝排列、纵向交错排列、横向交错排列和十字交错排列。对每种排列方式下的河沙袋进行了竖向荷载分别为1.5, 2.5, 3.5 kN的3次试验。图9为不同排列方式下河沙袋层间摩擦试验

结果。可见,4 种排列方式的河沙袋在同一竖向荷载下,水平力均随着水平位移的增加而增大,且逐渐趋于一稳定值;对于每种排列方式下的土工袋,最大水平力随着竖向荷载的增大而增大。图 10 为 4 种不同排列方式的土工袋在 3 种不同竖向荷载下的层间等效摩擦系数 μ 。可见,对于不同竖向荷载下的土工袋层间等效摩擦系数,横向交错排列与十字交错排列方式基本接近,层叠无缝排列与纵向交错排列方式基本接近,前者数值明显大于后者。当上层土工袋骑跨在下层两个土工袋接触缝上时,由于土工袋具有一定的柔性,在本身自重和上部竖向荷载的作用下上层土工袋的一部分会嵌入到接触缝中,从而形成一种嵌固作用,如图 11 所示。当水平力施加方向与下层两个土工袋间接接触缝垂直时(试验中的横向交错排列与十字交错排列方式),这种嵌固作用导致土工袋层间摩擦阻力增大,即层间等效摩擦系数增大;当水平力施加方向与下层两个土工袋间接触缝平行时(试验中的纵向交错排列方式),嵌入接触缝内的上层土工袋顺着接触缝位移,对土工袋层间摩擦阻力贡献不大,因此土工袋层间等效摩擦系数 μ 与层叠无缝交错排列基本相同,且基本不受竖向荷载的影响。对于横向交错排列与十字交错排列方式,上、下层土工袋间的嵌固作用随竖向荷载的增大而增强,相应的土工袋层间等效摩擦系数增大。

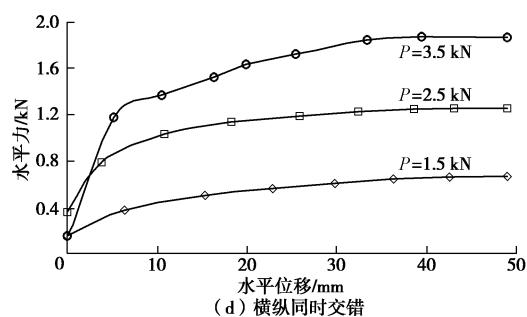
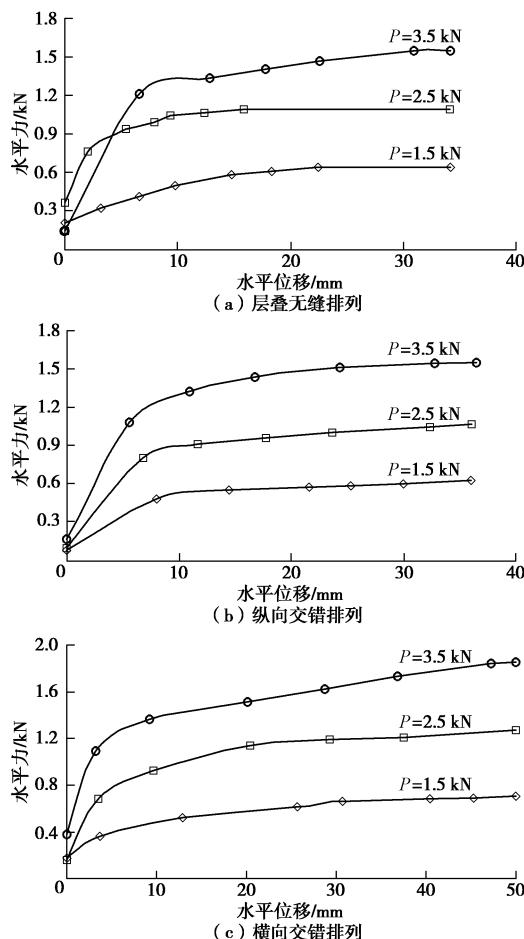


图 9 不同排列方式下土工袋层间摩擦试验结果

Fig. 9 Result of friction tests on interlayer soilbags with different kinds of arrangements

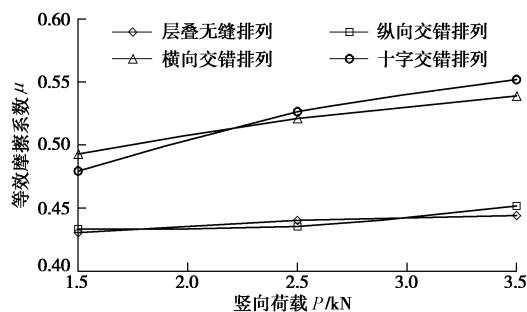


图 10 不同袋内材料土工袋层间等效摩擦系数 μ

Fig. 10 Equivalent friction coefficients of interlayer soilbags with different kinds of arrangements

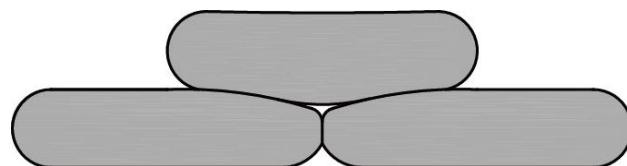


图 11 土工袋层间嵌固示意图

Fig. 11 Schematic view of insertion between two layers of soilbags

由于垂直于水平力方向的接触缝(简称“垂直接触缝”)产生的嵌固作用使得土工袋层间摩擦作用增大,进一步研究了垂直接触缝的数量对土工袋层间摩擦作用的影响。对于横向交错排列方式,进行了 2.5 kN 竖向荷载作用下不同数量垂直接触缝的土工袋层间摩擦试验。图 12 为试验得到的土工袋层间等效摩擦系数 μ 与垂直接触缝数量的关系,其中垂直接触缝数量为零代表层叠无缝排列。可见,土工袋层间等效摩擦系数随着垂直接触缝数量的增加而增大。

3.3 水下土工袋层间摩擦特性

由于实际工程中,土工袋有可能浸泡于水下,因此进行了水下土工袋层间摩擦试验,上、下土工袋采用层叠无缝排列。表 2 为水上、水下 3 种袋内材料(河沙、壤土、堆石料)的土工袋层间等效摩擦系数以及编织袋摩擦系数的对比。可见,编织袋的摩擦系数以及河沙袋、壤土袋层间等效摩擦系数浸水条件下相比

于天然状态下(水上)要小, 而堆石袋层间等效摩擦系数基本不变。如前所述, 对于层叠无缝排列的土工袋, 层间摩擦包括编织袋本身的摩擦和层间接触面凹凸不平引起的咬合作用两部分。对于河沙袋与壤土袋, 由于袋内材料颗粒较小, 层间接触面相对平整, 咬合作用不明显, 土工袋层间摩擦主要为编织袋本身之间的摩擦; 而对于堆石袋, 由于袋内材料颗粒较大, 层间接触面凹凸不平现象明显, 咬合作用对土工袋层间摩擦影响较大(参见图8)。由于水的润滑作用, 土工袋浸泡于水下后编织袋本身之间的摩擦作用减小, 因此, 对于袋内材料为河沙及壤土的两种土工袋, 其水下层间等效摩擦系数减小, 而堆石袋层间等效摩擦系数基本不变。

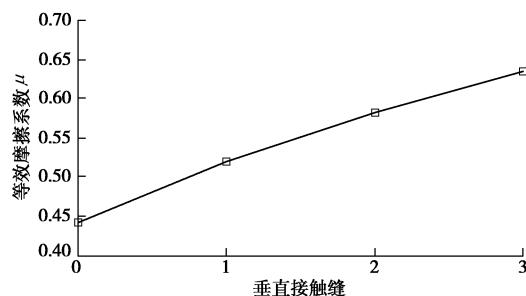


图 12 土工袋层间等效摩擦系数随垂直接触缝数量的变化

Fig. 12 Variation of equivalent friction coefficient of interlayer soilbags with number of contact joints

表 2 浸泡于水下土工袋层间等效摩擦系数以及编织袋摩擦系数的变化

Table 2 Change of interlayer frictions of soilbags and bags placed underwater

装袋材料	水上(天然状态) 等效摩擦系数	浸泡于水下 等效摩擦系数
编织袋	0.404	0.364
天然河沙	0.442	0.405
壤土	0.534	0.403
堆石料	0.619	0.619

4 结 论

通过铝棒土工袋层间摩擦试验, 对柔性土工袋层间摩擦特征进行了说明; 进行了不同袋内材料、土工袋排列方式以及运行环境(水上或水下)等条件下的土工袋层间摩擦试验, 探究了各个因素对土工袋层间摩擦特性的影响, 主要结论如下:

(1) 土工袋由于具有一定的柔性, 其层间摩擦特征与刚性物体间的摩擦不同。层间摩擦力随着袋体沿受力方向变形的增大而逐渐增大, 当土工袋层间发生整体滑动时, 层间摩擦力达到最大, 并趋于稳定。

(2) 土工袋层间摩擦不仅与编织袋体的摩擦有关, 而且受袋内材料粒径大小及排列方式的影响。当

袋内材料粒径较大时, 土工袋层间出现凹凸不平, 形成了一种咬合作用, 导致层间摩擦作用增大; 当上下层土工袋交错排列, 土工袋层间形成了一种嵌固作用, 如果交错缝与受力方向垂直, 则这种嵌固作用会导致土工袋层间摩擦阻力增大, 且随着竖向荷载与交错缝数量的增加而增大。

(3) 土工袋浸泡于水下时, 由于水的润滑作用, 编织袋本身之间的摩擦作用减小。对于袋内材料为细颗粒的土工袋, 由于层间凹凸不平形成的咬合作用较小, 水下土工袋层间摩擦作用减小; 而对于袋内材料为粗颗粒的土工袋, 由于层间接触面凹凸不平现象明显, 咬合作用较大, 水下土工袋层间摩擦变化不大。

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 Hajime. 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(增刊), 2007: 644 - 648. (LIU Si-hong, WANG Yi-shen. Reinforcement mechanism of soilbags and its applications[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007: 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] 毕东涛. 加筋土挡墙静动力稳定性研究[D]. 兰州理工大学, 2011. (BI Dong-tao. The static and dynamical stability research of reinforcement retaining wall[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2011. (in Chinese))
- [8] 刘斯宏, 薛向华, 樊科伟, 等. 土工袋柔性挡墙位移模式及土压力研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **12**(36): 2267 - 2273. (LIU Si-hong, XUE Xiang-hua, FAN Ke-wei, et al. Study on the earth pressure and deformation mode of a retaining wall constructed with soilbags[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **12**(36): 2267 - 2273. (in Chinese))
- [9] LEE K M, MANJUNATH V R. soil-geotextile interface friction by direct shear tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, **37**(1): 238 - 252.
- [10] LING H I, PAMUK A, DECHASAKULSOM M, et al. Interactions between PVC geomembranes and compacted clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, **127**(11): 950 - 954.
- [11] HSIEH Chi-wan, HSIEH Ming-wen. Load plate rigidity and scale effects on the frictional behavior of sand/geomembrane interfaces[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2003, **121**(1): 25 - 47.
- [12] 吴景海, 陈环, 王玲娟, 等. 土工合成材料与土界面作用特性的研究[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(1): 89 - 93. (WU Jing-hai, CHEN Huan, WANG Ling-juan, et al. Study on soil interaction characteristics of geosynthetics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(1): 89 - 93. (in Chinese))
- [13] 尹光志, 张东明, 魏作安, 等. 土工合成材料与细粒尾矿界面作用特性的试验研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2004, **23**(3): 426 - 429. (YI Guang-zhi, ZHANG Dong-ming, WEI Zuo-an, et al. Testing study on interaction characteristics between fine grained tailings and geosynthetics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(3): 426 - 429. (in Chinese))
- [14] MIZYAL IZGIM, YIDIZ WASTI. Geomembrane-sand interface frictional properties as determined by inclined board and shear box tests[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1998(16): 207 - 219.
- [15] YIDIZ WASTI, BAHADIR OGZDUZGUN Z. Geomembrane-geotextile board and direct properties as determined by inclined board and direct shear box tests[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2001, **19**: 45 - 57.
- [16] 徐超, 赵春风, 叶观宝. 关于土与土工合成材料界面的实验研究[J]. 同济大学学报, 2004, **32**(3): 307 - 311. (XU Chao, ZHAO Chun-feng, YE Guan-bao. Research on interface between soil and geosynthetics[J]. Journal of Tongji University, 2004, **32**(3): 307 - 311. (in Chinese))
- [17] 李萍, 唐延东, 李辉山. HDPE 膜与土工布界面摩擦特性的斜板仪试验[J]. 兰州理工大学学报, 2012, **38**(5): 121 - 124. (LI Ping, TANG Yan-dong, LI Hui-shan. Experiment of frictional properties of HDPE geomembrane against and geotextile using tilt table device[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2012, **38**(5): 121 - 124. (in Chinese))
- [18] 潘洋, 秦庆娟. 土工编织袋摩擦角的试验研究[J]. 上海水务, 2007, **23**(3): 43 - 46. (PAN Yang, QIN Qing-juan. Study on the friction angle of soilbags[J]. Shanghai Water, 2007, **23**(3): 43 - 46. (in Chinese))
- [19] 蓝日彦, 王保田, 魏军扬, 等. 生态当涂结构面层与加筋连接强度的试验研究[J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2013, **38**(1): 62 - 66. (LAN Ri-yan, WANG Bao-tian, WEI Jun-yang, ZHAO Bo. Experimental Study on connection strength between soil bag surface and reinforced geotextile for ecological retaining wall[J]. Journal of Guangxi University (Nat Sci Ed), 2013, **38**(1): 62 - 66. (in Chinese))
- [20] 朱君星, 张默, 曹作忠, 等. 尾矿土工织物编织袋层间界面摩擦强度特性研究[J]. 金属矿山, 2013, **404**: 114 - 117. (ZHU Jun-xing, ZHANG Mo, CAO Zuo-zhong, et al. Study on the layer interface friction strength characteristics of tailings geotextiles woven bags[J]. Metal Mine, 2013, **404**: 114 - 117. (in Chinese))
- [21] 祝士媛. 学前教育百科全书—学科教育卷[M]. 沈阳: 沈阳出版社, 1995. (ZHU Shi-yuan. Encyclopedia for preschool school education-discipline education volume[M]. Shenyang: Shenyang Press, 1995. (in Chinese))