

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtk.2022.0059

刘斯宏,高从容,程德虎,等.土工袋修复膨胀土边坡抗滑稳定分析与摩擦特性试验[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(3):581-589. LIU S H,GAO C R,CHENG D H,et al. Sliding stability analysis of soilbags-repaired expansive soil slope and experimental study on friction characteristics of soilbags[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2022,20(3):581-589. (in Chinese)

土工袋修复膨胀土边坡抗滑稳定分析与摩擦特性试验

刘斯宏¹,高从容¹,程德虎²,廖洁¹,樊科伟³

(1. 河海大学水利水电学院,南京 210098;2. 南水北调中线干线工程建设管理局,北京 100038;
3. 武汉大学土木建筑工程学院,武汉 430072)

摘要:通过引入单一安全系数,基于极限平衡法,推导土工袋修复体两种滑动模式的抗滑稳定性计算公式。通过土工袋摩擦试验,研究不同袋内材料、土工袋排列方式、竖向压重以及运行环境(水上或水下)等条件下的土工袋袋体层间和袋土之间的摩擦特性,试验结果表明:袋装膨胀土土工袋堆叠为交错排列的过程中形成的咬合作用和嵌固作用将土工袋袋体无缝排列的层间摩擦因数0.714提升至0.920;土工袋浸泡于水下进行摩擦试验,水的润滑作用会导致土工袋袋体层间以及土工袋袋土之间的摩擦因数从0.920降低至0.901。采用土工袋抗滑稳定公式与摩擦试验得出的摩擦因数,对南水北调中线工程中土工袋修复膨胀土边坡案例的两种滑动形式进行抗滑稳定性分析,得出土工袋修复体最小安全系数为1.25,论证了土工袋修复膨胀土边坡的效果。

关键词:土工袋;膨胀土边坡修复;抗滑稳定性;摩擦试验;稳定性分析

中图分类号:TV52;TU443 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



膨胀土一般是指黏粒成分主要由蒙脱石或伊利石组成的黏性土,在湿润和干燥时表现出显著的膨胀和收缩^[1-4]。膨胀土在用作建筑材料时,可能会引起较大的外部膨胀压力、差异位移或两者的组合,从而对其上部或与其一体的基础设施建设造成严重破坏。例如,对于膨胀土的自然边坡、原状膨胀土的开挖边坡或压实膨胀土的填方边坡,容易发生从局部边坡坍塌到整体边坡滑坡的不同规模的失稳现象^[5-10]。

为了避免膨胀土边坡在运营期间发生破坏,在工程建设期主要采用“好土换填”和“水泥改性”的方法对膨胀土边坡进行处理,以减小浅层滑坡的威胁^[11-14]。但是,对于在工程运行期发生的膨胀土边坡局部破坏,由于此时征地已经完成,很难采用非膨胀性土进行换填,而掺拌水泥需用专门机械,对于小

土方量的修复存在机械进场困难、不经济等缺陷。近年来,伞型锚快速锚固新技术、微型桩、土工袋等支护技术以及边坡外水防护和土体排水技术因施工简便、工期较短、时效性高等优点,在边坡加固中得到了一定的推广应用,为实现边坡快速抢险加固和运行期工程维护提供了有力的技术支撑^[15-20]。

土工袋处理膨胀土滑坡技术主要针对发生浅表层滑动的边坡,采用环保无污染、耐久性好且适用于边坡的土工袋,直接利用滑塌土体装袋进行修复。同时,可在修护后的边坡表层铺设专用土工袋植草,防止雨水冲刷,以保持边坡的长期稳定。该技术无须使用大型机械进场、灵活方便,尤其适用于小范围快速定点修复,是一项具有显著应用前景的膨胀土渠坡加固和快速修复技术,目前已在南水北调中线干线工程中进行了应用。然而,目前对土

收稿日期:2021-11-11 修回日期:2022-03-18 网络出版时间:2022-03-25

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20220324.1708.004.html

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFE0128900)

作者简介:刘斯宏(1964—),男,浙江江山人,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

通信作者:高从容(1996—),男,安徽宣城人,博士生,主要从事土石坝工程方面的研究。E-mail:congonggao@hhu.edu.cn

工袋修复体的抗滑稳定性还未有相关研究。为此,针对土工袋修复膨胀土边坡可能发生的滑动形式,对土工袋修复体的抗滑稳定性计算方法进行理论推导,进行土工袋袋体层间和袋土之间的摩擦试验,并将试验结果应用于土工袋修复膨胀土边坡的抗滑稳定性分析,以验证土工袋修复膨胀土边坡的效果。

1 土工袋修复膨胀土边坡抗滑稳定性分析

土工袋按照一定的规则排列在开挖处理后的滑坡床上,堆积起来的土工袋在原滑坡体处形成一个修复体。表层铺设一层生态袋,用于保护土工袋修复体。土工袋修复膨胀土浅层滑坡的示意图见图 1。由于设计时生态袋不作为结构体,因此一般情况下不考虑其对整体边坡稳定性的影响。土工袋修复

体与原坡土体或土工袋与土工袋之间形成了天然的滑动面,土工袋修复体滑动破坏的可能模式有两种:一种是整个土工袋修复体沿底面土体滑出,见图 2(a);另一种是土工袋修复体层间发生滑动,见图 2(b)。

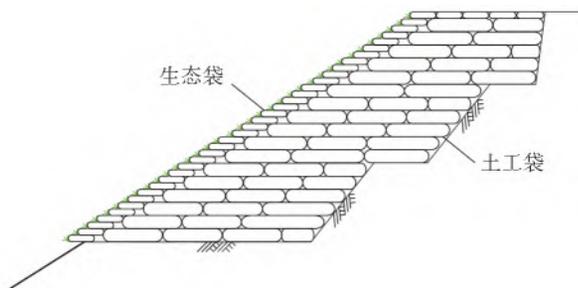


图 1 土工袋修复膨胀土浅层滑坡
Fig. 1 Schematic view of the expansive soil slope repaired with soilbags

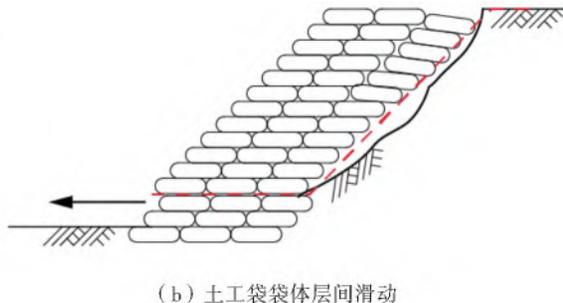
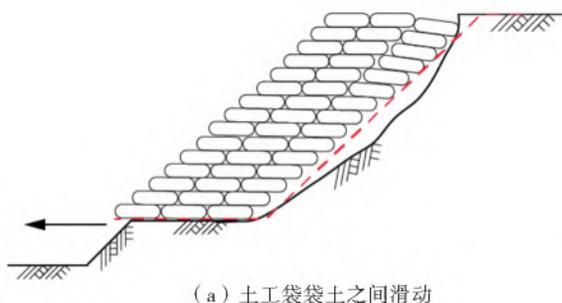


图 2 土工袋修复体滑动破坏形式

Fig. 2 Schematic view of the sliding failure modes of the expansive soil slope repaired with soilbags

针对图 2(a)所示滑动形式分析土工袋修复体抗滑稳定性。假设土工袋修复体为一整体,整体滑动面由修复体底部与后缘两个与土体接触面组成。基于土工袋修复体作为整体的假设,在稳定性分析时,将滑动面之上的土工袋修复体部分视为一个刚性体,单独对其进行受力分析,求出土工袋修复体和坡后缘之间的相互作用力,然后基于极限平衡法分析土工袋修复体的整体抗滑稳定性。

将土工袋修复体作为一个隔离体进行受力分

析,见图 3。由静力平衡条件可得如下平衡方程:

$$N_1 + N_2 \cos\theta + T_2 \sin\theta - G = 0 \tag{1}$$

$$T_1 + T_2 \cos\theta - N_2 \sin\theta = 0 \tag{2}$$

式中: N_1 为土工袋修复体与底面之间的法向作用力, kN; T_1 为土工袋修复体与底面土体之间的摩擦力, kN; N_2 为土工袋修复体与坡后缘之间的法向作用力, kN; T_2 为土工袋修复体与坡后缘土体之间的摩擦力, kN; G 为土工袋修复体的自重, kN; θ 为土工袋修复体与坡后缘之间界面与水平面的夹角, ($^\circ$)。

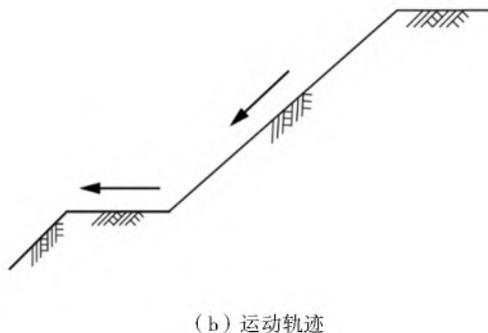
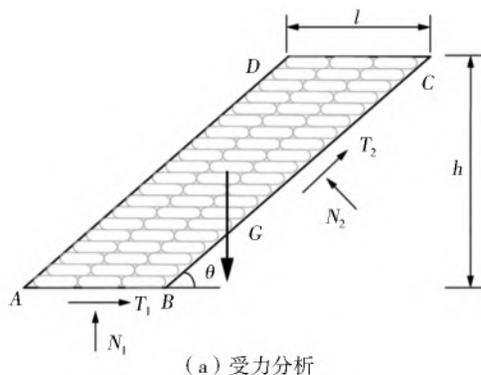


图 3 土工袋修复体整体滑动受力分析及运动轨迹

Fig. 3 Force analysis and motion trajectory of the expansive soil slope repaired with soilbags

单一安全系数法是水利和土木工程中最常用的方法^[21-22],为了使提出的边坡抗滑稳定计算方法,在工程设计时更容易被工程师所使用。引入土工袋修复体抗滑稳定安全因数 F_s ,同时假定 AB 与 BC 段土工袋修复体与土体间的摩擦因数分别为 μ_1 与 μ_2 ,则 AB 与 BC 段滑动面的法向力与切向摩擦力间的关系为

$$T_1 = \frac{\mu_1 N_1}{F_s} \quad (3)$$

$$T_2 = \frac{\mu_2 N_2}{F_s} \quad (4)$$

将式(3)、式(4)代入式(1)、式(2)中可得

$$N_1 + N_2 \cos\theta + \frac{\mu_2 N_2}{F_s} \sin\theta - G = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\mu_1 N_1}{F_s} + \frac{\mu_2 N_2}{F_s} \cos\theta - N_2 \sin\theta = 0 \quad (6)$$

假设 F_s 已知,可求解得到 N_1 与 N_2 为

$$N_1 = \frac{G(\sin\theta - \mu_2 \cos\theta / F_s)}{\sin\theta + \mu_1 \cos\theta / F_s - \mu_2 \cos\theta / F_s + \mu_1 \mu_2 \sin\theta / F_s^2} \quad (7)$$

$$N_2 = \frac{G\mu_1 / F_s}{\sin\theta + \mu_1 \cos\theta / F_s - \mu_2 \cos\theta / F_s + \mu_1 \mu_2 \sin\theta / F_s^2} \quad (8)$$

AB 段竖向压力分布实际上接近于三角形分布,合力 N_1 距 B 点约 $l/3$,但土工袋修复体作为一个整体,AB 段长度较短,且 B 点所受竖向压力较小,为简化计算假定 N_1 作用在 AB 中点处。土工袋边坡 CB 段土压力沿深度方向应该近似于梯形分布,但有学者^[23]指出,边坡土压力在水位线以下受到孔隙水影响而有所降低。因此, N_2 实际作用点位置距 CB 段中点较近,可以视为作用在 CB 段中点处。根据此假定,隔离体所受的力对 AB 中点求弯矩可得

$$\frac{h}{2} G \cot\theta - \frac{l}{2} \frac{\mu_2 N_2}{F_s} \sin\theta - N_2 \left(\frac{h}{2 \sin\theta} + \frac{l \cos\theta}{2} \right) = 0 \quad (9)$$

式中: h 、 l 分别为土工袋修复体的高度和宽度, m。

将式(7)和(8)代入式(9)可得

$$F_s = \frac{h\mu_1 + l\mu_1 \cos\theta \sin\theta + h(\mu_2 - \mu_1) \cos^2\theta}{h \cot\theta \sin^2\theta} \quad (10)$$

对于图 2(b)所示滑动形式,采用同样的方法分析土工袋修复体的抗滑稳定性,得到其抗滑稳定安全系数 F_s 的表达式为

$$F_s = \frac{h_y \mu_3 + l \mu_3 \cos\theta \sin\theta + h_y (\mu_2 - \mu_3) \cos^2\theta}{h_y \cot\theta \sin^2\theta} \quad (11)$$

式中: μ_3 为假定土工袋修复体中土工袋与土工袋之间的摩擦因数; h_y 为潜在层间滑移面以上土工袋修复体的高度, m。

在式(10)和式(11)中,土工袋修复体底部与土体间的摩擦因数 μ_1 以及土工袋与土工袋之间的摩擦因数 μ_3 应根据摩擦试验确定。土工袋修复体后缘(BC 段)与土体间的摩擦因数 μ_2 取值是一个较为复杂的问题,它是土工袋修复体与膨胀土开挖坡面的接触摩擦,在实验室很难模拟现场条件开展摩擦试验,建议按普通挡墙背摩擦角的方法近似取值,即 $\mu_2 = \tan(0.5\varphi)$, φ 为膨胀土摩擦角, ($^\circ$)。

2 土工袋摩擦试验

从土工袋修复膨胀土边坡抗滑稳定性分析可以看出,土工袋袋体层间摩擦与袋土之间摩擦是土工袋修复膨胀土边坡抗滑稳定性计算中应该考虑的关键因素,因此开展一系列土工袋摩擦试验,分别研究不同砾石含量袋内膨胀土、不同坡高(竖向压重)、不同排列方式以及运行环境(水上或水下)对土工袋层间摩擦特性的影响,以及土工袋与膨胀土之间的摩擦特性。

土工袋摩擦试验装置见图 4。该装置主要由水平拉伸、竖向加载以及控制系统组成。竖向加载系统采用压力加载速率控制,最大加载压力为 1 000 kN;水平拉伸系统采用位移速率进行控制;量测系统与控制台均布置在控制系统。本项目中竖向加载系统采用 0.1 kN/s 速率进行加载,水平拉伸系统采用 2 mm/min 速率进行拉伸。为减少竖向加载系统与加载板间的摩擦力,在加载系统和加载板之间放置了装有滚轮的钢板。



图 4 土工袋摩擦试验装置

Fig. 4 Photo of friction tests on soilbags

试验所用膨胀土取自南水北调中线河南叶县段附近走马岭地区,其基本物理力学性质见表 1。所采用的土工袋大小为 60 cm×40 cm×10 cm(长×宽×高),土工编织袋原材料为聚丙烯(PP),每平方米重量为 100 g,拉力试验测试得到的经、纬向拉力强

度分别为 20 kN/m 与 17 kN/m,经纬向伸长率为 18%。

表 1 膨胀土基本物理力学性质

Tab. 1 Basic index properties of the tested expansive soil

物理力学参数	参数值
重度	2.70
液限/%	70.8
塑限/%	26.3
最优含水率/%	21.7
最大干密度/(g·cm ⁻³)	1.60
自由膨胀率/%	64

2.1 土工袋袋体层间摩擦

2.1.1 竖向压重影响

膨胀土装袋之前对结块的风干膨胀土进行了简单的压碎,压碎后的土体粒径范围为 0~5 cm。假设边坡坡比为 1:2.5,土工袋修复假设最多使用 6 列,则土工袋第三列到第六列所受竖向应力分别为 19.2、25.6、32.0、38.4 kPa,见图 5。为研究不同坡高(竖向压重)对土工袋层间摩擦特性的影响,分别对以上竖向应力取整进行 20、25、32、40 kPa 的土工袋袋装膨胀土层间摩擦试验,试验结果见图 6。不同竖向压力对应的层间摩擦因数分别为 0.703、0.708、0.711 和 0.714。可以看出随着竖向压力增大,土工袋层间摩擦因数也略有增大。

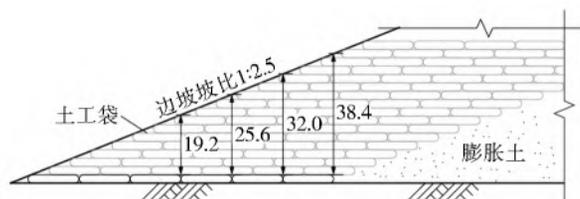


图 5 不同列数土工袋承受的工作应力(单位:kPa)

Fig. 5 Vertical stresses acting on the soilbags in the expansive soil slope

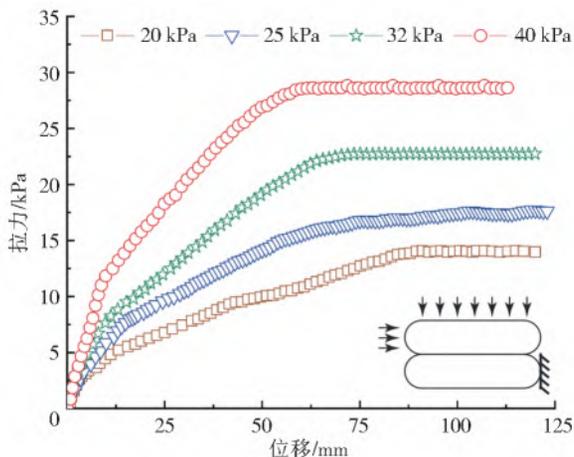


图 6 不同竖向压重土工袋袋体层间摩擦试验结果

Fig. 6 Result of friction tests on soilbags at different vertical stresses

土工袋层间摩擦因数随竖向压力增大是由于土工袋为柔性体,上下袋体中的块状膨胀土使得土工袋袋体层间形成了咬合作用(图 7)^[24],当竖向压力增大时,土工袋袋体间咬合作用有所增大,导致了层间摩擦因数有所增大。

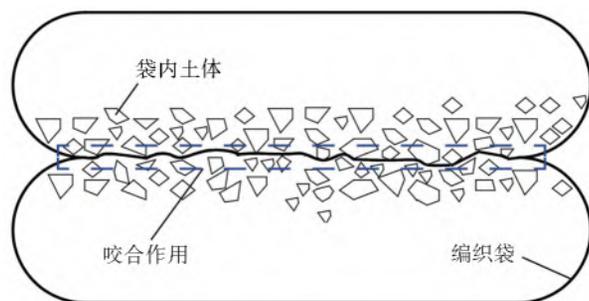


图 7 土工袋袋体层间咬合作用示意图

Fig. 7 Schematic view of interlocking between two soilbags

2.1.2 砾石含量影响

现场开挖的膨胀土可能掺杂不同粒径和不同含量的砾石,为研究砾石粒径和含量对袋装结块膨胀土土工袋袋体层间摩擦的影响,进行土工袋摩擦试验见表 2。

表 2 砾石含量影响下的土工袋摩擦试验

Tab. 2 Friction tests on soilbags under the influence of gravel content

编号	砾石粒径/cm	砾石含量/%
FG1		0
FG2-1		10
FG2-2	6~8	20
FG2-3		35
FG3-1		10
FG3-2	4~6	20

竖向应力为 40 kPa 袋装不同含量的 4~6 cm 和 6~8 cm 砾石土工袋袋体层间摩擦试验结果见图 8。可以看出,随着砾石含量的增多,初始剪切刚度有所增长,这是因为砾石刚度比土体大,砾石的存在一定程度上增加了土体的刚度。计算得到竖向压重为 40 kPa 情况下,4~6 cm 砾石含量为 10%、20% 和 35% 时的土工袋袋体层间摩擦因数分别为 0.714、0.735 和 0.754,6~8 cm 砾石含量为 10% 和 20% 时摩擦因数分别为 0.714 和 0.755。可以看出随着碎石含量增多,土工袋袋体层间摩擦因数也随着增大。这是由于砾石粒径较大,增大了土工袋袋体层间的咬合作用。

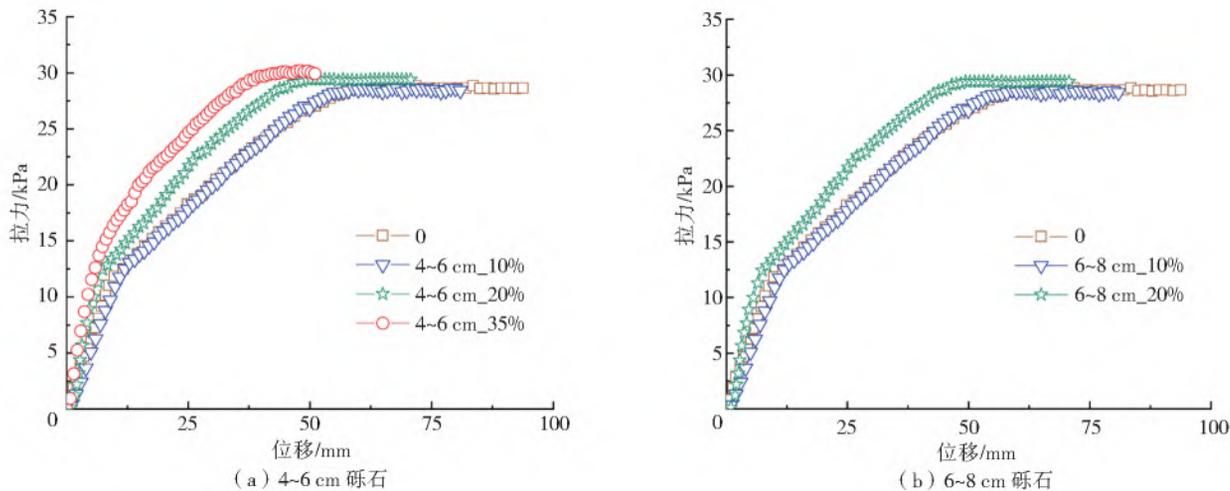


图8 袋装不同砾石含量的土工袋袋体层间摩擦试验结果
Fig. 8 Result of friction tests on soilbags with gravel of different contents

2.1.3 排列方式影响

土工袋排列方式主要包括4种:层叠无缝排列;横向交错排列;纵向交错排列;纵横十字交错排列。

不同排列方式见图9。刘斯宏等^[24]发现十字交错排列方式的层间摩擦因数最大,因此实际施工时,要求上、下层土工袋为纵横十字交错,见图10。



图9 土工袋上下层4种不同排列方式
Fig. 9 Four interlayer arrangements of soilbags

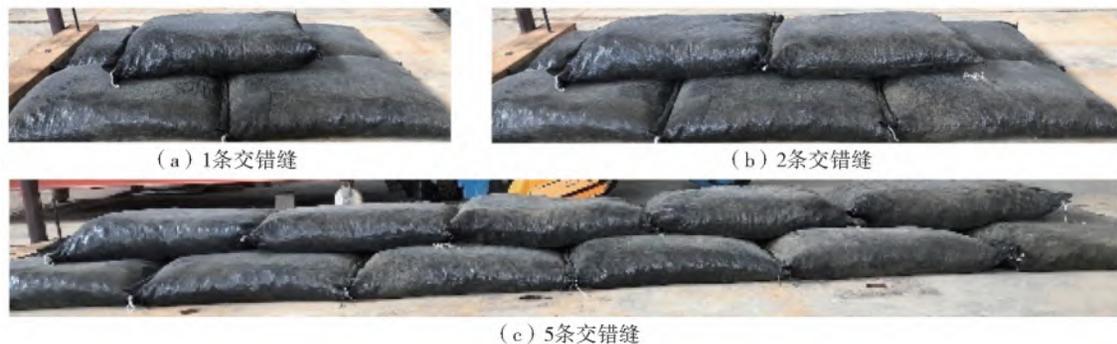


图10 不同交错缝排列方式下的土工袋袋体层间摩擦试验
Fig. 10 Friction tests on soilbags with different kinds of arrangements

为模拟实际施工,分别开展竖向应力为40 kPa情况下的1、2、3、4和5条交错缝的土工袋袋体层间摩擦试验。图10为1、2、5条交错缝的摩擦试验现场照片。试验时,在上层土工袋顶面进行加载,同时拉动上层末端土工袋进行直剪试验。图11以土工袋层叠无缝排列的层间摩擦试验为例,介绍由配重块、液压拉力装置、位移计等组成的试验装置,所有土工袋摩擦试验均使用此装置完成,试验结果见表3。

从表3可以看出上、下层土工袋十字交错排列后,层间等效摩擦因数较层叠无交错缝排列增大,且交错缝的个数越多,层间等效摩擦因数越大。其原因是当具有柔性的上层土工袋骑跨在下层两个土工袋接触缝上时,在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,从而形成一种增大层间摩擦阻力的嵌固作用^[25],且随竖向荷载的增大而增强,见图12。



图 11 土工袋袋体层间摩擦试验

Fig. 11 Friction tests on soilbags

数约为 0.901,较干燥情况下有所降低(干燥情况下十字交错缝排列的土工袋层间摩擦因数为 0.920),这是由于水的润滑作用使编织袋本身之间的摩擦作用减小,进而导致了土工袋层间摩擦作用减小。

2.2 土工袋袋土之间摩擦

土工袋与底部土层的接触摩擦也会影响整个膨胀土边坡的稳定性。室内试验时,将土工袋放入模型框中,并保证土体表面平整。下部模型框固定不动,上部土工袋施加 40 kPa 的竖向应力,并以 2 mm/min 的速度张拉上部土工袋,见图 14。结果表明,土工袋袋土摩擦因数为 0.784。再将土工袋与膨胀土浸没在水中,进行试验,得到浸水环境下土工袋袋土摩擦因数为 0.703,两组试验与土工袋袋体层间摩擦因数近似相等。



图 14 土工袋袋土之间摩擦试验

Fig. 14 Photo of friction tests on soilbag and soil

表 3 不同交错缝排列方式下的土工袋摩擦试验
Tab. 3 Friction tests on soilbags with different kinds of arrangements

排列方式	摩擦因数
无交错缝	0.714
1 条交错缝	0.920
2 条交错缝	1.021
3 条交错缝	1.052
4 条交错缝	1.076
5 条交错缝	1.159

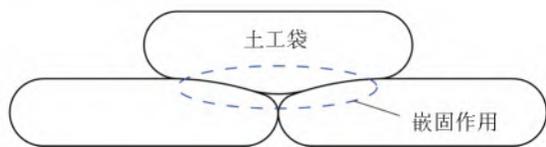


图 12 土工袋袋体层间嵌固作用

Fig. 12 Schematic view of the insertion of stacked soilbags

2.1.4 运行环境影响

由于在实际工程中,土工袋有可能浸泡于水下^[26],因此,进行浸水条件下 1 条交错缝排列的土工袋层间摩擦试验,见图 13。下层土工袋浸泡于水中,配重块置于加载板上提供竖向均布荷载,再采用液压装置水平拉动上层土工袋。

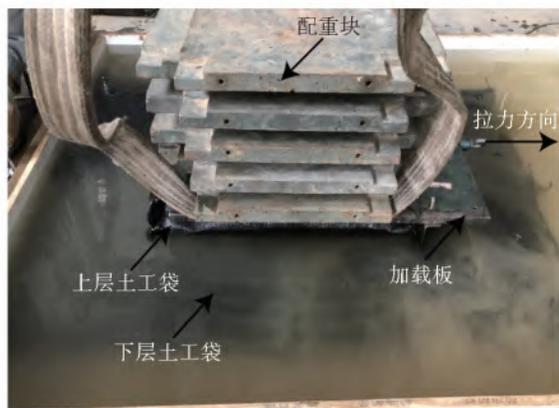


图 13 土工袋袋体层间水下摩擦试验

Fig. 13 Photo of the underwater friction test on soilbags

3 土工袋修复膨胀土边坡抗滑稳定性算例

采用第 1 节土工袋修复体抗滑稳定性分析方法和第 2 节得到的土工袋袋体层间和袋土之间摩擦因数,对南水北调中线工程中土工袋修复膨胀土边坡案例进行分析。计算案例具体工况为:所用土工袋尺寸为 40 cm×60 cm×10 cm,后缘开挖后保证土工袋长度方向与河道方向垂直摆放 3 列。修复体宽度 l 为 1.8 m,高度 h 为 3 m,坡比 1:2.5。现场膨胀土摩擦角由室内直剪试验获取,试验前对所取膨胀土去除腐化植物和石块,风干、研磨后过 2 mm 筛子,然后制作成与现场压实度一致的膨胀土试样进行直剪试验,测得其摩擦角为 25°。

现场土工袋为十字交错排列,其袋体层间摩擦因数取浸水时十字交错排列值 0.901,土工袋袋土间取浸水时摩擦因数 0.703。通过土工袋修复体抗滑稳定性分析方法得到土工袋修复体发生图 2(a)所示的滑动形式的安全因数为 1.25。土工袋修复体高度为 h ,假设土工袋潜在层间滑动面为坡底或距坡底分别为 $h/4$ 、 $h/2$ 、 $3h/4$,进行稳定性分析后得

试验结果表明,浸水时土工袋袋体层间摩擦因

出相应的安全因数分别为 1.48 和 1.67、2.04、3.16。发生图 2(b)所示的滑动形式的安全系数为 1.48。因此修复体最小安全因数为 $1.25 > 1$, 可见土工袋修复膨胀土边坡具有很好的抗滑稳定性。

4 结 论

通过理论推导,建立了土工袋修复体的抗滑稳定性计算公式,进行了土工袋摩擦试验,研究了不同袋内材料、土工袋排列方式以及运行环境(水上或水下)等条件下的土工袋袋体层间和袋土之间的摩擦特性,主要结论如下:

土工袋袋体层间摩擦受袋内材料及排列方式的影响。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,导致袋体层间摩擦作用增大。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,也会增大袋体层间摩擦作用。

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,土工袋袋体层间以及土工袋袋土之间的摩擦作用变小。

通过土工袋修复膨胀土边坡抗滑稳定性算例得知,两种滑动形式的安全因数分别达到 1.48 与 1.25,证明了土工袋是修复膨胀土边坡局部破坏的一条有效途径。

参考文献(References):

[1] 缪林昌,仲晓晨,殷宗泽,等. 膨胀土的强度与含水量的关系[J]. 岩土力学,1999(2):71-75. (MIU L C, ZHONG X C, YIN Z Z, et al. The relationship between strength and water content of expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999(2):71-75. (in Chinese)) DOI:10.16285/j.rsm.1999.02.016.

[2] 方瑾瑾,杨小林,冯以鑫,等. 干湿循环后膨胀土力学特性的真三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2021,40(5):1043-1055. (FANG J J, YANG X L, FENG Y X, et al. True triaxial experimental study on mechanical properties of expansive soils after drying and wetting cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021,40(5):1043-1055. (in Chinese)) DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2020.0902.

[3] ALBRECHT B A, BENSON C H. Effect of desiccation on compacted natural clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(1): 67-75.

[4] 朱豪,王柳江,刘斯宏,等. 南阳膨胀土膨胀力特性试验[J]. 南水北调与水利科技,2011.9(5):11-14 (ZHU H, WANG L J, LIU S H, et al. Experimental study of the swelling force of Nanyang expansive soils [J].

South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011. 9(5):11-14. (in Chinese)) DOI:10.3724/SP.J.1201.2011.05011.

- [5] 汪时机,杨振北,李贤,等. 干湿交替下膨胀土裂隙演化与强度衰减规律试验研究[J]. 农业工程学报,2021,37(5):113-122. (WANG S J, YANG Z B, LI X, et al. Experimental study on crack evolution and strength attenuation of expansive soil under wetting-drying cycles [J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(5):113-122. (in Chinese)) DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.05.013.
- [6] 蔡正银,陈皓,黄英豪,等. 考虑干湿循环作用的膨胀土渠道边坡破坏机理研究[J]. 岩土工程学报,2019,41(11):1977-1982. (CAI Z Y, CHEN H, HUANG Y H, et al. Failure mechanism of canal slopes of expansive soils considering action of wetting-drying cycles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(11): 1977-1982. (in Chinese)) DOI: 10.11779/CJGE201911001.
- [7] 邓铭江,蔡正银,朱洵,等. 北疆渠道膨胀土边坡破坏机制及加固措施[J]. 岩土工程学报,2020,42(S2):50-55. (DENG M J, CAI Z Y, ZHU X, et al. Failure mechanism and reinforcement measures of shallow slopes of expansive soils in northern Xinjiang [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(S2): 50-55. (in Chinese)) DOI:10.11779/CJGE2020S2009.
- [8] 陆定杰,陈善雄,罗红明,等. 南阳膨胀土渠道滑坡破坏特征与演化机制研究[J]. 岩土力学,2014,35(1):189-196. (LU D J, CHEN S X, LUO H M, et al. Study of failure characteristics and evolution mechanism of canal slope of Nanyang expansive soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 189-196. (in Chinese)) DOI:10.16285/j.rsm.2014.01.030.
- [9] 张雨灼,王柳江,刘斯宏,等. 干湿循环下膨胀土边坡响应的模型试验[J]. 郑州大学学报(工学版),2015,36(6):114-118. (ZHANG Y Z, WANG L J, LIU S H. Model test on the performance of the expansive soil slope during wetting-drying cycles [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2015, 36(6):114-118. (in Chinese) DOI:10.3969/j.iss.1671-6833.2015.06.023.
- [10] 陈强,韩军,刘自楷,等. 武汉绕城高速公路生态防护膨胀土边坡失稳的几种形式及加固处理[J]. 岩石力学与工程学报,2006(S2):4040-4045. (CHEN Q, HAN J, LIU Z K, et al. Several failure modes and treatment of ecological protection of expansive soil slope in expressway around Wuhan [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006(S2): 4040-4045. (in Chinese))

- [11] 李东森,夏熙临,陈丛丛,等. 石灰、水泥及砂改性膨胀土工程特性的试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2011,9(4):25-27,46. (LI D S,XIA X L,CHEN C C, et al. Experimental study on engineering characteristics of expansive soils modified with lime, cement and sand[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011,9(4):25-27,46. (in Chinese)) DOI:10.3724/SP.J.1201.2011.04025.
- [12] MATSUOKA H, LIU S H. A new earth reinforcement method using soilbags[M]. A. A. Balkema Publishers-Taylor & Francis, London, 2005.
- [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 S H, MATSUOKA H. A new earth reinforcement method by soilbags [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1665-1670. (in Chinese)) DOI:10.16285/j.rsm.2007.08.033.
- [14] 丁万涛,雷胜友. 加筋膨胀土不同布筋型式三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1147-1150, 1156. (DING W T, LEI S Y. Triaxial tests on reinforced expansive soil under different reinforced modes [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1147-1150, 1156. (in Chinese)) DOI:10.16285/j.rsm.2010.04.044.
- [15] 江学辉,吴珺华,彭明,等. 土袋技术加固膨胀土边坡数值模拟研究[J]. 江西理工大学学报, 2013, 34(1): 28-32. (JIANG X H, WU J H, PENG M, et al. Study on mechanism and numerical simulation of strengthening expansive soil with soil bags [J]. Journal of Jiangxi University of Science and Technology, 2013, 34(1):28-32. (in Chinese)) DOI:10.13265/j.cnki.jxlgdxxb.2013.01.008.
- [16] 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 S H, WANG Y S. Application of new geotechnologies to South-to-North Water Transfer Project[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(8): 61-66. (in Chinese)) DOI:10.13928/j.cnki.wrahe.2009.08.00.
- [17] 刘斯宏,汪易森,朱克生,等. 有荷条件下南阳膨胀土强度试验及其应用[J]. 水利学报, 2010, 41(3): 361-367. (LIU S H, WANG Y S, ZHU K S, et al. Experimental study on strength characteristics of Nanyang expansive soil under loading and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(3): 361-367. (in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.2010.03.013.
- [18] 王钊,邱宗强,蔡松桃,等. 螺旋锚和土工合成材料修复膨胀土渠坡实例[J]. 南水北调与水利科技, 2007(5):127-131. (WANG Z, QIU Z Q, CAI S T, et al. A case history of application of FRP screw anchor and geosynthetics in repairing of canal slope of expansive soils[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2007(5): 127-131. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbqk.2007.05.014.
- [19] 赵旻,阳云华. 南阳盆地膨胀土工程特性研究[J]. 南水北调与水利科技, 2008(1): 163-166. (ZHAO M, YANG Y H. Engineering characteristics of expansive soil in Nanyang basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008(1): 163-166. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbqk.2008.01.040.
- [20] 龚壁卫,童军. 土工合成材料在南水北调膨胀岩渠坡加固中的应用[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(11): 81-84. (GONG B W, TONG J. Application of geosynthetic in expansive rock canal slope treatment in South to North Water Transfer Project[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(11):81-84. (in Chinese)).
- [21] 李广信. 岩土工程安全系数法稳定分析中的荷载与抗力[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(5): 918-925. (LI G X. Load and resistance in stability analysis of geotechnical engineering with safety factor method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(5): 918-925. (in Chinese)) DOI:10.11779/CJGE202105016.
- [22] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2003. (CHEN Z Y. Stability analysis of soil slope [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2003. (in Chinese)).
- [23] 卢廷浩,刘斯宏,陈亮,等. 土力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2010. (LU T H, LIU S H, CHEN L, et al. Soil Mechanics [M]. Beijing: China Higher Education Press, 2010. (in Chinese)).
- [24] 樊科伟,刘斯宏,廖洁,等. 袋装石土工袋剪切力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(2): 477-484. (FAN K W, LIU S H, LIAO J. et al. Experimental study on shearing characteristics of pebbles-filled soil-bags [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(2): 477-484. (in Chinese)) DOI:10.16285/j.rsm.2019.0309.
- [25] 刘斯宏,樊科伟,陈笑林,等. 土工袋层间摩擦特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(10): 1874-1880. (LIU S H, FAN K W, CHEN X L, et al. Experimental studies on interface friction characteristics of soil-bags [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(10): 1874-1880. (in Chinese)) DOI:10.11779/CJG20160017.
- [26] 刘斯宏,白福青,汪易森,等. 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):54-58,129. (LIU S H, BAI F Q, WANG Y S, et al. Experimental study on wetting-induced deformation and strength characteristics of soilbag filled with expansive soil[J]. South-to-North Water Trans-

fers and Water Science & Technology, 2009, 7(6): 54-58, 129. (in Chinese)) DOI: 10. 3969. j. issn. 1672-1683. 2009. 06. 012.

Sliding stability analysis of soilbags-repaired expansive soil slope and experimental study on friction characteristics of soilbags

LIU Sihong¹, GAO Congrong¹, CHENG Dehu², LIAO Jie¹, FAN Kewei³

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Construction and Administration Bureau of South-to-North Water Transfer Middle Route Project,

Beijing 100038, China; 3. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Soilbags can enhance the strength and restrict the swelling deformation of the expansive soil, and the assembly of soilbags on the expansive soil slope acts as an overburden can avoid the collapse of expansive soil slope during operation period. It has been proved that the soilbag layer arranged on the slope can effectively retard the moisture movement into the underlying expansive soil/rock slope and can be regarded as a reinforcement layer to take effect of restraining the expansion and contraction of expansive soils. It is a promising method to repair the failed expansive soil slopes by the use of soilbags. Unlike other methods such as chemical and mechanical stabilization, when dealing with shallow slope failure, the collapsed expansive soils can be directly filled into bags, and large construction machines are not required for the repairing work. It is particularly suitable for repairing the expansive soil channel slope on a small scale during the operation of the project as it is very flexible and convenient. A method to analyze the sliding stability of the soilbags-repaired expansive soil slope was proposed by introducing a single safety factor. And, a series of laboratory tests were conducted to study the frictional characteristics of stacked soilbags with different filling materials under different inter-layered arrangements of soilbags and the applied vertical stresses. Different filled materials refer to 10%, 20%, and 30% of the gravel content and different gravel particle size in the expansive soil. The inter-layered arrangements of soilbags mainly include four kinds. The influence of the water on the interlayer friction of soilbags was also investigated. The results show that the interlayer frictional coefficient between the vertically stacked soilbags is around 0.714, and it can increase up to 0.920 for the staggered soilbags owing to the interlocking effect. When soilbags are soaked in water, the interlayer friction coefficient between the staggered soilbags will decrease to 0.901 owing to the lubrication of water. The case study on a failed expansive channel slope in the South-to-North Water Transfer Project showed that the proposed stability analysis method based on the limit equilibrium of the soilbags-repaired assembly is appropriate for the design of a soilbags-repaired expansive soil channel slope.

Key words: soilbag; expansive soil slope; sliding stability; friction test; stability analysis