

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.06.013

袋装膨胀土组合体渗透特性大型模型试验

刘斯宏¹, 鲁洋¹, 张勇敢¹, 张呈斌², 程德虎³

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122;
3. 南水北调中线干线建设管理局, 北京 100038)

摘要: 为探究袋装膨胀土组合体的渗透演化规律, 研制了大型渗透试验模型箱, 针对土工袋排列方式、袋体缝间填土、渗透水流方向和渗透水头大小等实际修复工程关注的主要因素开展渗透试验。试验结果表明: 袋装膨胀土组合体的水平向渗透系数大于竖向渗透系数, 入渗的水分能够沿土工袋水平层间缝隙快速排出, 不易进入下卧层的压实膨胀土渠坡; 袋装膨胀土组合体的渗透性主要取决于袋间缝隙的大小, 排列方式对袋装膨胀土组合体结构渗透性的影响实质是改变了袋间缝隙的数量和形状大小; 袋装膨胀土组合体的袋间缝隙填土后, 竖向的渗透系数变化较小, 而水平向的渗透系数明显减小; 袋装膨胀土组合体在实际运行时, 若不在缝间填土, 则对水平向层间排水有利。

关键词: 膨胀土; 土工袋; 渗透特性; 袋间缝隙; 模型试验

中图分类号: TU43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2022)06-0101-07

Large-scale model test on permeability characteristics of soilbags infilled with expansive soils

LIU Sihong¹, LU Yang¹, ZHANG Yonggan¹, ZHANG Chengbin², CHENG Dehu³
(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Powerchina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China;
3. Construction Administration Bureau of the Middle Route of the South-to-North Water Transfer Project, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to explore the permeability characteristics of soilbags infilled with expansive soils, a large-scale permeability-test model box was developed. The permeability test was carried out according to the arrangement pattern of soilbags, water flow direction, water head and interlayer filling conditions. The experimental result showed that the horizontal permeability coefficient is greater than the vertical permeability coefficient. The infiltration water could be quickly discharged along the gap between the horizontal layers of soilbags, so that it was not easy to infiltrate into the compacted underlying layer of the expansive soil canal slopes. After filling the gaps between bags with expansive soils, the vertical permeability coefficient changed slightly, while the horizontal permeability coefficient decreased obviously. The permeability of soilbags infilled with expansive soils mainly depends on the size of the gaps. The effect of the soilbag arrangement on the permeability is essentially attributed to the changing of the gap number and shape. In practical, it is expected to provide more preferential flow paths along the horizontal direction if no compacted soils are infilled inside the gaps between soilbags during the actual construction conditions.

Key words: expansive soil; soilbags; permeability characteristics; gaps between soilbags; model test

膨胀土含有亲水性黏土矿物蒙脱石和伊利石, 具有强水敏性及胀缩性, 对环境变化非常敏感, 由其引发的工程灾害一直是困扰岩土工程界的重大问题^[1-4]。受自然气候的影响, 膨胀土边坡土体的含水量变化会引起土体膨胀收缩及土体软化等现象, 容易导致边坡发生失稳破坏^[5-8], 因此, 控制膨胀土边坡内部含水率的变化是防治膨胀土工程灾害的一种有效手段, 而土工合成材料可以有效减少膨胀土的干缩湿胀变形, 减小外界水分变化对膨胀土的影响^[9-13]。

土工袋作为一种新型的土工加筋技术, 针对土工袋加固膨胀土边坡的作用机理和效果方面已有较多研究。刘斯宏等^[14-15]提出使用土工袋处理膨胀土边坡的加固方法, 利用土工袋的张力增加袋内土体的附加黏

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFE0128900); 国家自然科学基金(52109123)

作者简介: 刘斯宏(1964—), 男, 教授, 博士, 主要从事土石坝工程、土工袋技术和水工岩土研究。E-mail: sihongliu@hhu.edu.cn

通信作者: 鲁洋(1991—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事水工岩土和特殊岩土体力学研究。E-mail: luy@hhu.edu.cn

引用本文: 刘斯宏, 鲁洋, 张勇敢, 等. 袋装膨胀土组合体渗透特性大型模型试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(6): 101-107.

LIU Sihong, LU Yang, ZHANG Yonggan, et al. Large-scale model test on permeability characteristics of soilbags infilled with expansive soils[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(6): 101-107.

聚力,从而限制膨胀土遇水后的膨胀变形,并开展了浸水变形和膨胀力等室内试验,得出土工袋浸水膨胀后会出现侧向变形,降低内部土体密度,从而降低膨胀势能发挥的结论。随后,刘斯宏等^[16]对土工袋处理膨胀土边坡的压重效果进行了论证,结合抗剪强度试验结果,得出经土工袋处理后边坡稳定安全系数提高了18.7%的结论。此外,施工期的现场试验也验证了土工袋用于处理膨胀土渠坡时,在抑制渠坡膨胀和减小侧向变形方面具有良好的效果^[17]。在南水北调工程运行期,中线工程叶县段曾发生了局部渠段膨胀土边坡变形、裂缝等问题,危及工程运行安全,最终选择采用土工袋换填技术成功对变形体进行治理,显示了土工袋技术在膨胀土渠坡修复方面的潜在优势^[18]。

在实际工程运行过程中,渠道边坡在水位升降、降雨入渗等条件下的稳定性与土工袋组合体的渗透特性紧密相关^[17,19],然而,关于土工袋组合体渗透特性方面的认识还远落后于工程实践,这主要是由于规范建议的室内常规渗透试验方法在测试土工袋组合体渗透特性时还存在一定的局限性。渠坡土工袋垫层是一种复杂结构组合体,而非均质单元体,无法通过简单的室内单元试验揭示其渗透规律,有必要研制专门的大型渗透模型试验装置。

本文设计并制作了土工袋渗透试验模型箱,开展袋装膨胀土组合体大型渗透试验,研究不同土工袋的排列方式、水流方向、层间填土、渗透水头等因素对袋装膨胀土组合体渗透特性的影响,并分析其作用机理,以为土工袋修复膨胀土边坡的设计提供参考。

1 试验装置、材料与方案

1.1 试验装置

袋装膨胀土组合体大型渗透试验所用的模型装置为自主加工研制,如图1所示。模型箱的主体采用2 cm厚的有机玻璃板焊接而成,箱体尺寸为240 cm×120 cm×100 cm(长×宽×高),外部采用不锈钢方钢焊接框架加固。在箱体内部焊接两块PVC板用以划分进水室、试样室和出水室,在PVC板上均匀打通直径为2 cm的圆孔用以过水,过水区域高度为40 cm。在实际工程中,缝隙间均进行了压实处理,在渗透水流的作用下,可能发生局部淤堵-部分流失-再淤堵等现象,但总体不会发生细颗粒流失。因此,当研究土工袋缝间填土的影响时,为了更加接近真实条件,除了常规的压实处理外,还在过水区域增设了孔径为1 mm的反滤网,以尽量减少试验进行过程中土工袋缝间压实土颗粒随水流的流失。此外,通过调节该模型箱进水口水箱的溢流高度,可以开展不同渗透水头条件下的渗透试验。为了进一步研究土工袋加固渠坡在水位涨落和雨水入渗等实际运行过程中渗透水流的方向性,揭示土工袋垫层在水平向和竖向渗透特性的各向异性,本次试验对模型箱进行了水平向和竖向渗透的统一设计,可以同时开展水平向和竖向渗透试验。



图1 大型渗透试验模型装置

Fig.1 Photo of the large-scale permeability-test apparatus

如图2(a)所示,开展水平向渗透试验时,顶部密封是试验成败的关键。为了密封试样室,用整块橡胶制作成不漏水的盒型橡胶垫置于试样之上。在橡胶垫与模型箱侧壁之间挤入适量的玻璃胶,再使用伸缩杆挤

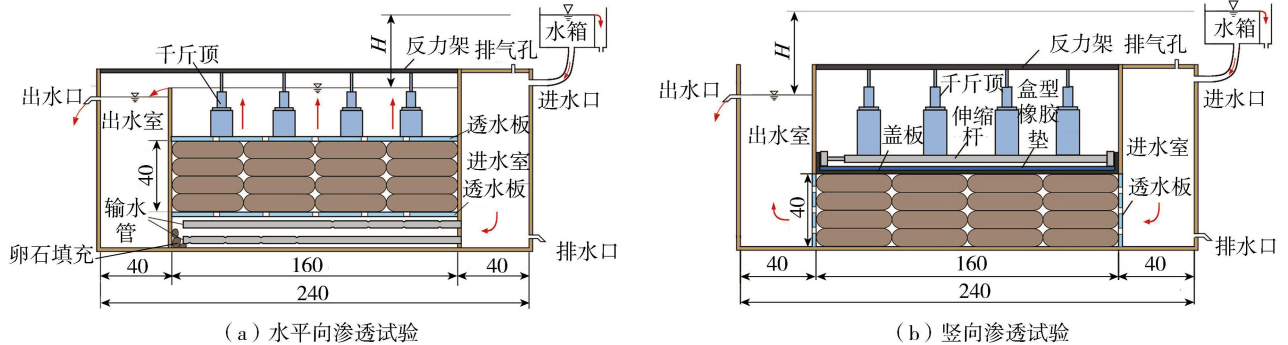


图2 大型渗透试验示意图(单位:cm)

Fig.2 Schematic diagram of large-scale permeability test(unit:cm)

压橡胶垫使得玻璃胶均匀地填充橡胶垫与侧壁之间的空隙用以密封。需要注意的是,在实际操作时,往往有必要在橡胶垫和伸缩杆接触面之间加塞木块进行过渡,以实现良好的密封效果。此外,由于试验过程中水压力较大,为了避免试样室的盖板被顶起,在模型箱外用工字钢和螺杆制作一个可拆卸的简易反力架,反力架与盖板之间用千斤顶加以支撑以确保盖板不发生位移。

竖向渗透试验模型装置由水平向渗透试验模型装置进一步改装而成,如图 2(b)所示。为了使试样室中的水流均匀地自下而上流动,用预制的打孔排水管将进室内的水流水平引进、竖直引出。排水管之间填充卵石,用以消减水流的冲击力。卵石上方放置带有反滤网的透水板,其上可布置试验试样。试样装填完后,再放置一块带有反滤网的透水板,透水板通过反力架和千斤顶加以固定。将试样室和出水室之间的 PVC 隔板上方截去一块,使得水流可溢流进入出水室,然后测量出水口流量,最后根据流量和时间计算渗透系数。

1.2 试验材料

试验所用的膨胀土取自南水北调中线工程区域的河南省平顶山市叶县。由于南水北调中线总干渠已处于运行期,输水渠道附近属于隔离保护区,在场地上取土并不现实,故膨胀土土样取自南水北调中线工程叶县段渠道右侧附近的走马岭地区。经测定,试验用土的比重为 2.70,塑限、液限分别为 26.3% 和 70.8%,塑性指数为 44.5,最大干密度和最优含水率分别为 1.60 g/cm³ 和 21.7%,自由膨胀率为 59%。级配曲线如图 3 所示。

试验用的土工袋为采用土工编织布缝制的袋体,其中土工布为聚丙烯(PP)材料,质量为 99.5 g/m²,经、纬向抗拉强度分别为 19.83 kN/m 和 18.99 kN/m,经、纬向伸长率分别约为 22.81% 和 20.82%。为了能够充分发挥袋体的张力作用,且使袋体易于砌筑成型,每个袋内填土的装填率设置约为 80%,其中,装填率定义为实际装入袋内土体的体积与在可以封口条件下装入袋内土体体积的比值。此外,为了模拟现场土工袋的交错排列方式,该试验共设计了 3 种大小规格的土工袋(均为压实后的尺寸):40 cm×40 cm×10 cm、40 cm×20 cm×10 cm 和 20 cm×20 cm×10 cm。

制样时,首先配置过 2 mm 分样筛的膨胀土至 21.7% 的初始含水率,接着将其装袋封口后置于相应的模具内,并用小型振动平板夯进行夯实,夯实后再用手持式抹光机进行局部修整,以减少由于袋子形状不规则对渗透系数的误差影响。压实后的袋内膨胀土干密度控制在 1.44 g/cm³ 左右(压实度约 90%),通过常规变水头渗透试验测得该干密度下膨胀土土样的渗透系数为 2.5×10⁻⁵ cm/s。

1.3 试验方案与步骤

袋装膨胀土组合体主要是由袋装膨胀土单元体经过一定的排列组合而成,其渗透特性势必与土工袋单元体以及袋子单元体间的缝隙结构(袋间缝隙)紧密相关。考虑到袋内土体已经过充分碾压压实,其渗透系数(2.5×10⁻⁵ cm/s)远小于实际组合体整体渗透系数的量级。可以推断,渠坡袋装膨胀土组合体渗透特性将主要由袋体间的缝隙结构控制,而缝隙结构主要取决于袋体的排列方式。此外,实际工程中,在袋子缝隙间也往往存在一定的填土,而其缝隙间是否填土也影响其渗透特性。因此,影响运行期渠坡袋装膨胀土组合体渗透系数的主要因素为土工袋的排列方式和层间是否填土。

为研究袋装膨胀土组合体排列方式的影响,如图 4 所示,设计了 4 种代表性排列方式,包括:竖直堆叠

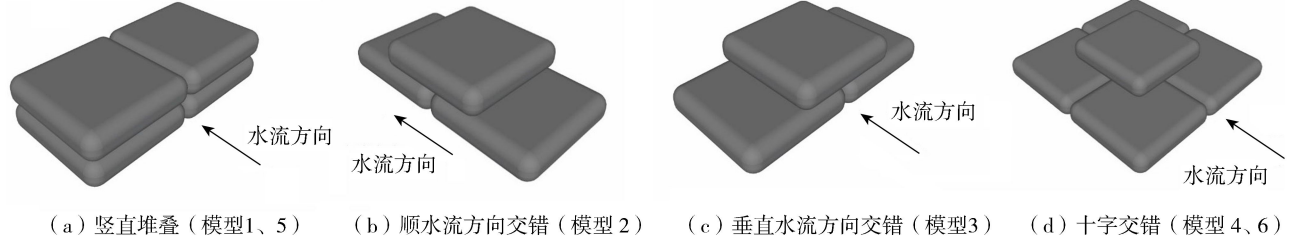


图 4 土工袋垫层的 4 种不同排列方式

Fig. 4 Four kinds of arrangement patterns of soilbags

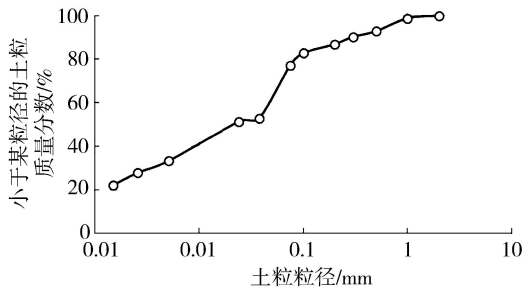


图 3 膨胀土级配曲线
Fig. 3 Gradation curve of expansive soil

(模型1)、顺水流方向交错(模型2)、垂直水流方向交错(模型3)和纵横十字交错(模型4),其排列结构如图4所示;进一步针对层叠无缝(模型5)和十字交错(模型6)的排列方式,增设对照组,在袋间缝隙进行土料回填处理,以研究袋间缝隙是否回填对渗透系数的影响。

试验时,为减小边壁接触渗透效应,首先在土工袋与试验箱体接触面涂抹凡士林以防止水从边壁流动而产生接触渗漏。接着,将土工袋逐个置于试样室中,土工袋袋间缝隙分别采用填土处理和不填土处理,填土处理时直接使用与袋中同样的膨胀土填充并压实,采用小型击实锤手工击实,压实后的干密度控制在 1.44 g/cm^3 左右(压实度约90%)。在开展水平渗透试验时,涉及模型箱顶部的密封,考虑最顶层袋装膨胀土上表面无法做到完全整平,存在接触渗透的可能。为减少该误差,采用土工膜反包细沙以填补土工袋上表面与模型装置之间的空隙,并在土工膜下部涂抹一层凡士林,然后再放置橡胶垫,用玻璃胶进行密封。橡胶垫上放置一硬板,其上用千斤顶进行加压固定。袋装膨胀土试样在装填前先放入饱和容器中浸泡约48 h,经测量袋内土体基本接近饱和,试样装填完后浸水约5 h后,再进行渗透试验。此外,为研究不同渗透水头对袋装膨胀土组合体渗透特性的影响,针对每组工况均设置两个常水头高度(1.0 m和0.5 m)进行渗透试验。试验时,首先打开储水塔不同高程处的排水口,待储水塔水箱保持稳定溢流及出水口稳定出流时开始计时,记录出水口出水量 Q 和出水时间 t ,每组试验均平行测试3次以确保渗透量的稳定性和试验结果的可靠性。

2 试验结果与分析

2.1 水平向渗透特性测定与分析

试验测得水平向渗透系数见图5(a)。从图5(a)可知,渗透系数最小的结构为模型6结构,在水头为1 m左右时渗透系数为 0.0412 cm/s ;渗透系数最大的结构为模型1,在水头为1 m左右时渗透系数为 0.779 cm/s ,比模型6大了1个数量级,比原状土体本身渗透系数 $2.5\times10^{-5}\text{ cm/s}$ 大了约4个数量级。

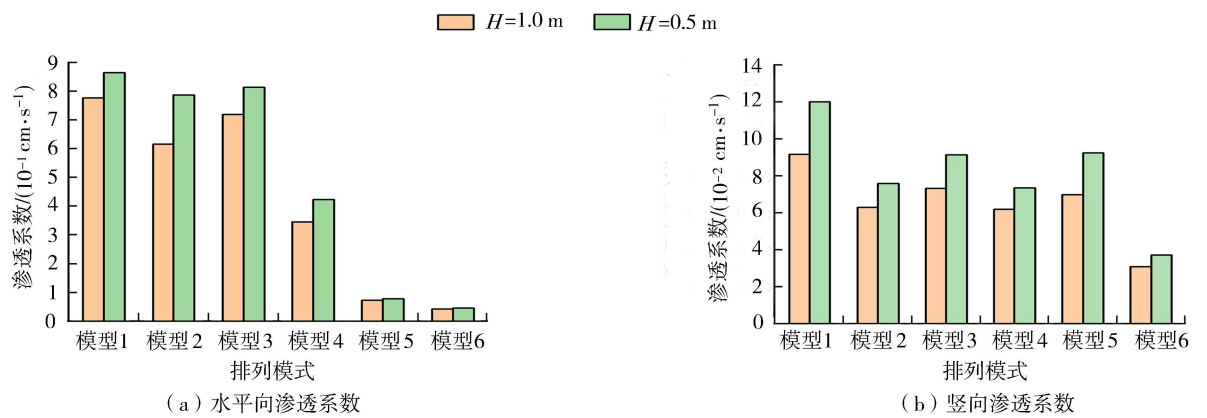


图5 不同工况下袋装膨胀土渗透系数

Fig.5 Horizontal and vertical permeability coefficients of soilbags infilled with expansive soils under different cases

a. 水头差大小对渗透系数的影响。在土工袋排列方式一定的情况下,无论袋体缝间有无填土,袋装膨胀土组合体在低水头工况下的顺水流向渗透系数总是大于高水头工况,即随着水压的增加,袋装膨胀土组合体顺水流方向的渗透系数会减小。这可能是由高水头工况下水流的沿程水头损失增加引起的,因为水力梯度增加后,土工袋缝隙间的水流流速也增加,沿程水头损失增加,从而导致渗透系数降低^[20]。

b. 土工袋排列方式对渗透系数的影响。本文研究了层叠无缝、顺水流方向交错、垂直水流方向交错和十字交错4种排列方式对渗透系数的影响。对比模型1和模型2可以发现,土工袋顺水流方向交错堆叠会降低渗透系数,这是因为交错排列后,渗透通道中出现了更多的节点,在节点处产生的局部水头损失增加,使得渗透系数减小。对比模型1和模型3可以发现,土工袋垂直水流方向交错堆叠会产生同样的效果,因为垂直水流方向交错后袋间◇形的渗透通道会变成△形,通道横截面面积减小,使得渗透系数降低。但是模型2相比模型3,其渗透系数的降低程度更大,这是因为在模型3的排列方式下,通道的横截面面积虽然减小,但其数量增多,使得渗透系数减小的幅度略小。当土工袋采用纵横十字交错方式进行堆叠(模型4)时,渗透系数比只有一个方向交错时大幅降低。这主要是由于十字交错时,土工袋的排列形式相当于模型2和模型3

的组合,绕渗路径较模型 2 和模型 3 更复杂,且袋体间的层间嵌固作用也更为显著,导致渗透系数更小。

c. 缝间填土对渗透系数的影响。对比模型 1 与模型 5、模型 4 与模型 6 可以发现,无论是竖直堆叠排列或十字交错排列,土工袋缝间填土后,水平向渗透系数均出现数量级的减小,其减小幅度远大于排列方式作用的结果,由此可见,袋体缝间填土与否对水平向渗透系数的影响很大。同时在试验过程中发现,由于层间填土无法被完全碾压密实,因此在水流的冲刷作用下,部分缝间的土颗粒会逐渐被带动,集中汇聚于出口处,土颗粒之间重新排列,使得局部土颗粒形成挤密效应。而在土颗粒发生移动后,靠近进水口处的渗透通道会被疏通。因此层间填土后的袋装膨胀土组合体会在水流的作用下形成一个复杂、不均匀的渗流通道。

2.2 竖向渗透特性测定与分析

试验测得袋装膨胀土组合体竖向渗透系数见图 5(b)。从图 5(b)可知,渗透系数最小的结构为模型 6 结构,在水头为 1 m 左右时渗透系数为 $3.07\times10^{-2}\text{cm/s}$;渗透系数最大的结构为模型 1 结构,在水头为 1 m 左右时渗透系数为 $9.16\times10^{-2}\text{cm/s}$,比模型 6 大了约 0.5 个数量级。

a. 水头差大小对渗透系数的影响。由图 5(b)可知,0.5 m 水头时袋装膨胀土组合体的竖向渗透系数明显大于 1 m 水头时的渗透系数,该试验结果与水平向渗透试验结果一致,可见水头是影响袋装膨胀土组合体渗透系数的一个重要因素,随着水压力的增加其渗透系数逐渐降低。

b. 土工袋排列方式对渗透系数的影响。对比层叠无缝和顺水流方向交错这两种排列方式下的竖向渗透系数可以发现,土工袋交错排列后其竖向渗透系数减小,这是由于交错之后上层土工袋会阻挡下层土工袋的袋间缝隙通道,使得竖向水流的渗透路径增长,沿程水头损失增加,因此渗透系数有所降低,如图 6(a)所示。对比顺水流方向交错和垂直水流方向交错两种排列方式下的竖向渗透系数,发现顺水流方向交错的渗透系数较小。土工袋在两种排列方式下竖向水流的渗径长度基本接近,但从俯视图中可以发现垂直水流排列方式下的袋间缝隙比顺水流方向交错排列时多,可见缝隙的数量是影响袋装膨胀土组合体渗透系数的因素之一。当土工袋十字交错排列时,其竖向渗透系数较垂直水流方向交错排列时有所减小,与顺水流方向交错排列时基本接近。从图 6(b)可以看出,十字交错排列后竖向水流的渗透路径会进一步增长,其渗透系数本该较顺水流方向交错排列时减小,但由于其袋间缝隙有所增加,因此竖向渗透系数的变化较顺水流方向交错排列时并不明显。

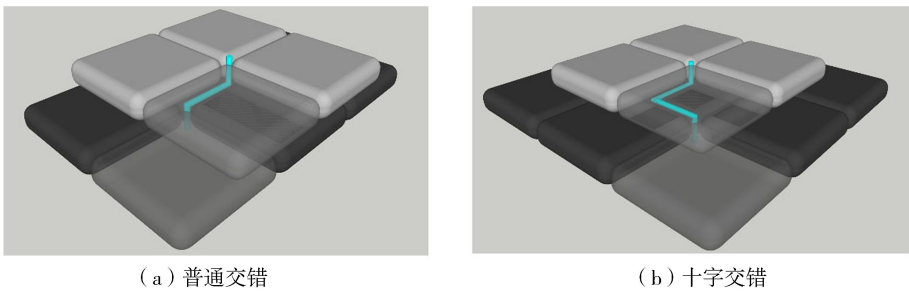


图 6 袋装膨胀土组合体竖向渗透路径示意图
Fig. 6 Schematic diagram of vertical flow paths of soilbag assembly

c. 缝间填土对渗透系数的影响。对比模型 1 和模型 5 两种工况下的试验结果不难发现:袋间缝隙回填土后袋装膨胀土组合体的竖向渗透系数有所降低,但从模型 1 到模型 2 的变化幅度来看,缝间填土对竖向渗透系数的影响不及排列方式的影响大。由此可见,对于袋装膨胀土组合体的竖向渗透性,渗透路径与袋间缝隙数量起主要的决定作用,缝隙间填土的作用效果相对较小。而在目前实际膨胀土渠坡的修复工程中,施工人员在填完一层土工袋后,往往习惯性地覆盖一薄层土体以填充袋体间的空隙,这种做法值得进一步商榷。一方面,土工袋袋间填土后,渗透系数较不填土的情况有所减小,阻碍了渠道运行过程中土工袋垫层内部的排水和超静孔隙水压力的消散,不利于渠坡的稳定;此外,回填土体也增加了施工工序和成本,不利于修复工程的经济性。

2.3 竖向与水平向渗透系数对比

为了便于观察,选取 1 m 水头工况下水平向与竖向渗透系数绘成柱状图(图 7)。从图 7 可以看出,若袋装膨胀土组合体的袋间缝隙不填土,则水平向渗透系数比竖向渗透系数明显较大。分析其原因,从图 4 和图

6 不难看出,水平向渗透时,袋装膨胀土组合体内的渗透系数较袋间缝隙要低很多,土工袋截面面积相对较小,袋间缝隙能起到很好的排水作用;而在竖向渗透时,土工袋截面面积占比增加,袋间缝隙所起的作用相对降低,导致测得的渗透系数比水平向的低。而当袋装膨胀土组合体的袋间缝隙填土后,水平向渗透系数比竖向渗透系数略大。竖向渗透系数较填土前变化较小,而水平向渗透系数较填土前明显减小,这是因为缝隙间的填土会堵塞水平向的渗透通道,使其渗透系数出现明显的变化,而对于竖向渗透路径,由于土工袋自身已起到一定的阻水效果,因此缝隙间填土对其渗透系数的影响不明显。

袋装膨胀土组合体的渗透系数主要取决于袋体间的缝隙通道,用土工袋来处理膨胀土渠坡,在水位升降和降雨入渗等外界因素的影响下,由于水平向渗透系数大于竖向渗透系数,入渗的水分能够沿组合体水平层间缝隙很快流走,不易进入下卧层的压实膨胀土渠坡。

3 结 论

- a. 袋装膨胀土组合体的水平向渗透系数大于竖向渗透系数,用土工袋来处理膨胀土渠坡,在降雨等外界因素影响下,入渗的水分能够沿组合体水平层间缝隙很快流走,不易进入下卧层的压实膨胀土渠坡。
- b. 由于袋装膨胀土组合体内的渗透系数较小,袋装膨胀土组合体的渗透性主要取决于袋间缝隙的大小,通过组合体的流量由通过袋间缝隙的流量控制,因此排列方式对袋装膨胀土组合体渗透性影响的实质是改变了袋间缝隙的数量和形状的大小。
- c. 袋装膨胀土组合体在低水头工况下的渗透系数大于高水头工况,即随着水压的增加,土工袋组合体的渗透系数会减小,这是由高水头工况下水流的沿程水头损失增加引起的。
- d. 袋装膨胀土组合体的袋间缝隙填土后,其竖向渗透系数较填土前变化较小,而水平向渗透系数较填土前明显减小。袋装膨胀土组合体在实际运行时,若不在缝间填土,则对水平向层间排水有利。

参考文献:

[1] 蔡正银,朱锐,黄英豪,等. 冻融过程对膨胀土渠道边坡劣化模式的影响[J]. 水利学报,2020,51(8):915-923. (CAI Zhengyin,ZHU Rui,HUANG Yinghao,et al. Influences of freeze-thaw process on the deterioration mode of expansive soil canal slope[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2020,51(8):915-923. (in Chinese))

[2] 龚永康,陈亮,武广繁. 膨胀土裂隙电导特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2009,37(3):323-326. (GONG Yongkang, CHEN Liang,WU Guangfan. Electric conductance characteristics of fissures of expansive soil[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2009,37(3):323-326. (in Chinese))

[3] 袁俊平,陈剑. 膨胀土单向浸水膨胀时程特性试验与应用研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2003,31(5):547-551. (YUAN Junping,CHEN Jian. Experimental research on swelling characteristics of expansive soil under one-side immersion and its application[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2003,31(5):547-551. (in Chinese))

[4] 杨俊,童磊,张国栋,等. 干湿循环机制下风化砂改良膨胀土的收缩特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(2):150-155. (YANG Jun,TONG Lei,ZHANG Guodong,et al. Shrinkage characteristics of expansive soil improved with weathered sand through wet-dry cycles[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2015,43(2):150-155. (in Chinese))

[5] 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(增刊2):50-55. (DENG Mingjiang,CAI Zhengyin,ZHU Xun,et al. Failure mechanism and reinforcement measures of shallow slopes of expansive soils in Northern Xinjiang[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2020,42(Sup2):50-55. (in Chinese))

[6] 周葆春,陈志. 压实膨胀土非饱和渗水系数函数的密度与水力滞回效应[J]. 岩土工程学报,2019,41(10):1800-1808. (ZHOU Baochun,CHEN Zhi. Effects of density and hysteresis on hydraulic conductivity function of compacted expansive soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2019,41(10):1800-1808. (in Chinese))

[7] 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):

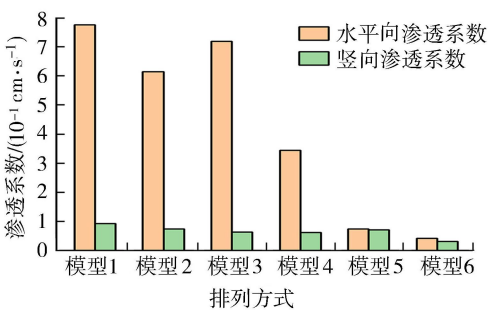


图7 水平向和竖向渗透系数对比关系(1m水头差)
Fig.7 Comparison of horizontal and vertical permeability coefficients under water head difference of one meter

- 1043-1055. (FANG Jinjin, YANG Xiaolin, FENG Yixin, 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))
- [8] 吴珺华,袁俊平,杨松,等. 干湿循环下膨胀土胀缩性能试验[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(1): 62-65. (WU Junhua, YUAN Junping, YANG Song, et al. Experimental study on swell-shrinking performance of expansive soil under wetting-drying cycles[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(1): 62-65. (in Chinese))
- [9] 吴宏伟,陈守义,庞宇威. 雨水入渗对非饱和土坡稳定性影响的参数研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(1): 2-15. (WU Hongwei, CHEN Shouyi, PANG Yuwei. Parametric study of effects of rain infiltration on unsaturated slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 20(1): 2-15. (in Chinese))
- [10] 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(中英文), 2007, 5(5): 127-131. (WANG Zhao, QIU Zongqiang, CAI Songtao, 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(5): 127-131. (in Chinese))
- [11] 张坤勇,徐娜,陈恕,等. 膨胀土完全软化强度指标试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(11): 1988-1995. (ZHANG Kunyong, XU Na, CHEN Shu, et al. Experimental study on fully softened shear strength of expansive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(11): 1988-1995. (in Chinese))
- [12] 殷宗泽,韦杰,袁俊平,等. 膨胀土边坡的失稳机理及其加固[J]. 水利学报, 2010, 41(1): 1-6. (YIN Zongze, WEI Jie, YUAN Junping, et al. Mechanism of slope slide of expansive soil and reinforcement for the slope[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(1): 1-6. (in Chinese))
- [13] 袁俊平,韩春雷,丁巍,等. 膨胀土边坡防护方案比选研究[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(1): 68-72. (YUAN Junping, HAN Chunlei, DING Wei, et al. Comparison study of four protection schemes for expansive soil slope[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(1): 68-72. (in Chinese))
- [14] 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 Transfer Project[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(8): 61-66. (in Chinese))
- [15] 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. (LIU Sihong, BAI Fuqing, WANG Yisen, et al. 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))
- [16] 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 Sihong, WANG Yisen, ZHU Kesheng, 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))
- [17] LIU Sihong, LU Yang, WENG Liping, et al. Field study of treatment for expansive soil/rock channel slope with soilbags[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2015, 43(4): 283-292.
- [18] 武运动. 土工袋填筑技术在边坡变形体处理中的应用[J]. 河南水利与南水北调, 2020(1): 82-84. (WU Yungong. Application of soilbags in the treatment of slope deformation[J]. Henan Water Conservancy and South-to-North Water Transfers, 2020(1): 82-84. (in Chinese))
- [19] 蒋希雁,陈宇宏,许梦然,等. 强降雨作用下生态袋护坡入渗规律模型试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2022(7): 1-9. (JIANG Xiyan, CHEN Yuhong, XU Mengran, et al. Model test on infiltration law of ecological bag slope protection under heavy rainfall[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(7): 1-9 (in Chinese))
- [20] 宋林辉,黄强,闫迪,等. 水力梯度对黏土渗透性影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(9): 1635-1641. (SONG Linhui, HUANG Qiang, YAN Di, et al. Experimental study on effect of hydraulic gradient on permeability of clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(9): 1635-1641. (in Chinese))

(收稿日期:2021-12-06 编辑:胡新宇)