

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.05.016

袋装膨胀土强度变形特性及其碾压质量控制与检测

张勇敢,刘斯宏,鲁 洋,方斌昕,廖 洁,张思钰

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:为研究袋装膨胀土的强度变形特性,开展了袋装膨胀土的无侧限抗压强度试验,分析了袋体加载过程中的应力-应变关系演化规律,并验证了落锤式弯沉仪用于袋装膨胀土施工质量检测的可行性,探讨了小型平板振动碾的碾压时间和小型滚筒振动碾的碾压遍数对袋装膨胀土回弹模量的影响。试验结果表明:土工袋用于处理膨胀土渠道边坡时只需通过适当碾压消除应力-应变关系曲线上初始变形模量“较低”的阶段即可;落锤式弯沉仪可用于袋装膨胀土的施工质量检测;建议膨胀土渠道边坡施工过程中采用小型滚筒振动碾对袋装膨胀土进行碾压,碾压遍数应不低于 4 遍。

关键词:土工袋;膨胀土;无侧限抗压强度试验;落锤式弯沉仪;质量控制与检测

中图分类号:TU531.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2022)05-0118-06

Strength and deformation characteristics, compaction quality control and inspection of soilbags filled with expansive soil

ZHANG Yonggan, LIU Sihong, LU Yang, FANG Binxin, LIAO Jie, ZHANG Siyu
(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to investigate the strength and deformation characteristics of soilbags filled with expansive soil, a series of unconfined compression strength tests were conducted. The evolution of the stress-strain relationship during the loading process of soilbags was subsequently analyzed. In addition, the feasibility of falling weight deflectometer used on the construction quality inspection of soilbags filled with expansive soil was verified, and the influence of the compaction duration of small-sized plate vibration roller and the number of compaction of small-sized drum vibration roller on the resilient modulus of soilbags filled with expansive soil was further investigated. The test results show that the initial stage with relatively low deformation modulus from the stress-strain curve can be successfully eliminated through simple compaction when soilbags are used for treating expansive soil channel slope. In addition, the falling weight deflectometer can be used to inspect the construction quality of soilbags filled with expansive soil. Furthermore, it is suggested that the soilbag filled with expansive soil should be compacted by use of a small-sized drum vibration roller during the construction on the expansive soil channel slope, with the number of compaction no less than 4 times.

Key words: soilbags; expansive soil; unconfined compressive strength test; falling weight deflectometer; quality control and inspection

膨胀土是一种易吸水膨胀、失水收缩的高塑性黏土,目前已在我国 20 多个省发现其分布^[1]。由于国家基础建设的需要,一大批长距离水利、交通工程不可避免地穿越了有“工程癌症”和“拦路虎”之称的膨胀土地段^[2-5]。以南水北调中线工程为例,渠道干线全长超过 1 400 km,其中膨胀土(岩)地段累计长度约 387 km,约占输水干线总长的 27%^[6]。为解决膨胀土地段的工程建设问题,全国多家科研、勘察、设计单位对膨胀土问题开展了深入研究,提出了土料换填^[7]、土料改性(添加水泥或者固化剂)^[8-9]和土料加筋(铺设土工格栅以及添加纤维等)^[10-11]等各种膨胀土处理方案。刘斯宏等^[12-14]通过对膨胀土工程特性及其影响因素的分析,首先提出了采用土工袋处理膨胀土渠道边坡的新思路,随后采用室内试验和现场试验验证了土工袋处理膨胀土渠道边坡的有效性,并进一步提出了土工袋处理膨胀土渠道边坡的稳定性计算分析方法。

基金项目:国家重点研发计划(2017YFE0128900);中央高校基本科研业务费专项(B220203029);江苏省研究生科研与实践创新计划(KYCX21_0511);国家自然科学基金(52109123)

作者简介:张勇敢(1995—),男,博士研究生,主要从事特殊土工程特性研究。E-mail:yonggan.zhang@hhu.edu.cn

通信作者:刘斯宏(1964—),男,教授,博士,主要从事土工袋及土石坝技术研究。E-mail:sihongliu@hhu.edu.cn

引用本文:张勇敢,刘斯宏,鲁洋,等.袋装膨胀土强度变形特性及其碾压质量控制与检测[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):118-123.

ZHANG Yonggan, LIU Sihong, LU Yang, et al. Strength and deformation characteristics, compaction quality control and inspection of soilbags filled with expansive soil [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(5): 118-123.

近年来土工袋技术已被应用于膨胀土渠道边坡的修复和保护^[15-16],但在施工期的质量控制和检测方面仍有以下 3 个关键问题未完全解决:①在工程设计阶段,目前土工袋用于膨胀土的渠道边坡填筑时仍选用压实度作为控制指标,压实度的大小一般参考相应规范中土体碾压时所需达到的压实度(一般压实度不小于 0.95)^[17]。事实上,袋装膨胀土的强度远超相同压实度下的纯膨胀土,而且土工袋用于处理膨胀土渠道边坡时其稳定性主要由堆叠袋体间的摩擦特性决定,受袋体的承载力影响较小^[18-22]。因此,选取一个合适的施工质量控制指标对于土工袋处理膨胀土渠道边坡的填筑尤其重要。②土工袋处理膨胀土渠道边坡的处理深度一般为 1~2 m^[15],但目前膨胀土渠道边坡修复时多数采用大型振动碾作为土工袋渠道边坡的碾压机械,考虑到工作面的大小和施工的便易性,选择小型碾压机械对袋装膨胀土进行碾压是值得探索的。③当碾压机械对袋装膨胀土碾压完成之后,施工质量检测一般采取压实度检测方法^[16],但是压实度检测耗时且需要大量人工操作,严重降低施工效率,寻找一种简洁、快速和高效的袋装膨胀土施工质量检测方法是迫切而必要的。

为解决以上问题,本文基于袋装膨胀土的无侧限抗压强度试验,研究袋装膨胀土在外荷载作用下的应力应变曲线变化规律,结合应力应变曲线特点提出袋装膨胀土填筑时的碾压质量控制指标,并进一步探讨落锤式弯沉仪(FWD)用于袋装膨胀土施工质量检测的可行性,提出可用于膨胀土渠道边坡施工的袋装膨胀土碾压机械及其碾压方案。

1 试验材料与试验方案

1.1 试验材料

试验所用膨胀土取自南水北调中线工程叶县段输水渠道工程现场,土料密封保存运回实验室后,依据 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》开展膨胀土的基本物理特性试验。试验结果表明:该膨胀土的最大干密度为 1.60 g/cm³,对应的最优含水率为 21.7%;土料塑限含水率为 26.3%,液限含水率为 70.8%,塑性指数为 44.5;土料自由膨胀率为 59%,属于弱膨胀土。此外,试验选用以聚丙烯(PP)为原材料的黑色土工编织袋,袋体每平方米质量为 100 g,平铺尺寸为 85 cm×50 cm。袋体经向抗拉强度为 22.7 kN/m,极限伸长率为 23.5%;纬向抗拉强度为 17.2 kN/m,极限伸长率为 22.1%。

1.2 试验方案

1.2.1 无侧限抗压强度试验

试验在河海大学自主研发的大型液压试验机上进行,试验装置主要由加载系统和控制系统两部分组成(图 1)。竖向加载系统最大荷载为 1 000 kN,最大位移为 1 000 mm,其中荷载传感器精度为±0.01%,位移传感器的精度为 0.1 mm。试验时采用应力式加载方式,加载速率为 1 kN/s。试验前先将风干膨胀土采用木槌适当敲碎,然后将初步破碎的风干土样通过带有 2 mm 筛网的粉碎机粉碎,土料粉碎后拌和均匀并采用保鲜膜包裹密封,静置 48 h 后取出部分土样测定其风干含水率。根据试验方案以及所得风干含水率将风干土料加水至试验目标含水率,随后装入密封袋中闷料 24 h 备用。

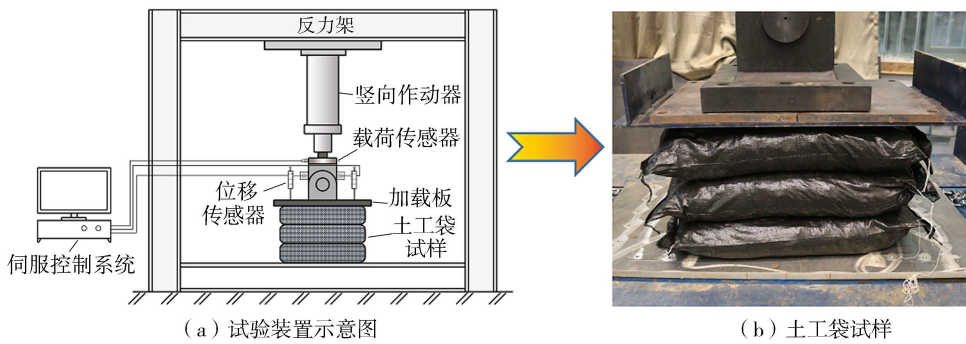


图 1 无侧限抗压强度试验

Fig.1 Unconfined compressive strength test

考虑南水北调中线工程叶县段输水渠道工程现场的膨胀土中存在部分大小不一的砾石,同时考虑土料含水率对土工袋装填难易程度和压实性能的影响,设计了表 1 所示的试验方案。其中,含水率 21.7% 为最优含水率;掺入的砾石粒径范围为 2~10 cm;为确保试验结果的准确性,各试验方案均开展 3 组平行试验,合

计制备 36 个土工袋试样。仅选取最优含水率和高于最优含水率的土料开展无侧限抗压强度试验主要是基于以下两点考虑:①在渠道边坡施工过程中,一般土料的含水率均控制在最优含水率附近;②土工袋不但可以用于正常施工过程中膨胀土的处理,也可以用作膨胀土渠道边坡滑坡破坏后的快速修复,而膨胀土渠道边坡的滑坡破坏一般发生在降雨期,此时可用于装填土工袋的土料其含水率明显高于最优含水率。此外,为减小加载板上、下刚性边界对袋装膨胀土强度变形特性的影响,每组试验均堆放 3 层土工袋,这种堆叠方式虽然与实际工程中的交错排列方式有一定的差异,但从土工袋单元体受力的角度来讲,这种排列方式的差异对袋装膨胀土抗压强度的影响几乎可以忽略,这是因为袋装膨胀土的抗压强度主要由袋内土体强度以及袋体的抗拉强度(即袋体可发挥的张力)决定^[12-13]。

1.2.2 袋装膨胀土碾压质量检测

FWD 是目前路面弯沉检测的最先进设备之一,具有检测速度快、精度高、无损等特点,因此在高速公路基层、土石坝等工程的施工质量检测中得到广泛应用^[23]。本文采用 FWD 检测袋装膨胀土的碾压质量。

2 试验结果与分析

2.1 无侧限抗压强度试验

袋装膨胀土在加载过程中,袋体与加载板之间的接触面面积会发生变化,因此试样加载过程中分别沿土工袋的长度和宽度方向布设了两个环向拉线式位移传感器,以实时监测袋体长度和宽度两个方向的周长变化。袋体加载过程中其竖向变形由加载装置自带的位移计实时记录。试验中的应力由实测竖向力除以接触面的实时校正面积所得,而应变则由竖向变形除以袋体初始高度得到。其中,袋体与加载板之间的实时接触面积基于以下两个基本假定确定:①土工袋在压缩过程中袋体始终保持长方体形态;②袋体沿长度和宽度两个方向的变形是均匀的(从严格意义上来说,这种假定是不完全准确的,这是因为在加载过程中土工袋各部位的变形并非完全均匀,进而导致加载后袋体形态不能呈现标准的长方体;但本文试验选用的土工袋尺寸较大,加载过程中土工袋侧边凸起和凹陷部位面积占加载接触面总面积的比例较小,因此计算误差可以满足工程要求,同时计算结果的准确性也显著优于未校正接触面面积)。实时接触面积计算公式为

$$S = l_1 l_2 = \frac{1}{4}(C_1 - 2h)(C_2 - 2h)$$
 (1)

其中 $l_1 = \frac{1}{2}C_1 - h$ $l_2 = \frac{1}{2}C_2 - h$

式中: S 为土工袋与加载板之间的实时接触面积; l_1 、 l_2 分别为土工袋长、宽方向的实时长度、宽度; C_1 、 C_2 分别为土工袋长、宽方向的实时周长; h 为土工袋实时高度。

图 2 给出了不同试验方案下袋装膨胀土的应力-应变关系曲线,可以看出:①压缩过程中,袋装膨胀土应力-应变关系曲线呈现上凹形态。加载初始阶段曲线斜率(变形模量)显著小于加载后期,这主要是因为加载初始阶段袋内土体的压缩占优势,当袋装膨胀土压缩到一定的变形后,土工袋张力的约束作用逐渐增强,导致袋体的变形模量增大;②在相同竖向应力作用下,由于砾石的不可压缩性,导致掺砾膨胀土土工袋的压缩变形比纯膨胀土土工袋要小,且袋内膨胀土含水率越低这种现象越明显;③袋内膨胀土的含水率越低,砾石的加入对提高土工袋变形模量的效果越明显,因此在施工时应尽可能选择含水率较低的土体。

表 1 袋装膨胀土无侧限抗压强度试验方案

Table 1 Unconfined compressive strength test scheme for soilbags filled with expansive soil

方案	含水率/%	掺砾量/%	填充率/%	装填质量/kg	装填后袋体尺寸/cm		
					长	宽	高
1	21.7	0	100	42.4	75.7	41.4	11.6
2	21.7	20	100	47.2	73.1	39.8	13.9
3	26.7	0	100	38.5	74.8	43.2	10.8
4	26.7	20	100	43.8	71.5	41.5	12.2

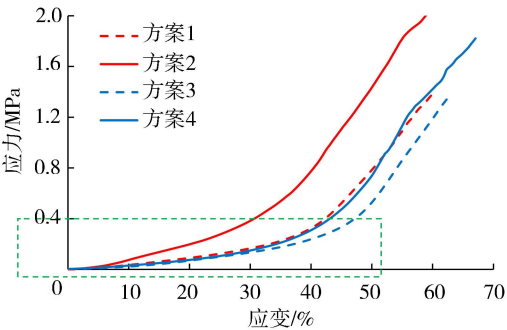


图 2 袋装膨胀土应力-应变关系曲线
Fig. 2 Stress-strain curves of soilbags filled with expansive soil

图 3 为试验加载结束时(对应于图 2 中应力-应变关系曲线结束点)各试验方案下土工袋袋体的破坏形态,可知未掺砾膨胀土土工袋表面平整无损,但袋体侧面出现胀裂,并且土体含水率越高其侧面胀裂现象越明显。此外,掺砾膨胀土土工袋除袋体侧面胀裂外,表面袋体有局部被砾石顶破,并且土体含水率越高破坏现象越严重。但从试验结果(图 2)可以看出,即使袋体侧面胀裂、表面有局部顶破,各试验方案下袋装膨胀土的竖向应力随着应变的增大仍然呈现出增长趋势,也就是说,即使土工袋袋体出现局部破损,袋体仍然能够对袋内土体起到良好的加筋作用。

从图 2 还可以看出,袋装膨胀土的应力-应变关系曲线存在一个显著的变形模量“较低”阶段(图 2 中绿色方框部分,其划分标准可参考图 4),在这一阶段,袋装膨胀土的变形模量随着应变的快速增加而缓慢增大,这与方斌昕等^[24-27]关于袋装砂土、袋装淤泥质土和袋装建渣的试验结果有显著的不同,主要原因是袋内填料的物理力学特性不同。事实上,对于土工袋处理的膨胀土渠道边坡,渠道边坡的稳定性受袋内土体强度的影响不大,而是取决于袋体与袋体之间的摩擦特性^[15,18-22]。此外,相对于无加筋的土体,不管土工袋加筋土体的初始压实度如何,其抗压强度可以轻易地超过 1 MPa,甚至达到更高,并且强度的大小主要与袋体材料所能提供的最大张力有关^[28-29]。因此,从保持膨胀土渠道边坡稳定性的角度来讲,袋装膨胀土在施工碾压时并不需要使袋内土体的压实度达到 0.95 及以上。然而,考虑到渠道边坡的使用功能,则要求袋装膨胀土施工完成后不能产生过大变形和沉降。因此,从施工的便易性和经济性两方面考虑,土工袋用于处理膨胀土渠道边坡时只需要通过适当碾压消除应力-应变关系曲线上初始变形模量“较低”的阶段即可。

2.2 基于 FWD 的袋装膨胀土碾压质量控制

2.2.1 FWD 用于袋装膨胀土碾压质量检测的可行性分析

FWD 虽然已成功应用于道路的施工质量检测,但在土工袋施工质量检测中尚未有使用先例。为验证 FWD 用于土工袋施工质量检测的有效性,采用大型万能试验机对方案 1 的 9 个初始状态相同的袋装膨胀土试样进行预压,预压应力分别选取为 20 kPa、40 kPa、80 kPa、120 kPa、180 kPa、250 kPa、400 kPa、600 kPa 和 800 kPa,随后采用 FWD 测定其回弹模量,结果如图 5 所示。由图 5 可知,袋装膨胀土的回弹模量随着预压应力的增加而单调增大,二者之间存在一一对应关系,因此可以采用回弹模量来表征袋装膨胀土所承受的预压应力。此外,从图 2 的试验结果可知,当预压应力达到 400 kPa 左右时,袋装膨胀土初始变形较大阶段(即图 2 中变形模量“较低”阶段)基本结束,对应的由 FWD 检测得到的回弹模量约为 27 MPa(图 5)。综合考虑袋装膨胀土的强度变形特性以及回弹模量随预压应力的变化规律,可以选取回弹模量 27 MPa 作为南水北调中线工程叶县段渠道边坡袋装膨胀土现场施工的碾压质量控制指标。

2.2.2 不同碾压机械碾压后袋装膨胀土回弹模量分析

a. 小型平板振动碾。在验证了 FWD 可用于袋装膨胀土的施工质量检测之后,采用小型平板振动碾(整

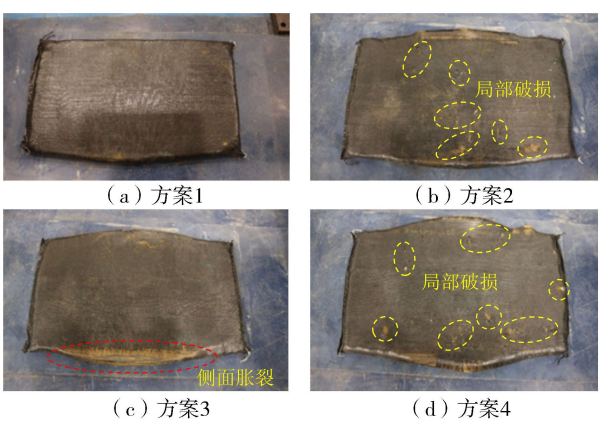


图 3 加载试验结束时土工袋袋体破坏形态
Fig.3 Failure pattern of soilbags at the end of loading

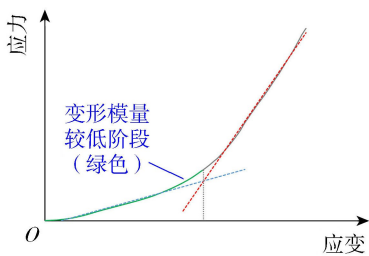


图 4 应力-应变关系曲线变形模量较低阶段划分示意图
Fig.4 Division diagram of lower deformation modulus stage in stress-strain curve

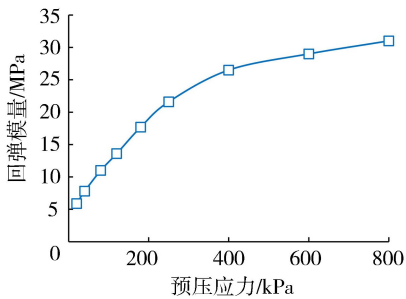


图 5 袋装膨胀土回弹模量与预压应力的关系曲线
Fig.5 Relationship curve between resilient modulus and compression stress of soilbags filled with expansive soil

机质量 80 kg,输出功率 5.5 kW,激振频率60 Hz,激振力约 16 kN)对初始状态相同的袋装膨胀土进行碾压,碾压时间分别为 1 min、2 min 和 3 min,随后采用 FWD 对碾压后的袋装膨胀土进行回弹模量检测,得到碾压 1 min、2 min、3 min 的袋装膨胀土回弹模量分别为 14.4 MPa、17.2 MPa 和 18.1 MPa。可见,随着碾压时间的增加,袋装膨胀土的回弹模量逐渐增大,但当碾压时间超过 2 min 后,回弹模量随碾压时间增加而增大的效果不再明显,碾压 3 min 后袋装膨胀土回弹模量与消除袋装膨胀土初始压缩变形较大阶段所需的回弹模量 27 MPa 仍存在一定差距。

b. 小型滚筒振动碾。在确认小型平板振动碾并不能满足碾压要求后,改用小型滚筒振动碾(整机质量 640 kg,动力型号为常柴 R180,激振力约30 kN)对袋装膨胀土进行了碾压,碾压遍数为 2 遍、4 遍和 6 遍,随后采用 FWD 对碾压后袋装膨胀土的回弹模量进行检测,得到碾压 2 遍、4 遍、6 遍的袋装膨胀土回弹模量分别为 16.0 MPa、26.1 MPa 和 39.1 MPa。可见,当小型滚筒振动碾的碾压次数达到 4 遍后,袋装膨胀土的回弹模量已经接近 27 MPa,碾压 6 遍后超过了消除袋体压缩过程中回弹模量较低阶段所需的 27 MPa。综合考虑碾压机械的效率和操作的便易性,建议膨胀土渠道施工过程中采用小型滚筒振动碾对袋装膨胀土进行碾压,碾压遍数应不低于 4 遍。

3 结 论

a. 将土工袋用于处理膨胀土渠道边坡时,施工碾压时不需要使袋内土体的压实度达到 0.95 及以上,只需通过适当碾压消除应力-应变关系曲线上初始变形模量“较低”的阶段即可。

b. 砾石的加入可以显著提高袋装膨胀土的变形模量,但是提高效果与袋内土体的含水率密切相关。

c. FWD 作为一种快速、简单和无损的施工质量检测技术,可用于袋装膨胀土的施工质量检测。

d. 将土工袋用于处理膨胀土渠道边坡时,建议施工过程中采用小型滚筒振动碾对袋装膨胀土进行碾压,碾压遍数应不低于 4 遍。

参考文献:

[1] 钮新强,蔡耀军,谢向荣,等. 膨胀土渠道处理技术[M]. 武汉:长江出版社,2016.

[2] 张勇敢,鲁洋,刘斯宏,等. 基于巴西劈裂试验的冻结膨胀土拉伸特性研究[J]. 岩土工程学报,2021,43(11): 2046-2054. (ZHANG Yonggan, LU Yang, LIU Sihong, et al. Experimental study on tensile strength of frozen expansive soils based on Brazilian splitting tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(11): 2046-2054. (in Chinese))

[3] 蔡正银,朱洵,黄英豪,等. 湿干冻融耦合循环作用下膨胀土裂隙演化规律[J]. 岩土工程学报,2019,41(8): 1381-1389. (CAI Zhengyin, ZHU Xun, HUANG Yinghao, et al. Evolution rules of fissures in expansive soils under cyclic action of coupling wetting-drying and freeze-thaw[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(8): 1381-1389. (in Chinese))

[4] LU Y, LIU S H, ALONSO E, et al. Volume changes and mechanical degradation of a compacted expansive soil under freeze-thaw cycles[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 157: 206-214.

[5] 马文鑫,张勇敢,刘斯宏,等. 干密度和温度对冻结膨胀土单轴压缩特性影响的试验研究[J]. 冰川冻土,2022,44(2): 515-523. (MA Wenxin, ZHANG Yonggan, LIU Sihong, et al. Experimental study on the influence of dry density and temperature on the uniaxial compression characteristics of frozen expansive soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(2): 515-523. (in Chinese))

[6] 程德虎,苏霞. 南水北调中线干线工程技术进展与需求[J]. 中国水利,2018(10): 24-27. (CHENG Dehu, SU Xia. Technical advancement and demand of Middle Route Scheme of South-to-North Water Diversion Project[J]. China Water Resources, 2018(10): 24-27. (in Chinese))

[7] 陈尚法,温世亿,冷星火,等. 南水北调中线一期工程膨胀土渠坡处理措施[J]. 人民长江,2010,41(16): 65-68. (CHEN Shangfa, WEN Shiyi, LENG Xinghuo, et al. Treatment measures for expansive-soil canal slope of Phase I Works of Middle Route Project of S-N Water Diversion[J]. Yangtze River, 2010, 41(16): 65-68. (in Chinese))

[8] LU Y, LIU S H, ZHANG Y G, et al. Freeze-thaw performance of a cement-treated expansive soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 170: 102926.

[9] DING L Q, VANAPALLI S K, ZOU W L, et al. Freeze-thaw and wetting-drying effects on the hydromechanical behavior of a stabilized expansive soil[J]. Construction and Building Materials, 2021, 275: 122162.

[10] ZHANG R, LONG M X, LAN T, et al. Stability analysis method of geogrid reinforced expansive soil slopes and its engineering application[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(7): 1965-1980.

[11] SOLTANI A,DENG A,TAHERI A. Swell-compression characteristics of a fiber-reinforced expansive soil[J]. Geotextiles and Geomembranes,2018,46(2):183-189.

[12] 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1):644-648. (LIU Sihong,WANG Yisen. Reinforcement mechanism of soilbags and its applications[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2007,38(Sup1):644-648. (in Chinese))

[13] 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 geotechniques to South-to-North Water Transfer Project[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2009,40(8):61-66. (in Chinese))

[14] LIU S H,BAI F Q,WANG Y S,et al. Treatment for expansive soil channel slope with soilbags[J]. Journal of Aerospace Engineering,2013,26(4):657-666.

[15] 李卓,范光亚,刘斯宏,等. 土工袋防渠道冻胀水-热-力耦合数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(5):408-417. (LI Zhuo,FAN Guangya,LIU Sihong,et al. Moisture-heat-stress coupled numerical simulation of soilbags preventing the frost heaving of channel[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2018,46(5):408-417. (in Chinese))

[16] 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,2020,49(1):82-84. (WU Yundong. Application of geobag filling technology in the treatment of slope deformation[J]. Henan Water Resources and South-to-North Water Diversion,2020,49(1):82-84. (in Chinese))

[17] 杨鹏,刘东海,刘强,等. 高填方推土机铺筑推平作业远程实时协同监控[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(6):559-566. (YANG Peng,LIU Donghai,LIU Qiang,et al. Real-time and collaborative monitoring of bulldozer paving and leveling for high filled embankment[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2021,49(6):559-566. (in Chinese))

[18] FAN K,LIU S H,CHENG Y P,et al. Effect of infilled materials and arrangements on shear characteristics of stacked soilbags[J]. Geosynthetics International,2020,27(6):662-670.

[19] WANG Y Q,LIU K,LI X,et al. Experimental and upper-bound study of the influence of soilbag tail length on the reinforcement effect in soil slopes[J]. Geotextiles and Geomembranes,2019,47(5):610-617.

[20] 朱俊高,汪森,黄维,等. 钢-土接触面位移与强度特性直剪试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(3):265-271. (ZHU Jungao,WANG Miao,HUANG Wei,et al. Experimental study on displacement and strength behavior of interface between soil and steel using direct shear test[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2021,49(3):265-271. (in Chinese))

[21] 陈爽,鲁洋,刘斯宏,等. 土工袋单元体循环剪切特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(2):98-104. (CHEN Shuang,LU Yang,LIU Sihong,et al. Experimental study on cyclic shear characteristics of single soilbag[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(2):98-104. (in Chinese))

[22] 王艳巧,李一雷,刘康,等. 土工袋排列方式对砂性土质边坡加固影响试验研究[J]. 岩土工程学报,2020,42(增刊2):208-213. (WANG Yanqiao,LI Yilei,LIU Kang,et al. Experimental study on influences of inter-layered arrangements of soilbags on reinforcement of sandy soil slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2020,42(Sup2):208-213. (in Chinese))

[23] 李跃军. 路基强度的快速无损检测、评价与控制研究[D]. 长沙:中南大学,2012.

[24] 方斌昕,刘斯宏,鲁洋,等. 土工袋竖向承载及循环压缩特性试验研究[J/OL]. 西南交通大学学报:1-9[2021-11-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20210414.1737.002.html>. (FANG Binxin,LIU Sihong,LU Yang,et al. Experimental study of bearing and vertically cyclic compression behaviors of soilbags[J/OL]. Journal of Southwest Jiaotong University:1-9[2021-11-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20210414.1737.002.html>. (in Chinese))

[25] 陈俊生,莫海鸿,刘叔灼,等. 土工模袋砂单轴抗压强度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(增刊1):2930-2935. (CHEN Junsheng,MO Haihong,LIU Shuzhuo,et al. Experimental study of uniaxial compressive strength on geomembrane bag with sand[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2014,33(Sup1):2930-2935. (in Chinese))

[26] 高军军,刘斯宏,白福清. 袋装淤泥土土工袋的强度变形研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2014,36(1):33-36. (GAO Junjun,LIU Sihong,BAI Fuqing. Experimental study of strength and deformation properties of soilbags filled with mud soil[J]. Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences),2014,36(1):33-36. (in Chinese))

[27] 文华,曹兴,邹娇丽,等. 建渣土工袋力学特性试验研究[J]. 浙江工业大学学报,2017,45(2):217-222. (WEN Hua,CAO Xing,ZOU Jiaoli,et al. An experimental study on the mechanical properties of geobags filled with construction waste[J]. Journal of Zhejiang University of Technology,2017,45(2):217-222. (in Chinese))

[28] 刘斯宏. 土工袋技术原理与实践[M]. 北京:科学出版社,2017.

[29] LIU S H,JIA F,SHEN C M,et al. Strength characteristics of soilbags under inclined loads[J]. Geotextiles and Geomembranes,2018,46(1):1-10.