

膨胀土边坡防护方案比选研究

袁俊平^{1,2}, 韩春雷^{1,2}, 丁巍^{1,2}, 王强林^{1,2}, 丁国权^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要:针对膨胀土边坡的防护问题,对土工膜、砂垫层、表砂层和水泥改性土4种防护方案进行室内模型试验,在膨胀土模型边坡干湿循环工况下,对比每种方案下模型边坡的膨胀变形、裂隙开展和含水率变化情况,讨论了各方案的防护效果及工程应用问题。结果表明:4种防护方案中,水泥改性土方案的防护效果最优;采用土工膜方案时应注意土工膜间的搭接处理;采用砂垫层方案时应根据气候条件确定合理的砂垫层厚度;表砂层方案不宜单独使用,可作为辅助措施;采用水泥改性土方案时,在保证防护层厚度的基础上应注意控制其压实度并做好养护工作。

关键词:膨胀土边坡;土工膜;砂垫层;表砂层;水泥改性土

中图分类号:TU413.6⁺2

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2017)01-0068-05

Comparison study of four protection schemes for expansive soil slope//YUAN Junping^{1,2}, HAN Chunlei^{1,2}, DING Wei^{1,2}, WANG Qianglin^{1,2}, DING Guoquan^{1,2} (1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: With the aim of protecting expansive soil slope, four kinds of protective schemes were chosen for laboratory model tests, including geo-membrane covering, sand cushion bedding, sand layer covering, and replacement with cement-treated soil. Drying-wetting cycles were carried out for slopes with different protective methods. During the cycles, the deformation of expansion, the development of cracks, and the variation of moisture content were monitored and compared among these slope models. The effectiveness of each protective method and corresponding application problems were discussed. The results show that the method of replacement with cement-treated soil is the best of these four methods. Furthermore, for geo-membrane, attention should be paid to processing the joint between two pieces of geo-membrane. For the method of sand cushion bedding, the thickness of the sand cushion should be adjusted according to the climate conditions. The sand layer covering should be taken as a supplementary measure rather than being used independently. When the method of replacement with cement-treated soil is used, attentions should be paid to guaranteeing the thickness, controlling the degree of compaction, and doing careful maintenance work.

Key words: expansive soil slope; geo-membrane; sand cushion; sand layer; cement-treated soil

膨胀土含有大量的蒙脱石和伊利石等强亲水性矿物,具有胀缩性、裂隙性和超固结性,压实膨胀土渗透性低,遇水易发生软化。因此,膨胀土滑坡常常具有浅层性、牵引性、平缓性、长期性和季节性等特点^[1]。降雨导致膨胀土边坡含水率增大以及吸力降低,抗剪强度随之降低,同时坡体膨胀变形,孔隙比增大进而出现软化现象,进一步降低了边坡的稳定性。降雨停止后,一些地区常伴随长期的干旱天气,受强烈蒸发作用边坡含水率急速下降,膨胀土收缩。经过湿胀干缩的边坡将出现大量裂隙,下次降雨时雨水通过这些裂隙快速渗入到边坡内部,可能

导致边坡沿裂隙面滑坡^[2]。研究表明,对膨胀土边坡的防护采用挡土墙、抗滑桩等被动方式不仅花费巨大,且往往难以保证其长期安全。从膨胀土边坡滑坡机理来看,主动防护方式宜成为首选防护措施^[3]。采用主动防护的主要思路是控制边坡内部含水率的变化,避免土体与周围环境进行水分交换,一方面防止土体因失水而引起裂隙发展,另一方面设置防渗和排水设施,及时将渗入坡体表层的水排出,避免降雨持续入渗,从而维持边坡的稳定。

南水北调中线工程总干渠全长1 200多km,穿越的膨胀土地区超过300km,膨胀土渠段约占总干

基金项目:国家自然科学基金(51378008);中央高校基本科研业务费专项(B15020060);“十二五”国家科技支撑计划(2011BAB10B04)

作者简介:袁俊平(1975—),男,副教授,博士,主要从事非饱和土和堤坝工程研究。E-mail:13815861109@163.com

通信作者:韩春雷(1989—),男,硕士,主要从事非饱和土和堤坝工程研究。E-mail:davinci08@163.com

渠总长的 27%。研究适用的防护方案,消除降雨对膨胀土边坡的危害,关系到整个南水北调工程能否安全运行^[4]。笔者依托国家“十二五”科技支撑计划项目的子课题“膨胀土渠道防渗排水技术”对 4 种不同的膨胀土边坡防护方案进行了室内模型试验,重点比较了其防护效果,以期为工程方案的选择和实施提供参考。

1 室内试验

1.1 防护方案选择

a. 土工膜方案。近几年,土工合成材料发展迅速^[5],土工膜作为其中的一种在工程中得到广泛应用,如在渠道底部铺设土工膜达到防渗目的等^[6]。南徐大道膨胀土边坡试验段采用土工膜覆盖,在降雨和蒸发环境下有效避免了坡内土体含水率的剧烈变化,使边坡土体长期处于非饱和状态,保持了较高的强度,维持了边坡的稳定性,而后将土工膜覆盖法应用于整个滑坡治理工程^[1]。因此,笔者首先考虑采用了土工膜方案作为膨胀土边坡坡顶防护方案。

b. 砂垫层方案和表砂层方案。随着吸力的增加,土的渗透系数减小,同一种土的非饱和渗透系数通常小于饱和渗透系数。不同种类土的渗透系数下降速率不同。一般地,粗粒土渗透系数的下降速率大于细粒土,因此,饱和状态下渗透性强的粗粒土在某一吸力下,其渗透性能反而较细粒土差,变得不容易透水。可以将非饱和土的这种渗透特性应用到边坡防渗当中。张家发等^[7]利用了非饱和粗粒土和细粒土渗透性大小随着吸力变化的特性,进行了兼有排水功能的双层结构边坡防护方案研究。史文娟等^[8]指出在黏土中设置粗砂层,可以减小毛细水上升高度,减缓土体蒸发。笔者将在坡顶表面设置粗砂层和在膨胀土以下一定深度设置粗砂层作为两种方案分别进行研究。

c. 水泥改性土方案。工程上将水泥、石灰等掺入到土中,在化学反应过程中与土生成结晶矿物,填充了土颗粒间的孔隙,使土的孔隙率减小,渗透性减弱,原土的强度大幅度增加^[9-13]。工程中有很多水泥改性土的应用实例,如渠道防渗,渠道边坡衬砌,水泥搅拌桩隔水帷幕等。将水泥改性土取代混凝土,利用了水泥改性土的低渗性和高强度特性,是一种相比于混凝土方案更加经济可行的方法。众所周知,将水泥掺入膨胀土后膨胀土失去膨胀性,因此,可将边坡表面的膨胀土翻晒后掺入水泥,铺于边坡表面压实,用来防止原膨胀土受到大气作用开裂或膨胀变形。

1.2 试验设计

试验在室内模型槽中进行,模型槽尺寸为 80 cm×40 cm×50 cm (长×宽×高)。先在模型槽中填满土料,再将其削成土坡,边坡形态和尺寸如图 1 所示。考虑边坡运行的不利条件,坡度设置成 60°的陡坡。模型槽中防护层的位置和厚度依据现场情况按照一定比例进行折减,具体数值见表 1。

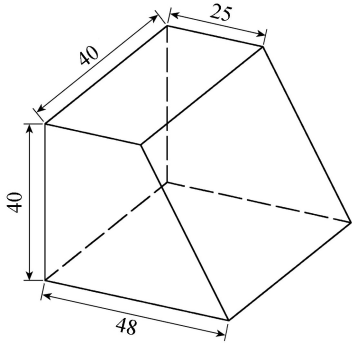


图 1 边坡形态示意图(单位:cm)

表 1 现场和室内试验各方案防护层位置和厚度

防护方案	现场试验		室内试验	
	位置(距离坡顶)/cm	厚度/cm	位置(距离坡顶)/cm	厚度/cm
土工膜	100	2	25	0.02~0.4
砂垫层	50	20	10	5
表砂层	0	20	0	5
水泥改性土	0	100	0	10

试验过程采用人工降雨和光照蒸发装置对边坡进行干湿循环。降雨强度约为 10 mm/h,相当于中雨;蒸发时保持土体表面温度约为 38℃。试验时,先人工降雨 1 h,静置 1 d 后,再持续光照蒸发 1 d,以此为一个干湿循环周期。试验过程拍照记录边坡的膨胀变形和裂隙开展情况,预埋含水率探头记录边坡内部含水率变化情况。

1.3 试验装置

试验中降雨装置采用针孔式降雨器,针孔孔径 1~2 mm,针孔间距 3~5 mm。相比于喷头式降雨器,前者不需要提供供水压力,结构简单,降雨范围适中。光照蒸发装置采用红外线灯。试验时,将 4 盏功率为 275 W 的红外线灯悬挂在边坡上方约 30 cm 高度,蒸发过程中观测边坡表面的温度,稳定在 38℃左右。用 EC-5 传感器记录试验过程中边坡内部不同深度处的含水率变化,EC-5 传感器埋在坡顶以下 5 cm、10 cm、15 cm、20 cm 和 30 cm 深度处,所测数据通过 EM50 采集器采集。

1.4 试验材料

试验土料取自南水北调中线工程现场淅川段,该土料的最大干密度为 1.63 g/cm³,相对密度为 2.75,液限为 45%,塑性指数为 21%,自由膨胀率为

90% ,综合判定所用土料属中强膨胀土。

土工膜由 2 层土工布和中间的薄膜组成,试验中所用的土工膜规格为 576 g/m^2 ,即每平方米质量为 576 g ,其断裂强度为 14 kN/m ,顶破强力为 2.8 kN ,撕破强力为 0.4 kN ,耐净水压强为 0.6 MPa ,渗透系数为 $1\times 10^{-11}\text{ cm/s}$ 。

砂垫层和表砂层采用级配良好、质地坚硬的中粗砂作为隔水排水垫层,中粗砂细度模数为 3.6 ,总含泥量(质量分数)为 1.1% ,粒径小于 0.2 mm 的颗粒质量分数为 3.7% 。

水泥改性土选用 42.5 号硅酸盐水泥,施工现场掺入量取 5% ,即每 100 g 膨胀土掺入 5 g 水泥,掺加水泥后水泥改性土的自由膨胀率小于 20% 。

2 结果分析

2.1 边坡膨胀变形与裂隙开展

观测不同防护方案下模型边坡的膨胀变形及裂隙开展情况。结果显示,经过 3 ~ 5 次干湿循环后,各边坡均不同程度地出现坡顶和坡面向外鼓胀的现象,个别方案边坡坡脚发生了局部滑坡破坏。图 2 是从模型槽侧面观测到的各方案边坡膨胀变形和裂隙开展情况的照片。图中用蓝色标记边坡坡面初始位置,用红色标记膨胀后坡面形态。

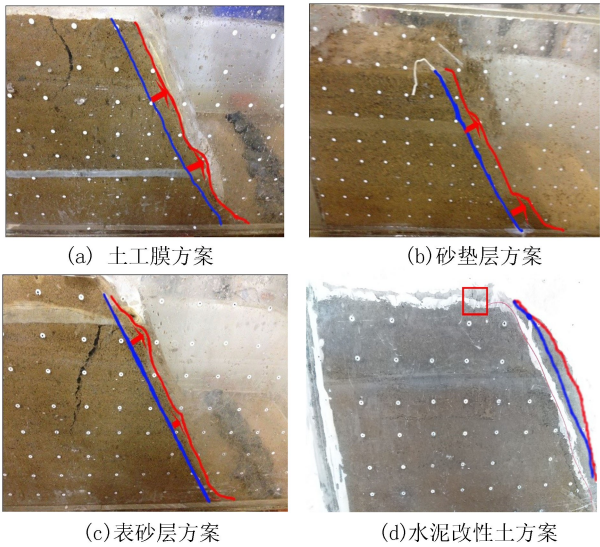


图 2 边坡最终膨胀变形量和裂隙开展情况

从图 2(a)可以看出,受膨胀力和下滑力共同作用,坡脚发生局部滑动,随着干湿循环的进行滑动区域有向上发展的趋势,膨胀位移越来越大,最终膨胀量约为 $2\sim 3\text{ cm}$ 。从边坡横剖面可观察到有竖向裂隙发育,裂隙随着干湿循环的进行向下延伸,5 次干湿循环后该裂隙深度约达 15 cm 。拆除模型坡时发现沿边坡走向分布有少量裂隙,边坡与模型槽侧壁间可见一定深度的贯通裂隙;土工膜以下土体未见

裂隙发育。

对于砂垫层方案(图 2(b)),第 3 次降雨后模型坡脚发生局部滑坡,完成 5 次干湿循环后坡脚处最大膨胀量约为 7 cm ,坡面平均膨胀量为 $3\sim 4\text{ cm}$ 。经历蒸发后坡顶可见密布的细小裂隙,但模型边坡拆除过程中,砂垫层下方膨胀土中未发现裂隙发育。

对于表砂层方案(图 2(c)),经历 3 次干湿循环后,模型边坡坡脚处发生局部破坏,随着干湿循环次数的增加,破坏区域逐渐向坡顶扩大,坡面膨胀位移也逐渐增大。5 次干湿循环后,坡肩位置膨胀量约为 $3\sim 4\text{ cm}$,略大于下部坡面。从边坡横剖面可以观察到 1 条倾斜的由坡肩指向边坡内部的裂隙,其开展深度约为 17 cm 。

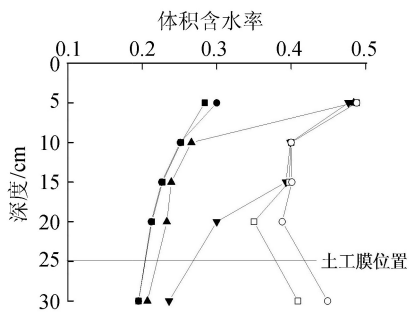
相比前 3 种防护方案,经历干湿循环后,采用水泥改性土方案(图 2(d))的模型边坡未见明显破坏,坡面的膨胀量相对最小,为 $1\sim 2\text{ cm}$;膨胀变形沿坡面较为均匀,变形后坡面基本仍保持在一个平面上。从边坡横剖面可观察到 1 条竖向裂隙,深度约 5 cm (见图 2(d)中小方块区域),位于水泥改性土防护层范围内,防护层以下土体未见裂隙发育。在坡顶和坡面发现有细小网状裂隙分布,裂隙宽度小于 2 mm 。

2.2 含水率变化

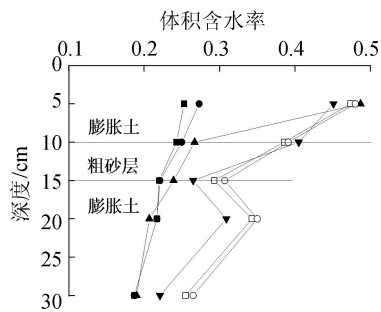
模型边坡填筑完成后先静置 24 h ,观测不同测点处初始含水率,再进行干湿循环,每次降雨结束观测各测点处含水率。不同方案下含水率沿深度分布见图 3,图中纵坐标表示含水率探头的埋置深度。

从图 3 可以看出,初次降雨时,由于膨胀土边坡形态完整,裂隙尚未发育,且土体渗透性低,4 种防护方案的模型坡含水率分布基本与初始状态相同,只有表砂层方案中粗砂层的含水率迅速增大到接近饱和状态。随着干湿循环次数的增加,土工膜方案模型边坡的坡顶和坡面逐渐产生裂隙,雨水沿裂隙下渗,导致膜上土体含水率增加,见图 3(a)。结合试验过程中的裂隙开展情况,可知含水率受影响的深度与裂隙开展深度一致。干湿循环次数超过 4 次后,由于边坡与模型槽侧壁间出现一定深度的贯通裂隙,导致雨水入渗到土工膜下约 30 cm 埋深处。对于砂垫层方案,随干湿循环次数的增加,边坡中土体含水率逐渐增加,其中表层土体含水率增加较快,而砂垫层下伏土体含水率增加较慢(图 3(b)),这是由于非饱和砂层的毛细阻滞和排水作用所致。而表砂层方案,表面的粗砂层经历初次降雨就达到了饱和状态,而且边坡深处的膨胀土的含水率也迅速增大(图 3(c)),这主要是由于边坡中有很深的裂隙发育(图 2(c)),雨水得以沿着这条裂隙迅速入

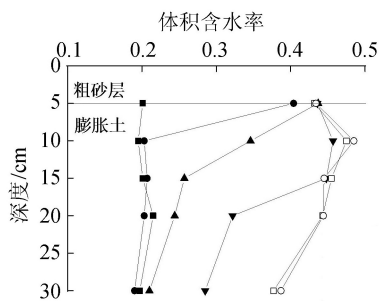
—■— 初始状态 —●— 第1次降雨 —▲— 第2次降雨
—▼— 第3次降雨 —□— 第4次降雨 —○— 第5次降雨



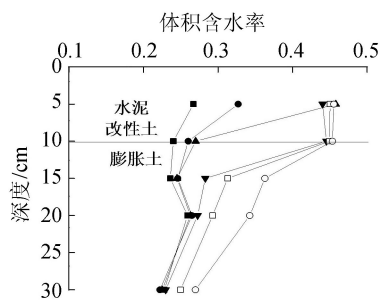
(a) 土工膜方案



(b) 砂垫层方案



(c) 表砂层方案



(d) 水泥改性土方案

图3 边坡含水率变化

渗。从图3(d)可以看出,水泥改性土方案在经历2次干湿循环后,尽管水泥改性土防护层含水率明显增大,但防护层以下土体含水率几乎没有变化。第3次干湿循环后,防护层下部土体含水率有较大幅度的增加。这可能是防护层中裂隙开展(图2(d)),使得雨水入渗到了下部土体的缘故。从观测结果来看,防护层下部10 cm埋深以下范围土体含水率增加幅度始终较小,表明防护层下部土体中没有出现裂隙。

2.3 防护效果与工程应用分析

模型试验尺寸是参照工程原型按表1确定。受试验条件限制,本次试验未对尺寸效应进行分析,本次模型试验结果能否按比例放大后直接应用于工程设计尚难以确认。不过,4种方案均是由工程原型按相同比例确定的,可以认为尺寸效应对各方案的影响是相同的,因此,可以由试验结果来评价各防护方案的相对优劣。从上述试验结果可以看出,4种防护方案下,在模型边坡中均观测到一定程度的膨胀隆起变形和裂隙开展,防护层以下土体含水率均有所增加。综合上述观测结果,无论从边坡土体隆起变形量,还是防护层下部土体裂隙开展及含水率变化情况来看,水泥改性土方案在4种防护方案中效果最优。以下结合试验结果及工程应用,对各防护方案作进一步分析和讨论。

从文献[1,3]来看,土工膜不透水且具有一定强度,用在膨胀土边坡防护中的效果良好。但本次试验发现膜下土体含水率却有明显增加,似乎其防护效果并不理想。分析其原因,土工膜在试验过程中并未出现破坏,膜下土体含水率的增加是由于模型边坡发生纵向干缩,使得土与模型槽侧壁间出现缝隙。因此,使用土工膜覆盖来防护膨胀土边坡时,应注意做好土工膜的搭接,铺设时应留有一定的变形余量,使之能适应边坡可能发生的胀缩变形。试验中同时发现膜上土体干湿循环后裂隙发育明显,尽管对边坡整体稳定性影响不大,但不利于其自身的稳定,届时将失去对土工膜的保护。因此,宜回填压实弱膨胀性或非膨胀性土层作为土工膜的保护层。

与土工膜方案类似,砂垫层上的回填土层在干湿循环后含水率变化幅度大,且裂隙发育明显。从观测结果来看,砂垫层下部土体含水率变化幅度明显小于表层土体,且未发现明显裂隙。可见砂垫层不仅能发挥毛细阻滞和排水作用,减缓雨水入渗速率,同时作为柔性夹层,能限制裂隙向下层土体发展。不过,当降雨强度超过砂垫层的阻滞和排水能力时,雨水仍能入渗到下部土体。因此,根据当地的气候条件确定合理的砂垫层厚度,是采用砂垫层防护的关键。

本次试验中,采用表砂层防护的边坡,在干湿循环过程中下部土体出现竖向裂隙,这不仅使雨水能迅速入渗到边坡深部,使边坡土体强度降低,而且在裂隙面上形成水压力,不利于边坡稳定。此外,采用表砂层防护时,当降雨强度较大时,容易形成表面冲刷,表砂层自身的长期稳定性难以保证。因此,表砂层方案只可辅助使用,不宜单独采用。

水泥改性土强度高、渗透性低,本次试验中,其坡面膨胀变形量最小,裂隙发育程度也最小,较好地

保护了坡面避免雨水冲刷。从监测结果来看,干湿循环条件下水泥改性土仍出现了裂隙,因此,实际应用时,不仅应在设计时保证一定的防护层厚度,还应结合水泥改性土的强度增长规律^[14],通过严格控制压实度和养护条件,来提高水泥改性土的强度,减小胀缩性和大气影响深度。

3 结 论

a. 参照工程原型尺寸按相同比例缩尺制作模型边坡,进行了土工膜、砂垫层、表砂层和水泥改性土 4 种防护方案的模型试验。结果显示,在土工膜、砂垫层、表砂层和水泥改性土 4 种防护方案中,水泥改性土方案防护效果最优。

b. 4 种边坡防护方案都有防护效果,但均存在一定的缺点,如处理不当会影响防护效果。工程应用中,当采用土工膜覆盖时,应注意土工膜的搭接处理,避免产生边坡走向方向的纵向裂隙;采用砂垫层方案时,应根据气候条件确定合理的防护层厚度;表砂层方案可作为辅助措施,不宜单独采用;采用水泥改性土方案时,应保证其具有一定的厚度,并注意控制其压实度和养护条件。

参考文献:

[1] 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))

[2] 詹良通,吴宏伟,包承纲,等. 降雨入渗条件下非饱和膨胀土边坡原位监测[J]. 岩土力学,2003,24(2): 151-158. (ZHAN Liangtong, WU Hongwei, BAO Chenggang, et al. Artificial rainfall infiltration tests on a well-instrumented unsaturated expansive soil slope [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(2): 151-158. (in Chinese))

[3] 龚壁卫,包承纲,周欣华. 总干渠膨胀土渠坡处理措施探讨[J]. 长江科学院院报,2002,19(增刊1): 108-110. (GONG Biwei, BAO Chenggang, ZHOU Xinhua. Probe into treatment measures for main channel slope in expansive soil region [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2002,19(Sup1): 108-110. (in Chinese))

[4] 包承纲. 南水北调中线工程膨胀土渠坡稳定问题及对策[J]. 人民长江,2003,34(5): 4-6. (BAO Chenggang. On slope stability of expansive soil canal of Middle Route Project of South-North Water Transfer and countermeasures [J]. Yangtze River,2003,34(5): 4-6. (in Chinese))

[5] 马时冬. 土工合成材料工程应用现状[J]. 华侨大学学

报(自然科学版),2003,24(2): 113-118. (MA Shidong. Present state of the application of geosynthetics to engineering [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science),2003,24(2): 113-118. (in Chinese))

[6] 周维博,李立新,何武权,等. 我国渠道防渗技术研究与进展[J]. 水利水电科技进展,2004,24(5): 60-63. (ZHOU Weibo, LI Lixin, HE Wuquan, et al. Advances in canal seepage control techniques in China [J]. Advances in Science Technology of Water Resources,2004,24(5): 60-63. (in Chinese))

[7] 张家发,刘晓明,焦赳赳. 膨胀土渠坡兼有排水功能的双层结构防护方案[J]. 长江科学院院报,2009,26(11): 37-41. (ZHANG Jiafa, LIU Xiaoming, JIAO Jiujiu. A protection scheme of double layers with drainage function for expansive soil slopes by canal [J]. Yangtze River Scientific Research Institute,2009,26(11): 37-41. (in Chinese))

[8] 史文娟,汪志荣,沈冰,等. 夹砂层土体构型毛管水上升的实验研究[J]. 水土保持学报,2004,18(6): 167-170. (SHI Wenjuan, WANG Zhirong, SHEN Bing, et al. Soil capillary water upward movement from sand layered soil column [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004,18(6): 167-170. (in Chinese))

[9] 侯永峰,龚晓南. 水泥土的渗透特性[J]. 浙江大学学报(工学版),2000,34(2): 189-193. (HOU Yongfeng, GONG Xiaonan. The permeability of cement-treated soil [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2000,34(2): 189-193. (in Chinese))

[10] 梁仁旺,张明,白晓红. 水泥土的力学性能试验研究[J]. 岩土力学,2001,22(2): 211-213. (LIANG Renwang, ZHANG Ming, BAI Xiaohong. Analysis of laboratory test result of cemented soil [J]. Rock and Soil Mechanics,2001,22(2): 211-213. (in Chinese))

[11] 朱崇辉,王增红. 水泥土渗透系数变化规律试验研究[J]. 长江科学院院报,2013,30(7): 59-63. (ZHU Chonghui, WANG Zenghong. Experimental research on the variation regularity of permeability coefficient of cement soil [J]. Yangtze River Scientific Research Institute, 2013,30(7): 59-63. (in Chinese))

[12] BAHMANI S H, HUAT B B K, ASADI A, et al. Stabilization of residual soil using SiO₂ nanoparticles and cement [J]. Construction and Building Materials,2014,64: 350-359.

[13] CONSOLI N C, WINTER D, RILHO A S, et al. A testing procedure for predicting strength in artificially cemented soft soils [J]. Engineering Geology,2015,195: 327-334.

[14] 汪海鸱,洪明强,谢镭. 夯实水泥土强度影响因素的试验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2010,29(2): 263-266. (WANG Haiou, HONG Mingqiang, XIE Lei. Experimental study on influence factors of compacted cement soil strength [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science),2010,29(2): 263-266. (in Chinese))

(收稿日期:2015-11-30 编辑:骆超)