

类毛细导水材料排水及抑制土体冻融效果研究

刘志彬^{1†}, 刘锋¹, 张书建², 雷松林², 白梅¹, 黄昊冉¹

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 211189;

2. 吉林省高等级公路建设局, 吉林 长春 130062)

摘要:为解决季节性冻土地地区路基土中水分积累引起的路基冻害问题,以商用高岭土为对象,通过对使用类毛细导水材料处理后的高岭土单元试样分别进行排水和冻融试验,研究类毛细导水材料排水及抑制土体冻胀的效果。结果表明,类毛细导水材料可以在土体非饱和条件下将其中水分排出,使土样中水分含量降低20%~30%;类毛细导水材料包裹试样侧面时的排水效果优于将其埋设于试样中,且试样初始含水率越大,类毛细导水材料的排水性能发挥越充分;冻融试验中,土样初始含水率越高,其冻胀量和融沉量也就越大,类毛细导水材料能够使土样在冻胀融沉过程中的体积变化率降低5%~15%,从而有效抑制土体冻害。

关键词:类毛细导水材料;排水能力;冻胀;融沉;抑制效果

中图分类号:TU57

文献标志码:A

Study on Drainage Performance of Quasi Wicking Fabric and Its Control Effect on Freeze-thaw of Clayey Soil

LIU Zhibin^{1†}, LIU Feng¹, ZHANG Shujian², LEI Songlin², BAI Mei¹, HUANG Haoran¹

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China;

2. Jilin Provincial High Class Highway Construction Bureau, Changchun 130062, China)

Abstract: To solve the frost damage problems of road embankment caused by moisture accumulation in subgrade in seasonal frozen soil area, drainage and freeze-thaw tests were carried out on kaolinite soil samples dealt with the quasi wicking fabric. It's aimed to study the drainage performance of quasi wicking fabric and its control effect on frost heaving of soils. The test results indicate that the quasi wicking fabric can discharge water from unsaturated soil and reduce the moisture content of soil sample by 20%~30%. The drainage effect of the condition that the soil sample is laterally wrapped by wicking materials is better than that of placing the material in the sample. As the initial water content of the sample increases, the drainage performance of the quasi wicking fabric also becomes more effective. In the freeze-thaw test, frost heave and thaw settlement increases with the increasing initial water content of the soil sample. The quasi wicking fabric can effectively reduce the volume change of the soil sample during freeze-thaw process by 5%~15%, which thereby can inhibit the frost damage of the soil.

Key words: quasi wicking fabric; drainage performance; frost heave; thaw settlement; control effect

* 收稿日期:2019-11-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41877240,41672280), National Natural Science Foundation of China(41877240,41672280); 吉林省交通运输科技项目(2016-1-16-2), Technology Project of Jilin Province Transportation(2016-1-16-2); 东南大学2018年实践创新计划项目(3221009745), 2018 Practice Innovation Plan of Southeast University(3221009745)

作者简介:刘志彬(1976—),男,河北灵寿人,东南大学副教授,博士

† 通讯联系人, E-mail: seulzb@seu.edu.cn

季节性冻土区公路路基冻害主要表现为冻胀和翻浆2类,冻胀会引起路面横向挠曲变形和裂缝,翻浆则会导致路面沉陷、鼓包及车辙变形^[1-2].李雨浓等^[3]指出,在季节性冻土区路基水分迁移变化是导致道路冻害频发的最主要因素.许健等^[4]通过研究发现,土体降温冻结时冻结区的液态水含量急剧减小,从而引起其基质势能的急剧降低,促使土中未冻水沿着温度降低方向迁移,最终导致路基强度降低.Hermansson等^[5]调查了水位高度对冻土路基冻胀行为的影响,结果表明,路面排水结构的改善以及降低地下水位高度可以显著减少冻胀.因此路基的防排水技术是减少道路冻胀破坏的关键所在.

目前解决季节性冻土区路基冻胀破坏的措施主要是通过改良路基填筑用土或换填来实现^[6-9],但上述措施对道路冻胀破坏只能起到一定的预防和改善作用,存在诸多不足.例如,换填法和保温法成本高,不能彻底消除及避免路基土水分迁移与冻胀^[10-11].美国TenCate公司研制了一种具有毛细吸水功能的毛细导水材料H₂Ri,这是一种由亲水吸湿纤维制成的新型高分子材料,能够在非饱和条件下将土中水分排出,美国一些学者围绕这种材料开展了一些研究工作.Azevedo等^[12]利用小型土柱模型试验发现,毛细导水材料的水平排水性能明显优于其竖向排水能力.Zhang等^[13]在阿拉斯加某公路试验段开展了现场试验,初步证明该种毛细导水材料可有效解决冻土区路基的冻融破坏问题.Lin等^[14-15]通过室内和现场试验证明毛细导水材料可以有效地将自由水和毛细水排出路面结构.Guo等^[16]在控制温度和相对湿度条件下测试了毛细导水材料的除水率,结果表明毛细导水材料可以以较快速率从水箱中抽排水.

由于国内并不生产上述毛细导水材料,本文采用与毛细导水材料H₂Ri具有相似功能的类毛细导水材料Coolmax材料进行研究.以商用高岭土为对象,对使用类毛细导水材料处理后的不同初始含水率高岭土单元体试样分别进行排水和冻融试验,研究类毛细导水材料排水特性及其抑制土体冻融变形的效果.

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

本研究采用市场上具有毛细导水性能的类毛细导水材料Coolmax材料(如图1所示)进行测试分析,探讨其排水能力以及抑制黏性土冻融变形的效

果.Coolmax材料由于具有良好的吸排水性能,被广泛地应用于制造速干类运动衣^[17],Coolmax材料的规格参数见表1.

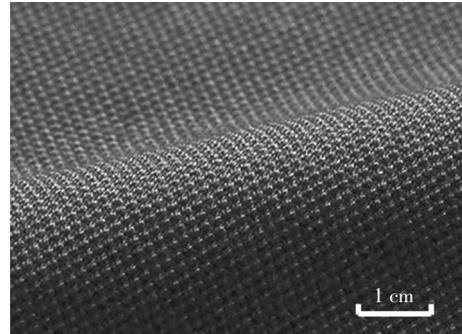


图1 Coolmax材料实物图

Fig.1 Picture of the Coolmax material

表1 Coolmax材料的规格参数

Tab.1 Specifications of the Coolmax material

材料成分	织物组织	厚度/mm	面密度/(g·m ⁻²)
$m_{\text{聚酯纤维}}/m_{\text{棉}} = 62/38$	平纹	0.38	151.3

试验所用土样为徐州矿务局夹河高岭土厂生产的商用高岭土(粒径<50 μm).其主要的物理性质指标见表2.

表2 高岭土主要物理性质

Tab.2 Basic properties of the kaolinite soil

土样	液限 $w_l/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 I_p	最优含水率/%	最大干密度 $\rho_d/(g\cdot cm^{-3})$
高岭土	31.9	19.2	12.7	14.3	1.85

1.2 试验方法

将上述高岭土按15%、17%、19%、21%、23%调制含水率,密封养护24 h后采用静压法制成 $\phi 5\text{ cm} \times H 10\text{ cm}$ 的圆柱样,试验控制土样初始干密度为1.76 g/cm³,土样压实度为95%.在相同含水率条件下,制样采用2种材料布设方案,同时制作对照试样.

方案1将类毛细导水材料直接包裹在样品侧面.试验组1a将类毛细导水材料完全包裹在土样侧面,仅留下上下表面裸露在外,旨在测试材料接触面排水效果;对照组1b则直接使用塑料保鲜膜将土样侧面包裹起来,仅留上下表面裸露在外.方案2将类毛细导水材料分上下2层埋设于土样中间.试验组2a制样时将宽0.7 cm、长6.5 cm的类毛细导水材料分2层布设在土柱试样1/3和2/3高度,每层2根宽

0.7 cm 的材料平行布设,间距 0.5 cm;对照组 2b 使用塑料保鲜膜将侧面包裹起来,仅留上下表面裸露在外,在材料对应的位置剪出开口,将开口区域的土样曝露于空气中.本次试验所制试样编号见表 3,材料布设方法和试样制备方法分别如图 2 和图 3 所示.

表 3 试样编号

Tab.3 Sample number of all the soil samples

含水率/%	试验组 1a	对照组 1b	试验组 2a	对照组 2b
15	1a-15	1b-15	2a-15	2b-15
17	1a-17	1b-17	2a-17	2b-17
19	1a-19	1b-19	2a-19	2b-19
21	1a-21	1b-21	2a-21	2b-21
23	1a-23	1b-23	2a-23	2b-23

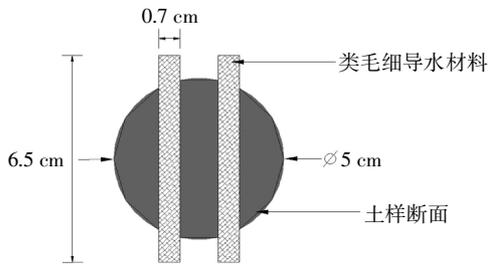


图 2 方案 2 材料布设方法

Fig.2 Material layout method of scheme 2

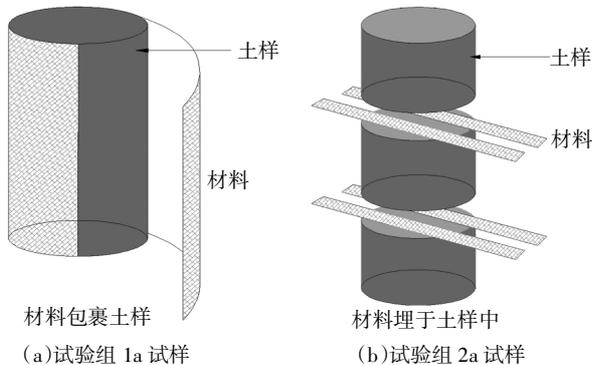


图 3 试样制备方法示意图

Fig.3 Diagram of sample preparation method

进行排水试验时,室温为(25±3)℃,湿度为 65%±5%,定期测量土样质量变化并精确至 0.1 g,最终测量至 72 h.冻融试验参考美国 ASTM D6035/D6035M 规范^[18]进行试验设计:试验时将试样在-20℃下冻结 24 h,然后置于 25℃环境下融化 24 h.

冻融过程中每隔 1 h 用游标卡尺测量试样直径和高度,考虑冻融过程中试样变形的不均匀性,沿试样高度方向取 3 个断面测量直径,并取平均值计算试样体积.最后根据式(1)计算试样体积变化率.

$$\delta = \frac{V_t - V_0}{V_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: δ 为体积变化率,%; V_t 为土样经历冻融后体积, cm^3 ; V_0 为土样初始体积, cm^3 .

2 排水试验结果分析

2.1 类毛细导水材料包裹土样排水结果分析

图 4 所示为材料包裹试样的试验组 1a 与对照组 1b 含水率变化曲线.从图 4 可看出在类毛细导水材料作用下,土样含水率明显低于对照组土样含水率.在类毛细导水材料包裹下的土体排水过程主要可分为 2 个阶段,即类毛细导水材料主导的快速排水阶段,以及蒸发作用主导下的匀速排水阶段.

图 5 所示为采用材料包裹试样与对照组试样的含水率降低率曲线.由图 5 可看出,类毛细导水材料包裹的试样的初始含水率越高,材料排水效果越明显.这表现在土样初始含水率越高,含有类毛细导水材料的土样最终含水率降幅越大.

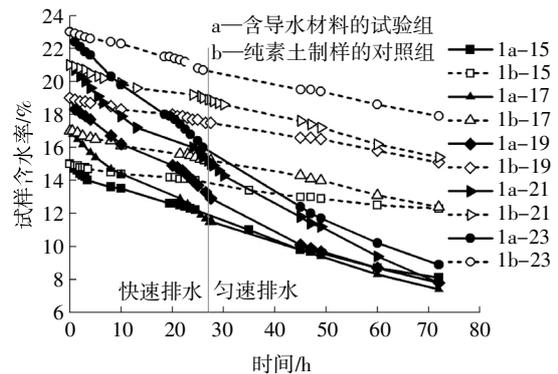


图 4 材料包裹土样的含水率变化

Fig.4 Moisture content of samples with wrapped quasi wicking fabrics

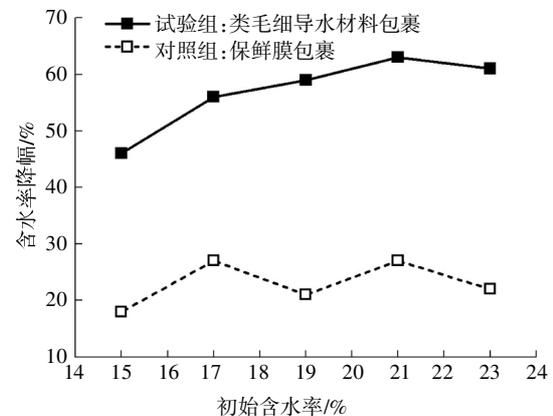


图 5 材料包裹土样的含水率降幅

Fig.5 Moisture content reduction of samples with wrapped quasi wicking fabrics

2.2 铺设2层类毛细导水材料土样排水结果分析

图6所示为铺设2层材料试样的试验组2a与对照组2b的含水率变化曲线,从图6可看出含类毛细导水材料土样的含水率始终低于对照组试样.随着时间的增长以及土中含水率的减小,最终2组试样的排水速率相差不多.

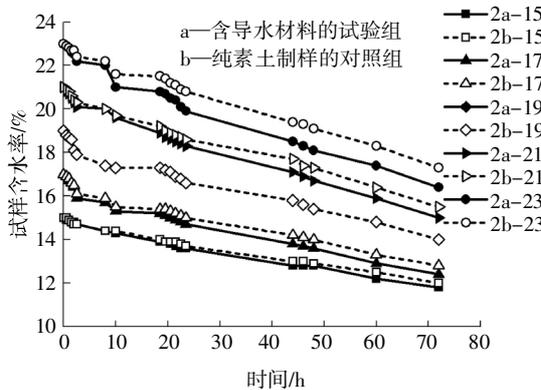


图6 铺设2层类毛细导水材料土样的含水率变化

Fig.6 Variation of moisture content of samples with two layers of quasi wicking fabrics

图7所示为铺设2层材料的土样与对照组试样的含水率降低率曲线.分析图7可发现埋有类毛细导水材料试样的含水率降低率与对照组试样的含水率降低率之间未表现出太大差异.埋有类毛细导水材料的土样排水效果略优于没有材料的土样,这可能是由于蒸发作用比较明显且类毛细导水材料在土样中排水工作面积不足,未能表现出明显的吸排水效果.

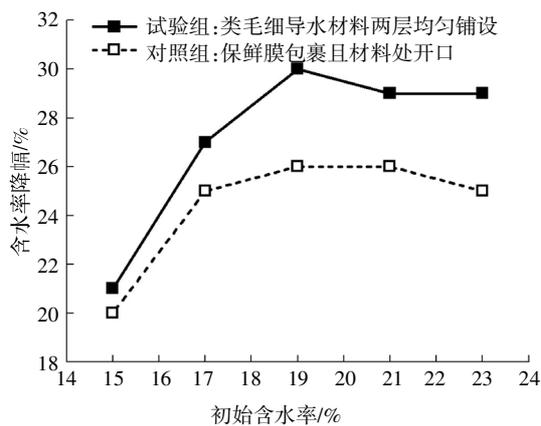


图7 铺设2层材料试样的含水率降低率

Fig.7 Moisture content reduction of samples with two layers of quasi wicking fabrics

图8所示为试验结束时铺设2层材料土样的分层含水率,由图8可看出铺设2层材料的土样不同深度的含水率是不同的,由于土样顶层暴露在空气

中,所以土样上部同时受到类毛细导水材料的毛细效应以及蒸发影响,含水率最低.土样中部只受到类毛细导水材料的排水作用,能够体现材料真实排水能力.土样下部含水率较高可能是由于土样底层无蒸发作用且离导水材料较远所致.

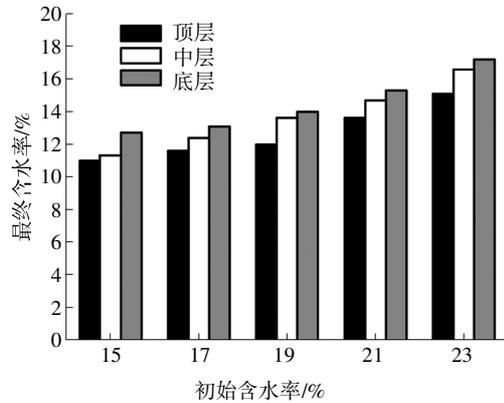


图8 铺设2层材料试样的分层含水率

Fig.8 Moisture content of each layer in samples with two layers of quasi wicking fabrics

2.3 布设方案对类毛细导水材料排水效果影响分析

图9显示了2种材料布设方案对试样含水率变化率的影响.由图9可发现材料包裹试样的排水效果要明显优于在试样中铺设2层材料的排水效果,且初始含水率越大,越能发挥材料的排水作用.此外,类毛细导水材料的排水能力与它和土样之间的有效接触面积相关,接触面积越大,材料的排水效果就越好.除了有效接触面积之外,类毛细导水材料在空气中的暴露面积同样起到关键作用.类毛细导水材料暴露在空气中的部分直接参与了蒸发过程,因此暴露在空气中的材料面积越大,类毛细导水材料排水能力越强.

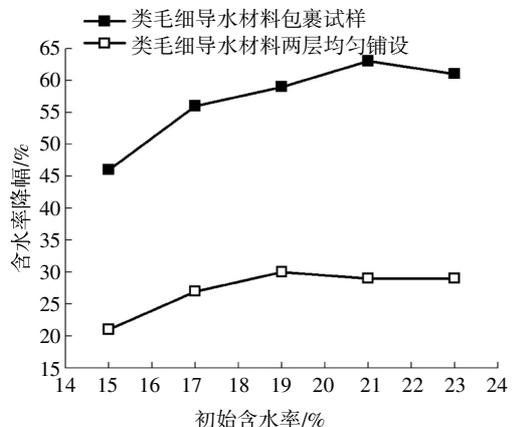


图9 2种材料布设方案含水率降幅比较

Fig.9 Comparison of moisture content reduction between two layout methods

结合具体工程实际进行考量,第一种材料布设方案在实际工程中较难应用,而第二种布设方案所表现出的效果虽然不如方案一,但在具体工程应用上更加可行.在第二种材料布设方案中,由于室内试验条件限制,材料埋设宽度较小,类毛细导水材料与土样接触面积不足,因此降低了其排水效果.

3 材料抑制土样冻融效果研究

3.1 类毛细导水材料包裹试样冻胀融沉分析

图 10 所示为用材料包裹的初始含水率为 19% 与 23% 的试样体积变化率.从图 10 可看出土样初始冻胀阶段体积变化最快,随着时间增长,体积变化逐渐减慢,直至稳定.试样刚开始融化时,试样的体积迅速减小,随着时间增长,体积变化逐渐减小.

从图 10 可看出,在冻胀阶段,包裹了类毛细导水材料和不含材料的 2 个试样的体积变化率都在增加,出现明显的冻胀现象;在融化阶段,2 个试样也都出现了明显的融沉现象.但在整个冻胀融沉试验过程中,类毛细导水材料包裹的试样的体积变化率一直都比素土试样的体积变化率低 15% 左右,这说明采用类毛细导水材料包裹侧面的布设方案确实能够有效抑制土样的冻胀融沉.

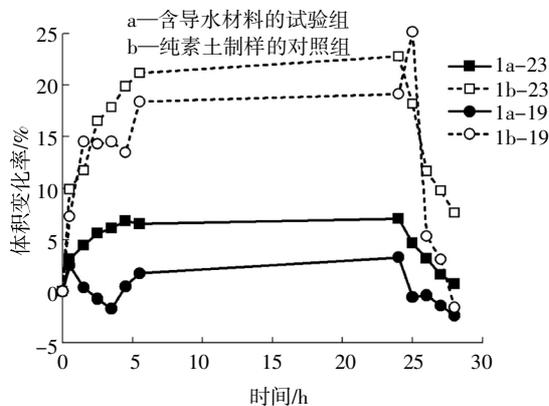


图 10 材料包裹试样的体积变化率
Fig.10 Volume change ratio of samples with wrapped quasi wicking fabrics

3.2 均匀铺设 2 层材料试样冻胀融沉分析

图 11 为初始含水率分别为 19% 与 23% 且均匀铺设 2 层类毛细导水材料试样的体积变化曲线.由图 11 可看出,在初始冻胀阶段,土样体积迅速增大,出现明显的冻胀现象,随着时间增长,体积逐渐趋于稳定,直至不再变化.相同情况下,试样初始含水率越高,其体积变化越大.比较 2 种试样的体积

变化率可见,铺设有类毛细导水材料试样的体积变化率比对照组试样低 5%,这说明采用在土样中均匀铺设类毛细导水材料的试验方案能够抑制土样的冻胀融沉.

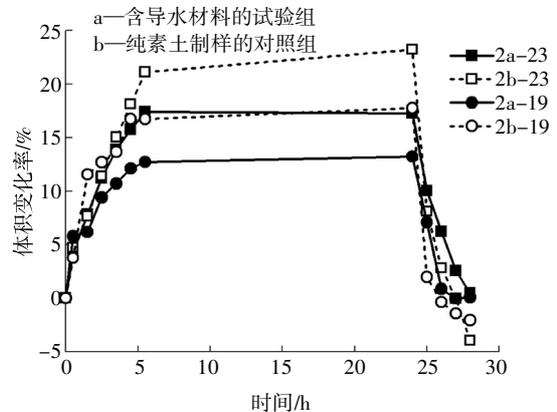


图 11 铺设 2 层材料试样的体积变化率
Fig.11 Volume change ratio of samples with two layers of quasi wicking fabrics

4 结论

本文以商用高岭土为对象,通过对埋设有类毛细导水材料的不同含水率高岭土试样进行排水和冻融试验,得到了以下主要研究结论:

1)类毛细导水材料能够将非饱和高岭土中的水分排出,使土样的含水率降低 20%~30%,起到抑制路基土冻胀的作用.

2)在排水试验中,采用了将类毛细导水材料直接包裹在土样侧面和将 2 层材料均匀铺设在土样中 2 种材料布设方案,其中类毛细导水材料包裹在土样侧面时的排水效果明显好于将其铺设于土样中;土样的初始含水率越高,类毛细导水材料的排水能力越强;暴露在空气中的类毛细导水材料面积越大,类毛细导水材料排水效果越好.

3)在冻融试验中,所有土样均发生了明显的冻胀和融沉现象,且土样含水率越高,土样的体积变化越大;使用类毛细导水材料能够使土样在冻融过程中的体积变化率减少 5%~15%,有效抑制土样的冻胀融沉.

参考文献

[1] 武立波,祁伟,牛富俊,等.我国季节性冻土区公路路基冻害及其防治研究进展[J].冰川冻土,2015,37(5):1283—1293.
WU L B, QI W, NIU F J, et al. A review of studies on roadbed frozen

- damage and countermeasures in seasonal frozen ground regions in China [J]. *Journal of Glaciology & Geocryology*, 2015, 37(5): 1283—1293. (In Chinese)
- [2] 盛岱超, 张升, 李希. 高速列车与路基冻胀相互作用机理[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(12): 2186—2191.
SHENG D C, ZHANG S, LI X. Effects of train loads on frost heave [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(12): 2186—2191. (In Chinese)
- [3] 李雨浓, 张喜发, 冷毅飞, 等. 季冻区高速公路路基冻害调查及试验观测[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2010, 42(4): 617—623.
LI Y N, ZHANG X F, LENG Y F, *et al.* Investigation on freeway subgrade frost damage in seasonally frozen ground [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2010, 42(4): 617—623. (In Chinese)
- [4] 许健, 牛富俊, 牛永红, 等. 冻结过程路基土体水分迁移特征分析[J]. *重庆大学学报*, 2013, 36(4): 150—158.
XU J, NIU F J, NIU Y H, *et al.* Analysis on the moisture migration of subgrade soil under effect of temperature gradient [J]. *Journal of Chongqing University*, 2013, 36(4): 150—158. (In Chinese)
- [5] HERMANSSON Å, GUTHRIE W S. Frost heave and water uptake rates in silty soil subject to variable water table height during freezing [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2005, 43(3): 128—139.
- [6] 齐吉琳, 程国栋, VERMEER P A. 冻融作用对土工程性质影响的研究现状[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(8): 887—894.
QI J L, CHENG G D, VERMEER P A. State-of-the-art of influence of freeze-thaw on engineering properties of soils [J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(8): 887—894. (In Chinese)
- [7] EIGENBROD K D. Effects of cyclic freezing and thawing on volume changes and permeabilities of soft fine-grained soils [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, 33(4): 529—537.
- [8] VIKLANDER P. Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze/thaw [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1998, 35(3): 471—477.
- [9] OTHMAN M A, BENSON C H. Effect of freeze-thaw on the hydraulic conductivity and morphology of compacted clay [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1993, 30(2): 236—246.
- [10] 李安原, 牛永红, 牛富俊, 等. 粗颗粒土冻胀特性和防治措施研究现状[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(1): 202—210.
LI A Y, NIU Y H, NIU F J, *et al.* Research status of frost heaving properties and controlling measures of coarse grained soil [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(1): 202—210. (In Chinese)
- [11] 许健, 牛富俊, 李爱敏, 等. 季节性冻土区保温法抑制铁路路基冻胀效果研究[J]. *铁道学报*, 2010, 32(6): 124—131.
XU J, NIU F J, LI A M, *et al.* Analysis of the prevention effect of thermal-insulation method on frost heave of railway subgrade in seasonal frozen regions [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2010, 32(6): 124—131. (In Chinese)
- [12] AZEVEDO M, ZORNBERG J G. Capillary barrier dissipation by new wicking geotextile [C]// *Advances in Unsaturated Soils Proceedings, First Pan-American Conference on Unsaturated Soils*. London: Taylor & Francis Group, 2013: 559—565.
- [13] ZHANG X, PRESLER W, LI L, *et al.* Use of wicking fabric to help prevent frost boils in Alaskan pavements [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014, 26(4): 728—740.
- [14] LIN C, PRESLER W, ZHANG X, *et al.* Long-term performance of wicking fabric in Alaskan pavements [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2017, 31(2): 1—14.
- [15] LIN C, ZHANG X. Laboratory drainage performance of a new geotextile with wicking fabric [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30(11): 1—13.
- [16] GUO J, WANG F, ZHANG X, *et al.* Quantifying water removal rate of a wicking geotextile under controlled temperature and relative humidity [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016, 29(1): 1—8.
- [17] 郑晓晴, 沈兰萍. Coolmax/麻赛尔/棉吸湿导湿机织物的开发与试织[J]. *纺织科学与工程学报*, 2018, 35(3): 23—25.
ZHENG X Q, SHEN L P. Development and trial weaving of coolmax/jutecell/cotton moisture absorption and moisture-conductive woven fabrics [J]. *Journal of Textile Science and Engineering*, 2018, 35(3): 23—25. (In Chinese)
- [18] ASTM D6035/D6035M-13 Standard test method for determining the effect of freeze-thaw on hydraulic conductivity of compacted or intact soil specimens using a flexible wall permeameter [S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2013: 1—5.