

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20240229002

文章编号: 1672-9331(2025)01-0028-12

引用格式: 赵培琳, 张明礼, 冯微, 等. 毛细阻滞层防治季节冻土路基覆盖效应试验研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2025, 22(1): 28-39.

Citation: ZHAO Peilin, ZHANG Mingli, FENG Wei, et al. Experimental study on effect of capillary blocking layer in preventing and controlling subgrade covering of seasonal frozen soil[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2025, 22(1): 28-39.

毛细阻滞层防治季节冻土路基覆盖效应试验研究

赵培琳¹, 张明礼^{1,2}, 冯微¹, 冯德刚³, 闫欣晨¹, 刘岳峰¹

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050; 3. 中交三公路桥梁隧道工程有限公司, 北京 100012)

摘要:【目的】季节冻土区公路路基因季节性温度变化使路基中的水分向上迁移, 导致水分在封闭覆盖层下聚集产生覆盖效应, 进而引起路基冻胀、融沉、路面开裂、道路翻浆等工程病害。为了有效抑制封闭覆盖层下覆盖效应的产生, 以季节冻土区气候特征为背景, 开展了室内一维土柱试验。【方法】通过设计两组冻融循环条件下的室内路基模型试验, 探究有、无毛细阻滞层季节冻土区路基内部的水热变化规律, 验证毛细阻滞层对季节冻土区公路路基覆盖效应的防治效果。【结果】在季节性温变导致的冻融循环条件下, 传统路基浅层 2.5、5.0 cm 深度范围内的土体含水率随冻融循环次数的增加而不断增大, 最大液态水含量增加量达 5.8 个百分点, 覆盖效应明显; 毛细阻滞层路基在浅层 2.5 cm 深度处的土体含水率随冻融循环次数的增加水分累积量仅为 1.8 个百分点, 且经历 3 个循环后其他深度的最大液态水含量与含水率累积量均略有减小, 整体含水率远小于无毛细阻滞层路基的。【结论】毛细阻滞层的设置能够明显抑制覆盖层下浅层土体含水率的增加和累积, 且对维持季节冻土区路基土体水分场稳定具有重要作用。

关键词: 毛细阻滞效应; 季节冻土; 冻融循环; 公路路基; 覆盖效应; 水热变化

中图分类号: U419.92

文献标志码: A

Experimental study on effect of capillary blocking layer in preventing and controlling subgrade covering of seasonal frozen soil

ZHAO Peilin¹, ZHANG Mingli^{1,2}, FENG Wei¹, FENG Degang³, YAN Xincheng¹, LIU Yuefeng¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3. Bridge and Tunnel Engineering Co., Ltd., CCCC Third Highway Engineering Co., Ltd., Beijing 100012, China)

Abstract: [Purposes] The seasonal temperature change of highway subgrade in the seasonal frozen soil area causes the upward migration of water in the subgrade, making water accumulate under the closed covering layer and resulting in the covering effect, which then induces the subgrade frost heave, melt settlement, pavement cracking, frost boiling of roads, and other engineering diseases. In order to effectively suppress the covering effect under the closed covering layer, a laboratory one-dimensional soil column test was carried out based on the climatic

收稿日期: 2024-02-29; 修回日期: 2024-04-25; 接受日期: 2024-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41961010); 中科院西部之光“西部青年学者”项目(23JR6KA027); 甘肃省杰出青年基金项目(24JRRA167); 甘肃省重点研发计划(25YFFA012)

通信作者: 张明礼(1987—)(ORCID: 0000-0002-4350-4781), 男, 教授, 主要从事冻土工程方面的研究。

E-mail: mingli_0919@126.com

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxzbzk/home>

characteristics of the seasonal frozen soil area. **[Methods]** Through the design of two sets of laboratory subgrade model tests under the condition of freeze-thaw cycles, the hydrothermal variation rule in the subgrade with and without capillary blocking layer in the seasonal frozen soil area was explored, and the prevention and controlling effect of capillary blocking layer on the covering effect of highway subgrade in the seasonal frozen soil area was verified. **[Findings]** Under the freeze-thaw cycle conditions caused by seasonal temperature change, the volume water content of soil in the traditional shallow subgrade at a depth of 2.5 and 5.0 cm increases with the increase in the number of freeze-thaw cycles, and the maximum liquid water content increases by 5.8 percentage points, which shows obvious covering effect. The soil water content at the shallow capillary blocking layer at a depth of 2.5 cm is only 1.8 percentage points with the increase in the number of freeze-thaw cycles, and the maximum liquid water content and cumulative water content at other depths decrease slightly after the three cycles. The overall water content is much smaller than that of the subgrade without the capillary blocking layer. **[Conclusions]** The installation of a capillary blocking layer can significantly inhibit the increase and accumulation of water content in shallow soil under the covering layer and play an important role in maintaining the stability of the water field of subgrade soil in the seasonal frozen soil area.

Key words: capillary blocking effect; seasonal frozen soil; freeze-thaw cycle; highway subgrade; covering effect; hydrothermal change

Foundation items: Project (41961010) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (23JR6KA027) supported by the Chinese Academy of Sciences “Light of West China” Program for Western Young Scholars; Project (24JRRA167) supported by the Science Foundation for Distinguished Young Scholars of Gansu Province; Project (25YFFA012) supported by Key Research and Development Program of Gansu Province

Corresponding author: ZHANG Mingli (1987—) (ORCID: 0000-0002-4350-4781), male, professor, research interest: frozen soil engineering. E-mail: mingli_0919@126.com

0 引言

覆盖效应是指地表覆盖层使土体表面蒸发受阻,引起水汽在不透气的覆盖层下凝结或冻结,进而导致覆盖层下土体含水率升高的现象^[1]。覆盖效应是一种重要的土中水汽迁移现象,常发生于季节冻土区^[2]。中国是世界上冻土分布面积第三大国,季节性冻土广泛分布于干旱半干旱地区^[3]。这些地区的大温差和低水位为覆盖效应创造了条件^[4]。覆盖效应也称“锅盖效应”^[5],在覆盖效应作用下经历的冻融干湿循环导致地基土体孔隙率增大、承载力下降,从而引起路面开裂、不均匀沉降、倾斜、变形、冻胀等工程病害,这些工程病害严重威胁寒区工程稳定性,并对生态环境、地质水文、农业生产、国民建设、交通出行等都有着不利的影响。因此,通过覆盖效应的形成机制来研究覆盖效应的防治有着很重要的意义。

为解决季节冻土区因覆盖效应引起的公路路基工程病害,学者们开展了覆盖效应防治措施系列研究。其中,姚仰平等^[6]、罗汀等^[7]、张升等^[8]、李彦龙等^[9]、郑策等^[4]对土体中的水汽迁移进行了相关试验和理论研究。基于水汽迁移的研究,可将常见覆盖效应防治措施分为换填法^[10]、改良土质法、保温法等。李安原等^[11]采用粗颗粒土换填方法研究分析并表明,在反复冻融条件下,粗颗粒土的含水量会急剧增加,粗颗粒土仍有可能发生冻胀融沉现象。苏群^[12]结合实际情况得出当换填深度超过最大冻深 1/3 时,换填成本将会非常高。汤永强等^[13]针对季冻区软黏土路基开展电动化学加固试验研究,该方法在理论和试验上能够有效改善软黏土路基的抗冻胀性能,但在实际工程中不易操作。

可见,为解决覆盖效应问题,如何有效阻隔路基土体内水分向上迁移,保证路基土体湿度稳定,是路基结构长期稳定的关键。因此,广泛应用于

垃圾填埋场封顶覆盖层中的毛细阻滞效应覆盖层提供了很好的借鉴。毛细阻滞覆盖层耐久性好、造价低、防渗性能优异^[14-18]。由于构成毛细阻滞层的粗颗粒之间并不是相互黏结的,因此在干湿冻融循环作用下土颗粒并不会出现胀缩,同时,相较于土工膜或土工织物,粗颗粒的性质更加稳定,不会轻易随时间推移而出现破损^[19]。毛细阻滞效应通常是两层或多层不同粒径非饱和土在水分入渗过程中形成的一个自然现象。粗细粒界面的非饱和导水性差异^[20]形成的持水层,实现阻水功能,即毛细阻滞层的粗颗粒相当于铺设在传统路基土体之间的夹层,当土体中存在相较于路基本体粒径更大的粗颗粒时,粗颗粒层不仅会影响水分的迁移速度,同时还会影响水分的迁移高度,使下层土体滞留更多的水分,有效抑制下层土体水分的迁移^[21],以此阻碍水分进一步向粗颗粒层入渗。

综合比较,毛细阻滞型路基使用的砂石材料,具有环保、取材方便和易操作等优点^[22],采用毛细阻滞型路基优于其他大部分防治措施。杨清雷等^[23]采用数值模拟的方法提出了浅阻隔型封顶层结构体系,该体系包括三层结构(分别为0.5 m粉质黏土层、0.4 m砂土层、0.3 m粉质黏土层),具有较好的储水与释放水效果。陈冠一等^[24]基于非饱和渗流理论,采用有限元软件开展了四种不同组合形式的毛细阻滞覆盖层的稳定性试验,并得出最佳毛细阻滞层形式。YANG等^[25]通过土柱试验研究了三种不同粒径砂土组合下的毛细阻滞层的作用效果,结果表明,在土质越均匀、越粗糙、质地越好的情况下,土壤越容易形成毛细阻屏障。王甦宇等^[19]分析了几何构造、内部渗流以及材料粒径组成等不同因素对毛细阻滞层防护效果的影

响,指出了毛细阻滞层的优势与不足,并进一步讨论了提高毛细阻滞层防护性能的改进措施和途径。寒旱区覆盖效应路基结构主要考虑路基内填土的水分迁移,利用毛细阻滞效应抑制或阻碍下部填土水分向浅层土体迁移,可能能够达到防治覆盖效应的目的。

目前,季节冻土区公路路基覆盖效应的防治措施优缺点十分明显,且利用毛细阻滞效应对季节冻土区公路路基覆盖效应防治的研究涉及较少。因此,本文以兰州地区公路路基为研究对象,开展传统公路路基与设置毛细阻滞层公路路基的室内模型对比试验,通过分析在季节性温变条件下有、无毛细阻滞层的路基内部水热变化情况,对比得出毛细阻滞层防治季节冻土路基覆盖效应的有效性,为季节冻土路基的防治提供新的思路和建议。

1 试验概况

1.1 试验装置

本研究采用自主设计研发的冻融循环试验仪,如图1所示。该仪器主要包括试验罐体、模拟季节温度变化的上下导温盘、控制上下导温盘温度的温控循环液浴装置、温度湿度传感器、数据采集仪以及外部保温系统。其中,试验罐体为有机玻璃制成的空心圆柱体,内直径为30 cm,高为60 cm,壁厚为4 cm;通过液浴装置控制上下导温盘中循环流动的防冻液温度,控温范围为 $-40\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度为 $\pm(0.05\sim 0.10)\text{ }^{\circ}\text{C}$;5TM土壤温度湿度传感器可实时记录土体的温度与液态水体积含水率(下文简称为“液态水含量”),温度精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,水分精度

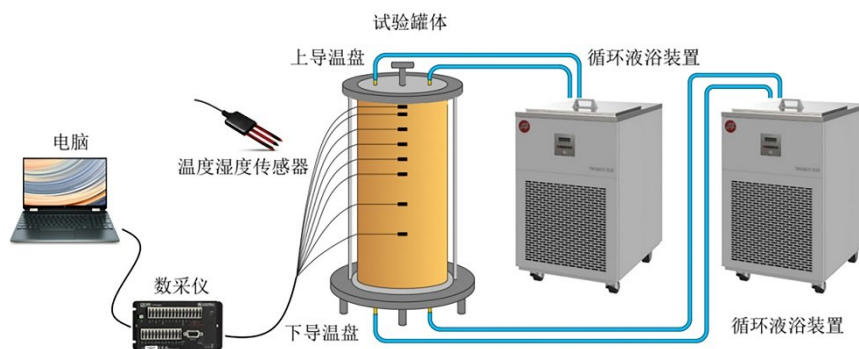


图1 试验装置

Fig. 1 Experimental facility

为 $\pm 0.03\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$,采集频率为 5 min/次 ;PT100 温度传感器用于检测上下导温盘的传导温度,温度采集范围为 $-50\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$;CR300 数据采集仪工作环境温度为 $-40\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$;为使试验过程中路基模型达到较好的温控效果,外部保温系统采用在试验罐体四周用 25 mm 厚高密橡塑板进行贴壁保温,以及在最外侧采用定制的柔性保温衣进行保温的方法,以有效减少温度的径向损失。

1.2 试验设计

该试验研究有、无毛细阻滞层对于季节冻土区宽幅公路路基土体内部水分迁移规律及水分聚集位置变化的影响。因试验罐体高 60 cm ,且试验单个循环的温度边界为模拟实际一年 365 天的气温变化,为使计算方便,采用几何相似比 $^{[26]}1:6$ 进行试验罐体内路基模型土样的装填。根据相似理论,此几何相似比下的时间相似比为 $1:36$,即单个冻融循环周期可近似为 10 天。两组试验除有、无毛细阻滞层的差异外,其余各条件均相同。路基模型示意图如图 2 所示,试验具体设计如表 1 所示。同时,由于兰州地处黄土高原东北缘,土壤类型以黄土为主,且黄土中主要为粉土,在修筑公路路基时,综合考虑各方面因素,通常就地取材,因此试验中所用土体为兰州市七里河区的粉土。通过室内土工试验对其液限 w_L 、塑限 w_P 、最优含水率 w_{op} 以及最大干密度 ρ_{d-max} 进行测定,其基本物理性质参数指标如表 2 所示。

季节冻土区粉土公路路基产生覆盖效应的水分主要聚集在覆盖层下浅层土体内,因此,试验主要监测浅层路基。在浅层路基内布置 8 个 5TM 传感器,8 个传感器距表层距离依次为 $2.5、5、10、15、$

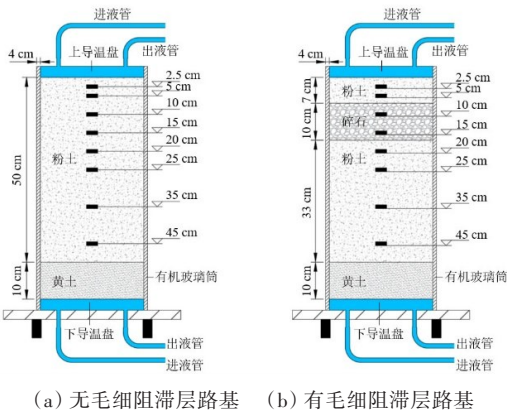


图 2 路基示意图
Fig. 2 Subgrade

表 1 试验设计

Table 1 Experimental design

编号	类型	材料	厚度/ cm	粒径/ mm	含水率 $w/\%$	阻滞层位置(上边界 为 0)/cm
试验 1	无毛细 阻滞层	粉土	50	0~2	22	
试验 2	毛细阻 滞层	粉土、 碎石	40、10	0~2、 10~15	22、0	7~17

表 2 土体基本参数

Table 2 Basic parameters of soil

土质	$w_L/\%$	$w_P/\%$	I_P	$w_{op}/\%$	$\rho_{d-max}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
粉土	28.63	19.21	9.42	22.00	1.74

$20、25、35、45\text{ cm}$ 。由于 5TM 传感器只能测得路基土体的液态含水率,本试验仅分析经历 3 个冻融循环后土体内部的液态含水率,本文的含水率均指体积含水率。同时,为监测上下导温盘的传导温度,在上下导温盘传温面上各贴放 1 个 PT100 温度传感器,传导温度效果如图 3 所示。土样初始含水率取兰州地区路基填筑的最优含水率,即 22.00% 。烘干后的土样按照最优含水率进行配制并密封静置 24 h ,以使土样水分分布更均匀。为保证模型土体的均匀性,采用分层填筑的方法,根据土样的干密度计算试验罐体每 10 cm 高度所需土量,将准备好的土样定量分层装填并压实,当填土到达一定的深度时,在相应深度处埋设传感器,土样装填的干密度控制为 1.3 g/cm^3 。装填完毕后上覆保鲜膜模拟实际路基上边界不透水不透气的覆盖层。试验罐体四周包裹 25 mm 厚的高密橡塑板进行贴壁保温并在最外侧采用定制的柔性保温衣进行保温,可有效减少温度的径向损失。准备完毕后,连接冷浴,使路基模型至少保持 24 h 恒温后开始试验。试验过程中的主要步骤如图 4 所示。

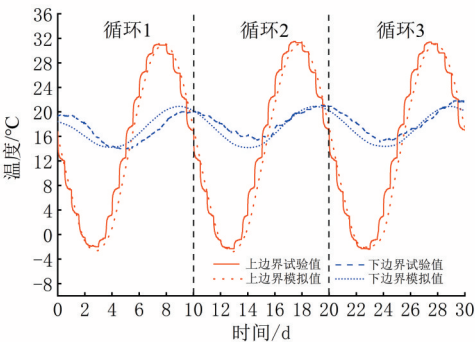


图 3 温度验证
Fig. 3 Temperature verification

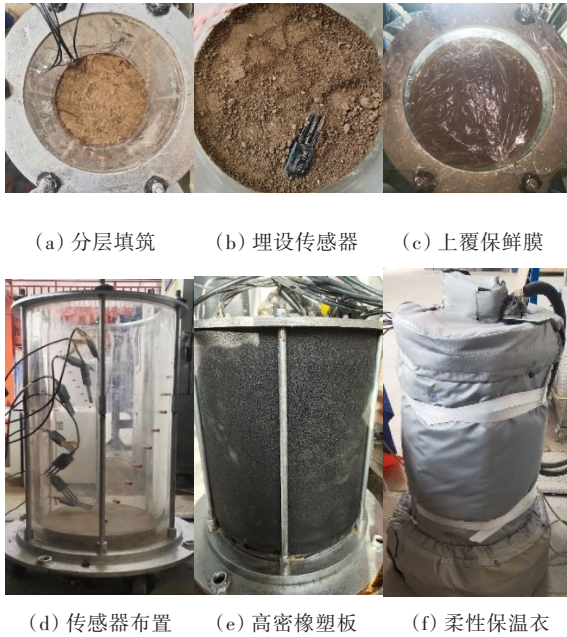


图4 试验过程
Fig. 4 Test process

1.3 试验边界条件

根据试验设计的几何相似比,试验模型0~50 cm模拟实际路基面层下3 m深度范围内的路基,50~60 cm模拟实际路基下0.6 m深度范围内的天然场地。由附面层理论得下附面层底的年平均地温,如式(1)所示:

$$T_{\text{地}} = T_a + \Delta T + A \sin\left(\frac{2\pi t}{8760} + \pi\right) \quad (1)$$

式中: $T_{\text{地}}$ 为下附面层底的年平均地温, $^{\circ}\text{C}$; T_a 为年平均气温, $^{\circ}\text{C}$; ΔT 为考虑附面层效应的总温度增量, $^{\circ}\text{C}$; A 为下附面层底的温度振幅, $^{\circ}\text{C}$; t 为时间,h。

以兰州10月份气温为路基建设的起始温度,则兰州地区环境温度正弦函数如式(2)所示。

$$T = 10.2 + 20 \sin\left(\frac{2\pi t}{8760} + \pi\right) \quad (2)$$

为选取合适的温度边界条件,考虑到西北地区少雨,公路两侧有植被覆盖或建筑物遮挡,所以天然地表按一般湿润地表考虑, ΔT 取值为 1.5°C ,即确定天然场地上边界温度正弦函数如式(3)所示。

$$T = 11.7 + 18 \sin\left(\frac{2\pi t}{8760} + \pi\right) \quad (3)$$

路基上边界温度正弦函数如式(4)所示。

$$T = 13.2 + 19 \sin\left(\frac{2\pi t}{8760} + \pi\right) \quad (4)$$

根据路基温度场数值模拟^[27]结果确定下边界温度,提取天然场地下0.6 m深度处的温度正弦函数,即试验中温度边界条件,如表3所示。根据试验周期设计调控温度频率为12 h/次,每个周期共调温20次。

表3 试验温度边界条件

Table 3 Test temperature boundary conditions

边界	温度正弦函数
上边界	$T = 13.2 + 19 \sin\left(\frac{2\pi t}{10 \times 24 \times 3600} + \pi\right)$
下边界	$T = 13.6 + 2.9 \sin\left(\frac{2\pi t}{10 \times 24 \times 3600} + \frac{\pi}{16}\right)$

2 试验结果及分析

2.1 传统路基

图5给出了无毛细阻滞层传统路基模型经历3个循环后不同深度土层温度随时间的变化。从图5可以看出,各深度土层温度均随时间呈现正弦函数变化规律,与LUO等^[28]研究结果吻合,这也验证了本试验的有效性。随着土层深度的增加温度波动幅度越小,且随着深度的增加温度变化存在明显的相位滞后,这是由于土柱内部储热(冷)能较少,热量在土壤中传递存在衰减和滞后。由于各个深度处的温度不同,土柱内水分由于温度梯度的作用向上或向下迁移。例如,在第7天时,土柱从上至下温度依次为29.6、28.3、26.6、25.3、21.2、20.8、17.8、15.9 $^{\circ}\text{C}$,在温度梯度作用下土体水分由冷端向暖端迁移。默认 0°C 为冻融界限,则0~10 cm范围内的土柱经历了完整的冻融循环,即默认该组试验的最大冻结深度为10~15 cm。

图6给出了无毛细阻滞层路基模型经历3个循环后不同深度处体积含水率随时间的变化。在冻结期土体液态水含量先减小后增大,浅层土体液态水含量随着试验冻融循环次数的增加整体呈增大趋势。以2.5 cm深度处土层液态水含量为例,第1、2、3次循环最大液态水含量分别为26.1%、27.0%以及27.8%,第3次循环后的最大液态水含量27.8%与第1次循环后的最大液态水含量26.1%相比增加了1.7个百分点,与初始体积含水率相比增加了5.8个百分点,即土体随着冻融循环次数的增加体积含水率也越大。这主要是因为

该深度靠近不透水不透气的覆盖层,在冻结期内下部土体水分向上迁移后无法及时排除,在土样上部聚集,使得土体含水率增大,形成覆盖效应。

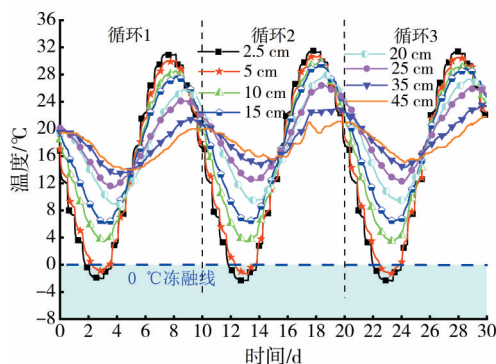


图5 不同深度土层温度随时间的变化

Fig. 5 Variation of soil temperature with time at different depths

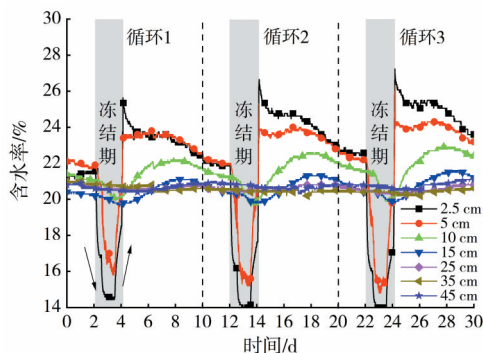
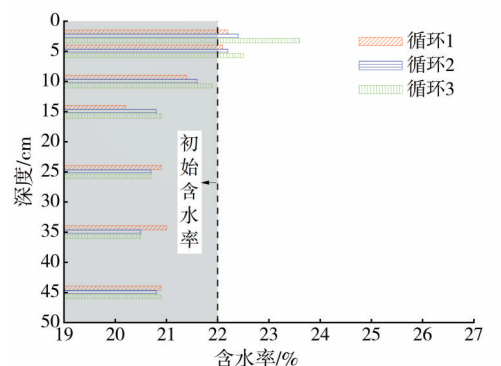


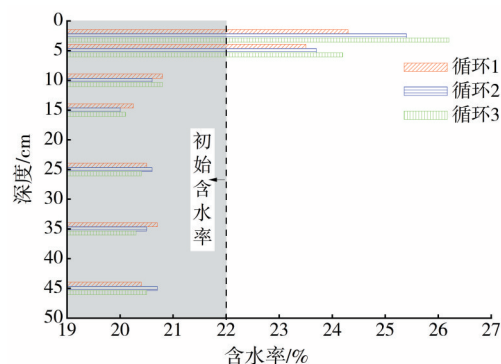
图6 不同深度土层含水率随时间的变化

Fig. 6 Variations of soil water content with time at different depths

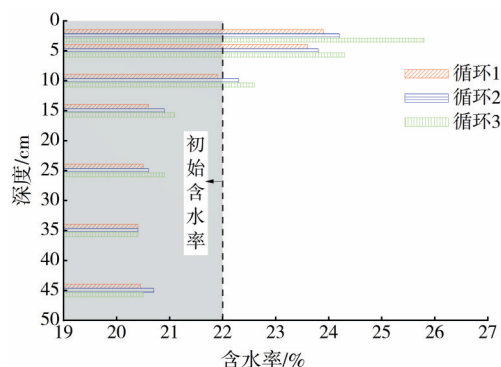
为了更清晰直观地体现土柱在冻融循环过程中液态水含量的变化情况,图7给出了不同循环同一时刻传统路基含水率沿深度的分布情况。由图7可以看出,靠近模型顶部0~10 cm深度范围内的液态水含量在不同循环同一时期随冻融循环次数的增加而明显增大,最大液态水含量出现在完全融化后的第1天。这是由于试样刚经历了一个完整的冻结期,试样在上低下高的温度梯度作用下水汽向上迁移,所以试样上部含水率达到了一个循环中的最高值。以图7(b)每个循环完全融化后的第1天含水率沿深度的变化为例,2.5 cm深度处的液态水含量在第5、15、25天分别为24.3%、25.4%和26.3%,第25天的液态水含量比第5天的增加了2.0个百分点,即该深度处不同循环同一时期内液态水含量随冻融循环次数的增加而增大,



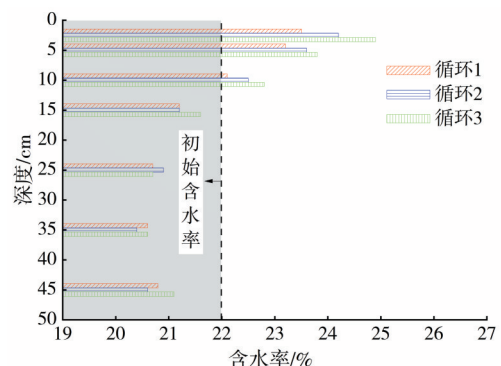
(a) 各循环第1天



(b) 各循环第5天



(c) 各循环第7天



(d) 各循环第9天

图7 不同循环同一时刻传统路基含水率沿深度的变化
Fig. 7 Variation of traditional subgrade water content along depth at the same time in different cycles

经过3个冻融循环含水率增加4.3个百分点。整体来看,随着冻融循环次数的增加,10 cm深度范围内的土体液态水含量均不断增加,最终液态水主要聚集在2.5 cm深度附近,其最大聚集量为4.3%。

2.2 毛细阻滞层路基

为了两组试验之间能够形成直观的对比,本组试验温度边界与传统路基模型试验(试验1)温度边界设置一致,该试验所呈现温度与试验1温度变化趋势基本一致,在此不再赘述。

图8为毛细阻滞层路基模型经历3个冻融循环后不同深度土层液态水含量随时间的变化图。由图8可见,经历3个冻融循环后,毛细阻滞层路基在浅层2.5 cm深度处的土体含水率随冻融循环次数的增加水分累积量仅为1.8个百分点,3个循环内的最大液态水含量相比初始含水率减小了0.6个百分点,呈轻微减小趋势。10、15 cm深度土层的体积含水率始终处于0~2%范围内,这是由于10、15 cm深度处的传感器位于毛细阻滞层(碎石)所处的7~17 cm范围内,碎石初始状态为风干状态,而粉土初始含水率为22%,在温度梯度作用下粉土层水分在向上或向下迁移过程中会有少量水汽逸入碎石层,造成毛细阻滞层含水率出现微小增加。20 cm深度(紧邻毛细阻滞层下边界)处的含水率有增长趋势,这是由于在每个循环的冻结期结束后,碎石层下部的粉土层水分在上低下高的温度梯度作用下水汽向上迁移,由于碎石层与粉土层构成了毛细阻滞屏障,处于非饱和状态的碎石层渗透系数大于粉土层的,水分无法滞留于碎石层中,无论向上或向下迁移,均在碎石层与粉土层交界面7与17 cm处,此时毛细阻滞层便起到了储水与隔水的作用。传统的覆盖效应只是在浅表层聚集^[8],此时的毛细阻滞层可使浅表层土体水分的聚集降低,从而增加覆盖层的蓄热能力,减缓冻土的温度梯度,有利于维持冻土路基的稳定性。25、35以及45 cm深度处的含水率基本保持不变,始终维持在初始含水率左右。以上分析说明,以10~15 mm粒径的碎石作为路基模型的毛细阻滞层有助于明显减小深层土体水分向浅层土体的迁移,从而减少浅层土体的水分累积量。毛细阻滞层具有稳定路基土体含水率的作用。

图9给出了不同循环同一时刻冻融循环作用下的毛细阻滞层路基土体含水率沿深度方向的变化

化情况。浅层2.5 cm深度处的液态水含量由第1天的22.0%经过3~4 d的冻结期减少至第5天的20.1%,在完全融化后增加至第8天的23.5%,在单个循环结束时降低至初始含水率附近,循环始末液态水含量未发生变化。碎石层在冻融循环各个阶段中的液态水含量均处于1%左右,该范围内的含水率增加是由于碎石层初始状态为风干状态,碎石层两侧土体水分迁移,碎石层含水率出现微小增加。另外,在冻结期结束后,20 cm深度处的含水率随着时间的增加,聚集量不断地增大,由冻结期结束第1天的22.2%增长至单个循环最后1天的24.0%。这是由于下部粉土水分向上迁移至

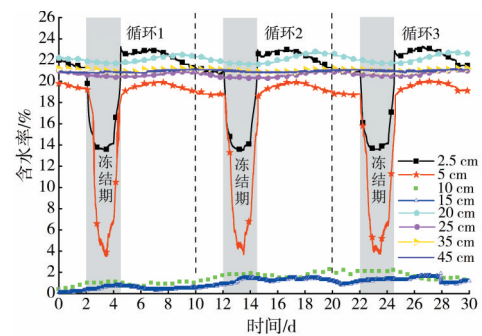
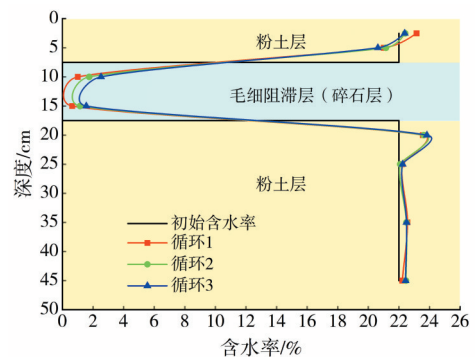
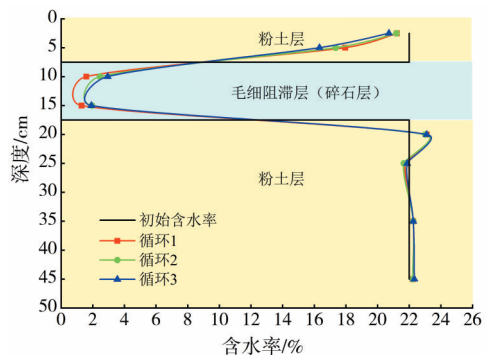


图8 不同深度土层含水率随时间的变化

Fig. 8 Variations of soil water content with time at different depths



(a) 各循环第1天



(b) 各循环第5天

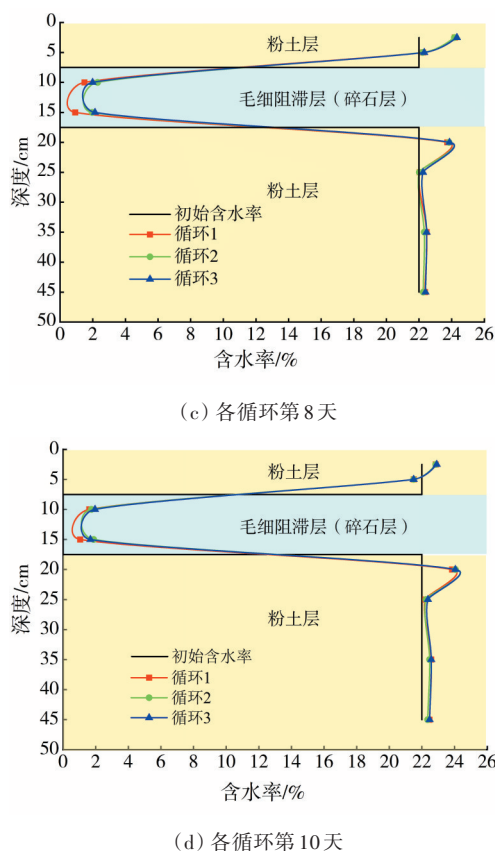


图9 不同循环同一时刻毛细阻滞层路基含水率沿深度变化

Fig. 9 Variation of capillary blocking layer subgrade water content along depth at the same time in different cycles

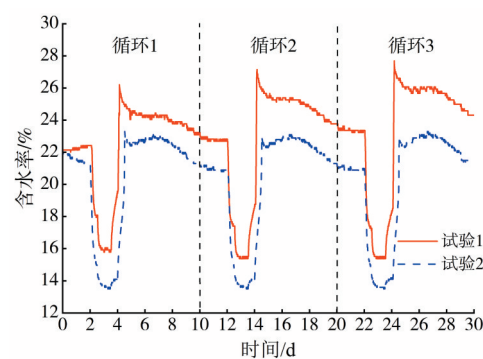
粗细粒层交界面处,界面处的基质吸力大于渗透曲线中渗透系数相等处对应的基质吸力,粉质黏土层的渗透系数小于碎石层的,使水分无法大量进入碎石层,即发生了毛细阻滞作用。在毛细阻滞层下交界面处出现水分聚集,且单个循环内含水率随着时间的增加而增大。

3 有、无毛细阻滞层路基水分对比及讨论

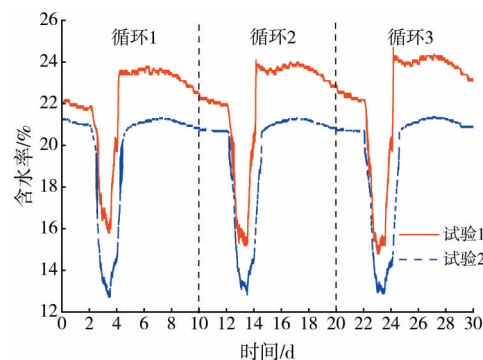
3.1 水分对比

图10给出了有、无毛细阻滞层两组试验中2.5、5.0 cm深度土层的含水率对比曲线。由图10可以看出,试验2浅层(2.5、5.0 cm深度)土体含水率均比试验1的小,试验1最大含水率(28.1%)出现在循环3第4天2.5 cm深度处,比初始含水率增加6.1个百分点。而同时,试验2该深度处的含水率仅为22.4%,仅比初始值增加0.4个百分点。设置毛细阻滞层的路基模型循环3在浅层2.5 cm深

度处土体最大体积含水率比未设置毛细阻滞层浅层2.5 cm深度处的小5.7个百分点,即毛细阻滞层的设置对浅层土体含水率具有明显的降低作用。同时,关于土体水分的累积量,在试验1中,2.5 cm深度处土体体积含水率累积量随着冻融循环次数的增加明显增加,而在试验2中相同深度土体体积含水率未出现明显累积。



(a) 2.5 cm 深度



(b) 5.0 cm 深度

图10 两组试验2.5 cm、5.0 cm深度路基含水率对比

Fig. 10 Comparison of subgrade water contents at depths of 2.5 cm and 5 cm for two groups of tests

图11为两组试验在第3个冻融循环(循环3)5~8天路基模型土体液态水含量沿深度方向的对比曲线。由图11可以看出,设置毛细阻滞层的路基模型在0~10 cm深度范围的液态水含量均低于无毛细阻滞层路基模型的,试验2不同时刻最大液态水含量的差值出现在冻结期结束后的第1天,试验1液态水含量为20.1%,试验2液态水含量为26.2%,差值为6.1个百分点。另外,在20~25 cm深度范围试验2的液态水含量略微高于试验1的,但相对于初始值变化不大。因为毛细阻滞层是由一层细粒和一层粗粒组成,本文细粒为粉土,粗粒为碎石,粉土作为核心储水层发挥储水作用,碎石作为基础层与粉土层构成毛细组织屏障,利用水

分在土中的毛细现象阻滞水分向上迁移,即通过设置毛细阻滞层达到抑制由于覆盖效应引起的覆盖层下浅层土体含水率的增加的目的。毛细阻滞层对整体路基土体内部水分迁移重分布具有一定的稳定作用,从而使季节冻土区公路路基内部水分场维持相对稳定。

根据毛细阻滞层发挥作用的原理可知,毛细阻滞层能发挥作用最主要的原因主要是不同土质粒径的不同,并不仅仅是土质的不同。所以,当试验材料不再是该地区的粉土时,只要毛细阻滞层材料与路基本体材料之间的粒径形成一定的差异,毛细阻滞层的设置对路基覆盖效应的防治依然有效。

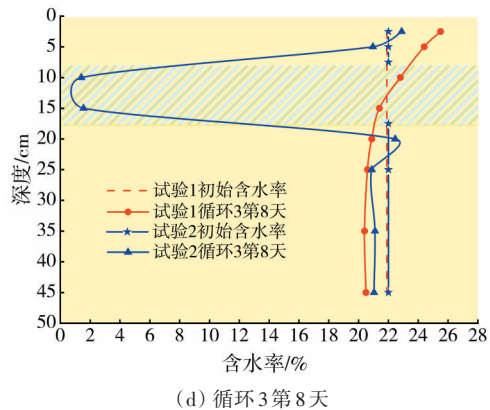
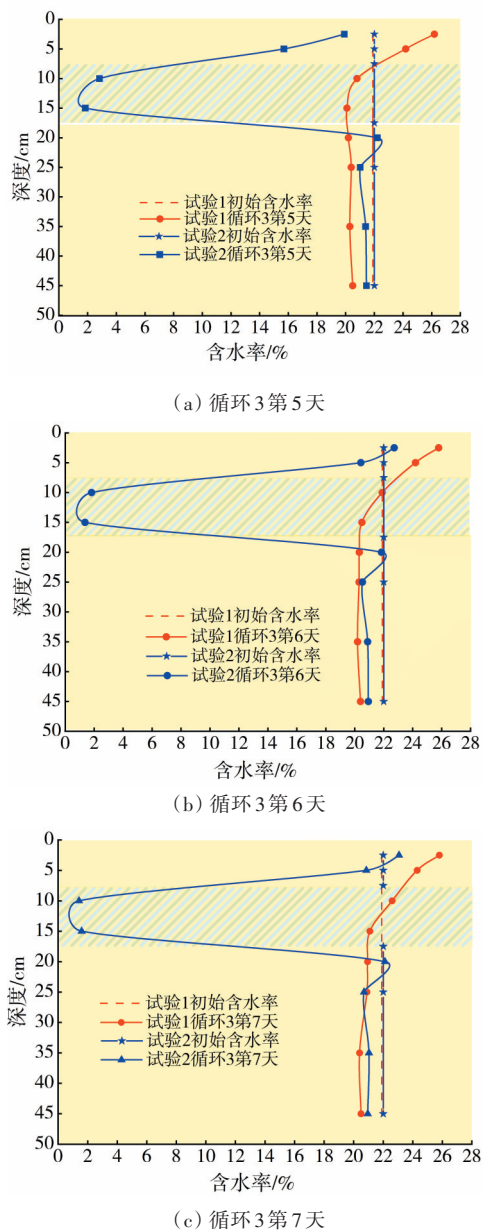


图11 两组试验循环3路基含水率沿深度方向对比

Fig. 11 Comparison of subgrade water contents along depth in two groups of test after cycle 3

3.2 讨论

季节冻土区公路路基因季节性的环境温度变化而导致的覆盖效应的形成机理已经较为明了^[5],但对季节冻土区公路路基覆盖效应的防治措施仍须进一步优化^[10-12]。已有许多有关垃圾填埋场覆盖层设计的试验表明,利用毛细阻滞效应可以有效防止干旱和半干旱条件下土体间水分的迁移渗入^[29-30]。

根据本文试验的分析结果,将毛细阻滞效应应用到季节冻土区公路路基中,在季节性温变情况下,紧邻覆盖层下的土层最大液态水含量与融化期结束前的含水率累积量并未增加,且有一定的减小,这对传统路基结构产生的覆盖效应有明显的防治作用。紧邻粗、细粒层交界面下部粉土层的浅层土体含水率呈增加趋势,交界面以下深度范围内土体含水率均小于初始含水率。设置毛细阻滞层的公路路基由不同粒径材料组成,一般包括细粒层和粗粒层,利用水分在土体中的毛细现象抑制水分向上迁移并聚集在交界面下。当水分到达粗细粒层交界面处时,界面的基质吸力大于渗透性曲线中渗透系数相等处对应的基质吸力,粉土的渗透系数高于碎石的,水分无法大量进入碎石层,即发生了毛细阻滞作用^[31],从而对季节冻土区公路路基覆盖效应的防治产生一定效果。同时,季节冻土区公路路基土体中的气态水的迁移主要受温度及温度梯度的直接影响^[32],而由于毛细阻滞层中的碎石在冻结期的高导热性,毛细阻滞层温度及温度梯度低于传统路基的,进而对整个路基温度有一定的调控作用。因此,毛细阻滞层的

设置对冷冻作用下的水汽迁移有一定的阻滞作用。

根据本文试验的分析结果,碎石层与下部粉土层交界面处的含水率显著增加,水分在该区域聚集,毛细阻滞层阻隔水分进一步向路基浅表层迁移,从而减缓季节冻土路基的冻胀与融沉现象。在冬季,毛细阻滞层可以防止路基水分在路基浅表层聚集,减缓冻胀;在夏季,毛细阻滞层可有效使水分蒸发,有利于维护路基的湿度平衡。与传统路基模型相比,毛细阻滞层路基浅层粉土的含水率降低,如图12所示。毛细阻滞层可有效阻隔下层细颗粒土中水分的进一步上迁,防止在夏季路基浅表层土体水分含量过低可能引起路面的干缩裂缝的产生,有利于维持路基的长期稳定。本文仅从一维角度进行季节冻土区公路路基覆盖效应的防治研究,而在实际路基工程中,水分的影响是二维的。在试验中设置毛细阻滞层是为了切断水分的迁移路径,改变水分的聚集位置,在后续研究中还应将毛细阻滞层与隔温层相结合,对季节冻土区公路路基覆盖效应的防治进行研究。

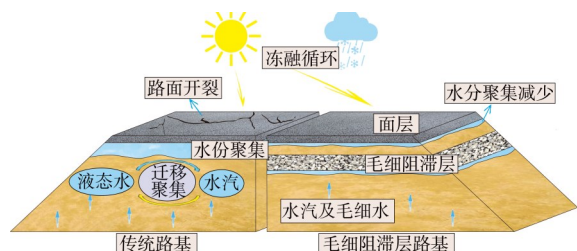


图12 路基水分迁移示意图

Fig. 12 Subgrade water migration

4 结论

本文通过设置有、无毛细阻滞层两种工况下的季节冻土路基模型,分析了土体内部温度场和水分场的变化特征,明确了毛细阻滞层对于防治季节性冻土路基覆盖效应的具体效果。主要得出以下结论:

1) 在季节性温变导致的冻融循环条件下,未设置毛细阻滞层的传统路基在浅层2.5、5.0 cm深度范围内的土体体积含水率随冻融循环次数的增加而不断增大,最大液态水含量增加量达5.8个百分点,覆盖效应明显。

2) 设置毛细阻滞层的路基在浅层2.5 cm深度处的土体体积含水率随冻融循环次数的增加未出

现明显的增大,且经历3个循环后最大液态水含量与含水率累积量均有减小趋势,毛细阻滞层上部含水率略微减少而毛细阻滞层下部含水率略有增大,但增大幅度远小于无毛细阻滞层的。

3) 毛细阻滞层的设置明显抑制覆盖层下浅层土体含水率的增加和累积,且对维持季节冻土区路基土体水分场稳定具有重要作用,能够有效防治季节冻土区路基覆盖效应。

[参考文献]

- [1] 曲啸,姚仰平,罗小映,等.地表“锅盖效应”水汽迁移量的计算方法研究[J].工业建筑,2022,52(5):194-198.
QU Xiao, YAO Yangping, LUO Xiaoying, et al. A calculation method for vapor migration in the earth's surface of "the pot cover effect" [J]. Industrial Construction, 2022, 52(5): 194-198.
- [2] 姚仰平,孙国超,王乃东,等.双向“锅盖效应”诱发戈壁荒漠长草机制分析[J].水利学报,2023,54(11):1371-1379. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20230387.
YAO Yangping, SUN Guochao, WANG Naidong, et al. Mechanism analysis of grass growing in Gobi Desert induced by two-way "pot cover effect" [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(11): 1371-1379. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20230387.
- [3] 叶仁政,常娟.中国冻土地下水研究现状与进展综述[J].冰川冻土,2019,41(1):183-196. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2019.0009.
YE Renzheng, CHANG Juan. Study of groundwater in permafrost regions of China: status and process [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(1): 183-196. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2019.0009.
- [4] 郑策,高万德,陈云飞,等.季节性冻土区包气带水汽热耦合运移研究进展[J].农业工程学报,2022,38(24):110-117. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.24.012.
ZHENG Ce, GAO Wande, CHEN Yunfei, et al. Review of coupled water, vapor, and heat transport of the vadose zone in the seasonal frozen soil region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(24): 110-117. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.24.012.
- [5] 李强,姚仰平,韩黎明,等.土体的“锅盖效应”[J].工业建筑,2014,44(2):69-71. DOI: 10.13204/j.gyjz201402016.
LI Qiang, YAO Yangping, HAN Liming, et al. Pot-cover effect of soil [J]. Industrial Construction, 2014, 44(2): 69-71. DOI: 10.13204/j.gyjz201402016.
- [6] 姚仰平,王琳,王乃东,等.锅盖效应的形成机制及其防治[J].工业建筑,2016,46(9):1-5. DOI:

- 10.13204/j.gyzj201609001.
YAO Yangping, WANG Lin, WANG Naidong, et al. Mechanism of forming pot-cover effect and its prevention[J]. Industrial Construction, 2016, 46(9): 1-5. DOI: 10.13204/j.gyzj201609001.
- [7] 罗汀, 陈含, 姚仰平, 等. 锅盖效应水分迁移规律分析[J]. 工业建筑, 2016, 46(9): 6-9. DOI: 10.13204/j.gyzj201609002.
LUO Ting, CHEN Han, YAO Yangping, et al. Analysis of water migration characteristics of pot-cover effect [J]. Industrial Construction, 2016, 46(9): 6-9. DOI: 10.13204/j.gyzj201609002.
- [8] 张升, 贺佐跃, 滕继东, 等. 非饱和土水汽迁移与相变: 两类“锅盖效应”的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(5): 961-968. DOI: 10.11779/CJGE201705022.
ZHANG Sheng, HE Zuoyue, TENG Jidong, et al. Water vapor transfer and phase change in unsaturated soils: experimental study on two types of canopy effect [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(5): 961-968. DOI: 10.11779/CJGE201705022.
- [9] 李彦龙, 王俊, 王铁行. 温度梯度作用下非饱和土水分迁移研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 2839-2844. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.10.014.
LI Yanlong, WANG Jun, WANG Tiehang. Moisture migration of unsaturated soil due to thermal gradients [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(10): 2839-2844. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.10.014.
- [10] 马浪, 张瑞玲, 张明礼. 季节冻土路基覆盖效应换填控制效果研究[J]. 甘肃科学学报, 2023, 35(3): 113-120. DOI: 10.16468/j.cnki.issn1004-0366.2023.03.019.
MA Lang, ZHANG Ruiling, ZHANG Mingli. Research on the control effect of subgrade covering effect on seasonally frozen soil [J]. Journal of Gansu Sciences, 2023, 35(3): 113-120. DOI: 10.16468/j.cnki.issn1004-0366.2023.03.019.
- [11] 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. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2015.0023.
LI Anyuan, NIU Yonghong, NIU Fujun, 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. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2015.0023.
- [12] 苏群. 东北地区路基土冻胀机理与防治对策[J]. 黑龙江工程学院学报, 2001, 15(1): 2-4, 13. DOI: 10.3969/j.issn.1671-4679.2001.01.002.
SU Qun. The principle and prevention countermeasure of subgrade soil heaving in northeast region [J]. Journal of Heilongjiang Institute of Technology, 2001, 15(1): 2-4, 13. DOI: 10.3969/j.issn.1671-4679.2001.01.002.
- [13] 汤永强, 王宁伟, 王松, 等. 季冻区软黏土路基电动化学加固试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(2): 282-289. DOI: 10.11717/j.issn: 2095-1922.2020.02.11.
TANG Yongqiang, WANG Ningwei, WANG Song, et al. Experimental study on electrokinetic stabilization of soft clay in seasonal frozen ground regions [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2020, 36(2): 282-289. DOI: 10.11717/j.issn: 2095-1922.2020.02.11.
- [14] 张文杰, 耿潇. 垃圾填埋场毛细阻滞型蒸发封顶工作机理及性能分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(3): 454-459. DOI: 10.11779/CJGE201603008.
ZHANG Wenjie, GENG Xiao. Performance and mechanism of capillary-barrier evapotranspiration cover of landfills [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(3): 454-459. DOI: 10.11779/CJGE201603008.
- [15] 焦卫国, 刘振男, 季永新, 等. 红黏土覆盖层水力参数演变规律与防渗设计讨论[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(1): 45-52. DOI: 10.11779/CJGE202201003.
JIAO Weiguo, LIU Zhennan, JI Yongxin, et al. Evolution laws of hydraulic parameters of red clay covers and design of seepage prevention [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(1): 45-52. DOI: 10.11779/CJGE202201003.
- [16] LEE M L, KOO C H, CHONG S Y, et al. Laboratory and numerical studies of rainfall infiltration into residual soil slope improved by biomediated soil cover [J]. Water, 2022, 14(5): 744. DOI: 10.3390/w14050744.
- [17] ZHANG L M, KE Y Q. Combinations of soil materials for granular capillary barriers for minimizing rainfall infiltration and gas emission [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 54(11): 1580-1591. DOI: 10.1139/cgj-2016-0334.
- [18] 焦卫国, 詹良通, 季永新, 等. 黄土-碎石毛细阻滞覆盖层储水能力实测与分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(6): 1149-1157. DOI: 10.11779/CJGE201906020.
JIAO Weiguo, ZHAN Liangtong, JI Yongxin, et al. Field tests on water storage capacity of loess-gravel capillary barrier covers [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(6): 1149-1157. DOI: 10.11779/CJGE201906020.
- [19] 王甦宇, 刘爱华, 邹家强, 等. 毛细阻滞覆盖层边坡防护技术研究综述[J]. 人民长江, 2022, 53(4): 79-85, 97. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2022.04.013.
WANG Suyu, LIU Aihua, ZOU Jiaqiang, et al. Review on slope protection technique of capillary barrier [J]. Yangtze River, 2022, 53(4): 79-85, 97. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2022.04.013.
- [20] 吴宏伟, 周超, 张帅, 等. 状态相关非饱和土力学理论及应用[J]. 中国科学: 技术科学, 2023, 53(10): 1728-

1746. DOI: 10.1360/SST-2022-0383.
- WU Hongwei, ZHOU Chao, ZHANG Shuai, et al. State-dependent theory for unsaturated soil and its applications [J]. *Scientia Sinica(Technologica)*, 2023, 53(10): 1728-1746. DOI: 10.1360/SST-2022-0383.
- [21] 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.
- [22] 焦卫国,庾斌,张松,等.西北非湿润区毛细阻滞覆盖层防渗性能验证与长期服役高危易渗气象段分析[J]. *岩土力学* 2023, 44(增刊1): 539-547. DOI: 10.16285/j.rsm.2022.1075.
- JIAO Weiguo, TUO Bin, ZHANG Song, et al. Anti-seepage performance verification and analysis of high-risk permeable meteorological period of capillary barrier cover in Northwest non humid area [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(Sup. 1): 539-547. DOI: 10.16285/j.rsm.2022.1075.
- [23] 杨清雷,张金利,杨庆,等.毛细阻滞型腾发封顶系统中水分运移特性分析[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(3): 7-11. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb. 2011. 03.001.
- YANG Qinglei, ZHANG Jinli, YANG Qing, et al. Simulation of moisture transport in evapo-transpiration covers of shallow capillary barrier for landfills [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(3): 7-11. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb. 2011.03.001.
- [24] 陈冠一,肖杰,陈强,等.不同毛细阻滞覆盖层处治膨胀土边坡的渗流及稳定性研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(1): 199-213. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2022.01.015.
- CHEN Guanyi, XIAO Jie, CHEN Qiang, et al. Study on seepage and stability of expansive soil slope treated by different capillary barrier cover layers[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53(1): 199-213. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2022.01.015.
- [25] YANG H, RAHARDJO H, LEONG E C, et al. A study of infiltration on three sand capillary barriers [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2004, 41(4): 629-643. DOI: 10.1139/t04-021.
- [26] 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. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20200064.
- 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. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20200064.
- [27] 张明礼,温智,董建华,等.降雨增加对多年冻土区铁路路基水热影响研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(10): 2580-2590. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0424.
- ZHANG Mingli, WEN Zhi, DONG Jianhua, et al. The influence of rainfall increasing on thermal-moisture dynamics of railway embankment in cold regions [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(10): 2580-2590. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0424.
- [28] LUO T, QU X, WANG N D, et al. Pot cover effect and its prevention: an experimental study in the field [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, 167: 102845. DOI: 10.1016/j.coldregions.2019. 102845.
- [29] 李晓康,李旭,吴羊,等.含非饱和导排层毛细阻滞覆盖层服役性能试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(增刊1): 189-194. DOI: 10.11779/CJGE2022S1034.
- LI Xiaokang, LI Xu, WU Yang, et al. Experimental study on service performance of capillary capillary barrier cover with unsaturated drainage layer [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(Sup. 1): 189-194. DOI: 10.11779/CJGE2022S1034.
- [30] 李晓康,李旭,王菲,等.毛细阻滞覆盖层储水能力和击穿时间试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(7): 1501-1511. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2021.0839.
- LI Xiaokang, LI Xu, WANG Fei, et al. Experimental study on water storage capacity and breakthrough time of capillary barrier cover [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(7): 1501-1511. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2021.0839.
- [31] 李光耀,詹良通,焦卫国,等.中国西北地区生态型土质覆盖层厚度设计简化方法[J/OL]. *土木与环境工程学报(中英文)*. 1-12 (2023-12-08) [2024-04-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU. 20231206.1009.002.html>.
- LI Guangyao, ZHAN Liangtong, JIAO Weiguo, et al. Simplified method for thickness design of ecological soil covers in northwest China [J/OL]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*. 1-12 (2023-12-08) [2024-04-14]. <http://kns. cnki. net/kcms/detail/50.1218. TU. 20231206.1009.002.html>.
- [32] 贺佐跃,张升,滕继东,等.冻土中气态水迁移及其对土体含水率的影响分析[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(7): 1190-1197. DOI: 10.11779/CJGE201807004.
- HE Zuoyue, ZHANG Sheng, TENG Jidong, et al. Vapour transfer and its effects on water content in freezing soils [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(7): 1190-1197. DOI: 10.11779/CJGE201807004.

(责任编辑:毛娜;校对:刘平)