

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.06.020

多次冻融循环人工盐渍土路基模型试验研究*

杨进财¹, 巩丽丽², 王旭¹, 张延杰¹, 王彦虎², 李建东¹

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃兰州 730070; 2. 中国中铁二院集团有限责任公司, 四川成都 610031)

摘要: 青藏铁路西宁至格尔木段为典型的季节性冻土区铁路, 冻害频发, 严重影响铁路的正常使用和安全运营, 为了整治路基体发生冻害, 结合成熟的注浆技术和传统撒盐法, 提出注盐法整治路基冻害。在室内模型箱中填筑实体模型, 进行封闭系统中多次冻融循环条件下人工盐渍土路基模型试验, 探究人工盐渍土路基中温度、水分、盐分以及变形规律, 验证注盐法整治路基冻害的可行性。试验结果表明: 路基土体内温度变化趋势符合环境温度变化趋势的余弦函数变化波动规律, 土体内温度变化较环境温度变化推迟 36 h 左右; 温度梯度是引起水分迁移的主要因素, 越接近冷端, 迁移量越大, 在冻结锋面处达到最大; 在封闭系统中, 盐分随着水分向冷端运移, 但是盐分运移量较低, 随着周期的推进, 盐分呈逐渐降低的趋势; 随着温度的周期性变化路基顶面的变形呈现出有规律的冻胀和融沉现象, 但是最大冻胀量为 0.08 mm, 可见路基盐化之后路基土体基本不产生冻胀变形。

关键词: 季节性冻土区; 铁路路基; 多次冻融循环; 人工盐渍土; 模型试验

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)06-1001-08

Experimental Study on Multiple Freezing-Thawing Cycles of Artificial Saline Soil Subgrade

YANG Jincai¹, GONG Lili², WANG Xu¹, ZHANG Yanjie¹, WANG Yanhu², LI Jiandong¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Grope Co.Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: The Xining-Golmud section of Qinghai-Tibet Railway is in the typical seasonal frozen soil region. This railway suffers from frost damage frequently, which seriously affects the normal and safe operation of the railway. In order to remedy the frost damage of the roadbed, a salt injection approach combining the mature grouting technology and the traditional salt spraying method was put forward in this paper. The artificial saline soil model was prepared by filling soil in a model box. The model was then submitted to multiple freezing-thawing cycles test in a closed system. The change rule of temperature, moisture, salinity and deformation of saline soil was studied, and the feasibility of salt injection in embankment damage mitigation in the permafrost region was validated. The result displays that the variation trend of temperature in subgrade soil conforms to the variation law of cosine function of environmental temperature, and the temperature in subgrade soil has about 36 hours delay comparing to

* 收稿日期:2018-10-15;修回日期:2019-02-23

基金项目:青藏铁路公司科技研究开发计划课题(QZ2015-G01)、冻土工程国家重点实验室开放基金(SKLFSE201607)资助

作者简介:杨进财(1992-),男,硕士研究生。主要从事铁路路基方面的研究。Email:1612847374@qq.com

通讯作者:王旭(1965-),男,教授,博导。主要从事岩土工程方面的研究。Email:publicwang@163.com

environmental temperature. The temperature gradient is the main factor causing water migration. The closer the area to the cold side, the greater the amount of water migration. The maximum migration appears at the freezing front. In the closed system, the salt migrates to the cold side with the water, but the amount is low. The salt content decreases gradually with the increase of cycles. With the periodic change of temperature, the deformation at the embankment surface presents a regular phenomenon of frost heave and thaw settlement, and the maximum frost heave is 0.08mm. It can be seen that the subgrade soil does not produce frost heave after subgrade salinization.

Keywords: seasonal frozen soil area; railway subgrade; multiple freezing and thawing cycles; artificial saline soil; model test.

引言

冻土作为一种温度低于0℃且含有冰的土岩,季节性冻土是冻土的一种,只在地表几米范围内冬季冻结、夏季消融,广泛分布在我国的东北、华北及西北等地,我国季节性冻土分布面积占国土面积的53.5%^[1]。对于季节性冻土区的铁路路基,温度变化经常引起路基冻胀融沉的病害^[2-3],整治季节性冻土区铁路路基冻害的方法很多^[4],研究发现,在路基土体中掺入一定量的盐分,使路基土体人工盐渍化,可在一定程度上预防冻胀^[5]。

针对人工盐渍化路基土体预防冻胀,王云霞^[6]通过分析京原线涞源地区的路基产生冻害的原因,结合实际情况提出采用钻孔埋管注盐法预防路基冻害;倪铁山等^[7]对长白铁路长春段路基冻土进行试验研究,提出将路基土盐化的方法整治铁路路基冻害;肖泽岸等^[8]通过单向冻结试验,研究了冻结过程中的水盐运移过程及土体变形,从而为深入了解盐渍土在冻结过程中的变形机理提供理论参考;王彦虎等^[9]通过对青藏铁路环青海湖段铁路路基冻害原因进行分析,提出了钻孔埋管注盐法整治路基冻害,并提出了注盐相关参数。

针对多次冻融循环模型试验,刘德仁等^[10]采用填筑室内黄土边坡模型试验,研究了控制降雨—日照循环条件对黄土边坡模型中温度、水分及坡面位移变化的影响结果;张莎莎等^[11]对天然粗粒盐渍土进行不同方法的化学成分分析试验、模拟季节交替冻融循环试验、有(无)附加荷载单次降温盐胀试验及大型溶陷试验的基础上,开展了多次冻融循环条件下大型路堤模型试验;王静等^[12]选择季节冻土地

区3种不同塑性指数的路基土,在封闭条件下进行多次冻融循环过程不同围压下的三轴压缩试验;包卫星等^[13]对喀什地区12处天然盐渍土进行室内基本性质试验分析,在开放系统中选取典型天然盐渍土,进行反复冻融循环条件下的试验研究,针对不同土类别研究了天然盐渍土的盐胀规律。

目前针对季节性冻土区铁路路基冻胀融沉规律研究已经比较深入^[14-18],但是对于人工盐渍化后的路基土体中温度、水分及变形的变化规律研究较少。本文采用冻土环境箱填筑模型试验的方法,探究人工盐渍化路基土体内部温度、水分、变形和盐分的变化规律,并验证人工盐渍化路基土体整治路基冻害的可行性。

1 试验方案及过程

1.1 试验仪器及监测系统

试验装置分别由模型试验箱、高低温控制器和数据采集系统3部分组成,如图1所示。

模型箱外尺寸长宽高为3.5 m×2.0 m×2.2 m,四周壁厚为15 cm,中间填充保温材料,以隔绝冻土环境箱内外的热量交换,达到保温的作用。箱体内部

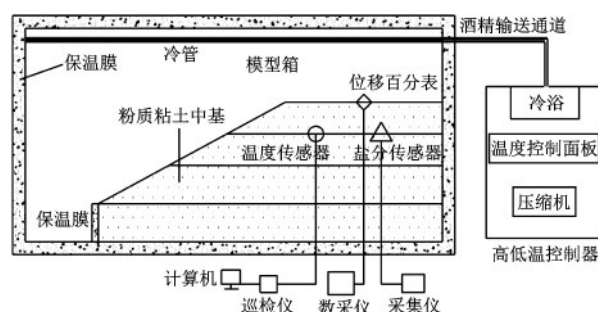


图1 试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of the test device

部顶面和两侧布设酒精循环冷管,来控制环境箱温度。

高低温控制器的型号为XT5701LTB-450,外形尺寸为730 mm×750 mm×1 100 mm,包括恒温槽内胆、控制显示面板、压缩机、熔丝管、温度传感器等。试验过程中温度可通过装置本身设定的程序,通过显示面板进行调节控制。

数据采集系统包括温度测试系统、盐分测试系统、变形测试系统和水分测试系统。

温度由pt100温度传感器采集,在试验段中心和试验段中心左右0.4 m处布设三个温度监测断面,每个断面分三层布置温度传感器,如图2所示。每个断面布设12个温度探头,用巡检仪每隔3 h自动测试一次。

盐分由盐分传感器测定,在试验段中心断面和距中心断面0.4 m处分三层布置两个盐分监测断面,如图2所示。每个断面布设6个盐分探头,用盐分自动采集仪每隔8 h手动采集一次。

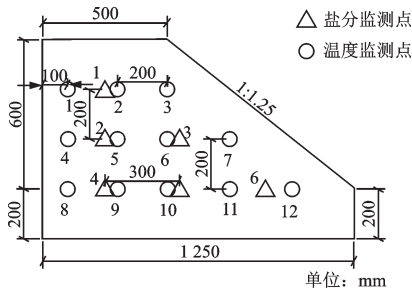


图2 盐分和温度传感器布置

Fig.2 Schematic diagram of salt and temperature sensors

路基顶面变形由机电百分表测定,在试验段中心和距中心0.4 m处布设两个变形监测断面,每个断面架设4个机电百分表,如图3和图4所示。通过电脑终端数据采集仪每隔15 min采集一次。

试验处于封闭模型箱中,没有水分补给,水分测试在整个试验过程结束后进行,整个循环过程

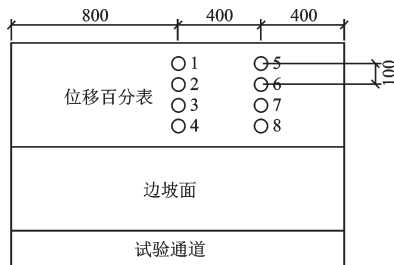


图3 变形测试点布置示意

Fig.3 Schematic diagram of displacement test

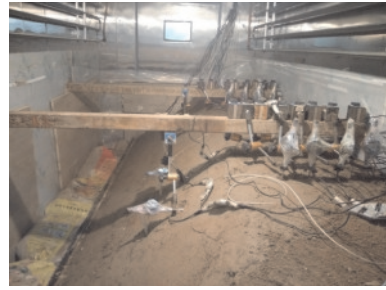


图4 模型试验概况

Fig.4 General situation of model test

中,路基土体内部水分基本保持平衡。试验周期结束后,分别在-12℃冻结状态和+12℃融化状态下控温48 h,稳定后分两次利用洛阳铲取不同深度处路基土体测其含水率,取样过程如图5所示。



图5 含水率取样

Fig.5 Water content sampling diagram

1.2 温度条件及模型设计

根据青藏铁路西宁至格尔木段的四季气温变化情况,试验温度按照式(1)进行控制,其中年平均气温为1.5℃,一个周期为144 h,其中环境气温为负值的时间为68 h、为正值的时间为76 h,正温时间占比53%。温度控制曲线如图6所示,试验理想温度为余弦函数关系曲线,试验控制温度按照式(1)每隔4 h调节一次,由图可知控制温度基本能够反应理想温度趋势。

$$T = 1.5 + 15 \sin(2\pi t/144 + 9.525) \quad (1)$$

模型试验设计如图1所示,取对称路基断面的一半作为试验段,路基高度为0.8 m,顶面一半宽度为0.5 m,底面一半宽度为1.25 m,放坡比例为1:1.25,坡底高度为0.2 m,试验段总长为1.6 m。

1.3 土样参数

填筑路基的土样基本参数为:最大干密度为1.63 g/cm³,天然密度为1.3 g/cm³,最优含水率为

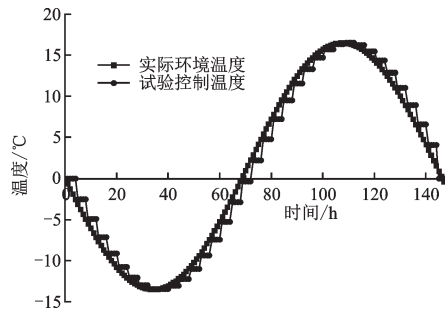


图6 温度随时间变化曲线

Fig.6 Temperature changing curves with time

16.5%，液限为 32.78，塑限为 21.10，塑限指数为 11.68。模型分层填筑，压实度控制为 0.8。试验用盐采用工业氯盐 ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$)，按比例 2% 提前拌入土体中。

2 试验结果分析

2.1 温度场分析

本次试验进行了四个周期，先列出第二个周期的温度进行分析，因为第二个周期从 $0^\circ C$ 开始，先冻后融，数据更能显示实际现场的变化规律，每个周期为 144 h。180 h 和 252 h 对应的温度分别是环境箱内的最低温度和最高温度。

图 7 所示为模型试验第二个周期内五个时间点的温度场分布图。由图可知，路基表面温度首先开

始下降，随着环境温度不断降低，路基土体内部的 $0^\circ C$ 等温线也不断向路基内部移动，冻结面向路基核心移动。而后环境温度开始上升，在 216 h 时环境温度为正温，但是此时，整个路基土体都处于冻结状态，说明路基土体温度的升降与环境温度存在一定的滞后，路基土体温度较环境温度变化滞后 36 h 左右。此后，环境温度不断上升，在 252 h 达到最高温度，由图 7(d) 可以看出，沿路基土体深度方向，温度呈现逐渐回升的现象，在路基中心出现了 $0^\circ C$ 等温线，路基表面土体温度随着环境温度的升高而上升。到 288 h 时，环境温度再次下降，路基土体开始冻结，而此时 $0^\circ C$ 等温线出现在了路基体中心处和接近路基顶面处，且路基内的整体温度比较低，温度梯度变化大。这主要是因为路基土体中加入一定的盐量，当温度降低时，水分向冷端迁移，导致冷端的盐分浓度降低，所以在环境温度开始下降时冷端容易发生冻结现象。由此可以说明，路基内加入一定的盐分含量对于路基内温度变化有一定的影响。

2.2 路基表面变形分析

在冻融循环过程中，路基表面监测点的位移变化曲线如图 8 所示，图 8(a) 为路基中心断面，图 8(b) 为距路基中心 0.4 m 处断面，可以看出两个断面的位移变化规律接近余弦变化趋势。

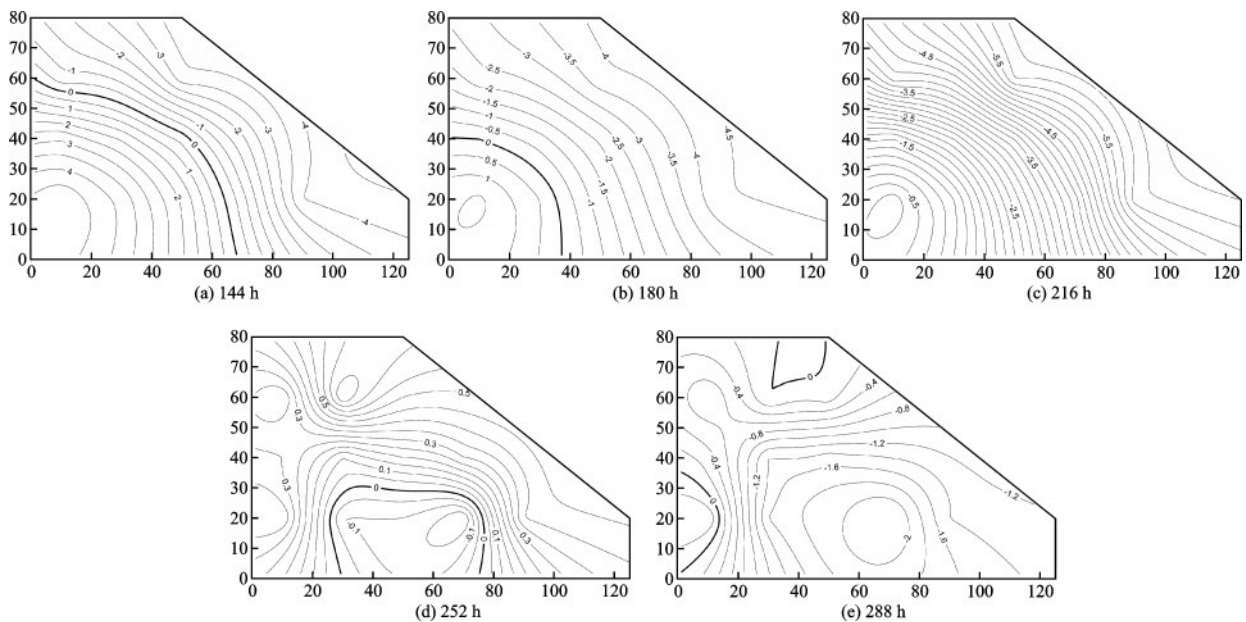


图7 第二个周期内的等温图

Fig.7 Isothermal diagram in second cycles

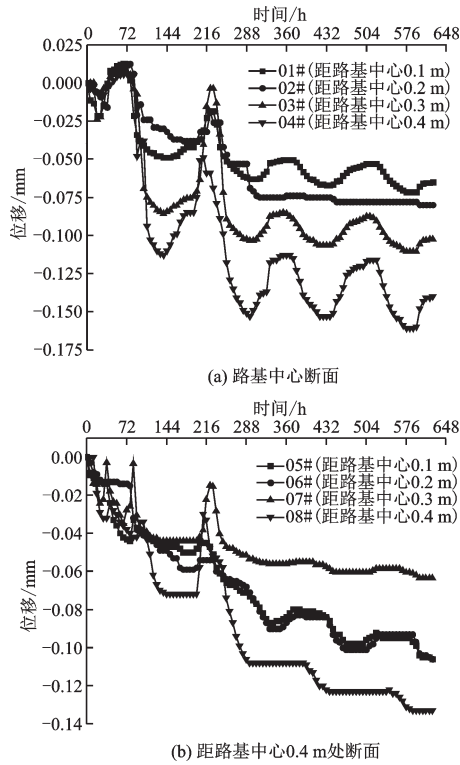


图8 冻融过程中监测断面位移变化

Fig.8 Change of displacement of monitoring section during freezing-thawing process

位移量负值表示融沉和沉降,正值表示冻胀,冻胀变形的极大值在最低温度后产生。路基中心断面土体最终沉降量为 0.16 mm,最大冻胀量为 0.08 mm,最大融沉量为 0.12 mm,且均发生在第二个冻融循环周期中。距路基中心 0.4 m 处的断面土体最终沉降量为 0.14 mm,最大冻胀量为 0.05 mm,最大融沉量为 0.045 mm。两者变化规律比较接近,均随着距路基中心的距离增大,冻融变形量发生较大变化,特别是距路基中心 0.3 m 和 0.4 m 处的变形波动形式与温度变化的余弦形式相一致,表现出有规律的冻胀融沉现象。在 0.3 m 处,出现冻胀量最大值。在 0.4 m 处,出现融沉量最大值,冻胀融沉规律比较明显,但总体变化量不大。

随着温度的周期变化,路基土体呈现出小范围的抬升和下沉,累计固结沉降逐渐增大。两个监测断面的位移变化趋势基本一致,冻胀融沉范围为 0~0.16 mm。在同期内冻胀最大值和融沉最大值均滞后温度最低温和最高温 36 h 左右。其主要原因是,试验用较短时间(144 h)的温度变化模拟现场环境一年的气温变化,温度的快速变化,使得路基体的冻融量没有完全产生。

在路基体的冻融循环过程中,路基中心断面处距离路基中心不同距离土体的冻胀融沉变化量过程曲线如图 9 所示。由图可以看出,路基体的总体冻融变化量不大,且冻胀融沉量的最大值均出现在第二个冻融循环周期中,从而也很好的和前文中第二个周期中温度分析对照起来。另外路基土体的冻胀融沉变化量随冻融循环周期的进行,呈现出先增大后减小,趋于稳定的趋势。

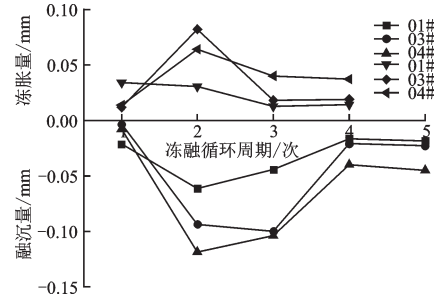


图9 路基中心断面处的冻胀融沉变化量

Fig.9 Variation of frost heave and thaw settlement at the center section of roadbed

2.3 路基体盐分运移分析

季节性冻土区盐渍土的盐胀融陷特性对路基的质量有一定的影响。路基体温度的变化将引起水分的迁移,进而引起盐分的运移。为了研究水分迁移时引起的盐分运移规律,在冻融循环过程中,在路基体中设置盐分检测点(图 2),各断面盐分检测点含盐量随时间变化曲线如图 10 所示。图 10(a)为一号断面,其在路基中心断面处,图 10(b)为二号断面,其在距路基中心断面 0.4 m 处。路基填筑时,土体初始盐含量控制为 2.0%,因此选盐含量为 2.0% 水平直线作为理想盐分线。

由图 10(a)可知,路基一号断面不同位置处的盐分运移变化规律基本相似。随着周期的进行,所有监测点盐分呈缓慢减小的趋势。其主要原因是路基体在冻融循环过程中,特别是在路基土体冻结的过程中,有固相的氯化钠晶体析出,同时析出的晶体中含有水,使得路基体中盐分和水分含量都降低。图 10(b)可知,盐分运移量在随着周期的进行缓慢降低,并且在同一个周期里,盐分随着时间呈现出小范围的余弦变化趋势,温度最低时盐分缓慢下降,温度最高时盐分有小范围的提升。9#、10#、11#、12#监测点在四个冻融循环周期中盐分运移的

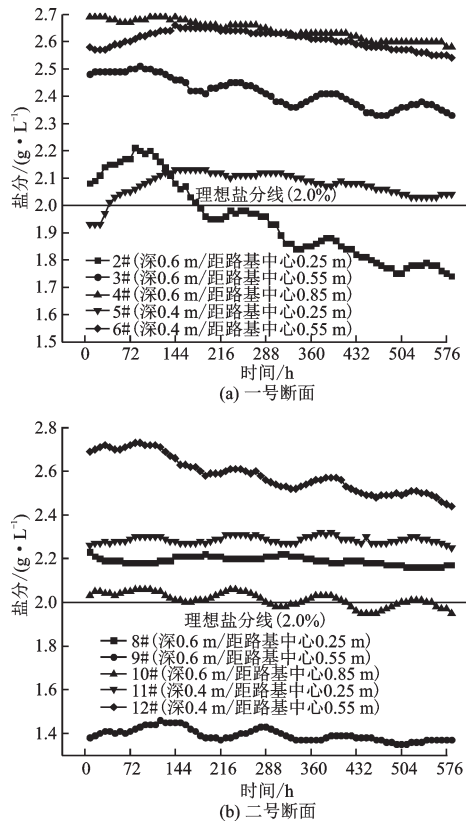


图10 盐分随时间变化曲线

Fig.10 Change curves of salt with time

增加量分别为 0.045%、0.047 5%、0.037 5%、0.035%，减少量分别为 0.063 3%、0.067 5%、0.04%、0.097 5%，盐分运移增加量始终小于减少量，其也是由土体在冻胀过程中，氯化钠晶体析出引起的。

此外还可看出，在冻胀融沉过程中，3#和12#盐分检测点的盐含量变化曲线波动较大，因为这两个监测点设置在路基表层，接近坡面，其温度直接受到外界环境温度的影响，温度变化量大，引起路基表层水分迁移，导致表层土体盐分运移量大于路基体内部土体，从而导致盐分随水分向冷端面迁移。

因为温度是引起水分迁移的主要因素，温度越低水分迁移变化越大，在水分向冷端面迁移的过程中，一定条件下路基土体中盐分达到溶解度出现部分盐分随着温度的降低慢慢的析出，从而带动路基体盐分运移。随着温度的回升，水分逆向迁移，析出的部分氯化钠晶体再次溶于水，使得路基体中的盐分含量增加，水分和盐分重分布。现场检测结果发现^[19]，在此冻融循环过程中容易引起路基的盐胀现象，影响道路的正常运营。

总体来说，温度对盐分的迁移影响较小，而在接近坡面的地方温度影响水分迁移，导致路基中盐分含量发生一定的变化。由试验结果可知，在冻融循环过程中，掺入2%的氯盐路基土体温度变化较小，盐分减少量不明显，同时盐含量还可以抑制水分的迁移。

2.4 路基体水分迁移分析

路基体在冰冻和融化时，不同位置处土体含水率变化曲线如图11所示。土体的初始含水率为16.5%，可以看出，在冻融循环过程中，不同位置处路基土体水分发生不同程度的迁移。

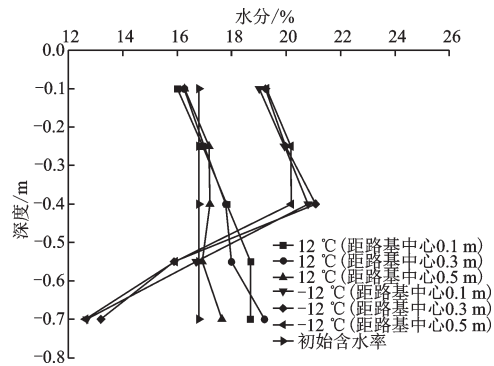


图11 水分迁移变化曲线

Fig.11 Water migration curve

在-12°C低温冻结状态时，接近路基表面处，水分迁移较大，含水率变化量在3.5%~4.5%，在路基深度0.40 m处，水分迁移量达到最大值4.5%。在距路基中心0.1、0.2、0.3 m位置处最大含水率分别为20.81%、21.08%、20.17%，含水率变化量分别为4.31%、4.58%、3.67%，可以看出随着路基深度的增加，水分迁移量越来越小，并且在路基底层，土体含水率低于初始含水率，因在低温状态时，路基表面开始冻结，且冻结面慢慢向路基核心移动，在温度梯度的驱动下，模型箱路基土体中的水分向冻结锋面迁移，导致路基浅层含水率大于初始含水率，路基底层含水率小于初始含水率。

在+12°C正温融化状态时，路基不同深度处水分迁移量比较小，路基体的含水率基本维持在初始含水率16.5%左右。因为路基土体处于正温状态时，温度梯度小，对水分迁移作用不明显。可见，温度是影响水分迁移的主要因素，越接近坡面和顶面，越接近冷端，路基土体水分迁移量越大。

3 结 论

通过在封闭模型试验箱中填筑人工盐渍土路基进行实体模型试验,分别分析温度、变形、盐分和水分变化规律,得到结论如下:

(1)在路基土体冻融循环的过程中,人工盐渍化路基土体内部温度变化趋势和与环境温度变化趋势一致,土体冻结最低温度滞后环境最低温度36 h左右。

(2)在封闭系统中,水分和盐分总体上都是向冷端面迁移,但是盐分运移量较低,随着周期的推进,主要是在温度降低时,有部分盐分晶体析出,引起盐分呈逐渐降低的趋势;而水分迁移变化量比较大,越接近冷端,迁移量越大,迁移量在冻结锋面处达到最大。

(3)在整个冻融循环的过程中,路基土体伴随温度的周期性变化,呈现出有规律的抬升和下沉现象,且伴随着土体的固结沉降。

(4)盐化之后路基土体最大冻胀量为0.08 mm,基本不产生冻胀,可见注盐法整治季节性冻土区路基冻害是可行的。

参考文献:

[1] 徐学祖,王家澄,张立新. 冻土物理学[M]. 北京:科学出版社,2001.
Xu X Z, Wang J Ch, Zhang L X. Permafrost physics [M]. Beijing: Science Press, 2001.(in Chinese)

[2] 刘德仁,赖远明,董元宏,等. 冻土区块石夹层路基防冻胀翻浆效果试验研究[J]. 岩土力学,2012,33(3):753-756.
Liu D R, Lai Y M, Dong Y H, et al. Experimental study of anti-frost-heave and frost boil effect of block-stone-interlayer embankment in permafrost regions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3):753-756.(in Chinese)

[3] 严 晗,王天亮,刘建坤. 粉砂土反复冻胀融沉特性试验研究[J]. 岩土力学,2013(11):3159-3165.
Yan H, Wang T L, Liu J K. Experimental study of repeated frost heave and thaw settlement properties of silty sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013(11):3159-3165.(in Chinese)

[4] 周志军,钟世福,梁 涵. 冻融循环次数对黄土路用性

能影响规律的试验[J]. 长安大学学报(自然科学版),2013,33(4):1-6.
Zhou Zh J, Zhong Sh F, Liang H. Test research on change law of highway performance at loess are influenced by number of freeze-thaw cycles[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2013, 33(4):1-6.(in Chinese)

[5] 李国玉,喻文兵,马 巍,等. 甘肃省公路沿线典型地段含盐量对冻胀盐胀特性影响的试验研究[J]. 岩土力学,2009,30(8):2276-2280.
Li G Y, Yu W B, Ma W, et al. Experimental study of characteristics of frost and salt heaves of saline highway foundation soils in seasonally frozen regions in Gansu Province[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8):2276-2280.(in Chinese)

[6] 王云霞. 采用钻孔埋管注盐法预防路基冻害[J]. 铁道技术监督,2012,40(8):35-35.
Wang Y X. Application of the method of drilling and burying pipe to prevent the disease of roadbed[J]. Railway Quality Control, 2012, 40(8):35-35.(in Chinese)

[7] 倪铁山,丁 超. 注盐法整治铁路路基冻害的试验性研究[J]. 科技创新与应用,2012(32):218-219.
Ni T Sh, Ding Ch. Experimental study on the treatment of roadbed frost damage by salt injection[J]. Technology Innovation and Application, 2012(32):218-219.(in Chinese)

[8] 肖泽岸,赖远明,尤哲敏. 单向冻结过程中NaCl盐渍土水盐运移及变形机理研究[J]. 岩土工程学报,2017,39(11):1992-2001.
Xiao Z A, Lai Y M, You Zh M. Water and salt migration and deformation mechanism of sodium chloridesoil during unidirectional freezing process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(11):1992-2001.(in Chinese)

[9] 王彦虎,王 旭,杨 楠,等. 钻孔埋管注盐法整治季节性冻土区路基冻害现场试验研究[J]. 冰川冻土,2017,39(6):1265-1272.
Wang Y H, Wang X, Yang N, et al. Field test study on railway subgrade against frost damage in seasonally frozen ground areas by using salt injection method[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(6):1265-1272.(in Chinese)

[10] 刘德仁,张文清,黄新智,等. 非饱和黄土边坡水热变化过程室内模型试验研究[J]. 岩土力学,2017,38(增2):236-240.
Liu D R, Zhang W Q, Huang X Zh, et al. Laboratory

- model test on water and heat variation process of unsaturated loess slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(Sup2):236-240. (in Chinese)
- [11] 张莎莎, 杨晓华, 张秋美. 天然粗粒盐渍土大型路堤模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(5): 842-847.
Zhang Sh Sh, Yang X H, Zhang Q M. Large-scale model tests on embankment of crude coarse grained saline soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(5):842-847.(in Chinese)
- [12] 王 静, 刘寒冰, 吴春利. 冻融循环对不同塑性指数路基土弹性模量的影响研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(12):3 665-3 688.
Wang J, Liu H B, Wu Ch L. Influence of freeze-thaw cycles on elastic modulus of subgrade soil with different plasticity indices[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12):3 665-3 688.(in Chinese)
- [13] 包卫星, 杨晓华, 谢永利. 典型天然盐渍土多次冻融循环盐胀试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1 991-1 995.
Bao W X, Yang X H, Xie Y L. Research on salt expansion of representative crude saline soil under freezing and thawing cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(11): 1 991-1 995.(in Chinese)
- [14] O'Neill K, Miller R D. Exploration of a rigid ice model of frost heave[J]. Water Resources Research, 1985, 21(3):281-296.
- [15] Coussy O, Monteiro P J M. Poroelastic model for concrete exposed to freezing temperatures[J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(1):40-48.
- [16] 张玉芝, 杜彦良, 孙宝臣, 等. 季节性冻土地区高速铁路路基冻融变形规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(12): 2 546-2 553.
Zhang Y Zh, Du Y L, Sun B Ch, et al. Study on the freezing and thawing deformation law of high speed railway subgrade in seasonally frozen soil area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(12):2 546-2 553.(in Chinese)
- [17] 杜晓燕, 张千里, 孔郁斐, 等. 高速铁路路基粗粒土冻胀机理探析[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(增1):152-156.
Du X Y, Zhang Q L, Kong Y F. et al. Frost heave mechanism analysis of coarse grained soil for high speed railway subgrade [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12 (Sup1): 152-156.(in Chinese)
- [18] Lu J, Zhang M, Zhang X, et al. Experimental study on the freezing-thawing deformation of a silty clay[J]. Cold Regions Science & Technology, 2018, 151(1):19-27.
- [19] 张莎莎, 杨晓华, 戴志仁. 天然粗颗粒盐渍土多次冻融循环盐胀试验[J]. 中国公路学报, 2009, 22(4): 28-32.
Zhang Sh Sh, Yang X H, Dai Zh R. Freezing-thawing cycles and salt expansion test of crude coarse grain clay salty soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(4):28-32.(in Chinese)

(本文责编:赵 霞)