

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.03.19

季节性冻土区人工盐化路基冻胀模型试验

巩丽丽¹, 王彦虎¹, 杨楠², 张延杰¹, 刘德仁¹

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 青藏铁路公司西宁工务段, 青海 西宁 810006)

摘要:以青藏铁路西格段季节性冻土区路基冻害为研究背景,在室内分普通和盐化两个试验段填筑路基实体模型,进行封闭系统中反复冻融循环条件下的模型试验,分析冻融循环条件下普通路基和人工盐化路基的温度和位移规律,并探讨水分、盐分的迁移规律。结果表明:路基土体温度与环境温度变化趋势一致,路基土体的温度滞后于环境温度约36 h;越靠近冷端的位置,温度波动范围越大,温度随着深度的增加逐渐减小,温差也随之减小,路基土体温度的波动范围约为环境温度波动的一半;温度是影响水分迁移的主要因素,水分迁移在路基顶面以下一定的范围内达到最大,越靠近冷端,水分迁移量越大;路基土盐化之后冻胀量减小约73.9%,说明人工盐化路基土的方法可以整治季节性冻土区路基冻害。

关键词:季节性冻土区;人工盐化路基;冻胀;模型试验;冻融循环

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)03-0129-07

Experimental study on frost heave model of artificial saline subgrade in seasonal frozen soil area

GONG Lili¹, WANG Yanhu¹, YANG Nan², ZHANG Yanjie¹, LIU Deren¹

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

2. Xining Railway Section of Qinghai Tibet Railway Company, Xining, Qinghai 810006, China)

Abstract: Based on the research background of roadbed freezing injury in the seasonally frozen soil area of Qinghai-Tibet railway, roadbed solid mode is filled indoors, and the model test is carried on under the condition of repeated freezing and thawing cycles in a closed system. The temperature, frost heave and thawing rule of ordinary sugared and artificial stalinized roadbed under freeze-thaw cycle were analyzed, and the law of water and salt migration was discussed. The results show that the internal temperature of sugared soil is consistent with the environmental temperature, and the temperature in the subsoil is lag about 36 hours of the environmental temperature. The closer to the cold end, the greater the temperature fluctuation range is, temperature decreases with the increase of depth, and the temperature difference decreases. The fluctuation range of the internal temperature of the subsoil is about half of the fluctuation of ambient temperature. Temperature is the main factor affecting the water migration and the water transfer reaches the largest in the range of the sugared, the closer to the cold end, the greater the moisture transfer. After the stalinization of sugared soil, the frost heaving decreased by about 73.9%, indicating that the method of artificial saline subsoil can be used to improve the seasonal frozen soil sugared freezing damage.

Keywords: seasonal frozen soil area; artificial saline sugared; frost heave; model test; freeze-thaw cycle

收稿日期: 2018-07-25; 修订日期: 2018-08-07

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)

第一作者: 巩丽丽(1991-), 女, 硕士研究生, 建筑与土木工程专业, 主要从事路基工程研究工作。E-mail: 2823638498@qq.com

0 引言

季节性冻土指的是冬季冻结春季融化的土层,我国季节性冻土区面积大约 $5.137 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占国土面积的 53.5%, 西从云南章凤, 向东经昆明、贵阳, 绕四川盆地北缘, 到长沙、安庆、杭州一带。季节性冻土的冻胀、融沉特性对工程影响重大, 因此在季节性冻土地区修筑铁路应特别考虑冻害对路基的影响及防范措施^[1]。

国内外很多学者对冻融循环试验过程中水分和盐分迁移问题进行了系统的研究^[2-8]; 王静等^[9]取季节性冻土区 3 种不同塑性指数路基土在封闭条件下经历 0~7 次完整冻融循环, 进行了不同围压下的三轴压缩试验; 刘德仁等^[10]通过室内模型试验研究一种新型防治道路冻胀翻浆的路基结构; 杨晓华等^[11]为研究粗粒盐渍土作为路基填料的适用性, 取甘肃省金永高速公路二标的路基料和底基层料进行模拟季节交替变化的大型冻融循环试验; 包卫星等^[12]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, 从土的类别角度研究了天然盐渍土的盐胀规律; 严晗等^[13]通过室内试验研究了粉砂土在不同条件下的反复冻胀、融沉特性; 李国玉等^[14]针对甘肃省季节冻土区公路沿线盐渍化道路病害比较严重的地段, 选取几种典型的盐渍土进行室内冻融循环试验来研究它们在周期波动温度条件下冻胀、盐胀和融沉特性; 倪铁山等^[15]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; 王彦虎等^[16]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, 并提出了相关参数; 此外, 很多学者对冻融循环模型试验进行了比较系统的研究。

人工盐化路基土的方法整治冻土区路基冻害是公路部门经常采用的方法之一, 但对盐化之后形成的新的人工盐渍土环境的冻胀机理还缺乏比较系统的研究。青藏铁路西格段为典型的季节性冻害, 以青藏铁路公司科技研究开发计划课题为依托, 采用人工盐渍化路基土体的方法进行冻害整治试验, 研究人工盐渍化路基土整治冻害的效果, 探究冻融循环条件下人工盐渍化路基土体温度和位移变化规律, 水盐迁移规律, 用与研究区力学性质相似的黄土分普通试验段和盐化试验段填筑路基实体模型进行对比研究。

1 试验概况

1.1 土样参数

模型填筑土样为与青藏铁路西格段季节性冻土区相似的黄土, 通过室内试验得到黄土的基本物理性质指标(表 1)。本试验土体模型分一层填筑, 土样按最优含水量 16.5%, 压实度为 0.8, 干密度为 $1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 填筑。分普通试验段和盐化试验段两段, 盐化试验段将盐分提前拌入土中, 比例为 2%, 盐的种类为工业氯盐 ($\text{MgCl}_2 - 6\text{H}_2\text{O}$)。

表 1 土样基本物理指标

Table 1 Basic physical indexes of soil samples

颗粒组成 (mm) / %					最优含	最大干密度 /	液限 / %	塑限 / %	塑性指数	液性指数	土质
2 ~ 0.075	0.075 ~ 0.05	0.05 ~ 0.01	0.01 ~ 0.005	0.005 ~ 0.002	水率 / %	($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)					
23.1	25	52.6	7.2	2.1	16.5	1.58	32.78	21.08	11.73	0.51	粉质黏土

1.2 试验装置

试验装置由模型试验箱、高低温控制器和数据采集系统 3 部分组成(图 1)。模型箱外长 3.5 m, 宽 2.0 m, 高 2.2 m, 箱内长 3.2 m, 宽 1.7 m, 高 1.9 m, 中间填充保温材料, 用来隔绝内外热量的交换, 达到保温效果, 两边各开一扇门, 其中门高 1.7 m、宽为 0.9 m。箱体内部布置酒精冷管, 顶部全部布置, 侧面从箱顶往下布置 0.7 m。

数据采集系统包括温度测试系统、位移测试系统和盐分测试系统。温度测试系统由 pt100 温度传感器(精度为 $0.01 \text{ } ^\circ\text{C}$) 和 HED70A 型巡检仪(精度为

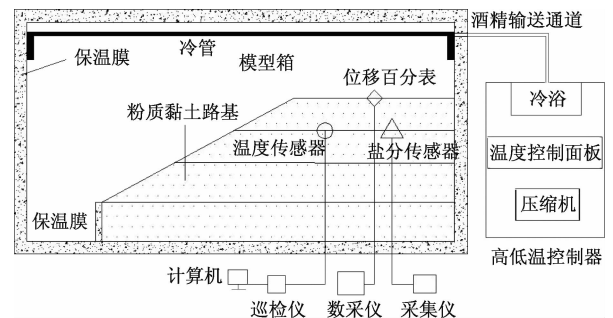


图 1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the test device

$\pm 0.2\% \text{ F.S}$) 组成, 每隔 3 h 采集一次数据。机电百分

表(量程为50 mm,精度为0.01 mm),配合支座和钢架布置于路基顶面,通过配套集线器连接计算机,构成位移测试系统,每隔15 min采集一次数据。盐分测试系统由盐分传感器和数据采集仪构成,盐分监测选用YT-DY-0301系列盐分传感器,量程为0~20.00 mS/cm,测试精度<5%。

试验所用的高低温控制器为XT5701LTB-450型,外形尺寸为730 mm×750 mm×1100 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。该装置温度可控范围在-40~+90℃,温度波动度在±0.05~0.1℃。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。

1.3 模型设计及监测断面布置

模型设计如图2所示,路基顶宽1 m,底宽2.5 m,坡度1:1.25,高度0.6 m,根据路基对称结构,模型取路基断面的一半。试验段长3.2 m,其中普通试验段长1.6 m,盐化试验段长1.6 m。

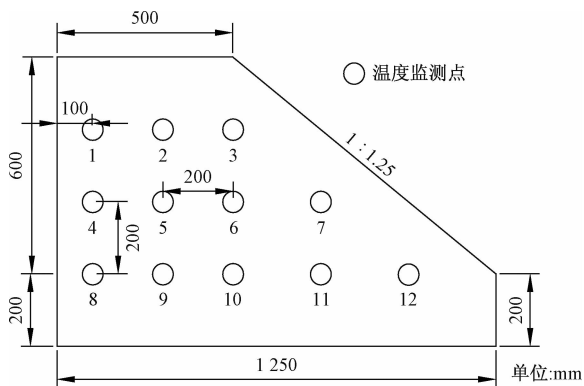


图2 路基模型剖面图(单位:mm)

Fig.2 Subgrade model profile (unit: mm)

在普通试验段和盐化试验段分别设置三个温度监测断面,在试验段中心、距中心0.4 m左右各设一个断面,每个断面上的温度传感器的布置如图2所示,总共布置72个温度传感器。

在普通试验段和盐化试验段中心分别设置两个位移监测断面,在距离路基中心线0.1 m、0.2 m、0.3 m、0.4 m处架设百分表,用表座固定于基准梁之上,然后用集线器连接电脑进行实时采集数据(图3)。

为了探究盐化试验段盐分的迁移规律,在盐化试验段提前拌入2%的盐分,布置两个盐分监测断面的,每个断面盐分传感器位置如图4所示。

1.4 试验方法及温度条件

试验选用室内模型试验的方法,对青藏铁路西格



图3 模型试验照片

Fig.3 Model test photo

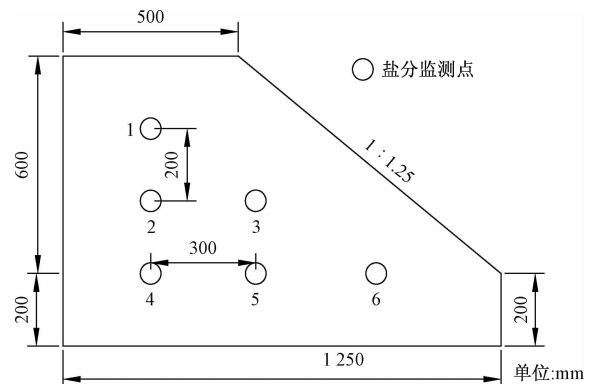


图4 盐分传感器布置(单位:mm)

Fig.4 Salt sensor arrangement (unit: mm)

段季节性冻土区路基的冻胀特性进行研究,模拟自然界夏季温度的升高和冬季温度的降低,监测温度、位移和盐分。

根据当地气温条件,模型箱内的温度按照式(1)进行调控,平均环境温度1.5℃,一个周期144 h,负温时间68 h、正温时间76 h,温度控制曲线如图5所示,实际控制温度每隔4 h调节,实际环境温度为实时监测模型箱中的温度。

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

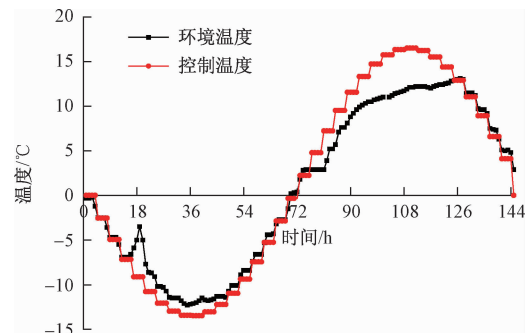


图5 试验温度控制曲线

Fig.5 Temperature control curve in the test

2 试验结果分析

2.1 冻融过程中温度场分析

本次试验进行 4 个周期,每个周期 144 h,总共 576 h,每隔 3 h 采集一次温度数据。图 6 所示的是距路基中心不同距离处的温度变化曲线与环境温度之间的关系曲线,由于监测各断面规律一致,故选取中心断面进行分析,距路基中心 0.1 m、0.3 m、0.5 m、0.7 m 和 0.9 m 处的点分别对应图 2 中 8#、9#、10#、11#、12#。

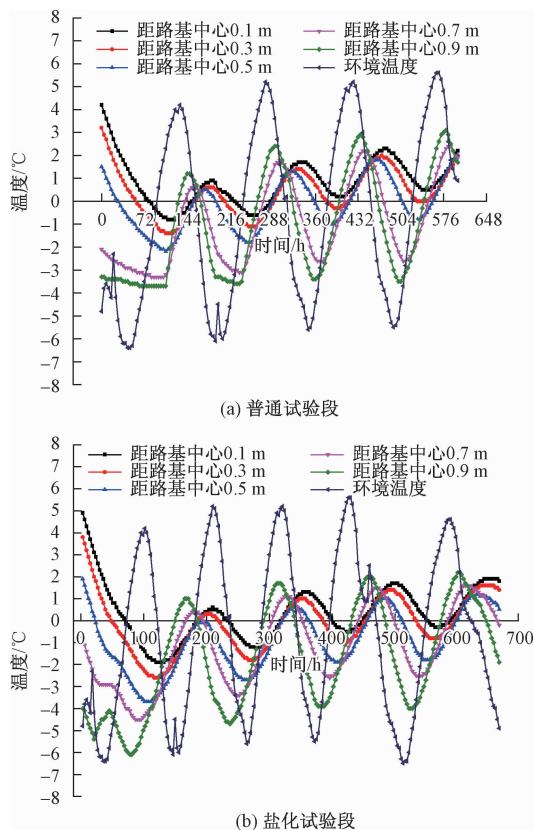


图 6 路基不同距离处温度变化

Fig. 6 Temperature change at different distances of sugared soil

由图 6 可知,随着环境温度的变化,不同距离处各点均呈现出与环境温度一样的趋势,出现峰值和谷值,但路基土体内部的温度滞后于环境温度约 36 h。初试温度场温度较高,随着周期的稳定,普通试验段距路基中心 0.1 m、0.3 m、0.5 m、0.7 m 和 0.9 m 的位置温度分别在 $-1.5 \sim 4.5$ °C、 $-2.5 \sim 3.5$ °C、 $-3.0 \sim 2.0$ °C、 $-4.0 \sim 2.0$ °C 和 $-4.5 \sim 3.0$ °C 的范围内波动,盐化试验段在 $-2.0 \sim 5.0$ °C、 $-2.5 \sim 4.0$ °C、 $-4.0 \sim 2.0$ °C、 $-5.0 \sim 2.0$ °C 和 $-6.0 \sim 2.0$ °C 的范围内波动。由此可知,距离路基中心越近的点,即越靠

近冷端的点,温度变化幅度越大,最高温度逐渐升高,最低温度逐渐降低。环境温度的波动范围为 $-7.5 \sim 4.5$ °C,路基土体内部温度的波动范围约为环境温度波动的一半。

盐化试验段温度变化趋势和普通试验段一致,对应位置温度变化幅度比普通试验段处略有增大,最低温度从 -4.5 °C 到 -6.0 °C 有明显下降,对应各距离路基中心点处起始温度较普通试验段有所增加,说明盐化对于路基内温度降低有一定的抑制作用,特别是对于距离路基中心越近的位置,效果越明显。

图 7 为路基不同深度处的温度变化曲线和环境温度之间的关系曲线,由于监测各断面规律一致,故选取中心断面进行分析,距路基中心 0.2 m、0.4 m 和 0.6 m 处的点分别对应图 2 中 2#、5#、9#。

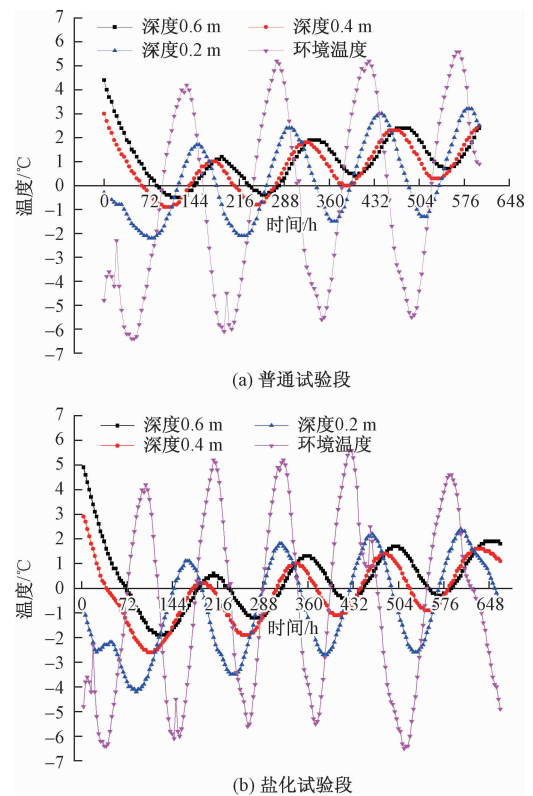


图 7 路基不同深度处温度变化

Fig. 7 Temperature change at different depth of subgrade soil

由图 7 可知,路基土体各点温度变化趋势与环境温度一致,同样滞后环境温度约四分之一周期。普通试验段路基土体深度 0.2 m、0.4 m 和 0.6 m 处的温度分别在 $-2.5 \sim 2.0$ °C、 $-2.0 \sim 1.5$ °C 和 $-1.5 \sim 1.5$ °C 的范围内波动,盐化试验段在 $-4.5 \sim 2.5$ °C、 $-3.0 \sim 1.5$ °C 和 $-2.0 \sim 2.0$ °C 的范围内波动。由此可知,不同深度处距离顶面越近的点处,即越接近冷端

的点,温度变化幅度越大,深度为0.4 m和0.6 m处的温度变化幅度基本一致,随着深度的增加温差逐渐减小。环境温度的波动范围为 $-7.5 \sim 4.5^{\circ}\text{C}$,路基土体内部温度的波动范围同样约为环境温度波动的一半。

2.2 冻融过程中位移分析

由图8可知,随着温度的周期性变化,普通试验段路基土体在固结沉降过程中呈现出有规律的冻胀融沉,盐化试验段只呈现出固结沉降的过程。横向对比两个断面,不同试验段的两个断面均表现出一致的规律。

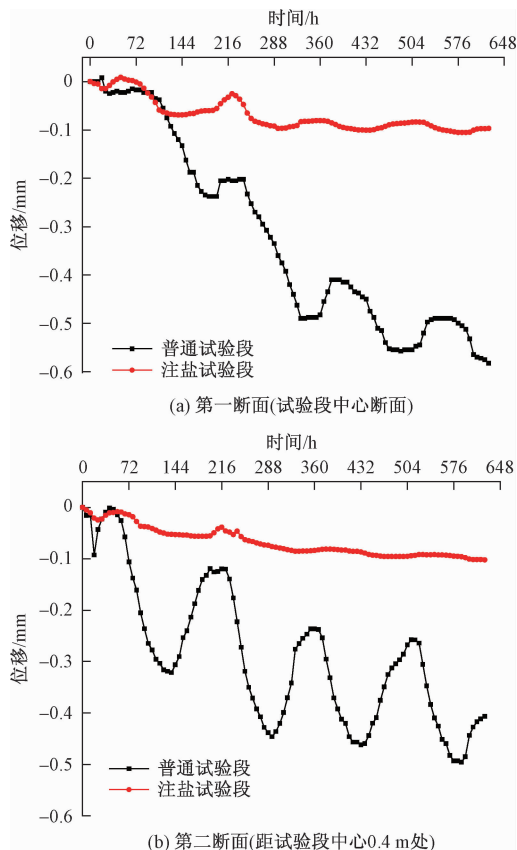


图8 冻融过程中监测断面位移变化
Fig. 8 Change of displacement of monitoring section during freeze-thaw process

对于普通试验段,第二断面位移变化趋势表现出三角函数的曲线形式,第一断面则没有,主要与路基不均匀沉降,路基填土拌和过程中初始含水率不同和填筑过程中压实不均与等多种因素有关。

对于盐化试验段,四个周期路基土体的冻胀最大值时间分别为72 h、216 h、360 h、540 h,对应着每个周期中最低温度,但冻胀量相比普通试验段减小很多,说明盐分对于路基土体的冻胀有很大的抑制作用,但并没有完全消除冻胀现象。

由图9知,由于环境温度与土体内温度进行交换

时,具有延迟效应,周期中温度最低点并不是冻胀极值发生的时间,但延迟时间很短,基本可忽略。普通试验段和盐化试验段的最终沉降量分别为0.5 mm、0.1 mm,盐化试验段相比于普通试验段沉降位移有明显的减少,盐化在可以有效抑制路基土体的沉降变形。普通试验段和盐化试验段路基土体冻胀最大值分别为0.23 mm、0.06 mm,盐化之后路基冻胀减小约73.9%,说明盐化对于路基土体冻胀有很大的抑制的作用。

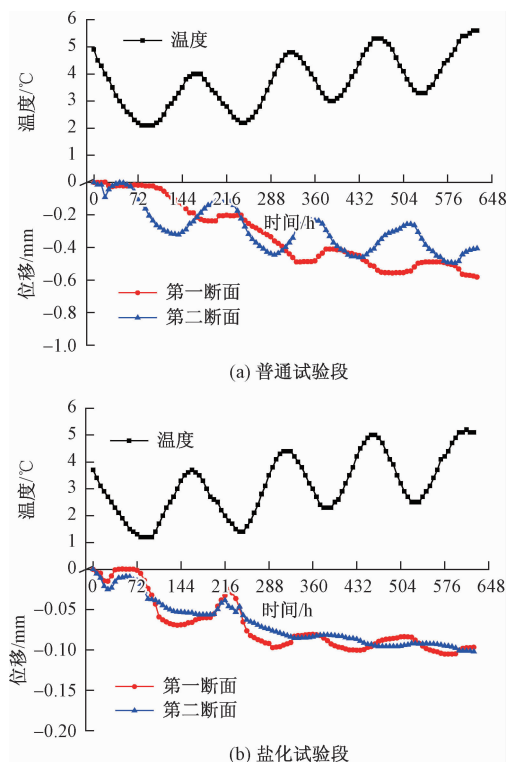


图9 冻融过程中温度与位移关系曲线
Fig. 9 Relationship between temperature and displacement in freeze-thaw process

2.3 冻融过程中盐分分析

图10所示是冻融循环过程中盐化路基不同深度,不同距离处的盐分变化规律,其中6#测点在试验过程失效。初始拌和填筑路基时的盐分是2.0%。由于拌和填筑的不均匀,所有位置的盐分均在1.7%~2.7%范围内波动。所有观测点位置盐分迁移量较小,只是围绕初始盐分轻微波动,随着温度的升高和降低呈现出周期性的减小和增大。随着周期的发展,盐分呈现出逐渐减小的趋势,整体来说,四个周期内封闭的环境中盐分迁移较小,最大为0.1%。

2.4 冻融过程中水分分析

在试验结束之后,分别让模型在 12°C 即融化状态和 -12°C 即冻结状态下稳定48 h以上,然后用洛阳铲

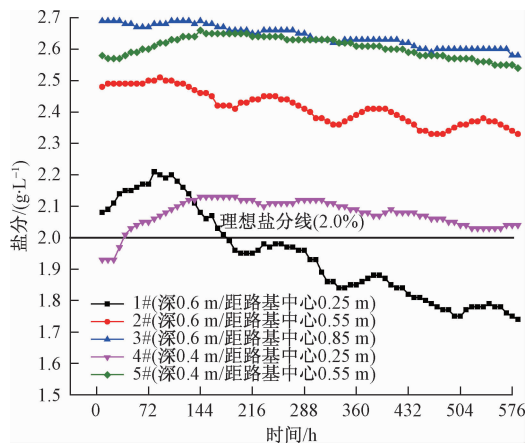


图 10 冻融过程中盐分变化

Fig. 10 The change of salt in freeze-thaw process

分不同位置取样进行含水率的测试。图 11 所示的不同位置处的含水率变化曲线。初试填筑过程中土体含水率为 16.5%, 冻融循环之后路基土体内的水分有不同程度的迁移。

由图 11 可知, 当温度为 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 即冻结状态时, 在路基表面, 水分迁移较大, 普通试验段在深度 0.25 m 处迁移量达到最大, 距离路基中心处 0.5 m、2.5 m、4.5 m 位置处最大含水率分别为 22.17%、23.65% 和 24.48%, 迁移量分别为 5.67%、7.15% 和 7.98%; 盐化试验段在深度 0.40 m 迁移量最大, 离路基中心处 0.5 m、2.5 m、4.5 m 位置处最大含水率分别为 20.81%、21.08% 和 20.20%, 迁移量分别为 4.31%、4.58% 和 3.70%。随着深度的增加, 水分的迁移量逐渐减小, 在路基最深处, 水分迁移量为负值, 说明在封闭环境中当温度降低时, 路基内部水分迁移至冷端。当温度为 $+12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时即融化状态时, 距离路基不同位置处的水分迁移量很小, 基本在初始含水率 16.8% 周围波动, 说明在低温时水分迁移的主要因素, 当温度降低时, 水分迁移至冷端, 路基土体水分增加, 产生冻结。当温度为正温时, 路基土体水分基本不会产生迁移。

3 结论

本文通过填筑路基实体模型, 进行普通试验段和盐化试验段的冻融循环试验, 主要结论如下:

(1) 随着环境温度的变化, 路基不同位置处各点均呈现出与环境温度一样的趋势, 出现峰值和谷值, 路基土体内部温度滞后于环境温度约 36 h。

(2) 越靠近冷端的位置, 温度波动范围越大, 路基土体内部温度的波动范围约为环境温度波动的一半, 随着深度的增加, 路基土体内部温度逐渐减小, 温差也

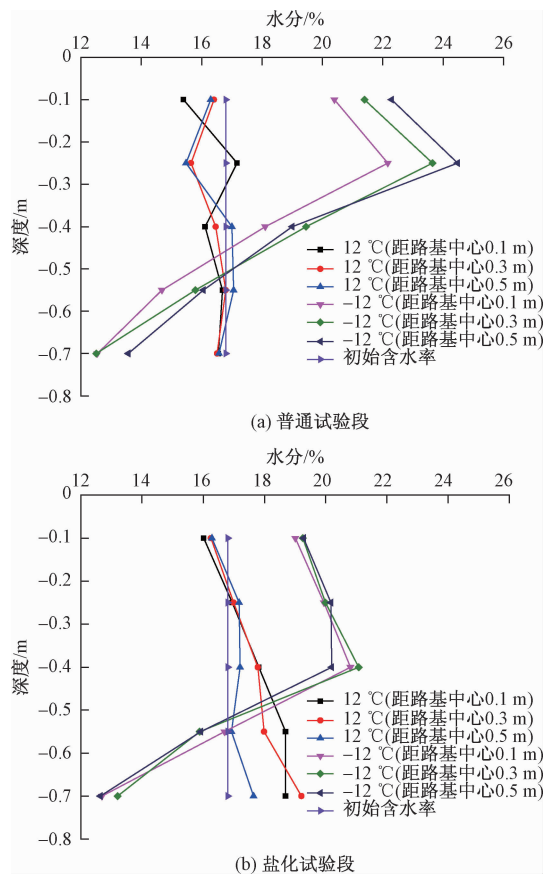


图 11 冻融过程中的水分迁移曲线

Fig. 11 Water migration curve during freezing and thawing

逐渐减小。

(3) 普通试验段和盐化试验段路基土体冻胀最大值分别为 0.23 mm、0.06 mm, 盐化之后冻胀减小 73.9%, 说明盐化对于路基土体的冻胀有一定的抑制的作用, 人工盐化路基土整治路基冻害是可行的。

(4) 在试验进行的四个周期内, 随着温度的周期性变化, 封闭环境中盐分迁移量较小, 最大为 0.1%。

(5) 普通试验段和盐化试验段水分迁移最大值分别为 7.98% 和 4.58%, 迁移最大值处深度分别为 0.2 m 和 0.4 m, 随着深度的增加, 水分的迁移量逐渐减小, 在路基最深处, 土体水分迁移量较小。温度是影响水分迁移的一个主要因素, 越靠近冷端, 水分迁移量越大。

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 Xuezu, WANG Jiacheng, ZHANG Lixin. Physics of frozen soil[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [2] GAO O' NEILL K, MILLER R D. Exploration of a rigid icemodel of frost heave[J]. Water Resources

- Research, 1985, 21(4): 281 – 296.
- [3] HARLAN R L. Analysis of coupled heat-fluid transportation partially frozen soil [J]. Water Resources Research, 1973, 9(6): 1314 – 1323.
- [4] 张树光, 张向东, 易富. 辽西地区冻风积土水分迁移特征的研究[J]. 岩土力学, 2006(3): 418 – 422.
ZHANG Shuguang, ZHANG Xiangdong, YI Fu. Study on moisture transfer of freezing Aeolian soil in West Area of Liaoning Province [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006(3): 418 – 422.
- [5] REMPEL A W, WETLAUFER J S, WORSTER M G. Preempting dynamics in a continuum model of frost heave [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2004, 498: 227 – 244.
- [6] 赵刚, 陶夏新, 刘兵. 原状土冻融过程中水分迁移试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009(12): 1952 – 1957.
ZHAO Gang, TAO Xiaxin, LIU Bing. Experimental study on water migration in undisturbed soil during freezing and thawing process [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009(12): 1952 – 1957.
- [7] 张喜发, 辛德刚, 张冬青, 等. 季节冻土区高速公路路基土中的水分迁移变化[J]. 冰川冻土, 2004, 26(4): 454 – 460.
ZHANG Xifa, XIN Degang, ZHANG Dongqing, et al. Water migration and variation in the subgrade soils of expressway in seasonally frozen ground regions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(4): 454 – 460.
- [8] 路建国, 张明义, 张熙胤, 等. 冻土水热力耦合研究现状及进展[J]. 冰川冻土, 2017, 39(1): 102 – 111.
LU Jianguo, ZHANG Mingyi, ZHANG Xiying, et al. Review of the coupled hydro-thermo-mechanical interaction of frozen soil [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(1): 102 – 111.
- [9] 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): 3665 – 3668, 3688.
WANG Jing, LIU Hanbing, WU Chunli. Influence of freeze-thaw cycles on elastic modulus of subgrade soil with different plasticity indices [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3665 – 3668, 3688.
- [10] 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 Deren, LAI Yuanming, DONG Yuanhong, 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.
- [11] 杨晓华, 王龙, 张莎莎. 甘肃金永高速公路粗粒盐渍土试验研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2014, 10(1): 141 – 143.
YANG Xiaohua, WANG Long, ZHANG Shasha. Test and study of coarse salted soil in Gansu Jin Yong Expressway [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 10(1): 141 – 143.
- [12] 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(11): 1991 – 1995.
BAO Weixing, YANG Xiaohua, XIE Yongli. Research on salt expansion of representative crude saline soil under freezing and thawing cycles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006(11): 1991 – 1995.
- [13] 严晗, 王天亮, 刘建坤. 粉砂土反复冻胀融沉特性试验研[J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3159 – 3165.
YAN Han, WANG Tianliang, LIU Jiankun. Experimental study of repeated frost heave and thaw settlement properties of silty sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3159 – 3165.
- [14] 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 Guoyu, YU Wenbing, MA Wei, et al. Experimental study on the effect of Gansu Province highway typical section of salinity on the frost heave and salt expansion characteristics [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8): 2276 – 2280.
- [15] 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(23): 218 – 219.
NI Tieshan, DING Chao. Experimental study on the treatment of roadbed frost damage by salt injection [J]. Science and Technology Innovation and Application, 2012, (23): 218 – 219.
- [16] 王彦虎, 王旭, 杨楠, 等. 钻孔埋管注盐法整治季节冻土区路基冻害现场试验研究[J]. 冰川冻土, 2017, 39(6): 1265 – 1272.
WANG Yanhu, WANG Xu, YANG Nan, 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.