

不同因素对青藏铁路环湖段路基内水分变化及冻胀规律影响研究

唐先习¹, 杜腾飞¹, 张寿红², 董江龙³, 栾恩铭¹

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 中国铁路青藏集团有限公司, 青海 西宁 810000;
3. 中国铁路青藏集团有限公司西宁工务段, 青海 西宁 810000)

摘要: 为探究青海湖水位持续上升这一状况下冻融循环对青藏铁路环湖段路基带来的影响, 对路基内不同含盐量、不同压实度以及不同含水率等因素对路基内水分迁移及冻胀规律的影响展开研究。试验结果表明: 对于不同含盐量的土样, 随着循环次数的增加, 土样含水率逐渐降低, 冻胀率逐渐增大(含盐量0土样除外), 而且含盐量越高土样含水率降低越多, 冻胀率增加越大。对于不同压实度的土样, 随着循环次数的增加, 土样含水率逐渐降低, 冻胀率逐渐增大, 而且压实度越大的土样含水率降低越少, 冻胀率增加越大。对于不同初始含水率的土样, 随着循环次数的增加, 土样含水率逐渐降低, 冻胀率逐渐增大, 而且初始含水率越高的土样含水率降低越少, 冻胀率增加越大。研究结果可为青海湖水位不断上升造成的青藏铁路环湖段路基含水率及冻胀控制的研究提供参考。

关键词: 青藏铁路; 环青海湖路基; 冻融循环; 水分迁移

中图分类号: U216.41+7

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)04-0092-07

Influence Factors on Moisture Changes and Frost Heave Regular in the Roadbed of the Qinghai Tibet Railway Around Lake Section

TANG Xianxi¹, DU Tengfei¹, ZHANG Shouhong², DONG Jianglong³, LUAN Enming¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China;

2. China Railway Qinghai-Tibet Group Co., Ltd., Xining, Qinghai 810000, China;

3. Xining Engineering Section of China Railway Qinghai-Tibet Group Co., Ltd., Xining, Qinghai 810000, China)

Abstract: In order to explore the influence of freeze-thaw cycle on the roadbed of Qinghai-Tibet Railway around Qinghai Lake under the condition of continuous rise of Qinghai Lake water level, the influence of different salt content, different compaction degree and different water content in the roadbed on the water migration and frost heave law in the roadbed was analyzed. The test results are as follows. For soil samples with different salt content, with the increase of cycle times, the water content of soil samples decreases gradually, and the frost heave rate increases gradually (except for soil samples with 0 % salt content). The higher the salt content, the more the water content of soil samples decreases, and the greater the frost heave rate increases. For soil samples with different degrees of compaction, with the increase of the number of cycles, the water content of the soil sample gradually decreases, and the frost heave rate gradually increases. The greater the degree of compaction, the less the water content of the soil sample decreases, and the greater the frost heave rate increases. For soil samples with different initial water content, with the increase of cycle times, the water content of soil samples decreases gradually, and the frost heave rate increases gradually. The higher the initial water content, the less the water content of soil samples decreases, and the greater the frost heave rate increases. The research results can provide a theoretical basis for the study of roadbed moisture content and frost heave control in the lake section of Qinghai-Tibet Railway caused by the rising water level of Qinghai Lake.

Keywords: Qinghai-Tibet Railway; roadbed around Qinghai Lake; freeze-thaw cycle; moisture changes

收稿日期: 2024-03-30

修稿日期: 2024-05-03

基金项目: 国家自然科学基金(11962016); 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目(K2022G017); 中国铁路青藏集团有限公司科技研究开发计划项目(QZ2022-G07)

作者简介: 唐先习(1972—), 男, 副教授, 主要从事路基冻害机理及控制措施方面的研究工作。E-mail: 695913483@qq.com

青藏铁路环湖段主要建设在以盐渍土为主的季节性冻土区,路基的冻胀融沉给铁路的运营和维护带来了较多的问题。特别是青藏铁路环湖段所处位置环境温差较大,冻融循环频繁。尤其是近年来受全球气温升高的影响,冰川加速消融,致使青海湖水水位连年上涨,湖水上涨导致铁路环湖段地下水位抬升,增加了路基内水分含量,在冻融循环作用下会对铁路的安全运营造成严重影响。因此,开展环湖铁路路基土内水分的迁移规律、冻胀性能等研究对于保障青藏铁路环青海湖路段列车的平稳运行具有重要的意义。

国内外学者对冻融循环作用下盐渍土的冻融性能进行了较多的研究。孔元元等^[1]研究了考虑水盐运移的分散性盐渍土冻融破坏机制,指出土体在冻融循环过程所发生的水盐迁移是土体强度和结构发生变化的重要原因。何宝华^[2]研究了铁路路基的冻胀特性,指出土体冻胀量和冻胀率随初始含水率的增加而增大;而冻胀速率随初始含水率的增加而降低;水分重分布的峰值含水率与初始含水率呈正相关关系。刘浩等^[3]研究了冻融循环对固化滨海盐渍土强度的影响规律,发现冻融循环前后固化盐渍土的应力应变曲线呈现应变软化型。Hewage等^[4]发现随着盐浓度的增加,冻融循环试样和干燥试样的裂纹面积和宽度减小。肖泽岸等^[5]通过单向冻结试验研究了冻结过程中水盐运移及土体变形,得出随着盐分在冻结锋面处的累积,土体冻胀过程中冻胀明显减小。Shu等^[6]通过试验得出了不同的可再生环保复合材料对固化盐渍土力学性能的影响规律。张莎莎等^[7]通过室内模拟对天然粗颗粒盐渍土的盐胀进行了分析,发现天然粗颗粒氯化物硫酸盐渍土在多次冻融循环时具有明显的体缩现象。Li等^[8]研究了不同冻融循环次数下生石灰、粉煤灰和水玻璃联合固化土的宏观强度特性和孔隙结构变化规律,并探讨了其固化机理。黄佑芬等^[9]配制不同含盐量粉土开展室内试验,结果表明低含盐量土应变以冻胀和融沉为主,随土体含盐量增加对盐胀和溶陷的贡献越来越大。江建兵等^[10]对粉砂质硫酸盐渍土进行冻融循环试验,得出盐分含量对土体最终变形变化表现为先减后增。李生伟^[11]通过室内试验指出,自然环境下水盐运移作用会导致土体盐-冻胀进而引起盐渍土物理力学性质变化。张玉芝等^[12]得出在反复冻融作用下,路基粗颗粒填料的水、汽迁移及相变可导致路基中冰层的形成。李国玉等^[13]通过现场道路病害考察及室内冻融循环试验研究发现,盐渍土反复冻融循环后含水率重

新分布,形成两端含水率高、中间低的现象。余云燕等^[14]通过冻融循环试验表明硫酸钠盐渍土内温度传递存在“深度效应”和“时间滞后效应”,时差约为5 h。刘倩倩等^[15]通过单向冻结试验发现粗颗粒级配土中液态水很难通过冻胀-抽吸力直接上升至冻结锋面,气态水迁移是造成冻胀发展的重要因素。胡田飞等^[16-17]发现西北由于气候因素导致路基冻胀持续时间长、冻结深度大,主要发育深层冻胀,预防冻胀应优先以温度为对象。雷华阳等^[18]分析了不同因素对水分迁移的影响,发现了初始含水率和冷端温度对砂土的水分迁移和冻胀效果影响明显。陈伟志等^[19]开展室内温度循环下粗粒土水盐迁移试验,研究发现经历多次温度循环后水盐向土体表面迁移聚集,越靠近土体表面水盐增量越大。

综上所述,以上的研究对冻融循环作用下盐渍土水、盐迁移及盐冻胀变形规律做了大量研究工作,但这些成果是针对某一区域、某一特定土体而展开,而对于其他的土体则未必适用。青藏铁路环青海湖区段,特别是近湖土体因湖水上升而导致铁路路基内水分场变化较快,在高日照强度、高蒸发量下路基填料土盐渍化会由于冻胀等原因对铁路安全运营造成很大影响。本文拟根据现场的实际情况进行冻融循环试验,研究砂砾质硫酸盐渍土的水分迁移及盐-冻胀变形特征,以期今后环湖铁路路基因水位路基工程病害机理及防治研究提供理论支撑。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验土样取自青藏铁路环青海湖段的下行线K222+500附近靠近青海湖一侧的路基内。由现场调研数据显示,2018年湖面距该路段铁路防护网距离为98 m,2020年湖面距该路段铁路防护网距离为56 m,2023年初调研时湖面距该路段铁路防护网距离已不到30 m,湖面与铁路相对位置见图1。



图1 青藏铁路K222+500区段青海湖距青藏铁路现状图

根据《铁路工程土工试验规程》(TB10102—2010)进行土样基本物理力学试验,可得路基填料土土样物理参数如表 1 所示,土体的颗粒累计曲线见图 2。由击实试验得最优含水率为 6.5%、最大干密度为 2.16 g/cm³,见图 3。所取原状土体含有大量可溶盐,进行易溶盐分析得各离子含量见表 2,其中主要阳离子为 Na⁺和 K⁺,主要阴离子为 SO₄²⁻。

表 1 土样物理参数

液限 W_L /%	塑限 W_P /%	塑性指数 I_P	表观密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	堆积密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	空隙率 /%
24.1	17.2	6.9	1950	1130	42

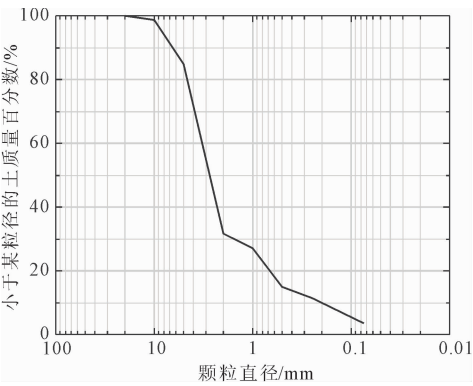


图 2 粒径累计曲线

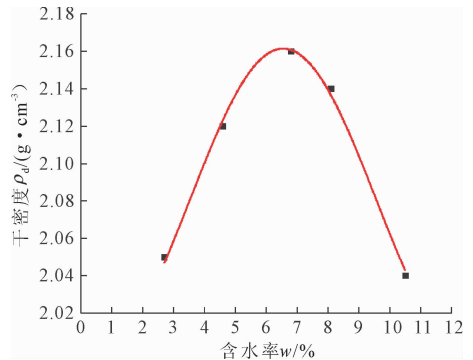


图 3 ρ_d-w 关系曲线

表 2 土样中各离子含量 单位:mg

Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ 、K ⁺	总含量
274	431	219	189	208	102	803	2227

注:各离子总含量的质量比为 0.223%。

试件制作时,首先将纯净水注入土样后搅拌,静置后直至土样浸出液澄清,抽取土样浸出液,再次注入纯净水并搅拌,如此为一个循环。直至抽取土样浸出液经测定含盐量小于 0.1%时,认为土体盐分已清洗干净。然后将去除盐分的土体风干、碾碎,过 2 mm 筛后烘箱烘干,分别与含有不同质量的无水硫

酸钠及纯净水混合,以此来配置含有不同盐分及水分的试样。再次将配置好的土密封后放置在生化培养箱中以 20℃ 恒温条件培养 24 h。最后将土放入高 17 cm、内径 10 cm 模具内并分三层击实,第一、二层击实后进行刮毛,防止土样分层。击实后在试件底端插入温湿度传感器,外侧包裹保温棉,以防止试件在冻融循环过程中与环境发生热交换;并在土样上端放置玻璃盖板,以利于采用百分表进行试件竖向位移测量。

1.2 试验仪器

试验中温控系统采用 ST-225LBZ 程式恒湿恒温试验箱,可调温度范围 -40℃~150℃,可调湿度范围 20% RH~98% RH,温湿度控制精度:温度 ±0.3℃,湿度 ±0.5% RH。试验箱侧面有开孔供传感器线穿入。

试样温湿度检测采用 TDR-3A 土壤温湿度一体传感器,湿度量程为 0~100% RH,精度 ±2% RH;温度量程为 -40℃~+80℃,精度 ±0.2℃;传感器测量区域为以中央探针为中心直径 3 cm、高 6 cm 的圆柱体内。采用 PC-2SQ 型土壤温湿度采集仪采集传感器数据并储存,采集间隔设置为 10 min/条。

1.3 环境温度确定

通过前期试验可知在 4 次冻融循环之后试验土柱的冻胀量增幅很小且逐渐趋于稳定,同时在参考其他同类试验研究的基础上^[2],确定本次试验采用 4 次冻融循环,每次循环 24 h。每次循环的 0~2 h 为恒温阶段,2 h~6 h 为降温阶段,6 h~14 h 为恒温阶段,14 h~18 h 为升温阶段,18 h~24 h 为恒温阶段。在此基础上设计 4 个方案,每种方案对应不同最低环境温度,其中 a 方案的温度区间为[-10℃~20℃],b 方案的温度区间为[-20℃~20℃],c 方案的温度区间为[-30℃~20℃],d 方案的温度区间为[-40℃~20℃]。4 个方案在降温与升温阶段除温度变化速率不同外其他均一致,方案如图 4 所示。

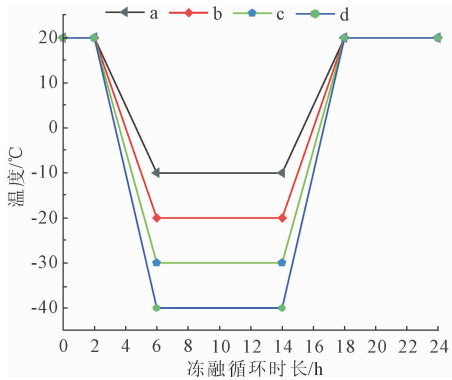


图 4 环境温度方案图

4 个方案确定后,进行相应的对比试验,以确定适宜的试验温度方案。通过对对比试验结果进行整理分析,得到冻融循环作用下试验箱内环境温度变化图和试件温度-含水率的关系图,如图 5、图 6 所示。

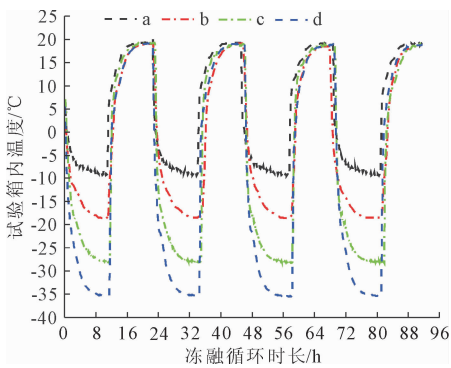


图 5 环境温度变化图

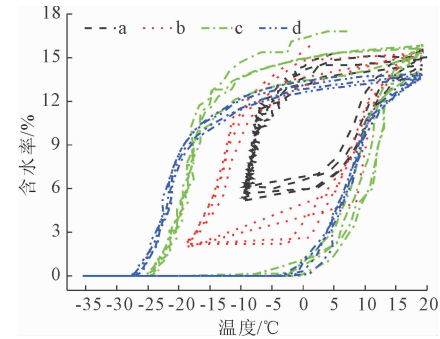


图 6 各方案下试样温度与含水率关系图

从图 5 可以看出,不同冻融循环时试验箱内温度变化的规律性。由图 6 可得试件在 4 个方案下水分变化呈现出相同的规律性,试样内水分含量随温度的降低而降低。在 c、d 方案中,当环境温度为 $-25^{\circ}\text{C}\sim 28^{\circ}\text{C}$ 时试样含水率为 0,说明土中水完全冻结,孔隙内水分子已完全相变。结合取土区域所在地年气温变化、当地冻结深度等调研结果分析,选取方案 b 为后续冻融循环试验的环境温度,即温度变化范围为 $-20^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ 。

1.4 试验方案

依据试验的目的,进行试验时配制不同含水率、压实度和含盐量的土样试件,并经过前期试验确定试验温度 ($-20^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$),冻融循环次数取 4 次。研究确定的试验方案见表 3,其中表 3 中土样的含水率为配制土样时采用的质量含水率,而在试验测量结果中显示的含水率为体积含水率,体积含水率等于质量含水率与压实度的乘积。

表 3 试验方案

试样编号	含水率/%	压实度/%	含盐量/%
BY01	6.5	90	0.0
BY02			0.5
BY03			1.0
BM01	6.5	85	0.223
BM02		90	
BM03		95	
BS01	5	90	0.223
BS02	8		
BS03	10		
BS04	12		

表 3 中每个试样包括 3 个相同试样,为了使试验土样的边界条件与自然条件相似,在试样外侧包裹保温棉,仅上端与环境温度交汇,来实现土样的一维冻结,以模拟现场路基土体的冻结过程。在冻融试验中使用数据采集仪终端,自动实时记录土样温湿度数据,冻胀融沉后试样的竖向位移量采用百分表读数并记录。试样结果分析时采用的数值为每组 3 个试样采集到的平均值。

2 试样冻融循环结果分析

2.1 不同含盐量土样

2.1.1 土样内水分迁移规律

不同盐含量土样水分变化如图 7 所示。由图 7 可知,试样在相同初始含水率和压实度的情况下,其含盐量越高,土的保水能力越强,表现为含水率越大。随着循环次数增加,盐含量为 0%、0.5%、1.0% 的土样含水率均降低。这是由于在冻融循环初期,土体的损伤速度较快,孔隙尺寸及数量增加明显,且随着冻融循环次数的增加,冻融循环作用导致的土体损伤程度减小;另一方面,在冻结过程中水分会向冻结锋面迁移,而在融化过程中水分的回迁量小于冻结时的迁移量,并且冻结时水分迁移方向与融化时相反。但融化时的盐颗粒仍带有结晶水,因而冻融循环后盐含量为 0%、0.5%、1.0% 土样的界面含水率较初始含水率均有降低,分别降低 5.96%、6.70% 和 7.83%。

2.1.2 土样变形特征

不同含盐量土样竖向位移值变化如图 8 所示,随着循环次数增加,含盐量为 0% 的土体在每次循环的最低温度时的竖向膨胀量最大值逐渐减小,最高温度时的融陷量最大值的绝对值逐渐增加,但整体呈现融沉的趋势,每次的沉降量增量逐渐减小。整体出现融沉的趋势,主要是因为含盐量为 0% 的

土样在冻融循环中土颗粒重组,土体结构发生改变,导致土体融沉量增加且增量大于冻胀量;因此每次循环均发生沉降变形,具有沉降累加性。

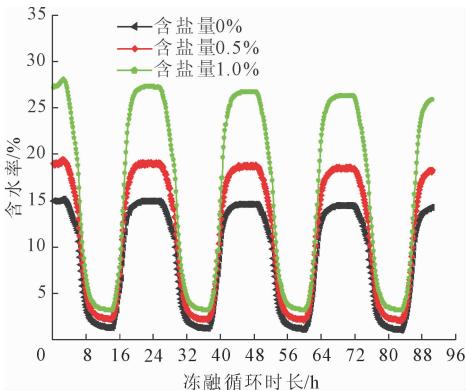


图 7 不同含盐量土样水分变化曲线

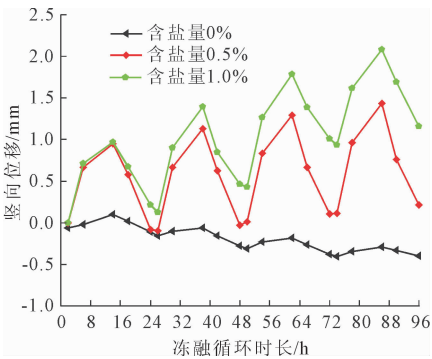


图 8 不同含盐量土样竖向位移曲线

含盐量 0.5%、1.0% 的土样有相同趋势的竖向位移变化规律,整体变形呈盐-冻胀累加。对于含盐量 0.5% 的土样,4 个循环的最大竖向位移分别为 0.949 mm、1.132 mm、1.295 mm 和 1.432 mm,增量分别为 0.183 mm、0.163 mm 和 0.137 mm,增量的变化量逐渐减小。而对于含盐量 1.0% 的土样,4 个循环的最大竖向位移分别为 0.967 mm、1.395 mm、1.783 mm 和 2.082 mm,增量分别为 0.428 mm、0.389 mm 和 0.298 mm,增量的变化量逐渐减小。这主要是由于土体内硫酸盐析出产生盐-冻胀变形,盐-冻胀量远大于融沉量而导致的。

不同含盐量土样冻胀变形随易溶盐含量增加逐渐增大,见表 4。

表 4 不同含盐量土样冻胀率表	
易溶盐含量/%	冻胀率/%
0.0	-0.237
0.5	0.126
1.0	0.680

2.2 不同压实度土样

2.2.1 土样内水分迁移规律

不同压实度土样水分变化如图 9 所示,相同含盐、水率,不同压实度的土柱,经历 4 次冻融循环后,土样最大含水率随循环次数增加而降低,其中压实度为 85%、90%、95% 的土样含水率较初始含水率分别降低 7.44%、5.68%、4.90%,可见压实度对土体保水能力也有一定影响。

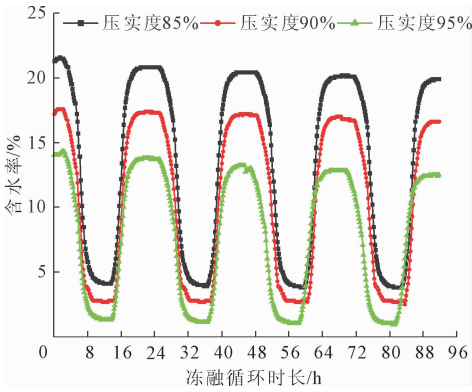


图 9 不同压实度土样水分变化曲线

2.2.2 土样变形特征

不同压实度土样竖向位移变化如图 10 所示。由图 10 可见压实度大的土样受冻融作用明显,压实度大的土样竖向位移值增幅最大;4 次循环后,压实度为 95% 的土样冻胀变形为 1.508 mm,压实度为 90% 的土样冻胀变形为 1.240 mm,压实度为 85% 的土样冻胀变形为 0.945 mm。这主要是因为压实度大的土样中孔隙率及大孔隙均减小,但小孔隙数量增多。在初始水分含量相同时,在冻结初期孔隙中自由水和结合水发生相变,土粒重新排布、稳定和密实,相变后冰晶体充满孔隙。在温度回升后,容纳冰晶体的孔隙相较于之前产生变化,使土体不稳定性受到影响更大,经过循环后土骨架松散,对其破坏作用更明显。

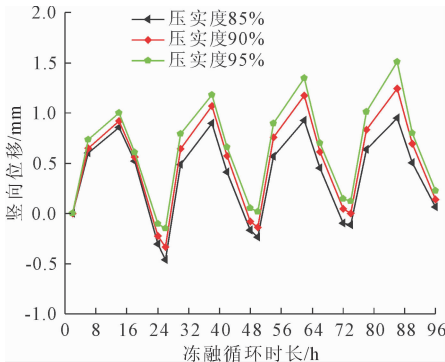


图 10 不同压实度土样竖向位移曲线

土样冻胀率随压实度的增加而增加,见表 5。这主要是随着压实度的增大,土体孔隙率减少,小孔隙数量增多,弱结合水的含量随之减少。在相同温度下未冻水含量就会减少,试样更容易达到饱和状态,故而冻胀作用会更显著。

表 5 不同压实度土样冻胀率表

压实度/%	冻胀率/%
85	0.036
90	0.081
95	0.132

2.3 不同含水率土样

2.3.1 土样内水分迁移规律

不同含水率土样水分变化如图 11 所示,在封闭条件下,初始含水率为 5%、8%、10% 与 12% 的土样在经历 4 次循环后含水率均降低,较初始含水率降低分别为 12.6%、7.40%、3.70%、3.21%。在相同条件下,高含水率土样温度波动均迟于低含水率土样,说明含水率为影响冻融循环过程中温度变化的因素之一。土样含水率越高,冻结阶段转化冰晶所需释放的热量越多,同等条件下的温度传递效应也就越久。

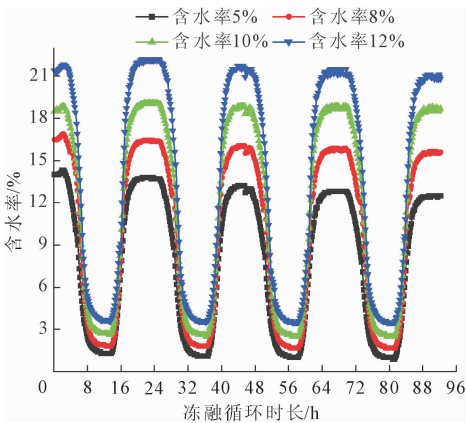


图 11 不同含水率土样水分变化曲线

2.3.2 土样变形特征

不同含水率土样竖向位移变化如图 12 所示。由图 12 可以看出,不同试样的冻胀变形程度与含水率呈正比关系。在相同条件下,初始含水率较大土柱的竖向位移增减幅度要大于初始含水率较低土柱。4 次循环后,含水率为 12% 的土样冻胀变形为 1.708 mm,含水率为 10% 的土样冻胀变形为 1.565 mm,含水率为 8% 的土样冻胀变形为 1.446 mm,含水率为 5% 的土样冻胀变形为 1.198 mm。经历 4 次循环后,土柱整体表现为变形量增大。土柱在冻融

过程中缺少水分补给,土体孔隙中水分减小使得土样饱和度降低,而初始含水率较高的土样饱和度始终较大,故冻胀变形则较为明显。

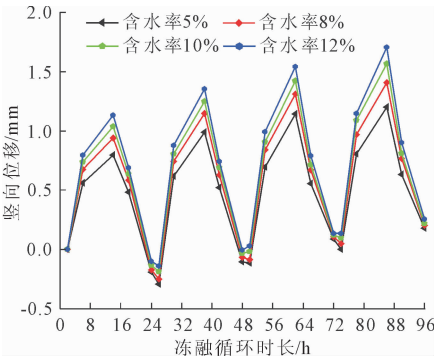


图 12 不同含水率土样竖向位移曲线

随着土样初始含水率的增加,土样的冻胀率增大,见表 6。

表 6 不同含水率土样冻胀率表

含水率/%	冻胀率/%
5	0.105
8	0.121
10	0.129
12	0.150

3 结 论

本文研究了冻融循环条件下青藏铁路环湖段路基填料土特性在不同冻融循环次数下的变化规律,通过变更不同的含盐量、压实度和含水率,研究了土样内水分的迁移规律和土样变形特征,结论如下:

- (1) 对于不同含盐量的土样,随着循环次数增加,土样含水率逐渐降低,而且含盐量越高土样含水率降低越多,4 次冻融循环后,含盐量为 0%、0.5% 和 1.0% 的土样含水率分别降低 5.96%、6.70% 和 7.83%。随着循环次数增加,土样冻胀率逐渐增加(除含盐量 0% 的土样冻胀率逐渐减小外),4 次冻融循环后,含盐量为 0%、0.5% 和 1.0% 的土样冻胀率分别增加 -0.237% (融沉)、0.126%、0.680%。
- (2) 对于不同压实度的土样,随着循环次数的增加,土样含水率逐渐降低,而且压实度越大的土样含水率降低越少,4 次冻融循环后,压实度为 85%、90%、95% 的土样含水率分别降低 7.44%、5.68%、4.90%。随着循环次数的增加,土样冻胀率逐渐增大,而且压实度越大的土样冻胀率增加越大,4 次冻融循环后,压实度为 85%、90%、95% 的土样冻胀率分别增加 0.036%、0.081%、0.132%。

(3) 对于不同初始含水率的土样,随着循环次数的增加,土样含水率逐渐降低,而且初始含水量越高的土样含水率降低越少,4 次冻融循环后,初始含水率为 5%、8%、10% 与 12% 的土样含水率分别降低 12.6%、7.40%、3.70%、3.21%。随着循环次数的增加,土样冻胀率逐渐增大,而且初始含水量越高的土样冻胀率增加越大,4 次冻融循环后,初始含水率为 5%、8%、10% 与 12% 的土样冻胀率分别增加 0.105%、0.121%、0.129%、0.150%。

参考文献:

- [1] 孔元元,梁晨涛,王智慧,等.考虑水盐运移的分散性盐渍土冻融破坏机制[J].长安大学学报(自然科学版),2024,44(2):1-11.
- [2] 何宝华.准池铁路路基冻胀特性的试验研究[J].水利与建筑工程学报,2022,20(5):160-165,216.
- [3] 刘浩,邓彩军,杨庆港,等.冻融循环对固化滨海盐渍土强度的影响规律研究[J].建筑技术,2023,54(14):1787-1792.
- [4] Hewage Shaini Aluthgun, Tang Chaosheng, Mehta Yusuf, et al. Investigating cracking behavior of saline clayey soil under cyclic freezing-thawing effects [J]. Engineering Geology, 2023,326:107319.
- [5] 肖泽岸,赖远明,尤哲敏,等.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.
- [6] Shu Hang, Yu Qingbo, Niu Cencen, et al. The coupling effects of wet-dry and freeze-thaw cycles on the mechanical properties of saline soil synergistically solidified with sulfur-free lignin, basalt fiber and hydrophobic polymer [J]. Catena, 2024,238:107832.
- [7] 张莎莎,杨晓华,戴志仁,等.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.
- [8] Li Jinze, Lin Hongjie, Liu Jiankun, et al. Macro-micro characteristics of geopolymer-stabilized saline soil in seasonal frozen soil region[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023,19:e02496.
- [9] 黄佑芬,吴道勇,吴诗雨,等.冻融循环条件下重塑硫酸盐渍土变形试验研究[J].冰川冻土,2022,44(2):602-611.
- [10] 江建兵,杨晓松,肖旻,等.冻融循环作用下粉砂质硫酸盐渍土变形特性研究[J].水利水电技术(中英文),2024,55(1):180-190.
- [11] 李生伟.冻融循环作用下寒旱区盐渍土中水、盐迁移研究综述[J].水利水电技术,2020,51(9):205-215.
- [12] 张玉芝,马巍,赵维刚,等.冻融循环作用下非饱和粗颗粒填料水热汽迁移追踪及规律研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(1):156-165.
- [13] 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.
- [14] 余云燕,罗崇亮,崔文豪,等.冻融循环下盐渍土热质传递及盐冻胀机理[J/OL].西南交通大学学报,2023:1-8 [2023-11-27].
- [15] 刘倩倩,蔡国庆,秦宇腾,等.单向冻结条件下粗颗粒级配土的水热分布及冻胀特性研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(9):2329-2340.
- [16] 胡田飞,刘济华,张宗凯,等.华北地区铁路路基冻胀监测及冻害发育特性[J].中国铁道科学,2023,44(4):40-53.
- [17] 胡田飞,张宗凯,张晓东,等.冻土地区铁路路基主动供热防冻胀方法的现场试验研究[J].铁道学报,2024,46(4):156-166.
- [18] 雷华阳,张文振,冯双喜,等.水汽补给下砂土水分迁移规律及冻胀特性研究[J].岩土力学,2022,43(1):1-14.
- [19] 陈伟志,张莎莎,李安洪.温度循环下压实粗粒盐渍土水盐迁移与变形响应[J].岩土力学,2022,43(S2):74-84,94.