

冻融循环条件下细粒硫酸盐渍土 盐冻胀机理研究

刘海翔^{1,2*}, 柴明霞^{3#}, 马艳霞^{1,2}

¹青海大学土木工程学院, 青海 西宁

²青海省建筑节能材料与工程安全重点实验室, 青海 西宁

³青海大学省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 青海 西宁

收稿日期: 2023年4月9日; 录用日期: 2023年5月25日; 发布日期: 2023年5月31日

摘要

针对不同含盐量细粒硫酸盐渍土, 采用自制试验箱进行冻融循环试验, 测定土样不同高度处温湿度及含盐量, 分析冻融循环条件下水盐分布与迁移规律, 结合微观结构特征, 开展细粒硫酸盐渍土盐冻胀机理研究。试验结果表明: 冻融循环过程中, 从土样底部到顶部, 土体降温速率和温度变化区间均有所增大; 含盐量不同, 土样不同高度处的温度变化也有所不同, 但其变化趋势相似, 含盐量越大的盐渍土水分向冷端迁移越大, 底部与顶部的含水率差越大, 热量损失逐渐减小。冻融循环结束后, 不同含盐量盐渍土盐分向冷端迁移, 含盐量越大盐分迁移量越大, 顶部与底部的含盐量差越大。土样自土层底部到顶部的土颗粒中大孔隙数量增加且分布不均匀, 土体顶部产生明显膨胀变形, 说明冻融循环条件下, 盐渍土中水盐均向冷端迁移, 冷端产生较多冰结晶与盐结晶, 使得土体产生了盐冻胀变形。

关键词

冻融循环, 细粒硫酸盐渍土, 机理研究, 微观结构, 含盐量

Study on the Mechanism of Salt Frost Heaving in Fine Grained Sulfuric Acid Saline Soil under Freeze-Thaw Cycles

Haixiang Liu^{1,2*}, Mingxia Chai^{3#}, Yanxia Ma^{1,2}

¹School of Civil Engineering, Qinghai University, Xining Qinghai

²Qinghai Provincial Key Laboratory of Energy-saving Building Materials and Engineering Safety, Xining Qinghai

³State Key Laboratory of Sanjiangyuan Ecology and Plateau Agriculture and Animal Husbandry Jointly, Qinghai University, Xining Qinghai

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 刘海翔, 柴明霞, 马艳霞. 冻融循环条件下细粒硫酸盐渍土盐冻胀机理研究[J]. 地球科学前沿, 2023, 13(5): 569-582. DOI: 10.12677/ag.2023.135054

Abstract

For fine-grained sulfuric acid saline soil with different salt contents, a self-made test chamber was used to conduct freeze-thaw cycle tests. The temperature, humidity, and salt content of the soil samples at different heights were measured, and the distribution and migration of water and salt under freeze-thaw cycle conditions were analyzed. Based on the microstructure characteristics, the mechanism of salt frost heave in fine-grained sulfuric acid saline soil was studied. The experimental results show that during the freeze-thaw cycle, the cooling rate and temperature variation range of the soil sample increase from the bottom to the top; the temperature changes at different heights of soil samples vary with different salt contents, but their trends are similar. The higher the salt content, the greater the water migration of saline soil towards the cold end, the greater the difference in water content between the bottom and top, and the gradual reduction of heat loss. After the freeze-thaw cycle, the salt content of saline soil with different salt contents migrates towards the cold end. The higher the salt content, the greater the salt migration, and the greater the difference in salt content between the top and bottom. The number of large pores in the soil particles from the bottom of the soil layer to the top of the soil sample increases and their distribution is uneven, resulting in significant expansion deformation at the top of the soil. This indicates that under freeze-thaw cycling conditions, water and salt in saline soil migrate towards the cold end, resulting in more ice crystals and salt crystals at the cold end, resulting in salt frost heave deformation of the soil.

Keywords

Freeze-Thaw Cycle, Fine Grained Sulfuric Acid Saline Soil, Mechanism Research, Microstructure, Salt Content

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

温度梯度诱导下盐渍土内部会产生水盐迁移,同时引起盐渍土发生盐冻胀现象,环境温度的周期性变化,水盐不断迁移相变,导致土体结构严重破坏[1]。王景辉[2] [3] [4]等采用室内土柱冻融试验,测定了冻融循环过程中土体含水率、电导率、温度和位移的变化,得到了在自上而下的冻结方式中,土体底部的水分向冻结锋面移动,同时带动盐分向上聚集。田秋林[5]等对西北寒旱区盐渍土水盐迁移规律的研究发现相同含水率不同含盐量的硫酸盐渍土的盐分梯度是水盐迁移的主要因素。徐爽[6]等通过改变土样冷端温度,初始含水率,干密度和含盐量等因素,进行室内重塑土单向冻结、双向融化的冻融循环试验,得到试样初始含水量增加水分迁移量也会增加,同时随着含盐量的增加,水分迁移量总体减少。肖泽岸[7] [8]等通过试验得到:蒸发条件使得盐分向表面集聚,降水条件使得表层盐分向下迁移。土样的微观结构决定了其宏观表现,可以分析其形成条件,研究土体物理、力学特征。不同的试验条件及影响因子都会对试样的微观结构产生影响。赵福堂[9]等的研究表明盐类的存在会使土体的微观结构更加复杂,盐离子能够增强土颗粒的胶结能力。冻融循环前后土样内部微观结构变化极大,土颗粒大小及孔隙数量均会发生改变。溶质的存在对土体水分迁移

有较大的影响，同时在不同浓度的盐分补给下，冻结缘处的盐分有累积趋势[8][10][11]。

石群[12]等对罗布泊天然盐渍土冻融循环后微观结构分析，得到未经冻融循环处理的土体内部结构彼此粘连，颗粒间孔隙发育不明显；冻融循环后的土体颗粒排列松散，间距增大，咬合力减小，骨架结构体系内部发生位移。刘军勇[13]等对察尔汗盐湖地区盐渍土微观结构及其力学特性进行研究，发现含盐量较低时，土体颗粒相互接触，盐晶体不足以起到有效的胶结作用，盐渍土结构较为疏松，孔隙较大。含盐量增加，胶结作用增强，盐晶体填充孔隙形成骨架密实骨架结构过渡，最终形成骨架结构。付玉涛[14]研究盐渍土的微观结构发现，易溶盐的质量分数不同，组织结构不同，主要有架空、点式接触以及接触-胶结形式。李威[15]等研究了冻融循环对盐渍土单轴强度影响的微观研究，得到由裂缝发育和盐析程度表明，冻融循环作用加剧了盐渍土的盐析过程，盐析量在冻融循环次数具有一定累加性，但因盐析量的增加，表面裂缝被填充表现为随机性较大。

通过对以上专家学者的成果分析，可以发现大量学者的研究主要包括冻融循环过程中盐渍土内部水分和盐分的迁移规律以及微观结构变化，结合土体内部不同高度处温度变化规律的研究较少，但土体内部不同高度处温度的变化差异较大，且对土体内部水分和盐分的迁移也会产生影响。因此本研究针对青海海东地区细粒硫酸盐渍土在冻融循环过程中的温湿度、盐分变化试验，结合微观结构特征，分析细粒硫酸盐渍土盐冻胀机理。

2. 试验材料与方法

2.1. 试验材料

1) 土样基本物理性质及化学成分分析

本研究选取青海乐都公路段二十里铺区沿线盐渍土，经洗盐后加硫酸钠溶液配比不同含盐量盐渍土进行室内冻融循环试验，分析冻融循环条件下细粒硫酸盐渍土盐冻胀机理。所取土样进行基本物理性质试验及化学成分分析，结果见表 1 和表 2。

Table 1. Basic physical property indexes of soil samples

表 1. 土样基本物理性质指标

土样类别	液限 ω_L (%)	塑限 ω_P (%)	最大干密度 ρ_d ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	最优含水率(%)
细粒土	25.6	17.9	1.73	18.8

Table 2. Chemical composition of soil samples

表 2. 土样化学成分

CO_3^{2-} (g/kg)	Cl^- (g/kg)	SO_4^{2-} (g/kg)	Mg^+ (g/kg)	K^+ (g/kg)	Na^+ (g/kg)
0.21	0.09	16.65	0.07	0.06	0.21

经计算得土样的塑性指数为 7.4，液性指数为 0.03，依据表 1 数据可判定该土样为含砂低液限黏土。洗盐前土样总含盐量为 4.1%，其中 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 为 0.0055，小于 0.3，判定该土样为硫酸盐渍土。对所取盐渍土土样进行洗盐操作，对洗盐后的土样进行化学成分分析及含盐量测定，其中 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 为 0.1176，判定该土样为硫酸盐渍土；含盐量为 0.37%，小于 0.5%，无盐胀性。

2) 土样制备

① 将洗盐后的土样在 108℃烘箱中烘干、碾碎、过筛，取 2 mm 筛下土备用。

② 按盐与干土的质量比称取一定量的硫酸钠粉末，将硫酸钠粉末与土样充分搅拌，混合后的土样在室温条件下密封放置，使盐分与土样充分融合。

③ 采用一层土一层水的方式在土样中按比例加入去离子水，使土样与水分充分接触并控制达含水率为 20%，密封放置 24 h。

④ 将土样充分搅拌，并将粘在一起的土颗粒捣散，根据试验步骤制样。

2.2. 试验方法

1) 试验仪器

本研究所使用的设备主要包括试验仪器和数据采集设备两部分。试验仪器主要有：自制模型试验箱、温控系统、扫描电子显微镜等。数据采集设备主要有：温湿度传感器等。试验设备见图 1。

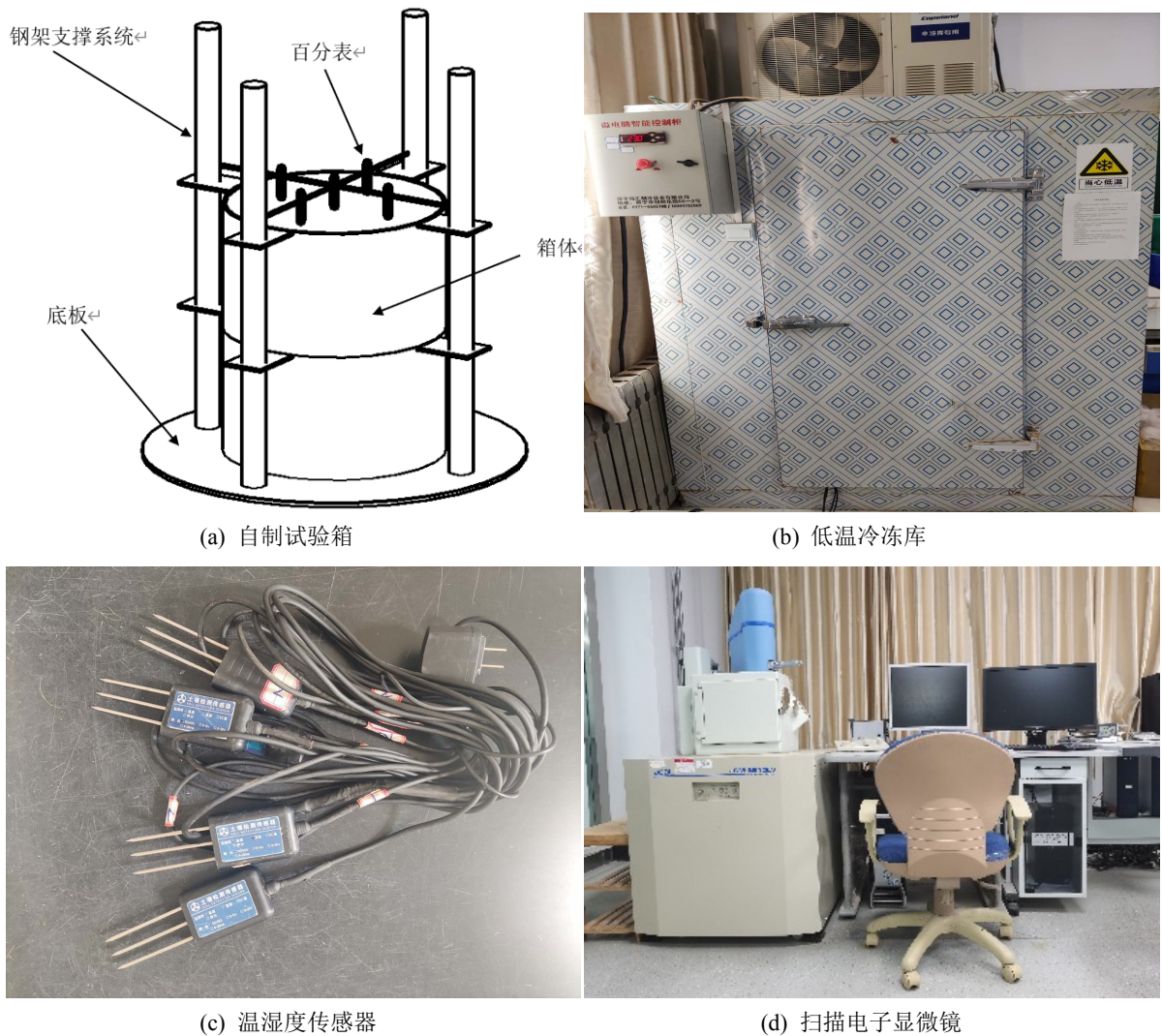


Figure 1. Test equipment

图 1. 试验设备

模型试验箱(见图 1(a))是一种模拟原状土的试验装置，选用具有防腐功能的不锈钢材料制作，箱体设置为内径为 35 cm，单桶高为 40 cm 的箱体。将箱体四周和底盘的外部包裹保温层进行模拟土样单向冻结的试验。低温冷冻库(见图 1(b))首次试验前需要进行温度设定及空载运行检查，检查无误后进行试验，后期试验前需检查温度设定，但不需要进行空载运行检查。若长时间未进行试验则需进行空载检查。温湿

度传感器(见图 1(c))装有湿敏和热敏原件,能用来测量温度和湿度。它将温度和湿度信号采集后经过稳压滤波、运算放大、非线性矫正等电路处理后,转化成温度和湿度相关的信号通过数据传输线传入电脑,采用“Java”软件形成十进制的温度和湿度数据。扫描电子显微镜(JSM-6610LV)(见图 1(d))对试验样本进行观测,其加速电压为 0.3~30 kV、放大倍数为 5×~3,000,000×;可进行金属、矿物等固态材料和生物材料的高分辨微观形貌观察,断口分析,同时可对样品表面微观区就行化学成分测定。

2) 试验参数

季艳杰[16]通过一维试验将硫酸盐渍土的影响因素及强弱顺序为:土的种类 > 含水量 > 降温速率 > 压实度/干密度。本试验用洗盐[17]后盐渍土与一定质量的无水硫酸钠粉末配置本研究所需硫酸盐渍土土样,减少冻融循环过程中其余离子对盐冻胀的影响。2020 年西宁最高温度 29℃,最低温度-18℃,平均高温 15℃,平均低温 0℃;2021 年西宁最高温度 33℃,最低温度-19℃,平均高温 16℃,平均低温 2℃;2022 年西宁最高温度 35℃,最低温度-21℃,平均高温:13℃,平均低温-4℃。万旭升[18]等人进行了温度对硫酸盐渍土盐胀的研究得到了硫酸钠的盐胀主要发生在正温区间,负温下主要发生冻胀。而于天佑[19] [20]等人对硫酸盐渍土的盐冻胀特性进行研究发现盐胀在冻结温度 5℃~-5℃发展速度最快,在-5℃以下增长率很小。故设置温度变化区间为 20℃~-20℃。其余试验参数设置见表 3。

Table 3. Test plan

表 3. 试验方案

试样编号	含盐量(%)	含水率(%)	压实系数	变温范围(℃)	循环周期(次)
1	1.5				
2	2.0				
3	2.5				
4	3.0	20	0.93	20℃~-20℃	7(降温升温均为 24 h, 48 h 为一个冻融循环周期)
5	3.5				
6	4.0				

2.3. 试验步骤

1) 温湿度变化及盐冻胀变形试验

① 将试验箱擦拭干净,并在箱体内壁处涂抹一层凡士林,减少盐冻胀过程中土样与桶体内壁的摩擦,从而减少试验误差。

② 称取定量配置好的土样分层装入试验箱内,并击实到计算高度,控制压实度为 0.93。在每次击实完成后使用刮刀刮毛土样表面。最终制得直径 35 cm × 高 80 cm 的圆柱形土样。

③ 制样过程中自底面起高度为 20 cm、40 cm、60 cm、80 cm 处将土样刮毛 2 cm 左右,在土样中间位置水平埋设温湿度传感器,见图 2。将传感器与电脑连接输出数据。

④ 在制备好的土样表面覆盖一层保鲜膜放置试验过程中土体水分流失,将制备好的土样在 20℃环境中静置 48 h。

⑤ 在土体表面放置一层具有一定刚度的轻型盖板,将百分表与土体表面充分接触。

⑥ 在试验箱四周及底面包裹保温层,控制降温过程中土样自上而下单向冻结。在 20℃~-20℃温度区间内进行冻融循环试验。

⑥ 在试验箱四周及底面包裹保温层,控制降温过程中土样自上而下单向冻结。在 20℃~-20℃温度区间内进行冻融循环试验。

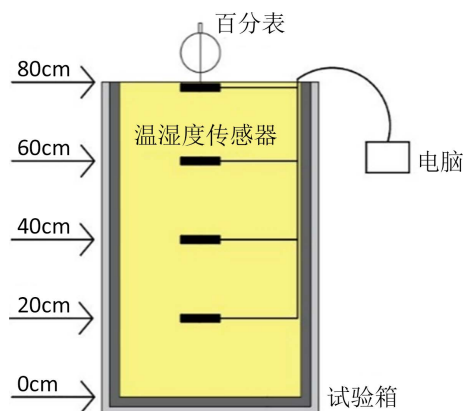


Figure 2. Sensor installation location diagram
图 2. 传感器安装位置图

2) 盐分迁移试验

- ① 在冻融循环试验结束后，自土样底部选取 20 cm、40 cm、60 cm、80 cm 高度处的土样。
- ② 采用 1:5 的土水比制作浸出液，取一定量浸出液放入蒸发皿中进行蒸干，残渣呈黄褐色时加入 3 mL 的 15% H_2O_2 溶液，反复处理至黄褐色消失(见图 3)。
- ③ 将蒸发皿放入 105℃~110℃ 的烘箱中烘干 4~8 h，取出后放入干燥器中冷却 0.5 h，重复操作多次，直至前后两次质量之差不大于 0.0001 g。
- ④ 称量蒸发皿与残渣总质量，使用易容盐总量计算公式计算含盐量。

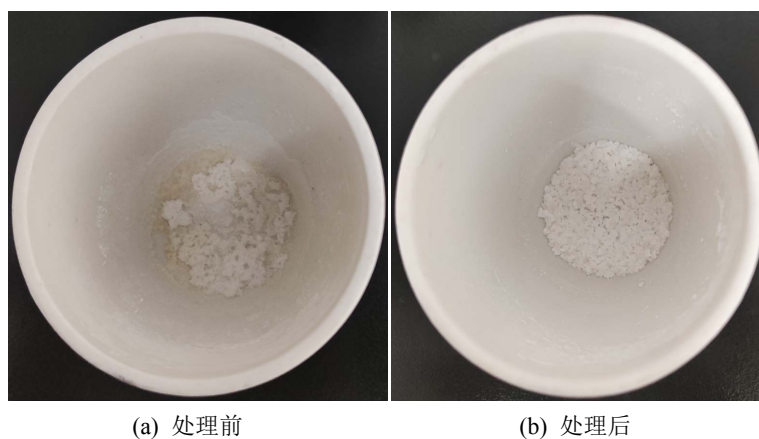


Figure 3. Comparison of 15% H_2O_2 solution before and after treatment
图 3. 15% H_2O_2 溶液处理前后对比图

3) 微观试验

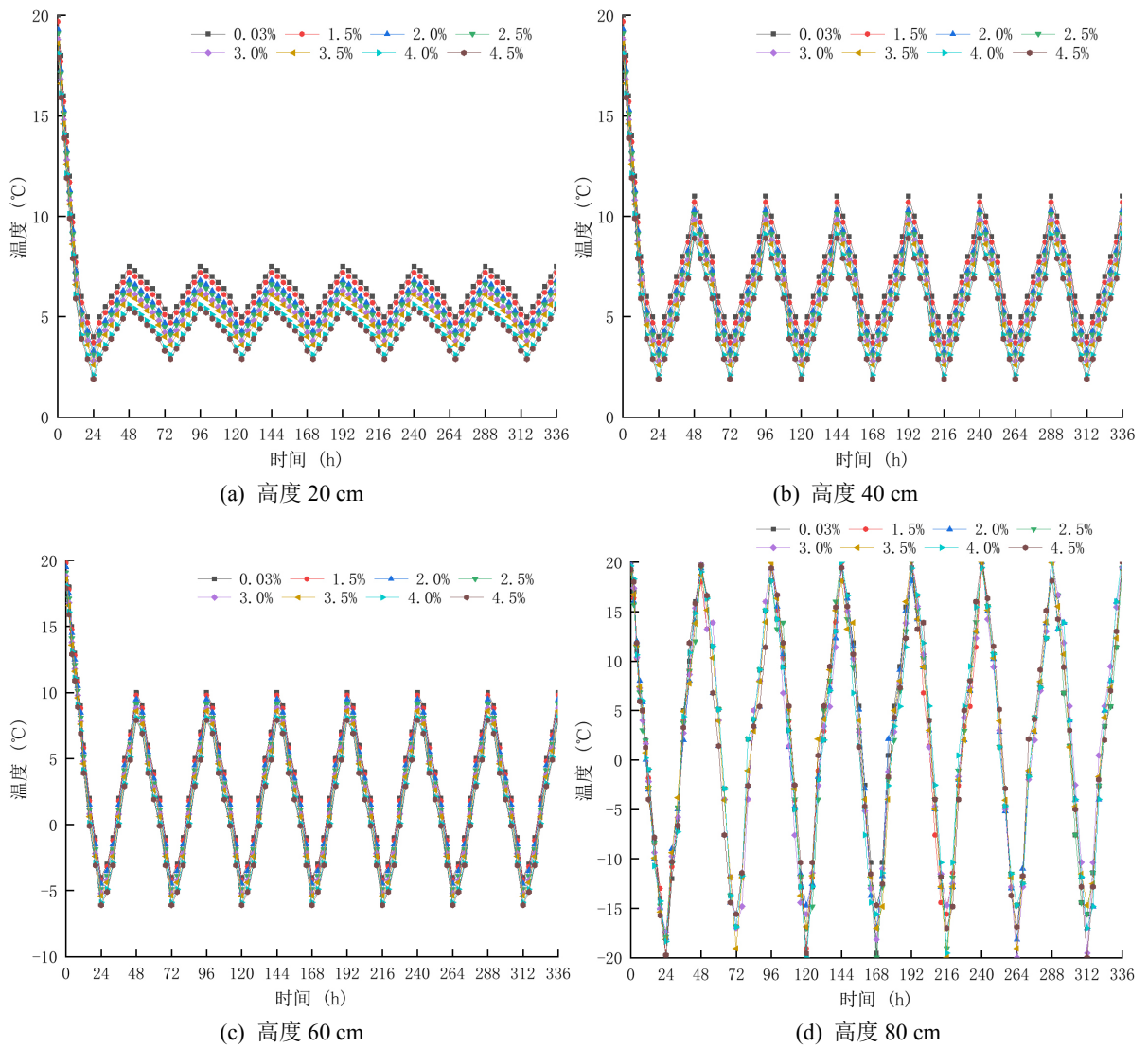
- ① 将冻融循环结束后的试样放入烘箱中烘干。将烘干后的土样打磨至表面光滑平整，制成 1 cm × 1 cm × 3 cm 左右的立方体试样，见图 4(a)。
- ② 将制好的微观试样沿高分成两部分，将多个试样用双面碳导电胶带粘到底座上。
- ③ 由于试样在干燥后导热性能极差、不导电，影响扫描电子显微镜下图像的清晰度或导致无法成像，需要抽真空后进行喷金处理增加其导电性能，使电子显微镜成像清晰，同时也能够防止试验发生热损伤。喷金处理后的试样，见图 4(b)。
- ④ 使用扫描电子显微镜进行土样孔隙结构特征观察。



(a) 微观试样

(b) 喷金处理后的试样

Figure 4. Partial process of micro test
图 4. 微观试验部分过程



(a) 高度 20 cm

(b) 高度 40 cm

(c) 高度 60 cm

(d) 高度 80 cm

Figure 5. Temperature variation with time at different heights inside soil samples
图 5. 土样内部不同高度处温度随时间变化规律

3. 结果与讨论

3.1. 温湿度变化规律分析

1) 温度变化规律

图 5 给出了不同含盐量盐渍土冻融循环条件下自土样底部起不同高度处温度变化规律。

在冻融循环过程中不同含盐量土样在相同高度处的温度变化规律相似。土样内部的降温速率和温度变化区间均随着土样高度的增加而增大。在降温过程中，土样内部不同高度处的温度速率均呈现先急后缓，最后趋于平稳的趋势；在升温过程中，土样内部不同高度处的温度变化速率表现状态与降温过程相似。含盐量不同时，土样不同高度处的温度变化也有所不同，但其变化趋势相似，含盐量越大的土样温度变化范围略有增加。将土样不同高度处温度变化范围进行整理，得到冻融循环过程中土样不同高度处温度范围，见表 4。

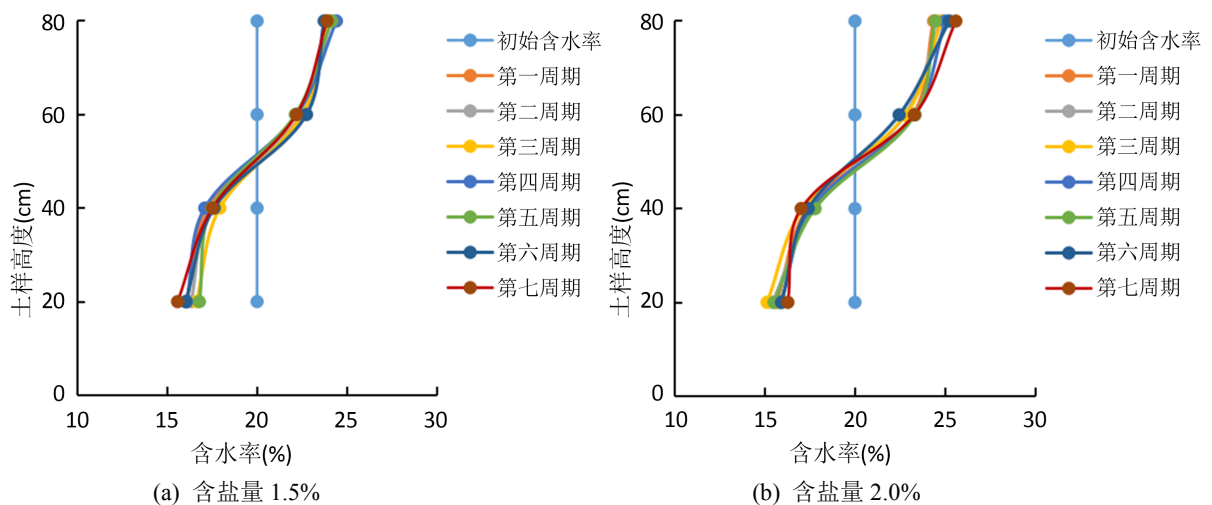
Table 4. Temperature variation range at different heights of soil samples
表 4. 土样不同高度处温度变化范围

土层高度(cm)	温度范围(°C)
20	5~8
40	1~10
60	-7~12
80	-20~20

由于试验箱外部及底部包裹保温层，隔绝四周及底部土样与外部的温度交换，降温过程中温度会自土样表面向土体内部单向传递。从表 4 中可看出从土样底部到顶部土样温度逐渐升高，证明了试验箱内土样从上自下单向冻结。随着冻结时间的增加，冻结锋面会向下迁移，而土样表面的温度经过土体传递会出现折损，使得土样内部不同高度处温度变化产生差异。同时也会产生土样上部冻结结束开始融化时，土样中下部还依旧处于冻结状态。在 0~10 h 时间内，土样外界环境温度急剧下降，此阶段土样温度与内部温度差较大。在以后时间内土样温度与内部温度差会逐渐减小。盐渍土在冻结过程中，土中的易溶盐更容易形成结晶析出同时释放热量，含盐量越大的土样在冻结过程中结晶越多释放的热量越多。同一高度的土样温度变化随着冻融循环周期和含盐量的增加会有波动，但波动量不大。

2) 水分变化规律

图 6 给出了不同含盐量盐渍土冻融循环条件下自土样底部起不同高度处含水率变化规律。



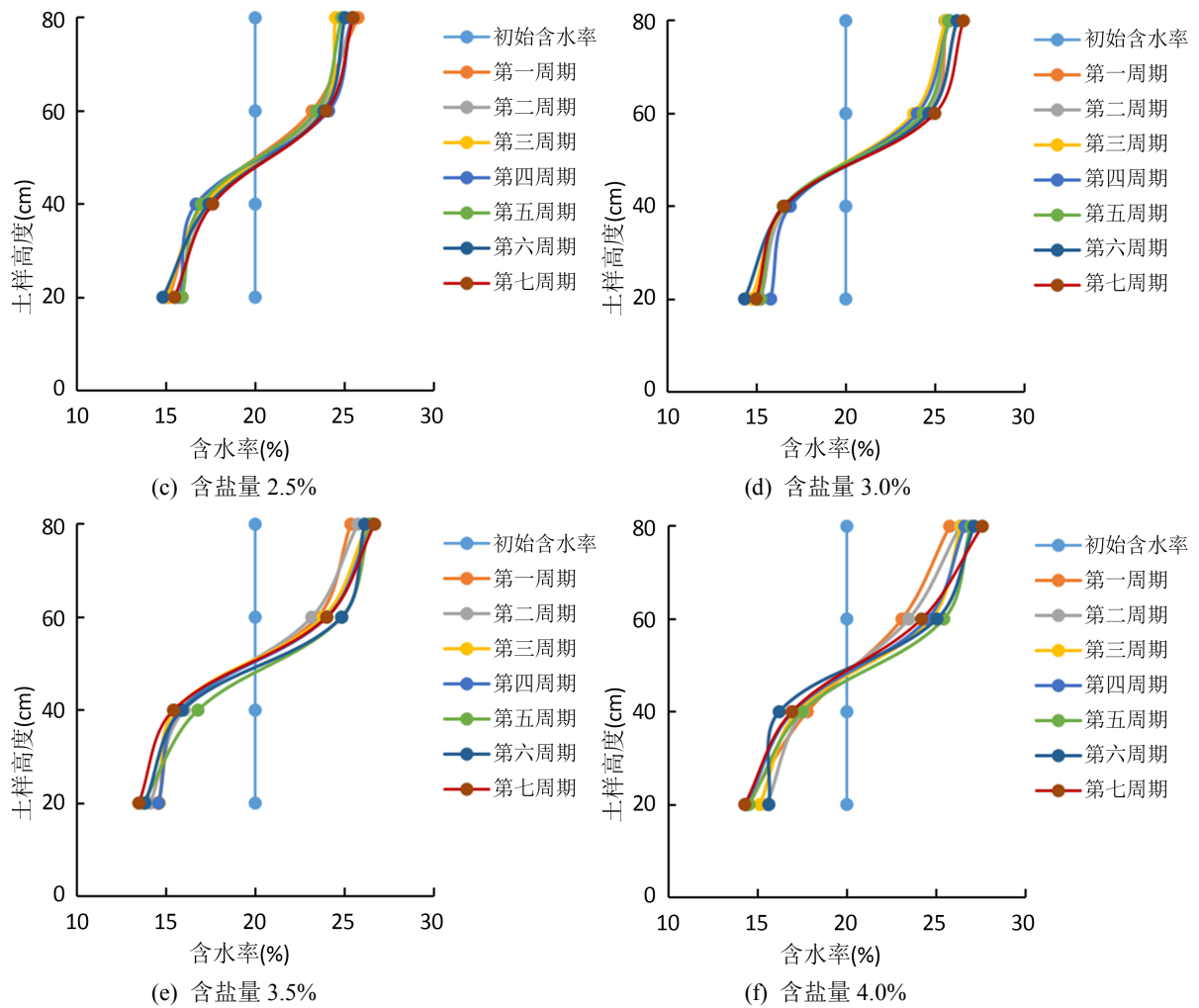


Figure 6. Water content and time variation curve at different positions of the sample

图 6. 试样不同位置含水率与时间变化曲线

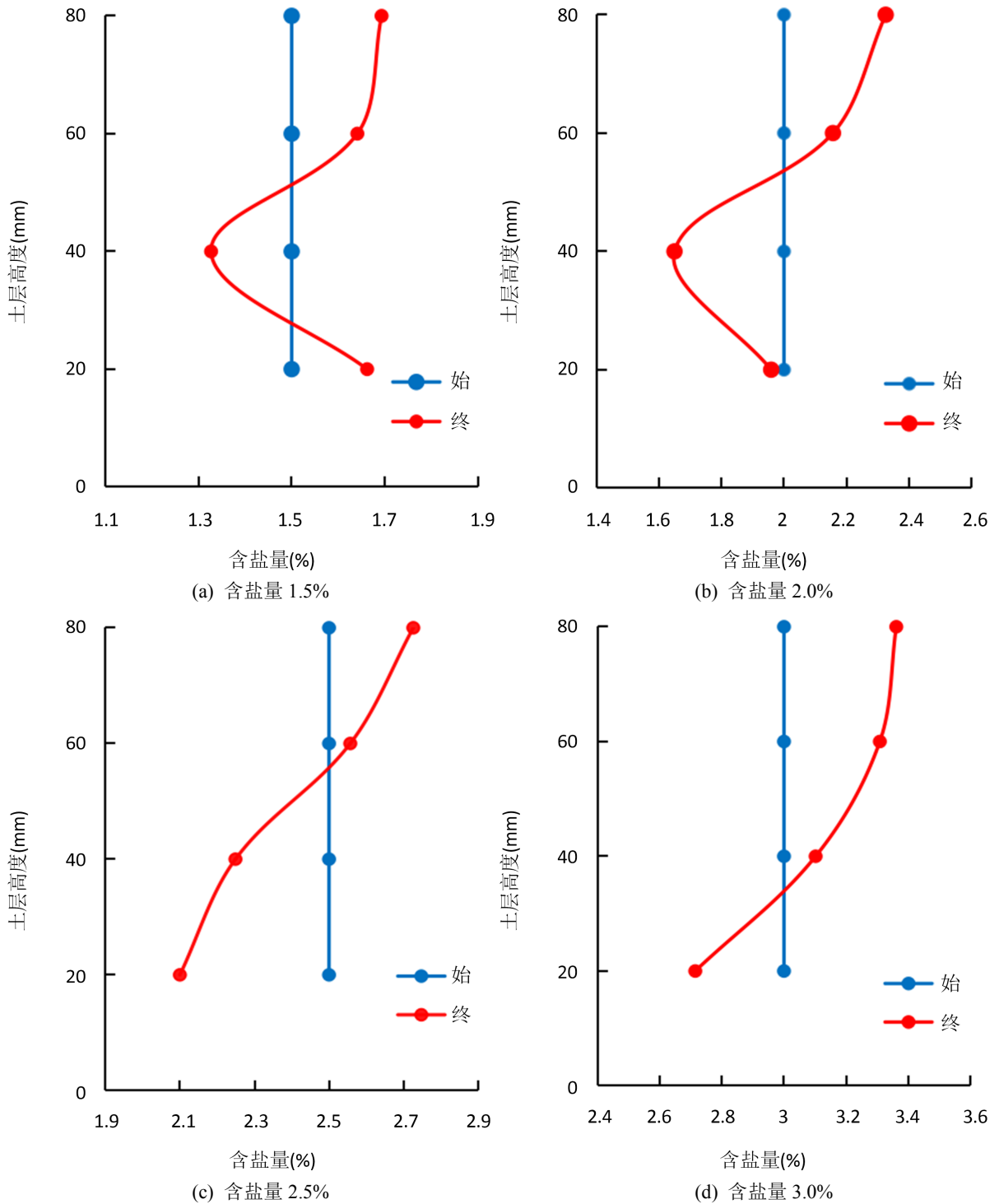
不同含盐量盐渍土在冻融循环过程中水分产生向冷端迁移的现象。含盐量相同的土样在不同冻融循环周期的水分迁移规律相似。温度降低时，土样上部的土中水率先冻结，而土样中下部的土中水会滞后冻结。此时水分会在土水势和温度梯度的作用下发生向上迁移，土样上部含水率明显增加。在冻融循环过程中含盐量越大的土样产生的结晶和孔隙数量越大，土体变形也会越大。随着含盐量的增加，土样冻结温度降低，冻结速率变缓，土体内部含水率迁移的速率增大。冻融循环过程中土样内部结晶产生的位置以及孔隙分布具有随机性产生的毛细管通道数量和位置也具有随机性，所以部分同一高度不同周期的含水率出现了减小的现象。

3.2. 盐分迁移规律

在冻融循环过程中，水分会在温度变化的条件下产生重分布，水的重分布会引起土样盐分的迁移。土中盐分会随着水分迁移向冷端迁移，同时产生浓度差，浓度差会产生盐分的自由迁移。将冻融循环结束后不同高度处土样含盐量与初始含盐量进行比较，见图 7。

本研究土样降温方式为由表及里单向降温，降温过程中盐分发生迁移，聚集和重分布，导致土样内部盐分分布不均匀。由图 7 可见，在冻融循环过程中土中的含盐量呈现向上迁移的现象，即向冷端迁移。

不同含盐量土样盐分随高度的变化趋势相似，部分呈现“S”形分布。温度降低时，表面土层率先发生冻结，水分带动盐分向冻结面迁移，表层盐浓度增加，部分盐分结晶析出引起盐溶液浓度降低。含盐量越大的土样冻结温度越低，土中水的迁移量越大，溶液浓度差越大，更有利于晶体析出从而更多的盐分发生迁移。含盐量越大的盐渍土盐分迁移量越大，顶部与底部的含盐量差越大。温度通过影响盐分的溶解度进而影响盐分的溶解和吸附，使盐分在土体内部重新分布。



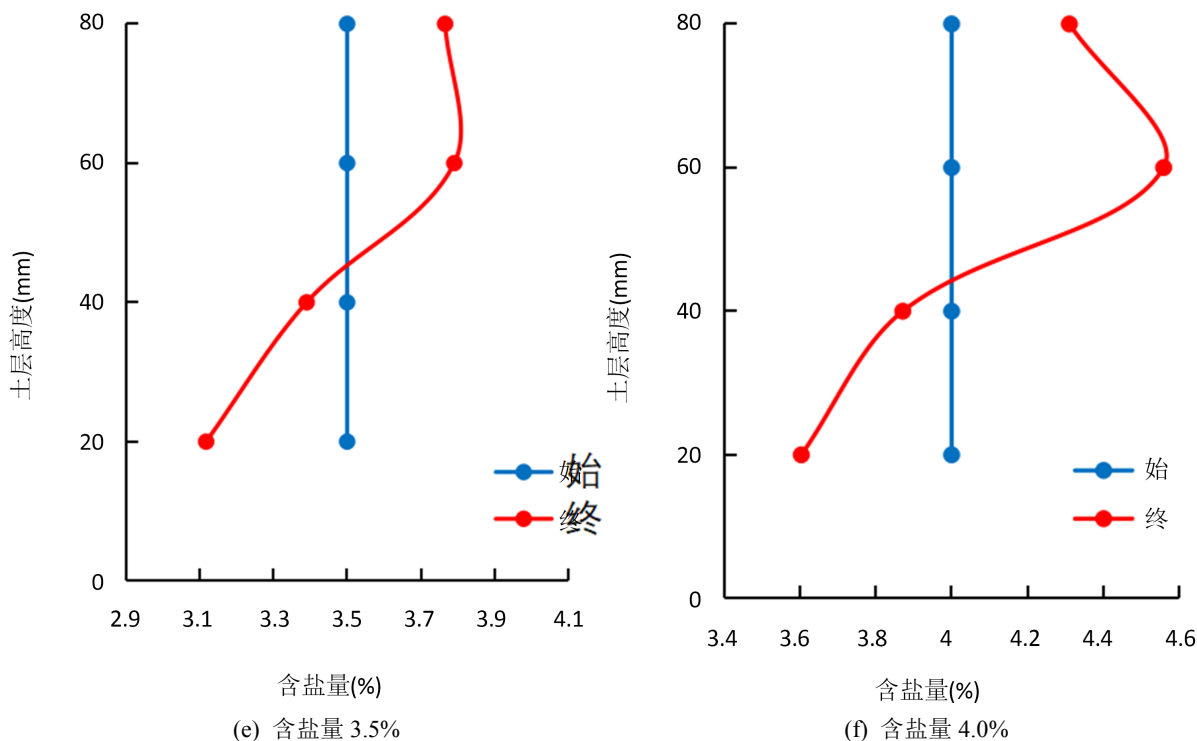


Figure 7. Distribution diagram of salt content of saline soil with different salt content at different heights after the end of freeze-thaw cycle of samples

图 7. 试样冻融循环结束后不同含盐量盐渍土不同高度含盐量分布图

3.3. 盐渍土盐冻胀变形

图 8 给出了冻融循环条件不同含盐量盐渍土冻结次数与盐冻胀变形关系曲线。

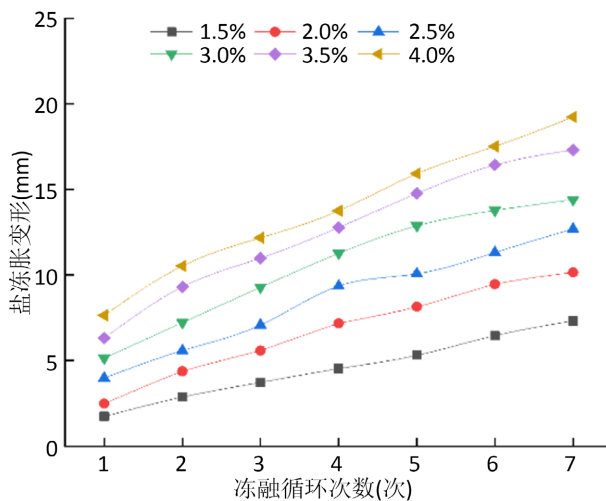


Figure 8. Relationship curve between freezing times of saline soil with different salt content and salt frost heave deformation

图 8. 不同含盐量盐渍土冻结次数与盐冻胀变形关系曲线

从图 8 中可看出，盐冻胀变形与冻融循环次数之间呈现线性增大的现象。随着冻融循环次数和含盐量的增加，土样的盐冻胀变形量出现明显的增加，在土样表面表现为明显的膨胀，见图 9。



Figure 9. Surface expansion of soil samples
图 9. 土样表面膨胀现象

3.4. 微观结构特征分析

考虑冻融循环过程中土体内部不同高度处温度变化区间、水分迁移和盐分迁移规律相似，选择含盐量为 3.5% 土样，分析冻融循环前、冻融循环后(自土样底部起 20 cm、40 cm、60 cm、80 cm 高度处)试样微观结构，选择观测倍数为 2000 倍，见图 10。

冻融循环前土颗粒间连接较为紧密，土颗粒大小分布较为均匀，颗粒间可见清晰的小孔隙，孔隙分布较为均匀，大孔隙数量较少。经过冻融循环后，土颗粒间的状态相较于冻融循环前变化特别明显，土体结构逐渐疏松，孔隙数量及大小均有所增加，架空结构增多且分布不均。在冻融循环前后土颗粒间均可见盐结晶。图 10(b) 的土样离冷源最远，同时试验箱外部包裹保温层使得土样在冻融循环过程中热量的损失最大，该土层在冻融循环过程中的温度变化梯度较小，土中冰和盐结晶数量较少，产生的膨胀较小、对土样结构的破坏最小。由土层底部到顶部，土样在冻融循环过程中热量的损失逐渐减少，在冻融循环过程中的温度变化梯度逐渐增大，产生的冰结晶与盐结晶逐渐增加，产生的膨胀量逐渐增加，对土层的破坏也逐渐变大。图 10(e) 的土层离冷源最近，温度变化梯度最大，在冻融循环过程中进行了多次充分的盐胀冻胀，结构受到严重破坏，产生较大孔隙。

同时对于高度为 20 cm 的土样来说，上部土体的自重对其产生一定压力，同时该土层在冻融循环过程中产生的盐冻胀效应相对较小，二者相互作用也会影响孔隙变化。对于高度为 80 cm 的土样，该土层在冻融循环过程中产生的盐冻胀效应相对较大，而上部仅存在少量土体，土体自重对其产生的影响可忽略不计。故随着土样高度的增加，土结构逐渐疏松，孔隙数量及大小增加，架空结构增多且分布不均。

盐渍土在经过冻融循环后，土颗粒间的状态相较于冻融循环前变化特别明显，土体结构逐渐疏松，

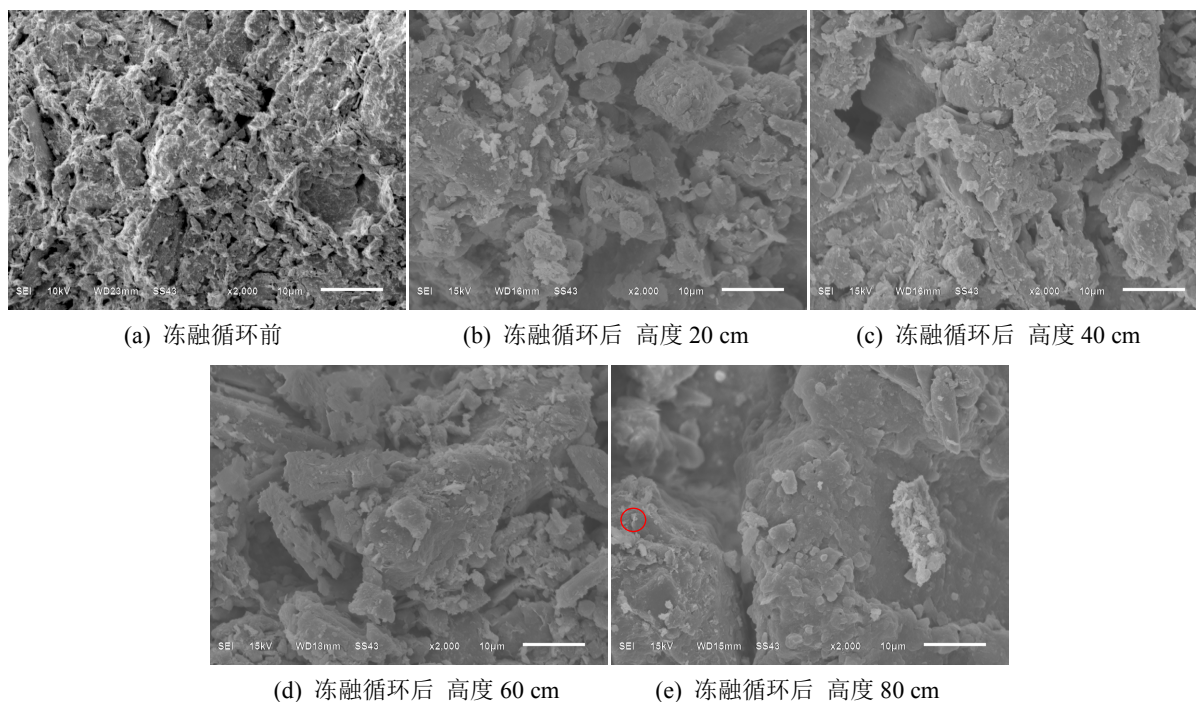


Figure 10. SEM images of soil samples at different heights before and after freeze-thaw cycles (3.5%)

图 10. 冻融循环前后土样不同高度处电镜扫描图片(3.5%)

孔隙数量及大小均有所增加，架空结构增多且分布不均。随着土样高度的上升土体结构逐渐疏松，孔隙数量及大小均有所增加，架空结构增多且分布不均。

4. 结论

土体内部温度、水分、盐分以及孔隙的变化是分析盐渍土盐冻胀的主要因素，通过测量冻融循环条件下不同含盐量土样内部不同高度处的温度、含水率、盐分变化，结合不同含盐量盐渍土冻结次数与盐冻胀变形关系，以及冻融循环前后土样不同高度微观结构特征，得到冻融循环条件下，盐渍土中水盐均向冷端迁移，冷端产生较多冰结晶与盐结晶，导致土体产生盐胀变形。

冻融循环过程中，土样底部到顶部的降温速率和温度变化区间均有所增大。含盐量不同，土样不同高度处的温度变化趋势相似。不同含盐量盐渍土离表面越近的土样温度变化对水分和盐分迁移的影响越大，同时盐分和水分的迁移量也越大。土样底层的温度变化范围较小，水分和盐分迁移量较小。含盐量越大迁移量越大，底部与顶部的差值越大。盐渍土中水盐在冻融循环条件下均向冷端迁移，冷端产生较多冰结晶与盐结晶，使得土体产生了盐冻胀变形，故顶部土层中盐结晶数量增加，自底部到顶部的土颗粒中大孔隙数量增加。

基金项目

青海省科技计划项目(2023-ZJ-756)交通荷载作用下粗颗粒氯盐渍土格栅加筋路基关键技术研究。

参考文献

- [1] 张恒. 硫酸钠盐渍土盐胀冻胀机理及电化学防治技术研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2020
- [2] 王景辉, 张卫兵, 唐莲, 等. 水盐迁移对硫酸盐渍土盐-冻胀规律的影响[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(6): 108-115.
- [3] 王景辉. 基于冻融循环的宁夏地区硫酸盐渍土水盐运移和盐-冻胀规律研究[D]: [硕士学位论文]. 银川: 宁夏大

学, 2020

- [4] 王景辉, 张卫兵. 硫酸盐渍土盐冻胀机理研究现状与进展[J]. 岩土工程技术, 2019, 33(4): 187-191, 249.
- [5] 田秋林, 朱世煜, 陆军, 等. 西北寒旱区盐渍土水盐迁移规律研究[J]. 公路, 2019, 64(8): 22-27.
- [6] 徐爽, 郭颖, 单炜. 冻融过程中重塑土水盐迁移的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(30): 285-290.
- [7] 肖泽岸, 赖远明. 冻融和干湿循环下盐渍土水盐迁移规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S1): 3738-3746.
- [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.
- [9] 赵福堂, 常立君, 张吾渝. 循环应力比和振动频率对盐渍土微观结构影响分析[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3): 854-864.
- [10] 肖泽岸, 朱霖泽, 侯振荣, 等. 水盐相变对硫酸盐渍土基质吸力影响规律研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(10): 1935-1941.
- [11] 周立增. 温度梯度作用下非饱和硫酸盐渍土水盐迁移及其变形特性研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2021
- [12] 石群, 张远芳. 罗布泊天然盐渍土冻融循环后微观结构分析[J]. 工程勘察, 2016, 44(5): 12-16.
- [13] 刘军勇, 任勇, 张留俊. 察尔汗盐湖地区盐渍土微观结构及其力学特性[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(5): 1277-1287.
- [14] 付玉涛. 易溶盐与盐渍土层微观结构及竖向分布关系[J]. 山东交通学院学报, 2020, 28(2): 58-64.
- [15] 李威, 齐军, 王亚静, 等. 冻融循环对盐渍土单轴强度影响的微观机理研究[J]. 山西建筑, 2018, 44(17): 62-64.
- [16] 季艳杰. 硫酸钠结晶对细粒土变形和强度影响试验研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2019
- [17] 邴慧, 武俊杰, 邓津. 黄土状盐渍土洗盐前后物理力学性质的变化[J]. 冰川冻土, 2011, 33(4): 796-800.
- [18] 万旭升, 赖远明. 硫酸钠溶液和硫酸钠盐渍土的冻结温度及盐晶析出试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(11): 2090-2096.
- [19] 于天佑, 吴亚平, 司培国, 等. 细粒硫酸钠盐渍土盐冻胀特性试验研究[J]. 冰川冻土, 2019, 41(2): 407-415.
- [20] 于天佑. 细粒硫酸盐渍土盐冻胀特性及其对路基变形的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.