

# 封闭系统条件下粉细砂水盐迁移及变形分析

江建兵<sup>1,2</sup>, 杨晓松<sup>1,2\*</sup>, 杨保存<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>塔里木大学水利与建筑工程学院, 新疆 阿拉尔

<sup>2</sup>塔里木大学南疆岩土工程研究中心, 新疆 阿拉尔

收稿日期: 2023年3月5日; 录用日期: 2023年3月24日; 发布日期: 2023年3月31日

## 摘要

在西北地区广泛分布的冻土及盐渍土中, 作为铁路路基C类填料的粉细砂在冻融方面少有研究, 本文结合阿拉尔市的实际情况, 采用粉细砂为研究对象, 进行多次冻融循环后水盐迁移及变形试验研究。结果表明, 冻融循环过程中, 越靠近冷端, 温度变化越剧烈, 水盐也向冷端迁移, 越靠近顶部水, 盐聚集越多; 粉细砂素土在冻融循环中变形为融沉, 而盐渍土变形为先盐胀后融沉, 素土与盐渍土累积变形均表现为沉降的趋势。

## 关键词

粉细砂, 冻融循环, 水盐迁移

# Water-Salt Migration and Deformation Analysis of Silty Fine Sand under Closed System Conditions

Jianbing Jiang<sup>1,2</sup>, Xiaosong Yang<sup>1,2\*</sup>, Baocun Yang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Water Resources and Architecture Engineering, Tarim University, Aral Xinjiang

<sup>2</sup>Research Center of Southern Xinjiang Geotechnical Engineering, Tarim University, Aral Xinjiang

Received: Mar. 5<sup>th</sup>, 2023; accepted: Mar. 24<sup>th</sup>, 2023; published: Mar. 31<sup>st</sup>, 2023

## Abstract

In the northwest region widely distributed frozen soil and saline soil, as railway subgrade class C filler, there is little research on the freeze-thawing aspects of silty fine sand. In this paper, combined

\*通讯作者。

with the actual situation of Aral City, silty fine sand was used as the research object to carry out experimental research on the water-salt migration and deformation after several freeze-thaw cycles. The results show that during the freeze-thaw cycle, the closer to the cold end, the more severe the temperature changes, the water salt also migrates to the cold end, and the closer to the top, the more water salt accumulates. In the freeze-thaw cycle, the silty fine sand was deformed into thaw sedimentation, while the saline soil was deformed by salt expansion and then thaws sedimentation, and the cumulative deformation of the prime soil and the saline soil showed a tendency of settlement.

## Keywords

Silty Fine Sand, Freeze-Thaw Cycle, Water-Salt Migration

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

在工程实践中, 冻土问题广泛存在于岩土工程领域, 如路基的冻胀与融沉, 我国是季节性冻土占国土面积 50% 以上的冻土大国, 尤其在我国西北地区, 更是因其土体矿化度高而使土体盐渍化[1] [2] [3]。土体盐渍化所带来的工程灾害使得经济遭受严重损失[4] [5]。

盐渍土的形成与冻融变化有关, 冻融循环使得土体水盐迁移, 进而造成土壤盐渍化。早在上世纪 30 年代, Richards 提出多孔介质中水流运动的基本方程, 开创水盐迁移理论研究先河[6]; Bear 等通过试验研究非饱和土的盐分迁移, 结果表明, 温度会影响土体的水分性能和相平衡[7]。在国内, Zhang 等通过室内冻融试验, 发现在冻融过程中, 土壤的水分和盐分经历两次迁移, 形成了特殊的水盐运动规律[8]。王玉龙以上覆荷载下的盐渍土为研究对象, 探究其在开放系统下的水盐迁移及变形规律[9]。张恒进行了不同硫酸钠含量、不同温度梯度及溶液补给条件下室内单向冻结试验, 研究了硫酸盐渍土的水盐迁移特征, 阐明了水-热-盐耦合作用下硫酸钠盐渍土的变形规律[10]。张留俊通过人工配制盐渍土, 研究了降水入渗条件下氯盐渍土的水盐迁移规律[11]。刘健鹏采用开放系统下对盐渍土进行单向冻结试验, 认为低含盐土中发生更多的冰水相变[12]。目前, 关于冻土及盐渍土冻融的研究限于黏质土, 而南疆广泛分布的粉细砂应用于铁路路基的 C 类土在冻融方面却少有研究[13]。本次试验采用室内土柱试验, 探究粉细砂在多次冻融循环后的水盐迁移及变形规律, 为南疆地区基础工程建设与次生盐渍化治理提供理论依据。

## 2. 试验材料与试验方案

### 2.1. 试验材料

试验用土取自新疆阿拉尔市塔里木大学。试验土样中含有可溶性盐, 参考《公路土工试验规程》中测得土样总盐为 0.069%, 小于 0.3% 的盐渍土标准, 同时为避免洗盐带来的土体破坏, 故不对试验土样进行洗盐处理, 土样各离子含量如表 1 所示。参考《土工试验方法标准》进行基本物理力学性质试验, 采用击实试验测得最大干密度为  $1.63 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 最优含水率为 15.54%, 采用液塑限试验测得塑限为 15.5%, 液限为 30%, 经测定本试验土样为粉细砂。

### 2.2. 试验方案及装置

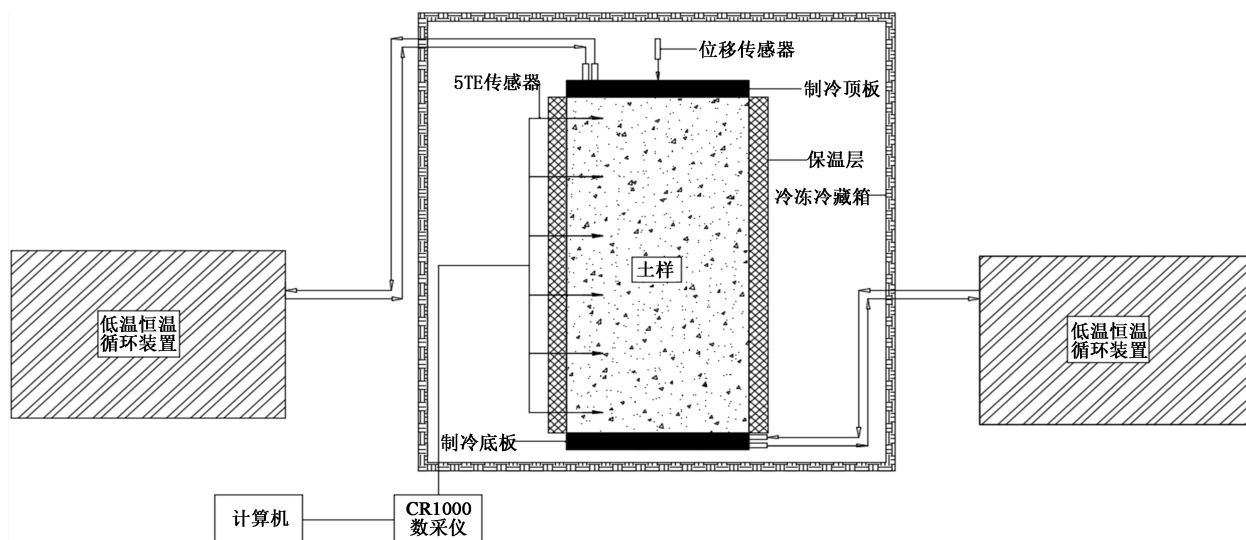
粉细砂在工程中易产生沉降, 而硫酸盐渍土则具有盐胀特性, 本文主要研究粉细砂在冻融作用下的

水盐迁移及变形规律, 对比得出硫酸盐对粉细砂的影响。土样最大干密度为  $1.63 \text{ g/cm}^3$ , 最优含水率为  $15.54\%$ , 压实度为  $95\%$ , 因此土柱控制干密度为  $1.55 \text{ g/cm}^3$ , 控制含水率为  $15\%$ 。本次试验采用素土与  $1\%$  含硫酸盐土样对照作为试验土样进行室内模拟实验, 根据阿拉尔市气象数据降温过程采用顶端  $-20^\circ\text{C}$ , 底部采用  $5^\circ\text{C}$ , 升温过程顶端设置为  $20^\circ\text{C}$ , 采用降温  $12 \text{ h}$ , 升温  $12 \text{ h}$  为一个循环, 往复进行  $5$  次循环, 采用传感器检测试验时的水、盐、温及位移变化。试验中将试验土样装入密封袋中闷料  $24 \text{ h}$  以上[14], 然后间隔  $5 \text{ cm}$  分层装入有机玻璃筒并压实, 并按图 1 所示将传感器安装到位。

**Table 1.** Content table of soluble salt ions in soil samples

**表 1.** 土样易溶性盐离子含量表

土质	各离子含量(%)								总含盐量 (%)	盐渍土类别
	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$		
粉细砂	0	0.0488	0.039	0.04	0.23	0.0854	0.2246	0.0254	0.069	非盐渍土



**Figure 1.** Diagram of the test device

**图 1.** 试验装置图

### 3. 试验结果及分析

将第  $n$  次循环记为  $T-n$ ,  $n = 1, 2, 3, 4, 5$ , 变形以盐冻胀为正值, 沉降为负值。

#### 3.1. 温度变化分析

如图 2 所示, 距底部不同高度土层温度随时间的变化基本一致, 呈现高度越高, 温度变化越大, 越靠近底部则温度变化越不明显。

由图 2 可以看出, 素土与  $1\%$  含盐土样温度变化大致相同, 各循环周期内冻结与升温阶段温度均表现自上而下逐级变化。

#### 3.2. 水盐迁移规律

冻融循环后, 土柱不同高度体积含水率变化曲线如图 3 所示。

由图 3 可以看出, 素土与  $1\%$  含盐土不同高度体积含水率的变化基本一致, 在土柱上半部分表现为随

冻融循环次数增加，体积含水率随之增加，且越靠近顶板越明显；在土柱下半部分则表现为随冻融次数的增加，体积含水率随之降低。试验结果表明，冻融循环过程中，水分向冷端迁移。这是由于土壤基质势造成冻结过程未冻水不断向冻结锋面迁移且冻结，使得上部含水率增加，融化时虽会在重力作用下向下迁移，但基质势大于重力势，使得上部水分变化剧烈但整体表现向上迁移。

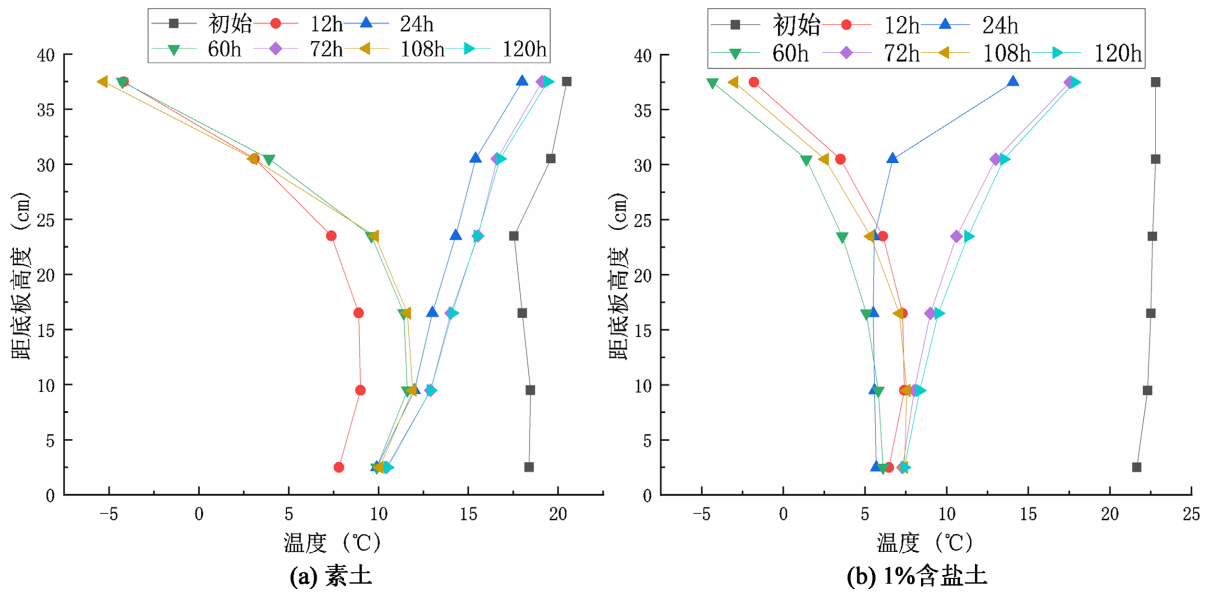


Figure 2. Variation curves of the temperature of soil column along depth during freeze-thaw process

图 2. 土柱冻融过程温度沿深度变化曲线

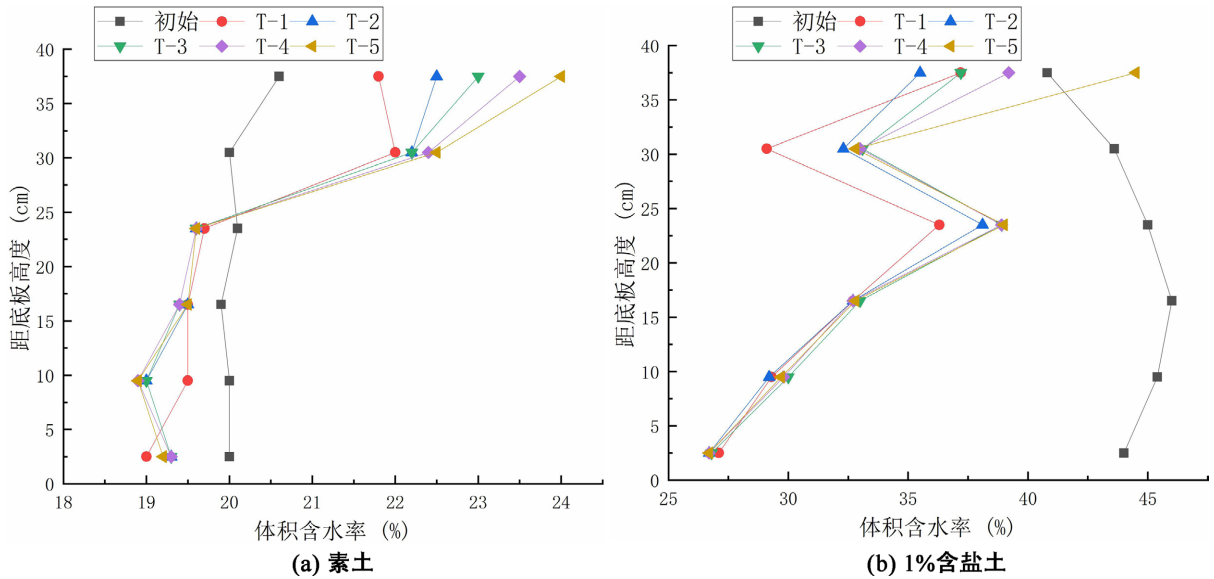


Figure 3. Variation curves of volume moisture content at different heights

图 3. 不同高度体积含水率变化曲线

图 4 为冻融循环后土柱不同高度电导率变化曲线。

由图 4 可得，素土与 1%含盐土不同高度电导率变化与不同高度体积含水率的变化趋于一致，也表现为随冻融次数增加，上部电导率增加，下部电导率降低，但相对于水分迁移有一定的滞后性，素土电导

率主要在 37~40 cm 范围变化, 1% 含盐土电导率则在 25~40 cm 范围变化较大, 随冻融次数增加, 二者在顶端电导率均不断变大。结果表明, 冻融循环加剧水分迁移, 水分迁移带动盐分向顶端迁移, 使得土样顶部盐碱化加剧。这是水在冻结后, 盐从冰相析出, 使得土壤盐分增加, 水分的迁移带动了盐分的聚集, 这就是“盐随水走”。

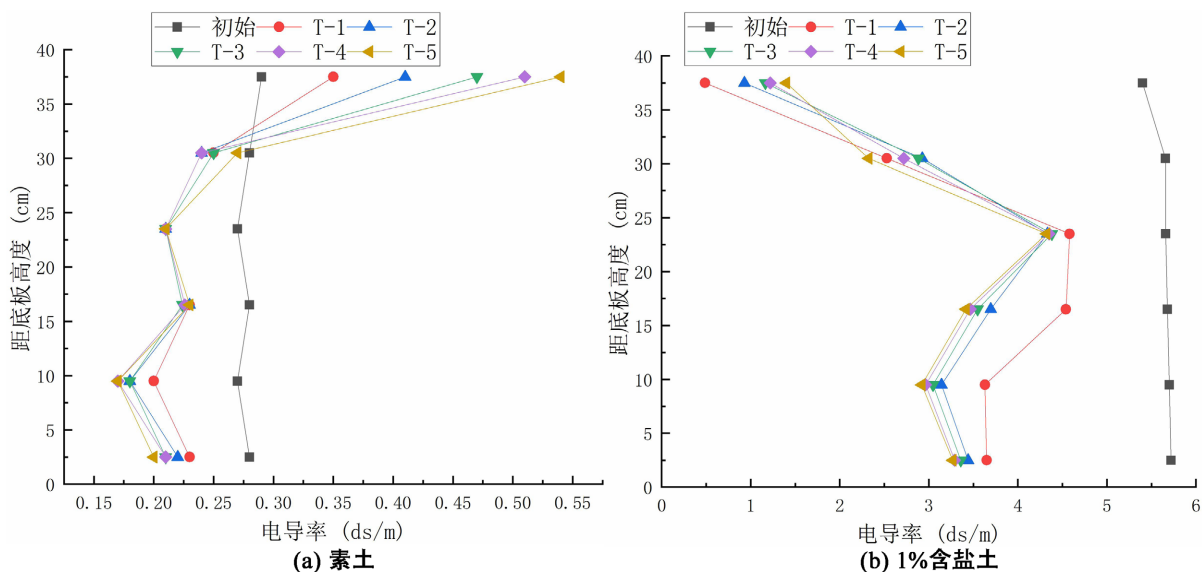


Figure 4. Variation curves of conductivity at different heights

图 4. 不同高度电导率变化曲线

### 3.3. 变形分析

如图 5, 土柱盐 - 冻胀变形呈现阶梯式反复发展, 素土持续变形沉降, 而 1% 含盐土则表现先上升后下降的趋势, 但总体表现为沉降。素土变形冻融循环前半周期表现为平稳基本无变化, 后半周期表现为快速沉降后趋于平稳; 1% 含盐土样变形在前半周期表现为持续盐 - 冻胀, 在后半周期与素土表现一致。可见盐 - 冻胀变形发生在降温阶段, 沉降变形则主要发生于升温阶段, 素土因自身含盐量低在降温阶段以冻胀变形为主, 且由于制冷顶板有一定荷载, 造成素土降温时变形不明显。由图中可见, 素土与 1% 含盐土在升温或降温发生一段时间后变形量趋于稳定, 这与季节性冻土区变形相似[15]。

冻融循环后素土与 1% 含盐土的残余变形与累积变形如图 6 所示, 由图 6(a)可知, 素土主要以融沉为主, 最大融沉量 0.35 mm; 而 1% 含盐土在第一次循环盐胀, 盐胀量 0.16 mm, 而后为融沉变形, 最大融沉量为 0.41 mm。在第三个循环后, 两个土柱变形均表现为趋于减小, 素土的残余变形较 1% 含盐土更为稳定。由图 6(b)看出, 素土随冻融循环次数增加变形表现为融沉趋势, 1% 含盐土随冻融次数增加变形表现为先盐胀后融沉趋势。

土柱在冻融循环后产生变形的主要原因是冻融循环使砂砾重分布, 土体孔隙率增大, 在自重作用下发生沉降, 并且土颗粒之间存在内摩阻力、粘结力等作用, 使得结构产生小幅度变形。

## 4. 结论

针对粉细砂进行在冻融循环下的水盐迁移及变形规律研究, 通过素土与人工配制含硫酸盐土对照开展不同周期冻融试验, 得出以下结论:

- 1) 土柱在各循环周期内, 冻结与升温阶段表现为自上而下逐级变化, 越靠近冷端, 温度变化越剧烈;

2) 经过多次冻融循环, 水分不断地向冷端迁移并带动盐分迁移, 且随冻融次数增加, 电导率值不断变大;

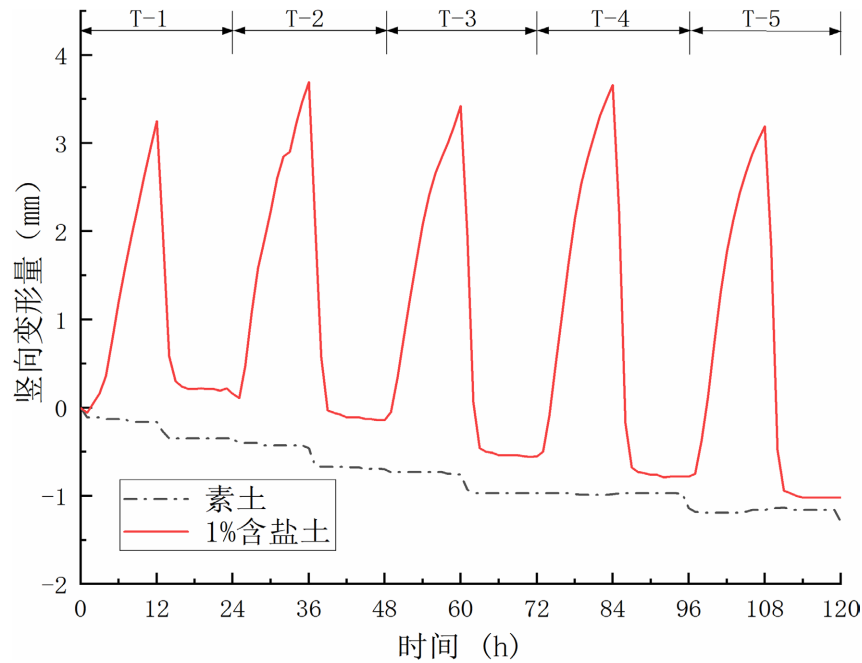


Figure 5. The relationship between soil column deformation and time

图 5. 土柱变形与时间的关系

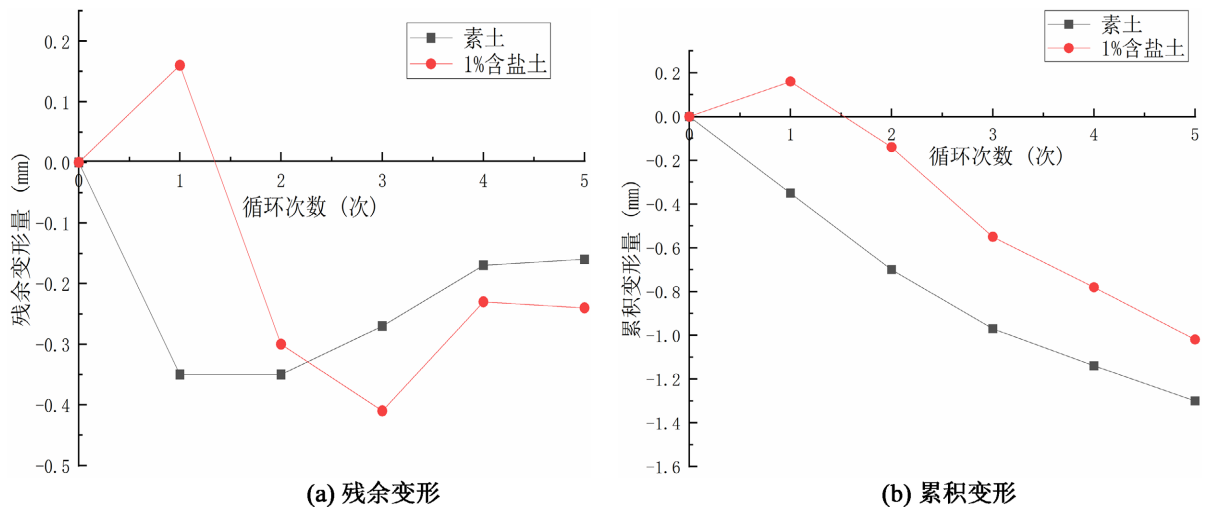


Figure 6. The development trend of soil column deformation follows freeze-thaw cycle

图 6. 土柱变形随冻融循环发展趋势

3) 在冻融循环过程中, 粉细砂素土以沉降变形为主, 1%含盐土则表现为先盐胀后融沉, 随冻融次数增加, 二者累积变形呈现不断沉降的趋势, 这是由于经过冻融循环, 粉细砂内部砂砾重分布, 孔隙增大, 在自重作用下产生沉降;

4) 本次试验表明, 粉细砂素土在冻融循环过程中与 1%含盐土水盐迁移主要发生在上部, 累积变形为沉降; 在工程中, 应注意对上部采取阻盐及防沉降措施。

## 基金项目

本研究由塔里木大学校长基金(TDZKSS202151)资助。

## 参考文献

- [1] 徐攸在, 等. 盐渍土地基[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993: 1-11.
- [2] Carteret, R., Buzzi, O., Fityus, S., *et al.* (2014) Effect of Naturally Occurring Salts on Tensile and Shear Strength of Sealed Granular Road Pavements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **26**, 1-13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000938](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000938)
- [3] 铁道部第一勘测设计院. 盐渍土地地区铁路工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1988: 1-3.
- [4] 高江平, 王永刚. 盐渍土工程与力学性质研究进展[J]. 力学与实践, 2011, 33(4): 1-7.
- [5] Netterberg, F. (1979) Salt Damage to Roads: An Interim Guide to Its Diagnosis, Prevention and Repair. *Scientia Sinica*, **15**, 107-122.
- [6] Richards, L.A. (1931) Capillary Conduction of Liquids in Porous Mediums. *Physics*, **1**, 318-333. <https://doi.org/10.1063/1.1745010>
- [7] Bear, J. and Gilman, A. (1995) Migration of Salts in the Unsaturated Zone Caused by Heating. *Transport in Porous Media*, **19**, 139-156. <https://doi.org/10.1007/BF00626663>
- [8] Zhang, D.F. and Wang, S.J. (2001) Mechanism of Freeze-Thaw Action the Process of Soil Salinization in Northeast China. *Environmental Geology*, **41**, 96-100. <https://doi.org/10.1007/s002540100348>
- [9] 王玉龙, 常立君, 李舒洁. 冻融循环作用下上覆荷载对盐渍土水盐迁移及变形规律的影响研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(2): 142-153.
- [10] 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.
- [11] 张留俊, 裘友强, 张发如, 等. 降水入渗条件下氯盐渍土水盐迁移模拟试验[EB/OL]. 交通运输工程学报: 1-14. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1369.U.20221207.1043.001.html>, 2022-12-07.
- [12] 刘健鹏, 杨平, 赵记领. 氯盐粉质黏土冻结过程中变形特性及其机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(8): 1689-1700.
- [13] 中铁第一勘察设计院集团有限公司. TB 10001-2016 铁路路基设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
- [14] 包卫星, 张莎莎. 路用砂类盐渍土盐胀及融陷特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 734-739
- [15] 蔡德钧. 高速铁路季节性冻土路基冻胀时空分布规律试验[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(3): 16-21.