

DOI: 10.11779/CJGE201404020

# 南疆铁路路基次生盐渍化试验研究

赵德安<sup>1</sup>, 余云燕<sup>2</sup>, 马惠民<sup>3</sup>, 陈志敏<sup>2</sup>, 金培杰<sup>3</sup>, 彭典华<sup>2</sup>

(1. 西北民族大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730030; 2. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070;  
3. 中铁西北科学研究院, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 为了全面地研究重塑盐渍土和改良盐渍土的毛细水上升及次生盐渍化现象, 弄清水分盐分迁移规律, 结合南疆铁路盐渍土路基病害防治技术研究, 自行研发了一套测定土的毛细水上升高度和盐分迁移试验系统。试验结果表明: 改良盐渍土试验未见明显泛盐现象, 而重塑盐渍土在同样压实度及相同物理环境下, 迁移盐分表面析出十分明显, 沿土柱高度(模拟土层深度)呈梯度规律变化。K938 III-3型改良盐渍土的毛细水上升高度和次生盐渍化平行试验进一步表明, 盐渍土经水泥、石灰和粉煤灰等掺入物改良后能有效地抑制次生盐渍化现象的发生, 有效地降低毛细水上升高度。

**关键词:** 盐渍土; 改良盐渍土; 次生盐渍化; 试验装置

中图分类号: TU411.99 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)04-0745-07

**作者简介:** 赵德安(1959-), 男, 博士, 教授、博士生导师, 主要从事岩土与地下工程的试验、数值分析及岩土锚固技术研究。E-mail: zhao\_da@mail.lzjtu.cn。

## Secondary salinization of subgrade of southern Xinjiang Railway

ZHAO De-an<sup>1</sup>, YU Yun-yan<sup>2</sup>, MA Hui-min<sup>3</sup>, CHEN Zhi-min<sup>2</sup>, JIN Pei-jie<sup>3</sup>, PENG Dian-hua<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Northwest University for Nationalities, Lanzhou 730030, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 3. Northwest Research Institute of China Railway, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The defects of saline soil subgrade are obvious along the southern Xinjiang Railway. The most serious cases occur at the railway section between Akesu and Kashi, 108 km in length. This kind of problem has been gradually found since the opening of the railway in 1999. The causes include local natural, engineering and hydrogeological conditions. The main defective forms are salinity exposure, surface expansion, subgrade compaction, sinking, track deformation, and so on. On the one hand, these defects increase the difficulty and workload of maintenance departments; on the other hand, they also seriously affect the traffic safety. An intelligent control test system is designed to study these problems. Its main functions are to investigate the secondary salinization phenomenon and transportation height of capillary water in the soil samples. The transport rules of water and salt are studied by means of the intelligent control test system based on two comparable cases of remolded saline and improved saline soils. The test results show that the secondary salinization phenomenon is not obvious in the improved saline soils. But the secondary salinization phenomenon is very obvious in the remolded saline soils under the same compression degree and physical condition. The secondary salinization degree gradually varies with the depth of soils. The III-3 type improved saline soils on K938 are further tested parallelly. The results show that secondary salinization and the transportation height of capillary water can be controlled effectively if the fly ash, lime and cement are mixed into the saline soils with a certain proportion. The research results are successfully employed to solve the secondary salinization problem of the subgrade of southern Xinjiang Railway. There have been no new defects for more than 6 years.

**Key words:** saline soil; improved saline soil; secondary salinization; experimental equipment

## 0 引 言

南疆铁路路基次生盐渍化试验研究做了两年多, 成果应用于路基改良 6 年多无新病害发生。经过对 6 种改良盐渍土和重塑盐渍土的对比试验分析, 选择了控制次生盐渍化相对好的配方应用于工程实践。

南疆铁路库尔勒至喀什段全长 969.88 km, 沿途经过库车、阿克苏、巴楚等地, 是中国西北路网的重要组成部分。南疆铁路所处自然地理位置特殊, 沿线

基金项目: 铁道部科技开发计划项目(2004G034)

收稿日期: 2013-04-01

降雨、大风、气候等自然条件和工程、水文地质条件较为复杂。本段线路于1999年12月6日全线交付临管处运营后由于各种因素的影响,盐渍土病害较为明显,特别是阿克苏和喀什工务段的盐渍土病害十分严重,其病害产生路段长达108 km。

盐渍土路段的路基病害主要表现为路基泛盐,表面松胀,部分路基板结,脚踩下陷,其中部分路段下沉,轨道几何尺寸变形较大。这些路基病害的不断产生不仅加大了工务部门的养护难度和工作量,而且严重影响行车安全。为此南疆铁路临管处采取了工程措施进行整治,但由于盐渍土路基的特殊性,治理效果不佳,南疆铁路西延线盐渍土病害仍然存在很大的隐患,致使铁路的正常运营受到严重的影响。

土壤盐渍化<sup>[1-4]</sup>是指在自然或人为因素下,盐碱成分在土体中累积,使得其他类型土壤向盐渍土演变的过程。土壤盐渍化的危害和特征<sup>[4-7]</sup>:

(1) 腐蚀性破坏。盐渍土中氯盐对金属有强烈的腐蚀作用,特别是金属(铁轨)。硫酸盐对混凝土、黏土砖的腐蚀作用强烈,对金属(铁轨)也有腐蚀作用,硫酸盐与氯盐同时存在时,其腐蚀性更大。

(2) 溶陷性破坏。盐渍土的盐分遇水溶解后,土的物理性质和力学性质的指标均发生变化,强度明显降低。同时因为盐的溶解而产生地基溶陷,由此产生的收缩沉降对铁路路基造成破坏。

(3) 盐胀性破坏。若土层中的硫酸盐含量过大,在温度或湿度发生变化时,会产生体积膨胀,导致路基破坏,轨道变形。

(4) 吸湿性。氯盐的吸湿使土层表面变得泥泞,但如果在干旱缺水地区,则对土壤有较好的压实作用。

(5) 聚表性。含有盐分的地下水在毛细水的作用下,由于土层表面受大气蒸发影响,使土表盐分大量聚集,而发生次生盐渍化现象。

(6) 碱化作用,主要指钠盐渍土。当路基受到雨水大量冲洗,表层盐分下移,引起离子交换作用,使细粒土表面吸附钠离子数量增加,结果使土体由盐土变为碱土,这种碱化作用使土体膨胀性增加,透水性减弱,土体密度变小,路基稳定性降低,故应做好路面排水工作。目前国内外毛细水上升高度和次生盐渍化研究主要集中在农业部门,试验方法主要采用现场测试<sup>[8]</sup>或室内竖管法试验<sup>[9]</sup>。在工程领域中的应用在解决盐渍土相关工程问题时常采用强夯置换复合地基<sup>[10]</sup>、砂砾桩、塑料插板、化学改良<sup>[12]</sup>等手段进行改良加固。针对重塑盐渍土和改良盐渍土的毛细水上升及次生盐渍化现象,为弄清水分盐分迁移规律,课题组组织自动化、给排水和土力学等方面的专家自行研发了一套

测定土的毛细水上升高度智能控制系统<sup>[13]</sup>,目前尚未查到与本试验装置完全相同的申请专利,属于国内外首创。

## 1 试验方案及设备研制

### 1.1 试验方案

#### (1) 试验取样

试验所使用的盐渍土、含盐分的水均取自病害现场。

#### (2) 试验目的

弄清重塑盐渍土和不同配方的改良盐渍土的毛细水上升及水分盐分迁移规律,选择控制次生盐渍化相对好的配方应用于工程实践。

#### (3) 试验配方

结合南疆铁路盐渍土的病害特点,课题组通过查阅文献并组织有工程实践经验的专家讨论,拟定表1改良方案<sup>[14]</sup>,表1中的配合比为干灰重量比。

表1 改良盐渍土的配合比

| 类型    | 氯化钙 | 水泥 | 消石灰 | 粉煤灰 | 盐渍土 |
|-------|-----|----|-----|-----|-----|
| I     | 5   | 0  | 0   | 0   | 95  |
| II    | 3   | 0  | 8   | 0   | 89  |
| III-1 | 0   | 4  | 6   | 30  | 60  |
| III-2 | 0   | 4  | 6   | 25  | 65  |
| III-3 | 0   | 4  | 6   | 20  | 70  |
| III-4 | 0   | 9  | 9   | 27  | 55  |

#### (4) 试验实施方案及过程

次生盐渍化试验的贮土筒体的截面尺寸为20 cm×20 cm,高为1.5 m。按预定压实度0.93分别计算出每厘米高度土样重量,分层将土样加入贮土筒体,用击实锤均匀击实。贮土筒体下端用开有密集小孔的有机玻璃板封住,将装入土样的贮土筒体放入水槽中,在试验过程中保持水槽中的水面高度不变并且高出贮土筒体筒底13.0 cm。注入工程所在地的地下水,并采用如图3所示的自动循环供水系统向水槽给水,保持水位不变。利用图4所示的自动控制加热系统模拟当地地表温度(35.5℃~41.5℃)。采用全自动控制及数据采集系统进行全程监控和自动采集数据。

### 1.2 试验设备研制

规范推荐测定土的毛细水上升高度试验有直接观察法和土样管法。直接观察法一般在现场进行。土样管法无论从保持供水的恒水位还是在加传感器、自动模拟地表温度和数据采集等方面都存在诸多困难。为了能真实地模拟在当地环境(温度、地下水位以及含盐量等)下盐渍土体水分盐分迁移规律,课题组自行研发了一套测定土的毛细水上升高度智能控制系统。

如图1所示,该系统可以根据需要拼装贮土筒体

高度, 下部采用恒水供水循环系统 (图 3), 上部有自动温控模拟地表温度系统 (图 4), 贮土筒体中部可埋设温湿度传感器 (图 1 和图 2), 整套系统具有自动控制和数据自动采集功能 (图 5)。



图 1 次生盐渍化试验总系统

Fig. 1 Secondary salinization test system



图 2 高度可拼装贮土筒体

Fig. 2 Soil tube with adjustable height



图 3 恒水位循环供水系统

Fig. 3 Circulating water supply system with constant water level

试验设备在工程应用初见成效的情况下申报了中国实用新型专利, 专利名称“一种毛细水上升高度与次生盐渍化试验设备”, 见文献[13]。



图 4 加热系统

Fig. 4 Heating system

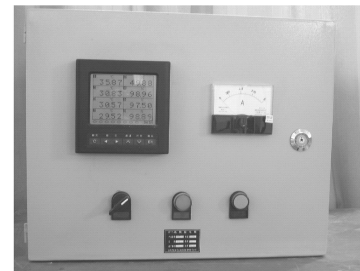


图 5 控制及数据采集系统

Fig. 5 Control and data collection system

## 2 试验结果及分析

### 2.1 试样分析

(1) 水质分析

样品保存条件: 冷藏保存。

检验环境条件 (包括温湿度、压强等): 温度: 19℃, 湿度: 35%。

结果估算及不确定度补充说明: 标准曲线拟合度不小于 0.995, 标准偏差为 0.0006。

试验水样取自 K938+100, 水质分析结果见表 2。

表 2 水样中离子含量

Table 2 Ion contents of water samples (g·L<sup>-1</sup>)

| 检测编号                          | K938+100 |
|-------------------------------|----------|
| CL <sup>-</sup>               | 0.1875   |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | 0.2617   |
| K <sup>+</sup>                | 0.0033   |
| Na <sup>+</sup>               | 0.0742   |
| Ca <sup>2+</sup>              | 0.0716   |
| Mg <sup>2+</sup>              | 0.0411   |
| 总硬度 (以CaO计)                   | 20       |

(2) 盐渍土及其改良土的阴离子含量分析

盐渍土及其不同改良配方阴离子变化如图 6 所示, 可以看出, 盐渍土经改良后盐分有比较大的调整, III型改良盐渍土的降盐效果优于 I -1 型和 II -1 型改良盐渍土, III型改良盐渍土中掺入物量最少降盐效果最好的是III-3 型改良盐渍土。因此, 以III-3 和III-4 型改良盐渍土为例进行介绍。

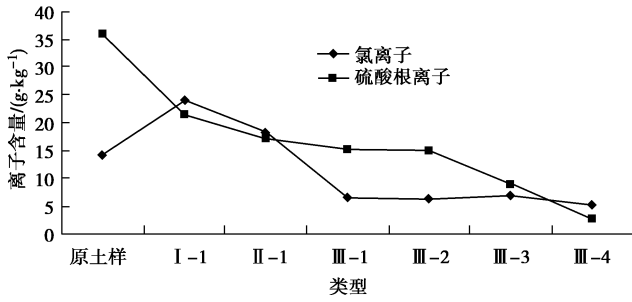


图 6 改良盐渍土不同改良配方阴离子变化

Fig. 6 Variation of anion contents of improved saline soils with different compounds

2.2 K938+100 III-4 型改良盐渍土毛细水上升试验

根据III-4 型改良盐渍土的配方（水泥 9%、粉煤灰 27%、石灰 9%、盐渍土 55%）和最大干密度（1.64 g/cm<sup>3</sup>）及最优含水率（14.0%）制备土样，分层均匀击实到贮土筒体，压实系数为 0.93。模拟地表温度为 30℃~35℃，试验室内温度 28℃，土体中埋设温、湿度传感器，自动数据采集。贮土筒体浸水深度 13 cm。试验开始时间是 2006 年 8 月 7 日下午 5: 00。图 7 给出了 K938+100III-4 型改良盐渍土含水率与高度关系；给出了初始含水率、16 d 和 21 d 含水率沿贮土筒体高度的分布曲线。可以看出，稳定水位面到 30 cm 高含水率是逐渐减小的，0~30 cm 段是毛细水上升段；30~110 cm 含水率基本没有大的变化，这段是平衡段，110 cm 至顶部含水率又急剧减少，顶部的含水率因烘干几乎为零。通过该曲线判断 K938+100III-4 型改良盐渍土毛细水上升的高度为 30 cm。

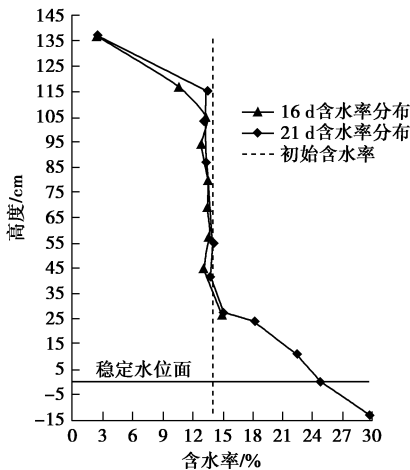


图 7 III-4 型改良盐渍土含水率与高度关系 (K938+100)

Fig. 7 Relation between moisture and height of III-4 improved saline soils (K938+100)

图 8 是温度和含水率沿土柱高度的变化曲线，土中温度从贮土筒顶部加热系统处的 35℃沿高度递减，在到达土柱初始含水率区段的上端高度位置时降温速

率突然减缓，温度梯度与含水率的变化规律符号逻辑关系。

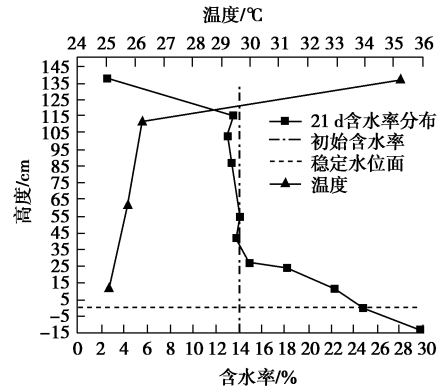


图 8 III-4 型改良盐渍土含水率、温度与土柱高度关系 (K938+100)

Fig. 8 Relation among moisture, temperature and height of III-4 improved saline soils (K938+100)

图 9 表示土柱各截面温度随时间的变化曲线。试验初始阶段各处温度接近室温，约 28℃，顶部加热系统处的控制温度约 35℃(加热系统温控低于 35℃自动启动)。土柱的上部（高出水面 112 cm）、中部（高出水面 62 cm）和下部（高出水面 12 cm）监控温度随着时间不断下降，这主要是毛细水上来后导致土柱温度下降。试验进行 17 d 后土中温度开始稳定，表明毛细水上升已达最大高度，这与图 7 试验结果基本吻合。

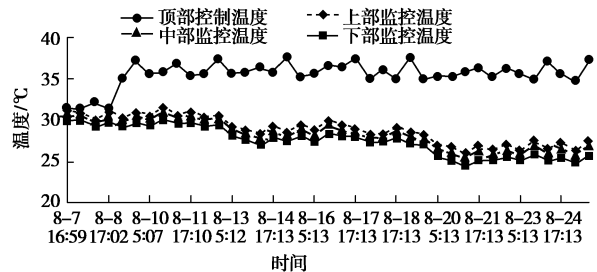


图 9 III-4 型改良盐渍土温度与时间关系 (K938+100)

Fig. 9 Relation between temperature and time of III-4 improved saline soils (K938+100)

2.3 K938 重塑盐渍土毛细水上升及次生盐渍化现象试验

根据 K938 重塑盐渍土最大干密度（1.97 g/cm<sup>3</sup>）和最优含水率（11.5%）制备土样 24 h 后，分层击实到贮土筒体，贮土筒体高为 1.5 m，截面尺寸为 0.2 m×0.2 m，压实系数为 0.93。模拟地表温度为 35℃，试验室内温度 21℃，土体中埋设温、湿度传感器，自动数据采集。贮土筒体浸水深度 13 cm。试验开始时间 2006 年 12 月 25 日 17: 00。

含水率随高度变化曲线如图 10，“0”高度处是稳定水位面，可以看出 0~90 cm 段是毛细水上升段，

90~105 cm 含水率基本没有大的变化, 这段是平衡段, 105 cm 至顶部含水率又急剧减少。通过该曲线可以判断 K938 重塑盐渍土毛细水上升高度约为 90 cm。

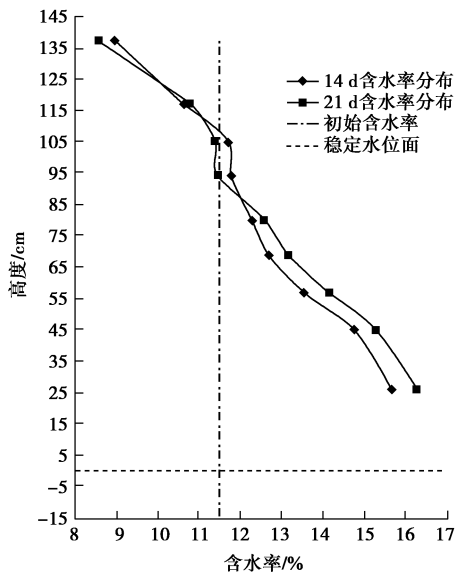


图 10 重塑盐渍土含水率与高度关系 (K938)

Fig. 10 Relation between moisture and height of remolded saline soils (K938)

图 11 显示试样表面似有泛盐现象, 并形成一层硬壳, 壳下面的土体相对壳上的土体潮湿。图 12 是肉眼观察到的毛细水上升位置, 约在水面以上 90 cm 位置。



图 11 试验 20 d 试样土柱顶面照片 (K938)

Fig. 11 Top face of sample soils after 20 days (K938)

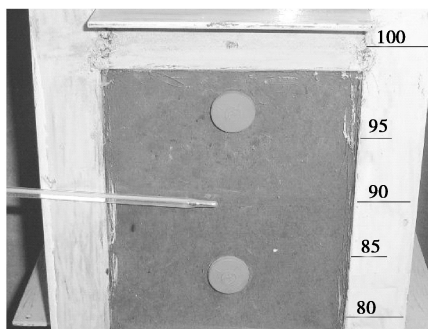


图 12 试验 20 d 观察到的毛细水上升位置 (K938)

Fig. 12 Capillary water level of sample soils after 20 days (K938)

图 13~15 是试验土柱自上而下 3 个放置温湿度传感器的地方, 其中距水源最近的地方 (图 15, 高出水面 12 cm) 泛盐现象非常明显, 中间的 (图 14, 高出水面 62 cm) 可以看出有泛盐现象, 而上面的 (图 13, 高出水面 112 cm) 很难看出泛盐现象。这里验证了盐分向低温处迁移。



图 13 试验 20 d 水面上 112cm 传感器位置照片 (K938)

Fig. 13 Photo of sample soils at height of 112 cm above water level after 20 days (K938)



图 14 试验 20 d 水面上 62 cm 传感器位置照片 (K938)

Fig. 14 Photo of sample soils at height of 63 cm above water level after 20 days (K938)



图 15 试验 20 d 水面上 12 cm 传感器位置照片 (K938)

Fig. 15 Photo of sample soils at height of 12 cm above water level after 20 days (K938)

从各处泛盐程度的不同可以估计毛细水上升的高度在 62~112 cm 之间, 从另一侧面印证了图 10 所示试验结果及图 12 所给肉眼观察结果。

图 16 是温度和平均含水率沿土柱高度的变化曲线, 土中温度从贮土筒顶部加热系统处的 35℃沿高度递减, 在达到土柱初始含水率相应区段的上端高度位置时降温速率突然转缓。温度梯度与含水率的变化规

律符号逻辑关系。试验室温是 21℃，毛细水的上升导致土体温度下降，图 16 曲线进一步说明毛细水上升高度为 90 cm。现场测得 K938 毛细水上升高度为 1.3~1.7 m，室内试验与现场结果有差距，这与压实系数、土体分层等因素都有关。

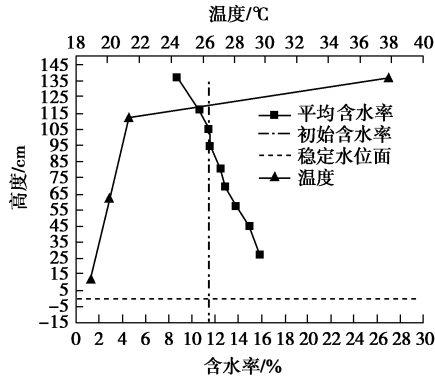


图 16 重塑盐渍土含水率、温度与高度关系 (K938)

Fig. 16 Relation among moisture, temperature and height of remolded saline soils (K938)

#### 2.4 K938 III-3 改良盐渍土毛细水上升及次生盐渍化现象试验

根据 K938 III-3 改良盐渍土最大干密度 ( $1.69 \text{ g/cm}^3$ ) 和最优含水率 (14%) 制备土样 0.5 h 后，分层击实到贮土筒体，贮土筒体高为 1.0 m，截面尺寸为  $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ ，压实系数为 0.93。模拟地表温度为  $40^\circ\text{C}$ ，试验室内温度  $20^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$ ，土体中埋设温度传感器，自动数据采集。贮土筒体浸水深度 13 cm。第一次试验时间是 2007 年 4 月 5 日 17:00 到 2007 年 4 月 20 日 17:00 结束，第二次试验时间是 2007 年 5 月 5 日 15:00 到 2007 年 5 月 20 日 15:00 结束。

图 17 中“第一次试验含水率”和“第二次试验含水率”表示两次并行试验，即 4 月 20 日结束第一次次生盐渍化试验，从击实筒中掏出试验土，并根据观察预估的毛细水分布情况取土，测各剖面土样含水率分布；5 月 20 日结束第二次次生盐渍化试验，取土测得各剖面土样含水率分布。

含水率随高度变化曲线如图 17，“0”高度处是稳定水位面，可以看出 0~40 cm 段是毛细水上升段，40~70 cm 含水率基本没有大的变化，这段是平衡段，70 cm 至顶部含水率又急剧减少。通过该曲线可以判断 K938 III-3 改良盐渍土毛细水上升高度约为 40 cm。

对比图 7 K938+100 III-4 改良盐渍土毛细水分布曲线可以看出，盐渍土经水泥、石灰和粉煤灰等掺入物改良后毛细水的分布规律基本一致，并且能有效地抑制次生盐渍化现象。

图 18 是温度和含水率沿土柱高度的变化曲线。“0”高度处是稳定水位面，此处温度代表试验水温，

由于第二次试验的室温高出第一次试验室温  $2 \sim 3^\circ\text{C}$ ，导致第二次试验时的水温高于第一次。土中温度从贮土筒顶部加热系统处的  $40^\circ\text{C}$  沿高度递减，在到达土柱初始含水率区段的上端高度位置时降温速率突然减缓，温度梯度与含水率的变化规律符号逻辑关系。

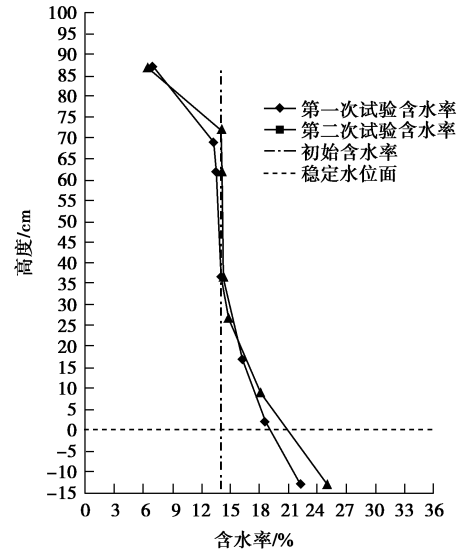


图 17 III-3 型改良盐渍土含水率与高度关系的平行试验对比 (K938)

Fig. 17 Relation between moisture and height of parallel tests on III-3 improved saline soils (K938)

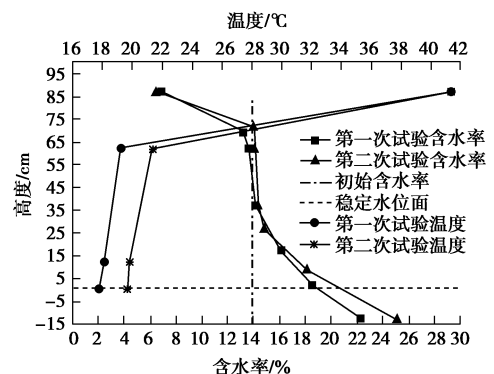


图 18 III-3 型改良盐渍土含水率、温度与高度关系的平行试验对比 (K938)

Fig. 18 Comparison of parallel tests on relation among moisture content, temperature and height of III-3 improved saline soils (K938)

### 3 结 论

通过自制的次生盐渍化试验系统，研究了南疆铁路重塑盐渍土 (K938) 及改良盐渍土 (K938+100 III-4 型, K938 III-3 型) 在一定环境下的水分迁移规律和盐分迁移现象，总结可得以下 4 点结论。

(1) 在室内物理环境下，压实度为 0.93，南疆铁

路 K938 重塑盐渍土的毛细水上升高度为 90 cm, 而 K938+100 III-4 型改良盐渍土的毛细水上升高度为 30 cm, K938 III-3 型改良盐渍土的毛细水上升高度为 40 cm。

(2) 改良盐渍土试验未见明显泛盐现象, 而重塑盐渍土在同样压实度及相同物理环境下, 迁移盐分表面析出十分明显, 沿土柱高度(模拟土层深度)呈梯度规律变化。

(3) 改良盐渍土的毛细水上升高度和次生盐渍化平行试验表明, 盐渍土经水泥、石灰和粉煤灰等掺入物改良后能有效地抑制次生盐渍化现象的发生, 有效地降低毛细水上升高度。

(4) 试验装置的研制和应用属国内外首创, 获得中国实用新型专利, 专利名称“一种毛细水上升高度与次生盐渍化试验设备”, 专利号 ZL200820210442.9。

#### 参考文献:

- [1] FOOKES P G, FRENCH W J. Soluble salt damage to surfaced roads in middle east[J]. Highway Engineer, 1977, 24(12): 10 - 20.
- [2] 汪林, 甘泓, 于福亮, 等. 西北地区盐渍土及其开发利用中存在问题的对策[J]. 水利学报, 2001(6): 90 - 94. (WANG Lin, GAN Hong, YU Fu-liang, et al. Salted soil and its development in Northwest China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001(6): 90 - 94. (in Chinese))
- [3] 王遵亲. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993. (WANG Zun-qin. Saline soil in China[M]. Beijing: Science Press, 1993. (in Chinese))
- [4] 铁道部第一勘测设计院. 盐渍土地区铁路工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1988. (The First Railway Survey and Design Institute. Saline soil in railway engineering[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1988. (in Chinese))
- [5] 徐攸在. 盐渍土地基[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993. (XU You-zai. Saline soil foundation[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1993. (in Chinese))
- [6] 余侃柱. 中国内陆砂碎石盐渍土工程特性研究[C]// 中国岩石力学与工程学会第六次学术大会. 北京: 中国科学技术出版社, 2000, 10: 158 - 161. (YU Kan-zhu. Research on engineering properties of sand gravel saline soil in Chinese inland[C]// Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering Sixth Academic Meeting. Beijing: China Science and technology press, 2000, 10: 158 - 161. (in Chinese))
- [7] 柴筠之. 盐渍土的工程性质[J]. 工程勘察, 1983(6): 3 - 6. (CHAI Jun-zhi. Engineering character of saline soil[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1983(6): 3 - 6. (in Chinese))
- [8] 张彧, 房建宏, 刘建坤, 等. 察尔汗地区盐渍土水热状态变化特征与水盐迁移规律研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(7): 1344 - 1348. (ZHANG Yu, FANG Jian-hong, LIU Jian-kun, et al. Variation characteristics of hydrothermal state and migration laws of water and salt in Qarhan Salt Lake region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(7): 1344 - 1348. (in Chinese))
- [9] 董斌, 张喜发, 李欣, 等. 毛细水上升高度综合试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10): 1569 - 1574. (DONG Bin, ZHANG Xi-fa, LI Xin, et al. Comprehensive tests on rising height of capillary water[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(10): 1569 - 1574. (in Chinese))
- [10] 姚华, 张喜发, 张冬青. 影响粗粒土毛细水上升高度的因素研究[J]. 勘察科学技术, 2007(1): 10 - 12. (YAO Hua, ZHANG Xi-fa, ZHANG Dong-qing. Research on affecting factors of rising height of capillary water on coarse grained soil[J]. Site Investigation Science and Technology, 2007(1): 10 - 12. (in Chinese))
- [11] 张彧, 房建宏, 刘建坤, 等. 强夯置换复合地基加固盐渍土效果的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊 1): 251 - 254. (ZHANG Yu, FANG Jian-hong, LIU Jian-kun, et al. Field tests on reinforcement effects of ground treatment of composite foundation in saline soils by dynamic compaction replacement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S1): 251 - 254. (in Chinese))
- [12] 王兆东, 张雷. 盐渍土对路基的危害及防治[J]. 辽宁交通科技, 2005(1): 35 - 37. (WANG Zhao-dong, ZHANG Lei. Harmfulness of salty soil to subgrade and its preventing and treating[J]. Liaoning Communication Science and Technology, 2005(1): 35 - 37. (in Chinese))
- [13] 赵德安, 余云燕, 陈志敏. 一种毛细水上升高度与次生盐渍化试验设备[P]. ZL200820210442.9, 2009-08-19. (ZHAO De-an, YU Yun-yan, CHEN Zhi-min. A kind of experimental equipment for the transportation height of capillary water secondery salinization[P]. ZL200820210442.9, 2009-08-19. (in Chinese))
- [14] 余云燕, 赵德安, 彭典华, 等. 新疆铁路路基填料改良盐渍土的盐胀冻胀试验研究[J]. 兰州交通大学学报, 2009, 28(1): 1 - 5. (YU Yun-yan, ZHAO De-an, PENG Dian-hua, et al. Experimental research on frost heave and salt expansion of the improved saline soil of railway roadbed filling at south of Xinjiang[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2009, 28(1): 1 - 5. (in Chinese))