

# 天然粗粒盐渍土大型路堤模型试验研究

张莎莎<sup>1,2</sup>, 杨晓华<sup>1,2</sup>, 张秋美<sup>1,2</sup>

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 西北地区分布着大量的粗粒盐渍土, 研究其作为路堤填料的适用性, 可充分利用当地资源和节约公路工程建设费用。为了使试验结果更准确地反映工程实际情况, 在对天然粗粒盐渍土进行不同方法的化学成分分析试验、模拟季节交替冻融循环试验、有(无)附加荷载单次降温盐胀试验及大型溶陷试验的基础上, 开展了多次冻融循环条件下大型路堤模型试验。结果表明: 两种化学成分分析试验—规范法和过5 mm筛法分别得到的易溶盐含量相差较大, 过5 mm筛法能更准确指导实际工程的施工; 随着含水率的增加, 粗粒盐渍土的盐胀量和溶陷量亦逐渐增大, 溶陷累加性较显著; 50 kPa附加荷载抑制该天然粗粒盐渍土的盐胀量可达85%以上; 经多次冻融循环后, 大型路堤表面的最大盐胀率仅为0.44%; 该天然粗粒盐渍土可用于上部路堤填料。

**关键词:** 道路工程; 天然粗粒盐渍土; 盐胀量; 溶陷; 模型试验

中图分类号: TU448; U416 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)05-0842-06

作者简介: 张莎莎(1982-), 女, 山西运城人, 博士, 讲师, 主要从事特殊土性状及工程应用的科研与教学工作。E-mail: zss\_lx@126.com。

## Large-scale model tests on embankment of crude coarse grained saline soil

ZHANG Sha-sha<sup>1,2</sup>, YANG Xiao-hua<sup>1,2</sup>, ZHANG Qiu-mei<sup>1,2</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** In Northwest China, there is great deal of crude coarse grained saline soil. If it can be used as embankment fill, full use of local resources will be made and construction cost of highways saved. In order to make the test results more accurately and to reflect the actual working conditions, based on two different chemical analysis tests, experiments of freeze thaw cycles, salt expansion tests under (no) additional load and large-scale immersed tests, large-scale model tests on embankment under freeze thaw cycles are performed. It is shown that the soluble salt obtained by two different test methods (standard method and screening method of 5 mm) is quite different, and the results from the screening method of 5 mm can better guide the construction. With the increase of moisture content, the values of salt expansion and collapsibility gradually increase, and the cumulative characteristics of collapsibility are obvious. The amount of salt expansion for the saline soil under additional covering load is less than 15%, compared with that under no additional load. After several freeze-thaw cycles, the maximum expansion rate of the large-scale embankment model is only 0.44%. The crude coarse grained saline soil can be used for embankment fill.

**Key words:** road engineering; crude coarse grained saline soil; salt expansion; collapsibility; model test

## 0 引言

西北地区分布着大量的粗粒土, 其通常是路堤填料的首选材料。但是, 由于西北地区气候干燥少雨, 气温变化大, 寒暑悬殊, 蒸发量大, 且矿化度极高, 使其形成了大面积的粗粒盐渍土。而盐渍土中的易溶盐会随着环境条件的改变而产生相态的变化, 对路堤结构造成破坏, 影响道路的正常使用。盐渍土的工程特性使得这些地区路堤填料的选择受到了限制, 如果

放弃当地土料, 而选择从外地运输填料势必增加工程的修筑费用, 并且西部地区面积广阔, 经济相对落后, 就地取材可以节约大量的工程建设资金, 因此开展粗粒盐渍土作为路堤填料的可用性研究是十分必要的。

基金项目: 国家西部交通建设科技项目(200331879750); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CHD2011JC41)

收稿日期: 2011-04-22

自 21 世纪以来, 学者针对粗粒盐渍土的研究越来

越广泛, 华遵孟等根据大量的工程实践经验, 对分布

表 1 试样筛分结果表

Table 1 Grain size distribution of test saline soil

粒径/mm	40~20	20~10	10~5	5~2	2~1	1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.074	<0.074	土类
含量/%	3.3	6.4	27.3	14.8	6.6	12.2	16.2	10	3.2	级配良好 砾/GW

表 2 试样易溶盐及各离子含量表

Table 2 Ion content of test saline soil

试验方法	各离子含量/%							易溶盐含量/%	盐渍土类别
	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup> +Na <sup>+</sup>		
规范法	0	0.18000	0.09321	0.21073	0.08938	0.13900	0.13383	0.84615	亚硫酸盐渍土
5 mm 筛法	0	0.1623	0.0674	0.1974	0.0461	0.0757	0.0569	0.4519	亚硫酸盐渍土

在西北内陆盆地的粗粒硫酸盐渍土的成因、分布规律及盐胀变形机理进行了总结研究; 吴青柏等人针对恒温下含硫酸钠盐粗粒土的盐胀特征及其过程进行了研究, 指出在没有外来水源补给的条件下粗粒土不具有强烈盐胀特性<sup>[1]</sup>; 罗炳芳等<sup>[2]</sup>、包卫星等<sup>[3]</sup>针对公路工程中粗粒盐渍土的易溶盐含量试验方法进行了研究, 其结果表明现行试验方法测得的易溶盐含量比实际值偏大; 张莎莎等<sup>[4-6]</sup>对甘肃典型天然粗粒盐渍土进行了工程特性试验及其盐胀机理研究, 并且针对不同种类粗粒盐渍土进行了路用性能指标的分析。上述研究对于粗粒盐渍土的工程应用起到了良好的推动作用, 但是依然缺乏将粗粒盐渍土直接作为路堤填料的工程试验验证。

本文依托新疆奎屯至克拉玛依高速公路工程, 采用沿线某料场的粗粒盐渍土作为试验材料, 分别进行了多次冻融循环盐胀 - 溶陷特性试验、有(无)附加荷载单次降温盐胀试验及大型溶陷试验, 分别研究了该粗粒盐渍土的盐胀 - 溶陷特性和盐胀规律。并在这些研究成果的基础上, 开展了模拟实际工况的大型路堤模型试验研究, 以分析粗粒盐渍土作为路堤填料的可用性, 为实际工程提供可靠依据。

## 1 土样基本工程性质

土样取自新疆奎屯至克拉玛依高速公路某砂砾料场, 根据《公路土工试验规程》<sup>[7]</sup>对土样进行了颗粒分析试验、击实试验和易溶盐含量试验, 其土样试验结果如表 1、2 所示。土样的最大干密度为 2.27 g/cm<sup>3</sup>, 最佳含水率为 6.34%。为了全面掌握土样中的易溶盐含量, 其化学成分分析共分为两种方法: 第一种按照规范规定, 土试样过 1 mm 筛进行化学成分分析<sup>[7]</sup>; 第二种测试方法为过 5 mm 筛, 取样 300g 进行化学成分分析<sup>[2-3]</sup>, 其他测试程序与规范一致。

由《公路土工试验规程》<sup>[7]</sup>可知, 规范法测得该土样为中盐渍土, 5 mm 筛法测得该土样为弱盐渍土。

而根据《公路路基设计规范》<sup>[8]</sup>的规定, 规范法测得该土样为弱盐渍土, 5 mm 筛法测得该土样易溶盐含量小于 0.5%, 小于《公路路基设计规范》中粗粒盐渍土对应的弱盐渍土的最低含盐量标准。由于奎克高速公路施工工期紧迫, 该粗粒盐渍土是否能用作路堤上部路床部分的填料亟待解决。因此, 本文针对该粗粒亚硫酸盐渍土作为上部路堤填料的可用性, 开展了进一步的工程试验验证。

## 2 路用粗粒盐渍土的盐胀 - 溶陷特性试验

### 2.1 试验设计及实施程序

已有研究结果<sup>[5-6]</sup>表明, 粗粒亚硫酸盐渍土在冻融循环过程中的盐胀溶陷特性对路基质量的影响较大。其中, 土、水、盐、温、力是影响盐渍土盐胀特性的主要因素, 由于该土样中的土、盐已确定, 试验重点研究水、力和温度的变化对试样盐胀特性的影响。为了分析该土样在不同含水率条件下的盐胀-溶陷特性规律及上覆荷载对该土样盐胀量的影响程度, 并为后续大尺寸路堤模型试验提供技术参考, 本次工程特性试验开展的研究项目有: ①冻融循环条件下, 不同含水率 (4.5%, 6.34%, 7%) 的粗粒盐渍土的盐胀特性试验; ②有(无)附加荷载条件下, 粗粒盐渍土的单次降温盐胀特性试验; ③粗粒盐渍土的大型溶陷特性试验。

冻融循环条件下粗粒盐渍土的盐胀特性试验, 其模拟季节交替引起温度变化而导致的盐渍土盐胀溶陷特性。试验过程中, 土样上端温度控制在-20℃, 底端维持在+5℃, 以实现温度降低时土壤温度从上向下逐渐降低的现象, 降温过程持续 24 h 后, 关闭低温恒温槽让温度自然回升以模拟土壤温度逐渐上升的现象, 此过程也维持 24 h, 即 48 h 为一循环周期, 共 7 个周期; 有(无)附加荷载单次降温盐胀试验, 其附加荷

载为 50 kPa (模拟路堤上覆路面材料的荷重), 试验过程为 (土柱体顶端温度/土柱体底端温度) 25℃/25℃ → 5℃/5℃ → 0℃/5℃ → -5℃/0℃ → -10℃/0℃ → -15℃/-5℃ → -20℃/-5℃, 每单次降温历时 12 h, 共 84 h<sup>[6]</sup>。

其中, 试验仪器采用室内大尺寸有侧向变形限制的有机玻璃试筒, 试筒高 60 cm, 内径 15 cm, 试验过程中试筒周围附着保温膜, 使其达到竖向一维试验效果。为减小侧壁摩阻力, 试筒内壁均匀涂抹凡士林。在 25℃ 环境下, 将养护好的盐渍土分次装入试筒中, 击实至要求密度 (压实度为 96%), 养护 24 h 后开始试验, 基本上覆荷载由特制制冷头的重量模拟, 试验装置参考文献[5]。

常规溶陷试验中, 土样粒径小于 2 mm, 本试验土样为砾, 若按规范方法过筛进行溶陷试验, 则无法真实反映土样的溶陷特性。为此专门设计了适用于粗粒土的溶陷仪器, 以探讨粗粒土的溶陷特性。溶陷试验仪主要由数据采集系统、加压系统和粗粒土样盛放容器三部分组成。其中, 为避免颗粒效应问题, 盛土容器的直径为 28 cm 有机玻璃筒, 上、下面布设滤纸和自制透水板可自由排水, 其径高比参考常规试验中环刀的标准为 3.99, 土样压实度为 96%。加压系统为万能试验机, 可以由输入电脑的程序进行自动控制。试验装置如图 1 所示, 实施程序与文献[9]中的盐渍土溶陷率单线法一致。

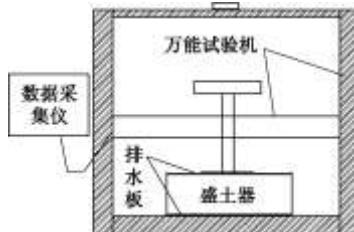


图 1 溶陷试验装置示意图

Fig. 1 Scheme of test apparatus

## 2.2 多次冻融循环下粗粒盐渍土的盐胀特性

图 2~4 分别为含水率 4.5%, 6.34%, 7% 的粗粒盐渍土冻融循环盐胀变化趋势图。

从图 2~4 中可以看出, 不同含水率条件下, 粗粒盐渍土的盐胀量变化趋势是基本相似的, 7 个冻融循环周期内, 降温过程产生的盐胀量具有累加性, 升温过程中粗粒盐渍土的变形量有趋于一致的特性。随着含水率的增加, 粗粒盐渍土产生的盐胀量逐渐增大, 溶陷量亦逐渐增大, 溶陷累加性也逐渐增强。

因为在降温过程中, 土体中的水不仅促使了易溶盐的结晶膨胀, 产生结晶盐, 而且在负温环境下多余的水分亦产生了冻胀, 产生冰晶体, 其中一部分结晶

体被土体孔隙吸收, 一部分使得含水率较高的粗粒土产生较大的结构架空; 在升温过程中, 结晶盐和冰晶体同时释放水分, 土体的胶结结构破坏, 架空体塌陷, 使得含水率较高的粗粒土的溶陷特性较明显。

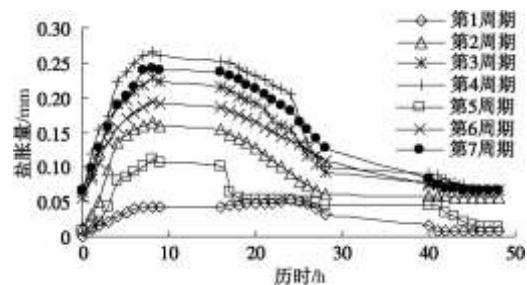


图 2 含水率 4.5% 的粗粒盐渍土盐胀曲线

Fig. 2 Variation curves of freeze-thaw cycles (4.5%)

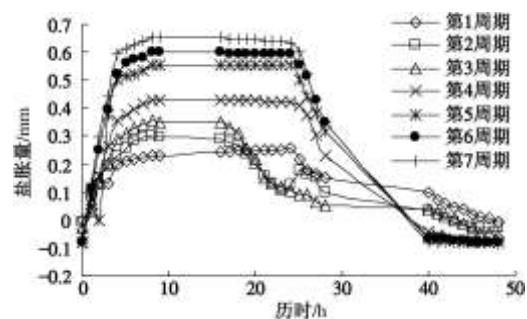


图 3 含水率 6.34% 的粗粒盐渍土盐胀曲线

Fig. 3 Variation curves of freeze-thaw cycles (6.34%)

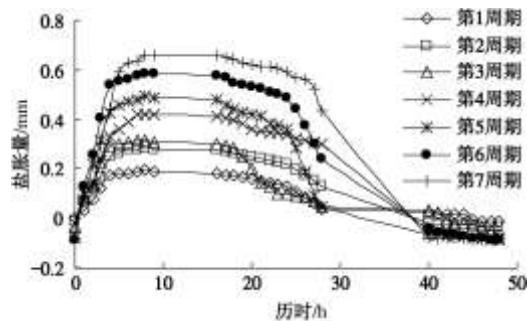


图 4 含水率 7% 的粗粒盐渍土盐胀曲线

Fig. 4 Variation curves of freeze-thaw cycles (7%)

含水率为 4.5% 的粗粒盐渍土产生的盐胀量及溶陷量较小。但是当土样含水率较低时, 土体的击实性较差, 在实际施工过程中, 土体小于最佳含水率, 很难达到要求的压实度, 并且在最佳含水率时, 土体产生的最大盐胀量和溶陷量的差值仅占土体高度的 0.12%, 最大盐胀率和溶陷率分别为 0.11% 和 0.01%, 对于土体的结构影响较小, 所以最佳含水率是该粗粒盐渍土作为路堤填料的首选含水率。

## 2.3 附加荷载条件下粗粒盐渍土的盐胀特性

图 5 为土样含水率为 6.34% 的有 (无) 附加荷载的单次降温盐胀曲线图。

图5(a)、(b)中,在其前3个降温区间内,盐胀量增长较明显,后期盐胀量增长较趋缓。该土样的盐胀增长活跃期主要集中在 $5^{\circ}\text{C} \sim -5^{\circ}\text{C}$ ,在 $-5^{\circ}\text{C}$ 温度内,2种试验土体的盐胀量基本都完成了总量的80%以上。其区别为在降温过程中,有附加荷载的粗粒盐渍土处于附加荷载压力及盐渍土结晶膨胀力的双重作用力之下,波动上胀。 $50\text{ kPa}$ 的附加压力下,土柱体首先破坏下陷,且 $50\text{ kPa}$ 的荷载对于这种粗粒亚硫酸盐渍土的盐胀量抑制可以达到85%以上。

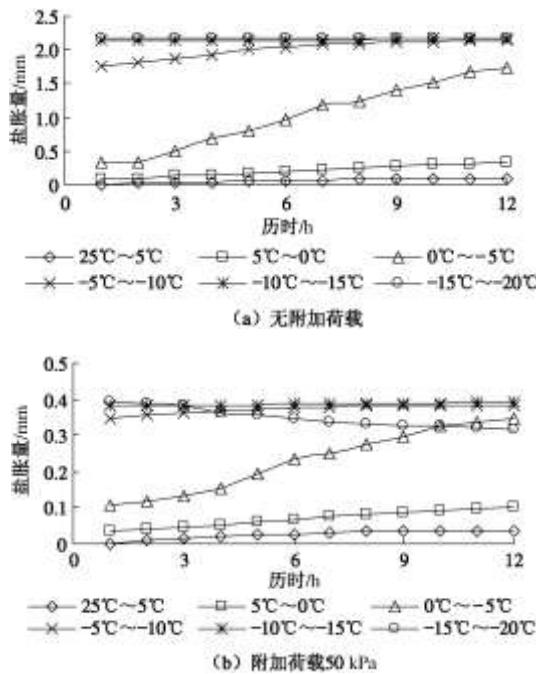


图5 粗粒盐渍土单次降温盐胀曲线

Fig. 5 Variation of salt expansion

## 2.4 粗粒盐渍土的溶陷特性

图6为粗粒盐渍土的溶陷特性试验曲线。

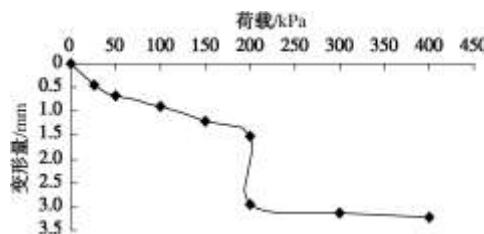


图6 粗粒盐渍土溶陷特性曲线

Fig. 6 Variation of salt collapsibility

由试验数据可以得到该粗粒盐渍土的溶陷系数<sup>[9]</sup>为1.443%,根据新疆公路学会编写的《盐渍土地区公路设计与施工指南》可知,高速公路和一级公路地基溶陷系数的标准为小于1.5%。由于该粗粒盐渍土为级配良好的砾,压实度较高,土体结构比较密实。在水的作用下,易溶盐随水流失对土体结构的破坏作用较小。

## 3 大型路堤模型试验

### 3.1 模型设计及制备

为了研究该粗粒盐渍土作为路堤上部路床填料的可行性,本文采用该土样进行了实际路堤高度和坡度比的大型路堤模型试验研究。路堤模型顶面的长、宽、高分别为3.6, 0.8, 0.8 m, 边坡坡度为1:1.5。模型按照实际工程情况分层修筑,每层10 cm,共8层,压实度为96%,模拟路堤上部的冻融盐胀特性。由多次冻融循环盐胀试验结果可设定路堤含水率取最佳含水率。在填筑前,填料土体充分拌合均匀,并按重型击实标准控制压实厚度,完工后的路堤表层拉毛后再铺筑上一层,路堤表层不铺设路面材料(无附加荷载)。

模型所处的环境室由制冷机和加热器组成。根据研究资料及该土样的单次降温盐胀试验结果分析可知,该粗粒盐渍土的盐胀敏感温度区间为 $5^{\circ}\text{C} \sim -5^{\circ}\text{C}$ 。因此,试验中环境温度持续降温,最低温度设定降到 $-15^{\circ}\text{C}$ ,降温历时225 h,升温历时50 h,共3个周期。

由于盐渍土的盐胀和溶陷变形是盐渍土地区路堤破坏的主要原因,所以路堤上表面布设位移传感器,用于测量路堤表面的变形量,如图7所示。

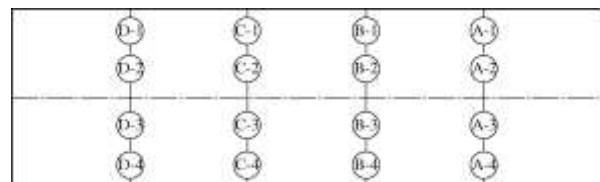


图7 位移传感器布设图

Fig. 7 Scheme of displacement sensor

为了观测路堤内部的温度是否处于盐胀敏感温度区间及分析路堤内部温度场的分布特点,于路堤内部布设了50只温度传感器。其分别布设于两个错开的断面,channel1~channel7, channel15~channel20, channel27~channel31, channel37~channel40及channel45~channel47分布于左半幅路堤,其他传感器分布于右半幅路堤,图8为部分温度传感器的分布图。温度传感器采用高精度热敏电阻温度传感器,测试精度为 $0.01^{\circ}\text{C}$ 。

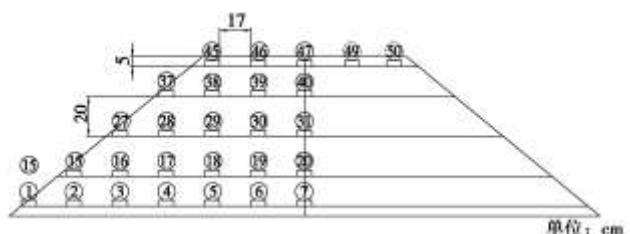


图8 温度传感器布设断面图

Fig. 8 Scheme of temperature sensors

### 3.2 试验结果及分析

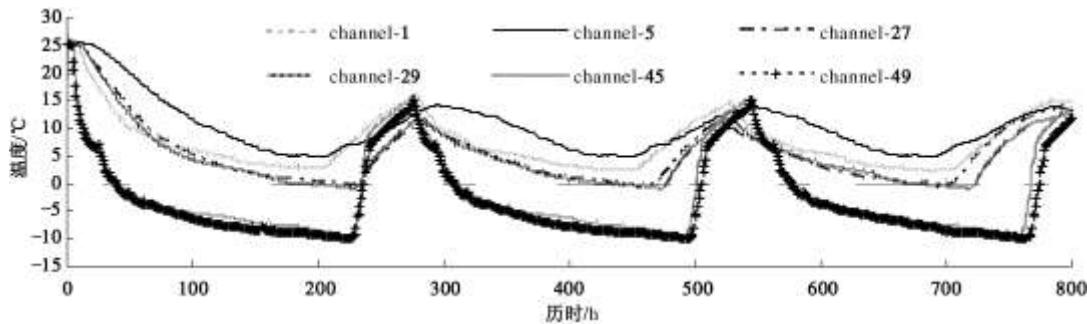


图 9 路堤内部温度变化曲线图

Fig. 9 Temperature curves of internal embankment

冻融循环试验中路堤表面最大盐胀量的分布图, 图中“*A*断面 1”表示的是第 1 次冻融循环过程中 *A* 断面不同点处的最大盐胀量分布曲线。图 11 为冻融循环过程中路堤表面不同点处的盐胀量变化曲线图, 其中“*B-2*”代表的是 *B* 断面的第 2 点, 其位置如图 7 所示。

图 9 中的曲线为模型路堤底层、中层和上层的路肩及路堤中心处的土体温度随环境温度改变而发生变化的过程。从中可以看出, 随着环境温度的改变, 模型路堤上层温度变化较大, 土体的最低温度可以降至-10°C, 路堤底层最低温度为 2.76°C; 同一层中, 路堤中心和路堤侧边的温度随着模型路堤层位的上升, 温差逐渐缩小。从试验数据可以得出, 3 次冻融循环试验条件下, 在降温过程中, 底层路堤均处于 5°C 之下, 路堤上层均低于 0°C, 为该粗粒盐渍土的盐胀敏感温度区间, 由于降温过程历时较长, 所以模型路堤盐渍土已充分结晶。在不同冻融循环周期下, 升温后的各土层温度均可以达到 14.5°C 以上, 模型整体均高于盐结晶体释放结晶水的温度。

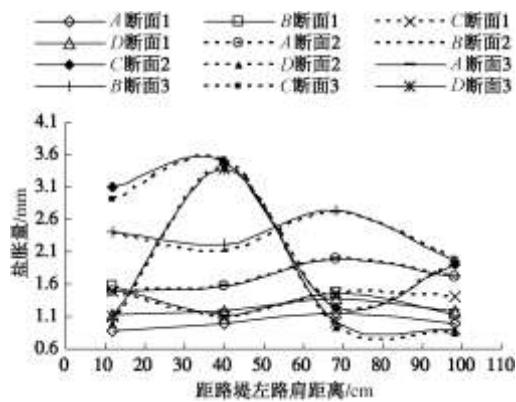


图 10 不同冻融周期下路堤表面最大盐胀量分布图

Fig. 10 Distribution of maximum salt expansion amount on embankment surface under different freeze-thaw cycles

从路堤内部温度分布状况的监测结果可以看出,

路堤内部温度变化曲线如图 9 所示。图 10 为不同

试验中的温度设定可以反映实际工况。

从图 10 可以看出, 经过多次冻融循环以后, 路堤表面的最大盐胀量为 3.51 mm, 盐胀率为 0.44%; 路堤表面不同点之间的最大变形差值为 2.6 mm; 路肩处产生的最大盐胀量值小于路堤中部产生的最大盐胀量值。

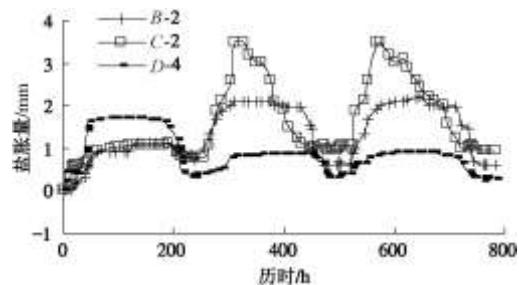


图 11 冻融循环过程中路堤表面的盐胀量变化曲线

Fig. 11 Variation curves of freeze-thaw cycles on embankment surface

图 11 为路堤表面不同点处的盐胀量随时间的变化过程, 从中可以看出, 盐胀量具有一定的累加性, 但进入 2 次冻融循环周期以后, 盐胀累加性表现并不明显, 增长的变形量较小; 盐胀量与溶陷量的最大差值为 2.56 mm。试验土样为级配良好的砾, 虽有大颗粒骨架, 但也有较小粒径的颗粒予以填充。在降温阶段, 土体中的盐分吸水结晶, 对土体结构有一定的填充和起胀作用, 但是相对土体而言, 易溶盐含量较小, 结晶盐不足以破坏路堤结构, 盐胀量累加性很小。在升温阶段, 结晶盐释放水分, 由于土体结构密实, 且盐胀作用并没有破坏路堤结构, 在没有外来水源补给的条件下, 土体的溶陷变形并不明显。

由有(无)附加荷载单次降温盐胀试验可知, 50 kPa 的附加荷载可以抑制该粗粒盐渍土的盐胀量达到 85% 以上, 大型路堤模型冻融循环试验是在没有铺筑路面的情况下进行的, 所以实际应用中产生的盐胀量应小于试验所得到的盐胀量。

## 4 结 论

(1) 基于模拟季节交替多次冻融循环试验和有(无)附加荷载单次降温盐胀试验, 该粗粒盐渍土的盐胀量与溶陷量随着含水率的逐渐增加而逐渐增大, 粗粒盐渍土的含水率越大, 溶陷累加性越显著; 50 kPa 的附加荷载可抑制该粗粒盐渍土的变形量达到 85% 以上。在工程实际中应注重粗粒盐渍土的路堤防水。

(2) 通过试验装置的改进设计, 本文采用粗粒盐渍土的原土样进行溶陷特性试验, 溶陷系数小于 1.5%, 在实际工程中应严格控制路堤压实度不小于 96%, 防止路堤土体的溶陷破坏。

(3) 采用粗粒盐渍土作为路基填料进行大尺寸路堤模型试验, 经多次冻融循环后, 路堤表面的最大盐胀量为 3.51 mm, 盐胀率为 0.44%; 路堤表面不同点之间的最大变形差值为 2.6 mm。所得盐胀量(率)和溶陷量(率)不会对路堤结构造成破坏。因此, 该粗粒盐渍土可以作为上部路堤的填料。

(4) 针对试样进行了 2 种化学成分分析试验。根据“公路路基设计规范”的规定, 两种试验方法得到了两种不同的试验结论, 结合盐渍土的盐胀特性试验、大型溶陷试验及大型路堤冻融循环模型试验, 可以得到试验土样可用于上路堤填料。说明该粗粒盐渍土过 5 mm 筛法的化学成分分析试验较规范法能更好地指导实际工程的施工。

## 参考文献:

- [1] 吴青柏, 孙 涛, 陶兆祥, 等. 恒温下含硫酸钠盐粗颗粒土盐胀特征及过程研究[J]. 冰川冻土, 2001, 9(3): 238 - 243. (WU Qing-bai, SUN Tao, TAO Zhao-xiang, et al. Experimental studies on the salt expansion of coarse grain saline soils under constant temperature[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 9(3): 238 - 243. (in Chinese))
- [2] 罗炳芳, 潘菊英. 粗粒土易溶盐含盐量测定方法的研究[J]. 公路, 2005, 11(11): 192 - 193. (LUO Bing-fang, PAN Qiu-ju. Determination of soluble salt content of coarse-grained soil[J]. Highway, 2005, 11(11): 192 - 193. (in Chinese))
- [3] 包卫星, 李志农, 罗炳芳. 公路工程粗粒盐渍土易溶盐试验方法研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(5): 792 - 797. (BAO Wei-xing, LI Zhi-nong, LUO Bing-fang. Test method for soluble salt in saline soil in highway engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(5): 792 - 797. (in Chinese))
- [4] 张莎莎, 杨晓华, 谢永利, 等. 路用粗粒盐渍土盐胀特性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2009, 29(1): 20 - 25. (ZHANG Sha-sha, YANG Xiao-hua, XIE Yong-li, et al. Salt-expansion laws of coarse-grained salty soil in road subgrade[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2009, 29(1): 20 - 25. (in Chinese))
- [5] 张莎莎, 谢永利, 杨晓华, 等. 典型天然粗粒盐渍土盐胀微观机制分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 123 - 127. (ZHANG Sha-sha, XIE Yong-li, YANG Xiao-hua, et al. Research on microstructure of crude coarse grain saline soil under freezing and thawing cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 123 - 127. (in Chinese))
- [6] 张莎莎, 杨晓华, 戴志仁. 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. (ZHANG Sha-sha, YANG Xiao-hua, DAI Zhi-ren. Freezing-thawing cycles and salt expansion test of crude coarse grain clay salty soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(4): 28 - 32. (in Chinese))
- [7] JTGE40—2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007: 67-71, 132-139, 361-398. (JTGE40—2007 The methods of soils for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2007: 67-71, 132-139, 361-398. (in Chinese))
- [8] JTGD30—2004 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 81 - 84. (JTGD30—2004 Specifications for design of highway subgrades[S]. Beijing: China Communications Press, 2004: 81 - 84. (in Chinese))
- [9] 新疆公路学会. 盐渍土地区公路设计与施工指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006: 35 - 36. (Xinjiang Highway and Transportation Society. Technical guidelines for highway design and construction in the saline soil regions[S]. Beijing: China Communications Press, 2006: 35 - 36. (in Chinese))