

引用本文:张莎莎,刘亚超,杨晓华,等.粗粒盐渍土区既有高铁路基变形特性试验研究[J].建筑科学与工程学报,2022,39(2):135-142.
ZHANG Sha-sha, LIU Ya-chao, YANG Xiao-hua, et al. Experimental Study on Deformation Characteristics of Existing High-speed Railway Subgrade in Coarse Saline Soil Area[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(2): 135-142.

DOI:10.19815/j.jace.2021.04026

粗粒盐渍土区既有高铁路基变形特性试验研究

张莎莎¹, 刘亚超¹, 杨晓华¹, 陈伟志², 金好乾¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031)

摘要:为了探究某既有高速铁路路基变形特性,对路基填料进行了基础物理化学试验,得到了颗粒级配、最大干密度、最佳含水率和易溶盐含量等基本工程性质,然后选取典型标段路基填料,分别开展室内单次降温盐胀试验、溶陷试验、冻融循环试验和现场大型溶陷试验。结果表明:该段路基土体在单次降温试验中的最大盐胀率为0.96%,最大盐胀变形量与土样不均匀系数之间存在线性关系,土样最终盐胀量在很大程度上取决于土样级配和硫酸根离子含量;在最不利工况下土样的最大溶陷系数为0.012, K87+950标段土样最终溶陷量最大,为5.67 mm,最大变形率为4.7%; K87+950标段路基变形量随温度变化呈现V形下降趋势,在第5次冻融循环周期相对融沉量达到最大,7次冻融循环后硫酸根离子沿土样高度呈现M形分布;土样顶部接近制冷头部位的含水率明显增加,底部含水率减少,20~40 cm高度范围内土样含水率无明显变化,距土样顶部15~30 cm层位范围盐胀变形量最大;由现场溶陷试验可知,注水量达到30 mm时, K31+000试验点路基溶陷量可达到最终溶陷量的80%,极端降雨不会引起该既有路基发生较大溶陷变形。

关键词:高速铁路;路基工程;溶陷特性;冻融循环;模型试验

中图分类号: TU448

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2022)02-0135-08

Experimental Study on Deformation Characteristics of Existing High-speed Railway Subgrade in Coarse Saline Soil Area

ZHANG Sha-sha¹, LIU Ya-chao¹, YANG Xiao-hua¹, CHEN Wei-zhi², JIN Hao-qian¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: In order to explore the deformation characteristics of an existing high-speed railway subgrade, the basic physical and chemical tests of the subgrade filler were carried out, and the basic engineering properties such as particle size distribution, maximum dry density, optimum moisture content and soluble salt content were obtained. Then, the typical subgrade filler was selected to carry out indoor single cooling salt expansion test, collapse test, freeze-thaw cycle test and field large-scale collapse test. The results show that the maximum salt expansion rate of the subgrade soil in a single cooling test is 0.96%. There is a linear relationship between the maximum salt expansion deformation and the soil sample coefficient of uniformity. The final salt

收稿日期:2021-04-13

基金项目:陕西省自然科学基金研究计划项目(2019JM-147);中铁重大科研项目(2017-重大-11-04)

作者简介:张莎莎(1982-),女,山西运城人,副教授,工学博士, E-mail: zss_lx@126.com.

通信作者:刘亚超(1995-),男,山东滨州人,工学硕士研究生, E-mail: 583396948@qq.com.

expansion of soil sample depends on the grading of soil sample and the content of sulfate ion to a large extent. The maximum collapse coefficient of soil sample under the most unfavorable condition is 0.012, the final collapse of K87+950 section is the largest, which is 5.67 mm, and the maximum deformation rate is 4.7%. The subgrade deformation of K87+950 section presents a V type downward trend with the change of temperature, and the relative thaw settlement reaches the maximum in the fifth freeze-thaw cycle. The sulfate ion presents a M type distribution along the soil sample height after the seventh freeze-thaw cycle. The moisture content at the top of the soil sample near the refrigeration head increases obviously, while the moisture content at the bottom decreases. The moisture content of the soil sample has no obvious change in the height range of 20-40 cm, and the salt expansion deformation is the largest in the range of 15-30 cm from the top of the soil sample. According to the field collapse test, when the water injection amount reaches 30 mm, the collapse amount of K31+000 test point subgrade can reach 80% of the final collapse amount, and extreme rainfall will not cause large collapse deformation of the subgrade.

Key words: high-speed railway; subgrade engineering; collapse characteristic; freeze thaw cycle; model test

0 引言

在区域经济发展的需求下,一些高速铁路的建设将面临既有路基的利用问题。部分既有路基位于粗粒盐渍土区,路基填料大多是粗粒盐渍土,因修筑时建设水平较低,且长时间在无防护条件下搁置,势必会造成路基填料的基本物理化学性质发生很大程度的改变。路基填料物理化学性质的改变直接影响建设工程的安全性,要想有效利用某既有路基,首先就要明确该既有路基填料现在的基本物理化学性质及其变形特性,所以开展既有路基变形特性方面的研究具有较大的实际工程意义。

费雪良等^[1]对不同初始干密度和冻融循环条件下硫酸盐渍土的盐胀规律进行了研究,发现冻融循环作用下的盐胀具有累加性。张莎莎等^[2-6]对粗粒盐渍土的盐胀敏感区间、盐胀特性及其微观机制等方面进行了研究,并分析了多次添加含盐施工用水对砾类硫酸盐渍土工程性质的影响机理。Zhang等^[7-9]研究了硫酸盐渍土在盐胀、冷却过程中的相变过程,建立了预测冻结点和未冻结水含量的数学模型。包卫星等^[10]研究了不同含盐量水平下砂类盐渍土的盐胀变化特点和冻融循环作用下砂类盐渍土的溶陷特性。杨晓华等^[11]采用室内模拟潜蚀溶陷变形的离心模型试验,研究典型天然盐渍土和不同氯离子含量的盐渍土溶陷系数的特点。肖泽岸等^[12-13]研究了盐分在土体冻结过程中对水分重分布与变形的影响,探讨了硫酸钠盐渍土在冻融循环作

用下土体的变形规律。Zhang等^[14-15]对冻融-降水循环作用下盐渍土路基的变形特性进行了研究,并分析了无机黏结剂改良粗粒盐渍土的可行性和合理性。文桃等^[16]对不同试样制备条件下的硫酸盐渍土进行了击实试验和电镜扫描。张建渊等^[17]对兰新高速铁路沿线不同类型盐渍土地基进行现场浸水荷载试验,并对盐渍土地基的溶陷特性及影响因素进行研究。张沛然等^[18]对深基坑内不同深度土层的温度场、水分场和盐胀变形随季节性变化状况进行了长期的动态监测和分析研究。Wan等^[19]建立了土的冰点和冰的成核速率计算模型以及盐渍土冰点预测方程,探讨了水过冷对不同土壤体积和含盐量的影响。周凤玺等^[20]建立了温度梯度作用下非饱和盐渍土水-热-盐-力多场耦合数学模型,分析了盐渍土特征温度的影响因素。许健等^[21]研究了硫酸钠盐渍原状黄土冻融过程劣化规律及微细观结构损伤演化机制。杨晓华等^[22]对粗颗粒硫酸盐渍土工程性质进行了总结分析。以上学者在粗粒盐渍土的盐胀、溶陷变形等方面做了比较详尽的研究,但很少涉及既有路基变形特性方面的研究,既有路基具有线路长、工程地质条件复杂、路基填料性质多变的特点,需要进行关于变形特性方面的深入研究。

本文针对某既有高铁路基典型路段的填料,分别开展了室内盐胀试验、溶陷试验、冻融循环试验以及现场大型溶陷试验,明确该既有路基的基本物理化学性质及变形特性,为有效利用该既有路基提供理论支撑,为粗粒盐渍土作为路基填料提供工程实

践支撑,并为粗粒盐渍土区类似工程项目提供参考。

1 路基填料基本物理化学性质

由于路基填料级配特征与其相关变形特性密切相关,为了明确该既有路基变形特性与其级配特征的关系,采用筛分法得到该既有路基填料的颗粒组成,部分标段路基填料筛分试验结果见图 1。

为了探究该既有路基填料变形特性与土样本身

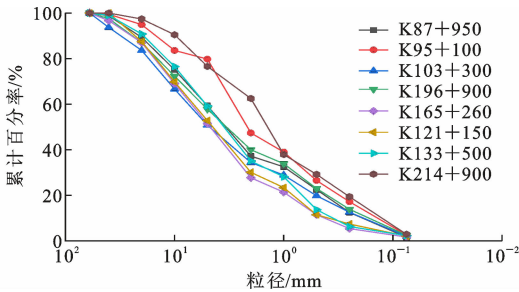


图 1 颗粒级配曲线
Fig. 1 Grain Gradation Curves

表 1 各标段土样基本物理性质

Table 1 Basic Physical Properties of Soil Sample in Each Bid Section						
土样位置	最大干密度 $\rho_{dmax}/(g \cdot m^{-3})$	最佳含水率 $\omega_{opt}/\%$	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_P/\%$	塑性指数 I_P	压实度
K87+950	2.22	7.1	24.2	15.4	8.8	0.918
K95+100	2.28	5.9	18.5	9.9	8.6	0.961
K103+300	2.25	6.8	19.0	13.6	5.4	0.974
K196+900	2.22	6.2	17.9	9.0	8.9	0.969
K165+260	2.24	6.7	16.7	10.2	6.5	0.980
K121+150	2.28	6.1	18.5	13.3	5.2	0.961
K133+500	2.24	6.4	17.3	12.6	4.7	0.974
K214+900	2.24	5.9	22.1	14.1	8.0	0.973

表 2 各标段路基填料易溶盐总含量

Table 2 Total Soluble Salt Content of Subgrade Filler in Each Bid Section			
土样位置	易溶盐总量/ $\%$	土样位置	易溶盐总量/ $\%$
K87+950	1.016	K165+260	0.514
K95+100	0.280	K121+150	1.022
K103+300	0.216	K133+500	0.254
K196+900	0.240	K214+900	0.218

本次试验采用高度为 13 cm、直径为 15 cm 的铁桶作为试验容器,试验装置见图 2^[6]。按照现场检测取土位置处的压实度,将土样分 3 次击入试验桶中,然后覆盖 1 层保鲜膜,放置 12 h。采用单次降温,降温范围设定为 25 ~ -15 ℃,降温速率为 5 ℃ · (60 min)⁻¹,当降温到 -15 ℃ 时,恒温保持 6 h。

2.2 溶陷试验

为了探究各标段路基的溶陷量以及与土样相关性质之间的内在联系,进行室内溶陷试验。试筒选

的相关物理化学性质之间的关系,基于室内重型击实试验,得到各标段路基填料的最大干密度和最佳含水率,并采用液、塑限联合测定法测得各标段路基填料中细粒土的液限和塑限值,部分标段路基填料的试验结果见表 1;采用过 5 mm 筛孔的烘干土样 300 g 进行易溶盐含量试验,部分标段试验结果见表 2、3。

2 试验方案

2.1 单次降温盐胀试验

为了探究单次降温条件下各标段土样盐胀量情况以及与填料级配特点之间的关系,选取 K87 + 950、K121 + 150、K133 + 500、K165 + 260、K196 + 900、K214 + 900 土样进行单次降温盐胀试验。添加适量蒸馏水使土样处于最佳含水率状态,试验选用各标段路基填料的易溶盐含量、最大干密度、最佳含水率及路基压实度见表 1。

用直径 28 cm、高度 12 cm 的有机玻璃桶,试筒上、下面均可自由排水,在试筒上部放置钢排水板,同时在有机玻璃桶外侧安装铁箍。试验土样同室内盐胀试验所取土样一致,每个标段的土样按照现场测得的压实度,分 3 次击入试样桶中。采用单线法,通过万能试验机施加荷载,荷载施加顺序为 0→50 kPa→100 kPa→150 kPa→200 kPa→300 kPa。以试样每小时变形量不超过 0.01 mm 为变形稳定标准,变形稳定后再施加下一级荷载,200 kPa 加载稳定 1 h 后,加水浸湿 3 d,然后将荷载加载至 300 kPa。

为了明确降水量对路基溶陷量的影响效果,选取 K31+000 标段路基进行现场溶陷试验。荷载板直径为 0.8 m,试坑直径为 2.5 m。在距试坑中心 0.43 m 处布置 4 个分层观测点(图 3),距坑底表面深度分别为 1、2、3、4 m,用来测量不同土层的沉降、溶陷量以及溶陷深度。

表 3 各标段路基填料化学成分分析结果

Table 3 Chemical Composition Analysis Results of Subgrade Filler in Each Bid Section

土样位置	各化学成分含量(质量分数)/%						
	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	石膏
K87+950	0.417	0.429	0.350	0.078	0.007	0.240	3.718
K95+100	0.004	0.018	0.040	0.033	0.003	0.007	0.556
K103+300	0.195	0.232	0.012	0.007	0.002	0.105	7.448
K196+900	0.275	0.245	0.210	0.048	0.004	0.005	0.478
K165+260	0.634	0.848	0.020	0.012	0.004	0.005	0.170
K121+150	0.006	0.084	0.030	0.015	0.002	0.032	0.695
K133+500	0.471	0.942	0.203	0.035	0.006	0.210	2.103
K214+900	0.274	0.222	0.135	0.027	0.037	0.042	1.504

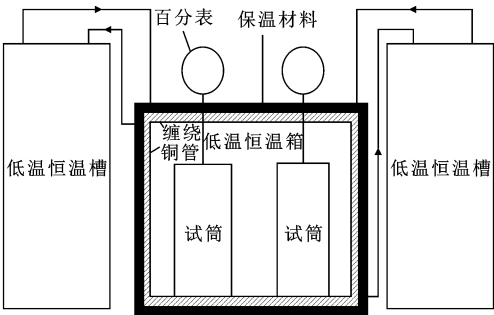


图 2 单次降温盐胀装置

Fig. 2 Single Cooling Salt Expansion Device

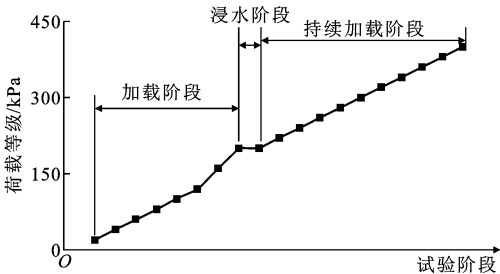


图 4 现场溶陷加载过程

Fig. 4 Field Collapse Loading Process

试验点路基的溶陷系数。

2.3 冻融循环试验

为了明确冻融循环条件下路基的变形量及冻融后含水率、硫酸根离子的分布情况,选取 K87+950 标段土样开展室内大尺寸冻融循环试验。按照最佳含水率配制试验用土,并装入密封袋中闷料 24 h 以上。试筒选用直径 30 cm、桶高 75 cm 的有机玻璃桶。土样高度 75 cm,每层土厚度为 2.5 cm,分层击实,使试验土样压实度与现场检测数据一致。距土样底部每隔 10 cm 设置温度探头,来测量对应土层的温度,试验装置见图 5。

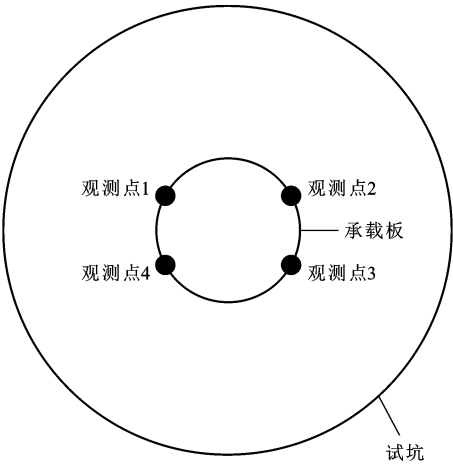


图 3 现场溶陷观测点布置

Fig. 3 Layout of Field Collapse Observation Point

本次试验浸水压力为 200 kPa,加载阶段分 8 级,浸水过程完成后分 8 级继续加载,整个加载过程见图 4。浸水阶段分 5 步进行,模拟 5 种不同的气候条件:①注水 30 mm 模拟一年中月最大平均降水量;②在工况 1 的基础上再次注水 30 mm,模拟一年内最大单次降水量;③在工况 2 的基础上再次注水 40 mm,模拟年均降雨量;④保持 30~40 cm 常水头浸水持续 24 h,模拟当地极端单次降雨;⑤长期保持 30~40 cm 常水头浸水来测定最不利工况下

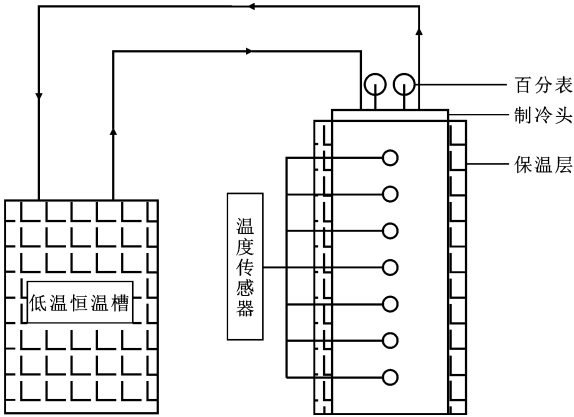


图 5 冻融循环试验装置

Fig. 5 Freeze-thaw Cycle Test Device

试验装置采用低温恒温槽,单向降温,单向升温。降温设置为 $25\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow -15\text{ }^{\circ}\text{C}$,降温速率为 $5\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (1.5\text{ h})^{-1}$,温度达到 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后恒温 36 h。升温设置为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 25\text{ }^{\circ}\text{C}$,升温速率为 $5\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (1.5\text{ h})^{-1}$,温度达到 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时恒温维持 36 h。在无附加荷载的情况下(制冷头 0.7 kPa),共进行 7 个冻融循环周期。

3 试验结果及分析

3.1 单次降温盐胀试验结果及分析

各标段土样最终盐胀量以及与路基填料不均匀系数之间的关系见图 6。从图 6 可以看出,单次降温情况下路基填料的最终盐胀量与土样的不均匀系数之间呈现出正相关关系。K87+950 土样在整个降温过程中出现了显著的体缩,K121+150 土样出现轻微体缩,K133+500 和 K165+260 土样则发生明显的盐胀,K196+900 和 K214+900 土样盐胀变形不明显。K133+500、K165+260、K214+900 土样最大干密度一致,说明在最大干密度相同的情况下,土样最终盐胀量的大小在很大程度上由颗粒级配特点以及硫酸根离子含量共同决定。

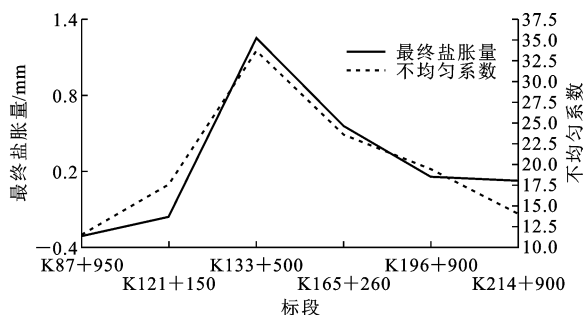


图 6 各标段土样最终盐胀量

Fig. 6 Final Salt Expansion of Soil Sample in Each Bid Section

在本次试验的 6 个标段路基填料中,K133+500 和 K165+260 土样的硫酸根离子含量以及不均匀系数最大,且路基压实度最大。不均匀系数越大代表级配越良好,压实以后孔隙率越小,颗粒间接触越紧密,硫酸盐吸水膨胀时外在表现越显著。在降温阶段,K133+500 和 K165+260 土样中硫酸盐吸水结晶产生很大的膨胀力,导致颗粒间隙增大,盐结晶体积增加量部分填充大孔隙,土体颗粒重新排列,小颗粒回落到大孔隙中,但盐结晶体积增加量大于小颗粒回落量,因而产生了明显的盐胀变形^[4]。其余标段路基填料中硫酸根离子含量相对较少,不均匀系数较小,颗粒间隙较大。在降温阶段,盐结晶产

生膨胀力,使得土体颗粒间隙扩大,而硫酸盐结晶数量少,不能很好地填充土体颗粒间隙而使土体结构破坏,小颗粒回落在大孔隙中,因此盐胀现象不明显,甚至会产生体缩。

3.2 溶陷试验结果及分析

图 7 为各标段土样在不同荷载压力 P 作用下的溶陷曲线。从图 7 可以看出,随着荷载的增加,各标段溶陷变形量具有一致的变化趋势。在荷载压力为 100 kPa 时,各标段土样变形量在 $1\sim 3.5\text{ mm}$ 之间;当荷载压力为 200 kPa 时,浸水后土样会发生 Δh_p 的溶陷量;当荷载压力达到 300 kPa 时,K87+950 标段土样最终变形量最大,为 5.67 mm ,最大变形率为 4.7% 。在实际工程中,若以 1 m 浸水深度计算,则最大变形量为 47 mm ,超出了高速铁路无砟轨道要求的 15 mm 变形量^[21],所以需要采取相关措施,防止因溶陷导致路基破坏。

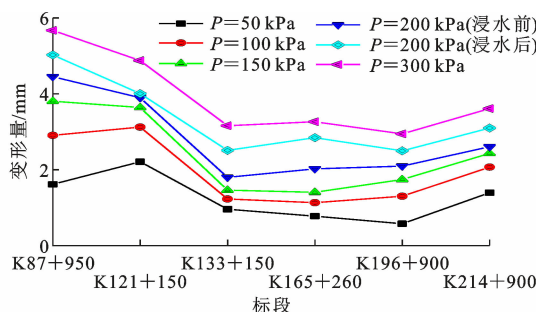


图 7 各标段土样溶陷曲线

Fig. 7 Collapse Curve of Soil Sample in Each Bid Section

图 8 为各标段土样溶陷系数。由图 8 可知,各标段路基填料的溶陷系数与氯离子含量曲线变化趋势一致,二者存在正相关关系。K87+950、K133+500 以及 K165+260 这 3 个标段土样的溶陷系数大于或等于 0.01 ,属于溶陷性盐渍土,其最大溶陷系数为 0.012 。其余 3 个标段的盐渍土溶陷系数均小于 0.01 ,溶陷现象不明显。

现场溶陷试验浸水阶段溶陷量变化如图 9 所示。在浸水阶段,第 1 次注水 30 mm 时,荷载板下部土体沉降量显著增大,溶陷发展迅速,这一阶段溶陷量占比高达 80% 。第 2 次注水 30 mm 时,土体沉降量和溶陷量均有所增加,且 2 m 及 2 m 以下土体沉降板基本上没有发生沉降,此工况下溶陷量占比 1.6% 。再次注水 40 mm ,溶陷会持续发生,但增加速度缓慢,第 3 工况溶陷量占总溶陷量的 5.1% 。持续 24 h 保持 30 cm 常水头浸水稳定时,试验路基各观测点沉降、溶陷量增加幅度较小,此工况溶陷量占比为 6.8% 。保持 30 cm 常水头,长期浸水稳定

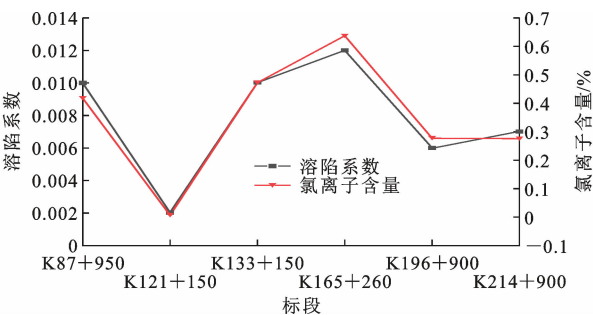


图 8 各标段土样溶陷系数

Fig. 8 Collapse Coefficient of Soil Sample in Each Bid Section

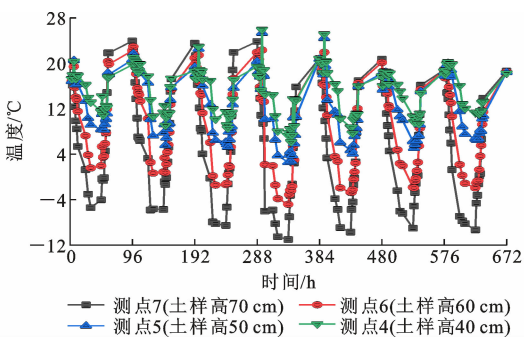


图 11 冻融循环过程中的温度变化曲线

Fig. 11 Temperature Change Curves During Freeze-thaw Cycle

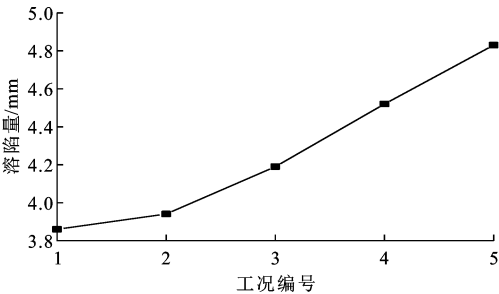


图 9 浸水阶段土样溶陷量

Fig. 9 Collapse Amount of Soil Sample in Immersion Stage
时,此工况溶陷量占比 6.5%。路基土体溶陷量随着降水量的变大而增加,但当降水量达到 30 mm 以后,溶陷量保持相对稳定,极端降水不会使路基土体发生过多的溶陷变形。现场溶陷试验表明,K31+000 段路基不具有溶陷性,最大溶陷量为 4.83 mm,满足高速铁路无砟轨道 15 mm 的变形要求。

3.3 冻融循环试验结果及分析

图 10 为 K87+950 标段土样在冻融循环各周期中最低温度和最高温度时的变形量,温度测点位置土体的温度变化见图 11。

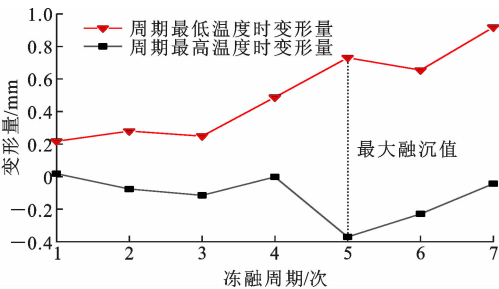


图 10 各冻融循环周期最高温度、最低温度时的变形量

Fig. 10 Deformations at Highest Temperature and Lowest Temperature in Each Freeze-thaw Cycle

从图 10 可以看出,土样在各周期最高温度时的变形量随着冻融循环周期的增加逐渐增大,变形量随温度变化呈现 V 形下降趋势,在第 5 个冻融循环

周期相对融沉量达到最大值。本标段路基压实度为 91.8%,土体不密实,空隙较大较多。在冻融循环开始阶段,硫酸盐吸水结晶,土体体积增大,细小颗粒回落填充大空隙,土体盐胀不明显。当温度升高时,盐结晶失去结晶水,逐渐溶解,土体骨架遭到破坏,土体产生塌落变形,体积减小。5 次冻融循环后,土体骨架结构破坏严重,升温过程中结晶盐释放出水分,水分迁移使得顶部位置含水率特别大,可以溶解部分土颗粒胶结而形成的骨架结构,破坏胶结结构,使得部分土体失稳塌陷,土颗粒重新排列,产生溶陷,7 次冻融循环后该标段土体盐胀量为负值,最终表现为融沉。

从图 11 可以看出,距土样顶部 15 cm 高度范围为温度敏感区间,温度影响作用沿土体高度逐渐递减,土样高度 70 cm 处温度探头监测的温度变化范围最大,第二周期最低温度为 -11℃。

土样经历 7 个周期的冻融循环后含水率和硫酸根离子含量变化见图 12。

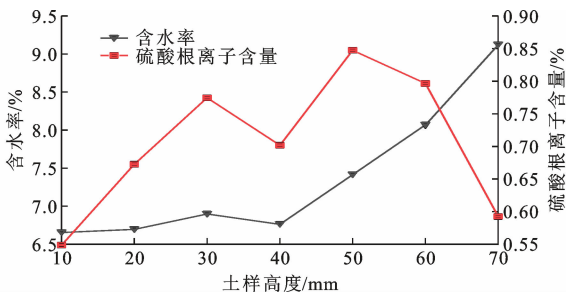


图 12 冻融循环后含水率及硫酸根离子含量变化

Fig. 12 Changes of Water Content and Sulfate Ion Content After Freeze-thaw Cycle

从图 12 可以看出,冻融循环后土样顶部含水率明显增加,底部含水率减少,20~40 cm 高度范围内土样含水率无明显变化。降温过程中,土样顶部的硫酸盐吸水形成结晶体,液态水逐渐结冰,使得水分

逐渐向冷端迁移,顶部土体含水率高于试验开始时的含水率。硫酸根离子分布呈现出M形,土样顶部和底部位置处的硫酸根离子含量都减少,中间位置的硫酸根离子含量没有变化。盐胀是由硫酸钠吸水结体积膨胀导致的,距土样顶部15~30 cm范围硫酸根离子含量最高,说明这个层位范围盐胀变形量最大。

4 结 语

(1)在无上覆荷载的单向降温条件下,土体的最大盐胀率为0.96%,部分标段路基不会发生盐胀,甚至出现下沉。最大盐胀率与路基填料不均匀系数之间存在正相关关系,在最大干密度相同的情况下,土样最终盐胀量在很大程度上取决于颗粒级配和硫酸根离子含量。

(2)在最不利工况下,由室内溶陷试验可知土样的最大溶陷系数为0.012,部分标段土样是溶陷性盐渍土。溶陷系数与氯离子含量之间存在正相关关系。K87+950标段土样最终溶陷量最大,为5.67 mm,最大变形率为4.7%,应采用设置反压护道或垂直防渗等措施,防止发生溶陷危害。

(3)现场溶陷试验点路基的溶陷量和溶陷系数均较小,不具有溶陷特性,该路基填料粗颗粒含量相对较多,细颗粒含量少,浸水过程中,易溶盐晶体溶解,不影响土体主要骨架结构,不会发生较大的溶陷变形。注水量达到30 mm时,溶陷量可达到最终溶陷量的80%,极端降雨不会引起路基产生较大的溶陷变形。

(4)K87+950段路基变形量随温度变化呈现V形下降趋势,在第2次冻融循环后,出现融沉,在第5次冻融循环周期时相对融沉值达到最大。7次冻融循环后硫酸根离子沿土样高度呈现M形分布,土样顶部含水率增大。土样顶部15 cm范围内为温度敏感区间,土样顶部15~30 cm层位膨胀变形最大。在实际工程中,对于压实度较低的路段,应重视其融沉。

参考文献:

References:

- [1] 费雪良,李 斌,王家澄.不同密度硫酸盐渍土盐胀规律的试验研究[J].冰川冻土,1994,16(3):245-250.
FEI Xue-liang, LI Bin, WANG Jia-cheng. Experimental Researches on Salt Heaving of Sulphate Treated Soil with Different Dry Densities[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1994, 16(3): 245-250.

- [2] 张莎莎,杨晓华,戴志仁.基于均匀设计的砾类硫酸盐渍土盐胀特性试验研究[J].公路交通科技,2009,26(5):29-34.
ZHANG Sha-sha, YANG Xiao-hua, DAI Zhi-ren. Experimental Study on Salt Expansion of Gravel Sulfate Salty Soil Based on Uniform Design[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(5): 29-34.
- [3] 张莎莎,杨晓华,王 龙.单因素对粗粒盐渍土的盐胀规律影响效果研究[J].水利学报,2015,46(增1):129-134.
ZHANG Sha-sha, YANG Xiao-hua, WANG Long. Research on the Law of Salt Expansion of Crude Coarse Grained Saline Soil with the Changing of Single Factors[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(S1): 129-134.
- [4] 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.
- [5] 张莎莎,戴志仁,杨晓华,等.上覆荷载对砾砂类硫酸盐渍土路基盐胀的影响[J].中国铁道科学,2019,40(2):1-8.
ZHANG Sha-sha, DAI Zhi-ren, YANG Xiao-hua, et al. Effect of Overburden Load on Salt Expansion of Gravelly Sand Sulfate Saline Soil Subgrade[J]. China Railway Science, 2019, 40(2): 1-8.
- [6] 张莎莎,王旭超,杨晓华,等.含盐施工用水对路基填料工程特性的累加效应[J].交通运输工程学报,2020,20(6):71-81.
ZHANG Sha-sha, WANG Xu-chao, YANG Xiao-hua, et al. Cumulative Effect of Saline Construction Water on Engineering Properties of Subgrade Filling Material[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(6): 71-81.
- [7] ZHANG M Y, ZHANG X Y, LAI Y M, et al. Variations of the Temperatures and Volumetric Unfrozen Water Contents of Fine-grained Soils During a Freezing-thawing Process[J]. Acta Geotechnica, 2020, 15(3): 595-601.
- [8] LAI Y M, WAN X S, ZHANG M Y. An Experimental Study on the Influence of Cooling Rates on Salt Expansion in Sodium Sulfate Soils[J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, 124: 67-76.
- [9] XIAO Z A, LAI Y M, YOU Z M, et al. The Phase

- Change Process and Properties of Saline Soil During Cooling[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2017, 42(9): 3923-3932.
- [10] 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.
BAO Wei-xing, ZHANG Sha-sha. Experimental Study on Salt Expansion and Thawing Subsidence Properties of Sandy Saline Soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(4): 734-739.
- [11] 杨晓华, 张志萍, 张莎莎. 高速公路盐渍土地基溶陷特性离心模型试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2010, 30(2): 5-9.
YANG Xiao-hua, ZHANG Zhi-ping, ZHANG Sha-sha. Centrifugalize Model Test on Dissolve Collapse of Saline Soil Under Expressway [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2010, 30(2): 5-9.
- [12] 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(增 1): 3738-3746.
XIAO Ze-an, LAI Yuan-ming. Study on Water and Salt Transfer Mechanism in Saline Soil Under Freezing-thawing and Dry-wet Conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S1): 3738-3746.
- [13] 肖泽岸, 赖远明, 尤哲敏. 冻融循环作用下含盐量对 Na_2SO_4 土体变形特性影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(5): 953-960.
XIAO Ze-an, LAI Yuan-ming, YOU Zhe-min. Experimental Study on Impact of Salt Content on Deformation Characteristics of Sodium Sulfate Soil Under Freeze-thaw Conditions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(5): 953-960.
- [14] ZHANG S S, ZHANG J S, GUI Y L, et al. Deformation Properties of Coarse-grained Sulfate Saline Soil Under the Freeze-thaw-precipitation Cycle[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 177: 103121.
- [15] ZHANG S S, YANG X H, XIE S J, et al. Experimental Study on Improving the Engineering Properties of Coarse Grain Sulphate Saline Soils with Inorganic Materials[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 170: 102909.
- [16] 文 桃, 米海珍, 马连生, 等. 硫酸钠盐渍土击实特性与压实度评价试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(12): 3455-3462, 3471.
WEN Tao, MI Hai-zhen, MA Lian-sheng, et al. Experiment and Evaluation of Compaction Characteristics of Sodium Sulfate Saline Soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(12): 3455-3462, 3471.
- [17] 张建渊, 胡海东, 沈 鑫. 兰新高速铁路沿线盐渍土地基的溶陷特性[J]. 铁道建筑, 2018, 58(3): 59-63.
ZHANG Jian-yuan, HU Hai-dong, SHEN Xin. Collapsibility Characteristics of Saline Soil Foundation in Lanzhou-Xinjiang High Speed Railway [J]. Railway Engineering, 2018, 58(3): 59-63.
- [18] 张沛然, 黄雪峰, 杨校辉, 等. 盐渍土水-热场耦合效应与盐胀变形试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(5): 1619-1624.
ZHANG Pei-ran, HUANG Xue-feng, YANG Xiao-hui, et al. Experiment on Coupling Effect of Water and Thermal Field and Salt-expansion Deformation of Salty Soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(5): 1619-1624.
- [19] WAN X S, YANG Z H. Pore Water Freezing Characteristic in Saline Soils Based on Pore Size Distribution [J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 173: 103030.
- [20] 周凤玺, 周立增, 王立业, 等. 温度梯度作用下非饱和盐渍土水盐迁移及变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(10): 2115-2130.
ZHOU Feng-xi, ZHOU Li-zeng, WANG Li-ye, et al. Study on Water and Salt Migration and Deformation Properties of Unsaturated Saline Soil Under Temperature Gradient[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(10): 2115-2130.
- [21] 许 健, 张明辉, 李彦锋, 等. Na_2SO_4 盐渍原状黄土冻融过程劣化特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(9): 1642-1650.
XU Jian, ZHANG Ming-hui, LI Yan-feng, et al. Experimental Study on Deterioration Behavior of Saline Undisturbed Loess with Sodium Sulphate Under Freeze-thaw Action[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(9): 1642-1650.
- [22] 杨晓华, 张莎莎, 刘 伟, 等. 粗颗粒盐渍土工程特性研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(5): 22-40.
YANG Xiao-hua, ZHANG Sha-sha, LIU Wei, et al. Research Progress on Engineering Properties of Coarse-grained Saline Soil[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(5): 22-40.