

典型天然盐渍土多次冻融循环盐胀试验研究

包卫星^{1, 2}, 杨晓华¹, 谢永利¹

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 新疆交通建设管理局, 新疆 乌鲁木齐 830001)

摘要:通过对新疆喀什地区12处天然盐渍土室内基本性质试验分析,选取典型天然盐渍土,在开放系统中进行反复冻融循环条件下的试验研究。从土的分类角度研究了天然盐渍土的盐胀规律。试验结果表明:低液限粘土前五次冻融循环过程中盐胀具有较好累加性,随着冻融循环次数的增加,盐胀量增长速度逐渐降低;含砂低液限粘土的盐胀过程可以被分为三个阶段;粘土质砂在冻融循环过程中的变形主要为冻胀和沉降变形,具有较好的溶陷累加性;低液限粘土、含砂低液限粘土的盐胀率和粘土质砂的溶陷率与冻融周期之间的关系符合二次抛物线变化规律。

关键词:道路工程;盐胀;冻融循环;天然盐渍土;开放系统;溶陷

中图分类号: TU448; U416.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)11-1991-05

作者简介:包卫星(1979-),男,新疆乌鲁木齐人,博士研究生,主要从事软粘土力学及地基处理方面的研究。

Research on salt expansion of representative crude saline soil under freezing and thawing cycles

BAO Wei-Xing^{1, 2}, YANG Xiao-Hua¹, XIE Yong-Li¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Sinkiang Traffic Construction Management Bureau, Urumchi 830001, China)

Abstract: Based on the test results of saline soil samples of twelve places (Kashi, Sinkiang, China), the representative crude saline soil samples were selected for the experiment of freezing and thawing cycles in laboratory. The salt expansion laws of crude saline soil were researched by use of three kinds of soil. It was shown that salt expansion value of low liquid-limit clay was accumulated before the sixth freezing and thawing cycles, but the increment of salt expansion was reduced gradually with increasing cycles; the salt expansion accumulation of low liquid-limit clay could be separated into three phases; the deformation of clayey sand was mostly frost heave and subsidence under cycles, and collapsibility value of clayey sand was accumulated with increasing cycles; the variation of salt expansion ratio and collapsibility ratio was a parabolic function of freezing and thawing cycles.

Key words: road engineering; salt expansion; freezing and thawing cycles; crude saline soil; open systems; collapsibility

0 引言

盐渍土盐胀作用是盐、土、水、温度等因素综合作用的结果^[1],迄今为止,通过对盐渍土盐胀的研究,人们对盐渍土的性质有了较全面地认识,逐步形成了较为完善的盐渍土盐胀理论。西部交通发展是实施国家西部大开发战略的重要内容之一,高等级公路在盐渍土地区的迅猛发展又使许多新的问题随之出现,需要进一步的实践积累和理论研究。以往对盐渍土的工程性质的研究大多数是使用当地的土样,人工添加盐分对其性质进行研究。由于盐渍土的工程特性受地域性影响很大,不同地域不同土类的盐渍土工程性质差别较大^[2],上述研究方法的成果难以普遍推广。

本文对不同土类的天然盐渍土在开放系统中进行了多次冻融循环试验研究,对不同土类天然盐渍土的

盐胀规律进行了探讨。

1 试验方案及试样基本性质

1.1 试验方法及方案

在对喀什地区岳普湖至英吉沙道路沿线12处天然盐渍土分析的基础上,选取低液限粘土、含砂低液限粘土、粘土质砂类盐渍土作为本次试验研究土样。试验采用室内模拟试验,模拟自然界冬季的降温过程及来年春天升温过程^[3]。降温采用顶端温度保持零下20℃不变,下端保持5℃,升温采用室内温度自然升温。为了使试样的边界条件与自然条件下相似,在试样筒

基金项目: 国家西部交通建设科技项目(200331879750)

收稿日期: 2005-09-16

周围包以保温材料,以防止试样与周围环境的热交换。结合当地自然环境,考虑地下水的补给,试验采用开放系统试验,从底端自下而上补充盐水^[4]。考虑取样区域地下水含盐状况,盐水成分主要是以硫酸钠为主,浓度与地下水含盐浓度相近。将闷好的料在20℃条件下成型,即将准备好的土料分12次装入高60 cm,内径15 cm的有机玻璃筒中,单向击实到所需干密度。在顶端制冷头顶面垂直安置百分表。土样分5层,每段插有温度传感器监控。特制的制冷头的重量模拟上覆荷载。为模拟多次冻融循环对盐胀规律的影响,每种土体的冻融循环次数设定为7次。每个冻融循环周期为48 h。试验装置示意图如图1所示。

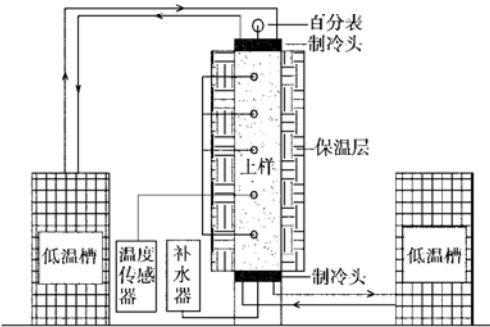


图1 试验装置示意图

Fig. 1 Scheme of the test apparatus

1.2 试验土样基本性质

试验采用重型击实标准^[5],根据《公路工程技术标准》^[6]取其压实度为0.93,即压实后的干密度=最大

干密度×0.93,采用最佳含水率,试样成型温度取20℃。试样基本参数如表1~3所示。

2 试验数据处理及分析

2.1 低液限粘土盐胀数据及分析

喀什地区低液限粘土在保持顶端零下20℃,底端5℃降温过程中,土体各层的温度是逐渐降低的,在自然升温阶段各层温度也是逐渐回升的,呈抛物线形变化规律,见图2。

低液限粘土前五次冻融循环过程中盐胀过程具有较好累加性(见图3),随着冻融循环次数的增加,盐胀量增长速度逐渐降低,这主要是由于冻融循环使土体变得疏松,孔隙率增大,因而对盐胀有一定的吸收作用。

低液限粘土冻融循环过程中水分补充主要发生在起始盐胀阶段,补充量较小,见图4。

2.2 含砂低液限粘土盐胀数据及分析

含砂低液限粘土在保持顶端零下20℃,底端5℃降温过程中,土体各层的温度是呈抛物线形规律变化,见图5。

含砂低液限粘土的盐胀过程(见图6)可以被分为三个过程:随着温度的降低盐胀量急剧增加阶段;温度持续降低盐胀量保持稳定阶段;升温时盐胀量均匀下降过程。含砂低液限粘土的盐胀的累加性较好,前四次冻融循环中,盐胀量变化较大,后三次冻融循环

表1 试样颗粒分析表

Table 1 Grain size distribution of the test saline soil

土类	颗粒组成质量百分比/%				
	>0.074 mm	0.074 mm~0.01 mm	0.01 mm~0.005 mm	0.005 mm~0.002 mm	<0.002 mm
低液限粘土	20.19	33.45	22.10	17.08	7.18
含砂低液限粘土	34.94	62.27	1.10	1.48	0.21
粘土质砂	69.80	27.20	1.11	0.66	1.22

表2 试样易溶盐各离子含量表

Table 2 Ion content of the test saline soil

土类	各离子含量/%							总含盐量/%
	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺ +Na ⁺	
低液限粘土	0.0034	0.0068	0.9054	1.0254	0.3376	0.2069	0.3048	2.854
含砂低液限粘土	0.0050	0.0068	0.9523	1.0213	0.3510	0.2128	0.2666	3.256
粘土质砂	0.0000	0.0136	0.3581	1.0040	0.2562	0.0692	0.2913	2.124

表3 试样基本参数

Table 3 Main parameters of the test saline soil

土类	液限 w _p /%	塑限 w _L /%	塑性指数 I _p /%	最优含水率 w _o /%	最大干密度 ρ _d /(g·cm ⁻³)	盐渍土类别
低液限粘土	36.64	20.09	16.55	15.8	1.81	氯化物硫酸盐渍土、强盐渍土
含砂低液限粘土	27.06	12.16	14.90	11.8	1.86	氯化物硫酸盐渍土、强盐渍土
粘土质砂	27.93	16.07	11.86	12.3	1.75	氯化物硫酸盐渍土、强盐渍土

中盐胀量变化较稳定, 主要以冻胀为主。

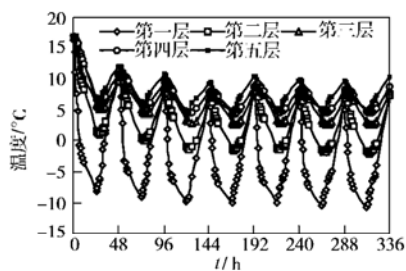


图 2 低液限粘土冻融过程中各土层的温度变化曲线
Fig. 2 Variation of temperature of low liquid-limit clay under freezing and thawing cycles

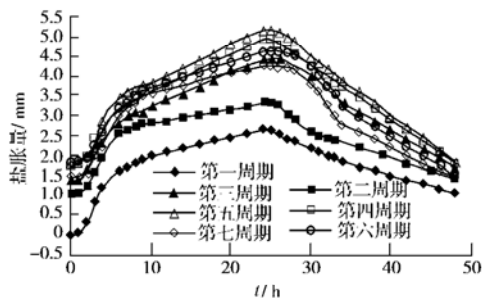


图 3 低液限粘土盐胀过程曲线
Fig. 3 Variation of salt expansion of low liquid-limit clay

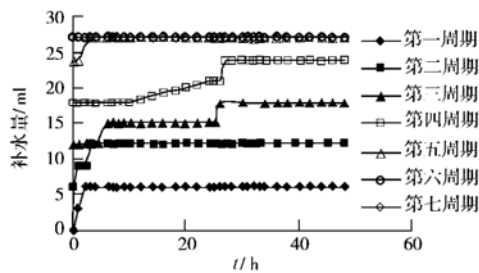


图 4 低液限粘土补水过程曲线
Fig. 4 Variation of water intake flow of low liquid-limit clay

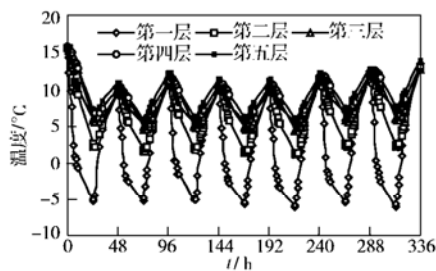


图 5 含砂低液限粘土冻融过程中各土层的温度变化曲线
Fig. 5 Variation of temperature of low liquid-limit clay under freezing and thawing cycles

含砂低液限粘土冻融循环过程中水分补充 (见图 7) 主要在盐胀剧增阶段, 补水量很小, 这与其微观结构有关。

2.3 粘土质砂盐胀数据及分析

粘土质砂在保持顶端零下 20℃, 底端 5℃ 降温过程中, 土体各层的温度呈抛物线形变化规律, 见图 8。第一层与第二层由于离冷段较近温度降低幅度较大, 也是盐胀产生的主要区域。

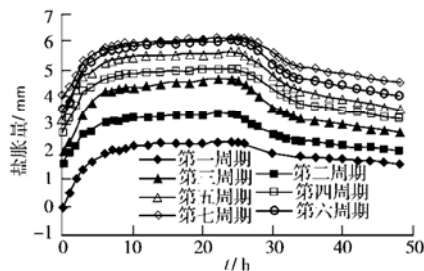


图 6 含砂低液限粘土盐胀过程曲线
Fig. 6 Variation of salt expansion of low liquid-limit clay

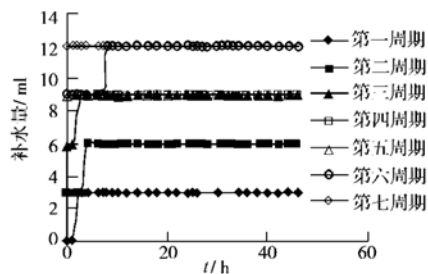


图 7 含砂低液限粘土补水过程曲线
Fig. 7 Variation of water intake flow of low liquid-limit clay

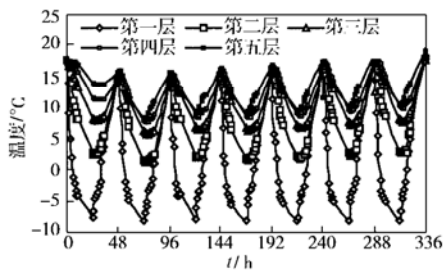


图 8 粘土质砂冻融过程中各土层的温度变化曲线
Fig. 8 Variation of temperature of clayey sand under freezing and thawing cycles

粘土质砂在冻融循环过程中的变形 (见图 9) 主要为冻胀和沉降变形, 盐胀较微弱, 基本上没有盐胀累加性。变形过程中, 前两次冻融循环过程中, 变形具有盐胀和冻胀特性, 随着冻融周期的增加, 不断发生沉降变形。粘土质砂在冻融循环过程中的变形没有明显的阶段性, 变形比较平缓, 变形量较小, 具有溶陷累加性。

粘土质砂在冻融循环过程中水分补充 (见图 10) 主要发生在降温过程中, 前两个冻融循环过程中水分补充量较大, 这主要是因为粘土质砂渗透性较好。

3 盐胀性状分析

通过对喀什地区低液限粘土、含砂低液限粘土、

粘土质砂三种典型土质的盐渍土分别进行了七次冻融循环试验，得到如图11所示的盐胀累加过程曲线。

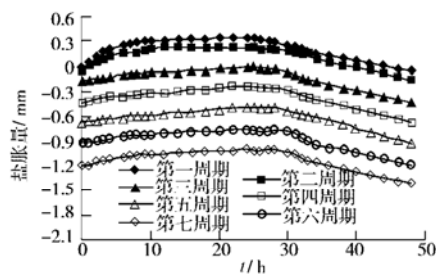


图 9 粘土质砂盐胀过程曲线

Fig. 9 Variation of salt expansion of clayey sand

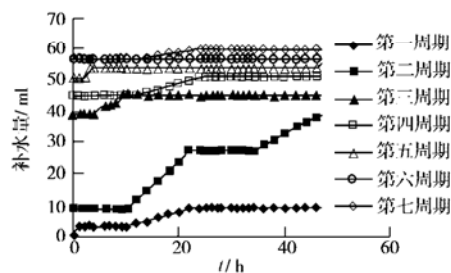


图 10 粘土质砂补水过程曲线

Fig. 10 Variation of water intake flow of clayey sand

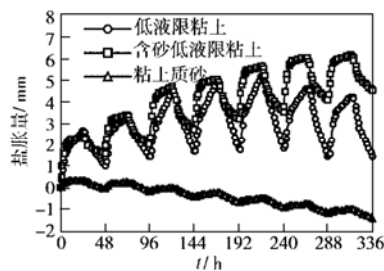


图 11 典型天然盐渍土反复冻融条件下的变形曲线

Fig. 11 Accumulation of salt expansion of crude saline soil under freezing and thawing cycles

喀什地区天然硫酸盐渍土在冻融循环条件下的盐胀机理与直接冻结时的盐胀机理有所不同，但第一次降温与直接冻结相似，即开始时两者的盐胀机制一致。接下来的冻融循环过程中，由于升温作用使土体温度升高，硫酸钠晶体部分或大部分溶入水中，由于温度场、毛细水、薄膜水等的作用，使水分重新分布，盐分也随之重新分布。所以第二次循环中，盐分析出的位置也将发生变化。因而这时土体中颗粒间的相互位置和盐胀与以前相比有很大不同，以后的冻融循环过程中也类似，每次盐分析出的位置要发生变化。但随着冻融循环次数的增加，盐分析出、溶解并随水分发生重分布的次数增加，每次降温过程中盐分的析出位置的距离越来越小。

从图11曲线中可以看出，低液限粘土、含砂低液限粘土试样均随着温度的不断降低，盐胀量不断增加。

在升温过程中，随着温度的升高，盐胀量又逐渐减小，但只能回落一部分，在下次冻融循环过程中，盐胀量又继续增加，表现出盐胀累加性。这主要是因为降温阶段硫酸钠晶体在结晶时产生很大的膨胀力^[7]，使土颗粒间距增大，土颗粒发生错动，土体体积膨胀。当升温时硫酸钠晶体溶解后，土颗粒之间失去了相互支撑而形成空缺，此时有部分土颗粒回落。但是，还有一部分土颗粒虽然失去了硫酸钠晶体的支撑，但还存在其它土颗粒与其的相互作用（内摩阻力、粘结力等），因此这一部分土颗粒并不发生回落现象，表现为盐胀累加性。由于天然低液限粘土试样经过多次冻融循环后土体较松，因而使降温过程中消耗在土体内部的盐胀量增加^[8]。在升温过程中土颗粒的回落量加大，表现出回落量大于或等于盐胀量，亦即盐胀量的累加量越来越小，最终总盐胀量趋于稳定值。

粘土质砂试样随着冻融次数的增加，盐胀和冻胀量逐渐减小，并且回落量大于盐胀量，在下次冻融循环过程中，回落量继续大于盐胀量，表现为溶陷累加性。这主要是由于冻融循环使砂砾重新排列，土体变的疏松，孔隙率增大，在自重力的作用下发生沉降。在冻融循环过程中，含砂低液限粘土盐胀累加性最好，低液限粘土次之，粘土质砂的溶陷累加性较好。

典型天然盐渍土最大盐胀率见表4；盐胀率、溶陷率与冻融周期的关系见图12、13。

表 4 典型天然盐渍土最大盐胀率表

Table 4 Salt expansion ratio of crude saline soil						
冻融周期/次	低液限粘土		含砂低液限粘土		粘土质砂	
	最大盐胀量/mm	盐胀率/%	最大盐胀量/mm	盐胀率/%	最大溶陷量/mm	溶陷率/%
1	2.65	0.4410	2.35	0.391	-0.05	0.0083
2	3.33	0.555	3.40	0.566	-0.16	0.0267
3	4.46	0.7430	4.70	0.783	-0.42	0.0700
4	4.95	0.8250	5.07	0.845	-0.67	0.1117
5	5.17	0.8616	5.65	0.941	-0.92	0.1533
6	4.61	0.7680	6.08	1.013	-1.18	0.1967
7	4.24	0.7060	6.16	1.026	-1.41	0.2350

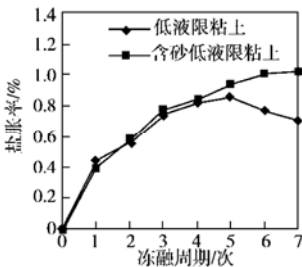


图 12 盐胀率与冻融循环周期关系曲线

Fig. 12 Curves of salt expansion ratio vs. freezing and thawing cycles

如图12可见，低液限粘土、含砂低液限粘土的盐胀率和粘土质砂溶陷率与冻融周期之间的关系符合二次抛物线变化规律，因此采用抛物线进行回归分析。

低液限粘土盐胀率与冻融周期的回归方程:

$$\left. \begin{aligned} Y &= -0.0353x^2 + 0.3375x + 0.0495, \\ R^2 &= 0.9764, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

含砂低液限粘土盐胀率与冻融周期的回归方程:

$$\left. \begin{aligned} Y &= -0.0244x^2 + 0.3072x + 0.0489, \\ R^2 &= 0.9882, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, Y 为盐胀率 (%), x 为冻融循环周期 (次), R 为相关系数。

粘土质砂溶陷率与冻融循环周期的回归方程为

$$\left. \begin{aligned} Y &= 0.0024x^2 + 0.0191x - 0.0084, \\ R^2 &= 0.9928, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, Y 为溶陷率 (%), x 为冻融循环周期 (次), R 为相关系数。

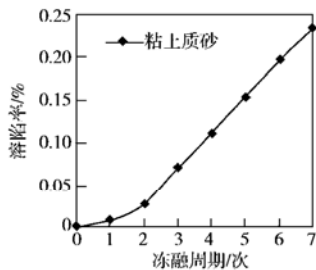


图 13 溶陷率与冻融循环周期关系曲线

Fig. 13 Curves of collapsibility ratio vs. freezing and thawing cycles

从图12中可以看出, 低液限粘土的盐胀率随冻融循环次数的增加不断增大, 但到第五次循环时开始下降。含砂低液限粘土的盐胀率随冻融次数的增加一直增大。从图13中可以看出粘土质砂的溶陷率随冻融次数的增加不断增加。通过多次试验验证, 以上回归方程与试验结果的拟合程度较好。

4 结 语

(1) 低液限粘土前五次冻融循环过程中盐胀过程具有较好累加性, 随着冻融循环次数的增加, 盐胀量增长速度逐渐降低, 从第六次开始, 盐胀量最大值开始下降, 并伴随有溶陷。

(2) 含砂低液限粘土的盐胀过程可以被分为三个阶段: 随着温度的降低盐胀量急剧增加阶段; 温度持续降低盐胀量保持稳定阶段; 升温时盐胀量均匀下降阶段。含砂低液限粘土的盐胀的累加性较好, 前四次冻融循环中, 盐胀量变化较大, 后三次冻融循环中盐胀量变化较稳定, 主要以冻胀为主。

(3) 粘土质砂在冻融循环过程中的变形主要为冻胀和沉降变形, 盐胀较微弱, 基本上没有盐胀累加性, 但具有较好的溶陷累加性。

参考文献:

- [1] 徐学祖. 土体冻胀和盐胀机理[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 100 - 107.(XU Xue-zu. Mechanism of frost heave and salt expansion of soil [M]. Beijing: Science Press, 1995:100 - 107.)
- [2] 徐攸在. 盐渍土地基[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993:7 - 10.(XU You-zai. Saline soil ground [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1993:7 - 10.)
- [3] JTJ051—93 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 1993.(JTJ051 — 93 The methods of soils for highway engineering [S]. Beijing: China Communications Press, 1993.)
- [4] JTJ001—97 公路工程技术标准[S]. 北京: 人民交通出版社, 1997.(JTJ001 — 97 Technical standard of highway engineering [S]. Beijing: China Communications Press, 1997.)
- [5] 高江平, 吴家惠, 杨荣尚. 盐渍土盐胀特性各影响因素间交互作用规律的分析[J]. 中国公路学报, 1997, 10(1): 10 - 15.(GAO Jiang-ping, WU Jia-hui, YANG Rong-shang. Analysis of the interaction laws of all influencing factors upon salt heaving properties of the sulphate salty soil [J]. China Journal of Highway and Transport, 1997,10(1):10 - 15.)
- [6] 褚彩萍, 李 斌. 硫酸盐渍土在多次冻融循环时的盐胀累加规律[J]. 冰川冻土, 1998,20(2):89 - 91.(CHU Cai-ping, LI Bin. Salt expansion accumulation of sulphate salty soil under freezing and thawing cycles [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998,20(2):89 - 91.)
- [7] 李宁远, 李 斌. 硫酸盐渍土及膨胀特性研究[J]. 西安公路学院学报, 1989,7(3):81 - 90.(LI Ning-yuan, LI bin. Study on the expansive characteristics of sulphuric saline soils [J]. Journal of Xi'an Highway University, 1989,7(3): 81 - 90.)
- [8] 高树森, 师永坤. 碎石类土盐渍化评价初探[J]. 岩土工程学报, 1996,18(3):96 - 99.(GAO Shu-sen, SHI Yong-kun. Research on the properties for saline soil of sand angular gravels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996,18(3):96 - 99.)