

文章编号:1671-8879(2008)02-0026-05

喀什地区不同盐渍土冻融变形特性试验

包卫星^{1,2}, 李志农²

(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:为了研究新疆喀什地区天然盐渍土盐胀特性、水盐迁移模式及其相互之间的关系,对喀什地区 12 处天然盐渍土进行了室内基本性质试验分析,选取了典型天然盐渍土,在开放系统中进行了反复冻融循环条件下的试验研究。试验结果表明:低液限粘土盐胀具有较好的累加性,水分重分布与盐分重分布有很好的 consistency;含砂低液限粘土的盐胀过程可以被分为 3 个阶段,离子剖面呈现中间大两端小的趋势;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。

关键词:道路工程;天然盐渍土;盐胀;水分盐分迁移;冻融循环;开放系统

中图分类号:U416.166

文献标志码:A

Testing on transmutation properties of saline soil under freezing and thawing cycles in Kashi, Xinjiang

BAO Wei-xing^{1,2}, LI Zhi-nong²

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

2. Xinjiang Management Bureau of Traffic Construction, Urumqi 830001, Xinjiang, China)

Abstract: In order to research salt expansion laws, the moving patterns of water and salt, and their relation in crude saline soil, the soil samples at twelve places (Kashi, Xinjiang, China) were selected for the experiment of freezing and thawing cycles. The results show that: salt expansion value of low liquid-limit clay can be accumulated; the moving patterns of water and salt of low liquid-limit clay are identical; the salt expansion accumulation of low liquid-limit clay can be separated into three phases; the profile of ion concentration is bigger in the middle and is little in both sides; the transmutation of clay sand mostly occurs in two ways, freezing expansion deformation and settlement deformation under freezing and thawing cycles. 3 tabs, 16 figs, 7 refs.

Key words: road engineering; crude saline soil; salt expansion; water and salt migration; freezing and thawing cycles; open system

0 引言

盐渍土的三相组成与一般土不同,液相中含有

盐溶液;固相中含有结晶盐,尤其是易溶的结晶盐^[1]。中国盐渍土地区公路病害主要有盐胀、翻浆、溶陷和腐蚀等类型^[2]。盐胀作用是盐、土、水和温度

收稿日期:2007-01-10

基金项目:国家西部交通建设科技项目(200331879750)

作者简介:包卫星(1979-),男,新疆乌鲁木齐人,新疆交通建设管理局工程师,长安大学博士研究生, E-mail:baowx@163.com

等因素综合作用的结果^[3]。以往对盐渍土的盐胀特性的研究大多使用当地的土样,人工添加盐分,在封闭系统中,利用小模型试验对其性质进行研究。由于盐渍土的工程特性受地域影响很大,不同地域、不同土类的盐渍土工程性质差别较大,因此上述研究方法的成果难以普遍推广。为此,本文针对新疆喀什地区的盐渍土,利用开放系统中的大尺寸模型试验,研究不同土类天然盐渍土在多次冻融循环条件下的盐胀特性、水盐迁移模式及其相互之间的关系,为喀什地区公路的盐渍土病害防治提供依据。

1 区域地理特征

取样点区域公路自然区划为绿洲-荒漠区,路线所经地带地形平坦,西南高、东北低;在构造上属于塔里木地区的西部,其北为南天山冒地槽的柯坪断隆区,其南为西昆仑冒地槽的昆仑山山前拗陷区。境内属于新生界第四系上更新统纪塔里木盆地南缘的西喀什拗陷区,界于昆仑海西褶皱带之间,呈扇形,东部开阔,西部收缩。中新世代岩层的褶皱构造,在喀什西北的天山山前褶皱的喀什—阿图什背斜与南部昆仑山山前褶皱的英吉沙背斜之间,构成了宽缓的大向斜。而山区则不断隆起,随后山区冰川活动及水流的作用带来大量碎屑物质而形成冲积平原。区域属于暖温带大陆性干旱气候,其主要特点是:四季分明,春季升温快而不稳定,多大风沙和浮尘;夏季长而炎热,水源丰富;秋季降温迅速,温差较大,降水较少,大风和浮尘天气较少;冬季略长天气晴朗,风小、降雪少,低温持续时间长。地下水埋深 1.0~2.0 m,地下水来源于山区裂隙水和河床渗漏。

2 试验方案及试样基本性质

2.1 试验方案

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、含砂低液限粘土和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季的升温过程^[4]。降温采用顶端温

度保持-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相似,在试样筒周围包装保温材料,以防止试样周围环境的热交换。将闷好的土料在 20℃条件下成型,即将准备好的土料分 12 次装入高为 60 cm、内径为 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 段,每段插有温度传感器监控。特制的制冷头的质量模拟上覆荷载。为模拟不同冻融循环周期对盐胀规律的影响,每种土体的冻融循环次数设定为 3、5、7 次,每次冻融循环周期为 48 h。每次试验结束后,去掉制冷头,将土样划分为 5 层,每层分别取出适量土样,按《公路土工试验规程》(JTJ 050-93)进行含水质量分数和易溶盐分析。试验装置如图 1 所示。

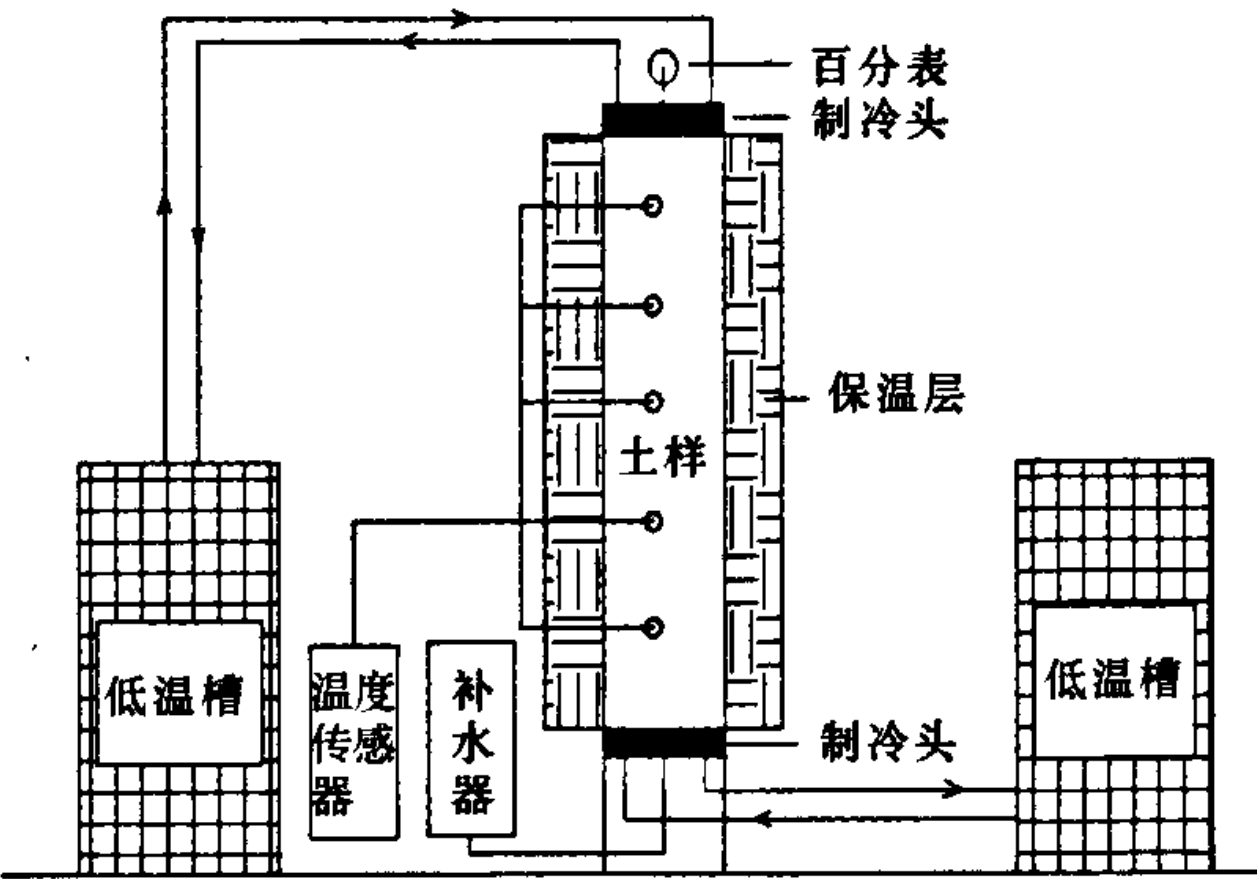


图 1 试验装置

2.2 试验土样基本性质

试验采用重型击实标准,根据《公路工程技术标准》(JTG B01-2003)取其压实度为 0.93,即压实后的干密度为最大干密度的 93%,含水质量分数采用最佳含水质量分数,试样成型温度取 20℃。3 种试样基本参数如表 1、表 2、表 3 所示。

表 1 试样颗粒分析

土 类	不同筛孔(mm)颗粒组成的质量分数/%				
	>0.074	0.074~0.010	0.010~0.005	0.005~0.002	<0.002
低液限粘土	20.19	32.45	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 试样易溶盐的各离子质量分数

土 类	各离子质量分数/%							总含盐质量 分数/%
	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺ +Na ⁺	
低液限粘土	0.003 4	0.006 8	0.905 4	1.025 4	0.337 6	0.206 9	0.304 8	2.854
含砂低液限粘土	0.005 0	0.006 8	0.952 3	1.021 3	0.351 0	0.212 8	0.266 6	3.256
粘土质砂	0	0.013 6	0.358 1	1.004 0	0.256 2	0.069 2	0.291 3	2.124

表3 试样基本参数

土类	液限 $\omega_p/\%$	塑限 $\omega_L/\%$	塑性指数 $I_p/\%$	最佳含水质量分数 $\omega/\%$	最大干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	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

3 试验数据处理及分析

3.1 低液限粘土盐胀和水盐迁移数据及分析

低液限粘土盐胀过程如图2所示。

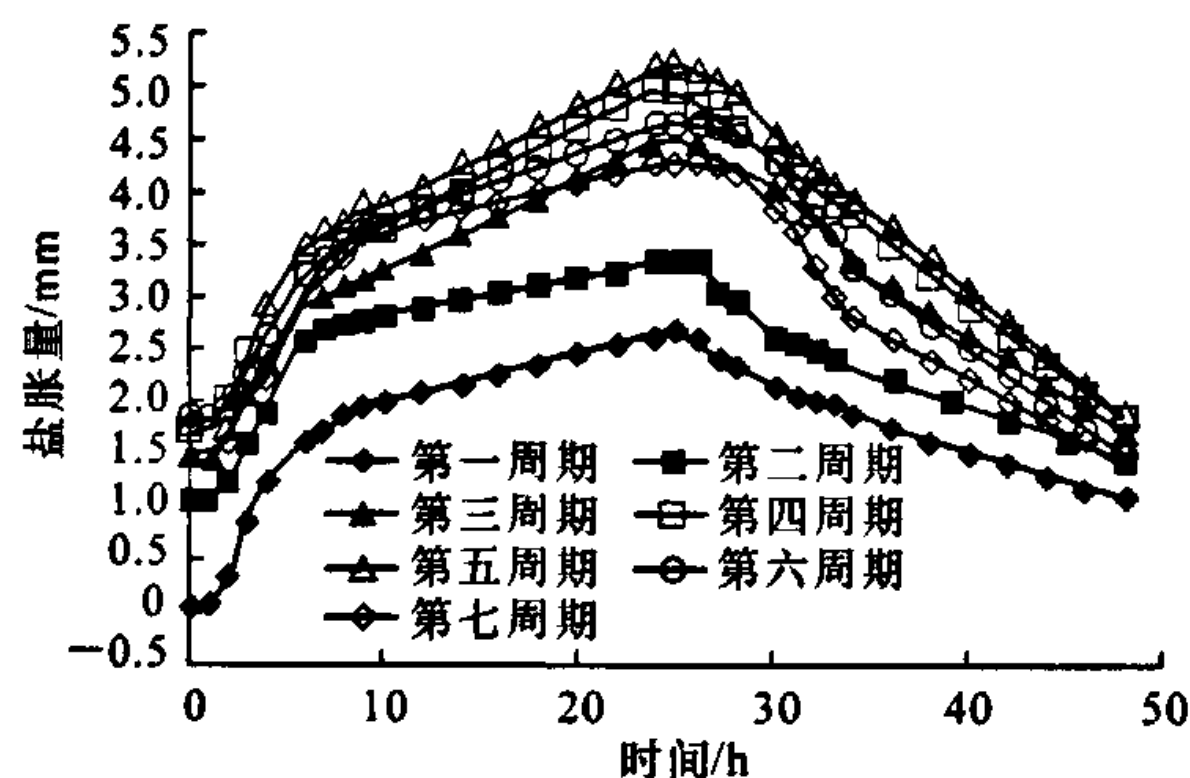


图2 低液限粘土盐胀过程

低液限粘土前5次冻融循环中盐胀过程具有较好的累加性，随着冻融循环次数的增加，盐胀量增长速度逐渐降低。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，使土粒间距增大，土颗粒发生错动，土体体积膨胀。当升温到硫酸钠晶体溶解时，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；还有一部分土颗粒虽然失去了硫酸钠晶体的支撑，但其他土颗粒与其相互作用（内摩阻力、粘结力等）还存在，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。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。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，最终总盐胀量趋于稳定值。

低液限粘土冻融循环3次后的离子质量分数剖面见图3；含水质量分数剖面见图4。

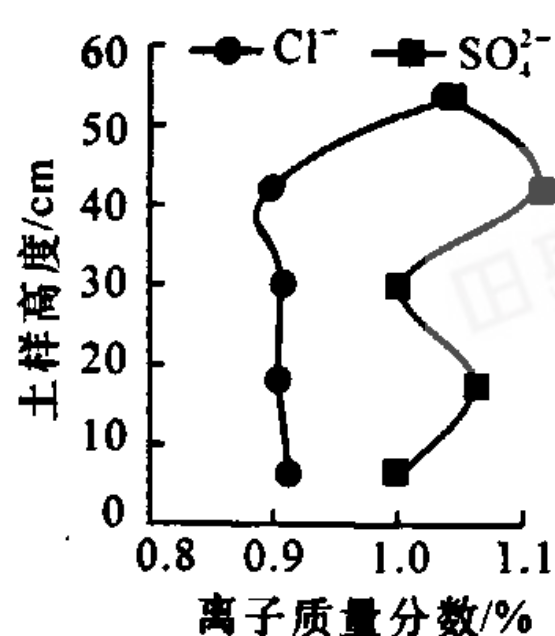


图3 冻融循环3次后的离子质量分数剖面

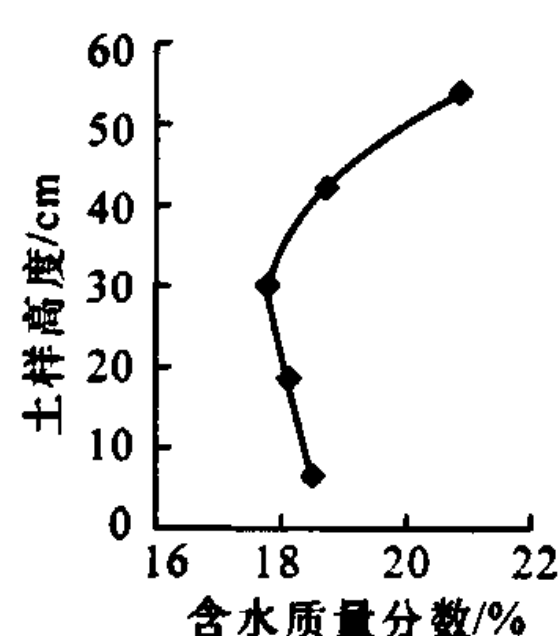


图4 冻融循环3次后的含水质量分数剖面

Cl⁻迁移主要发生在冷端附近，原因是冷端附近温度梯度大，土样含盐质量分数较高，使冰点降低，水分迁移量较大，并且氯化钠的溶解度受温度影响较小，所以随水分一起向冷端迁移。SO₄²⁻的迁移在冷端附近很微弱，主要是由于硫酸钠的溶解度受

温度的影响较大，还未迁移到顶端时就已经被析出。低液限粘土试样经历3次冻融循环后，水分、离子迁移主要发生在靠近冷端的3层。这是因为水分、离子的迁移均需要考虑通道和连续性，而前3次冻融循环中土样底部的迁移通道还未形成。

低液限粘土冻融循环5次后的离子质量分数剖面见图5；含水质量分数剖面见图6。

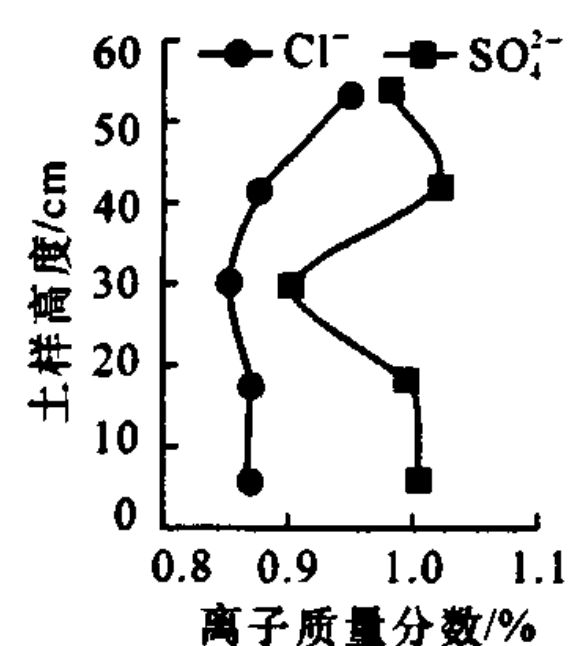


图5 冻融循环5次后的离子质量分数剖面

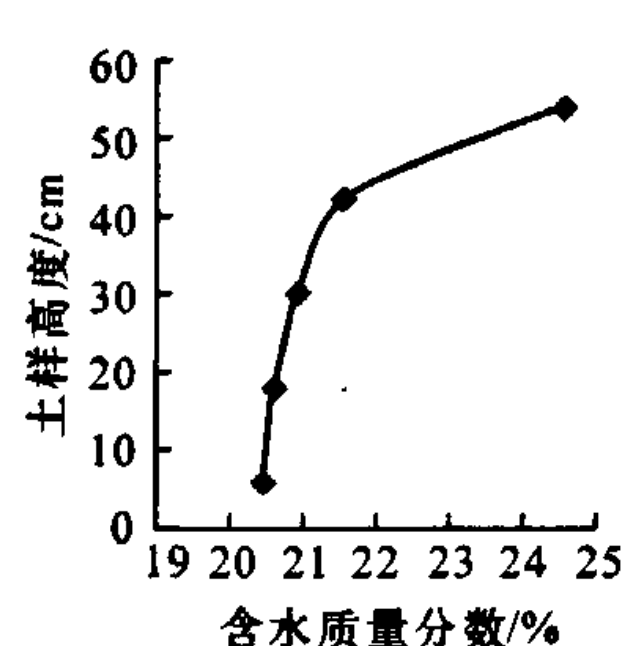


图6 冻融循环5次后的含水质量分数剖面

低液限粘土试样经历5次冻融循环后，各层水分均不断地向冷端方向迁移，说明整体土样的迁移通道已基本形成，顶端含水质量分数不断加大。Cl⁻整体迁移量明显加大，试样上部Cl⁻质量分数明显大于试样下部质量分数；SO₄²⁻制冷头附近的离子质量分数逐渐加大。

低液限粘土冻融循环7次后的离子质量分数剖面见图7；含水质量分数剖面见图8。

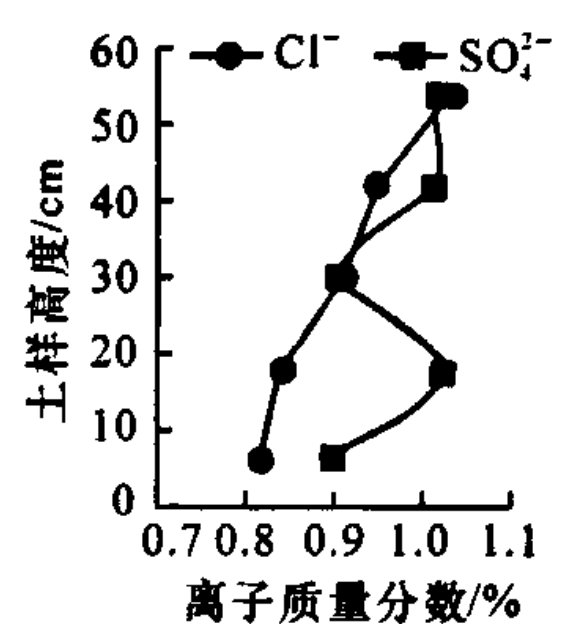


图7 冻融循环7次后的离子质量分数剖面

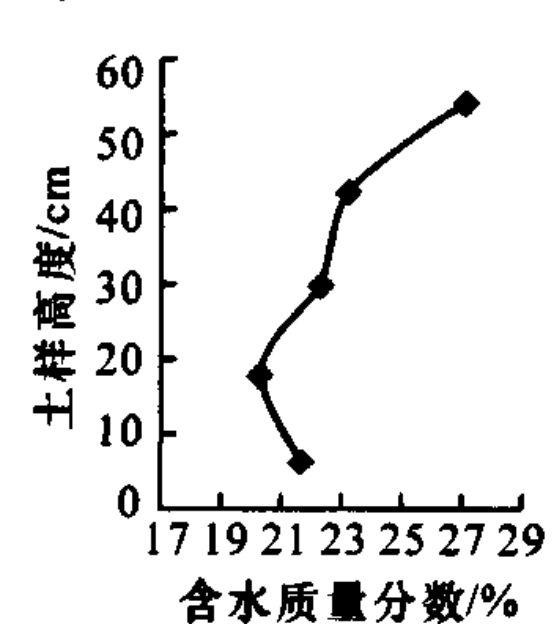


图8 冻融循环7次后的含水质量分数剖面

低液限粘土的水分、盐分总体上是由试样下部向冷端迁移的，但却不是按线性规律沿试样高度等量向上迁移的。其原因主要是土壤的微观结构，如土体孔隙大小、土颗粒的粒径大小及其级配、矿物成分等特征在土体中的分布具有随机性；加之土体中的盐分在降温过程中的结晶受外界因素的影响，如温度、氯化钠和硫酸钠比值等因素，析出量也是随机变化的。这些因素使土体中水分、盐分的迁移和结晶呈现出一定的局部随机波动的特点，使得水分和盐分沿试样高度的分布表现出一定的局部波动性的现象。

低液限粘土试样中 Cl^- 比 SO_4^{2-} 向中、上部的迁移量大。这是因为氯化钠的溶解度随温度变化不大,随着温度的下降, Cl^- 的浓度变化不大,而 SO_4^{2-} 的浓度却不断减小,并且 Cl^- 具有抑制 SO_4^{2-} 迁移的能力,所以降温时水分向试样中、上部迁移时所携带的 Cl^- 较多。低液限粘土试样的盐胀量随冻融周期的增加而逐渐降低,这与试样中、上部 Cl^- 增加有直接的关系。已有研究表明^[5-7],增大 Cl^- 与 SO_4^{2-} 的比值对盐胀有抑制作用。

3.2 含砂低液限粘土盐胀和水盐迁移数据及分析

含砂低液限粘土盐胀过程如图9所示。

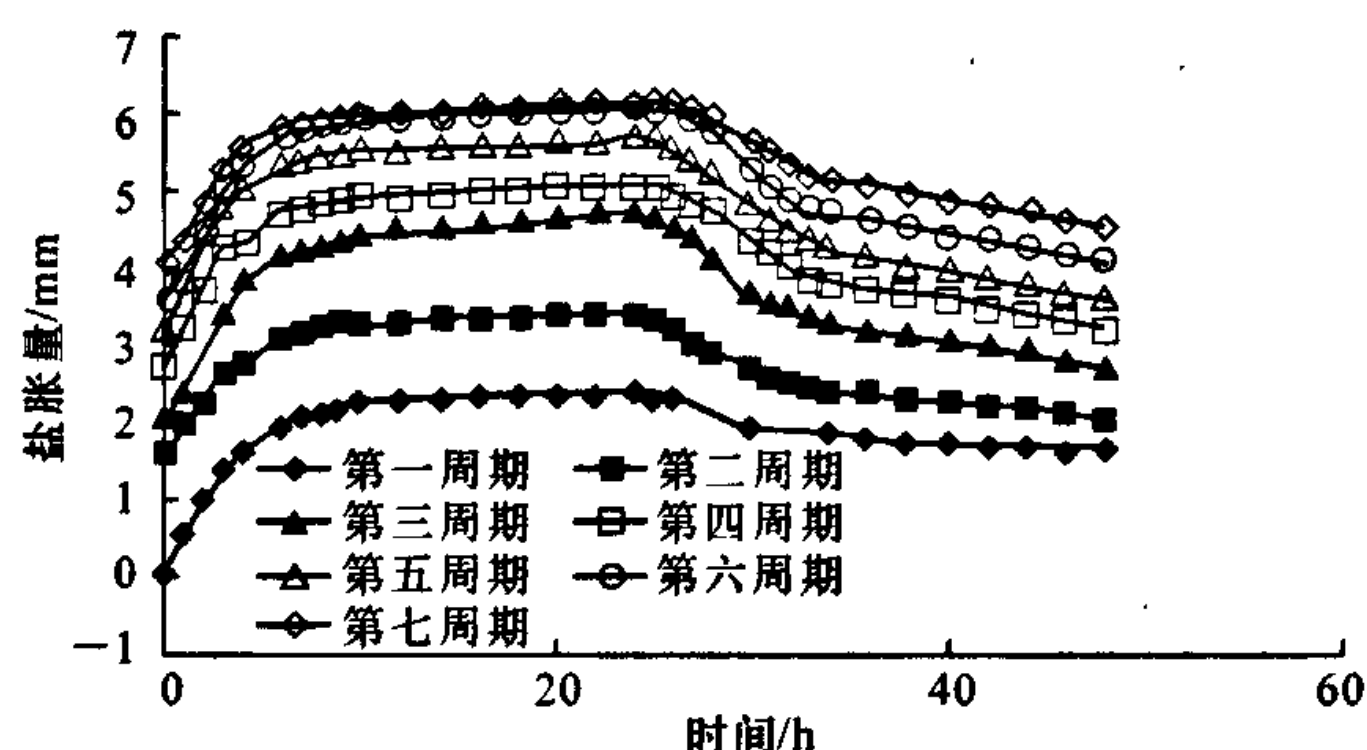


图9 含砂低液限粘土盐胀过程

含砂低液限粘土在降温初始阶段,盐胀急剧增大,当顶端温度保持 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 放置 5 h 后,盐胀速度变缓,盐胀量增加较少。含砂低液限粘土的盐胀过程可分为 3 个阶段:随着温度的降低,盐胀量急剧增加阶段;温度持续降低时,盐胀量保持稳定阶段;温度升高时,盐胀量均匀下降阶段。含砂低液限粘土的盐胀累加性较好,盐胀量变化较大。

第一次降温与直接冷冻的盐胀机理一致。在以后的冻融循环过程中,由于升温作用,硫酸钠晶体部分或大部分溶入水中;由于温度场、毛细水和薄膜水等的作用,使水分、盐分重新分布。第二次循环中,盐分析出的位置将发生变化,因而土体中颗粒间的相互位置和盐胀与以前相比有很大不同,表现为总体盐胀量差异大。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,盐胀量也趋于相似。

含砂低液限粘土冻融循环 3 次后的离子质量分数剖面见图 10;含水质量分数剖面见图 11。

含砂低液限粘土试样经历 3 次冻融循环后,冷端附近水分迁移量最大。 Cl^- 迁移主要发生在中间层位,并且其质量分数明显大于两端,这与低液限粘土不同。 SO_4^{2-} 迁移主要发生在第四层向第三层迁移。含砂低液限粘土冷端处离子质量分数较低,主要是因为含砂低液限粘土渗透性较好。在降温阶段,水分向冷端迁移,盐分随水溶液向上迁移;升温

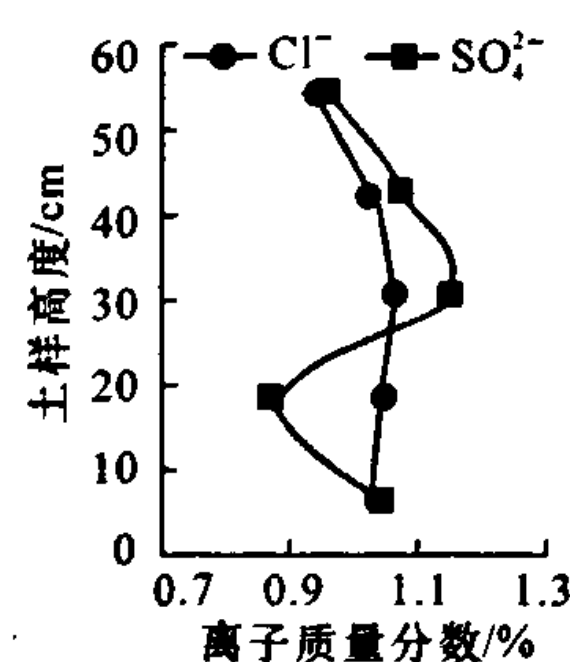


图10 冻融循环3次后的离子质量分数剖面

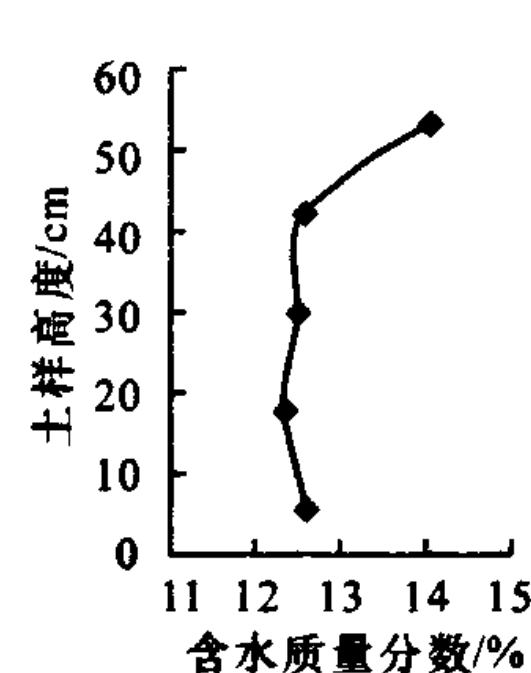


图11 冻融循环3次后的含水质量分数剖面

阶段,由于含砂低液限粘土渗透性较好,水分易于向下渗透,盐分随之也被带走。并且盐分溶解度受温度的影响较大,还未迁移到顶端时已经析出。

含砂低液限粘土冻融循环 5 次后的离子质量分数剖面见图 12,含水质量分数剖面见图 13。

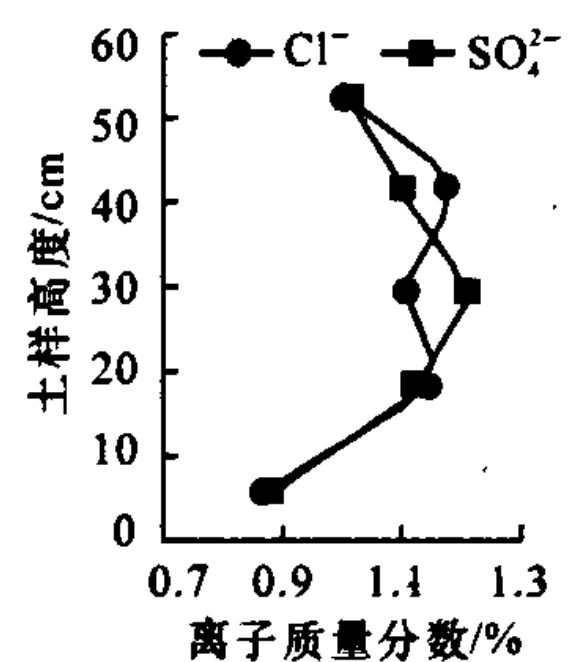


图12 冻融循环5次后的离子质量分数剖面

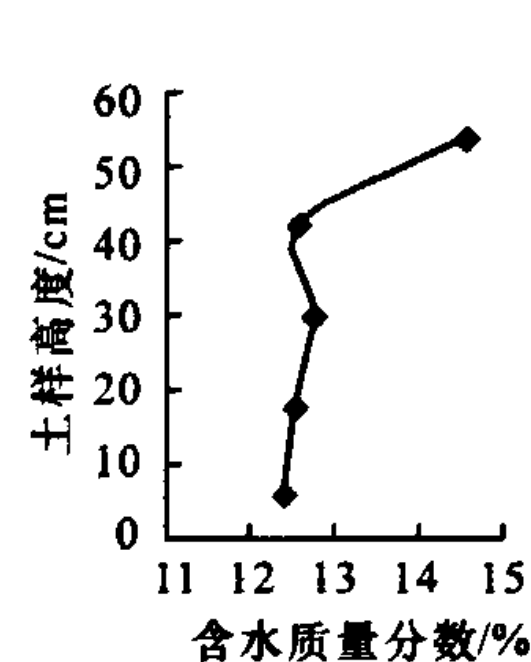


图13 冻融循环5次后的含水质量分数剖面

试样经历 5 次冻融循环后,各层水分均开始不断地向冷端方向迁移,说明整体土样的迁移通道已基本形成,顶端含水质量分数不断加大。

含砂低液限粘土冻融循环 7 次后的离子质量分数剖面见图 14;含水质量分数剖面见图 15。

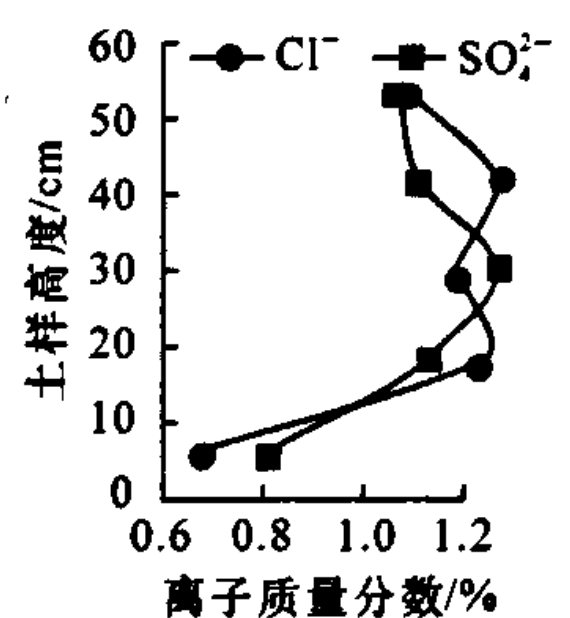


图14 冻融循环7次后的离子质量分数剖面

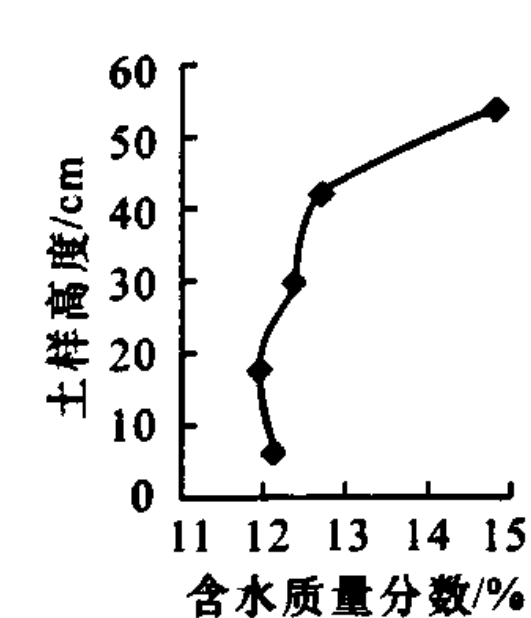


图15 冻融循环7次后的含水质量分数剖面

总体来说,含砂低液限粘土试样中的 SO_4^{2-} 和 Cl^- 均随水分向冷端面迁移,但是离子质量分数分布规律与低液限粘土不同,离子质量分数呈现中间大两端小的趋势。离子剖面图中,最小的离子质量分数有时并非出现在试样底端,而是在底端向上一层中。这是由于在水气迁移过程中,把大量离子仍然留在液态水中。

含砂低液限粘土试样盐分的重分布与水分的重分布并没有完全对应。冻融循环过程中水分向上方迁移量较多时,其盐分的迁移量与水分的迁移量不成正比。含水质量分数呈现上大下小,离子质量分

数呈现中间大两端小的趋势。这主要是因为含砂低液限粘土渗透性较好。降温阶段,水分向冷端迁移,盐分随水溶液向上迁移;升温阶段,由于含砂低液限粘土渗透性较好,水分易于向下渗透,盐分随之也被带走。并且盐分溶解度受温度的影响较大,还未迁移到顶端时已经析出。由于在冻结过程中,受新相形成和溶液结冰脱盐的影响,所以出现离子质量分数呈现中间大两端小的趋势。

含砂低液限粘土试样中 SO_4^{2-} 比 Cl^- 向中、上部的迁移量大,这与氯化钠的溶解度随温度变化不大有关。在升温阶段,水分中 SO_4^{2-} 的浓度较低, Cl^- 浓度较高,水分向下渗透时大量 Cl^- 被带走。含砂低液限粘土试样冻融循环过程中的盐胀量较大,并且累加性较好,这与试样中 SO_4^{2-} 比 Cl^- 向中、上部的迁移量大有直接关系,硫酸钠是盐胀的主导因素。

3.3 粘土质砂盐胀数据及分析

粘土质砂盐胀过程如图 16 所示。

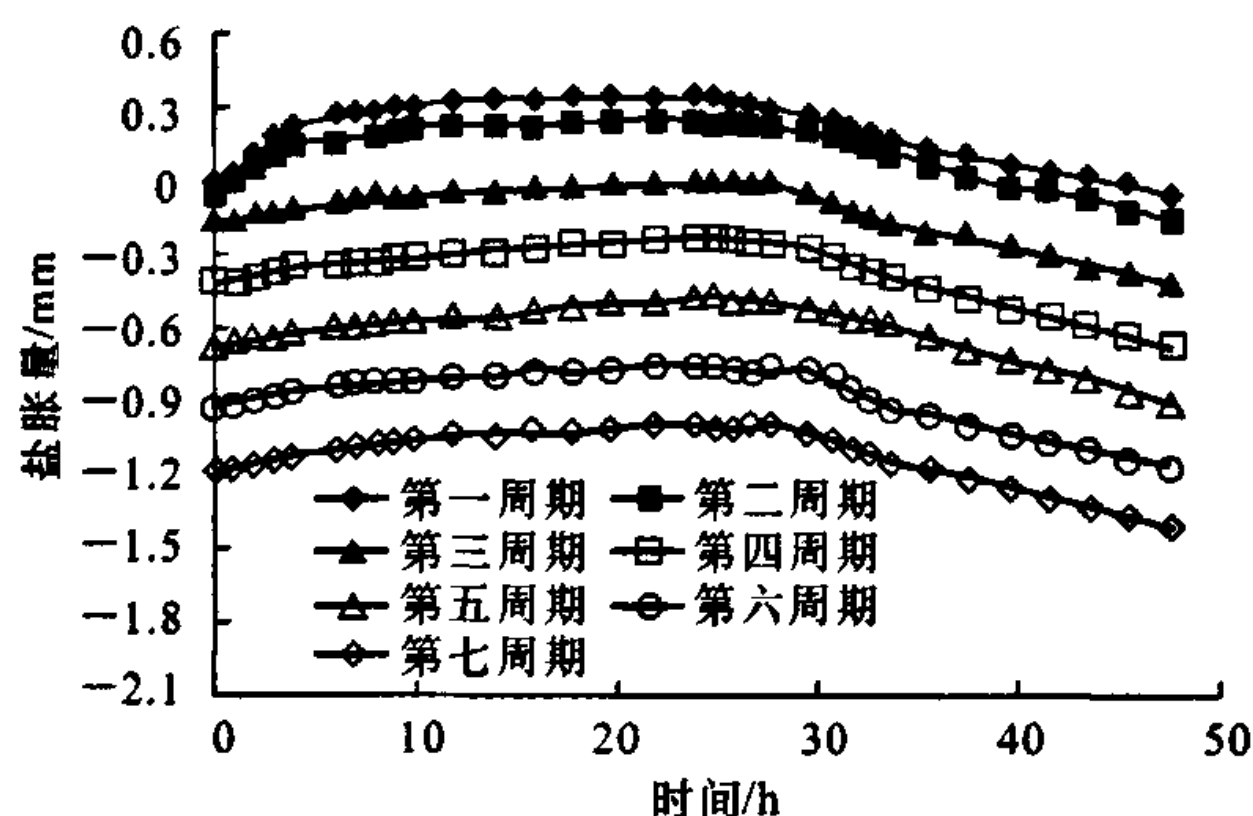


图 16 粘土质砂盐胀过程

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。在变形过程中,天然粘土质砂在前 2 次冻融循环过程中具有盐胀特性,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。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,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。

粘土质砂在冻融循环过程中,水分、盐分迁移很微弱。

4 结 语

(1)喀什地区低液限粘土、含砂低液限粘土类盐渍土均随温度的不断降低,盐胀量不断增加。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,粘土质砂具有较好的溶陷累加性。

(2)低液限粘土前 5 次冻融循环过程中盐胀过程

具有较好的累加性,随着冻融循环次数的增加,盐胀量增长速度逐渐降低。低液限粘土试样盐分的重分布与水分的重分布有很好的一致性,总体来讲,分布是上大下小。试样中 Cl^- 比 SO_4^{2-} 向中、上部的迁移量大。

(3)含砂低液限粘土的盐胀过程可分为 3 个阶段:随着温度的降低,盐胀量急剧增加阶段;温度持续降低时,盐胀量保持稳定阶段;温度升高时,盐胀量均匀下降阶段。含砂低液限粘土试样冻融循环过程中的 SO_4^{2-} 和 Cl^- 均随水分向冷端面迁移,但是离子质量分数分布规律与低液限粘土不同,离子剖面呈现中间大两端小的趋势。试样中 SO_4^{2-} 比 Cl^- 向中、上部的迁移量大。

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

参考文献:

References:

- [1] 徐攸在. 盐渍土地基[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.
- [2] 徐学祖. 土体冻胀和盐胀机理[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [3] 徐学祖, 邓友生. 冻土中水分迁移的试验研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [4] 高江平, 吴家惠, 杨荣尚. 盐渍土盐胀特性各影响因素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.
- [5] 李 芳, 李 斌, 陈 建. 中国公路盐渍土的分区方案[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(6): 12-14.
LI Fang, LI Bin, CHEN Jian. Highway-related dividing scheme of salty soil [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(6): 12-14.
- [6] 李志农, 金昌宁. 新疆典型土类路基干压实试验[J]. 中国公路学报, 2007, 20(2): 23-28.
LI Zhi-nong, JIN Chang-ning. Test on dry compaction of typical earth subgrade in Xinjiang[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(2): 23-28.
- [7] 李 哲, 王芝银, 谢永利. 粗粒土类别的分形图解[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24(6): 15-19.
LI Zhe, WANG Zhi-yin, XIE Yong-li. Fractal graphic of sands categories [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(6): 15-19.