

冻融循环条件下细粒硫酸盐渍土盐冻胀力学特性试验研究

刘海翔^{1,2}, 柴明霞³, 马艳霞^{1,2}, 高 英⁴, 张小荣^{1,2}

(1. 青海大学 土木工程学院, 青海 西宁 810016; 2. 青海省建筑节能材料与工程安全重点实验室, 青海 西宁 810016;
3. 青海大学省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 青海 西宁 810016; 4. 西安交通大学 城市学院, 陕西 西安 710018)

摘要: 硫酸盐渍土在失水或者温度降低的情况下会产生盐胀现象, 严重影响结构物的正常使用. 为研究细粒硫酸盐渍土盐冻胀力学特性, 选取青海乐都公路段二十里铺区沿线硫酸盐渍土, 采用自制试验箱, 开展室内冻融循环试验, 分析含盐量及冻融循环次数对法向盐冻胀力的影响. 试验结果表明: 冻融循环过程中, 土中盐溶液向土体上表面迁移, 同时析出的盐结晶和冰结晶使土样中硫酸钠溶液浓度增大, 从而引起土体膨胀变形. 压实系数为 0.93、含水率为 20% 的细粒硫酸盐渍土盐冻胀力随着含盐量和冻融循环次数的增加而增大, 盐冻胀力的增长趋势随着冻融循环次数的增加逐渐降低; 在一个冻融循环周期内, 按照盐冻胀力中盐胀占比及冻胀占比随温度变化的规律, 将盐冻胀力变化分为四个阶段: 盐胀阶段、盐冻胀耦合阶段、冻胀阶段、融化阶段, 并测得含盐量为 1.5%~4.0% 的细粒硫酸盐渍土冻结温度在 2~−5 °C 内变化, 且冻结温度随着含盐量的增加而降低; 盐冻胀力冻结峰值与残余值随着冻融循环次数的增加而增加, 表明细粒硫酸盐渍土的盐冻胀力具有累加性, 且含盐量越大累加性越强.

关键词: 细粒硫酸盐渍土; 盐冻胀力; 冻融循环; 含盐量

中图分类号: TU445

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)01-0023-07

Experimental study on salt frost heaving mechanical properties of fine-grained sulfate saline soil under freeze-thaw cycle conditions

LIU Haixiang^{1,2}, CHAI Mingxia³, MA Yanxia^{1,2}, GAO Ying⁴, ZHANG Xiaorong^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China;

2. Qinghai Provincial Key Laboratory of Energy-saving Building Materials and Engineering Safety, Xining 810016, China;

3. State Key Laboratory of Sanjiangyuan Ecology and Plateau Agriculture and Animal Husbandry Jointly Established by Qinghai University, Xining 810016, China; 4. City College, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710018, China)

Abstract: Sulfate saline soil will produce the salt swelling phenomenon in the case of water loss or temperature reduction, which seriously affects the normal use of structures. In order to study the mechanical properties of salt frost heaving of fine-grained sulfate saline soil, the sulfate saline soil along the Ershilipu area of Qinghai Ledu highway section was selected, and the indoor freeze-thaw cycle test was carried out by using the self-made test box to analyze the effects of salt content and the number of freeze-thaw cycles on the normal salt-frost heave force. The experiment results show that during the freeze-thaw cycle, the salt solution in the soil migrates to the upper surface of the soil, and the salt crystals and ice crystals precipitated at the same time increase the concentration of sodium sulfate solution in the soil sample, thus causing the soil to expand and deform. The salt frost heaving force of fine-grained sulfate saline soil with compaction coefficient of 0.93 and water content of 20% increases with the increase of salt content and freeze-thaw cycles, and the growth trend of salt frost heaving force decreases with the increase of freeze-thaw cycles. In a freeze-thaw cycle, according to the law of salt expansion ratio and frost expansion ratio changing with temperature in salt frost heave force, the change of salt frost heave force is divided into four stages: salt expansion stage, salt frost heave coupling stage, frost heave stage and melting stage. The freezing temperature of fine-grained sulfate saline soil with a salt content of 1.5%~4.0% varies from 2~−5 °C, and the freezing

收稿日期: 2022-10-27

修回日期: 2022-11-02

基金项目: 青海省科技厅基础研究计划项目(2023-ZJ-756); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2021JQ-892)

第一作者: 刘海翔(1997—), 女, 硕士生, 主要研究细粒硫酸盐渍土盐冻胀特性. E-mail: lhx15891498958@163.com

通信作者: 柴明霞(1978—), 女, 硕士, 副教授, 主要研究无机材料. E-mail: cmxwsg@163.com

temperature decreases with the increase of salt content. The freezing peak value and residual value of salt frost heave force increase with the increase of freeze-thaw cycles, indicating that the salt frost heave force of fine-grained sulfate saline soil is cumulative, and the greater the salt content, the stronger the accumulation.

Key words: fine-grained sulfate saline soil; salt frost heaving force; freeze-thaw cycle; salt content

硫酸盐渍土在失水或者温度降低的情况下会产生盐胀现象,严重影响道路、水渠等构筑物的正常使用^[1-3]。在影响盐渍土盐冻胀特性的众多因素中含盐量、含水率、压实度、颗粒级配等是影响盐冻胀的主要因素^[4-6],其中硫酸钠的存在及其含量是影响盐冻胀变形的最主要原因之一^[7]。杨晓华、路建国、冯瑞玲等^[8-10]研究发现土-水-盐-热-力各因素之间存在一定的交互作用,并采用多场耦合理论开展硫酸盐渍土盐胀规律的分析研究;在冻融循环过程中盐胀与冻胀耦合产生盐冻胀,盐胀与冻胀相互影响、相互制约共同引起土体膨胀,但盐胀与冻胀的界限较模糊^[11]。张卫兵、牛玺荣、张莎莎等^[12-14]将盐渍土在降温过程中发生的盐冻胀现象分为三个阶段:盐胀阶段、盐胀+冻胀阶段、冻胀阶段。应赛、周凤玺等^[15]开展盐渍土冻结试验研究,发现盐冻胀总变形受盐胀与冻胀强弱关系的影响,在盐胀变形与冻胀变形相等时,盐冻胀总变形最小。于天佑^[16]的研究则表明在硫酸钠含量不变时,温度越低,盐胀占比越大;温度不变时,硫酸钠含量越高,盐胀占比也越大,故温度和硫酸盐含量是影响盐胀占比的主要因素。文桃等^[17]进行了不同含盐量条件下硫酸盐渍土的多次冻融循环试验,结果表明在无水源补给的条件下,硫酸盐渍土的盐冻胀量(包括峰值和残余量)均随冻融循环次数的增加而增大,且具有显著的累加性。Wan Xusheng等^[18]研究了土样的冻结温度,提出了黏土冻结温度计算公式。

目前,对于硫酸盐渍土盐冻胀特性的研究多集中于分析不同因素影响下的盐冻胀变形规律,而刘娉慧等^[19]针对渠道面板因盐胀压力产生破坏的工程问题,进行了硫酸盐渍土的法向膨胀力和非盐渍土的冻胀力的对比,结果表明硫酸盐渍土在

降温过程中盐胀力占据主导,具有较大的法向盐胀压力。因此,进行细粒硫酸盐渍土盐冻胀力学特性的研究,对渠道面板、路面等荷载较小的构筑物的设计计算具有重要的工程意义。

本研究选取青海乐都公路段二十里铺区沿线硫酸盐渍土进行室内冻融循环试验,分析含盐量及温度对细粒硫酸盐渍土盐冻胀力学特性的影响。

1 试样基本参数与试验方案

1.1 土样基本情况

在取土场地 1m 深度处选取典型土样,土样呈红棕色,块状土样较多,且表面有盐结晶析出,较为坚硬。依据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)对所取土样进行基本物理性质试验,颗粒级配曲线见图 1,物理性质指标见表 1。

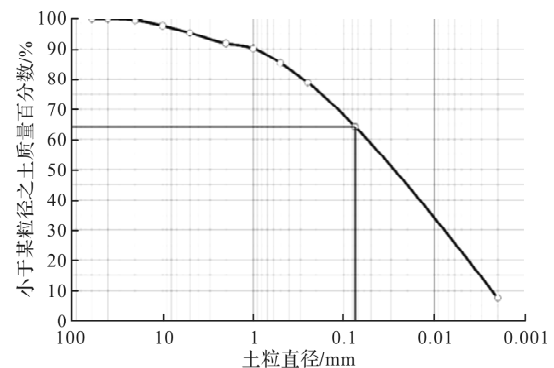


图 1 颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle grading curve

根据颗粒级配曲线得到该土样的中值粒径 d_{30} 为 0.031 45 mm,限制粒径 d_{60} 为 0.069 87 mm,有效粒径 d_{10} 为 0.005 84 mm,则不均匀系数 C_u 为 11.964 04,曲率系数 C_c 为 2.424 02,该土样土粒不均匀($C_u > 5$),且级配曲线连续($1 \leq C_c \leq 3$),土样级配良好。

表 1 物理性质指标

Tab. 1 Physical property index

土类	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_P/\%$	塑性指数 I_P	液性指数 I_L	最大干密度 $\rho_d/g \cdot cm^{-3}$	最优含水率 $/\%$
细粒土	25.6	17.9	7.4	0.03	1.73	18.8

试样中细粒土(粒径小于 0.075 mm)质量占土样总质量的 64.26%,塑性指数为 7.4,液性指数为 0.03,依据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)最终判定该土样为含砂低液限黏土(CLS)。

1.2 试验仪器

试验采用自制试验箱,选用具有防腐功能的不锈钢材料制作,试验箱内径为 35 cm,高度为 80 cm,其结构如图 2 所示。采用 VWE-3 振弦式

土压力计测量冻融循环过程中土体产生的盐胀力及盐冻胀力. 土压力计测量范围为 0~3 000 kPa, 分辨率为 0.025%, 测温范围为-40~+80 ℃, 测温精度为±0.5 ℃. 控温设备采用低温冷冻库, 控温范围为-40~30 ℃, 精度±0.1 ℃.

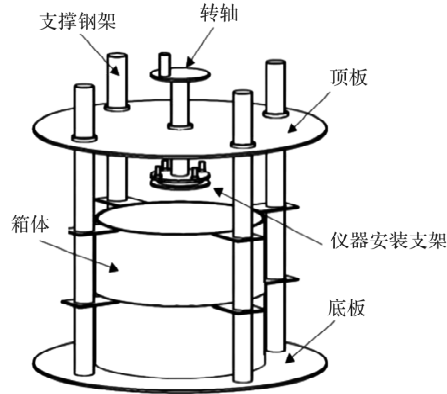


图 2 试验箱结构图
Fig. 2 Structure diagram of test chamber

1.3 试样制备

1.3.1 洗盐

洗盐是研究重塑盐渍土的重要过程, 洗盐后盐渍土中含盐量降低, 各离子含量减少. 在洗盐后的土样中加入无水硫酸钠粉末配置试验所需盐渍土, 可减少其他离子对试验过程中盐冻胀力的影响.

洗盐^[20]时, 将所取土样放入桶内, 加入纯水, 控制土水比为 1:5, 充分搅拌 3 min 后静置一昼夜, 吸出上清液, 重复上述步骤反复洗盐. 将每次吸出的上清液, 利用电导率测定仪测定其电导率在 20 ℃时小于 1 000 μs/cm, 认为洗盐后盐渍土基本达到试验要求. 再采用化学试剂进一步判定最后一次的洗盐效果, 取两个试管, 分别加入 2 ml 上清液, 其中一个试管中加入浓度分别为 100 ml/L 的硝酸和 50 ml/L 的硝酸银溶液, 另一个试管中加入 100 ml/L 的盐酸和 50 ml/L 的氯化钡溶液(硝酸银溶液可去除氯离子的干扰, 氯化钡溶液能去除银离子的干扰, 上述两种组合可产生白色沉淀, 干扰氯离子和硫酸根离子的测定), 观察试管中是否有白色沉淀发生, 若有白色沉淀表明洗盐不彻底, 需重复上述洗盐操作, 无白色沉淀则表示洗净, 可烘干后开展后续试验.

对土样进行化学成分及总含盐量试验, 土样洗盐前后总含盐量和各离子含量见表 2.

测得洗盐前总含盐量为 4.1%, 其中 Cl⁻/SO₄²⁻ 为 0.005 5, 小于 0.3, 属于强硫酸盐渍土; 洗盐后总含盐量为 0.37%, 其中 Cl⁻/SO₄²⁻ 为

0.117 6, 小于 0.5%, 属于硫酸盐渍土, 无盐胀性.

表 2 洗盐前后含盐量及离子成分
Tab. 2 Salt content and ionic composition before and after salt washing

土样名称	总含盐量/%	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Mg ⁺	K ⁺	Na ⁺
g · kg ⁻¹							
洗盐前	4.1	0.21	0.09	16.65	0.07	0.06	0.21
洗盐后	0.37	0.16	0.04	0.34	0.02	0.05	0.11

1.3.2 土样配制方法

土样制备过程: (1)将洗盐后的土样碾碎, 取 2 mm 筛下土在 108 ℃烘箱中烘干; (2)按盐与干土的质量比称取一定量的硫酸钠粉末与土样充分搅拌, 混合后的土样在室温条件下密封放置, 使盐分与土样充分混合; (3)在混合后的土样中分层加入蒸馏水, 使土样与水分充分接触, 密封放置 24 h 后使用.

1.4 试验方案

盐渍土地基产生盐胀的主要原因是土中的硫酸钠在温度与湿度的作用下结合 10 个水分子形成结晶(Na₂SO₄ · 10H₂O 芒硝), 产生膨胀^[21-22], 含盐性质、含盐量、含水量、温度等是影响盐渍土盐胀、盐冻胀的主要因素. 本试验中, 为研究含盐量及温度对盐冻胀力的影响, 针对不同含盐量土体, 在相同含水率及压实系数下, 温度 20~-20 ℃范围内进行 7 次冻融循环试验, 具体试验方案见表 3. 其中试样 1 为洗盐后盐渍土, 其硫酸钠含量小于 0.5%, 土样表现为非盐胀性, 可用于纯冻胀研究, 进行对照试验.

表 3 试验方案
Tab. 3 Test scheme

试样编号	含盐量/%	含水率/%	压实系数	循环周期/次	变温范围/℃
1	0.37				
2	1.5				
3	2.0				
4	2.5	20	0.93	7(降温升温均 24 h, 48 h 为一个循环周期)	20~-20
5	3.0				
6	3.5				
7	4.0				

试验时, 将配置好的土样分层装入试验箱内并击实, 试样高度 80 cm, 直径 35 cm. 在试验箱四周及底面包裹保温层, 保证土样在试验过程中自上而下单向冻融. 通过试验箱上方转轴将土压力计与土体表面充分接触, 并通过土压力计读测

系统测定试验过程中产生的法向盐冻胀力(以下简称盐冻胀力), 设置采样时间为1次/h。

2 试验结果与分析

2.1 冻融循环过程中温度变化规律

试验降温采用低温冷冻库控制, 在24 h内使得土样温度达到 -20°C , 然后再经过24小时, 使得土样在室温条件下自然升温到 20°C , 故降温过程的温度变化比升温过程更为稳定, 每个冻融循环周期内温度变化均呈现先急后缓的规律, 冻融循环过程中温度变化与时间关系曲线见图3。

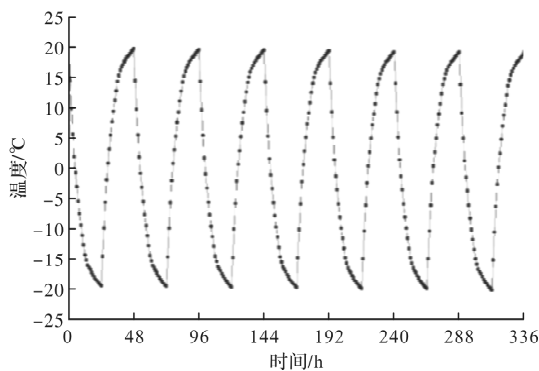


图3 冻融循环过程中温度变化与时间关系曲线

Fig. 3 Relationship curve between temperature change and time during freeze-thaw cycle

2.2 不同含盐量硫酸盐渍土盐冻胀力变化规律

在冻融循环试验过程中, 试样1只发生冻胀, 不发生盐胀, 其余试样在盐胀与冻胀耦合作用下产生盐冻胀力。不同含盐量细粒硫酸盐渍土试样在冻融循环过程中冻胀力、盐冻胀力变化曲线见图4。

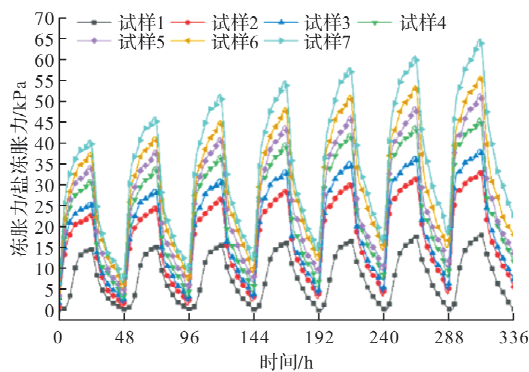


图4 不同含盐量硫酸盐渍土冻融循环过程中冻胀力/盐冻胀力变化曲线

Fig. 4 Variation curve of salt frost heaving force of sulfuric acid saline soil with different salt content during freeze-thaw cycle

由图4可知, 试样1在冻融循环过程中产生的冻胀力随着温度的降低而增加, 随温度的升高而减小。整个降温过程中产生的冰结晶填充土体内部的孔隙, 对土颗粒的排列影响较小。随着冻融循环次数的增加, 冻胀力变化较小, 说明冻胀具有一定累加性, 但累加量不大。随着含盐量和冻融循环次数的增加, 其余试样的盐冻胀力呈增长趋势, 且含盐量越大的盐渍土盐冻胀力增量越大。不论含盐量大小, 硫酸盐渍土的盐冻胀力表现为明显的累加性。不同冻融循环周期的冻胀力、盐冻胀力变化规律相似, 选择单个冻融循环周期内(0~48 h)冻胀力/盐冻胀力变化曲线, 如图5所示。

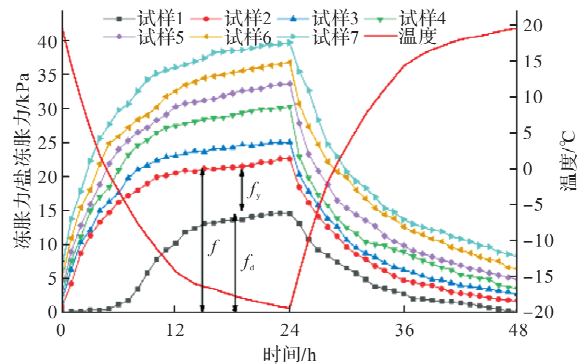


图5 单个冻融循环周期内(0~48 h)盐冻胀/冻胀力变化曲线

Fig. 5 Change curve of salt frost heave/frost heave force in a single freeze-thaw cycle (0~48 h)

盐胀占比(冻胀占比)、盐胀力(冻胀力)与盐冻胀力三者之间的关系可用公式(1)和(2)来表示。

$$K_y = f_y / f \quad (1)$$

$$K_d = f_d / f \quad (2)$$

式中: K_y 表示盐胀占比; K_d 表示冻胀占比; f 表示盐冻胀力; f_d 表示冻胀力; f_y 表示盐胀力。

以试样1、试样2、试样7为例, 计算其在一个冻融循环周期内(0~48 h)的盐胀占比、冻胀占比, 计算结果见表4。

土的冻结温度是指土内自由水开始冻结的温度, 盐渍土的冻结温度是指土中盐溶液开始结晶析出的温度。通过图3、4、5及表4分析可得: 试样在冻结过程中(温度达到 -15°C 以前)均存在一个温度节点, 该节点前后曲线增长速率变化较大。在该温度节点以前, 试样盐冻胀力呈迅速增长状态, 盐胀占比占据主要地位; 在该节点后, 盐冻胀力持续增长, 盐胀占比逐渐减弱, 冻胀占比逐渐增强。根据盐渍土在冻结过程中的变化规律, 认为该温度节点为对应土样的冻结温度, 不同土样冻结温度见表5。

表 4 不同试样盐胀占比、冻胀占比
Tab. 4 The proportion of salt heave and frost heave of different samples

试样	温度/℃	f/kPa	f_d/kPa	f_y/kPa	$K_d/\%$	$K_y/\%$
试样 1	1.9	0.31	0.31	0	100	0
	-3.1	1.17	1.17	0	100	0
	-14.3	10.18	10.18	0	100	0
	-16.0	12.35	12.35	0	100	0
	-19.2	14.65	14.65	0	100	0
	-14.5	13.14	13.14	0	100	0
	19.6	0.12	0.12	0	100	0
试样 2	1.9	13.31	0.31	12.99	2.37	97.63
	-3.1	16.26	1.17	15.09	7.21	92.79
	-14.3	20.58	10.18	10.39	49.50	50.50
	-16.0	20.83	12.35	8.47	59.30	40.70
	-19.4	22.67	14.65	8.01	64.64	35.36
	-14.5	18.47	13.14	5.32	71.18	28.82
	19.5	1.73	0.12	1.61	6.94	93.06
试样 7	1.9	25.67	0.31	25.35	1.23	98.77
	-3.1	29.87	1.17	28.70	3.93	96.07
	-14.3	36.14	10.18	25.95	28.18	71.82
	-16.0	37.04	12.35	24.69	33.34	66.66
	-18	39.63	14.65	24.97	36.98	63.02
	-14.5	35.55	13.14	22.40	36.98	63.02
	19.6	8.24	0.12	8.12	1.46	98.54

表 5 不同土样冻结温度
Tab. 5 Freezing temperature of different soil samples

试样名称	含盐量/%	冻结温度/℃
试样 2	1.5	2~3
试样 3	2.0	1~-1
试样 4	2.5	0~-1
试样 5	3.0	-1~-2
试样 6	3.5	-2~-3
试样 7	4.0	-4~-5

由表 5 可得: 含盐量越大, 土样冻结温度越低. 同一土体不同位置处冻结温度相同, 但不同位置处土体达到冻结温度所需时间存在略微差异^[23]. 本次试验中土样冻结温度在 2~-5℃ 范围内变化.

结合图 3、4、5 和表 4 数据, 可得试样 1 在 -15℃ 以后冻胀力的变化速率与其余含盐量试样变化速率相似, 故将 -15℃ 作为盐冻胀过程中的第二个温度节点. 在此温度节点前, 盐胀与冻胀共同作用引起土体膨胀; 在此温度节点后, 土体膨胀主要由冻胀引起.

综上所述, 将单个冻融循环周期中的盐冻胀力变化曲线划分为四个阶段:

第一阶段称为盐胀阶段, 该阶段由初始温度开始, 至冻结温度结束. 在此阶段中盐胀占比远大于冻胀占比, 由于硫酸钠的存在土体还未达到冻结温度^[24], 故盐胀占主导地位, 盐冻胀力随着冻结时间的增加迅速增大, 且含盐量越大, 盐冻胀力越大、增长速率越快.

第二阶段称为盐冻胀耦合阶段, 该阶段由冻结温度开始至 -15℃ 结束. 随着冻结时间的增加盐胀占比逐渐减小, 冻胀占比逐渐增大. 由于不同含盐量试样的含水率、压实系数相同, 在此阶段土样的盐冻胀力变化规律相似, 但由于不同含盐量土样在第一阶段的累积盐冻胀力不同, 且在此阶段土样也会产生一定量的盐胀, 故不同试样在此阶段的盐冻胀力变化速率不同.

第三阶段称为冻胀阶段, 该阶段由 -15℃ 开始至 -20℃ 结束, 盐冻胀力随着冻结时间的增加而缓慢增大, 当温度达到 -20℃ 时存在冻结峰值. 该阶段冻胀占比远大于盐胀占比, 表明冻胀占主导地位, 含盐量对试样盐冻胀力的影响下降, 不同含盐量试样盐冻胀力的增长规律相似.

第四阶段称为融化阶段, 该阶段由 -20℃ 开始至 20℃ 结束. 在此阶段, 盐冻胀力随温度的升高逐渐减小, 当单个冻融循环周期结束时, 盐冻胀力存在残余值.

2.3 盐冻胀力与含盐量、冻融循环次数之间的关系

绘制不同含盐量试样峰值盐冻胀力、残余盐冻胀力与冻融循环次数的关系曲线, 见图 6 和图 7. 在 7 次冻融循环后, 不同含盐量盐渍土的盐冻胀力在降温阶段的峰值盐冻胀力及升温融沉后的残余盐冻胀力均表现有明显的累加性.

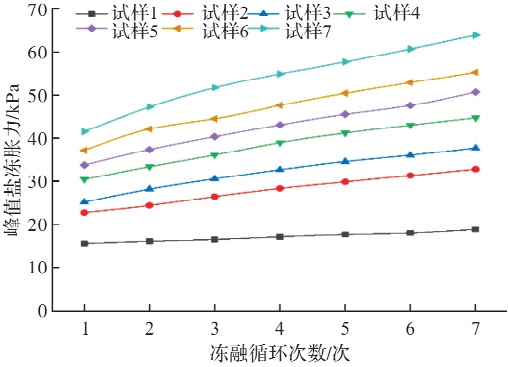


图 6 不同试样峰值盐冻胀力与冻融循环次数关系曲线
Fig. 6 Relation curve between peak salt frost heaving force and freeze-thaw cycles of different samples

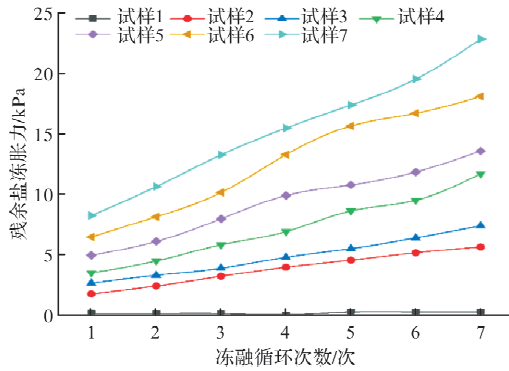


图7 不同试样残余盐冻胀力与冻融循环次数关系曲线

Fig. 7 Relation curve between residual salt frost heaving force and freeze-thaw cycles of different samples

由图6、图7可得, 试样1第一次冻融循环的冻结峰值为15.55 kPa, 残余值为0.12 kPa, 第七次冻融循环的冻结峰值为18.73 kPa, 残余值为0.23 kPa, 其增量分别为20.45%、91.66%。试样2第一次冻融循环的冻结峰值为22.67 kPa, 残余值为1.73 kPa, 第七次冻融循环的冻结峰值为32.78 kPa, 残余值为4.63 kPa, 其增量分别为44.59%、167.63%。试样7在第一次冻结的峰值为37.06 kPa, 残余值为7.73 kPa, 第七次冻结的峰值为55.19 kPa, 残余值为22.86 kPa, 其增量分别为48.92%、195.73%。结果表明, 冻结峰值和残余值随着冻融循环周期的增加而增大, 且含盐量越大的土样增长速率越快, 冻结峰值与冻融循环次数之间呈线性增大的关系。含盐量越大的试样其峰值增量越大, 累加性越大。

3 盐冻胀力变化机理分析

盐渍土的固相由土颗粒, 易溶盐和难溶盐三种物质组成^[25], 盐渍土中的可溶盐具有易变性和可逆性, 当盐渍土的含水量达到一定量时, 盐分就会发生固相与液相之间的转化。在冻融循环过程中, 盐渍土中的盐溶液又会发生固态和液态之间的转化。硫酸盐渍土盐冻胀过程中土体内部孔隙、结晶等变化见图8。

土样降温方式为由表及里单向降温, 降温过程中盐分发生迁移, 聚集和重分布, 导致土样内部盐分分布不均匀。由于试验所配置土样均为洗盐后盐渍土配置, 且在制样过程中将土样充分搅拌, 认为冻融循环前土样内部不同高度处盐分均匀分布, 含盐量相同。取试样2~试样7第七次冻融循环结束后自底面起不同高度处土样进行含盐量测定, 分析冻融循环前后土样含盐量变化, 见图9。

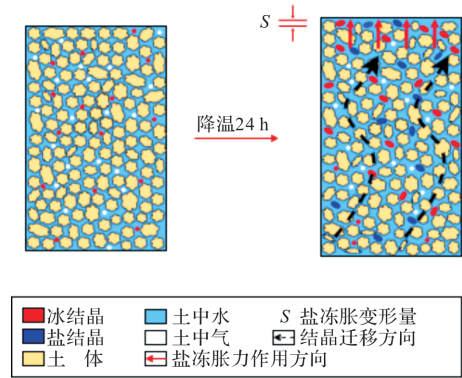


图8 细粒硫酸盐渍土盐冻胀过程中的相变示意图

Fig. 8 Schematic diagram of phase change of fine Sulfate saline soil during salt frost heave

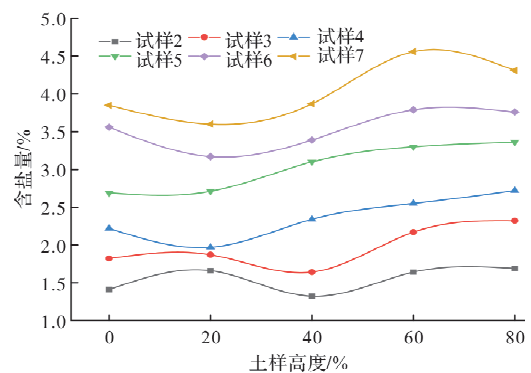


图9 冻融循环前后土样含盐量变化

Fig. 9 Salinity changes of soil samples before and after freeze-thaw cycle

由图9可得: 冻融循环过程中的盐分总体存在向上迁移的趋势, 含盐量越大的盐渍土盐分迁移量越大, 顶部与底部的含盐量差越大。温度降低的过程中土样温度由表面向内部快速下降, 产生冰结晶同时盐分溶解度降低, 土体中硫酸钠溶液浓度增大。随着时间的推移土体内部产生大量的盐结晶, 含盐量越大的盐渍土盐分析出量越大, 结晶占土体的体积越大。且含盐量越大, 产生的盐结晶越多、盐分迁移量亦大于含盐量小的盐渍土。降温过程中, 土中的盐溶液逐渐向上表面迁移, 硫酸钠溶液析出结晶, 盐结晶逐渐占据土体内部孔隙, 剩余结晶引发土体膨胀变形。

4 结论

本研究针对压实系数为0.93, 含水率为20%的不同含盐量细粒硫酸盐渍土, 开展冻融循环条件下室内盐冻胀试验, 对盐冻胀力变化规律进行分析, 得到以下结论:

(1)在整个冻融循环过程中, 含盐量越大的硫酸盐渍土盐冻胀力越大, 单个冻融循环周期的盐冻胀力增长速率呈现先快后缓, 最后趋于稳定增长的趋势。

本次试验中硫酸盐渍土冻结温度在 $2\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内变化,且含盐量越大的盐渍土冻结温度越低;

(2)在同等条件下,盐冻胀力的冻结峰值、残余值随着含盐量和冻融循环次数的增加而增大,含盐量越大的试样其残余值越大,累加性越明显;

(3)在冻融循环过程中,土中盐溶液向土体上表面迁移,并析出盐结晶和冰结晶,从而引起土体发生膨胀变形,产生盐冻胀力。

参考文献 References

- [1] SCHIRO M, Ruiz-Agudo E, Rodriguez-Navarro C. Damagemechanisms of porous materials due to in-pore salt crystallization[J]. Physical Review Letters, 2012, 109(26): 265-503.
- [2] MA Qinguo, LAI Yuanming, ZHANG Mingyi. Freezing-thawing behaviour of saline soil with various anti-saline measures[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2019, 23(10): 1178-1202.
- [3] ZHANG Shasha, ZHANG Jiansuo, GUI Yilin, 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.
- [4] 司培国,曹博,王茂靖,等.基于高铁变形控制的粗颗粒硫酸盐渍土盐胀影响因素的试验研究[J].价值工程, 2019, 38(32): 188-190.
SI Peiguo, CAO Bo, WANG Maojing, et al. Experimental study on the influence factors of soil-salt swelling in sulphuric acid based on deformation control of high speed iron [J]. Value Engineering, 2019, 38(32): 188-190.
- [5] 张莎莎,刘瑞瑞,王永威.基于BP模型的粗粒亚硫酸盐渍土盐胀特性敏感因素研究[J].建筑科学与工程学报, 2021, 38(3): 107-116.
ZHANG Shasha, LIU Ruihui, WANG Yongwei. Research on sensitive parameters of salt expansion characteristics for coarse-grained sulfite saline soil based on BP model[J]. Journal of architecture and civil engineering, 2021, 38(3): 107-116.
- [6] 官滢,王正君,赵安平.压实度对苏打型盐渍土冻融特性影响研究[J].森林工程, 2020, 36(5): 112-118.
GONG Ying, WANG Zhengjun, ZHAO Anping. Influence of compaction degree on the freeze-thaw characteristics of soda saline soil [J]. Forest Engineering, 2020, 36(5): 112-118.
- [7] NIXON J F, LEM G. Creep and strength testing of frozen saline fine-grained soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1984, 21(3): 518-529.
- [8] 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 Xiaohua, ZHANG Shasha, LIU Wei, et al. Research progress on engineering properties of coarse-grained saline soil[J]. Journal of Transportation Engineering, 2020, 20(5): 22-40.
- [9] 路建国,万旭升,刘力,等.降温过程硫酸钠盐渍土水-热-盐相互作用过程[J].哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(2): 126-134.
LU Jianguo, WAN Xusheng, LIU Li, et al. Water-heat-salt interaction process in sodium sulfate-saline soil during a cooling process[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(2): 126-134.
- [10] 冯瑞玲,蔡晓宇,吴立坚,等.硫酸盐渍土水-盐-热-力四场耦合理论模型[J].中国公路学报, 2017, 30(2): 1-10, 40.
FENG Ruiling, CAI Xiaoyu, WU Lijian, et al. Theoretical model on coupling process of moisture-salt-heat-stress field in sulfate salty soil[J]. Chinese Journal of Highways, 2017, 30(2): 1-10, 40.
- [11] ESPINOSA R M, FRANKE L, DECKELMANN G. Phase changes of salts in porous materials: crystallization, hydration and deliquescence[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(8): 1758-1773.
- [12] 张卫兵,杨生财,马君泽,等.单次降温条件下硫酸盐渍土盐冻胀试验研究[J].地下空间与工程学报, 2019, 15(4): 1017-1023.
ZHANG Weibing, YANG Shengcai, MA Junze, et al. Experimental study on salt expansion and frost heaving characteristics of sulfate saline soil under the condition of unilateral cooling[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(4): 1017-1023.
- [13] 牛玺荣,李志农,高江平.盐渍土盐胀特性与机理研究进展[J].土壤通报, 2008, 39(1): 163-168.
NIU Xirong, LI Zhinong, GAO Jiangping. Study progress in salt expansion characteristic and mechanism of saline soil[J]. Soil Bulletin, 2008, 39(1): 163-168.
- [14] 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 Shasha, DAI Zhiren, YANG Xiaohua, 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.
- [15] 应赛,周凤玺,文桃,等.硫酸盐渍土降温过程中的盐胀与冻胀特性[J].长江科学院院报, 2021, 38(6): 116-122.
YING Sai, ZHOU Fengxi, WEN Tao, et al. Salt expansion and frost heave in cooling sulfate saline soil[J]. Journal of the Yangtze River Academy of Sciences, 2021, 38(6): 116-122.
- [16] 于天佑.细粒硫酸盐渍土盐冻胀特性及其对路基变形的影响研究[D].兰州:兰州交通大学, 2020.
YU Tianyou. Study on frost heaving characteristics of fine grain sulphuric acid saline soil and its effect on roadbed deformation[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020.
- [17] 文桃,曹亚鹏,应赛,等.多次冻融循环下硫酸盐渍土盐-冻胀特性试验研究[J].中外公路, 2018, (2): 49-54.
WEN Tao, CAO Yapeng, YING Sai, et al. Experimental study of characteristics of salt-frost heave under freezing and thawing cycles of sulph [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, (2): 49-54.