

DOI: 10.11779/CJGE201705021

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

肖泽岸^{1, 2}, 赖远明¹, 尤哲敏¹

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 冻融循环作用下, 土体孔隙溶液中的盐分不断结晶与溶解, 水分不断冻结与融化, 使得含盐土体的变形不断变化。以青藏高原粉质黏土为研究对象, 对洗盐后的素土分别加入质量分数为 0%, 1%, 2%, 3% 的 Na_2SO_4 盐, 研究了封闭系统下 Na_2SO_4 盐渍土在冻融循环作用下的变形规律。结果表明, 在冻融循环过程中, 不含盐土体和较低含盐量的土体表现出明显的冻胀融沉现象, 且土体的融沉大于其的冻胀。而较高含盐量的土体在冻结过程中, 土体的冻—盐胀作用显著, 融沉现象却不再明显, 甚至消失。利用多孔介质力学的方法, 探讨了 Na_2SO_4 盐渍土在冻融循环作用下土体的变形规律, 得出土体的变形由冰水/盐分相变、热胀冷缩、相变过程中的密度变化等引起的变形综合而成。结合 Na_2SO_4 溶液的性质, 还分析了 Na_2SO_4 的结晶机理, 从而为进一步研究盐渍化冻土中的变形机理提供一些参考。

关键词: 冻融循环; Na_2SO_4 ; 盐渍化冻土; 变形; 多孔介质力学

中图分类号: TU445; TU448 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)05-0953-08

作者简介: 肖泽岸(1989-), 男, 博士研究生, 主要从事寒区盐渍土方面的理论和试验研究。E-mail: xzalfx@163.com。

Experimental study on impact of salt content on deformation characteristics of sodium sulfate soil under freeze-thaw conditions

XIAO Ze-an^{1, 2}, LAI Yuan-ming¹, YOU Zhe-min¹

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Due to the sharp fluctuations of temperature in cold regions, salt may crystallize and water may freeze, resulting in the deformation of soil. In order to investigate the impact of salt content on soil deformation under freeze-thaw cycles, the freeze-thaw tests on soil with different salt contents are conducted. The desalinized Qinghai-Tibet silty clay is used, then different salt contents 0%, 1%, 2%, 3% are added, respectively. By testing the deformation of soil in a close system, the impact of salt content on deformation characteristics of sodium sulfate soil is studied. The results demonstrate that the frost heave and thaw settlement occur when the soil is desalinated or the salt content is 1%, and the thaw settlement is larger than the frost heave. However, when the salt content of soil is higher, though the frost heave still exists, the thaw settlement decreases and even disappears. Based on the porous media mechanics, the mechanism of soil deformation is discussed under freeze-thaw cycles. It is obtained that the deformation of soil is the results of combined effect of many factors, such as the phase change effect, thermal expansion and contraction and so on. In addition, considering the sodium sulfate properties, the crystallization mechanism of sodium sulfate is investigated. The research will help to provide some theoretical basis for the studies on saline frozen soil.

Key words: freeze-thaw cycle; sodium sulfate; saline frozen soil; deformation; poromechanics

0 引言

中国西北地区分布着大量以硫酸盐和氯盐为主的盐渍土^[1], 在剧烈的温差作用下, 土体中孔隙水不断冻结与融化, 易溶盐不断结晶和溶解, 造成土体强度和稳定性下降, 进而破坏土体结构, 增加各类工程建设的难度。随着西北地区各类建设的深入实施, 寒区

盐渍化冻土的研究受到了越来越多的重视。

迄今为止, 已有诸多学者对冻融循环作用下的盐

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41230630); 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDY-SSW-DQC015); 中科院寒旱所青年人才基金项目(Y451231001); 中科院寒旱所冻土工程国家重点实验室自主课题(Y452F71001)
收稿日期: 2016-07-18

渍土开展了研究, 其研究主要包括以下两个方面。一是冻融作用下的水盐迁移研究。徐学祖等^[2-3]通过室内试验研究了正冻土中盐分的迁移。陈肖柏等^[4]提出在低温和蒸发条件下盐渍土中盐分由暖端向冷端迁移。张殿发等^[5]通过室内冻融模拟试验, 研究了盐渍土在冻融过程中土体的剖面结构、内部各层温度变化、水盐迁移过程。邴慧等^[6]研究了盐渍土在单向冻结、正弦波曲线和负温循环作用下的盐渍土中的水盐重分布状况及土的干密度变化规律。Cary^[7]和 Padilla 等^[8]研究了土体在含有溶质条件下土体的冻胀变形规律。Baker 等^[9]研究了冻结砂土中盐分重分布的过程。二是冻融作用下土体物理力学性质研究。Anderson 等^[10]研究了含盐土体中的液态水含量与土体温度的关系。Banin 等^[11]研究了不同盐类的水溶液冻结温度的计算公式。陈肖柏等^[12]研究了强盐渍土在冻融过程中土体的无侧限抗压强度变化规律。包卫星等^[13]利用天然状态下低液限黏土的室内冻融试验, 探究了天然盐渍土在经历不同的冻融周期后, 水盐迁移规律和强度变化情况。王海涛等^[14]依托罗布泊地区的盐渍土, 研究了强盐渍土在冻融循环条件下的工程性质, 研究表明在冻融循环后盐渍土渗透系数增加明显, 结构破坏, 密度降低。然而, 以往对盐渍土的大多数研究忽略了盐分本身的性质, 从而使相应的研究成果受地域性和土的类型影响很大, 导致一些研究成果难以普遍推广。尽管已经对盐渍土有较多的研究, 但是冻融循环作用下含盐量对土体变形规律影响的研究较少。

为了探究含盐量对冻融循环作用下土体变形的影响规律, 本文通过室内试验, 对洗盐后的素土分别以 0%, 1%, 2%, 3% 的梯度加入 Na_2SO_4 盐, 研究了封闭系统下含盐土的变形规律, 并结合 Na_2SO_4 的性质分析了土体在冻融循环作用下的变形机理, 旨在为盐渍化冻土的变形机理提供一些参考。

1 试验方案

以青藏高原粉质黏土为研究对象, 首先将粉质黏土进行洗盐处理。洗盐时, 在一定量的土样中注入去离子水, 充分搅拌均匀, 静置直至上部土样浸出液澄清, 抽取上部澄清的土样浸出液, 然后再注入去离子水, 重复上述步骤多次。每次抽取土样浸出液时, 用电导率笔测量土样浸出液的电导率, 并根据电导率与土样含盐量的换算关系得到土体在洗盐后的含盐量。当换算得出的土体含盐量小于 0.1%^[15]时, 认为土体中盐分已清洗干净。此时洗盐后土体的物理特性如图 1 所示; 其次对洗盐后的素土分别以 0%, 1%, 2%, 3% 的梯度加入 Na_2SO_4 盐。在加水配置的过程中, 先在盐中添加水, 直至盐完全溶解, 然后将溶液和素土按

一定比例配置成同一含水率(20%)、不同含盐量的土样。然后, 用密封袋将土样密闭保存 1 d, 使土体中的水分和盐分分布均匀。最后将配置好的某一含盐量的土样分层装入直径为 10 cm 和高度为 12.2 cm 的钢罐中, 并用压样机将土样高度压到 10.5 cm, 试样干密度为 1.75 g/cm^3 , 再用千斤顶将试样压入到试验所用的有机玻璃罐中。

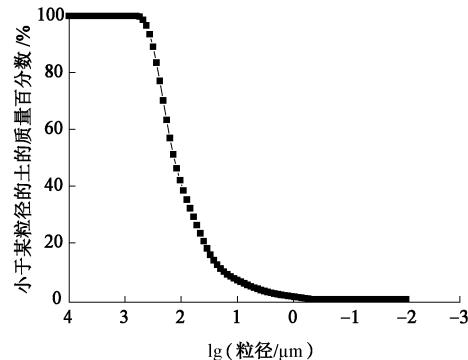


图 1 土体粒径分布

Fig. 1 Particle-size distribution of soil

试验设备采用 DRP305 冻融循环试验机(分辨率 0.1℃, 精度为 $\pm 0.3^\circ\text{C}$), 如图 2 所示。该试验机控温范围为 $-40^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$, 温度探头(精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$)分别以 1 cm 间距布置, 土体顶部用位移计(精度为 $\pm 0.001 \text{ mm}$)测量土体在冻融循环过程中的位移变化。为保证不同含盐量的土样有同样的初始条件, 首先将土样在 12.5°C 恒温 12 h, 此时, 测得土体各位置处温度为 12.5°C , 故认为土体中的易溶盐已经充分结晶。在这个温度条件下, 含盐量为 1% 的土样中盐分会全部溶解, 而 2% 和 3% 含盐量的土样在正温融化过程中依然会有盐晶体存在。然后将顶板温度调为 -20°C , 底板温度调为 1°C , 使土样产生单向冻结, 单向冻结时间持续 24 h, 单向冻结结束后, 将冻融循环试验仪关闭, 使土样在常温下融化, 融化时间持续 12 h。试验过程中, 重复以上步骤, 测量土体在冻融循环 4 次的变形规律, 在土体冻融试验结束后, 分层取样, 测量土体的含水率分布。



图 2 试验装置图

Fig. 2 Picture of testing device

2 试验结果分析

2.1 土体温度场变化

在冻融循环过程中, 由于土体的外界温度变化条件相同, 所以土体的温度表现出相似的变化规律, 尽管土体中盐分含量不同, 但盐分对土体的温度场影响不太明显, 究其原因在于土体中盐分含量较低, 导致盐分对土体热容和导热系数^[17]的影响不太明显。选取不含盐土体单向冻结过程中的温度场变化如图 3 所示。

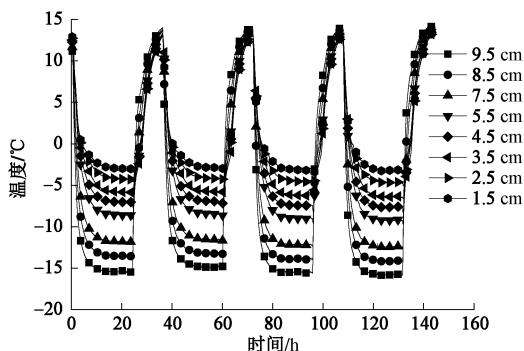


图 3 土体不同部位处温度变化

Fig. 3 Variation of temperature at different locations

从图 3 的温度场变化来看, 土样在降温过程中在 10 h 左右土体各层温度变得稳定。此时土样处于单向冻结状态。在土样单向冻结 24 h 后, 关闭仪器, 土样在室温下融化, 12 h 之后, 土体的温度场又逐渐变得稳定。随着土体冻融循环的进行, 土体靠近顶板的探头温度呈现微弱下降趋势, 这可能是因为土体在冻融循环过程中, 土体颗粒发生重组, 土的结构发生变化所致。

2.2 冻融循环作用下含盐量对土体变形的影响

图 4 为不同含盐量的土体在冻融循环过程中的变形曲线, 可以看到, 在不含盐的条件下, 土体在冻融过程中表现出冻胀融沉的特性, 主要原因是土体在冻结过程中, 水分相变成冰, 体积膨胀了 9%, 冰水相变产生了巨大的冰压力, 在冰压力的作用下, 土体发生瞬时变形, 而且在冻结过程中, 水分会由土水势高的暖端向土水势低的冷端迁移^[3], 在迁移水的作用下, 土体发生分凝冻胀。而在融化过程中, 伴随着土体温度的升高, 冰的含量逐渐减少, 冰压力逐渐消失, 冰变为水后体积减小, 使得土体在融化过程中发生融沉现象。在冻融过程中, 土体中的土颗粒发生重组, 土体的结构发生变化, 导致土体在此过程中融沉大于土体的冻胀。此现象说明在冻结过程中, 未冻土段的土颗粒在冰压力作用下挤压重组并发生固结压密, 同时

说明土体的初始干密度小于土体经历冻融循环后的干密度。还可以看到, 在冻结过程中, 当土体先发生快速冻胀, 随后土体的变形又有所减小。融化过程中, 土体先快速融沉, 随后土体的变形又有轻微增大。这可能是因为土体在剧烈的温度波动下所表现出来的热胀冷缩现象。

含盐条件下的土体在冻融循环过程中的变形特性与不含盐土不同, 在含盐量为 1% 的条件下, 土体依然表现出冻胀融沉特性。而在土体含盐量为 2% 和 3% 的条件下, 土体在冻融循环过程中的变形却有所不同。土体在冻结过程中变形快速增加, 说明在冻结过程中有冰晶体和盐晶体产生。而在融化过程中, 土体的沉降量却明显减小, 甚至消失, 这可能是因为在含盐量较高的情况下, 融化过程中只有冰晶体融化变为水, 而盐晶体尽管有部分溶解, 却依然存在于土体孔隙中的缘故, 也就是说融化过程中盐胀力依然存在, 所以土体在融化过程中融沉值几乎不存在。从含盐量为 2% 和 3% 的土体的变形来看, 土体在冻融过程中, 土体的变形逐渐增加, 表明在此含盐量条件下, 土体内部存在着残余变形。

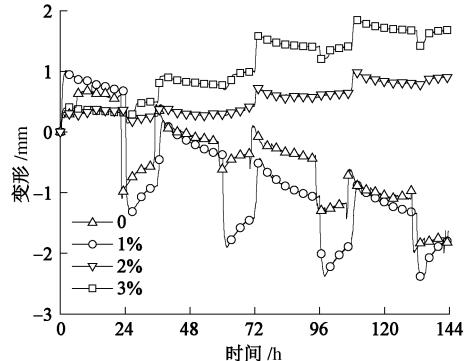


图 4 不同含盐量的土体在冻融循环作用下的变形

Fig. 4 Deformation of soil with different salt content under freeze-thaw cycles

2.3 冻融循环作用后土体的含水率分布

在冻融循环作用后, 不同含盐量情况下, 土体的含水率分布曲线如图 5 所示, 可以看到土体的含水率变化不明显。这主要有两方面原因: ①尽管土体在冻结过程中迁移的水分由暖端向冷端迁移, 但在融化的过程中, 孔隙水发生耗散, 冻结区的水分向未冻区迁移, 从而导致土体含水率变化不明显。②在降温过程中, 孔隙溶液中的 Na_2SO_4 结晶为 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 析出, 析出的盐晶体减少了用于迁移的液态水的含量, 而且晶体填充孔隙使得土体孔隙率减小, 从而使得水分迁移减弱。两个方面共同作用使得试验完成后, 土体各个位置处含水率变化不大。

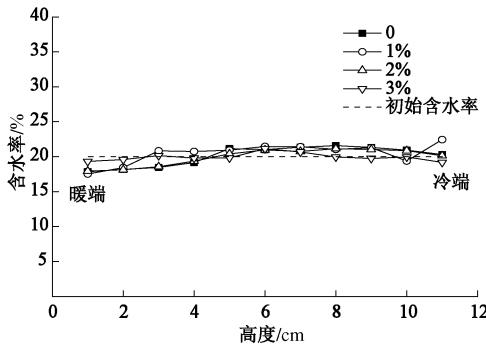


图 5 试验结束后土体含水率分布

Fig. 5 Distribution of water content of soil after tests

2.4 机理分析

土体在冻融循环过程中, 孔隙溶液中的相变会对土体的变形产生明显的影响, 为分析土体的变形机理, 根据多孔介质力学^[16-17], 在冰晶体和盐晶体共同产生的条件下, 土体中应力可以表示为

$$\sigma_{ij} = \left(K - \frac{2}{3}G \right) \varepsilon \delta_{ij} + 2G\varepsilon_{ij} + \sum_{i=C,L,I}^n b_i(P_i - P_0)\delta_{ij} + 3\alpha K(T - T_0)\delta_{ij}, \quad (1)$$

$$\varphi_C = b_C\varepsilon + \frac{P_C - P_0}{N_{CC}} + \frac{P_L - P_0}{N_{CL}} + \frac{P_I - P_0}{N_{CI}} + 3\alpha_C(T - T_0)\delta_{ij}, \quad (2)$$

$$\varphi_L = b_L\varepsilon + \frac{P_C - P_0}{N_{CL}} + \frac{P_L - P_0}{N_{LL}} + \frac{P_I - P_0}{N_{LI}} + 3\alpha_L(T - T_0)\delta_{ij}, \quad (3)$$

$$\varphi_I = b_I\varepsilon + \frac{P_C - P_0}{N_{CI}} + \frac{P_L - P_0}{N_{LI}} + \frac{P_I - P_0}{N_{II}} + 3\alpha_I(T - T_0)\delta_{ij}. \quad (4)$$

式中 K 和 G 分别为土体的体积模量和剪切模量, b_i 和 N_{ij} 分别为广义 Biot 系数和广义 Biot 模量, α 为土体的热膨胀系数。 σ_{ij} 和 ε 分别为土体的应力和应变。 φ_i 为 i 组分的体积变化。若假定各相之间的相互影响可以忽略, 也就是一相的增加, 不会引起另一相体积改变, 所以当 $i \neq j$ 时, $\frac{1}{N_{ij}} = 0$ 。当孔隙溶液中有相变产生时, 土体孔隙变化为

$$\sum_{i=C,L,I}^n \rho_i \phi_i = \sum_{i=C,L,I}^n \rho_i (\phi_0 S_i + \varphi_i), \quad (5)$$

式中, ϕ_0 为土体的初始孔隙率, S_i 为孔隙溶液中 i 组分的体积分数, 假定土体孔隙溶液的各组组分不可压缩, 并且忽略其随温度变化导致的体积变化, 孔隙溶液中各组分密度可以简化为

$$\begin{aligned} \rho_I &= \rho_{I0}, \rho_C = \rho_{C0}, \\ \rho_L &= \rho_{L0} \left(1 + \sum_j \varpi_j (c_j - c_{j0}) \right) \end{aligned} \quad , \quad (6)$$

式中, ϖ_j 为 j 组分引起的孔隙溶液密度变化系数。 c_j

为孔隙溶液中 j 组分的浓度, c_{j0} 为初始孔隙溶液中 j 组分的浓度。则

$$\begin{aligned} \sum_{i=C,L,I}^n \rho_i \phi_i &= \rho_{L0} \left(\frac{\rho_{I0}}{\rho_{L0}} - 1 \right) \phi_0 S_I + \rho_{L0} \left(\frac{\rho_{C0}}{\rho_{L0}} - 1 \right) \phi_0 S_C + \rho_{L0} \phi_0 S_0 + \\ &\quad \rho_{L0} \sum_j \varpi_j (c_j - c_{j0}) \phi_0 S_L + \sum_{i=C,L,I}^n \rho_i \varphi_i \quad . \end{aligned} \quad (7)$$

在没有补水的条件下, 孔隙溶液的质量在相变过程中不变, 则

$$\sum_{i=C,L,I}^n \rho_i \phi_i = \rho_{L0} \phi_0 S_0 \quad . \quad (8)$$

将式 (8) 代入式 (7), 得到

$$\begin{aligned} \rho_{L0} \left(\frac{\rho_{I0}}{\rho_{L0}} - 1 \right) \phi_0 S_I + \rho_{L0} \left(\frac{\rho_{C0}}{\rho_{L0}} - 1 \right) \phi_0 S_C + \sum_{i=C,L,I}^n \rho_i \varphi_i + \\ \rho_L^0 \sum_j \varpi_j (c_j - c_{j0}) \phi_0 S_L = 0 \quad . \end{aligned} \quad (9)$$

将式 (2) ~ (4) 代入到式 (9) 中, 可以得到

$$\begin{aligned} \rho_{L0} \left(\frac{\rho_{I0}}{\rho_{L0}} - 1 \right) \phi_0 S_I + \rho_{L0} \left(\frac{\rho_{C0}}{\rho_{L0}} - 1 \right) \phi_0 S_C + \rho_{L0} \sum_j \varpi_j (c_j - c_{j0}) \cdot \\ \phi_0 S_L + \bar{b}\varepsilon + M_I(P_I - P_0) + M_C(P_C - P_0) + M_L(P_L - P_0) + \\ N_T(T - T_0) = 0 \quad , \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{式中, } \bar{b} &= \sum_{i=C,L,I}^n \rho_{i0} b_i + \rho_{L0} \sum_j \varpi_j (c_j - c_{j0}), \quad M_I = \frac{\rho_{I0}}{N_H}, \\ M_C &= \frac{\rho_{C0}}{N_{CC}}, \quad M_L = \frac{\rho_{L0}}{N_{LL}} + \frac{\rho_L^0 \sum_j \varpi_j (c_j - c_{j0})}{N_{LL}}, \quad N_T = \\ &3 \left(\alpha_C \rho_{C0} + \alpha_L \rho_{L0} \left(1 + \sum_j \varpi_j (c_j - c_{j0}) \right) + \alpha_I \rho_{I0} \right) . \end{aligned}$$

联立本构方程 (1), 先设初值为不受压力, (即 $\sigma=0$) 的条件, 得出在不补水的条件下应变的关系式如下:

$$\varepsilon = \frac{1}{K} \left(\sum_{i=C,L,I}^n b_i (P_i - P_0) + 3\alpha K(T - T_0) \right) \quad , \quad (11)$$

可将式 (11) 作如下变换:

$$\varepsilon = \frac{b}{K} (P_L - P_0) + \frac{1}{K} (b_C (P_C - P_L) + b_I (P_I - P_L)) + 3\alpha(T - T_0) \quad , \quad (12)$$

其中 $b = \sum_{i=C,L,I}^n b_i$, 联立式 (10), 可以得到

$$\varepsilon = A_L (P_L - P_0) + A_I (P_I - P_L) + A_C (P_C - P_L) + A_T (T - T_0) - (\varepsilon_{\rho I} + \varepsilon_{\rho C} + \varepsilon_{\rho L}) \quad , \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{其中, } A_L &= \frac{b - M}{b + K}, \quad A_I = \frac{b_I - M_I}{b + K}, \quad A_C = \frac{b_C - M_C}{b + K}, \\ A_T &= \frac{3\alpha K - N_T}{b + K}, \quad \varepsilon_{\rho I} = \frac{\rho_L^0 (\rho_I^0 / \rho_L^0 - 1) \phi_0 S_I}{b + K} \end{aligned}$$

$$\varepsilon_{\rho C} = \frac{\rho_{L0}(\rho_{C0}/\rho_{L0}-1)\phi_0 S_C}{b+K}, \quad \varepsilon_{\rho L} = \frac{\rho_{L0} \sum_j \sigma_j (c_j - c_{j0}) \phi_0 S_L}{b+K}.$$

当孔隙溶液压力和大气压力相等时, 土体的相变可以表示为

$$\varepsilon = A_I(P_I - P_L) + A_C(P_C - P_L) + A_T(T - T_0) - (\varepsilon_{\rho I} + \varepsilon_{\rho C} + \varepsilon_{\rho L}) \quad (14)$$

式(14)中, 第一项为由冰压力所产生的变形, 第二项为由盐结晶压力所引起的变形, 第三项为由于热胀冷缩所引起的土体的变形, 第四项为冰晶和盐晶体生成后, 由孔隙溶液密度变化所引起的变形。由于式(14)涉及参数甚多, 且在相变过程中有很多参数无法通过试验测定, 但是能够较完整地表现出孔隙溶液相变过程中土体变形机理, 可为进一步研究盐渍化冻土在冻融过程中的变形机理提供参考。

从式(14)可以看到, 孔隙溶液中产生冰和产生盐晶体的过程中, 土体孔隙受到足够大的内压, 在相变所引起的内压作用下, 土体发生剧烈变形, 同时因为在相变过程中盐结晶和冰结晶都会使得孔隙溶液的密度发生变化, 如孔隙水在相变成冰后, 体积增加9%, 体积的突然增加同样会使得土体在相变过程中会产生变形突变, 但是, 在位移发生突变之后, 相变对土体变形的作用减小, 由于在冻结过程中, 水分和盐分迁移微弱, 忽略由于水分和盐分迁移过程中土体的变形, 则在相变过程之后, 土体的变形主要受热胀冷缩的影响。因而土体在冻结过程中, 土体的变形呈现下降趋势, 而土体在融化后, 土体的变形又随着温度的增加有所增大。

2.5 降温过程中的盐晶析出量

根据 Na_2SO_4 水溶液的相图^[18], 可以得到 Na_2SO_4 溶液在不同温度条件下的冰结晶和盐结晶比例, 由此可以计算出土体的冻胀和盐胀比例。根据溶液相图, 当土体中含盐量分别为1%, 2%和3%时, 溶液的冻结温度变化不大, 这是因为 Na_2SO_4 溶液的冰盐共晶点的溶解度为4.25 g, 此时冰盐共晶点的温度为-1.25°C, 此为 Na_2SO_4 溶液冻结温度的最低值。当土体的温度低于-1.25°C时, 土体中的冰晶开始产生。而盐晶体的析出则完全受孔隙溶液中的溶解度来控制。当孔隙溶液中的浓度达到饱和甚至过饱和状态时, 土体中的盐晶体就开始产生。当温度低于冰盐共晶点温度时, 由于冰晶的产生, 使得剩余孔隙溶液的浓度急剧升高, 从而使得剩余孔隙溶液迅速达到饱和, 盐结晶量快速增加。

土体中因为土颗粒表面能和土体孔隙结构的作用, 使得土体的相变过程发生在一个温度区间而非一个温度点。Zeng^[19]曾推导了混凝土在冻结过程中冰含

量与浓度、温度和土体孔隙结构变化的关系式, 虽然考虑了诸多因素, 但在实际情况中, 随着土体的变形, 土体的孔隙结构不断发生着变化, 因此很难直接反映土体中冰结晶比例和盐结晶比例的关系。

为简单考虑起见, 认为土体孔隙溶液的相变与自由溶液中的相变规律是一致的, 土颗粒对溶液的相变没有影响, 在忽略土体中水分迁移的条件下, 可以得出土体在不同含盐量条件下的不同位置 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 的结晶量随时间变化过程, 为了计算过程的统一性, 认为

$$S_I + S_C + S_L = 1, \quad (15)$$

式中, S_I , S_C , S_L 分别为孔隙溶液冰晶体、盐晶体和剩余孔隙溶液的体积百分数。则式(15)表示孔隙溶液中冰含量、盐结晶含量与未相变的孔隙溶液的含量之和等于1。则可以计算出土体在初始含盐量为1%时不同位置处 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 的结晶量随时间变化过程如图6所示。

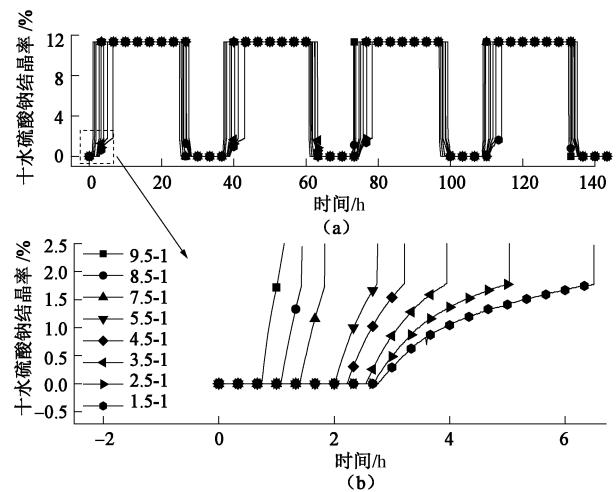


图6 含盐量为1%时土体不同位置 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 的结晶量随时间变化

Fig. 6 Varation of mirabilite crystalline amount of soil with salt content of 1% with time at different locations

图6给出了含盐量为1%时土体不同位置 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 的结晶量随时间变化关系, 可以看到, 随着外界环境温度的降低, 土体顶端温度首先降低, 当孔隙溶液浓度达到饱和状态, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 结晶析出。土体发生盐胀变形。随着冻结深度不断增加, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 在土体不同位置处都发生结晶。而土体在融化过程中, 盐结晶逐渐溶解, 由盐结晶所引起的盐胀变形消失。

图7给出了含盐量为2%时土体不同位置 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 的结晶量随时间变化关系。随着外界环境温度的降低, 孔隙溶液浓度达到饱和状态, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 结晶析出。但其析出时间较含盐量为

1%时提前，随着温度持续降低， $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 大量析出，当温度低于 Na_2SO_4 溶液的冰盐共晶点温度时，冰晶析出，剩余溶液的浓度迅速增大， $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 晶体析出量发生突变。图 7(b)给出了不同深度 Na_2SO_4 的析出量随时间变化的局部放大图，由于温度是从冷端向暖端传递，所以随着距离冷端距离的增大，不同位置处析出盐晶体时间不同，但由于土体温度探头位置温度都低于 Na_2SO_4 溶液的冰盐共晶点处的温度，土体温度探头的位置处都会出现 Na_2SO_4 晶体突变的情况。同时由于剧烈的温差作用下土体的冷缩作用，导致土体在发生位移突变后，其位移值有减小的趋势。而在融化时，土体中冰发生融化，孔隙溶液浓度降低，盐晶体也逐渐溶解，土体在剧烈升温过程中土体发生融沉，在初始含盐量为 2%的 Na_2SO_4 盐渍土中，盐胀和冻胀力在融化过程中逐渐消失，但是土体在温度作用下的热胀作用，使得土体中的融沉现象变得不够明显。

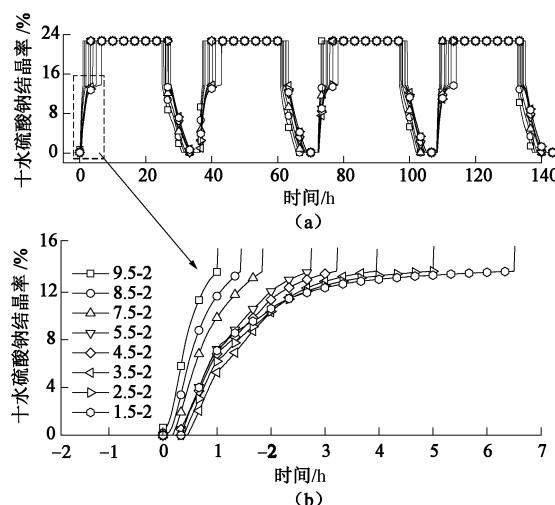


图 7 含盐量为 2% 时土体不同位置 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 的结晶量随时间变化

Fig. 7 Varation of mirabilite crystalline amount of soil with salt content of 2% with time at different locations

图 8 反映了含盐量为 3% 时土体不同位置 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 的结晶量随时间变化规律。可以看到，土体在恒温阶段，已经有 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 晶体析出，温度降低，晶体析出量继续增加。当土体温度达到稳定时，土体的综合变形中，盐结晶变形占土体总变形的 34.01%，而在升温过程中，冰晶体逐渐全部融化，而盐晶体并未全部溶解，即土体中依然有盐结晶所产生的力。在土体的热胀作用和盐结晶力的作用下，土体的融沉量较不含盐状态小，而且在盐结晶力的作用下，土体的残余变形在冻融过程中逐渐累积，土体的综合变形逐渐变大。

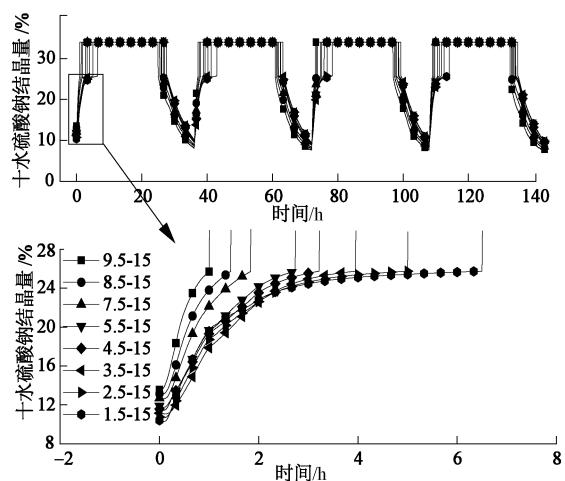


图 8 含盐量为 3% 时土体不同位置 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 的结晶量随时间变化

Fig. 8 Varation of mirabilite crystalline amount of soil with salt content of 3% with time at different locations

土体中冰盐结晶比例确定后，可以进一步得到在冻结过程中冰水相变所产生的力^[20]和盐结晶^[21]所产生的力，如果土体的弹性模量已知，则可以进一步通过式(14)得出土体在降温过程中由于冰盐结晶所产生的土体变形。

3 讨论

盐渍化土体在冻融循环作用下的变形是一个复杂的水热盐力耦合过程，不同种类的盐分和不同含盐量的土体在冻融循环作用下会表现出不同的变形特性。在不含盐或者低含盐量的土体中，土体表现出冻胀融沉的特性，而当盐分含量较高时，土体的融沉现象减小甚至消失。在结合 Na_2SO_4 溶液的性质和多孔介质力学的基础上，本文分析了 Na_2SO_4 盐渍土在冻融过程中的变形机理。但是本文的研究依然具有局限性。

首先，粉质黏土作为一种试验材料，土体本身的黏粒含量较高，在含有可溶性盐的情况下，黏粒在溶质渗透压的作用下发生吸湿膨胀；其次，冻土作为一种黏弹塑性材料，土体的蠕变变形可能会使土体在冻结过程中的变形减小。再次，冻结区的水分迁移可能也是土体发生变形的一个因素，尽管土体发生冻结，但是土体中的水分依然会从暖端向冷端迁移，暖端含水率减小时，暖端会发生固结，使土体的变形量减小。

在讨论盐结晶量时，本文忽略了土颗粒对孔隙溶液相变的影响，认为孔隙溶液的相变同自由溶液的相变一样，但是在实际情况中，由于土体不均匀的孔隙结构，大孔隙中的溶液容易发生相变，小孔隙中的溶液不容易发生相变，土体孔隙溶液的相变并非发生在一个温度点而是一个温度区间^[22]。在这个过程中，土

体孔隙溶液的冰盐共晶点会较自由溶液的低, 而且因为土体孔隙结构在相变过程中是动态变化的, 所以很难测定盐结晶对土体综合变形的贡献, 只能通过水溶液相图大致进行判定。

4 结 论

本文通过封闭系统中的 Na_2SO_4 盐渍土冻融循环试验, 得到了以下 3 点结论。

(1) 不含盐土体在冻融循环作用下, 土体发生冻胀和融沉变形, 但是土体的融沉变形大于其冻胀变形, 在经历多次冻融循环过程后, 土体的变形为负, 这主要是因为在冻融循环作用下土体的结构发生重组所致。

(2) 低含盐量的 Na_2SO_4 盐渍土冻融循环过程中, 土体依然表现出冻胀融沉的现象, 但高含盐量的土体在降温过程中, 出现冻胀和盐胀的综合变形。而在融化过程中, 土体并未表现出融沉现象, 盐胀所引起的残余变形是具有累积性的。

(3) Na_2SO_4 盐渍土在降温过程中的变形是多种因素共同作用的结果, 通过多孔介质力学, 分析得到 Na_2SO_4 盐渍土的变形主要由三部分组成: 冰盐结晶压力所引起的变形, 冰盐结晶后由于密度变化所引起的变形以及由于土体热胀冷缩所引起的变形。此外, 土体的蠕变变形及孔隙溶液中盐分引起的渗透压所导致的膨胀变形也可能是土体产生变形的原因。

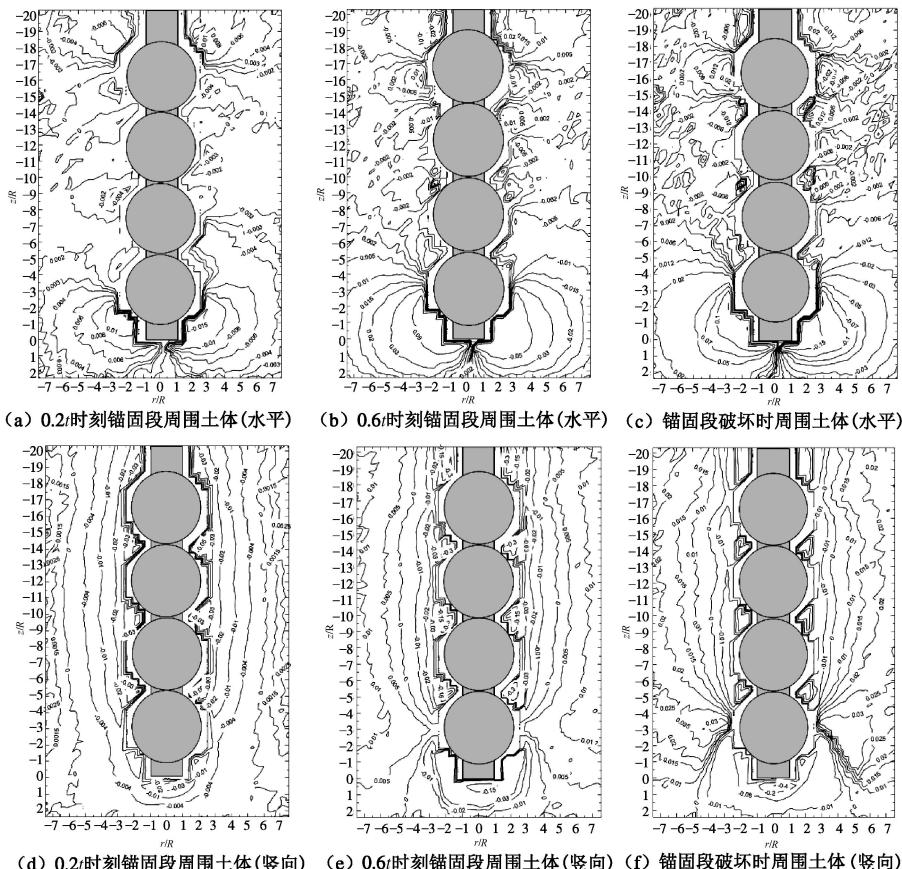
参考文献:

- [1] 高江平, 杨荣尚. 含氯化钠硫酸盐渍土在单向降温时水分和盐分迁移规律的研究[J]. 西安公路交通大学学报, 1997(3): 22 - 25. (GAO Jiang-ping, YANG Rong-shang. Study on the moving pattern of water and salt with directional temperature lowing in sulphate salty soil containing NaCl [J]. Journal of Xi'an Highway University, 1997(3): 22 - 25. (in Chinese))
- [2] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 土体冻胀和盐胀机理[M]. 北京: 科学出版社, 1995. (XU Xue-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin. Mechanisms of frost heave and soil expansion of soils[M]. Beijing: Science Press, 1995. (in Chinese))
- [3] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2010. (XU Xue-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin. Frozen soil physics[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese))
- [4] 陈肖柏, 邱国庆, 王雅卿, 等. 温降时之盐分重分布及盐胀试验研究[J]. 冰川冻土, 1989, 11(3): 231 - 238. (CHEN Xiao-bai, QIU Guo-qing, WANG Ya-Qing. Salt redistribbption and heave of saline soil during cooling[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1989, 11(3): 231 - 238. (in Chinese))
- [5] 张殿发, 郑琦宏. 冻融条件下土壤中水盐运移规律模拟研究[J]. 地理科学进展, 2005(4): 46 - 55. (ZHANG Dian-fa, ZHEN Qi-hong. Simulation of water-salt movement law under the freeze-thawing condition[J]. Progress in Geography, 2005(4): 46 - 55. (in Chinese))
- [6] 邝 慧, 何 平. 不同冻结方式下盐渍土水盐重分布规律的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2307 - 2312. (FENG Hui, HE Ping. Experimental study of water and salt redistributions of saline soil with different freezing modes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(8): 2307 - 2312. (in Chinese))
- [7] CARY J W. A new method for calculating frost heave including solute effects[J]. Water Resources Research, 1987, 23(8): 1620 - 1624.
- [8] PADILLA F, VILLENEUVE J P. Modeling and experimental studies of frost heave including solute effects[J]. Cold Regions Science and Technology, 1992, 20(2): 183 - 194.
- [9] BAKER G C, OSTERKAMP T E. Salt redistribution during freezing of saline sand columns at constant rates[J]. Water Resources Research, 1989, 25(8): 1825 - 1831.
- [10] ANDERSON D M, TICE A R. Predicting unfrozen water contents in frozen soils from surface area measurements[J]. Highway Research Record, 1972, 393: 12 - 18.
- [11] BANIN A, ANDERSON D M. Effects of salt concentration changes during freezing on the unfrozen water content of porous materials[J]. Water Resources Research, 1974, 10(1): 124 - 128.
- [12] 陈肖柏, 邱国庆, 王雅卿, 等. 重盐土在温度变化时的物理化学性质和力学性质[J]. 中国科学, 1988(4): 429 - 438. (CHEN Xiao-bai, QIU Guo-qing, WANG Ya-Qing. The physical chemical properties and mechanical properties of saline soil during temperature change process[J]. Science in China, 1988(4): 429 - 438. (in Chinese))
- [13] 包卫星, 谢永利, 杨晓华. 天然盐渍土冻融循环时水盐迁移规律及强度变化试验研究[J]. 工程地质学报, 2006(3): 380 - 385. (BAO Wei-xin, XIE Yong-li, YANG Xiao-hua. A laboratory test study on water and salt mitigation in natural saline soils and associated shear strength changes under freezing and thawing cycles[J]. Journal of Engineering Geology, 2006(3): 380 - 385. (in Chinese))
- [14] 王海涛. 冻融循环条件下罗布泊盐渍土工程性质试验研究

- [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2013. (WANG Hai-tao. Experimental study on engineering properties of Lop Nor saline soil in condition of freeze-thaw cycle[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2013. (in Chinese))
- [15] 陈 锦, 李东庆, 邝 慧, 等. 含盐量对冻结粉土单轴抗压强度影响的试验研究[J]. 工程力学, 2013, 33(12): 18 - 23. (CHEN Jin, LI Dong-qing, BING Hui, et al. The experimental study on the uniaxial compressive strength of frozen silt with different salt content[J]. Engineering Mechanics, 2013, 33(12): 18 - 23. (in Chinese))
- [16] COUSSY O. Poromechanics of freezing materials[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2005, 53(8): 1689 - 1718.
- [17] COUSSY O, MONTEIRO P J M. Poroelastic model for concrete exposed to freezing temperatures[J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(1): 40 - 48.
- [18] 天津化工研究院. 无机盐工业手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1979. (Tianjin Chemical Research Institute. Handbook of inorganic salt industry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1979. (in Chinese))
- [19] ZENG Q. Poromechanical behavior of cement-based materials subjected to freeze-thaw actions with salts[D]. Paris: Université Paris-Est, 2011.
- [20] LOCH J P G. Thermodynamic equilibrium between ice and water in porous media[J]. Soil Science, 1978, 126(2): 77 - 80.
- [21] SCHERER G W. Stress from crystallization of salt[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(9): 1613 - 1624.
- [22] 张莲海. 土体冻融过程中孔隙水压力测试及冻结缘过程研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014. (ZHANG Lian-hai. Investigation on the pore water pressures and frozen fringe process during soil freezing and thawing[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2014. (in Chinese))

勘 误

本刊 2017 年第 3 期“基于透明土的 4 种锚杆拔出对比模型试验”一文中, 第 403, 404 页图 9 有误, 应为



特此更正。

(本刊编辑部)