

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2016.08.008

温度对硫酸钠盐渍土盐胀影响的试验研究

万旭升¹, 廖孟柯², 杜立群¹

(1. 西南石油大学 土木工程与建筑学院, 四川 成都 610513;

2. 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)

摘要: 为了探究温度对硫酸盐渍土盐胀的影响规律, 保障我国盐渍土地区道路工程安全运营, 通过室内试验, 测试了不同温度环境下硫酸钠盐渍土的盐胀率。从样品降温前后体积变化、未相变含水量随温度变化、以及 CT 扫描图像分析了不同温度下盐胀对土体各组分的影响。研究结果表明: 随着温度不断降低, 盐胀不断加剧并趋于稳定; 盐胀主要温度区间为 0 ℃ 至盐晶体初始析出温度, 在负温下盐晶体析出很少, 引发的盐胀十分微小; 在正温下含水率随着温度降低而减小, 其递减趋势不断减小并在 0 ℃ 附近趋于稳定; 随着温度不断降低, 土体结构的损伤也不断增大; 空气所占孔隙率的变化主要取决于含水率的变化, 当含水率剧烈变化时, 其也会剧烈变化, 二者呈现反比关系。

关键词: 道路工程; 盐胀; 降温试验; 硫酸钠盐渍土; 损伤

中图分类号: TU448

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2016) 08-0044-07

Experimental Study on Influence of Temperature on Salt Expansion of Sodium Sulfate Saline Soil

WAN Xu-sheng¹, LIAO Meng-ke², DU Li-qun¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan 610513, China;

2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Region Environmental and Engineering Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: In order to find the rule of effect of different temperature conditions on salt expansion of sodium sulfate saline soil, and ensure the safty operation of road engineering in area of saline soil, the salt expansion ratio of sodium sulfate saline soil in different temperature environments are measured by laboratory test. By analyzing the variation of soil samples before and after cooling, the water contents without phase change at different temperature, and CT scan images, the influence of salt expansion on the soil components at different temperatures is obtained. The research result shows that (1) salt expansion intensifies and tends towards stability as the temperature decreases; (2) the main temperature range of salt expansion is from 0 ℃ to the initial precipitation temperature of salt crystals, its precipitation is very little at negative temperature, so the induced salt expansion is very small; (3) moisture content decreases as temperature decreases at positive temperature, the diminishing trend is decreasing and gradually stabilizing at 0 ℃; (4) the damage of soil structure increases as the temperature decreases; (5) the change of porosity occupied by air is mainly decided by the change of water content, and it changes acutely as the water content changes acutely, in addition, they show a inverse relationship.

Key words: road engineering; salt expansion; cooling down test; sodium sulfate saline soil; damage

收稿日期: 2015-01-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41230630); 西南石油大学青年教师“过学术关”项目 (201599010104); 中国科学院西部行动计划项目 (KZC2-XB3-19); 西南石油大学科研起航计划项目 (2015QHZ025)

作者简介: 万旭升 (1987-), 男, 甘肃静宁人, 博士. (xinyanwanxxusheng@163.com)

0 引言

盐渍土在世界各地均有分布,其中我国盐渍土面积占全国总面积的2%^[1],西北地区是我国盐渍土面积分布最多的地区^[2],广泛分布着硫酸盐渍土,且这些地区分布有大面积的多年冻土和季节冻土。由于盐渍土物理化学性质特殊,不仅制约着该地区的农牧业发展,而且对道路工程、建筑物基础等危害非常大^[3]。随着我国西部建设的快速发展,修筑道路、桥梁、水利、石油等工程的力度加大,硫酸盐渍土中硫酸钠由于温度变化引起的盐胀和冻胀造成的工程破坏问题愈来愈严重。所以,开展低温下硫酸钠盐渍土盐胀的研究显得至关重要。

国内有关盐渍土盐胀已有大量研究,袁红等对硫酸盐渍土的起胀含盐量做了试验研究^[4],对盐胀等级进行了划分并给出了不同击实标准下的容许含盐量。高江平等通过试验提出了硫酸盐渍土盐胀率与五因素之间的计算公式^[5],可通过硫酸盐渍土的含水量、含盐量、初始干容重、上覆荷载、离子类型计算其盐胀率。硫酸盐渍土的盐胀特性、冻融循环的盐胀累加性、盐胀敏感性以及其工程应用均取得了一些成果^[6-10]。硫酸盐渍土盐胀成因主要是硫酸钠结合水分子形成十水硫酸钠造成土体体积膨胀,所以温度是引起盐胀的主要外界因素。在反复冻融条件下,盐胀变形在温度回升时不能完全恢复,具有残留性。牛玺荣等建立了纯盐胀期的盐胀关系^[11],可依据硫酸钠溶液的饱和度区间计算盐晶体在土中的析出量,为正温下硫酸钠盐渍土的盐胀提供理论依据。但由于土中硫酸钠溶液受到土颗粒表面自由能的影响,用溶液饱和度曲线计算土中盐胀率会造成偏差较大。万旭升等^[12]通过研究土体中与溶液中硫酸钠晶体的析出,得出了其相似的析出规律,这说明土体的盐胀主要由于硫酸钠溶液的性质决定。但对盐胀过程中土体中各组分的变化分析以及低温下盐胀的强弱分析较少。在国外 STEIGER^[13]研究了多孔介质中盐胀以及盐胀产生的盐胀力大小,指出受约束介质的盐胀力大小主要由其溶液的过饱和比决定,过饱和比越大,盐胀力越大。DERLUYN^[14]详细介绍了盐晶体析出形态并推导了盐晶体生长公式。盐晶体的形态不仅受降温速率的影响,而且在不同湿度下,其晶体形态也是不一样的。但其研究的多孔介质均为建筑材料如砖、混凝土等,涉及土体中的盐胀很少。

基于前人已有的研究成果,通过不同阶段的硫酸钠

盐渍土的降温试验来研究盐胀对土体中各组分的影响并结合 CT 扫描结果对盐胀冻胀引起的损伤进行探讨。

1 试验方法

1.1 试样制作

土样来自于青藏高原北麓河地区具有代表性的硫酸盐渍土,土性为粉质黏土(塑限 14.5%,液限 23.8%,含水量为 17%~18%)。为了消除其他离子的影响,事先应对土样进行脱盐,用蒸馏水浸泡洗土 10 次,将脱盐后的土样烘干并碾碎,最后统一过筛。将硫酸钠盐溶解到蒸馏水中配置成特定浓度的硫酸钠溶液,土样和硫酸钠溶液充分混合。工程实践表明,当含盐量超过 2% 时,其盐胀现象比较明显^[6]。配置含盐量为 3.8%,含水量为 18% 的硫酸钠盐渍土。将配置好的硫酸钠盐渍土样密封袋密封并在 25℃ 的恒温箱中放置 24 h,让盐分分布更加均匀。

用压样机分别制作 3 个直径 62.2 mm,高度 128.0 mm 的标准样,在压样过程中逐层放置土并轻捣,正反压样,干密度为控制 1.75 g/cm³ 左右,以接近天然干密度。压好的土样采用统一编号为 1, 2, 3。并将制好的土样用保鲜膜密封,以防止水分损失。将样品放置 25℃ 的恒温箱中,防止外界环境温度变化引起盐胀的发生。事先记录稳定后的样品尺寸,做好标记,并分别进行试验前 CT 扫描。冻土工程国家实验室现用的医用 CT 机的 k 值为 1 024,其 CT 数覆盖范围是 -1 024~3 071,使用水膜作为标准件,水的 CT 数为 0,空气的为 -1 024^[15]。运输样品途中均采用恒温箱恒温,以防止受环境温度影响。将制样剩余的土样装到塑料管中制成一样的干密度,用核磁共振仪测其未相变含水量与温度之间的关系。

1.2 降温条件

降温仪器采用可程式超低温仪器,其利用降低空气温度的方法达到降温的效果。可程式超低温仪器起始温度设为 25℃,分别对 3 个土样均采用 0.02℃/min 降温速率进行降温,1 号土样降温至 10℃ 并恒温 3 h; 2 号土样降温至 0℃ 并恒温 3 h; 3 号土样降温至 -10℃ 并恒温 3 h。记录降温后的样品的尺寸,并分别将降温后的样品进行 CT 扫描,由于扫描时间很短,不考虑土样扫描过程中的温度变化。

利用核磁共振测量未相变含水量,降温模式为:

25℃→20℃→15℃→10℃→5℃→1℃→0℃
→-1℃→-2℃→-3℃→-4℃→-5℃→-8℃
→-10℃→-15℃→-20℃

每降至以上温度时恒温 3 h。

2 试验结果及数据分析

降温结束后,对样品进行 CT 扫描,分别提取同一土样中间层试验前后的 CT 图像,如图 1 所示。

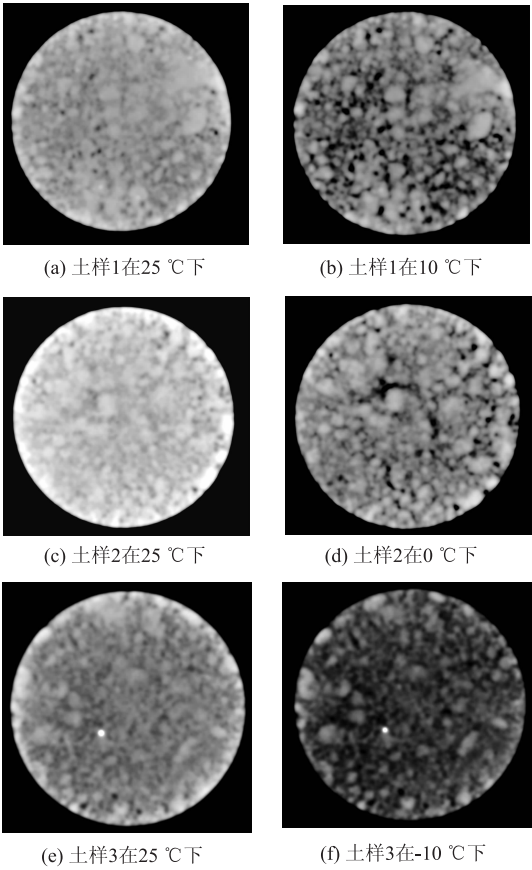


图 1 土样在降温前后 CT 扫描图
Fig. 1 CT scan images of soil samples before and after cooling

从图 1 中可以看出降温前后土体结构发生了明显的变化,孔隙体积明显增大,依据硫酸钠溶解度相图^[16-18],如图 2 所示,在 32.4 °C 以下,随着温度降低,硫酸钠溶液溶解度不断降低,并会有十水硫酸钠晶体的析出。所以硫酸钠盐渍土降温后会有十水硫酸钠的生成。其改变了土体组成,十水硫酸钠的体积是无水硫酸钠的 3.1 倍,导致土样膨胀,体积增大。十水硫酸钠的形成会结合溶液中水分子,所以减小了土体中含水量,导致土颗粒之间连接性能降低,以至于降温后土样较为松散,同一层面的不同区域内部结构极度不均匀,低密区增多且图像明显变暗。由于土样为自由膨胀,孔隙沿四周增大,内部呈破碎状分布。

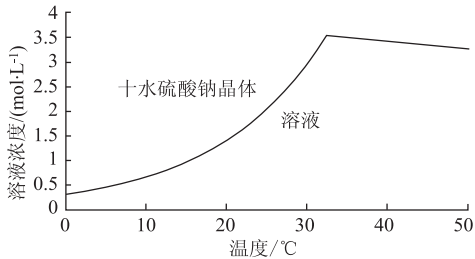


图 2 硫酸钠溶解度相图
Fig. 2 Curve of sodium sulfate solubility

土样降温前后尺寸变化如表 1 所示。用游标卡尺测量土样的平均高度,以及土样上端、中部和下端的直径,求取土样平均直径,最后计算土样体积变化。

从表 1 中可以看出随着温度的降低,硫酸钠盐渍土土样的体积增大,对应的干密度减小。试验前后的样品对比如图 3 所示。

表 1 试验前后土样尺寸变化
Tab. 1 Dimensional changes of soil samples before and after experiment

温度/°C	样品编号	质量/g	含水量/%	含盐量/%	高/mm	直径/mm			干密度/(g·cm ⁻³)
						上	中	下	
25	1	804.7	18	3.8	128	62.2	62.2	62.2	1.75
10					132	63.2	63.2	62.7	1.65
25	2	805.5	18	3.8	128.1	62.2	62.2	62.2	1.75
0					133.5	63.6	64	63	1.61
25	3	805.9	18	3.8	128.6	62.2	62.2	62.2	1.73
-10					135.2	64	64.5	63.8	1.59

从图 3 中可以明显看出降温后的土样高度增加且土样未相变含水量减小,土样较干,且表面孔隙增大,有较小裂纹出现,试样顶底部依稀可见非常小的白色晶体,土体内部结构较先前松散,依稀可见白色晶体。

由于降温后的盐渍土土样中包含多种物质,有土颗粒、硫酸钠溶液、十水硫酸钠晶体、冰晶(土样处在负温),所以研究降温后物质成分如何变化显得至关重要。以下讨论降温对硫酸钠盐渍土土样各组分的影响。



图3 硫酸钠盐渍土降温前后土样对比

Fig. 3 Comparison of sodium sulfate saline soil samples before and after cooling

孔隙率和体应变之间的关系为:

$$n = n_0 + \varepsilon_v, \quad (1)$$

式中, n_0 为土样初始孔隙率; ε_v 为土体的体应变。对于土体的体应变可用式 (2) 表达。

$$\varepsilon_v = \Delta n_c + \Delta n_l + \Delta n_a + \Delta n_i, \quad (2)$$

式中, n_c 为十水硫酸钠晶体的孔隙率; n_l 为硫酸钠溶液的孔隙率; n_a 为空气所占的孔隙率; n_i 为冰晶所占的孔隙率。在计算中忽略液体中溶质所占的体积, 近似认为溶液的体积等于水分的体积。

通过试验获取硫酸钠盐渍土未相变含水量核磁共振信号强度与温度之间的关系, 将其转化为未相变含水量与温度之间的关系, 如图 4 所示。

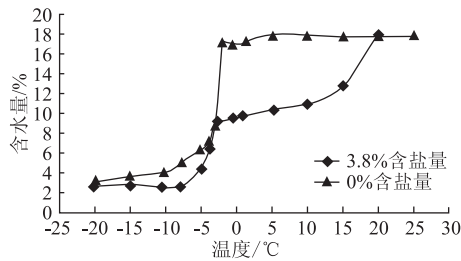


图4 硫酸钠盐渍土不同温度下未相变含水量

Fig. 4 Water contents without phase change of sodium sulfate saline soil at different temperatures

从图 4 可以看出随着温度不断降低, 3.8% 含盐量的硫酸钠盐渍土中盐晶体不断携带水分析出导致含水量减小, 在 0 °C 以下主要发生冰水相变导致含水量继续减小, 最后趋于稳定。而未含盐量的土样在 0 °C 以下发生冰水相变导致未冻水含量减小并在 0 °C 到 -4 °C 发生剧烈相变。最终二者含水量在 -20 °C 趋于一致。

土体含水率和含水量之间存在以下关系:

$$n_l = \rho_d w, \quad (3)$$

式中, ρ_d 为土体的干密度; w 为土体的含水量。

当硫酸钠晶体析出时, 由十水硫酸钠引起的孔

隙率变化 Δn_c 为:

$$\Delta n_c = \frac{V_c}{V}, \quad (4)$$

式中, V 为土样的总体积; V_c 为盐晶体析出体积。

由于 1 mol 十水硫酸钠晶体析出会携带 10 mol 水分子, 所以存在:

$$V_c = \frac{\Delta w \cdot m_{\text{soil}}}{180} \cdot \frac{322}{\rho_c}, \quad (5)$$

式中, Δw 为未相变含水量的减小量; m_{soil} 为土颗粒的质量。

则化简后可得:

$$\Delta n_c = \frac{1.789\rho_d}{\rho_c} \cdot \Delta w, \quad (6)$$

式中 ρ_c 为十水硫酸钠晶体的密度。

式 (6) 适用于 0 °C 以上有降温引起的十水硫酸钠晶体的孔隙率变化, 对于 0 °C 以下存在冰水相变和盐晶体的析出, 从未冻含水量变化曲线可以看出负温下主要发生冰水相变, 参照硫酸钠溶液的饱和度曲线以及 3.8% 含盐量与未含盐量的土样在低温下的未冻水含量的变化来计算其发生盐晶体析出部分的含水量变化以及发生冰水相变部分的含水量变化。利用溶质质量变化推导:

$$V_c = \frac{\Delta m_{\text{Na}_2\text{SO}_4}}{142} \cdot \frac{322}{\rho_c}, \quad (7)$$

式中 $\Delta m_{\text{Na}_2\text{SO}_4}$ 为十水硫酸钠晶体的质量增加量。

样品在降温结束恒温后处于稳定状态, 溶液处于饱和状态, 有:

$$V_c = \frac{(r_1 w_1 - r_2 w_2) m_{\text{soil}}}{142} \cdot \frac{322}{\rho_c}, \quad (8)$$

式中, r 为溶液的饱和状态的浓度, 下标分别表示不同温度状态; r_1, w_1 分别为温度 T_1 下的饱和浓度和未冻含水量; r_2, w_2 为温度 T_2 下的饱和浓度和未冻含水量。

则化简后可得:

$$\Delta n'_c = \frac{2.268\rho_d}{\rho_c} \cdot (r_1 w_1 - r_2 w_2), \quad (9)$$

式中, n'_c 为负温下发生盐晶体析出所占的孔隙率。利用其未相变含水量与温度的关系以及硫酸钠溶液饱和度曲线求解低温下十水硫酸钠晶体析出所占孔隙率变化。联立式 (6)、(9) 可反算负温下十水硫酸钠晶体析出所携带水分的变化量。

对于冰水相变而言, 冰的体积是水的体积的 1.09 倍, 故冰晶所占孔隙率的变化为:

$$\Delta n_i = 1.09 \Delta n''_i, \quad (10)$$

式中, n''_1 为负温下发生冰水相变的溶液所占的孔隙率, 其大小可由以下公式计算:

$$\Delta n''_1 = \Delta n'_1 - \Delta n'_1, \quad (11)$$

式中, n'_1 为负温下含水率; n'_1 为负温下由于盐晶体析出所携带的含水率。

综合以上公式可以分别计算不同温度下各组分所占孔隙率变化, 若考虑土体各物质的整体孔隙变化, 近似认为 3 个土样的初始各孔隙率相等, 其各物质所占孔隙率变化如图 5 所示。

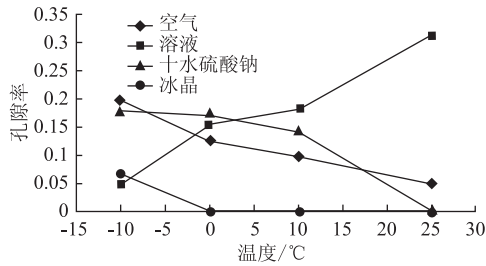


图 5 土样中各物质所占孔隙率随温度变化

Fig. 5 Porosity occupied by each component of soil sample varying with temperature

从图 5 可以看出对于盐晶体的析出主要发生在正温以上, 在负温下盐晶体的析出较少, 此含盐量在 10 °C 以上发生盐溶液剧烈相变, 为主要盐胀区间。盐晶体的析出导致了含水率的减小, 在正温下其减小规律与十水硫酸钠晶体所占孔隙率增加规律呈现一定的对称性。在负温下, 冰水相变剧烈发生, 导致含水率急剧减小。空气所占孔隙率在正温下随温度降低基本呈线性增加, 一旦进入冰水相变区间, 其迅速增大, 主要是由于含水量迅速减小所致。对于冰晶的生长, 当土体进入冻结温度时, 发生冰水相变, 结合硫酸钠盐渍土的未冻水含量与温度的关系, 可认为在 -10 °C 时未冻含水率基本不再变化, 冰晶含量基本不再增加, 要使其继续增加则需更低外界温度。

含盐量多少直接影响盐胀强弱, 依据式 (2) 以及各组分物质在不同温度条件下的变化量大小, 盐胀率的大小主要由 n_c 和 n_1 变化决定, 而 n_c 由发生相变的水的变化决定。常温下不同含盐量盐渍土盐胀率大小主要由其未相变含水量决定, 对于同一含盐量的硫酸钠盐渍土, 未相变含水量随着温度非线性减小。随着含盐量的减小, 未相变含水量相对增大^[19], 导致 n_c 减小, 从而导致盐胀率减小。

3 盐晶体析出及冰晶产生对土体损伤研究

盐晶体析出和冰晶产生后会导致土体的内部结

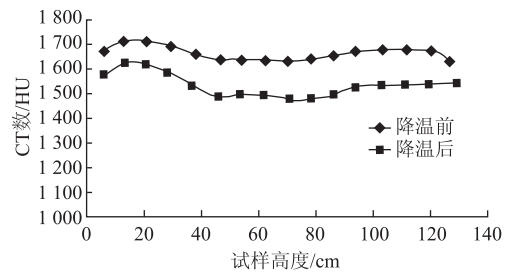
构发生变化从而导致土样断面的 CT 数发生变化, 利用试验前后的 CT 数, 探讨晶体析出对土体结构的影响。

根据相关文献 [15], 冻土损伤公式为:

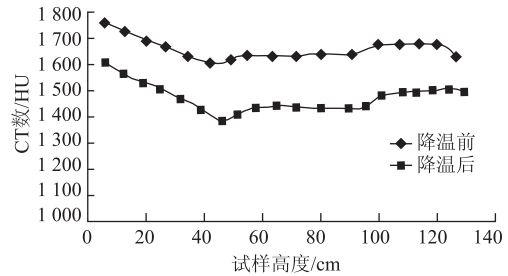
$$D = -\frac{1}{m_0^2} \left(\frac{H_i - H_0}{1.024 + H_0} \right), \quad (12)$$

式中, m_0 为空间分辨率; H_0 为样品初始 CT 数; H_i 为样品损伤后 CT 数。

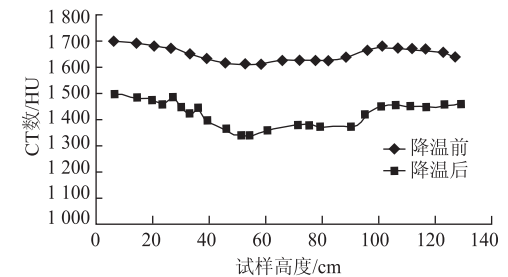
通过软件计算试验前后 CT 数, 其结果如图 6 所示。



(a) 土样降温至 10 °C 前后 CT 数



(b) 土样降温至 0 °C 前后 CT 数



(c) 土样降温至 -10 °C 前后 CT 数

图 6 土样降温前后 CT 数

Fig. 6 CT number of soil samples before and after cooling

通过试验前后土样的 CT 数可以看出, 降温后土样的 CT 数减小, 且随着温度不断降低, CT 数不断减小。土样 1, 2, 3 降温后其平均 CT 数较先前分别减小了 133.8, 187.7, 235.4 HU。同一试样的 CT 数在高度的中间段变化最为明显。

将处理后的数据代入式 (12) 计算降温对硫酸钠盐渍土的损伤, 其结果如图 7 所示。

从图 7 中可以看出随着温度不断降低, 硫酸钠盐渍土样的损伤增大, 土样分别在 10, 0, -10 °C,

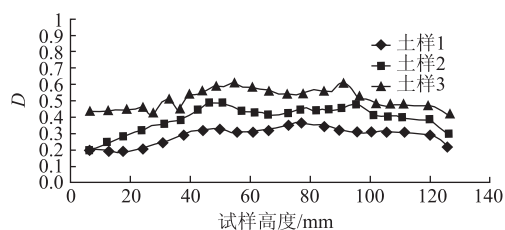


图7 试验后各土样损伤

Fig.7 Damages of soil samples after experiment

其平均损伤为 0.288, 0.390 和 0.509。其中土样高度方向的中间区域变化最剧烈。损伤是密度变化量的函数^[20], 对于同一土样, 采用平均损伤和平均密度, 建立其之间的联系, 通过试验数据可绘得图 8。

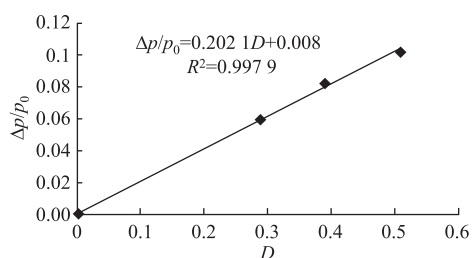


图8 土样密度与损伤关系

Fig.8 Relation between soil density and damage

从图 8 可以看出土样密度变化量与损伤之间存在很好的线性关系, 若不考虑试验误差的影响, 硫酸钠盐渍土密度与损伤之间的关系可用式 (13) 表示。

$$\Delta\rho = 0.2D\rho_0, \quad (13)$$

式中, ρ_0 为土样的初始密度; $\Delta\rho = \rho_0 - \rho$, 表示密度的变化量。

将式 (12) 代入式 (13) 即可得土样密度变化与 CT 数之间的关系, 如式 (14) 所示。

$$\Delta\rho = -\frac{0.2\rho_0}{m_0^2} \left(\frac{H_i - H_0}{1.024 + H_0} \right). \quad (14)$$

由于中间区域 CT 数较小, 依据式 (14), 可得出土样密度较小, 这说明盐胀和冻胀在低密段易于产生并且破坏严重, 该结果与吴紫汪等^[21] 研究结果相似。

4 结论

通过对高含盐量硫酸钠盐渍土的降温试验可以得出以下结论:

(1) 硫酸钠盐胀主要发生在正温区, 而负温下十水硫酸钠晶体的析出较少, 主要发生冻胀。

(2) 盐胀或冻胀对土体的低密区间容易产生影

响, 其变化非常剧烈。

(3) 硫酸钠盐渍土随着温度不断降低, 对土体结构的损伤不断增大。当温度不变后, 相变不再发生, 土体结构稳定。

(4) 硫酸钠盐渍土中空气所占孔隙率的变化主要取决于含水率的变化, 当含水率剧烈变化时, 其也会剧烈变化, 二者呈现反比关系。

参考文献:

References:

- [1] 徐学祖, 王家澄, 张立新, 等. 土体的冻胀和盐胀机理 [M]. 北京: 科学出版社, 1995.
XU Xue-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin, et al. Mechanisms of Frost Heave and Soil Expansion of Soils [M]. Beijing: Science Press, 1995.
- [2] 邴慧, 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.
BING 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.
- [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.
- [4] 袁红, 李斌. 硫酸盐渍土起胀含盐量及容许含盐量的研究 [J]. 中国公路学报, 1995, 8 (3): 10-14.
YUAN Hong, LI Bin. On the Minimum Salt Content and Allowable Salt Content of Sulphate Salty Soil [J]. China Journal of Highway and Transport, 1995, 8 (3): 10-14.
- [5] 高江平, 吴家惠. 硫酸盐渍土盐胀特性的单因素影响规律研究 [J]. 岩土工程学报, 1997, 10 (1): 39-44.
GAO Jiang-ping, WU Jia-hui. Study on Laws of the Single Factor Effect upon Heaving Properties of the Sulphated Salty Soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 10 (1): 39-44.
- [6] 陈肖柏, 刘建坤, 刘鸿绪, 等. 土的冻结作用与地基 [M]. 北京: 人民出版社, 2006.
CHEN Xiao-bai, LIU Jian-kun, LIU Hong-xu, et al. Frost Action of Soil and Foundation Engineering [M]. Beijing: People's Publishing House, 2006.
- [7] 陈伟韬, 王鹰, 王明年, 等. 冻融循环对盐渍土黏聚力影响的试验研究 [J]. 岩土力学, 2007, 28 (11): 2343-2347.
CHEN Wei-tao, WANG Ying, WANG Ming-nian, et al.

- Testing Study on Influence of Freezing and Thawing Circulation on Saline Soil's Cohesion [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28 (11): 2343 - 2347.
- [8] 张军艳, 高江平. 硫酸盐渍土盐胀过程分析 [J]. 公路交通技术, 2010 (6): 8 - 11.
ZHANG Jun-yan, GAO Jiang-ping. Analysis of Salt Heaving Process in Sulphuric Acid Salinized Soil [J]. Tecnology of Highway and Transport, 2010 (6): 8 - 11.
- [9] 顾强康, 吴爱红, 李宁. 硫酸盐渍土的盐胀特性试验研究 [J]. 西安理工大学学报, 2009, 25 (3): 283 - 287.
GU Qiang-kang, WU Ai-hong, LI Ning. The Experiment Study of Salt Heaving Behaviors of Sulphate Saline Soil [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2009, 25 (3): 283 - 287.
- [10] 温小平, 翁兴中, 张俊, 等. 新疆地区粗颗粒盐渍土毛细水上升和隔断层隔断效果研究 [J]. 公路交通科技, 2015, 32 (5): 56 - 60.
WEN Xiao-ping, WENG Xing-zhong, ZHANG Jun, et al. Research on Effect of Capillary Water Rise and Layer Separation of Coarse Grained Salty Soil in Xinjiang Region [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32 (5): 56 - 60.
- [11] 牛玺荣, 高江平. 硫酸盐渍土纯盐胀期盐胀关系式的建立 [J]. 岩土工程学报, 2008, 30 (7): 1058 - 1061.
NIU Xi-rong, GAO Jiang-ping. Deduction of Salt Expansion Expression during Pure Salt Expansion Period of Sulphate Saline Soil [J]. Chinese Journal Geotechnical of Engineering, 2008, 30 (7): 1058 - 1061.
- [12] 万旭升, 赖远明. 硫酸钠溶液和硫酸钠盐渍土的冻结温度及盐晶析出试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35 (11): 2090 - 2096.
WAN Xu-sheng, LAI Yuan-ming. Experimental Study on Freezing Temperature and Salt Crystal Precipitation of Sodium Sulfate Solution and Sodium Sulfate Saline Soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35 (11): 2090 - 2096.
- [13] STIGER M. Crystal Growth in Porous Materials-I: The Crystallization Pressure of Large Crystals [J]. Journal of Crystal Growth, 2005, 282: 455 - 469.
- [14] DERLUYN H. Salt Transport and Crystallization in Porous Limestone: Neutron-X-ray Imaging and Poromechanical Modeling [D]. Zürich: University of Zurich, 2012.
- [15] 陈世杰, 赵淑萍, 马巍, 等. 利用 CT 扫描技术进行冻土研究的现状和展望 [J]. 冰川冻土, 2013, 35 (1): 193 - 200.
CHEN Shi-jie, ZHAO Shu-ping, MA Wei, et al. Studying Frozen Soil with CT Technology: Present Studies and Prospects [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35 (1): 193 - 200.
- [16] 徐学祖, 王家澄, 张立新, 等. 土体的冻胀和盐胀机理 [M]. 北京: 科学出版社, 1995.
XU Xue-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin, et al. Mechanism of Frost Heaving and Salt Expansion of Soil [M]. Beijing: Science Press, 1995.
- [17] STIGER M, ASMUSSEN S. Crystallization of Sodium Sulphate Phases in Porous Materials: The Phase Diagram $\text{Na}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}$ and Generation of Stress [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2008, 72 (17): 4296 - 4036.
- [18] 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.
- [19] WAN Xu-sheng, LAI Yuan-ming, WANG Chong. Experimental Study on the Freezing Temperatures of Saline Silty Soils [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2015, 26 (2): 175 - 187.
- [20] 杨更社, 张长庆. 岩土损伤计检测 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1998.
YANG Geng-she, ZHANG Chang-qing. Rock and Soil Damage Meter Detecting [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1998.
- [21] 吴紫汪, 马巍, 蒲毅彬, 等. 冻土单轴蠕变过程中结构变化的 CT 动态监测 [J]. 冰川冻土, 1996, 18 (4): 306 - 311.
WU Zi-wang, MA Wei, PU Yi-bin, et al. Monitoring the Change of Structures in Frozen Soil in Uniaxial Creep Process by CT [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 18 (4): 306 - 311.