

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0062

HUANG Youfen, WU Daoyong, WU Shiyu. Experimental study on deformation of remolded sulfate saline soil under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(2):602-611. [黄佑芬, 吴道勇, 吴诗雨. 冻融循环条件下重塑硫酸盐渍土变形试验研究[J]. 冰川冻土, 2022, 44(2):602-611.]

冻融循环条件下重塑硫酸盐渍土变形试验研究

黄佑芬¹, 吴道勇^{1,2}, 吴诗雨¹

(1. 贵州大学 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 季节冻土区特殊的温湿环境造成盐渍土累积变形是导致众多工程问题的主要原因,但其变形破坏机理尚不十分明确。通过配制不同含盐量的粉土开展冻融循环试验,研究试验过程中温度、未冻水含量、孔隙水压力、基质吸力和位移的变化规律。结果表明:孔隙水压力和基质吸力对土体温度敏感,对土体变形有重要影响。类比于非饱和土有效应力原理,给出了冻结盐渍土的有效应力方程,将土体变形分为温度应变、盐胀、冻胀、溶陷、融沉和残余应变,很好地解释了冻结盐渍土的变形机理。研究了含盐量对土体变形的影响程度,发现低含盐量时土体应变以冻胀和融沉为主;随着含盐量的增加,盐胀和溶陷的贡献越来越大;而含盐量为1%时土体变形最小,表明适当控制含盐量可有效抑制土体变形。

关键词: 冻融循环; 硫酸盐渍土; 变形机理; 有效应力原理

中图分类号: TU448 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)02-0602-10

0 引言

盐渍土广泛分布于西北季节冻土区,受气温周期波动的影响,寒区活动层内土体会产生反复的冻结和融化,冻融循环改变了土体的内部结构,宏观上表现为土体位移的变化。盐渍土的冻胀、盐胀是一个复杂的问题,其性质受温度、水分、盐分、土质等多种因素的影响^[1-3],冻融过程中涉及多相之间的转变及土体自身结构的调整。相较于其他类型盐渍土,硫酸盐渍土的盐冻胀破坏最为严重^[4]。在极端气候环境条件下,常发生公路、铁路、石油管道等工程变形破坏^[5-7],造成巨大经济损失,甚至引发严重的安全问题。因此,开展硫酸盐渍土的冻胀、盐胀研究工作对于保障西北季节冻土区工程建筑物的安全是十分必要的。

许多学者对冻融作用下盐渍土的盐胀性质开展了研究^[8-9],重点开展室内试验,少数学者进行了室外试验^[10]。主要涉及以下几个方面的研究:(1)冻融作用下盐渍土中的水盐迁移。徐学祖等^[11]通过室内试验研究了水分和盐分在正冻土中的迁移,

表明试样体积增大是由于水分的迁移、冻结及盐离子与土颗粒相互作用引起的,但没有阐明水盐迁移的驱动力。随着科学技术的发展,许多高精度传感器被用于研究土体的变形机理^[12-13],发现基质吸力梯度是水盐迁移的驱动力^[14]。陈肖柏等^[15]发现,降温及蒸发过程中,盐分从暖端向冷端、从湿区向干区迁移、聚集并结晶,是盐胀产生的主要原因。吴道勇等^[16]研究了盐分、水分重分布过程对土体变形的影响,发现含盐量较低时冻胀和融沉是土体变形的主要因素,含盐量较高时盐胀和溶陷占主导作用。(2)冻融作用下土体的变形规律。包卫星等^[17]对天然盐渍土进行反复冻融循环试验研究,表明低液限黏土冻融循环过程中盐胀具有较好累加性,其盐胀率与冻融周期之间的关系符合二次抛物线变化规律。肖泽岸等^[18]从盐渍土盐胀的影响因素着手,对盐渍土盐胀的变形规律有了较为深入的认识。高江平等^[19]、张莎莎等^[20]利用回归分析得到多因素盐胀率计算公式。邴慧等^[21-22]为了探究硫酸钠盐对土体冻胀的影响,开展了室内开放系统下粉质

收稿日期: 2021-08-10; 修订日期: 2022-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(42002280;41761016);贵州省科学技术基金项目(黔科合基础-ZK[2022]重点018)资助

作者简介: 黄佑芬,硕士研究生,主要从事盐渍土变形特性研究. E-mail: huangyoufenxxx@163.com

通信作者: 吴道勇,副教授,主要从事特殊土工程特性与本构理论研究. E-mail: dywu@gzu.edu.cn

黏土冻结试验,表明土体变形主要是由冻胀引起,但对于多次反复冻融过程中,参与到土体变形中的盐胀变形及冻胀变形到底有多大,还需进一步研究。也有学者^[23-26]基于溶液相图计算了降温过程中晶体的体积变化,提出仅适用于正温时的盐胀计算模型,对于负温下土体的盐胀、冻胀研究还较少^[27]。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 and 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^[18]。(3)由于不同盐分的存在,冻融过程中涉及到的冻结温度也发生变化。邴慧等^[28]考虑了不同因素对土体冻结温度的影响,表明土体的冻结温度随含盐量的增加而降低,随含水率的增加而增大。Wan 等^[29]进一步研究了盐渍土的冻结温度,提出青藏高原粉质黏土冻结温度的一般计算公式。

上述研究成果为正确认识盐渍土水盐迁移、变形特性奠定了良好的基础,为盐渍土地区工程建设提供了理论依据。但硫酸盐渍土中存在多种稳定和亚稳定晶型,导致冻融循环等特殊的温湿环境条件下其变形破坏机理尚不十分明确。而针对冻融

土体内部孔隙水压力的试验测试,相关研究较少^[30]。针对这些问题,本文开展不同含盐量硫酸盐渍土的多次冻融循环试验,探究冻融过程中盐胀和冻胀对土体变形的贡献,分析冻融过程中温度、水分、盐分等量与土体变形的关系,阐明冻融过程中孔隙水压力与基质吸力对土体变形的影响,为进一步认识冻结盐渍土变形机理提供试验依据。

1 材料与方法

试验土样为采自青海省海南藏族自治州共和县大水桥镇的粉土,根据《土工试验方法标准》^[31]进行基本物理力学试验,结果见表1。天然土体中含有大量可溶盐,各离子含量见表2,其中主要阳离子为 Na^+ ,主要阴离子为 Cl^- 和 SO_4^{2-} 。首先,将天然盐渍土与蒸馏水充分搅拌,待溶液澄清后抽出澄清液体,即完成一次清洗。然后,再加入蒸馏水,反复清洗,直到溶液电导率与蒸馏水接近。此时认为土体中的盐分已清洗干净,降低了多种离子相互作用对试验结果的影响。将去除盐分的土体在 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下烘干、碾碎,并过 2 mm 的筛备用。

表1 土体的基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of the soil

土壤类型	密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	液限/%	塑限/%	塑性指数	最大干密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	最佳含水率/%	比重
粉土	1.4	28.3	20.0	8.3	1.8	17	2.589

表2 天然盐渍土中各离子含量(单位: $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

Table 2 Ion contents in the natural saline soil (unit: $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

Na^+	Ca^{2+}	K^+	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	总含盐量/%
395.92	102.98	66.08	7.82	756.32	302.56	22.96	0.83

冻融试验装置如图1所示,主要包括冷冻箱(量程为 $-40\sim 10\text{ }^\circ\text{C}$)和数据采集装置。分别采用温度传感器(精度为 $0.01\text{ }^\circ\text{C}$)、pF-Meter土壤水势传感器和HC-25微型孔隙水压力传感器测量试验过程中的土体温度、基质吸力和孔隙水压力,采用Hydra Probe II土壤水分盐分温度三参数传感器测量土柱中未冻水含量(体积含水率)和电导率,位移传感器测量冻融过程中的土柱位移。数据采集系统可以实时记录各测量参数的变化情况。

本试验主要研究不同含盐量条件下硫酸盐渍土的变形规律,设置了5组不同含盐量条件,分别为0、1%、2%、3%和4%。天然土体的最优含水率为17%,最大干密度为 $1.8\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,因此试验过程中控

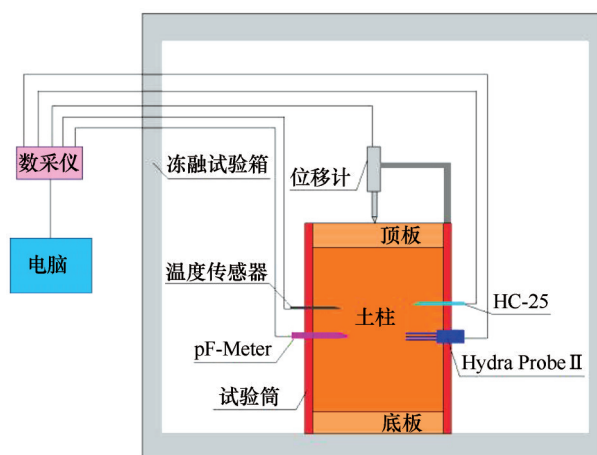


图1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the test device

制含水率和干密度分别为 21% 和 $1.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 以减小含水率和干密度对试验结果的影响。然后, 将 5 组试样编号为 S0、S1、S2、S3 和 S4, 其中 S0 代表 0 含盐量, S1 代表 1% 含盐量, 以此类推。试验开始前根据设置的试验条件称取对应质量的 Na_2SO_4 (纯度 $\geq 99\%$)、蒸馏水和上述去除盐分的土体, 将盐加入蒸馏水中充分搅拌完全溶解后加入土中搅拌均匀, 然后装入密封袋中静置 24 h 以保证土体与盐溶液充分混合, 最后分三层装入内径为 115 mm、高为 98 mm 的圆柱形试样筒中。试样制作完成后安装相应传感器(竖直和水平方向尽可能保持居中), 并在试样筒周围缠绕保鲜膜减少试验过程中的水分蒸发。准备就绪之后将试样放入冷冻箱内, 设置冷冻箱温度为 10°C , 恒温静置 12 h 左右。待土柱中温度恒定后, 设置冷冻箱环境温度为 -20°C , 持续降温 12 h, 然后在室温下升温 12 h, 如此反复进行 5 次冻融循环。采用传感器持续监测试验过程中土柱的温度、水分、电导率、孔隙水压力、基质吸力以及土体位移等变化情况。

2 试验结果

如前所述, 试验过程中测试了土体中温度、位移和未冻水含量等参数的变化过程, 结果如图 2 所示。由图中可知各参数之间存在良好的相关性, 试验开始后试样温度逐渐降低, 土体出现小幅沉降变形, 当土体温度达到相变温度后, 土体中的未冻水含量和溶液电导率迅速减小, 而土体位移迅速增大。冻结点附近土体温度保持恒定, 当土体中的液态水完全结冰后, 土体温度再次降低, 但土体位移几乎不变。升温过程中, 土体温度逐渐升高, 达到融化温度附近其温度几乎不变, 当土体中的冰完全转化为液态水后, 土体温度再次升高。随着温度的变化过程, 未冻水含量、溶液电导率和土体位移均发生相应变化。

为了进一步研究试验过程中土体温度、未冻水含量、电导率和位移的变化规律, 本文着重分析 S0 和 S3 的第 2 个冻融循环过程。根据各测试参数随土体温度的变化过程(表 3), 将不含盐土体冻融循环过程中的变形行为分为 5 个阶段, 含盐土体冻融循环过程分为 6 个阶段(图 3):

(1) 阶段 I

土体温度从冻融循环最高温度开始下降至盐分相变温度。在这一阶段, 由于未达到相变温度,

土体 S0 和 S3 中均没有冰晶体产生。S3 中电导率逐渐增大是由于土体中盐溶液的饱和度随着温度的降低而增大, 但未达到晶体析出的临界过饱和比, 孔隙中无盐晶体生成, 即使温度持续降低, 液态水的含量也保持恒定, 因此, 此阶段土体产生轻微变形主要由冷收缩造成。

(2) 阶段 II

土体温度继续降低, 直至土体冻结温度。在这一阶段, 土体温度未达到冻结温度, 但土体盐分处于过饱和状态, 土体孔隙中 1 mol 硫酸钠结合 10 mol 水分子析出十水硫酸钠晶体, 使得土体变形快速增大, 电导率和未冻水含量迅速降低, 当土体中的温度达到吸放热平衡时, 土体温度保持不变[图 3(b)中 A 点]。之后, 盐结晶导致溶液过饱和比逐渐减小, 盐结晶速率减小, 液态水的降低幅度变缓, 土体变形速率也逐渐减小。因此, 此阶段土体变形主要由盐结晶引起。

(3) 阶段 III

土体温度从冻结温度下降到冻融循环的最低温度。当土体温度达到冻结温度时, 大孔隙中的自由水率先结冰, 释放潜热。水分结冰后液态水含量减少, 含盐土体中盐分浓度逐渐增大并处于过饱和状态, 土体孔隙内盐晶体伴随着冰晶体产生共同析出, 土体应变快速增大。最后, 当土中的液态水含量很低且硫酸钠溶液未达到饱和时, 温度继续降低, 试样处于冷冻状态, 土体变形也保持基本稳定。

(4) 阶段 IV

土体温度从冻融循环过程的最低温度逐渐上升至融化温度。温度升高时, 小孔隙中的冰先融化, 未冻水含量逐渐增加, 但土体仅产生较小的沉降变形。

(5) 阶段 V

土体温度由融化温度继续升高直至晶体完全融化/溶解。此阶段, 土体孔隙中冰完全融化, 盐晶体逐渐溶解, 未冻水含量和电导率恢复至初始值, 土体发生明显融沉现象。

(6) 阶段 VI

土体温度继续上升。此阶段, 未冻水含量和电导率保持不变。随着温度逐渐升高, 位移仅小幅度变化, 土体变形主要为温度应变。

3 变形机理分析

此外, 冻融过程中, 温度的变化会导致土体中

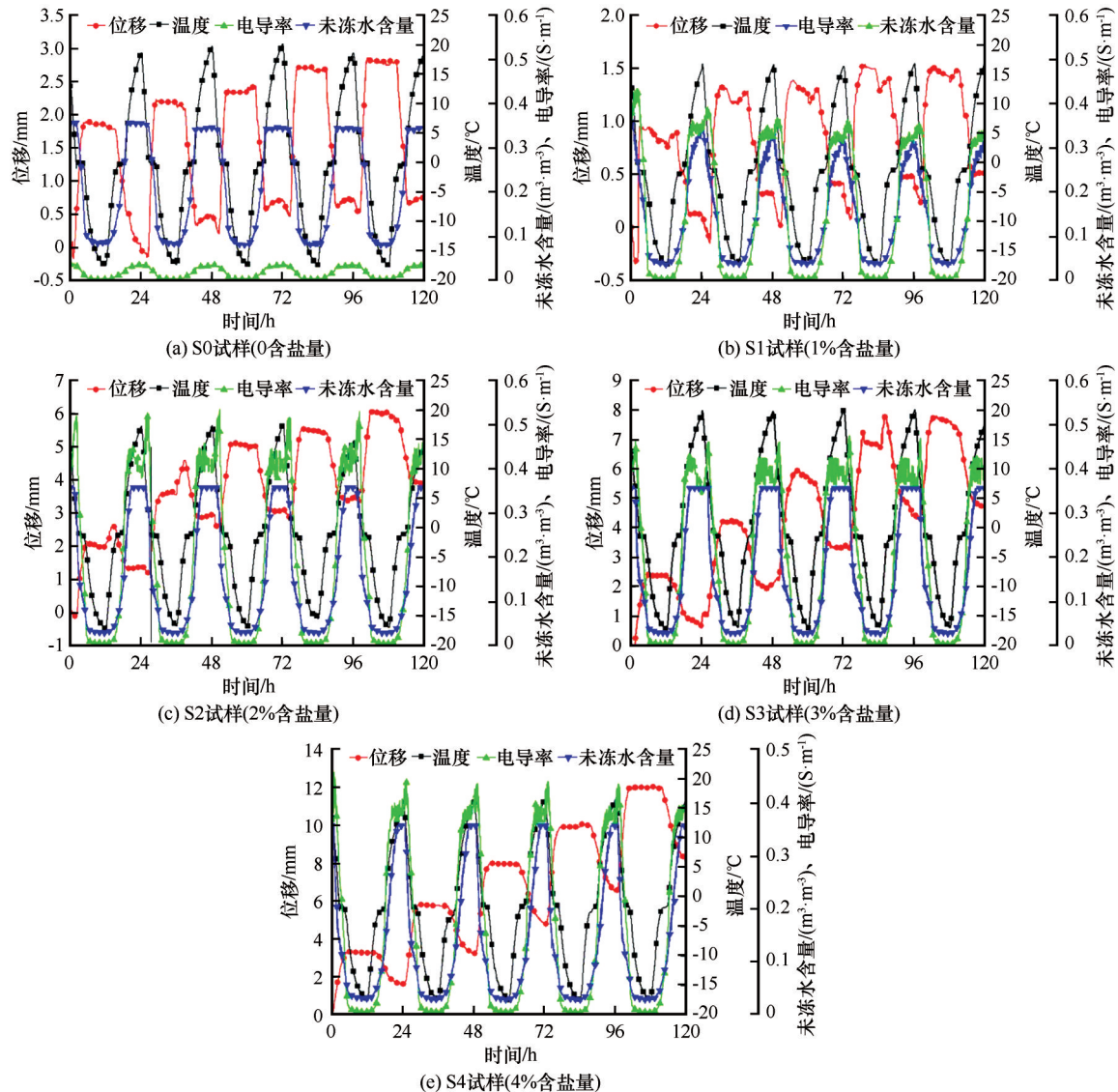


图2 S0~S4试样在冻融循环过程中未冻水含量和位移的变化

Fig. 2 Variations of unfrozen water content and displacement of soil samples during freeze-thaw cycles: Sample S0 (0 salt content) (a), Sample S1 (1% salt content) (b), Sample S2 (2% salt content) (c), Sample S3 (3% salt content) (d) and Sample S4 (4% salt content) (e)

孔隙压力的变化。孔隙压力的变化受孔隙中未冻水、冰晶体和盐晶体等多种物质及其含量的影响,是引起相变过程中土体变形的重要因素。图4反映冻融过程土体孔隙水压力、位移等变化情况。降温阶段,溶液溶解度逐渐降低,盐溶液结晶,未冻水膜厚度减小导致孔隙水压力减小,土体产生压缩变形;达到冻结温度时,土体中水结冰产生的热量导致系统温度升高,少量冰核融化为水,孔隙水压力轻微上升,土体变形快速增大;然后,由于冰水相变过程中毛细势和吸附势降低而引起孔隙水压力迅速降低^[32],此时,土体中只存在少量吸附于土颗粒表面的束缚水,较大的负孔隙水压力使得土体产生

轻微的固结变形。升温阶段,孔隙水压力、位移等量的变化与降温阶段呈现相反过程。随着温度升高,孔隙水压力逐渐增大,土体变形轻微增大;温度刚达到融化温度时,土体中的冰晶体融化为水是一个吸热过程,导致系统温度降低,液态水分子处于过冷状态而结晶,孔隙水压力小幅度减小,位移减小;随着系统温度的升高,大量冰晶融化为水,孔隙水压力急剧增大,土体发生融沉变形;此后,未冻水含量和孔隙水压力趋于稳定,土体不会产生明显的变形。

为了进一步明确冻融过程中基质吸力对土体变形的影响,本文以S0和S2的第3个冻融周期(图

表3 冻融过程中土体在各阶段的温度参数(单位:℃)

Table 3 Temperature parameters of soil in each stage during freeze-thaw cycles (unit:℃)

试样编号	温度参数	冻融循环次数				
		1	2	3	4	5
S0	冻结温度	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
	融化温度	-1.20	-1.20	-1.20	-1.20	-1.20
S1	晶体析出温度	-0.83	-0.91	-0.83	-0.94	-0.84
	冻结温度	-1.25	-1.12	-1.10	-1.05	-1.04
	融化温度	-2.60	-2.40	-2.31	-2.21	-2.11
	完全溶解温度	4.61	4.52	4.31	4.71	4.72
S2	晶体析出温度	0.52	1.02	1.41	1.54	1.85
	冻结温度	-1.21	-1.21	-1.22	-1.21	-1.21
	融化温度	-2.10	-2.01	-2.01	-2.01	-2.01
	完全溶解温度	10.50	10.04	11.01	11.11	11.20
S3	晶体析出温度	7.42	7.91	8.22	8.31	8.51
	冻结温度	-1.34	-1.34	-1.38	-1.39	-1.35
	融化温度	-2.12	-2.13	-2.31	-2.32	-2.31
	完全溶解温度	12.55	12.91	13.01	12.82	12.93
S4	晶体析出温度	12.04	14.03	13.73	14.14	13.91
	冻结温度	-1.41	-1.41	-1.34	-1.34	-1.34
	融化温度	-2.82	-3.91	-2.15	-2.13	-2.06
	完全溶解温度	13.01	13.93	14.53	14.61	14.52

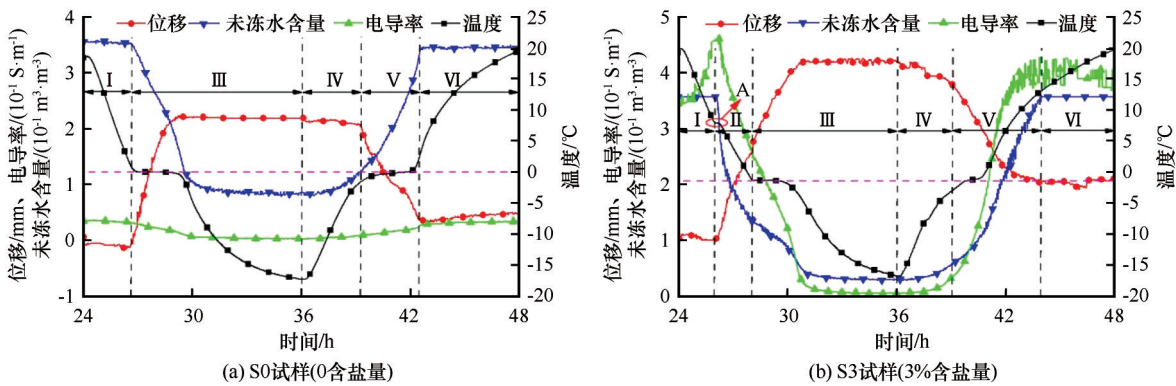


图3 S0试样与S3试样在第2个冻融循环中位移、未冻水含量和电导率的变化

Fig. 3 Variations of displacement, unfrozen water content and conductivity of soil samples in the second freeze-thaw cycle: Sample S0 (0 salt content) (a) and Sample S3 (3% salt content) (b)

5)进行分析。基质吸力与未冻水含量的变化呈现相反的过程,与位移变化曲线相似。随着温度的降低和未冻水含量的减少,基质吸力以升高为主;随温度升高,未冻水含量的增加,基质吸力以下降为主。

由上述试验现象可知,结晶相变和未冻水含量变化会引起土壤结构及基质吸力的变化。Bishop^[33]提出非饱和土的有效应力公式,为

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (1)$$

很多学者^[34-35]将饱和正冻土的基质吸力与非饱和土基质吸力进行类比,认为饱和正冻土中冰压力与空气压力具有类似的效果,是冻土中基质吸力产生的主要原因。因此,可将冻结盐渍土的有效应力写为

$$\sigma' = (\sigma - u_m) + \chi(u_m - u_w) \quad (2)$$

式中: σ' 为粒间有效应力; σ 为总应力; u_a 为孔隙气压力; u_m 为非液相压力; u_w 为孔隙水压力; χ 为有效应力参数,其值取决于液态水饱和度。其中,非液相

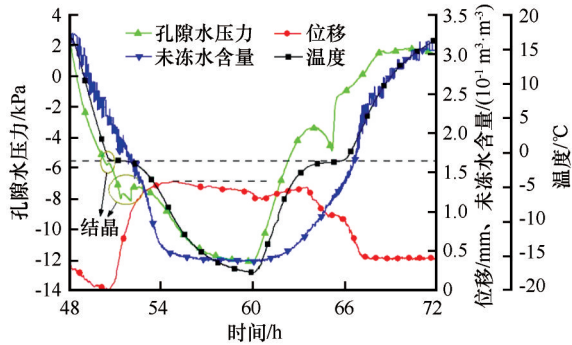
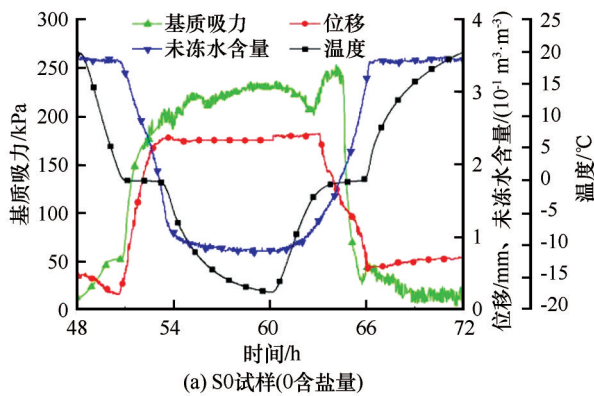


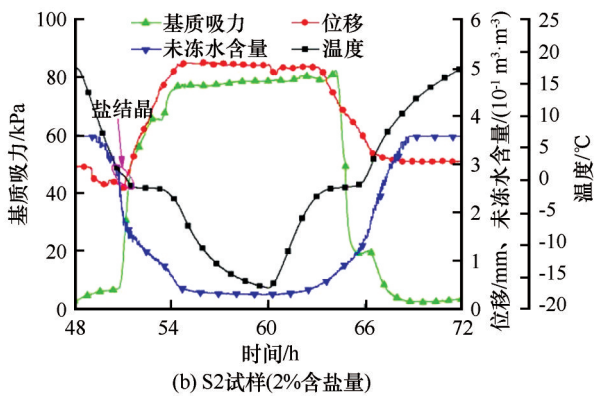
图4 S1试样(1%含盐量)在第3个冻融循环中孔隙水压力和位移的变化

Fig. 4 Variations of pore water pressure and displacement of Sample S1 (1% salt content) in the third freeze-thaw cycle

压力 u_m 包括孔隙气压力 u_a 、冰晶体压力 u_i 和盐晶体压力 u_c 。通过上述类比可知,对于冻结盐渍土, $(\sigma - u_m)$ 为净法向应力, $(u_m - u_w)$ 为基质吸力。



(a) S0试样(0含盐量)



(b) S2试样(2%含盐量)

图5 S0试样与S2试样在第3个冻融循环中基质吸力和位移的变化

Fig. 5 Variations of matrix suction and displacement of soil samples in the third freeze-thaw cycle: Sample S0 (0 salt content) (a) and Sample S2 (2% salt content) (b)

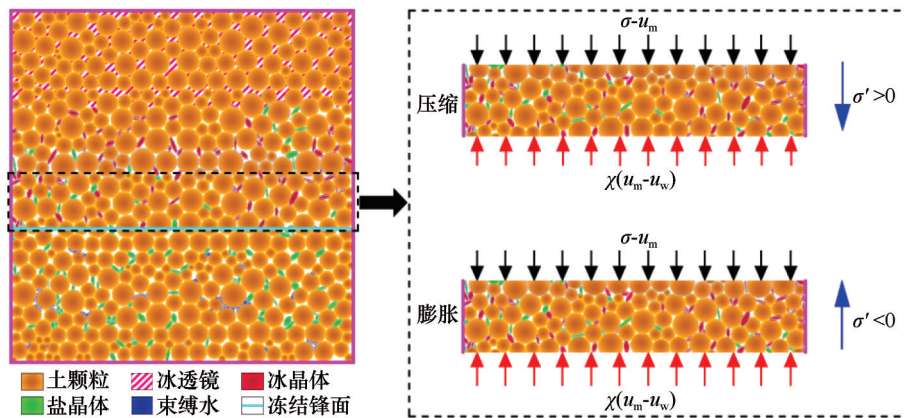


图6 基质吸力对土体变形的影响示意图

Fig. 6 Schematic diagram of influence of matrix suction on soil deformation

根据上述冻融循环过程中盐渍土变形特征,进一步分析冻融过程中引起土体变形的因素包

式(2)反映了盐渍土中孔隙水压力和基质吸力对有效应力的贡献。由图4~5可知,冷缩压密阶段,孔隙水压力在较短的时间内首先由正孔隙水压力减小为负孔隙水压力,基质吸力小幅增加,导致有效应力减小,但有效应力方向不变,仍为压应力,最终土体发生压缩变形(图6)。在进一步降温过程中,盐溶液过饱和比达到初始结晶过饱和比时,盐晶体开始析出,基质吸力迅速增大[图5(b)],有效应力方向发生变化,为拉应力,当超过土体间连接强度后土颗粒被盐晶体推开,导致土体变形逐渐增大;达到冻结温度后,水分开始结冰,冰压力的作用使基质吸力进一步增加,土体变形进一步增大(图6)。反之,升温后基质吸力逐渐减小,孔隙水压力逐渐增大,土体中有效应力增大(压应力),土体变形减小。

括温度、水分和盐分。如图7所示,将土体应变分为温度应变、盐胀、冻胀、融沉、溶陷和残余应变。温

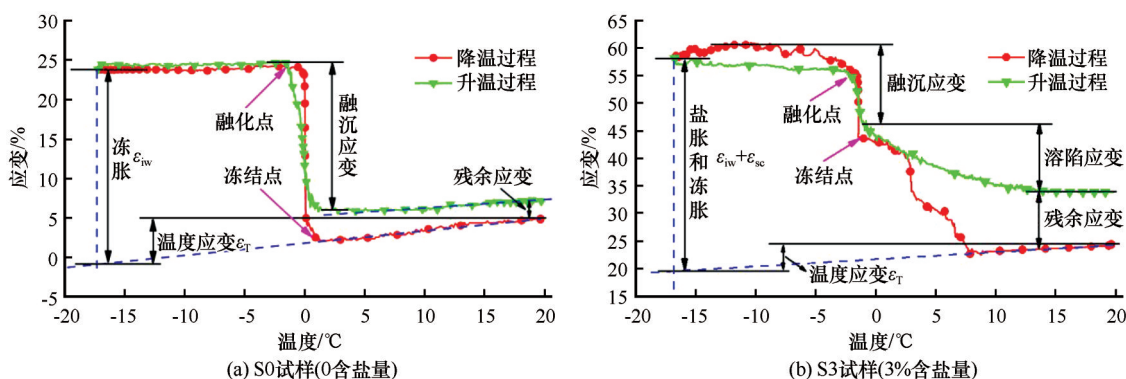


图7 S0试样与S3试样在第3个冻融循环中典型的应变-温度曲线

Fig. 7 Typical strain-temperature curves in the third freeze-thaw cycle; Sample S0 (0 salt content) (a) and Sample S3 (3% salt content) (b)

度应变为升降温过程引起的变形,与土体的热膨胀系数有关,当土体温度变化量最大时,温度应变达到最大值;由于盐晶体主要在温度达到冻结温度之前产生,则盐胀为冻结温度之前盐晶体析出时产生的应变;冻胀是当土体温度达到冻结温度后,土体内水分结冰产生的应变;升温过程中,融沉为冰晶体融化产生的应变;溶陷为盐晶体溶解产生的应变;残余应变是冻融循环发生后,温度升到初始温度时,土体变形仍未完全恢复的应变,残余应变反映了土体在冻融循环过程中的累计变形效应。因此,应变可表示为

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h} = \varepsilon_T + \varepsilon_{sc} + \varepsilon_{iw} \quad (3)$$

由于土体盐溶液浓度的不同,土体达到饱和的温度也有所不同。为了进一步分析冻结过程中温度、水分、盐分对土体变形各阶段产生的贡献,以冻结温度为界,不含盐土体应变在冻结之前由温度引起(ε_T),冻结之后由水结冰和温度共同产生($\varepsilon_{iw} + \varepsilon_T$);而含盐土体应变在冻结之前由温度和盐结晶引起($\varepsilon_T + \varepsilon_{sc}$),冻结之后由水结冰和温度引起($\varepsilon_{iw} + \varepsilon_T$)。由此,可分别估算不同含盐土体冻融循环过程中各应变量的值。

由图8(a)可知,降温过程中盐胀随含盐量的增大显著增大,低含盐量时土体盐胀变形不显著,变形主要由冻胀引起。随着溶质含量增大,溶液达到饱和的温度逐渐升高,冻结温度之前的盐胀变形曲线明显由缓变陡,盐胀对土体变形的贡献随着溶质含量的增加显著增大。此外,含盐量越高,冻融次数对盐胀的影响越明显,从第一冻融周期到第五冻融周期,含盐量为4%时土体盐胀由 $23.5 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1}$ 变化为 $41.7 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1}$ 。而冻结过程中,土体冻胀变形

随着含盐量的增加有减小的趋势,且在含盐量为1%处最小,表明含盐量为1%时可以在一定程度上抑制土体的冻胀变形[图8(b)]。

融沉与冻胀的变化趋势基本一致,呈现出随着含盐量增加而减小的趋势[图8(c)];而溶陷与盐胀的变化趋势较为一致,随着含盐量增大,盐晶体对土体溶陷变形的贡献有增大趋势[图8(d)]。降温与升温过程中由于水结冰与融化、盐结晶与溶解使得土体结构不断调整,随着含盐量的增加,残余应变逐渐增大[图8(e)]。由此可见,高含盐量时温度变化引起水分和盐分相变对土体结构的调整剧烈,严重影响了该区域建筑物的稳定性。

4 结论

论文研究了冻融循环条件下硫酸盐渍土变形规律,通过温度、未冻水含量、电导率和孔隙水压力及基质吸力的变化过程,对硫酸盐渍土变形机理进行了探讨,得到以下结论:

(1)冻融过程中孔隙水压力和基质吸力的变化受多种因素的共同作用,由于相变点处于非平衡状态,孔隙水压力具有一定程度的波动特征,基质吸力变化显著。类比于非饱和土有效应力表达式,给出了冻结盐渍土的有效应力方程。阐明了冻融过程中孔隙水压力及基质吸力的变化对土体变形过程的影响。

(2)对应于土体温度变化,可将冻融循环中土体变形过程分为六个阶段,并计算了温度应变、盐胀、冻胀、溶陷、融沉和残余应变对总变形的贡献量。发现冻融过程中土体的含盐量较低时,土体应变以冻胀和融沉为主;含盐量较高时,土体应变以盐胀和溶陷为主;含盐量为1%时土体应变最小,表

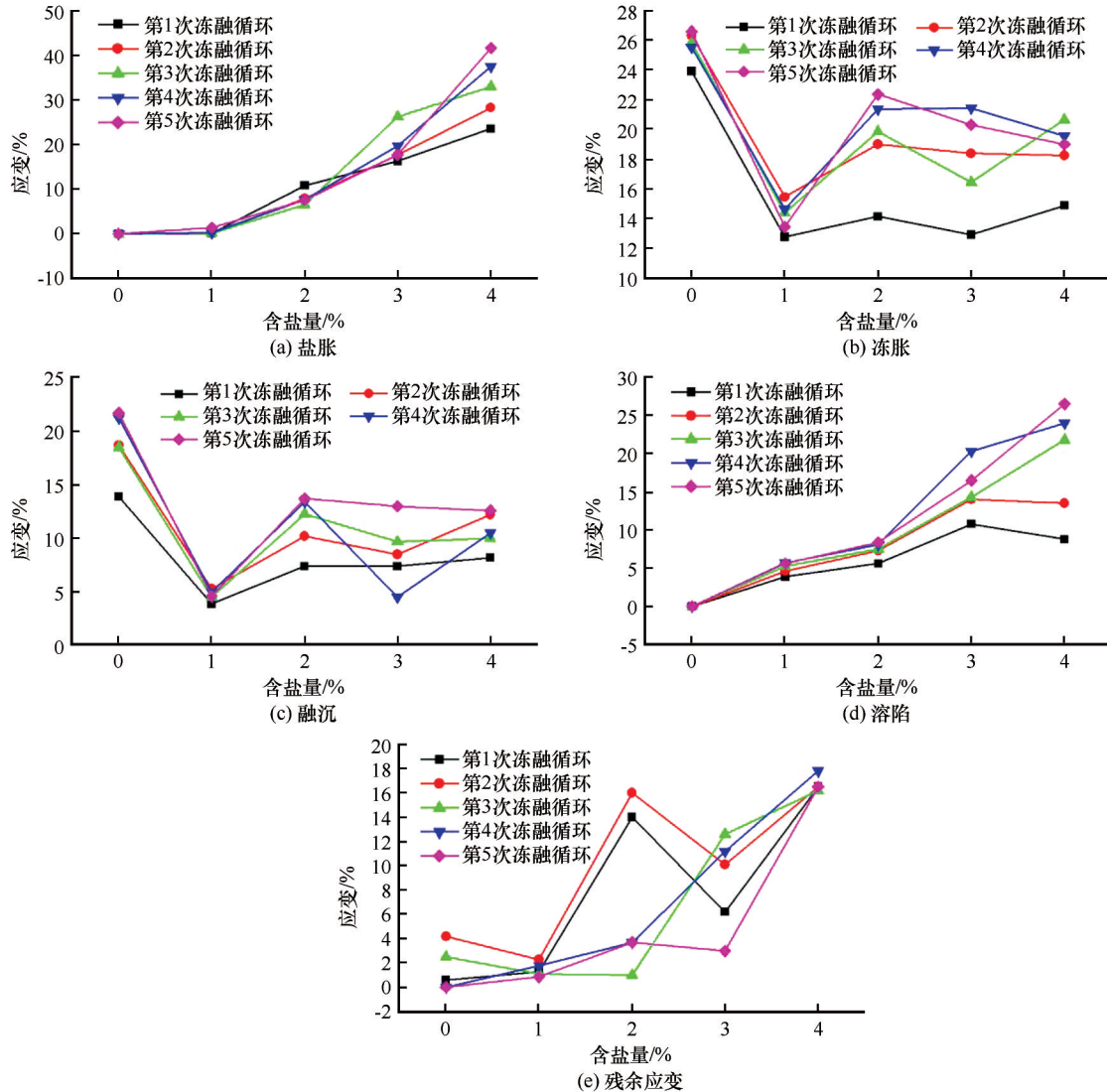


图8 升降温过程中各种土体应变随含盐量的变化

Fig. 8 Variations of various soil strains with salt content during warming and cooling: salt expansion (a), frost heave (b), thaw settlement (c), dissolve collapse (d) and residual strain (e)

明适当控制含盐量能够有效防止冻融循环对土体的变形破坏作用。

参考文献(References):

- [1] Wan Xusheng, Hu Qijun, Liao Mengke. Salt crystallization in cold sulfate saline soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2017, 137: 36-47.
- [2] Xu Xiangtian, Wang Baoxuan, Fan Caixia, et al. Strength and deformation characteristics of silty clay under frozen and unfrozen states[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 172: 102982.
- [3] Yang Peng, Zhu Yanpeng, Mi Haizhen. Experimental investigation of microscopic mechanism of salt-expansion and dehydration of salty soil soaked by coarse-particle sulphate[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2019, 45(5): 130-134. [杨鹏, 朱彦鹏, 米海珍. 粗颗粒硫酸盐渍土失水盐胀微观机理的试验研究[J]. 兰州理工大学学报, 2019, 45(5): 130-134.]
- [4] Ren Xiuling, Zhang Wen, Liu Xin, et al. The research development and thinking about the expansibility property of saline soil in Northwest region[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(1): 246-252. [任秀玲, 张文, 刘昕, 等. 西北地区盐渍土盐胀特性研究进展与思考[J]. 土壤通报, 2016, 47(1): 246-252.]
- [5] Schiro M, Ruiz-Agudo E, Rodriguez-Navarro C. Damage mechanisms of porous materials due to in-pore salt crystallization[J]. Physical Review Letters, 2012, 109(26): 265503.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Liu Kai, Zhang Yuanfang, Zhang Yunhai, et al. Salt heaving test of sub-chlorine saline soil under cyclic freezing and thawing

- [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(5): 93-96. [刘凯, 张远芳, 张运海, 等. 冻融循环条件下亚氯盐渍土盐冻胀试验研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(5): 93-96.]
- [9] Tian Runze, Zhang Yu, Xu Anhua, et al. Impact of cooling on water and salt migration of high-chlorine saline soils [J/OL]. Geofluids, 2021: 8612762 [2022-03-25]. <https://doi.org/10.1155/2021/8612762>.
- [10] Zhang Peiran, Huang Xuefeng, Yang Xiaohui, et al. Experiment on coupling effect of water and thermal field and salt-expansion deformation of salty soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(5): 1619-1624. [张沛然, 黄雪峰, 杨校辉, 等. 盐渍土水-热场耦合效应与盐胀变形试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(5): 1619-1624.]
- [11] Xu Xuezu, Lebedenko IU P, Chuvilin E M, et al. Experimental study on processes of heat-mass transfer and deformation in system of frozen kaolin and salt solution [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1992, 14(4): 289-295. [徐学祖, 列别钦科 IO П, 丘维林 E M, 等. 冻土与盐溶液系统中热质迁移及变形过程试验研究[J]. 冰川冻土, 1992, 14(4): 289-295.]
- [12] Ying Sai, Zhou Fengxi, Wen Tao, et al. Salt expansion and frost heave in cooling sulfate saline soil [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(6): 116-122. [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.]
- [13] Wu Gang, Bing Hui, Bu Dongsheng. Experimental study on the relationship between saline soil and salt solution freezing temperature [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(3): 615-628. [吴刚, 郇慧, 卜东升. 盐渍土与盐溶液冻结温度关系的试验研究[J]. 冰川冻土, 2019, 41(3): 615-628.]
- [14] Liu Jianpeng, Yang Ping, Yang Zhaohui. Water and salt migration mechanisms of saturated chloride clay during freeze-thaw in an open system [J]. Cold Regions Science and Technology, 2021, 186: 103277.
- [15] Chen Xiaobai, Qiu Guoqing, Wang Yaqing, et al. Salt redistribution and heave of saline soil during cooling [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1989, 11(3): 231-238. [陈肖柏, 邱国庆, 王雅卿, 等. 降温时之盐分重分布及盐胀试验研究[J]. 冰川冻土, 1989, 11(3): 231-238.]
- [16] Wu Daoyong, Lai Yuanming, Ma Qinguo, et al. Model test study of water and salt migration and deformation characteristics in seasonally frozen soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(2): 465-476. [吴道勇, 赖远明, 马勤国, 等. 季节冻土区水盐迁移及土体变形特性模型试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 465-476.]
- [17] Bao Weixing, Yang Xiaohua, Xie Yongli. Research on salt expansion of representative crude saline soil under freezing and thawing cycles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(11): 1991-1995. [包卫星, 杨晓华, 谢永利. 典型天然盐渍土多次冻融循环盐胀试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1991-1995.]
- [18] Xiao Ze'an, Lai Yuanming, You Zheming. Experimental study on impact of salt content on deformation characteristics of sodium sulfate soil under freeze-thaw conditions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(5): 953-960. [肖泽岸, 赖远明, 尤哲敏. 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[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(5): 953-960.]
- [19] Gao Jiangping, Wu Jiahui, Deng Yousheng, et al. A multi-factor study of salt expansion of sulphate salty soil [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 18(2): 76-83. [高江平, 吴家惠, 邓友生, 等. 硫酸盐渍土膨胀规律的综合影响因素的试验研究[J]. 冰川冻土, 1996, 18(2): 76-83.]
- [20] Zhang Shasha, Wang Yongwei, Bao Weixing, et al. Sensitive parameters of embankment deformation behavior for coarse-grained sulfate saline soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(5): 946-952. [张莎莎, 王永威, 包卫星, 等. 影响粗粒硫酸盐渍土盐胀特性的敏感因素研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(5): 946-952.]
- [21] 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. [郇慧, 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.]
- [22] Bing Hui, He Ping, Yang Chengsong, et al. Influence of sodium sulfate on soil frost heaving in an open system [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(1): 126-130. [郇慧, 何平, 杨成松, 等. 开放系统下硫酸钠盐对土体冻胀的影响[J]. 冰川冻土, 2006, 28(1): 126-130.]
- [23] Fang Jianhong, Li Xu, Liu Jiankun, et al. The crystallization and salt expansion characteristics of a silty clay [J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 154: 63-73.
- [24] Xiao Ze'an, Lai Yuanming, You Zheming, et al. The phase change process and properties of saline soil during cooling [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2017, 42(9): 3923-3932.
- [25] Wang Liyang, Liu Jiankun, Feng Ruiling, et al. Experimental study on salt expansion characteristics of coarse-grained sulfate soils [J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2020, 34(2): 4020004.
- [26] Zhao Tianyu, Zhang Huyuan, Wang Zhishuo, et al. Theoretical analysis of crystallization of sodium sulphate for sulphate saline soil containing chloride [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(7): 1340-1347. [赵天宇, 张虎元, 王志硕, 等. 含氯硫酸盐渍土中硫酸钠结晶量理论分析研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(7): 1340-1347.]
- [27] Niu Xirong, Gao Jiangping. Expression for volume change of sulphate saline soil considering salt expansion and frost heave [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(4): 755-760. [牛玺荣, 高江平. 综合考虑盐胀和冻胀时硫酸盐渍土体积变化关系式的建立[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(4): 755-760.]
- [28] Bing Hui, Ma Wei. Experimental study on freezing point of saline soil [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(5): 1106-1113. [郇慧, 马巍. 盐渍土冻结温度的试验研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(5): 1106-1113.]
- [29] Wan Xusheng, Lai Yuanming, Wang Chong. Experimental study on the freezing temperatures of saline silty soils [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2015, 26(2): 175-187.
- [30] Huang Yongting, Ma Wei, He Pengfei, et al. Laboratory tests on pore water pressures in soils subjected to cyclic freeze-thaw under different loads [J/OL]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021 [2022-03-25]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1152.TD.20210316.1618.002.html>. [黄永庭, 马巍, 何鹏飞, 等. 有压冻融土体孔隙水压力变化试验研究[J/OL]. 中国矿业大学学报, 2021 [2022-03-25]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1152.TD.20210316.1618.002.html>.]
- [31] Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing

- method: GB/T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019. [中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.]
- [32] Zhang Lianhai, Ma Wei, Yang Chengsong. Pore water pressure measurement for soil subjected to freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(7): 1856-1864. [张莲海, 马巍, 杨成松. 冻融循环过程中土体的孔隙水压力测试研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(7): 1856-1864.]
- [33] Bishop A W. The principle of effective stress[J]. Teknisk Ukeblad, 1959, 106(39): 859-863.
- [34] Kadivar M, Manahiloh K N. Revisiting parameters that dictate the mechanical behavior of frozen soils[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 163: 34-43.
- [35] Yin Xiao, Liu Enlong, Song Bingtang, et al. Numerical analysis of coupled liquid water, vapor, stress and heat transport in unsaturated freezing soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 155: 20-28.

Experimental study on deformation of remolded sulfate saline soil under freeze-thaw cycles

HUANG Youfen¹, WU Daoyong^{1,2}, WU Shiyu¹

(1. Key Laboratory of Karst Georesources and Environment, Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: The accumulated deformation of saline soil caused by the special temperature and humidity environment is the main cause of numerous engineering problems in seasonally frozen region. However, the deformation failure mechanism of saline soil is not well defined. The freeze-thaw cycle experiments are carried out by silt with different salt contents to investigate the variation characteristic of temperature, unfrozen water content, pore water pressure, matric suction and displacement during the test. It is found that the pore water pressure and matric suction are sensitive to soil temperature and have important effects on soil deformation. By analogy with the effective stress principle of unsaturated soil, the effective stress equation of frozen saline soil is given. The soil deformation is divided into temperature strain, salt expansion, frost heave, dissolve collapse, thaw settlement and residual strain, which completely explains the deformation mechanism of frozen saline soil. Moreover, the degree of influence of salt content on soil deformation is discussed, which indicates that frost heave and thaw settlement are the main strains of saline soil with low salinity. With the increase of salt content, the contribution of salt expansion and dissolve collapse becomes more and more significant. The soil deformation is minimum when the salt content is 1%, which indicates that proper control of salt content can effectively suppress soil deformation.

Key words: freeze-thaw cycles; sulfate saline soil; deformation mechanism; effective stress principle

(责任编辑: 张泽)