水利水运工程学报
HYDRO-SCIENCE AND ENGINEERING

冻融循环对膨胀土变形和力学特性的影响研究

陈永，黄英豪，朱洵，吴敏，王硕，朱锐

Study on the influence of freeze-thaw cycles on the deformation and mechanical properties of expansive soil

CHEN Yong, HUANG Yinghao, ZHU Xun, WU Min, WANG Shuo, ZHU Rui

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12170/20210116001

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

基于正交设计的膨胀土冻融循环试验研究
Experimental studies on freeze-thaw cycles of expansive soil based on orthogonal design
水利水运工程学报. 2017(2): 51 https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.02.007

冻融劣化混凝土压剪作用下力学特性及破坏准则
Mechanical properties and failure criterion of freeze-thaw deteriorated concrete under compressive-shear stress
水利水运工程学报. 2019(4): 107 https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.04.015

不同冻融循环次数混凝土单轴压缩试验
Experimental studies on dynamic properties of concrete under different freeze-thaw cycles
水利水运工程学报. 2017(1): 32 https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.01.005

冻融劣化混凝土循环加卸载外包络线及能量演化
Study of outer envelope curve and energy evolution for freeze-thaw deteriorated concrete under cyclic loading and unloading test
水利水运工程学报. 2017(6): 85 https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.06.012

膨胀土膨胀变形试验研究
Experimental study on expansion and deformation of expansive soil
水利水运工程学报. 2019(1): 60 https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.01.008

混凝土剪切强度影响因素敏感性分析
Sensitivity analysis of influencing factors on concrete shear strength
水利水运工程学报. 2019(3): 112 https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.03.014

扫码进入官网，阅读更多精彩文章

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20210116001
陈永, 黄英豪, 朱洵, 等. 冻融循环对膨胀土变形和力学特性的影响研究 [J]. 水利水运工程学报, 2021(5): 112-119. (CHEN Yong, HUANG Yinghao, ZHU Xun, et al. Study on the influence of freeze-thaw cycles on the deformation and mechanical properties of expansive soil[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(5): 112-119. (in Chinese))

冻融循环对膨胀土变形和力学特性的影响研究

陈 永, 黄英豪, 朱 洵, 吴 敏, 王 硕, 朱 锐
(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 为探究季冻区恶劣气候对不同含水率下渠基膨胀土的胀缩变形和物理力学性质的影响, 以北疆阿勒泰地区膨胀土为研究对象, 室内模拟了北疆地区实际气候条件的冻融循环试验。基于此, 对含水率为 12%、16% 和 20% 的膨胀土进行体积变形试验、无侧限抗压强度试验和 SEM 电镜扫描试验, 着重分析了冻融循环作用对膨胀土体积变形和力学特性的影响规律。结果表明: 冻融循环过程中, 随含水率的增加, 试样的体积变形由冻缩融胀向冻胀融缩转变。应力-应变曲线特性与冻融循环次数和含水率都有较大的关系。试样的无侧限抗压强度随着含水率和冻融循环次数的增加而降低, 其中以第 1 次冻融循环最为明显, 3 次后趋于稳定。函数拟合发现, 试样的无侧限抗压强度与冻融循环次数呈明显的自然指数关系。含水率越大, 冻融循环作用对土体微观结构的影响越大; 土体的孔隙度随冻融循环次数的增加逐渐增大, 第 1 次冻融循环作用最为明显, 宏观上表现为冻融循环作用对土体力学性质的劣化影响。

关 键 词: 冻融循环; 渠基膨胀土; 体积变形; 无侧限抗压强度; 电镜扫描
中图分类号: TU475 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2021)05-0112-08

膨胀土是一种富含蒙脱石和伊利石等强亲水性矿物的高塑性黏土, 具有裂隙性、强衰减性和强胀缩性等特点[1-2]。膨胀土亦称胀缩性土, 受外界正负温度变化极易发生胀缩变形, 进而造成土体结构的破坏和抗剪强度的急剧减弱, 是工程界典型的“问题土”。目前, 已有众多针对膨胀土特性的试验研究, 杨和平等[3]对南宁膨胀土进行了干湿循环作用后的直剪试验, 指出土体抗剪强度的下降主要是因为干湿循环次数的增加; 朱洵等[4] 通过三轴剪切试验研究了不同干密度下膨胀土的力学性质与湿干冻融耦合循环次数的关系, 指出在湿干冻融耦合作用下膨胀土的体积变形和弹性模量等受干密度的影响较大; 刘清秉等[5] 通过室内 K_0 应力状态膨胀试验, 认为含水率越大, 膨胀率越小; 蔡正银等[6] 通过无侧限抗压强度试验测得, 随着含水率的升高土体强度先增加后减小, 并存在最大强度。上述研究大多集中在干湿循环、冻融循环、含水率等单因素对膨胀土胀缩变形和力学性质等方面的影响, 而且局限于土体宏观力学的研究, 针对冻融循环与含水率之间的交互作用对膨胀土的胀缩变形和力学性质的影响少有研究, 土体微观结构的演化等微细观机理与宏观力学性质相结合的研究也尚待开展。

基于此, 本文以北疆阿勒泰地区某长距离输水渠道渠基膨胀土为研究对象, 其膨胀土段工程约占渠道总长的 32%, 渠道沿线的年平均地温 3.4 ℃, 冬季极端低温达−40.3 ℃, 夏季平均气温约为 20 ℃。这些因素共同作用形成了明显的冻融循环过程, 造成渠基膨胀土严重变形, 严重影响渠道稳定[7-8]。通过 12%、16% 和 20% 共 3 种不同含水率膨胀土试样的体积变形试验、无侧限抗压强度试验和 SEM 电镜扫描试验, 研究冻融循环作用下不同含水率的膨胀土的体积变形和力学性质的演化规律, 并将土体的性质从宏微观角度进行联系, 进一步明确冻融循环作用与含水率对胀缩变形、力学性质及土体微观结构演化规律的影响。

收稿日期: 2021-01-16
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51879166); 冻土工程国家重点实验室开放基金资助项目(SKLFSE201909)
作者简介: 陈 永(1997—), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要从事寒区供水工程的研究。
E-mail: chen1861442850@163.com 通信作者: 黄英豪 (E-mail: yhhuang@nhri.cn)

1　试验材料与方案

1.1　试验材料

本次试验所用土料取自北疆长距离输水渠道建设工地, 取样深度约为 1.5 m, 土料在此深度具有代表性。土料呈黄色, 通过一系列室内试验测得土料的基本物理性质及矿物组成, 如表 1 所示。土料的不均匀系数为 16, d_{10}、d_{30}、d_{50} 和 d_{60} 分别为 0.001、0.005、0.010 和 0.016 mm, 曲率系数为 1.56, 说明土的级配良好。同时, 土料的自由膨胀率为 86%, 具有中强膨胀性。

表 1　膨胀土的基本物理性质及矿物组成

Tab. 1　Basic physical properties and mineral composition of expansive soil

物理性质					矿物组成				
液限/%	塑性/%	塑性指数/%	最大干密度/(g·cm^{-3})	最优含水率/%	蒙脱石/%	石英/%	长石/%	方解石/%	钠长石/%
52.6	18.4	34.2	1.71	18.4	61.5	31.4	6.1	0.5	0.5

1.2　试样制备

将从工程现场运回的土料进行翻晒、自然风干碾压后过 2 mm 筛, 测定过筛土的初始含水率为 5.18%, 然后根据试样预设的含水率(按干土质量的 12%、16% 和 20%)用喷雾器向土中均匀地喷洒一定量的蒸馏水, 搅拌 15 min 后, 装入密封袋闷料 24 h, 使水分分布均匀。控制所有试样的压实度为 95%, 即干密度均为 1.62 g /cm^3, 含水率分别为 12%、16% 和 20%, 按照土工试验规范[9], 采用三层击实法制样, 将土样等量分 3 次填入制样器, 压实后削平土样表面, 试样尺寸为 ϕ39.1 mm×80 mm。将制备好的试样用保鲜膜包裹并进行分组编号, 然后放入略大于试样的密封袋中, 确保试样不与外界接触, 避免水分的散失和外界补给。

1.3　试验方案

1.3.1　*冻融循环试验*　渠道现场经历的冻融循环过程本身较为复杂, 室内试验中难以完全模拟, 参考文献 [10-11] 中的方法, 首先对现场实际边界条件进行概化。图 1 为北疆渠道总干渠段沿线某气象站观测到的 2013—2014 年地表温度分布, 不难发现, 全年平均气温低于 0 ℃ 的时间约为 4 个月(2013-11-20—2014-03-19), 此过程可视为土体经历了冻结作用; 平均气温高于 0 ℃ 的时间约为 8 个月(2014-03-19—2014-11-11), 此过程可视为土体经历了融化作用。由上述渠道温度变化最终确定室内模拟现场冻结状态的温度是 −22 ℃, 持续时间为 12 h; 模拟现场融化状态的温度是 22 ℃, 时间是 24 h。多项试验结果[12-14] 均发现, 在进行了大约 7 次冻融循环后, 膨胀土的力学和物理性质逐渐趋于稳定, 鉴于此结果, 本文将试样的最终冻融循环次数设计为 7 次。冻融循环试验采用可程式高低温试验装置进行室内模拟试验。

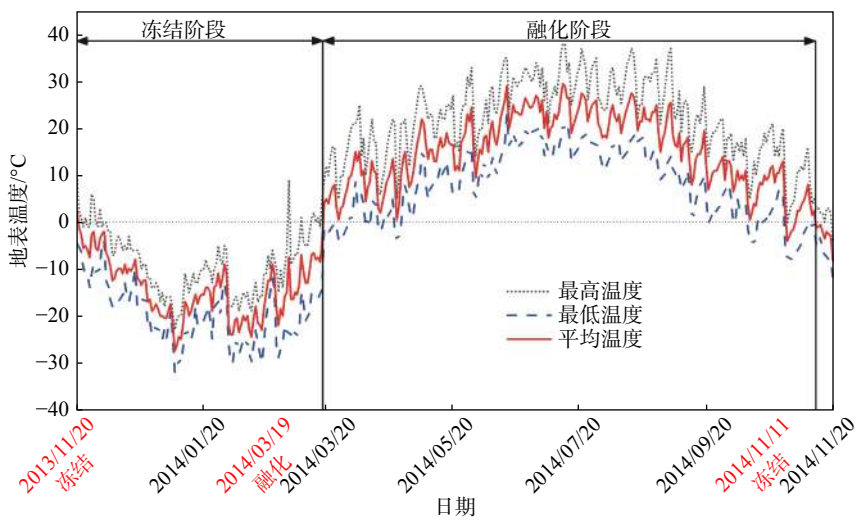


图 1　2013 年 11 月—2014 年 11 月渠道沿线地表气温分布曲线

Fig. 1　Surface temperature distribution curve along the channel from November 2013 to November 2014

1.3.2 体积变形试验 为了探究冻融循环过程中试样的体积变形规律，每组试样设置 5 个平行组，用数显游标卡尺测量冻结和融化后试样的直径和高度。考虑到冻融循环过程中试样变形的微小性和多向性[15]，参考蔡国庆等[15]的方法，对每个试样分别进行 3 次直径测量与高度测量，然后各取平均值根据公式计算出试样的体积。每次试样尺寸测量结束后，用电子天平对其进行称重，对冻融循环过程中试样的质量变化情况进行监控，避免水分的散失和外界补给带来的试验误差。

1.3.3 无侧限抗压强度试验 采用南京土壤仪器厂有限公司生产的石灰土无侧限抗压仪进行无侧限抗压强度试验，以此获取不同含水率下膨胀土试样经历多次冻融循环后的力学指标。分别对经过 0(初始状态)、1、3 和 7 次冻融循环作用后的试样进行无侧限抗压强度试验，轴应变达到 20% 时停止剪切试验，剪切速率为 1 mm/min。

1.3.4 SEM 电镜扫描试验 微观试验采用中科院兰州化学物理研究所的 SU8020 型冷场发射型扫描电镜仪。对经历不同冻融循环次数的试样从中心处较典型的部位切取体积为 5 mm×5 mm×5 mm 大小的土样，采用液氮真空冷却干燥法[16]，最大限度地保证土体的原始孔隙与结构特征。然后将其喷好金属镀膜连同基座一并放入扫描电镜样品区，通过调节试样位置，在观察区附近聚焦，选取具有代表性的点进行拍照，以探究冻融循环作用对不同含水率的试样在微观结构方面的影响，扫描倍数设为 100、500、1 000。

2 试验结果与分析

2.1 体积变形特征

试样在 7 次冻融循环后质量损失约为 0.51%，除极少数土粒外，都为水分损失，这说明此试验方法密封性较为良好。图 2 为不同含水率试样的体积变化率随冻融循环作用的变化情况(膨胀状态为正，收缩状态为负)，“F”表示试样每次冻结完成，“T”表示试样每次融化完成。由图 2 可以发现，不同含水率状态下试样的体积变形特征存在较大差异，含水率为 12% 和 16% 的试样在冻融循环过程中表现为“冻缩融胀”，不同的是，随着冻融循环次数的增加，含水率 12% 的试样体积变化幅度基本维持稳定不变，而含水率 16% 的试样体积变化幅度逐渐减小，3 次循环后体积变化幅度基本趋于稳定。含水率为 20% 的试样呈现出完全相反的变化趋势，整体表现为“冻胀融缩”，且冻胀率要大于融缩率，除第 1 次融化时表现为“融胀”。含水率为 12%、16% 和 20% 的试样体积变化率最大值分别出现在第 2 次、第 1 次和第 3 次冻结作用后，分别为−4.51%、−2.92% 和 5.67%，这从侧面说明了冻结作用是造成土体体积变形的主要原因。可以发现，随着试样含水率的增加，其整体体积变形规律由“冻缩融胀”向“冻胀融缩”转变，所有试样经 7 次冻融循环结束后，体积均略有增加。

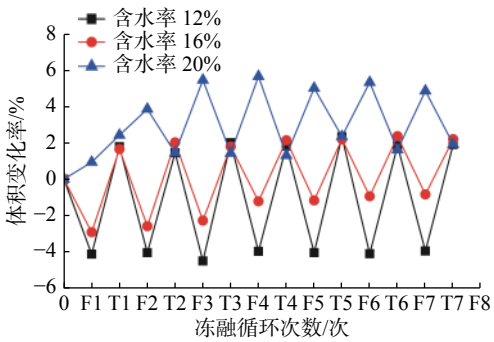


图 2 冻融循环过程中试样体积变化曲线

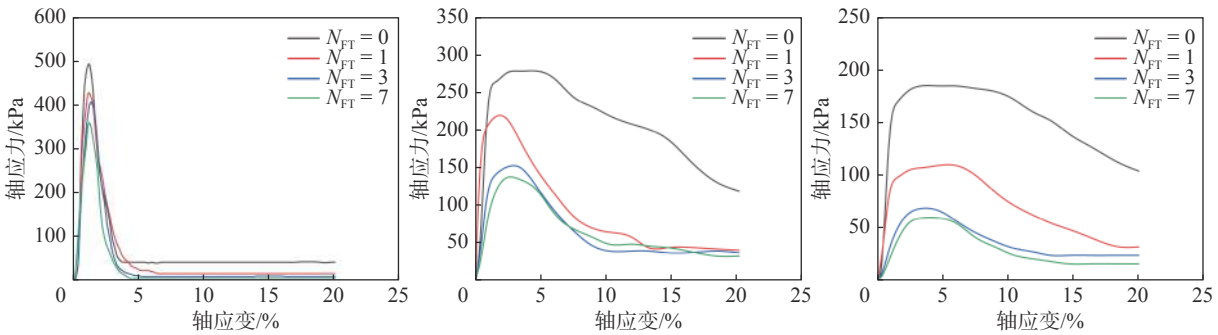
Fig. 2 Sample volume change curve during freeze-thaw cycle

冻融循环作用对膨胀土试样体积变形特征影响主要体现在两方面：一方面由于水与冰的密度不同，固态冰的体积比等质量液态水的体积大，当冻结作用发生时，液态水转变为固态冰，冰晶生长体积膨胀，融化作用则为逆过程；另一方面在冻结作用过程中膨胀土颗粒会因失水发生收缩[17]，并且冰晶不断地生长对周围的土颗粒产生挤压，这将使土颗粒发生位移，使土颗粒间的孔隙变小，融化作用则为逆过程。试样含水率较低时宏观呈现出“冻缩融胀”，这是因为在冻结时液态水相变成固态冰体积膨胀量小于膨胀土颗粒失水收缩量，融化时则正好相反。对于含水率较高的试样，因为含水量较大，在冻结时液态水相变成固态冰体积

膨胀量要大于膨胀土颗粒失水收缩量, 融化时则正好相反, 因此宏观表现为“冻胀融缩”。7 次冻融循环结束后, 所有试样体积均略有增加可解释为膨胀土试样的初始干密度较大(压实度 95%), 水相变成冰会使试样产生体积膨胀的塑性变形, 通常这种变形是不可逆的[18]。

2.2　应力-应变关系

图 3 为不同含水率和冻融循环次数对应的应力-应变关系曲线, 其中 N_{FT} 表示冻融循环次数。由图 3 可知, 本次试验中膨胀土试样的应力-应变曲线均表现出应变软化型, 冻融循环作用对膨胀土试样的应力-应变曲线特性有着显著影响, 其中以第 1 次循环最为突出。试验过程中, 不同含水率试样对应的应力-应变曲线形态存在较大差异, 具体表现为随着含水率的增加试样由脆性破坏向塑性破坏转变, 破坏应变也在逐渐增大, 不同的是含水率 12%、16% 的试样的破坏应变随冻融循环先减小后增大, 而含水率 20% 的试样却与此相反。这是因为含水率较低时土体本身比较干硬, 颗粒间胶结力较弱, 试样内部的初始孔隙和裂缝较多, 冻融循环次数的增加在一定程度提高了土体的韧性, 从而导致破坏应变略有增大。



(a) 含水率为 12%　(b) 含水率为 16%　(c) 含水率为 20%

图 3　应力-应变曲线

Fig. 3　Stress-strain curve

2.3　力学强度衰减规律分析及回归分析

2.3.1　*力学强度衰减规律分析*　对于一般应变软化型土, 取其应力-应变曲线峰值对应的应力为无侧限抗压强度[19]。图 4 为无侧限抗压强度随冻融循环次数的变化曲线。从图 4 可以看出, 第 1 次冻融循环对土体强度的衰减作用最大, 可占整个冻融循环试验的 41.3% 以上, 这是因为在复杂的冰水相变和土粒胀缩变形的双重影响下, 土体结构受到严重破坏, 孔隙分布发生变化, 随着冻融循环次数的增加, 土体强度衰减逐渐减缓, 第 3 次后趋于稳定。冻融循环过程中, 含水率越大, 试样的强度衰减幅度越大, 7 次循环结束后, 含水率 12%、16% 和 20% 的试样强度衰减率分别为 31.9%、49.1% 和 67.7%, 这是由于含水率越大的试样在冻融循环过程中受冰水相变及土粒胀缩变形等作用造成的结构损伤越大。

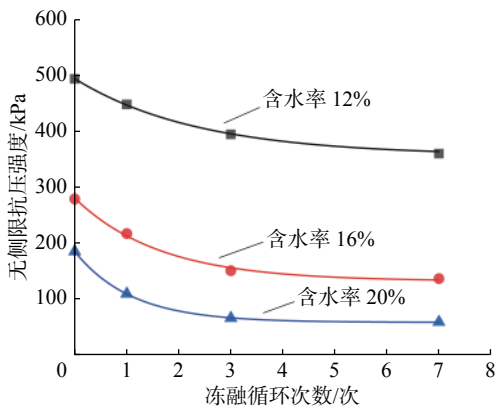


图 4　q_u 随冻融循作用的变化

Fig. 4　Changes of q_u with freeze-thaw cycles

2.3.2　*曲线回归分析*　为了更准确地预测冻融循环次数对类似于北疆寒区长距离输水渠道渠基膨胀土无侧限抗压强度指标的影响, 对不同含水率试样对应的无侧限抗压强度随冻融循环次数的变化情况进行函数拟合, 拟合曲线如图 4 所示, 函数式为: $q_u = A + B\exp(CN_{FT})$。其中: q_u 为无侧限抗压强度; A、B、C 为与含水率大小有关的系数, 其值见表 2; N_{FT} 为冻融循环次数。

表 2 函数拟合结果

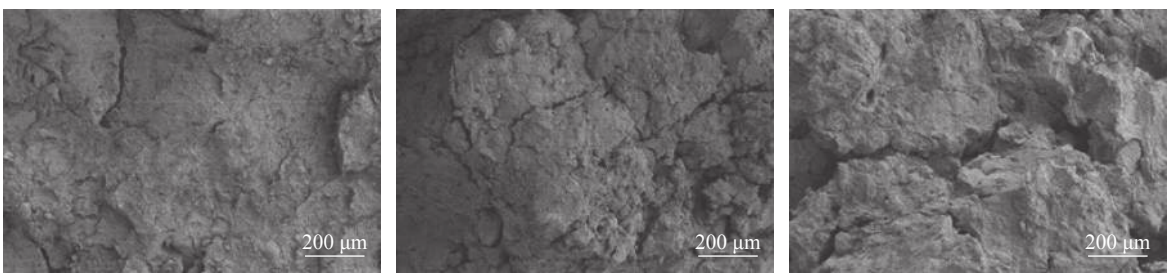
Tab. 2 Function fitting result

含水率/%	系数A	系数B	系数C	相关性R^2
12	356.260 8	137.340 3	−0.420 3	0.999 0
16	132.301 9	148.206 9	−0.607 7	0.987 2
20	58.835 5	126.488 7	−0.915 2	0.999 8

综合图 4 与表 2 可以发现，在同一含水率下，无侧限抗压强度与冻融循环次数的自然指数呈明显的线性负相关关系。系数 $A+B$ 为初始状态下（0 次循环）无侧限抗压强度的理论值，系数 C 则反映了某一含水率下无侧限抗压强度随冻融循环次数的增大而降低的速率。系数 $A+B$ 的值随含水率的增加而减小，这说明试样的含水率越小，初始状态下无侧限抗压强度越大。系数 C 的绝对值随含水率的增加也表现出减小的趋势，这说明受冻融循环作用影响，含水率越大试样的无侧限抗压强度衰减幅度越大。3 组数据中 R^2 均接近 1，说明采用上述函数的拟合效果较好，函数式较为准确。

2.4 土体微观结构的演化规律

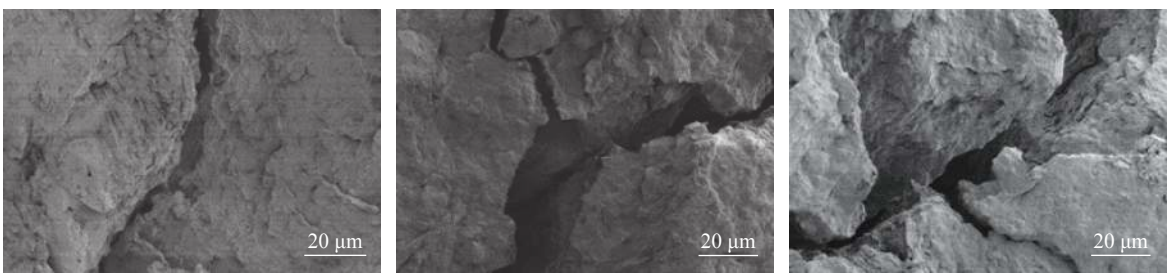
图 5 为 100 倍电镜扫描后的图像，可以看出，初始状态下（0 次循环）土颗粒之间胶结联结形成整体，土样表现为整体性较好，试样经历 1 次冻融循环后试样孔隙开始发育，7 次冻融循环后的孔隙明显大于 1 次的孔隙，且 7 次冻融循环后土体内部形成了明显的贯通裂隙。对比 1 000 倍下的电镜图像（如图 6 所示）可以发现，含水率越高土体的裂隙均宽越大，这说明土体含水率越大，土体微观结构受冻融循环作用的影响越大。



(a) 初始状态 (b) 1 次循环 (c) 7 次循环

图 5 冻融循环 1、7 次后含水率为 20% 的膨胀土 SEM 照片（100 倍）

Fig. 5 SEM photo of expansive soil with 20% moisture content under a magnification of 100 times after freeze-thaw cycle of 0, 1, 7 times

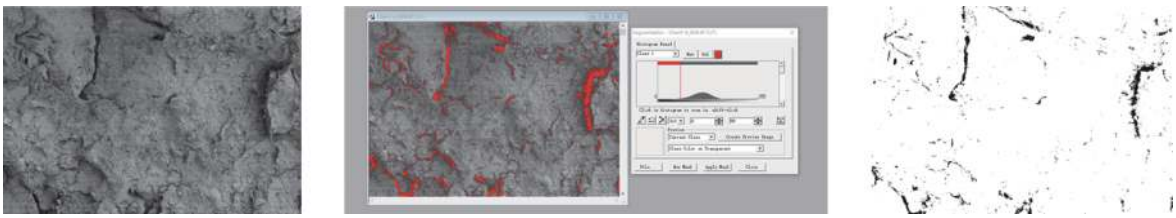


(a) 含水率为 12% (b) 含水率为 16% (c) 含水率为 20%

图 6 冻融循环 7 次后含水率为 12%、16%、20% 的膨胀土 SEM 照片（1 000 倍）

Fig. 6 SEM photo of expansive soil with moisture content of 12%, 16%, 20% after 7 freeze-thaw cycles under 1 000 times magnification

通过图像处理软件对电镜扫描后的图像进行定量分析，可以提取土体孔隙相关参数，例如颗粒的形态、孔隙大小、面积等，如图 7 所示。



(a) 原始土体微观结构图像　(b) 孔隙识别　(c) 二值化图像

图 7　SEM 图像处理过程

Fig. 7　Processing of SEM image

参考文献 [20] 选择合适的阈值对 100 倍下的图像进行二值化处理, 并降噪分割孔隙, 得到了不同冻融次数后的孔隙大小。如图 8 所示, 土样的面孔隙率(土体某平面上孔隙所占的比例)随着冻融循环次数的增加逐渐增大, 3 次循环后增加的趋势逐渐减缓, 至 7 次循环结束后, 3 种含水率的土样面孔隙率分别增加了 0.087、0.110 和 0.155, 宏观上表现为冻融循环作用对土体力学性质的劣化影响, 即相同冻融循环次数下, 土体含水率越大无侧限抗压强度衰减得越快。同时可见, 试验前期, 含水率越高, 土体面孔隙率增加得越快。这是由于含水率越大, 液态水相变为冰晶并对周围土颗粒产生的破坏力也越大, 则冻融循环后土体微观结构的改变越明显。

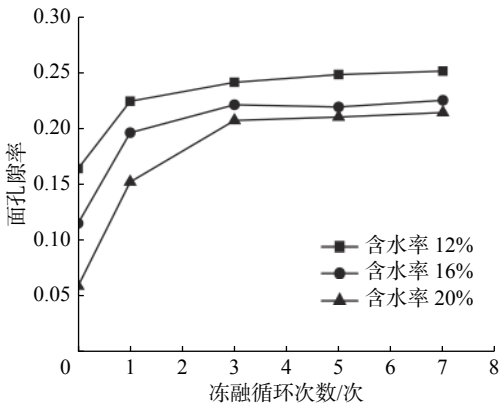


图 8　面孔隙率随冻融循环的变化

Fig. 8　Surface porosity changes with freeze-thaw cycles

3　结　语

本文以冻融循环试验为基础, 对 3 种不同含水率的膨胀土试样进行了体积变形试验、无侧限抗压强度试验和 SEM 电镜扫描试验, 试验研究主要结论如下:

(1)随含水率的增加, 试样的体积变形由冻缩融胀向冻胀融缩转变; 整个冻融试验过程中, 试样体积变化最大值均发生在冻结作用后; 3 次循环后试样体积变形趋于稳定, 7 次循环后试样体积略有增加。

(2)应力应变曲线特性与含水率大小和冻融循环次数都有较大的关系, 随着含水率的增加, 试样由脆性破坏向塑性破坏转变, 破坏应变也在逐渐增大。试样的含水率越大, 冻融循环试验后土体力学强度衰减幅度越大。

(3)在同一冻融循环次数下, 试样的无侧限抗压强度随含水率的增加而增大; 在同一含水率下, 随冻融循环次数的增加试样的无侧限抗压强度逐渐减小, 其中以第 1 次循环最为明显, 3 次后趋于稳定。函数拟合发现, 试样的无侧限抗压强度与冻融循环次数呈明显的自然指数关系。

(4)从微观图像上可以看出, 整个冻融循环过程中, 土体的面孔隙率随冻融循环次数的增加逐渐增大, 随含水率的增加逐渐减小。冻融循环作用使土体内部微观孔隙增大, 导致宏观上力学性能的衰减。通过提出一种高效的改良措施, 减弱冻融循环作用对土体力学性质产生劣化作用, 这也是后续需要开展的工作。

参　考　文　献:

[1] 冷挺, 唐朝生, 徐丹, 等. 膨胀土工程地质特性研究进展[J]. 工程地质学报, 2018, 26(1): 112-128. (LENG Ting, TANG

Chaosheng, XU Dan, et al. Advance on the engineering geological characteristics of expansive soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(1): 112-128.(in Chinese))

[2] 张路, 樊恒辉, 车雯方, 等. 黑龙江地区渠道基土工程性质试验分析[J]. 水利水运工程学报, 2018(2): 82-89.(ZHANG Lu, FAN Henghui, CHE Wenfang, et al. Experimental analysis of engineering properties of foundation soil of canal works in Heilongjiang area[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(2): 82-89.(in Chinese))

[3] 杨和平, 王兴正, 肖杰. 干湿循环效应对南宁外环膨胀土抗剪强度的影响[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(5): 949-954.(YANG Heping, WANG Xingzheng, XIAO Jie. Influence of wetting-drying cycles on strength characteristics of Nanning expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(5): 949-954.(in Chinese))

[4] 朱洵, 蔡正银, 黄英豪, 等. 湿干冻融耦合循环及干密度对膨胀土力学特性影响的试验研究[J]. 水利学报, 2020, 51(3): 286-294.(ZHU Xun, CAI Zhengyin, HUANG Yinghao, et al. Research on mechanical properties of expansive soils under cyclic action of coupling wetting-drying and freeze-thaw and density[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(3): 286-294.(in Chinese))

[5] 刘清秉, 吴云刚, 项伟, 等. K_0及三轴应力状态下压实膨胀土膨胀模型研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 2795-2802, 2809.(LIU Qingbing, WU Yungang, XIANG Wei, et al. Swelling model study of expansive soil at K_0 and triaxial stress state[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(10): 2795-2802, 2809.(in Chinese))

[6] 蔡正银, 吴志强, 黄英豪, 等. 含水率和含盐量对冻土无侧限抗压强度影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(9): 1580-1586.(CAI Zhengyin, WU Zhiqiang, HUANG Yinghao, et al. Influence of water and salt contents on strength of frozen soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(9): 1580-1586.(in Chinese))

[7] 蔡正银, 黄英豪. 咸寒区渠道冻害评估与处治技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.(CAI Zhengyin, HUANG Yinghao. Evaluation and treatment technology of channel frost damage in salty cold regions[M]. Beijing: Science Press, 2015.(in Chinese))

[8] 谭娇, 丁建丽, 张钧泳, 等. 1961—2014年新疆北部地区气温时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(5): 1181-1191.(TAN Jiao, DING Jianli, ZHANG Junyong, et al. Spatiotemporal variation of temperature in North Xinjiang during the period of 1961-2014[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(5): 1181-1191.(in Chinese))

[9] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.(Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standard for geotechnical test methods: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.(in Chinese))

[10] 黄英豪, 蔡正银, 朱锐, 等. 季冻区渠道湿干冻融离心模拟试验设备的研制[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(7): 1181-1188.(HUANG Yinghao, CAI Zhengyin, ZHU Rui, et al. Development of centrifuge model test equipment for canals in seasonal frozen areas under cyclic action of wetting-drying and freeze-thaw[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(7): 1181-1188.(in Chinese))

[11] 蔡正银, 朱锐, 黄英豪, 等. 湿干冻融耦合循环作用下渠道劣化过程离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(10): 1773-1782.(CAI Zhengyin, ZHU Rui, HUANG Yinghao, et al. Centrifugal model tests on deterioration process of canal under cyclic action of coupling wetting-drying and freeze-thaw[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(10): 1773-1782.(in Chinese))

[12] 殷宗泽, 袁俊平, 韦杰, 等. 论裂隙对膨胀土边坡稳定的影响[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2155-2161.(YIN Zongze, YUAN Junping, WEI Jie, et al. Influence of fissure on slope stability of expansive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2155-2161.(in Chinese))

[13] HOTINEANU A, BOUASKER M, ALDAOOD A, et al. Effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of lime-stabilized expansive clays[J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 119: 151-157.

[14] 王大雁, 马巍, 常小晓, 等. 冻融循环作用对青藏粘土物理力学性质的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(33): 4313-4319.(WANG Dayan, MA Wei, CHANG Xiaoxiao, et al. Physico-mechanical properties changes of Qinghai-Tibet clay due to cyclic freezing and thawing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(33): 4313-4319.(in Chinese))

[15] 蔡国庆, 刘祎, 徐润泽, 等. 全吸力范围红黏土干湿循环土-水特征曲线[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊2): 13-16.(CAI Guoqing, LIU Yi, XU Runze, et al. Experimental investigation for soil-water characteristic curve of red clay in full suction range[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(Suppl2): 13-16.(in Chinese))

[16] 王东伟, 陆武萍, 唐朝生, 等. 砂土微观结构样品制备技术及量化方法研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(12): 4783-4792.（WANG Dongwei, LU Wuping, TANG Chaosheng, et al. Sample preparation technique and microstructure quantification method for sandy soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(12): 4783-4792.（in Chinese））

[17] 许雷, 刘斯宏, 鲁洋, 等. 冻融循环下膨胀土物理力学特性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊2): 167-174.（XU Lei, LIU Sihong, LU Yang, et al. Physico-mechanical properties of expansive soil under freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Suppl2): 167-174.（in Chinese））

[18] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 201-272.（CHEN Zhenghan. On basic theories of unsaturated soils and special soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(2): 201-272.（in Chinese））

[19] 宋迎俊, 许雷, 鲁洋, 等. 基于正交设计的膨胀土冻融循环试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2017(2): 51-58.（SONG Yingjun, XU Lei, LU Yang, et al. Experimental studies on freeze-thaw cycles of expansive soil based on orthogonal design[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(2): 51-58.（in Chinese））

[20] 唐朝生, 施斌, 王宝军. 基于SEM土体微观结构研究中的影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(4): 560-565.（TANG Chaosheng, SHI Bin, WANG Baojun. Factors affecting analysis of soil microstructure using SEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(4): 560-565.（in Chinese））

Study on the influence of freeze-thaw cycles on the deformation and mechanical properties of expansive soil

CHEN Yong, HUANG Yinghao, ZHU Xun, WU Min, WANG Shuo, ZHU Rui

(*Nanjing Hydraulic Research Institute*, *Nanjing* 210029, *China*)

Abstract: In order to explore the influence of the severe weather in the seasonal freezing area on the expansion and contraction deformation and physical and mechanical properties of the canal base expansive soil with different water contents, the expansive soil in the Altay area of northern Xinjiang was taken as the research object, and the freeze-thaw cycle test of the actual climatic conditions in northern Xinjiang was performed in the laboratory. Based on this, the volumetric deformation test, unconfined compressive strength test and scanning electron microscope (SEM) test of the expansive soil with moisture contents of 12%, 16%, and 20% were carried out, and the influence of freeze-thaw cycles on the volume deformation and mechanical properties of expansive soil was analyzed emphatically. The results show that during the freeze-thaw cycle, with the increase of water content, the volume deformation of the sample changes from "freeze shrinkage and thaw expansion" to "freeze heave and thaw shrinkage". The characteristics of the stress-strain curve are closely related to the number of freeze-thaw cycles and the moisture content. The unconfined compressive strength of the sample decreases with the increase of the moisture content and the number of freeze-thaw cycles. Among them, the first freeze-thaw cycle is the most obvious, and it stabilizes after three times. The function fitting shows that the unconfined compressive strength of the sample has an obvious natural exponential relationship with the number of freeze-thaw cycles. The greater the water content, the greater the influence of freeze-thaw cycles on the microstructure of the soil; the porosity of the soil gradually increases with the increase in the number of freeze-thaw cycles. The first freeze-thaw cycle has obvious effect, which is manifested macroscopically as the effect of freeze-thaw cycles on the degradation of soil mechnical properties.

Key words: freeze-thaw cycle; expansive soil for channel foundation; volume deformation; unconfined compressive strength; scanning electron microscopy