

DOI: 10.11779/CJGE2020S1046

湿干冻融耦合作用下膨胀土裂隙发育方向性研究

张 晨, 朱 洵, 黄英豪, 郭万里, 韩 迅

(南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘 要: 湿干冻融耦合作用(WDFT)是导致寒区膨胀土地基发生劣化现象的重要因素,而膨胀土地基裂隙发育的方向对工程安全稳定存在长期影响。围绕膨胀土裂隙发育的方向性问题,采用自行设计的单向环境边界加载装置,开展了WDFT边界条件下表面裂隙发育特征的大尺寸试样单元试验,运用数字图像采集与处理方法得到了不同WDFT循环下的表面裂隙发育特征。试验结果表明,冻结过程中膨胀土内部液态水含量对表面裂隙的分布及形态产生重要影响,当临界饱和度较大时,冻结过程对裂隙起到促进作用,反之则为抑制作用;而在后期WDFT下的裂隙率逐渐趋于稳定。在此基础上,以裂隙图像灰度直方图为基础,通过梯度方向法对裂隙发育的局部方向性进行了统计,引入无量纲影响因素对裂隙角度进行了量化归纳,进一步探讨了膨胀土在下的裂隙演化规律。所采用的量化分析方法可为相关研究提供参考。

关键词: 膨胀土; 干湿、冻融循环耦合; 裂隙发育; 单元试验; 裂隙方向

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)S1-0234-05

作者简介: 张 晨(1988—),男,高级工程师,博士,主要从事岩土工程测试方面的研究工作。E-mail: czhang@nhri.cn。

Directionality of fissures in expansive soils under cyclic action of coupling wetting-drying and freeze-thaw

ZHANG Chen, ZHU Xun, HUANG Ying-hao, GUO Wan-li, HAN Xun

(Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: The wetting-drying and freeze-thaw(WDFT) coupling effect is an important factor leading to the deterioration of the expansive soil foundation in the cold regions, and the direction of fissure development in the expansive soil foundation has a profound impact on the long-term safety and stability. Focusing on the directionality of crack development in expansive soils, a unit test of the characteristics of surface crack development under WDFT coupling boundary conditions is carried out using the self-designed unidirectional environmental boundary loading device, and the digital image acquisition and processing methods are used to obtain characteristics of surface fissure development under WDFT coupling cycle. The test results show that the liquid water content in the expansive soil during freezing has an important effect on the distribution and morphology of surface cracks. When the critical saturation is large, the freezing process promotes the cracks, and vice versa. The fracture rate gradually stabilizes at later stage of WDFT. Based on the gray histogram of the fissure image, the local directionality of fissure development is calculated by the gradient direction method, and the dimensionless influence factor is introduced to quantify and summarize the fissure angle. The crack evolution laws of expansive soil are further investigated. The quantitative analysis method used can provide reference for related researches.

Key words: expansive soil; coupling wetting-drying and freeze-thaw; fissure; sample test; directionality

1 研究背景

膨胀土在干湿循环作用下表现出的多裂隙性和膨胀缩性,对相关工程的安全运行带来一定隐患^[1]。一些位于北方寒区的建筑物,特别是水工建筑物,基础除受干湿循环作用外,还受到显著地冻融循环作用,使得地基的边界条件呈现出湿干冻融耦合循环作用的特点,导致膨胀土地基极易形成裂隙,影响地基的渗流、变形及强度特性^[2]。

研究表明,复杂环境边界条件下膨胀土的裂隙发育存在一定的方向性规律^[3-4],这种特性对工程运行的长期稳定性有深刻影响。具体体现在部分直接暴露在边界条件作用的地基,入渗通道按一定方向扩展,造成通道附近基土强度劣化;随着运行时间增长,劣化

基金项目: 国家重点研发计划项目(SQ2017YFSF020086);国家自然科学基金项目(51709185, 51879166);中央级公益性科研院所基金基金本科业务费项目(Y320010)

收稿日期: 2020-06-05

区域进一步扩大, 从而波及到相邻区域的建筑物。例如在一些防渗性较好寒冷地区的膨胀土渠道断面仍会发生垮塌。

国内外学者通常采用单元试验考察膨胀土试样在环境特征变化下的表面裂隙发育特征, 通过适宜的手段采集裂隙并进行关键参数的测定、提取等量化处理, 以获取膨胀土裂隙演化规律, 一些学者也围绕湿干冻融耦合循环边界条件开展了相关研究, 得到了膨胀土裂隙发育的三维形态^[5]。然而, 目前对湿干冻融耦合循环作用下的表面裂隙演化特征的研究仍相对缺乏, 更缺乏对这种特定边界下裂隙演化方向的规律性定量分析。

为此, 本文拟采用室内单元试验获取膨胀土在湿干冻融耦合循环作用下的裂隙发育特征, 在此基础上, 运用合适的方法表征裂隙发育的方向性, 进一步探讨膨胀土在湿干冻融耦合循环作用下的裂隙演化规律。

2 试验方案

2.1 试验材料

试验土样取自北疆供水一期工程某渠基, 外观呈黄色, 其基本物理性质如表 1 所示。通过 X 衍射仪确定土样的矿物成分, 按照《膨胀土地区建筑技术规范》的划分, 试验土样属中强膨胀土。该工程为季节性供水工程, 即每年 4~9 月通水, 秋冬季停水, 渠基的边界条件具有出显著干湿循环的特征。

表 1 膨胀土的基本物理性质

Table 1 Physical properties of sample					
基本指标					
G_s	$w_p/\%$	$w_l/\%$	$\delta_{ef}/\%$	$\rho_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$	$w_{opt}/\%$
2.67	20.3	65.9	76	1.56	24.1
矿物成分					
蒙脱石	石英	长石	方解石	钠长石	
61.5%	31.9%	6.1%	0.5%		

2.2 边界条件设定

以工程原型在通水、停水、正温变负温、负温变正温 4 个时间节点为基础, 通过控制各阶段渠基土饱和度和 (S_r) 的方法实现 WDFT 全过程的模拟, 如图 1 所示。图中 S_{rsat} 对应渠基土的最大饱和状态; S_{rcr} 表示渠基土经历干燥阶段后对应的饱和度 (S_{rcr} 为现场实测, 数值上等于 $0.7S_{rsat}$); S_{rf} 和 S_{ri} 对应渠基土经历冻结和融化阶段后的饱和度, 各阶段饱和度的具体设置步骤可参考文献^[5]。

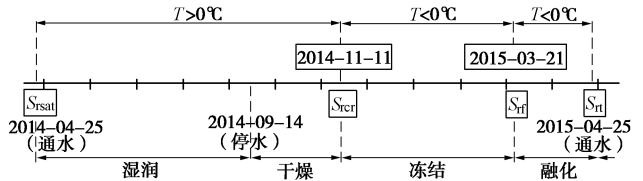


图 1 简化的湿干冻融耦合循环过程示意图

Fig. 1 Simplified schematic diagram of cyclic action of WDFT

设计了一套可对试样加载湿干冻融耦合边界条件的装置, 如图 2 所示。加载装置由内到外, 依次为试样、有机玻璃、隔热海绵及隔热板。将该装置放置于环境试验箱中, 可实现冻结—融化过程的单向温度边界连续加载。

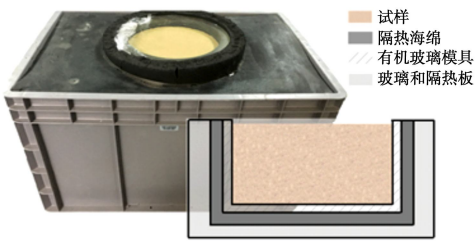


图 2 单向温度边界加载装置

Fig. 2 Schematic diagram of unidirectional boundary device

试验中湿干冻融耦合循环的具体施加过程如表 2 所示。试验采用抽气饱和法和低温干燥法模拟试样的湿润及干燥过程, 循环共进行 7 次。试验的干燥、冻结及融化温度按照工程原型全年地温特征确定。试验干燥阶段的时长由试样到达对应临界饱和度 (S_{rcr}) 的时间控制 (称重法), 而冻结和融化阶段时长以试样整体冻结与融化为准。

表 2 湿干冻融耦合循环边界条件

Table 2 Details of WDFT in tests				
条件	温度/°C	时间/h	循环次数	施加方式
湿润	室温	—	7	抽气饱和
干燥	40	至 S_{rcr} 为止	7	称重法对
冻结	-20	24	7	试样质量
融化	20	36	7	进行监控

注: “—” 表示持续时间以质量稳定为准; 温度指的是冷源或热源的温度。

2.3 试样尺寸选择及制作

研究表明, 传统环刀试样 (直径 61.8 mm、高 2 mm) 用作表面裂隙发育特征研究时, 分析结果易受尺寸效应影响^[6], 特别是在干燥及冻结阶段。为消减这一影响, 提升裂隙发育获取精度, 选择了不同直径试样进行尺寸选择试验, 边界设置参考表 2, 共进行 7 次湿干冻融耦合循环。对 7 次循环后不同直径膨胀土试样表面图像进行灰度化、降噪及二值化处理后得到的各尺寸试样对应的表面裂隙率, 如图 3 所示。通过对比不同试样尺寸 r 对应的表面裂隙率, 发现当 r 增至 190 mm 时, 其表面裂隙率逐渐趋于稳定。进一步地, 分别选取试样表面积的 50%, 60%, 70%, 80%, 90% 及 100% (同心圆) 进行表面裂隙率计算, 对试样表面裂隙的均匀性进行分析, 如图 3 所示。随试样尺寸的增加, 其表面各百分比的裂隙标准差逐渐降低,

即试样表面裂隙逐渐趋于均匀。初步确定试样的直径 $r=190\text{ mm}$ ，这与 Lu 等^[7]的研究结果类似。

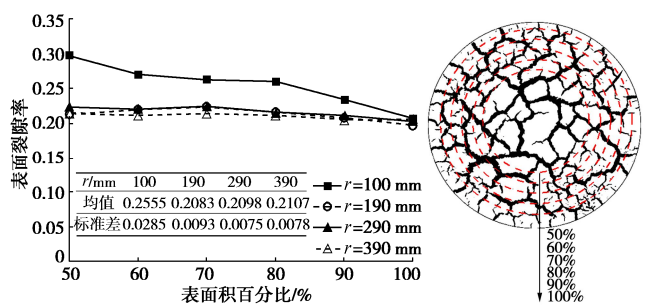


图3 不同直径下膨胀土试样的裂隙分布统计

Fig. 3 Distribution of fissures with different sample sizes

考虑到模具制作等因素，本次裂隙试验选用的试样直径为 200 mm ，高度为 105 mm 。制样时采用一次成型两头压实的制样方法，相比较而言，这种方法制得试样的初始损伤较小，且较其他制样方法（分层击实法和泥浆法）更易控制试样的均匀性。

2.4 数据采集

试样的表面裂隙通过数码相机（Olympus EM10）进行实时采集，相机固定高度为 50 cm 。为了使得试样表面裂隙清晰，在试样两侧各设置一个白炽灯（ 35 W ）。试样表面裂隙采集频率为 0.1 h/次 。同时采用称重法（天平精度为 0.1 g ）获取不同时刻试样质量，干燥阶段初期采集频率为 0.5 h/次 ，当接近试样临界饱和度时采集频率为 0.1 h/次 ；而冻结、融化阶段的采集频率均为 0.5 h/次 。

3 试验结果与分析

3.1 裂隙基本特征

图4为试样在经历多次湿干冻融耦合作用下的表面裂隙图像(限于篇幅,仅列出 $\text{WDFT}_s=1$ 和 $\text{WDFT}_s=2$ 所对应的典型表面裂隙)。由图4(a)可知，试样在 $t_1=2.5\text{ h}$ 时刻试样表面左上角首先出现裂隙；随后 $t_1=4.5\text{ h}$ 较 $t_1=2.5\text{ h}$ 时刻试样表面裂隙向下延伸，同时在右下角区域也出现部分裂隙；随着干燥时间的增加，初期表面形成的独立裂隙逐渐贯通；最终裂隙在 $t_1=15\text{ h}$ 时刻完全贯穿试样表面；自 $t_1=15\text{ h}$ 起至干燥阶段完成（ $t_1=34.2\text{ h}$ ），试样表面裂隙发育基本稳定。

试样进入冻融过程后，伴随着试样水分的持续散失，表面裂隙又继续拓展，最终在 $t_1=65.7\text{ h}$ 趋于稳定。当 $t_1=94.2\text{ h}$ 时刻试样完成融化过程，对应试样的第一次湿干冻融耦合循环完成。但注意到，试样在经历第一次耦合循环中冻结过程前后（图4(a)中 34.2 h 与 58.2 h ）表面裂隙开度存在较大差异，冻结过程结束试样表面裂隙开度较冻结阶段开始时刻明显降低，土体在经历冻结过程后表面裂隙出现收缩现象。在第二

次湿干冻融耦合循环($\text{WDFT}_s=2$)过程中(见图4(b))，试样开裂模式与第一次循环类似，干燥阶段试样表面裂隙均呈现出先局部形成，后整体汇聚的发育模式。但第二次循环干燥阶段试样表面起裂时间（ $t_2=9.5\text{ h}$ ）较第一次循环明显滞后（ $t_1=2.5\text{ h}$ ），这主要是由于第一次循环过程中冻融过程对试样的影响。

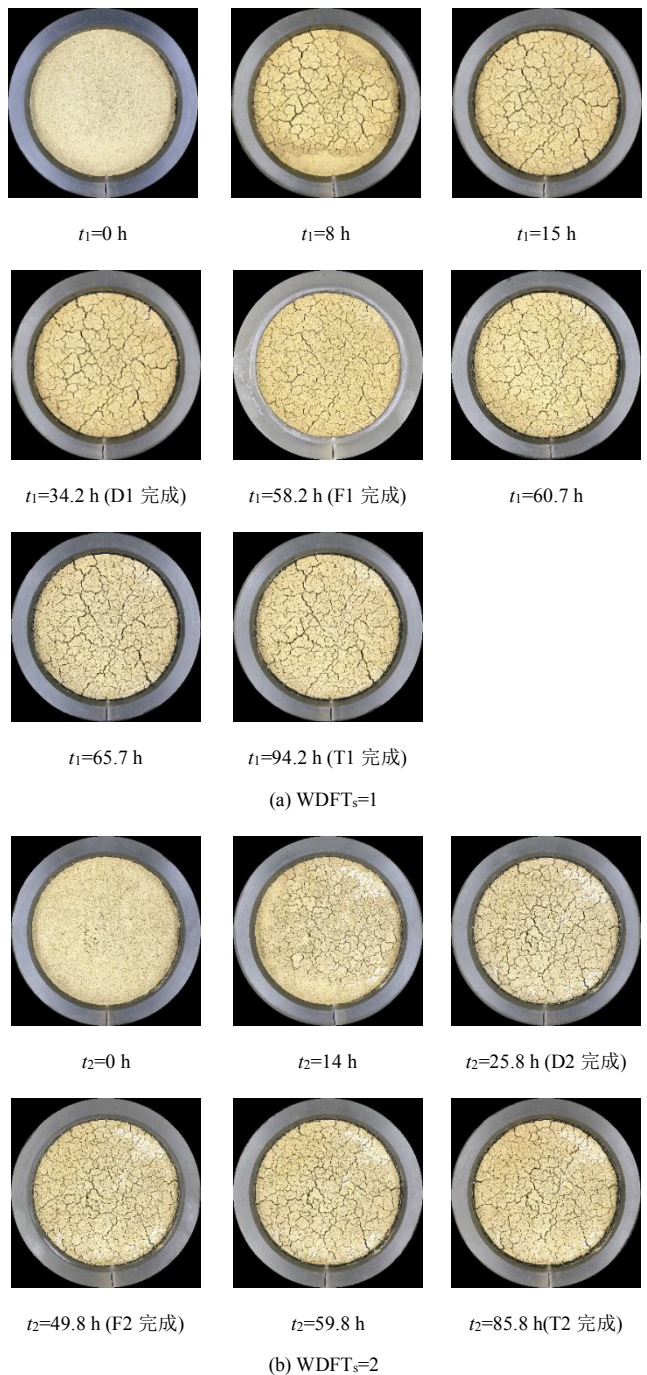


图4 湿干冻融耦合循环作用下表面裂隙图像

Fig. 4 Images of surface fissures under WDFT

起初的冻结过程中，试样土体在蒸发和冰升华的共同作用下含水率明显降低^[8]，致使表面裂隙逐渐增多。随着冻结作用的加剧，冻结区域土体含水率的降低将导致其内部孔隙率减少，从而导致干燥阶段生产

裂隙在冻结阶段逐渐闭合。此外, 刘振亚等^[9]研究表明, 试样的水分含量对其冻结变形影响较大, 饱和度较低土体冰水相变影响较小, 土体呈冻缩特征, 而饱和度较高土体, 其内部冰水相变占主导作用, 土体结构破坏明显。试样在经历第一次循环中的冻、融阶段前干燥阶段已经完成, 初始高压实度试样(压实度 100%)已形成一定深度的裂隙, 可认为此刻试样经过 WD 过程后压实度变低, 随后的 FT 阶段试样发生收缩压密, 最终导致了第二次循环干燥阶段试样表面起裂时间的滞后。

采用表面裂隙率(R_{cr})对试样在 7 个循环结束后的表面裂隙分布进行定量化, 以考察多次 WDFT 循环对裂隙的影响, 如图 5 所示, 其中表面裂隙率(R_{cr})是指试样表面裂隙面积与初始面积的比值。循环次数与试样表面最终裂隙率间存在明显的幂函数分布特征, 最终试样表面裂隙率在经历 4 次循环后趋于定值(12.31%)。第 7 次循环约为第 1 次的 1.65 倍, 但较先前有所下降。造成这一现象的原因主要是随着试样在经历多次湿干循环后, 在试样表面裂隙出现塑性累积, 导致膨胀土裂隙的膨胀性的降低。

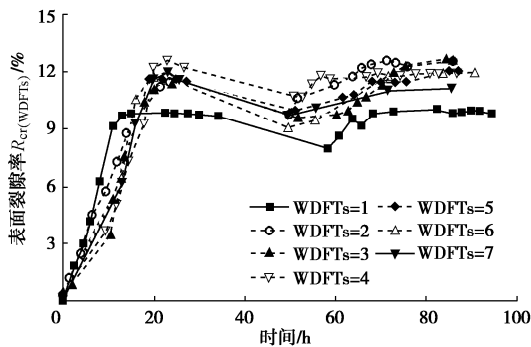


图 5 湿干冻融耦合下试样表面裂隙率随时间分布

Fig. 5 Distribution of surface crack rate over time under WDFT

3.2 裂隙发育方向及演化特征

试验表明, 早期 WDFT 循环中膨胀土裂隙发育较为显著。为进一步研究裂隙发育的方向性, 在裂隙图像灰度直方图的基础上, 通过局部梯度方向法^[10]对裂隙发育角度的出现频率进行统计。图 6 为干燥过程(WD)中 4 个时刻试样裂隙发育方向的统计结果(以 WDFTs=1 中的干燥过程为例)。由图 6 可知, 不同干燥时刻试样的表面裂隙发育方向统计分布规律类似, 统计峰值频率均集中分布在 0° , 45° 及 90° 方向, 即裂隙在这 3 个方向的发育最为充分。但对比不同干燥时刻对应的发育方向统计分布可知, 发现以 45° 方向角为界, $(-45^\circ, 45^\circ)$ 区间内裂隙的发育方向频率随干燥时间的增加逐渐上升, 而 $(45^\circ, 135^\circ)$ 区间内裂隙的发育方向频率随干燥时间的增加逐渐下

降。总体上看, 随着循环次数的增加, 土体表面裂隙发育不同方向的裂隙角度出现频率趋于一致。

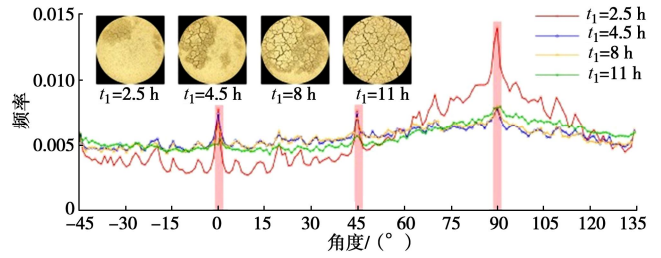


图 6 干燥过程中不同时刻表面裂隙发育方向统计结果

Fig. 6 Statistical results of surface crack development direction at different moments under WD

考虑到湿干冻融耦合中不同过程对试样表面裂隙的发育方向存在影响, 这里对第一次耦合循环中的干燥、冻结、融化(DFT) 3 个过程对应的试样裂隙发育方向进行统计, 如图 7 所示。与单纯的干燥过程结果类似, 试样在经历干燥、冻结、融化后对应表面裂隙发育方向的统计峰值频率也呈现在 0° , 45° 及 90° 方向集中的分布特征。此外, 对比上述分布可以发现, 试样表面裂隙发育方向在经历冻结过程后已基本稳定, 随后的干燥过程对其后续发育方向影响不大。

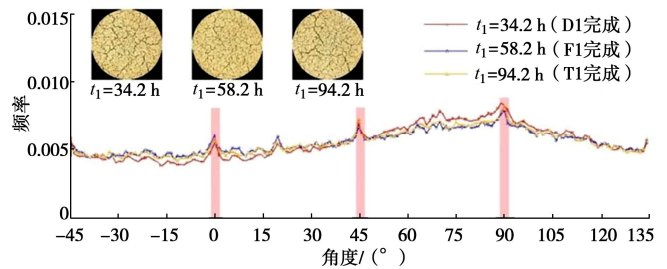


图 7 干燥、冻结、融化完成时刻表面裂隙发育方向统计结果

Fig. 7 Statistical results of surface crack development direction at different moments under DFT

从本质来讲, 土体冻结本身也是未冻水向冻结锋面迁移的过程, 类似土体干燥过程。现引入无量纲影响因子 f 量化裂隙的发育角度, 定义 f 为湿干冻融耦合循环中每次冻结过程完成后与干燥过程完成后表面裂隙发育方向频率的差值 Δf_i 与对应的干燥过程完成后表面裂隙发育方向频率的比值, 即

$$f = \frac{f_{WDF}^i - f_{WD}^i}{f_{WD}^i} \quad (1)$$

图 8 为影响因子 F 与湿干冻融耦合循环次数 N 之间的关系曲线。可以发现冻结过程对膨胀土表面裂隙发育方向的影响主要集中在前两次循环, 且不同裂隙方向角区间内影响因子 F 对耦合循环的响应也存在差异。对于裂隙方向角位于 $-45^\circ \sim 0^\circ$ 区间(I 区), 第一次冻结过程对应的影响因子 F 为正, 即第一次冻结

过程加剧了方向 $(-45^\circ, 0^\circ)$ 区间内裂隙的发育,而第二次冻结过程则造成方向 $(-45^\circ, 0^\circ)$ 区间内裂隙发育程度的降低;对于裂隙方向角位于 $45^\circ \sim 90^\circ$ 区间(II区),两次冻结过程对该区间内裂隙发育方向的影响与 $-45^\circ \sim 0^\circ$ 区间(I区)情况相反。

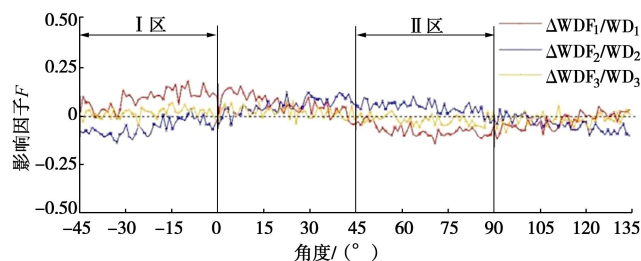


图8 影响因子 f 随表面裂隙发育方向统计结果

Fig. 8 Statistical results with surface crack development direction by f

4 结 语

运用数字图像采集与处理方法,采用自行设计的单向环境边界加载装置对膨胀土在经历WDFT作用下表面裂隙的发育方向及演化特征进行试验研究,在此基础上,以裂隙图像灰度直方图为基础,通过梯度方向法对其局部方向性进行统计。研究取得如下结论:

冻结过程中膨胀土内部液态水含量对表面裂隙的分布及形态产生重要影响,当临界饱和度较大时,冻结过程对裂隙起到促进作用,反之则为抑制作用。

湿干冻融耦合循环作用造成土体表面裂隙起裂时间的滞后,主要原因在于冻融过程易造成膨胀土整体结构的发生收缩压密,进而抑制了土体后续裂隙的生成。

湿干冻融耦合循环作用下裂隙在 $0^\circ, 45^\circ$ 及 90° 方向这3个方向的发育最为充分;且随着循环次数的增加,膨胀土表面裂隙不同发育方向的均匀性也逐渐提高;前两次耦合循环中的冻结过程对膨胀土表面裂隙发育方向的影响较大,且影响主要集中在 $(-45^\circ, 0^\circ)$ 及 $(45^\circ, 90^\circ)$ 两个区间内。

参考文献:

- [1] 包承纲. 非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 1 - 15. (BAO Cheng-gang. Behavior of unsaturated soil and stability of expansive soil slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 1 - 15. (in Chinese))
- [2] 蔡正银, 朱 洵, 黄英豪, 等. 冻融过程对膨胀土裂隙演化特征的影响[J]. 岩土力学, 2019, 40(12): 1 - 9. (CAI Zheng-yin, ZHU Xun, HUANG Ying-hao, et al. Influences of freeze-thaw process on evolution characteristics of fissures in expansive soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(12): 1 - 9. (in Chinese))
- [3] R N TOLLENAAR, L A VAN PAASSEN, C JOMMI, et al. Observations on the desiccation and cracking of clay layers[J]. Engineering Geology, 2017, 230: 23 - 31.
- [4] 曾 浩, 唐朝生, 林 鑫, 等. 土体干缩裂隙发育方向及演化特征的层间摩擦效应研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(6): 1172 - 1180. (ZENG Hao, TANG Chao-sheng, LIN Luan, et al. Interfacial friction dependence of propagation direction and evolution characteristics of soil desiccation cracks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(6): 1172 - 1180. (in Chinese))
- [5] 蔡正银, 朱 洵, 黄英豪, 等. 湿干冻融耦合循环作用下膨胀土裂隙演化规律[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(8): 1381 - 1389. (CAI Zheng-yin, ZHU Xun, HUANG Ying-hao, et al. Evolution rules of fissures in expansive soils under cyclic action of coupling wetting-drying and freeze-thaw[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(8): 1381 - 1389. (in Chinese))
- [6] LI J H, ZHANG L M. Geometric parameters and REV of a crack network in soil[J]. Computers & Geotechnics, 2010, 37(4): 466 - 475.
- [7] LU Y, LIU S H, WENG L P, et al. Fractal analysis of cracking in a clayey soil under freeze-thaw cycles[J]. Engineering Geology, 2016, 208: 93 - 99.
- [8] LU Y, LIU S, WENG L, et al. Fractal analysis of cracking in a clayey soil under freeze-thaw cycles[J]. Engineering Geology, 2016, 208: 93 - 99.
- [9] 刘振亚, 刘建坤, 李 旭, 等. 非饱和粉质黏土冻结温度和冻结变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(8): 1381 - 1387. (LIU Zhen-ya, LIU Jian-kun, LI Xu, et al. Experimental study on freezing point and deformation characteristics of unsaturated silty clay subjected to freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(8): 1381 - 1387. (in Chinese))
- [10] 靳华中, 万 方, 叶志伟. 结合路面深度影像梯度方向直方图 and 分水岭算法的裂缝检测[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2017, 51(5): 715 - 722. (JIN Hua-zhong, WAN Fang, YE Zhi-wei. Pavement crack detection fused HOG and watershed algorithm of range image[J]. Journal of CCNU (Nat, Sci), 2017, 51(5): 715 - 722. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)