

DOI: 10.11779/CJGE201908001

湿干冻融耦合循环作用下膨胀土裂隙演化规律

蔡正银, 朱 洵*, 黄英豪, 张 晨

(南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘要: 裂隙的发生与演化是膨胀土在各种外部条件作用下的显著特征。针对北疆高寒地区膨胀土渠道边坡劣化问题, 以渠基土每年经历通水、停水及冻结、融化过程为研究条件, 开展了单向湿干冻融耦合循环作用下膨胀土裂隙试验。采用计算机断层扫描(CT扫描)及三维重建技术, 对湿干冻融耦合循环作用下膨胀土试样内部裂隙演化特征进行定量描述, 研究了不同湿干冻融耦合循环次数对膨胀土三维裂隙演化规律的影响。试验结果表明, 湿干冻融耦合循环作用下的试样内部裂隙发育存在明显的区域性分布特征, 裂隙的发育深度在5次循环后逐渐趋于稳定, 对应于试样初始总高度的40%。对比不同循环次数作用下试样内部裂隙的发育形态可知, 试样内部裂隙发育模式由循环初期浅层分散分布向后期深层汇聚偏转进行转化。采用切片裂隙率、弯曲度、分支数及死端点4个指标能较好地定量描述裂隙空间分布及连通性随循环次数的演化规律。研究成果对进一步揭示干湿冻融耦合作用下膨胀土渠道的劣化过程和破坏机制具有一定参考价值。

关键词: 膨胀土; 湿干冻融耦合循环; CT扫描; 定量分析; 裂隙演化规律

中图分类号: TU445

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)08-1381-09

作者简介: 蔡正银(1965—), 男, 教授级高级工程师, 从事土的基本性质与土工测试、土的本构理论、土工离心模拟技术方面的研究工作。E-mail: zyc@nhri.com。

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

CAI Zheng-yin, ZHU Xun, HUANG Ying-hao, ZHANG Chen

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

Abstract: The occurrence and evolution of fissures are the significant characteristics of expansive soils under the action of various external factors. With regard to the deterioration of slopes of the canals of expansive soils in high and cold regions in the northern area of Xinjiang Uygur Autonomous Region, the tests on the fissures in expansive soils are performed under the unidirectional cyclic action of coupling wetting-drying and freeze-thaw considering the processes of the foundation soils of the canals witnessing water supply, water cut-off, freezing and thawing. By means of the CT scanning and 3D reconstruction techniques, the evolution characteristics of the internal fissures in expansive soils are quantitatively described under the cyclic action of coupling wetting-drying and freeze-thaw, and the influences of various coupling wetting-drying and freeze-thaw cycles on evolution rules of 3D fissures in expansive soils are investigated. The test results show that the internal fissures in the samples exhibit the development characteristics of obvious regional distribution. The growth depth of the fissures gradually tends to be stable after five cycles, corresponding to 40% of the initial total height of the samples. A comparison of development morphologies of the internal fissures in the samples under various cycles indicates that the development mode transforms from the shallow scattering distribution at the initial stage to the deep gathering one at the final stage. By using the four indices of porosity, bending, branching number and dead endpoints of slices, the evolution rules of the spatial distribution and connectivity of the fissures with the cycles can be quantitatively depicted more satisfactorily. The achievements of this study have certain reference values for further revealing the deterioration process and failure mechanism of canals of expansive soils under the coupling action of wetting-drying and freeze-thaw.

Key words: expansive soil; coupling wetting-drying and freeze-thaw; CT scanning; quantitative analysis; fissure evolution rule

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0405100); 国家自然科学基金项目(51879166); 水利部推广项目(SF-201704); 南京水利科学研究院院基金项目(Y318001, Y318009)

收稿日期: 2018-09-25

*通讯作者(E-mail: 962140062@qq.com)

0 引言

新疆地处欧亚大陆腹地, 气温季节性明显, 水资源十分短缺, 且分布差异性较大, 局部地区缺水严重^[1]。为缓解这个问题, 自 20 世纪起在北疆地区相继建成一批长距离输水明渠。由于渠道沿线膨胀土分布广泛, 气候恶劣, 加之建设初期施工水平不足, 渠基土劣化明显, 严重影响渠道的正常运行。

膨胀土对外部环境变化敏感, 是一种多裂隙性、强胀缩性的高塑性黏土^[2]。渠基膨胀土在经历干湿交替、冻融循环作用下内部水分发生变化, 破坏了土体结构的完整性, 对其变形强度及渗流特性影响较大^[3-4], 表现为两个重要的特征: 裂隙的扩展和强度的衰减。因此, 通过设置合理的环境边界条件, 研究干湿交替、冻融循环作用对膨胀土裂隙演化规律的影响显得尤为必要。

为了准确获取干湿交替、冻融循环作用下膨胀土内部裂隙的演化特征, 试验中对裂隙的采集及量化处理显得十分关键。目前对裂隙的量化描述大多集中在表层, 而现实中裂隙的生成和发展都是三维过程^[5-9]。为了克服这一问题, 部分学者将计算机断层扫描成像 (CT 扫描) 技术引入土体裂隙演化研究中, 通过将一系列二维图像合成整体三维裂隙图像并进行量化处理, 获得土体内部三维裂隙的分布规律^[10-11]。卢再华等^[12]通过 CT 扫描技术对干湿循环作用下土体的微观结构进行研究, 发现随着干湿循环次数的增加, 裂隙数和连通性均显著增加; Mukunoki 等^[13]对压实黏土垫层 (CCL) 在冲击和弯曲荷载作用下的内部细观结构进行 CT 扫描, 对 CCL 内部裂隙由局部向整体演化全过程进行研究。Gebrenegus 等^[14]以砂-膨润土隔离屏障为研究对象, 通过 CT 扫描研究了干燥过程中隔离屏障的裂隙演化规律。

以上对膨胀土裂隙演化规律的研究多集中在对试样内部某一位置处切片断面的裂隙进行提取分析, 对裂隙网络的三维空间信息丢失较多, 很难完整直观地发现试样内部裂隙的三维特征演化规律; 同时试验过程中施加的边界条件多为单一干燥或干湿 (冻融) 循环, 与现场实际干湿交替、冻融循环的边界条件存在较大差异。鉴于此, 本文选用北疆供水渠道现场渠基膨胀土, 模拟渠道现场干湿交替、冻融循环过程, 结合 CT 扫描及三维重建技术, 深入探讨湿干冻融耦合循环作用对膨胀土试样内部裂隙演化规律的影响。

1 渠道现场边界条件

渠道现场经历的干湿交替、冻融循环过程本身较

为复杂, 室内试验中难以完全模拟。本文首先对现场实际边界条件进行简化: 图 1 为渠道沿线某气象站观测到的全年地表温度分布 (限于篇幅, 仅列出 2014—2015 全年地温分布), 其中实线为平均气温。

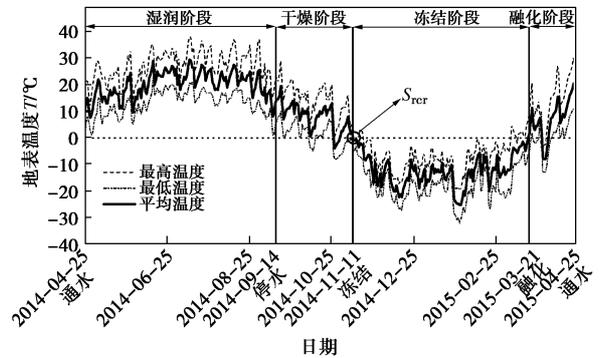


图 1 渠道沿线某气象站全年地温分布曲线(2014—2015)

Fig. 1 Distribution of annual ground temperature of a weather station along channel (2014-2015)

从图 1 中不难发现, 北疆供水渠道为季节性供水渠道, 即每年冬季不供水, 供水期大约为 4 月—9 月期间。目前对季节性供水渠道边坡失稳问题多从单纯冻胀变形或冻融损伤角度进行研究^[15-16], 但实际情况绝非如此。对现场实测地温 (如图 1) 进行分析后发现, 2014 年 4 月 25 日至 2014 年 9 月 14 日为渠道通水期, 由于渗漏渠基土处于湿化过程。2014 年 9 月 14 日渠道进入停水期, 在近 3 个月的时间内地温始终高于 0°C, 期间渠基土实际首先经历了干燥过程 (渠道已停水, 无外界水源补给)。在 2014 年 11 月 11 日地温完全降至冻结温度 (一般认为水的冻结温度为 0°C) 以下, 此时渠基土进入冻结状态。随后地温在 2015 年 03 月 21 日升至 0°C 以上, 此时渠道仍未通水, 渠基土处于融化阶段。综上所述, 渠基土在全年所经历的边界条件可简化为湿润—干燥—冻结—融化 (简称湿干冻融) 耦合的边界条件, 渠基土在每年经历上述反复的湿干冻融耦合循环后产生劣化, 造成渠基土强度的衰减和裂缝的开展, 最终导致膨胀土渠道边坡的失稳。

2 试验材料与方法

2.1 试验土样

试验土样取自北疆供水渠道工程现场, 取样深度为 1 m, 土样呈黄色。将取自现场的土料按《土工试验方法标准》^[17], 经自然风干、人工碾碎及过 2 mm 筛后采用四分对角取样法获取过筛土, 密封保存。取一定质量土样进行基本物理性质试验, 试验结果见表 1。依据《膨胀土地区建筑技术规范》^[18]分类可知, 试验膨胀土具有中等膨胀性。对风干后土样进行轻型击实

试验, 得到本次试验土样最优含水率 w_{opt} 为 24.1%, 最大干密度 ρ_{dmax} 为 1.56 g/cm^3 。通过 X 衍射仪确定土样的矿物成分, 具体组成如表 2 所示。

表 1 膨胀土物理性质指标

Table 1 Physical parameters of expansive soils

G_s	$w_p/\%$	$w_L/\%$	$\delta_{cl}/\%$	颗粒组成(mm)/%		
				>0.075	0.075~0.005	<0.005
2.67	20.3	65.9	76	18	41	41

表 2 膨胀土矿物成分及含量

Table 2 Mineral compositions and content of expansive soils (%)

蒙脱石	石英	长石	方解石及钠长石
61.5	31.9	6.1	0.5

2.2 湿干冻融耦合循环边界的具体设置

考虑到土体的饱和度 (S_r) 受湿干冻融耦合循环过程影响最为明显, 且容易通过现场试验获得, 故采用控制渠基土在由正温变负温时刻的饱和度 (S_{rcr} , 见图 1), 结合通水、停水、正温变负温、负温变正温四个时间节点饱和度的方法, 实现北疆渠道现场湿干与冻融耦合全过程的模拟。图 2 为本次试验湿干冻融耦合循环过程的具体参数设置。初始饱和度 S_{r0} 对应渠基土初始压实状态, 湿润阶段结束时刻饱和度 S_{rsat} 对应渠道通水后考虑最不利工况下渠基土的最大饱和状态。临界饱和度 S_{rcr} 表示渠基土经历干燥阶段后对应的饱和度。结合现场实测结果, 确定本次试验的 $S_{rcr}=0.7S_{rsat}$ 。饱和度 S_{rf} 和 S_{rt} 对应渠基土经历冻结和融化阶段后的饱和度。

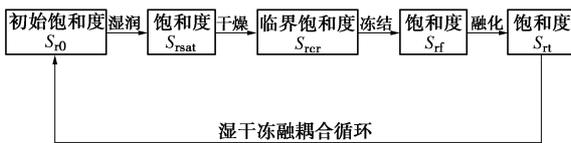


图 2 湿干冻融耦合循环过程边界设置

Fig. 2 Boundary conditions of wetting-drying freeze-thaw coupling cycles

试验过程中, 采用抽气饱和法和模拟渠基土湿润过程 (试样抽气 4 h, 浸泡 24 h); 参考渠道沿线地温分布 (图 1), 确定干燥阶段边界温度为 40°C , 干燥过程在烘箱中进行; 同时采用称重法 (天平精度为 0.1 g) 结合临界饱和度 S_{rcr} 对试样干燥时间进行监控; 冻结和融化阶段均在冻融循环箱中进行, 温度及持续时间分别对应 -20°C , 24 h 和 20°C , 36 h。试验共进行 7 次循环。

2.3 试样尺寸选择及制作

在进行膨胀土裂隙性试验时, 需考虑试样尺寸效应对裂隙发育的影响。试样尺寸越小, 越不易开裂。试样尺寸逐渐增大时, 尺寸效应会明显减弱, 当达到

某一尺寸时得到的裂隙结果可反映原型分布^[19]。Li 等^[20-21]通过对膨胀土现场裂隙进行统计后得到单条裂隙的平均长度约为 27.5 m, 并提出当试样直径为平均裂隙长度的 5 倍 (即 137.5 mm) 时, 可基本消除尺寸效应。同时试样高度对裂隙的发育也产生重要影响。Benson 等^[22]通过对不同高径比 (H/D) 条件下压实黏土试样进行渗透性试验后指出, 在 $H/D=0.5, 1.0$ 条件下获得的渗透系数近似, 即高径比为 0.5 的试样就可以较为合理地模拟现场实际情况, 继续增加高径比不会显著提高模拟的准确性。综合考虑各种因素, 本次试验选用直径为 200 mm, 高度为 105 mm 的试样。

通过预试验发现, 采用常规分层压实法制得的试样存在“层间薄弱带”问题, 当对试样进行干湿或冻融试验时, 裂隙首先沿层间薄弱带扩展, 难以反映自然状态中裂隙自上而下的发展规律。郑剑锋等^[23]研究发现, 通过一次成型的变速率两头压实制样方法制得试样的初始损伤较小, 各层的含水率和干密度分布较为均匀, 故本次试验采用这一方法制取试样。具体制样过程为: 首先测定过筛土的初始含水率, 按试验目标含水率 ($w_{opt}=24.1\%$) 及干密度 ($\rho_{dmax} = 1.56 \text{ g/cm}^3$) 称取对应质量的蒸馏水和土, 随后采用喷雾法均匀地将蒸馏水加入土样中, 密封闷料 24 h 使土样内部水分均匀。在有机玻璃模具侧壁涂抹适量凡士林, 将土料一次性均匀倒入模具中, 采用两头压实法制取试样, 待试样压制后用保鲜膜包裹模具顶部与底部以防止内部水分蒸发。

2.4 单向边界加载装置

为了较真实地模拟现场渠基土在经历湿干冻融耦合循环作用后裂隙所呈现出由表层向深部发育的演化过程, 选择试验的边界为单向施加, 即仅试样上表面受边界条件影响。实际操作中, 通常选择将压制完成的试样 (连同模具) 置于四周及底部隔热的装置中以达到单向环境边界加载效果^[14]。

本次试验通过在模具四壁和底部设置 3 道隔热层的方式来实现边界条件的单向施加。首先在模具四周设置厚度为 50 mm 的隔热海绵, 用箍圈及胶水进行固定, 如图 3 (a) 所示; 将其放入预制的隔热箱中 (隔热箱底部和侧壁均设置厚度为 150 mm 的隔热板), 同时在隔热模具与隔热箱间填充玻璃棉以确保模具四壁和底部的隔热 (图 3 (b)); 随后用一块厚度为 50 mm 的隔热海绵 (图 3 (c)) 实现装置上部的密封; 最终得到单向环境边界加载装置, 如图 3 (d) 所示。

需要说明的是, 由于本次试验为大尺寸单元性试验, 试样在经历单向湿干冻融耦合循环边界作用下内部存在明显的干燥锋面, 使得试样内部水分沿深度方向存在明显差异。为了缓解这一问题, 采用密封法对

试样内部的水汽进行一定程度的平衡,具体操作如下:在每次循环后,采用保鲜膜将试样顶部进行密封;同时将试样(连同隔热箱)静置于室温中进行水汽平衡,时间为24 h,如图3(d)所示。

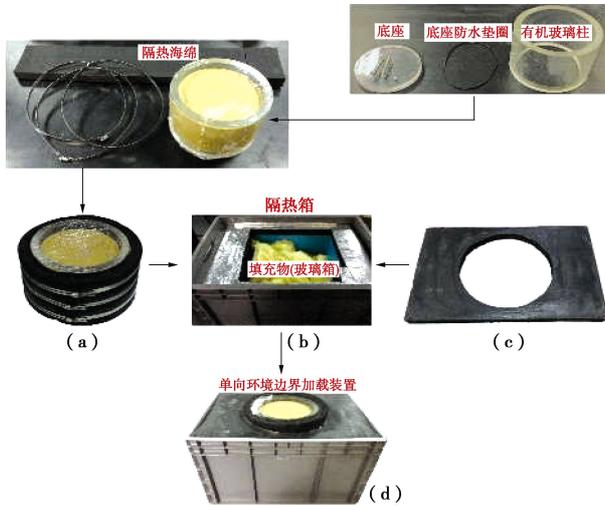


图3 单向环境边界加载装置示意图

Fig. 3 Set up of one-dimensional boundary devices

3 CT 试验及三维重建

3.1 CT 扫描系统

土体裂隙的生成和发展是一个三维过程,本次试验采用 CT 扫描方法获取试样在湿干冻融循环作用下形成的裂隙。试验在中科院寒区旱区研究所 CT 系统上进行,该系统具体参数:CT 机型号为 Philips Brilliance,扫描电压为 120 kV,扫描电流为 235 mA,最小像素值为 0.3 mm,可视密度分辨率为 0.3%,探测器排数为 16。其中扫描水平分辨率为 1024×1024 pixels,体素为 0.3 mm×0.3 mm×3 mm。试样的 CT 扫描过程分别在耦合循环的第 1, 3, 5, 7 次后进行,共计 4 次。

3.2 图像采集与分割

将到达预定循环次数的试样置于 CT 机规定区域进行扫描。由于在扫描过程中常存在探测器扫描工作不一致等原因,易在试样顶部和底部形成环状伪影,影响后期对裂隙的定量化处理,故每次扫描均删除顶部和底部各一张切片。对删减后的 CT 图片进行裁剪,去除有机玻璃模具对试样的影响,最终得到试样直径为 199.8 mm。随后将试样转化为灰度 8 bit 图像以方便后续处理,在此基础上对图像采用中值球形滤波法(直径为 5 voxel)以降低高频噪声。最后采用全局 Ostu 法^[24]对试样裂隙分割的阈值进行选取,最终确定试样的分割阈值为 160。

对试样各切片图像进行二值化处理,最终得到各

层切片的裂隙分布,如图4所示(以循环7次试样为例,简称为 WDF_{T_s}=7)。其中不同位置处试样内部裂隙存在较大差异,使用传统的表面测量具有较大的局限性。

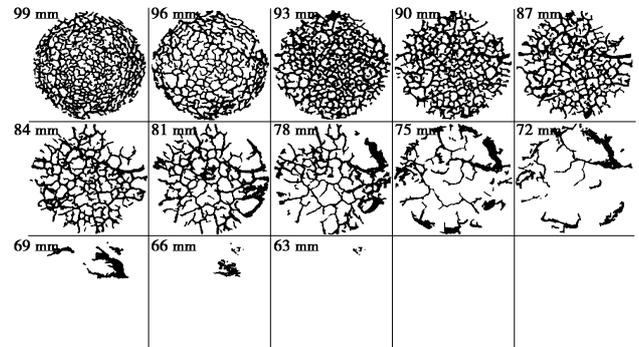
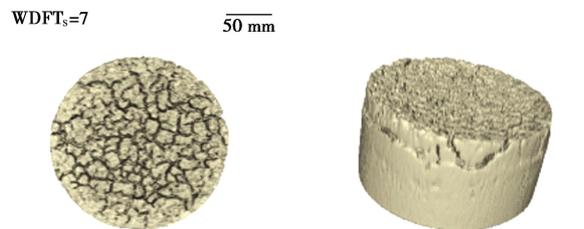


图4 试样各层切片二值化后的裂隙分布图(WDF_{T_s}=7)

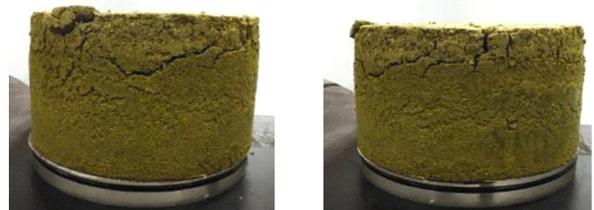
Fig. 4 Crack distribution of each slice after binarization (WDF_{T_s}=7)

3.3 裂隙的三维重建

首先采用 imageJ^[23]中的 3D viewer 插件对 CT 扫描后的图像直接进行三维重建,其最终效果如图5(a)所示(以循环7次试样为例)。待全部循环结束后拆除试样外侧脱模,采集其表面裂隙形态,如图5(b)所示。对比图5(a)与图5(b)可知,三维重构后试样的表面与侧壁均与实物相似度较高,这也证明了本次试验三维重建方法的准确性。



(a) 三维重构图



(b) 三维实物图

图5 试样三维重构及实物图对比图(WDF_{T_s}=7)

Fig. 5 Comparison between soil samples and 3D reconstruction samples (WDF_{T_s}=7)

对分割后的裂隙图像进行三维重构(如图6),其中乳白色部分为重构后的裂隙,黑色为试样底座。试样整体裂隙的发育方向与其边界加载方向一致,均呈现出由顶部向下的发展规律。试样在经历多次湿干冻融耦合循环作用下内部裂隙网络呈现出高度的连通

性。同时发现至 7 次循环结束, 裂隙并未完全贯穿试样, 但可观察到随着循环次数的增加, 试样裂隙发育深度先逐渐增加, 后趋于稳定。

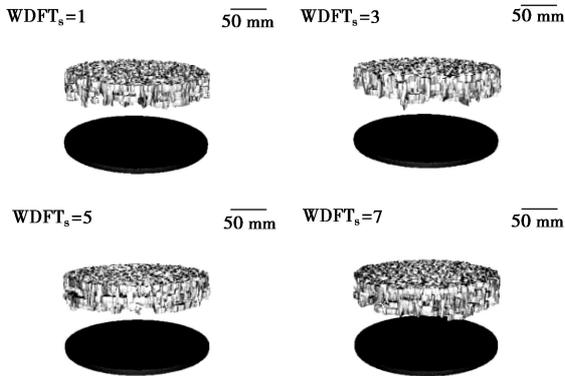


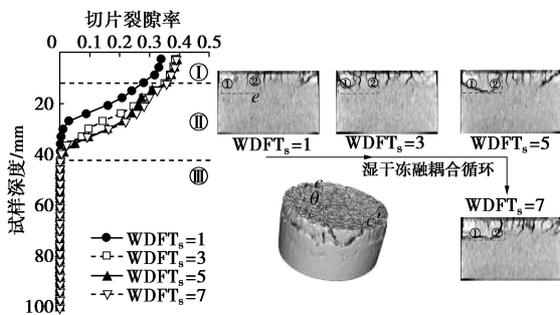
图 6 湿干冻融耦合循环作用下试样内部裂隙网络三维重建图
Fig. 6 3D reconstruction of crack networks in samples under various coupling wetting-drying freeze-thaw cycles

4 裂隙的定量描述及演化规律

对膨胀土裂隙进行定量描述是后续研究裂隙对土体强度、渗透性及变形等方面影响的基础^[24-25]。选取切片裂隙率、分支数、死点数和弯曲度这 4 个指标对试样内部裂隙的空间分布及连通特征进行量化描述, 研究不同湿干冻融耦合循环次数对裂隙网络演化规律的影响。

4.1 试样内部裂隙空间分布特征

对经 CT 试验获得的试样不同深度处的切片裂隙率进行统计, 如图 7 (a) 所示。不同湿干冻融耦合循环次数作用下各深度切片裂隙率的分布规律类似, 均呈现出顶部最大, 沿深度方向逐渐降低的变化规律。试样在经历 1 次循环作用下裂隙开展至距顶部 33 mm 位置, 约占试样初始总高度的 31.4%; 随着循环次数的增加, 裂隙深度在 5 次循环后趋于稳定, 对应深度 42 mm, 占试样初始总高度的 40%。



(a) 切片裂隙率-深度分布 (b) 三维重建后 c-c' 截面的裂隙分布

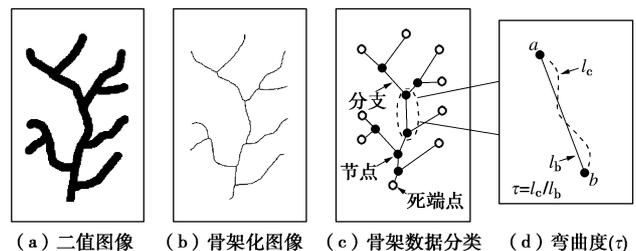
图 7 湿干冻融耦合循环作用下试样内部裂隙分布图

Fig. 7 Distribution of cracks in samples under coupling wetting-drying freeze-dry cycles

由于本次试验边界条件采用单向加载, 试样内部水分仅能通过上表面进入大气, 造成试验过程中试样沿深度方向含水率的不均, 故试样内部裂隙的分布与其所处深度存在直接关系。基于试验获得的切片裂隙率-深度分布特征曲线, 按试样内部裂隙对循环响应程度, 沿深度方向将试样划分成 3 个区域: (I) 贯穿区 (试样顶部至深度 12 mm): 随循环次数的增加, 区域内试样裂隙沿深度方向分布的差异性逐渐消失, 最终各层切片裂隙率逐渐趋于稳定; (II) 渐变区 (深度 12~42 mm), 区域内各循环次数对应的切片裂隙率随深度均呈反比例关系; (III) 无影响区 (试样深度 42 mm 至试样底部), 区域内无裂隙生成, 可认为该区域不受湿干冻融耦合循环作用的影响。

对三维重建后的试样沿深度方向按 c-c' 截面 (与水平方向呈 45° 夹角) 进行切片处理, 获得试样在经历不同湿干冻融耦合循环次数后内部裂隙分布剖面图 (图 7 (b)), 其中黑色部分为裂隙。与图 7 (a) 结果类似, 试样内部裂隙分布区域性特征明显, 在影响区域内裂隙间存在明显的汇聚和贯通现象。以区域 e 内裂隙①和裂隙②的演化过程为例: 循环 1 次后在区域 e 左侧形成裂隙①, 同时表层裂隙②生成并逐渐向试样内部拓展; 循环 3 次后多条微裂隙开始在裂隙①附近汇聚, 并在区域 e 左侧局部贯通; 在第 5 次循环后, 裂隙①逐渐沿水平方向向试样内部拓展, 同时裂隙②在向下发育的同时发生偏转, 最终与裂隙①在区域 e 右侧整体贯通。多次湿干冻融耦合循环作用下, 裂隙在影响范围内经历了起裂、微裂隙汇聚、局部贯通和整体贯通 4 个动态变化过程, 最终裂隙在 5 次循环后趋于稳定。

为了进一步研究湿干冻融耦合循环对试样内部裂隙发育程度的影响, 通过对二值图像 (图 8 (a)) 进行骨架化处理, 在保证裂隙重要形态特征 (拓扑、长度及方向) 的基础上减少图像中冗余信息对最终分析结果的影响^[26]。采用 3D 细化算法^[27]对三维重建后的裂隙网络进行骨架化处理, 提取裂隙中心轴主干 (图 8 (b)); 同时对分支数, 分支长度和节点位置进行统计 (图 8 (c)), 得到裂隙网络骨架化分支特征分布。



(a) 二值图像 (b) 骨架化图像 (c) 骨架数据分类 (d) 弯曲度(τ)

图 8 骨架化处理及数据提取示意图

Fig. 8 Schematic of skeleton processing and data extraction

考虑到试样内部裂隙网络结构的复杂性和连通性，按发育方向将分支划分为水平裂隙骨架分支（简称为水平分支）和非水平裂隙骨架分支（简称为非水平分支）。图9(a)~(d)为不同湿干冻融耦合循环次数作用下试样内部裂隙骨架分支分布图（为便于观察分支的分布规律，仅在图中显示长度大于40 mm的分支）。经历1次循环作用后，试样内部分支分布较为分散且深度较浅，非水平分支（大于40 mm）数为48，约占分支总数的0.79%，水平裂隙数则为2，对应裂隙总数的0.03%（见表3）；最长裂隙对应分支位置位于试样高度66~93 mm区域内，贯穿试样的I区（贯穿区）和II区（渐变区）（如图7(a)）。随着循环次数的增加，5次循环后试样内部非水平分支呈现出明显的汇聚（最长分支两端点处较为明显）和贯通现象（水平分支逐渐连通），至7次循环后最长裂隙位于试样高度72~81 mm区域内，对应试样的II区（渐变区）；同时最长裂隙形态较1次循环出现一定程度的偏转；此外，非水平和水平分支数均较1次循环有大幅度增长（非水平向为127%，水平向为92%）且随着循环次数的增加而逐渐趋于稳定。上述现象说明：湿干冻融耦合循环作用对膨胀土试样内部裂隙拓展规律影响显著，随着循环次数的增加，裂隙发育模式由循环初期的浅层分散分布模式向深层的汇聚偏转模式进行转化；同时由最长裂隙对应的分支位置可知，II区（裂隙渐变区）为试样内部裂隙汇聚贯通的主要区域。

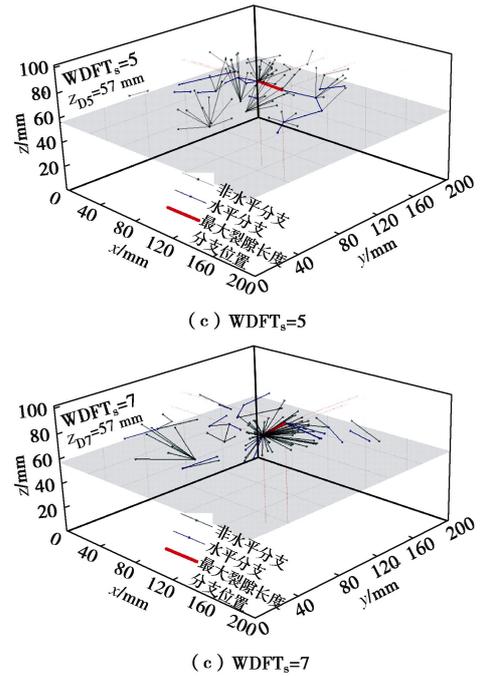
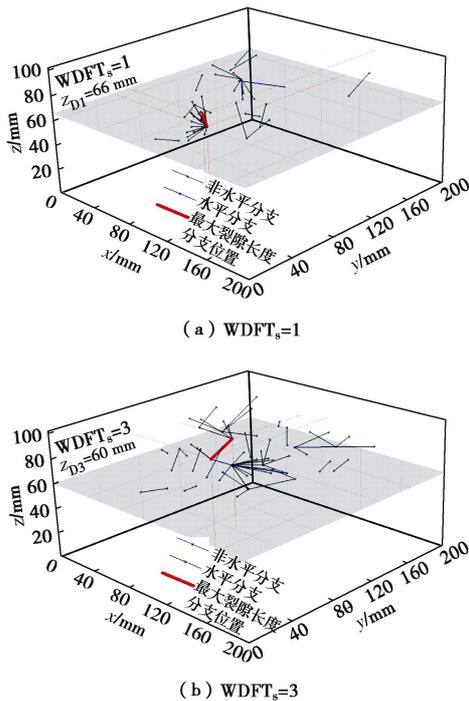


图9 三维裂隙网络骨架化分支简化分布

Fig. 9 Simplified distribution of skeletonized 3D crack networks

表3 三维裂隙网络骨架化分支数据统计

Table 3 Statistics of branch length

参数	WDFTs=1	WDFTs=3	WDFTs=5	WDFTs=7
非水平数/总比	48/0.79%	67/1.39%	101/1.54%	109/1.55%
水平数/总比	2/0.03%	12/0.25%	21/0.32%	25/0.36%
最长裂隙长度	66.68	67.35	73.84	79.38

注：表中非水平数和水平数均为长度大于40 mm的分支数；总比为占分支总数的比例；最长裂隙长度单位为mm。

4.2 试样内部裂隙连通性特征

考虑到切片裂隙率和骨架分支特征(长度和位置)分布均属于累计参数，仅能反映试样内部三维空间内裂隙的数量、长度和走向，不足以对裂隙网络结构的连通性进行描述，这里采用弯曲度和死端点数对不同湿干冻融耦合循环次数作用下试样内部的三维裂隙网络结构连通性进行定量化分析^[28-29]。

弯曲度 τ 定义为三维空间内两节点间实际裂隙长度 l_c 与分支长度 l_b 之比，如图8(d)所示。同时定义裂隙网络的平均弯曲度 $\bar{\tau}$ 来对裂隙网络的整体弯曲度进行描述：

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^n l_{ci}}{\sum_{i=1}^n l_{bi}}, \quad (1)$$

式中，系数*i*为分支序号，*n*为裂隙网络中的分支总

数。

图 10 给出了试样经历 1 次、3 次、5 次和 7 次湿干冻融耦合循环后的弯曲度分布及平均弯曲度。各循环次数对应的弯曲度分布规律类似，均呈现出随弯曲度增大其对应区间内频率逐渐较小的趋势；同时 90% 以上裂隙对应的弯曲度集中分布在 [1, 2] 内。试样在经历 1 次、3 次、5 次和 7 次循环后 [1, 2] 对应的弯曲度频率分别为 2926, 3483, 3823 和 4210，这说明随着循环次数的增加，试样内部弯曲度分布在 [1, 2] 区间的裂隙数量逐渐增多，结合各循环对应的裂隙网络的平均弯曲度 ($\bar{\tau}_1=1.351$, $\bar{\tau}_3=1.336$, $\bar{\tau}_5=1.327$ 和 $\bar{\tau}_7=1.311$)，说明试样在经历多次湿干冻融耦合循环作用下，内部裂隙弯曲度分布逐渐向 [1, 2] 集中。同时湿干冻融耦合循环作用促进了试样内部裂隙网络的发育，使得裂隙网络的平均弯曲度降低，整体的连通性增加，宏观表现为试样内部渗透性的增加。值得注意的是，在对 [1, 2] 进行细化时发现各循环对应的细化区间 - 弯曲度频率分布存在较大差异，1 次和 7 次循环细化区间与弯曲度频率大体呈现出反比例变化规律。而 3 次和 5 次循环则呈现出单峰分布，峰值分别出现在 [1.3, 1.4] 和 [1.1, 1.2] 内。

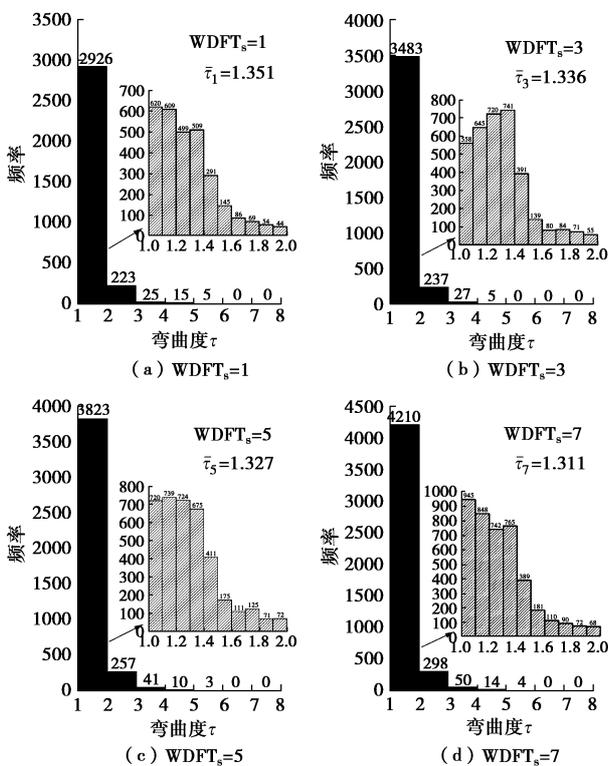


图 10 三维裂隙网络弯曲度分布

Fig. 10 Distribution of bending of 3D crack networks

图 11 (a) 为不同湿干冻融耦合循环作用下试样内部裂隙网络死端点沿深度方向分布。不同循环次数对应的死端点 - 深度分布规律类似，最大死端点位置

均在试样上部，对应于图 7 (a) 中的 I 区 (贯穿区)。随着深度的增加，试样的死点数逐渐降低。在 I 区 (贯穿区)，不同循环对应的死端点 - 深度在 (108, 158) 范围内波动，这是因为在单向环境边界作用下试样上表面与外部环境直接接触，导致了 I 区的裂隙发育程度较高 (图 7 (a))，即试样近环境边界处裂隙网络的局部连通性较好，可认为循环对该区域内的死端点影响不明显。II 区内死端点 - 深度分布较 I 区存在较大差异，对比不同循环次数对应的死端点 - 深度分布，发现随着循环次数的增加，试样内部死端点 - 深度分布曲线大致经历了先下移后抬升的变化过程，可归因于裂隙的汇聚与贯通 (图 7)：试样经历 3 次循环后裂隙深度逐渐增加，对应其死端点 - 深度曲线的逐渐下移；当经历 5 次循环后试样沿深度方向的发育逐渐减缓 (图 7 (a))，同时在裂隙节点处的汇聚和多条裂隙间的贯通现象逐渐明显，导致其内部连通性的增强 (图 9)，在这里表现为死端点 - 深度曲线的抬升。

进一步对不同循环次数对应的死端点频率进行分析，如图 11 (b) 所示。同样按死端点所处裂隙方向将其分为水平死端点和非水平死端点。随着循环次数的增加，水平死端点与非水平死端点呈现出完全相反的分佈规律。循环次数的增加导致了非水平死端点频率的降低，这说明在此方向上循环次数对裂隙结构的渗透性起到促进的作用。与此同时，非水平死端频率的增加说明试样水平方向的裂隙在逐步发育。

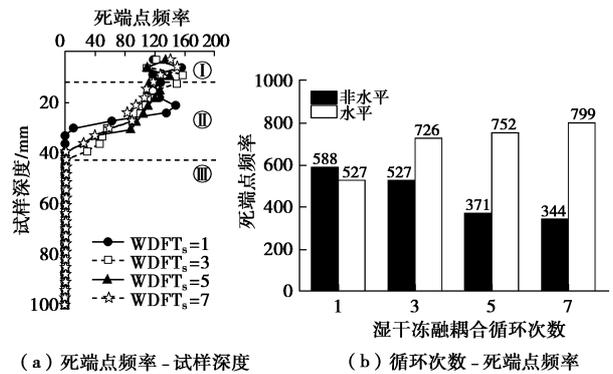


图 11 三维裂隙网络死端点分布

Fig. 11 Distribution of dead-end points of 3D crack networks

5 结 论

本文利用单向环境边界加载装置，结合 CT 扫描及三维重建技术对膨胀土在经历不同湿干耦合循环作用下内部裂隙的演化规律进行试验研究，得到以下 3 点结论。

(1) 湿干冻融耦合循环作用下试样内部裂隙发育存在明显的区域性分布特征，沿深度方向可将试样分为贯穿区 (顶部 - 12 mm)、渐变区 (12 ~ 42 mm) 和

无影响区(42 mm至底部)。

(2) 随着湿干冻融耦合循环次数的增加, 试样内部裂隙发育模式由循环初期浅层分散分布向深层汇聚偏转进行转化。在5次循环后裂隙深度逐渐趋于稳定, 对应深度为42 mm, 占试样初始总高度的40%。

(3) 湿干冻融耦合循环作用促进了试样内部裂隙的发育, 增强了其裂隙网络的连通程度, 在7次循环完成后裂隙网络的平均弯曲度由1.351降至1.311。II区内试样的死端点-深度分布呈现出较初始下移后抬升的变化规律: 试样经历3次循环后内部死端点-深度曲线的逐渐下移, 当经历5次循环后死端点-深度曲线又出现抬升现象。

本文给出了不同湿干冻融耦合循环次数下北疆渠道现场膨胀土裂隙的空间分布及连通性演化规律, 为后续揭示渠基土的劣化过程和灾变机理提供基础。

参考文献:

- [1] 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 Zheng-yin, HUANG Ying-hao. Evaluation and treatment technology of frost damage in canals in saline and cold regions[M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese))
- [2] 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))
- [3] 程展林, 龚壁卫. 膨胀土边坡[M]. 北京: 科学出版社, 2015. (CHENG Zhan-lin, GONG Bi-wei. Expansive soil slope[M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese))
- [4] 孔令伟, 陈建斌, 郭爱国, 等. 大气作用下膨胀土边坡的现场响应试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 1065 - 1073. (KONG Ling-wei, CHEN Jian-bin, GUO Ai-guo, et al. Field response tests on expansive soil slopes under atmosphere[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(7): 1065 - 1073. (in Chinese))
- [5] BANDYOPADHYAY K K, MOHANTY M, PAINULI D K, et al. Influence of tillage practices and nutrient management on crack parameters in a vertisol of central India[J]. Soil & Tillage Research, 2003, 71(2): 133 - 142.
- [6] 李雄威, 王爱军, 王勇, 等. 模拟日照条件下膨胀土的湿-热耦合性状及蒸发效应[J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 2821 - 2826. (LI Xiong-wei, WANG Ai-jun, WANG Yong, et al. Moisture-heat coupling behavior and evaporation effect of expansive soil in simulated solar[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(10): 2821 - 2826. (in Chinese))
- [7] 袁俊平, 殷宗泽. 膨胀土裂隙的量化指标与强度性质研究[J]. 水利学报, 2004, 35(6): 108 - 113. (YUAN Jun-ping, YIN Zong-ze. Quantitative index of fissure and strength characteristics of fissured expansive soils[J]. Journal of Hydraulic Engineering[J]. 2004, 35(6): 108 - 113. (in Chinese))
- [8] TANG C S, CUI Y J, SHI B, et al. Desiccation and cracking behaviour of clay layer from slurry state under wetting-drying cycles[J]. Geoderma, 2011, 166(1): 111 - 118.
- [9] VOGEL H J, HOFFMANN H, ROTH K. Studies of crack dynamics in clay soil: I experimental methods, results and morphological quantification[J]. Geoderma, 2005, 125(3): 203 - 211.
- [10] CLARK J G, STEPHEN H A. Computed tomographic measurement of macroporosity in chisel-disk and no-tillage seedbeds[J]. Soil & Tillage Research, 2002, 64(1): 101 - 111.
- [11] LUO L, LIN H, HALLECK P. Quantifying soil structure and preferential flow in intact soil using X-ray computed tomography[J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72(4): 1058 - 1069.
- [12] 卢再华, 陈正汉, 蒲毅彬. 膨胀土干湿循环胀缩裂隙演化的CT试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 417 - 422. (LU Zai-hua, CHEN Zheng-han, PU Yi-bin. A CT study on the crack evolution of expansive soil during drying and wetting cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(4): 417 - 422. (in Chinese))
- [13] MUKUNOKI T, NAKANO T, OTANI J, et al. Study of cracking process of clay cap barrier in landfill using X-ray CT[J]. Applied Clay Science, 2014, 101: 558 - 566.
- [14] GEBRENEGUS T, GHEZZEHEI T A, TULLER M. Physicochemical controls on initiation and evolution of desiccation cracks in sand-bentonite mixtures: X-ray CT imaging and stochastic modeling[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2011, 126(1): 100 - 112.
- [15] 张晨, 蔡正银, 黄英豪, 等. 输水渠道冻胀离心模拟试验[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(1): 109 - 117. (ZHANG Chen, CAI Zheng-yin, HUANG Ying-hao, et al. Centrifuge modelling of frost-heave of canals[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(1): 109 - 116. (in Chinese))
- [16] 李学军, 费良军, 任之忠. 大型U型渠道渠基季节性冻融水分运移特性研究[J]. 水利学报, 2007, 38(11): 1383 - 1387. (LI Xue-jun, FEI Liang-jun, REN Zhi-zhong. Model of

- coupled heat-fluid transport of U-shape canal lining with concrete during seasonal freezing and thawing stage[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, **29**(8): 13 - 17. (in Chinese))
- [17] SL 237—1999 土工试验规程[S]. 1999. (SL 237—1999 Specification of soil test[S]. 1999. (in Chinese))
- [18] GB 50112—2013 膨胀土地区建筑技术规范[S]. 2012. (GB50112 — 2013 Technical code for buildings in expansivesoil regions[S]. 2012. (in Chinese))
- [19] 黎伟, 刘观仕, 汪为巍, 等. 湿干循环下压实膨胀土裂隙扩展规律研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(7): 1302 - 1308. (LI Wei, LIU Guan-shi, WANG Wei-wei, et al. Crack propagation law of compacted expansive soils under wetting-drying cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(7): 1302 - 1308. (in Chinese))
- [20] LI J H, ZHANG L M, WANG Y, et al. Permeability tensor and REV of saturated cracked soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, **46**(8): 928 - 942.
- [21] LI J H, ZHANG L M. Geometric parameters and REV of a crack network in soil[J]. Computers & Geotechnics, 2010, **37**(4): 466 - 475.
- [22] BENSON C H, BOUTWELL G P. Compaction conditions and scale dependent hydraulic conductivity of compacted clay liners[J]. ASTM STP, 2000, **1384**: 254 - 273.
- [23] 郑剑锋, 马巍, 赵淑萍, 等. 重塑土室内制样技术对比研究[J]. 冰川冻土, 2008, **30**(3): 494 - 500. (ZHENG Jian-feng, MA Wei, ZHAO Shu-ping, et al. Development of the specimen-preparing technique for remoulded soil samples[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, **30**(3): 494 - 500. (in Chinese))
- [24] OHTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Trans Syst Man Cybern, 1979, **9**(1): 62 - 66.
- [25] SCHNEIDER C A, RASBAND W S, ELICEIRI K W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis[J]. Nature Methods, 2012, **9**(7): 671 - 675.
- [26] 程明书, 汪时机, 毛新, 等. 结构性损伤膨胀土三轴加载下的裂隙形态及力学表征[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(增刊 2): 73 - 78. (CHENG Ming-shu, WANG Shi-ji, MAO Xin, et al. Fissure morphology and mechanical characterization for structure-damaged expansive soil under triaxial compression tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(S2): 73 - 78. (in Chinese))
- [27] WANG J J, ZHANG H P, ZHANG L, et al. Experimental study on self-healing of crack in clay seepage barrier[J]. Engineering Geology, 2013, **159**: 31 - 35.
- [28] 唐朝生, 施斌, 刘春, 等. 黏性土在不同温度下干缩裂缝的发展规律及形态学定量分析[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(5): 743 - 749. (TANG Chao-sheng, SHI Bin, LIU Chun, et al. Developing law and morphological analysis of shrinkage cracks of clay soil at different temperature[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(5): 743 - 749. (in Chinese))
- [29] DOUBE M, KŁOSOWSKI M M, ARGANDA-CARRERAS I, et al. BoneJ: free and extensible bone image analysis in ImageJ[J]. Bone, 2010, **47**(6): 1076 - 1079.