

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.05.015

CT 扫描视域下黏土干湿循环劣化机理

马晓凡¹, 陈红², 刘瑾¹, 王颖¹, 陈志昊¹, 车文越¹

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为研究干湿循环对黏土力学特性和微观结构的影响, 通过一系列无侧限抗压强度试验和 CT 扫描测试从宏观和微观角度揭示了干湿循环对黏土的劣化机理。结果表明: 随着干湿循环次数的增加, 黏土的抗压强度保持指数性下降趋势, 在经历 4 次循环后, 抗压强度损失了 40% 左右, 干湿循环达到 8 次后抗压强度基本达到稳定; CT 扫描横剖面显示, 在干湿循环过程中, 裂隙从试样四周开始发育, 并逐渐向内部扩展, 裂隙的宽度和长度均持续增加, 连续性也有所提高; 随着干湿循环次数的增加, 试样的逐层面孔隙率均明显增加, 且不同层间的交界面孔隙率的增加更为显著, 层间的裂隙最先发育, 试样表面也有竖向裂隙发育, 试样内部连通孔隙的数量增加, 闭合孔隙的数量减小; 不同次数干湿循环作用下黏土的孔隙率与抗压强度之间保持负指数性关系, 当干湿循环次数达到 4 次后, 孔隙率的增加对抗压强度的影响减小。

关键词: 黏土; 干湿循环; CT 扫描; 抗压强度; 微观结构

中图分类号: TV443⁺.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2023)05-0111-08

Deterioration mechanism of clay in dry-wet cycle under CT scanning

MA Xiaofan¹, CHEN Hong², LIU Jin¹, WANG Ying¹, CHEN Zhihao¹, CHE Wenyue¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the influence of dry-wet cycles on the mechanical properties and microstructure of clay, a series of unconfined compressive strength tests and CT scanning tests were carried out to reveal the deterioration mechanism of clay caused by dry-wet cycles from macroscopic and microscopic perspectives. The following conclusions were drawn: With the increase of the times of dry-wet cycles, the compressive strength of clay maintained an exponential decline trend. After 4 cycles, the compressive strength lost about 40%, and after 8 cycles, the compressive strength basically reached the stable state. It can be seen that from the cross-section of CT scanning, during the dry-wet cycle, cracks start to develop around the sample and gradually expand inward. The width and length of cracks continue to increase, and the continuity also improves. With the increase of the times of dry-wet cycles, the porosity of each layer of the sample increased significantly and the porosity of the interface between different layers increased more significantly. The cracks between layers developed first, and vertical cracks also developed on the surface of sample. Besides, the number of connected pores increases while the number of isolated pores decreases. There is a negative exponential relationship between porosity and compressive strength of clay under different dry-wet cycles and when the number of dry-wet cycles reaches 4 times, the increase of porosity has less effect on the decrease of compressive strength.

Key words: clay; dry-wet cycle; CT scanning; compressive strength; microstructure

温度和湿度的变化(冻融循环、干湿循环等)将会对岩土体的工程性质或结构件稳定性产生显著影响^[1-3]。岩土体经历干燥和湿润的循环作用后,其宏观特性均会产生不可逆损伤,将会对工程设施的安全性和长期稳定性造成巨大影响。因此,研究干湿循环后岩土体的力学特性和微观结构变化,能够从多尺度揭

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1508501);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B220203020)

作者简介: 马晓凡(1989—),男,实验师,硕士,主要从事地质工程试验技术研究。E-mail: maxiaofan_11@foxmail.com

通信作者: 陈红(1981—),男,正高级实验师,博士,主要从事现代流体测试与河流模拟研究。E-mail: chh_hhu@hhu.edu.cn

引用本文: 马晓凡,陈红,刘瑾,等. CT 扫描视域下黏土干湿循环劣化机理[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(5): 111-118.

MA Xiaofan, CHEN Hong, LIU Jin, et al. Deterioration mechanism of clay in dry-wet cycle under CT scanning[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(5): 111-118.

示干湿循环作用对岩土体的损伤机理。

岩土体在经历干湿循环后力学特性的变化主要通过抗压强度、黏聚力和内摩擦角等参数进行研究。张俊云等^[4]通过直接剪切试验研究了红层土石混合土在经历不同次数干湿循环作用后抗剪强度的变化。邓华峰等^[5]对岸坡消落带土体进行干湿循环作用和剪切试验,揭示了其劣化规律并分析了对岸坡稳定性的影响。李志刚等^[6]采用单轴压缩试验对云母石英片岩在经历干湿循环后的力学特性和破坏特征进行了研究,并分析了其劣化机制。在干湿循环过程中,岩土体内部的水分会发生变化,土体颗粒间的距离增大或收缩,造成内部结构的损伤,从而导致岩土体的物理性质发生变化。岩土体力学特性的变化,通常受其内部结构的影响,干湿循环作用将会对岩土体的微观结构造成损伤,从而在宏观层面表现出力学特性的损失,因此对经历干湿循环后的岩土体进行微观结构参数研究能够揭示其内在劣化机理。干湿循环后岩土体微观结构主要通过图像分析、核磁共振技术(NMR)、压汞试验(MIP)以及计算机断层扫描技术(CT)等方法^[7-10]进行研究,测试岩土体经历干湿循环后的表面裂隙率、孔隙率、孔径分布等^[11-12]。

在以上微观结构测试方法中,CT 扫描技术能够对岩土体整体结构进行测试,实现良好的三维重建效果,且具有快速分析、对岩土体结构无损等优点,正越来越多地被应用到岩土体微观结构的测试当中,可有效揭示岩土体经历冻融和干湿循环后的劣化规律^[13-17]。蔡正银等^[18]采用 CT 扫描和三维重构技术研究了干湿循环与冻融循环作用下膨胀土的内部裂隙演化规律,发现膨胀土的裂隙均呈现出由表层向内部的发展规律,具有明显的区域性分布特点。王晓燕等^[19]结合 CT 扫描技术、三轴浸水和各向等压加载试验,研究了膨胀土在干湿循环作用过程中裂隙对膨胀土变形特征的影响。除此之外,CT 扫描技术在研究岩土体经历冻融损伤和破坏形态方面也具有显著优势,可为揭示岩土体破坏机制和失效模式的研究提供直观定量的参数^[20-22]。

为探究黏土在干湿循环作用下的劣化规律,本文采用无侧限抗压强度试验和 CT 扫描技术,从宏观和微观 2 个尺度,对经历不同干湿循环次数的黏土力学特性和微观结构进行研究,旨在揭示干湿循环后黏土的宏观表现与内在结构之间的关联,以期能为复杂环境变化下工程设施的建设维护提供依据。

1 试验原理与方法

1.1 CT 扫描技术工作原理与测试设备

X 射线断层扫描成像(X-ray computed tomography, X-CT)技术是一种无损检测技术,具有扰动低、精度高、多方位、非破坏性等技术优势,已经被广泛应用于水泥基材、混凝土、岩土体等多孔材料的细观或微观物质结构特征检测、损伤演化及破坏机理研究。

CT 图像往往采用滤波技术进行预处理,主要的预处理软件包括 ImageJ、Matlab 和 Avizo 等,一般采用平滑滤波、边缘检测滤波、锐化滤波、频域转换滤波以及灰度转换滤波等方式进行降噪处理,使得 CT 扫描图像达到既消除噪点,又保留孔隙边缘轮廓、几何形态、拓扑特征的目的。对处理后的高精度 CT 扫描图像进行二值化、图像分割等工作,将检测样品中的孔隙空间与颗粒结构进行分割。目前 Avizo 提供的图像分割方法包括自动和交互式阈值分割、形态学分割、分水岭分割和顶帽分割等方式。对经过一系列分割处理后的图像进行三维建模,构建被测物体的三维形貌和结构,基于建立的三维模型可进行数据提取与运算,从而进行孔隙网络模型建立、渗流数值模拟以及网格剖分等操作,对检测样品的微观几何形态和孔隙分布等特征进行量化研究。最后,可将建模分析得到成果进行数据导出及三维可视化展示。X 射线断层扫描试验工作流程如图 1 所示。

本文所用设备为河海大学地学分析测试中心的 NanoVoxel 4561 型多尺度高分辨 X 射线三维数字岩心成像分析系统,由天津三英精密仪器股份有限公司生产。全套设备由防辐射屏蔽箱体、样品仓、开放式微聚焦 X 射线源、大视野平板探测器、高精密度样品转台、岩心成像采集系统、数据三维重建及数字化岩心可视分析系统、射线源高压控制与真空维持设备以及配电系统共同组成。能够以微米级分辨率对较大尺寸的岩石及土壤样品内部结构进行三维无损扫描成像,构建样品内部微结构的三维模型并进行定性和定量分析,通过二维及三维视角表征样品的孔隙、裂隙、骨架、基质、流体场、位移场等信息。

主要技术参数包括:①系统总体技术指标。最高空间分辨率 3 μm,可测最大样品尺寸 200 mm;具备超分辨成像能力,可实现亚像素成像功能。②开放式微聚焦 X 射线源。光源最高电压 300 kV,光源最低电压 50 kV;最大发射功率 350 W;可自由调节电流;配备多组 X 射线滤波片;z 轴行程 0 ~ 600 mm。③大视野平板

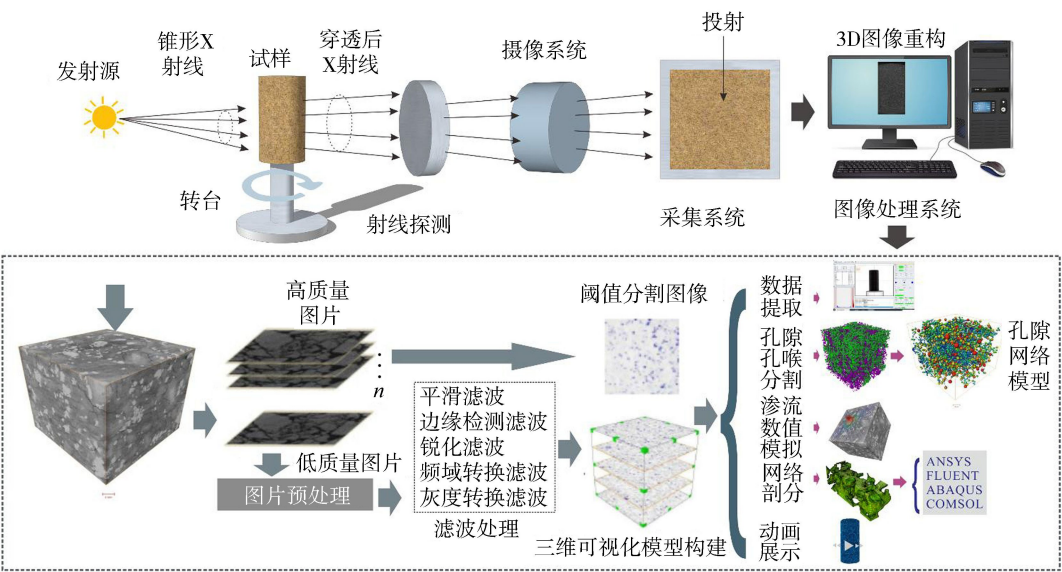


图 1 X 射线断层扫描试验工作流程

Fig.1 Workflow of X-ray tomography test

探测器。具抖动防伪影机械功能;像素矩阵 2 560×2 048 像素;成像面积 253.6 mm×317.4 mm;动态范围 16 bit;具备本底校正、增益校正功能;z 轴行程 0 ~ 600 mm。④高精密样品转台。最大承载 100 kg;旋转范围 0 ~ 360°的任意整数倍旋转;x 轴行程 0 ~ 1 000 mm,y 轴行程 0 ~ 250 mm。⑤数据三维重建及数字化岩心可视分析系统。可对扫描软件获得的数据进行图像三维重构,获得三维体数据;具有三维数据导入与导出、三维可视化及分割、定量分析及测量、二维与三维图像滤波、去噪、平滑等功能;可实现三维数据体渲染、数据孔隙网络模型建模,孔隙、喉道、裂隙等详细数据分析统计等功能。

1.2 样品制备与试验方案

本文采用的黏土为南京下蜀土,取自南京市江宁区某工地。烘干现场取回的黏土,然后破碎过筛,测试其基本物理力学参数:相对密度为 2.70,液限为 38.41%,塑限为 21.12%,塑性指数为 17.29,粒径分布曲线如图 2 所示。通过试验确定了土体的最优含水率为 18.80%,最大干密度为 1.70 g/cm³。

试样制备过程中,按照最优含水率(18.8%)和最大干密度(1.70 g/cm³),称取一定质量的干土和水,接着将干土和水进行混合并养护 24 h,采取分层击实的方法进行制样,每层的接触面进行刮毛处理,最后将土体制成高 80.0 mm,直径 39.1 mm 的试样,并将试样用保鲜膜包裹,养护 24 h 后进行后续试验。力学测试制备 3 个平行样,并制备一个试样用于 CT 扫描测试,共计 16 个试样。

为研究不同干湿循环次数对黏土力学特性与微观结构的影响,选取干湿循环次数分别为 0、1、4、8 和 12。干湿循环采取的是先增湿后减湿的过程,试样制备完成养护 24 h 后,先采用抽真空饱和的方法对试样进行增湿,接着 45 °C 对试样进行烘干减湿处理^[23]。记录烘干过程中试样的含水率变化,达到初始含水率后取出试样,表明一次干湿循环结束。

试样经历不同干湿循环次数后再进行后续力学特性测试与微观结构测试。本文采用无侧限抗压仪对不同干湿循环次数黏土的力学性质进行测试,试验过程中加载速率为 0.8 mm/min。采用 NanoVoxel4561 型多尺度高分辨 X 射线三维数字岩心成像分析系统对不同干湿循环次数黏土的微观结构变化进行测试,并根据 CT 扫描结果对试样的整体结构进行三维重建。结合力学参数和定量微观结构参数,揭示干湿循环作用下黏土的劣化规律。CT 扫描测试参数:测试电压为 250 kV,测试电流为 110 μA,曝光时间为 0.32 s,扫描帧数为 900,图像合并数为 2,像素合并数为 1,分辨率为 58.17 μm。

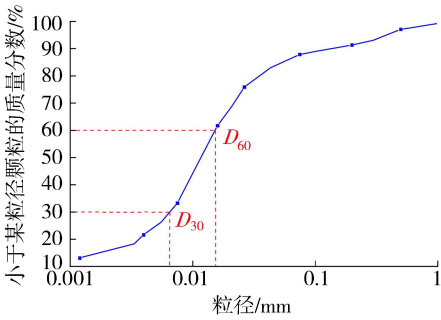


图 2 试验用土的粒径分布曲线
Fig.2 Grain size distribution curve of clay in test

2 结果与分析

2.1 力学特性试验结果

由图3可知,干湿循环作用对黏土的抗压应力应变曲线具有显著影响,随着循环次数的增加,试样在达到峰值轴向应力时对应的轴向应变呈现逐渐减小的趋势;在应变的初始阶段,经历干湿循环次数较多的试样,其轴向应力的增加速率相对较小;当轴向应力达到峰值后,轴向应力的下降速率在总体上出现增加的趋势,表明试样在经历干湿循环作用后,试样的轴向应力在达到峰值后将会出现显著的损失。

由图4(a)可知,黏土的抗压强度随干湿循环次数的增加保持指数性减小的趋势。当干湿循环次数从0增加到1时,抗压强度出现显著下降,下降幅度约为25%;当干湿循环次数从1增加到4时,抗压强度减小了约20%,而随着干湿循环次数的进一步增加,强度的下降幅度逐渐减缓,当干湿循环次数达到8后,抗压强度基本达到稳定,变化幅度仅为4%左右。

本文中采用的弹性模量(E_{50})为割线模量,为试样应力应变曲线中50%应力与其对应的应变之间的斜率。由图4(b)可知,黏土的弹性模量与干湿循环次数间保持指数性减小关系。在前8次干湿循环作用下,试样的弹性模量出现了显著的减小,下降了40.9%。当干湿循环次数达到8后,干湿循环对黏土弹性模量的劣化作用几乎达到稳定。

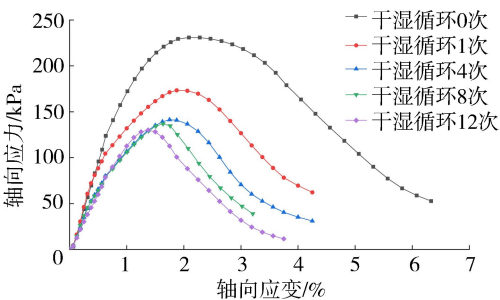


图3 不同干湿循环次数黏土的抗压应力应变曲线
Fig.3 Compressive stress-strain curve of clay under different times of wet-dry cycles

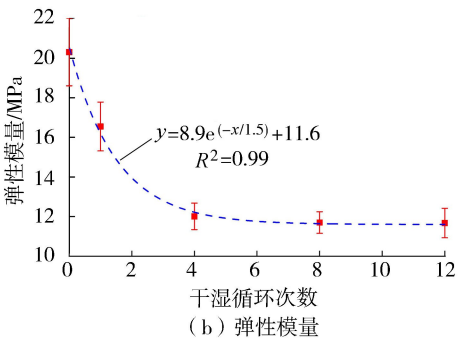
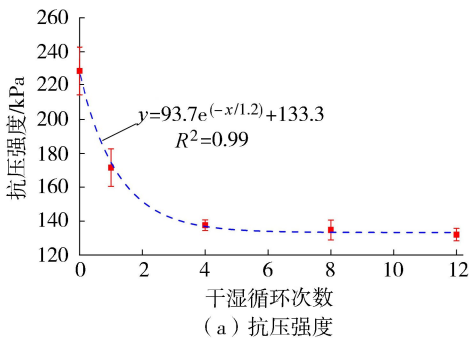


图4 抗压强度、弹性模量与干湿循环次数之间的关系

Fig.4 Relationships between compressive strength, elastic module and times of dry-wet cycles

2.2 CT 扫描测试结果

对不同干湿循环次数黏土的 CT 扫描横剖面图进行二值化处理,提取试样内部的裂隙分布情况,得到如图5所示的裂隙发育过程图。由图5可知,当试样经历1次干湿循环后,内部裂隙从试样的四周开始发育,而此时发育的裂隙较为分散,且宽度较小。当干湿循环次数增加到4时,裂隙进一步发育,并逐渐向试样内部扩展,部分离散的裂隙逐渐相互连接。随着干湿循环次数的进一步增加,试样内部裂隙逐渐扩展,长度和宽度均有进一步的增加,裂隙的连续性也有所提高,且主要分布在试样四周。当干湿循环次数达到4后,试样中裂隙的总体分布形态基本达到稳定,随着干湿循环劣化作用的持续,仅长度和宽度得到进一步扩展。除

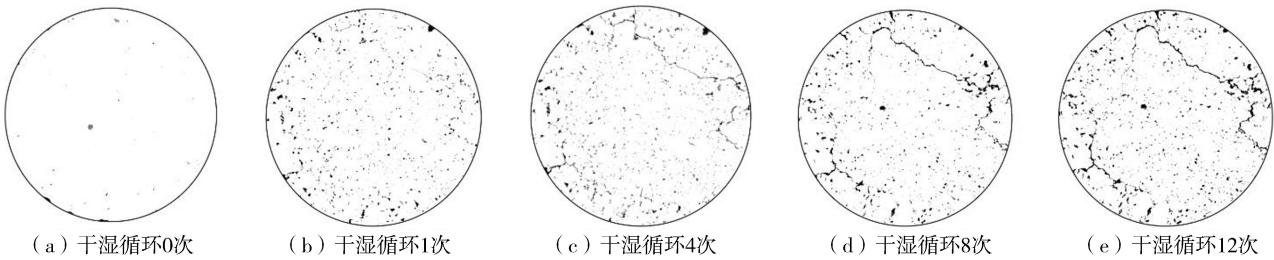


图5 不同干湿循环次数黏土裂隙分布

Fig.5 Fracture distribution of clay under different times of dry-wet cycles

此外,随着干湿循环次数的增加,试样内部的微裂隙也持续发育,当循环次数从 8 增加到 12 的过程中,干湿循环的劣化作用开始减轻。

由图 6 可知,随着干湿循环次数的增加,裂隙首先在不同层的交界处开始发育,试样经历 1 次干湿循环后,从底部开始出现裂隙。当循环次数达到 4 时,试样的中间层开始发育竖向裂隙,且随着干湿循环次数的增加,试样内部裂隙的长度和宽度均有所增加。

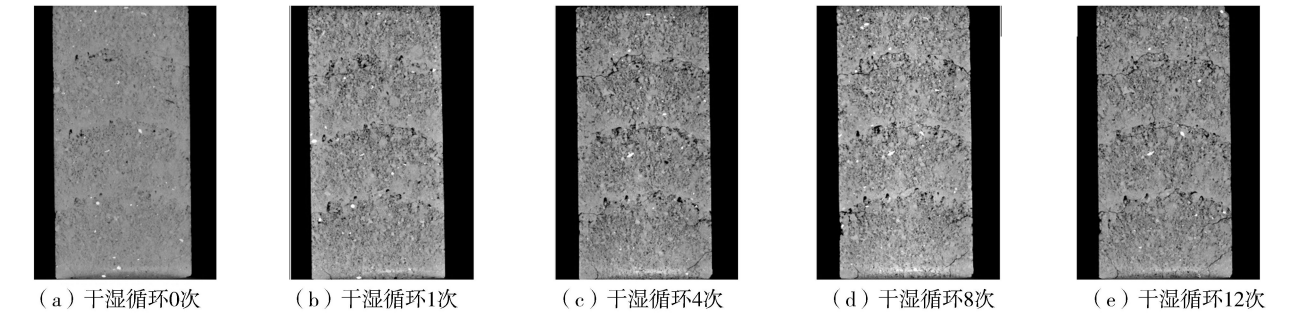


图 6 不同干湿循环次数黏土的纵剖面 CT 扫描图像

Fig. 6 Profile CT scanning images of clay under different times of dry-wet cycles

对试样 CT 扫描图像进行三维重构,得到 $900\times900\times1\,600(x\times y\times z)$ 像素的三维图像数据,在纵向上去除试样底部和顶部干扰信号,得到 1327 层有效数据。采用 Avizo 软件对 CT 扫描数据进行处理,使用交互式 Top-hat 分割方法对每一层扫描图像进行处理,计算得出每一层的面孔隙率(图 7)。由于试样制备采用的是分层击实方法,因此在对试样的面孔隙率进行统计时发现,在每一层的交界面,面孔隙率显著大于层间的孔隙率。随着干湿循环次数的增加,试样的面孔隙率均出现了明显的增加,交界面孔隙率的增加更加显著,这也表明,在干湿循环劣化作用下,层间的裂隙最先发育。通过对分割后的图像进行三维建模,能够得到不同干湿循环次数下试样的三维孔隙结构(图 8)。在孔隙结构的三维建模图像中能够观察到,当试样经历 1 次干湿循环作用后,试样中孔隙明显增多,不同层交界处出现了连续的裂隙,且层间也发育了竖向裂隙,随着干湿循环次数的增加,孔隙数量进一步增加,层间裂隙和试样表面的竖向裂隙也逐渐扩展,当循环次数由 0 增加到 12 时,孔隙率由 19.12% 增加到 22.5%。

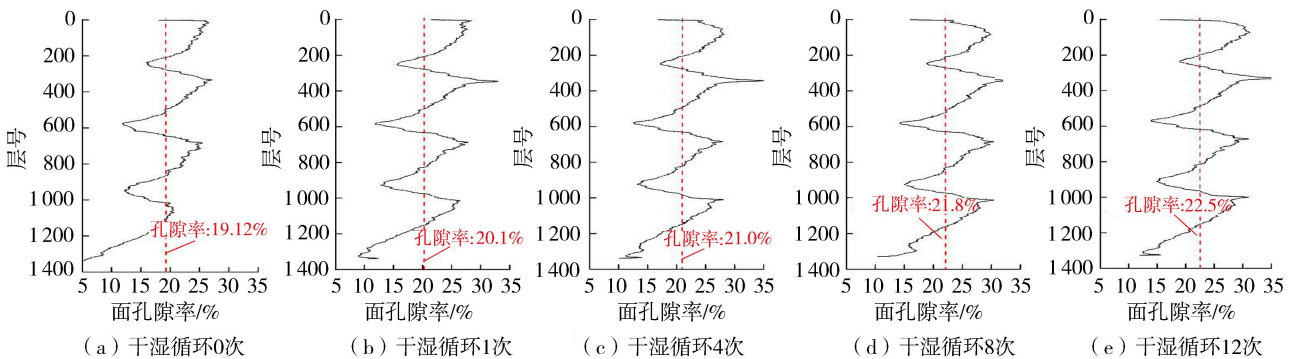


图 7 不同干湿循环次数试样的面孔隙率

Fig. 7 Surface porosity of samples under different times of dry-wet cycles

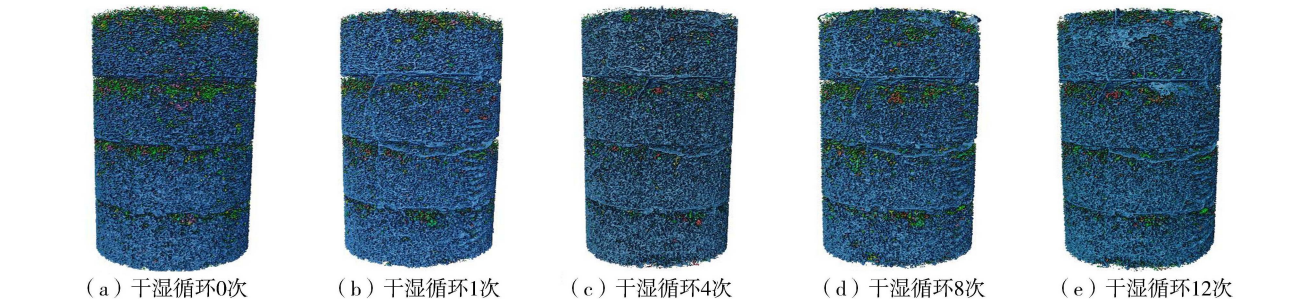


图 8 不同干湿循环次数试样的三维孔隙结构

Fig. 8 Three-dimensional pore structure under different times of dry-wet cycles

孔隙的连通性对其破坏特征和渗流特性均具有重要影响,为进一步评估干湿循环作用对黏土孔隙结构的影响,对部分试样的孔隙连通性进行研究。考虑到计算机的图像处理能力和孔隙结构的代表性,选取的单元体大小为 30 mm×30 mm×30 mm。为减小制样的不均匀性对试样孔隙连通性的影响,选取的单元体位置位于试样的 928 ~ 1 228 层,为制样过程中试样的最下层。孔隙的连通性研究中,沿着 z 轴方向对代表性单元体的连通性进行分析,判断依据为单元体在 z 轴方向孔隙的连通情况,其中从 z 轴顶面存在连续到底面的孔隙通道称为连通孔隙,其间出现断续的孔隙称之为闭合孔隙。

图 9 中红色部分代表连通孔隙,绿色部分代表闭合孔隙。由图 9 可知,黏土中的连通孔隙占主要部分,且随着干湿循环次数的增加,连通孔隙所占的比例逐渐增加,而闭合孔隙的比例逐渐减小,且闭合孔隙的分布变得更加分散。不同干湿循环次数黏土中连通孔隙和闭合孔隙所占的比例如图 10 所示。在经历不同次数干湿循环后,黏土中连通孔隙所占的比例均超过 90%,且当干湿循环次数达到 8 后,连通孔隙和闭合孔隙所占的比例基本达到稳定。

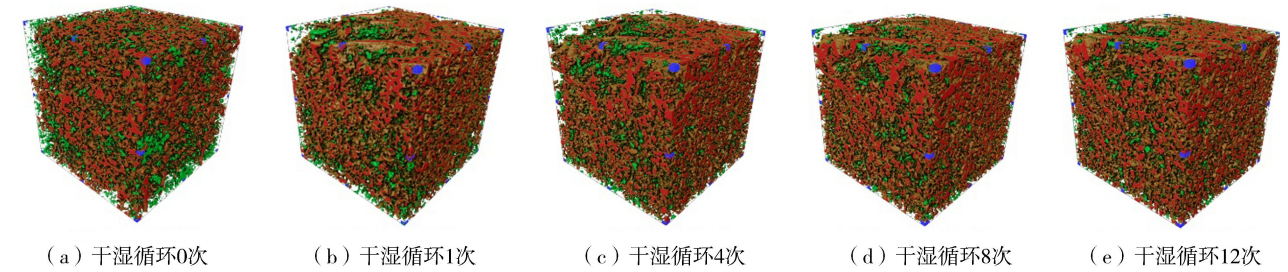


图 9 不同干湿循环次数黏土中连续孔隙和闭合孔隙分布情况

Fig. 9 Distribution of continuous pores and closed pores in clay under different times of dry-wet cycles

2.3 干湿循环劣化作用下黏土宏微观参数之间的联系

岩土体外在宏观表现受其内在微观结构特性的影响,为定量研究不同干湿循环次数下黏土的微观参数对强度特性的影响,建立了孔隙率与抗压强度之间的关系,如图 11 所示。由图 11 可知,抗压强度与孔隙率之间保持负指数关系,随着试样孔隙率的增加,试样的抗压强度出现了先快速下降后趋于稳定的趋势。孔隙率从 19% 增加到 21% 的过程中抗压强度下降了 40% 左右,当孔隙率从 21% 增加到 22.5% 时,抗压强度仅变化了 4% 左右。从孔隙率与抗压强度之间的关系能够得出,在干湿循环过程中,当干湿循环达到一定次数后,孔隙率增加对抗压强度的减小作用开始减缓。

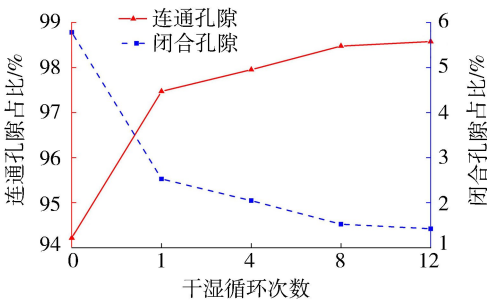


图 10 不同干湿循环次数黏土中连续孔隙和闭合孔隙占比

Fig. 10 Proportion of continuous pores and closed pores in clay under different times of dry-wet cycles

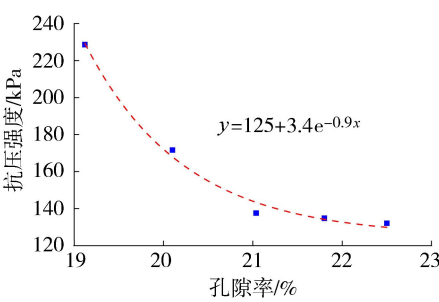


图 11 不同干湿循环次数黏土的孔隙率与抗压强度之间的关系

Fig. 11 Relationship between porosity and compressive strength of clay under different times of dry-wet cycles

3 结 论

- a. 由无侧限抗压强度试验得出,随着干湿循环次数的增加,黏土的抗压强度保持指数性下降趋势,且在前 4 循环时抗压强度损失最显著,下降了 40%,在干湿循环达到 8 次后抗压强度基本达到稳定。
- b. 随着干湿循环次数的增加,内部裂隙从试样的四周开始发育,并逐渐向试样内部扩展,裂隙的宽度和长度均持续增加,裂隙的连续性也有所提高,连通孔隙所占比例从 94.2% 增加到 98.5%。

- c. 随着干湿循环次数的增加,孔隙率从 19.12% 增加到 22.5%,试样的面孔隙率均明显增加,且不同层间交界面孔隙率的增加更加显著,层间的裂隙最先发育,试样表面也有竖向裂隙发育。
- d. 不同次数干湿循环作用下黏土的孔隙率与抗压强度之间保持负指数性的关系,当干湿循环次数达到 4 后,孔隙率的增加对抗压强度的减小作用变缓。

参考文献:

[1] 叶伟,马福恒,胡江,等. 压实黏土干缩裂缝扩展规律试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):102-109. (YE Wei,MA Fuheng,HU Jiang,et al. Experimental study on propagation law of shrinkage cracks in compacted clay[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(1):102-109. (in Chinese))

[2] 张凌凯,崔子晏. 干湿-冻融循环条件下膨胀土的压缩及渗透特性变化规律[J]. 岩土力学,2023,44(3):728-740. (ZHANG Lingkai,CUI Ziyang. Compression and permeability characteristics of expansive soil under drying-wetting-freezing-thawing cycles [J]. Rock and Soil Mechanics,2023,44(3):728-740. (in Chinese))

[3] 陈峰,孙晓明,杜世鹤. 岩石吸水特性及水岩耦合力学特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):77-81. (CHEN Feng,SUN Xiaoming,DU Shihe. Experimental study on water absorption characteristics and water-rock coupling mechanical properties of rock[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(1):77-81. (in Chinese))

[4] 张俊云,张乐,高福洲,等. 干湿循环下红层土石混合料强度及变形特性试验研究[EB/OL]. 西南交通大学学报:1-9 [2022-10-28]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20221027.1054.004.html>.

[5] 邓华锋,肖瑶,方景成,等. 干湿循环作用下岸坡消落带土体抗剪强度劣化规律及其对岸坡稳定性影响研究[J]. 岩土力学,2017,38(9):2629-2638. (DENG Huafeng,XIAO Yao,FANG Jingcheng,et al. Shear strength degradation and slope stability of soils at hydro-fluctuation belt of river bank slope during drying-wetting cycle[J]. Rock and Soil Mechanics,2017,38(9):2629-2638. (in Chinese))

[6] 李志刚,叶宏林,刘伟,等. 干湿循环作用下云母石英片岩抗压性能劣化规律及机理[EB/OL]. 地质科技通报:1-7[2023-02-09]. <https://doi.org/10.19509/j.cnki.dzkg.tb20210817>.

[7] 赵德新,杨柏,李元坤. 基于干湿循环的红黏土裂隙发育特征试验研究[J]. 科技通报,2022,38(7):45-50. (ZHAO Dexin,YANG Bai,LI Yuankun. Experimental study on rracture development characteristics of red clay based on dry-wet cycle[J]. Bulletin of Science and Technology,2022,38(7):45-50. (in Chinese))

[8] XU Jian,LI Yanfeng,REN Chang,et al. Damage of saline intact loess after dry-wet and its interpretation based on SEM and NMR [J]. Soils and Foundations,2020,60(4):911-928.

[9] 常锦,杨和平,肖杰,等. 酸性环境干湿循环条件下膨胀土的膨胀特性及微观作用分析[J]. 中国公路学报,2019,32(3):34-43. (CHANG Jin,YANG Heping,XIAO Jie,et al. Experimental study on fracture development characteristics of red clay based on dry-wet cycle[J]. China Journal of Highway and Transport,2019,32(3):34-43. (in Chinese))

[10] AN Ran,KONG Lingwei,ZHANG Xianwei,et al. Effects of dry-wet cycles on three-dimensional pore structure and permeability characteristics of granite residual soil using X-ray micro computed tomography[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2022,14(3):851-860.

[11] 王欢,曹义康,任俊玺. 干湿循环对粉砂土改良膨胀土裂隙及强度影响[J]. 建筑科学与工程学报,2022,39(5):213-221. (WANG Huan,CAO Yikang,REN Junxi. Influence of dry-wet cycle on crack and strength of silty sand improved expansive soil [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2022,39(5):213-221. (in Chinese))

[12] 何俊,管家贤,张磊,等. 干湿循环对固化污泥微观结构及强度的影响[J]. 水利水电科技进展,2022,42(4):39-44. (HE Jun,GUAN Jiaxian,ZHANG Lei,et al. Effects of dry-wet cycles on microstructure and strength of solidified sludge[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(4):39-44. (in Chinese))

[13] 刘慧,杨更社,申艳军,等. 冻融-受荷协同作用下砂岩细观损伤演化 CT 可视化定量表征[J]. 岩石力学与工程学报,2023,42(5):1136-1149. (LIU Hui,YANG Gengshe,SHEN Yanjun,et al. CT visual quantitative characterization of meso-damage evolution of sandstone under freeze-thaw-loading synergistic effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2023,42(5):1136-1149. (in Chinese))

[14] 王学军,张向东,敬鹏飞,等. 冻融循环作用下沥青混凝土分形断裂特性研究[J]. 力学与实践,2023,45(1):100-112. (WANG Xuejun,ZHANG Xiangdong,JING Pengfei,et al. Fractal fracture characteristics of asphalt concrete under freeze-thaw cycles[J]. Mechanics in Engineering,2023,45(1):100-112. (in Chinese))

[15] 周学友,张敏,常兆广,等. 膨胀土裂缝灌浆效果可视化定量评价方法研究[EB/OL]. 长江科学院院报:1-9[2022-12-14]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail//42.1171.TV.20221212.1717.001.html>.

[16] 郑佳,庄建琦,孔嘉旭,等. 基于 CT 扫描的黄土孔隙结构特征研究[J]. 地质科技通报,2022,41(6):211-222. (ZHENG Jia,ZHUANG Jianqi,KONG Jiaxu,et al. Study of loess pore structure characteristics based on CT scanning[J]. Bulletin of

Geological Science and Technology,2022,41(6):211-222. (in Chinese))

[17] 刘杰,黎照,杨渝南,等. 冻融循环作用下砂岩无损测试力学特性研究[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(4):201-209. (LIU Jie,LI Zhao,YANG Yu'nan,et al. Study on the mechanical properties of sandstone nondestructive testing under the freeze-thaw cycle[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2019,30(4):201-209. (in Chinese))

[18] 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):4555-4563. (CAI Zhengyin,ZHU Xun,HUANG Yinghao,et al. Influences of freeze-thaw process on evolution characteristics of fissures in expansive soils[J]. Rock and Soil Mechanics,2019,40(12):4555-4563. (in Chinese))

[19] 王晓燕,姚志华,党发宁,等. 裂隙膨胀土细观结构演化试验[J]. 农业工程学报,2016,32(3):92-100. (WANG Xiaoyan,YAO Zhihua,DANG Faning,et al. Meso-structure evolution of cracked expansive soils[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2016,32(3):92-100. (in Chinese))

[20] MENG Qingshan,WU Kai,ZHOU Haoran,et al. Mesoscopic damage evolution of coral reef limestone based on real-time CT scanning[J]. Engineering Geology,2022,307:106781.

[21] 谭皓,宋勇军,郭玺玺,等. 冻融裂隙砂岩细观损伤与应变局部化研究[J]. 岩石力学与工程学报,2022,41(12):2485-2496. (TAN Hao,SONG Yongjun,GUO Xixi,et al. Research on meso-damage and strain localization of fractured sandstone after freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2022,41(12):2485-2496. (in Chinese))

[22] 魏俊,廖华林,王华健,等. 真三轴条件下砾岩力学特性试验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2022,46(5):81-89. (WEI Jun,LIAO Hualin,WANG Huajian,et al. Experiment on mechanical properties of conglomerate rocks under true triaxial loading[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science),2022,46(5):81-89. (in Chinese))

[23] 杨俊,童磊,张国栋,等. 干湿循环机制下风化砂改良膨胀土的收缩特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(2):150-155. (YANG Jun,TONG Lei,ZHANG Guodong,et al. Shrinkage characteristics of expansive soil improved with weathered sand through wet-dry cycles[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2015,43(2):150-155. (in Chinese))

(收稿日期:2023-04-07 编辑:刘晓艳)

(上接第 103 页)

[19] 张哲铭,李晓瑜,姬建. 基于 LS-SVM 的 TBM 掘进参数预测模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(4):373-379. (ZHANG Zheming,LI Xiaoyu,JI Jian,et al. TBM excavation parameter prediction model based on LS-SVM method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(4):373-379. (in Chinese))

[20] ZHANG Q,ZHU Y,MA R,et al. Prediction method of TBM tunneling parameters based on PSO-Bi-LSTM model[J]. Frontiers In Earth Science,2022,10:854807.

[21] 徐芝纶. 弹性力学(第五版)[M]. 北京:高等教育出版社,2016.

[22] 赵雷刚,陈云节,刘发展. 盾构滚刀布置方法分析与研究[J]. 铁道标准设计,2012,609(11):84-88. (ZHAO Leigang,CHEN Yunjie,LIU Fazhan. Analysis and research on the arrangement of disk cutter of shield machine[J]. Railway Standard Design,2012,609(11):84-88. (in Chinese))

[23] 刘文波,杨学锋,万壮,等. 盾构机刀具的分类与布置[J]. 重型机械,2019(2):6-11. (LIU Wenbo,YANG Xuefeng,WAN Zhuang,et al. Classification and arrangement of shield machine cutters[J]. Heavy Machinery,2019(2):6-11. (in Chinese))

[24] 朱伟,钱勇进,王璐,等. 长距离盾构隧道掘进的主要问题及发展趋势[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):138-149. (ZHU Wei,QIAN Yongjin,WANG Lu,et al. Main problems and development trends of long-distance shield tunneling[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(1):138-149. (in Chinese))

[25] 张金铸,林天键. 三轴试验中岩石的应力状态和破坏性质[J]. 力学学报,1979,11(2):99-105. (ZHANG Jinzhu,LIN Tianjian. Stress conditions and the variation of rupture characteristics of a rock as shown by triaxial tests[J]. Acta Mechanica Sinica,1979,11(2):99-105. (in Chinese))

[26] HOEK E,BROWN E T. Empirical strength criterion for rock masses [J]. ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division,1980,106(GT9):1013-1035.

[27] 胥月稳,俞茂宏,王思敬. 岩石的非线性统一强度准则[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(10):1435-1441. (ZAN Yuewen,YU Maohong,WANG Sijing. Nonlinear unified strength criterion of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2002,21(10):1435-1441. (in Chinese))

[28] 毛红梅,陈馈,冯欢欢. 不同刀具配置下隧道掘进机高效破岩机理与推力预估[J]. 岩土工程学报,2013,35(9):1627-1633. (MAO Hongmei,CHEN Kui,FENG Huanhuan. Rock-breaking mechanism of TBM with different types of cutter tools and estimation of thrust force[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2013,35(9):1627-1633. (in Chinese))

[29] 吴波,阳军生. 岩石隧道全断面掘进机施工技术[M]. 安徽:安徽科学技术出版社,2008.

(收稿日期:2023-06-02 编辑:刘晓艳)