

DOI: 10.11779/CJGE2024S20006

# 干湿循环对黏土微观结构及持水性能影响的试验研究

杨 旭<sup>1</sup>, 蔡国庆<sup>\*1,2</sup>, 刘倩倩<sup>1</sup>, 李风增<sup>3</sup>, 单治鹏<sup>1</sup>

(1. 城市地下工程教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 3. 郑州市公路事业发展中心, 河南 郑州 450015)

**摘要:** 长期干湿循环作用会削弱路基土的工程力学性质, 产生工程灾害, 有必要研究干湿循环对其微观结构及持水性能的影响。针对既有线有砟轨道路基土, 开展了一系列考虑干湿循环影响的压汞试验、扫描电镜试验、压力板试验与饱和盐溶液蒸汽平衡试验。试验结果表明: 在反复的干湿循环过程中, 土体结构遭到破坏, 内部胶结物质不断减少。土体微孔及小孔( $<5\text{ }\mu\text{m}$ )数量逐渐增多, 中孔及部分大孔范围( $5\text{~}30\text{ }\mu\text{m}$ )内的峰值孔径逐渐减小, 分布密度逐渐增大。数次干湿循环后微裂隙( $>100\text{ }\mu\text{m}$ )逐渐增多, 导致试样开裂。干湿循环会对土体的持水性能产生影响, 初始干密度较小时, 经历过1次干湿循环持水性能略有增强, 而经历过3次及5次干湿循环持水性能持续减弱。

**关键词:** 干湿循环; 有砟铁路黏土填料; 微观结构; 持水性能

中图分类号: TU442 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)S2-0011-05

作者简介: 杨 旭(1996—), 男, 博士研究生, 主要从事非饱和土力学方面的研究。E-mail: 1054836602@qq.com。

## Experimental study on influences of wetting-drying cycles on microstructure and water-retention characteristics of clay

YANG Xu<sup>1</sup>, CAI Guoqing<sup>1, 2</sup>, LIU Qianqian<sup>1</sup>, LI Fengzeng<sup>3</sup>, SHAN Yepeng<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Urban Underground Engineering of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. Zhengzhou Highway Development Centre, Zhengzhou 450015, China)

**Abstract:** The Long-term wetting-drying cycles can weaken the engineering characteristics of subgrade fillers, resulting in engineering disasters. It is necessary to study the effects of the wetting-drying cycles on their microstructure and water-retention performance. A series of mercury intrusion tests, scanning electron microscopy tests, pressure plate tests and saturated salt solution vapor equilibrium tests considering the influences of the wetting-drying cycles are carried out on the subgrade filler of the existing ballasted track roads. The experimental results show that during repeated wetting-drying cycles, the soil structure is damaged, and the internal cementitious materials are continuously reduced. The number of micropores and small pores( $<5\text{ }\mu\text{m}$ ) in the soil gradually increases, while the peak pore size in the range of mesopores and some large pores( $5\text{~}30\text{ }\mu\text{m}$ ) gradually decreases, and the distribution density gradually increases. After several wetting-drying cycles, the number of microcracks( $>100\text{ }\mu\text{m}$ ) gradually increases, leading to cracking of the soil specimens. The wetting-drying cycles have effects on the water-retention characteristics of the soil. When the initial dry density is low, the air-entry value after experiencing one wetting-drying cycle is slightly higher than that without wetting-drying cycles, while the air-entry value of the specimen after three and five wetting-drying cycles continues to decrease.

**Key words:** wetting-drying cycle; ballasted railway clay filler; microstructure; water-retention characteristic

## 0 引言

细粒土通常且含有蒙脱石、伊利石等亲水矿物, 在长期干湿循环作用下, 其工程力学性质的变化不容忽视<sup>[1]</sup>。

在铁路工程中, 尤其是既有线有砟轨道, 干湿循环作用易导致道砟下细粒土填料的持水性能、结构、孔隙比等发生变化, 进而引发路基不均匀沉降等工程灾害。土体持水性能可以通过土水特征曲线 (soil-

water characteristic curve) 来研究, 这是研究非饱和土的重要工具之一。土体的结构可以通过压汞试验和扫描电镜试验法来研究<sup>[2-4]</sup>。土体持水性能受结构变化影响, 研究干湿循环作用下土体的微观结构变化及土水

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U2034204, 52078031), 中央高校基本科研业务费项目 (2023JBZD004)

收稿日期: 2024-06-21

\*通信作者 (E-mail:gqcai1001@163.com)

特征曲线对于进一步解决路基性能等在复杂气候条件下的劣化甚至灾变问题具有重要意义。

近年来,学者们对干湿循环作用下土体的微观结构及 SWCC 的变化规律开展了广泛研究。赵天宇等<sup>[5]</sup>对黄土等细粒土开展试验研究,通过扫描电镜试验发现干湿循环会导致土体中胶结物被溶蚀,孔隙贯通或扩张,土体中大孔隙增多,使土体的持水性能降低。Zhao 等<sup>[1]</sup>、Kong 等<sup>[6]</sup>通过 SWCC 证实了干湿循环会使土体的进气值降低,持水性能减弱。利用干湿循环降低持水性能这个特性,一些学者<sup>[7-8]</sup>提出预测不同次数干湿循环 SWCC 的方程,其中 Yi 等<sup>[8]</sup>参考了土体的孔隙尺寸分布 (PSD) 曲线。但是,当前的研究对象多为膨胀土、黄土等,普通黏土研究较少,且对土体进行的干湿循环次数普遍较少,集中在 2~3 次,多次干湿循环后的变化规律有待进一步研究。此外,将 SWCC、扫描电镜法得到的图像以及压汞试验得到的孔隙分布结合起来分析的研究较少。

综上,本研究利用从既有线有砟轨道路基病害现场取回的黏土开展一系列试验,研究了干湿循环作用下黏土的微观结构及持水性能的变化规律,揭示了干湿循环对黏土持水性能的影响机理。

## 1 试验材料及制备

### 1.1 试验材料

试验材料为辛泰铁路莱芜东站路基细粒土填料,依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019),对现场采集的土样开展了颗粒分析试验、比重试验、击实试验、液塑限试验。此外,还开展了土样的成分分析试验,以确定土体的矿物组成。图 1 为路基土的颗粒级配曲线,基本物理参数见表 1。土体矿物组成由高到低依次为石英 (34%)、斜长石 (17%)、伊利石 (12%)、微斜长石 (12%)、蒙脱石 (11%)、闪石 (6%)、高岭石 (3%) 等。依据《岩土工程勘察规范》(GB50021—2009) 可确定试验土样为低液限黏土。

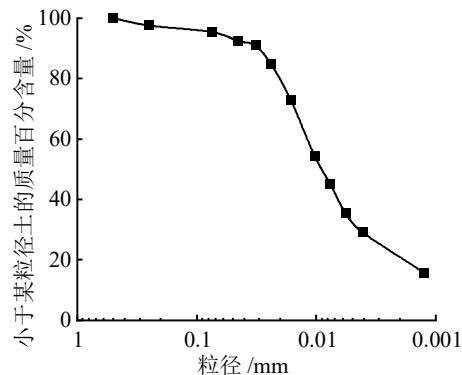


图 1 路基土级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve of subgrade soil

表 1 试验黏土的基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of clay used in tests

$G_s$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指 数 $I_p$	最优含水 率 $w_{op}/\%$	最大干密度 $\gamma_{d, max}/(g \cdot cm^{-3})$
2.73	46.1	22.4	23.7	20.4	1.635

### 1.2 试样制备

将现场取土烘干、碾碎,将碾碎土样过 0.5 mm 筛,按照 20.4% 含水率,即最优含水率进行配置,静置 24 h 使其水分分布均匀。静压制样法制备试样,环刀试样直径为 61.8 mm,高 20 mm;三轴试样直径为 39.1 mm,高 80 mm。本试验设定三种压实度,分别为 90%、95% 和 100%,即初始干密度 1.47 g/cm<sup>3</sup>、1.55 g/cm<sup>3</sup> 和 1.64 g/cm<sup>3</sup> 进行试验。

## 2 试验方案

### 2.1 干湿循环试验

将制备好的试样进行干湿循环试验,包括真空饱和与自然风干两个过程。首先,在真空饱和器中进行 48 h 饱和,模拟雨季的大量降雨,然后,将饱和试样在室内风干,模拟降雨后的自然风干。干化终点定为含水率 10%,风干过程每 4 h 对试样翻转一次,每 8 h 风干后用保鲜膜将试样包裹并静置 8 h,减少因水分分布不均引起的开裂。

### 2.2 压汞试验、扫描电镜试验

将经历 0, 1, 3, 5 次干湿循环的三轴试样保持在 10% 含水率,取试样中心部位切成 5 mm 边长的方块试样用于压汞和扫描电镜试验。

### 2.3 压力板试验与饱和盐溶液蒸汽平衡试验

将经历过不同次数干湿循环的环刀试样在真空饱和器中充分饱和,随后将其放入压力板中进行吸力平衡(见图 2 (a))。本试验设定的吸力为 0 kPa→20 kPa→50 kPa→100 kPa→200 kPa→370 kPa。按照设定的吸力路径逐级进行脱湿试验,每一级吸力平衡后称取各个试样质量,待最后一级吸力平衡结束后,将试样高温烘干以得到各级含水率。在高吸力段,将经历过不同次数干湿循环的环刀试样小心切成小土块放入装有饱和盐溶液的保湿缸(见图 2 (b))。饱和盐溶液在 20℃ 条件下对应的吸力值依次为  $LiCl \cdot H_2O$  (286.70 MPa)、 $CH_3COOK$  (198.14 MPa)、 $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  (149.51 MPa)、 $NaNO_2$  (57 MPa)、 $KCl$  (21.82 MPa)、 $ZnSO_4$  (14.24 MPa)、 $K_2SO_4$  (3.29 MPa)、 $CuSO_4$  (2.73 MPa)。密封饱和盐溶液坛,待其吸力平衡后,使用高精度天平称量试样质量,并采用高温烘干法测量含水率。

## 3 试验结果与分析

本节首先介绍干湿循环对试样外形及孔隙比等方面的影响,接着从孔径分布、微观结构、SWCC 等方面对

干湿循环对土体的影响进行详细阐述与分析。

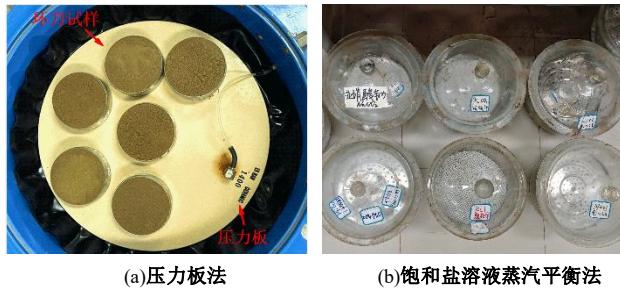


图 2 压力板法和饱和盐溶液蒸汽平衡法

Fig. 2 Pressure plate method and saturated salt solution vapor equilibrium method

### 3.1 土体外观随干湿循环的变化

图 3 为每次干湿循环的干化终点试样外部形态。可以看出, 随着干湿循环次数的增多, 试样会逐渐产生开裂现象。在第一次干化终点, 试样较完整, 第二次干化终点产生微小裂缝, 之后随着干湿循环次数增加, 原有裂缝会变得越来越明显, 之前完好的部分也会陆续产生裂缝。



图 3 1~5 次干化终点试样外形

Fig. 3 Appearances of end point specimens after drying cycles of 1~5

在干湿循环过程中忽略试样内部土颗粒质量损失, 认为只有水的质量发生变化。经历 48 h 抽真空饱和后, 试样内部所有孔隙均被水充满, 试样完全饱和, 同组试样称取质量并取平均值, 计算此时孔隙比。在每次干化终点使用游标卡尺从三个不同方向测量试样高度与直径, 计算体积并得到此时孔隙比。饱和状态及干化终点孔隙比随干湿循环次数变化见图 4。

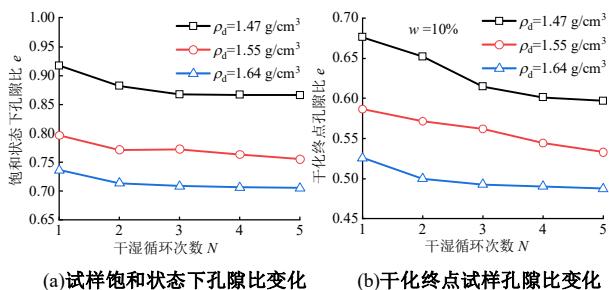


图 4 饱和状态及干化终点试样孔隙比变化

Fig. 4 Changes in porosity of specimens in saturated and drying states

可以看出随着干湿循环次数增加, 饱和状态和干化终点状态的孔隙比不断减小, 经历前三次干湿循环

下降较快, 之后随着干湿循环次数增加孔隙比下降速率减缓。

### 3.2 土体结构随干湿循环的变化规律

初始干密度  $1.47 \text{ g/cm}^3$ , 且经历过 0, 1, 3, 5 次干湿循环的试样, 在 10% 含水率下, 其孔隙结构的变化见图 5。

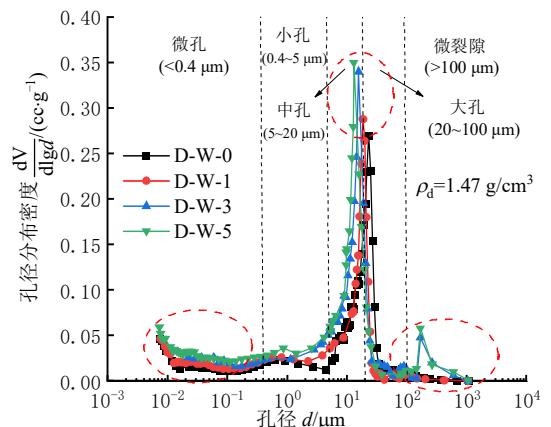


图 5 干湿循环对土体孔隙结构的影响 (压汞试验)

Fig. 5 Influences of wetting-drying cycles on pore structure of soil mass (mercury intrusion tests)

土中孔隙大小及类别: 微裂隙 ( $>100 \mu\text{m}$ )、大孔 ( $>20 \mu\text{m}$ )、中孔 ( $5\sim20 \mu\text{m}$ )、小孔 ( $0.4\sim5 \mu\text{m}$ )、微孔 ( $<0.4 \mu\text{m}$ )。由图 5 可见, 干湿循环对初始干密度  $1.47 \text{ g/cm}^3$  的试样, 其影响主要集中在三个方面: ①微孔及小孔范围, 随着干湿循环的发展, 相同大小的孔径数量逐渐变多; ②中孔及部分大孔,  $5\sim30 \mu\text{m}$ , 这个范围存在土体孔隙的峰值, 干湿循环会使其峰值“左移”和“上移”, 即峰值孔径逐渐减小, 孔隙密度逐渐增大; ③大孔及微裂隙范围, 未经历干湿循环及经历一次干湿循环的试样, 在大孔及微裂隙分布密度很小, 而经历 3 次及 5 次干湿循环后, 在  $200 \mu\text{m}$  附近产生了很明显的微裂隙, 且经历 5 次干湿循环的试样微裂隙数量大于 3 次。

初始干密度  $1.47 \text{ g/cm}^3$ , 且经历过 0, 1, 3, 5 次干湿循环的试样, 在 10% 含水率下, 其土体结构的变化见图 6, 选取的放大倍数分别为 500 倍、1000 倍。

由图 6 可看出, 未经干湿循环的土体主要由黏土集聚体组成, 土颗粒和黏土集聚体组成了土体的骨架, 黏土集聚体之间连接模式以面对面和点对面接触为主, 颗粒排列松散, 孔隙较大。经历 1 次干湿循环的土体, 其黏土集聚体上发生了显著的变化, 部分集聚体结合在一起, 整体变大。部分破碎, 分解成更小的集聚体, 填充在大集聚体缝隙中。整体上土颗粒分布较未经历干湿循环试样变得均匀, 大孔隙减少。经历 3 次干湿循环的土体, 黏土集聚体变得更大, 几乎连在一起。此时土体的孔隙变得更小, 土颗粒的分布更

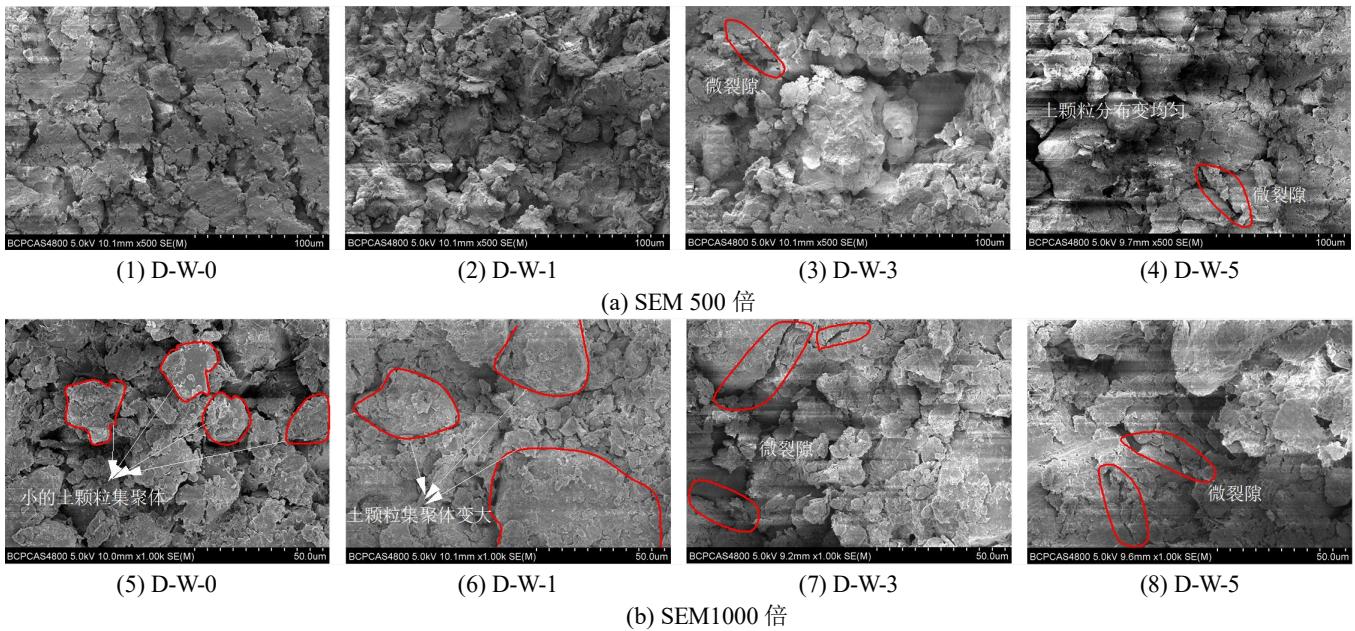


图 6 土体微观结构随干湿循环的变化

Fig. 6 Evolution of soil microstructure with wetting-drying cycles

加均匀。同时还可以看出土体内部产生了微裂隙。经历 5 次干湿循环的土体，土颗粒的分布更加均匀。同时，产生了更加明显的微裂隙。

综上所述，在土体反复干湿循环过程中，饱和阶段水的冲刷作用使得土体的原状结构破坏，黏土集聚体破碎，大孔隙逐渐变小，土样变得均匀。干燥过程中，土体会产生微裂隙，随着干湿循环次数变多，裂隙逐渐变大。同时经历过于湿循环的试样更易破碎，说明干湿循环使土样内部的胶结物质不断散失。这与 3.1 节中得到的干湿循环使试样体积收缩、产生裂隙的试验现象及压汞试验结果相吻合。

### 3.3 土体持水性能随干湿循环的变化规律

图 7 为不同初始干密度试样的 SWCC。

可以看出，初始干密度大的试样饱和度在全吸力范围内均高于初始干密度低的试样，脱水速率慢。这说明提高试样的初始干密度可以有效增强土体的持水性能。初始干密度越大，集聚体间的大孔隙越少，土体进气值越大，在低吸力段越不易脱水，持水性能越强。不同的初始孔隙比土体主要差距在于大孔隙，而不是黏土集聚体之间的小孔隙<sup>[9]</sup>。在饱和盐溶液蒸汽平衡法量测的高吸力段，排水主要由集聚体间的小孔隙控制，整体相差不大。

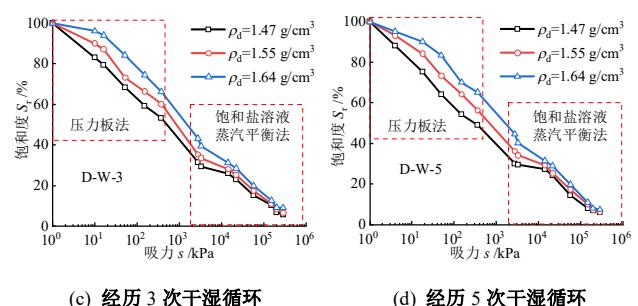
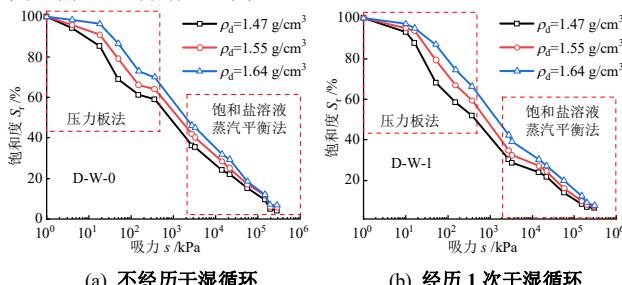


图 7 初始干密度对 SWCC 的影响

Fig. 7 Influences of initial dry density on soil-water characteristic curve (pressure plate method)

图 8 为低吸力段的经历不同次数干湿循环的 SWCC。初始干密度  $1.47 \text{ g/cm}^3$  且经历过 1 次干湿循环的试样，整体上微孔和小孔数量变多，中孔及部分大孔整体孔径变小，数量变多，使其土体孔隙变得更加均匀。因此，在  $50 \text{ kPa}$  以内的低吸力段，经历 1 次干湿循环的试样饱和度略大于未经干湿循环的试样，进气值变大，脱水速率变慢，说明此时经历过 1 次干湿循环的试样持水性能强于未经干湿循环。当试样继续经历干湿循环，一方面微孔和小孔数量继续增加，中孔和部分大孔孔径继续变小，数量增加，另一方面不断产生微裂隙。在脱水过程中，排水的顺序为微裂隙，集聚体间大孔、中孔，集聚体间小孔、微孔，其中微裂隙甚至裂隙影响最大。因此，干湿循环次数越多，在低吸力段饱和度越低，进气值越小，脱水越快，持水性能越差。初始干密度  $1.55 \text{ g/cm}^3$  的试样变化规律与之类似。

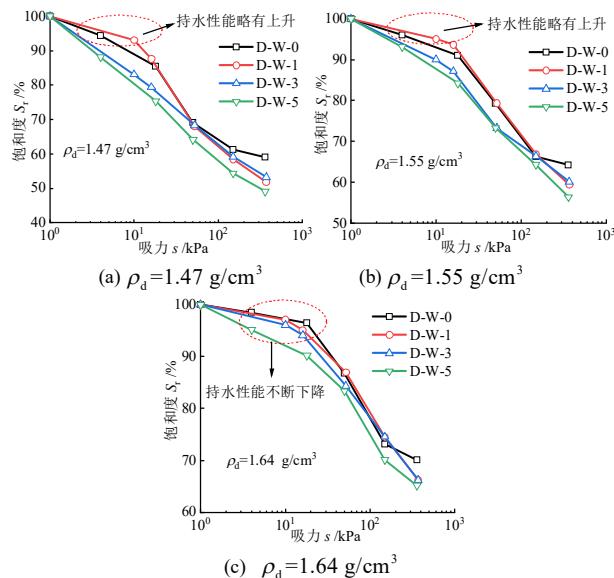


图 8 低吸力范围内干湿循环对 SWCC 的影响

Fig. 8 Influences of wetting-drying cycles on soil-water characteristic curve in low suction range

初始干密度  $1.64 \text{ g/cm}^3$  的试样, 在最优含水率与最大干密度下制成, 经历 1 次干湿循环使其孔隙减小的影响, 略小于胶结物质散失等的影响, 故进气值较为接近, 脱水速率和持水性能变化不明显。随着干湿循环次数增加, 微裂隙和裂隙的影响变大, 进气值不断减小, 脱水速率变快, 持水性能下降。

## 4 结 论

(1) 干湿循环会导致土体体缩与开裂。随着干湿循环次数增加, 土体孔隙比减小, 产生体缩, 体积缩小速度不同步导致土体开裂, 裂隙会随干湿循环次数增多而发展。

(2) 干湿循环会导致土体整体孔隙减小。随着干湿循环次数增加, 土体微孔及小孔分布密度逐渐变大。 $5\text{--}30 \mu\text{m}$  的中孔及部分大孔范围, 峰值孔径逐渐减小, 孔隙分布密度逐渐增大。经历 3 次及以上的干湿循环, 在  $200 \mu\text{m}$  附近产生微裂隙。

(3) 干湿循环会使土颗粒分布更均匀。随着干湿循环次数增加, 土颗粒集聚体部分连接成为更大的集聚体, 部分破碎并填充进大孔隙, 土颗粒分布变均匀。

(4) 干湿循环会对土体的持水性能产生影响。初始干密度较小时, 经历过 1 次干湿循环进气值增大, 脱水速率减慢, 持水性能略有增强。经历 3 次及 5 次干湿循环进气值不断减小, 脱水速率加快, 持水性能持续减弱。

## 参考文献:

[1] ZHAO G T, ZOU W L, HAN Z, et al. Evolution of soil-water

and shrinkage characteristics of an expansive clay during freeze-thaw and drying-wetting cycles[J]. Cold Regions Science and Technology, 2021, 186: 103275.

- [2] DELAGE P, LEFEBVRE G. Study of the structure of a sensitive Champlain clay and of its evolution during consolidation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1984, 21(1): 21-35.
- [3] CUI Y J, LOISEAU C, DELAGE P. Microstructure changes of a confined swelling soil due to suction controlled hydration[C]// Proc of the Third Inter Conf on Unsaturated Soils, UNSAT, 2002.
- [4] 叶为民, 钱丽鑫, 陈宝, 等. 高压实高庙子膨润土的微观结构特征[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(1): 31-35. (YE Weimin, QIAN Lixin, CHEN Bao, et al. Characteristics of micro-structure of densely compacted gaomiaozi bentonite[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009, 37(1):31-35.(in Chinese))
- [5] 赵天宇, 王锦芳. 考虑密度与干湿循环影响的黄土土水特征曲线[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(6): 2445-2453. (ZHAO Tianyu, WANG Jinfang. Soil-water characteristic curve for unsaturated loess soil considering density and wetting-drying cycle effects[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2012, 43(6): 2445-2453.(in Chinese))
- [6] KONG L W, SAYEM H M, TIAN H H. Influence of drying-wetting cycles on soil-water characteristic curve of undisturbed granite residual soils and microstructure mechanism by nuclear magnetic resonance(NMR) spin-spin relaxation time ( $T_2$ ) relaxometry[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, 55(2): 208-216.
- [7] 张俊然, 许强, 孙德安. 多次干湿循环后土-水特征曲线的模拟[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 689-695. (ZHANG Junran, XU Qiang, SUN De'an. Simulation of soil-water characteristic curves during drying and wetting cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 689-695. (in Chinese))
- [8] YI F C, WANG Z, ZHOU M J. Research on the soil water characteristic curve and prediction of compacted bentonite[J]. Advanced Materials Research, 2012, 518/519/520/521/522/523: 2785-2791.
- [9] 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(S2): 13-16. (in Chinese))

(编校: 明经平)