

低应力水平下土遗址力学特性的干湿循环效应

任克彬^{1,2}, 王博¹, 李新明³, 尹松³

(1. 郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省文物建筑保护研究院, 河南 郑州 450002;

3. 中原工学院 建筑工程学院, 河南 郑州 450007)

摘要: 为分析干湿循环对土遗址力学性状的影响规律及作用机制, 以遗址粉土为研究对象, 采用自制的可分层取样试验装置开展长达15个月的干湿循环测试工作。在完成一定次数的干湿循环后, 分别取样进行低应力条件下三轴排水剪切试验, 并对部分土样进行相关微观试验。三轴排水剪切试验结果表明, 与初始土样相比, 1次干湿循环土样的应变软化特征显著增强, 但随着干湿循环次数的继续增加, 其应变软化性整体上呈减弱趋势; 同时, 黏聚力 c 、变形模量 E_0 也都呈现出1次循环后明显增大随后逐渐减小的变化规律。因此, 在土遗址浅层破坏修复工程中, 建议采用干湿循环稳定后低应力水平下的力学参数进行相关计算。结合压汞试验结果, 认为造成上述土体强度及变形参数随干湿循环次数非单调变化的主要原因是, 第1次干湿循环后土样团粒内孔隙体积减小, 而循环后期团粒内、颗粒间及颗粒内孔隙体积增大。同时, 遗址粉土力学特性的干湿循环效应主要受粉土中黏粒“三维网架”的均匀收缩和局部破坏所控制, 与黏土的干湿循环作用机制存在本质差异。研究可为土遗址预防性保护及加固提供技术依据和理论支撑。

关键词: 土力学; 土遗址; 力学特性; 干湿循环; 土柱; 孔径分布

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2019)02-0376-10

Effect of dry-wet cycles on the mechanical properties of earthen archaeological site under low stresses

REN Kebin^{1,2}, WANG Bo¹, LI Xinming³, YIN Song³

(1. School of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China; 2. Henan Provincial Architectural Heritage Protection and Research Institute, Zhengzhou, Henan 450002, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450007, China)

Abstract: In order to analyze the influence law and mechanism of dry-wet circulation on the mechanical properties of earthen archaeological site, the dry-wet circulation test was carried out by using the self-made stratified sampling test device. The test lasted as long as 15 months. The samples which were prepared for microscopic test and triaxial drainage shear test under low stress conditions were from the soil column after a certain number of dry and wet cycles. Triaxial drainage shear test results show that the strain softening characteristics are enhanced significantly when the soil experiences the first dry-wet circulation. As the number of dry-wet cycles continues to increase, the strain softening decreases gradually on the whole. The cohesion c and deformation modulus E_0 also increase significantly after one cycle, and then gradually decrease. The strength and deformation parameters of soil show the law of nonmonotonic change under the action of dry-wet circulation. It was suggested that mechanical parameters of dry-wet circulation after stabilization under low stress level should

收稿日期: 2018-08-16; **修回日期:** 2018-09-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51579226, 51509274, 51709290)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 51579226, 51509274 and 51709290)

作者简介: 任克彬(1986-), 男, 2007年毕业于信阳师范学院土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土质文物保护方面的研究工作。E-mail: renkebin1986@163.com。通讯作者: 王博(1956-), 男, 现任教授、博士生导师。E-mail: wangbo@zzu.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0988

be used for the shallow damage restoration project in earthen archaeological sites. Combined with the mercury injection test results, It was concluded that the main reason of the nonmonotonic change law is that the volume of intra-aggregate pore decreases after one cycle and then the volumes of intra-aggregate, intragranular pores and intergranular pores increase at the later stage of circulation. The dry-wet circulation effect of silt mechanical properties may be mainly controlled by the uniform shrinkage and local failure of clay "three-dimensional grid structure" in silt, which is essentially different from that of clay. The research can provide technical basis and theoretical support for the preventive protection and reinforcement of earthen archaeological site.

Key words: soil mechanics; earthen archaeological site; mechanical properties; dry-wet cycles; soil column; pore size distribution

1 引言

土遗址是以土为主要建筑材料的具有历史、文化和科学价值的古遗址^[1]。目前河南保存的新石器时代和历代王朝古城址约有 320 多座, 它们清晰地勾勒出中国古代城市的发展轮廓, 其中省级以上文物保护单位多达 101 处, 如新密古城寨、郑韩故城、苑陵故城遗址等^[2]。由于这些土遗址多为粉土夯筑且长期暴露于自然环境中, 加之粉土具有较强的水敏性, 遗址本体性能极易劣化, 容易产生裂隙、掏蚀、坍塌等病害。尤其是在降雨及农田浇灌所致土遗址根部积水、地下水水位波动及高温蒸发等环境作用下, 其力学性能的干湿循环效应明显, 主要表现在强度及变形参数的衰减^[3]。而土遗址的抗害能力与其强度及变形参数密切相关, 如抗剪强度指标是土遗址抗滑塌和坍塌能力的重要表征参数^[4]; 黏聚力值可间接反映土的抗拉强度, 是反映土遗址抗掏蚀病害能力的主要指标^[5]; 变形参数可反映土遗址整体沉降及局部非均匀沉降的差异, 是评价变形及卸荷裂隙产生与发展的重要参数^[6]。所以, 分析干湿循环作用下遗址土力学特性的衰变规律及其影响机制, 可为土遗址的预防性保护和防护加固提供理论支持, 具有重要的意义。

在土遗址修复工程中, 须首先获得本体的力学参数。鉴于土遗址保护“最低限度干预”原则, 应尽量避免在本体上取大量原状土样进行室内试验^[4]。目前, 常利用墙体散落土重塑样进行相关室内试验获得本体力学特性。但遗憾的是, 由于土遗址本体经历多次反复干湿循环作用, 直接利用重塑土样所得力学参数显然与土遗址真实状态不符且偏于危险。因此, 研究室内较真实模拟土遗址实际干湿循环过程的试验方法, 对于土遗址修复工程十分关键。

对于干湿循环作用下土的力学性能研究一直是国内外学者关注的重点, 研究者们也证实了经历

干湿循环作用后, 土的微观结构会发生调整, 力学性质也会发生不可逆的转变^[7-9]。但由于土的物理性质、制样方法、应力条件及干湿循环过程等方面的差异, 土的性能衰变规律差异较大。如崔凯等^[3, 10]研究发现, 随着干湿循环次数的增加, 重塑粉土的抗剪强度逐渐降低。而张虎元等^[11]对新疆交河故城重塑生土试样的试验却得到了与之截然相反的结论。孟庆明等^[12]研究表明, 重塑福建土楼试块的抗压强度随干湿循环次数的增加呈现先增大后减小的趋势, 研究结论也存在一定差异。所以探究遗址土力学特性的干湿循环效应时, 应考虑土遗址的水环境特点及其内部水分的迁移规律, 较真实模拟遗址土的干湿循环过程。分析发现, 现有研究成果多采用三轴或环刀试样的干湿循环过程模拟土的基质吸力循环加卸载作用, 难以真实反映土遗址的水环境特点, 且粉土在干湿循环过程中容易破坏损伤, 经历相同干湿循环工况下的平行样间可比性差, 离散性较大, 产生试验结果不准确等问题。故有必要继续探讨干湿循环过程的试验模拟方法, 分析遗址土力学性状的演化规律。

黄强兵等^[13-15]研究证实了浅层滑塌是边坡及路基破坏的重要表现形式。在低应力条件下描述土的力学特征较为合理, 所得到的剪切强度参数与实际工况更为相符。土遗址构筑物与边坡及路基构筑物在形态上具有相似角度的临空面, 赋存环境及应力状态较为相似^[16]。相比而言, 土遗址的坍塌、滑塌、掏蚀等病害也主要发展在土遗址的浅层部位, 深度范围一般不超过 3 m, 如图 1 所示。但现有土遗址的抗剪强度试验以常规应力(50~400 kPa)范围为主^[3, 17], 与土遗址病害部位的应力状态不符。并且土的抗剪强度包络线多呈非线性特征, 低应力条件下土的剪切强度明显偏低^[18]。土遗址保护工程如采用常规应力条件下的剪切强度参数将不利于工程安全, 所以需结合土遗址的实际应力状态, 研究低应力水平下遗址土的力学特性。

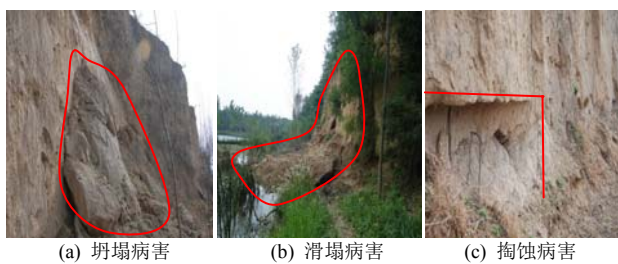


图1 土遗址的浅层病害形式

Fig.1 Characteristics of shallow diseases

另一方面,对于土质材料而言,孔隙分布的变化是引起其微观结构和力学特性发生改变的一种重要因素。如 F. J. Griffiths 等^[19-20]通过压汞(MIP)试验证实了不同类别土样固结特性与孔隙特征的关系; H. Nowamooz 等^[21-24]通过 MIP 或扫描电镜(SEM)试验探究了干湿循环后土样孔隙分布或颗粒排列特征改变对其宏观力学特性的影响。因此,对于干湿循环作用下遗址土力学特性的分析,应结合相应条件下的微观特征描述,合理诠释遗址土力学特性的衰变机制。

综上所述,本文以中原地区典型遗址粉土为研究对象,通过自制可分层取样土柱的反复吸水-烘干(45 °C)过程模拟土遗址的干湿循环过程,进而在土柱内取样制备三轴及微观试验样品,完成低应力条件下的三轴固结排水剪切试验,通过压汞及扫描电镜试验对部分样品的微观结构进行分析,探究低应力条件下遗址土力学特性的演化规律及机制。

2 试验设计及方案

2.1 土样性质

试验土样取自新密古城寨遗址,该遗址位于新密市(隶属河南省郑州市)东南 35 km 曲梁乡大樊庄村,溱水、洧水交汇处北 1.5 km 处,溱水东岸台地上,如图 2 所示。鉴于文物保护的特殊要求,收集城墙散落土,风干后过 2 mm 筛备用。其基本物性



图2 新密古城寨遗址地理位置

Fig.2 The location of earthen site in Xinmi

指标见表 1,属粉土。

2.2 土柱制备及试验方法

2.2.1 土柱制备

土柱制备装置由有机玻璃材料制成,高度为 40 cm,直径为 20 cm。为便于取样,整个装置采用 8 组高 10 cm,直径为 20 cm 的半圆形带孔组块通过螺栓拼装组成,装置底部铺设土工布,防止垫层材料洒落,装置示意图如图 3 所示。为减小干湿循环周期,在土柱装置中心增设了开孔通气管并与开孔底板相连接。装置底部(第 1 层)铺设 10 cm 厚的碎石和粗砂混合材料垫层。

利用轻型击实试验方法得到了土的最大干密度和最优含水率,分别为 $\rho_{dmax} = 1.78 \text{ g/cm}^3$ 和 $w_{opt} = 14.00\%$ 。结合古城墙夯筑营造工艺,笔者拟在最优含水率下,采用击实法制备干密度为 1.71 g/cm^3 的土柱。

土柱制备装置组装完成后,采用分层击实的方法对每层土样进行夯击,每层控制高度为 10 cm。由于上层土击实过程会对该层以下土体产生压密作用,采用试击的方式调整每层土柱的实际击实次数,并最终确定第 2, 3, 4 层土柱的实际击实次数分别为 60, 70 和 60 次。试击完成后,通过高度反算获得土柱第 2 层和第 3 层的干密度为 1.69 与 1.71 g/cm^3 ,最大误差为 1.2%。重复该过程,制备 0(未经历干湿循环), 1, 3, 5, 9, 15 次干湿循环土柱,6 组土柱干密度误差范围为 1.2%~2.0%。需要说明的是,第 4 层土柱(1.67 g/cm^3)并不参与后续三轴剪切试验。设置第 4 层土柱主要是为了增加下层(第 3 层)土柱的均匀性,同时避免第 3 层土柱顶面直接与空气接触。这样可使第 2 层和第 3 层土柱的干湿循环过程基本相同,减小试验误差。

2.2.2 土柱的干湿循环过程

由于河南省郑州市历史最高气温达 $43 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[25],所以为较真实地模拟现场气候条件,取烘干脱湿温度为 $45 \text{ }^\circ\text{C}$ 。具体试验过程为:土柱制作完成后进行脱湿,采用定制大型烘箱在 $45 \text{ }^\circ\text{C}$ 下进行烘干(见图 4),每 1 或 2 d 对土柱进行称重,并计算土柱的平均含水率,待含水率稳定后,脱湿过程结束并开始增湿过程。增湿过程中,将土柱放入水槽内。水位与第 1 层土柱顶面齐平,间隔 24 h 对水槽持续补水。与脱湿过程类似,每 1 或 2 d 对土柱进行称重,并计算土柱的平均含水率,待含水率达到稳定时,增湿过程结束。至此,完成 1 次干湿循环。试验中,为减小称重过程中反复搬运对土样的影响(土柱及模具质量约 31.7 kg),前 3 次干湿循环过程中,每天

表 1 新密古城寨遗址土样基本物理特性指标

Table 1 Physical average indices and grain size distribution of soil in Xinmi earthen site

相对密度 G_s	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 I_p	颗粒组成/%			
				细砾 > 2 mm	砂粒 2~0.075 mm	粉粒 0.075~0.005 mm	黏粒 < 0.005 mm
2.64	27.0	17.0	10.0	0.0	5.06	82.37	12.57

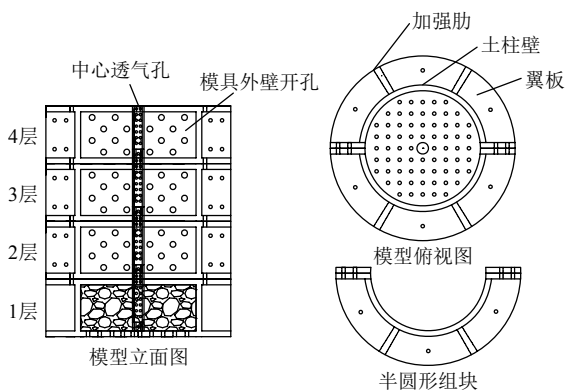


图 3 土柱制备装置图

Fig.3 Soil column preparation device



图 4 土柱烘干装置

Fig.4 Soil column drying device

进行称重, 后续循环过程中, 对土柱每 1 或 2 d 进行称重并反算含水率。

在 15 次干湿循环过程中, 土柱的含水率变化规律如图 5 所示。从图 5 可看出, 每次干湿循环过程约需 30 d, 整个干湿循环过程长达 450 d。土柱在 1~5 次干湿循环过程中, 增湿稳定含水率逐渐下降, 9 次循环后趋于稳定。说明干湿循环过程改变了土的孔隙特征, 毛细作用产生差异。

2.2.3 土柱取样

根据试验要求, 首先对增湿后土柱自上而下进行拆模处理, 然后对 2~3 层土柱开槽分块, 每层分为 5 块, 其中 4 块采用原状样切削方法制备三轴样 (试样直径 39.1 mm, 高度 80 mm), 1 块用于压汞试验, 最后将样品用保鲜膜包裹封存, 放入保湿缸内以备后续试验使用, 取样过程如图 6 所示。经测试, 相同干湿循环次数下切削三轴样含水率误差在 $\pm 0.5\%$ 以内, 干湿循环过程及幅度较为一致。

2.2.4 试验仪器与方法

三轴试验采用南京宁曦土壤仪器厂生产的 TSZ - 2 型全自动应变控制式三轴仪。首先将制备好的

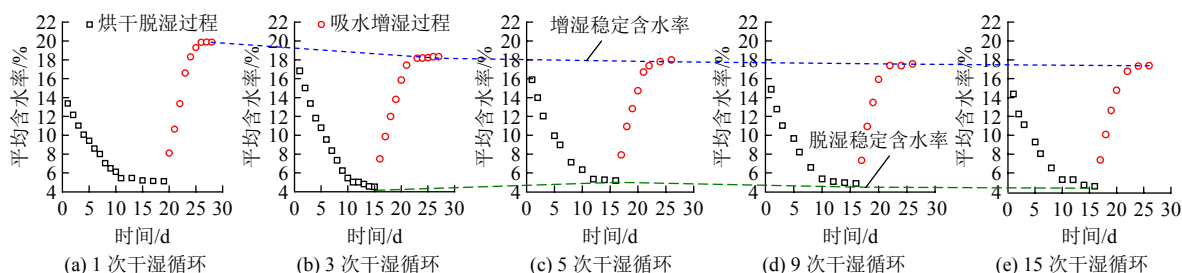


图 5 土柱干湿循环过程含水率变化

Fig.5 Change of moisture content in soil column during dry-wet cycles

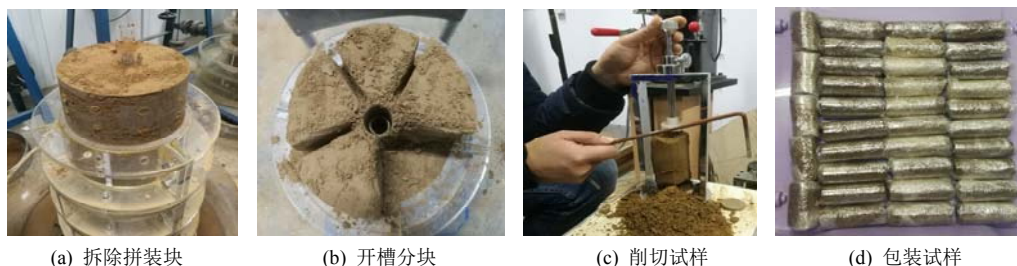


图 6 取样过程

Fig.6 Sampling process

试样进行抽真空饱和,饱和后在 10,20,30 和 40 kPa 固结压力下进行固结排水剪切试验。试样固结稳定后等变速率剪切至轴向应变 20%, 剪切速率为 0.073 mm/min。

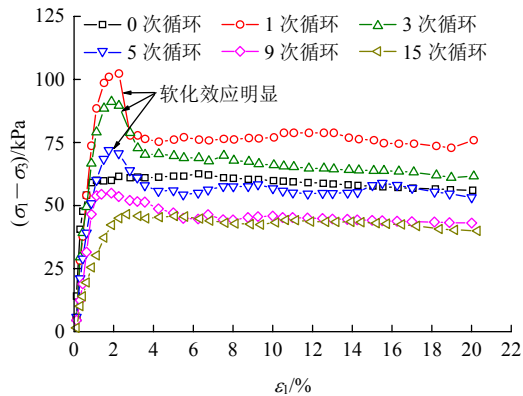
微观孔径分布试验采用美国康塔公司生产的 PoreMaster33GT 系列压汞仪,其孔径分布测定范围为 0.006 4~950 μm。

3 试验结果与分析

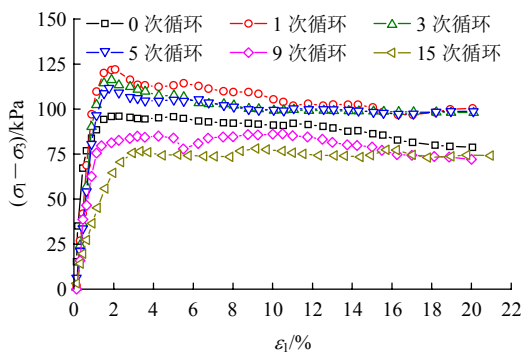
3.1 三轴试验结果分析

3.1.1 应力 - 应变关系曲线

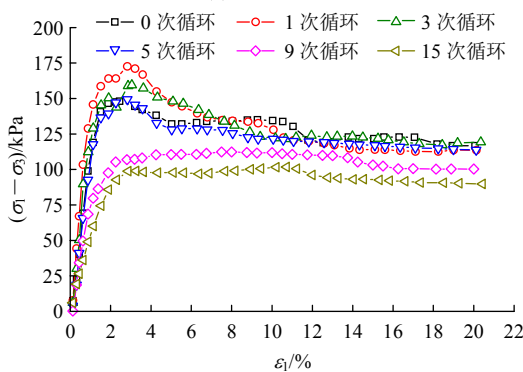
对 0~15 次干湿循环试样在 10~40 kPa 围压水平下进行剪切试验,应力 - 应变关系如图 7 所示。当存在峰值应力时,取峰值应力为试样强度;无峰值时,取 $\epsilon_1 = 20\%$ 所对应的应力值为试样强度。



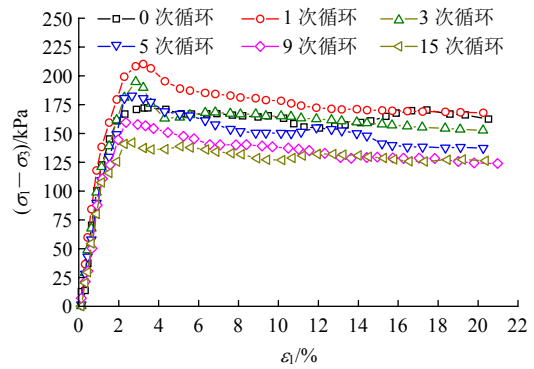
(a) $\sigma_3 = 10 \text{ kPa}$



(b) $\sigma_3 = 20 \text{ kPa}$



(c) $\sigma_3 = 30 \text{ kPa}$



(d) $\sigma_3 = 40 \text{ kPa}$

图 7 应力 - 应变关系

Fig.7 Stress-strain curves

可以看出,干湿循环前后土的应力 - 应变关系曲线形态差异明显,循环前土的应力 - 应变曲线为应变硬化型或弱应变软化型;1 次干湿循环后,应力 - 应变关系存在明显的应力峰值,软化性显著增强,随着干湿循环的继续作用,软化性逐渐减弱,9 次循环后软化特征已不明显。刘文化^[26]也得到类似结论。

另外,通过应力 - 应变曲线可发现,1 次干湿循环后土的强度明显提高,随着干湿循环次数的增加逐渐降低,9 次循环后强度低于未经历干湿循环土样。干湿循环作用使得土体经历了强度先增大后逐渐减小至稳定的过程,但稳定值低于初始土样。表明干湿循环过程中土颗粒存在不断向稳定趋势调整的过程,土的微观结构发生改变,抵抗外部荷载的能力也产生了一定差异,水环境的反复作用最终使土遗址的强度劣化,工程设计与评价时应予以重视。

3.1.2 干湿循环作用下土的变形特性分析

土的应力 - 应变关系中,当 $\epsilon_1 < 1.0\% \sim 1.5\%$ 时,应力随应变近乎呈线性增长,所以对 $\epsilon_1 < 1.0\%$ 时的应力 - 应变关系进行线性拟合,取其斜率(变形模量 E_0)作为土体变形特性的分析参数。

图 8 给出了变形模量 E_0 与干湿循环次数的关系。可发现,各围压下 E_0 随着干湿循环次数的增加呈现先增大后逐渐减小的变化趋势。总体而言,1 次干湿循环后 E_0 增幅较为明显,循环次数为 3~5 次时大幅衰减,且低于初始值,9 次循环后降幅减弱,模量值趋于稳定。围压为 10~40 kPa 时,干湿循环过程中 E_0 的最大与最小值之差分别为 4.4, 7.7, 9.4 和 7.4 MPa。因此,土遗址保护工程中,应注意变形特性的干湿循环效应,大范围补筑时应考虑材料的变形协调性,防止变形裂缝的产生与发展。

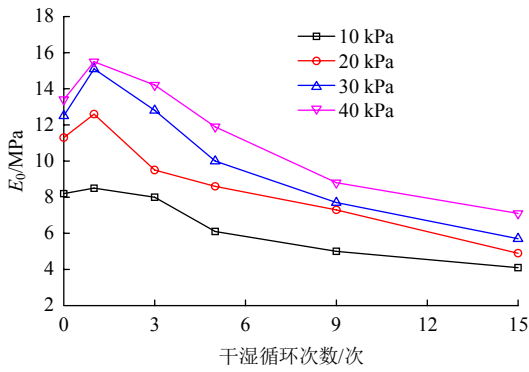


图 8 \$E_0\$ 与干湿循环次数关系

Fig.8 The relationship between \$E_0\$ and the number of dry-wet cycles

3.1.3 干湿循环作用下土的强度参数分析

不同干湿循环次数下土柱试样的强度指标 \$c, \phi\$ 值如图 9 所示。

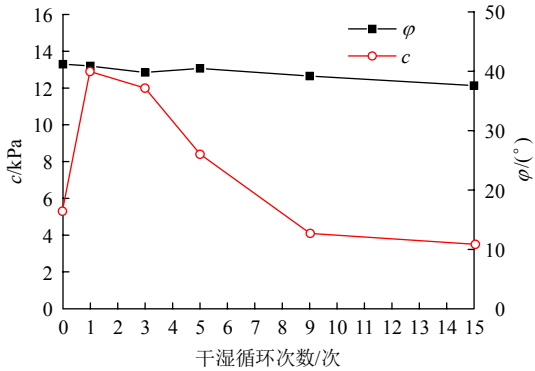


图 9 试样强度参数与干湿循环次数的关系

Fig.9 The relationship between strength parameters and the number of dry-wet cycles

可以看出，土柱经历干湿循环后，试样的剪切强度参数 \$c\$ 值变化明显。具体表现为经历 1 次循环后 \$c\$ 值增幅明显，然后逐渐下降，9 次循环后趋于稳定，稳定值低于未经历干湿循环土样；干湿循环过程中内摩擦角基本保持不变。说明干湿循环作用主要影响粉土颗粒间的联结状态，改变土颗粒间的接触形式，对于土颗粒本身的形状特性和整体级配特征影响较小。

在低应力条件下所得到的饱和粉土 \$c\$ 值明显低于张涛等^[10]对豫东粉土在常规应力条件(100~400 kPa)下所得黏聚力值。这说明粉土强度特性存在一定的非线性，常规应力条件下所得到的粉土强度参数不利于工程安全。

需要注意的是，刘文化等^[26-27]研究发现土样在 1~3 次干湿循环后强度指标便趋于稳定，而本次试验所得土的黏聚力 \$c\$ 值在 9 次循环后才趋于稳定。这主要是因为本文采用 45 °C 烘干和毛细水自由上

升的增湿方法对土柱进行干湿循环，1 次循环周期相对较长(见图 5)，约 30 d。干燥和增湿过程土颗粒的基质吸力加卸载周期较长，需在较大的干湿循环次数下才得以稳定。所以研究干湿循环作用下土的力学性状应结合区域环境，真实反映土的劣化效应。

鉴于土遗址保护工程中“最低限度干预”原则，本体力学参数如何准确获得一直是文物保护现场勘察的难题。土柱干湿循环及低应力剪切条件可较真实模拟土遗址现场毛细水作用和浅部应力状态，因此建议采用土柱干湿循环稳定后低应力水平下的强度和变形参数用于土遗址浅层病害修复加固工程。

3.2 干湿循环作用下土的孔隙分布特性

3.2.1 压汞试验原理

压汞试验是一种测定材料孔隙尺度及其分布较为准确有效的方法^[20]。其测定的主要依据是非浸润性液体在没有压力作用时不会流入固体孔隙，将汞在一定压力下压入多孔体中，达到平衡时，作用在汞接触环截面法线方向的压力与同一截面上张力在该面法线上的分量等值反向^[21]。假设孔隙为圆柱形，给定毛细孔的半径 \$r\$ 和长度 \$l\$，单位体积内压入汞的表面积 \$A\$ 根据 Washburn 公式计算：

$$A = 2\pi r l \tag{1}$$

壁对汞的压力 \$W_1\$：

$$W_1 = -2\pi r l \sigma \cos \theta \tag{2}$$

汞进入毛细孔后，外界对汞的压力 \$W_2\$：

$$W_2 = P\pi r^2 l \tag{3}$$

由 \$W_1 = W_2\$，则

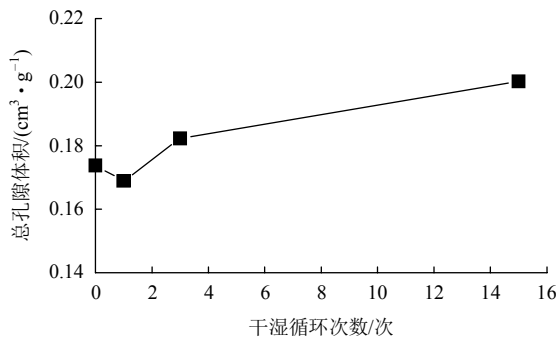
$$Pr = -2\sigma \cos \theta \tag{4}$$

式(1)~(4)中：\$P\$ 为施加的压力；\$\sigma\$ 为导入液体的表面张力，取 480.00 dyn/cm；\$\theta\$ 为导入液体与固体材料的接触角，取 140°；从压汞试验得到压力与汞压入的体积关系，通过压力 \$P\$ 找到对应的当量直径 \$d\$，转换得到土中孔隙分布特征参数。

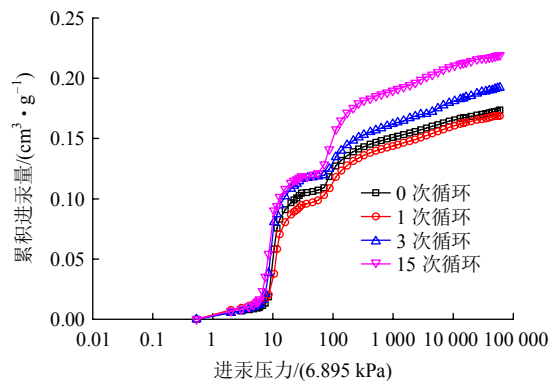
3.2.2 孔隙分布特征分析

采用压汞试验对 0, 1, 3 及 15 次干湿循环试样进行分析。图 10 给出了干湿循环作用下土柱试样的进汞体积与压力关系曲线。

可见，干湿循环作用下试样进汞曲线形态相似，累积进汞量随着进汞压力的增加表现为缓慢增长 - 急剧上升 - 缓慢增长 - 急剧上升 - 缓慢增长的递增关系。有所不同的是，相同进汞压力下 1 次循环试样累积进汞量较未经历干湿循环试样略低，而 3 和 15 次循环试样累积进汞量高于未经历干湿循环试



(a) 不同干湿循环次数下总孔隙体积



(b) 累积进汞量与进汞压力

图 10 进汞体积与压力关系曲线

Fig.10 Relations between volume of intrusion and pressure of mercury intrusion

样并呈逐渐增加趋势。试样总孔隙体积呈现出 1 次干湿循环作用下降低(降幅约 2.8%), 随后又逐渐增加的趋势。该趋势与图 9 中土的黏聚力 c 值变化规律相对应, 这表明遗址粉土的黏聚力与土的密实度直接相关, 1 次干湿循环后, 土的孔隙比降低, 颗粒间距缩小, 土颗粒间接触点的化合键能增加, c 值增大; 随着干湿循环的继续作用, 孔隙结构继续调整, 孔隙比增大, c 值逐渐减小。

图 11 为干湿循环作用下土遗址试样的孔径分布密度测试结果, 由图可知, 土样的孔径分布密度曲线呈双峰结构特征, 主要孔径分布在 $0.4 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $5 \sim 50 \mu\text{m}$ 范围内。这也是干湿循环作用的主要影响孔径范围。

根据试验所得孔隙分布特征, 并参考 D. L. Shear 等^[28]的孔隙划分标准, 将土的孔隙划分为 4 个类别, 分别为团粒间孔隙($>70 \mu\text{m}$)、团粒内孔隙($70 \sim 5 \mu\text{m}$)、颗粒间孔隙($5 \sim 0.4 \mu\text{m}$)、颗粒内孔隙($<0.4 \mu\text{m}$)。由图 11 可看出, 对于 $0.4 \sim 5 \mu\text{m}$ 范围内孔径, 1 次干湿循环后孔径向减小方向移动, 峰值减小, 分布面积略微增大, 当循环次数达到 15 次时, 曲线峰值转向孔径增大方向移动, 峰值及分布面积增大。而图 11 中, $5 \sim 70 \mu\text{m}$ 范围内孔径同

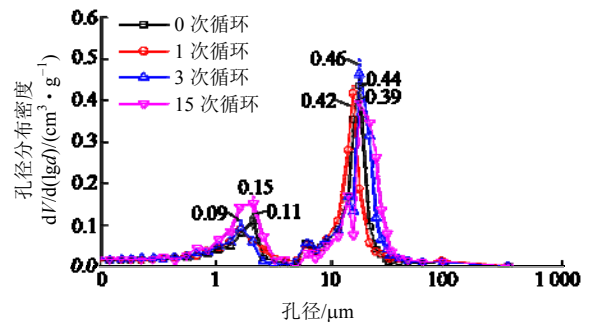


图 11 土的孔径分布曲线

Fig.11 The curves of pore-size distribution

样在 1 次干湿循环后向孔径减小方向移动, 峰值及分布面积减小, 随后曲线向孔径增大方向移动, 分布面积增大。

图 12 给出了干湿循环作用后土的各类孔隙体积。可发现干湿循环作用下土的孔隙体积变化主要体现在团粒内孔隙、颗粒间孔隙及颗粒内孔隙体积的增减, 团粒间孔隙体积干湿循环效应不明显。具体表现为, 团粒内孔隙体积在 1 次干湿循环后有所降低, 随后逐渐增大至稳定; 颗粒间孔隙体积在 0~3 次干湿循环过程中变化不明显, 在 15 次循环后显著增大; 颗粒内孔隙体积在 3 次循环后有所增大并保持稳定。结合图 10 中总孔隙体积的变化规律可知, 1 次干湿循环后土的总孔隙体积降低主要是团粒内孔隙体积减小所引起, 而后续干湿循环过程中孔隙体积逐渐增大主要由团粒内孔隙、颗粒间孔隙及颗粒内孔隙体积的增大所致。

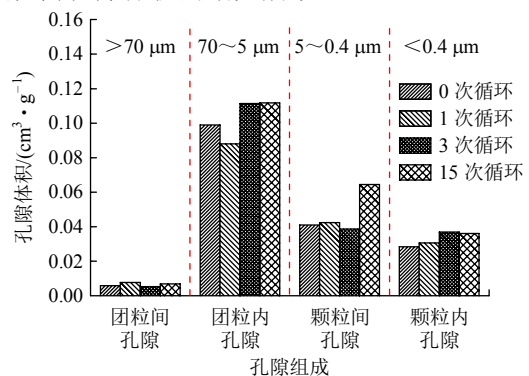


图 12 干湿循环作用下土的各类孔隙体积

Fig.12 The volumes of all type pore of soil under dry-wet cycles

总体而言, 干湿循环作用最终将导致土中各类孔隙体积的发展, 破坏遗址粉土原有的孔隙结构特征和毛细管网, 降低土的毛细作用, 这一点可以从图 5 中得到很好的验证。此外, 结合图 8 中土的变形模量变化规律可知, 1 次干湿循环后 E_0 出现明显增幅主要由两方面原因造成。首先是土的总孔隙体

积减小，土体干密度增大，土的整体抗压缩性能增强；其次是初始剪切阶段主要为土的压缩阶段，此时平均应力水平较低，较大孔隙体积首先被压密，团粒内孔隙体积的降低增加了土体在该应力阶段的抗变形能力。同理，后期随着干湿循环的继续作用，总孔隙及各类孔隙体积逐渐增大，土的压缩性逐渐增强，抗变形能力减弱。

4 遗址粉土的干湿循环作用机制分析

文中干湿循环作用下粉土力学性状的变化规律与程允等^[29-30]研究所得黏土的干湿循环效应差异较为明显。分析认为，孔隙的调整过程本质上是由于粉土存在特殊的级配特征，粉粒悬浮于黏粒所形成的“三维网架”中，干湿循环作用下“三维网架”胀缩作用明显，该作用会对粉土颗粒产生“牵扯或推拉效应”，造成粉粒的不断移动调整，最终改变其孔隙结构特征。与黏土的干湿循环作用机制存在本质差异^[21]。

图 13 为干湿循环作用下粉土颗粒的调整过程示意图，可以看出，粉土中颗粒的调整过程主要分为 2 个阶段。

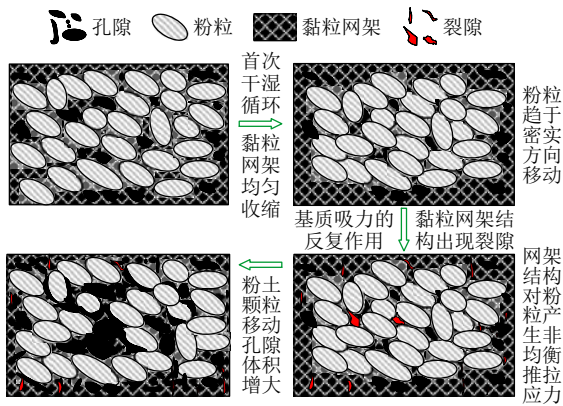


图 13 干湿循环作用下土颗粒的调整

Fig.13 Adjustment of particles under action of dry-wet cycles

第一阶段为土中粉粒趋于密实的定向移动过程，该过程与压汞试验结果中总孔隙含量减少所对应(见图 10)。主要是由于土柱制备过程中，粉土颗粒易于拌和，土柱击实后粉粒及黏粒分布相对均匀，粉粒均匀的悬浮于黏粒“三维网架”结构中，而土柱在首次烘干过程中，由于烘干温度较低(45℃)，烘干时间较长(19 d)，见图 5，致使黏粒“网架”产生相对均匀的收缩变形，迫使粉粒趋于密实方向移动调整，粉粒间距减小。结合图 12 可知，该阶段颗粒的调整导致部分团粒内孔隙体积减小。为了验证上述分析的合理性，对相应干湿循环次数下土样进

行扫描电镜试验，如图 14 所示。可以看出 1 次循环后土样颗粒排列相对紧密，黏粒“网架”致密，“包裹”性明显增强，致使粉粒紧紧的嵌固于黏粒网架结构中，孔隙含量显著降低。

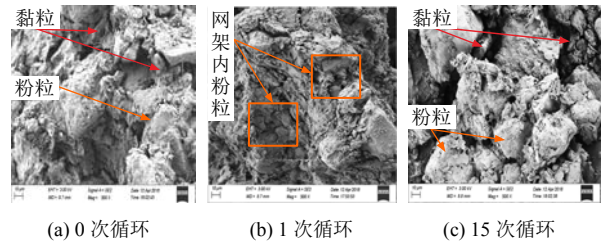


图 14 干湿循环作用下土的微观结构

Fig.14 Microstructure of soil under action of dry-wet cycles

第二阶段为土颗粒在基质吸力的反复加卸载作用下，“网架”微裂隙或孔隙发展，产生应力集中效应，进而不平衡的“推拉应力”致使粉粒继续移动调整，颗粒间距增大。图 10 中粉土总孔隙含量在 1 次干湿循环后逐渐增大也是该过程中粉粒的调整所致。分析认为，该过程中趋于密实的黏粒网架结构在后续的干湿循环作用下，基质吸力的加卸载使得黏粒“网架”反复胀缩，逐渐产生微裂隙或微孔，“黏粒网架”遭到破坏，出现了应力集中效应。此时黏粒网架对粉粒的作用以非均衡应力为主，由于粉粒间搭接薄弱，该“推拉应力”致使粉粒向应力较大方向移动，整体孔隙体积增加。在图 14 中亦可看出，随着循环次数的增加，试样中黏粒网架结构已经破坏，土颗粒间距明显增大，颗粒排列错综复杂，能够对图 13 中土颗粒的调整过程进行验证。

5 结论及建议

(1) 土柱试样应力 - 应变关系在 1 次干湿循环后软化性明显增强，随后逐渐减弱，9 次循环后软化特征不明显。土体强度呈现先增大后逐渐减小，最后趋于稳定的变化规律，稳定值低于初始土样。

(2) 干湿循环过程中土的剪切强度参数 c 、变形模量 E_0 先增大后逐渐减小并趋于稳定。土遗址保护工程中，针对浅层病害建议采用干湿循环稳定后低应力状态下的强度及变形参数。

(3) 土的团粒内孔隙体积在 1 次循环后有所降低，随后逐渐增大；15 次干湿循环后颗粒间孔隙体积大幅增加；总孔隙体积呈现先减小后逐渐增大的趋势。孔径分布的差异能够合理诠释其力学特性的变化规律。

(4) 遗址粉土的干湿循环作用机制与黏土存在本质差异, 主要受黏粒“三维网架”所控制。1次干湿循环后“网架”的均匀收缩致使粉粒趋于密实; 后续循环中, “网架”结构破坏, 不平衡的“推拉应力”致使粉粒间距增大, 孔隙体积增加。

(5) 本研究采用的土柱干湿循环过程能较好地模拟土遗址的毛细水作用, 对于中原地区典型粉土遗址的根部掏蚀、浅层垮塌等病害的预防性保护及修复工程具有一定的参考价值。

参考文献(References):

- [1] 孙满利. 土遗址保护研究现状与进展[J]. 文物保护与考古科学, 2007, 19(4): 64 - 70.(SUN Manli. Research status and development of the conservation of earthen sites[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2007, 19(4): 64 - 70.(in Chinese))
- [2] 陈爱兰. 河南省文物志[M]. 北京: 文物出版社, 2009: 123 - 177.(CHEN Ailan. Henan provincial cultural relics[M]. Beijing: Cultural Relics Press, 2009: 123 - 177.(in Chinese))
- [3] 崔凯, 谌文武, 匡静, 等. 干湿交替与盐渍双重作用干旱和半干旱地区土遗址劣化效应[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(6): 361 - 367.(CUI Kai, CHEN Wenwu, KUANG Jing, et al. Effect of deterioration of earthen ruin with joint function of salinized and alternating wet and dry in arid and semi-arid regions[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(6): 361 - 367.(in Chinese))
- [4] 张景科, 谌文武, 和法国, 等. 高陡濒倾土遗址边坡加固后的变形行为[J]. 文物保护与考古科学, 2012, 24(1): 56 - 61.(ZHANG Jingke, CHEN Wenwu, HE Faguo, et al. Deformation of crumbling high steep earthen slope of cultural heritage after conservation[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2012, 24(1): 56 - 61.(in Chinese))
- [5] IRAVANI A, BILSEL H. Tensile strength properties of sand-bentonite mixtures enhanced with cement[C]// Procedia Engineering. [S. l.]: [s. n.], 2016: 111 - 118.
- [6] 孙满利, 王旭东, 李最雄, 等. 交河故城的裂隙特征研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(4): 612 - 617.(SUN Manli, WANG Xudong, LI Zuixiong, et al. Study on cranny characteristics of the ruins of Jiaohe[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(4): 612 - 617.(in Chinese))
- [7] ALLAM M M, SRIDHARAN A. Effect of wetting and drying on shear strength[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1981, 107(4): 421 - 438.
- [8] GUAN G S, RAHARDJO H, CHOON L E. Shear strength equations for unsaturated soil under drying and wetting[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(4): 594 - 606.
- [9] 孙文静, 韦广, 崔玉军, 等. 粉土干化过程中微观结构的演变[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(10): 2544 - 2550.(SUN Wenjing, WEI Guang, CUI Yujun, et al. Microstructure evolution in silty soil during drying[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(10): 2544 - 2550.(in Chinese))
- [10] 张涛, 乐金朝, 张俊然. 干湿循环对豫东粉土路基强度的影响及其预测[J]. 公路, 2016, (4): 200 - 206.(ZHANG Tao, YUE Jinchao, ZHANG Junran. Influence of dry and wet cycle on roadbed strength and its prediction[J]. Highway, 2016, (4): 200 - 206.(in Chinese))
- [11] 张虎元, 严耿升, 赵天宇, 等. 土建筑遗址干湿耐久性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 347 - 355.(ZHANG Huyuan, YAN Gengsheng, ZHAO Tianyu, et al. Durability of earthen architecture ruins under cyclic wetting and drying[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 347 - 355.(in Chinese))
- [12] 孟庆明, 彭兴黔, 梁兰娣. 福建土楼夯土试块在干湿循环的抗压强度试验研究[J]. 青岛理工大学学报, 2015, 36(1): 41 - 45.(MENG Qingming, PENG Xingqian, LIANG Landi. Experimental study of Fujian tulou rammed earth blocks on compressive strength in drying and wetting cycles[J]. Journal of Qingdao Technological University, 2015, 36(1): 41 - 45.(in Chinese))
- [13] 黄强兵, 刘悦, 彭建兵. 黄土路堑边坡变形破坏机制的三轴试验研究[J]. 工程地质学报, 2007, 15(6): 806 - 811.(HUANG Qiangbing, LIU Yue, PENG Jianbing. Triaxial test study on the deformation and failure mechanism of loess cut slope[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(6): 806 - 811.(in Chinese))
- [14] 肖杰, 杨和平, 李晗峰, 等. 膨胀土边坡浅层破坏稳定性分析[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(2): 21 - 27.(XIAO Jie, YANG Heping, LI Hanfeng, et al. Shear strength test of Nanning expansive soil with various dry densities and low stresses[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 14(2): 21 - 27.(in Chinese))
- [15] 连继峰, 罗强, 蒋良滩, 等. 雨水浸润软化下路基土质边坡浅层稳定分析[J]. 铁道学报, 2017, 39(4): 101 - 108.(LIAN Jifeng, LUO Qiang, JIANG Liangwei, et al. Stability analysis of shallow soil slope under effect of rainfall infiltration[J]. Journal of The China Railway Society, 2017, 39(4): 101 - 108.(in Chinese))
- [16] 陈毅, 张虎元, 杨龙. 遗址土劣化进程中微观结构变化的类比研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(11): 1 - 9.(CHEN Yi, ZHANG Huyuan, YANG Long. Analogy study on evolution of microstructure of earthen

- monument during natural weathering process[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(11): 1 - 9.(in Chinese))
- [17] 胡再强, 于 淼, 李宏儒, 等. 人工制备遗址土力学特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(9): 1 914 - 1 923.(HU Zaiqiang, YU Miao, LI Hongru, et al. Experimental study on characteristics of artificial soil ruins[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(9): 1 914 - 1 923.(in Chinese))
- [18] MAKSIMOVIC M. Nonlinear failure envelope for soils[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1989, 115(4): 581 - 586.
- [19] GRIFFITHS F J, JOSHI R C. Changes in pore size distribution due to consolidation of clays[J]. *Geotechnique*, 1989, 39: 159 - 167.
- [20] 张先伟, 孔令伟, 郭爱国, 等. 基于 SEM 和 MIP 试验结构性黏土压缩过程中微观孔隙的变化规律[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(2): 406 - 412.(ZHANG Xianwei, KONG Lingwei, GUO Aiguo, et al. Evolution of microscopic pore of structured clay in compression process based on SEM and MIP test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(2): 406 - 412.(in Chinese))
- [21] NOWAMOOZ H, JAHANGIR E, MASROURI F, et al. Effective stress in swelling soils during wetting drying cycles[J]. *Engineering Geology*, 2016, 210: 33 - 44.
- [22] KAY B D, DEXTER A R. The influence of dispersible clay and wetting/drying cycles on the tensile strength of a red-brown earth[J]. *Soil Research*, 1992, 30(3): 297 - 310.
- [23] ALDAOOD A, BOUASKER M, AL-MUKHTAR M. Impact of wetting-drying cycles on the microstructure and mechanical properties of lime-stabilized gypseous soils[J]. *Engineering Geology*, 2014, 174(1): 11 - 21.
- [24] 尹 松, 孔令伟, 张先伟. 炎热多雨气候影响下残积土小应变刚度特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(4): 743 - 751.(YIN Song, KONG Lingwei, ZHANG Xianwei. Experimental study on stiffness characteristics of residual soil at small strain under hot and rainy climate[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(4): 743 - 751.(in Chinese))
- [25] 吴燕锋, 巴特尔·巴克, 阿斯姑力·托合提, 等. 1958~2012 年郑州市极端气温和极端气温事件年际变化特征[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(23): 259 - 265.(WU Yanfeng, BATER·BAKER, ASIGULI·TUOHE TI, et al. The variation of extreme temperature and extreme weather events from 1958 to 2012 in Zhengzhou[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(23): 259 - 265.(in Chinese))
- [26] 刘文化. 干湿循环对非饱和土力学特性影响及非饱和土本构关系探讨[博士学位论文][D]. 大连: 大连理工大学, 2015.(LIU Wenhua. Effect of drying/wetting on the mechanical behaviors of unsaturated soils and study on the constitutive relationship of unsaturated soils[Ph. D. Thesis][D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.(in Chinese))
- [27] 江强强, 刘路路, 焦玉勇, 等. 干湿循环下滑带土强度特性与微观结构[J]. *岩土力学*, 2019, 待刊.(JIANG Qiangqiang, LIU Lulu, JIAO Yuyong, et al. Strength properties and microstructure characteristics of slip zone soil under wetting-drying cycles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, (to be Pressed).(in Chinese))
- [28] SHEAR D L, OLSEN H W, NELSON K R. Effects of desiccation on the hydraulic conductivity versus void ratio relationship for a natural clay[R]. Washington D C: National Academy Press, 1993: 1 365 - 1 370.
- [29] 程 允, 韦昌富, 牛 庚. 干湿循环作用对岩溶区红黏土剪切强度的影响[J]. *岩土力学*, 2017, 38(增 2): 191 - 196.(CHENG Yun, WEI Chanfu, NIU Geng. Effect of wetting and drying cycles on shear strength of karst red clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(Supp.2): 191 - 196.(in Chinese))
- [30] 万 勇, 薛 强, 吴 彦, 等. 干湿循环作用下压实黏土力学特性与微观机制研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(10): 2 815 - 2 824.(WAN Yong, XUE Qiang, WU Yan, et al. Mechanical properties and micromechanisms of compacted clay during drying-wetting cycles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(10): 2 815 - 2 824.(in Chinese))