文章编号:1674-2974(2024)01-0159-11 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024015

干湿循环下花岗岩残积土胶结物溶蚀-微结构演化规律与力学行为

康馨[1,2,3],赵士成[1,2,3†],刘鹏[1,2,3]
[1. 湖南大学 地下空间先进技术研究中心,湖南 长沙,410082;
2. 建筑安全与节能教育部重点实验室(湖南大学),湖南 长沙,410082;
3. 湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙,410082]

摘 要:花岗岩残积土中的游离氧化铁粒间胶结作用使其具有高结构性和水敏性.因此,在干湿循环过程中,粒间胶结氧化物被溶蚀,残积土表现出结构崩解重组和复杂的剪切变形特性.为进一步研究干湿循环过程中花岗岩残积土中游离氧化铁溶蚀造成的土体组构变化及其对力学性能弱化的影响,进行一系列的宏微观试验以揭示不同干湿循环次数(0、1、2、4)下残积土的复杂力学特性.研究结果表明,随着干湿循环次数的增加,花岗岩残积土的应力-应变关系将由弱应变硬化型逐渐转变为应变软化状态.微观分析表明游离氧化铁会促使黏土颗粒胶结形成团聚体,随着干湿循环的进行其含量逐渐降低最终趋于稳定.此外,原状残积土粒度分布(PSD)曲线呈现明显的双峰,然后在干湿循环或去除氧化铁后转变为单峰曲线.反复干湿循环会削弱残积土的胶结结构特性,进而导致土体出现明显的软化特征.在剪切过程中,残积土首先表现出剪切收缩特性,随后出现明显的扩张趋势.随着干湿循环次数增加,残积土的有效黏聚力逐渐减小,但有效内摩擦角呈现逐渐增加的趋势.干湿循环过程中花岗岩残积土复杂的力学性能特点是不可逆的体积收缩和胶粒含量的变化以及微裂缝发展之间的耦合效应.

关键词:花岗岩残积土;干湿循环;结构特性;游离氧化铁;剪切行为
中图分类号:TU411 **文献标志码**:A

Cement-microstructure Evolution Law and Mechanical Behavior of Granite Residual Soils under Multiple Drying-wetting Cycles

KANG Xin[1,2,3],ZHAO Shicheng[1,2,3†],LIU Peng[1,2,3]
[1. Research Center for Advanced Underground Space Technologies of Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of Ministry of Education (Hunan University), Changsha 410082, China;
3. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China]

Abstract: Due to the intergranular cementation of free iron oxides (FIOs), granite residual soils (GRS) are highly structural and water-sensitive. Therefore GRS exhibits structural disintegration and reorganization and

* **收稿日期**:2023-02-10
基金项目:国家自然科学基金重点项目(52090082),Major Program of National Natural Science Foundation of China(52090082);国家自然科学基金资助项目(51938005,51808207),National Natural Science Foundation of China(51938005,51808207)
作者简介:康馨(1971—),男,陕西榆林人,湖南大学教授,博士生导师
† 通信联系人,E-mail:zxxsc314@hnu.edu.cn

complex shear deformation properties when subjected to dissolution of the intergranular cemented oxides under repeated drying and wetting (D-W) cycles. In order to further investigate the structural changes caused by the dissolution of the cement FIOs under D-W cycles and its effect on the weakness in mechanical properties of GRS, a series of macroscopic tests were carried out to reveal the complex mechanical behaviors of GRS under different numbers of D-W cycles (0, 1, 2, 4). The experimental results show that the stress-strain relationship of GRS gradually transforms from a weak strain-hardening type into a strain-softened state with the increase in the number of D-W cycles. The microscopic analysis indicates that the FIOs lead to the cementation of soil particles into soil aggregates. However, the content of FIOs shows a decreasing trend but finally tends to be a stable value after the D-W cycles. In addition, the particle size distribution (PSD) curve exhibits an evident bimodal peak, then changes to a single peak curve after the D-W cycles or the removal of FIOs. The repeated D-W cycles weaken the cementation structural properties of the GRS, resulting in the obvious softening characteristics of the soil. During the shear process, GRS first displays shear shrinkage properties, followed by the trend of dilatancy. With an increasing number of D-W cycles, the effective cohesion of the GRS gradually decreases, but the effective internal friction angle shows a trend of increase. The complicated mechanical properties of GRS are characterized by coupling effects among the irreversible volume shrinkage, the variation of collodion content, and the development of microcracks.

Key words: granite residual soil; drying-wetting cycles; structure property; free iron oxides; shear behaviors

花岗岩残积土是母岩在温暖潮湿的环境下经过一系列的物理化学风化作用而形成的覆盖于母岩之上的残积土,其仍残存有母岩的结构和构造特征[1].近年来,随着我国东南沿海地区重大基础设施项目的快速发展,残积土的特殊工程特性和相关工程问题引起人们的广泛关注.在炎热多雨的气候下,浅层花岗岩残积土不可避免地要经历季节性的干燥和湿润过程,伴随着孔隙液在土体内部结构中入渗和析出,残积土内部胶结物质也会不断流失,这显著改变了土的微观结构和水力学行为[2].研究表明,土壤水分的变化对土体性能起着重要作用[3].安然等[4]通过核磁共振成像技术研究多次干湿循环后残积土中孔隙水信号强度的变化情况,发现多次干湿循环增强保水能力并改善土体的孔隙间连接.刘越等[5]研究干湿循环下残积土的裂隙演化规律,发现干湿循环作用会引起残积土的裂隙扩展,裂隙深度与强度衰减有确定的量化关系.在干湿循环过程中,土体的微观结构(织物/结构)发生明显变化,同时伴随着体积变形,这强烈影响土体剪切强度和导水率[6].万勇等[7]通过试验研究干湿循环长期作用下土体抗剪强度的变化规律.一些研究者也报道了在多次干湿循环下土的抗剪强度特性是不同的[8-9].这种差异在第一次干湿循环中更明显,在随后的干湿循环中逐渐减弱.然而,由于残积土的特殊胶结结构,其对气候的季节性变化较为敏感,花岗岩残积土在多次干湿循环过程中水力学行为和微结构变化规律复杂,尚需深入研究.

花岗岩残积土的特殊工程地质性质是与其物质成分和结构密切相关的.花岗岩残积土的黏土矿物组成以高岭石为主,与一般黏性土不同的是残积土中含有大量游离氧化铁,其含量、形态、性质对残积土的工程地质特性具有重大影响.胡国成等[10]指出作为胶结物质之一,氧化铁的形态及其含量对土团聚体的形成起着重要的作用.游离氧化铁及其水合物可以将黏土颗粒结合在一起,形成团聚体,这大大改变了其物理化学性质,如团聚体的稳定性和分散性[11].王继庄[12]研究表明,红黏土的高强度主要是游离氧化铁所形成的铁质“结构联结”的结果.氧化铁胶体和黏土矿物之间的交互作用是通过改变土颗粒间的联结状态及粒间力来控制微观结构形态,进而影响土体的持水能力和剪切行为[13-14].马琳等[15]指出土中游离氧化铁含量的多少以及其存在形态的差异都将对土的工程性质产生很大影响.Tang等[16]观察到在没有晶间胶结作用的情况下,残积土的抗拉能力急剧下降.另外,环境物理化学因素的变化会导致游离氧化铁的破坏、变性或进一步的富集,从而使土的物理力学性质发生相应的变化.然而,现有的研究主要集中在对游离氧化铁引起的物理力学性能变

化的定性描述上,缺乏关于氧化铁含量变化影响残积土胶结结构进而改变力学行为的深入研究.

干湿循环影响膨胀土或压实黏土的体积变化和力学行为已有广泛研究[17-18],但花岗岩残积土作为特殊结构性土在多次干湿循环下的水力学性能还远未被理解.且以往研究未分析干湿循环过程中游离氧化铁的含量变化对残积土力学行为的影响.土体结构的宏观变形现象都是土体微观结构改变的结果[19].以前的微观研究多集中在干湿循环过程中孔隙大小分布和表面形态的变化[20],很少对微粒尺寸大小及分布的变化进行系统的研究.本文通过室内干湿循环模拟试验,并利用三轴固结不排水剪切试验研究原状结构性花岗岩残积土在干湿循环过程中的剪切行为,确定并分析抗剪强度指标的变化.用DCB方法检测不同干湿循环次数下残积土中的游离氧化铁含量.同时,通过扫描电子显微镜(SEM)和动态光散射(DLS)试验研究土体微观结构的演变,进一步了解残积土的水力学行为.

1　材料和样品制备

1.1　试验材料

本研究中使用的花岗岩残积土取自深圳市南山区.完整的样品是从一个8 m深的基坑中采集的,用手工挖坑的方法采集长30 cm的样品.残积土的原位含水率约为28.5%,干密度为1.47 g/cm^3,其详细物理特性和化学构成见表1.根据XRD衍射试验发现,该土体除了含有大量石英颗粒外,母岩的矿物成分基本风化为高岭石,另含有少量的赤铁矿,其中石英含量为51.3%,高岭石含量为38%,赤铁矿含量为8.7%.

表1　花岗岩残积土物理特性和矿物成分

Tab.1　Soil properties and mineral compositions of GRS

土体相对密度	液限/%	塑限/%	塑性指数	最优含水率/%	最大干密度/(g·cm^{-3})	颗粒尺寸分布/%			矿物成分/%			
						砂砾(0.075~2 mm)	粉粒(0.005~0.075 mm)	黏粒(<0.005 mm)	石英	高岭石	赤铁矿	其他
2.69	39.4	25.3	14.1	24.3	1.54	49	42.2	8.8	51.3	38	8.7	2

1.2　样品制备

使用三轴取样装置来获取高度为100 mm、直径为50 mm的花岗岩残积土原状样.由于原位残积土的硬度较高,首先在所需的分层方向上切割比目标尺寸稍大的土柱.然后将取样器缓慢压入样品中,直至达到所需的取样高度,将样品底部土体与取样器中的残积土样品分离.将残积土试样从三轴取样器中推出,放入三轴饱和器中,然后用钢丝刀切断试样两端多余土体并刮平表面.样品制备完后,先使用真空泵将土样用蒸馏水浸泡饱和,随后将饱和后土样放置在恒定温度(45 ℃)和湿度(85%)下的恒温恒湿试验箱中进行干燥[21],质量变化<0.02 g/h表明干燥阶段结束[22].然后在真空泵中对样品进行再饱和.在此过程中,土样经历了一个完整的干燥-润湿循环,分别记录干燥和润湿条件下样品的质量和体积.在不同的位置平行测量每个试样的高度和直径三次,并取平均高度和直径来计算试样的体积.以前的研究表明,土体结构在大约3~5个干湿循环周期后达到平衡状态[23].重复上述过程,直到完成所需的干湿循环次数(第0、1、2和4次).根据不同干湿循环次数完成后的土体状态,可确定三轴试验中使用的原状花岗岩残积土试样的基本物理指标(包括含水率、干密度、空隙比、饱和度),见表2.

表2　不同干湿循环次数后原状花岗岩残积土试样的基本物理指标

Tab.2　Basic physical indexes of the intact GRS samples after different D-W cycles

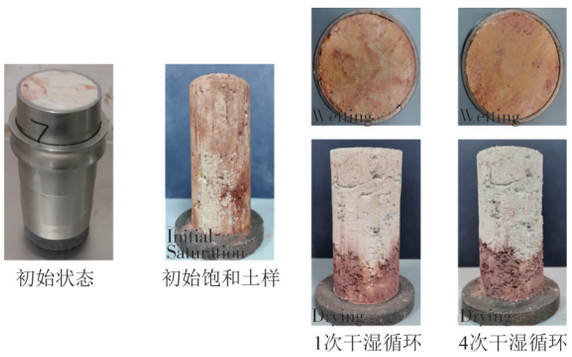
干湿循环次数	含水率/%	干密度/(g·cm^{-3})	孔隙比	饱和度/%
0	31.0	1.441	0.867	96.21
1	30.2	1.466	0.835	97.30
2	29.7	1.473	0.826	96.70
4	29.5	1.478	0.820	96.77

然后将原状饱和三轴试样放入真空桶中进行保湿和养护,直到相关试验开始.图1为经受干湿循环后的原状三轴残积土样的图片.

2　测试方案和程序

2.1　三轴剪切试验

力学性质测试采用GDS三轴试验系统,该系统



初始状态 初始饱和土样 1次干湿循环 4次干湿循环

图1 经受不同干湿循环次数的原状三轴残积土样

Fig.1 The intact triaxial GRS samples after being subjected to the different numbers of D-W cycles

配备先进的压力与体积控制器,可实现加载与量测的自动化,准确量测荷载作用下土体应力-应变关系,用以研究干湿循环对原状花岗岩残积土宏观力学行为和变形特性的影响.准备好样品后,在不同围压(σ_3=30、60和120 kPa)下进行一系列单调的三轴压缩试验.每个试验包括三个阶段:初始饱和、各向同性等压固结和不排水剪切.在初始饱和阶段,每级施加50 kPa的反压增量以确保样品完全饱和[24].当Skempton孔隙水压力系数B≥0.95时,认为饱和阶段已完成.之后,在预先确定的有效约束压力下进行各向同性固结,直到超孔隙水压力完全消散.在不排水剪切阶段,以0.05 mm/min的恒定轴向应变速率进行,并保持排水阀关闭.剪切试验在20%的轴向应变时结束,试样视为破坏.经过0、1、2、4次干湿循环的原状花岗岩残积土样进行3级有效围压下的三轴固结不排水剪切试验,共耗费12个试样.

2.2 游离氧化铁含量测定试验

采用连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-碳酸氢钠溶液(DCB)来去除残积土中游离氧化铁并测定其含量.土样被干燥后通过0.25 mm的筛子,0.5 g过筛的土样被用来测定氧化铁的含量.用Mehra-Jackson[25]方法测定氧化铁的含量,将DCB溶液与土样混合,然后在水浴中加热到80℃并不断搅拌,直到样品呈灰白色.通过离心分离上清液,并依次加入浓度为100 g/L的盐酸羟胺、醋酸-醋酸钠缓冲溶液和1 g/L的1,10-菲罗啉溶液.充分搅拌后,在20℃的室温下放置1.5 h进行显色.然后用1 cm的比色皿在520 nm处测量吸光度.最后,根据测量的吸光度和铁标准曲线计算出残积土中含有的游离氧化铁总量.

2.3 动态光散射试验

使用Malvern Zetasizer Nano ZS90仪器分析干湿循环后残积土的微粒尺寸分布.DLS技术可以捕捉到由颗粒的布朗运动引起的光散射强度波动,这与微粒子的大小有关.首先将不同干湿循环次数的样品切成小块,分别通过0.25 mm的筛子,取2 g过筛土用于DLS测试.加入去离子水以产生土颗粒悬浮液.然后用吸管提取土壤悬浮液并转移到反应容器中.在加入样品前,用超声波消除反应容器中残留的气泡,并用去离子水冲洗三次以防止交叉污染.每次测量时,样品的遮光率保持在15%.

3 结果和讨论

3.1 干湿循环中残积土的体积变化情况

分别测量和计算不同干湿循环次数后的残积土样品的体积,并将其变化规律绘制在图2中.干燥导致土体收缩,湿润导致土体膨胀,但这两个过程引起的土体结构变化是不完全可逆的,这点从体积变化曲线中存在明显的滞后环可以看出.在干燥条件下,残积土样品的体积从第1到第4个干湿循环周期持续减小,并在第4个干湿循环周期后逐步达到稳定值.样品体积的持续减小主要是由两个因素造成的:土样的质量损失和土体裂缝的延伸.在连续干燥-湿润过程中,土样经历反复的冲洗作用,表面的细粒土会被冲走.此外,当土体中出现裂缝时,土样更容易失水和风干,土颗粒之间的孔隙随之减小,从而导致土样体积的收缩.在完成整个干湿循环后,土样出现累积的收缩变形,且收缩幅度随着干湿循环次数的增加而变大.干湿循环历史对土壤体积变化的影响是由于机械和水力行为之间的耦合效应[26].然而,体积收缩不可能无限制地发展,随着干湿过程的继续最终达到平衡状态.由于干湿循环引起的不可逆的体积变形程度随着循环次数的增加而逐渐减少,因此每个循环后都会形成一个更稳定的土体结构[27].

3.2 干湿循环对残积土剪切行为的影响

3.2.1 应力-应变关系和孔压-应变关系

图3说明在三种围压下,经历不同次数干湿循环的残积土的偏应力和超孔隙水压力随轴向应变的变化情况.由未经历干湿循环的土样的应力-应变曲

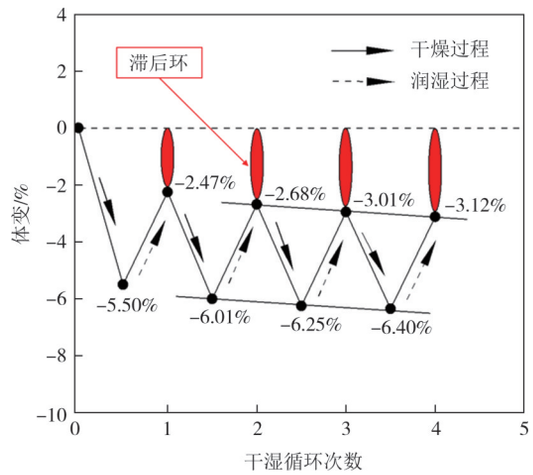


图 2　不同干湿循环次数下残积土样体变变化

Fig.2　The changes in volumetric strain of the GRS samples at different numbers of D-W cycles

线可以看出,在 30 kPa 下土样内部的偏应力始终处于增长状态,呈现出应变硬化类型;在 60 kPa 下剪切的样品,其应力-应变曲线表现出轻微的应变软化特征;当压力增加到 120 kPa 时,表现为明显的软化状态. 随着围压的增加,明显观察到土样的应力-应变关系发生了相变. 通过分析土样的应力-应变曲线结果,王成华等[28]明确指出剪切过程中应力-应变关系转变的普遍存在性. 一般,随着围压的增加,应力-应变关系会从应变软化阶段转变为应变硬化阶段. 然而,原状残积土的应力-应变行为与上述描述完全相反. 据推测,原状花岗岩残积土具有很强的胶结结构,结构特性的存在大大增强了土体抗剪能力,但它会随着围压的增加而降低. 即在较低的围压下,残积土表现出结构土的力学特性,而在较大的围压下,结构特性对应力-应变曲线的影响相对减小.

低围压(30 kPa)下,残积土在第 0、1、2、4 次干湿循环下的应力-应变曲线都属于弱应变硬化型. 在初始阶段,偏离应力线性增加,然后斜率逐渐减小,最终趋于稳定或略有增加. 相似地,经历第 0 次和第 1 次干湿循环的 60 kPa 的样品的应力-应变关系也显示出弱应变硬化. 然而,在第 2 个干湿循环后应力-应变曲线将转变为应变软化型,即偏应力先上升到峰值然后逐渐下降到稳定值. 随着干湿循环次数的增加,应力-应变曲线在 120 kPa 时逐渐从弱应变软化转变为明显的应变软化. 此现象表明,结构特征的存在使原状残积土在不同干湿循环次数下的应力-应变关系有相当大的差异. 此外,周期性的干湿循环同时削弱了土的结构特性,导致土体在第 2 个干湿循环后出现明显的应变软化特征. 经过反复的干湿循环,强度软化现象进一步加剧,应力-应变曲线类型逐渐从加强型向稳定型和软化型转换.

在三轴固结不排水剪切试验过程中,土的总体积保持不变,超孔隙水压力和有效应力不断调整. 超孔隙水压力最初保持增加的趋势,然后随着应变的增加而减少. 超孔隙水压力曲线有一个明显的拐点,它几乎与线性增长剪切强度(弹性范围)对应的轴向应变相同. 在 30 kPa 的围压下,超孔隙水压力在小的应变范围内迅速增加到一个峰值,然后开始大幅度下降到一个负值,最后稳定下来. 这表明,在剪切过程中样品首先表现出剪切收缩的特性,然后是明显的扩张趋势. 当有效围压较大时,土的横向变形受到抑制,正的超孔隙水压力一直存在. 在整个剪切过程中,残积土均表现出剪切收缩的趋势. 一般在剪切阶段开始时,超孔隙水压力的增加表明残积土的体积收缩,然后在达到峰值后逐渐减少,这表明土样的剪切扩张趋势. 在剪切阶段结束时超孔隙水压力保持稳定的下降趋势.

3.2.2　有效强度指标

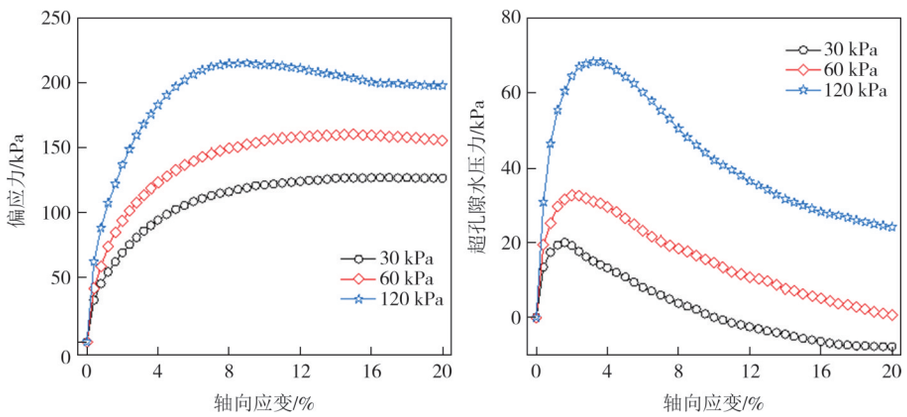
三轴剪切试验中有效应力路径上的峰值点被认为是剪切破坏点(图 4). 将这些点画成一条线,然后计算出土的有效抗剪强度指标,即有效黏聚力 c' 和有效内摩擦角 φ'. 采用修正剑桥模型中的临界状态理论确定原状花岗岩残积土的抗剪强度指标[29].

$$\sin\varphi' = \frac{3M}{6+M} \tag{1}$$

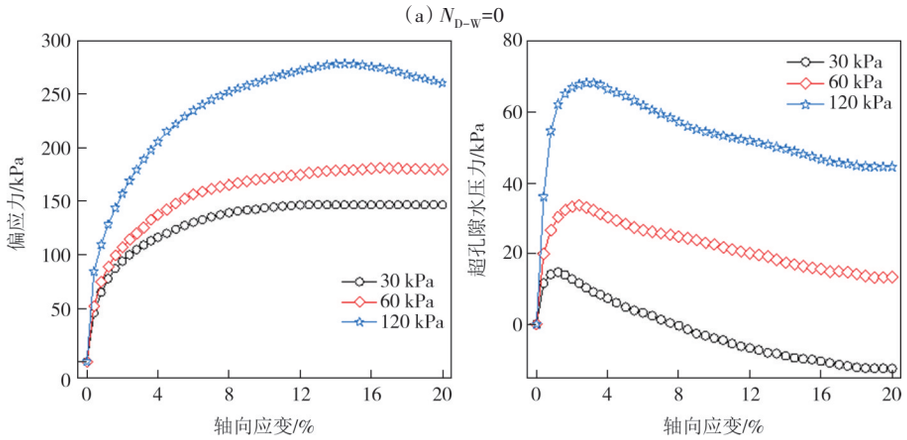
$$c' = \frac{S(3-\sin\varphi')}{6\cos\varphi'} \tag{2}$$

式中:M 和 S 分别为失效线在 p'-q 平面上的斜率和截距;p' 为平均主应力.

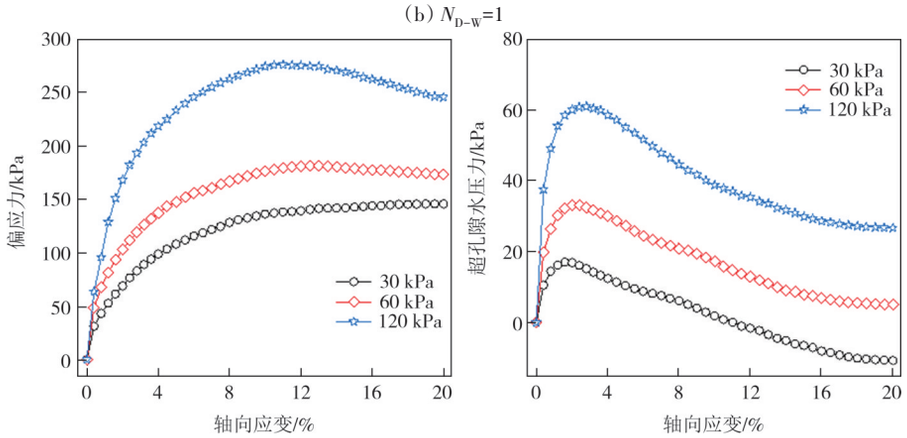
根据上述方法得到经历不同干湿循环次数的残积土的有效强度指标,结果见表 3. 可以看出,随着干湿循环次数的增加,残积土的有效黏聚力 c' 逐渐降低,而有效内摩擦角 φ' 则逐渐增加. 在第 4 次干湿循环后,有效黏聚力 c' 由初始的 14.78 kPa 下降到



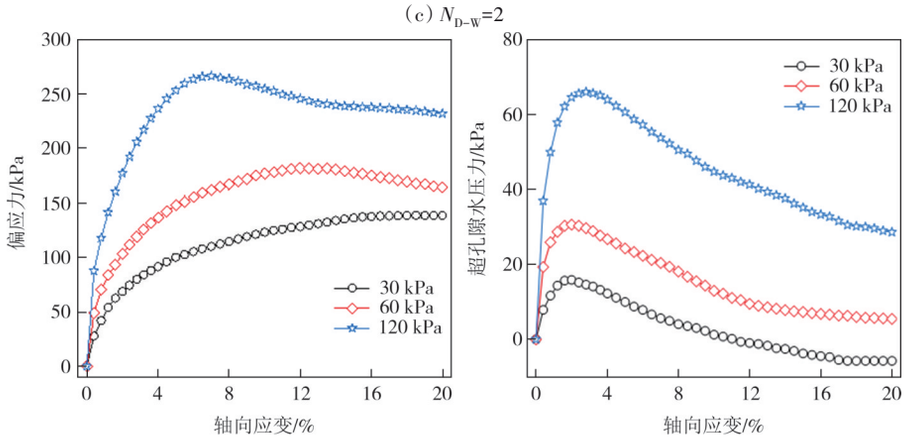
(a) N_{D-W}=0



(b) N_{D-W}=1



(c) N_{D-W}=2



(d) N_{D-W}=4

图 3 不同干湿循环次数下处于不同围压下残积土的剪切行为

Fig.3 Shear behaviors of GRS samples at three confining pressures under

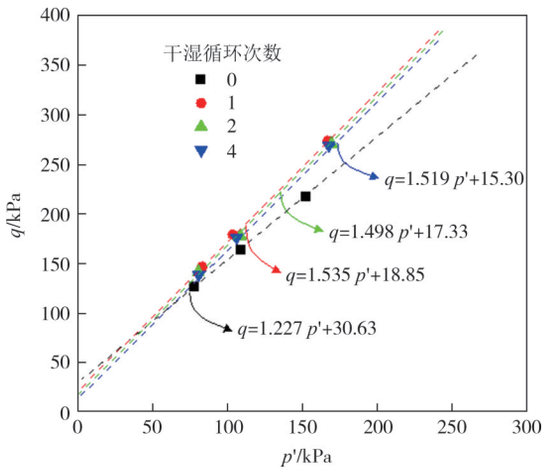


图 4　不同干湿循环下的峰值剪应力

Fig.4　Peak shear stress at different D-W cycles

7.68 kPa,黏聚力值衰减了 48.04%;而有效内摩擦角 φ' 由初始的 30.62°增大到 37.30°,内摩擦角增加了 21.82%. 另外,在第 1 次干湿循环后,有效黏聚力衰减 35.86%,占总衰减量的一半以上,并且在之后的干湿循环过程中衰减程度逐渐减弱. 有效内摩擦角随干湿循环次数的变化规律与黏聚力的变化基本相似,在第 1 次干湿循环时有 23.02% 的相对较大增长,并在后续干湿循环中趋于稳定. 花岗岩残积土的长期力学性能将在连续的干湿循环过程中稳定下来. 综上,干湿循环对花岗岩残积土力学性能的劣化影响主要表现为有效黏聚力的降低,而有效内摩擦角的增大是导致干湿循环后残积土峰值强度增加的内在因素.

表 3　不同干湿循环次数下抗剪强度指标

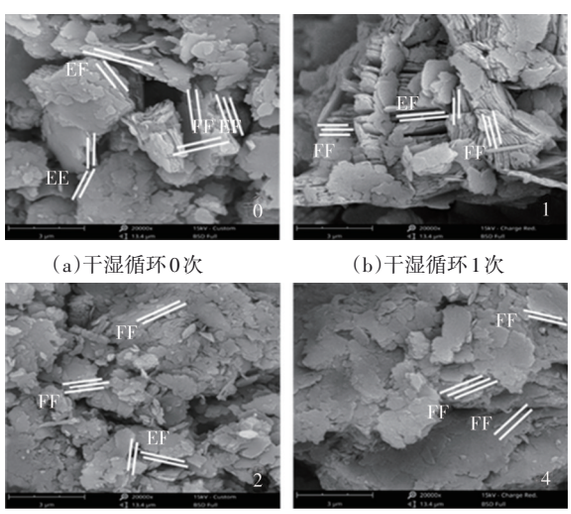
Tab.3　Shear strength index for different D-W cycles

抗剪强度指标	干湿循环次数			
	0	1	2	4
有效黏聚力 c'/kPa	14.78	9.48	8.66	7.68
有效内摩擦角 φ'/(°)	30.62	37.67	36.82	37.30

3.3　干湿循环过程中残积土胶结结构的变化规律

3.3.1　微观结构的定性分析

图 5 展示不同干湿循环次数下残积土样品的 SEM 图像,由图 5(a)可见原状花岗岩残积土中存在着密集的团聚体堆积,叠片状的高岭土矿物以面与面(FF)接触的形式产生团聚体,这些团聚体又以边与面(EF)或边与边(EE)接触的形式相互连接. 密集的团聚体在空间上处于混合和堆积的状态,其内部形成大量的微小孔隙,在团聚体聚集区外以及团聚体间存在着较大的裂隙和孔洞,残积土的微观结构显示出无序松散的排列模式. 从图 5(a)中还可观察到高岭土矿物与氧化物颗粒间的显著结合,氧化铁颗粒包裹在高岭土片层表面,将各自分散的高岭土片层胶结堆覆. 经过干湿循环后,颗粒和团聚体之间原有的胶体联系开始被破坏,大部分相互接触的颗粒或团聚体逐渐转变为面与面(FF)的形式. 在第 1 个干湿循环中,高岭土片层堆积形成的各团聚体排列更加紧密,呈现一定的方向性,并且各团聚体以边与面(EF)接触的形式相互联结形成更大的团块. 大团块中各团聚体内的微孔变大变多,但各团聚体间的孔隙明显减少. 经历不同干湿循环次数的残积土样品之间连接孔隙数量的变化以及不同位置土体内部孔隙结构的变化都比较大. 在第 4 个干湿循环中,颗粒或团块明显形成较大的团聚体,但同时也产生更大的孔洞和裂缝.



(a)干湿循环 0 次　　(b)干湿循环 1 次

(c)干湿循环 2 次　　(d)干湿循环 4 次

图 5　不同干湿循环次数下残积土样的 SEM 图像

Fig.5　SEM micrographs of GRS samples with different numbers of D-W cycles

3.3.2　胶结氧化铁的定量分析

原状花岗岩残积土样的剖面如图 6 所示,其类型主要是红褐色、黄红色、黄白色和灰白色,它们由下层混合花岗岩的风化形成. 颜色上的明显差异表征残积土的强烈风化异质性. 残积土中的铁氧化物通常以游离形式存在.

为了更好地描述干湿循环下残积土中游离氧化铁的含量变化,选择黄红色和黄白色这两类土样,因为它们的氧化铁含量分布相对均匀. 经过多次干湿

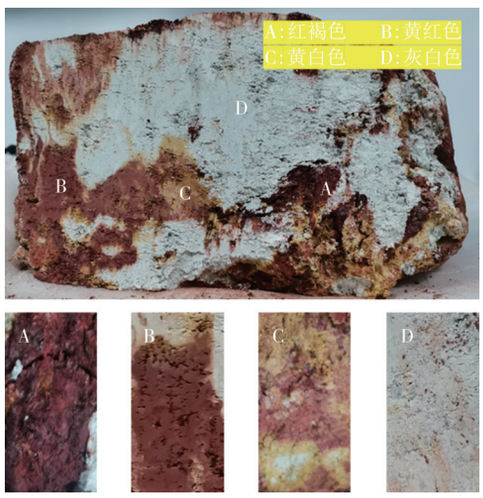


图6 原状花岗岩残积土样的剖面图

Fig.6 The soil profiles of the intact GRS

循环后,黄红色和黄白色残积土样中游离氧化铁含量的变化情况见图7.

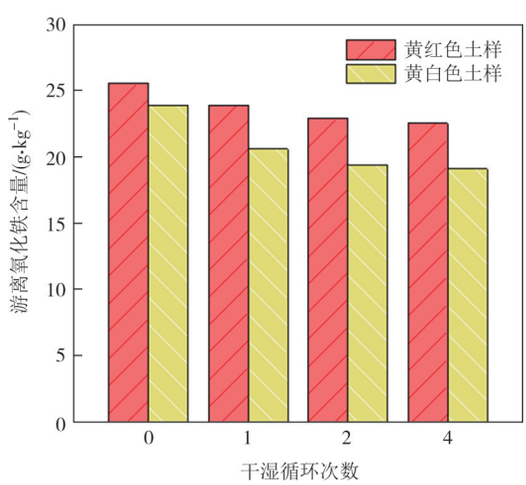


图7 不同干湿循环次数下残积土游离氧化铁含量变化

Fig.7 The variations of FIOs content in the residual soils underwent multiple D-W cycles

可以看出黄红色土样有着更高的氧化铁含量,这也与它的颜色更红的状态一致.在干湿循环后,两种土的氧化铁含量均呈下降的趋势,并最终趋于稳定的数值,这表明在吸湿过程中水的浸入溶解了残积土中的胶体物质.铁氧化物和黏土矿物之间的相互作用是通过改变土颗粒之间的结合状态和晶间力来控制微观结构形态,进而改变土的力学特性.未经历干湿循环的土样有着较高的氧化铁含量,但从SEM图像中并未观察到明显的胶结现象.这可能是由于在土样制备过程中原先形成的铁质结构连接部分被破坏,胶结状态很难在短时间内恢复.胶结效应在第1个干湿循环后最为明显.老化效应可能是造成这种现象的原因.在干燥过程中,样品处于恒温(45 ℃)和恒湿(85%)下,这相当于一个固化过程,催化了残积土中结晶性氧化铁的形成和胶结的水化反应,因此土的聚集性得到加强.Liu等[30]还发现,反复的干湿循环可以导致残积土中的土颗粒聚集,从而在团聚体之间形成了一些相对较大的中间层.然而,在随后的干湿循环过程中,胶结作用逐渐退化.

3.3.3 微粒尺寸及分布特征

图8通过DLS测量揭示了花岗岩残积土在经历不同干湿循环后的累积粒径体积曲线和相对粒径体积曲线.可以看出,干湿循环后残积土累积粒径体积曲线向左移动.颗粒大小的差异在第1个循环中最明显,并在随后的循环不断减小.第0次、第1次、第2次和第4次循环的d_{90}分别为180.1 μm、95.7 μm、77.83 μm和63.29 μm.第0次干湿循环下的颗粒大小体积的相对分布曲线显示一个双峰曲线,其特点是有两个明显的峰值,分别对应22.5 μm(主峰)和168.5 μm(次峰)的直径.然而,随着干湿循环次数的增加逐渐变为单峰曲线,其峰值对应于20~30 μm的区间.此外,当土样经受干湿循环时,黏土粒径体积(<5 μm)没有明显变化,但相对中间的粒径体积(20~100 μm)有明显增加.花岗岩残积土粒度分布的变化可以归结为以下几个原因:由于水化过程,一系列的干湿循环可能会导致大型团聚体的分解,导致次级团聚体的体积密度增加[31];在反复的干燥和湿润过程中团聚体中游离氧化铁胶结物的减少被认为是导致土颗粒度密度增加的另一个因素.由游离氧化铁胶结在一起的土颗粒被分散,所以大颗粒的比例相对减少,而小颗粒的比例相对增加;另外,在完全去除氧化铁后,残积土的PSD曲线与经历多次干湿循环土样的PSD曲线在形状和曲率上没有明显变化,这反映出只有部分游离氧化铁参与土颗粒的胶结.进而可知,这部分氧化铁的含量对残积土的粒度分布起着重要作用,这与既有研究结果相近[32].由于胶结铁质的不断溶蚀减弱原状土的结构强度,残积土的抗剪能力渐渐丧失,同时土颗粒的分散性显著增大.

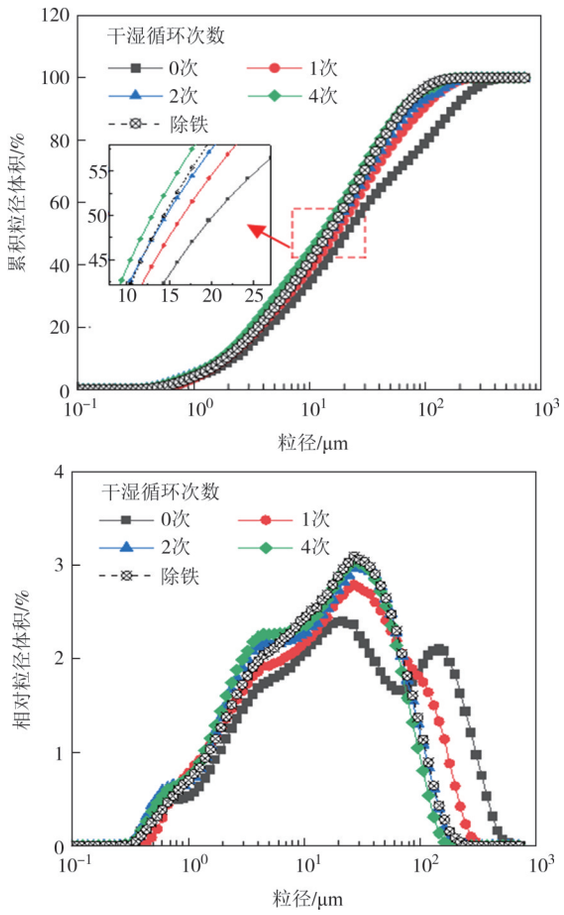


图 8　不同干湿循环次数下残积土的累积粒径体积曲线和相对粒径体积曲线

Fig.8　The cumulative particle volume and the relative particle volume of GRS samples after undergoing different D-W cycle

4　干湿循环下残积土结构特征演变

在地质形成的漫长过程中,由胶体氧化物和黏土颗粒形成的集合体有助于形成残积土的胶结结构特征.残积土的骨架主要由团聚体组成,大的团聚体中充满分布不均的黏土颗粒和砂质颗粒.由于黏粒的含量较低,初始裂缝相对较宽,团聚体内部裂隙会随着裂缝的发展增多.在干燥过程中,由于水分的蒸发,土体在转变为非饱和状态的过程中会产生吸力,超高的基质吸力会将土颗粒拉近,急剧的体积收缩促进土的超固结状态出现.由黏土颗粒胶结形成的团聚体持续收缩,互锁的堆积物变得更加紧密.此外,适宜的温湿度催化残积土中结晶性氧化铁的形成和胶结的水化反应,起到胶结作用的游离氧化铁被固化,因此土粒的聚集性得到加强.在润湿过程中当水侵入土样时,黏土颗粒被分散,胶结材料的水解流失削弱了颗粒间的黏聚力.水分迁移通常伴随着土中细粒的流失,这又导致裂缝的扩大,形成通水通道.在土体吸水膨胀作用下,氧化铁胶结系统也会部分崩溃,残积土的结构特性被削弱.在经历多次干燥-润湿过程后,残积土内部的胶结物质逐渐溶解和流失,土颗粒之间的结构强度显著下降,从而导致土体黏聚力下降.此外土体内部黏粒流失严重,形成贯通的水分运移通道,为裂隙发育提供条件.不可逆的体积收缩,团聚体的分解和石英颗粒的释放会增强晶间摩擦,这解释了土体内摩擦角的增加,最终土体结构会趋于稳定.反复的干湿循环引起土体的周期性膨胀和收缩,孔隙水的迁移,以及土体内粗颗粒和团聚体的分解,同时导致土壤微观结构的变化(如体积收缩、裂缝渗透、胶结物水解、微粒的释放重排和微裂缝的延伸).

5　结 论

基于实验室试验,通过分析多次干湿循环和游离氧化铁对残积土微观结构和力学特性的影响,包括微粒尺寸的变化、剪切行为,得出以下结论:

1)干湿循环导致残积土的累积收缩变形.残积土体积变化的特点是吸水历史和微裂缝发展之间的耦合效应.原状残积土的相对尺寸分布曲线表现出明显的双峰,但在干湿循环条件下或去除氧化铁后变为单峰曲线.

2)游离氧化铁可将土中细颗粒胶结黏合形成大的团聚体.在干湿循环后,残积土的氧化铁含量呈下降趋势,但最终趋于稳定.由于含铁矿物胶结结构的存在,残积土表现出较强的结构特性,但随着干湿循环的进行逐渐变弱.

3)原状残积土具有很强的结构特性,在低约束压力下,残积土结构特性保持良好状态,对干燥和润湿不敏感.但在较高压力下,土体结构特性变弱,对干湿循环的反应更加明显.同时连续干湿循环会削弱土体的结构特性,导致残积土在第 2 个循环后出现明显应变软化.

4)在多次干湿循环下,有效黏聚力 c' 随着干湿循环的增加而下降,有效内摩擦角 φ' 则逐渐增长.在反复干湿循环后,残积土的长期性能趋于稳定.胶结物(游离氧化铁)的溶解流失和裂缝的发展共同促成

有效黏聚力的降低.此外,不可逆的体积收缩和细颗粒含量的增加导致有效内摩擦角的增加.

参考文献

[1] 颜波, 汤连生, 胡辉, 等. 花岗岩风化土崩岗破坏机理分析[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(6): 68-71,84.
YAN B,TANG L S,HU H,et al. The mechanism of disintegration damage of granite weathered soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(6): 68-71, 84.(in Chinese)

[2] HOSSAIN MD S, KONG L W, YIN S. Effect of drying-wetting cycles on saturated shear strength of undisturbed residual soils[J]. American Journal of Civil Engineering, 2016, 4(4): 143-150.

[3] 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.

[4] 安然,孔令伟,黎澄生,等. 炎热多雨气候下花岗岩残积土的强度衰减与微结构损伤规律[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(9):1902-1911.
AN R, KONG L W, LI C S, et al. Strength attenuation and microstructure damage of granite residual soils under hot and rainy weather [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2020,39(9):1902-1911.(in Chinese)

[5] 刘越,陈东霞,王晖,等. 干湿循环下考虑裂隙发育的残积土边坡响应分析[J]. 岩土力学,2021,42(7):1933-1943,1982.
LIU Y, CHEN D X, WANG H, et al. Response analysis of residual soil slope considering crack development under drying-wetting cycles[J]. Rock and Soil Mechanics,2021,42(7):1933-1943,1982.(in Chinese)

[6] ROMERO E. A microstructural insight into compacted clayey soils and their hydraulic properties[J]. Engineering Geology, 2013, 165(1): 3-19.

[7] 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):2815-2824.
WAN Y, XUE Q, WU Y, et al. Mechanical properties and micromechanisms of compacted clay during drying-wetting cycles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(10): 2815-2824.(in Chinese)

[8] TSE E Y M, NG C W W. Effects of drying and wetting cycles on unsaturated shear strength[C]//Advances in Geo-Engineenring, Proceeding of 1st European Comference. on Unsaturated Soils. 2008: 481-486.

[9] 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.

[10] 胡国成,章明奎. 氧化铁对土粒强胶结作用的矿物学证据[J]. 土壤通报,2002,33(1):25-27.
HU G C, ZHANG M K. Mineralogical evidence for strong cementation of soil particles by iron oxides[J]. Chinese Journal of Soil Science,2002,33(1):25-27.(in Chinese)

[11] DUIKER S W, RHOTON F E, TORRENT J, et al. Iron (hydr) oxide crystallinity effects on soil aggregation[J]. Soil Science Society of America Journal,2003,67(2):606-611.

[12] 王继庄. 游离氧化铁对红粘土工程特性的影响[J]. 岩土工程学报,1983,5(1):147-156.
WANG J Z. The effects of free iron oxides on the engineering properties of red clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1983,5(1):147-156.(in Chinese)

[13] GUTIERREZ N H M, DE NÓBREGA M T, VILAR O M. Influence of the microstructure in the collapse of a residual clayey tropical soil [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2009,68(1):107-116.

[14] 张先伟, 孔令伟. 氧化铁胶体与黏土矿物的交互作用及其对黏土土性影响[J]. 岩土工程学报,2014,36(1):65-74.
ZHANG X W, KONG L W. Interaction between iron oxide colloids and clay minerals and its effect on properties of caly[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1):65-74.(in Chinese)

[15] 马琳,王清,原国红. 红土中游离氧化铁作用的试验研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2007,23(1):53-57.
MA L,WANG Q,YUAN G H. Experimental study on function of free iron oxide in red soil[J]. Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition),2007,23(1):53-57.(in Chinese)

[16] TANG L S, SANG H T, HOU T, et al. Experimental study on tensile strength of granite residual soil [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni,2014,53(6),98-105.

[17] CHEN R,NG C W W. Impact of wetting-drying cycles on hydro-mechanical behavior of an unsaturated compacted clay [J]. Applied Clay Science,2013,86: 38-46.

[18] HOY M,RACHAN R,HORPIBULSUK S,et al. Effect of wetting-drying cycles on compressive strength and microstructure of recycled asphalt pavement-fly ash geopolymer[J]. Construction and Building Materials,2017, 144: 624-634.

[19] BURTON G J,PINEDA J A,SHENG D C,et al. Microstructural changes of an undisturbed, reconstituted and compacted high plasticity clay subjected to wetting and drying[J]. Engineering Geology,2015,193:363-373.

[20] SUN W J,CUI Y J. Investigating the microstructure changes for silty soil during drying[J]. Géotechnique,2018,68(4): 370-373.

[21] 刘琳, 刘京, 林姚宇, 等. 多种城市地表形态的局地气候分析[J]. 建筑科学, 2017, 33(2): 8-14, 26.
LIU L, LIU J, LIN Y Y,et al. Local climatic analysis of multiple

urban surface morphology[J]. Building Science, 2017, 33(2): 8-14, 26.(in Chinese)

[22] ZHANG X W, KONG L W, YIN S, et al. Engineering geology of basaltic residual soil in Leiqiong, southern China[J]. Engineering Geology, 2017, 220: 196-207.

[23] NOWAMOOZ H, MASROURI F. Hydromechanical behaviour of an expansive bentonite/silt mixture in cyclic suction-controlled drying and wetting tests [J]. Engineering Geology, 2008, 101(3-4):154-164.

[24] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019 [S]. Beijing:China Planning Press, 2019.(in Chinese)

[25] MEHRA O P, JACKSON M L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite citrate system buffered with sodium bicarbonate[J]. Clays and Clay Minerals, 1960, 7: 313-317.

[26] KIM J, HWANG W, KIM Y. Effects of hysteresis on hydro-mechanical behavior of unsaturated soil[J]. Engineering Geology, 2018, 245: 1-9.

[27] FARULLA C A, FERRARI A, ROMERO E. Mechanical behaviour of compacted scaly clay during cyclic controlled-suction testing [C]//Springer Proceedings in Physics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007: 345-354.

[28] 王成华, 李广信. 土体应力-应变关系转型问题分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1185-1190.
WANG C H, LI G X. Analysis of problem of pattern transition in stress-strain relations of soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(8):1185-1190.(in Chinese)

[29] WOOD D M. Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics [M]. Cambridge, UK:Cambridge University Press, 1991.

[30] LIU P, CHEN R P, WU K, et al. Effects of drying-wetting cycles on the mechanical behavior of reconstituted granite-residual soils [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(8): 04020199.

[31] TANG C S, WANG D Y, SHI B, et al. Effect of wetting-drying cycles on profile mechanical behavior of soils with different initial conditions[J]. CATENA, 2016, 139: 105-116.

[32] 孔令伟, 罗鸿禧, 袁建新. 红粘土有效胶结特征的初步研究[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(5): 42-47.
KONG L W, LUO H X, YUAN J X. Preliminary study on the effective cementation characteristics of the red clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(5): 42-47.(in Chinese)