

DOI : 10.16285/j.rsm.2017.S2.026

# 干湿循环作用对岩溶区红黏土剪切强度的影响

程 允<sup>1</sup>, 韦昌富<sup>1,2</sup>, 牛 庚<sup>1</sup>

(1. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004;  
2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘 要:**以桂林雁山红黏土为研究对象,对经历不同干湿循环次数后的试样进行快剪试验,得到其剪切强度,研究自然状态下反复的降雨和干旱气候对土体强度的影响。试验结果表明,经历多次干湿循环后饱和状态下红黏土样无明显峰值,为应变硬化;干燥状态下土样出现明显峰值,为应变软化,且其曲线前部还出现“平台”状,随着干湿循环次数的增多,饱和状态下和干燥状态下的黏聚力均逐渐降低,而两者的内摩擦角则均呈现整体逐渐增大的趋势,干燥状态下土样的抗剪强度参数均较饱和状态下的土样大,黏聚力和内摩擦角的变化幅度都十分显著。为进一步研究干湿循环对土样抗剪强度及剪切强度参数的影响,量测了干湿循环过程中试样的体积变化情况后发现,随着循环次数的增多,试样体积先不断地减小,然后基本保持不变。

**关 键 词:**红黏土;干湿循环;剪切强度

**中图分类号:** TU443

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 7598 (2017) 增 2 - 0191 - 06

## Effect of wetting and drying cycles on shear strength of karst red clay

CHENG Yun<sup>1</sup>, WEI Chan-fu<sup>1,2</sup>, NIU Geng<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

**Abstract:** To study the effect of precipitation and drought weather on soil shear strength, a series of quick shear tests is performed on karst red clay samples sampled from Yanshan area of Guilin city, which have been subjected to several wetting/drying cycles. The experimental results show that after several drying and wetting cycles, the red clay samples under fully saturated conditions have no significant peak value in their shear strain-shear stress relationship, showing strain hardening behavior, whereas the oven-dried samples have significant strength peak values, showing strain softening behavior, and their strength tend to be stable as the development of strain. With the increase of the drying/wetting cycle number, both cohesion and frictional angle gradually decrease for both fully saturated and oven-dried samples. Both the cohesion and internal friction angle of oven-dried samples are larger than those of the fully saturated samples, showing more significant variations. In order to study the effects on shear strength and strength parameters of soil samples, the volume changes of the soil samples are also measured after different cycles of wetting and drying. It is found that with the increase of the number of cycles, the volume of the sample decreases first and then remains unchanged.

**Keywords:** red clay; wetting and drying cycles; shear strength

## 1 引 言

红黏土是特殊土类,主要分布在北纬 30° 与南纬 30° 之间的热带与亚热带地区,我国的红黏土主要分布贵州、广西、云南、广东及湖南等省<sup>[1]</sup>。红黏土变化过程是一个化学、物理化学的变化或母岩中矿物的迁移、过渡、交代、沉淀的过程<sup>[2]</sup>,且红

黏土自身虽密度较小,却具有高孔隙比、高塑性和高强度的特性。红黏土分布范围较广且其强度特性变化复杂,与膨胀土性质类似都易吸水膨胀,失水干缩产生裂隙,一旦经历反复的降雨和高温干旱作用,压实红黏土大坝、路基、边坡工程容易产生裂隙,由于红黏土的水敏性强,其强度也会受到影响,不仅会引发塌陷和滑坡等自然灾害,而且还危及人

收稿日期: 2017-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 11372078, No. 51309055)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(11372078, 51309055).

第一作者简介:程允,女,1993年生,硕士研究生,主要从事岩土工程方面研究。Email:yun\_cheng6@163.com

民的生命和财产安全。因此,研究干湿循环作用下的红黏土的强度变化情况有着十分重要的意义。

张芳枝等<sup>[3]</sup>采用非饱和土三轴仪测试黏土试样经过多次吸湿-脱湿循环路径后的力学特性,研究了反复干湿循环对非饱和土变形和强度特性的影响效应。唐朝生等<sup>[4]</sup>研究了干湿循环过程中膨胀土的胀缩变形特征,开展了2组干湿循环试验,测量试样在每次干湿循环过程中的轴向变形及循环结束后的含水率,分析了其胀缩变形特性。吕海波等<sup>[5]</sup>对南宁地区原状膨胀土进行干湿循环试验,探讨了膨胀土抗剪强度与含水率、循环次数、循环幅度等循环控制参数的关系,发现其抗剪强度随干湿循环次数增加而衰减,最终趋于稳定,强度稳定值与稳定时所需循环次数均随含水率变化幅度的增加而减小。Kholghifard等<sup>[6]</sup>研究了干湿循环过程对压实红土试样的湿陷性的影响,对预测充满地基道路及其他结构的压实红土的潜在湿陷性十分有用。傅鑫晖等<sup>[7]</sup>从红黏土的水敏性、密度与胶结作用三方面对其抗剪强度进行了试验研究,发现胶结物质减少,红黏土的抗剪强度明显降低。Sayem等<sup>[8]</sup>对未扰动的残积土进行了干湿循环试验,研究其对饱和和剪切强度特性的影响,发现其黏聚力和内摩擦角都随着干湿循环次数的增多而减小,且黏聚力的减小幅度大于内摩擦角的减小幅度。杨和平等<sup>[9]</sup>改进了常规直剪试样制备条件和试验方法,模拟土体季节性干缩湿胀过程,探究了两种土样经历多次干湿循环作用后抗剪强度的衰减规律,发现不管原状还是重塑土样经干湿循环后的强度衰减主要是黏聚力 $c$ 值大幅降低。

上述研究主要针对经历干湿循环作用后湿状态下的土样进行力学特性方面的试验,对干湿循环作用后在干燥状态下土样的力学特性的研究却不多。本次对经历不同干湿循环次数后饱和状态和干燥状态的土样进行直剪试验,探讨了不同干湿循环次数对红黏土剪切特性的影响,同时还量测了经历不同干湿循环次数后的土样的体积变化,根据所得数据对红黏土的微观结构模型做出假设。

## 2 试验方案

### 2.1 试验用土及试样制备

本次试验所选红黏土取自桂林理工大学雁山校区,其中伊利石含量为15%,高岭石含量为64%,蛭石含量为12%,伊利石蛭石混层含量为19%。试验土样的化学成分及物理性质指标分别见表1、2。

按照土工试验方法标准<sup>[10]</sup>对试验用土进行粒

度分析,由试验结果可知,粒径 $d > 0.5$  mm占0.83%, $0.25 \sim 0.5$  mm占1.54%, $0.075 \sim 0.25$  mm占7.36%, $0.005 \sim 0.075$  mm占46.75%, $0.005 \sim 0.002$  mm占4.92%, $0.002$  mm占35.06%。试验采用直径为61.8 mm、高20 mm的压实土样,控制试样初始含水率为28%,初始干密度为 $1.3 \text{ g/cm}^3$ (天然状态下土样密度一样),剪切试验每组做4组平行试验。

表1 土样化学成分

名称	含量/%	名称	含量/%
SiO <sub>2</sub>	43.44	MgO	0.77
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30.55	Na <sub>2</sub> O	0.62
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.84	SO <sub>3</sub>	0.09
K <sub>2</sub> O	1.50	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.09
TiO <sub>2</sub>	1.42	CaO	0.08

表2 试验用红黏土的物理性质指标

天然含水率/%	天然湿密度/(g/cm <sup>3</sup> )	液限/%	塑限/%	塑性指数	土粒相对密度
33.77	1.18	65.06	35.49	29.57	2.74

### 2.2 干湿循环过程

将压制好的环刀样称重后放入叠式饱和器内,用真空抽气缸抽真空3 h后注入蒸馏水饱和,为一次饱和过程,将蒸馏水饱和24 h后的土样(试验顺序编号饱和1,余下依次类推)放在托盘内,置于75(为防止红黏土中的某些胶结物质在较高温度下破坏<sup>[11]</sup>)的烘箱内进行恒温烘干24 h,为一次烘干过程,一次饱和加一次烘干过程为一个循环。

将烘干的土样再次进行抽真空饱和,循环进行上述试验步骤,直至第5次饱和完成,干湿循环试验方案如图1所示。

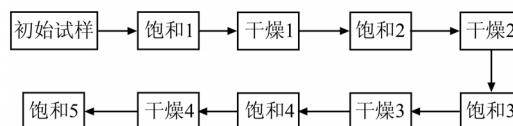


图1 干湿循环试验方案

Fig.1 Test scheme of wetting and drying cycles

## 3 试验结果及试验分析

### 3.1 直剪试验

为进一步研究干湿循环对红黏土强度特性的影响,对历经不同干湿循环次数的饱和与干燥红黏土样进行直剪试验,获得不同干湿循环次数之后的红

黏土的抗剪强度特性。将经过上述干湿循环后的各状态下的土样在南京土壤仪器厂有限公司生产的 ZJ 型四联应变控制式直剪仪上进行快剪(Q)试验, 试验控制剪切速率为 0.8 mm/min, 加载竖向压力分别为 100、200、300、400 kPa。

3.1.1 饱和状态下剪切强度与水平位移的关系

依据不同状态以及不同的竖向有效应力, 绘制直剪试验中红黏土土样的剪切强度-水平位移关系曲线如图 2 所示。通过对比可知, 不同饱和状态下土样的剪切变形均呈现应变硬化现象。从图中还可以看出, 在同一饱和状态下对试样所施加的竖向有效应力越大, 其所对应的剪应力越大。

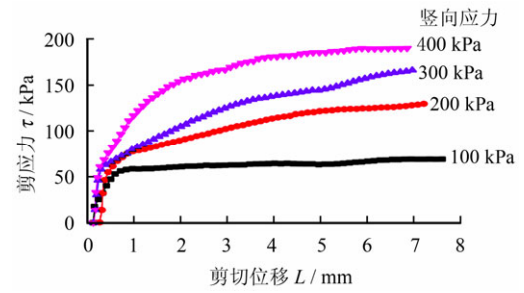
3.1.2 烘干状态下剪切强度与水平位移的关系

经历不同干湿循环次数后干燥状态下土样的剪切强度-水平位移关系曲线如图 3 所示。从图中可以看出, 在不同竖向压力下土样呈现应变软化现象, 且同一干燥状态下对试样所施加的竖向有效应力越大, 其所对应的剪应力越大; 干燥状态下的土样在剪切位移约 0.5 ~ 1.5 mm 处曲线皆出现不同程度的“平台”状, 即随着剪切位移的不断增大, 剪应力变化很小或基本保持不变。出现这种情况是因为土体烘干后内部会出现较大孔隙以及不断地干湿循环使得土体内部出现裂隙, 尤其位移处于 0.5 ~ 1.5 mm 的环刀边缘位置, 使直剪仪在这些部位出现空走和颗粒错动滑移现象, 导致其剪切强度-水平位移关系曲线随着剪切位移的增大, 剪应力却基本保持不变。

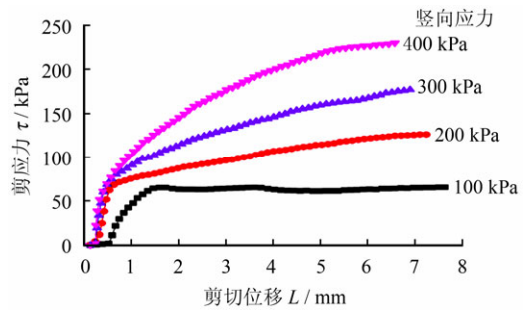
对比图 2 和图 3 的可知, 在干燥状态下土样的剪切强度明显高于饱和状态下的剪切强度, 说明经过干燥后的土样抗剪强度更大, 其抵抗剪切的能力比饱和状态下的土样更强。

3.1.3 剪切强度参数的对比

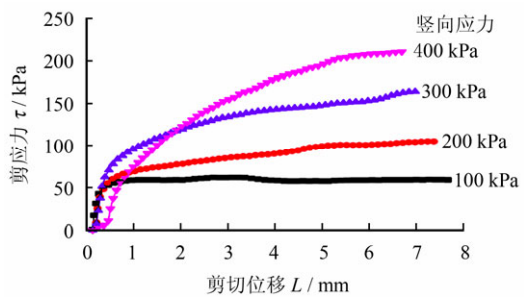
红黏土的剪切试验得到的红黏土抗剪强度参数如图 4、5 所示。从图中可以看出, 历经干湿循环后无论饱和状态还是干燥状态, 其黏聚力  $c$  均呈现不断降低的趋势, 而内摩擦角都随着干湿循环次数的增加而整体呈现上升的趋势, 且前 3 次循环时黏聚力和内摩擦角的降低幅度都较大, 之后的循环中两者的变化程度都相对较小。由图 4 可知, 干燥状态下的黏聚力  $c$  最大可达到 192.1 kPa, 而饱和状态下土样的黏聚力最大值仅 30.53 kPa, 干燥状态的土样的黏聚力大小约是饱和状态下的 6 倍, 可见土样的在干燥状态下剪切强度明显大于饱和状态下的剪切强度。干燥状态下土样的内摩擦角虽然也比饱和状态下的内摩擦角大, 但其远没有黏聚力变化那么明



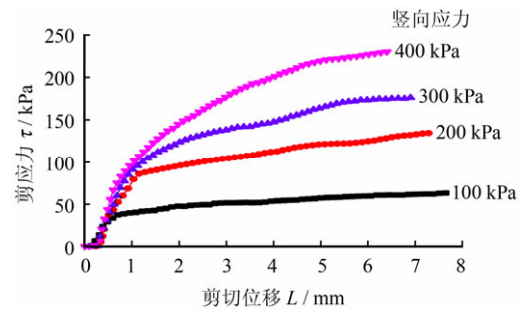
(a) 饱和 1



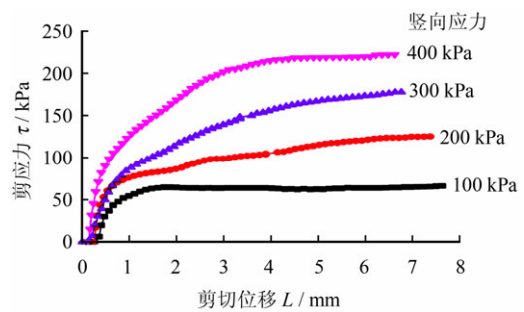
(b) 饱和 2



(c) 饱和 3



(d) 饱和 4



(e) 饱和 5

图 2 饱和状态下剪切强度与水平位移关系曲线  
Fig.2 Relation curves between shear strength and horizontal displacement in saturated state

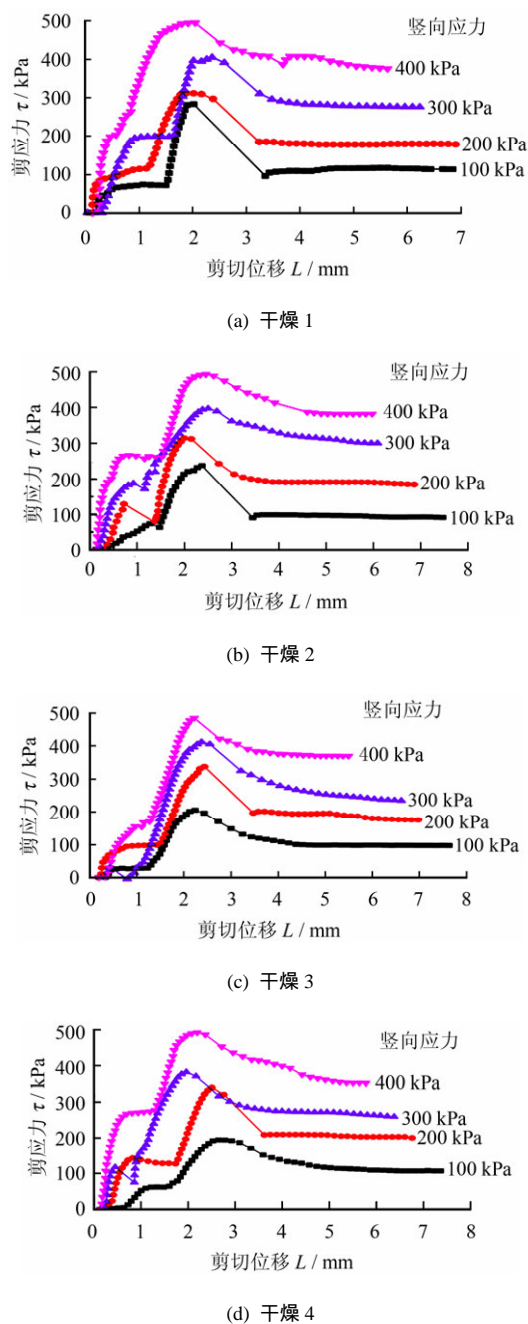


图3 干燥状态下红黏土样剪切强度与水平位移关系  
Fig.3 Relationships between shear strength and horizontal of displacement in dry state

显。由图5可见，干燥状态下土样的最大内摩擦角为  $43.08^\circ$ ，饱和状态下的最大内摩擦角仅为  $26.47^\circ$ ，土样干燥状态下的内摩擦角大小约为饱和状态下的2倍左右，说明土样干燥状态下的内摩擦角仅比饱和状态下的微小，远没有黏聚力的变化幅度明显。

### 3.2 红黏土干湿循环体积变化

为了更好地分析经历干湿循环过后试样体积收缩情况和剪切强度参数变化的原因，选取了3个试样（编号为试样1~3），用游标卡尺对3个试样每次循环后的直径和高度进行多次测量并求取平均

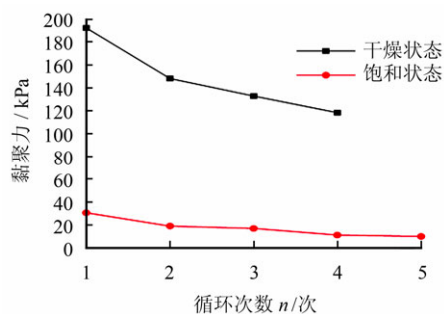


图4 红黏土样黏聚力随干湿循环次数的变化曲线  
Fig.4 Change curves of cohesion of red clay sample with wetting-drying cycles

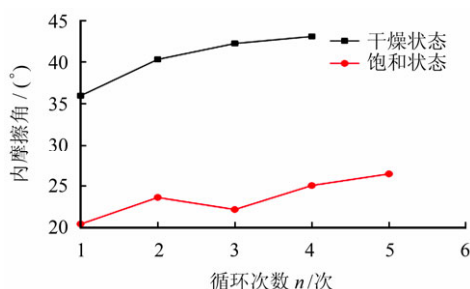


图5 红黏土样内摩擦角随干湿循环次数的变化曲线  
Fig.5 Change curves of internal friction angle of red clay sample with wetting-drying cycles

值，计算每次循环过后试样的体积。图6为试验过程中试样体积变化曲线。试样的体积变化主要发生在前3次循环，后2次循环时试样的体积变化微小，基本保持不变，进入0收缩阶段。试样在饱和状态下的体积收缩比干燥状态下的收缩更显著。

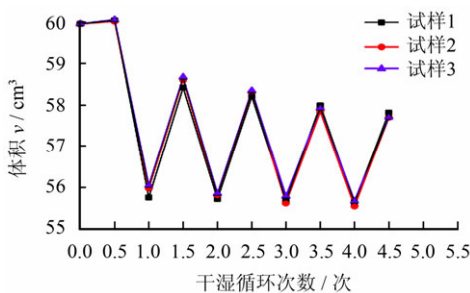


图6 干湿循环后红黏土样体积变化曲线  
Fig.6 Volume change curves of red clay sample after drying and wetting cycles

## 4 剪切强度参数变化的分析

### 4.1 红黏土黏聚力的变化规律

由红黏土的黏聚力随干湿循环次数的变化曲线(见图4)可知，无论在干燥还是饱和状态下，土样黏聚力随干湿循环次数的增加，均呈现逐渐减小的趋势。因为土样在干湿循环的过程中有裂隙产生，黏聚力降低，初次烘干后土样的上下表面保持光滑，并无特别明显的缝隙，但从环刀边缘可看出，红土

与环刀结合的边缘位置已经出现微小的空隙与裂缝。第 2 次增湿后, 虽然土样内部的孔隙再次被水分填充, 土体中间的较大裂隙已闭合, 土样发生微膨胀, 但从图 6 可见土样已无法恢复至初始体积, 环刀边缘处土体依然有微小裂隙存在, 导致土体强度逐渐降低。在下次干燥过程中, 随着失水时间的进一步延长, 裂缝只是在宽度上逐渐变大, 不再出现新生裂缝, 直到稳定<sup>[12]</sup>, 唐朝生等<sup>[13]</sup>的观点得到验证, 可见干湿循环会对土样造成不可逆的结构损伤。

反复的干湿循环会导致土中游离的氧化铁胶体在不断地饱和条件下水化、电解并迁移到水中, 不仅使得游离氧化铁胶体的体积大小和数量不断减小, 还不断地改变土颗粒原有的结构, 形成新的裂缝与空隙。随着循环次数的增多, 形成的裂缝会加深加宽, 降低了土体的均匀性和完整性, 使得土样的黏聚力逐渐减小。

#### 4.2 红黏土内摩擦角的变化规律

由图 5 红黏土的内摩擦角随干湿循环次数的变化规律和图 6 试样体积随干湿循环次数变化的规律可知, 随着干湿循环次数的增多, 试样收缩, 体积不断减小, 使得土颗粒间的距离减小, 颗粒间的接触更紧密, 土体的咬合作用逐渐增强, 内摩擦角也随之增大。图 5 中前 3 次循环过程中试样体积变化显著, 导致试样的内摩擦角在前 3 次循环中变化较大, 在后 2 次循环过程中试样体积变化不明显, 内摩擦角的变化幅度也较小。

### 5 红黏土的微观结构模型的假设

红黏土的微观结构特征可将其孔隙分为聚集体内孔隙和聚集体之间孔隙<sup>[14]</sup>两大类, 体积的收缩是由两者共同作用所致。

根据前文的数据可对红黏土的微观结构模型做如图 7 所示假设: 图 7(a)、7(b)为干燥前和干燥后聚集体间孔隙微观结构图, 7(c)和 7(d)为干燥前和干燥后的聚集体内孔隙微观结构图, 黑色不规则颗

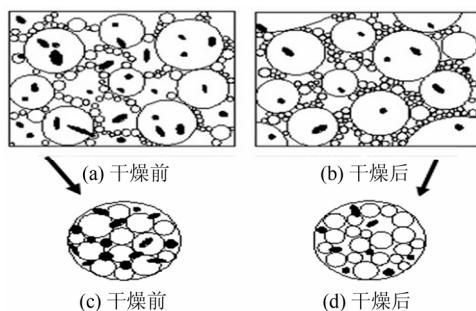


图 7 红黏土微观结构

Fig.7 Microscopic structure of red clay

粒体为游离的氧化铁胶体。随着土体多次干燥失水过程的进行, 首先主要是聚集体间孔隙水的消散, 使得聚集体间的孔隙逐渐减小, 孔隙数量也在减少, 聚集体之间相互靠近, 接触更紧密, 在整体上表现为土体的体积收缩, 见图 7(a)和 7(b), 前 3 次循环时的体积收缩程度较大。随着后几次干燥过程的继续进行, 聚集体间的水分基本消散完成, 接着主要是聚集体内的孔隙水开始减少, 见图 7(c)、7(d)。此时聚集体内部本来排列较紧密的黏土颗粒也会因为干燥作用而逐渐失水收缩, 颗粒自身收缩, 体积变小, 进而重新排列, 也使得聚集体内部孔隙体积逐渐增大, 孔隙数量不断增多。因聚集体自身的收缩不能通过土体的宏观变形得以完全反映, 试验所测的体积变形主要来自宏观孔隙变化<sup>[13]</sup>, 对宏观体积的影响微乎其微, 此阶段主要为 0 收缩阶段, 即土样体积基本无明显变化。

### 6 结 论

(1) 含水率较高时红黏土服从“应变硬化”现象, 含水率较低时红黏土服从“应变软化”现象, 对比可知, 土样在干燥状态下的剪切强度明显高于饱和状态下的剪切强度。

(2) 无论饱和状态还是干燥状态, 随着干湿循环次数的增多, 红黏土样黏聚力  $c$  均呈现不断降低的趋势, 内摩擦角则整体呈现上升的趋势, 且干燥状态下的剪切强度参数均大于饱和状态下的剪切强度参数, 但黏聚力的变化幅度大于内摩擦角的变化幅度。

(3) 在土体多次干燥失水过程中, 首先是聚集体间孔隙不断减少, 土体的体积收缩程度较大, 随后主要是聚集体内的孔隙水开始减少, 颗粒本身干燥收缩, 聚集体内孔隙体积逐渐增大, 孔隙数量不断增多, 进入 0 收缩阶段。

#### 参 考 文 献

- [1] 何毅东. 关于红黏土的若干问题研究[D]. 广西: 广西大学, 2007.  
HE Yi-dong. Several studies on red clay[D]. Guangxi: Guangxi University, 2007.
- [2] 姜洪涛. 红黏土的成因及其对工程性质的影响[J]. 水文地质工程地质, 2000, 27(3): 33 - 37.  
JIANG Hong-tao. Genesis of red clay and its influence on Engineering properties[J]. *Hydrogeology and Eng-*

- ineering Geology, 2000, 27(3): 33 - 37.
- [3] 张芳枝, 陈晓平. 反复干湿循环对非饱和土的力学特性影响研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 41 - 46.  
ZHANG Fang-zhi, CHEN Xiao-ping. Influence of repeated drying and wetting cycles on mechanical behaviors of unsaturated soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32 (1): 41 - 46.
- [4] 唐朝生, 施斌. 干湿循环过程中膨胀土的胀缩变形特征[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(9): 1376 - 1384.  
TANG Chao-sheng, SHI Bin. Swelling and shrinkage behaviour of expansive soil during wetting-drying cycles[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(9): 1376 - 1384.
- [5] 吕海波, 曾召田, 赵艳林, 等. 膨胀土强度干湿循环试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3797 - 3802.  
LÜ Hai-bo, ZENG Zhao-tian, ZHAO Yan-lin. Experimental studies of strength of expansive soil in drying and wetting cycle[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(12): 3797 - 3802.
- [6] KHOLGHIFARD M, AHMAD K, ALI N, et al. Collapse/swell potential of residual laterite soil due to wetting and drying-wetting cycles[J]. **National Academy Science Letters**, 2014, 37(2): 147 - 153.
- [7] 傅鑫晖, 颜荣涛, 于海浩, 等. 红黏土的强度机理[J]. 桂林理工大学学报, 2014, 34(4): 691 - 696.  
FU Xin-hui, Yan Rong-tao, YU Hai-hao. Shear strength properties of red clay[J]. **Journal of Guilin University of Technology**, 2014, 34(4): 691 - 696.
- [8] MD S H, LING-WEI K, SONG Y. Effect of drying-wetting cycles on saturated shear strength of undisturbed residual soils[J]. **American Journal of Civil Engineering**, 2016, 4(4): 143 - 150.
- [9] 杨和平, 王兴正, 肖杰, 等. 干湿循环效应对南宁外环膨胀土抗剪强度的影响[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(5): 949 - 954.  
YANG He-ping, WANG Xing-zheng, XIAO Jie. Influence of wetting-drying cycles on strength characteristics of Nanning expansive soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(5): 949 - 954.
- [10] 南京水利科学研究所. GB/T 50123 - 1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国规划出版社, 1999.  
Nanjing Hydraulic Research Institute. GB/T 50123-1999 Standard for soil test method[S]. Beijing: China Planning Publishing House, 1999.
- [11] 谭罗荣, 孔令伟. 某类红黏土的基本特性与微观结构模型[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 458 - 462.  
TAN Luo-rong, KONG Ling-wei. Fundamental property and microstructure model of red clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(4): 458 - 462.
- [12] 杨荫华, 柏树田. 红土干燥脱水不可逆性对物理力学性质的影响[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(4): 104 - 113.  
YANG Yin-hua, BAI Shu-tian. The influence of irreversibility of desiccation of lateritic soils on their physic-mechanical properties[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1982, 4(4): 104 - 113.
- [13] 唐朝生, 崔玉军, Anh-Minh TANG, 等. 土体干燥过程中的体积收缩变形特征[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(8): 1271 - 1279.  
TANG Chao-sheng, CUI Yu-jun, Anh-Minh TANG, et al. Volumetric shrinkage characteristics of soil during drying[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(8): 1271 - 1279.
- [14] 谈云志, 孔令伟, 郭爱国, 等. 压实过程对红黏土的孔隙分布影响研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1427 - 1430.  
TAN Yun-zhi, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Pore size evolution of compacted laterite under desiccation shrinkage process effects[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(5): 1427 - 1430.