

# 反复干湿循环对非饱和土的力学特性影响研究

张芳枝<sup>1, 2</sup>, 陈晓平<sup>1</sup>

(1. 暨南大学力学与土木工程系, 广东 广州 510632; 2. 广东水利电力职业技术学院水利工程系, 广东 广州 510635)

**摘 要:** 通过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, 研究反复干湿循环对非饱和土变形和强度特性的影响效应。试验结果表明: 干湿循环使 SWCC 产生变化, 相同含水率所对应的基质吸力减小; 收缩特性亦发生改变, 干湿循环后试样在基质吸力增加的开始阶段(收缩屈服前)收缩性增强, 屈服后收缩特性基本与循环前一致; 非饱和土固结屈服后的压缩指数增高, 但增高的幅度随基质吸力增大而降低; 有些试样经过干湿循环后, 剪切时产生了滑裂破坏面, 其应力-应变关系表现有明显峰值和应变软化特征; 吸湿-脱湿循环过程不仅使非饱和土有效内摩擦角  $j'$  降低, 而且对吸力内摩擦角  $j^b$  值产生一定影响。说明非饱和土经过反复干湿循环的应力路径后, 其力学特性将产生不可逆转的变化。

**关键词:** 非饱和土; 反复干湿循环; 土水特征曲线; 变形; 抗剪强度

**中图分类号:** TU43      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2010)01-0041-06

**作者简介:** 张芳枝(1968-), 女, 湖北石首人, 副教授, 博士研究生, 主要从事岩土试验研究和土工数值计算等方面的工作。E-mail: zhangfzh@gdsdxy.cn。

## Influence of repeated drying and wetting cycles on mechanical behaviors of unsaturated soil

ZHANG Fang-zhi<sup>1, 2</sup>, CHEN Xiao-ping<sup>1</sup>

(1. Department of Mechanics and Civil Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2. Department of Hydraulic Engineering, Guangdong Technical College of Water Resources and Electric Engineering, Guangzhou 510635, China)

**Abstract:** A series of tests are performed to measure the variation of deformation and shear strength of unsaturated clays subjected to repeated drying and wetting cycles so as to study the effect of repeated drying and wetting cycles on unsaturated soil by using unsaturated triaxial apparatus. The test results show: firstly, the matric suction of the same soil moisture in SWCC reduces, and shrinkage behaviors of soil enhance during the pre-yield stage of shrinkage and do not change approximately during the post-yield stage of shrinkage; secondly, the compression index increases during the post-yield stage of isotropic compression, and the influence on compression behavior decreases with the increasing suction; and thirdly, a few samples subjected to repeated drying and wetting cycles exhibit a slide plane in triaxial shear tests. Consistently, the stress exhibits an obvious peak value and then decreases sharply with the increasing strain. In addition, repeated drying and wetting cycles not only decrease the triaxial shear coefficient  $j'$  but also have an effect on coefficient  $j^b$  with respect to matric suction to a certain extent. It indicates that the change of mechanical properties is irreversible after the unsaturated soil is subjected to repeated drying and wetting cycles.

**Key words:** unsaturated soil; repeated drying and wetting cycles; soil-water characteristic curve; deformation; shear strength

## 0 前 言

经过碾压填筑的土坝、河堤等边坡属于非饱和土边坡, 在填筑完成初期处于非饱和状态, 受洪水和降雨作用填土处于饱和浸泡状态, 枯水季节又回复到非饱和状态。填土受季节性影响, 经历了反复的干湿循环过程, 即一个由非饱和土到饱和土交替变化的过程, 该过程可能使土体的强度和变形特征产生不可逆转的变化, 研究这一过程对非饱和土体强度和变形特征的

影响, 对土坝、河堤等边坡工程具有重要意义。

干湿循环对土体特性影响问题已有学者开展了一些研究探索。文献[1]通过三轴试验探讨了三峡库区滑带土经过多次干湿循环后饱和试样的黏聚力和内摩擦角下降情况, 文献[2]采用直剪试验研究了膨胀土击

基金项目: 广东省水利科研及技术推广项目(2008-38)

收稿日期: 2008-11-05

实样经过反复干缩湿胀饱水后的抗剪强度, 这些研究主要探讨饱和土在反复干湿循环后的强度影响, 不考虑非饱和土强度变化, 即吸力对强度的作用。文献[3]探讨了多次干湿循环过程中 SWCC 的“逆向回滞”现象, 分析了产生该现象的原因。文献[4]探讨了在一个干湿循环中干燥过程重塑黏土试样的土水特征曲线和收缩特性, 以及干燥后重新饱和过程中的变形特性, 这些研究未考虑多次干湿循环后的变形特性及相应的强度变化。文献[5]采用直剪试验探讨了一个干湿循环中吸湿路径和脱湿路径对膨胀土强度的影响, 研究表明, 在干湿循环过程中相同的基质吸力具有不同的强度贡献, 不同的含水率变化路径可能使吸力摩擦角  $j^b$  发生变化, 但要确定干湿循环过程、特别是多次循环过程对吸力摩擦角  $j^b$  产生的影响还需要进一步的研究。

以往的研究更侧重于一个干湿循环过程中非饱和土性状研究, 或者是经过多次循环后的饱和强度变化情况(不涉及吸力对非饱和土强度的影响), 而对非饱和土体经过反复吸湿脱湿稳定后的力学性状研究甚少。

为模拟土坝、河堤等边坡土体真实环境变化, 采用多次反复循环是必要的。本文采用非饱和土三轴仪, 通过反复干-湿循环土体与原土体的对比试验, 探讨这一过程对非饱和土变形和强度的影响效应, 对土坝、河堤等受季节性洪水影响的非饱和边坡研究具有重要意义。

## 1 研究方案

### 1.1 试样的基本物理性质测试

试验土样取自广东珠江三角洲地区, 对土样进行基本的物理性质试验, 测得其基本性质指标: 比重为 2.70, 塑限为 17.5%, 液限为 40.0%, 塑性指数为 22.5, 粒径  $d > 0.5 \text{ mm}$  为 1%,  $0.5 \sim 0.25 \text{ mm}$  为 0.6%,  $0.25 \sim 0.075 \text{ mm}$  为 4.0%,  $0.075 \sim 0.005 \text{ mm}$  为 35.7%,  $0.005 \sim 0.002 \text{ mm}$  为 18.8%,  $\leq 0.002 \text{ mm}$  为 39.9%, 根据 SL237—1999 确定土样为低液限黏土 CL。

### 1.2 击实样和干湿循环样的制备

#### (1) 击实样的制备

采用击实方法制备三轴试样, 试样直径 39.1 mm, 高度为 80 mm。试样的初始含水率为 19.5%, 击实后要求密度为  $1.96 \text{ g/m}^3$ , 根据要求的密度, 称取所需土质量, 将试样分 6 层装入饱和容器, 分层击实。各层土料质量相等, 每层击实至要求高度后, 将表面刨毛, 然后再加第 2 层土料, 如此进行直至最后一层, 控制各组试样的密度差值小于  $0.02 \text{ g/m}^3$ , 然后抽气饱和和

用, 作为击实样。

#### (2) 干湿循环样制备

对准备好的击实样在饱和容器中风干脱水, 经过 6~7 d 的自然脱水后, 放入水中抽气饱和和浸泡 6~7 d, 该过程作为一个干湿循环。文献[3]的研究表明, 非饱和土体经过 3 次干湿循环后土中孔隙的结构趋于稳定, 为了保证获得反复干湿循环土体的稳定力学性状, 该试验经过了 5 次干湿循环, 将完成 5 次风干饱和和浸泡循环的试样备用, 作为干湿循环样。

### 1.3 试验设备及对比试验设计

试验采用非饱和土三轴仪, 设备主要由双压力室、加压系统和量测与采集系统构成, 利用轴平移技术来控制试样中的吸力, 试样中的孔隙气压通过试样帽上的气压管连接到加压系统控制, 试样中的孔隙水压通过试样底座中的陶土板连接到加压系统控制, 试验过程中每隔 8~10 h, 对陶土板底部冲洗一次, 以除去扩散空气, 试验中所有量测数据均由计算机采集。试验方案见表 1。

#### (1) 三轴收缩试验

将完全饱和的两种试样分别装入非饱和土三轴仪压力室中, 首先施加  $s_3=5 \text{ kPa}$  的预压, 待试样变形和排水量稳定后记录相应数值, 并以它们为排水和变形的零点。施加吸力脱湿: 同步缓慢施加等量室压和孔隙气压 ( $u_a < s_3$ ), 达到预定的吸力值, 直至变形和排水量稳定, 吸力平衡的判别标准是, 排水连续 2 h 不超过  $0.01 \text{ mm}^3$ , 且历时不少于 48 h。研究干湿循环对试样脱湿路径中含水率与基质吸力关系(土水特征曲线)的影响, 以及对脱湿路径中试样收缩特性的影响。

#### (2) 等吸力固结试验

等吸力固结试验试样各有 3 组, 吸力值分别控制为 0, 50, 200 kPa, 最大固结压力为 400 kPa。首先, 将完全饱和的试样装入非饱和土三轴仪压力室中, 施加预压  $s_3$  的方法同前; 然后, 同步缓慢施加等量室压和孔隙气压 ( $u_a < s_3$ ), 达到预定的吸力值, 吸力平衡的判别标准同前; 吸力平衡后, 保证孔隙水压力为零, 吸力不变, 逐级施加等向压力固结, 最大固结压力 400 kPa, 研究反复干湿循环对非饱和土固结特性的影响。

#### (3) 排水剪切试验

非饱和土三轴排水剪切试验试样各 12 组, 控制的吸力值分别为 0, 50, 100, 200 kPa, 控制的固结压力分别为 50, 100, 200 kPa。施加预压、施加预定吸力值、以及在等吸力条件下的等向固结方法同前, 吸力平衡和固结稳定后, 保持吸力和孔隙水压力不变(孔隙水压力为 0), 缓慢施加轴向压力剪切至破坏, 剪切速率为  $0.0096 \text{ mm/min}$ , 研究反复干湿循环对非饱和

土应力 - 应变关系和强度特性的影响。

表 1 三轴试验方案

Table 1 Schemes for triaxial tests

编号	状态	试验方法及研究目的
RC1	击实样	脱湿路径的土水特征曲线, 脱湿路径中土的收缩特性。
RDW1	干湿循环样	试验方法同上, 研究反复干湿循环对非饱和土土水特征曲线和收缩特性的影响。
RC2-4	击实样	施加预定吸力值, 分别为 0, 50, 200 kPa, 然后逐级等向固结, 最大固结压力 400 kPa。
RDW2-4	干湿循环样	试验方法同上, 研究反复干湿循环对非饱和土固结特性的影响。
RC5-16	击实样	首先施加预定吸力值, 然后施加等向固结压力, 最后等吸力排水剪切。控制的吸力值分别为 0, 50, 100, 200 kPa, 控制的固结压力分别为 50, 100, 200 kPa。
RDW5-16	干湿循环样	试验方法同上, 研究反复干湿循环对非饱和土强度特性的影响。

## 2 试验成果分析

### 2.1 反复干湿循环对土水特征曲线的影响

图 1 显示了击实样和反复干湿循环样在脱湿过程中的重量含水率与基质吸力的关系。

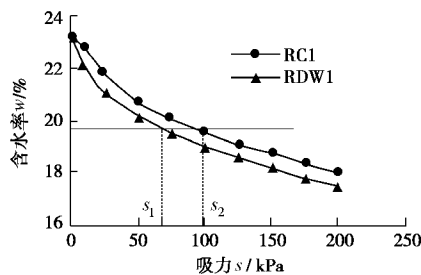


图 1 土水特征曲线比较

Fig. 1 Soil-water characteristic curves during drying stage

(1) 在相同含水率条件下, 击实样和反复干湿循环样在脱湿曲线上所对应的基质吸力不同, 经过反复干湿循环后的土样所需吸力小于击实样。

文献[6]的研究表明, 土体结构对 SWCC 的型式有显著的影响, 文献[3]通过干湿循环对膨胀土的 SWCC 的影响研究指出, 在脱湿过程中, 水量的排出由结构中最小的孔隙起控制作用, 基质吸力与与孔径成反比。由此分析, 土样经过反复干湿循环后, 结构发生了一定的变化, 土体中最小的孔隙有所增大, 或许是由于盐溶质流失导致了结构的变化。

(2) 从图 1 看出, 击实样和反复干湿循环样脱湿路径的土水特征曲线, 随着基质吸力的加大, 两者的脱湿曲线变化趋势一致, 且在同一含水率下吸力相差约 32 kPa (如图 1 中  $s_1$  和  $s_2$  所示)。这种现象进一步加强了文献[3]有关一定基质吸力范围对应着一定孔隙直径的猜测。

### 2.2 反复干湿循环对收缩特性的影响

图 2 显示了两种试样在脱湿路径中孔隙比与基质吸力关系比较, 孔隙比随基质吸力的变化反映试样在脱湿路径中的收缩特性。由于试样经过吸湿和干燥循环后, 试样中最小的孔隙增大, 所以在相同的孔隙比下干湿循环样对应的吸力更小。

试验还表明, 两种试样的收缩曲线均出现分段收缩, 增加基质吸力使试样发生了屈服<sup>[7]</sup>, 屈服后的直线斜率明显大于屈服前的直线斜率, 两种试样在拐点的基质吸力基本一样, 即两者的屈服吸力  $s_0$  基本相同。多次干湿循环后, 由于土样的最小孔隙有所增大, 反复干湿循环样在更小的孔隙比下才能达到屈服。

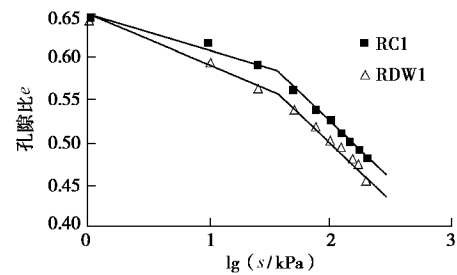


图 2 脱湿路径中试样孔隙比与吸力的关系

Fig. 2 Relationship between void ratio and suction during drying stage

在各个阶段定义直线的斜率为体积收缩指数<sup>[4]</sup>

$$C_s = \frac{\Delta e}{\Delta \lg u_s}$$

指数分别为 0.0393 和 0.0486, 屈服后的收缩指数几乎相等, 约为 0.1395, 即说明干湿循环使试样在屈服前的收缩特性明显增强, 而对屈服后的收缩特性影响很小。由该结果分析, 由于反复干湿循环样的最小孔隙有所增大, 试样的水量排出更顺畅, 所以在基质吸力增加开始阶段收缩指数更大; 随着基质吸力的进一步加大, 试样屈服后, 对收缩特性影响不明显。

### 2.3 反复干湿循环对非饱和土的固结特性的影响

图 3 (a) 显示的是击实样和干湿循环样在吸力为 0 kPa (饱和土) 的固结曲线对比, 图 3 (b) 显示了击实样和干湿循环样吸力分别为 50, 200 kPa 的等吸力条件下固结曲线对比。图 3 表明, 吸力不同, 干湿循环对固结特性的影响有差异。

在吸力为 0 kPa 时 (饱和状态), 击实样和干湿循

环样的屈服点几乎相同,但屈服后干湿循环样的压缩指数明显大于击实样的压缩指数,即压缩性明显增高。

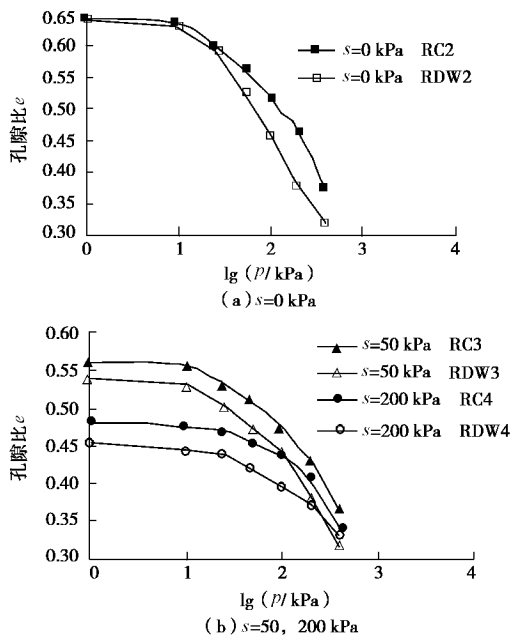


图3 不同吸力条件下的等向压缩曲线比较

Fig. 3 Comparison among isotropic compression curves under different suctions

对于非饱和状态,前面已经分析由于反复循环对试样收缩特性的影响,干湿循环样固结前的初始孔隙比小于击实样初始孔隙比。吸力为 50 kPa 的非饱和状态,试样经反复循环后,其固结屈服后的压缩指数增大,即压缩性有所增高,但增高的幅度降低。吸力为 200 kPa 的非饱和状态,击实样和干湿循环样的固结曲线变化趋势基本一致,即固结屈服点以及屈服后的压缩性变化很小。

可见,对于非饱和土,干湿循环对固结特性的影响与基质吸力的大小有关。非饱和土除了固相、气相和液相之外,还有独立的相“收缩膜”,当吸力增加后,收缩膜象一张薄的橡皮膜,将土颗粒拉在一起<sup>[8]</sup>。较大的吸力削弱了干湿路径对土体微观结构改变的影响,所以随着基质吸力的增加,反复干湿循环对固结特性的影响降低。

#### 2.4 非饱和土应力 - 应变关系的变化

图 4(a) 显示的是吸力和净围压均为 200 kPa 时,击实样和干湿循环样的应力 - 应变关系。试验表明,在同一吸力和净围压条件下,随着剪切应变的增加,两种试样的应力应变曲线均出现明显的应变硬化现象,但经过干湿循环后的试样,产生相同应变的应力有所减小,土样破坏时的强度也相应降低。在分别进行的 12 组三轴剪切对比试验中,绝大多数试验的应力 - 应变关系变化类似于图 4(a) 所示,试样剪切破坏

表现为鼓胀破坏。

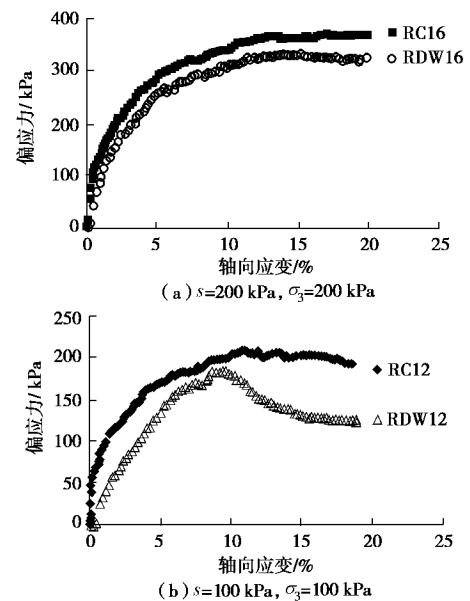


图4 应力 - 应变关系比较

Fig. 4 Comparison among stress-strain curves

在这次剪切试验中,有 2 组经过循环后的试样在剪切时出现了明显的剪切滑裂面,其应力 - 应变关系相应表现了明显的应变软化特征。图 4(b) 显示了其中一组吸力和净围压均为 100 kPa,击实样和干湿循环样的应力 - 应变关系对比曲线,试样经过干湿循环后,剪切出现明显的峰值,然后产生软化。

由此分析,试样在反复的湿化和干燥过程中,微观结构发生变化,可能在局部出现微小裂隙通道,剪切中发展成为滑裂面。由于本次试验的样本有限,加之存在试样尺寸效应,该结果有待进一步开展大比例尺寸试验和微观结构分析试验加以验证。

#### 2.5 反复干湿循环对非饱和土强度的影响

图 5 显示了击实样和干湿循环样在等吸力剪切试验中  $q-p$  平面上的临界状态线。 $q-p$  平面上的临界状态线表示为<sup>[9]</sup>

$$q = M(s)p + m(s) \quad (1)$$

式中,  $M(s)$  和  $m(s)$  都是吸力的函数,分别为临界状态线的斜率和  $q$  轴上的截距。

击实样和干湿循环样在不同吸力条件下的临界状态线参数  $M(s)$  和  $m(s)$  值如表 2 所示,可知,分别对击实样和干湿循环样而言,  $M(s)$  的变化很小,即可认为  $M(s)$  是一个与吸力无关的常量。常量  $M$  相当于 Fredlund 非饱和土抗剪强度表达式中的  $j'^{[9]}$ , Fredlund 双应力变量强度理论<sup>[8]</sup>的非饱和土抗剪强度表示为

$$t = c' + (s - u_a) \tan j' + (u_a - u_w) \tan j^b \quad (2)$$

击实样的  $M(s)$  平均值为 0.749, 相当于  $19.7^\circ$  的内摩擦角,干湿循环样的  $M(s)$  平均值等于 0.669, 相

当于 17.5° 的内摩擦角, 可见, 非饱和土试样经过干湿循环后, 内摩擦角降低, 降低的幅度大约为 10%。

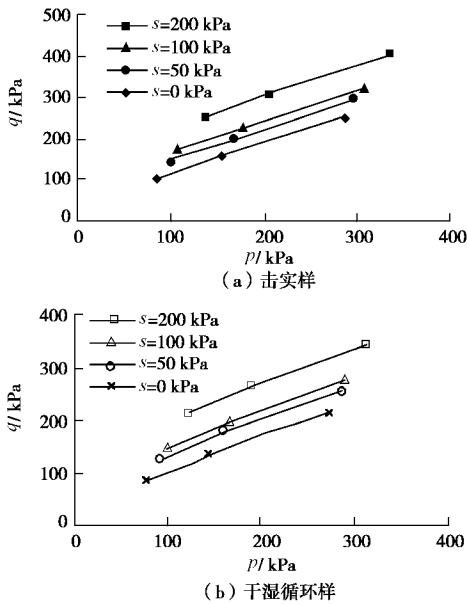


图 5 临界状态时偏应力与平均净正应力的关系

Fig. 5 Deviator stress plotted against mean net stress at critical state

试样  $m(s)$  随吸力的变化如图 6 所示, 在低吸力 ( $s \leq 200$  kPa) 范围内, 击实样和干湿循环样的  $m(s)$  值均随吸力呈线性增长。 $m(s)$  值随吸力的变化相当于 Fredlund 非饱和土抗剪强度表达式中的  $j^b$  值随吸力的变化<sup>[9]</sup>。在本次试验的吸力范围内 (200 kPa), 击实样和干湿循环样的  $m(s)$  值随吸力呈线性变化, 其变化率分别为 0.581, 0.499, 即相当于 15.3° 和 13.0° 的  $j^b$  值。

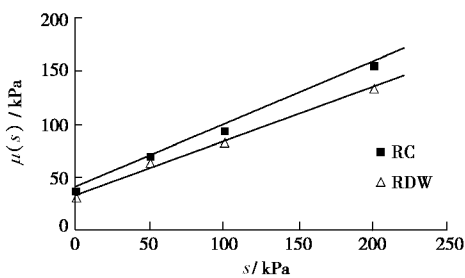


图 6 吸力对抗剪强度的贡献

Fig. 6 Contribution of suction to shear strength

$j^b$  值反映非饱和土强度随吸力增长的大小, 许多研究者的试验成果<sup>[10-12]</sup>显示, 吸力内摩擦角  $j^b$  随着吸力的增加而变化, 在基质吸力较低时为一常数, 超过某个吸力值后则随吸力增加而减小。不同的土,  $j^b$  随吸力增加的变化趋势有差别, 本文所研究土样 (包括击实样和干湿循环样) 在一定吸力范围内,  $j^b$  均基本为一常数, 但经过反复干湿循环后有所降低, 降低的幅度大约是 15%。说明非饱和土经过多次含水率变化

路径后, 土的微观结构发生了变化, 如土的盐溶质流失、局部微小裂隙通道的开展等削弱土粒间的联结力, 使土体产生了一定的强度降低效应,  $j^b$  值的降低是土的微观结构发生变化的宏观反映。

表 2 土的剪切试验参数值

Table 2 Values of soil parameters of shear tests			
试样	吸力/kPa	$M(s)$	$m(s)$ /kPa
击实样	0	0.759	36.1
	50	0.743	71.3
	100	0.751	92.6
	200	0.744	154.6
	平均值	0.749	
—————			
试样	吸力/kPa	$M(s)$	$m(s)$ /kPa
干湿循环样	0	0.676	31.0
	50	0.665	65.0
	100	0.667	82.4
	200	0.669	133.6
	平均值	0.669	

### 3 结 论

(1) 非饱和土经过反复干湿循环后, 在脱湿路径中达到相同含水率所需吸力减小, 说明土样经过循环后, 结构发生了一定的变化, 土体中最小的孔隙有所增大。

(2) 反复干湿循环后, 非饱和土的收缩特性发生变化。在基质吸力增加开始阶段 (屈服前) 试样收缩指数增加, 随着基质吸力的进一步加大, 试样屈服后, 收缩的孔隙尺寸效应不明显了。

(3) 经反复循环后, 非饱和土固结屈服后的压缩系数增大, 即压缩性增高, 但增高的幅度随基质吸力增大而降低。

(4) 经过反复吸湿和干燥后, 非饱和土产生相同应变的应力有所减小, 土样破坏时的强度也相应降低, 试样剪切破坏一般表现为鼓胀破坏。但极少数经过干湿循环后的试样, 其应力 - 应变关系表现明显的应变软化特征, 剪切破坏时产生了明显的剪切滑裂面。在反复的湿化和干燥过程中, 可能在局部产生微小裂隙, 剪切时发展成为破坏面。

(5) 反复吸湿和干燥对非饱和土强度产生较大影响。有效内摩擦角  $j'$  和吸力内摩擦角  $j^b$  值均有所降低,  $j'$  值降低的幅度大约是 10%,  $j^b$  值降低的幅度大约是 15%, 强度降低是土的微观结构发生变化的宏观反映。

随着对非饱和土研究的深入认识, 应进一步开展大比例尺寸试验和微观结构分析试验, 探讨非饱和土变形和强度干湿循环效应, 研究反复吸湿和干燥对非

饱和土的内在影响机理。

### 参考文献:

- [1] 曹玲, 罗先启. 三峡库区千将坪滑坡滑带土干-湿循环条件下强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(增): 93 - 97. (CAO Ling, LUO Xian-qi. Experimental study of dry-wet circulation of Qianjiangping Landslide's unsaturated soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(S): 93 - 97. (in Chinese))
- [2] 杨和平, 肖夺. 干-湿循环效应对膨胀土抗剪强度的影响[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2005, **2**(2): 1 - 5. (YANG He-ping, XIAO Duo. The influence of alternate dry-wet effect on the strength characteristic of expansive soils[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2005, **2**(2): 1 - 6. (in Chinese))
- [3] 龚壁卫, 吴宏伟, 王斌. 应力状态对膨胀土 SWCC 的影响研究[J]. 岩土力学, 2004, **25**(12): 1915 - 1918. (GONG Bi-wei, NG Charles WW, WANG Bin. Influence of stress states on soil-water characteristics of expansive soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(12): 1915 - 1918. (in Chinese))
- [4] 汪东林, 栾茂田, 杨庆. 非饱和和重塑黏土干湿循环特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(9): 1862 - 1867. (WANG Dong-lin, LUAN Mao-tian, YANG Qing. Experimental study on behavior of unsaturated remoulded clay subjected to drying and wetting cyclic paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(9): 1862 - 1867. (in Chinese))
- [5] 龚壁卫, 周小文, 周武华. 干-湿循环过程中吸力与强度关系研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(2): 207 - 209. (GONG Bi-wei, ZHOU Xiao-wen, ZHOU Wu-hua. Test on suction and strength of expansive soil in a desorption-absorption cycle of moisture[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(2): 207 - 209. (in Chinese))
- [6] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E. The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of compacted till[J]. Geotechnique, 1999, **49**(2): 143 - 159.
- [7] ALONSO E E, GENS A, JOSA A. A constitutive model for partially saturated soils[J]. Geotechnique, 1990, **40**(3): 405 - 430.
- [8] FREDLUND D G, RAHARDJO H. 非饱和土土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. (FREDLUND D G, RAHARDJO H. Unsaturated soil mechanics[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997. (in Chinese))
- [9] WHEELER S J, SIVAKUMAR V. An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil[J]. Geotechnique, 1995, **45**(1): 35 - 53.
- [10] GAN J K M, FREDLUND D G, RAHARDJO H. Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1988, **25**: 500 - 510.
- [11] 林鸿州, 李广信, 于玉贞, 等. 基质吸力对非饱和土抗剪强度的影响[J]. 岩土力学, 2007, **28**(9): 1931 - 1936. (LIN Hong-zhou, LI Guang-xin, YU Yu-zhen, et al. Influence of matric suction on shear strength behavior of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(9): 1931 - 1936. (in Chinese))
- [12] 詹良通, 吴宏伟. 非饱和膨胀土变形和强度特性的三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(2): 196 - 201. (ZHAN Liang-tong, NG C W W. Experimental study on mechanical behavior of recompacted unsaturated expansive clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(2): 196 - 201. (in Chinese))