

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.1706

干湿循环下滑带土强度特性与微观结构试验研究

江强强^{1,2}, 刘路路³, 焦玉勇^{1,4}, 王 浩¹

(1. 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; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 山东省城乡建设勘察设计院, 济南 山东 250031; 4. 中国地质大学(武汉) 工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 库区水位周期性波动, 巨大的水位变幅使库岸滑坡滑带土处于干湿循环变化之中, 而干湿循环作用影响土体的强度特性。基于此, 以三峡库区某典型库岸滑坡滑带土体作为研究对象, 对经历不同干湿循环次数的土样进行环剪试验、扫描电子显微镜 (SEM) 试验和核磁共振 (NMR) 试验, 分析干湿循环作用下滑带土强度特性和微观结构变化规律, 并初步探讨干湿循环对滑带土强度影响的微观机制。试验结果表明: 干湿循环作用下, 滑带土残余强度的劣化特性十分明显, 且前 3 次干湿循环导致土体强度衰减幅度较大, 之后衰减趋势减弱, 土体强度逐渐趋于稳定, 同时, 黏聚力的劣化效应大于内摩擦角; 随干湿循环次数的增加, 以叠聚状、凝块状为主的团粒逐渐分散、解体, 颗粒间连接由面-面接触逐渐向面-边、面-角接触演化, 表现为土体内孔隙数量增多, 土颗粒形态变化, 粒间距离增加, 微小孔隙逐渐向大孔隙演变; 干湿循环作用下, 滑带土内亲水性黏土矿物吸水膨胀、失水收缩而引发土颗粒、孔隙及胶结物等微结构变化是导致滑带土残余强度劣化的内在原因。

关 键 词: 滑带土; 干湿循环; 残余强度; 微观结构; 电镜扫描; 核磁共振

中图分类号: TU 441

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2019) 03-1005-09

Strength properties and microstructure characteristics of slip zone soil subjected to wetting-drying cycles

JIANG Qiang-qiang^{1,2}, LIU Lu-lu³, JIAO Yu-yong^{1,4}, WANG Hao¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Shandong Institute of Urban and Rural Construction Investigation, Jinan, Shandong, 250031, China; 4. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: Large hydro-fluctuation and periodical water level changes in the reservoir have caused the slip zone soil of the banks to experience drying-wetting cycles, which has a great influence on strength characteristics of soil. In this paper, a series of drying-wetting cycle tests on the slip zone soil from an ancient landslide is carried out. The soil samples after different runs of drying-wetting tests are then used to conduct the ring shear tests, scanning electron microscope (SEM) tests and nuclear magnetic resonance (NMR) tests. The results of these tests can be used to analyze the changes of soil microstructure and strength properties during drying-wetting cycles, and to investigate the microscopic mechanism of changes in strength properties. The research indicates that the deterioration of the residual strength of soil is obvious in drying-wetting cycles. The first three drying-wetting cycles result in a larger attenuation of soil strength, then the decay trend weakens and the soil strength gradually stabilizes. At the same time, the deterioration effect of cohesion is greater than the internal friction angle. Besides, the results also show that the clump-like aggregates are gradually disintegrated with the increase of drying-wetting cycles, and the way of connection of soil particles changes from plane-plane to plane-edge and plane-angle. Meanwhile, under the drying-wetting cycles, the number of pores in the soil increases, the morphology of the soil changes, the distance between the grains increases, and the small pores gradually change to the large pores in soil. The pore and cement microstructure changes of soil particles caused by clay mineral swelling and shrinkage are the causes of deterioration of the residual strength of slip soil under the drying-wetting cycles.

Keywords: the slip zone soil; drying-wetting cycles; residual shear strength; microstructure; SEM; NMR

收稿日期: 2017-08-15

基金项目: 国家自然科学基金 (No.51509243); 国家重点基础研究发展计划 973 项目 (No.2011CB710602)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51509243) and the National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2011CB710602).

第一作者简介: 江强强, 男, 1992 年生, 博士研究生, 主要从事岩土体力学特性及失稳机制的研究工作。E-mail: jiangqiangqiang123@126.com

通讯作者: 焦玉勇, 男, 1968 年生, 博士, 教授, 主要从事岩土工程方面的教学与科研工作。E-mail: yyjiao@cug.edu.cn

1 引言

三峡水库蓄水后,库区水位周期性涨落,库岸消落带内的岩土体将经历失水-饱水的长期循环过程,这种周期性地干湿交替过程将引起岸坡岩土体的组成成分、物理结构和力学性质等变化^[1-4],可能使稳定的库岸边坡向不稳定方向演化发展。

滑带作为滑坡中强度最为薄弱的区域,是控制滑坡稳定的关键部位。一般地,滑带土在自然状态已接近饱和,同时其渗透性小,对于水文地质条件变化小的一般滑坡而言,可认为滑带土长期保持饱和状态。而三峡水库运营过程中,库水位将出现30 m (145~175 m)的周期性变动,长时间的低水位疏干与高水位浸泡作用势必会引起库岸滑坡滑带土含水率变化。而滑带土的组成物质中通常含有较大比例的黏土矿物,其亲水性较强,物理力学性质受水的影响显著,含水率小幅度的变化即可能引起滑带土组成结构和力学性质的改变。近些年,已有一些学者在该领域开展相关研究。姚志华等^[5]对膨胀土在浸水过程中微观结构的变化进行了试验研究。李江等^[6]开展滑带土的室内饱水软化试验,研究了不同饱水程度下土样的微观结构和力学性质。黄斌等^[7]利用三轴排水固结试验研究了不同饱和度和滑带土样的强度和变形特性,发现土体黏聚力与内摩擦角均随着饱和度和含水率的提高而线性降低。李维树等^[8]通过原位直剪试验对滑带土在自然和饱水两种状态下的强度参数进行了对比研究。

就目前的研究而言,大多集中于不同含水率或饱和度下滑带土强度特性的软化规律,而针对滑带土在干湿循环作用(含水率循环变化)下的强度劣化机制和微细观结构变化研究尚涉及较少。基于此,本文以三峡库区某典型库岸滑坡滑带土体作为研究对象,对经历不同干湿循环次数的土样进行环剪试验、扫描电子显微镜(SEM)试验和核磁共振(NMR)试验,在获得干湿循环作用下滑带土的强度特性变化规律的基础上,利用数字图像处理技术对干湿循环下土样的微结构特征进行分析,并初步探讨干湿循环作用影响滑带土宏观强度劣化的微观机制。

2 试验概况

2.1 滑带土基本物理力学性质

本次试验的滑带土取自三峡库区某典型库岸滑坡。为了尽量减小对滑带土结构的扰动,采用人工刻取块状土样的方法进行取样,并对土样进行液体石蜡密封处理,蜡封好的试样表面包裹2层塑料保鲜

膜,再放入取样箱运回实验室。

室内对现场取回的原状土样进行了基本物理力学参数测试分析,滑带土的物性指标见表1。根据土样的孔隙比 e 、天然含水率 w 及土粒相对密度 d_s ,可求得滑带土的饱和度 $S_r \approx 75\%$,这也进一步说明了由于库水位的周期性波动,库岸滑坡滑带土并非长期保持饱和状态。颗粒级配分析结果显示(见图1),天然状态滑带土以黏粒、粉粒为主,其中黏粒含量占35%,粉粒含量占29%,粗粒组质量百分比约为36%,按照《土工试验规程》(SL237-1999)^[9]中关于土的工程分类的规定,该滑带土可初步定名为含粗粒的细粒土。

表1 滑带土物理性质指标

Table 1 Physico-mechanical indices of slip soil sample

土粒密度 $\rho_s/(\text{g}/\text{cm}^3)$	土粒相对 密度 d_s	含水率 $w/\%$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	孔隙比 e
1.75	2.68	11.2	31	14	0.40

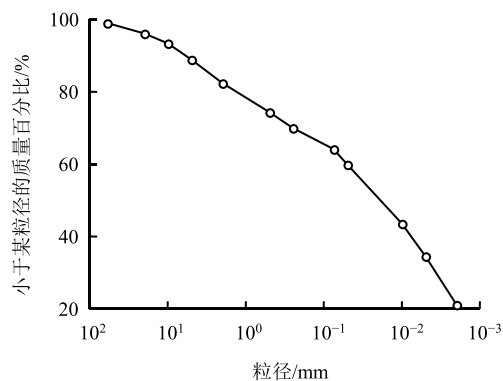


图1 天然滑带土颗粒级配曲线

Fig.1 Grain size distribution curve of slip zone soil

2.2 干湿循环方案

为了考虑库水位波动引起滑带土失水-饱水的循环交替过程对其强度特性的影响,设计了滑带土干湿循环试验(见图2)。由于本文主要研究的是滑带土的排水残余强度,而与其土的初始结构和应力历史无关,故可采用重塑土样进行试验。试验前将所取土样风干并碾压,过2 mm筛,再按照土样的饱和含水率配成重塑样,试样制好后装入环刀中进行干湿循环试验。

为使室内试验更加接近滑带土实际应力状态,试样均在法向应力为600 kPa条件下进行干湿循环(取样滑带土埋深约为30 m)试验。具体干湿循环过程:向环剪仪槽内加水使试样饱和,饱和时间持续2 d,饱和过程中法向应力保持恒定;然后用浴霸灯使试样在高温下脱水,脱水时间约为3 d,之后静

置 1 d 使试样内外温度和含水率均衡。如此反复，干湿循环次数分别为 0、1、2、3、4、5、6 次，每个干湿循环次数的样品为 4 个，其中 3 个用来完成环剪试验，另外 1 个样品风干后在样品最具代表性的部位中间取 2 块试样分别完成 SEM 试验和 NMR 试验。

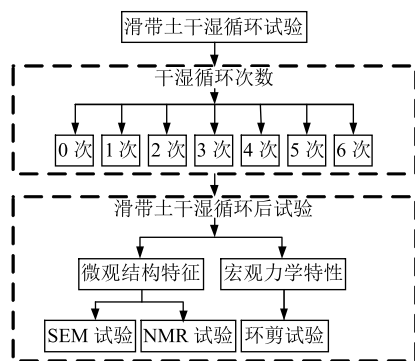


图2 滑带土干湿循环流程图

Fig.2 Flow chart of drying-wetting cycles of slip soil

试验中，滑带土自然状态下的含水率为 11.2%，饱和含水率为 15.0%，干湿幅度为 3.8%，干湿循环过程如图 3 所示。

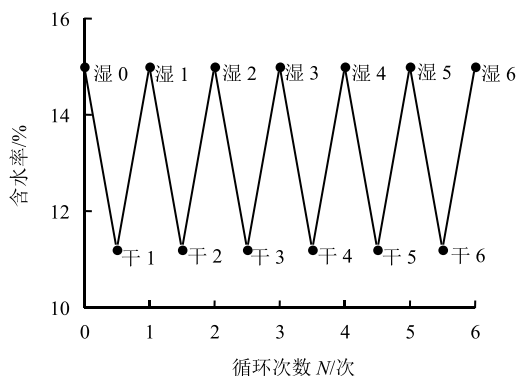


图3 滑带土干湿循环过程示意图

Fig.3 Schematic map of drying-wetting cycles of slip soil

2.3 环剪试验方法

试验在中科院武汉岩土力学研究所的 DTA-138 型土工环剪仪进行，该环剪仪可满足多种剪切速率的要求。试验采用排水固结剪切，剪切过程采用逆序加载下的多级剪切（正应力由大到小），正应力分别选择 400、200、100、50 kPa。根据前期的探索试验，剪切速率在 $v = 0.05 \sim 0.50$ mm/min 范围内时，得到的土样抗剪强度结果稳定，因此试验选用剪切速率 $v = 0.10$ mm/min 进行缓慢剪切，直到剪应力值达到稳定，即认为土样达到残余强度。

2.4 扫描电镜试验方法

干湿循环试验结束后，对试样进行干燥、掰断、撕皮和喷金等步骤处理以制作电镜扫描样品，对于每个扫描土样，选取具有代表性的扫描点进行拍摄。试验采用 Quanta 250 型扫描电子显微镜设备，在高真空扫描环境下进行，同时，为获得更多土体微观结构信息，分别采用了 50、100、800、2 000 倍 4 种不同放大倍数进行观察拍摄，图 4 为初始饱和状态的试样在不同放大倍数的 SEM 图像。

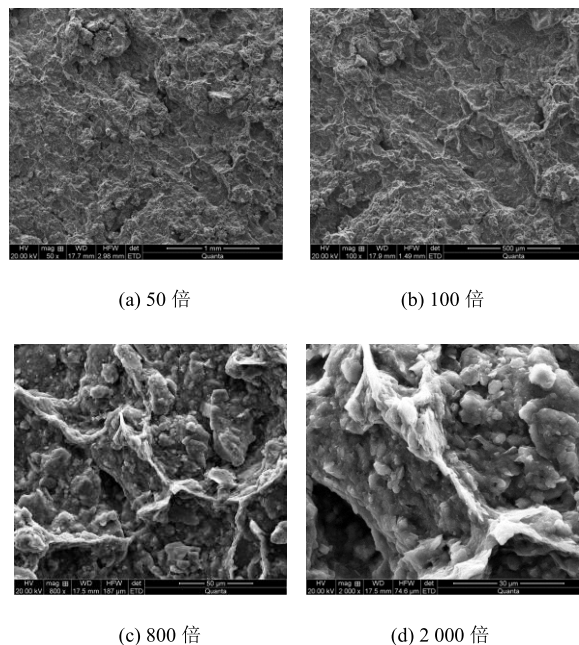


图4 不同放大倍数下土样 SEM 图像

Fig.4 SEM images of soil under different magnifications

2.5 核磁共振试验方法

核磁共振试验能够探测饱水土样孔隙结构中水的弛豫时间特征 T_2 。由核磁共振基础理论知，当多孔介质完全被水饱和时，单一孔隙的 T_2 值与孔隙的表面积与体积的比值成正比，因此，根据观测到的所有孔隙的 T_2 分布就换算出土样的孔径分布特征。本次试验采用的仪器为 PQ-001 型 MiniNMR 核磁共振分析仪，分别对经历不同干湿循环次数作用的滑带土重塑样进行了测定，分析干湿循环引起土样孔径分布的变化。

3 干湿循环下滑带土的强度特性

3.1 滑带土剪应力-位移特征

图 5 为土样在逆序加载方式下多级剪切试验的剪应力-位移曲线。初始阶段，土样的剪应力-位移关系曲线与单级剪切试验一样，即剪应力随剪切位移增加而迅速增大，在较小的位移处即达到峰值强

度；峰后随剪切位移继续增加出现明显的应力降，即应变软化现象；之后随位移增加，剪应力趋于稳定，最终达到一稳定的残余强度值。而在下一级较小法向应力下，剪应力随即衰减至较小值。剪切开始后随着剪切位移的增大，剪应力由大到小逐渐达到残余强度值，这是因为转换为小法向应力继续剪切时，土体部分弹性变形恢复，土体孔隙比变大，土颗粒趋于更松散；同时，第1次剪切完成后，剪切面上土颗粒已经发生定向排列，后续剪切过程中剪切面上主要为颗粒间的滑动摩擦。

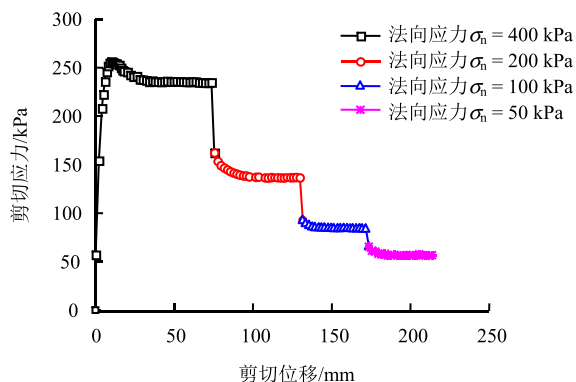


图5 滑带土剪应力-位移曲线

Fig.5 Shear stress-displacement curves of slip soil

另外，本文采用的逆序加载方式与之前较多学者^[10-11]利用的正序加载下剪切特性有所差别，主要表现为能够避免法向应力变化所引起土体的二次固结，从而在较小剪切位移下得到残余强度。

3.2 干湿循环次数对残余强度的影响

图6为经历不同次数干湿循环作用下土样的残余抗剪强度变化特征。由图可知，随干湿循环次数的增加，相同法向应力状态下，土样的残余强度整体呈衰减趋势，即干湿循环作用引起了土体强度的

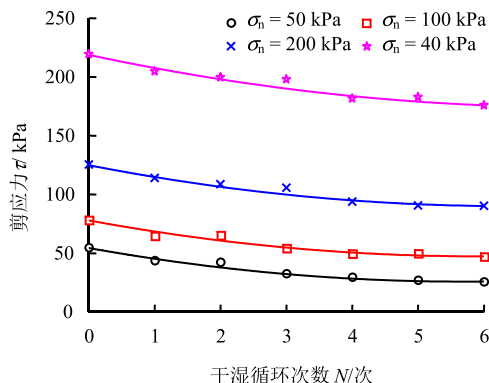


图6 干湿循环下残余强度劣化曲线

Fig.6 Residual shear strength degradation curves in drying-wetting cycles

劣化，且前3次干湿循环引起的强度劣化程度较大，之后劣化趋势逐渐减弱，土体强度趋于稳定。

基于Mohr-Coulomb强度准则，整理土样在不同法向应力下的剪切试验结果，得到干湿循环作用下滑带土的残余抗剪强度参数 c_r 、 ϕ_r 值，见图7和表2。根据干湿循环作用下滑带土的残余抗剪强度参数 c_r 、 ϕ_r 值的变化规律，利用非线性拟合方法可以建立 c_r 、 ϕ_r 值的劣化公式，分析发现，滑带土强度参数的劣化趋势可以用指数函数较好地拟合，拟合曲线如图7所示。

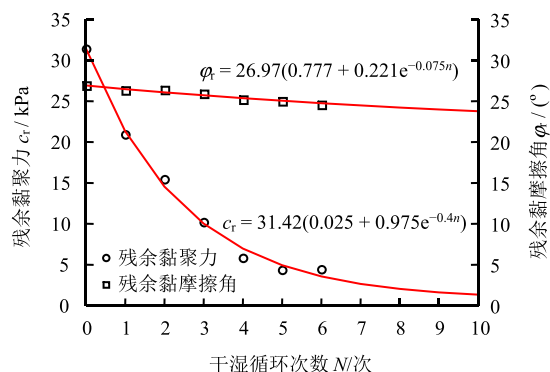


图7 干湿循环下黏聚力和内摩擦角的劣化曲线

Fig.7 Degradation curves of cohesion and internal friction angle under drying-wetting cycles

表2 干湿循环作用下滑带土残余抗剪强度参数

Table 2 Residual shear strength parameters in drying-wetting cycles

循环次数	c_r 值/kPa	S_i^c /%	ΔS_i^c /%	ϕ_r 值/(°)	S_i^ϕ /%	ΔS_i^ϕ /%
0	31.42	/	/	26.97	/	/
1	20.95	33.32	33.32	26.39	2.22	2.22
2	15.47	50.76	17.44	26.44	1.97	-0.25
3	10.21	67.50	16.74	25.95	3.78	1.81
4	5.84	81.41	13.91	25.24	6.41	2.63
5	4.37	86.09	4.68	25.04	7.16	0.75
6	4.46	85.81	-0.29	24.61	8.75	1.59

注：劣化度 S 为“正值”代表降低，“负值”代表增加。

同时，为衡量干湿循环作用对土体强度参数的影响，参考了文献[12]，定义劣化度 S 为干湿循环过程抗剪强度参数降低的程度，其计算公式如下：

$$S_i^c = [(c_0 - c_i) / c_0] \times 100\% \quad (1)$$

$$S_i^\phi = [(\phi_0 - \phi_i) / \phi_0] \times 100\% \quad (2)$$

$$\Delta S_i^c = (S_i^c - S_{i-1}^c), \quad \Delta S_i^\phi = (S_i^\phi - S_{i-1}^\phi) \quad (3)$$

式中： S_i^c 和 S_i^ϕ 分别为 i 次干湿循环后抗剪强度参数

c_r 与 ϕ_r 值的总劣化度; ΔS_i^c 和 ΔS_i^ϕ 分别为第 i 次干湿循环引起 c_r 与 ϕ_r 值的劣化度。不同干湿循环次数下残余抗剪强度参数 c_r 与 ϕ_r 值的劣化度见表 2。由表可以看出:

(1) 滑带土的残余黏聚力 c_r 值随干湿循环次数增加而逐渐衰减; 其中, 前 3 次干湿循环作用下 c_r 值衰减幅度较大, 达到了 67.5%, 而经过 5 次干湿循环后 c_r 值变化趋势趋于平缓, 单次劣化度小于 5%。说明前几次干湿循环作用使土体颗粒间的黏结及胶结作用遭受严重的破坏, 以致滑带土残余黏聚力大幅降低; 而在后续的干湿循环过程中, 由于环刀的侧向约束作用, 土体颗粒间联结作用的变化逐渐趋于缓慢, 对残余黏聚力的影响也越来越小。这与已有类似试验^[13-14]揭示的现象是相同的。

(2) 与残余黏聚的变化规律类似, 残余内摩擦角 ϕ_r 值随干湿循环作用次数增加也呈减小之势, 但其衰减幅度明显小于 c_r 值。经 6 次干湿循环作用后, ϕ_r 值由初始状态下的 26.97° 逐渐减小至 24.61° , 劣化度仅为 8.75%。 ϕ_r 值的变化说明干湿循环作用也导致土体内部颗粒的形状、大小、密实度及颗粒间的接触形式等发生了变化。

4 干湿循环下滑带土的微观结构特征

4.1 SEM 试验结果与分析

4.1.1 微观结构初步观察

在兼顾图像清晰度及微观结构信息的前提下, 本次试验最终选用 800 倍的微观图像照片进行分析。图 8 分别给出了经历 0、1、3、6 次干湿循环后的土样放大倍数为 800 倍的 SEM 图像。

对比发现, 经不同次数干湿循环后, 土颗粒骨架和孔隙形态变化明显。未经干湿作用的土骨架颗粒多以叠聚状和凝块状为主, 颗粒连接多为面-面接触, 以小孔隙为主; 随着干湿循环次数的增加, 颗粒间的团聚性遭到破坏, 部分团粒开始分离, 甚至逐渐脱落, 散乱地堆落在其他颗粒周围及孔隙中, 颗粒间面-边、面-角接触明显, 表现为土体内孔隙数量增多, 孔隙空间增大, 结构更趋于疏松。

4.1.2 微观结构特征参数分析

利用图像处理软件 IPP (image-pro plus) 提取干湿循环后滑带土样 SEM 图像中存储的微观结构信息, 如孔隙和土颗粒的数量、面积、周长及角度等几何信息, 以分别讨论经历不同次数干湿循环后滑带土样的孔隙等效直径、颗粒圆形度及颗粒分形维数等微观特征参数的变化。

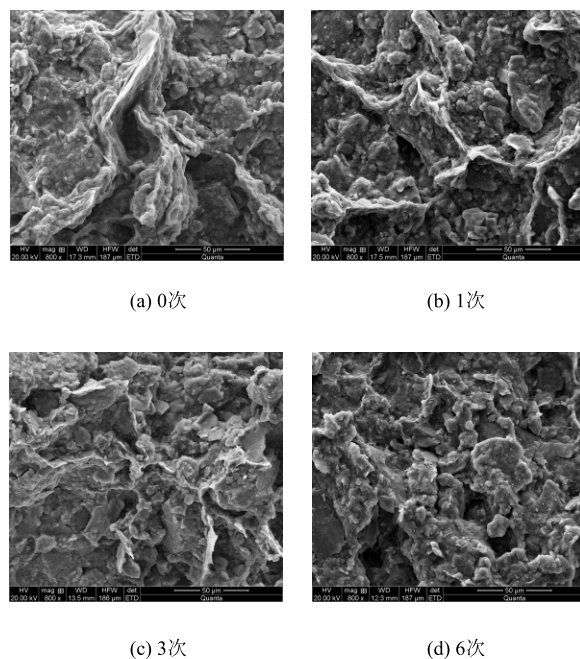


图 8 不同次数干湿循环后土样 SEM 图像
Fig.8 SEM images of soil under different drying-wetting cycles

(1) 孔隙等效直径

定义孔隙等效直径来表示孔隙大小, 即与孔隙面积 S' 相等的圆的直径为等效直径 d , 其计算公式为

$$d = \sqrt{\frac{4S'}{\pi}} \quad (4)$$

根据文献[15]的分类方法将土微观孔隙根据等效直径大小分为 4 类: 微孔隙 ($d < 5 \mu\text{m}$), 小孔隙 ($5 < d < 10 \mu\text{m}$), 中孔隙 ($10 < d < 20 \mu\text{m}$), 大孔隙 ($d > 20 \mu\text{m}$)。图 9 为不同次数干湿循环作用下各类孔隙数量占比的变化统计图。从图中可看出, 土体内孔隙孔径多分布在 $5 \sim 20 \mu\text{m}$ 之间, 以小、中孔隙为主, 数量占比可达总量的 80% 之多。对于经历不同干湿循环作用的土样, 中、大孔隙数量随循环次数逐渐增加, 而小孔隙不断减少, 这与图 8 中 SEM 图像的肉眼初步观察结果是一致的。究其原因主要是土在干湿循环的过程中团粒间的联结不断遭受损伤、破坏, 粒间产生的微裂纹逐渐扩展, 甚至导致部分团粒解体, 使原来粒间的微小孔隙不断向更大的孔隙结构演变。

(2) 颗粒平均圆形度

定义平均圆形度 R 来描述不同次数干湿循环作用下土颗粒形状的变化, 平均圆形度的计算公式如下:

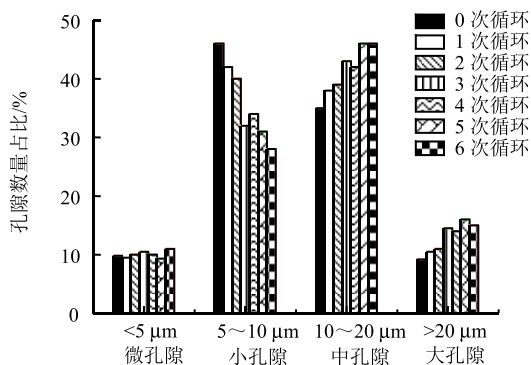


图9 不同次数干湿循环后土样各类孔隙数量

Fig.9 Amounts distribution of pores under different drying-wetting cycles

$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{4\pi S_i}{L_i^2} \quad (5)$$

式中： n 为颗粒数量； S_i 为颗粒面积； L_i 为颗粒的周长。圆形度 R 的取值区间为 $(0, 1)$ ， R 值越大，代表颗粒越接近于圆形。图10为干湿循环后滑带土试样微观图像上提取到的颗粒平均圆形度。总体而言，随干湿循环次数增加，颗粒平均圆形度呈逐渐增长趋势，表明干湿循环作用使颗粒形状逐渐趋于圆润，其主要由干湿循环作用使呈复杂形态的团粒分散脱离成细小颗粒所致。此外，值得注意的是，前3次干湿循环过程中，颗粒平均圆形度处于波动变化，之后才逐渐增长，这主要与干湿循环作用下颗粒微结构的调整有关。黏土矿物颗粒的吸水膨胀及失水收缩均使团粒间联结受到损伤破坏，产生微小裂隙，使微观图像上团粒的周长 L_i 增加，因而颗粒圆形度逐渐减小；而随干湿循环作用继续，团粒间裂隙不断扩展、连通，复杂形态的团粒分散、解体，圆形度才逐渐增加。

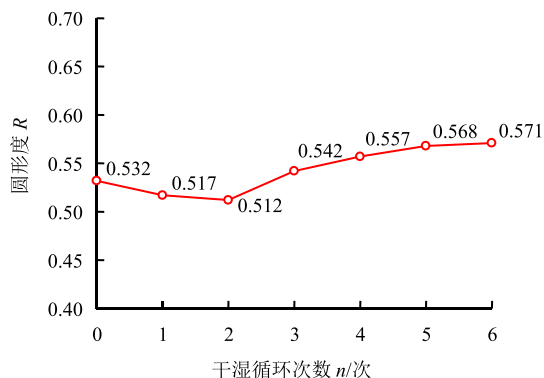


图10 不同次数干湿循环后颗粒平均圆形度

Fig.10 Average roundness of particles under different drying-wetting cycles

(3) 颗粒分形维数

土颗粒在微观结构上呈十分不规则复杂形态，而分形方法能够通过分形维数对形体不规则性进行较好的定量描述。计算分形维数的方法很多，如盒计数法、面积-体积法及周长-面积法等多种方法，本次研究主要针对的是SEM图像上土颗粒轮廓的粗糙程度，因而选用面积-周长法计算分形维数，计算公式如下：

$$\lg L_i = \frac{D}{2} \lg S_i + C \quad (6)$$

式中： D 为分形维数； C 为常数。分形维数 D 主要表征的是颗粒微观界面的粗糙程度。分形维数越大，颗粒界面的粗糙程度越低；反之，粗糙程度则越高。

通过提取SEM图像中每个土颗粒结构的面积和等效周长，将这些数据绘制在双对数坐标中，对数据进行直线拟合，分形维数 D 数值上等于拟合得到的直线斜率 K 的2倍，即 $D = 2K$ 。图11为未经干湿循环作用的试样SEM图像中提取得到的数据点，根据拟合的直线可以得到颗粒的分形维数 $D = 1.208$ 。基于此，可以得到不同次数干湿循环作用下滑带土的颗粒分形维数，如图12所示。可以看出，颗粒分

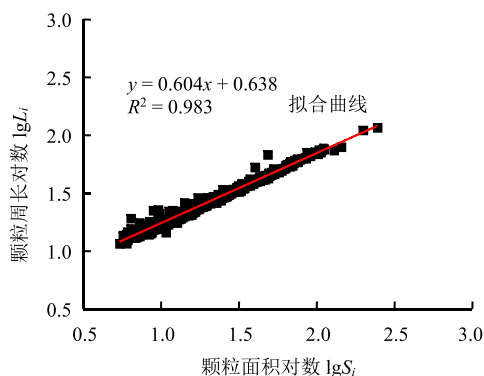


图11 土颗粒面积-周长双对数图

Fig.11 lg(Area)-lg(Perimeter) graph of test data

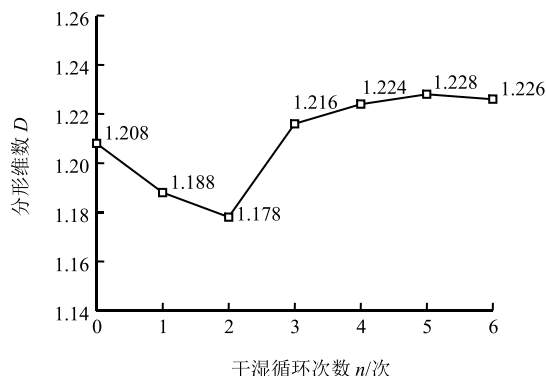


图12 不同次数干湿循环后颗粒分形维数

Fig.12 Fractal dimension of particles under different drying-wetting cycles

形维数随干湿循环次数表现为先减小、后增加，其原因与前述颗粒平均圆形度相同，前几次干湿过程中团粒间产生微裂隙，使 SEM 图像上颗粒轮廓更趋于复杂，而后随干湿循环作用继续，复杂形态的团粒逐渐分散成形态稍简单的次一级团粒。

4.2 NMR 试验结果与分析

根据核磁共振理论，横向弛豫时间 T_2 分布反映了孔隙孔径信息， T_2 值越小，代表孔隙的孔径越小，而孔隙大，则 T_2 值也大；同时，弛豫时间与信号谱积分面积的变化可反映土体内孔隙总体积的变化。图13所示为滑带土重塑样核磁共振 T_2 时间分布，图中 T_2 分布曲线均出现两个峰，根据 T_2 值与孔隙孔径间的关系，左、右峰积分面积分别代表的是小、大孔隙的体积，表3为经不同次数干湿循环试样 T_2 分布曲线积分面积及每个峰所占比例的统计结果。

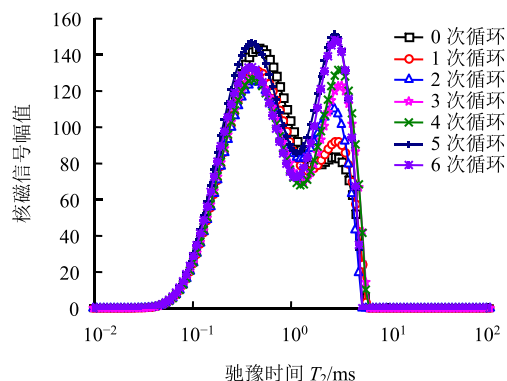


图 13 不同次数干湿循环后土样 T_2 分布曲线

Fig.13 T_2 distribution curves of soil under different drying-wetting cycles

表3 T_2 分布曲线积分面积的统计表

Table 3 Integral area statistics of T_2 distribution curves

循环次数/次	峰总积分面积	左峰积分面积	右峰积分面积	左峰积分面积占比	右峰积分面积占比
0	4 528	3 571.7	956.3	0.788 8	0.211 2
1	4 617	3 349.6	1 267.4	0.725 5	0.274 5
2	4 726	3 069.1	1 656.9	0.649 4	0.350 6
3	4 803	2 981.7	1 821.3	0.620 8	0.379 2
4	4 898	3 034.3	1 863.7	0.619 5	0.380 5
5	4 954	3 000.1	1 953.9	0.605 6	0.394 4
6	4 963	2 994.7	1 967.3	0.603 6	0.396 4

综合图12和表3可以看出，总积分面积及右峰积分面积占比随着干湿循环次数的增加而逐渐增大，而后趋于稳定。这说明干湿循环作用使滑带土重塑样中孔隙的体积增加，即孔隙比增大，但干湿循环作用一定次数后，孔隙比不再继续增大而趋于稳定；同时，试样中大孔隙所占的比例逐渐增加，而小孔

隙占比减少。上述结果与SEM图像所揭示的土样微观孔隙结构变化规律是一致的，也进一步验证了扫描电镜试验结果的准确性。

4.3 微观机制分析

从对SEM图像的肉眼初步观察和NMR试验结果来看，干湿循环作用下粒间联结作用遭受损伤破坏，颗粒间距离增大，甚至部分团粒中颗粒分离、脱落，使土体内微小孔隙逐渐向大孔隙演化；此外，颗粒的平均圆形度 R 与颗粒分形维数 D 随干湿循环次数 N 的变化也揭示了颗粒的形态也由复杂的团粒逐渐向趋于形态简单的次一级细小团粒转变。而与此同时，土体宏观的残余强度随干湿循环作用而逐渐劣化，表现为残余抗剪强度参数 c_r 、 ϕ_r 值不断减小。根据宏观和微观两种尺度的辩证关系，即土体的宏观变形特征是其微观结构变化的集中体现，而微观结构演化规律则是宏观力学行为的内在机制，可认为干湿循环作用下滑带土残余强度劣化就是土体内亲水性黏土矿物吸水膨胀、失水收缩从而引发土体内颗粒、孔隙及胶结物等微结构变化的综合体现。

土体的干湿循环过程，是水分在土体内反复渗入和渗出的过程。土在增湿过程中，一方面，水分的增加使部分胶结物被溶解，降低了土粒间的联结作用；另一方面，在黏土颗粒表面的静电引力作用下极性水分子被吸附，结合水膜增厚，水膜的楔入压力使颗粒间距离增大，甚至造成团粒分散成次一级团粒，分子引力减小；两方面作用使土体在宏观上表现为孔隙度增大、强度劣化。与此相反的是，风干过程中水分子渗出，使粒间联结作用增强，部分次一级团粒重新聚集在一起，使土体强度恢复。但这两个过程不是完全可逆的，无论是黏土矿物颗粒吸水膨胀还是失水收缩过程都会引起颗粒团聚体间不可逆的变形破坏，产生新的裂隙，并在后续的干湿过程中持续扩展，使土体的微观结构不断解体。而实际试验中，由于环刀的侧向约束，一定次数干湿循环之后，土样微观结构的变化逐渐趋于缓慢，其抗剪强度参数的劣化趋势也逐渐趋于缓慢。

以往的研究认为，土体的黏聚力主要来源于颗粒间的黏结力、分子引力及与胶结物间的胶结力等，而内摩擦角则主要取决于颗粒的形态、密实度及接触方式等。干湿循环导致了土样内微裂隙的不断发育以及团粒的解体，颗粒间黏结力、分子引力及胶结作用减弱，因此，黏聚力劣化速度明显较快。同时，团粒的分散解体使颗粒的形态也趋于光滑、圆

润,导致了土样内摩擦角降低,但颗粒的重新排列却也使颗粒间接触点增多,因此其降低幅度较小。

5 结 论

(1) 干湿循环作用下,以叠聚状、凝块状为主的团粒逐渐分散、解体,颗粒间连接由面-面接触逐渐向面-边、面-角接触演化,表现为土体内孔隙数量增多,结构更趋于疏松。

(2) 干湿循环作用还改变土体内孔隙孔径分布。随干湿循环次数的增加,土体内孔径为 $5\sim 10\ \mu\text{m}$ 的小孔隙含量逐渐降低,而孔径为 $>10\ \mu\text{m}$ 的中、大孔隙含量升高,表现为土颗粒间距离逐渐增加,微小孔隙逐渐向大孔隙演变。

(3) 干湿循环过程中土颗粒形态受微观裂隙发展过程的控制。裂隙的萌生、张开先使团粒的形态更趋于复杂,而其扩展及连通过程由于导致了团粒解体反而使颗粒形态向规则状发展,表现为微观结构特征参数颗粒平均圆形度与分形维数随干湿循环作用次数均呈先减后增的变化趋势。

(4) 在干湿循环作用下,滑带土残余强度的劣化效应明显,且前3次干湿循环作用导致土体强度衰减幅度较大,之后衰减趋势逐渐减弱,土体强度趋于稳定;此外,黏聚力的劣化幅度明显大于内摩擦角的幅度。

(5) 干湿循环作用下滑带土内亲水性黏土矿物吸水膨胀、失水收缩而引发土颗粒、孔隙及胶结物等微结构变化是导致滑带土残余强度劣化的内在原因。

参 考 文 献

- [1] ERGULER Z A, ULUSAY R. Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(2): 355—370.
- [2] 邓华锋, 李建林, 朱敏, 等. 饱水-风干循环作用下砂岩强度劣化规律试验研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(11): 3306—3312.
DENG Hua-feng, LI Jian-lin, ZHU Min, et al. Experimental research on strength deterioration rules of sandstone under “saturation-air dry” circulation function[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(11): 3306—3312.
- [3] 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(增刊1): 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(Suppl.1): 93—97.
- [4] 梁和成, 单慧媚. 天然饱水-失水对三峡库岸边坡土体的影响研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(7): 1837—1848.
LIANG He-cheng, SHAN Hui-mei. Effect of natural water-saturation and water-loss on bank-slope soil in Three Gorges reservoir[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(7): 1837—1848.
- [5] 姚志华, 陈正汉, 朱元青, 等. 膨胀土在湿干循环和三轴浸水过程中微观结构变化的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(1): 68—76.
YAO Zhi-hua, CHEN Zheng-han, ZHU Yuan-qing, et al. Meso-structural change of remolded expansive soils during wetting-drying cycles and triaxial soaking tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(1): 68—76.
- [6] 李江, 许强, 胡泽铭, 等. 川东红层原状滑带土饱水软化试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015(增刊2): 4333—4342.
LI Jiang, XU Qiang, HU Ze-ming, et al. Experimental research on softening of undisturbed saturated slip soil in eastern of Sichuan province red bed[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015(Suppl.2): 4333—4342.
- [7] 黄斌, 傅旭东, 谭凡, 等. 含水率对滑带土强度及变形影响试验研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(9): 57—62.
HUANG Bin, FU Xu-dong, TAN Fan, et al. Experimental study of relationship between water content and strength or deformation of slip soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(9): 57—62.
- [8] 李维树, 邬爱清, 丁秀丽, 等. 三峡库区滑带土抗剪强度参数的影响因素研究[J]. *岩土力学*, 2006, 27(1): 56—60.
LI Wei-shu, WU Ai-qing, DING Xiu-li, et al. Study on influencing factors of shear strength parameters of slide zone clay in Three Gorges Reservoir area[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(1): 56—60.
- [9] 中华人民共和国行业标准编写组. SL237—1999土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. SL237—1999 Specification of soil test[S]. Beijing: China Water Power Press, 1999.