文章编号：1000－7598－（2007）增刊－0093－05

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

曹　玲，罗先启

（三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室，湖北 宜昌 443002）

摘　要：三峡库区滑坡的失稳，主要是水库水位的升降、大气降雨和人类活动等因素的影响引起的，滑坡的滑带土在水的反复浸泡作用下，其强度降低是导致大量古滑坡复活或产生新生型滑坡的主要原因。通过对千将坪滑坡滑带土在干—湿循环试验（DWC）条件下与天然非饱和土 CU 试验结果比较，研究了干-湿循环条件下滑坡滑带土强度特性及其变形特性，揭示了千将坪滑坡失稳机制。

关　键　词：非饱和土；干-湿循环；吸力；变形；抗剪强度

中图分类号：TU 454　　**文献标识码：**A

Experimental study of dry-wet circulation of Qianjiangping Landslide's unsaturated soil

CAO Ling,　LUO Xian-qi

(China Three Gorges University Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Yichang 443002, China)

Abstract: For the instability landslide in the Three Gorges Reservoir region, the change of the reservoir water level, atmospheric precipitation and other factors arising from the impact of human activities will be the chief reasons. Landslide sliding zone which repeatedly immersed in water under its intensity is a large number of ancient landslide or produce new landslide in the region. Based on the slide belt Qianjiangping landslide in wet-dry cycle test (DWC) and the consolidated-undrained triaxial test (CU) of unsaturated soil under natural conditions results, studied wet-dry cycle Qianjiangping landslide conditions slippery soil strength and deformation characteristics, reveals the instability mechanism of Qianjiangping landslide.

Key words: unsaturated soil; dry-wet circulation; suction; deformation; shear strength

1　引　言

三峡库区滑坡的失稳，主要是水库水位的升降、大气降雨和人类活动等因素的影响引起的，其中千将坪滑坡为一顺层基岩滑坡，滑坡的地形地貌、物质组成及结构构造在三峡库区具有典型代表性；该地段有顺向坡、岩层软硬相间的斜坡结构特点，具备发生水库新生型滑坡的物质基础。滑坡发生时，恰逢雨季及三峡水库第一期蓄水，因此深入研究千将坪滑坡成因机制，对于预测、预防和治理三峡库区水库新生型滑坡具有十分重要意义。本文通过对千将坪滑坡滑带土在干-湿循环试验（DWC）条件下与天然非饱和土 CU 试验结果比较，研究了干—湿循环条件下非饱和土体强度特性，揭示了千将坪滑坡失稳机制。

2　滑带土组成及特征

千将坪滑坡为一顺向坡，岩层软硬相间，在滑坡范围内，唯一见有的一层含碳质页岩夹层，厚 20~30 cm，这是滑坡原生沉积夹层，在后期构造运

收稿日期：2007-04-28
基金项目：国家自然科学基金（No.50609012）；湖北省自然科学基金资助项目（No.2005ABA295）；湖北省教育厅重大科学研究计划资助项目（No.Z200513003）；三峡大学科学基金资助项目（No.2004C03）。
作者简介：曹玲，女，1979 年生，讲师，主要从事边坡工程、非饱和土方面的研究。E-mail: caoling1999@163.com

动层间错动下，碳质页岩夹层受到改造，形成层间剪切错动泥化带，在三峡水库第一期蓄水并逢雨季，千将坪滑坡即以此作为滑带下滑。在勘探平硐、钻孔岩芯以及地表露头都可见到这一典型的具有鲜明特点的滑带土。本次试验用土均在滑坡体牵引区中部、滑带土特征最为清楚的平硐 1 处进行取样。如图 1 所示。



图 1 秭归县沙镇溪镇千将坪滑坡远眺图
Fig.1 Qianjiangping landslide in Zigui Country of Shazhenxi Town

层间剪切错动泥化带为碎斑岩局部糜棱岩化，原岩成份为碳质页岩夹灰岩条带或团块，碎裂岩分布于错动面上部，岩层挤压成片状，泥质钙质胶结，风化明显，受滑动牵引，普见纵向擦痕及阶步。



图 2 层间剪切错动泥化带照片
Fig.2 The photo of the shear slide mudding zone

对此滑带土做颗粒分析，其颗粒组成中粒径大于2 mm颗粒约占49 %~53 %，本次试验用（2 mm以下）的土体颗分曲线如图3所示。其物理性质试验指标均值：湿密度（r ）干密度（r_d）分别为2.03/1.79 g/cm^3，天然含水率（ω）13.5 %，比重（G_s）2.70，孔隙比（e）为0.52，饱和度（S_r）为70.2 %，液限（W_L）为34.7 %，塑限（W_P）为18.3 %。

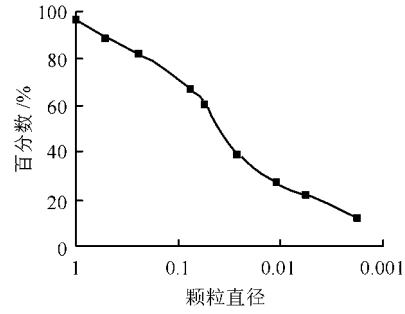

图 3 用于非饱和土 DWC 的颗分曲线
Fig.3 Particle-size distribution curve of the soil for the unsaturated CWY test

3 滑坡滑带土（CU 剪切试验）

千将坪滑坡滑带土在一般条件下处于非饱和状态，其抗剪强度一般通过同时控制吸力和净周围压力的非饱和土三轴固结不排水（consolidated-undrained test）剪切试验确定。

3.1 试样制备

试验前将土料烘干并碾碎，过 2 mm 的筛，按照液限含水率配成湿土，闷料 24 h 使土中含水量均匀，采用削土法制样，将土样削成高 100 mm、直径为 50 mm 的重塑黏土试样。试样物理参数见表 1。

表 1 土样物理参数
Table 1 Physical parameters of the soil samples

重量 /g	重度 /kN·m^{-3}	比重	含水率 /%	干密度 /g·cm^{-3}	孔隙比
393.1	19.6	2.70	19.6	1.67	0.57

3.2 试验仪器设备

采用英国 GDS 公司生产的饱和—饱和应力路径双室三轴仪，同时做控制吸力和净周围压力的非饱和土三轴固结不排水（CU）剪切试验。该仪器最大的优点是避免了试样体积测量误差，并通过一个差压传感器自动连续地测量参照管和内室的水位差变化，从而可以随时直接读取试样在试验过程中的体变[2]。

3.3 试验方案

试验按吸力控制情况分为 4 组，吸力分别为 0，50，100，200 kPa，每组 3 个土样，净周围压力（$\sigma_3 - u_a$）分别为 50，100，150 kPa。相同吸力下的 Mohr 圆归为一组，其公切线即为破坏包线，并得出其破坏包线的截距和斜率，分别为不同吸力条件下的c 和φ，如表 2 所列。由表可知，在试验的吸力范围内（0~200 kPa），ϕ 值变化不大。当吸力为 0 时，即为饱和土的三轴试验，由此可确定 $\phi' = 26.6°$。

表 2　滑带土在不同吸力情况下的抗剪强度指标
Table 2　Shear strength of the soil in shearing zone under different suction

指标	不同围压(kPa)下吸力 /kPa			
	0	50	100	200
c /kPa	10	40.3	59.1	94
ϕ /（°）	26.6	27.2	27.5	28.2

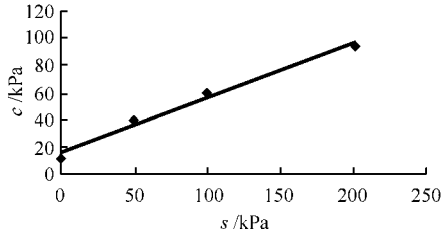

图 4　总黏聚力与吸力关系
Fig.4　The relationship between the total cohesion and suction

由表 2 可绘出图 4，可见总黏聚力 c 与吸力（u_a-u_w）基本成线性关系，线性方程可表示为

$$c=c'+(u_a-u_w)\tan\phi^b \quad (1)$$

式中：c' 为在给定的基质吸力和净法向应力为 0 的情况下，引伸的 Mohr-Coulomb 包面与剪应力轴的截距，这样可得到 $c'=15.7$ kPa，$\phi^b=22°$。

综合上述结果，千将坪滑坡滑带土的强度可以用库仑公式表示：

$$\tau_f=c'+(\sigma-u_a)_f\tan\phi'+(u_a-u_w)_f\tan\phi^b=15.7+0.5(\sigma-u_a)_f+0.405(u_a-u_w)_f \quad (2)$$

式中：τ_f 为破坏面上的剪应力，即土的抗剪强度；$(\sigma-u_a)_f$ 为破坏面上的净法向应力；$(u_a-u_w)_f$ 为破坏面上的吸力。

4　滑带土干-湿循环试验（DWC）

由于非饱和土干-湿循环对强度的影响这一问题的复杂性，使得有关干-湿循环对非饱和土强度的影响的研究结果很少。一般干-湿循环试验都是在无荷载作用下进行[3, 4]，这与具有一定埋深的实际边坡土体是不相符的。本文以千将坪滑坡为对象，模拟实际工况下具有一定埋深的滑坡滑带土，在干-湿循环条件下的强度变化特性，为揭示滑坡失稳机制提供试验数据。

4.1　试验方案

图 5 为本次试验的应力路径。试验分为饱和固结、干-湿循环、剪切三个阶段。干-湿循环试验是采用基质吸力来加以控制模拟土体的干燥和浸湿过程（浸湿-干燥-浸湿），得到土体在干-湿循环之后的 q-ε_a 等关系曲线，具体试验过程为：试样放入压力室后，在初始压力 p_a 下经过反压饱和，并在各向等压（$p=\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3$）下分级加载至围压等于 p_0（$p_0>p_a$）固结稳定，3 个试样的 p_0 分别控制为 50，100，150 kPa。为了使吸力在加压过程中保持不变，本次试验采用的加压速率控制在 0.6 kPa/h 左右，加压速率的大小可以利用下式估算[5, 6]：

$$R_L=\frac{2c_v^w u_{lim}}{h^2} \quad (3)$$

式中：R_L 为加压速率；c_v^w 为非饱和土样中水相的固结系数；u_{lim} 为试样顶部的超孔隙水压力的界限值，可取所控制吸力的10 %；h 为试样的高度。

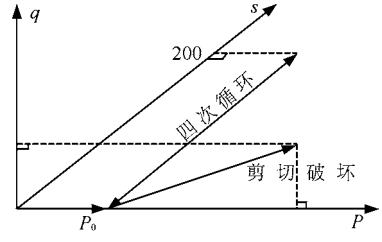

图 5　试样干-湿循环的应力路径
Fig.5　Stress path of the dry-Wet circulation test

固结稳定标准参考《土工试验规程》（SL237-1999）定为：2 h 排水量小于 1 mm^3。饱和、固结稳定后，控制 $(p-u_a)=p_0$ 不变，在各向等压的作用下基质吸力从 0 逐级增加至某一设定值，这一过程中，吸力平衡的判别非常重要，它直接影响到后继试验成果的可靠性。本次试验所采用吸力平衡判别标准：24 h 内测得试样排水或吸水量小于试样体积的 0.05 %[2, 5, 6]。稳定后仍控制净围压不变，基质吸力再从设定值逐级卸载至 0。如此通过吸力的加、卸载完成一次土体的干-湿循环。

文献[7]表明，非饱和土体在经过 4 次干-湿循环后强度值达到稳定，故在本次试验中，对试样进行 4 次同样的干湿循环过程，试验方法为：控制 $(p-u_a)=p_0$ 不变，在各向等压的作用下基质吸力从 0 逐级增加至某一设定值，稳定标准同上，稳定后测定总体积变形、排水量、计算含水率。稳定后仍控制净围压不变，基质吸力再从设定值逐级卸载至 0，稳定后同样测定体积变形量、排水量、计算含水率，如此通过吸力的加卸载完成一次土体的干-湿循环。干-湿循环完成后，控制 (u_a-u_w) 不变，施加偏应力，进行三轴剪切试验。参考文献[8]中“三轴试验的应变速率”和《土工试验规程》（SL237-1999）中“剪切速率的确定”，在试验中，剪切速率确定为 0.155 mm/min。

4.2 试验结果及分析

图 6 和表 3 为在不同围压情况下试样的体积应变和含水率在干-湿循环过程中的变化情况。结果表明，在本次干-湿循环试验的初始 1，2 次循环中，试样的压缩变形较大，而在随后的循环中，干缩变形量与湿胀变形量十分相近，但二者并非一个完全可逆的过程，其吸水湿化膨胀的速度比失水干燥收缩的速度要快。以往很多的试验研究表明，土水特征曲线具有逆向回滞现象[7, 9]，如果把土体变形认为是微观变形与宏观变形的总和，则在此可以看作微观变形在结构层次上是一个可逆过程。另外，从图中还可看到，在干-湿循环阶段，不同固结压力下同样的吸力变化范围内，体变的大小相差不大，这表明了在这一阶段，吸力对体变性状的影响占主导地位。

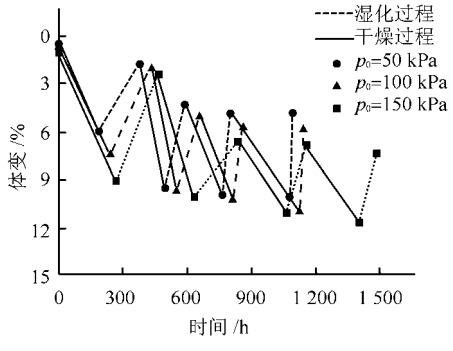

图 6 不同固结压力下干-湿循环过程中ε_v-h 曲线
Fig.6 ε_v-h curve of the dry-wet circulation under different consolidation pressures

表 3 不同围压下试样含水率在干-湿循环过程中的变化情况
Table 3 The water content's change of samples during the dry-wet circulation under different all-round pressures

围压 /kPa	初始 /%	w /%							
		1 次		2 次		3 次		4 次	
		干燥	湿化	干燥	湿化	干燥	湿化	干燥	湿化
50	32	30	31.6	28.8	30.7	28.7	30.5	28.6	30.5
100	29.3	26.9	28.7	25.2	27.8	24.8	27.5	24.7	27.3
150	21.6	18.4	19.9	17.7	19.4	17.2	18.8	17	18.2

从土体干-湿循环试验结果也可以看出，饱和土体的基质吸力与含水率间并不存在唯一的关系，其原因是影响基质吸力的因素除了含水率（饱和度）之外，还与含水率的变化路径有密切关系。换言之，非饱和土体当前的含水率是从饱和度较高的状态脱湿而得，还是从较干燥的状态吸湿而致，或者是经过多次的干-湿循环而得，对于土的基质吸力是有影响的。从试样干-湿循环过程中的含水率变化情况来看，即是土体的脱湿-吸湿过程不重合。显然，这种现象将引起土体的强度差异，因为即使含水率相同，其对应的基质吸力却差别较大，或基质吸力相同，对应的含水率却不同。非饱和土体的含水率变化历史和路径不同，也使土骨架承受不同的应力路径，而土与其他材料的差别之一就是强度与变形等力学特性与其应力路径有关，由此也可推测，土体的力学特性与其含水率的变化路径有关。

图 7 为 3 个试样在不同的净围压下剪切过程的体变曲线（剪切过程中的体变是在干-湿循环完成后的基础上重新计算的）。可以看到，各试样在剪切过程中体积均发生收缩。在这 3 个试样中，各试样由于剪切产生的体积收缩量随固结压力的增加而增大，表明固结压力对体变性状具有很大的影响，这点与其他学者的研究结论类似[10]。

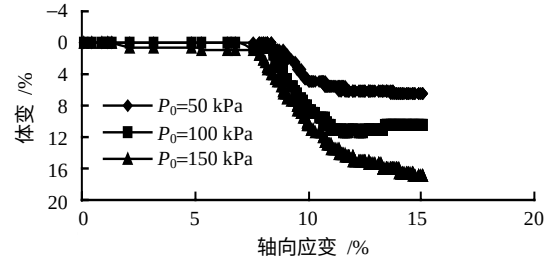

图 7 ε_a-ε_v 关系曲线
Fig.7 ε_a-ε_v curves

图 8 为干-湿循环结束后试样在剪切过程中轴向应变 ε_a 与偏应力 q 的关系曲线。取轴向应变 ε_a =15 % 对应的剪应力作为土样的抗剪强度（p_0 = 50 kPa，q = 98 kPa；p_0 = 100 kPa，q = 140 kPa；p_0 = 150 kPa，q = 166 kPa），由 Mohr-Clumb 准则（如图 9 所示）得到 c' = 11.19 kPa，φ' = 21.6°。

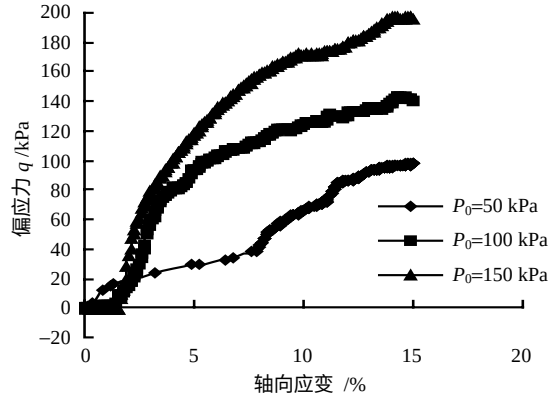

图 8 ε_a-q 关系曲线
Fig.8 ε_a-q curves

结合前面 CU 试验，两次试验结果相比较，发

现经过 4 次干-湿循环后的土样（$c'=11.19$ kPa，$\varphi'=21.6°$）与 CU 试验中未经干-湿循环的土样在同等条件（基质吸力 $(u_a-u_w)=0$，$(\sigma_3-u_a)=50$ kPa，$c'=15.7$ kPa，$\varphi'=26.6°$）下相比较，黏聚力下降 28.7 %，内摩擦角下降 18.8 %。这一数据充分说明了对于常年受库水位涨落及降雨、蒸发等一系列自然因素的影响的水库库岸，如果存在软弱夹层，如千将坪滑坡的层间剪切错动泥化带，其实际的剪切强度比用 CU 试验确定的强度参数要低。

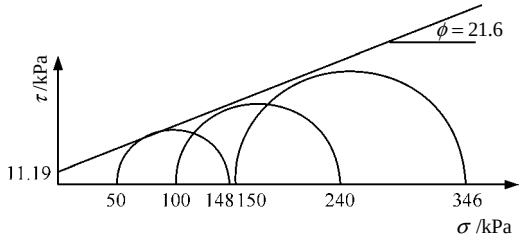

图 9　干—湿循环后剪切所得的 Mohr 圆及包线
Fig.9　Shearing results after the dry-wet circulation

就土体结构来讲，在大气营力的作用下，尤其是在降雨、库水位变化、蒸发等作用下，非饱和土体反复胀缩，比如在干燥状态下开裂后，其土体的原状结构遭到破坏，从而颗粒间的胶结减弱，结构力逐渐消失，如果随后遇水，则会有结合水溶剂膜的楔入发生。此外，在干-湿循环的过程中，土体内部由于不可逆的范德华力的作用，颗粒聚集，使得黏粒含量减小，比表面积减小，因而孔隙率增大，渗透性增强，可塑性降低，表现在土粒之间结构连接减弱，显然抗剪强度也会随之减小。另外，实际的工程经验表明，土体的胀缩裂隙主要是在干缩过程中产生，其产生的程度又会随着压力的减小、循环幅度增大而增大。因此，在此类试验中，土样的抗剪强度指标会由于其压力、循环次数、循环幅度的不同而有不同的表现。

5　结　论

（1）在干-湿循环阶段，在不同固结压力下、同样的吸力变化范围内，体变的大小相差不大，这表明了在这一阶段，吸力对体变性状的影响占主导地位。

（2）土体干-湿循环试验结果表明，非饱和土体的含水率变化历史和路径不同，也使土骨架承受不同的应力路径。而土与其他材料的差别之一就是：强度与变形等力学特性与其应力路径有关。由此也可推测，土体的力学特性与其含水率的变化路径有关。

（3）经过 4 次干-湿循环后的土样与 CU 试验中未经循环的土样在同等条件下相比较，抗剪强度有大幅度的降低，其中黏聚力下降 28.7 %，内摩擦角下降 18.8 %。

参 考 文 献

[1] Dai F C, Deng J H, Tham L G, et al. A large landslide in Zigui County, Three Gorges area—a fractual report[J]. **Candaian Geotechnical Journal**, 2004, 41: 1 233－1 240.

[2] ZHAN Liang-tong. Field and laboratory study of an unsaturated expansive soil associated with rain-induced slope instability[D]. Hong Kong: The Hong Kong University of Science and Technology, 2003.

[3] 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.

[4] 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.

[5] SIVAKUMAR V. A critical state framework for unsaturated soils[D]. Sheffield: University of Sheffield, 1993.

[6] 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.

[7] 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）：1 915－1 918.

[8] Fredlund D G, Rahardjo H. 非饱和土力学[M]. 陈仲颐、张在明等译. 北京：中国建筑工业出版社，1997.

[9] HO D Y F, Fredlund D G. A multi-stage triaxial test for unsaturated soils[J]. **Geotechnical Journal Testing**, 1982, 5(2): 18－25.

[10] CUI Y J, DELAGE P. Yielding and plastic behavior of an unsaturated silt[J]. **Geotechnique**, 1996, 46(20): 291－311.