

三峡水库消落带淹水—落干交替下紫色土力学特性变化模拟

吕发友^{1,2}, 鲍玉海¹, 贺秀斌¹, 张淑娟^{1,2}, 唐强¹, 王铭烽^{1,2}, 曹植菁³

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 四川大学建筑与环境学院, 成都 610207)

摘要: 三峡水库消落带在高压淹水浸泡和干湿交替作用下, 土壤力学特性必然发生变化, 影响土体抗侵蚀性能, 破坏库岸稳定性。目前对消落带土壤力学特性变化及其对淹水—落干驱动响应尚不明确。以三峡水库消落带广泛分布的紫色土为研究对象, 模拟水压作用和淹没—出露交替过程, 研究紫色土应力—应变和抗剪强度参数对高压淹水和干湿交替作用的响应。结果表明: 水柱压力、干湿交替次数和干湿交替幅度都能显著驱动紫色土力学特性发生变化。与对照组相比, 随着水柱压力增加, 紫色土刚度逐渐增强, 黏聚力降低幅度变小, 内摩擦角增大。随干湿交替次数增加, 紫色土刚度逐渐减小; 内摩擦角有所增大, 黏聚力的变化趋势与之相反, 且随干湿交替次数的增加而显著降低。随干湿交替幅度增加, 抗剪强度迅速降低(相同围压下), 黏聚力增大, 内摩擦角降低; 与对照组相比, 干湿交替幅度越小, 土壤的内摩擦角增大越多, 黏聚力降低越多。

关键词: 三峡水库; 消落带; 干湿交替; 抗剪强度; 应力—应变; 紫色土

中图分类号: S152.9

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)03-0079-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.03.014

Simulation of the Changes in Purple Soil Mechanical Properties in Response to Alternate Submergence and Exposure in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir

LÜ Fayou^{1,2}, BAO Yuhai¹, HE Xiubin¹, ZHANG Shujuan^{1,2},

TANG Qiang¹, WANG Mingfeng^{1,2}, CAO Zhijing³

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041; 2. University of Chinese Academy of

Sciences, Beijing 100049; 3. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610207)

Abstract: The riparian zone of the Three Gorges Reservoir undergoes high-pressure water submergence and alternate wet-dry condition, leading to changes in soil mechanical properties, influencing soil erodibility and bank instability. Based on the wide distribution of purple soil in the Three Gorges Reservoir, we simulated the hydraulic effect and the process of alternate submergence and exposure, researched stress-strain and shear strength of purple soil in response to high-pressure water submergence and wet-dry cycles. Till now, how soil mechanic properties response is not clear. It was found that water column pressure, and the frequency and magnitude of wet-dry cycles significantly drove the changes in soil mechanical properties. Compared with CK, stiffness increased, the decreasing rate of cohesion became slower, but the internal friction angle increased with increasing water column pressure. With the increasing number of wet-dry cycles, stiffness and cohesion decreased, while the internal friction angle increased. The shear strength decreased quickly with increasing amplitude of wet-dry cycles under the same confining pressure. Compared with CK, the purple soil which suffered minor amplitude of wet-dry cycles showed a significant increasing trend in the internal friction angle and a decreasing trend in cohesion.

Keywords: Three Gorges Reservoir; riparian zone; wet-dry cycles; soil shear strength; stress-strain; purple soil

收稿日期: 2016-11-17

资助项目: 国家自然科学基金项目(41571278, 41301290); 中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-SW-STS-175); 中国科学院“西部之光”人才培养引进计划(2013&2016)

第一作者: 吕发友(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事消落带土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: fayoul@163.com

通信作者: 贺秀斌(1967—), 男, 研究员, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: xiubinh@imde.ac.cn

三峡水库“蓄清排浑”的调度方式,引起水库水位每年在 145~175 m 间变化,形成了垂直落差 30 m、面积 349 km² 的反枯洪节律出露的消落带^[1-3]。消落带内的土壤每年都将经历至少一次高压淹水与干湿交替变化,由此将加速土体的损伤变化^[4]。土体力学特性与土壤侵蚀密切相关,消落带土体力学特性变化后,整体和土颗粒间的应力状态都将受到显著影响,最终改变边坡土体的稳定性和抗侵蚀能力^[1,5-10]。因此,明晰库水压力和干湿交替驱动下消落带土体强度的响应过程和规律,是研究消落带土壤侵蚀过程的重要环节。

国内外学者对于干湿交替作用下土体变形破坏的损伤理论已开展了诸多研究,也取得了很多成果^[11-13],有学者在室内试验的基础上研究了土体含水率与抗剪强度及应力—应变特性的关系,表明土壤抗剪强度和含水率呈正相关^[14]。也有学者研究了不同干湿交替幅度下的膨胀土力学特性,表明黏聚力随着干湿交替幅度的增大而逐渐降低^[15]。但三峡水库消落带受水库水位涨落影响,土质消落带所受库水压力、浸泡时间和干湿交替幅度等均具有明显的空间垂直梯度分异,不同水位高程处的土体力学特性的变化规律必将存在空间差异性,但目前针对这种极端条件下的土体力学特性变化机理的研究较少,库水压力和干湿交替状况等对其的影响规律尚不明确。因此,本研究选取三峡消落带广泛分布的紫色土进行了干湿交替和水下受压模拟试验,通过常规三轴试验,测定了不同水体压力、干湿交替次数和干湿交替幅度等作用下重塑紫色土抗剪强度参数和应力—应变过程,分析了水柱压力和干湿交替作用对紫色土强度和刚度的影响规律,旨在为消落带水土作用过程及土壤侵蚀过程机理的研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

三峡水库消落带地处东经 106°—110°50′,北纬 29°16′—31°25′,是由于人工调节水位而形成的周期性淹水—出露区域。根据三峡水库“蓄清排浑”的年水位调度方式,每年汛期之前水库水位降至防洪限制水位 145 m,汛期后(10 月)开始逐步回升蓄水至 175 m,并于次年 2—6 月再次逐步回落^[2,16]。消落带处于新华夏构造体系第三隆起带及其与大巴山弧形褶皱带的交汇处,地质以紫色泥岩和砂岩、泥灰岩和灰岩等为主,松散堆积物主要是河流冲积物、崩塌和滑坡堆积体,零星分布着第四系冲洪积、风化残积层^[17-18]。土壤以紫色土为主,伴有水稻土、石灰土、黄壤和黄棕壤等,淹水前土地利用方式主要包括旱地、水田、草地和林地等。区域气候属湿润亚热带季风气候,年均气温达 17~19℃,年均降水量 1 045~1 140 mm,年均相对湿度为 77.6%,年均气温较

同纬度其他地区高^[19]。消落带出露成陆期天气炎热潮湿,大雨、暴雨多,伴随伏旱。淹水后消落带植被优势种主要为一年生和多年生草本植物^[20-21]。

1.2 试验材料

模拟试验用土是 2016 年 6 月取自长江干流重庆段消落带上的典型紫色土,同期测得的消落带土壤常用指标如下:天然质量含水率 6.2%~17.8%,干密度 1.29~1.74 g/cm³。典型紫色土塑限 16.5%,液限 34.0%,塑性指数 17.5,有机质含量 5.2 g/kg;土壤质地为砂性土,颗粒组成以砂粒(0.02~2 mm)为主,占比 75.69%,其次为粉粒(0.002~0.02 mm),占比 22.0%,粘粒(<0.002 mm)含量较低,仅为 2.31%。自然风干碾细过 2 mm 筛备用。

1.3 试验设计

三峡水库不同水位高程段的消落带受库水影响程度差异较大,高水位段消落带淹水周期少、水压力小、干湿交替幅度大,低水位高程段消落带淹水周期多、水压力大、干湿交替幅度小。本文用初始状态完全相同的重塑紫色土(质量含水率 12.4%,干密度 1.53 g/cm³),模拟不同水位高程段消落带的淹水特征,研究三峡消落带紫色土力学特性对不同水位高程段库水作用的响应规律。经实测,得到消落带土体的天然最低质量含水率是 6.2%,且通过饱和试验测得重塑土样的饱和质量含水率为 30.7%,故定义干湿交替 3 个幅度为:6.2%~30.7%,12.4%~30.7%,18.5%~30.7%(质量含水率),分别记为 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 ;为研究多次干湿交替后消落带紫色土力学特性的变化规律,分别设置 1 次、3 次、6 次干湿交替模拟试验,记为 DW1、DW3、DW6;此外,为了研究库水压力的作用,分别设置了 0.300 kPa 2 组水压力试验,记为 P_{a_0} 、 $P_{a_{300}}$ 。按照以上各种搭配,以未经过干湿交替的紫色土为对照(CK),共设计 7 组模拟试验,各设计工况见表 1。

表 1 干湿交替模拟试验设计

工况代号	库水压力	干湿交替	土样饱和含水率
F1	$P_{a_{300}}$	DW1	ω_2
F2	$P_{a_{300}}$	DW3	ω_2
F3	$P_{a_{300}}$	DW6	ω_1
F4	$P_{a_{300}}$	DW6	ω_2
F5	$P_{a_{300}}$	DW6	ω_3
F6	P_{a_0}	DW6	ω_2

1.4 重塑土样制作

严格按照《土工试验方法标准》(GBT 50123—1999)制作重塑土样。考虑到重塑土样需经过干湿交替模拟过程,在模拟过程中土样表面可能会受到水流冲刷等作用而发生损坏,为避免此类因素引起的试验误差,制作了稍大于三轴试验仪要求尺寸的重塑土样,待干湿交替完成后、三轴试验前,将试样切削至仪器要

求的尺寸(直径 39.1 mm,高 80 mm,体积 96 cm³)。制样时用制样器(直径 50 mm,高 100 mm,体积 196 cm³)分 3 层进行压实,每层压实后小刀刮毛表面再进行下一层压制。用此方法制作干密度为 1.53 g/cm³、质量含水率为 12.4%、直径 50 mm、高 100 mm 的初始土样 28 个。重塑土样的天然质量含水率和干密度为三峡消落带土壤相应指标的平均值,故以此为初始状态对干湿交替过程进行模拟具有一定的代表性。

1.5 干湿交替过程模拟

为模拟三峡水库高压淹水对消落带紫色土的影响,采用自行研制的水柱压力模拟装置(图 1),通过对容器内水体加压的方式模拟高压淹水浸泡过程。用 7 个水压力变化过程对库水位涨落过程进行模拟,依次为:置样注水 0,100,200,300,200,100,0 kPa,调节压力后静置 4 h 以保证其稳定,此为湿循环(高压淹水浸泡),模拟水库蓄水开始至退水结束的过程。湿循环后取出试样,在 50 ℃烘箱中干燥处理,烘干过程随时称量试样质量,待其达到与设计含水率对应的质量时立刻取出试样,密封保存,待所有试样完成后关闭烘箱电源,结束干循环(高温干旱),以此模拟不同水位高程段的消落带土壤从库水消退后的饱和状态到下一次淹水前土壤最终状态的过程。一个干湿交替过程包括一个湿循环和一个干循环过程,重复以上步骤以模拟三峡水库多次淹水—落干交替过程。

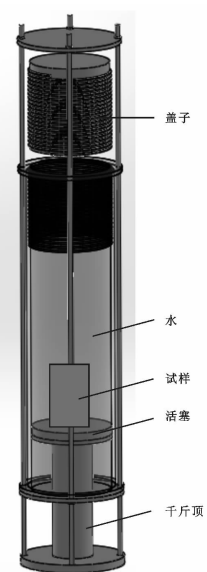


图 1 水柱压力模拟装置示意

1.6 土壤力学特性测试分析

土壤应力—应变曲线、抗剪强度及其参数通过不固结不排水试验(UU 试验)得到,仪器选用南京智龙科技开发有限公司生产的 TSZ-1 型全自动三轴仪。三轴试验的所有测试内容均按照《土工试验方法标准》(GBT 50123-1999)规定进行。用 $(\tau_{ck} - \tau_{\text{试样}}) / \tau_{ck}$ 表示经过干湿交替模拟后试样的强度衰减百分比

(正值表示降低,负值表示增加),用 $(c_{ck} - c_{\text{试样}}) / c_{ck}$ 和 $(\phi_{ck} - \phi_{\text{试样}}) / \phi_{ck}$ 分别表示经过干湿交替模拟后试样的强度参数黏聚力(c)和内摩擦角(ϕ)的衰减百分比,其中正值表示降低,负值表示增加。

2 结果与分析

2.1 水柱压力作用对紫色土力学特性的影响

2.1.1 应力—应变特性 初始状态完全相同的 2 组土样,分别在 0,300 kPa 的水柱压力条件下干湿交替 6 次(干湿交替幅度为 ω_2),得到试样 F6 和 F4,在相同围压下进行 UU 试验,得到力学特性曲线。由图 2 可知,F6 的应力—应变曲线呈应变软化型,且在相同围压条件下其抗剪强度显著低于 F4。与对照组相比,F6 的抗剪强度衰减百分比随围压增大依次为 81.0%,78.4%,71.1%;相同围压下 F4 的抗剪强度衰减百分比仅为 53.4%,29.0%,17.7%。对 2 组试样在相同围压下的应力—应变值进行非参数 Kolmogorov-Smirnov Z 检验,结果表明:围压分别为 100,200,300 kPa 时,在 2 种不同水压力下干湿交替 6 次后的试样 F4 和 F6 的应力—应变值均存在显著性差异($p=0<0.05$),即干湿交替过程中的水柱压力对紫色土变形特性有显著影响。

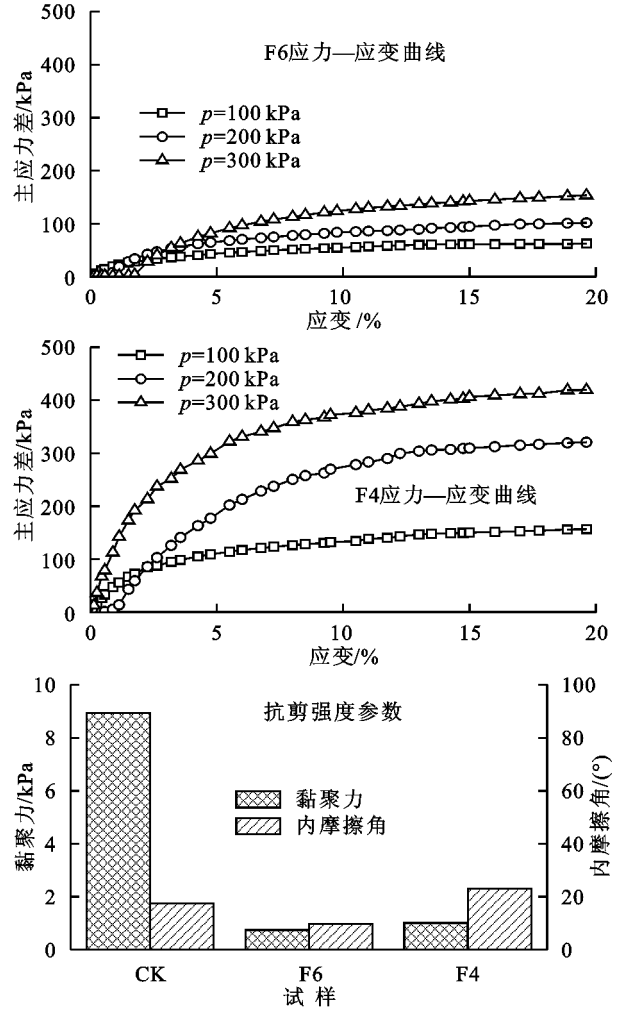


图 2 不同水柱压力条件下的力学特性

2.1.2 抗剪强度参数 由图 2 可知, F4 和 F6 的黏聚力较为接近, 分别为 7.43, 10.11 kPa; 内摩擦角则相差较大, 分别为 9.78° , 23.09° 。与对照组 CK 的抗剪强度参数相比, F6 的黏聚力和内摩擦角分别降低了 91.7%, 44.3%; 同等条件下 F4 的黏聚力降低了 88.7%, 内摩擦角则增加了 31.4%。由此可见, 在干湿交替过程中, 随着水柱压力的增加, 土体内摩擦角有所增大, 主要原因可能是水柱压力对土体的压实和固结作用加强了土体颗粒间的联结; 而黏聚力降低幅度呈减弱趋势。总体看来, 水柱压力对内摩擦角的影响比黏聚力更显著。

2.2 干湿交替作用对紫色土力学特性的影响

2.2.1 应力—应变特性 初始状态完全相同的 2 组土样, 在 300 kPa 水柱压力条件下分别干湿交替 1, 3, 6 次(干湿循环幅度为 ω_2), 得到 3 组试样 F1、F2、F4, 对 3 组试样和对照组在相同围压下进行 UU 试验, 绘制干湿交替作用下的应力—应变曲线。由图 3 可知, 未经过干湿交替的紫色土 CK, 应力值随轴向应变的增加而增大, 在压缩过程中表现出明显的应变硬化特征。随着干湿交替次数的增加, 紫色土在三轴压缩过程中逐渐表现出应变软化现象, 应力—应变曲线由应强化型逐步过渡为应变稳定型和应变软化型。

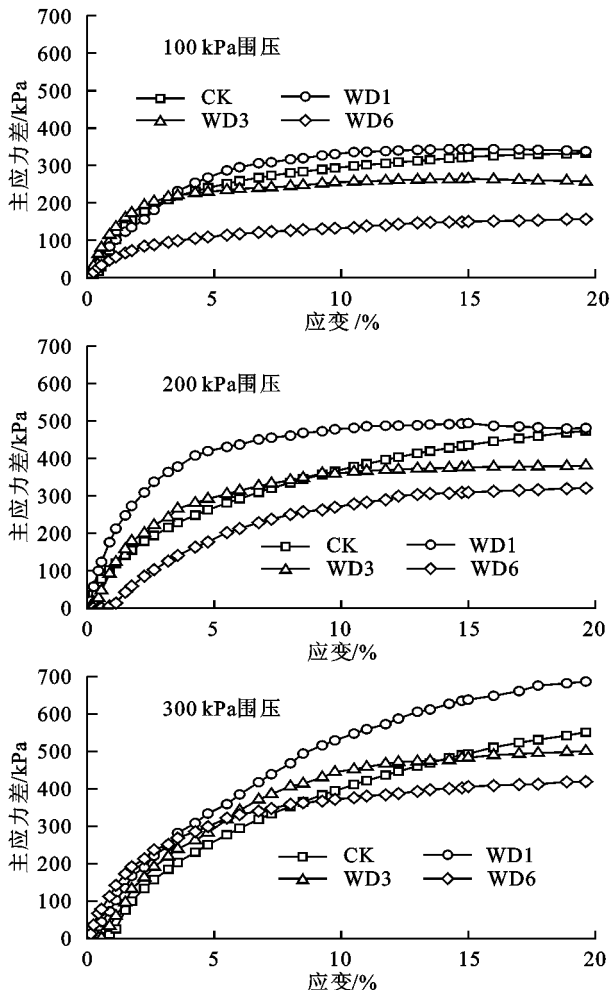


图 3 干湿交替作用下紫色土应力—应变曲线

2.2.2 抗剪强度参数 不同干湿交替次数下紫色土强度参数变化情况见图 4(应力—应变曲线中未出现峰值应力的, 取应变量为 16% 时所对应的应力值作为峰值轴应力)。在 3 个围压(100, 200, 300 kPa, 下同)下, 经过 1 次干湿交替后的土体, 其抗剪强度都有微弱的增大, 按围压从低到高依次增加了 6.7%, 13.4%, 29.3%。随着干湿交替次数的增加, 抗剪强度值持续降低。3 个围压下, 经过 6 次干湿交替后的紫色土, 其抗剪强度降低程度依次为 53.4%, 29.0%, 17.7%; 3 次干湿交替后, 相同围压下抗剪强度值降低程度依次为 18.0%, 13.6%, 2.1%, 强度降低幅度远低于 6 次干湿循环后的土样。

由图 4 可知, 多次干湿交替过程中, 重塑紫色土的黏聚力急剧下降, 干湿交替 6 次后, 黏聚力降低了 88.7%(其中第 1 次干湿交替后降低了 29.6%)。内摩擦角有微弱增大的趋势, 6 次干湿交替后其内摩擦角增加了 31.4%, 尤以第 1 次干湿循环后增长幅度最大(42.8%), 这与初次干湿交替后土体抗剪强度增大趋势一致。

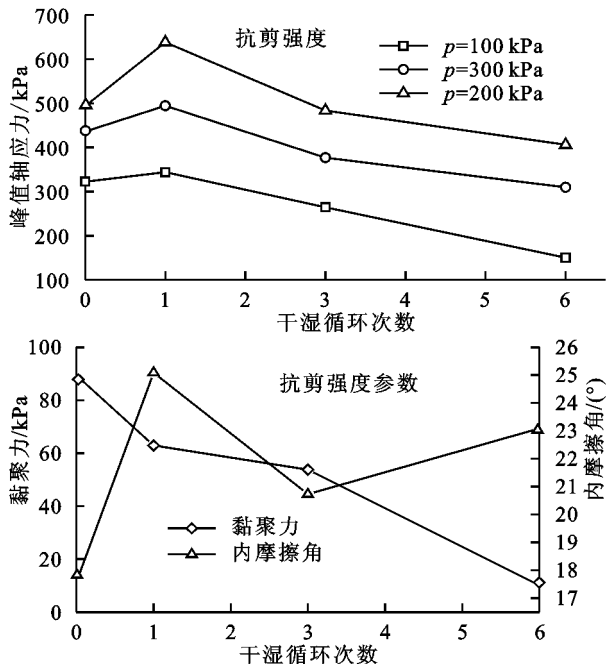


图 4 干湿交替作用下的抗剪强度参数

2.3 干湿循环幅度对紫色土力学特性的影响

2.3.1 应力—应变特性 初始状态完全相同的 3 组土样, 在 3 种不同幅度条件下干湿交替 6 次(水柱压力为 300 kPa), 得到 3 组试样 F3、F4、F5, 对 3 组试样和对照组在相同围压下进行 UU 试验, 得出应力—应变曲线。由图 5 可知, 在相同围压下, 随着干湿交替幅度的增大, 土体刚度逐渐减弱, 应力—应变曲线从应变硬化型逐步过渡到应变软化型, 并且随着围压的增加表现得更为明显。

2.3.2 抗剪强度参数 由图 6 可知, 在相同围压下,

随着干湿交替幅度的增大,紫色土抗剪强度值迅速降低。100 kPa 围压下,F3、F4、F5 的强度衰减百分比依次为 75.8%,53.4%,20.7%;200 kPa 围压下,F3、F4、F5 的强度衰减百分比依次为 74.5%,29.0%,−12.2%(增高);300 kPa 围压下,F3、F4、F5 的强度衰减百分比依次为 71.4%,17.7%,−45.3%(增高)。可见随着干湿交替幅度的减小,相同围压下紫色土抗剪强度衰减率逐渐减小。随干湿交替幅度的增加,黏聚力增大,内摩擦角降低。与对照组相比,F3、F4、F5 的黏聚力衰减百分比依次为 77.0%,88.7%,92.1%;内摩擦角的增大程度则随干湿交替幅度的增加而减小,3 种干湿交替幅度下增长率依次为−55.4%(降低),31.4%,84.4%。

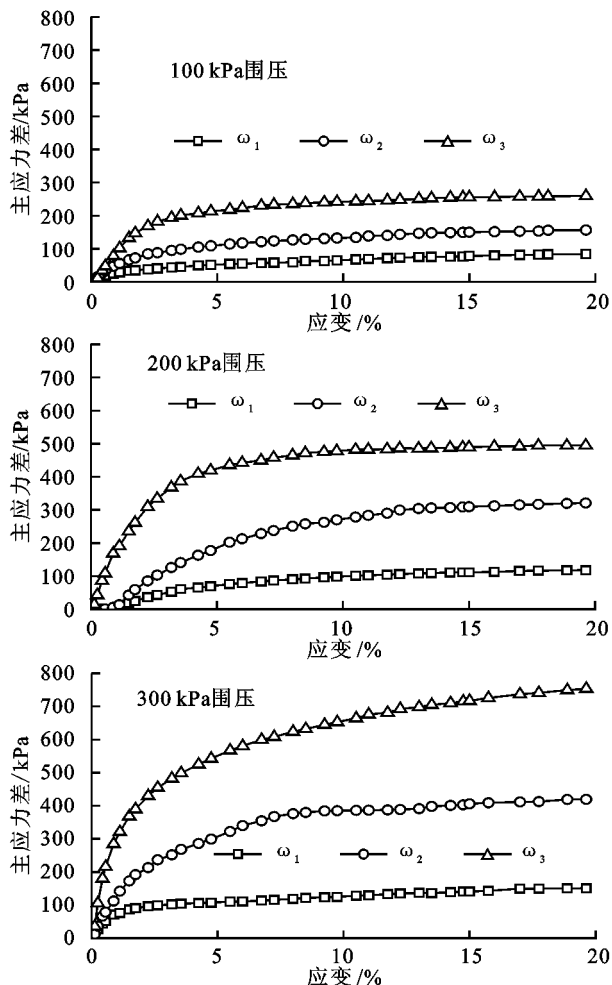


图5 不同干湿交替幅度下的应力—应变曲线

3 讨论

三峡消落带在高压淹水浸泡和干湿交替作用下,土壤力学特性必然发生变化,影响土体抵抗侵蚀的能力,破坏库岸稳定性^[5-9,22]。三峡水库独特的水位调节机制,导致消落带不同水位高程段上土体水—土作用特点各具差异,表现如下:低水位高程段(145 m)土体淹水浸泡时间长、压力大、干湿交替幅度小;高水位高程段(175 m)土体淹水浸泡时间短、压力小、干湿交替幅度大。因此,本文通过干湿交替模拟试验,

对库水压力、干湿交替次数和幅度等驱动下紫色土力学特性的变化规律进行了对比研究,揭示了三峡消落带形成以来,不同水位高程段土体的强度和变形指标的变化规律。

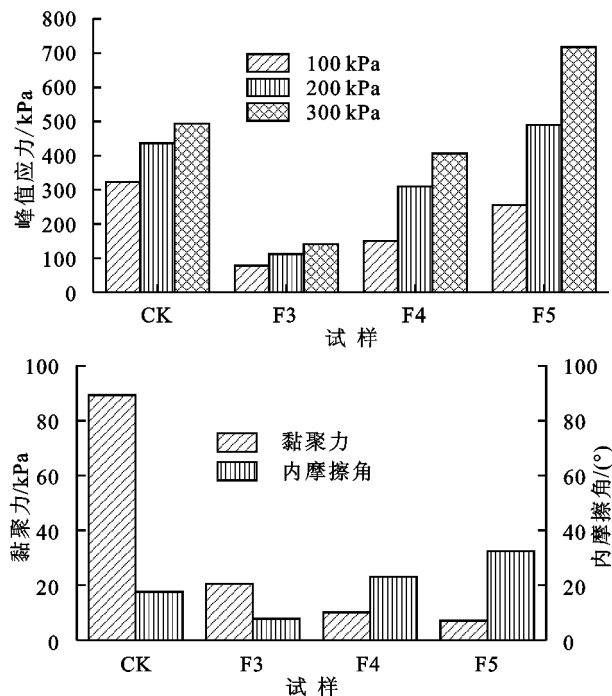


图6 不同干湿交替幅度下的抗剪强度参数

本研究表明,由于水库蓄水而产生的水压力对水下紫色土的强度和刚度均有显著影响,水柱压力对紫色土的刚度有明显的强化作用,内摩擦角与水柱压力的变化正相关。主要原因可能是水柱压力对土骨架的压实和固结作用使土颗粒间的联结得到了加强,抵抗颗粒间相对滑动破坏的能力有所提高,宏观上则表现为刚度和强度的增大。由此可以推断低水位高程处消落带土体的抗侵蚀能力较高水位高程段的土体强,这与三峡土质消落带高水位段土壤侵蚀为主,低水位段沉积为主的实际情况一致。

本研究表明,干湿交替次数对紫色土的强度和刚度有显著影响,随着干湿交替的发生(6次以内),相同围压下抗剪强度不断降低(第1次除外),且3次干湿交替后降低幅度远低于6次干湿交替后的降低程度。这与已有研究^[12,23]认为的3次干湿交替是土体抗剪强度参数基本稳定的临界点这一结论不同。造成这一差异的原因可能是:本文干湿交替模拟试验中,湿循环过程伴随着300 kPa的水柱压力,在此压力作用下,土体内部的孔隙和裂隙在干湿交替过程中将反复的产生和闭合,达到相对稳定的状态可能需要更长的干湿交替周期。将来在研究三峡消落带紫色土的稳定力学特性等指标时,建议适当增加干湿循环次数。

本研究还表明,干湿交替幅度对紫色土的强度和刚度也有一定影响,在其他条件(水压力、干湿循环次数

等)相同时,黏聚力随干湿交替幅度的增大而减小,内摩擦角变化则相反。这与已有研究^[24]结论类似,差异在于本研究发现内摩擦角有所增大,原因可能是湿循环过程伴随着水柱压力,在此作用下土骨架间的接触更加紧密,同时由于土颗粒间接触点的增多而减少了总体比表面积,进而降低了颗粒间的黏聚力。

4 结论

(1)水柱压力、干湿循环次数和干湿循环幅度都能显著影响重塑紫色土的变形特性。其他条件相同时,水柱压力越大、干湿循环次数越少、干湿循环幅度越小,强度和刚度则越大。

(2)干湿循环过程中的水柱压力作用对紫色土内摩擦角的影响极为显著,在 0 kPa 和 300 kPa 水柱压力条件下经过 6 次干湿循环后的重塑紫色土(干湿循环幅度为 ω_2),与初始试样相比,内摩擦角分别降低 44.3% 和增加 31.4%。

(3)随干湿循环次数的增加,重塑紫色土黏聚力以近似稳定的速率急剧降低,内摩擦角总体呈现上升的趋势,在第 3 次干湿循环前后有一定的波动。

(4)干湿循环幅度对重塑紫色土的抗剪强度及其参数有显著影响。随着干湿循环幅度的减小,相同围压下重塑紫色土抗剪强度值和内摩擦角迅速增大,黏聚力的变化趋势则与之相反。相比对照组,经历最小干湿循环幅度(ω_3)后的紫色土,其内摩擦角增大最多,为 84.4%,黏聚力下降最多,为 92.1%。

参考文献:

- [1] Bao Y H, Tang Q, He X B, et al. Soil erosion in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. Hydrology Research, 2015, 46(2): 212-221.
- [2] 艾丽皎,吴志能,张银龙. 水体消落带国内外研究综述[J]. 生态科学, 2013, 32(2): 259-264.
- [3] 鲍玉海,贺秀斌,钟荣华,等. 三峡水库消落带植被重建途径及其固土护岸效应[J]. 水土保持研究, 2014, 21(6): 171-174, 180.
- [4] 何晓英,唐红梅,陈洪凯,等. 周期性浸泡下三峡库区松散土体微观特性分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2010, 29(3): 445-449, 483.
- [5] 王玉杰,王云琦,夏一平. 重庆缙云山典型林分的林地土壤抗蚀抗冲性能[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(1): 20-26, 54.
- [6] 鲍玉海,贺秀斌. 三峡水库消落带土壤侵蚀问题初步探讨[J]. 水土保持研究, 2011, 18(6): 190-195.

- [7] 赵成刚,李舰,刘艳,等. 非饱和土力学中几个基本问题的探讨[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 1825-1831.
- [8] 文宝萍,申健,谭建民. 水在千将坪滑坡中的作用机理[J]. 水文地质工程地质, 2008, 16(3): 12-18.
- [9] 周彬,朱晓强,杨达源. 长江三峡水库库岸消落带地质灾害防治研究[J]. 中国水土保持, 2007(11): 43-45, 58.
- [10] Battaglia L L, Collins B S. Linking hydroperiod and vegetation response in Carolina bay wetlands[J]. Plant Ecology, 2006, 184(1): 173-185.
- [11] 袁志辉. 干湿循环下黄土的强度及微结构变化机理研究[D]. 西安:长安大学, 2015.
- [12] 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.
- [13] Rao S M, Revanasiddappa K. Influence of cyclic wetting drying on collapse behaviour of compacted residual soil[J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2006, 24(3): 725-734.
- [14] 黄琨,万军伟,陈刚,等. 非饱和土的抗剪强度与含水率关系的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2600-2604.
- [15] 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.
- [16] Ye C, Li S, Zhang Y, et al. Assessing soil heavy metal pollution in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 191(1): 366-372.
- [17] 周永娟,仇江啸,王姣,等. 三峡库区消落带生态环境脆弱性评价[J]. 生态学报, 2010, 30(24): 6726-6733.
- [18] Bao Y H, Gao P, He X B. The water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir A unique geomorphological unit[J]. Earth Science Reviews, 2015, 150(11): 14-24.
- [19] 雷波,杨春华,杨三明,等. 基于 GIS 的长江三峡水库消落带生态类型划分及其特征[J]. 生态学杂志, 2012, 31(8): 2082-2090.
- [20] 卢志军,李连发,黄汉东,等. 三峡水库蓄水对消落带植被的初步影响[J]. 武汉植物学研究, 2010, 28(3): 303-314.
- [21] 常超,谢宗强,熊高明,等. 三峡水库蓄水对消落带土壤理化性质的影响[J]. 自然资源学报, 2011, 26(7): 1236-1244.
- [22] 刘新荣,傅晏,王永新,等. 水-岩相互作用对库岸边坡稳定的影响研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 613-616, 627.
- [23] 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.
- [24] 穆坤,孔令伟,张先伟,等. 红黏土工程发送的干湿循环效应试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(8): 2247-2253.