

DOI: 10.11779/CJGE2025S20037

库水作用下碎石土岸坡塌岸机理研究

张文举¹, 李安强^{*1}, 朱浩延¹, 夏冬冬¹, 贾哲强², 鲁会军³, 杨森¹, 王喻¹

(1. 中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 四川 成都 610081; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031;

3. 西华大学, 四川, 成都 610039)

摘要: 库水作用是影响岸坡稳定性关键因素, 为揭示碎石土岸坡塌岸机理, 以白鹤滩库区为工程背景, 开展了塌岸物理模型试验与不同干湿循环重塑土样直剪测试, 结果表明: ①当库水首次渗入土体, 坡体内渗流通道形成后, 后续库水再次渗入时孔隙水压力变化不再滞后响应; ②当库水位上升时, 坡体中部产生贯通拉裂隙并发育成后退式坍塌, 坡体土压力由上升转为下降趋势。在库水位下降阶段, 坡体外部表层因指向外层的水力梯度出现滑移破坏现象; ③天然与饱和状态土样的强度软化系数为 70.22%。并随着干湿循环次数增加, 相同正应力下重塑土的抗剪强度呈下降趋势, 同时内摩擦角和黏聚力均呈减小趋势, 反映了周期性库水作用对土体剪切强度参数具有显著劣化效应。以为白鹤滩库区岸坡稳定性评价提供指导。

关键词: 库水; 碎石土; 岸坡; 塌岸

中图分类号: TU441

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)S2-0225-06

作者简介: 张文举(1975—), 男, 高级工程师, 主要从事岩土工程防灾减灾方面科研工作。E-mail: 12338739@qq.com。

Bank failure mechanism of gravel soil slopes under action of reservoir water

ZHANG Wenju¹, LI Anqiang¹, ZHU Haoyan³, XIA Dongdong¹, JIA Zheqiang², LU Huijun³, YANG Sen¹, WANG Yu¹

(1. Southwest Municipal Engineering Design and Research Institute of China, Chengdu 610081, China; 2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China; 3. Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: The action of reservoir water is a key factor affecting the stability of bank slopes, in order to reveal the mechanism of bank failure of gravel soil slopes, this paper takes Baihetan reservoir area as the engineering background, and carries out the physical model test of bank failure and direct shear test of remodeled soil samples with different dry and wet cycles. The results show that: (1) When the reservoir water firstly penetrates into the soil body, then the seepage channel is formed in the slope body, the subsequent changes in the pore water pressure no longer respond with a hysteresis when the reservoir water again penetrates into the soil body. (2) When the reservoir water level rises, the middle of the slope body produces through tensile fissures and develops into a backward collapse, and the soil pressure of the slope body changes from a rising to a decreasing trend. In the stage of falling reservoir water level, the outer surface layer of the slope body shows a slip damage phenomenon due to the hydraulic gradient pointing to the outer layer. (3) The strength softening coefficient of the natural and saturated state soil samples is 70.22%. And with the increase of wet and dry cycles, the shear strength of the remodeled soil under the same positive stress shows a decreasing trend, and the angle of internal friction and cohesion also shows a decreasing trend, reflecting that the cyclic reservoir water action has a significant deterioration effect on the shear strength parameters of the soil body. The results of the study are expected to provide guidance for the evaluation of bank slope stability in Baihetan reservoir area.

Key words: reservoir water; gravel soil; bank slope; bank failure

0 引言

随着中国西部大开发战略不断推进, 大规模水利水电工程建设得到飞速发展^[1-2]。然而, 大型的水利工程建设与运营必将改变原有的地质环境, 如在库水位变动下, 引起岸坡渗流场变化以及坡土体物理力学参数改变, 进而影响水库岸坡的稳定性, 并对库区公路、居民点与航道水运安全带来安全隐患。因此, 开展库

水作用下岸坡塌岸机理研究对库区边坡稳定性分析起到至关重要作用。

当前, 众多学者利用数值模拟、室内物理模型以及原位测试来揭示水库滑坡力学作用机理。在库水的

基金项目: 四川省自然科学基金项目 (2025ZNSFSC0826)

收稿日期: 2025-07-15

*通信作者 (E-mail: lianqiangscu@qq.com)

宏观力学作用下, Pinyol 等^[3]依据现场监测数据, 分析得到库水位迅速下降产生的动水压引起滑坡体失稳。Jian 等^[4]和 Wang 等^[5]发现库水的浮托作用将导致滑坡失稳。在库水位变动下岸坡渗流场变化特征方面, 杨逾等^[6]利用数值模拟手段, 探究了库水位变动速率对岸坡渗流场影响规律, 发现随着库水下降速度的增加, 岸坡稳定性逐渐降低。对于库水其他力学机制, Wolter 等^[7]与 Alonso 等^[8]发现库水作用下坡体裂隙闭合促使超孔隙水压力形成, 进而诱发滑坡失稳。在水对岩土体力学性能劣化方面, 王海东等^[9]均发现水对土体抗剪强度参数具有显著劣化效应。此外, 针对库水波动的周期性作用, 崔激等^[10]对膨胀土进行干湿循环处理, 发现不可恢复的颗粒之间连接以及范德华力是主要导致膨胀土塑性性能劣化的主要原因。综上所述, 主要就各类单一滑坡诱导因素分析影响机制, 针对库水作用下坡体内在力学响应与变形破坏特征的微观机理缺乏系统研究, 并在结合干湿循环下土体固有属性的宏观改变深入分析塌岸机理方面不够完善。

为此, 本文以白鹤滩库区岸坡为工程背景, 取现场土样为研究对象, 参照库区年调水方案, 开展物理模型试验, 以厘清库水升降下坡体孔隙水压力、土压力与变形破坏演化过程; 同时对不同干湿循环作用下重塑土进行直剪测试, 探究土体抗剪强度参数影响规律; 以期揭示库水作用下岸坡塌岸内在机理, 为白鹤滩库区岸坡稳定性评价提供指导意义。

1 库水作用对坡体内部压力与结构影响分析

1.1 试验方案

以白鹤滩库区小江段岸坡为工程背景, 依据野外勘探情况, 经相似比换算, 确定试验模型尺寸为 116 cm×80 cm×78 cm, 如图 1 所示。以砖砌岸坡作为基岩面, 坡度为 27°。设置碎石土质岸坡厚度 26 cm, 前缘厚度为 32 cm, 后缘厚度为 20 cm, 坡度为 32°。为监测孔隙水压力及土压力, 分别安置 6 个土压力传感器(编号为 M1~M6)以及 7 个孔隙水压力传感器(编号为 P1~P7), P7 传感器用于监测实时水位。在模型右侧与前测安置高速摄影机, 记录试验过程中土层变形破坏特征。

本次土体均取自白鹤滩库区小江段岸坡, 为第四系崩坡积碎石土。为避免尺寸效应, 剔除粒径大于 20 mm 碎石, 用超粒径颗粒等量置换。并对土层进行分层夯实, 处理后试验土层密度为 1.91 g/cm³, 渗透系数为 3.84×10⁻² cm/s, 天然含水率为 3.4%。

参照白鹤滩水库水位年调节方案, 设计如图 2 所示模拟试验水位调节方案, 水位上升速率约为 8 L/min, 下降速率约为 24 L/min。

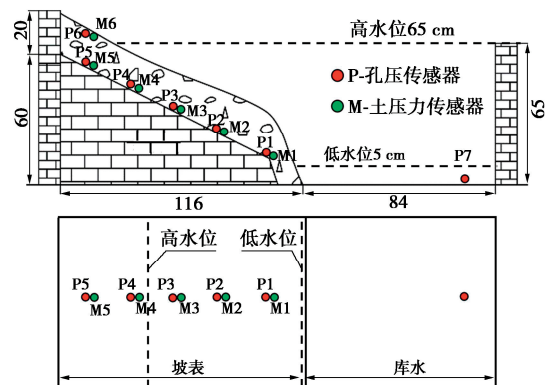


图 1 塌岸物理模型试验池与传感器布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test pool for physical modelling of bank failure and layout of sensors

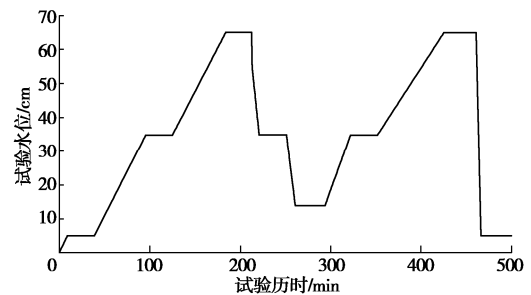


图 2 模拟试验的水位调节方案

Fig. 2 Water level regulation plan for simulation tests

1.2 试验结果与分析

(1) 孔隙水压力变化规律

获得不同位置孔隙水压力变化规律如图 3 所示。由于 P6 处于较高位, 未获得数据。从图 3 可以看出: 在第一次库水上升阶段, 蓄水至 15.6 cm 高度前, 孔隙水压力无变化。但随着库水位持续上升, 库水逐渐渗入相应位置传感器中, 导致孔隙水压力逐渐增大。库水到达最高水位后开始下降, 顶部坡体内库水立刻渗出, 从而降低了各监测点传感器上覆水柱高度, 孔隙水压力值减小。当库水第二次上升时, 蓄水至 13 cm 时 P1 监测点的孔隙水压力就开始增加, 相比第一次蓄水时该监测点的孔隙水压力响应高程降低了约 2.6 cm, 表明当坡体内渗流通道形成后, 其内部孔隙水压力响应滞后性明显减弱, 因此后期水位升降时孔隙水压力变化响应较快。渗流通道形成主要受土体颗粒饱水软化阶段后, 形成新的微小孔隙或扩张裂隙; 其次是库水浸泡导致可溶盐或碳酸盐胶结物溶解, 孔隙率增加, 进一步削弱颗粒间结合力, 加速渗流通道形成。

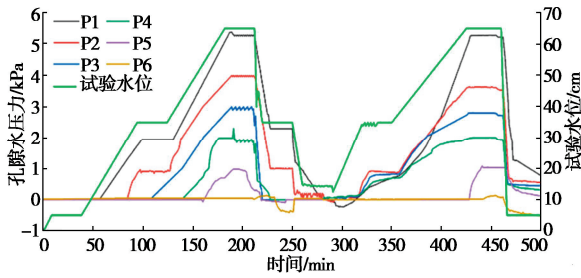


图 3 孔隙水压力变化曲线

Fig. 3 Variation curves of pore water pressure

(2) 土压力变化规律

根据试验模型的实时监测数据, 可获得不同位置土压力变化规律如图 4 所示, 分为 3 个阶段。

初期调整阶段: 在库水位从 5 cm 上升至 10 cm 阶段, 库水仅淹没坡体底部前缘一小部分, 岸坡无明显变形滑移现象, 故坡体土压力基本不变。

剧烈波动阶段: 在首次库水位升降期间, 坡体各监测点土压力值表现出剧烈宽幅波动。在 50~125 min 库水上升阶段, 坡脚前缘土体受到浸泡软化而产生裂缝, 低位土体受到挤压致使土压力升高; 随着库水位上升, 坡体中前部被淹没使得 M1、M2 与 M3 土压力值迅速下降。在 125~180 min 库水位上升阶段, 坡体淹没区域显著增大, 导致坡体中部产生贯通裂隙并逐渐发育成后退式坍塌; 故此阶段坡体土压力值快速降低。在 180~260 min 库水位下降阶段, 由于库水位下降速率远大于坡体内部水渗出速率, 从而在坡体内外形成较大水力梯度以及指向坡体外部的渗透压力, 导致坡体外部表层出现浅层滑移破坏现象; 所以监测点处坡体土压力快速下降。

平稳调整阶段: 由于第一次库水位循环升降作用后, 致使岸坡变形破坏基本完成, 整个坡体处于稳定状态, 故坡体各处土压力值也趋于稳定。因此第二次库水位循环升降作用下仅较小幅度变化。

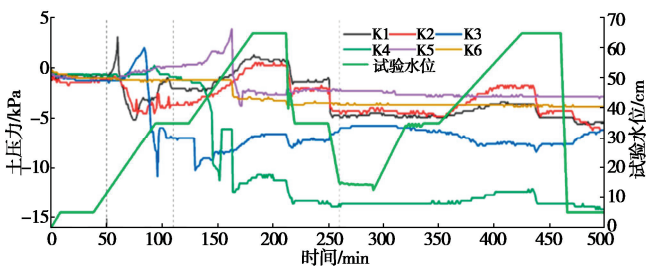


图 4 土压力变化曲线

Fig. 4 Variation curves of earth pressure

对于有效应力, 在高水位持续下或上升时, 非饱和区转为饱和, 有效应力瞬时降低。在库水位下降时, 坡内孔压维持高位, 而外部水压力卸载, 导致有效应力下降。

(3) 坡体变形破坏特征

可将坡体塌岸过程分为:

(a) 初期稳定阶段: 在库水位从 5 cm 上升至 10 cm 期间, 坡体无明显变形。

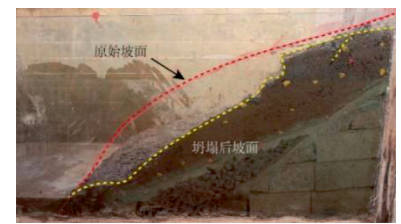
(b) 变形阶段: 在库水位上升至 24 cm 时, 坡体出现横向的张拉裂缝; 库水位持续上升, 坡体产生多条横向裂缝, 坡体下部裂缝受上部挤压出现闭合现象, 如图 5 (a) 所示。库水位稳定在 65 cm 时, 坡体整体向下沉降。

(c) 失稳破坏阶段: 库水位首次下降, 坡体在无水压支撑下原有裂缝逐渐扩展并贯通, 致使高位坡面出现溜滑特征; 在 35 cm 库水位时, 坡体沿后缘微裂纹呈坐落式塌滑, 其坍塌深度约 15~20 cm (图 5 (b))。

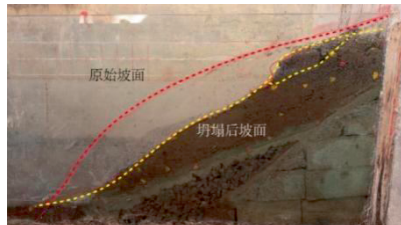
(d) 调整阶段: 第二次库水位再次升至最高位时, 后缘陡壁局部有垮塌; 下降后坡面比第一次下降的更为平整, 且细颗粒增多。在库水位降至 5 cm 时, 坡体前部产生新裂缝, 并沿着裂缝产生小规模坐落式塌滑 (图 5 (c))。第二次库水位升降阶段坡体变形破坏规模大幅降低。



(a) 第一次最高库水位时坡体后缘裂缝



(b) 第一次库水位下降最低后坡体坍塌



(c) 第二次库水位下降最低后坡体坍塌

图 5 坡体变形破坏特征

Fig. 5 Deformation and damage characteristics of slope model

(4) 渗流侵蚀效应讨论

库水位升降促进滑体渗流侵蚀作用, 进而导致致坡变形。从图 5 可知滑体内部结构因库水下降而破坏,

尤其在库水位第一次升降阶段。从图 6 可观察到：在库水浸泡前有少量微小原始裂隙，但随着库水位渗入土体内部，坡体内部土体颗粒经过饱水软化阶段后，形成新的微小孔隙或扩张裂隙。在水位下降渗流过程中，细小颗粒或孔隙裂隙的塌落物质被库水带走，最后产生明显的塌岸现象，即为渗流侵蚀效应。这种渗流侵蚀作用不断促使坡体内部裂隙扩展，最终导致坡体结构性损伤。在水位下降后上部滑坡土体顺着裂隙扩张方向滑动变形，同时会对下部坡体裂隙进行填充，使得下部土体压密固结。可概括为，库水升降在坡体内部产生渗流侵蚀效应，是对坡体结构损伤并造成滑坡变形主要诱因。



图 6 库水升降对坡体内部侵蚀效应细观表征

Fig. 6 Mesoscopic characterization of effect of reservoir water level fluctuation on internal erosion of slope

2 库水作用对碎石土强度劣化分析

白鹤滩水库库区水位在 765~825 m 变化，势必影响岸坡土体物性，造成岸坡稳定性问题。因此，有必要研究库水作用对碎石土强度劣化特征。

2.1 试验方案

采用中型环刀取现场原状土，剔除粒径大于 20 mm 土样；通过保湿养护，制取含水率为 3.4%、密度为 1.91 g/cm³ 土样。将其分 3 层装入，每层质量相同，如图 7 所示，共制取 24 个试样。然后进行干湿循环处理：浸泡 12 h 使其饱和，后 12 h 烘干，温度为 105℃，此为 1 次干湿循环过程。



图 7 分层制样

Fig. 7 Layered specimen preparation

最后采用中型应力控制式直剪仪开展试验（如图 8 所示）：试验过程正应力与剪应力均由液压千斤顶提供，位移百分表测量剪切位移；剪切盒为直径 30 cm 的圆柱型环刀，上下高度均为 10 cm，中间留有 1 cm 剪切缝，故剪切盒总高度为 21 cm。设置法向应力分别为 100, 200, 300, 400 kPa。

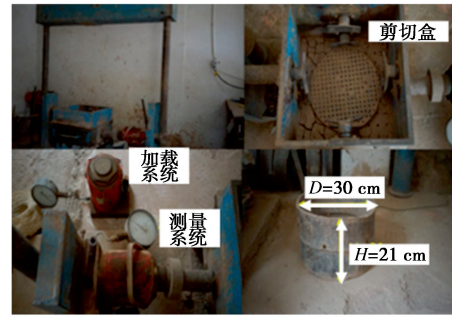


图 8 中型直剪设备

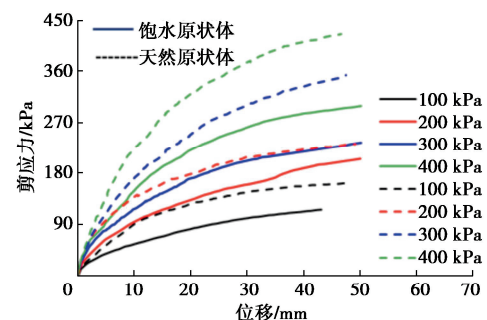
Fig. 8 Testing equipment photos

2.2 试验结果与分析

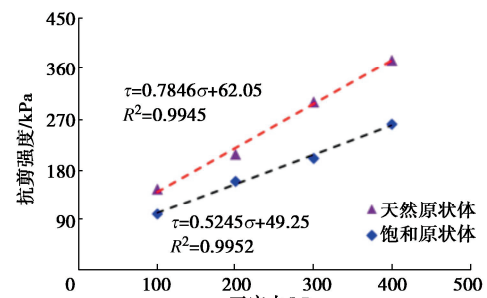
从图 9 (a) 可以看出，天然和饱和原状土抗剪强度均随正应力增加而增大，两者差距也愈大；并且在相同正应力下，天然原状土抗剪强度均大于饱和原状土，可见库水作用显著降低坡岸土体抗剪强度。其次，通过对比抗剪强度与正应力关系，如图 9 (b) 所示，可以计算出岸坡土体天然状态黏聚力 c 为 62.05 kPa，内摩擦角 φ 值为 38.12°，饱和状态的 c 值为 49.25 kPa， φ 值为 27.68°。从而揭示了库水渗入土体，在颗粒表面形成水膜，增加了颗粒间润滑作用，导致抗剪强度参数显著降低。根据以下公式即可求得土体浸润水之后的平均软化系数：

$$K = \frac{\tau_{\text{饱和}}}{\tau_{\text{天然}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中： K 为软化系数； $\tau_{\text{饱和}}$ 为饱和状态下抗剪强度 (kPa)； $\tau_{\text{天然}}$ 为天然状态下抗剪强度 (kPa)。得到白鹤滩水库岸坡天然原状土的软化系数为 70.22%。



(a) 不同正应力下剪应力与剪切位移关系曲线

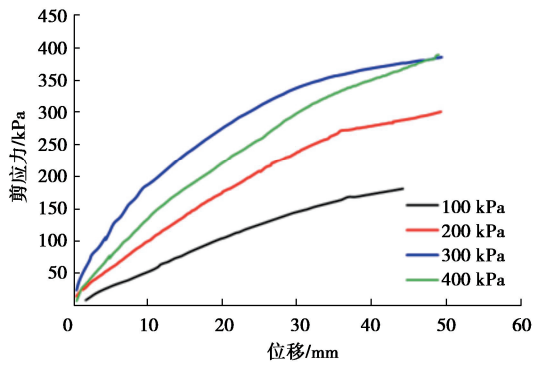


(b) 抗剪强度与正应力关系曲线

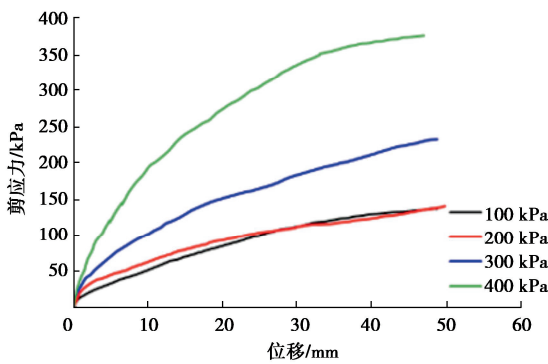
图 9 天然与饱和原状土试验数据

Fig. 9 Test data of natural and saturated in-situ soils

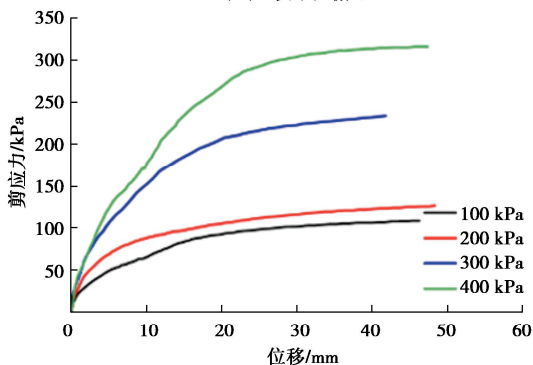
为进一步研究库水的周期性作用, 获取重塑土干湿循环作用下剪应力与剪切位移关系, 如图 10 所示。在不同干湿循环作用下, 随着正应力增加, 相同位移下剪切应力相应提升。重塑土均表现为应变硬化特征, 即随着剪切位移增加, 重塑土的强度持续增大。应力应变曲线无明显峰值强度, 故在剪切位移达到土样直径 10%时, 视为土样的剪切强度。



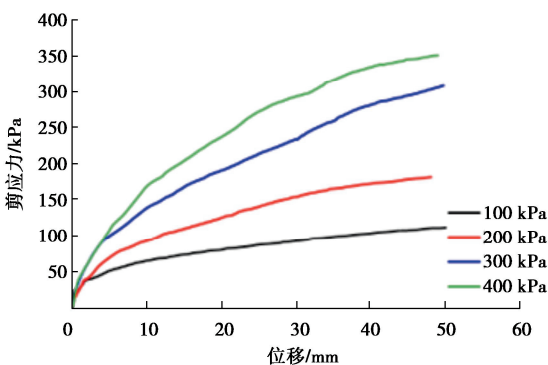
(a) 0次干湿循环



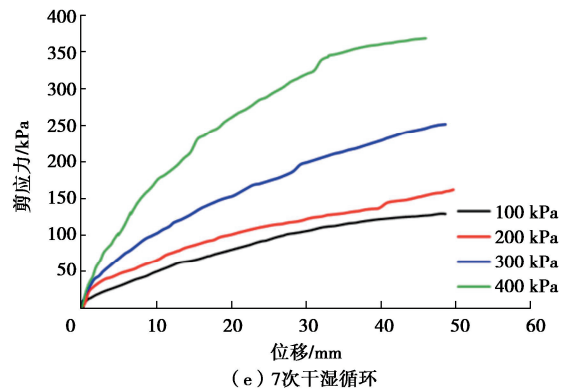
(b) 1次干湿循环



(c) 3次干湿循环



(d) 5次干湿循环



(e) 7次干湿循环

图 10 不同干湿循环作用下土样剪应力与剪切位移关系

Fig. 10 Shear stress versus shear displacement curves of soil samples under different wet and dry cycles

为分析不同干湿循环作用下对重塑土抗剪强度参数影响规律, 通过对抗剪强度和正应力拟合, 如图 11。大致上看, 随着干湿循环次数增加, 相同正应力下重塑土抗剪强度呈下降趋势, 即反映了周期性库水作用对土体剪切强度具有显著劣化作用。

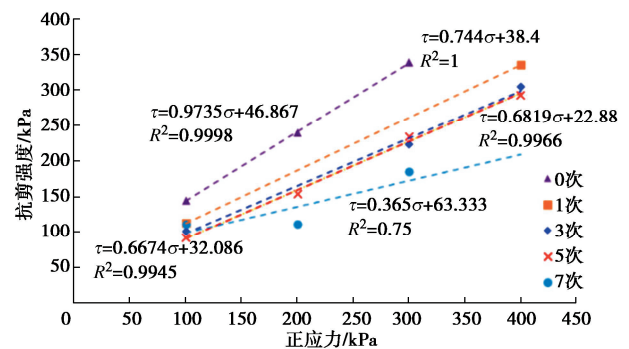


图 11 不同干湿循环作用下土样抗剪强度与正应力关系

Fig. 11 Relationship between shear strength and positive stress of soil sample under different dry and wet cycles

不同干湿循环作用下重塑土抗剪强度参数变化规律如图 12 所示。在自然含水率状态下, 第 1, 3 次重塑土的黏聚力分别下降了 21.42%, 34.33%, 内摩擦角分别下降了 17.14%, 23.81%。整体上随着干湿循环次数增加, 重塑土黏聚力呈线性下降趋势; 而内摩擦角在循环次数小于 3 时, 有明显减小, 但循环次数大于 3 时, 变化趋势很小。即当 $n \leq 3$ 时, 重塑土黏聚力和内摩擦角变化趋势基本保持一致。从细观视角分析内在机理: 白鹤滩水库岸坡土样中粗粒成分以灰岩为主, 其理化性质较为稳定, 在干湿循环作用下受到影响有限, 故后期随干湿循环作用, 粗粒与细粒之间咬合力趋于稳定, 即内摩擦角变化小。另一方面, 细粒部分粒径较小, 在水的作用下, 大量的矿物可能会被泥化分解, 细粒部分胶结作用减弱, 从而表现为土样的黏聚力持续劣化。

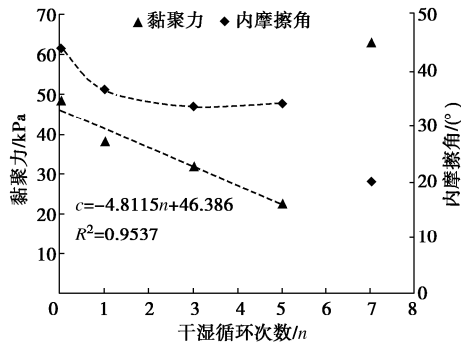


图 12 不同干湿循环作用下土样抗剪强度参数变化规律

Fig. 12 Changing law of shear strength parameters of soil sample under different dry and wet cycles

3 结 论

为系统科学解译库水作用下岸坡塌岸力学响应与破坏特征,创新性结合物理模拟试验与不同干湿循环作用下重塑土直剪测试,主要得到以下 4 点结论。

(1) 对于孔隙水压力,第一次库水上升阶段,呈滞后性逐渐增大趋势;当坡体内渗流通道形成后,第二次库水上升期间,变化迅速,反映了第一次库水升降对土样结构已完成核心影响作用。

(2) 对于土压力,随着库水位上升,坡体中部产生贯通裂隙并逐渐发育成后退式坍塌,坡体土压力快速降低。在库水位下降阶段,由于库坡体内外有较大水力梯度,导致表层出现浅层滑移破坏现象。

(3) 当库水渗入土体,在颗粒表面形成水膜,增加了颗粒间润滑作用,导致抗剪强度参数显著降低,且强度软化系数为 70.22%。

(4) 随着干湿循环次数增加,重塑土抗剪强度呈下降趋势,内摩擦角和黏聚力均呈减小,反映了周期性库水作用对土体剪切强度参数具有劣化效应。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

参考文献:

- [1] 张景昱, 宛良朋, 潘洪月, 等. 考虑水-岩作用特点的典型岸坡长期稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(10): 1851-1858. (ZHANG Jingyu, WAN Liangpeng, PAN Hongyue, et al. Long-term stability of bank slope considering characteristics of water-rock interaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(10): 1851-1858. (in Chinese))
- [2] 郑颖人, 唐晓松. 库水作用下的边(滑)坡稳定性分析[J]. 岩

土工程学报, 2007, 29(8): 1115-1121. (ZHENG Yingren, TANG Xiaosong. Stability analysis of slopes under drawdown condition of reservoirs[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1115-1121. (in Chinese))

- [3] PINYOL N M, ALONSO E E, COROMINAS J, et al. Canelles landslide: modelling rapid drawdown and fast potential sliding[J]. Landslides, 2012, 9(1): 33-51.
- [4] JIAN W X, XU Q, YANG H F, et al. Mechanism and failure process of Qianjiangping landslide in the Three Gorges Reservoir, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 72(8): 2999-3013.
- [5] WANG F W, ZHANG Y M, HUO Z T. Qianjiangping landslide, Three Gorges Reservoir, China[J]. Landslides, 2003, 1(2):157-162.
- [6] 杨逾, 袁杰, 王树达. 海水位上升条件下软土地基竖向位移数值模拟分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(6): 135-141. (YANG Yu, YUAN Jie, WANG Shuda. Soft clay vertical displacement of foundation under sealevel rise condition by numerical simulation[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(6): 135-141. (in Chinese))
- [7] WOLTER A, STEAD D, WARD B C, et al. Engineering geomorphological characterisation of the Vajont Slide, Italy, and a new interpretation of the chronology and evolution of the landslide[J]. Landslides, 2016, 13(5): 1067-1081.
- [8] ALONSO E F, PINYOL N M. Criteria for rapid sliding: I a review of Vaiont case[J]. Engineering Geology, 2010, 114(3):198-210.
- [9] 王海东, 高昌德, 刘方成. 含水率对非饱和砂土力学特性影响的试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(1): 90-96. (WANG Haidong, GAO Changde, LIU Fangcheng. Experimental study of the influence of water content on the mechanical characteristics of unsaturated sandy soil[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(1): 90-96. (in Chinese))
- [10] 崔激, 张志耕, 闫澍旺. 膨胀土的干湿循环性状及其在边坡稳定性分析中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(5): 24-27. (CUI Wei, ZHANG Zhigeng, YAN Shuwang. Cyclic behavior of expansive soils and its application in slope stability analysis[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2010, 8(5): 24-27. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)