



引用格式: 冯文凯, 易小宇, 白慧林, 等. 白鹤滩水库初次蓄水对双河段岸坡稳定性的影响预测分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(1): 346-352.

Feng Wenkai, Yi Xiaoyu, Bai Huilin, et al. Prediction and analysis of influence of the first impoundment of Baihetan reservoir on the bank slope stability of shuanghe river section[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(1): 346-352.

白鹤滩水库初次蓄水对双河段岸坡稳定性的影响预测分析

冯文凯¹, 易小宇¹, 白慧林¹, 李大龙², 杨 竞¹, 尹保国¹, 齐 洋²

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059; 2. 浙江华东建设工程有限公司, 杭州 310014)

摘 要 以白鹤滩库区巧家县双河左岸土质岸坡为研究对象, 通过野外详细调查、现场钻孔剪切试验以及 SEEP&SLOPE 模块耦合分析, 针对该岸坡在未来蓄水后的稳定性问题进行预测分析。研究发现: 双河左岸土质岸坡主要由残坡积角砾土组成, 其对水敏感性较强, 饱水后角砾土内聚力降低 60.65%, 内摩擦角降低 40.0%, 内聚力受影响程度大于内摩擦角。当水位由当前状态先升至 765 m, 再升至 825 m 时, 渗流场反应明显, 坡体稳定性系数由 1.238 降至 1.098, 再降至 1.010, 降幅先大后小, 坡体由稳定状态过渡欠稳定状态后处于失稳临界状态。岸坡土体在库水作用下发生的结构损伤、强度衰减是岸坡稳定性恶化的主要原因, 其变形趋势将由蠕滑变形向整体失稳破坏发展; 在此过程中, 库水的反压作用对于岸坡水下部分具有有利作用, 促使岸坡受影响, 高程段缩减。

关键词 白鹤滩库区; 残坡积角砾土; 渗流场; 稳定性系数; 库水作用

中图法分类号 TV641.2⁺3; 文献标志码 A

Prediction and Analysis of Influence of the First Impoundment of Baihetan Reservoir on the Bank Slope Stability of Shuanghe River Section

FENG Wen-kai¹, YI Xiao-yu¹, BAI Hui-lin¹, LI Da-long², YANG Jing¹, YIN Bao-guo¹, QI Yang²

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Zhejiang Huadong Construction Engineering Limited company, Hangzhou 310014, China)

[Abstract] The stability of the left-side soil bank of the Shuanghe River in Qiaojia County in Yunnan, SW China after impoundment of the under-construction Baihetan reservoir was simulated and predicted via detailed field investigation, field drilling shear test, and the Seep & Slope module coupling analysis. The soil bank slope is mainly composed of residual deluvial breccia soil that is highly sensitive to water. After water saturation, the cohesion of breccia soil would be decreased by 60.65%, the internal friction angle decreased by 40.0%, and the degree of influence of cohesion would be greater than that of internal friction angle. Results show that when water level rises to 765 m and then 825 m from the current level, the slope stability coefficient will decrease from 1.238 to 1.098 and then to 1.010, the decline amplitude increase first and then decrease, and the slope will be in a critical state of instability after the transition from stable state to unstable state, showing very obvious changes of the seepage field. The structural damage and strength attenuation of the bank slope soil under the action of reservoir impoundment will be the main reasons for the deterioration of the bank slope stability, and the deformation trend will develop from creep deformation to the overall instability, during which the backpressure of reservoir water will have a favorable effect on the underwater part of the bank slope, and thus reduce the affected elevation section of the bank slope.

[Keywords] Baihetan reservoir area; residual deluvial breccia soil; seepage field; stability coefficient; reservoir water effect

20 世纪至今, 水库蓄水造成的塌岸问题频繁出现, 典型的案例如意大利瓦伊昂水库滑坡^[1-2], 其造成的影响巨大, 因而水库岸坡稳定性问题成为中外水利水电工程最为重视的研究课题之一。

近几十年, 在中国水利水电工程建设发展的背

景下, 中外学者对于库区岸坡稳定性方面的研究获得一定成果。对于某一库区而言, 库水升降过程、渗流场特征以及岸坡稳定性三者之间具有密切的联系^[3], 其中水位骤降影响效果更为显著^[4]。唐红梅等^[5]基于 3D 激光扫描技术, 获得土质岸坡变形

收稿日期: 2020-03-31; 修订日期: 2020-07-04

基金项目: 国家自然科学基金(41572291); 2018 年度交通运输行业重点科技项目(2018-ZD5-029)

第一作者: 冯文凯(1974—)男, 汉族, 河南原阳人, 博士, 教授。研究方向: 岩土体斜坡稳定性及灾害控制、强震区震裂斜坡地质灾害成因与防治等。E-mail: fengwenkai@cdut.cn。

投稿网址: www.stae.com.cn

破坏演化过程,在此过程中孔隙水压力呈现出相对稳定、波动以及稳定增长的变化特征;杨恒等^[6]从干湿循环角度分析土体渗透性的变化,发现干湿循环过程、次数对土体质量、含水率有较大影响;周剑等^[7]结合三峡库区木鱼包滑坡长达15年的监测数据,采用Geostudio数值分析,发现随着库水位的变动,坡体稳定性、变形速率均呈现规律性变化;江强强等^[8]通过大型物理模拟,对三峡库区老滑坡展开研究,发现水位抬升过程中坡体变形速率偏低,水位下降过程中变形速率明显加快;李永康等^[9]在秭归县白家包滑坡研究中得出相似的结论;Zheng等^[10]建立三种不同角度岸坡模型,通过水位升降得出水位变化过程中岸坡失稳过程,认为水位变化对岸坡的影响强于静水位环境;Tang^[11]通过大量调查统计,总结出5类塌岸模型,分析得出不同类型塌岸的演化特征及库水作用机制;李鹏岳等^[12]在研究中同样选用了Geostudio软件,其研究发现库水抬升过程中坡体稳定性呈现先升高再降低的特征,并且水位抬升速率越大,坡体稳定性升高后衰减的程度越大。邓永煌等^[13]、赵代鹏等^[14]对于库水引起的付托减重效应展开了深入研究。

从现有研究成果来看,大量研究案例均位于水库蓄水以后,对于水库蓄水前进行的岸坡稳定性预测分析成果偏少,尤其是对初次蓄水条件的分析不足。基于当前水库岸坡研究成果以及对白鹤滩库区详细调查,现选取白鹤滩库区一处典型土质岸坡为研究对象,采用室外试验、数值模拟相结合的手段对其在将来初次蓄水条件下岸坡稳定性问题进行预测,旨在为后期白鹤滩库区的塌岸问题研究提供借鉴和指导作用。

1 研究区工程地质条件

研究对象为云南省巧家县金塘乡双河左岸、金沙江右岸岸坡,地理坐标 $102^{\circ}59'50.43''E$ 、 $26^{\circ}46'$

$21.73''N$ 。该岸坡坡脚为303省道,在建东川格勒-巧家县高速公路(简称格巧高速)从坡肩穿过,线路高程880 m;水库正常蓄水位825 m,防洪限制水位785 m,死水位765 m。

研究区属于中高山地貌,地形变化复杂,坡顶为斜坡平台,坡度为 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$,分布高程为870~1070 m;斜坡前缘坡度较陡,为 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$,发育两条冲沟,坡面局部裸露处受降雨冲刷形成多道水槽,分布高程750~870 m;坡脚地势平坦,坡度为 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$,属金沙江阶地、漫滩,分布于高程750 m以下。该范围属于金沙江水系,地下水主要为堆积层内孔隙水,以潜水形式分布,部分为基岩裂隙水、构造裂隙水。

根据野外调查,研究区出露基岩分别为二叠系上统峨眉山组($P_2\beta$)致密块状、气孔状玄武岩、二叠系下统栖霞-茅口组(P_1q+m)深灰~灰色致密块状灰岩,表层岩土风化破碎,多呈碎块状,灰岩产状 $319^{\circ} \angle 35^{\circ}$ 。上覆第四系残坡积(Q_4^{el+dl})角砾土、冲洪积(Q_4^{al+pl})卵砾石土,结构特征如图1所示。角砾土呈浅灰、黄褐色,表层土体呈稍密~中密,中下部土体较密实,碎石、角砾含量为50%~60%,土层厚度为40~70 m(图2),主要分布于坡顶平台。岸坡处于小江断裂带内,坡顶有一处小江断裂带分支断层(F12-2)穿过,断层倾角 70° ,属于逆断层(图3)。

2 土体物理力学性质

现场取残坡积角砾土、冲洪积卵砾石土试样进行室内物理参数测试。角砾土天然密度 $1.56 \sim 1.84 \text{ g/cm}^3$,天然含水率8%~13%,饱水密度 $1.60 \sim 1.92 \text{ g/cm}^3$,饱和含水率19.6%~21.8%,角砾、碎石主要灰岩、玄武岩风化残留物,呈棱角状~次棱角状;卵砾石土天然密度 $1.65 \sim 1.82 \text{ g/cm}^3$,天然含水率12%~18%,局部已达到饱和状态,含水

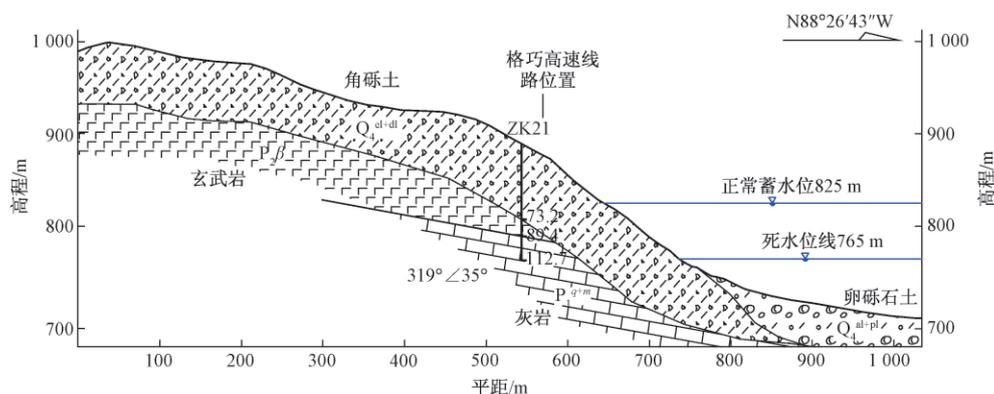


图1 岸坡工程地质剖面图(A-A')

Fig. 1 Engineering geological profile of bank slope (A-A')

投稿网址: www.stae.com.cn



图2 残坡积角砾土

Fig. 2 Residual deluvial breccia soil

率约 21.3% , 饱水密度 1.71 ~ 1.88 g/cm³。

由于现场取样对试样原生结构造成一定破坏, 为了准确获取土体天然、饱水条件下力学参数, 选用法国 Phicometre 原位岩土两用钻孔剪切试验仪进行现场试验。该设备主要由剪切探头、法向应力气压控制装置、提供剪应力的油压千斤顶和连杆以及油管等附属部分组成(图4)。其原理主要通过法向压力系统使探头内橡胶模膨胀, 将环形探头表部剪切刀片压入土体内, 再向上逐渐提拉获得剪切力, 并记录剪切位移, 由此得出应力-应变曲线, 最后根

据莫尔-库伦理论求取强度参数^[15]。

在测试前, 先对仪器进行标定, 记录注水量 (V)、标准压力 (P)、剪切探头直径 (D), 由此获得 P-V、D-V 关系曲线, 如图 5 所示。通过拟合得出 P-V、D-V 曲线的函数关系式: $P = 10^{-11} V^5 - 2 \times 10^{-8} V^4 + 2 \times 10^{-5} V^3 - 0.008 5 V^2 + 1.84 V + 5.12$, $R^2 = 0.98$; $D = 0.046 5 V + 47.62$ $R^2 = 0.97$ 。

根据钻孔剪切仪使用说明, 综合考虑该岸坡地下水、设计初始法向应力等因素, 按照式 (1) ~ 式 (3) 对法向应力、剪应力进行修正。

$$\sigma = \sigma_0 + \gamma_w (h_w + h_0) - P_e \quad (1)$$

$$\sigma = \sigma_0 + \gamma_w (h_w + h_0) - f(V) \quad (2)$$

$$\tau = \frac{T_{max}}{S} = \frac{T_{max}}{\pi L g(V)} \quad (3)$$

式中: σ 为法向应力修正值 kPa; σ_0 为初始设计法向应力 kPa; τ 为剪应力修正值 kPa; T_{max} 为加载过程中测得剪切破坏后最大剪力 kN; P_e 为 $P = f(V)$ 函数值 kPa; h_w 为地下水位深度 m; h_0 为法向压力控制装置内稳定水位面距离地面高度 m; r_w 为水的重度; S 为剪切表面面积 $S = \pi D L$ L 为剪切探头有效长度 D 为 $g(V)$ 函数值。

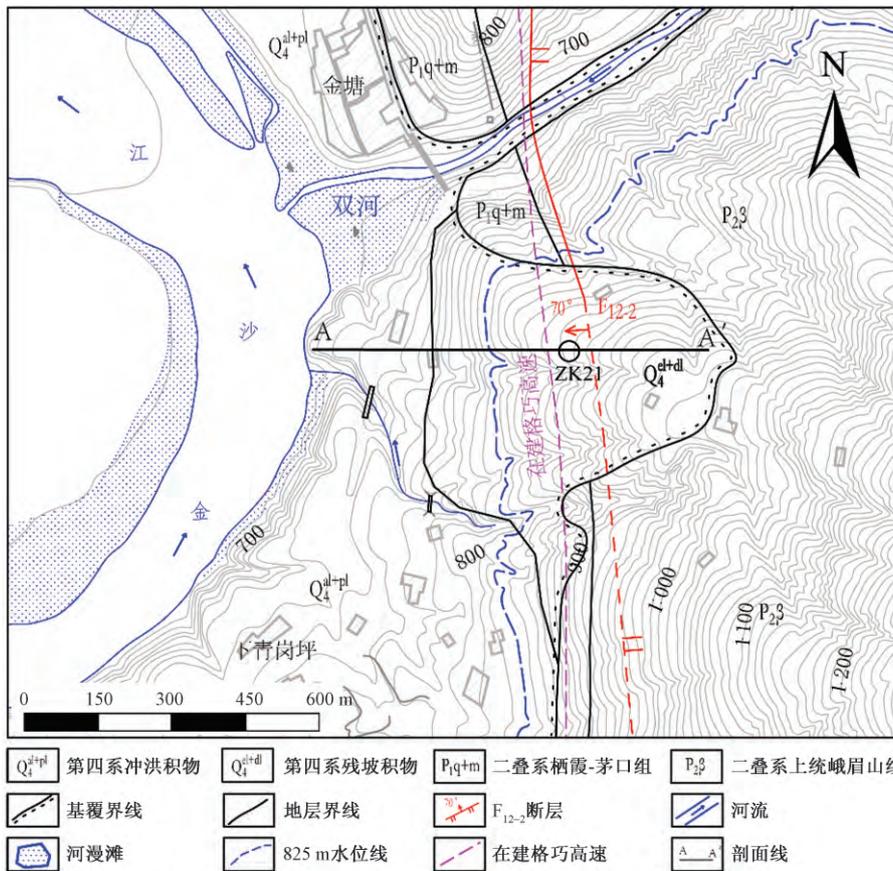
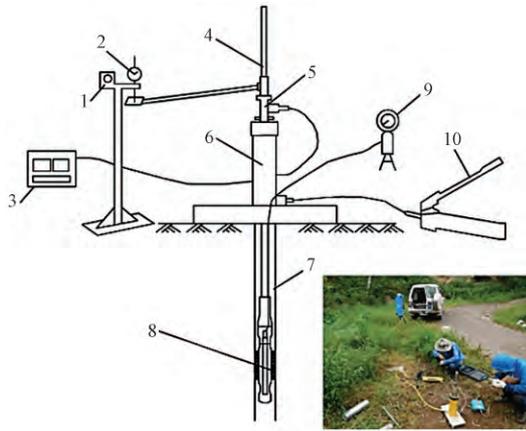


图3 研究区工程地质平面图

Fig. 3 Engineering geological plan of the study area

投稿网址: www.stae.com.cn



1 为计时器;2 为千分表;3 为测试数据显示器;4 为连杆;
5 为测力计;6 为中空千斤顶;7 为测试孔;8 为剪切探头;
9 为气压控制系统;10 为千斤顶加压泵

图4 钻孔剪切仪组件示意图

Fig. 4 Schematic diagram of borehole shear test

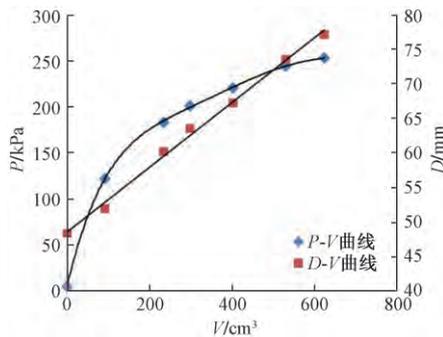


图5 P-V、D-V 关系曲线

Fig. 5 P-V, D-V relationship curves

经修正后,拟合得出如图6所示的天然、饱和状态下残坡积角砾土正应力-剪应力($\sigma - \tau$)关系曲线,拟合度较高。通过莫尔-库伦强度理论分析得出,天然条件下角砾土内摩擦角为 43.1° ,内聚力为 18.3 kPa ,饱水后内摩擦角为 26.3° ,内聚力为 7.2 kPa ,内聚力降幅 60.65% ,内摩擦角降幅 40.0% 。由此可见,角砾土内聚力受含水率的影响程度强于内摩擦角,其原因在于角砾土内的细粒组分主要由黏土矿物组成,遇水后原生结构在水分子作用下扩张、膨胀,导致土体黏聚强度降低,而角砾之间的摩擦受孔隙水影响程度相对较弱,此时摩擦强度构成饱水状态下角砾土的主要组成部分。

3 水库蓄水对岸坡稳定性的影响

3.1 模型概化

选用 Geostudio 软件中的 SEEP 模块、SLOPE 模块进行岸坡稳定性耦合分析,主要考虑当前水位、死水位线 765 m 水位、 825 m 水位条件下的渗流场特征以及岸坡稳定性变化特征。计算剖面选取 A-A'

剖面,该剖面通过勘查钻孔、野外调查综合确定,岩土体层序关系与实际工程开挖揭露情况一致。

由于岸坡结构特征较为复杂,水库蓄水的影响带主要在残坡积角砾土层,为了把握研究对象的主次关系,对分析模型进行适当的假设概化,以达到最佳分析结果。假设:①地层中玄武岩、灰岩均属于硬质岩,分析图层中将两种岩性归为一类;②模型中不考虑浅桩基、路基对岸坡稳定性的影响;③将同一图层材料视为均质体。按上述假设条件建立如图7所示的分析模型,共4924个节点,4783个单元,左右两侧采用水头边界,坡面为自由下渗边界。

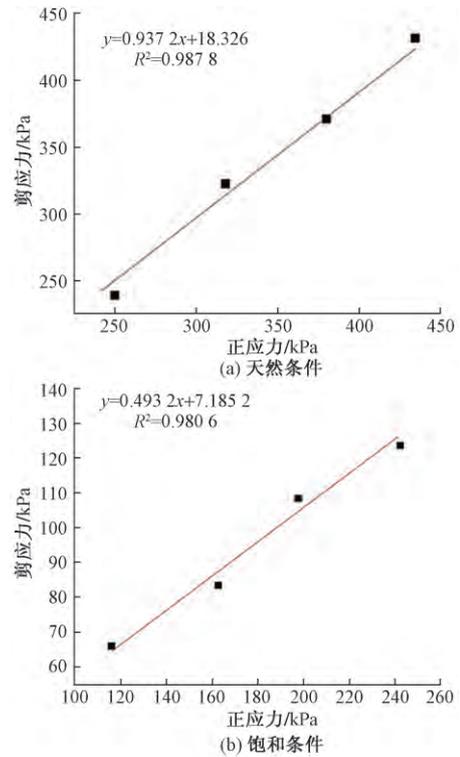


图6 角砾土剪应力-正应力拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve of shear stress-normal stress of breccia soil

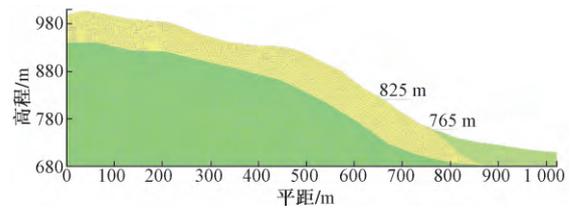


图7 岸坡模拟分析概化模型

Fig. 7 Generalization model of bank slope simulation analysis

3.2 计算参数及条件

模型渗流分析中的土水特征曲线 (soil-water characteristic curve SWCC) 基于实测饱和含水率、残余含水率,渗透系数取格巧高速公路工程实测值 $0.042 \sim 0.056 \text{ cm/s}$,通过 SEEP 模块内置 Van-Ge-

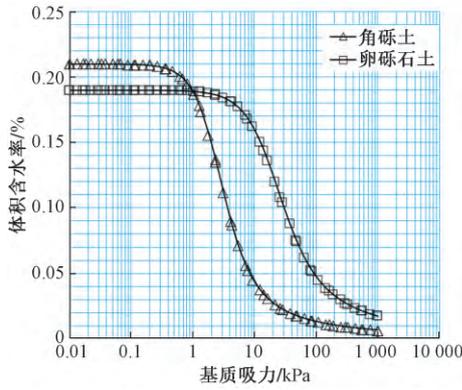


图8 材料土水特征曲线

Fig. 8 Soil water characteristic curve of materials

nuchten 模型估算角砾土、卵砾石土 SWCC 曲线(图8);基岩采用饱和材料参数。

数值模拟旨在研究初次蓄水条件下岸坡稳定性特征,主要考虑当前水位上升至死水位线 765 m,死水位线 765 m 上升至正常蓄水位 825 m 两种工况下岸坡渗流场特征及岸坡稳定性特征。

3.3 模拟结果分析

图9所示为当前水位条件下岸坡渗流场特征,可以看出,在阶地范围内地下水位线存在于卵砾石土层中,水位深度为 15~20 m,与前期勘察资料相符;随着高程增大,地下水位线主要分布在基覆界面,上覆残坡积角砾土多处于非饱和状态,格巧高速公路勘察孔内也未见稳定地下水。地下水位线形态与地形具有一致性。

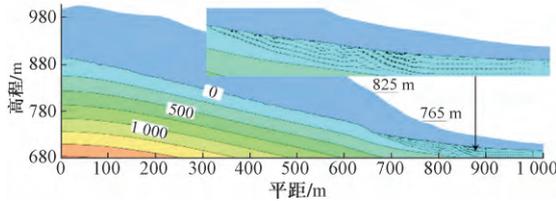


图9 当前水位岸坡渗流场特征

Fig. 9 Characteristics of seepage field of current water level bank slope

随着水位上涨,至死水位 765 m 时,坡脚陡缓变化段地下水位线明显提高,坡体中后部地下水位线未表现出明显的提升,地下水位线整体呈现缓-陡-缓的变化趋势(图10)。当水位升至 825 m,地下水位线出现更为显著的变化,地下水位线提升幅度增大,埋深 50~60 m,水位线较缓,无明显起伏形态,渗流流线角度约 15°(图11);按格巧高速公路当前规划线路,部分桩基将处于地下水位以下。

结合不同水位条件下岸坡渗流场特征进行岸

坡稳定性耦合分析。当前水位条件下,岸坡处于稳定状态,稳定性系数为 1.238;当水位升至 765 m,地下水位线上升,饱和-非饱和过渡带深度提升,岸坡土体含水率整体提高,土体力学强度衰减,抗剪切能力减弱,导致稳定性降低至 1.098,处于欠稳定状态,受影响高程段为 740~920 m(图12);水位再次升高至 825 m 时,饱水范围进一步扩大,土体含水率区间增大,岸坡纵深土-水结构发生明显变化,水位线附近土体软化,并且具有良好临空条件,坡体稳定性系数降低至 1.010,处于失稳临界状态,但由于水位线以下大部分受到库水反压作用,因而受影响高程段缩小至 815~935 m(图13)。

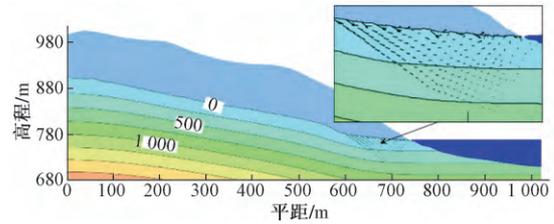


图10 765 m 水位岸坡渗流场特征

Fig. 10 Seepage field characteristics of bank slope with 765 m water level

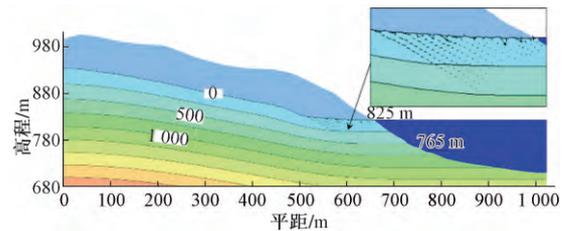


图11 825 m 水位岸坡渗流场特征

Fig. 11 Seepage field characteristics of 825 m water level bank slope

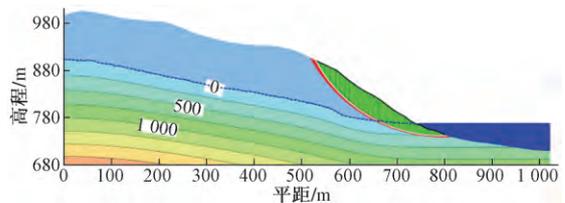


图12 765 m 岸坡稳定性分析结果

Fig. 12 Analysis results of 765 m bank slope stability

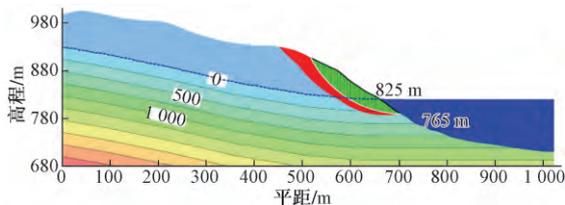


图13 825 m 岸坡稳定性分析结果

Fig. 13 Analysis results of 825 m bank slope stability

3.4 岸坡稳定性影响评价

现有研究成果表明,水对土体的影响主要表现在两个方面,一方面,孔隙水作用于颗粒之间,起到润滑作用,削弱颗粒间摩擦阻力,降低摩擦强度^[16];另一方面,孔隙水与土体发生反应,包括颗粒间胶结体、土体自身的矿物组分,导致土体细观结构严重损伤,这个过程中化学溶蚀、离子交换可导致黏聚强度衰减^[17]。白鹤滩库区蓄水将造成双河左岸岸坡角砾土结构损伤,加之孔隙水在粗颗粒间的润滑作用,促使土体黏聚强度、摩擦强度整体降低,从钻孔剪切试验结果可以看出相似的规律,但库水对黏聚强度的影响程度大于摩擦强度。

土体结构决定土体的强度,而土体的强度又是维持坡体稳定的主控因素。从前述模拟结果来看,水位由当前状态逐渐甚至正常蓄水位 825 m,岸坡稳定性系数由 1.238 降低至 1.010,处于失稳临界状态(图 14)。在蓄水至 765 m 的第一阶段,岸坡稳定性出现明显的降低,所影响岸坡高程段较大,也反映出土体对水敏感性较强,在实际蓄水过程中极有可能表现出沿水位面附近向临空方向发生蠕滑变形的迹象。当水位线由 765 m 升至 825 m 时,库水影响范围增大,土体强度的进一步衰减导致岸坡稳定性进一步降低,在坡体陡倾临空面条件下,构成滑动破坏的趋势。

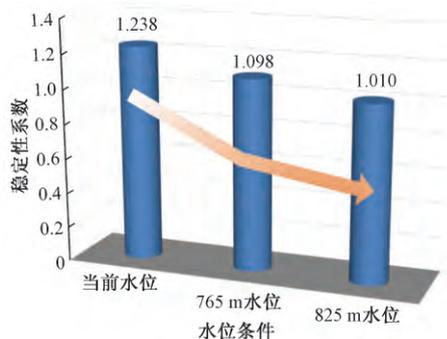


图 14 岸坡稳定性随水位线变化趋势

Fig. 14 Variation trend of bank slope stability with water level line

由于库水升至 825 m 后,765 m 水位线附近的岸坡区承受较大的水压,这种库水对岸坡的反压促使这一坡段稳定性反而增大,从而表现出库水影响的岸坡高程段降低,随着后期库水的调度回落,其所影响的范围极可能再次扩大,并且这个过程中的干湿循环作用对土体强度的影响更为强烈。

4 结论

通过野外调查、现场试验以及库水作用下的渗流场-稳定性耦合分析,得出以下结论。

(1) 白鹤滩库区双河左岸岸坡属于典型土质斜坡,坡体上覆残坡积角砾土对水敏感性较强,饱水后内聚力降低 60.65%,内摩擦角降低 40.0%,内聚力受影响程度大于内摩擦角。

(2) 初期蓄水至正常蓄水位 825 m,随着水位的上升,岸坡表现出不同的渗流场特征,坡体稳定性逐渐降低至临界失稳状态,整个过程中,降幅先大后小。

(3) 库水对岸坡土体强度的影响显著,土体结构遇水损伤、强度衰减是岸坡稳定性恶化的主要原因;水位线以下一定深度的反压作用有利于岸坡局部坡段的稳定性,库水由 765 m 升至 825 m,库水影响高程段由 740~920 m 缩减至 815~935 m。

参 考 文 献

- [1] 王兰生. 意大利瓦依昂水库滑坡考察[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(3): 145-148, 158-159.
Wang Lansheng. Landslide investigation of vaion reservoir in Italy [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007, 18(3): 145-148, 158-159.
- [2] Panizzo A, De Girolamo P, Di Risio M, et al. Great landslide events in Italian artificial reservoirs [J]. Natural Hazards and Earth System Science, 2005, 5(50): 733-740.
- [3] 熊茹雪, 许万忠, 史丁康. 库水位升降对岸坡稳定性影响研究综述[J]. 地质灾害与环境保护, 2019, 30(2): 86-91.
Xiong Ruxue, Xu Wanzhong, Shi Dingkan. A review of the study on the influence of the rise and fall of reservoir water level on the stability of bank slope [J]. Geological Hazards and Environmental Protection, 2019, 30(2): 86-91.
- [4] 王林峰, 李林刚, 杨 洵. 三峡库区碎石土质岸坡失稳启动机制研究——以龙江红岩子滑坡为例[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(S2): 209-214.
Wang Linfeng, Li Lingang, Yang Xun. Study on the initiation mechanism of gravel soil bank slope instability in the Three Gorges Reservoir Area—taking Hongyanzi landslide of Longjiang River as an example [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S2): 209-214.
- [5] 唐红梅, 周云涛, 李俊男. 库水升降作用下的类土质岸坡变形与破坏试验分析[J]. 灾害学, 2018, 33(3): 74-79.
Tang Hongmei, Zhou Yuntao, Li Junnan. Experimental analysis of deformation and failure of soil like bank slope under the action of reservoir water fluctuation [J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(3): 74-79.
- [6] 杨 恒, 黄 英, 周 丹, 等. 干湿循环对云南红土渗透性的影响[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(27): 289-297.
Yang Heng, Huang Ying, Zhou Dan, et al. The influence of dry wet cycle on the permeability of Yunnan laterite [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(27): 289-297.
- [7] 周 剑, 邓茂林, 李卓骏, 等. 三峡库区浮托减重型滑坡对库水升降的响应规律[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(5): 136-143.
Zhou Jian, Deng Maolin, Li Zhuojun, et al. Response law of floating and reducing heavy landslide to reservoir water fluctuation in

- Three Gorges Reservoir Area[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(5): 136-143.
- [8] 江强强,焦玉勇,宋亮,等. 降雨和库水位联合作用下库岸滑坡模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(11): 4361-4370.
Jiang Qiangqiang, Jiao Yuyong, Song Liang, et al. Model test study of reservoir bank landslide under the combined effect of rainfall and reservoir water level [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(11): 4361-4370.
- [9] 李永康,许强,董远峰,等. 库水位升降作用对动水压力型滑坡的影响——以三峡库区白家包滑坡为例[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(18): 18-24.
Li Yongkang, Xu Qiang, Dong Yuanfeng, et al. Influence of reservoir water level rise and fall on hydrodynamic pressure landslide: taking Baijiabao Landslide in Three Gorges Reservoir Area as an example[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(18): 18-24.
- [10] Zheng J, Yang X J, Fan H H, et al. Experimental study on the failure process of the homogeneous bank slopes of reservoir during the water level's fluctuation [J]. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences* 2018, 47(7): 1430-1434.
- [11] Tang M G. Types of typical bank slope collapses on the three gorges reservoir[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2006, 14(2): 172-177.
- [12] 李鹏岳,巴仁基,倪化勇,等. 库水位升降速率对雅安双家坪堆积体滑坡稳定性影响模拟分析[J]. *地质力学学报*, 2017, 23(2): 288-295.
Li Pengyue, Ba Renji, Ni Huayong, et al. Simulation analysis of the influence of reservoir water level rise and fall rate on the stability of Shuangjiaping accumulation landslide [J]. *Journal of Geomechanics*, 2017, 23(2): 288-295.
- [13] 邓永煌,易武,赵新建. 不同库水位升降速率作用下浮托减重型滑坡稳定性分析[J]. *科学技术与工程*, 2013, 13(32): 9554-9558.
Deng Yonghuang, Yi Wu, Zhao Xinjian. Stability analysis of heavy-duty landslides under different water level rise and fall rates [J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 13(32): 9554-9558.
- [14] 赵代鹏,王世梅,谈云志,等. 库水升降作用下浮托减重型滑坡稳定性研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(4): 1017-1024.
Zhao Daipeng, Wang Shimei, Tan Yunzhi, et al. Study on the stability of heavyweight landslide under the action of reservoir water lifting [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(4): 1017-1024.
- [15] 冯文凯,易小宇,白慧林,等. 原位钻孔剪切试验及其在残坡积土中的应用[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(34): 289-293.
Feng Wenkai, Yi Xiaoyu, Bai Huilin, et al. In situ borehole shear test and its application in eluvial soil [J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(34): 289-293.
- [16] 汤连生,张鹏程,王洋,等. 土体内外摩擦及摩擦强度试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 3(6): 974-979.
Tang Liansheng, Zhang Pengcheng, Wang Yang, et al. Experimental study on internal and external friction and friction strength of soil [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 3(6): 974-979.
- [17] 刘剑,崔鹏. 水土化学作用对土体黏聚力的影响——以蒙脱石-石英砂重塑土为例[J]. *岩土力学*, 2017, 38(2): 419-427, 434.
Liu Jian, Cui Peng. Influence of soil and water chemistry on cohesion of soil mass: taking montmorillonite quartz sand remolded soil as an example [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(2): 419-427, 434.