

库水位变动情况下库岸边坡稳定性研究

——以白鹤滩水电站石圪垱滑坡为例

崔华丽^{1,2}, 谯鹏志^{*1,2}, 王佃明^{1,2}

(1. 成都华建地质工程科技有限公司, 四川 成都 611734; 2. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734)

摘要:精细化研究库水位变动对库岸边坡稳定性影响具有重要意义, 本文以白鹤滩水电站库区石圪垱边坡为研究对象, 通过地质分析, 结合普适性监测仪GNSS位移监测数据、气象站降雨数据及库水位涨落数据, 并利用饱和-非饱和渗流有限元软件模拟不同库水位以及库水位以不同速度下降20 d后边坡稳定性。研究表明: 稳定渗流情况下岸坡安全系数较瞬态渗流情况下增大约17.6%, 库水位上升岸坡稳定性增加, 反之, 稳定性系数降低。库水位降速越大, 岸坡稳定性降低越明显, 降速相差0.5 m/d, 稳定性系数下降约3.2%。库水位下降前期稳定性系数下降较为明显, 第10天稳定系数降至最低, 与现场GNSS监测数据结果具有高度一致性, 监测数据的变化提前预报了滑坡的发生, 显示了普适性监测仪器的监测成效与预警作用。

关键词: 库岸边坡; 水位下降; 饱和-非饱和渗流; 边坡稳定性; 监测预警; 白鹤滩水电站

中图分类号: P642.22; TV697 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2023)05-0036-07

Study on stability of reservoir bank slope under fluctuated water level: A case of Shigenao Landslide in Baihetan Hydropower Reservoir

CUI Huali^{1,2}, QIAO Pengzhi^{*1,2}, WANG Dianming^{1,2}

(1. Chengdu Huajian Geological Engineering & Technology Co., Ltd, Chengdu Sichuan 611734, China;

2. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China)

Abstract: Refined study of the influence of the water level fluctuation on bank slope stability is of great significance. Taking the Shigenao Landslide in Baihetan Hydropower Reservoir as an example in the paper, based on geological conditions, combined the monitoring data of universal geo-hazard monitoring instrument, rainfall data from the meteorological station and reservoir water level fluctuation data, the stability of the slope in different water levels and water level dropped over 20d in different speeds was simulated by the finite element method. The results show that the safety factor increases about 17.6% in the stable seepage flow compared with the condition of transient seepage, the stability increased as the reservoir water level rises, otherwise the stability decreases. The greater the drop rate of reservoir water level, the worse the stability, and the stability decreases by about 3.2% when the deceleration rate increases by 0.5m/d. The factors of stability decreases significantly in the early stage, and reached to the lowest in the 10th day, which is highly coincide with the GNSS monitoring data. The monitoring data predicted the occurrence of the landslide in advance which shows the monitoring effect and forewarning function of the universal monitoring instrument.

Key words: landslide in reservoir bank slope; water level dropping; saturated-un-saturated seepage; stability of the slope; monitoring warning; Baihetan Hydropower Station

收稿日期: 2023-06-21; 修回日期: 2023-08-29 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.05.006

第一作者: 崔华丽, 女, 汉族, 1983年生, 工程师, 岩土工程专业, 硕士, 从事地质灾害成灾机理和防治技术研究工作, 四川省成都市郫都区成都现代工业港港华路139号, 287271085@qq.com。

通信作者: 谯鹏志, 男, 汉族, 1995年生, 助理工程师, 地质学专业, 硕士, 从事地质灾害监测预警研究工作, 四川省成都市郫都区成都现代工业港港华路139号, qiaopzh@qq.com。

引用格式: 崔华丽, 谯鹏志, 王佃明. 库水位变动情况下库岸边坡稳定性研究——以白鹤滩水电站石圪垱滑坡为例[J]. 钻探工程, 2023, 50(5): 36-42.

CUI Huali, QIAO Pengzhi, WANG Dianming. Study on stability of reservoir bank slope under fluctuated water level: A case of Shigenao Landslide in Baihetan Hydropower Reservoir[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5): 36-42.

0 引言

蓄水、泄洪、降雨等因素导致的水位变化直接影响库岸边坡的稳定性^[1-3]。三峡库区自2003年试验性蓄水以来,库水位升降和降雨引发了大量的滑坡灾害,造成了重大人员财产损失。开展库岸边坡稳定性影响因素定量研究,并结合物联网技术建立高效科学的地质灾害监测预警系统,大力提升库区地质灾害防治能力,是诸多学者一直研究的问题。

徐永强等^[4]利用有限元分析软件对三舟溪滑坡在实际降雨和三峡工程运行库水位条件下的稳定性进行了分析,得出滑坡的最危险升降速度和降雨量,提出滑坡水位下降比与滑坡稳定性关系。肖婷等^[5]采用Geo-studio软件的Sigma模块对滑坡进行变形模拟,并运用R/S分析方法判断滑坡的变形持续性,结合野外调查情况,综合评价分析了三峡库区四方碑滑坡的稳定性并对滑坡发展趋势进行了预测。黄观文等^[6]以三峡库区新铺滑坡为例,分析了在降雨及库水位影响下滑坡时滞影响并对滑坡变化趋势进行了预测。檀梦蛟等^[7]以三峡库区麻地湾滑坡为例,分析了滑坡前缘及后缘地下水位变化与库水位及降雨的响应。江强强等^[8]选取三峡库区黄土坡滑坡临江I号崩滑体为对象,通过室内模型试验研究水位波动、降雨及其组合作用下滑坡模型的变形情况。段祥宝等^[9]通过室内试验模拟多种材质的边坡在水位降落过程中的非稳定渗流物理过程,分析了水位降落过程中上游边坡的渗流场特点。黄健等^[10]从构建地质灾害实时监测预警系统的主要关键技术入手,研发了基于新一代信息技术的地质灾害实时监测预警系统。许强等^[11]提出滑坡时空演化规律及预警预报模型,在实践中取得了较好的应用效果,成功预测了多起滑坡。侯圣山等^[12]、马娟等^[13]、杜亮等^[14]通过分析普适型监测仪器在滑坡监测预警实践中的应用优势,为地质灾害监测预警提供了新的思路。

现有库岸滑坡研究多以三峡库区滑坡为例,通过有限元数值模拟或者室内模型试验开展,分析影响岸坡失稳的因素。目前,针对白鹤滩岸坡稳定性研究的资料较少,尤其是结合GNSS自动化监测以及现场调查全面反映滑坡真实变形状态的研究更少。本文以白鹤滩库岸石圪垯滑坡为例,通过地质分析,结合普适型监测数据分析,运用Geostudio有限元分析软件模拟库岸边坡在渗流与强度折减法耦合作用下的稳定性,精细化衡量库水位变动对岸坡

稳定性的影响,以期为白鹤滩库岸边坡失稳与监测预警提供新的思路与借鉴。

1 研究区概况

白鹤滩水电站位于四川和云南交界,自2021年4月开始蓄水,2022年12月2日库水位上升824.70 m,上升幅度达165.0 m;水电站运行期间最低水位765.0 m,最高水位824.70 m,升降水位差60.0 m,最大库容达 $256 \times 10^8 \text{ m}^3$,库区地形起伏较大、断裂构造发育,加之蓄水引起的水位变化直接影响库岸边坡的变形趋势,对水电站基础设施和上下游居民生命财产安全造成潜在威胁^[15-16]。

1.1 石圪垯滑坡概况

石圪垯滑坡位于白鹤滩水电站库区黑水河西岸,白鹤滩库区国道G353复建工程(阳葫路C段)从滑坡体中部穿过。该滑坡平面形态总体呈“圈椅状”(如图1),斜长258.0 m,横宽约330.0 m,滑坡后缘高程892.0~913.0 m,前缘高程740.0 m,为涉水滑坡。滑坡体平均厚度10.0 m,体积约 $85.14 \times 10^4 \text{ m}^3$,滑坡的滑向方位约 30° ,属中型岩土质滑坡。



图1 滑坡全貌

Fig.1 Full picture of the landslide

1.2 滑坡区地质情况

滑坡所在区域属侵蚀中山河谷地貌,地形较陡,整体坡度约 $40\% \sim 60\%$,平均坡角 32.5° ,局部陡峭,斜坡坡角达 42.2° 。滑坡体范围内上表层为第四系残坡积层(Q_4^{el+dl})含碎石粉质粘土(3.0~8.0 m,局部可达10.0 m以上),下伏寒武系上统二道水组(ϵ_3e)泥砂质白云岩夹砂质页岩。大坪子断裂从该处穿过,断面产状 $200 \sim 240^\circ \angle 50 \sim 60^\circ$,断层长约3.0 km,宽15.0~30.0 m,为逆断层,岩体结构十分破碎,完整性极差(如图2)。

1.3 滑坡变形情况

2021年9月20日,石圪垯斜坡产生了局部滑动

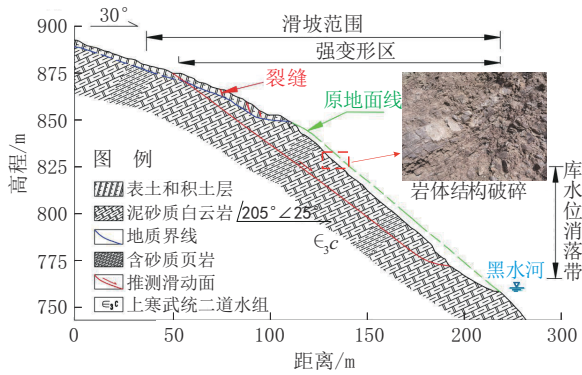


图2 岸坡纵剖面

Fig.2 Cross-section of the slope

破坏,9月26日15时30分,库岸已发生大面积浅层岩、土质滑动破坏,分布高程775.0~870.0 m,相对高差约115.0 m,坡度约为25~35°,主滑方向30°,纵向长约150.0 m,横向宽约330.0 m,面积约 $5.0 \times 10^4 \text{ m}^2$,塌方规模约 $50 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

现场调查发现,在变形区范围内宽度5 mm以上的裂缝共发育约150条(如图3)。

L1~L3裂缝群走向近NE向,近垂直于滑坡方向。L1位于滑坡后缘边界,宽度约0.25 m,长度约

5.6 m,最深部位可达1 m,呈直线状。L2位于滑坡体中上部,受前缘牵引拉张变形,裂缝长约3.4 m,宽约0.2 m,最深部位可达1.5 m,裂缝两侧下挫约0.15 m,呈直线状。L3位于滑坡中部,受前缘牵引拉张变形,错断蓄水池和农家生产用房,错距约30 cm,裂缝长约6 m,最宽处约0.3 m,最深部位可达3.0 m,平面上呈弧形。L4~L7裂缝群位于滑坡右边界,呈一系列雁列状拉张裂缝,受前缘牵引拉张和侧缘剪切拉张力共同作用,平面上形成明显的雁列式阶梯状裂缝,裂缝最宽处约0.2 m,每阶平均下挫约0.2 m,走向SEE向;L8~L9裂缝群位于滑坡左边界,呈一系列近平行的拉张裂缝,前缘有下挫迹象,错距0.05~0.15 m,走向NNW向,平面形态呈直线形—弧形。从裂缝的展布上可以看出,左右缘与后缘裂缝已经贯通,说明滑坡内部滑面已经形成,有可能引发更大范围的滑动。

2 监测预警系统建设

2.1 监测点的布设与运行

该岸坡布置了3套GNSS地表位移监测站,分别位于塌岸区域边缘部位,1套GNSS地表位移监

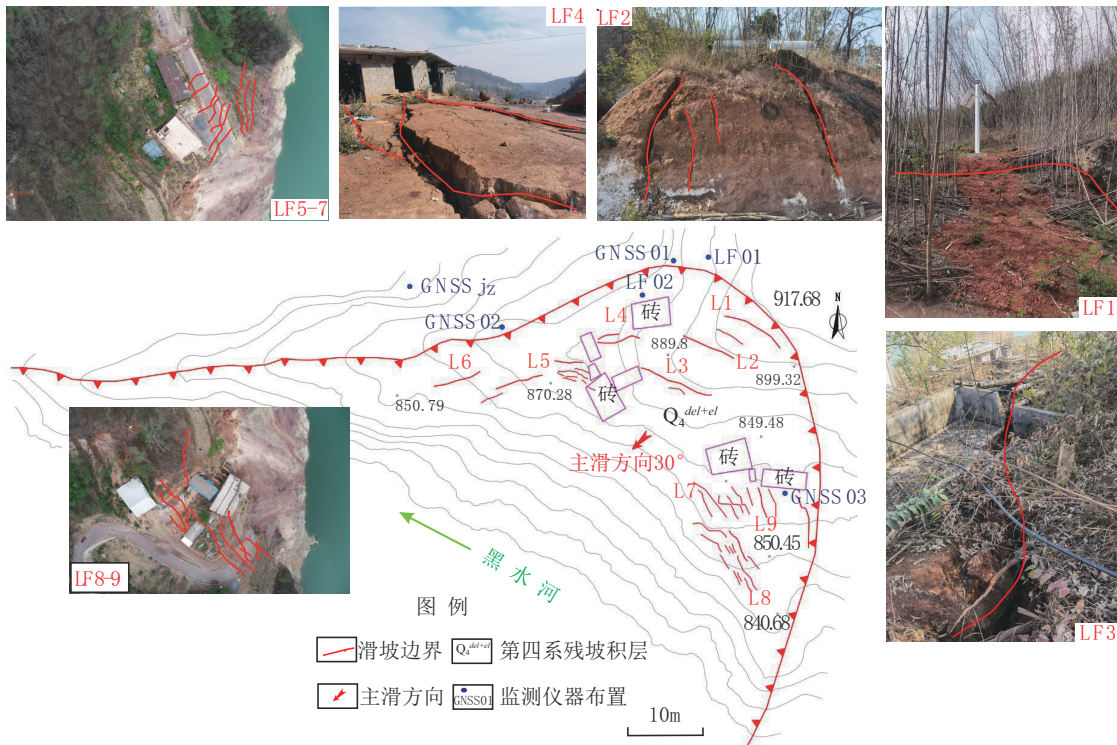


图3 裂缝分布及监测仪器布置平面

Fig.3 Layout of crack distribution and monitoring instruments

测基站和2套地表裂缝监测站位于外围明显裂缝处(参见图3)。设备安装与调试完成后,监测数据同步上传至地质灾害监测预警平台。若岸坡变形较大,位移-时间曲线的斜率会不断增加,尤其是在斜坡进入临滑阶段,变形曲线近于竖直,与横坐标轴的夹角接近 90° ,该滑坡预警模型采用改进的切线角模型^[11]。一旦滑坡进入加速变形阶段,位移切线角达到 89° ,监测预警系统则会发送预警信息至相关人员,实现实时预警。

2.2 监测数据分析

选取2022年5—10月历时5个月的监测数据进行对比分析,数据陆续在平台上线,监测系统运行情况良好,数据在线率达100%。

由GNSS01与GNSS03位移与库水位及降雨量关系曲线(如图4)变化可知,累计降雨量曲线呈较小台阶式缓慢上升,位移曲线在前期变化不明显,库水位曲线变化较大,有3个时间段上升,2个时间段下降。

降雨量数据反映自5月以来未发生较大的降雨量,累计降雨量最大的月份发生在7月,月降雨量达

168.2 mm,单日最大降雨量发生在7月23日,降雨量达50.9 mm,其它时间降雨量较小。9月15—28日持续小雨,2周累计降雨量达91.7 mm,9月28日降雨量达32.9 mm。

GNSS01与GNSS03监测点前期位移数据变化一直比较平稳,6月8日、7月19日、8月19日在这3个时间段的库水位下降10天后,GNSS01位移出现明显的增加,9月22日GNSS01位移曲线切线角接近 90° ,表示岸坡后缘发生较大的变形,边坡进入临滑阶段,预测滑坡将发生。

库水位自9月22日起以1.5 m/d的速度增加,其中9月28、29、30日3天的日增量达2.3 m,10月18日库水位上升至820.0 m后,GNSS03位移出现巨大增长,日增加达100 mm/d,同样位移时间变化曲线切线角接近 90° ,表示岸坡左缘也发生较大的变形,最终在库水位涨落和降雨联合作用下坡体前缘产生大面积流滑破坏,并溯源发展至后缘整体破坏,滑坡发生,GNSS03监测数据在10月29日中断,监测仪器损毁。

3 库水位降落情况下滑坡稳定性模拟分析

3.1 数值计算模型建立

根据石圪埡岸坡的工程地质条件,以主滑剖面建立数值计算模型(如图5),采用有限元数值分析软件Geostudio自带的Seep-w渗流分析模块以及Slope-w极限平衡稳定性分析模块,对岸坡稳定性进行分析。

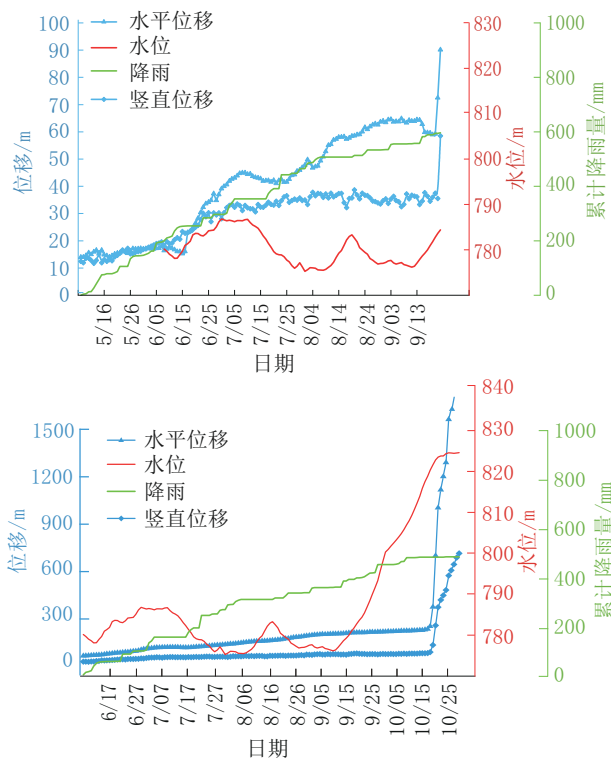


图4 位移与水位及降雨量时间关系

Fig.4 Relationship of the displacement with the water level and the rainfall time

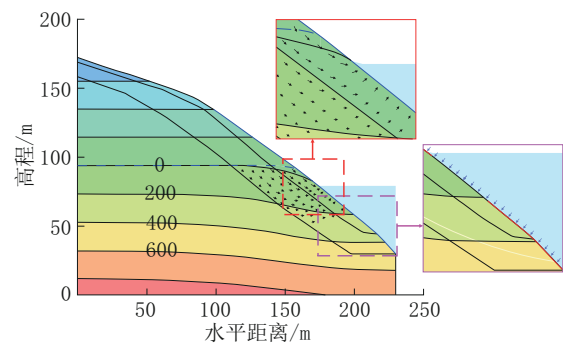


图5 数值分析模型

Fig.5 Numerical simulation analysis model

鉴于在监测周期内,降雨变化不明显,本次数值模拟分析仅考虑库水位变动对岸坡稳定性影响。通过分析岸坡在不同库水位(814.0、809.0、804.0、

799.0、794.0、789.0 m)以及库水位在814.0 m情况下以不同速度(1.0、0.5和1.5 m/d)降落情况下稳定与非稳定渗流场,并将计算得到的孔隙水压力和基质吸力用于滑坡极限平衡分析,研究渗流场和强度折减耦合情况下第20天岸坡的稳定性。

假定主滑剖面在滑动时其稳定系数 $F_s=0.98$,将主滑剖面恢复至原始地貌进行反演分析,从而获得该岸坡的粘聚力、内摩擦角,采用工程类别比法获取滑面以及滑体的重度(如表1)。结合Seep/W带的样本函数获取土-水特征曲线,利用Fredlund & Xing模型拟合,计算出滑坡岩土体渗透函数、岩土体渗透系数与基质吸力和体积含水量的关系如图6。

表1 数值模型材料参数取值

Table 1 Parameters of numerical model

类型	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	粘聚 力/kPa	内摩擦 角/($^\circ$)	饱和含 水量/%	渗透系数/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
页岩	27.5	1000	39	0.09	1×10^{-9}
强风化页岩	24	30	30	0.25	8×10^{-7}
表层强风化 粘土(1)	20.4	28	22	0.4	1×10^{-6}
表层强风化 粘土(2)	20	26	20	0.45	1×10^{-5}

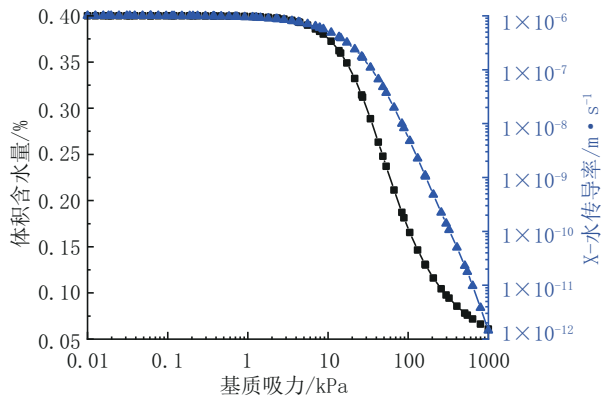


图6 滑体的基质吸力与体积含水量以及X-水传导率关系

Fig.6 Relationship of matrix suction with volumetric water content and the X-water conductivity

3.2 渗流模拟及稳定性分析

从图7中可以看出,稳定渗流情况下岸坡稳定系数明显高于瞬态渗流,库水位上升有利于岸坡的稳定,水位降至789.0 m时,4种计算情况下稳定系数相差极小,瞬态渗流反而略高于稳定渗流,库水位降速越大,岸坡越不稳定。

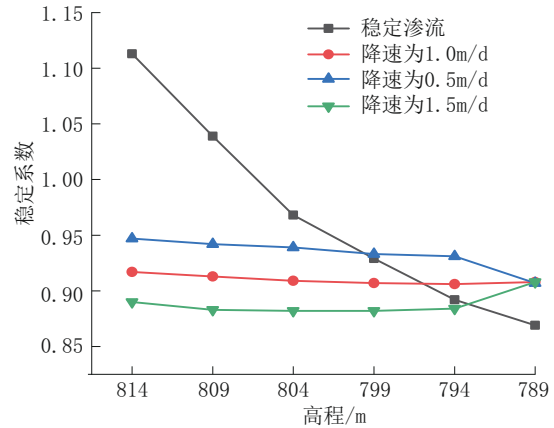


图7 稳定性系数与库水位以及降速变化关系

Fig.7 Relationship of safety factor with water level and drop rate

库水位在814.0 m稳态渗流下岸坡安全系数为1.113,岸坡处于基本稳定状态,而以1.0 m/s速度降落情况,岸坡稳定性系数降至0.917,稳定性系数降低了0.196,降幅达17.6%,此时岸坡处于不稳定状态。通过对比库水位在814.0 m高程下3种不同降速情况下稳定性系数可以发现,以1.5 m/d速度降低情况下岸坡稳定性系数为0.89,相比0.5 m/d速度情况下下降了0.057,下降比例为6%,相比1.0 m/d降速下安全系数降低了0.03,下降比例为3.2%。据此说明,库水位下降极大影响了岸坡的稳定性,是岸坡失稳的直接诱发因素。

由图8可知,水位下降前期,岸坡稳定性系数下降较快,第10天稳定性系数降至最低,随后出现平稳变化,略有回升,说明在第10天有效应力降至最低,随后土体饱和,有效应力与安全系数趋于平稳。这与GNSS监测数据在3次库水位降落10天后位移出现明显增加表现出高度一致。库水位降落速度越快,岸坡越不稳定。通过分析可知,库水位降落速度越快,岸坡内土体孔隙水压力消散速度滞后于水库降落速度,朝向坡外的水压力增加,导致岸坡稳定性下降。

白鹤滩水文站监测库水位在库水位自9月22日起以1.5 m/d的速度增加,虽然水位上升有利于边坡稳定,但是在前期3次库水位降落加之岩体结构极为破坏,联合作用下,坡体发生了较大的变形。说明砂质泥岩在库水反复浸泡下强度下降、粘聚力降低,引起岸坡稳定性下降。

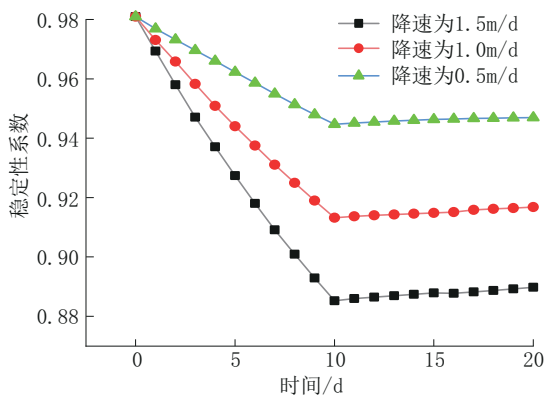


图8 稳定性系数与水位降速以及时间关系

Fig.8 Relationship of safety factor with water drop rate and time

3.3 岸坡失稳成因分析

(1)滑坡区岩体完整性较差,坡体的砂质页岩呈碎裂结构,岩体极破碎,遇水易软化且为隔水层,相对上硬下软的破碎岩体结构,为滑坡启动提供了较好的物质条件。

(2)石圪埡斜坡坡顶到坡脚,总体上由缓到陡,后缘坡度约 17° ,斜坡体中部坡度约 24° ,前缘地形坡度达 50° ,坡体前后缘高差约150.0 m。良好的地形地貌条件和势能条件与滑坡提供了基础。

(3)在监测周期内,库水位出现3次降落,且降速在1.0 m/d左右,坡体前缘涉水部分土体经循环软化、冲刷、掏蚀后,岩体抗剪强度降低,在库水位再一次上升后颗粒间的粘结力和摩阻力系数减小,土体土压力增大,土体竖向有效应力降低,滑体稳定性下降,坡体前缘首先产生小范围流滑破坏,并溯源发展至后缘产生整体拉裂破坏。

4 结论与建议

(1)破碎的岩体结构是引起白鹤滩库区石圪埡岸坡失稳的内在原因,水位反复升涨,引起坡体前缘涉水部分土体强度降低,是岸坡失稳的直接诱发原因。

(2)库水位降落情况下岸坡稳定性相比稳定渗流情况下下降约17.6%,在库水位下降前期,岸坡稳定性系数下降较明显,第10天,石圪埡岸坡稳定性降至最低,随后变化发生失稳。库水位下降速度越大,岸坡稳定性系数越低,每增加0.5 m/d的降速,稳定性系数下降约3.2%。

(3)GNSS监测仪实现了对石圪埡边坡变形的

整体监控,并且监测数据突变发生在库水位下降第10天,这与数值模拟分析具有较好的一致性,采用改进的切线角模型,及时预报了滑坡的发生,显现了普适型设备的监测成效与预警作用。

参考文献 (References):

- [1] 薛瑞. 城市地质灾害的类型和防范方法的研究[J]. 能源与节能, 2011(9):75-77.
XUE Rui. Types and prevention methods of city geological disasters[J]. Energy and Energy Conservation, 2011(9):75-77.
- [2] 解明礼. 矿山崩滑地质灾害风险评价与管理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
XIE Mingli. Risk assessment and management of landslide geohazards induced by underground mining[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [3] 陈欢. 三峡库区提升库水位下降速率条件下沟边上滑坡稳定性评价[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(9):60-65.
CHEN Huan. Stability evaluation of landslide on ditch side for drawdown rate raising in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(9):60-65..
- [4] 徐永强, 祁小博, 张楠. 基于降雨与库水位耦合的三舟溪滑坡渗流模拟及稳定性分析[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(5):111-118.
XU Yongqiang, QI Xiaobo, ZHANG Nan. Numerical simulation and stability analysis for the seepage flow in the Sanzhouxi landslide under the associative action of reservoir water level fluctuations and rainfall infiltration[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(5):111-118.
- [5] 肖婷, 殷坤龙, 杨背背. 三峡库区四方碑滑坡稳定性与变形趋势预测[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(1):10-14.
XIAO Ting, YIN Kunlong, YANG Beibei. Stability and deformation trend prediction of the Sifangbei landslide in the Three Gorges Reservoir[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(1):10-14.
- [6] 黄观文, 王家兴, 杜源, 等. 顾及降雨及库水位因素的滑坡时滞分析与预测分析[J]. 地球科学与环境学报, 2021, 43(3):621-631.
HUANG Guanwen, WANG Jiaying, DU Yuan, et al. Time-delay analysis and prediction of landslide considering precipitation and reservoir water level: A case study of Xinpu landslide in Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2021, 43(3):621-631.
- [7] 檀梦皎, 殷坤龙, 付智勇. 降雨及库水位影响下麻地湾滑坡地下水响应特征分析[J]. 中国地质灾害防治学报, 2022, 33(1):45-57.
TAN Mengjiao, YIN Kunlong, FU Zhiyong et al. Analysis on groundwater response characteristics of Madiwan landslide under the influence of rainfall and reservoir water [J]. The Chinese

- Journal of Geological Hazard and control, 2022, 33(1):45-57.
- [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):4362-4370.
JIANG Qiangqiang, JIAO Yuyong, SONG Liang, et al. Experimental study on reservoir landslide under rainfall and water-level fluctuation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40 (11) : 4362-4370.
- [9] 段祥宝,谢罗峰.水位降落条件下非稳定渗流试验研究[J].长江科学院院报,2009,26(10):7-12.
DUAN Xiangbao, XIE Luofeng. Unsteady seepage test under condition of rapid drawdown[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(10):7-12.
- [10] 黄健,巨能攀.基于新一代信息技术的地质灾害监测预警系统建设[J].工程地质学报,2015:23(1):140-147.
HUANG Jian, JU Nengpan. Establishment of early geohazard warning system using modern information technology [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(1):140-147.
- [11] 许强,汤明高,徐开祥,等.滑坡时空演化规律及预警预报研究[J].岩石力学与工程学报,2008:27(6):1104-1112.
XU Qiang, TANG Minggao, XU Kaixiang, et al. Research on space-time evolution laws and early warning-prediction of landslides [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6):1104-1112.
- [12] 侯圣山,李昂,陈亮,等.基于普适型仪器的滑坡监测预警初探——以甘肃兰州岷县三处滑坡为例[J].中国地质灾害与防治学报,2020:31(6):47-53.
HOU Shengshan, LI Ang, CHEN Liang, et al. Application of universal geo-hazard monitoring instruments in landslides and early warning of three landslides in Gansu Province: A case study in Minxian County and Lanzhou City of Gansu Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(6):47-53.
- [13] 马娟,赵文祎,齐干,等.基于普适型监测的多参数预警研究——以三峡库区卡门子湾滑坡为例[J].西北地质,2021,54(3):259-269.
MA Juan, ZHAO Wenyi, QI Gan, et al. Study on the multi-parameter early warning base on universal equipment: A case of kamenziwan landslide in the Three Gorges Reservoir [J]. Northwestern Geology, 2021, 54(3):259-269.
- [14] 彭亮,杜文学.西宁市特大滑坡监测预警示范[J].科学技术与工程,2021,21(18):7806-7813.
PENG Liang, DU Wenxue. Monitoring and early warning demonstration of huge landslide in Xining City [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(18):7806-7813.
- [15] 杨正荣,喜文飞,史正涛,等.基于SBAS-InSAR技术的白鹤滩水电站库岸潜在滑坡变形分析[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(5):83-92.
YANG Zhengrong, XI Wenfei, SHI Zhengtao, et al. Deformation analysis in the bank slopes in the reservoir area of Baihetan Hydropower Station based on SBAS-InSAR technology [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(5):83-92.
- [16] 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].科学技术与工程防治学报,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.

(编辑 王文)