

西静河水库左库岸失稳边坡稳定性分析

杨妙帆¹, 郭浩亮², 刘成栋¹, 朱延熙³

(1. 南京水利科学研究所, 南京 210029; 2. 浙江省水利水电勘测设计院, 杭州 310000;
3. 河海大学, 南京 210029)

摘要: 西静河水库位于地震频发区, 近坝库岸坡陡峻, 其左岸边坡是否稳定一直是困扰水库安全运行的主要问题之一。根据西静河水库库区地质勘察资料和坝址区水文地质条件, 对西静河水库库岸滑坡带进行了详析, 在此基础上采用不平衡推力法对左库岸失稳边坡进行了稳定性分析, 结果表明: 西静河水库左岸边坡趋于稳定, 但在持续暴雨或加载地震力的情况下边坡中段有滑坡风险, 该结论得到了现场勘察情况的支持。

关键词: 西静河水库; 地质条件; 失稳边坡; 地震荷载; 暴雨条件; 不平衡推力法; 稳定性

中图分类号: TV 697.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)01-0100-03

Stability analysis of unstable slopes on the left bank of Xijinghe Reservoir

YANG Miaofan¹, GUO Haoliang², LIU Chengdong¹, ZHU Yanxi³

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hangzhou 310000, China;

3. Hohai University, Nanjing 210029, China)

Abstract: Xijinghe Reservoir is located in an active earthquake zone, and the slopes near the dam are steep. Hence, the stability of the slopes has always been one of the problems affecting the reservoir security. Based on the geological survey data and hydrogeological conditions in the Xijinghe Reservoir, the landslide zone in the embankment of the Xijinghe Reservoir was analyzed in detail. The stability analysis of the slopes on the left bank was performed using the imbalance thrust force method. The results showed that the slopes on the left bank of the Xijinghe Reservoir is stable under the natural conditions; however, landslides may occur in the middle part of the slopes under the sustained heavy rains or earthquakes conditions. The conclusions were consistent with the in situ survey results.

Key words: Xijinghe Reservoir; geological condition; unstable slope; seismic load; heavy rain; imbalance thrust force method; stability

西静河水库是一座多年调节的中型水库, 位于金沙江水系龙川江流域西静河支流母掌田, 距楚雄市区(西北) 23 km。水库径流面积 60 km², 总库容 1 123 45 万 m³, 调节库容 898.4 万 m³, 最大坝高 60 m, 正常蓄水位 1 948.3 m。水库库盆狭小, 两岸岸坡陡峻, 右岸的塌岸和左岸库岩小规模滑坡及塌滑是该水库最为发育的地质现象。因此该水库的库岸稳定问题, 尤其是左库岸的失稳边坡稳定性问题, 直接影响到水库兴利效益的发挥^[1]。

1 研究区工程地质与水文地质概况

右岸库岸现状: 右岸库岸植被茂密, 多为森林, 地表坡度

在 20°~35° 之间, 除了在进水口上游侧岸坡正常蓄水位附近, 因库水浸蚀产生塌岸外, 其余地带库岸稳定, 无不良地质现象发育^[2]。因塌岸范围和规模较小, 右库岸可判为基本稳定。

左岸库岸现状: 左岸近坝库岸植被稀疏, 岸坡陡峻, 坡度基本在 50° 以上。现场地质考察发现, 靠近山顶部位地表覆盖层为第四系残坡积层(Q₄^{dl}) 碎石土、灰白、灰黑色黏土、粉质黏土夹碎石; 山顶下方坡面地表覆盖层则多为第四系崩积体(Q₄^{ml}), 块石、碎石夹砂土、黏土及粉质黏土; 地表出露基岩为鸡窝状白垩系下统高丰寺组(K_{1g}) 灰白、青灰色厚层状长石石英砂岩夹紫红色泥岩, 节理裂隙较发育, 产状

收稿日期: 2014-05-19 修回日期: 2014-11-12 网络出版时间: 2014-12-03

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20141203.1355.023.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51209145; 51179108; 51209144); 南京水利科学研究所基金(Y713010)

作者简介: 杨妙帆(1990-), 女(土家族), 湖南人, 主要从事大坝安全分析评估工作。E-mail: yaya112358@126.com

N6°E, NW ∠14°~18°, 倾向下游, 岩体风化程度深^[3], 强风化岩体厚度约在 50 m 以上。左岸远库端局部为旱地, 地表坡度平缓, 植被良好, 库岸稳定, 无不良物理地质现象发育^[4]。

水库库盆狭小, 枢纽区位于山谷中, 处于地震易发地带, 地震设防烈度为 7。库右岸山坡植被茂密, 左岸因水库建设期间料场开采, 植被覆盖较差。库盆两岸岸坡陡峻, 尤其是左岸, 基岩出露较多, 整个山坡稳定性差, 形成较小规模的塌滑^[5]。库区左岸发育一条大冲沟, 冲沟内有一条小河汇入水库, 是西静水库库容的重要来源, 右岸有较大冲沟 2 条, 切割较深, 常年都有水汇入库区, 但流量不大。西静水库多年平均降雨量为 900 mm, 较为充沛, 且库区拥有较为丰富的地下水资源。枢纽区地层为一套阻水性及透水性较弱的泥岩、粉砂质泥岩及长石石英砂岩, 水文地质条件相对简单, 主要有松散孔隙潜水、基岩裂隙潜水和承压水三类^[6]。地下水主要表现为顺层流动, 往往在砂、粉砂质泥岩或泥岩界面附近以泉的形式出露地表, 补给河水。库区内受构造影响, 局部地区存在承压水, 单孔涌水量 $Q=235\text{ m}^3/\text{d}$ 。

2 滑带特征

水库左岸塌滑体沿库区上、下游方向长度约 300 m, 沿坡向宽度平均约 40 m。塌滑体中部发育一小型浅表滑坡。该滑坡体沿上、下游方向长约 26 m, 沿坡向宽约 34 m, 为浅表覆盖层滑坡体, 滑床深度约 20~50 m, 目前该滑坡体处于稳定状态。在现场勘查中进行了工程地质测绘, 库区工程地质条件见图 1; 并选择了 1-1'、2-2'、3-3'、4-4' 典型断面, 剖面位置见图 2。

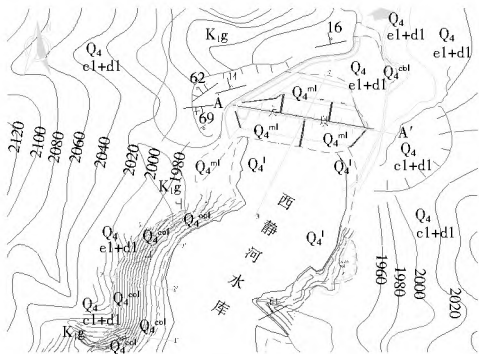


图 1 库区工程地质平面图

Fig. 1 Plan view of the engineering geology in the reservoir

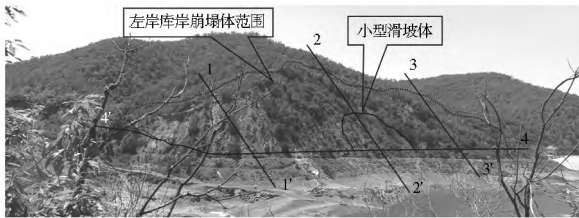


图 2 左岸库区塌坡

Fig. 2 Slope collapse on the left bank of the reservoir

由测绘成果可知, 1-1' 剖面上段基岩出露, 塌滑体主要为节理裂隙发育的表层强风化岩体, 在雨季因重力作用失稳产生崩塌, 但深度岩体稳定性较好, 下部小路以下崩塌堆积

体范围小, 厚度小, 如果失稳, 对上部库岸稳定性无大的影响。3-3' 剖面处地表覆盖层较薄, 在 25~30 m, 如果其失稳, 也是地表崩塌堆积体向库区滑动, 其厚度不大, 方量也有限, 不会对库岸稳定有太大影响。因此选择 2-2' 剖面对该崩塌堆积体的稳定性进行验算, 以判断其在各个工况下的稳定性。

3 库岸稳定计算

对于边坡稳定性的分析研究, 主要有两类方法: 一类是基于极限平衡的传统方法, 另一类则是基于有限元计算的分析方法。其中前者最常用。经勘查发现, 西静水库堆积体最危险滑移面呈折线型, 本次稳定性计算采用基于极限平衡理论的不平衡推力传递系数法^[7], 对堆积体 2-2' 剖面推测最危险滑动面进行条块划分, 按折线型不平衡传递法系数进行堆积体各条块推力及稳定性计算^[8]。

3.1 不平衡推力法

不平衡推力法针对的是折线形滑面, 其基本假定为条间力的作用方向与上一块的滑面方向平行^[9-11]。计算公式^[12]如下:

$$K_f = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left[(W_i(1-r_u) \cos \alpha_i) \text{tg} \varphi_i + C_i L_i \prod_{j=1}^{n-1} \Psi_j \right] + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} \left[(W_i \sin \alpha_i + A \cos \alpha_i) \prod_{j=1}^{n-1} \Psi_j \right] + T_n} \quad (1)$$

其中:

$$R_n = (W_n((1-r_u) \cos \alpha_n) - A \sin \alpha_n) - R_{Dn} \text{tg} \varphi_n C_n L_n \quad (2)$$

$$T_n = (W_n(\sin \alpha_n + A \cos \alpha_n) + T_{Dn}) \quad (3)$$

$$\prod_{j=1}^{n-1} \Psi_j = \Psi_1 \Psi_{i+1} \dots \Psi_{n-1} \quad (4)$$

式中: W_i 为第 i 条块的重量(kN/m); C_i 为第 i 条块内聚力(kPa); φ_i 为第 i 条块内摩擦角($^\circ$); L_i 为第 i 条块滑面长度(m); α_i 为第 i 条块滑面倾角($^\circ$); A 为地震加速度(重力加速度 g); K_f 为稳定系数; Ψ_j 为第 i 块段的剩余下滑力传递至第 $i+1$ 块段时的传递系数($j=i$)。

$$\Psi_j = \cos(\alpha_i - \alpha_{i+1}) - \sin(\alpha_i - \alpha_{i+1}) \text{tg} \varphi_{i+1} \quad (5)$$

堆积体剩余下滑推力计算公式^[13]为

$$P_i = P_{i-1} \Psi + K_s \cdot T_i - P_{Li} \quad (6)$$

其中, 传递系数为

$$\Psi_j = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \cdot \tan \varphi_i \quad (7)$$

下滑力为

$$T_i = W_i \sin \alpha_i + A \cos \alpha_i \quad (8)$$

抗滑力为

$$R_i = (W_i(\cos \alpha_i - A \sin \alpha_i) + C_i L_i) \quad (9)$$

式中: P_i 为第 i 条块推力(kN/m); P_{i-1} 为第 i 条块的剩余下滑力(kN/m), 其余符号含义同前。

3.2 参数选取

根据该区域地下水埋深综合情况并参考相似工程, 对于 2-2' 剖面堆积体土石比综合取 3:7, 堆积体天然容重平均值取 21.3 kN/m^3 , 饱和容重平均值取 22.0 kN/m^3 。计算时假定水库蓄水至正常蓄水位, 左岸库岸堆积体地下水位与水库正常蓄水位相接。采用反演分析法确定该崩塌堆积体的 c 、 φ 值, 以饱和状态来拟合连续暴雨工况。假设该堆积体在此条件下处于极限平衡状^[14], 稳定系数取 $F_s=1.0$, 选取此

时主堆积体土的 $c = 35 \text{ kPa}$, $\varphi = 23^\circ$ 。经反演分析, 并结合相似土体的经验值, 堆积体与下方强风化岩体面的抗剪强度参数 c 、 φ 值取值见表 1。

表 1 堆积体最危险滑动面抗剪强度参数取值

Tab. 1 Shear strength parameters for the most dangerous sliding surface of the accumulation body

滑带编号	反算或经验值	采用值	备注
天然状态	c/kPa	65	考虑一定的安全裕度, 对 c 、 φ 值进行适当折减。
	$\varphi/^\circ$	30	
饱和状态	c/kPa	40	
	$\varphi/^\circ$	26	

计算时考虑西静河左岸近坝库岸堆积体若产生滑坡, 将增大库区淤积, 影响水库向楚雄市供水, 对水库安全运行将产生一定程度影响, 直接经济损失估计小于 500 万元, 大于 100 万元。故将验算工程等级定为 0 级, 安全系数取 1.20, 其荷载组合应包括基本荷载和特殊荷载, 具体按以下三种工况进行计算。

表 2 堆积体最危险滑动面计算工况

Tab. 2 Calculation conditions for the most dangerous sliding surface of the accumulation body

工况	状态	安全系数取值
\bar{N}	自重天然状态	1.20
$\bar{0}$	自重+持续暴雨	1.20
$\bar{0}$	自重+持续暴雨+地震	1.05(地震按 0.15g 考虑)

4 计算结果与分析

堆积体 2-2' 剖面推测最危险滑动面条块划分见图 3。

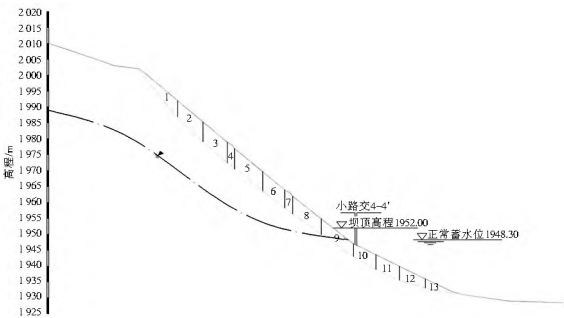


图 3 堆积体 2-2' 剖面稳定性计算条分图

Fig. 3 Strip partition of stability calculation for the 2-2' profile of the accumulation body

根据危岩体稳定程度等级划分^[15], 将堆积体稳定性评价标准确定为: $F_s < 1.0$ 时为不稳定; $1.0 \leq F_s < 1.2$ 时为欠稳定; $1.2 \leq F_s < 1.3$ 时为基本稳定; $F_s \geq 1.3$ 时为稳定。

对堆积体 2-2' 剖面不同工况下的稳定系数计算结果见表 3。

由表 3 可知, 西静河左岸失稳边坡在天然自重工况下 (\bar{N} 工况), 堆积体稳定系数 F_s 在 1.51 以上, 处于稳定状态; 在持续暴雨饱水情况下 ($\bar{0}$ 工况), 堆积体稳定系数 F_s 上段及下段均 > 1.20 , 表明其基本稳定或稳定, 但中段稳定系数为 $F_s = 1.061 \sim 1.152$, 即中段欠稳定; 在持续暴雨饱水和地

震力的情况下 ($\bar{0}$ 工况), 仅第 1 条的稳定系数为 1.417, 稳定外, 其他各段稳定系数 $F_s = 0.908 \sim 1.089$, 表明其欠稳定或不稳定, 中段稳定系数 F_s 小于 1.0, 表明其不稳定。

表 3 堆积体最危险滑动面稳定系数计算结果

Tab. 3 Stability coefficients for the most dangerous sliding surface of the accumulation body

土条	工况 \bar{N}	工况 $\bar{0}$	工况 $\bar{0}$	土条	工况 \bar{N}	工况 $\bar{0}$	工况 $\bar{0}$
1	2.352	1.587	1.417	7	1.515	1.061	0.908
2	1.811	1.242	1.089	8	1.523	1.068	0.912
3	1.623	1.124	0.976	9	1.588	1.112	0.948
4	1.589	1.103	0.955	10	1.610	1.152	0.983
5	1.530	1.069	0.918	11	1.641	1.200	1.022
6	1.516	1.062	0.909	12	1.699	1.267	1.076

5 结语

本文采用不平衡推力法对西静河水库工程左岸失稳边坡稳定进行分析, 发现西静河水库库区右岸趋于稳定, 左岸失稳边坡在现有水文地质条件下可保持稳定, 但中段作为不稳定因素, 易在持续暴雨或加载地震力的情况下发生滑坡, 应引起水库管理部门的重视。本文的计算成果符合现场勘查结果, 因此不平衡推力法作为一种滑坡稳定分析方法, 计算简便, 能够为滑坡治理提供设计推力, 可为类似工程提供参考。

参考文献 (References):

- [1] 王汇明, 吴继敏, 高正夏. 广东某水库库岸稳定评价[J]. 河海大学学报, 2001(5): 84-87. (WANG Hui ming, WU Ji min, GAO Zheng xia. Assessment of slope stability for a reservoir in Guangdong[J]. Journal of Hohai University, 2001(5): 84-87. (in Chinese))
- [2] 殷跃平, 胡瑞林. 三峡库区巴东组(T2b)紫红色泥岩工程地质特征研究[J]. 工程地质学报, 2004, 12(2): 124-135. (YIN Yue ping, HU Rui lin. Engineering geological characteristics of purple red mudstone of middle tertiary formation at the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(2): 124-135. (in Chinese))
- [3] 罗轶, 任光明, 王志红, 等. 某水库库岸稳定性的模糊综合评价[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(6): 67-70. (LUO Yi, REN Guang ming, WANG Zhi hong, et al. Fuzzy comprehensive evaluation on the stability of reservoir bank[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(6): 67-70. (in Chinese))
- [4] 张志敏, 张永央, 曹东勇, 等. 某大型水库环境工程地质问题初探[J]. 中国水运(下半月), 2013, 13(5): 204-205, 208. (ZHANG Zhi min, ZHANG Yong yang, CAO Dong yong. Initially search of environmental engineering geological problems for a large reservoir[J]. China Water Transport, 2013, 13(5): 204-205, 208. (in Chinese))
- [5] 陈太富. 水库库区地质灾害评估及防治措施[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2012(10). (CHEN Tai fu. Reservoir geological hazard assessment and prevention measures[J]. Chengshi Jiarshe Lilun Yanjiu, 2012(10). (in Chinese))

(下转第 117 页)

- the underground water environment a case study of Bamianshan tunnel[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology: Natural Science, 2011, 12(4): 6-11. (in Chinese)
- [7] 郭卫星, 卢国平. Modflow 三维有限差分地下水流动模型[M]. 南京: 南京大学出版社, 1998. (GUO Wei xing, LU Guo ping. Modflow 3d finite difference underground water flow model [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1998. (in Chinese))
- [8] 宋飞. 太峪隧道斜井交叉口挤压变形段涌水处理技术[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 3(6): 155-156. (SONG Fei. Water burst treatment on an extrusion segment of inclined intersection in Taiyu tunnel[J]. South to North Water Diversion and Water Science & Technology, 2011, 19(3): 155-156. (in Chinese))
- [9] 李泽龙. 隧道地下水环境保护技术[J]. 四川建筑, 2012, 3(6): 84-86. (LI Ze long. Protection technology of tunnel groundwater environmental[J]. Sichuan Architecture, 2012, 3(6): 84-86. (in Chinese))
- [10] 杜欣莉. 中条山某公路隧道地下水环境问题探讨[J]. 山西建筑, 2011, 4(10): 154-155. (DU Xin li. Explotion in grounawar ter environment of a tunnel in Zhongtiao mountain road[J]. Shanxi Architecture, 2011, 4(10): 154-155. (in Chinese))
- [11] 赖明. 叙岭关隧道建设对地下水环境的影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008. (LAI Ming. Study of the impaction the grounawater environment during the construction of the Xu linguan tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008. (in Chinese))
- [12] 周鹏, 运荷. 某公路隧道对地下水环境的影响评价与对策[J]. 山西交通科技, 2012, 8(4): 84-86. (ZHOU Peng, YUN He. The impact assessment and countermeasures of a highway tunnel on groundwater environment[J]. Shanxi Science & Technology of Communications, 2012, 8(4): 84-86. (in Chinese))

(上接第 102 页)

- [6] 胡小平, 孙贵尚, 王联军, 等. 三峡水库区地质灾害防治工程环境效益评估[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(1): 148-150. (HU Xiaoping, SUN Guishang, WANG Lianjun, et al. Environmental benefits assessment of geological disaster prevention project for the Three Gorges Reservoir[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2006, 17(1): 148-150. (in Chinese))
- [7] 许建聪, 尚岳全, 郑东宁, 等. 不平衡推力法的弹塑性有限元改进[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4247-4252. (XU Jiancong, SHANG Yuequan, ZHENG Shuning, et al. Elastoplastic finite element improvement of imbalanced thrust force method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4247-4252. (in Chinese))
- [8] 张鲁渝, 郑颖人, 时卫民, 等. 边坡稳定分析中关于不平衡推力法的讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 177-182. (ZHANG Luyu, ZHENG Yingren, SHI Weimin, et al. On slope stability analysis by imbalance thrust force method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 177-182. (in Chinese))
- [9] 时卫民, 郑颖人, 唐伯明, 等. 边坡稳定不平衡推力法的精度分析及其使用条件[J]. 岩土工程学报, 2004(5): 313-317. (SHI Weimin, ZHENG Yiren, TANG Boming, et al. Accuracy and application range of imbalance thrust force method for slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004(5): 313-317. (in Chinese))
- [10] 何正杰, 朱寿增, 米澄宇, 等. 不平衡推力法在滑坡治理中的应用研究[J]. 成都工业学院学报, 2013(4): 71-73. (HE Zhengjie, ZHU Shouzheng, MI Chengyu, et al. Application of unbalanced thrust transfer coefficient method in landslide[J]. Journal of Chengdu Technological University, 2013(4): 71-73. (in Chinese))
- [11] 郑颖人, 时卫民, 杨明成, 等. 不平衡推力法与Sarma法的讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17): 3030-3036. (ZHENG Yiren, SHI Weimin, YANG Mingcheng. Discussion on imbalance thrust force method and Sarma's method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 23(17): 3030-3036. (in Chinese))
- [12] 徐志英. 岩石力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1986: 225-252. (XU Zhiying. Rock Mechanics[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1986, 225-252. (in Chinese))
- [13] 文明, 叶洪华. 考虑条间推力倾角变化对不平衡推力法的修正[J]. 路基工程, 2013(4): 107-110. (WEN Ming, YE Honghua. Amendment on unbalanced thrust force method when considering change of interslice thrust force inclination[J]. Subgrade Engineering, 2013(4): 107-110. (in Chinese))
- [14] 陶丽娜, 周小平, 柴贺军, 等. 用于边坡稳定分析的改进通用条分法[J]. 土木建筑与环境工程, 2014(1): 106-113. (TAO Lina, ZHOU Xiaoping, CAI Hejun, et al. Improved general limit equilibrium method for slope stability analysis[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2014(1): 106-113. (in Chinese))
- [15] DZ/T 0218-2006, 滑坡防治工程勘查规范[S]. (DZ/T 0218-2006, Specification of Geological Investigation for Landslide Stabilization[S]. (in Chinese))