

DOI: 10.11779/CJGE2021S1031

罗闸河二级水电站拱坝右岸边坡变形破坏机制研究 及治理后评估

曾 钺^{1,2}, 赵树祥³, 葛龙进¹, 潘卫平¹, 李 敏⁴, 殷国峰¹

(1. 浙江省水利水电勘测设计院, 浙江 杭州 310002; 2. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 3. 临沧新华水利水电
开发有限公司, 云南 临沧 675800; 4. 浙江省新能源投资集团股份有限公司, 浙江 杭州 310020)

摘 要:2013年,罗闸河二级水电站大坝拱肩开挖导致右岸高边坡出现局部滑坡事故和更大范围内的松动等诸多安全隐患,需治理。针对此类问题的共性及本边坡的特点,研究综合采用预应力锚索“锁脚”、土钉+挂网喷混凝土“护体”、内嵌软式排水管“降压”的方案对边坡进行加固。经日常巡视,以及对边坡位移、地下水位、锚索受力情况的监测,综合分析、验证了防渗处理的合理性、有效性,同时给出了管理维护的建议。该边坡于2014年治理完成,5 a来受6级以上地震影响3次,并经历2018年7.18暴雨,至今运行良好,对类似边坡的治理有一定的指导意义。

关键词:水电站;高边坡;预应力锚索;土钉;深埋式排水软管

中图分类号:TU43

文献标识码:A

文章编号:1000-4548(2021)S1-0171-05

作者简介:曾 钺(1982—),男,博士,高级工程师,主要从事水利水电工程勘测设计、建设管理及岩土力学特性方面的研究工作。E-mail: autogerry@163.com。

Failure mechanism of deformation and evaluation of treatment effect of high slope at right bank of Luozha River II Hydropower Station

ZENG Zeng^{1,2}, ZHAO Shu-xiang³, Ge Long-jin¹, PAN Wei-ping¹, LI Min⁴, YIN Guo-feng¹

(1. Zhejiang Water Resources and Hydropower Survey and Design Institute, Hangzhou 310002, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, 710048, China; 3. Lincang Xinhua Water Resources and Hydropower Development Co., Ltd., Lincang, 675800, China; 4. Zhejiang New Energy Investment Group Co., Ltd., Hangzhou 310020, China)

Abstract: In 2013, the excavation of the arch abutment of dam of Luozha River II Hydropower Station caused many hidden safety hazards such as local landslide accidents and wider loosening of the high slope at the right bank, which needed to be treated. In view of the commonality of such problems and the characteristics of this slope, the scheme of “locking feet” by prestressed anchor cable, “protection” by soil nailing + hanging net sprayed concrete, and “pressure reduction” by built-in soft drainage pipe is used to reinforce the slope. After daily inspections and the monitoring of slope displacement, groundwater level and stresses on anchor cables, the comprehensive analysis and verification of the rationality and effectiveness of the anti-seepage treatment are given, and the management and maintenance recommendations are also put forward. The slope treatment was completed in 2014. It had been affected by the earthquakes of magnitude 6 or above three times in the past five years, and experienced heavy rains on July 18, 2018. It has been running well so far, which has certain guiding significance for the treatment of similar slopes.

Key words: hydropower station; high slope; prestressed anchor cable; soil nailing; deep buried drain hose

0 引 言

中国西南地区建设的水电工程普遍存在高陡边坡,失稳将导致灾难性后果,严重影响人民生命财产安全。特别是因工程建设,高陡边坡因二次扰动而失稳,时有发生。精准预判、积极治理、实时监控、动态反馈的“全生命周期”法处理高陡边坡^[1]已成共识。

高陡边坡治理,总体遵循应急先行、勘探监测设计并行、分期治理的原则^[2]。永久措施和应急措施包括减载、锚固、坡面排水系统重构和坡面保护、深部排水

系统设置等。基于各种理论的分析方法也提供了强大技术支撑。^[3]

1 工程概况

罗闸河二级电站坝址位于云南省普洱市云县忙怀乡上游樱歌山河谷,拱坝最大坝高72.0 m。坝址河谷

基金项目:国家自然科学基金项目(51979225,51679199)

收稿日期:2020-12-15

成 V 字型,地质条件复杂,公路以降陡直,河道狭窄。

勘察显示,基岩为岩浆岩,主要分布 Jm1、Jm2 及 Jm3 节理密集带:①Jm1: $N30^{\circ}W/NE \angle 38^{\circ}$ - 400,为缓倾角结构面,倾向河床下游,断续交叉延伸,主要发育在坝顶以上山体;②Jm2: $N350E/NW \angle 750$,为陡倾角,倾向上游,地表上成槽形,935 m 高程以下见集中挤压;③Jm3: $N350E/NW \angle 650$ 倾向上游,为小错动面,宽 20 ~ 30 cm,风化泥充填。因右岸拱座开挖,2013 年 10 月发生两次塌滑。幸导流洞发挥功效,未形成堰塞湖,无人员伤亡。滑坡最大高度逾百米,最大厚度近十米,共近五万方,多土夹碎石,属中型、中层滑坡。

2 成因分析

滑坡形态发育,滑动面、滑坡周界、滑坡后壁、主滑线等结构显著。周界普遍存在岩体松动,碎裂现象,个别区域岩石被挤压呈凌乱块状、碎屑状等。裂隙间夹次生泥,分布不均匀,规律性差,局部见空洞,破碎带垂直厚度 10 ~ 30 m,为典型的卸荷松动体。滑坡上部山体表面出现十数条张开裂缝,宽度 2 ~ 35 cm 不等,顶部高程为 1105 m。坝肩以下及上下游延伸段,均有基岩出露,塌滑层除土层外,含卸荷松动岩石。

边坡下陡上缓,主滑段 45° ~ 50° ,拱座开挖局部达 60° ,对坡脚破坏较大,为不稳定隐患。坡面覆土深厚、植被茂盛,时值雨季末期,覆盖层和卸荷岩体含水率高,个别区域见出水点。微风化带为较稳定的隔水层。弱风化带—强风化带存在陡倾和中倾的张裂面,为强透水带。弱风化带—强风化带裂隙有泥质充填密实,透水性弱。地下水位较高,且持续时间较长。

拱座开挖导致坡脚临空,上部岩土层在重力作用下产生拉裂变形,作用于下部基岩。在多重应力作用下,滑坡体脱离滑坡周界,出现了中上部表层失稳和下部卸荷带沿结构面的错动,致使整个边坡进入前拉后推的运动模式。

因此,从边坡地形条件、岩体结构特征、变形程度及坡面变形拉裂等现象综合分析,边坡岩体属卸荷倾倒松动变形。尚无深层滑动的迹象,但是必须重视开挖边坡上部深厚坡积层的稳定性,有可能在坡积层发生滑动的危险。

3 治理方案及现场实施

根据本工程等别和边坡与主要建筑物的位置关系,按《水电水利工程边坡设计规范: DL/T5353—2006》,本工程边坡工程安全等级为 A 类 II 级边坡。

3.1 应急措施

针对成因采取临时措施,改善短期内的边坡稳定

条件。着重表部,兼顾深层,为后续工作提供支持。分减载、固脚、排水和观测四部分内容。

(1) 减载

根据现场条件,从顶部和周界清除对坝肩威胁较大的滑坡体,尽可能清至滑坡壁,消减滑坡台地。

(2) 固脚

完成减载后,对潜在滑裂面出口的坡脚进行加固:一是设置系统锚杆,对坝址区 1037.50 m 高程以下,强风化岩石出露处进行固脚;二是根据坝顶高程以下基岩出露处裂缝视宽度、深度、延伸长度、密集度,慎重选择注浆压力进行固结灌浆。

(3) 排水

结合地表裂缝的分布,沿周界设置临时截水沟,汇集雨水导出潜在滑坡区域。采用塑料防雨布覆盖拉张裂缝,避免大量雨水渗入,使潜在滑裂面更加发育。



(a) 滑坡远观



(b) 坡顶1105高程地表拉张裂缝



(c) 滑坡周界卸荷体出露

图1 滑坡原状图

Fig.1 Original landslide

表 1 各岩土材料饱和状态下物理力学参数
Table 1 Mechanical parameters of geotechnical materials

地层分类		重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$		c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
		湿	饱和		
覆盖层 (土石混合)	1010 m 高程以下	17.9	18.2	16.47	33.7
	1010 ~ 1050 m 高程	17.6	18.0	15.65	32.3
	1050 m 高程以上	17.0	17.5	15.22	30.8
强风化层		20.0	21.0	100	30.0
弱风化层		21.7	22.9	220	45.0
微风化层		23.6	24.1	350	50.0

表 2 各工况边坡安全系数计算成果
Table 2 Safety factor of slope under different working conditions

工况	边坡稳定性系数	边坡稳定安全系数	滑逸前缘
1	1-1 0.95 < 不支护,继续开挖		坝顶高程以下(挖哪,滑哪)
	1-2 ≥ 1.24 先完成支护,再开挖	1.2 (施工期)	1025 高程左右
	1-3 ≥ 1.29 先部分支护,开挖,再支护		1022 高程左右(滑弧较 1-2 略深)
2	1.41 拱坝完建 + 设计洪水位	1.3 (正常运行工况)	坝顶高程以上
3	1.15 死水位 + 遭遇 7°地震	1.1 (非正常运行工况)	坝顶高程以下至死水位之间

(4) 观测

对坡面裂缝编号,记录其发现日期、宽度、深度、走向、倾向、延伸长度等,并在图上标示,记录后进行回填处理。每日排查一次,遇雨加大频次。此外还在滑坡体及后山坡上布置变形观测简易标点,建立变形监测网。结合钻孔,设置重点部位测斜、测水位等。确保边坡基本稳定,方才复工,转施工期常态化观测。

3.2 永久治理

实施应急工程、设计并行,分析研究过程中所揭示,作为永久支护和系统监测方案的技术支撑。

(1) 方案评估

摸清滑坡形态和各岩土层材料物理力学参数。主要是通过钻探、物探、原位测试和室内试验,获得基本物理力学参数和滑动面的形态^[4]。还原原始地层、地貌,建立计算模型,模拟工程扰动,反演用于分析和永久支护设计的材料力学参数,详见表 1。

根据掌握,经工程类比,基本确定底部基岩系统锚杆、中、上部覆盖层系统土钉 + 预应力锚索支护、降低地下水位的治理方案。模拟施工过程,分析支护措施和实施步骤。基于 Morgenstern-Price 法分析,滑裂面通过自动搜索和钻孔资料指定获得。研究了主、副两滑面在 3 种工况下的安全稳定:①分析右岸拱座继续开挖对现有

边坡影响,决策边坡永久支护后拱座开挖,抑或仅对拱座加强支护;②研究满库,山体高地下水位对边坡影响,确定支护措施和范围;③研究遭遇 7 度地震、库水位骤降至死水位、山体高地下水位,评估支护抗风险能力。

结果显示:现有边坡不能满足拱座进一步开挖要求,必须先进行支护处理;支护、开挖、再支护的模式比先支护再开挖的模式更有优势,安全系数由 1.24 提高到 1.29,提高了 4%,满足规范要求;经永久治理的边坡在正常运行、地震工况下安全系数分别能达到 1.41, 1.15,均大于规范要求的 1.3 和 1.1。此外针对滑弧贯穿的岩土层重度 γ ,抗剪强度 c 和 $f(\tan\varphi)$ 、地下水位高度敏感性分析显示: c 变化最为敏感,其次是水位线高度,再次为 f 和 γ 。可靠度分析采用 Mont Carlo 法,对地下水位线上、下变幅 5 m 进行了 5000 次的试算得出:正常运行工况 95% 的概率安全系数大于 1.3;施工期近乎 100% 的概率安全系数大于 1.0。

(2) 方案实施

根据以上研究成果,提出永久支护方案:①应急工程排除隐患后方可进行坝址区施工作业;②拱槽自上而下分段开挖,采用短进尺、小药量、预裂等方式爆破,减小对边坡的进一步扰动;③适当延长相邻槽段作业时间间隔,削弱变形叠加效应,对不稳定的松动岩体及

时加固;④调整原设计 3 m 长随机锚杆为长 4.5 m,间距 2 m 的系统锚杆;⑤根据声波测试成果,优化固结灌浆孔间距及深度。永久支护采用预应力锚索、护面墙及系统锚杆等综合手段。高程 1030 m 以上采用系统土钉支护,高程 1030 m 以下采用系统锚杆支护。在高程 1000 m 以上设置 3 组预应力锚索,锚索采用六束 $\Phi 15.24$ mm 低松弛普通钢绞线,钻孔直径 150 mm,按 1.05~1.10 倍设计预应力值进行超张拉锁定。索长根据取芯与钻孔电视成果确定,要求贯穿风化及破碎岩层,进入完整岩体一定深度且长度不小于 40 m。锚索外露端部,通过格构梁、挂网锚喷连接成片。采用 DN100 mm 深埋式排水软管,间距 5 m,以 2% 的坡比倾向坡外,伸入坡体长度不小于 30 m,降低坡体内地下水位。

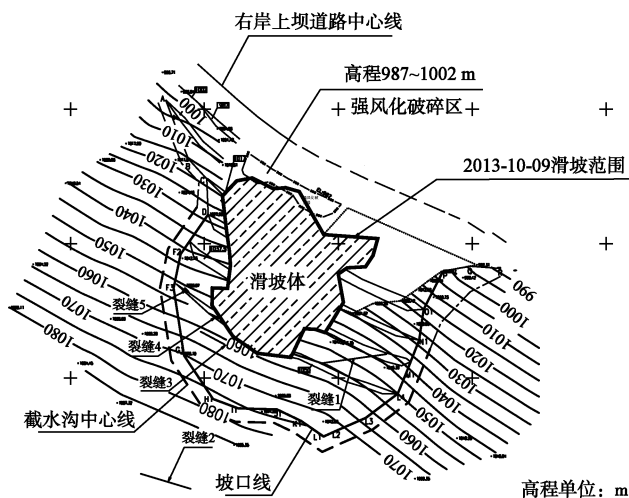


图2 滑坡体及影响范围

Fig. 2 Landslide body and affected area

最后在方案实施阶段,随着工作的深入,发现边坡松动时间、范围超预期。及时修改分析模型,调整初始支护方案,清除高程 1037.5、1050 m 马道内侧覆盖层。预应力锚索实施时,由于覆盖层和强风化层存在大量

空隙,孔底漏气、卡钻、塌孔等现象时有发生,造孔困难。为了节约成本、加快进度,采用先局部固结灌浆再钻进造孔的方法予以解决。在造孔时发现边坡所在山体地下水位分布复杂,水面缺乏连续性,局部存在“孤峰”现象。为此在高程 1036 m 增设一排深层排水孔,深入弱风岩石以下 1 m,孔距 5 m;高程 1035 m 以下边坡根据锚索钻孔的渗水情况随机增加深层排水孔。

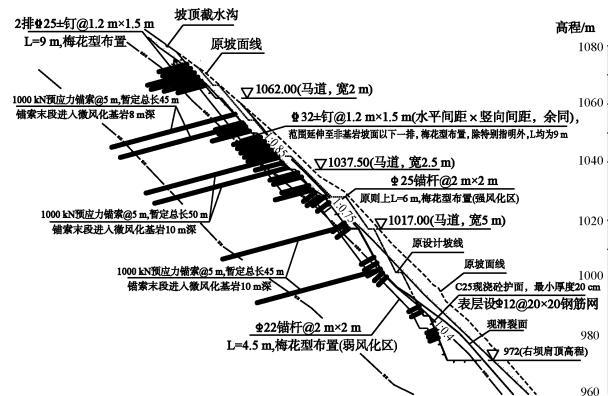


图3 主滑断面及支护方案

Fig. 3 Main sliding section and support plan

4 效果分析

边坡安装了 3 组多点位移计,每组 6 个测点,监测 2017 年 1 月 1 日至 2018 年 9 月 11 日,图 4 为其中变位最显著的一组^[5]。孔口实测位移量最大值为 1.27 mm,最小值为 -0.75 mm。各监测点数值随时间沿中心线趋同,反映现状条件下边坡处于稳定状态。为监测预应力锚索的受力情况,分别于 4 个高程,各布置 3 只,共 12 只锚索测力计。数据时间段从除 1053 m 高程的从 2017 年 9 月 8 日起,其余均为从 2017 年 1 月 1 日至 2019 年 5 月 31 日,预应力锚索监测成果见图 5^[5]。

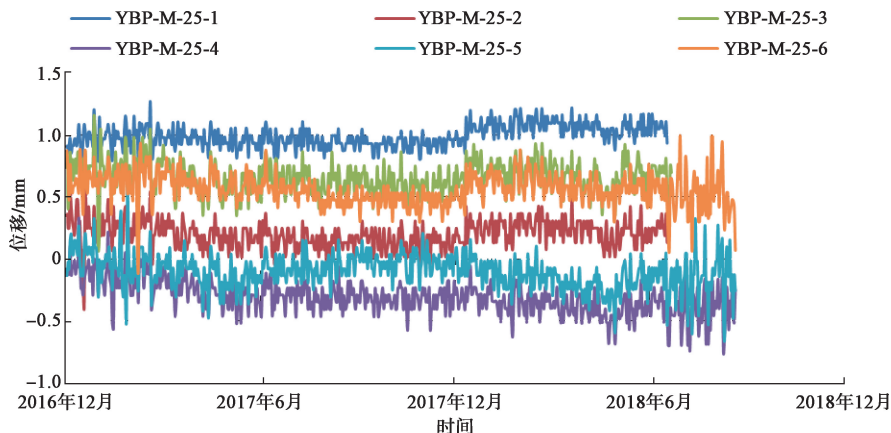


图4 多点位移计监测成果

Fig. 4 Monitoring results of multi-point displacement meter

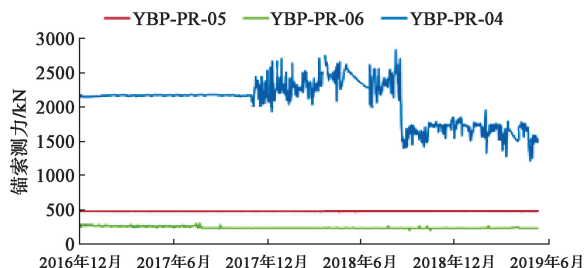


图5 锚索测力计监测成果(1038 m 高程)

Fig. 5 Monitoring results of anchor cable dynamometer

锚索测力计监测成果显示:锚索锁定后,各锚索荷载变化不大,荷载损失率也较小。大坝蓄水至正常蓄水位时段后,对所有的锚索均有不同程度的影响,影响最大的是1038 m 高程中部锚索,其荷载先呈增大趋势波动,而后降低,并趋于稳定。

应急工程实施前,边坡中、下部观测孔地下水位波动受降雨影响显著,2013 年 10 月底的长历时强降雨过程引起边坡中部地下水位上升逾 5 m。2013 年 4 月初应急工程实施完成后,边坡下部所有观测孔的地下水位均接近河面高程,几次较大的长历时降雨过程,引起地下水位的上升幅度均不足 3 m;边坡中部所有观测孔的地下水位未见明显变化,详见图 6^[5]。可见坡面截排水和深埋式排水系统效果良好,边坡主体入渗补给减弱、中下部排水通畅。水库蓄水后,近一年观测数据表明,边坡最高地下水位和库水位相关性更高,且基本保持稳定。5 a 来遭遇 6.6 级地震和 3 h 降 97.1 mm 暴雨,运行良好。

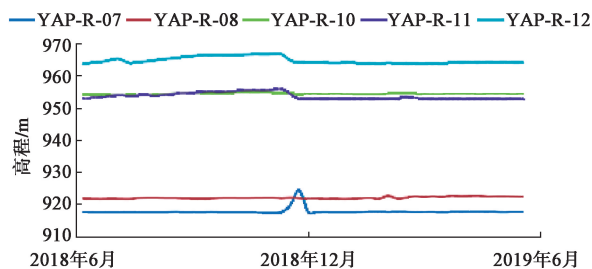


图6 地下水监测成果

Fig. 6 Monitoring results of groundwater

5 结 论

(1) 本工程高陡型边坡,因扰动发生滑坡。及时采取固脚、减载、截水等临时措施,趋于稳定,避免坝址重调,确保工程顺利推进。

(2) 通过计算,制定了坝顶高程以上实施自下而上、由表及里的动态支护措施;坝顶高程以下实施加

长、加密锚筋等措施,加固边坡。

(3) 蓄水后,监测显示:整体变形量级适中、收敛。锚索应力计受力与地形、地质趋同。深埋式排水软管效果良好,地下水维持低位,边坡稳定性显著提高。

(4) 工程运行后,边坡成功抵御暴雨、地震等极端自然地质灾害,有借鉴意义。

参考文献:

- [1] 王 浩, 王晓东, 泮 俊. 超高路堑边坡治理工程案例研究 I: 边坡失稳机制模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(4): 899 - 909. (WANG Hao, WANG Xiao-dong, PAN Jun. A case study of super-high cut slope I: simulation and analysis of instability mechanism of slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(4): 899 - 909. (in Chinese))
- [2] 王 浩, 王晓东, 泮 俊. 超高路堑边坡治理工程案例研究 II: 治理对策及其过程控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(5): 1152 - 1161. (WANG Hao, WANG Xiao-dong, PAN Jun. A case study of super-high cut slope II: stabilization measures and their process controls[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(5): 1152 - 1161. (in Chinese))
- [3] 薛海斌, 张聪敏, 党发宁, 等. 考虑参数时空演化规律的黄土边坡极限平衡分析法研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(增刊 2): 162 - 166. (XUE Hai-bin, ZHANG Cong-min, DANG Fa-ning, et al. Limit equilibrium analysis method for loess slopes considering spatial-temporal evolution laws of parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(S2): 162 - 166. (in Chinese))
- [4] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(19): 3381 - 3388. (ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi. Application of strength reduction fem in soil and rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(19): 3381 - 3388. (in Chinese))
- [5] 孙云春, 谭志伟, 董泽荣, 等. 临沧市罗闸河二级水电站安全监测系统工程竣工验收报告[R]. 昆明: 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 2017 (SUN Yun-chun, TAN Zhi-wei, DONG Ze-rong, et al. Completion Acceptance Report of Safety Monitoring System Project of Luozha River II Hydropower Station in Lincang City [R]. Kunming: PowerChina Kunming Survey, Design and Research Institute Co, Ltd, 2017. (in Chinese))

(编校: 孙振远)