

四川巴塘水电站两洞进口高边坡加固措施研究

齐景瑞¹, 杨光亮¹, 黄勇¹, 高全义²

(1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065;

2. 中国水利水电第五工程局有限公司, 四川 成都 610016)

摘要:高边坡的稳定性及治理问题是重大工程建设中的首要考虑的工程地质和岩石力学问题, 控制着工程建设的可行性和经济性。笔者以巴塘水电站两洞进口高边坡的治理为例, 结合具体工程地质情况, 分析了该工程倾倒变形岩体参数取值及抗滑稳定性, 根据分析结果, 采取了固结灌浆并插钢筋束后再进行隧洞开挖挂口等措施, 联合加固高边坡。该措施满足设计要求, 并在工程实践中证明了该方法的可行性与经济性, 效果较为显著。

关键词:高边坡; 倾倒变形岩体; 多种支护措施加固

中图分类号: U213.1+58

文献标志码: B

文章编号: 1001-2184(2024)03-0098-05

Study on Reinforcement Measures of High Slope at the Inlet of Diversion Tunnels and Flood Discharge Tunnels of Batang Hydropower Station in Sichuan

QI Jingrui¹, YANG Guangliang¹, HUANG Yong¹, GAO Quanyi²

(1. PowerChina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an Shaanxi 710065;

2. Sinohydro Bureau 5 Co., LTD., Chengdu Sichuan 610016)

Abstract: The stability and governance of high slopes are the primary engineering geology and rock mechanics problems in major engineering construction, which control the feasibility and economy of engineering construction. In this paper, taking the treatment of the high slope at the entrance of the diversion tunnels and flood discharge tunnels of the Batang Hydropower Station as an example, combined with the specific engineering geological conditions, the parameters of the dumping deformed rock mass and the anti-sliding stability of this project were analyzed. Based on results, consolidation grouting were adopted. After the reinforcement is carried out, the tunnel excavation and hanging joints are combined to strengthen the high slope. This measure meets the design requirements, and the feasibility and economic effect of the method are proved in engineering practice.

Keywords: High slope; Dumping deformed rock mass; Reinforcement by various support measures

0 引言

边坡的稳定性是工程建设过程中极为重要的课题之一, 特别是在大型水利水电工程建设过程中; 而高边坡的治理问题几乎成为重大工程建设中首要考虑的工程地质和岩石力学问题, 影响到工程建设的可行性和经济性。前人对各种高边坡的治理进行了相关研究, 并提出了一些相关工程(如公路、水电站、山地建筑工程等)的治理措施^[1]。高边坡加固治理目前主要应用混凝土抗滑、混凝土挡墙、排水截水以及锚固洞等措施。但是由于不同工程所处的地质条件不同, 相对应的高边坡治理措施差异也较大。

1 工程概况

巴塘水电站位于金沙江与巴楚河汇合口上游约 660 m 的金沙江干流上, 电站右岸为西藏昌都市芒康县, 左岸为四川省甘孜州巴塘县, 电站距巴塘县 9 km, 距成都市 827 km, 沿 318 国道经巴塘县城可至巴楚河口, 该工程采用坝式开发, 以发电为主, 为二等大(2)型工程。正常蓄水位为 2 545.00 m, 总库容 1.41 亿 m³, 调节库容为 0.21 亿 m³, 具有日调节能力。电站装机 750 MW, 多年平均发电量为 33.75 亿 kW·h, 装机年利用小时 4 500 h, 为西部大开发重点工程之一。该工程的导流洞进口与泄洪放空洞位于金沙江左岸, 山坡陡峭, 岩体倾倒变形, 卸荷现象剧烈, 岩体呈碎

收稿日期: 2024-03-15

裂~散体结构,泄水建筑物两洞进口联合开挖处,可研阶段最大开挖边坡高度约为150 m,开挖坡比为1:0.5;由于边坡开挖较高,存在严重的边坡稳定性问题。

笔者选取位于青藏高原南缘的巴塘水电站两洞进口处的高边坡为研究对象,详细论述了该工程在倾倒变形岩体中高边坡地质参数的选取、抗滑稳定分析以及施工过程中采取动态的支护措施。

2 进口边坡工程地质条件

巴塘水电站导流洞与泄洪放空洞进口处为一联合边坡,由于开挖揭露地质条件差异较大,导流洞进口底板高程为2 483 m,进口洞脸边坡为10级边坡,可研阶段最大开挖边坡高度约为150 m,两侧边坡开挖坡比为1:0.5。在实际施工过程中,由于7号路的影响,人工边坡往外侧水平移动了约16 m,开口线以7号路路基为准,致使导流洞和进口洞脸边坡最大开挖高度约为150 m,为8级边坡。

边坡开挖揭露地质情况显示,进口及边坡基岩为黑云母石英片岩,岩体受卸荷、倾倒变形影响,岩层产状多变,正常岩层产状为NE10°NW∠80°。

(1)第一、二级边坡(EL2 632~2 594 m):由于开挖范围处于坡表,开挖边坡上依然残留草根、树皮等,揭露岩体为强倾倒、强卸荷岩体,开挖扰动即解体,为V级岩体。

(2)第三级边坡(EL2 594~2 579 m):岩体质量较第一、二级边坡有好转,为薄层状岩体,局部夹中厚层岩体,岩体呈碎裂结构~层状碎裂结构,岩体强卸荷,局部卸荷裂缝宽3 cm,同时岩体倾倒变形,岩层产状NE40°NW∠50°,该级边坡整体为IV2~V级岩体。

(3)第四、五级边坡(EL2 579~2 549 m):开挖揭露为薄层状岩体,局部夹中厚层岩体,岩体呈层状碎裂结构,岩体倾倒。其中,第四级边坡岩层产状NE40°NW∠50°,为IV1~III2级岩体;第五级边坡的岩层产状NE30°NW∠55°,为III2级岩体。局部发育薄层状岩体,岩体呈碎裂~散体结构,为V级岩体。

(4)第六级边坡(EL2 549~2 531 m):揭露互层状岩体,岩体完整性较好,断层发育数量明显减

少,岩体基本呈层状结构,局部层状呈碎裂结构,为III2~IV级岩体。

(5)第七级边坡(EL2 519~2 531 m):揭露岩体呈薄层状,单层厚5~10 cm,强风化,岩体整体质量为IV1级岩体。局部段岩体呈中厚层状结构,岩体完整性稍好,为III2级岩体。

(6)第八级边坡(EL2 519~2 507 m):揭露岩体呈薄层状结构,局部中厚层,产状NE10°NW∠80°。由于受岩体卸荷及倾倒变形的影响,边坡岩体较松弛且反倾坡内偏下游,岩体完整性差。局部岩体呈薄层状,层厚约5~10 cm,岩体结构面锈染严重,为强风化岩体,边坡岩体整体质量为IV1~III2级岩体。

总体来看,导流洞、泄洪放空洞进口联合边坡基岩为黑云母石英片岩,岩体受卸荷、倾倒变形影响,岩层产状多变,抗风化能力弱,在风化、卸荷及倾倒变形的综合作用下,岩体破碎,呈层状碎裂~碎裂状结构,岩体多为IV级岩体;上游侧岩体呈中厚层状结构,岩体完整性稍好,为III2级岩体;上部岩体为强倾倒、强卸荷岩体,开挖扰动即解体,呈散体状就地堆积,为V级岩体。

3 失稳模式判别

将进口边坡上发育的各组断裂结构面和边坡开挖坡面均绘制于赤平投影见图1,以综合定性分析判断边坡失稳模式。

(1)边坡与岩层同倾向,与岩层走向夹角小于30°,属于层状同向结构坡,边坡整体稳定条件差。

(2)边坡浅表层存在较厚的强风化和强卸荷岩体,卸荷松弛严重,其中强风化深度达55 m,强卸荷深度达85 m,加之岩层与坡面同倾向,且其倾角陡于坡面,在浅表层强风化和强卸荷岩体内可能构成以岩层层面为后缘拉裂面,沿强风化或者强卸荷下限向临空侧滑移的滑动块体。

(3)开挖坡面受随机裂隙切割组合,将在各级马道平台部位构成可动随机楔形体。

4 边坡稳定性分析及实际施工支护设计

该工程建筑物级别为4级,属于临时建筑物,但泄洪放空洞与导流洞进口边坡联合开挖,边坡的失稳将影响泄洪放空洞的安全运行,依据《水电工程边坡设计规范》NB/T 10512—2021^[2]确定该

工程导流洞进、出口边坡为 A 类(枢纽工程区边坡)Ⅱ级边坡,持久工况安全系数取 1.25,短暂工况安全系数取 1.15,偶然工况安全系数取 1.05。

边坡结构面力学参数建议值见表 1^[3],岩体力学参数建议值见表 2。

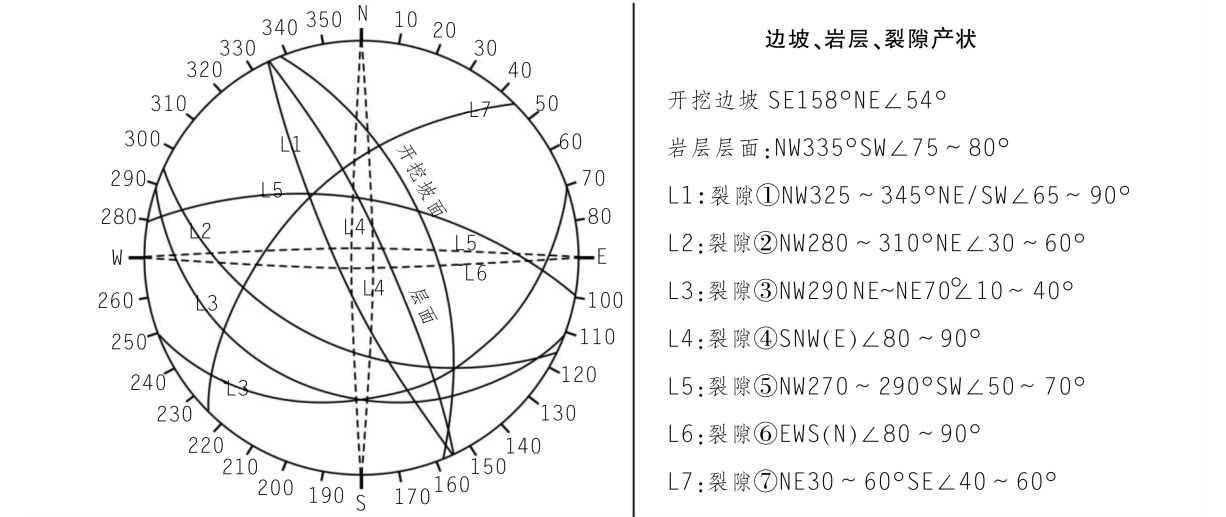


图 1 进口边坡赤平投影分析图

表 1 边坡结构面力学参数建议值

类型	抗剪断		抗剪	代表性结构面
	f'	c'/MPa	f	
碎屑夹泥型	0.40~0.45	0.05	0.35~0.40	雄松—苏洼龙断裂
碎屑型	0.45~0.50	0.08	0.40~0.45	F11、F45 等
硬性	0.50~0.55	0.10	0.45~0.50	闭合裂隙

表 2 岩体力学参数建议值表

岩体类别	抗剪(断)强度参数			抗压强度 /MPa		弹性模量
	f'	c'/MPa	f	干	饱和	/GPa
覆盖层	0.50~0.55	0.03~0.04	—	—	—	—
强卸荷	0.50~0.55	0.10~0.15	0.45~0.50	30~50	25~45	1~3
弱卸荷	0.55~0.60	0.35~0.40	0.50~0.55	40~60	35~55	3~5
微新岩体	1.05~1.00	0.80~0.85	0.60~0.65	50~70	45~65	7~10

4.1 平面极限平衡抗滑稳定分析

4.1.1 计算模型建立

根据失稳模式判别,在浅表层强风化和强卸荷岩体内以岩层层面为后缘拉裂面,沿强风化或者强卸荷下限为底滑面对可能形成的滑动块体进行敏感性分析,从而找出最危险滑面,计算模型见图 2。

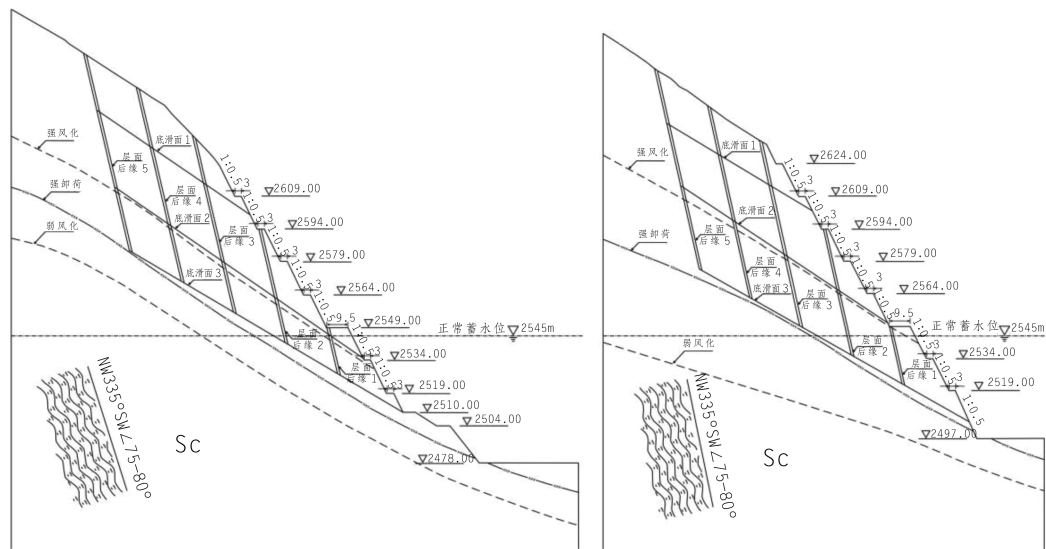
4.1.2 边坡块体平面滑动稳定计算结果及分析

依据边坡岩体及结构面力学参数地质建议值,天然状态下岩体参数取地质建议下限值,结构面参数取上限值。饱水状态下岩体抗剪断指标按 0.9 倍折减,结构面抗剪断指标按 0.8 倍折减。

计算采用刚体极限平衡法,计算结果显示:

(1)加固前,最危险滑动块体为底滑面 2 和后缘 5 所组成的块体,在 1—1 剖面、2—2 剖面正常运行期的安全系数分别为 1.123 和 1.041。而在正常运行+地震情况下安全系数分别降至 1.043 和 0.965,不满足规范要求,需进行加固处理。

(2)经加固处理后,上述块体在 1—1 剖面、2—2 剖面正常运行期的安全系数分别为 1.207 和 1.155,介于控制标准(1.25~1.15)均值之间。其余各工况安全系数均大于控制标准的上限值,加固前与加固后最危险块体平面滑动稳定计算结果见表 3。



(a)1-1 剖面抗滑稳定计算模型 (b)2-2 剖面抗滑稳定计算模型

图 2 计算模型(单位:m)

表 3 加固前后最危险块体平面滑动稳定计算结果

剖面	计算工况	加固前安全系数	加固后安全系数	控制标准
1-1	正常运行期	1.123	1.207	1.25~1.15
	施工完建期	1.123	1.207	1.15~1.05
	正常运行+暴雨或久雨	1.053	1.15	1.15~1.05
	正常运行+水位骤降	1.123	1.207	1.15~1.05
	正常运行+地震	1.043	1.123	1.05
2-2	正常运行期	1.041	1.155	1.25~1.15
	施工完建期	1.083	1.155	1.15~1.05
	正常运行+暴雨或久雨	0.989	1.095	1.15~1.05
	正常运行+水位骤降	1.041	1.152	1.15~1.05
	正常运行+地震	0.965	1.071	1.05

(3)边坡稳定性评价。进口开挖边坡失稳模式有两种:①在浅表层强风化和强卸荷岩体内构成以岩层层面为后缘拉裂面,沿强风化或者强卸荷下限向临空侧滑移的滑动块体;②开挖坡面受随机裂隙切割组合,将在各级马道平台部位构成可动随机楔形体。

由于该工程进口边坡为岩质边坡,开挖坡面与岩层同倾向,与岩层走向夹角小于30°,属于层状同向结构坡,边坡整体稳定条件差。经采用刚体极限平衡法所做边坡稳定性分析可知,平面滑动最危险块体在正常运行期和“正常运行+地震”情况下安全系数不满足规范要求,需进行加固处理。经加固处理后,控制工况正常运行期安全系数为控制标准均值,其余各工况安全系数均大于控制标准上限值,随机楔形体在各种设计工况下

的安全系数均满足规范要求。

4.2 两洞进口边坡施工动态支护措施

导流洞进口与泄洪放空洞进口联合开挖,开挖坡比为1:0.5,每15 m设3 m宽马道。开挖边坡采取的支护参数为:喷混凝土厚10 cm(挂钢筋网 $\phi 6@0.15\text{ m}\times 0.15\text{ m}$),边坡开口部位设置一排锁口锚索(1000 kN, $L=30\text{ m}$,间距5 m),边坡设置系统锚杆(锚杆 $\Phi 25$ 、间排距4 m $\times$ 4 m、 $L=4.5\text{ m}$ 、梅花型布置),并且布设随机长锚杆(锚杆 $\Phi 28$ 、 $L=9.0\text{ m}$),引渠边坡的支护方式基本同洞脸。为保证施工期和运行期的边坡稳定,进口洞脸及侧面边坡做贴混凝土处理,厚度0.5 m。

(1)2 609.00 m高程以上边坡。开挖坡比1:1,采用挂网喷混凝土+网格梁支护形式,挂网喷混凝土厚15 cm(挂钢筋网 $\phi 6.0\text{ mm}@20\text{ cm}\times$

20 cm);C25 混凝土网格梁间排距 $4\text{ m}\times 4\text{ m}$, 网格梁结点布置 $3\Phi 32$ 锚筋桩, 单根长 12 m; 网格梁框内中点布置系统锚筋桩 ($3\Phi 25$, 长 4.5 m/6.0 m, 间排距 $4\text{ m}\times 4\text{ m}$, 间隔布置)。坡面布置排水孔, 孔径 $\Phi 50$, 入岩 3 m, 间排距 $3\text{ m}\times 3\text{ m}$, 梅花形布置。

(2) 2 564.00~2 609.00 m 高程二级~四级边坡。开挖坡比 1:0.5, 采用钢筋混凝土贴坡进行防护, 厚度 60 m, 坡面设置系统锚杆 (锚杆 $\Phi 25$ 、间排距 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$ 、 $L=4.5\text{ m}$ 、梅花型布置); 每级边坡均布置四排预应力锚索 (1 000 kN, $L=40\text{ m}$, 间距 $4\text{ m}\times 4\text{ m}$); 混凝土贴坡内预埋排水管与坡面排水孔相接, 排水孔入岩 3 m, 间排距 $3\text{ m}\times 3\text{ m}$, 梅花形布置。

(3) 2 549.00~2 564.00 m 高程五级边坡。开挖坡比 1:0.5, 采用挂网喷混凝土+网格梁支护形式, 挂网喷混凝土厚 15 cm (挂钢筋网 $\Phi 6.0\text{ mm}@20\text{ cm}\times 20\text{ cm}$); 边坡系统锚杆 $\Phi 25/\Phi 28$, $L=4.5\text{ m}/6.0\text{ m}$, 间排距 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$, 间隔布置; C25 混凝土网格梁间排距 $4\text{ m}\times 4\text{ m}$, 网格梁结点布置预应力锚索 (1 000 kN, $L=40\text{ m}$, 间距 $4\text{ m}\times 4\text{ m}$); 坡面布置排水孔, 孔径 $\Phi 50$, 入岩 3 m, 间排距 $3\text{ m}\times 3\text{ m}$, 梅花形布置。

(4) 2 549.00 m 高程以下边坡。开挖坡比 1:0.5, 采用混凝土贴坡进行防护, 厚 60 cm, 坡面布置系统锚杆 (锚杆 $\Phi 25$ 、间排距 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$ 、 $L=4.5\text{ m}$ 、梅花型布置) 及两排锁口锚筋桩 ($3\Phi 32$, 单根长 12 m, 间排距 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$, 梅花形布置); 六级及七级边坡共布置三排预应力锚索 (1 000 kN, $L=40\text{ m}$, 间距 $4\text{ m}\times 4\text{ m}$); 混凝土贴坡内预埋排水管与坡面排水孔相接, 排水孔入岩 3 m, 间排距 $3\text{ m}\times 3\text{ m}$, 梅花形布置。

为防止外来水等渗入坡体, 除进行坡面喷护及布置排水孔 (间排距 $3\text{ m}\times 3\text{ m}$, 孔深 3 m) 外, 沿开挖轮廓线设截水沟, 在各级道路马道内侧设排水沟, 其间连通, 以形成有效的截、排水系统。

4.3 两洞进口边坡稳定性监测

在导流洞进口与泄洪洞进口联合边坡上共布设 3 条监测剖面, 其中 1-1 剖面位于导流洞边坡, 安装了 3 套 4 点式多点变位计, 5 套预应力锚索测力计, 修建了 4 个表面变形综合测点; 2-2 剖面位于导流洞与泄洪洞进口边坡转折点处, 安

装了 3 套 4 点式多点变位计, 4 套预应力锚索测力计, 修建了 4 个表面变形综合测点; 3-3 剖面位于泄洪洞进口边坡, 安装了 4 套 4 点式多点变位计, 7 套预应力锚索测力计, 修建了 6 个表面变形综合测点^[4]。预应力锚索监测自 2019 年 6 月份以后陆续开展。各测点变化速录均较小, 未出现数据测值突变、跳跃等现象, 因此该边坡整体稳定处于可控状态。

5 结 语

高边坡施工应严格遵循从上至下、分层开挖、开挖一层并及时喷锚加固一层的原则, 并根据高边坡所处部位的地层岩性、地质构造、不利结构面组合、风化卸荷及地下水等不良地质环境情况及高边坡的重要程度, 采取加固支护措施。由于巴塘水电站两洞进口处岩体倾倒变形严重, 岩体多为散体~碎裂结构, 岩体完整性差, 施工过程中全程采取动态加固处理措施, 对双洞进口高边坡的稳定非常重要。通过该工程的实践证明: 先固结灌浆并插钢筋束后再进行隧洞开挖挂口是较为有效的方法之一, 对节省工程投资、缩短工期、保证施工安全都有深远意义。高边坡的变形观测对指导水电工程施工非常有利, 导流洞、泄洪洞背坡的加固措施在技术上是可行的, 在经济上也具有明显优势, 可为其他同类工程提供借鉴。

参考文献:

- [1] 张帆, 王明疆, 刘永智. 基于刚体极限平衡法和离散元法的某水电工程岩质边坡综合处理措施[J]. 西北水电, 2020 (增刊 1): 15-21.
- [2] 黄润秋. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1525-1544.
- [3] 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司. 金沙江上游巴塘水电站可行性研究报告 (审定稿) 第三册 (工程地质) [R]. 2017.
- [4] 金沙江上游巴塘水电站导流洞过流专项安全鉴定设计自检报告[R].

作者简介:

齐景瑞 (1987-), 男, 甘肃武威人, 工程师, 本科, 从事水利水电勘察工作;

杨光亮 (1995-), 男, 甘肃榆中人, 助理工程师, 硕士, 从事工程地质勘察工作;

黄 勇 (1988-), 男, 四川绵阳人, 助理工程师, 本科, 从事水利水电勘察工作;

高全义 (1988-), 男, 湖北襄阳人, 工程师, 学士, 从事水电工程建设管理工作。

(编辑: 吴永红)