

超大跨度泄水隧洞出口洞段及边坡的风控分析与设计

张凤财, 周正军, 王观琪, 李永红

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072)

摘要:基于双江口水电站洞式溢洪道出口洞段及边坡的复杂工程地质条件、施工条件、环水保制约因素,通过施工勘察、危岩体风险分析与评价,借助边坡稳定分析、有限元计算等手段,开展治理方案技术经济比较。计算分析成果及实施情况表明,洞室晚出洞,边坡“少开挖、强支护”,危岩体大面防护治理结合关键部位锁口、拦腰、固脚措施,出口洞段与边坡危岩体“分而治之”的系统治理方案是合理可行的,满足工程进度要求的情况下降低了施工难度及风险,节约了工程投资成本,可供类似工程借鉴。

关键词:溢洪道;施工勘察;有限元;危岩体;风险分析评价

中图分类号:TV651.1;[O242.21]

文献标志码:B

文章编号:1001-2184(2024)05-0140-04

Risk Control Analysis and Design of the Exit Section and Slope of Super-large Span Spillway

ZHANG Fengcai, ZHOU Zhengjun, WANG Guanqi, LI Yonghong

(PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu Sichuan 610072)

Abstract:Based on the complex engineering geological conditions, construction conditions, and environmental and water conservation constraints of the outlet section and slope of the spillway at Shuangjiangkou Hydropower Project, a technical and economic comparison of the treatment plans was carried out through construction survey, risk analysis and evaluation of dangerous rock mass, slope stability analysis, finite element calculation, and other means. The results of calculation and analysis, as well as the implementation situation, indicate that the comprehensive treatment measures including the late exit of the tunnel results in "less excavation and stronger support" for the slope, the combination of large-scale protection and treatment of the dangerous rock mass with key measures such as locking the mouth, blocking the waist, and fixing the feet, and the "divide and rule" of the exit tunnel section and the dangerous rock mass of the slope, is reasonable and feasible. While meeting the requirements of the project schedule, it reduces the difficulty and risk of construction, saves project investment, and can be used as a reference for similar projects.

Key words: Spillway; Survey during construction period; Finite element; Dangerous rock mass; Risk analysis and evaluation

0 引言

双江口水电站右岸泄洪建筑物布置十分紧凑,高高程部位开挖后才能够开挖低高程部位,而低高程部位泄洪建筑物的施工进度制约电站的蓄水发电工期。同时,右岸边坡地质条件复杂,发育规模巨大的XW4危岩体;由于地形陡峻,施工道路布置极为困难;环保水保问题也面临解决。文章对设计方案进行了详细对比介绍。

1 概述

1.1 泄水隧洞简介

位于大渡河上的双江口水电站^[1]为一等大(1)型工程,装机容量200万kW,水库总库容28.97亿m³,调节库容19.17亿m³,具有年调节能力。枢纽泄洪^[2]最大水头约250m,最大下泄流量约8200m³/s,泄水建筑物包括洞式溢洪道(表孔)、深孔泄洪洞(中孔)、竖井非常泄洪洞和放空洞,除竖井泄洪洞布置在左岸外,其余泄洪洞布置在右岸。

洞式溢洪道^[3]最大下泄流量4138m³/s,由

收稿日期:2024-03-27

进口引渠段、控制闸段、无压洞段、泄槽段、挑坎段和下游防护段组成。无压洞全长 1 823 m,城门洞型,宽 16 m,高度由 24 m(进口)渐变至 21 m(出口),无压洞内流速约 25 m/s。

1.2 工程地质条件

洞式溢洪道出口边坡总体地形自然坡度 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$,局部达 65° 。覆盖层较薄,岩类为二云二长花岗岩、黑云钾长花岗岩,伟晶岩脉发育。

洞式溢洪道出口洞脸设计开挖底板高程 2 438.63 m,洞顶高程 2 463.26 m。定义出口洞脸为 0 桩号点,向上游方向为正。0~55 m 洞段临河侧有效围岩厚度 3~20 m,为典型的浅埋偏压隧洞段。围岩外侧发育 XW4 危岩体,分布高程 2 260.00~2 525.00 m,高差约 265 m,垂直投影面积约 3 040 m²,厚度 10~15 m,体积约 3 万 m³,泄洪建筑物与危岩体位置关系见图 1。表层为少量崩坡积碎石土和孤石群,下部分布危石群,为弱风化、强卸荷花岗岩。发育优势节理裂隙 ① $N60^{\circ}\sim 85^{\circ}W/NE\angle 30^{\circ}\sim 40^{\circ}$,② $N70^{\circ}\sim 85^{\circ}W/SW(NE)\angle 75^{\circ}\sim 85^{\circ}$,①和②相互切割组合形成潜在不稳定块体,XW4 危岩体典型照片见图 2。XW4 危岩体基本稳定,但表部危石受洞室、边坡开挖爆破震动及暴雨、地震等自然因素影响下可能局部发生坠落、倾倒崩塌、滑塌等。



图 1 泄洪建筑物与危岩体位置关系

2 洞脸边坡优化设计

(1)原设计方案:洞式溢洪道所处的大渡河右岸边坡地形陡峻,钻孔、探洞等勘探手段实施困难,因此前期工程地质勘探资料相对缺乏。原设计出洞桩号 35.5 m,Ⅲ类岩开挖坡比 1:0.3,Ⅳ类岩开挖坡比 1:0.5,最大洞脸边坡开挖高度 146 m,将洞式溢洪道底板以上的 XW4 危岩体挖

除。除开口线外布设两排锁口锚索外,开挖边坡以浅层锚喷支护和排水为主。



图 2 XW4 危岩体典型照片

(2)实施方案:实施阶段,高度重视施工勘察,先从具备交通条件的洞式溢洪道进口开挖洞身顶拱层,然后开挖导洞至出口边坡,对边坡及出口洞段采取现场踏勘、钻孔、探洞等勘察手段,并结合取芯、孔内摄像等。施工勘察揭示,出口边坡区域没有大的断层通过,整体地质条件较好,存在陡缓倾角裂隙组合,但缓倾角裂隙基本与地形平行,在不开挖边坡的情况下没有剪出口。

出口边坡地形陡峻,施工通道布置极为困难;下方深孔泄洪洞及放空洞出口边坡能否按时施工完成对电站能否按期下闸蓄水至关重要,而洞式溢洪道出口边坡施工会制约上述两个泄洪洞出口开挖边坡的施工;泄洪建筑物出口开挖边坡溜渣的防护难度大,溜渣入河会带来环水保问题。综合上述因素,要求尽可能优化洞式溢洪道出口开挖边坡的开挖高度及工程量,采用“少开挖、强支护”的设计原则。因此实施方案相对原设计方案进行了如下优化:①洞式溢洪道出洞桩号向下游侧平移 35.5 m,洞脸边坡开口线避免扰动 XW4 危岩体;②Ⅳ类岩开挖坡比也采用 1:0.3,最大开挖边坡高度降低了 65.0 m,减少基岩开挖约 10 万 m³,在原设计方案支护措施基础上,开挖边坡范围适当布设锚索,洞式溢洪道洞脸边坡形象面貌见图 3,根据稳定计算成果,优化后的出口边坡稳定安全系数满足规范要求。

3 XW4 危岩体支护设计

依据边坡及洞室开挖对危岩体的影响、危岩体失稳对施工期及运行期建筑物的危害可能性,对 XW4 危岩体进行分区治理^[4],图 1 为分区示

意图。



图 3 洞式溢洪道洞脸边坡形象面貌

XW4 危岩体在桩号约 30 m 处发育一条冲沟,洞身顶拱上方 10 m 以下、桩号 0~10 m 范围为光板岩体。①以冲沟为界,冲沟上游侧危岩体(XW4-1)若失稳,大概率沿冲沟滚落,对建筑物无影响,因此不采取工程处理措施,但在冲沟下游侧边缘设置被动防护网,防止滚石越过冲沟;②洞身顶拱上方危岩体(XW4-2)在洞脸边坡及洞室开挖过程中可能受扰动失稳,因此在洞脸边坡开口线外设置 2 排锁口锚索、紧邻洞顶上方沿洞轴线设置 3 排危岩体固脚锚索,为了增加锚索的锚固效果,设置最小厚度 0.5 m、边长 2.0 m 的基座,然后在其上方布设锚墩。同时对该区域危岩体布设针对性锚杆(束)和主动防护网,之后再行边坡及洞室开挖。从施工情况看,锁口锚索和固脚锚索作用极大,边坡开挖过程中下方危岩体出现了局部塌滑,但未牵引上方被锁固的危岩体失稳。③洞身底板下方危岩体(XW4-4)分布高差范围达 180 m,系统治理难度极大,因此放空洞也采取晚出洞并对边坡采取“少开挖、强支护”的设计方案,边坡开口线适当远离危岩体。考虑到泄洪雾化对该区域危岩体有一定影响,因此采取针对性“锚杆(束)+主动防护网+喷护”的治理措施,在危岩体底部采取“混凝土贴坡+锚索”的固脚措施。

4 出口洞段及对应危岩体(XW4-3)治理

XW4 危岩体在暴雨工况、多次地震作用下未

发生整体垮塌;根据洞式溢洪道洞身顶拱层开挖揭示的工程地质情况,平行于洞轴线展布、倾向坡外的中倾角裂隙较为发育,局部锈染,但是倾角基本与危岩体和基岩的接触面平行,即没有剪出口。

(1)原设计方案:在洞室临河侧设置 4 排对穿锚索,对洞室左侧边顶拱围岩和危岩体进行有效加固。但存在两个问题,一是 XW4 危岩体分布范围大,难以采取系统性的工程处理措施,虽然采取了防护治理措施,但在工程长期运行过程中若发生局部失稳,可能带动洞室失稳;二是施工难度大,若从洞内向外施工,有可能顶托某些对危岩体起关键支撑作用的块体而引起失稳,若从外向内施工,则较难精确定位锚索。

(2)实施方案:对危岩体与洞室围岩分而治之,不打对穿锚索。在洞身对应范围的危岩体区域布设针对性锚杆(束)和主动防护网。在洞室底板下方结合危岩体倒悬部位治理,浇筑贴坡混凝土并布设 3 排系统锚索,对洞室底板围岩及危岩体进行加固。

(3)计算分析:对出口洞段采用理想弹塑性模型进行有限元计算分析^[5-6];工况 1 不考虑 WX4 危岩体对洞室岩壁的支撑作用,即危岩体与洞室围岩由于裂隙作用完全分隔,危岩体不参与计算建模;工况 2 考虑 WX4 危岩体对洞室岩壁的支撑作用,即按不同材料联合建模计算;工况 3 在工况 2 的基础上考虑前述洞顶上方 3 排沿洞轴向布设的锚索作用。计算过程模拟了洞室开挖分层分段,3 个工况洞室围岩变形均较小,工况 1 开挖过程中断面围岩塑性区动态调整,但不存在塑性区贯通的现象;工况 2 除 WX4-3 危岩区有较大塑性区分布外,洞室围岩基本未发生塑性屈服破坏;工况 3 计算成果表明洞顶上方 3 排锚索对危岩体的变形和塑性区约束效果显著。

可见,在考虑危岩体对洞室完全失去支撑的极端情况下,洞室围岩的变形及塑性区发展情况在可接受范围内,且洞内布设的锚杆(束)、固结灌浆和衬砌将更有利于围岩的变形稳定,因此采取分而治之的方案是可行的;考虑到泄洪振动可能对围岩及危岩体有一定影响,且危岩体对洞室支撑效应显著,而布设锚索能有效限制危岩体的塑性区发展,因此在洞室顶拱上方及底板下部布设锚索是有必要的。有限元变形分析成果见表 1。

表1 有限元变形分析成果

工况	水平变形 /mm	竖向变形 /mm
围岩与危岩体隔离	3.5(向右)	4.5(向下)
围岩与危岩体联合作用	1.5(向右)	3.5(向下)
围岩与危岩体联合作用+锚索	1.4(向右)	3.5(向下)

(4)出口洞段支护:出口洞段地下水位很低,可能的洞壁外水压力主要为降雨渗水,根据计算分析成果,施工期安全风险较运行期洞室稳定问题更突出,出口洞段支护设计见图4。衬砌厚度1.5 m,挂网喷护厚度0.15 m,开挖断面尺寸19.30 m×24.15 m(宽×高)。

考虑前述顶拱上方设3排锚索,最下排锚索距离顶拱供5.0 m,因此顶拱采用长度4.5 m、6.0 m的锚杆进行支护;拱脚部位设置两排长度9.0 m的锚杆加强支护;为加强左侧围岩的整体性,确保开挖过程中的安全稳定,顶拱及边墙每层开挖完成后进行无盖重固结灌浆,并在左边墙设长度9 m、12 m的超前锚杆(束)后再进行下层开挖;边墙采用长度9 m、12 m的系统锚杆(束)支护。

为减小洞壁外水压力,改善混凝土衬砌运行期的受力条件,顶拱及左边墙等进行了无盖重固结灌浆的区域在衬砌后进行接触灌浆;顶拱回填灌浆结束后,打孔并加深作为排水孔;右边墙及底板衬砌后进行有盖重固结灌浆。

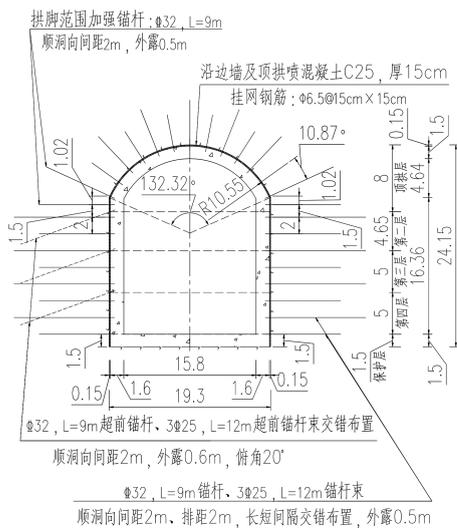


图4 出口洞段支护设计

5 结语

通过施工期勘察、方案对比研究、计算分析等,得出如下结论:

1)洞式溢洪道及放空洞均选择晚出洞,边坡采取“少开挖、强支护”的原则,避开XW4危岩体,计算成果表明优化设计方案合理可行。实施方案一定程度上解决了施工工期紧、上下方交叉作业安全风险突出、环保水保等问题。

2)对规模巨大的XW4危岩体按照边坡及洞室开挖对危岩体的影响、危岩体失稳对施工期及运行期建筑物的危害可能性等进行分区治理,大面治理措施以针对性锚杆(束)锚固和主动、被动防护网防护及局部喷护为主。对重点部位采取混凝土贴坡结合锚索等措施进行锁口、拦腰、固脚,预防危岩体发生整体失稳。

3)结合计算分析成果,出口洞段及对应边坡危岩体采取风险整体可控、施工难度较小的“分而治之”方案,在洞顶及底板部位设系统锚索,洞身范围危岩体以针对性锚固结合主动防护网治理措施为主。洞室围岩治理以洞内锚喷支护、衬砌和固结灌浆为主。

参考文献:

- [1] 景诗阳. 双江口水电站建设在大渡河流域开发中的地位和作用[J]. 四川水力发电, 2008, 27(2): 76-77.
- [2] 严沁之, 邹婷, 段斌, 等. 双江口水电站300 m级高坝泄洪消能关键技术研究[J]. 四川水力发电, 2019, 38(增2): 76-80.
- [3] 索慧敏, 周正军, 何兰, 等. 双江口水电站洞式溢洪道体型选择研究[J]. 水电站设计, 2021, 37(2): 9-12.
- [4] 王晓安, 许韬, 索慧敏. 风险分析及控制在水库边坡治理工程中的应用[J]. 水力发电, 2013, 32(5): 95-97.
- [5] 刘宁, 朱维申, 辛小丽. 双江口水电站初始地应力场反演回归分析[J]. 山东大学学报(工学版), 2008, 38(6): 121-126.
- [6] 周正军, 王观琪, 何兰. 双江口水电站洞式溢洪道不良地质段围岩稳定及开挖支护分析[J]. 水电站设计, 2021, 37(2): 1-4.

作者简介:

张凤财(1987-),男,云南文山山人,高级工程师,硕士,主要从事水工结构设计工作;

周正军(1986-),男,湖北汉川人,高级工程师,博士,主要从事水工结构设计工作;

王观琪(1978-),男,湖北竹溪人,教授级高级工程师,硕士,主要从事水电工程设计工作;

李永红(1970-),男,四川大英人,教授级高级工程师,硕士,主要从事水工结构设计和管理工作。

(编辑:廖益斌)