

超前地质预报技术在昌波水电站导流隧洞 施工中的应用

李和谋^{1,2}, 张晓静², 唐明武², 褚云²

(1. 华电金沙江上游水电开发有限公司, 四川 成都 610000;

2. 华电金沙江上游水电开发有限公司昌波分公司, 西藏 昌都 854000)

摘要:导流隧洞作为水利水电工程的重要组成部分,其施工技术的先进性直接影响工程建设的质量。针对昌波水电站复杂地质条件下的导流洞开挖施工项目,采用探地雷达和地震波反射结合的方法进行超前地质预报,利用探测技术计算隧洞长度和围岩类型,设计多种开挖施工工艺和质量控制体系,提高了昌波水电站导流隧洞的开挖效率和安全性。

关键词:导流隧洞;超前地质预报;探地雷达法;隧道地震波法;开挖支护

中图分类号:TV551.1+1

文献标志码: B

文章编号:1001-2184(2024)04-0143-05

Application of Advanced Geological Prediction Technology in Diversion Tunnel Construction of Changbo Hydropower Station

LI Hemou^{1,2}, Zhang Xiaojing², CHU Yun², TANG Mingwu²

(1. Huadian Jinsha River Upstream Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610000;

2. Changbo Branch, Huadian Jinsha River Upstream Hydropower Development Co., Ltd., Changdu Xizang 854000)

Abstract: Diversion tunnels are an important part of water conservancy and hydropower project. Their advanced construction technology directly affects the quality of project construction. Aiming at the diversion tunnel excavation project of Changbo Hydropower Project under complex geological conditions, this paper adopts the method of combining ground penetrating radar and seismic wave reflection for geological prediction, uses the detection technology to calculate the tunnel length and surrounding rock type, designs a variety of excavation construction technology and quality control system, and improves the excavation efficiency and safety of the diversion tunnels of Changbo Hydropower Project.

Keywords: Diversion tunnels; Advance geological prediction; Ground penetrating radar method; Tunnel seismic wave method; Excavation and support

0 引言

随着中国经济的快速发展,水利水电工程建设已成为促进经济发展、民生改善和能源保供的重要手段^[1]。导流隧洞作为水利水电工程的重要组成部分,其施工技术的先进性直接影响到工程建设的质量^[2]。

导流洞开挖施工技术复杂,需要考虑地质勘测、爆破设计、排水处理和洞身支护等多个环节,导流洞的施工需要根据不同的地质条件和施工要求,制定合理的施工方案和技术路线,以确保施工的效率 and 安全性^[3]。由于地质条件的不同,在导流洞实际开挖过程中存在诸多难题和挑战,例如

复杂的地质构造、恶劣的水文地质条件以及不均匀的围岩类型等,为导流隧洞的施工带来了巨大风险。因此,准确预测隧道内部的地质情况成为极其重要的一部分,结合地球物理方法,可以提高隧道预测的精度。

为了有效预测导流隧道的地质情况,提高导流洞开挖施工的效率 and 安全性,针对昌波水电站复杂地质条件下的导流洞开挖施工项目,采用探地雷达和地震波反射结合的方法进行超前地质预报,利用探测技术计算隧洞长度和围岩类型,设计多种开挖施工工艺和质量控制体系,提高了昌波水电站导流隧洞的开挖效率和安全性。

2 项目概况及施工难点分析

收稿日期:2024-05-15

2.1 项目概述

昌波水电站是金沙江上游干流梯级规划“一库十三级”中的第11个梯级电站,电机装机容量826 MW(其中引水式电站装机740 MW,河床式电站装机86 MW),总投资141.26亿元,开发任务以发电为主,并促进地区经济社会发展。电站建成后,预计每年发电量43.55亿kW·h,可节约标煤130万t,减少二氧化碳排放359万t。

电站导流隧洞工程布置在坝址右岸,在首部枢纽工程施工期间承担过流、泄洪的重要作用,是实现大江截流节点目标的关键性工程。导流隧道全长672 m,城门洞型断面,断面尺寸14.5 m×15 m,过水净断面200.23 m²,进口底板高程2362.00 m,出口底板高程2360.00 m,坡度约3%。导流洞洞向为S6.4°E—S60.5°E—S88.2°E,最外侧隧洞竖直埋深约100~260 m,水平埋深约30~100 m。

导流洞穿越的地层岩性主要为T1-2zh2中厚~薄层状角闪片岩、绿片岩,岩层(片理)产状N20°~30°W,SW∠25°~40°。岩层(片理)走向与洞轴线基本斜交,由上游到下游将遭遇fxb4、fxb8两条断层,其中fxb4与洞轴线交角小,对洞室的影响较大。洞室围岩以中硬岩为主,但由于受断层及进出口风化卸荷的影响,围岩稳定性差,以Ⅲ~Ⅴ类围岩为主。

导流隧洞出口段先具备入洞条件,在前期K0+672 m~K0+652 m段开挖时,未预先进行地质探测,施工过程中遇到一系列质量问题,例如洞室超欠挖严重、边坡岩体破坏、洞身掉块和塌方等。

2.2 超前地质预报技术

探地雷达法(Ground Penetrating Radar, GPR)工程地球物理勘探常用的技术手段之一^[4],利用电磁波在地下传播并反射的特性,通过接收反射回来的电磁波信号以获取地下结构的信息,具有高效、高分辨率的特点。利用偶极子天线发射和接收工作面正面的电磁反射信息,根据采集到的波形幅值、相位和频率推断岩体的完整性。

隧道地震波法(tunnel seismic prediction, TSP)是一种利用地震波来评估和预测隧道地质条件的技术^[5],这项技术能有效识别隧道施工过程中潜在的危险,例如断层、裂隙和含水层等,具

有探测深度大、适应性强的特点。TSP技术基于地震波的传播和反射原理,通过在地面或地下部署地震源和地震检波器,监测和记录地震波在地下岩石中的传播和反射,根据地震波在不同地质介质中的传播速度和反射特性不同,分析这些差异性来推断地质条件。

将探地雷达法和隧道地震波法联合应用,可以充分发挥各自的优势,弥补单一方法的不足,提升地质预测的精度和可靠性。具体优势包括:综合性强,结合GPR的高分辨率和TSP的深探测能力,可以获得更加全面的地下地质信息;多层次探测,GPR用于浅层结构的精细探测,TSP用于深层结构的宏观勘察,两者结合能实现多层次的地质预测;验证互补,不同方法的预测结果可以相互验证,提高预测的可靠性和可信度。GRP和TSP联合应用是隧洞超前地质预测中的一种有效手段,通过合理的组合和优化应用,可以提高地质预测的精度和可靠性,为隧道施工提供更加安全和高效的技术支持。

2.3 施工难点分析

(1)局部围岩稳定性较差,尤其是导流隧道进出口处,受风化卸荷载作用影响,属于Ⅳ类围岩。此外,隧道洞身被较大地质断层切割,施工容易造成岩体脱离以及爆破时的脱落和扰动,影响隧道断面施工质量。

(2)隧洞区地下水位较为低平,隧洞顶板位于地下水位附近,地下水流量有限,仅以局部渗水为主。但隧洞内小断层、大裂隙等较发育,近河侧存在河水沿断层、裂隙倒渗地下洞室的可能,在隧道施工期间对安全危害极大。

3 施工通风、水、电布置

按出口掌子面作业施工考虑通风,通风选择压入式供风,最大洞内作业人员50人,一次开挖最大断面123 m²,最大通风距离400 m,时段最大风量124 m³/min,选择6台同型号油动20 m³空压机,供风管道选择为1.5 m风筒。

施工用水水源考虑为导流洞出口处撒日西冲沟水源,规划2台水泵,选型为65-200A的离心泵,扬程40 m左右,输水量30 m³/h,电机功率11 kW,用于导流洞施工取水。

电源取自昌波水电站供电线路10 kVⅦ线,由终点端头架设10 kV高压线路至变压器处,采

用 1 台 1 000 kV 和 1 台 500 kV 箱式变压器连接施工隧道,为导流隧洞施工供电,照明供电网络采用 380/220 V 中性点接地的三相四线制系统。电源取自各供电点照明回路,灯用电压以 220 V 为主,隧洞内潮湿易触及带电体和危险而不便于工作的狭长地点选用 36 V 电压。照明线路以沿墙穿管暗敷设为主,部分采用电缆敷设。

4 开挖施工方案设计

为保证隧道开挖过程中围岩的稳定性,施工全程遵循“间隔开挖、及时支护”的原则。由于导流隧洞开挖断面较大,洞身开挖分三层进行,第 I 层开挖高度 850 cm。II、III 类围岩第 I 层开挖采用右半洞领先 2~3 个爆破循环,左半洞扩挖跟进的施工方法;IV 类围岩第 I 层按照一掘一支护的程序进行施工,IV 类围岩先开挖中导洞,中导洞支护

完成后扩挖支护两侧;V 类围岩及洞口段第 I 层采用预留核心土法开挖,分四部分,先进行两侧开挖,按先开挖软岩、后开挖硬岩的顺序分别开挖支护,并采用钢支撑加强支护,再开挖中部岩柱上部,连通钢支撑,支护顶拱,岩柱下部核心土开挖滞后掌子面 400~600 cm。

第 II 层典型断面开挖梯段高度 710 cm,采用预裂梯段爆破。II、III 类围岩第 II 层预裂孔采用轻型潜孔钻造孔,主爆孔采用液压钻造孔,一次阶段爆破至保护层;IV、V 类围岩先锋槽开挖采用液压钻造孔,两侧扩挖采用躲避钻造孔,先爆破向下扩挖中导洞再向两侧进行扩挖支护。

第 III 层为底板 200 cm 预留保护层,开挖钻孔采用手风钻造孔,开挖工程量不大,分半幅与第 II 层开挖平行作业。导流隧洞开挖分层见图 1。

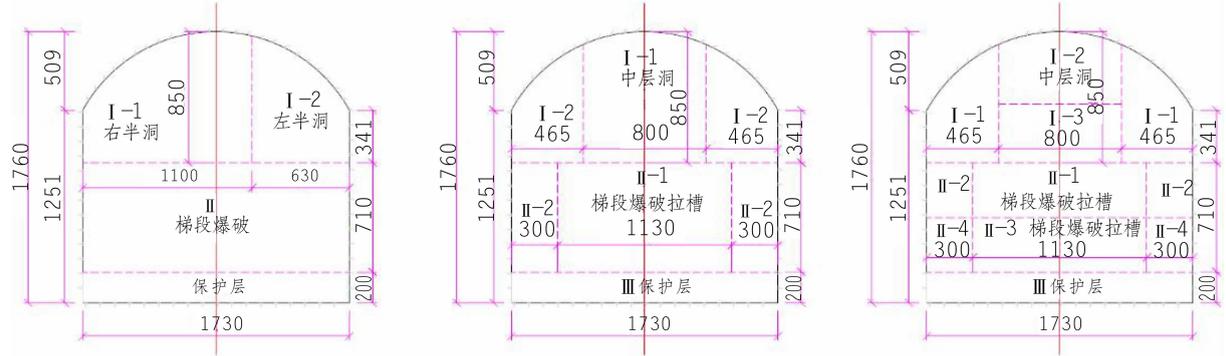


图 1 导流隧洞开挖分层图(单位:cm)

5 支护施工方案设计

在洞室开挖过程中,根据设计和开挖揭示围岩地质状况,确定支护跟进方式。当围岩稳定条件较差时,采用支护施工紧跟开挖作业面与开挖作业交叉交替进行的方法,及时进行随机锚杆、超前锚杆或钢支撑等型式的支护;当围岩稳定条件较好、较完整时,采用支护施工略滞后开挖作业面 30~50 m 的方式,进行系统锚杆和喷射混凝土支护。

II 类围岩洞段,系统锚杆滞后开挖面 3 个循环施工,与钻孔装药平行作业;III 类围岩洞段,初喷混凝土和锚杆施工紧跟开挖面,炮后即喷射混凝土,随后进行锚杆施工,挂钢筋网和复喷混凝土滞后开挖面 30~50 m,以 20 m 为一个作业段,与开挖平行作业;IV 类及断层围岩洞段,先进行超前锚固后,再进行开挖,喷锚支护和钢拱架支撑紧跟开挖掌子面,炮后立即初喷混凝土并进行系统锚

杆施工,碴出完后紧跟挂钢筋网,安设钢拱架支撑,然后复喷混凝土。

6 超前地质预报

在昌波水电站导流隧洞施工现场,隧洞 K0+652~K0+644、K0+629~K0+604 和 K0+608~K0+583 段采用 GPR 进行地质勘察,K0+593~K0+473 段采用 TSP 进行地质勘察。

6.1 GPR 法探测结果分析

GPR 采用检测频率分别 100 MHz 屏蔽单天线对岩体破碎带、裂隙等不良地质条件进行识别,K0+652~K0+644、K0+629~K0+604 和 K0+608~K0+583 段地质雷达探测成果见图 2~4。根据地质雷达探测成果图推测 K0+652~K0+627 段围岩以弱风大理岩为主,围岩较完整,其中 K0+652~K0+644 段围岩局部裂隙较发育,围岩较破碎,K0+644~K0+627 段围岩岩体较完整,局部有裂隙发育;K0+629~K0+604 段

围岩以中厚层混合化片岩为主,其中 K0+629~K0+626 段岩体局部较破碎,K0+626~K0+618 段右下侧裂隙发育,岩体较破碎,K0+618~K0+612.5 段为断层及影响带,岩体破碎,K0+612.5

~K0+604 段岩体较完整;K0+608~K0+583 段围岩以中厚层混合化片岩为主,其中 K0+608~K0+602 段发育一条岩体裂隙,该段岩体较破碎;K0+602~K0+583 段岩体较完整。

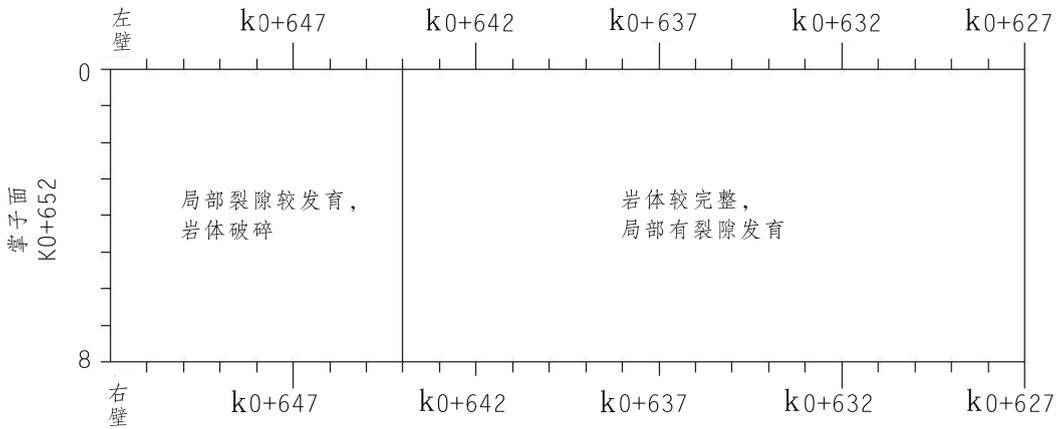


图2 K0+652~K0+644段地质雷达探测成果解释图(单位:m)

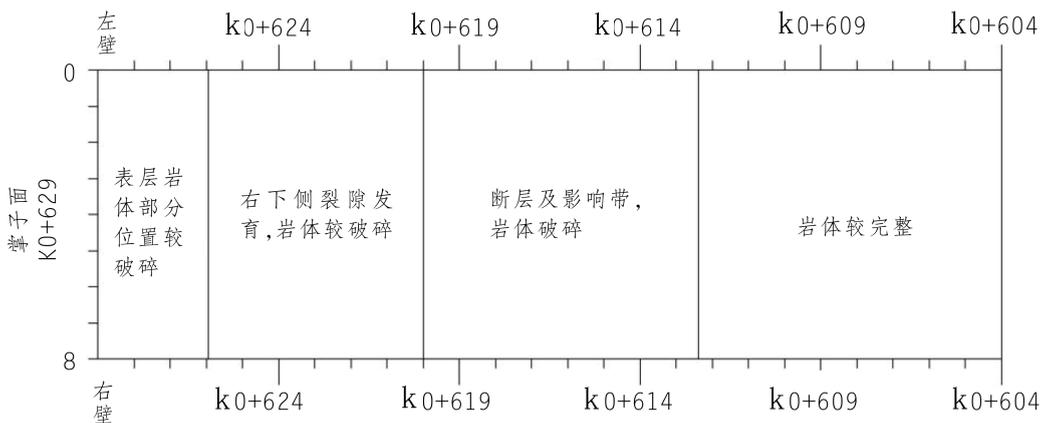


图3 K0+629~K0+604段地质雷达探测成果解释图(单位:m)

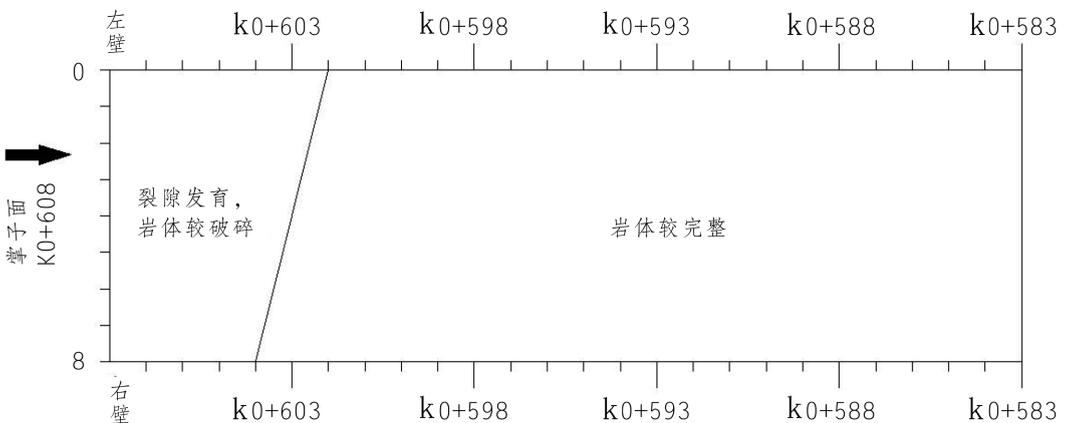


图4 K0+608~K0+583段地质雷达探测成果解释图(单位:m)

6.2 TSP法探测结果分析

TSP从隧洞工作面开始,在左右隧洞壁上分

别建立了24个震源点,震源点间距约为1.5m。

采集锤击产生的地震反射信号,采用预处理技术

滤除噪声和不需要的信号,这一过程获得了隧洞工作面前方的有效地震反射信号。TSP 探测成果显示 K0+655~K0+675 段范围内,围岩纵波速度为 3 914~5 629 m/s;泊松比为 0.17~0.39;密度为 2.41~2.61 g/cm³;静态杨氏模量为 18~29 GPa。分析结果为 K0+593~K0+542 段纵波速度 v_p 、静态杨氏模量 E 略微减小,横波速度 v_s 略微增大,与掌子面相比岩体强度略微增强,裂隙较掌子面发育,岩体较完整;K0+542~K0+493 段纵波速度 v_p 变化不大,密度 ρ 、静态杨氏模量 E、横波速度 v_s 略微增大,与掌子面相比岩体强度有所增强,岩体完整;K0+493~K0+473 段纵波速度 v_p 、横波速度 v_s 与掌子面基本一致,密度 ρ 、静态杨氏模量 E 略微下降,泊松比 σ 变大,与掌子面相比岩体强度基本一致,裂隙较发育,岩体较完整,施工过程中应注意掉块。

6.3 地质预报结果应用

根据 GPR 和 TSP 的预报结果,识别了隧洞前方的断层、破碎带,并制定相应的施工策略,对于破碎带和软弱地层,加强支护措施,显著提高了隧洞稳定性,避免再次出现因地质变化导致的质量事故。此外,根据地质预报结果,调整爆破的装药量、孔间距和起爆顺序,减少对围岩的扰动,防止了地质灾害,在软弱或破碎地层中采用微差爆破技术,控制爆破振动,保护隧道结构和周边环境。

GPR 法和 TSP 法的结合应用,为导流隧洞施工提供了准确的地质预报数据,基于地质预报数据,优化了施工工艺和爆破设计,显著提升了昌波水电站站导流隧洞的施工安全性和工程质量。

7 结 语

(1)根据不同围岩情况提出了相应的开挖和支护方案,是一种科学、经济、高效的施工管理策略,有助于保障工程质量和施工安全,同时实现环境保护和资源节约。针对围岩情况定制开挖和支护方案,有效预防了岩体坍塌和滑移,保障施工人员和设备的安全;减少了不必要的支护材料和施工设备的使用,降低工程成本;此外针对不同围岩采用最适合的开挖和支护方法,提高了工程施工速度,缩短了工期。

(2)探底雷达法和隧道地震波法在导流隧洞施工中的联合应用,能够有效提高地质勘察的准确性和施工安全性。通过详细的地质勘察和数据分析,可以提前识别和处理地质异常,保障施工的顺利进行。随着技术的不断发展和完善,探底雷达法和隧道地震波法将在隧洞施工中发挥更大的作用。

(3)导流隧洞开挖作为一个复杂的工程系统,其成功实施依赖于科学的设计、合理的施工方案、先进的技术设备以及严格的管理和安全措施。随着工程技术的不断发展和进步,隧洞施工将更加注重智能化和信息化管理,进一步提升施工效率和质量。同时,面对复杂的地质条件和施工环境,仍需不断探索和创新,开发出更加高效、安全、环保的施工技术和方法。

参考文献:

- [1] TAO Z. Analysis on Construction Technology of Concrete Cutoff Wall in Water Conservancy and Hydropower Project; proceedings of the International Symposium on Mechanical and Electrical Systems and Control Engineering, Shanghai, PEOPLES R CHINA, F Apr 22-23, 2017[C]. 2017.
- [2] 郝俊锁. 复杂地质特长深埋水工隧洞智能化施工关键技术研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(6): 188-196.
- [3] 冯欢欢, 洪开荣, 杨延栋, 等. 现代隧道技术[J]. 极端复杂地质条件下 TBM 隧道施工关键技术研究及应用, 2022, 59(1): 42-54.
- [4] HEE-MUN, ENGINEERS P J J O T K S O C. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications[J]. 2015(2): 437-440.
- [5] HE N, ZHANG X G. Excavation and Construction Technology of Diversion Tunnel under Complex Geological Conditions[J]. Applied Sciences-Basel, 2023, 13(20): 11538.

作者简介:

李和谋(1998-),男,四川阆中人,助理工程师,硕士,从事水利水电工程水电工程建设工作;

张晓静(1997-),女,河南平顶山人,助理工程师,硕士,从事水利水电工程水电工程建设工作;

唐明武(1979-),男,四川大英人,工程师,学士,从事水电水利水电工程建设工作;

褚云(1976-),男,青海贵德人,高级工程师,学士,从事水电水利水电工程建设工作。

(编辑:吴永红)