

复杂地质条件下引调水工程勘察方法实践研究

李磊

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司

DOI:10.32629/hwr.v10i4.6955

[摘要] 我国水资源时空分布不均衡,引调水工程作为优化水资源配置的核心载体,常穿越高山峡谷、断层破碎带等复杂地质区域,地质条件的复杂性直接影响工程勘察精度与施工安全。本文对复杂地质条件下引调水工程勘察技术、数据处理方法及工程实践进行系统研究,发现空天地一体化勘察、定向钻探与综合物探结合的技术体系,能够有效提升勘察数据精度,量化地质参数,解决传统勘察方法针对性不强、数据误差较大的难题,为工程风险防控提供精准的地质支撑。

[关键词] 复杂地质; 引调水工程; 勘察技术; 数据处理; 风险评价

中图分类号: TV672.2; P642 文献标识码: A

Practical research on survey methods for water diversion projects under complex geological conditions

Lei Li

Xinjiang Water Resources and Hydropower Survey and Design Institute Co., Ltd.

[Abstract] The spatial and temporal distribution of water resources in China is uneven. As the core carrier for optimizing water resource allocation, water diversion projects often cross complex geological areas such as high mountains, canyons, and fault zones. The complexity of geological conditions directly affects the accuracy of engineering surveys and construction safety. This article conducts a systematic study on the survey technology, data processing methods, and engineering practices of water diversion projects under complex geological conditions. It is found that the technology system of integrating air, space, and ground surveys, directional drilling, and comprehensive geophysical exploration can effectively improve the accuracy of survey data, quantify geological parameters, solve the problems of weak pertinence and large data errors in traditional survey methods, and provide accurate geological support for engineering risk prevention and control.

[Key words] complex geology; Water diversion project; Survey technology; Data processing; risk assessment

引言

我国水资源分布呈现“南丰北缺、东多西少”的格局,引调水工程是破解水资源供需矛盾的关键举措。目前国内引调水工程勘察多采用单一技术手段,对深埋长隧洞、高应力区域的勘察精度不足,数据预处理与风险评价的关联性不强,难以满足复杂地质条件下工程设计的精细化需求。本研究聚焦复杂地质核心特征,整合多元勘察技术,优化数据处理与风险评价方法,结合工程实践验证技术可行性,为同类工程勘察提供技术参考,提升引调水工程勘察的科学性与精准性。

1 复杂地质条件核心特征与勘察要求

1.1 引调水工程常见复杂地质类型

引调水工程常见复杂地质类型多样,主要集中于断层破碎带、岩溶发育区、软岩变形区、高应力区及富水地层,不同地质类型的分布特征与工程影响存在显著差异(表1)^[1]。

表1 引调水工程5类常见复杂地质类型的关键参数

地质类型	分布特征	岩体完整性系数	核心参数指标	工程隐患
断层破碎带	呈条带状分布,延伸长度500—3200m	0.12-0.35	裂隙密度4—12条/m	岩体坍塌、涌水
岩溶发育区	集中分布于灰岩区域,埋藏深度15—80m	0.20-0.45	溶洞直径0.5—8m,充填率30%—75%	突水突泥、溶洞坍塌
软岩变形区	片状分布,厚度10—55m	0.25-0.50	单轴抗压强度5-28MPa,软化系数0.3-0.6	围岩大变形、支护失效
高应力区	深埋区域,埋深≥600m	0.40-0.65	最大地应力18-35MPa	岩爆、岩体开裂
富水地层	砂层、砾石层,分布广泛	0.30-0.55	渗透系数 1.2×10^{-3} — 3.8×10^{-1} cm/s	涌水、基坑涌砂

1.2 复杂地质对勘察工作要求

复杂地质条件下,引调水工程勘察需满足针对性、精准性、

全面性三大核心要求^[2]。针对不同地质类型需采用差异化勘察手段,断层破碎带需重点查明破碎带宽度、充填物性质及地下水分布,勘察分辨率需达到0.5m;岩溶发育区需精准定位溶洞位置、尺寸及充填情况,避免遗漏隐蔽岩溶隐患;软岩变形区需重点测试岩体力学参数及遇水软化特性,测试误差控制在±5%以内。

2 复杂地质引调水工程勘察方法

2.1 空地一体化勘察

空地一体化勘察技术整合卫星遥感、无人机航测与地面勘察,形成“天-空-地”三级勘察体系,适用于大范围复杂地质区域勘察^[3]。卫星遥感采用高分辨率影像,重点识别区域地质构造、地层分布及不良地质范围,解译精度≥92%;无人机航测搭载激光雷达设备,对地形地貌进行三维建模,建模精度±0.15m,重点勘察线路沿线边坡、沟谷等区域,获取地形高程数据与地表地质信息;地面勘察配合地质测绘与浅层钻探,补充地下浅层地质资料,分辨率0.3m。

2.2 定向钻探与孔内精细探测

定向钻探技术针对深埋、复杂地质区域,采用定向钻机实现钻孔精准导向,钻孔偏斜度≤0.5°/100m,钻孔深度可达1000m,可实现水平、倾斜钻孔施工,重点用于断层破碎带、岩溶发育区的深部勘察^[4]。孔内精细探测采用孔内电视、超声波测井等设备,孔内电视分辨率0.1mm,可清晰观测孔壁岩体裂隙、溶洞分布及充填情况;超声波测井测试岩体波速范围1800—5200m/s,误差≤±3%,量化岩体完整性。钻探过程中采用高压柱塞进行孔内压水试验,控制柱塞密封压力≥1.2倍试验压力,避免漏水影响试验数据,确保孔内探测数据精准可靠。

2.3 综合物探

综合物探技术整合地震反射法、大地电磁法、地质雷达法,针对不同复杂地质类型优化技术组合,提升探测精度^[5]。地震反射法采用多道地震仪,道间距5m,主频20—100Hz,可识别断层破碎带宽度、埋深,探测误差≤±5%;大地电磁法探测深度可达1000m,分辨率10m,重点测试地下岩层电阻率,识别富水地层与岩溶发育区;地质雷达法采用100—500MHz天线,探测深度0—30m,分辨率0.1m,适用于浅层岩溶、裂隙及管线探测。通过多方法数据融合,剔除异常数据,验证吻合度≥88%,有效解决单一物探方法针对性不强的问题。

2.4 室内试验与原位测试

室内试验与原位测试结合,精准获取地质参数,为工程设计提供数据支撑^[6]。室内试验选取钻孔岩芯样品,开展单轴抗压强度、抗剪强度、渗透系数等测试,样品尺寸为50mm×100mm(圆柱体),每组试验样品≥3个,测试环境温度控制在20±2℃,湿度50±5%;原位测试采用平板载荷试验、标准贯入试验、压水试验等,平板载荷试验承压板直径30cm,加载速率0.05MPa/min,标准贯入试验锤重63.5kg,落距76cm,压水试验分3级升压,每级稳压30min。通过室内试验与原位测试数据对比,修正参数误差,确保参数取值精准,误差控制在±5%以内。

2.5 超前地质预报

超前地质预报技术采用“长中短”结合模式,针对隧洞等地下工程,实现施工期地质隐患提前预警^[7]。长距离预报(80—120m)采用地震波法,主频10—50Hz,探测误差≤±3m,识别断层、岩溶等大型不良地质体;中距离预报(20—30m)采用地质雷达法,主频200—500MHz,分辨率0.1m,排查浅层裂隙与局部富水区;短距离预报(5—10m)采用超前钻孔,钻孔直径108mm,取芯率≥85%,精准验证前方地质条件。预报数据实时分析,预警响应时间≤30min,形成预报报告,为施工方案调整提供依据,降低施工地质风险。

3 复杂地质引调水工程勘察方法应用方案

3.1 地质参数量化计算与公式推导

针对复杂地质核心参数,建立量化计算模型,推导相关计算公式,确保参数取值科学精准^[8]。岩体完整性系数(K_v)采用超声波测井数据计算,通过岩体纵波速度与完整岩体纵波速度的比值量化,计算公式如下所示:

$$K_v = \left(\frac{v_{pm}}{v_{pr}} \right)^2 \quad (1)$$

式中:K_v为岩体完整性系数(无量纲);v_{pm}为实测岩体纵波速度(m/s),取值范围1800—5200m/s;v_{pr}为完整岩体纵波速度(m/s),根据岩性确定,灰岩v_{pr}=4500—5200m/s,泥岩v_{pr}=1800—2500m/s。该公式考虑了岩体纵波速度的差异,计算误差≤±0.03,能够精准量化岩体完整性,为地质评价提供核心参数^[9]。推导渗透系数(k)修正公式,结合压水试验数据,修正温度对渗透系数的影响,提升参数精度。

3.2 工程地质风险分级评价模型

建立工程地质风险分级评价模型,结合地质参数与工程影响,实现风险量化分级。选取岩体完整性系数(K_v)、地应力(σ)、渗透系数(k)、岩性强度(R_c)4个核心指标,采用层次分析法确定权重,建立风险评价公式如下所示:

$$R = \omega_1 K_v + \omega_2 \frac{\sigma}{\sigma_{max}} + \omega_3 k g_k + \omega_4 \frac{R_c}{R_{cmax}} \quad (2)$$

式中:R为地质风险评价指数(无量纲),取值范围0—1;ω₁、ω₂、ω₃、ω₄分别为各指标权重,依次为0.35、0.25、0.20、0.20;σ为实测地应力(MPa),σ_{max}为区域最大地应力(MPa);k为渗透系数(cm/s);R_c为岩体单轴抗压强度(MPa),R_{cmax}为区域岩体最大单轴抗压强度(MPa)^[10]。根据R值将风险分为4级:R≥0.8为低风险,0.6≤R<0.8为中风险,0.4≤R<0.6为较高风险,R<0.4为高风险,评价误差≤±0.05,为工程风险防控提供量化依据。

4 工程实践案例分析

选取某长距离引调水工程作为实践案例,该工程线路总长192km,其中隧洞段长度128km,穿越断层破碎带、岩溶发育区、高应力区等复杂地质区域,隧洞最大埋深1180m,工程设计输水

流量 $35\text{m}^3/\text{s}$,总工期102个月。本次勘察采用本文提出的综合勘察方法,整合空天地一体化勘察、定向钻探、综合物探等技术,开展全线路勘察,重点排查隧洞段地质隐患,采集各类勘察数据12000余组,通过标准化预处理与量化分析,为工程设计与施工提供支撑(表2)。

表2 本案例不同勘察区域的实践数据

勘察区域	地质类型	采用勘察技术	核心勘察数据	勘察效果
隧洞进口段 (1—5km)	断层破碎带	定向钻探+孔内电视+地震反射法	破碎带宽度18—32m,岩体完整性系数0.18—0.32,裂隙密度6—10条/m	精准查明破碎带范围与充填情况,勘察吻合度90%
隧洞中段 (45—52km)	岩溶发育区	大地电磁法+地质雷达+超前钻孔	溶洞直径1.2—6.8m,埋深22—65m,充填率45%—70%,渗透系数 8.5×10^{-2} — 3.2×10^{-1} cm/s	定位溶洞12个,无遗漏隐蔽隐患,预报准确率89%
隧洞深部段 (88—95km)	高应力区	空天地一体化+超声波测井+地应力测试	最大地应力32MPa,岩体纵波速度4200—4800m/s,岩体完整性系数0.45—0.62	精准测试地应力参数,为岩爆防控提供支撑
管线穿越段 (150—158km)	富水砂层	地质雷达+原位压水试验+室内试验	渗透系数 1.5×10^{-3} — 9.8×10^{-2} cm/s,砂层密实度0.72—0.85	查明富水范围,为基坑降水设计提供数据

上表明确了各区域地质类型、采用的勘察技术、核心数据及勘察效果,勘察数据与实际地质条件吻合度均达到89%以上,有效识别各类地质隐患37处,验证了本文提出的勘察方法的可行性与精准性,能够满足复杂地质条件下引调水工程勘察的需求。

5 结语

复杂地质条件下引调水工程勘察难度大、要求高,传统单一勘察方法难以满足工程需求。本文整合多元勘察技术,明确了复杂地质核心特征与勘察标准,优化了数据处理与风险评价方法,结合工程实践验证了技术体系的可行性。研究提出的空天地一体化勘察、定向钻探与综合物探结合的技术模式,能够有效提升

勘察精度与效率,量化地质参数,为工程风险防控提供支撑。

[参考文献]

[1]王吉亮,向家菠,颜慧明,等.引江补汉工程输水线路工程地质选线研究[J].长江科学院院报,2023,40(5):100—105.

[2]董家兴,周志强,赵永川,等.滇中引水工程砂化白云岩隧洞围岩地质特征与破坏机制[J].岩石力学与工程学报,2024,43(z1):3464—3476.

[3]占艳平,林仕祥,刘恒.引水隧洞断裂地质缺陷分析及工程应对策略[J].人民长江,2022,53(9):94—101.

[4]王双明,孙强,袁士豪,等.论煤-水-土多资源协调开发[J].西北地质,2024,57(5):1—10.

[5]魏英豪,陈素娟,王学良,等.基于构造地貌法的滇中引水工程区全新世断裂活动强度空间差异性研究[J].地质科学,2025,60(1):293—307.

[6]郭超,许龙,李春茂,等.全球降水观测数据支持下的地质灾害危险性评价与区划——以广东连平县绣缎镇为例[J].中国地质灾害与防治学报,2025,36(6):152—165.

[7]张延杰,曾显志,王海深.高地震烈度区复杂地质条件渡槽结构[J].清华大学学报(自然科学版),2024,64(7):1264—1277.

[8]田苗壮,赵龙,崔文君,等.南水北调背景下地下水位上升对地面沉降控制与影响——以北京潮白河地下水系统为例[J].中国地质,2023,50(3):872—886.

[9]睦素刚,杨艳娜,黄靖宇.复杂断块山区隧道涌突水灾害的风险评价模型[J].地下空间与工程学报,2025,21(1):350—357.

[10]李露露,张秋兰,李星宇,等.高放废物深地质处置地下水数值模拟应用综述[J].水文地质工程地质,2022,49(2):43—53.

作者简介:

李磊(1999—),男,汉族,河南省驻马店市人,硕士研究生,助理工程师,从事研究方向:工程地质勘察及地质灾害研究。