

复杂地质条件下引水隧道深孔勘察技术研究

张 翔

河南省第二地质勘查院有限公司 河南 郑州 410000

摘要: 本文聚焦复杂地质条件下引水隧道深孔勘察技术,分析岩溶、破碎带等典型复杂地质类型及深孔勘察与隧道设计施工的衔接逻辑。构建核心技术体系,涵盖技术选型、关键技术应用及多源数据融合。开展工艺优化研究,涉及钻进、定位导向及特殊地质专项工艺。建立质量控制与地质风险评估体系,包括质量指标、控制措施及风险评估方法,为复杂地质引水隧道勘察提供科学指导。

关键词: 复杂地质; 引水隧道; 深孔勘察; 技术选型; 工艺优化

引言: 在水利工程建设中,引水隧道是关键组成部分。然而复杂地质条件给引水隧道建设带来诸多挑战,准确的地质勘察是保障隧道安全施工与运营的基础。深孔勘察作为获取地下地质信息的重要手段,其技术选型、工艺优化及质量控制等至关重要。本文深入探讨复杂地质条件下引水隧道深孔勘察技术,旨在提升勘察水平,为隧道工程提供可靠依据。

1 引水隧道复杂地质特征与深孔勘察需求分析

1.1 典型复杂地质类型及工程特性

引水隧道常见的复杂地质类型包括岩溶地质、破碎带地质、软弱围岩地质、高地应力地质及富水地质等。岩溶地质区域存在溶洞、溶蚀裂隙、地下暗河等地质构造,岩体完整性差,透水性强,施工中易发生突水突泥灾害,且对支护结构承载能力要求极高;破碎带地质由断层破碎带、节理密集带组成,岩体呈散体状或碎块状,稳定性极差,开挖后易出现塌方,需采取强化支护措施;软弱围岩地质主要包括页岩、泥岩、煤层等软质岩层,岩体强度低,遇水易软化崩解,变形量大,对施工工法和支护时机要求严格;高地应力地质多分布于深埋隧道区域,岩体承受巨大地应力,易产生岩爆、大变形等地质灾害,威胁施工安全;富水地质区域地下水丰富,水压高,易导致围岩强度降低、支护结构受水压力作用破坏。

1.2 深孔勘察与隧道设计施工的衔接逻辑

深孔勘察与隧道设计施工的衔接遵循“数据支撑-方案优化-动态调整”的核心逻辑,形成闭环协同体系。在设计阶段,深孔勘察获取的岩体物理力学参数、地质结构分布、地下水赋存状态等数据,为隧道线路比选、断面形式确定、支护参数计算、施工工法选型提供基础依据,通过地质建模明确潜在地质风险点,指导设计方案制定,避免因地质勘察不足导致设计不合理;在施工准

备阶段,深孔勘察成果用于施工组织设计编制,明确关键工序的地质风险防控重点,制定针对性的施工预案,如岩溶区域的注浆堵水方案、破碎带的强化支护方案等^[1]。在施工过程中,深孔勘察与超前地质预报相结合,对设计阶段勘察成果进行验证和补充,实时获取掌子面前方地质条件变化数据,若发现与勘察成果不符的地质情况,及时反馈给设计单位进行方案调整,实现“勘察-设计-施工”的动态衔接,确保施工安全和工程质量。

2 复杂地质条件下深孔勘察核心技术体系

复杂地质条件下深孔勘察核心技术体系以精准探测、数据可靠、高效作业为目标,整合技术选型、关键技术应用、多源数据融合三大核心模块,形成全方位、多层次的勘察技术架构。

2.1 深孔勘察技术选型方法

深孔勘察技术选型遵循“地质适配、功能匹配、效率优先、经济合理”原则,采用多因素综合决策确定最优方案。首先通过前期地质调查,明确勘察区域地质类型、岩体特性、地下水条件及埋深等关键参数,分析勘察难点与技术需求,如岩溶区域需侧重透水性探测和溶洞识别,破碎带需解决孔壁稳定与取芯难题;其次梳理钻进、物探、测试等各类技术的适用范围、优势、效率及成本,建立包含金刚石取芯钻进、声波测井等技术的特性数据库;随后采用层次分析法、模糊综合评价法等,构建涵盖地质适配性、数据准确性、作业效率等维度的量化评价体系;最后结合工程实际需求与现场施工条件,比选候选方案确定最优技术组合,确保高效解决复杂地质勘察问题,获取精准可靠数据^[2]。

2.2 关键勘察技术的应用特性分析

深孔勘察关键技术包括钻进、物探测试、孔内监测等,需结合地质条件针对性选用。金刚石取芯钻进采用金刚石钻头,钻进效率高、取芯质量优,岩芯采取率超

90%，适用于坚硬完整岩体，可提供高质量室内试验样本，但在破碎带、软弱围岩区域易出现孔壁坍塌、岩芯破碎；空气潜孔锤钻进借助压缩空气驱动，钻进速度快，适配硬岩、中硬岩及干旱缺水区域，能减少孔内积水导致的孔壁失稳，却受限于富水区域与软弱岩层；声波测井通过测量声波传播速度判断岩体完整性与风化程度，探测范围广、操作简便，适用于各类地质，但受孔壁平整性与地下水影响较大；电磁波测井分辨率高，可识别裂隙、溶洞，适配岩溶发育区与破碎带，对含水量敏感；岩体强度测试中，现场点荷载试验准确性高但效率低，声波测试推算效率高，需建立可靠换算关系。

2.3 多源勘察数据融合技术

多源勘察数据融合技术通过整合钻孔取芯、物探测井、现场测试、水文监测等多类型数据，经预处理、特征提取、信息融合及地质解释，实现地质信息的全面挖掘与精准表征。首先对原始数据进行清洗去异常、标准化统一格式、补全缺失值等预处理，保障数据质量；其次针对不同数据类型提取特征参数，如从岩芯数据中获取岩体完整性系数、岩芯采取率，从物探数据中提取波速、电阻率；随后运用统计、模型、决策等融合算法建立关联模型，消除单一数据的不确定性，实现互补优势；最后通过地质建模技术生成三维可视化模型，清晰呈现岩体结构、地质构造及地下水分布，为隧道设计施工提供直观全面的地质依据，提升地质解释的可靠性与科学性。

3 复杂地质条件下深孔勘察工艺优化研究

复杂地质条件下深孔勘察工艺优化以提升钻进效率、保障孔壁稳定、提高数据质量为核心目标，针对深孔钻进、定位导向、特殊地质专项勘察等关键环节进行技术改进和流程优化。

3.1 深孔钻进工艺优化

深孔钻进工艺优化围绕钻头选型、钻进参数调控、泥浆性能改良三大核心环节展开，实现复杂地质条件下的高效稳定钻进。在钻头选型方面，根据地质岩性特性针对性选择钻头类型，坚硬完整岩体选用金刚石孕镶钻头，利用其高耐磨性和切削效率提升钻进速度；破碎带、软弱围岩区域选用PDC钻头或牙轮钻头，增强钻头对破碎岩体的破碎能力和适应性，减少钻头磨损和卡钻风险。在钻进参数调控方面，通过实时监测钻进过程中的钻压、转速、钻进速度等参数，建立参数与地质条件的匹配关系，坚硬岩体采用高钻压、中低转速组合，避免钻头过度磨损；软弱围岩和破碎带采用低钻压、高转速组合，减少对孔壁的扰动，防止孔壁坍塌；同时根据

孔内情况动态调整钻进速度，确保钻进平稳。在泥浆性能改良方面，针对不同地质条件优化泥浆配比，富水区域采用高黏度、高切力泥浆，增强泥浆的护壁和携渣能力；破碎带区域添加堵漏剂和稳定剂，提高泥浆的堵漏效果和孔壁稳定能力；干旱缺水区域可采用泡沫泥浆或空气钻进技术，减少水资源消耗，同时保障钻进效率。

3.2 深孔勘察定位与导向优化

深孔勘察定位与导向优化通过采用高精度定位设备、先进导向技术和实时监测系统，实现钻孔轨迹的精准控制，确保勘察孔能够准确获取目标区域地质信息。在定位技术方面，采用GPS定位与全站仪结合的方式，实现勘察孔孔位的精准布设，定位误差控制在 $\pm 5\text{cm}$ 以内；针对山区等信号遮挡区域，增设基准站和信号放大器，保障定位信号稳定可靠^[1]。在导向技术方面，应用随钻测量（MWD）技术，实时采集钻孔轨迹参数（顶角、方位角、工具面角），通过数据传输系统将信息实时反馈至地面控制系统，操作人员根据反馈数据及时调整钻进方向；对于大深度、大倾角钻孔，采用螺杆钻具导向技术，利用螺杆钻具的定向钻进能力，精准控制钻孔轨迹，确保钻孔偏差不超过设计要求。

3.3 特殊地质条件下的专项勘察工艺

针对岩溶、破碎带、富水、高地应力等特殊地质条件，制定个性化专项勘察工艺，确保勘察数据的准确性和完整性。岩溶地质区域专项勘察采用“钻探+物探+水文测试”综合工艺，钻探过程中采用双管取芯技术，减少岩芯扰动，提高岩芯采取率，同时进行孔内电视观测，直观识别溶洞形态和充填情况；结合地质雷达和电磁法物探技术，探测岩溶发育范围和连通性；通过抽水试验和压水试验，测定岩体透水性和地下水水压。破碎带地质专项勘察采用“超前钻探+孔内成像+声波测试”工艺，超前钻探提前探明破碎带位置和厚度，采用跟管钻进技术保障钻孔稳定；利用孔内成像技术清晰观察破碎带内部结构和充填物性质；通过声波测试获取破碎带岩体波速，评价岩体完整性。富水地质区域专项勘察重点进行水文地质勘察，采用分段压水试验测定不同深度岩体透水性，结合水位观测孔监测地下水动态变化，分析地下水补给、径流、排泄规律；钻进过程中采用防喷装置，防止孔内涌水引发安全事故。高地应力地质区域专项勘察通过钻孔应力解除法测试地应力大小和方向，结合声波测井和岩体变形测试，评价岩体在高地应力作用下的稳定性，为隧道岩爆防治和支护设计提供依据。

4 深孔勘察质量控制与地质风险评估体系

4.1 深孔勘察质量控制指标体系

深孔勘察质量控制指标体系围绕勘察数据准确性、钻孔质量、成果可靠性三大核心目标,构建多维度量化指标体系,涵盖钻进参数、岩芯质量、测试数据、成果报告四大类指标。钻进参数指标明确钻压、转速、钻进速度的合理范围,如坚硬岩体钻压控制在15-30kN、转速300-600r/min,保障钻进平稳;钻孔质量指标严格限定孔位偏差($\leq \pm 5\text{cm}$)、孔斜度(每100m $\leq 1^\circ$)、孔深误差($\leq \pm 0.5\%$)及孔壁垂直度,通过实时监测与定期校验把控质量;岩芯质量指标规定完整岩体岩芯采取率 $\geq 90\%$ 、破碎带 $\geq 60\%$,同时明确岩芯连续性、摆放规整度及编录保存要求;测试数据指标要求参数合格率 $\geq 95\%$ 、数据重复性偏差 $\leq 5\%$,规范操作与审核流程;成果报告指标强调地质解释准确性、数据图表完整性和结论科学性。各指标均配套验收标准与检测方法,实现质量控制可量化、可追溯。

4.2 全流程质量控制措施

深孔勘察全流程质量控制贯穿勘察准备、钻进施工、数据采集、成果整理四大阶段,形成闭环管控机制。准备阶段,技术人员收集地质资料并现场踏勘,编制勘察方案与质量计划,校验调试勘察设备,同时对施工人员开展技术培训和质量安全交底,明确控制要点与操作规范。钻进施工阶段,建立钻进参数实时监测系统,专人记录钻压、转速、泥浆性能等数据,及时处理异常;采用跟管钻进、泥浆护壁等技术稳定孔壁,定期测量校正孔斜,确保钻孔轨迹符合设计;严格执行岩芯采取、编录、保存流程,保障岩芯信息真实完整。数据采集阶段,规范测试操作,使用校验合格仪器,对数据多次测量验证,建立专人复核制度,避免数据失真。成果整理阶段,系统分析处理勘察数据并进行合理地质解释,组织专家评审成果并整改问题,编制包含原始数据、图表及分析说明的完整报告,确保满足工程设计施工需求。

4.3 基于深孔勘察的地质风险评估方法

基于深孔勘察的地质风险评估遵循“风险识别-风险分析-风险评价-风险防控”逻辑流程,实现隧道工程地质风险精准评估。风险识别阶段,结合深孔勘察成果、地质理论与工程经验,识别塌方、突水突泥、岩爆、大变形等潜在风险类型,明确破碎带、岩溶、富水、高地应力等地质诱因^[4]。风险分析阶段,建立以岩体完整性系数、透水性、地应力、地下水水压等为核心的评价指标体系,采用层次分析法、模糊综合评价法分析风险因素影响程度与权重,明确风险发生可能性及影响范围。风险评价阶段,按“一般、较大、重大、特大”四级标准划分风险等级,对各类风险评定等级,锁定高等级防控重点。风险防控阶段,针对不同等级风险制定专项措施;建立动态监测机制,施工中持续跟踪风险变化,及时调整防控措施,保障施工安全。

结束语

复杂地质条件下引水隧道深孔勘察技术的研究意义重大。通过构建核心技术体系、优化勘察工艺、建立质量控制与风险评估体系,能有效提升勘察的精准性与可靠性。这不仅有助于保障引水隧道施工安全与工程质量,还能为类似工程提供宝贵经验。未来,随着技术发展,深孔勘察技术将不断完善,为水利工程建设发挥更大作用。

参考文献

- [1]蔡涛.复杂地质条件下隧道仰拱开裂病害分析与治理研究[J].铁道建筑技术,2020(12):141-145.
- [2]马留闯.基于复杂地质条件下铁路隧道施工技术研究[J].大众标准化,2022(20):166-168.
- [3]罗鹏.复杂地质条件下铁路隧道施工技术研究[J].大众标准化,2021(19):51-53.
- [4]沙英超.复杂地质条件下公路隧道施工技术应用分析[J].建筑技术开发,2021,48(07):101-102.