

复杂地质条件下水利隧洞施工关键技术与应用

尹一龙

吉林省水利水电勘测设计研究院

DOI:10.12238/hwr.v9i7.6477

[摘要] 水利隧洞施工面临复杂多变地质条件,存在工程风险高、技术要求严等特点。针对复杂地质构造、施工风险多样性、技术要求综合性等挑战,本文构建了涵盖超前地质预报与探测、围岩支护与加固、涌水突泥防治等关键技术在内的施工技术体系。同时,创新应用信息化施工管理系统、新型材料与装备等手段,以提升复杂地质条件下的水利隧洞施工效率与质量控制水平。通过典型工程案例分析,总结复杂地质条件下水利隧洞施工实践经验,为同类工程提供借鉴参考。本文研究成果对指导复杂地质条件下水利隧洞工程建设、保障工程安全和促进水利事业发展具有重要意义。

[关键词] 水利隧洞; 复杂地质; 施工技术信息化管理; 工程应用

中图分类号: TV52 文献标识码: A

Key technology and application of water conservancy tunnel construction under complex geological conditions

Yilong Yin

Jilin Province Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute

[Abstract] The construction of water conservancy tunnel is faced with complex and changeable geological conditions, which has the characteristics of high engineering risk and strict technical requirements. In view of the challenges of complex geological structure, diversified construction risks and comprehensive technical requirements, this paper constructs a construction technology system covering key technologies such as advanced geological prediction and detection, surrounding rock support and reinforcement, and prevention and control of water inrush and mud outburst. At the same time, innovative application of information construction management system, new materials and equipment and other means to improve the construction efficiency and quality control level under complex conditions. Through the analysis of typical engineering cases, the practical experience of water conservancy tunnel construction under complex geological conditions is summarized to provide reference for similar projects. The research results of this paper are of great significance to guide the construction of water conservancy tunnel under complex geological conditions, ensure the safety of the project and promote the development of water conservancy.

[Key words] water conservancy tunnel; Complex geology; Information management of construction technology; engineering application

引言

隧洞作为水利工程建设的关键构成,在防洪排涝、水资源高效配置等领域发挥着核心效用。随着水利工程建设规模不断扩大、复杂程度逐步升高,水利隧洞所处的地质情形日益复杂,好比高地应力的状况、高水压的情形、破碎围岩现象、岩溶发育现象等,对隧洞施工构成重大考验。本文基于对复杂地质条件下水利隧洞施工特性与难题的剖析,合理搭建施工关键技术组合,进而探索技术创新应用的路径,试图为复杂地质条件下水利隧洞工程实践给予有益借鉴,推动水利隧洞建设工艺升级。

1 复杂地质条件下水利隧洞施工特点与挑战

1.1 地质构造复杂性分析

水利隧洞工程一般会穿越多样地质构造,受区域地质构造运动波及,岩层产状的变化极为繁杂,地质情形千变万化,各层岩性差别明显,岩石强度、完整性这类力学性质变化极为显著。软硬岩彼此层状交替现象普遍发生,致使隧洞施工稳定性控制不易;因地质构造运动,岩体发生破碎现象,节理裂隙、断层破碎带出现大量发育现象,围岩架构错综,对隧洞围岩稳定性和施工安全构成重大威胁;岩溶地区或许可发育溶洞、暗河等不良

地质现象,很容易引发涌水、突泥、坍塌之类灾害,复杂地质构造条件让水利隧洞施工设计与现场操作面临极大的不确定局面,需结合实际情形采用针对性的施工技术办法^[1]。

1.2 施工风险多样性特征

基于地质构造展现出复杂情形,水利隧洞施工面对风险因素错综复杂、变化多端,展现出多元特性,高地应力状况下围岩应力集中化,极容易引发岩爆这种灾害,对施工人员生命及设备财产构成威胁;突发泥涌水相关风险,在隧洞穿越富水断层、进入岩溶发育区域之际,极易出现突泥涌水状况,引起工程进度滞后、施工成本增高;软弱又破碎的围岩稳定性能差,施工扰动时易出现坍塌现象,阻碍施工。四方面体现为环境风险,施工若行为不当,极可能诱发地表沉降、含水层被破坏等次生灾患,破坏生态格局,由此可判断水利隧洞施工风险存在突发性明显、破坏力超大、种类多样繁杂等特征,一定要高度聚焦风险识别与防控环节,最大程度排除各类风险因子。

1.3 技术要求综合性挑战

复杂地质条件下水利隧洞工程对施工技术提出了较高综合性要求:勘察设计阶段,需准确查明工程地质条件,合理预测不良地质发育情况,优化隧洞线位、埋深、断面等参数,为施工提供可靠依据;施工准备阶段,要做好施工组织设计,科学选择施工工艺,配备与地质条件相适应机具设备,提前做好风险防控预案;施工实施阶段,需全面掌握地质信息,动态调整支护参数,及时处置突发地质灾害,确保施工安全高效;运营维护阶段,还需加强隧洞安全监测,及时发现病害隐患,采取有效处治措施,保障隧洞运行安全。所以水利隧洞工程全寿命周期对技术综合性要求很高,只有各阶段深度融合、协同配合,才能确保复杂地质条件下隧洞建设安全、运行安全^[2]。

2 复杂地质条件下水利隧洞施工关键技术体系

2.1 超前地质预报与探测技术

针对复杂地质条件不确定性,应用物探方法对隧洞掌子面前方地质情况进行超前预报,是准确揭示地质条件、指导施工关键。常用超前地质预报方法包括TSP(隧道地震预报)、TRT(隧道反射面透视)、GPR(地质雷达)等。TSP利用地震波在不同岩性介质中传播速度差异,反演地质结构;TRT通过接收掌子面前方反射信号,判识地质界面形态;GPR则发射高频电磁脉冲,分析介质电性差异,探测地下物性分布。合理选用预报方法,可有效识别岩层性质、节理裂隙发育程度、地下水富集情况等,为优化施工参数、制定安全措施提供依据;还应开展必要超前钻探,获取岩芯直观地质信息,并进行必要室内试验,查明岩体物理力学性质,校核物探成果,从而对前方地质做出准确判断,指导现场施工决策。

2.2 围岩支护与加固技术

根据围岩地质条件,合理设计支护结构类型及参数,是确保隧洞围岩稳定和施工安全的重要保证。对于完整围岩,以锚喷支护为主,通过锚杆加固围岩,喷射混凝土封闭岩面,形成围岩-锚杆-喷射混凝土共同受力体系。对于破碎围岩,应加强初期支护,

采用管棚、大管棚等超前支护,并及时进行系统锚喷,以增强支护结构整体性。对于特别不良地段,还需设置钢架等专项支护,如格栅钢架、型钢钢架等,以承担围岩变形压力,防止坍塌;针对围岩特殊性质,采取相应加固措施。如对于岩溶发育地段,可采用帷幕注浆封堵溶洞,填充砂石料换填溶蚀空洞,提高围岩整体性;对于软弱夹层发育地段,可采用锚杆植筋、树脂锚固等方式,提高锚杆受力能力;对于高地应力岩爆地段,可采用减压爆破卸荷、锚杆应力监测等手段,降低岩爆风险。要因因地制宜确定支护加固方案,做到“以塑代刚”和“以刚控塑”并重,确保围岩受力均衡^[3]。

2.3 涌水突泥防治技术

隧洞贯穿富水层与岩溶发育地带,一般会伴生大量涌水、突泥方面灾害,极大地阻碍隧洞施工的推进,针对各类涌水突泥情形,要采用合适防治技术途径:涌水问题由强透水地层引起,主要借助深孔降水、管棚注浆等途径,截断含水层补给,减弱含水层给水力度;因岩溶水而诱发涌水现象,采用帷幕注浆对溶洞实施封堵、用回填砂石料置换溶蚀空洞等办法,阻隔岩溶水补给渠道,阻止大量突涌情况进一步恶化;突泥因泥水混合物质而起,可采用旋喷桩、高压旋喷注浆等方式强化地层结构,提高土体紧实度,与此同时铺设防水板,杜绝泥水形成混合;要迅速实施钢支撑搭建,封堵涌水突泥的通路,杜绝现象进一步延展扩大,迅速组织开挖清理行动,实现施工条件复原,针对易发生涌水、突泥现象的不良地质地带,应事先拟定针对灾害预案,筹备必要应急物资跟设备,保障在灾害出现时能及时响应、有序应对,最大程度减弱灾害的影响力。

3 复杂地质条件下水利隧洞施工技术创新应用

3.1 信息化施工管理系统应用

面对水利隧洞建设规模浩大、地质状况复杂、施工风险高等特质,采用信息化施工管理体系,能实现对隧洞施工操作过程动态管控和决策合理优化:数据采集并甄别,在工程现场安装监测器件,实时抓取围岩应力应变、支护结构受力所产生的变形、地下水压力等状态参数;以无线传输途径达成,将所采集的监测数据上传到管理系统平台。管理人员可即时调取分析数据资料,把握隧洞施工实时动态;针对施工过程模拟后优化,依照所采集现场监测数据,采用如有限元分析之类数值模拟技术,探究隧洞开挖扰动时围岩应力应变的演化规律,推测开挖面稳定情形,凭借反复模拟达成优化,可合理抉择开挖进尺、支护参数、加固措施等选项,推动现场施工实施,安全预警结合风险管控。为有效把控施工风险,项目部引入一套信息化施工管理系统,在隧道内部布置位移计、应力计这类监测器具,实时监控围岩的变形以及支护结构的受力,当监测数据显露出异常起伏波动,系统迅速给出自动预警,现场技术人员依照预警调整优化施工方案。^[4]当监测显示某处围岩位移速率出现急剧增长态势,快速采取超前小导管注浆稳固手段,阻止潜在塌方风险的出现;采用三维数字化设计系统,针对隧洞穿越不同地层的受力变形特性实施模拟分析,优化开挖以及支护方面的施工工艺,精准把控开挖进尺量,

快速推进初期支护实施,维持开挖面稳定状态;面对围岩情况较差地段,通过数据采集研判、过程模拟调校、风险预警化解等信息化途径,隧洞成功穿过多样不良地质区段,维护工程安全同时推进施工进度。

3.2 新型材料与装备推广

为提升复杂地质条件下水利隧洞施工效率与质量,积极推广应用新型材料与装备技术至关重要。在支护材料方面,高强高性能混凝土因具有早强、高强度、高韧性等特点,在隧洞衬砌、永久支护中得到广泛应用。采用掺加硅灰、粉煤灰等矿物掺合料和聚丙烯纤维混凝土材料,不仅强度高,而且具有良好的抗裂性和耐久性,可显著提升衬砌结构使用寿命。在防水材料方面,喷涂速凝防水剂可在涌水地段快速喷涂成膜,阻止水流,为后续堵漏封水创造条件。在施工装备方面,采用掘进机、运渣车等大型化、专业化设备,可提高开挖效率,减少人力投入。应用湿喷机械手、液压锚杆钻机自动化设备,不仅可提高施工质量,也能改善作业环境。某深埋长隧洞施工中,为提高工程质量,项目部采用新拌高性能混凝土喷射初期支护。该混凝土掺加硅灰,并经专业配比设计,具有和易性好、强度高、耐久性强等特点。采用湿喷工艺,通过机械手将混凝土喷射到拱墙面,初凝30分钟即可达到5MPa强度,可有效封闭围岩,控制变形。喷射拱墙平整度好,施工效率是人工3倍以上。在隧洞穿越富水地层时,项目部创新采用管棚超前预注浆新工艺,有效截断地下水,降低突水风险。在隧洞衬砌施工中,项目部应用小断面连续浇筑施工工艺,利用组合钢模台车,实现衬砌混凝土连续浇筑作业,一次成型。所采用高性能纤维混凝土,具有高强度、高抗渗性能,且收缩性小,有利于控制温度裂缝。通过采用新型材料与装备,隧洞工程质量和施工效率得到大幅提升,为同类工程提供了很好经验借鉴。

3.3 典型工程案例分析与经验总结

某条引水隧洞全长为8.5km,达到最大埋深为630m,沿途地质条件错综复杂,涉过松散黄土层、全风化砂岩、煤系地层、岩溶发育程度较高石灰岩等不良地质地带。开展隧洞施工采用台阶形式开挖,对于III级以上的围岩,采取锚喷支护手段,针对IV、V级围岩,采取系统锚喷结合钢架支护方式。施工过程中碰到多处涌水突泥以及岩溶塌方等地质灾害现象,借助超前地质预报实施,精准掌握前方岩体情形,实时优化支护参量,增加管棚注浆覆盖范围、调整开挖进尺数值等,显著降低岩溶塌方几率,若碰到突泥涌水情况,采取注浆封堵、铺设防水板等办法以截断泥水通路,实现施工面再度可用,依靠合理施工组织及应对灾害得力办法,隧洞工程最终实现顺利贯通。该工程针对复杂地质条件下的水利隧洞施工积累诸多经验,超前地质预报对施工指导起

到关键引领作用,及时把控地质详情,作为优化施工方案的基本前提;支护结构得让其与围岩性质相契合,依照岩体完整性、稳定性显现出差异状况,正确抉择支护类型及其参数。涌水突泥防治需依照具体情形去落实,水文地质情形复杂又多变,需按照各异的突水突泥原理,采取深孔降水疏流、帷幕注浆堵闭、旋喷桩固土等做法。信息化管理与智能化施工需齐头并进,采用数字化管控体系,增强施工环节动态监测及模拟解析,增强施工质量及工作效率;应积极引入革新的工艺、材料及装备,向着智能自动化方向前行,复杂地质条件里施工风险十分突出,务必坚守“安全至上、预防为要”方针,切实依照安全生产规章行事,加强对风险分级管控以及隐患排查治理实施,只有持续归纳经验,才会高效且优质地完成复杂地质背景下水利隧洞建设使命^[5]。

4 结语

水利隧洞建设作为复杂系统项目,遭逢不少技术难题,尤其是在复杂地质情形下施工,风险的突出性进一步增强。本文对复杂地质情形中水利隧洞施工特点及挑战加以分析,建成囊括超前地质详查、围岩支撑加固、涌水突泥遏制等重要技术的施工技术体系。表明要积极借助信息化施工管理系统、新型材料与装备等创新技术手段来达成目标,增进隧洞工程建设效率及质量。依据典型工程案例分析得出,只有进一步落实地质超前预报要求,结合当地情形采取支护加固办法,统筹实施各项防治手段,才得以保证隧洞施工安全高效开展。本文所提出的技术体系、应用策略,对复杂地质条件水利隧洞工程实践的指导有显著参考价值。未来,水利隧洞建设仍需进一步加强科技创新探索,全力推动施工实现智能化,逐步提升施工工艺水平,以保障安全为前提条件,逐步增进工程质量,助力水利建设事业健康稳定前行。

[参考文献]

- [1]张红星.水利工程施工中引水隧洞施工技术研究[J].科技与创新,2025,(13):208-211.
- [2]胡有军.复杂地质条件下水利隧洞施工技术研究[J].建筑机械,2025,(06):76-79.
- [3]吴涛.水利水电工程隧洞开挖与支护施工技术创新[J].全面腐蚀控制,2025,39(05):99-101.
- [4]欧阳升都.引水工程输水隧洞中应用的常见技术和创新技术研究[J].水上安全,2024,(22):169-171.
- [5]张永昌,刘丰泽,艾大伟.水利工程中引水隧洞施工关键技术分析[J].现代工程科技,2024,3(20):13-16.

作者简介:

尹一龙(1989--),男,汉族,吉林省吉林市人,硕士,高级工程师,水利工程施工。