

复杂地质条件下水利水电隧洞施工技术研究

于庆时 段永茂

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450000

【摘要】：复杂地质环境中，水利水电隧洞施工面临围岩稳定性不足、渗水量偏大、地质灾害多发等突出困境，这些问题直接关联施工安全、推进进度及工程品质。本文以破解复杂地质工况下隧洞施工的核心难点为导向，聚焦软弱围岩、岩溶、断层破碎带等各类复杂地质的工程属性，改进施工工艺与技术方案，结合现场施工实践，提出适配性突出的隧洞开挖、支护、防渗及涌水处置方案，明确各技术的应用要点与控制规范，有效规避各类地质风险，保障隧洞施工的连续性与安全性，为同类复杂地质条件下水利水电隧洞施工提供技术借鉴与实践支撑，助力水利水电隧洞施工技术在复杂地质场景中的完善与发展。

【关键词】：水利水电隧洞；复杂地质；施工技术；围岩支护；防渗处置

DOI:10.12417/2811-0536.26.08.079

引言

水利水电隧洞是水利工程中承担输水、发电、泄洪功能的关键构筑物，其施工质量直接关系到整体工程的运行效能与长期安全稳定。当前我国水利水电工程建设不断向山区及深部地层拓展，隧洞施工时常面临软弱围岩、岩溶发育、断层破碎带、高水压涌水等复杂地质条件，此类地质环境极易引发围岩坍塌、突水突泥等安全事故，不仅制约施工进度，还会抬高工程建设成本，成为制约隧洞施工的重要瓶颈。立足这一工程实际，深入研究复杂地质条件下水利水电隧洞施工技术，优化施工方案、解决关键技术难题，既是保障工程安全高效实施的现实需要，也是推动水利水电工程施工技术迭代升级的重要方向，同时也为后文相关技术的详细论述做好铺垫。

1 复杂地质条件下水利水电隧洞施工的工程背景与地质特征

我国水利水电工程建设逐步向偏远山区及深部地层推进，隧洞工程建设规模持续拓展，施工环境亦随之愈发复杂，复杂地质场景已成为隧洞施工中必须直面的核心问题。水利水电隧洞承载着输水、发电、泄洪等关键职能，建设质量直接关联整个水利水电工程的长期平稳运转，地质条件的复杂程度则直接左右施工难度、技术选用及安全管控的核心方向。复杂地质形态呈现多元分化态势，主要涵盖软弱围岩地质、岩溶发育地质、断层破碎带地质及高水压涌水地质等类别，各类地质均具备鲜明独特的自身属性：软弱围岩岩体强度偏弱、整体性欠佳，易出现变形坍塌现象；岩溶地质常分布有溶洞、溶蚀裂隙，易诱发突水突泥风险；断层破碎带岩体松散、胶结能力不足，透水性较强；高水压涌水地质则需应对地下水压力偏高、渗水量波动不定等难题，这些复杂地质属性相互交织叠

加，给水利水电隧洞施工造成诸多阻碍，也对施工技术的适配能力提出更为严苛的标准。

2 复杂地质条件下水利水电隧洞施工存在的核心问题及成因分析

复杂地质条件下，水利水电隧洞施工面临的突出问题集中体现在施工安全、工程质量与施工效率三个方面，各类问题相互交织、彼此影响，其产生既与特殊地质条件密切相关，也同技术适配性、现场管控水平直接关联。在施工安全上，围岩坍塌、突水突泥等风险居高不下，主要是由于软弱围岩自身强度低、自稳能力差，断层破碎带岩体结构松散，而岩溶、高水压涌水等地质条件又具有较强隐蔽性，导致围岩变形难以提前预判和有效控制，地下水在开挖扰动下极易突然涌出，形成重大安全隐患^[1]。在施工质量上，常出现隧洞轮廓成型差、超挖欠挖较为明显、支护整体性不足、结构防渗效果不理想等问题。究其原因，主要是施工技术方案与复杂地质工况匹配度不高，开挖工艺未能根据围岩变化动态调整，支护与防渗措施针对性不强，材料性能与施工工序难以应对围岩变形、地下水侵蚀等不利影响，导致结构受力不均、防渗薄弱部位易出现渗漏，影响整体工程质量。在施工效率上，受地质不确定性影响，隐患处置频繁、工序多次调整、现场管控压力增大，极易造成工期延误、成本增加。究其根源，在于前期对地质条件预判不够全面，超前地质预报应用不足，缺乏完善的针对性施工预案，施工组织与工序衔接不够紧凑，一旦遇到不良地质便容易出现停工整改、返工处理等情况，严重破坏施工连续性，降低整体施工效率。

3 复杂地质条件下水利水电隧洞施工的针对性技术解决方案

3.1 复杂地质隧洞开挖技术优化

(1) 软弱围岩与断层破碎带开挖技术: 针对软弱围岩与断层破碎带岩体结构松散、自身承载能力偏低、整体稳定性较差的特点, 施工中选用台阶分部开挖工艺, 严格遵循短进尺、弱爆破的施工原则, 合理控制单次开挖进尺长度, 最大限度降低爆破震动对周边岩体的扰动影响, 避免围岩因外力干扰出现失稳变形乃至坍塌险情。在开挖推进过程中同步实施超前地质预报, 实时掌握掌子面前方岩体完整程度与结构面分布情况, 据此动态调整开挖参数与作业节奏。开挖成型后立即开展初喷混凝土支护, 快速封闭裸露围岩, 阻止岩体风化剥落, 提升围岩整体承载能力, 以此构建稳定的作业环境, 为后续支护与衬砌工序筑牢安全施工基础。(2) 岩溶与高水压涌水地质开挖技术: 在溶洞与溶蚀裂隙发育、地下水压力大且涌水风险极高的复杂地质段, 开挖施工需兼顾岩体稳定与治水安全。施工前采用超前注浆堵水技术, 通过超前钻孔向围岩裂隙与地下水通道注入注浆材料, 使其胶结形成完整隔水帷幕, 从源头封堵高压地下水, 降低开挖期间突发涌水概率。开挖环节采用光面爆破, 严格控制爆破参数, 减小对溶洞及裂隙岩体的扰动, 防止因震动造成溶洞坍塌、掉块等险情^[2]。施工过程中同步设置完善的临时排水系统, 及时疏导掌子面与围岩渗出的地下水, 保持作业面干燥整洁。超前治水、精细开挖与动态排水相结合, 可有效化解岩溶及高水压地质带来的多重安全风险, 保证隧洞开挖连续、安全、有序推进。

3.2 复杂地质隧洞支护技术完善

(1) 主动支护技术应用: 结合复杂地质条件下围岩受力复杂、变形随机性强、易出现松动脱落的工程特点, 采用锚杆、锚索与喷射混凝土相结合的联合主动支护体系, 实现对围岩的全方位、深层次加固。锚杆植入浅层围岩内部, 与岩体紧密结合形成整体受力结构, 有效提升围岩自身刚度与承载能力, 控制表层岩体变形。锚索延伸至深部稳定岩层并施加预应力, 对破碎、松散岩体进行主动拉紧锚固, 限制围岩位移发展, 大幅增强支护体系的整体稳定性。喷射混凝土能够快速封闭围岩裸露面, 防止岩体风化剥落, 同时填充裂隙、胶结碎裂岩体, 优化围岩应力状态。三者协同作用, 使支护结构与围岩共同变形、协同受力, 可良好适应软弱围岩、断层破碎带等复杂地质的变形规律, 显著提升隧洞整体稳定性, 为后续开挖与衬砌施工创造安全可靠的作业条件。(2) 被动支护技术补

充: 针对地质条件复杂、围岩自稳能力弱、变形速度快且变形量偏大的隧洞区段, 在锚杆、锚索及喷混凝土等主动支护基础上, 增设钢支撑进行被动加固, 形成内外结合的完整支护体系。施工选用高强度型钢制作钢支撑, 按照设计间距精准安装, 保证支撑垂直度与整体性, 使其与围岩紧密贴合。钢支撑能够直接承担围岩松弛产生的荷载, 有效限制围岩变形发展, 抵御断层破碎带等不良地质带来的侧向挤压, 避免因变形超限导致支护开裂甚至失稳。钢支撑与主动支护协同受力, 大幅提升结构整体刚度与安全储备, 为复杂地质段开挖、衬砌等后续工序创造稳定条件, 进一步筑牢施工安全防线。

3.3 复杂地质隧洞防渗与涌水处置技术

(1) 隧洞防渗技术优化: 针对复杂地质中地下水分布不均、围岩裂隙发育、渗漏路径隐蔽性强等问题, 对隧洞防渗施工技术进行整体优化, 构建多层级、协同式的综合防渗体系, 从源头提升结构防渗性能。在衬砌施工阶段, 选用高抗渗、高韧性的专用防水板进行全断面铺设, 严格控制铺设平整度与搭接尺寸, 对接缝部位进行专业化焊接与密封处理, 确保无空隙、无破损, 阻断外部地下水渗入通道。同时在衬砌混凝土中掺入高效抗渗剂, 科学优化配合比, 提高混凝土密实度与抗裂性能, 增强结构自身防水能力^[3]。通过外部防水板隔离与内部混凝土自防水相结合, 形成双重防渗保障, 有效封堵地下水沿围岩裂隙、施工缝及结构薄弱带的渗流路径, 大幅提升隧洞整体防渗效果, 保证衬砌结构质量可靠, 为工程长期稳定运行提供坚实支撑。(2) 涌水应急处置技术: 针对复杂地质隧洞施工中易突发的集中涌水、高压涌水等险情, 建立“预防-响应-处置-巩固”的全流程应急处置技术体系, 确保险情发生时能够快速响应、科学处置、有效管控。施工现场提前配备大流量排水泵、应急管路等设备, 明确应急处置流程与人员职责, 做到防患于未然。一旦发生突发涌水, 立即启动应急预案, 迅速投入排水设备对掌子面及隧洞内部积水进行高强度抽排, 快速控制洞内水位攀升, 防止积水淹没作业区域、损坏施工设备, 保障作业人员安全。同时, 采用速凝型注浆材料对涌水通道进行精准封堵, 快速形成临时隔水屏障, 有效遏制涌水流量与水压, 稳定现场施工态势。待涌水险情得到全面控制、作业环境恢复稳定后, 结合永久防渗技术与注浆加固工艺, 对涌水部位及周边岩体进行系统性治理, 彻底封堵渗漏通道、消除安全隐患, 全方位保障复杂地质条件下隧洞施工安全有序、连续推进。见图1所示:



图1 涌水应急处置技术流程图

4 复杂地质条件下水利水电隧洞施工技术的应用成效分析

(1) 施工安全风险得到有效管控: 各类针对性施工技术在复杂地质隧洞施工中的综合应用, 从源头改善了以往安全隐患频发、管控难度偏高的状况, 实现施工安全全过程、全方位的有效管控。超前地质预报与超前注浆堵水技术相互配合, 能够提前探明掌子面前方岩溶分布、断层破碎带位置及高水压涌水区域, 准确识别潜在风险并提前落实防控措施, 极大降低突水突泥、围岩坍塌等恶性事故的发生概率, 保证施工连续稳定推进^[4]。联合支护体系的实施, 进一步提升围岩整体稳定性, 有效控制围岩变形幅度, 避免支护结构失稳破坏, 减少施工过程中的不确定风险。通过技术与管控的协同发力, 复杂地质带来的安全难题得到系统性解决, 作业环境更为安全可靠, 为工程顺利实施提供坚实保障。(2) 施工质量与工程可靠性显著提升: 依托适配复杂地质的开挖、支护、防渗一体化施工技术体系, 隧洞整体施工质量得到有效保障, 工程结构长期运行的稳定性与可靠性显著增强。优化后的开挖工艺可精准控制隧洞成型质量, 有效控制超挖与欠挖问题, 使隧洞断面规整平顺、尺寸精度更高, 为后续支护、衬砌施工奠定良好基础。联合支护技术针对性提升围岩整体承载能力, 有效抑制围岩变形,

参考文献:

- [1] 林明标.水利工程隧洞初期支护施工技术[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(23):154-156.
- [2] 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.
- [3] 线仲辉.浅析水利工程中隧洞施工技术的应用要点[J].全面腐蚀控制,2025,39(02):156-159.
- [4] 蔺文峰.水利工程中引水隧洞施工技术分析[J].水上安全,2024,(16):178-180.
- [5] 李军怀.水利工程隧洞开挖施工技术与质量控制[J].建材发展导向,2022,20(20):124-126.

避免结构开裂、失稳等质量缺陷。复合防渗体系则从源头封堵地下水渗流通道, 显著改善结构防渗效果, 提升衬砌整体性与耐久性。各项技术协同发力, 实现施工全过程质量可控, 各项指标均满足设计要求, 确保隧洞长期稳定发挥输水、发电、泄洪等功能, 有效降低后期运维成本, 延长工程使用寿命, 提升水利水电工程整体运行效益。(3) 施工效率提升与工程成本合理控制: 适配复杂地质工况的针对性技术解决方案全面落地, 有效破解了以往施工进度滞后、成本管控困难的核心痛点, 实现了施工效率提升与工程成本合理控制的双向赋能。通过优化开挖工艺、应用超前地质预报及防控技术, 提前规避地质风险, 减少了因突发险情、质量问题导致的停工整改、返工返修, 大幅缩短施工周期, 确保隧洞施工按既定规划有序推进, 显著提升施工效率^[5]。同时, 技术方案与现场工况精准适配, 优化施工流程、减少工序冗余, 合理调配人力、设备、材料等资源, 降低不必要的损耗与浪费, 有效控制施工阶段的人力、物力投入成本。此外, 完善的支护与防渗技术减少了后期维修养护的频次和费用, 进一步管控工程全生命周期成本, 最终实现水利水电隧洞工程经济效益与社会效益的协同提升, 达成高效施工与成本可控的双重目标。

5 结语

本文围绕复杂地质条件下水利水电隧洞施工技术开展系统探究, 梳理其工程背景与地质属性, 剖析施工中安全、质量、效率等核心难题及成因, 针对性提出开挖、支护、防渗与涌水处置协同发力的技术解决方案, 并分析各项技术应用成效。研究表明, 适配复杂地质工况的针对性施工技术, 可有效管控安全风险, 显著提升工程施工品质与可靠性, 改善施工效率、合理管控成本, 切实破解复杂地质给隧洞施工带来的各类困境, 为同类工程提供坚实技术借鉴与实践支撑。依托本文研究成果, 可进一步深化不同复杂地质技术适配性探究, 细化应用参数、完善技术体系, 推动水利水电隧洞施工技术向更高效、更安全、更适配方向稳步推进。