

复杂地质下水利隧洞施工稳定性控制技术研究

陈立峰

新疆水发建设集团有限公司

DOI:10.32629/hwr.v10i4.6934

[摘要] 水利隧洞工程作为水资源调配、水力发电及防洪排涝等基础设施的核心组成部分,其建设质量直接关系到国家水安全与区域经济发展。随着浅埋覆盖层、高地应力、软岩大变形、富水断层破碎带等复杂地质条件的日益普遍,传统的水利隧洞施工理论与技术面临严峻挑战。在复杂地质环境下,围岩稳定性差、支护结构失效风险高、突水突泥灾害频发,极易引发坍塌、冒顶等恶性事故,严重威胁施工人员生命安全并造成巨大的经济损失。本文旨在系统综述复杂地质条件下水利隧洞施工稳定性控制技术的最新研究进展与应用实践。文章首先深入剖析了复杂地质环境对隧洞围岩稳定性的影响机理,重点探讨了高地应力、软弱围岩及富水地层中的应力重分布规律与破坏模式。

[关键词] 复杂地质; 水利隧洞; 施工稳定性; 围岩控制; 动态设计; 超前预报; 智能监测; 支护技术
中图分类号: TV 文献标识码: A

Research on Stability Control Technologies for Water Conservancy Tunnel Construction in Complex Geological Conditions

Lifeng Chen

Xinjiang Shuifa Construction Group Co., Ltd.

[Abstract] As a core component of infrastructure for water resource allocation, hydropower generation, and flood control/drainage systems, the construction quality of hydraulic tunnel projects directly impacts national water security and regional economic development. With the increasing prevalence of complex geological conditions—including shallow overburden layers, high geostress zones, significant soft rock deformation, and water-rich fault zones—the traditional construction theories and techniques for hydraulic tunnels face severe challenges. In such environments, poor surrounding rock stability, high risks of support failure, and frequent water or mud outbursts frequently trigger catastrophic accidents such as collapses and roof falls, posing serious threats to workers' safety and causing substantial economic losses. This paper provides a systematic review of recent research advancements and practical applications of stability control technologies for hydraulic tunnel construction under complex geological conditions. It begins by thoroughly analyzing the mechanisms by which complex geological environments affect tunnel surrounding rock stability, with particular focus on stress redistribution patterns and failure modes in high-geostress environments, weak surrounding rocks, and water-rich strata.

[Key words] Complex geology; Water conservancy tunnel; Construction stability; Rock mass control; Dynamic design; Advanced forecasting; Intelligent monitoring; Support technology

引言

水是生命之源,也是经济社会发展的命脉。近年来,随着国家水网建设的加速推进,一批大型引调水工程、抽水蓄能电站及水电站枢纽项目相继启动或建成。这些工程往往需要穿越崇山峻岭,开凿大量长距离、大断面的水利隧洞。然而,我国地形地貌复杂多样,地质构造活动频繁,许多拟建隧洞线路不可避免地要穿越高地应力区、深埋软岩段、富水断层破碎带及岩溶发育

区等极端复杂的地质环境。在这些特殊地质条件下,围岩自稳能力极差,开挖扰动后极易发生塑性流变、应力集中释放、地下水突涌等失稳现象,导致隧洞变形过大甚至坍塌。^[1]

长期以来,水利隧洞施工主要依赖经验法则和静态设计理论,难以适应现代复杂地质条件下的精细化施工需求。传统的“钻爆法”若控制不当,容易过度扰动围岩,破坏其原始平衡状态;而支护结构设计往往偏于保守或不足,无法有效应对不可预

见的地质突变。特别是在高地应力软岩地区,大变形问题已成为制约工程顺利推进的瓶颈,常规支护手段往往难以奏效。此外,突水突泥灾害频发,不仅造成工期延误,更可能引发群死群伤的重大安全事故。因此,深入研究复杂地质下水利隧洞施工稳定性控制机制,探索适应不同地质特征的新技术、新工艺、新材料,构建科学严密的安全管控体系,已成为当前水利水电工程领域亟待解决的重大课题。

1 复杂地质环境对水利隧洞围岩稳定性的影响机理

准确理解复杂地质环境对围岩稳定性的作用机制,是制定有效控制策略的基础。必须从地应力场、岩体结构、水文地质及时间效应四个维度进行深入剖析。

1.1 高地应力场的应力重分布与岩爆机理

在高埋深或构造应力强烈地区,地应力水平往往远超岩体强度。隧洞开挖后,原岩应力平衡被打破,应力重新分布并在洞周形成高应力集中区。当切向应力超过岩体强度极限时,易诱发岩爆(岩体突然弹射破裂),造成设备损毁和人员伤亡。高地应力还导致围岩产生显著的塑性区扩展,特别是在硬脆性岩石中,表现为片帮、掉块;而在软岩中,则表现为持续的蠕变变形。这种应力重分布过程具有强烈的非线性和各向异性特征,且受节理裂隙发育程度影响极大,使得预测和控制难度显著增加。^[2]

1.2 软弱围岩的流变特性与大变形破坏模式

软弱围岩(如泥岩、页岩、千枚岩、断层破碎带等)通常具有低强度、高孔隙率、强亲水性及显著的流变特性。在开挖卸荷后,这类围岩不仅弹性变形小,而且塑性变形大,且随时间推移持续发生蠕变。在大断面隧洞施工中,软弱围岩极易发生收敛变形,导致初期支护开裂、侵限甚至整体失稳。其破坏模式往往不是瞬间崩塌,而是渐进式的流变破坏,具有隐蔽性强、持续时间长的特点。此外,地下水浸泡会进一步软化岩体,降低其内摩擦角和粘聚力,加剧变形趋势,形成“水-岩耦合”效应下的恶性循环。

1.3 富水断层破碎带的突水突泥与塌方风险

断层破碎带往往是地下水的富集通道和运移走廊。在隧洞掘进过程中,一旦揭露富水断层,高压地下水可能携带泥沙、石块瞬间涌入洞内,形成突水突泥灾害。这种灾害具有突发性强、能量巨大、破坏力强的特点,极易淹没掌子面,掩埋设备和人员。同时,破碎带岩体结构松散,自稳能力极差,开挖后极易发生局部或整体塌方。地下水压力的存在还会削弱围岩的有效应力,降低支护结构的承载能力,使得传统的注浆堵水和锚喷支护难以达到预期效果。

1.4 地质构造与岩体结构的不确定性

复杂地质条件下,岩体结构面(节理、裂隙、层面)的产状、密度、连通性及充填物性质变化多端,导致岩体呈现出高度的非均质性和各向异性。这种不确定性使得围岩的力学参数难以准确获取,设计模型与实际工况偏差较大。例如,顺层边坡或斜交断层可能导致特定的滑坡破坏模式,而随机分布的节理网络则可能引发楔形体破坏。此外,地质勘察的局限性使得

部分隐伏地质构造难以完全探明,给施工过程中的动态调整带来了巨大挑战。

2 复杂地质下水利隧洞施工关键技术体系

针对上述复杂地质条件,必须构建一套集超前预报、精细开挖、动态支护及特殊处理于一体的综合技术体系。

2.1 高精度超前地质预报与风险识别技术

“先探后挖”是确保施工安全的铁律。应综合运用TSP(地震波反射法)、TRT(瞬变电磁法)、地质雷达、超前水平钻探及红外探水等多种手段,构建“天-空-地-钻”一体化的超前地质预报体系。利用TSP和TRT对掌子面前方数十米至数百米的地质异常体进行宏观扫描,识别断层、破碎带及富水区位置;利用地质雷达和红外探水对近距离(5-10米)的岩体结构和含水情况进行精细探测;利用超前水平钻探直接获取岩芯,验证前方地质情况并测定水压。通过多源数据融合与人工智能解译,提高预报精度,提前制定应对措施,实现风险的主动防控。^[3]

2.2 光面爆破与微震控制开挖技术

在复杂地质条件下,爆破震动是导致围岩松动圈扩大、诱发失稳的重要因素。必须严格控制爆破参数,推广使用光面爆破和预裂爆破技术。通过优化装药结构、采用毫秒延期起爆网络、控制单段最大药量等措施,最大限度减少对围岩的扰动。同时,引入微震监测系统,实时监测爆破引起的微震事件,分析能量释放规律,及时调整爆破方案。对于极不稳定地段,可考虑采用机械挖掘(如铣挖机)代替爆破,彻底消除震动影响,保护围岩原生结构。

2.3 动态设计与分级支护体系优化

摒弃“一刀切”的静态设计模式,全面推行基于信息反馈的动态设计方法。根据超前预报结果和现场监控量测数据,实时评估围岩稳定性,动态调整支护参数。对于坚硬完整岩体,可采用轻型支护;对于软弱破碎围岩,则需加强支护,采用“强支护、早封闭”原则。具体措施包括:加密系统锚杆长度与间距,增设钢拱架并加强连接刚度,喷射混凝土厚度与强度提升,以及设置仰拱封闭成环。特别对于大变形软岩,应采用让压支护技术,如使用可缩性U型钢拱架、双层喷射混凝土、预应力锚索等,允许围岩适度变形以释放能量,避免支护结构过早破坏。

2.4 特殊地段注浆加固与防排水一体化技术

针对富水断层和破碎带,必须实施严格的注浆加固与防排水措施。采用“分段注浆、由外向内、固结止水”的策略,利用水泥浆液、化学浆液或双液浆液填充裂隙,胶结破碎岩体,提高其整体强度和抗渗性能。在注浆过程中,严格控制注浆压力和流量,防止劈裂破坏围岩或造成浆液流失。同时,构建完善的防排水系统,坚持“防、排、截、堵相结合,因地制宜,综合治理”的原则。在隧道顶部和侧壁设置防水板,铺设盲沟收集地下水,并通过排水管引排至中心水沟,确保洞内干燥。对于高压涌水段,可采用帷幕注浆形成止水圈,配合管棚或小导管超前支护,形成“刚柔相济”的防护体系。^[4]

3 基于智能化的施工稳定性监测与预警系统

面对复杂地质的高风险性,建立实时、精准的智能化监测预警系统是保障施工安全的关键防线。

3.1 多维感知网络与深部位移监测

构建覆盖全隧洞的多维感知网络, 布设高精度传感器阵列。利用多点位移计、深孔测斜仪监测围岩深部位的位移变化, 掌握塑性区扩展范围; 利用收敛计、全站仪自动化测量系统监测拱顶下沉和周边收敛, 实时掌握断面变形速率; 利用应力计、压力盒监测支护结构与围岩接触压力及内部应力状态。通过无线传输技术, 将海量监测数据实时上传至云端数据中心, 实现对围岩稳定状态的全天候、全方位感知。^[5]

3.2 大数据分析 with 智能预警模型

依托大数据平台和人工智能算法, 对监测数据进行深度挖掘与分析。建立围岩稳定性评价模型, 设定多级报警阈值(如黄色预警、橙色预警、红色警报)。当监测数据出现异常波动或超过临界值时, 系统自动触发报警机制, 并向管理人员推送预警信息及处置建议。利用机器学习技术, 训练历史数据模型, 预测未来一段时间内的变形趋势, 实现从“事后补救”向“事前预防”的转变。同时, 结合BIM技术, 将监测数据可视化映射到三维模型中, 直观展示围岩变形云图和风险区域, 辅助决策者快速制定抢险方案。

3.3 应急联动与数字化指挥平台

建立集监测、预警、指挥、救援于一体的数字化应急管理平台。一旦发生重大险情, 系统立即启动应急预案, 自动调度救援资源, 生成疏散路线和避难场所信息。通过视频监控、无人机巡检等手段, 实时回传现场画面, 支持远程专家会诊。加强与气象、水文、地质等部门的联动, 共享地质灾害预警信息, 提高应对突发自然灾害的能力。通过数字化指挥平台, 实现信息共享、指令畅通、响应迅速, 最大程度减少灾害损失。

4 完善管理制度与构建长效安全防控机制

技术是手段, 管理是保障。必须建立健全的科学管理体系, 确保持续稳定的施工安全。

4.1 强化全过程风险管理与动态评估

建立贯穿勘察、设计、施工、运营全过程的风险管理机制。在勘察阶段, 加大投入, 查明地质隐患; 在设计阶段, 充分考虑地质风险, 预留足够的风险储备金和安全系数; 在施工阶段, 严格执行“风险评估-方案编制-审批-实施-反馈”的闭环流程。定期组织专家对施工安全风险进行评估, 根据地质变化动态调整风险等级和管控措施。推行风险分级管控和隐患排查治理双重预防机制, 将风险控制在隐患形成之前, 将隐患消灭在事故发生之前。

4.2 推进标准化作业与专业化队伍建设

制定复杂地质隧洞施工标准化作业指导书, 规范施工工艺、操作流程和质量标准。加强对施工人员的技术培训和安全教育, 提高其风险意识和应急处置能力。组建专业化的施工队伍, 特别是针对大变形、涌水等特殊地段, 配备经验丰富的技术人员和熟练的操作工人。鼓励开展技术创新和工法研发, 推广应用新技术、新工艺、新材料, 提升施工技术水平。建立严格的质量安全考核制度, 将责任落实到人, 实行“一票否决”制。

4.3 构建多方协同与绿色施工体系

加强建设单位、施工单位、监理单位、设计单位及科研机构之间的协同合作, 形成合力。建立信息共享平台, 及时沟通地质变化、施工进展和风险状况。倡导绿色施工理念, 减少对周围环境的破坏, 做好水土保持和生态修复工作。在复杂地质条件下, 注重环境保护与安全生产的协调统一, 实现工程效益、社会效益和生态效益的有机融合。

5 结语

复杂地质下水利隧洞施工稳定性控制技术是一项涉及地质学、岩土力学、土木工程、信息技术等多学科交叉的系统工程。面对高地应力、软弱围岩、富水断层等极端地质条件的挑战, 单纯依靠传统经验已难以满足现代工程建设的需求。本文系统梳理了复杂地质环境对围岩稳定性的影响机理, 深入探讨了超前地质预报、光面爆破、动态支护、注浆加固等关键技术的创新应用, 并详细分析了智能化监测预警体系的构建与实践。

[参考文献]

- [1]陈天楠, 刘立鹏, 汪小刚, 等. TBM刀盘卡机风险分级预测方法构建与验证[J]. 水利学报, 2026, 1-11 [2026-04-24].
- [2]侯晓斌, 孟健, 翁凯乐, 等. 某抽水蓄能电站调压井围岩与支护结构稳定性数值模拟[J]. 科技通报, 2026, 42(03): 98-106.
- [3]陈希卓. 渗流作用下基坑开挖稳定性分析[J]. 建筑技术开发, 2026, 53(02): 122-124.
- [4]周创兵, 姚池. 水工岩石力学研究进展和展望[J]. 人民长江, 2025, 56(11): 1-9.
- [5]李健辉, 沈军辉. 蚀变辉绿岩隧洞稳定影响因素及塌方风险评价研究[J]. 地下空间与工程学报, 2025, 21(S1): 487-501.

作者简介:

陈立峰(1988--), 男, 汉族, 江苏人, 大学本科, 职称: 水利工程师, 研究方向: 长期从事水利工程建设施工与技术管理相关工作, 主要研究方向为复杂地质条件下水利隧洞施工稳定性控制技术、供水管线穿越特殊地段施工技术优化与质量安全管控, 具备丰富的水利隧洞、供水管道工程现场施工管理及技术实践经验。