

长距离水工隧洞围岩稳定性分析与支护优化研究

谢伟 罗冉 龚兵文

中国水利水电第七工程局有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i12.19253

[摘要] 随着我国水利水电工程向西部高海拔、深埋、复杂地质区域不断延伸,长距离水工隧洞作为输水、引水及发电的关键通道,其建设面临着前所未有的挑战。围岩稳定性直接关系到隧洞施工安全、运行寿命及工程投资效益。本文系统梳理了长距离水工隧洞围岩稳定性的关键影响因素,深入探讨了数值模拟、现场监测与地质力学模型试验等综合分析方法,并结合典型工程案例,提出了基于动态设计与信息化施工理念的支护优化策略。研究表明,采用“地质先行、动态反馈、分级支护、智能监测”的技术路线,可显著提升围岩稳定性控制水平,降低工程风险,实现安全、经济、高效的建设目标。研究成果对类似复杂地质条件下长距离水工隧洞的设计与施工具有重要的理论参考价值和工程指导意义。

[关键词] 长距离水工隧洞; 围岩稳定性; 数值模拟; 现场监测; 支护优化; 动态设计

中图分类号: TV554 **文献标识码:** A

Stability Analysis and Support Optimization of Surrounding Rock for Long-Distance Hydraulic Tunnels

Wei Xie Ran Luo Bingwen Gong

Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd.

[Abstract] As China's water conservancy and hydropower projects continue to extend into high-altitude, deeply buried, and complex geological regions in the western area, long-distance hydraulic tunnels, as key passages for water conveyance, diversion, and power generation, are facing unprecedented construction challenges. The stability of surrounding rock directly affects tunnel construction safety, operational life, and project investment efficiency. This paper systematically reviews the key factors influencing the stability of surrounding rock in long-distance hydraulic tunnels, deeply explores comprehensive analysis methods including numerical simulation, field monitoring, and geomechanical model testing, and proposes support optimization strategies based on the concepts of dynamic design and information-based construction, combined with typical engineering case studies. Research shows that adopting the technical approach of "geology first, dynamic feedback, graded support, and intelligent monitoring" can significantly improve the control level of surrounding rock stability, reduce engineering risks, and achieve safe, economical, and efficient construction goals. The research results have important theoretical reference value and engineering guidance significance for the design and construction of long-distance hydraulic tunnels under similar complex geological conditions.

[Key words] long-distance hydraulic tunnel; surrounding rock stability; numerical simulation; field monitoring; support optimization; dynamic design

引言

在国家“双碳”战略和水资源优化配置的大背景下,大型跨流域调水工程、抽水蓄能电站及高坝大库容水电站建设如火如荼。长距离水工隧洞因其线路灵活、占地少、蒸发损失小等优势,已成为现代水利工程的核心构筑物。然而,此类隧洞往往穿越构造复杂、岩性多变、高地应力、高外水压力及活动断裂带等不良地质区域,围岩稳定性问题尤为突出。一旦发生塌方、涌

水、岩爆或大变形等地质灾害,不仅会严重延误工期、增加投资,更可能危及人员安全,甚至导致工程失败。因此,深入研究长距离水工隧洞围岩稳定性机理,发展精准的分析预测方法,并在此基础上进行科学合理的支护结构优化设计,是保障工程全生命周期安全、可靠、经济运行的关键所在。这不仅是岩土工程领域的前沿课题,更是国家重大基础设施建设的迫切需求。

1 长距离水工隧洞围岩稳定性影响因素分析

长距离水工隧洞围岩稳定性受多重因素交织影响,可归纳为以下几类:

1.1 地质条件

地质条件是决定围岩稳定性的根本内因。岩体结构特征,包括岩性、节理裂隙的发育程度、产状、连通性以及结构面强度,直接决定了岩体的整体性和承载能力。块状坚硬岩体通常表现出良好的自稳能力,而层状、碎裂乃至散体结构的岩体则极易在开挖扰动下发生失稳。地应力场的状态同样至关重要,尤其是在深埋隧洞中,高地应力不仅会导致围岩产生显著的塑性区,还可能诱发岩爆或挤压性大变形等地质灾害。最大主应力方向与洞轴线之间的夹角,会显著影响围岩的破坏模式。地下水的的作用亦不可忽视,高外水压力不仅直接作用于衬砌结构,还会通过软化结构面、降低岩体有效应力和强度参数,加剧围岩劣化,甚至引发灾难性的突涌水事件。此外,水化学侵蚀作用也可能在长期运营中导致围岩性能退化。特殊地质现象,如断层破碎带、蚀变岩带、高地温乃至瓦斯赋存等,均构成重大的工程风险源,需要在设计和施工阶段予以特别关注和针对性处理。

1.2 工程特性

工程本身的特性对围岩稳定性有着直接且显著的影响。隧洞的几何尺寸,尤其是断面大小,决定了开挖扰动的范围和应力重分布的复杂程度,大断面隧洞的稳定性控制难度远高于小断面隧洞。埋深是另一个关键参数,随着埋深的增加,初始地应力和地下水头压力均呈非线性增长,使得围岩所处的力学环境愈发恶劣^[1]。隧洞的线路走向决定了其穿越地质单元的复杂性,一条长距离隧洞往往需要横跨多个不同的岩组和构造带,围岩条件变化剧烈,这对支护设计的适应性和灵活性提出了极高要求。

1.3 施工与运营因素

施工与运营阶段的人为活动同样是影响围岩稳定的重要变量。不同的开挖方法对围岩的扰动程度差异巨大,钻爆法产生的振动和损伤区通常大于TBM掘进,但后者在遭遇不良地质时的适应性又相对较弱。支护的时机与参数选择直接关系到能否有效控制围岩变形。过晚或过弱的支护无法形成有效的承载环,而过度刚性的支护则可能因无法适应围岩变形而导致自身破坏。在运营阶段,隧洞内水位的频繁变动会产生交变的水压力,这种循环荷载作用可能对衬砌结构产生累积损伤和疲劳效应,进而影响其长期服役性能。

2 围岩稳定性综合分析方法

面对复杂的工程问题,单一方法难以胜任,必须采用多种手段相结合的综合分析体系。

2.1 数值模拟分析

数值模拟是进行围岩稳定性定量评价的核心工具。其首要任务是基于详尽的地质勘察资料,构建能够真实反映工程地质条件的三维地质模型。在本构模型的选择上,弹塑性模型(如Mohr-Coulomb、Hoek-Brown)是模拟岩体宏观力学行为的基础。对于存在显著大变形或流变特性的软弱围岩,则需引入应变软

化或黏弹塑性等更为复杂的本构关系。对于高外水压力隧洞,单纯的应力分析已远远不够,必须开展渗流-应力耦合分析,通过求解Biot固结理论或其简化形式,准确评估孔隙水压力对岩体有效应力状态及变形演化的影响。为了真实再现施工过程,模拟中需采用“生死单元”等技术,精细刻画分步开挖及支护结构逐次施作的动态过程。此外,通过敏感性分析可以识别出对稳定性影响最为关键的参数,而利用现场监测数据进行参数反演,则能有效修正初始假设的岩体力学参数,从而大幅提升数值模型的预测精度和工程指导价值。

2.2 现场监测与反馈

现场监测是检验理论分析、指导动态设计的眼睛,是连接理论与实践的桥梁。常规的必测项目,如洞内外地质素描、拱顶沉降、周边收敛、锚杆轴力及钢架内力等,构成了围岩稳定性监控的基本框架^[2]。针对高风险洞段,还需增设围岩内部位移、围岩压力、衬砌应力及孔隙水压力等选测项目。近年来,分布式光纤传感(BOTDA/DTS)技术实现了沿隧洞全长的应变与温度连续、高分辨率监测;三维激光扫描(LiDAR)则能快速获取开挖面及已成洞段的高精度点云数据,为变形分析和超欠挖评估提供直观依据;微震监测系统通过捕捉岩体破裂释放的微震信号,能够有效定位潜在的失稳区域,对岩爆等突发性灾害起到预警作用。

为系统化管理各类监测手段及其功能定位,表1归纳了长距离水工隧洞常用监测技术的适用场景与核心作用。

表1 长距离水工隧洞常用监测技术对比

监测技术	主要监测对象	空间覆盖特性	核心功能	适用围岩等级
全站仪收敛/沉降	拱顶沉降、净空收敛	离散点	变形趋势判断、安全预警	III~V类
锚杆轴力计	锚杆/锚索受力	离散点	评估支护有效性	III~V类
多点位移计	围岩深部位移	径向剖面	判定松动圈范围	IV~V类
孔隙水压力计	围岩孔隙水压力	离散点	评估外水压力、渗流状态	高外水压力区
分布式光纤(BOTDA)	应变、温度	连续全长	全域变形感知、异常区定位	全类型(重点IV~V)
三维激光扫描(LiDAR)	开挖面/洞壁三维形貌	面域	超欠挖分析、变形可视化	全类型
微震监测系统	岩体破裂事件	三维空间	岩爆预警、破裂区动态追踪	高地应力硬岩区

对海量监测数据的深度挖掘同样重要,通过建立专业的监测数据库,并运用时序分析、灰色系统理论乃至机器学习算法,可以对围岩变形趋势进行科学研判,及时发出预警信息,为动态决策提供坚实的数据支撑。

2.3 地质力学模型试验

对于特别重要或地质条件极端复杂的洞段,数值模拟和现场监测有时仍显不足,此时大型三维地质力学物理模型试验便成为不可或缺的研究手段。该方法通过相似理论,选用合适的相似材料来模拟原型中的不同岩层和结构面,并在模型边界施加与原型相似的初始地应力场。通过在模型中模拟真实的开挖及支护全过程,可以直观地再现围岩的变形、开裂乃至坍塌的破坏模式,以及支护结构的受力与变形响应。这种“看得见、摸得着”的研究方式,不仅能为数值模型的正确性提供强有力的验证,更能为多种支护方案的比选和优化提供最直接、最可靠的试验依据,尤其适用于验证新型支护结构或处理世界级工程难题。

3 支护优化设计策略

支护优化的目标是在确保安全的前提下,实现技术可行与经济合理的统一。其核心在于“动态”与“分级”。

3.1 动态设计与信息化施工

传统的静态、一成不变的设计模式已无法满足复杂地质条件下长距离隧洞的建设需求,必须全面推行“动态设计、信息化施工”的先进理念。这一理念要求在施工前,通过TSP、地质雷达、超前水平钻探等综合超前地质预报手段,尽可能提前探明掌子面前方的地质情况,特别是不良地质体的位置、规模和性质。在开挖揭示新的地质信息后,设计方需立即对原定的围岩级别进行动态复核与调整,并据此启动相应的支护加强预案^[3]。整个施工过程应围绕一个信息闭环展开:将超前预报、开挖揭示、初期支护及各类监测所获得的数据实时汇集、分析,并迅速反馈至设计和施工单位,作为下循环开挖及支护参数调整的直接依据。通过这种“预报-开挖-支护-监测-反馈-优化”的闭环管理,能够实现支护方案的实时、精准调整,真正做到“岩变我变”,最大限度地规避风险。

3.2 分级支护体系

根据围岩自稳能力和风险等级,实施差异化、精细化的分级支护是支护优化的技术关键。对于I~II类稳定或基本稳定的围岩,应以喷锚支护为主,必要时辅以局部锚杆,其核心思想是充分发挥围岩自身的承载能力,支护结构主要起封闭岩面、防止风化剥落和局部加固的作用。进入III类中等稳定围岩时,系统锚杆配合一定厚度的喷射混凝土成为标准配置,必要时可增设钢筋网以提高喷层的整体性。当面对IV类不稳定围岩时,则需采用“锚、喷、网、架”联合支护体系,其中钢拱架能够提供即时的、强大的支撑力,有效防止围岩在支护完成前发生松弛和坍塌。对于V类极不稳定围岩及各类特殊不良地质段,则需采取更为综合和强力的处治措施。例如,在断层破碎带,应采用管棚、小导管等超前支护配合注浆加固,形成一个稳固的超前承载环;在岩爆高风险区,需通过应力释放孔、应力解除爆破、高强预应力长锚杆及纤维喷射混凝土等组合措施,以吸收能量、抑制岩片弹射;在软岩大变形区,则应采纳可缩式钢架、预留足够变形量、分层分次施作支护等柔性支护理念,允许围岩发生可控的、有益的变形,从而避免刚性支护结构被巨大的围岩压力压溃;而在高外水压区,除加强初期支护外,二次衬砌必须采用高强抗渗混凝土,

并精心设置由环向盲管、纵向排水管组成的排水系统,形成“防、排、截、堵”相结合的综合治理体系。

3.3 新型支护材料与技术应用

支护技术的进步离不开新材料与新工艺的支撑。高性能喷射混凝土,通过掺加钢纤维或合成纤维,能显著提升其韧性、抗裂性、抗冲击性及早期强度,使其更能适应复杂应力环境。高强预应力锚固技术,如采用高强精轧螺纹钢或缓粘结预应力锚索,能够向围岩深部施加强大的主动支护力,有效调动深层围岩的自承能力,对控制深层变形效果显著^[4]。更具前瞻性的是智能支护构件的研发与应用,例如内置光纤光栅或MEMS传感器的智能锚杆、智能钢架,它们能够在服役期间持续感知自身的受力与变形状态,并将数据无线传输至监控中心,为隧洞结构的健康诊断和全生命周期管理提供宝贵的第一手资料。

4 结语

本文聚焦长距离水工隧洞围岩稳定性,经系统分析与工程实践得出关键结论:围岩稳定性受地质、工程、施工等多因素复杂耦合影响,需系统性审视;以精细化数值模拟为核心,融合现场监测与地质力学模型试验的综合分析法,是精准评价围岩、提升预测能力的基石;动态设计与信息化施工构建的闭环管理体系,可实现支护方案实时精准调整;分级、差异化、柔性化支护理念,结合新材料新技术,是保障工程安全高效建设的根本。展望未来,面对更复杂的水工隧洞工程,围岩稳定性分析与支护优化研究空间广阔。数字孪生技术可构建全要素、全周期虚拟映射,人工智能能从海量数据挖掘深层规律实现智能预警,绿色低碳支护材料与工艺研发成新方向,严酷环境下支护结构长期性能研究也意义深远,坚持科技创新、推动多学科融合才能为重大水利水电工程建设提供坚实技术支撑。

[参考文献]

- [1]党挺.某工程长距离引水隧洞开挖施工期围岩稳定性数值分析[J].地下水,2023,45(01):252-255.
- [2]金雪红.长距离输水隧洞TBM掘进过程围岩稳定性探讨[J].黑龙江水利科技,2020,48(05):59-61.
- [3]孟尧.长距离水工隧洞TBM开挖围岩稳定有限元分析[J].云南水力发电,2025,41(04):77-80.
- [4]陈小龙.富水段引水隧洞围岩变形及支护技术研究[J].陕西水利,2025,(06):131-133+136.