

# Research on Stability Control and Support Optimization of Tunnel Surrounding Rock under Complex Geological Conditions

Yanghua Chen

Foshan Miaohui Engineering Design Co., Ltd., Foshan, Guangdong, 528100, China

## Abstract

Against the backdrop of infrastructure construction advancing towards complex geological regions, the stability of tunnel surrounding rock has become a key factor affecting engineering safety and quality. Under complex geological conditions, the mechanical properties of surrounding rocks are characterized by significant nonlinearity, anisotropy and uncertainty, which can easily lead to disasters such as deformation, collapse and water gushing, threatening the safety of construction and operation. This paper systematically analyzes the types and causes of rock instability in complex geological tunnels, sorts out the deformation characteristics and disaster evolution laws under the action of multiple coupling, and assesses the adaptability and deficiencies of conventional and new support technologies. Based on theoretical research, numerical simulation and engineering cases, a stability control strategy centered on advanced prediction, zoned and graded support, information management and dynamic adjustment is proposed. Research shows that fine geological analysis and adaptive support optimization are the key paths to enhancing the safety and economy of complex geological tunnel projects.

## Keywords

Complex geological conditions; Tunnel engineering; Stable surrounding rock; Support optimization; Numerical simulation

# 复杂地质条件下隧洞围岩稳定控制及支护优化研究

陈杨华

佛山市淼汇工程设计有限公司, 中国 · 广东 佛山 528100

## 摘 要

在基础设施建设向复杂地质区域推进的背景下, 隧洞围岩稳定性已成为影响工程安全与质量的关键。复杂地质条件下, 围岩力学特性非线性、各向异性和不确定性显著, 易引发变形、坍塌、涌水等灾害, 威胁施工和运营安全。本文系统分析了复杂地质隧洞围岩失稳的类型及成因, 梳理了多元耦合作用下的变形特征与灾害演化规律, 评估了常规与新型支护技术的适应性与不足。基于理论研究、数值模拟与工程案例, 提出以超前预报、分区分级支护、信息化管理和动态调整为核心的稳定控制策略。研究表明, 地质精细分析和自适应支护优化是提升复杂地质隧洞工程安全与经济性的关键路径。

## 关键词

复杂地质条件; 隧洞工程; 围岩稳定; 支护优化; 数值模拟

## 1 引言

近年来, 随着西部大开发、“一带一路”等重大工程建设的推进, 我国隧洞工程建设规模与技术水平持续提升, 大量隧洞穿越高地应力、断层破碎带、富水软岩、膨胀岩等复杂地质区域。复杂地质条件导致围岩结构力学性能剧烈变化, 力学环境高度不确定, 施工扰动易致围岩大变形、滑移、坍塌与涌水等灾害, 严重影响工程进度与安全, 增加维护成本。传统支护理念与技术在复杂地质条件下常面临适应性不足、响应滞后等挑战, 亟须理论创新和技术优化。本文以复

杂地质条件下隧洞围岩稳定控制及支护优化为核心, 聚焦于围岩工程地质特性分析、稳定性影响机制、支护技术对比与优化、信息化施工与智能监测等关键环节, 旨在为复杂地质隧洞工程的设计、施工与维护提供理论依据与技术参考, 提升工程本质安全性和经济性。

## 2 复杂地质条件下围岩失稳的类型与机理

### 2.1 围岩失稳的主要类型

复杂地质条件下, 隧洞围岩失稳类型多样, 表现为不同的灾害特征和破坏机理。其中, 大变形主要出现在深埋软岩和膨胀岩地段, 拱顶下沉、侧壁收敛和衬砌推移等现象突出。结构面滑移则常发生在断层、裂隙、节理等结构面发育区域, 拱部和侧壁局部支护失效频发, 严重时可引发大范围

【作者简介】陈杨华(1993-), 男, 中国湖南永州人, 本科, 助理工程师, 从事水利水电工程设计。

滑坡与坍塌。岩爆是高地应力环境中的典型失稳类型，短时能量释放对作业安全构成极大威胁，需高度重视监测与防控。塌方、突泥和涌水等灾害则多见于富水破碎带、不良地质体及软弱夹层分布区，这些灾害不仅影响施工进度，还对隧洞后期运营安全构成潜在威胁。不同类型失稳现象往往呈现空间重叠和相互转化，需要在设计与施工中针对性采取多元化的防控与加固措施。<sup>[1]</sup>

## 2.2 失稳致因的多元耦合作用

复杂地质环境下，围岩失稳常常是多种内外因素叠加作用的结果。首先，原岩应力场的扰动是失稳的基础，当隧洞开挖导致应力重新分布时，围岩承载力显著下降，结构面与节理弱化进一步削弱岩体整体性。地下水活动也是不可忽视的重要因素，水力作用会软化岩体、削弱结构面黏结力，诱发滑移、突泥和涌水等灾害。岩体力学参数的空间波动和非均质性，使得局部薄弱区成为失稳的高发部位。施工工法的不当选择与动态扰动，还会加剧微裂隙扩展和结构面剪切，提升宏观破坏概率。在高地应力与强降雨、突水等偶发极端事件叠加时，失稳风险呈非线性跃升，亟须动态风险评估和实时干预。<sup>[2]</sup>

## 2.3 复杂地质对支护设计的特殊要求

在复杂地质区域，隧洞支护设计与传统均质地层存在本质区别。首先，需针对不同围岩区段进行分区分级设计，准确识别高风险区域，科学配置支护结构与参数。支护体系不仅要具备足够的强度以抵抗变形和压力，还须具备良好的延性与适应性，能够应对突发的大变形、涌水等极端情况。设计过程中应强调地质超前预报、分步加固、信息化监测与动态反馈调控，实现从静态设计到动态响应的转变。支护结构材料选择也需兼顾韧性、耐腐蚀和可持续性，确保支护体系在全寿命周期内的安全与经济效益。通过“预报—分区—动态调整—反馈优化”一体化理念，最大限度降低复杂地质条件下围岩失稳风险，提升隧洞工程的本质安全与可持续发展能力。

# 3 围岩工程地质特性分析与变形规律

## 3.1 围岩物理力学特性与分区分级

复杂地质条件下的隧洞围岩常表现出高度的非均质性和各向异性，其物理力学特性受岩性、结构面、风化程度、水文地质条件等多重因素影响。不同区段的围岩在强度、弹性模量、渗透性及节理特征等方面差异显著，决定了其变形与失稳的响应模式。为科学评估围岩稳定性及合理配置支护措施，工程实践中通常采用分区分级的方法。依据 RQD（岩芯质量指标）、Q 值、节理密度、剪切强度和结构面几何参数等多维度指标，对围岩进行工程地质分类，识别出高、中、低风险区段。高风险区不仅要加强监测与数据采集，还需根据分区特性优化支护形式和加固措施，保证整个隧洞结构的安全与经济性。这一分区分级策略能够精细化指导支护设计

与施工管理，提升工程的本质安全水平。<sup>[3]</sup>

## 3.2 围岩变形特征及灾害演化

复杂地质环境下，围岩变形具有显著的空间不均一性和时序突变性。软弱岩层因结构松散、承载力低，通常表现为持续性大变形和长期蠕变；而膨胀岩类受地下水影响，容易发生剧烈膨胀和收缩，导致衬砌结构推移和变形。断层破碎带由于结构面滑移、剪切破坏等因素，常常引发阶段性或突发性的围岩失稳。地下水渗流会加速围岩软化、降低有效应力，进而诱发裂隙扩展、局部塌方等灾害。围岩灾害通常经历“微裂隙扩展—局部失稳—宏观破坏”的链式演化过程，具有突发性和难以预判性。为有效防控围岩灾害，需构建以高密度监测与过程干预为基础的动态管理机制，实现早期识别、实时预警和快速处置，提升隧洞工程的抗风险能力。

## 3.3 工程地质信息获取与超前预报

在复杂地质条件下，获取高精度的工程地质信息是科学决策和风险控制的前提。应充分利用钻探取芯、地质编录、物探（如地震波、地电、地质雷达）、超前地质钻孔等多元技术手段，对隧洞前方及周边岩体的结构特征、力学参数与水文地质状况进行全面调查，建立精细化三维地质模型。随着地质雷达、反射地震、红外热像等超前预报技术的发展，工程师可在隧洞推进过程中实时监控前方岩体变化，及时识别断层、破碎带、富水体等不良地质体及灾害隐患。<sup>[4]</sup>

# 4 支护体系技术与优化对策

## 4.1 常规支护技术的应用现状

在隧洞工程领域，传统支护技术以喷射混凝土（喷锚）、钢拱架和初期混凝土衬砌为核心，形成了较为成熟的支护体系。这些技术在均质、稳定地层中表现出良好的经济性与施工便捷性，能有效抵抗常规围岩压力，防止局部坍塌与变形。然而，面对高地应力、大变形、富水或破碎带等复杂地质环境，常规支护体系逐渐暴露出适应性不足和耐久性有限的问题。例如，钢拱架和喷锚体系易在强变形区出现失稳、屈服，混凝土衬砌在渗水强烈或膨胀岩环境下易失效。

## 4.2 新型支护材料与结构的探索

随着复杂地质条件下工程需求的提升，新型支护材料与结构体系的研发与应用成为行业热点。柔性支护技术如钢带网、弹性连接件等，通过分散变形与缓释应力，有效应对大变形及局部不均匀收敛。高分子复合衬砌和钢纤维混凝土具备更高的延性和耐腐蚀能力，提升了整体结构的稳定性与寿命。智能锚索、主动控制拱架等创新技术则集成了监测与反馈功能，能够在受力和变形异常时自动调节锚固力或结构刚度，实现实时响应。新型支护材料与结构体系通常与监测装置协同工作，形成“感知—分析—调整”的闭环，有助于在复杂地质条件下实现支护的自适应与最优配置。这些前沿技术的应用，不仅提高了隧洞工程的本质安全性，也为工程降本增效和可持续发展提供了重要支撑。

### 4.3 支护参数优化与动态调整机制

复杂地质条件下的隧洞支护设计已逐步从静态、单一的参数配置转向基于分区分级、动态优化的自适应体系。信息化施工平台和数值模拟技术的结合,使得设计人员能够在施工过程中实时获取围岩变形、应力分布与支护受力等多源数据。通过对监测数据的动态分析,可及时识别地质环境与工程响应的异常,进而对支护参数如锚杆长度、间距、预应力和衬砌厚度等进行适时优化调整。建立以“预测—监测—反馈—调整”为核心的动态支护机制,有效减少了因支护滞后或过度设计带来的风险和资源浪费。同时,支护参数的动态优化促进了材料与结构的合理配置,提高了工程安全性和经济性。<sup>[5]</sup>

## 5 信息化与智能化隧洞施工管理

### 5.1 信息化施工平台建设

在复杂地质条件下隧洞施工过程中,信息化施工平台的建设已成为提升工程管理效率和决策科学性的核心手段。通过 BIM (建筑信息模型)、GIS (地理信息系统)、物联网等数字化技术,实现了地质资料、支护参数、监测数据等多源信息的集成与共享。平台能够实时采集和整合围岩变形、地表沉降、支护结构受力等关键数据,为设计优化与动态调整提供科学依据。与此同时,信息化平台支持全过程数据可视化,便于各参与方协同与问题追溯,有效减少信息孤岛和管理盲区。在多工序、跨学科的复杂隧洞项目中,这种一体化管理体系不仅提高了工程透明度和决策的时效性,也为后续运营期的风险管理与维护提供了数据基础,实现了隧洞全生命周期的信息支撑和智能管理。

### 5.2 智能监测技术的集成应用

面向复杂地质条件,隧洞工程的安全监测已从单一手段向多源集成、智能化方向发展。现代项目广泛应用激光扫描、全站仪、自动收敛计、分布式光纤、智能传感器等多种监测设备,形成高密度、全方位的动态数据采集网络。各类传感器能够实时反馈隧洞围岩变形、衬砌应力、地下水变化等信息,极大提高了异常现象的发现与响应速度。结合大数据分析 with AI 模型,可对历史与实时监测数据进行深入挖掘,构建变形趋势判识、异常预警和灾害风险量化模型,提前发现不稳定隐患,实现从被动响应到主动预防的转变。监测数据还可反向驱动支护设计与施工调整,形成“监测—分析—

反馈—优化”的智能闭环,大幅提升隧洞施工与运行的本质安全水平。

### 5.3 全过程风险管理与应急响应

复杂地质条件下隧洞工程的风险管理已不再局限于事后补救,而强调全过程、全要素的系统管控。应建立以信息化平台和智能监测为基础的动态风险评估机制,覆盖项目设计、施工、运营各阶段。通过对地质变化、施工扰动、环境影响等关键风险点进行分级管理,实时识别潜在危险,实现分级预警与风险闭环管控。同时,应完善应急响应预案,搭建多部门协同的应急管理平台,实现风险识别、预警、决策与资源调度一体化。快速响应和科学联动可在异常事件发生初期有效控制险情,最大程度减少人员、财产与社会损失。全过程风险管理和高效应急响应不仅提升了工程安全管理的主动性和系统性,也是推动复杂隧洞项目可持续、高质量建设与运营的重要保障。

## 6 结语

复杂地质条件下隧洞工程面临的围岩稳定与支护问题,是多学科交叉、理论与工程高度融合的综合课题。研究与实践表明,只有依托高精度地质调查、分区分级科学支护、信息化动态施工和智能监测预警等多维创新措施,才能有效提升隧洞围岩的稳定性和支护体系的适应性,实现安全、经济与可持续发展的目标。未来,随着地质工程大数据、AI 辅助设计及新材料新技术的持续发展,复杂地质隧洞工程的智能化、精细化与绿色化水平将不断提升。应继续加强理论创新与工程应用结合,推动围岩稳定控制与支护优化的技术进步,为基础设施高质量建设和运营提供坚实支撑。

### 参考文献

- [1] 宋茜.深埋隧道穿越活动断裂带施工期围岩稳定性研究[D].山东大学,2022.
- [2] 李垂泉.地下空间岩体质量评价及围岩稳定性分析[D].南京理工大学,2020.
- [3] 杨永香.特殊地质条件下龙潭隧道的围岩稳定性数值研究[D].中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所),2006.
- [4] 夏勇,赵恒,何建华.高地应力及复杂地质条件耦合下大型地下洞室群围岩稳定分析[J].四川水力发电,2025,44(S1):118-122+134.
- [5] 孟尧.大埋深水工隧洞钻爆开挖围岩稳定有限元分析[J].云南水力发电,2025,41(07):52-54.