

# 复杂地质条件下隧洞围岩稳定性与支护优化

张 涛

浙江华东工程咨询有限公司 浙江杭州 311100

**摘 要:** 随着我国基础设施建设的持续推进, 隧道工程在交通、水利、电力等领域的应用日益广泛。但在复杂地质条件下, 隧道工程面临着围岩稳定性差、支护难度大等问题, 而不同地质构造、岩性组合以及地下水条件对围岩的稳定性有着显著的影响。基于此, 就复杂条件下隧道水利与电力研究洞围岩稳定性与支护优化进行研究分析, 并提出针对性的改进对策, 旨在为复杂地质条件下的隧道工程安全高效建设提供必要的参考借鉴。

**关键词:** 复杂地质; 隧洞围岩; 支护优化

## 引言

在隧道工程中, 由于其特殊的功能需求和复杂的运行环境, 通常对围岩稳定性和支护结构有着更高的要求。传统隧道设计和施工方法在复杂地质条件下很难满足工程安全性和经济性的需求, 因此, 开展多学科交叉融合, 并选用先进的监测技术和分析方法, 能够有效揭示复杂地质条件下隧洞围岩的失稳规律, 并以此提出科学合理的支护优化方案, 以满足施工需求。

## 一、复杂地质条件特征及对隧洞围岩稳定性的影响

### (一) 复杂地质条件类型与特征

在隧洞工程领域, 断层破碎带作为区域构造应力作用的产物, 其形成机制涉及岩石的断裂与相对位移, 空间分布呈带状特征, 宽度差异显著。该区域岩体结构遭受严重破坏, 完整性丧失, 力学性能显著劣化, 致使隧洞穿越过程中围岩稳定性急剧下降<sup>[1]</sup>。软弱夹层多由沉积过程中的物质成分差异或后期地质作用形成, 以层状结构分布于坚硬岩层之间, 厚度相对较小, 力学参数薄弱, 表现为抗剪强度不足、变形模量偏低, 易诱发剪切滑移变形, 如比1所示。高应力区域通常与深部地质环境或构造挤压作用密切相关, 应力场呈现高值集中特征, 围岩处于超限应力状态, 极易引发岩爆等突发性破坏。富含地下水区域由于水文地质条件优越, 围岩长期处于饱水状态, 导致岩石强度与抗剪性能显著衰减, 加之地下水产生的静水压力与动水压力共同作用, 进一步削弱

围岩整体稳定性, 对隧洞施工安全与长期运营构成重大挑战。

表1 软弱夹层类型表

岩层类型	关键数据
花岗岩、砂岩、页岩	软弱夹层厚度: 5~30cm
	倾角: <30°
	软弱夹层饱和抗压强度: <5MPa
	坚硬岩层饱和抗压强度: >60MPa
石灰岩、石英岩、泥岩	接触带附近结构面密度: >5条/m
	结构面倾向临空面且倾角较陡的比例: >30%
	软弱岩层抗剪强度: $c=10\sim 30\text{kPa}$ , $f=0.2\sim 0.4$
变质岩、巨厚层沉积岩	坚硬岩层抗剪强度: $c=50\sim 200\text{kPa}$ , $f=0.5\sim 1.0$
	软弱夹层含水量: >塑限
	泥化夹层抗剪强度: $c=5\sim 20\text{kPa}$ , $f=0.1\sim 0.3$
	地下水渗透系数: >10-4cm/s

### (二) 复杂地质条件对围岩稳定性的影响机制

从力学角度分析, 断层破碎带导致围岩完整性严重丧失, 连续应力传递路径被截断, 应力在破碎带区域集中分布, 诱发拉伸破裂或剪切破坏, 变形特征呈现局部剧烈塌落与松动。软弱夹层的存在使上下岩层间力学耦合强度显著降低, 在应力作用下形成潜在滑动面, 破坏机制主要表现为沿软弱面的滑移破坏, 变形特征以整体性位移为主。当高应力区与富含地下水区耦合作用时, 高应力使围岩处于临界失稳状态, 地下水的渗透与侵蚀作用进一步降低岩石强度, 诱导围岩变形特性发生显著转变, 促使其更易发生塑性流动。工程实例表明, 某隧洞穿越断层破碎带与富水区时, 反复发生塌方与涌水事故, 不仅制约了施工进度, 更危及施工人员安全; 在运营阶段, 围岩持续变形导致衬砌开裂, 对隧洞长期运营

**作者简介:** 张涛 (1984年02月-), 男, 汉族, 河南平舆县人, 大学本科, 中级职称, 研究方向: 水电工程。

安全性构成严重威胁。

## 二、隧洞围岩稳定性分析方法

### (一) 现场监测方法

针对复杂地质条件隧洞围岩稳定性分析时,需采用多维度监测技术手段,位移监测可精确量化围岩表面位移特征,为围岩变形演化趋势研判提供关键依据。应力监测能够表征围岩内部应力场分布特征,揭示其受力状态,应变监测则可有效表征围岩变形程度,反映弹性与塑性变形转化过程<sup>[2]</sup>。声发射监测通过捕捉围岩破裂过程中的弹性波特征,实现围岩失稳的早期预警。监测点布设应依据特定准则,在地质构造复杂区、应力集中带等关键部位实施加密布设,以全面掌握围岩稳定性特征,同时,需综合考虑施工扰动因素,确保监测点位长期稳定性。监测频率的确定需依据工程实施阶段与围岩变形动态特征,施工初期及围岩变形活跃期应实施高频次监测,变形稳定阶段可相应降低监测频次。监测数据处理流程包括实施数据预处理,剔除异常数据点,继而运用统计分析方法解析数据内在规律,通过构建位移-时间、应力-应变等特征曲线,结合岩土力学理论模型,提取围岩变形速率、应力变化梯度等关键力学参数,从而实现围岩稳定性状态的科学评估,为后续施工工艺优化与支护体系动态调整提供可靠技术支撑。

### (二) 数值模拟方法

在隧洞围岩稳定性分析领域,FLAC3D软件基于快速拉格朗日差分法,可有效表征岩土材料的非线性大变形特性,通过求解离散单元力学平衡方程,动态可视化表达围岩开挖过程中的应力场、应变场及位移场演化规律。ANSYS软件凭借其先进的有限元分析能力,在复杂结构力学行为模拟方面展现出显著技术优势,尤其适用于隧洞结构与围岩相互作用的精细化分析。数值模型构建需严格契合复杂地质条件,地质模型须精确表征地层岩性分布、断层破碎带空间展布及软弱夹层赋存特征<sup>[3]</sup>。结构模型需精细构建隧洞几何形态、断面尺寸及支护体系构型,边界条件设置应合理模拟实际地质环境,包括位移约束边界与应力加载边界。数值计算过程中,网格划分质量直接制约计算精度,参数选取需基于室内岩石力学试验、现场原位测试及工程实践经验,涵盖弹性模量、泊松比、内摩擦角等关键力学参数。研究表明,参数变化对模拟结果具有显著影响,弹性模量的提升将显著抑制围岩变形响应,内摩擦角的调整则直接影响围岩抗剪强度与整体稳定性。通过系统开展参数敏感性分析,

可精准识别关键控制参数,为隧洞工程优化设计与施工工艺动态调整提供科学依据。

### (三) 理论分析方法

在隧洞围岩稳定性分析领域,理论分析方法构成基础性研究框架,其科学价值在于为围岩力学行为提供系统化解析路径。弹塑性理论将围岩视为具有应力-应变非线性特征的连续介质,通过建立屈服准则与流动法则,可精确表征围岩从弹性响应到塑性破坏的渐进演化过程。断裂力学理论聚焦于围岩微裂纹的扩展机制,基于应力强度因子与能量释放率判据,定量评估裂纹失稳临界条件。损伤力学理论则引入连续损伤变量,建立围岩内部结构劣化程度与力学性能退化的本构关系,实现围岩损伤演化的全周期描述。针对复杂地质条件,需构建多参数耦合的力学模型,通过整合岩石力学参数、地质构造要素及水文地质特征,运用微分方程求解技术推导围岩应力场、应变场与位移场的解析解或半解析解,明确其空间分布规律与边界效应。理论分析结果的可靠性验证需依托多源数据比对机制,将解析解与现场位移监测数据、数值模拟应力云图进行系统性比对,当三者在关键特征参数上呈现高度一致性时,表明理论模型具有工程适用性。若存在显著偏差,则需溯源分析,可能源于理论假设的简化、现场监测的系统误差或数值模拟参数的工程适用性不足,进而通过修正本构关系或边界条件实现理论体系的迭代完善。

## 三、隧洞支护技术现状与优化策略

### (一) 常见隧洞支护技术类型与特点

在隧洞工程领域,锚杆支护技术通过锚固单元将不稳定岩体与稳定岩层形成力学连接,显著提升围岩整体结构完整性,如图1所示。在隧洞中,锚杆技术适用于中等稳定性围岩条件,具有施工便捷性与经济性优势,但其支护效能受围岩力学参数制约,在软弱破碎岩体中适用性受限<sup>[4]</sup>。喷射混凝土支护通过快速形成连续防护层,有效阻隔围岩风化与水化作用,实现与围岩的协同受力机制,对节理裂隙发育岩体具有显著加固效果,适用范围广泛,但其抗冲击性能有限,且在较厚支护层中易产生结构性开裂。钢架支护体系依托高强钢材构建的刚性支撑结构,能迅速提供结构抗力,尤其是适用于自稳能力薄弱的软弱破碎围岩,有效控制围岩大变形,但存在钢材消耗量大、工程成本高、以及与围岩界面密实度控制要求高等技术局限。衬砌支护通过全断面混凝土结构实现围岩压力的全面承载与防水功能,适用于地质

条件复杂、工程耐久性要求高的隧洞工程，然而其施工周期长、造价高，且对基础承载力有严格要求，需在设计阶段充分考虑地基条件与围岩力学响应特性。各类支护技术的工程应用需基于围岩力学参数、地质构造特征及工程功能需求进行系统性匹配，方能实现支护效能的最优化。



图1 锚杆在隧洞支护中的应用

## (二) 复杂地质条件的支护技术选择

在复杂地质条件下，支护技术的确定需严格依据地质条件特征及围岩稳定性分析成果，遵循以下核心原则。首先，适应性原则要求系统考量断层破碎带、软弱夹层、高应力区及富水区等地质单元的力学特性，针对性配置支护体系。对于软弱破碎围岩，宜优先采用钢架支护或衬砌支护以提供高强度支护抗力。其次，协同性原则强调支护技术体系的协同效应，通过组合应用实现优势互补，如锚杆支护与喷射混凝土的联合应用形成锚喷支护体系，有效增强围岩整体性<sup>[5]</sup>。最后，经济性原则要求在满足支护功能的前提下优化工程成本，对地质条件良好的区段可采用经济性较高的锚杆支护。并且，基于围岩稳定性分级结果实施分区支护策略，对稳定性劣化区域采用多技术组合的强化支护体系，对稳定性良好的区域优化支护结构形式，从而实现支护效能与经济效益的协同优化，确保隧洞工程的安全实施与高效推进。

## (三) 支护优化策略

在隧洞支护技术领域，为实现支护效能与经济效益的协同提升，需从结构形式、参数设计、施工工艺及方案适配等多个维度系统制定优化策略。在支护结构形式方面，应依据地质条件的空间异质性进行差异化配置，对于断层破碎带等自稳能力显著劣化的区域，宜采用钢架与现浇衬砌联合支护体系，以增强整体结构刚度与承载能力；而对于围岩条件相对稳定的区段，则可简化支护结构，采用锚杆与喷射混凝土组合的轻型支护形式。

支护参数的精细化设计亦至关重要。应基于围岩力学参数及地应力状态，通过理论计算或数值反演方法，合理确定锚杆长度、布置间距、喷射混凝土厚度等关键参数，确保支护体系与围岩变形特性相匹配，避免过度支护或支护不足。在施工工艺层面，应积极推进机械化与自动化作业模式，提升施工精度与效率<sup>[6]</sup>。例如，采用湿式喷射混凝土工艺，不仅可显著降低粉尘浓度，改善作业环境，还可提高混凝土密实度与力学性能，从而增强支护结构耐久性。针对不同类型的复杂地质条件，应构建个性化、适应性强的支护技术方案。在高应力区，宜采用具有让压功能的锚杆配合高强度钢架，以协调围岩大变形与支护结构承载之间的关系。在富含地下水区域，则需强化防排水措施，优先选用具备良好抗渗性能的防水型衬砌结构。同时，应对多种备选方案开展多目标综合比选，统筹考量支护效果、经济成本、施工可行性及运维安全性等因素。

## 结束语

不同地质构造的动态演化对围岩稳定性有着一定的影响，在开展多学科交叉融合，并引入先进的科技手段时，可通过建立完善的技术标准和规范体系，能有效促进支护优化技术在复杂地质条件下的隧道工程被广泛应用，从而为经济社会的发展做出更大的贡献。

## 参考文献

- [1] 刘金豹. 复杂地质条件下水利工程深基坑开挖与支护技术创新[J]. 水利技术监督, 2025, (12): 325-327+340.
- [2] 林仰纯, 唐宏, 何宝根. 面向水利工程的地质勘察智慧平台的研发与应用[J]. 水利技术监督, 2025, (12): 48-52+124.
- [3] 莫云凯. 原位测试技术在水利工程地质勘察中的应用研究[J]. 现代工程科技, 2025, 4(20): 141-144.
- [4] 苏庆, 张伟, 张宁. 浅谈水利水电工程的水文地质勘察策略[J]. 建材发展导向, 2025, 23(20): 106-108.
- [5] 孟博霞. 复杂地质条件下水利工程深基坑复合支护施工技术[J]. 河南水利与南水北调, 2025, 54(09): 40-41.
- [6] 慕娟. 复杂地质条件下水利工程基础灌浆施工技术要点研究[J]. 水上安全, 2025, (17): 174-176.