

高速公路隧道围岩稳定性分析与支护结构优化设计

杨镇豪

四川公路桥梁建设集团有限公司公路隧道分公司 四川 成都 610000

摘要: 高速公路隧道建设中, 围岩稳定性分析与支护结构优化设计是保障工程安全与经济性的核心环节。本文基于复杂地质条件下的隧道工程实践, 系统研究了稳定性分析方法、模型构建及支护参数优化策略, 涉及多目标优化模型构建、参数敏感性分析、动态调整策略等方面, 旨在为类似工程提供理论支撑与实践指导。

关键词: 隧道围岩稳定性; 支护结构; 优化设计

引言

随着我国高速公路网向山区延伸, 隧道工程面临的地质条件愈发复杂, 断层破碎带、岩溶发育区及软硬岩互层等不良地质现象频发, 导致围岩失稳事故频发。同时, 传统设计方法过度依赖经验公式, 难以准确反映复杂地质条件下的围岩力学行为, 导致支护结构过度设计或刚度不匹配, 进而引发资源浪费与安全隐患。近年来, 数值模拟技术、智能化监测手段及多场耦合分析方法的快速发展, 为隧道围岩稳定性研究提供了新范式。

1 围岩稳定性分析方法与模型构建

1.1 理论解析法

一方面, 理论解析法是隧道围岩稳定性分析的核心手段之一, 其通过数学物理方程构建围岩与支护结构的力学模型, 揭示应力应变分布规律及破坏机制。弹性力学模型基于连续介质假设, 认为围岩在开挖后处于弹性变形阶段, 应力与应变呈线性关系, 适用于浅埋或完整岩体条件。该模型通过求解平衡方程、几何方程及本构方程, 可获得围岩位移场与应力场的解析解, 但其假设与实际工程中围岩的裂隙发育、非均质性等特征存在偏差, 导致预测结果偏保守。弹塑性力学模型则引入屈服准则描述围岩从弹性到塑性的过渡过程, 其中Mohr-Coulomb准则以剪切破坏为核心, 通过内摩擦角与黏聚力定义破坏面, 广泛应用于岩土工程领域; Hoek-Brown准则则基于岩体经验参数, 考虑节理、断层等结构面影响, 更贴合实际围岩的非连续特性, 尤其适用于破碎岩体或软弱夹层条件^[1]。另一方面, 收敛-约束法作为动态分析工具, 通过建立围岩变形与支护反力之间的相互作用关系, 为支护时机与参数设计提供理论依据。该方法将隧道开挖过程视为围岩收敛与支护约束的动态平衡过程: 开挖后围岩因应力释放产生径向变形, 若未及时支护, 变形将持续发展直至形成塑性区甚至失稳; 支护结构施加后, 其刚度与强度会限制围岩进一步变形, 同时

承受围岩压力。收敛-约束法通过绘制围岩特征曲线与支护特征曲线, 确定两者交点对应的平衡状态, 该点对应最小支护阻力与最大允许变形。

1.2 数值模拟方法

数值模拟方法中有限元法(FEM)与离散元法(DEM)在隧道围岩稳定性分析中具有显著差异。(1)有限元法基于连续介质力学, 将围岩离散为有限单元, 通过节点连接求解偏微分方程, 擅长处理连续介质的应力、应变问题, 尤其适用于围岩完整性较好、节理不发育的场景。该方法可有效模拟隧道开挖过程中围岩的应力重分布、塑性区形成及支护结构的作用机制, 但对大变形问题可能面临网格畸变挑战, 需通过任意拉格朗日-欧拉法(ALE)或网格重划分技术克服。(2)离散元法则将围岩视为离散块体或颗粒集合, 通过接触力学模型描述块体间的相互作用, 能够模拟不连续介质的变形、移动和破坏过程, 如节理岩体的块体滑动、脱落及垮落等非连续变形, 在围岩破碎、节理裂隙发育或需分析块体失稳时更具优势, 但计算成本通常较高, 尤其当块体数量庞大时效率显著降低。(3)流固耦合的渗流-应力耦合模型通过整合地下水渗流与围岩应力场的相互作用, 能够更真实地反映富水地质条件下隧道开挖的力学行为。该模型将地下水渗流压力作为体荷载施加于多孔介质骨架, 并考虑围岩变形对渗透性能的反馈影响, 形成应力场与渗流场的动态耦合关系^[2]。通过数值迭代, 可分析不同埋深、水体位置及围岩强度条件下的围岩稳定性、渗流分布规律及突水风险, 为隧道设计和施工提供关键参数支持。(4)动态施工过程模拟通过分阶段再现开挖、支护及二次衬砌的施工顺序, 能够评估各阶段围岩的应力、变形及塑性区发展。开挖阶段模拟围岩临空面的应力释放与变形响应, 支护阶段分析锚杆、喷射混凝土等支护结构对围岩的加固效果, 二次衬砌阶段则评估衬砌与围岩的协同受力状态。该模拟可揭示施工时序

对围岩稳定性的影响,优化支护参数与施工节奏。

1.3 物理模型试验

物理模型试验通过构建缩尺地质力学模型,为隧道围岩稳定性分析与支护结构受力机制研究提供直观可靠的试验依据。(1)相似材料配比设计是模型试验的核心环节,需综合考虑几何相似、力学相似及初始条件相似原则。以铁精粉、重晶石粉为骨料调节密度,石英砂为细骨料改善级配,石膏或水泥作为胶结材料控制强度,通过正交试验确定各组分比例,使模型材料的弹性模量、黏聚力、内摩擦角等参数与原型岩体满足相似比要求。(2)试验方案需明确模型尺寸、加载方式及监测布置,模型几何尺寸通常按1:50至1:100缩比,边界条件采用柔性边界模拟地应力场。通过液压伺服系统施加分级荷载,模拟不同埋深下的围岩应力状态,同时利用位移传感器、应变片及数字图像相关技术(DIC)监测围岩变形与应力分布。(3)围岩变形与破坏模式的可视化分析依赖高精度监测设备与图像处理技术,DIC系统通过对比试验前后模型表面散斑图案的位移场,可定量获取围岩开裂位置、裂缝扩展路径及塑性区范围,结合声发射监测定位破坏源,揭示节理岩体在开挖扰动下的块体滑移、张拉破裂及剪切破坏机制,为理论分析与数值模拟提供验证依据。(4)支护结构受力机制的试验验证需在模型中预埋压力盒或光纤光栅传感器,实时监测锚杆轴力、喷射混凝土应变及钢拱架弯矩随开挖步骤的变化规律,分析支护结构与围岩的相互作用过程^[3]。例如,锚杆通过悬吊效应限制块体脱落,喷射混凝土通过闭合裂隙提高围岩完整性,钢拱架通过被动承载分担围岩压力,验证支护参数(如锚杆长度、间距、预应力)对围岩稳定性的控制效果。试验结果可进一步反演围岩力学参数,修正数值模型中的本构关系,形成“试验-理论-设计”的闭环验证体系,为复杂地质条件下隧道支护方案优化提供科学依据。

2 支护结构优化设计方法

2.1 多目标优化模型构建

多目标优化模型构建是隧道支护设计从单一指标向综合效益提升的关键方法,其核心在于通过数学建模平衡安全性、经济性与施工便利性之间的矛盾关系。目标函数体系涵盖三个核心维度:(1)安全性以围岩稳定安全系数或支护结构承载力为量化指标,反映支护体系抵抗失稳的能力;(2)经济性通过材料成本、施工设备投入及人工费用等综合成本衡量,需考虑支护类型的用量及施工工艺复杂度;(3)施工便利性以工期为直接表征,需分析支护安装时间、开挖与支护的衔接效率及现场作业空间对进

度的制约。三者构成相互制约的优化目标,例如提高安全性可能增加支护材料用量导致成本上升,或因支护结构复杂化延长工期,需通过多目标优化寻找非劣解集。另外,约束条件作为优化边界,需明确围岩变形控制值以确保施工安全,限定支护材料强度以满足承载要求,同时考虑施工空间限制避免支护结构与开挖作业冲突。最后,优化算法的选择直接影响解的质量与计算效率,NSGA-II多目标遗传算法通过非支配排序与拥挤度计算维持种群多样性,能够高效搜索帕累托前沿,适用于离散型变量与连续型变量的混合优化。粒子群优化(PSO)则通过个体与群体经验的动态调整,在连续空间中快速收敛至最优解,尤其适合处理支护参数连续变化的场景。两类算法均可通过并行计算加速收敛,并通过精英保留策略避免优质解丢失^[4]。实际应用中,需结合工程特点选择算法或进行混合改进,例如在NSGA-II中引入局部搜索算子提升解精度,或在PSO中采用动态惯性权重平衡全局探索与局部开发能力,最终从帕累托解集中筛选出兼顾安全性、经济性与施工便利性的最优支护方案,为复杂地质条件下的隧道设计提供科学决策支持。

2.2 参数敏感性分析

参数敏感性分析是隧道支护设计优化的重要环节,通过量化各参数对支护效果的影响程度,可为关键参数的合理取值提供理论依据。(1)锚杆长度、间距及预应力是影响支护体系整体稳定性的核心参数,锚杆长度增加可扩大其有效锚固范围,增强对深部围岩的约束作用,但过长可能导致锚固段进入软化区或施工难度增大。锚杆间距减小能提高支护密度,有效控制围岩裂隙扩展,但过密会引发群锚效应,降低单根锚杆的承载效率。预应力施加可主动限制围岩变形,增强支护结构的早期稳定性,但预应力值需与围岩强度匹配,避免因应力集中导致局部破坏。三者对支护效果的影响存在交互作用,需通过正交试验或参数化建模分析其敏感度排序,通常锚杆长度对控制拱顶沉降的贡献最大,预应力对抑制塑性区发展的效果显著,而间距调整对收敛位移的影响更为直接。(2)喷射混凝土厚度与强度等级的组合需兼顾封闭围岩、承受剪应力及传递锚杆力的功能,厚度增加可提高支护刚度,但超过一定限值后对变形控制的增益减弱,且增加材料消耗与施工时间。强度等级提升能增强混凝土的抗剪、抗拉能力,但过高强度可能导致脆性破坏,需与围岩变形特性相适应。优化组合需通过数值模拟或模型试验确定,通常在软弱围岩中采用高强度、中等厚度的喷射混凝土,而在破碎岩体中则优先保证厚度以形成有效承载壳。(3)钢拱架型号与布置

间距的协同设计需考虑其与围岩的相互作用机制,型号选择需满足强度与刚度要求,工字钢拱架适用于中等应力环境,格栅钢架在软弱围岩中变形协调能力更强。布置间距减小可提高支护连续性,但过密会限制围岩变形释放,增加支护结构受力,需结合围岩收敛速率与支护允许变形量确定合理间距。

2.3 动态调整策略

动态调整策略是隧道施工安全控制的核心手段,通过实时反馈与主动干预实现支护体系与围岩动态响应的精准匹配。(1)基于监测数据的支护参数实时修正依托高精度传感器网络,持续采集围岩位移、应力、渗压及支护结构受力等关键指标,利用数据驱动模型或物理机制模型分析监测数据与支护效果的关联性。当围岩变形速率超过预警阈值或支护应力异常时,自动触发参数修正流程,确保支护强度与围岩变形需求同步。(2)分阶段支护强度升级机制遵循“动态设计、分期实施”原则,初期支护以快速封闭围岩、限制变形为核心,采用柔性支护释放部分地应力,同时通过量测数据评估围岩稳定性。当变形趋于稳定且初期支护承载力接近极限时,启动二次衬砌施工,以刚性结构(如模筑混凝土)承担剩余荷载,形成“柔-刚”复合支护体系,分阶段升级需严格控制时间节点,避免初期支护过度承载导致失稳或二次衬砌滞后引发围岩松弛。(3)地质突变条件下的应急支护方案库通过预先构建针对不同地质灾害的应急响应体系,集成多种快速支护技术及配套设备,结合地质雷达、TSP等超前预报技术提前识别风险区域^[5]。当现场揭露地质条件与设计不符时,立即启动方案库匹配程序,根据灾害类型、规模及围岩特性选择最优应急措

施,例如在富水断层带采用“超前帷幕注浆+双层钢架”组合支护,在岩爆区实施“应力释放孔+柔性防护网”协同控制,并通过信息化平台实现应急资源的快速调配与施工指令的实时下达,最大限度降低地质突变对施工安全与进度的冲击。

结语

综上所述,本文通过理论分析、数值模拟与工程实践结合的方式,揭示了不同工况下围岩的变形特征和失稳机理,针对现有支护结构的不足,完成了支护参数、结构形式及施工工艺的优化设计,形成了适配不同围岩条件的支护方案。未来,研究可结合更多不同地质类型的隧道工程,进一步完善围岩稳定性评价体系,优化支护结构设计方法,为我国山区高速公路隧道工程建设提供更全面、可靠的技术保障。

参考文献

- [1]沈文海.水利水电工程引水隧洞洞挖施工方法分析[J].江西建材,2022(05):218-219.
- [2]耿利军,盛兆旺,宋立伟.公路隧道施工过程中围岩变形规律分析[J].工程技术研究,2024,9(14):8-10.
- [3]赵小元.高速公路隧道施工中围岩扰动影响因素与控制方案探讨[J].四川水泥,2025(07):211-213.
- [4]李新平,朱珍德,徐涛,等.深部软岩隧道围岩-支护结构协同作用机理与设计优化[J].岩石力学与工程学报,2022,41(5):921-933.
- [5]张向东,李猛,刘家顺.冻融环境下隧道围岩稳定性及支护结构参数优化[J].地下空间与工程学报,2023,19(2):498-506.