

公路隧道围岩稳定性分级与初期支护参数合理匹配方法研究

袁青杰

云南云路工程监理咨询有限公司 云南 昆明 650228

【摘要】：针对公路隧道围岩稳定性分级与初期支护参数之间缺乏定量匹配关系的技术困境，指出现行设计方法对围岩变形特性响应不足的核心问题。采用理论分析与数值模拟相结合的方法，建立基于位移响应的分级支护参数优选流程，揭示锚杆长度、钢拱架间距对拱顶沉降及水平收敛的敏感性规律，并提出分级匹配原则指导下的参数确定方法。结果表明，围岩变形特性可作为连接分级与支护参数的核心纽带，通过数值模拟与工程类比交叉验证，实现 I ~ V 级围岩条件下支护刚度的合理配置，为动态设计提供量化依据。

【关键词】：公路隧道；围岩稳定性分级；初期支护参数；变形响应；参数匹配

DOI:10.12417/2811-0722.26.06.055

引言

在公路隧道建设中，围岩稳定性分级与初期支护参数设计长期处于相对分离状态。前者主要依据岩体固有物理力学属性给出定性评价，后者则多依赖工程类比与经验公式进行取值，二者之间缺乏明确的定量映射关系。现行分级结果难以直接转化为锚杆长度、钢拱架间距等可执行参数，导致同一等级围岩下的支护方案差异较大，支护不足或过度的问题并存。为此，有必要围绕围岩变形特性这一核心纽带，探索分级结果向支护参数合理转换的定量方法，以实现安全与经济相协同的精准控制。

1 公路隧道围岩稳定性分级与初期支护参数匹配问题提出

1.1 围岩稳定性控制中分级与支护参数脱节的技术困境

公路隧道工程建设中，围岩稳定性分级属于勘察阶段地质评价内容，初期支护参数确定为结构设计工作，二者长期缺乏明确的定量对应关系。现有围岩分级多依据岩体完整程度、岩石物理强度等宏观指标进行定性划分，支护参数则多参考工程实例或经验模型选取，分级结果无法直接转化为锚杆长度、钢拱架间距、喷射混凝土厚度等具体施工指标。相同围岩级别对应的支护参数在不同项目中差异显著，易出现支护不足导致围岩失稳或支护过度造成材料浪费等问题。同时，现有分级体系未考虑围岩变形与支护刚度间的力学机理，难以反映开挖后围岩位移及塑性区分布，施工中支护参数动态优化也缺乏可靠的分级依据，多依赖经验判断。因此，亟需建立以围岩变形反馈为核心、兼顾安全与成本的量化设计方法，实现围岩分级与支护参数的精准匹配。

1.2 现行设计方法对围岩变形特性响应不足的局限性

现行公路隧道支护设计多依托围岩基本质量指标或 RMR 分类体系完成等级划分，并依此选取配套支护参数。此类方法侧重围岩强度与完整程度，对开挖后围岩真实形变特征缺少足够考量。隧道施工里拱顶沉降、水平收敛、仰拱隆起等形变数

值与发展速度，是判定围岩稳定状态的直观依据，不同地质环境下围岩形变规律存在明显区别。现有分级体系未将形变量级、持续时长及收敛特征等动态指标融入支护参数拟定流程^[1]。软弱破碎围岩具备明显流变与时空效应，形变过程可延续数月，传统静态设计模式无法体现这类时间与空间约束特征。数值模拟显示锚杆长度对应应力场优化作用有限，对围岩形变管控效果突出，支护参数确定应侧重形变反馈而非单一应力指标。现有设计模式对形变特征适配性不足，支护参数难以实现精细化管控。

1.3 实现分级与支护参数合理匹配的关键科学问题

围岩稳定性分级与初期支护参数的适配关键，在于构建分级结果与支护设计指标间的非线性映射关联。当前分级体系侧重岩体完整性、强度等静态地质参数，未能充分捕捉隧道开挖后围岩的变形演化特征及动态力学表现，致使分级结论难以直接转化为锚杆长度、钢拱架间距等具体支护指标。初期支护设计仍依托工程类比与经验赋值，缺乏不同围岩类别下支护结构与围岩变形特性协同作用的定量阐释，围岩应力释放程度、位移释放系数与支护刚度的耦合关联尚未形成统一理论框架，支护时机与支护强度的确定存在显著不确定性。揭示围岩分级指标与支护结构力学表现的内在联系，建立分级结果向支护参数转化的定量路径，是实现二者适配的核心科学课题。

2 围岩稳定性分级与变形特性关联分析

2.1 基于围岩力学参数的稳定性分级方法

依托围岩力学相关参数开展稳定性分级工作，多依托岩石强度、岩体完整度、结构面发育状况等量化指标完成类别划分^[2]。单轴抗压强度可体现岩石抵御失稳破坏的性能，为判定软硬围岩类别提供基础参考依据，岩体质量指标 RQD 可衡量岩体受节理裂隙分割后的完整状况，数值偏低对应围岩破碎程度偏高。结构面间距展布形态充填特征地下水赋存状态均会对围岩自身承载稳定性产生作用，整合各类参数可借助岩体分级体系测算量化数值完成 I 至 V 级围岩划分，此类分级方式未顾

及隧道开挖后围岩形变响应差别, 仅可体现岩体本身具备的物理学特性。各级围岩受力后形变数值塑性区域分布失稳形态均存在对应变化特征, 分级结论可为后续关联研究与支护方案设计提供参考依据。

2.2 不同分级条件下围岩应力分布与变形特征

围岩稳定性分级直接控制开挖后应力重分布的空间形态与变形量值范围。I、II级完整硬质围岩开挖后多呈弹性状态, 二次应力场以切向应力集中为主, 拱顶与边墙压应力较高, 整体变形量极小, 拱顶沉降与水平收敛多控制在数毫米内。围岩级别降至III、IV级时节理裂隙更为发育, 自稳能力持续减弱, 开挖后塑性区范围持续扩张, 应力集中峰值由洞壁向深部岩体转移, 卸荷作用使拱顶及仰拱区域出现拉应力, 拱顶沉降与水平位移明显增大, 变形表现出显著不对称性。

围岩变形特性与支护需求存在较强的敏感性关联, 各级围岩开挖后的变形规律存在明显区别, 拱顶沉降、仰拱隆起与水平收敛可直观体现围岩稳定状况。自稳能力偏弱的破碎围岩变形数值大、持续周期长, 对初期支护的刚度、强度及施作时段均有严格要求。调整锚杆长度与钢拱架间距可直接改变围岩位移表现。对于V级围岩, 锚杆自2.5m增至4.0m时, 拱顶沉降与仰拱隆起分别缩减约6.12mm、6.58mm, 超出4.0m后控制效果逐步减弱, 呈现支护效能边际递减(见图1)。钢拱架间距自0.5m扩大至1.5m, 拱顶沉降增幅由1.4mm升至4.91mm, 其变形敏感度高于仰拱区域, 水平位移同样随间距增大持续上升。此类变形响应特征明确了支护参数与围岩控制间的量化联系, 可为支护强度的合理选取提供数据支撑。

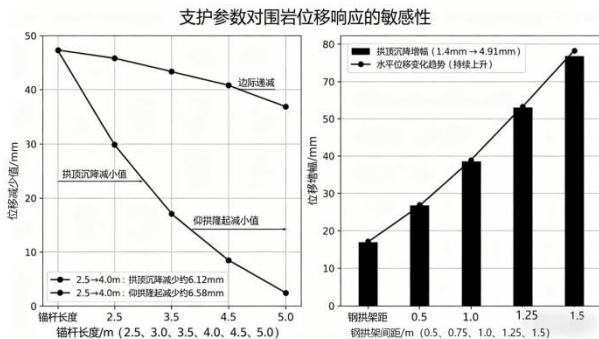


图1 支护参数对围岩位移响应的敏感性分析曲线

3 初期支护参数与围岩分级匹配的优化方法

3.1 锚杆长度与围岩变形控制效果的匹配关系

锚杆长度选取需依据围岩分级与变形控制成效匹配确定。IV级围岩结构面发育但保有一定承载能力, 锚杆长度选用3.0m~3.5m即可, 锚固端可穿过松动区域进入完整岩体, 抑制拱顶沉降与水平收敛。V级围岩破碎松散且塑性区范围较大, 锚杆长度需提升至4.0m~4.5m, 使锚固段处于承载区域, 发挥

深部岩体承载作用。数值计算显示, 锚杆长度由2.5m增至4.0m, 拱顶沉降与仰拱隆起分别降低约6.1mm、6.6mm, 延伸至5.0m后变形控制效果放缓, 支护成本每平方米上升约45元。V级围岩采用4.0m锚杆可兼顾控制成效与工程效益, IV级围岩选取3.0m~3.5m锚杆即可满足稳定需求。长度偏短锚固端难以脱离塑性区域, 无法实现有效加固, 过长则造成材料损耗, 对应力调控作用有限。

3.2 钢拱架间距对围岩位移响应的分级调控作用

针对不同围岩级别, 调整钢拱架间距可实现对隧道位移响应的分级控制。对于V级软弱破碎围岩, 其自稳能力差, 开挖后围岩变形速度快、总量大, 需采用0.5m~0.75m的密排钢拱架, 通过高刚度支撑体系及时约束拱顶沉降与水平收敛, 抑制塑性区扩展。随着围岩级别提升至IV级, 围岩强度与完整性有所改善, 钢拱架间距可放宽至1.0m~1.25m, 此时拱顶沉降与仰拱隆起增幅较小, 水平位移亦处于可控范围, 支护系统主要发挥协同承载作用, 避免过度刚化导致支护成本攀升。当间距进一步增大至1.5m时, 拱顶沉降增幅显著变大, 而仰拱隆起变化趋于平缓, 表明钢拱架间距对拱顶位移的敏感性高于仰拱。

3.3 综合考虑安全与成本的支护参数分级优化策略

针对不同围岩级别, 建立以安全阈值为首要约束、以全寿命成本为寻优目标的支护参数分级优化策略。对于I、II级稳定围岩, 以最小支护准则控制初期参数, 仅配置系统锚杆与低强度喷射混凝土, 利用围岩自承能力将成本降至最低。对于III、IV级围岩, 引入变形控制指标与支护成本函数的耦合模型, 通过数值试验对比不同锚杆长度、钢架间距下的位移响应, 选取满足拱顶沉降与水平收敛限值且单位延米成本最低的参数组合^[3]。对于V级及以上软弱破碎围岩, 以施工安全为绝对优先, 采用强支早撑原则, 在允许变形范围内优先选用密排钢拱架与长锚杆组合, 同时引入动态反馈机制, 依据现场监测数据反演调整参数, 避免过度支护导致的成本浪费。各分级优化策略均以定量判据替代经验类比, 实现安全与成本的双目标协同控制。

4 围岩分级与支护参数合理匹配的实现路径

4.1 基于位移响应的分级支护参数优选流程

该流程以隧道开挖后实测的围岩位移数据作为核心判别依据, 建立位移量与支护强度的动态对应关系。通过现场监控量测获取拱顶沉降和周边收敛等位移响应值, 将其与预设的位移分级阈值进行比对, 初步判定当前围岩所处的实际稳定状态^[4]。依据判定结果, 从预置的支护参数数据库中调用与该位移等级相匹配的初期支护方案, 涵盖锚杆长度、钢拱架间距及喷射混凝土厚度等关键参数。对初选方案开展数值模拟力学响应验算, 重点分析支护后围岩的位移控制效果与塑性区分布范

围。若模拟结果显示位移收敛值仍超出安全控制标准,则按预设步长逐级提升支护强度,直至满足变形控制要求。

4.2 数值模拟与工程类比相结合的匹配验证方法

公路隧道围岩分级与支护参数的合理匹配,可采用数值模拟与工程类比相结合的方式完成验证优化。依据隧道围岩级别及弹性模量、黏聚力、内摩擦角等物理力学参数构建三维有限元模型,模拟锚杆长度、钢拱架间距、喷射混凝土厚度等不同支护方案下的围岩应力分布与拱顶沉降、水平收敛等变形响应,通过计算得到围岩主应力大小与塑性区分布等关键指标,定量评价支护结构对围岩变形的管控效能。收集相近地质条件与围岩等级下既有隧道的支护案例及现场监测信息,建立工程类比数据库,将数值模拟得出的位移与应力结果同同类工程实测状况比对,判定支护参数取值是否合理^[5]。当模拟结果与类比工程数据偏差较大时,可调整支护参数再次开展计算分析,直至二者吻合程度较高,在缺少现场实测数据的前提下完成支护参数的科学校验与优化设计。

4.3 分级匹配原则指导下初期支护参数确定方法

结合围岩级别对应的变形破坏模式,依据分级匹配原则选取初期支护参数,量化结合岩体自承能力与支护结构力学响

应。I、II级围岩重点管控局部块体稳定,锚杆依据结构面及块体参数布设,喷射混凝土以封闭岩面、抵御风化为主,厚度5~8cm。III级围岩围岩整体稳定、局部产生塑性区,锚杆长度2.5~3.5m以穿越松动圈,间距1.0~1.2m,喷射混凝土厚度10~15cm,钢拱架仅在地应力较高、节理发育段局部设置。IV、V级围岩软弱破碎、变形大且自稳能力差,需支护具备强约束与闭合刚度,锚杆长度4.0~5.0m深入弹性岩体,环向间距加密至0.8~1.0m,搭配钢筋网形成系统支护,喷射混凝土厚度20~28cm,与钢拱架共同组成承载拱,拱架间距0.5~1.0m。支护参数可通过数值模拟反演位移释放率与支护刚度适配关系,结合现场监测动态调整,实现各等级围岩最优支护效果。

5 结语

分级匹配原则为公路隧道围岩稳定性控制提供了从定性分级到定量支护的科学路径。研究表明,围岩变形特性是连接分级与支护参数的核心纽带,锚杆长度与钢拱架间距对位移响应的控制效果存在显著敏感性差异。通过建立基于位移响应的参数优选流程,并结合数值模拟与工程类比的交叉验证,可实现I~V级围岩条件下支护刚度的合理配置。该方法将围岩自承能力与支护结构力学响应定量关联,兼顾施工安全与工程造价,为动态设计与信息化施工提供了可操作的技术支撑。

参考文献:

- [1] 洪高阳,蔡海兵,姚方兴,等.公路隧道穿越断层破碎段的围岩稳定性分析[J].低温建筑技术,2024,46(10):101-105.
- [2] 陈家征,李忠,韩场.公路隧道正交下穿边坡与软弱夹层围岩稳定性分析[J].河北工程大学学报(自然科学版),2023,40(04):74-81.
- [3] 林波,邝健驹,黄丽霞.大断面公路隧道进洞段围岩稳定性分析[J].市政技术,2022,40(04):111-117.
- [4] 高情义,李燕红.不同开挖进尺下公路隧道围岩稳定性分析[J].中国公路,2021,(19):108-109.
- [5] 李坤.公路隧道监控量测及围岩稳定性的探究[J].工程建设与设计,2021,(13):82-84+108.