

公路隧道软弱围岩段初期支护开裂与掉块病害成因分析及防控技术研究

朱文科

新疆生产建设兵团交通建设有限公司 新疆 石河子 832017

摘 要: 软弱围岩公路隧道施工易出现初期支护开裂、掉块病害, 严重威胁工程施工及运营安全。本文依托现场调研, 总结病害的形态特征与时空发育规律, 从地质条件、工程设计、施工工艺及监测管控维度剖析病害形成机理。针对性构建前置防控、支护优化、病害分级处置的成套技术体系, 经工程实践验证, 该体系可有效控制围岩变形, 提升支护结构稳定性, 可为同类隧道病害治理提供技术借鉴。

关键词: 公路隧道; 软弱围岩段; 初期支护开裂; 掉块病害成因; 防控技术

引言: 随着山区公路隧道工程持续建设, 软弱围岩地层施工难题愈发突出。软弱围岩自稳能力差、流变特性显著, 受施工扰动、地下水及构造应力影响, 初期支护极易产生开裂、掉块等病害。现阶段相关病害防控手段较为零散, 缺乏系统性、针对性的技术方案, 难以有效规避工程风险。为此本文开展病害成因与防控技术研究, 旨在完善软岩隧道支护防控体系, 保障隧道施工安全与结构质量。

1 公路隧道软弱围岩隧道初支开裂与掉块病害特征及发育规律

1.1 软弱围岩工程特性分析

(1) 软弱围岩基本物理力学特性: 软岩强度低、孔隙率大、黏聚力弱、抗变形能力差等基本特性显著, 围岩自稳能力极差, 应力释放具有非线性、时空效应强等规律, 开挖后易发生较大变形。(2) 软弱围岩特殊工程特性: 软岩遇水易软化膨胀, 干湿循环条件下力学性能劣化明显; 具有显著的时间效应流变特性, 围岩变形随时间持续增长; 在构造应力作用下, 软弱结构面易发生滑移变形, 对初期支护结构产生较大的挤压和剪切作用, 导致支护结构受力恶化。

1.2 初支病害类型及形态特征

(1) 初期支护开裂病害: 按形态可划分为纵向裂缝(多发生于拱顶及拱腰, 走向与隧道轴线平行)、横向裂缝(多发生在隧道围岩变化处)、斜向裂缝(与隧道轴线呈一定夹角, 常见于偏压段)及网状裂缝(表面龟裂状分布)。不同裂缝的分布位置、发育形态与损伤程度各异, 纵向裂缝往往反映围岩压力过大, 斜向裂缝多与偏压或滑移有关。(2) 初期支护掉块病害: 包括浅层混凝土剥落(保护层脱落, 拱架外露)、局部块状掉块

(呈楔形或扇形脱落, 多发生在节理发育区)及大面积坍塌式掉块(支护结构整体失稳, 破坏形式剧烈)。三类病害的发育特征分别为: 浅层剥落以表层损伤为主, 块状掉块涉及局部结构破坏, 大面积掉块则表现为系统性的支护失效^[1]。(3) 复合型病害: 开裂伴随掉块、钢架扭曲变形耦合混凝土破损等复合型病害较为常见, 其发育特征表现为裂缝扩展—掉块加剧—钢架变形三者相互促进的恶性循环。依据病害影响范围和结构损伤程度, 可将病害损伤等级划分为轻微(表层开裂)、中等(局部掉块、钢架轻微变形)和严重(大面积掉块、钢架严重变形)三个等级。

1.3 病害现场调研与发育规律分析

(1) 调研工程概况: 选取典型软弱围岩公路隧道开展系统调研, 收集工程地质条件(岩性、构造、地下水等)、支护设计参数(锚杆间距、喷射混凝土厚度、钢架型号等)、施工工艺(开挖方法、支护时机等)及病害分布概况等基础资料。(2) 病害空间分布规律: 统计表明, 拱顶和拱腰是病害最为集中的部位, 节理发育带及断层破碎带等区段病害显著高发。边墙部位病害相对较少。断层破碎带影响段病害密度较正常围岩段高出数倍, 是病害防控的关键区段。(3) 病害时间演化规律: 病害在隧道开挖后初期快速萌生, 支护成环后发展趋缓, 但受围岩流变影响, 在后续施工阶段(如二次衬砌施作前)仍持续发展甚至恶化。监测数据显示, 初支变形速率超过5mm/d时, 开裂与掉块风险显著增加, 病害演化具有明显的阶段性特征。

2 公路隧道软弱围岩隧道初期支护开裂与掉块病害成因及机理分析

2.1 围岩地质内在成因

(1) 岩体结构缺陷影响: 围岩节理、裂隙、软弱夹层发育, 岩体完整性差, 开挖后应力重新分布, 易产生局部应力集中, 导致初支结构受力不均, 局部点或面承受过大压应力或剪应力, 进而引发开裂与掉块。(2) 水文地质条件影响: 地下水渗透、浸泡软化围岩, 降低岩体力学参数(如黏聚力、内摩擦角), 增大围岩松弛荷载; 同时地下水中的侵蚀性介质对喷射混凝土产生化学侵蚀, 造成混凝土强度劣化、黏结力下降, 加剧结构损伤。(3) 构造应力与流变作用: 深埋软岩隧道构造应力水平较高, 围岩在高应力环境下表现出显著的流变特性, 变形随时间持续增长, 长期挤压初期支护结构, 当累计变形量超出结构承载极限时, 即引发弯折断裂、压溃掉块等破坏病害。

2.2 工程设计缺陷成因

(1) 围岩等级判定偏差: 勘察阶段受钻探手段局限性及岩样代表性不足等因素影响, 对软弱围岩等级划分、力学参数取值判定不够准确, 往往低估围岩实际变形压力, 导致支护参数设计偏弱, 安全储备严重不足, 结构在服役初期即处于超负荷状态。(2) 支护体系设计不合理: 锚杆、钢拱架、喷射混凝土等支护构件参数匹配不当, 整体支护刚度与强度不足, 预留变形量设置不合理, 未能充分考虑软岩大变形特性, 无法有效约束围岩持续变形发展, 导致围岩压力全部传递至初支结构^[2]。

(3) 支护时序与方案欠缺: 设计阶段未针对软岩段制定完善的超前支护、快速封闭成环专项方案, 支护施工时序安排不合理, 未能适应软岩来压快、变形大的工程特点, 导致初支结构在关键施工阶段即承受超量荷载, 为后期病害埋下隐患。

2.3 施工工艺与质量成因

(1) 开挖施工扰动过大: 软弱围岩段采用不合理开挖工法(如大断面一次开挖), 爆破参数控制不当(超挖、欠挖严重、炸药用量过大), 对围岩产生过度扰动, 加剧了岩体破碎程度与应力松弛范围, 增大了初支结构承受的松动荷载, 使支护结构从一开始便处于不利受力状态。(2) 初期支护施工质量缺陷: 喷射混凝土厚度不足、密实度差、回弹率过高, 锚杆锚固不饱满、长度不足、角度偏差, 钢拱架安装偏差、连接板贴合不密实、焊接质量不达标等施工问题直接削弱了初支结构的承载能力与整体性, 降低结构安全储备。(3) 施工工序管控不规范: 支护施作严重滞后(未及时喷射混凝土封闭岩面), 仰拱封闭成环不及时, 工序步距超标, 导致围岩自由变形时间过长, 初支结构被迫承受超出设计能力的超额荷载, 加速结构损伤进程。

2.4 外部环境与管理管控成因

(1) 外部环境扰动: 季节性降雨、地下水位动态变化、邻近工程施工爆破振动等外部因素, 加剧了围岩与支护结构的损伤劣化过程, 诱发或加速了病害发展, 使原本处于临界稳定状态的结构提前发生破坏。(2) 监控量测预警缺失: 监测点布设不合理、数据采集频率不足、信息反馈滞后, 预警机制不完善, 未能及时识别围岩变形异常与初支受力突变, 错失了病害干预的最佳时机, 导致病害从微小缺陷发展为结构性破坏。(3) 病害处置不及时: 对初期出现的微小开裂、局部剥落等病害重视不足, 未采取及时有效的处置措施, 致使微小缺陷持续扩展演化, 最终发展为大面积掉块、结构贯穿开裂等严重病害, 增加了后期处治难度与工程风险。

3 公路隧道软弱围岩隧道初期支护病害防控技术体系与工程应用

3.1 病害前置防控技术

(1) 精细化地质超前预报技术: 采用TSP地震波探测、地质雷达扫描、超前水平钻探等综合预报手段, 对掌子面前方软弱围岩分布范围、地下水赋存状况及断裂破碎带延伸情况进行精准探测与相互验证, 及时更新围岩分级信息, 准确识别不良地质区段, 为动态调整支护方案提供可靠地质依据, 从源头规避病害发生风险。

(2) 优化开挖与支护工法: 根据软岩等级及变形潜力, 合理选用超短台阶法(台阶长度控制在3~5m)、CD法或双侧壁导坑法等分部开挖工法, 严格控制循环进尺(软岩段控制在1榀), 减少开挖对围岩的过度扰动; 严格遵循“短开挖、强支护、快封闭”施工原则, 最大限度缩短围岩暴露时间, 有效抑制围岩变形快速发展^[3]。(3) 超前预加固防控技术: 采用超前小导管注浆(注浆压力0.5~1.5MPa, 保持10min以上)、超前管棚支护等预加固措施, 对前方松散围岩进行预固结, 封堵地下水渗流通道, 改善围岩力学性能, 提升围岩整体自稳能力, 为后续开挖与支护创造有利条件。

3.2 初期支护结构优化技术

(1) 支护参数分级匹配优化: 针对软弱围岩大变形, 建立“变形速率-支护刚度”动态匹配准则, 根据现场量测数据按变形等级差异化选取喷射混凝土厚度(25~35cm)与强度(C25~C30), 锚杆采用拱顶加密、边墙加强的非均匀布设(间距0.8~1.0m, 长度3.5~5.0m), 钢拱架选用I18~I22工字钢并加密至0.5~0.8m, 预留变形量据蠕变试验动态调整(15~25cm), 实现“抗让结合”的刚度优化, 避免刚度不足或过度冗余。(2) 多构件协同承载优化: 构建超

前预加固+系统锚杆+钢筋网+钢拱架+喷射混凝土联合体系,将被动叠加转为主动协同,着重优化受力传递路径与协同时机。锁脚锚杆增设钢垫板及U型连接筋与拱脚刚性铰接,强化抗剪-抗拉双向约束;优化超前预加固与初支工序衔接,匹配各构件强度增长速率,避免薄弱环节先行屈服,充分发挥整体协同承载效应,增强结构整体性^[4]。(3)仰拱封闭成环优化:将仰拱距离控制优化为“变形速率-封闭时机-强度增长”联动控制,软岩段仰拱与掌子面间距控制在40m以内,优化早强速凝混凝土配合比及早强剂掺量,缩短强度达设计值70%的龄期,及早实现全环封闭,有效避免边墙脚部应力集中与纵向开裂,防止仰拱滞后引起的结构损伤,保障长期稳定性。

3.3 既有病害处置与加固技术

(1)轻微开裂病害处置:针对宽度小于0.5mm的表面细微裂缝,采用环氧树脂涂刷封闭或水泥基渗透结晶材料抹涂处理;对于宽度0.5~2.0mm的裂缝,采用低压注浆法灌注改性环氧树脂或水泥-水玻璃浆液,修复混凝土裂缝并防止水分渗入引发钢筋锈蚀与裂缝进一步扩展。

(2)中度破损病害加固:针对局部开裂、小范围掉块(深度小于喷射混凝土厚度1/2)区域,首先凿除松动混凝土并清理基面,然后施作锚杆补强(间距1.0~1.2m),挂设钢筋网并复喷C25以上混凝土至设计厚度;对于局部钢架轻微变形段,增设纵向连接筋,有效恢复结构承载能力^[5]。(3)严重病害专项处置:针对大面积贯穿开裂、大面积坍塌式掉块、钢架严重扭曲失稳等严重病害,首先施作临时钢支撑或型钢立柱应急支顶确保施工安全,然后分幅拆除破损钢架与松散混凝土,实施换拱加固并辅以深层系统注浆(注浆压力0.5~2.0MPa,注浆深度3.0~5.0m),彻底消除结构安全隐患。

3.4 工程应用与效果验证

(1)工程应用方案:依托某典型软弱围岩公路隧道(全长约2.5km,软岩段占比约40%)作为工程应用对象,根据不同区段围岩等级及病害发育程度,分区段制定差异化防控与处置施工方案,详细明确各工序施工工艺、质量控制要点及验收标准,确保技术体系的可操作性与可追溯性。(2)现场监测效果分析:系统布设围岩收敛测点、拱顶沉降测点、初支应力计及锚杆轴力计等

监测元器件,变形较大段加密监测频率至每日1~2次。通过对防控处置前后监测数据的系统对比,防控措施实施后拱顶沉降速率由处置前的8~12mm/d降至1.5~3.0mm/d,周边收敛速率由6~10mm/d降至1.0~2.5mm/d,初支应力分布趋于均匀,围岩变形与结构受力得到有效控制,表明支护体系与围岩进入了协调工作状态。(3)应用效果评价:综合现场监测数据、施工质量检验结果与病害发生频率统计,对本防控技术体系的可行性与有效性进行系统评价。结果表明,该体系对软弱围岩隧道初支开裂与掉块病害具有显著的防控效果,实施后未再发生严重病害事件,结构服役状态良好,经济社会效益显著。总结施工关键技术要点包括:地质预报精准先行、开挖支护快速封闭、参数设计动态匹配、监测预警全程管控,可为类似软弱围岩隧道工程提供技术参考。

结束语

本文系统研究了软弱围岩隧道初支开裂与掉块病害问题,厘清了病害发育规律与多维度成因机理,搭建了全流程病害防控技术体系。通过实际工程应用检验,整套技术可有效遏制病害发展,优化围岩与支护结构受力状态,显著提升隧道施工质量。研究总结的核心施工技术要点,能够为山区软弱围岩隧道工程的病害防控、安全施工提供可靠的理论与实践支撑。

参考文献

- [1]王俊杰,张帅.基于超前应力释放与注浆加固的隧道围岩大变形控制分析[J].西南交通大学学报,2025,60(06):1362-1372.
- [2]刘晓龙,孙闯,王慧,等.含断层偏压隧道围岩变形机理及支护方案优化[J].中国地质灾害与防治学报,2025,36(01):108-118.
- [3]渠建伟,胡涛.不良地质条件新建隧道初支侵限及二衬开裂处治研究[J].路基工程,2025,24(04):232-236.
- [4]许万敏,徐佳信,徐金峰,等.深埋偏压公路隧道非对称大变形控制技术及其初期支护优化[J].隧道建设(中英文),2024,44(S2):435-442.
- [5]张云冬,吴玉涛,王浩.山岭隧道施工期物元理论和块体理论掉块风险评价方法研究[J].中国地质灾害与防治学报,2025,36(02):92-99.