

高速隧道软弱围岩开挖支护施工技术研究

朱 健

(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 610200)

摘 要 针对川西北高原山区软弱围岩隧道施工易出现坍塌、大变形、涌水突泥等技术难题, 依托川汶高速 TJ9 标段隧道工程, 分析了项目软弱围岩段的工程地质特征与施工风险, 系统研究了上下台阶预留核心土开挖工法、初期支护体系、二次衬砌及防排水等关键施工技术, 明确了各工序的质量控制要点与安全保障措施。工程实践表明, 该技术体系有效控制了围岩变形, 保障了隧道施工安全与结构质量, 可为同类山区软弱围岩隧道工程提供参考。

关键词 川汶高速; 软弱围岩; 隧道开挖; 支护施工; 光面爆破

中图分类号: U455.7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.029

0 引言

隧道是穿越复杂地形地质条件的核心构筑物。川西北地区地质构造复杂, 断裂带发育, 隧道工程多穿越 IV、V 级软弱围岩, 岩体破碎、自稳能力差, 施工中极易发生拱顶坍塌、围岩大变形、涌水突泥等工程灾害, 开挖与支护施工成为控制隧道工程安全与质量的关键。本文依托川汶高速大店隧道、穆肃堡隧道工程, 针对软弱围岩段的工程特点, 开展开挖支护施工技术研究, 总结形成适配于该类地质条件的施工工艺与控制措施, 为同类工程提供实践参考。

1 工程概况

川汶高速 TJ9 标段位于四川省阿坝州茂县境内, 标段核心工程为大店隧道与穆肃堡隧道, 两座隧道均为公路双线隧道, 设计行车速度 80 km/h。隧道施工严格遵循新奥法原理, 针对软弱围岩段采用台阶法、上下台阶预留核心土法开挖, 配套复合式衬砌支护体系^[1]。

隧道施工内容涵盖洞身开挖、初期支护、仰拱与填充、二次衬砌、防排水、洞门及附属工程等全流程工序, 其中 IV、V 级软弱围岩段占隧道总长度的 60% 以上, 洞口浅埋段、断层破碎带、富水软岩段为项目施工的重难点, 对开挖支护的精细化施工提出了极高要求。

2 软弱围岩隧道开挖施工关键技术

2.1 开挖工法选型与核心原则

结合本项目隧道软弱围岩的工程地质特征, 为最大限度降低开挖作业对围岩的扰动影响, 摒弃全断面开挖等围岩扰动程度高的施工工法, 针对不同围岩等

级实施差异化工法选型: 主洞软弱围岩段优先采用台阶法施工, 围岩条件极差的 V 级围岩段, 采用上下台阶预留核心土法组织施工。

本次工法选型与施工全过程, 核心遵循“减少围岩扰动、严控开挖进尺、及时封闭成环”三大基本原则^[2]。其中, 台阶法将隧道断面划分为上台阶、下台阶及仰拱三部分实施分步开挖, 通过分步作业减小单次开挖临空面, 严格将上台阶长度控制在 3 m ~ 5 m, 避免因台阶过长造成围岩暴露时间超标、扰动范围扩大的问题; 上下台阶预留核心土法则采用拱部环形开挖、预留核心土的作业方式, 依托核心土对掌子面的反压作用实现掌子面自稳, 施工中严格控制核心土面积不小于隧道开挖断面总面积的 50%, 可显著降低软弱围岩段掌子面失稳、坍塌的施工风险^[3]。

2.2 上下台阶预留核心土法施工工艺

上下台阶预留核心土法标准化施工流程如下: 施工准备→上台阶拱部环形开挖→拱部初期支护施作→上台阶核心土开挖→下台阶左右侧交错开挖→下台阶边墙初期支护施作→仰拱开挖与支护封闭→仰拱填充与二次衬砌施作。

施工全过程执行严格的工序管控与参数约束, 核心控制要点如下: (1) 循环进尺刚性管控: IV 级围岩段单循环开挖进尺不得大于 3 榀钢架设计间距, V 级围岩段单循环开挖进尺不得大于 2 榀钢架设计间距, 严禁超进尺开挖。(2) 上台阶作业时时效管控: 上台阶拱部环形开挖完成后, 第一时间开展找顶排险作业, 彻底消除拱部及掌子面危石风险, 并必须在 4 小时内完成工字钢架设、锁脚锚杆打设、钢筋网铺设及喷射

作者简介: 朱健 (1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 道路与桥梁。

混凝土封闭的全流程初期支护作业；上台阶核心土及下台阶开挖作业，必须待上台阶初期支护喷射混凝土强度达到设计强度的70%后方可启动^[4]，杜绝超前开挖、支护未达标即进入下道工序的违规作业。（3）下台阶作业与支护闭合管控：下台阶严格采用左右侧交错开挖、交错支护的作业方式，严禁两侧同时落底开挖，单次开挖进尺不得超过3榀钢架设计间距；单段开挖完成后立即同步施作边墙初期支护，确保支护结构快速闭合成环，最大限度缩短围岩无支护裸露时长，充分发挥初期支护的承载作用，有效控制围岩变形。

2.3 光面爆破精细化控制

隧道岩石段软弱围岩开挖采用预裂光面爆破技术，最大限度降低爆破作业对围岩的扰动。炮眼布置根据围岩岩性动态调整，周边眼间距控制在40 cm~50 cm，周边眼与隧道轮廓线的距离根据岩层水平情况优化，避免炮孔直接破碎岩体。钻眼作业选用经验丰富的专业人员施工，严格控制钻孔角度与深度，周边眼开眼误差不大于3 cm，角度偏差不大于5°。此外，爆破参数采用“多打眼、少装药”的弱爆破原则，周边眼采用不耦合装药结构，严格控制单段装药量，降低爆破振动速度。

表1 隧道软弱围岩段主要支护设计参数

支护项目	IV级围岩段	V级围岩段
喷射混凝土	C25湿喷混凝土，厚度22 cm	C25湿喷混凝土，厚度25 cm
钢筋网	Φ8钢筋，网格间距20 cm×20 cm，单层	Φ8钢筋，网格间距20 cm×20 cm，双层
型钢钢架	I20b工字钢，间距1.0 m	I22b工字钢，间距0.6 m
系统锚杆	Φ22药卷锚杆，长度3.0 m，间距1.2 m×1.0 m	Φ22药卷锚杆，长度3.5 m，间距1.0 m×0.6 m
锁脚锚管	Φ42无缝钢管，长度3.0 m，每榀4根	Φ42无缝钢管，长度3.5 m，每榀4根
超前支护	Φ42超前小导管，长度3.5 m，环距40 cm	Φ42双层超前小导管，长度4.5 m，环距40 cm

喷射混凝土采用湿喷工艺，优先选用混凝土湿喷台车作业，受限地段采用小型湿喷机。原材料严格控制，水泥选用P.042.5普通硅酸盐水泥，粗集料最大粒径不大于12 mm，速凝剂采用液体型。喷嘴与岩面保持垂直，距离控制在0.8 m~1.2 m，确保混凝土密实，与围岩密贴，钢架背后必须喷射饱满，严禁出现空洞^[6]。

型钢钢架在洞外加工厂分节加工，1:1放样试拼合格后运至洞内安装，节段间采用高强螺栓连接，安装时严格控制中线、高程与垂直度，相邻钢架采用Φ22纵向连接筋焊接，环向间距1.0 m，内外交错布置。钢筋网应依据受喷表面的几何形态进行灵活布局，确保其与锚杆及初支钢架的有效连接，并满足搭接长度不小于一个网格间距的技术规范。在实施系统锚杆和锁

2.4 开挖施工防坍塌控制措施

针对软弱围岩坍塌风险，施工中采取四项核心防控技术措施：一是通过部署超前地质探测设备，在掌子面前方30 m~100 m区域采用TSP地震波反射法、地质雷达以及超前水平钻孔等综合监测手段，全面排查潜在的不良地质状况；对存在断层破碎带或富水区段的区域，则需实施超前小导管注浆加固等针对性工程防护举措；二是及时初喷封闭围岩，隧道开挖后立即喷射4 cm厚混凝土封闭岩面，防止围岩风化与掉块，填充围岩裂隙，提升围岩自稳能力^[5]；三是增强锁脚锚管支护效果，弱化系统锚杆设置，针对软弱围岩锚杆锚固效果差的问题，重点强化锁脚锚管施工，严控锚管长度、角度与注浆质量，与钢架可靠焊接；四是加快循环施工进度，优化各工序衔接，严格控制开挖、支护、衬砌各工序的步距，尽早实现支护结构封闭成环。

3 软弱围岩隧道支护施工关键技术

3.1 初期支护体系施工技术

本项目隧道软弱地层区域的初期支护体系，采用“喷射混凝土结合钢筋网片、钢构件支撑及锚杆（或锁脚锚杆）”协同作用的综合防护技术，各工序施工严格遵循设计与规范要求，核心支护参数见表1。

脚锚管作业时，需重点保证钻孔精确度，同时优化注浆工艺的质量，达到密实饱满的效果。仅当锁脚锚管内砂浆强度达到设计值70%以上时，方可推进下一工序的爆破开挖操作。

3.2 二次衬砌施工控制要点

本工程二次衬砌施工选用C35等级防水混凝土材料，并确保抗渗性能不低于P8标准。为保障工程质量与工艺连贯性，采用全液压整体式衬砌台车进行连续化作业，设备全长设计为12 m，模板最小厚度须达到10 mm及以上。依据围岩监控量测数据判定最佳施作时机：在围岩位移趋于稳定时及时开展；对于软弱地层，则应优先封闭结构以提升整体稳定性。

钢筋在加工车间完成批量预制后运输至现场，主

筋间距的偏差值须严格控制在 ± 10 mm 范围内, 两层钢筋间距的允许误差应维持在 ± 5 mm 以内。为保证保护层厚度准确无误并符合设计规范, 采用专用定型模具进行定位固定, 并按照梅花状均匀布置垫块, 其最大间距不宜超过 1.5 m。在混凝土浇筑阶段, 借助泵送机械将料浆导入模板内部, 依据“分层分区、对称同步、逐步推进”的工艺流程实施操作, 每层摊铺高度不得超过 40 cm, 相邻区域表面高程差应控制在 1.0 m 之内。施工期间结合使用插入式与附着式振捣器, 以全面提升新拌混凝土的密实度及力学性能。

拱顶浇筑作业建议运用分段推进式压注法施工, 并设置不少于三个纵向浇筑分区及四个内置注浆孔。为有效防控拱顶空洞缺陷, 应在构件脱模前完成预设带模注浆工序。根据规范要求, 混凝土终凝后应立即开展保湿养护操作, 其中主体结构养护期须达到 7 天以上, 而洞口区域则需延长至 14 天及以上; 在此期间, 务必保证混凝土表面持续保持充分湿润状态以维持最佳性能指标。

表 2 隧道初期支护施工实测项目及允许偏差

项次	检查项目	规定值或允许偏差	检查方法与频率
1	喷射混凝土强度	在合格标准内	每 10 m 留置 1 组试块, 抗压强度试验
2	喷射混凝土厚度	90% 检查点 $\geq$ 设计厚度, 最小厚度 ≥ 0.5 设计厚度	每 10 m 一个断面, 地质雷达连续检测
3	钢架间距	± 50 mm	尺量, 每榀钢架检查
4	钢架保护层厚度	≥ 20 mm	尺量, 每 20 m 检查 3 处
5	锚杆孔位	± 150 mm	尺量, 抽查 10%
6	锚杆孔深	± 50 mm	尺量, 抽查 10%

施工中一定要实行“三检制”, 班组自检、工区复检、项目部专检合格后报监理验收, 未经验收严禁进入下一道工序。针对喷射混凝土厚度不足、背后空洞、锚杆注浆不饱满、钢架安装偏差等质量通病, 制定专项防治措施, 加强过程管控。同时, 通过监控量测动态反馈支护效果, 关键监控参数涵盖隧道内外的地质状况、围岩位移、拱顶沉降及地表形变等重要指标。量测频率根据变形速率动态调整, 当变形速率超过 5 mm/d 时启动预警, 及时采取补强支护措施, 确保支护体系安全稳定。

4 结束语

本文依托川汶高速隧道工程, 针对高原山区软弱围岩的工程特性, 系统研究了隧道开挖与支护施工的关键技术, 通过优化开挖工法、强化初期支护体系、严控二次衬砌与防排水施工, 形成了适配于该类地质条件的成套施工工艺。该工程案例实践有效控制了围岩变形, 杜绝了坍塌、突泥等灾害, 保障了施工安全

3.3 防排水系统施工技术

隧道防排水采用“防水板+止水带+排水盲管”的复合防排水体系。拱墙背后设置 FH50 环向软式透水管, 纵向间距 10 m, 集中出水点加密设置; 边墙脚设置 DN100 纵向打孔双壁波纹管, 外裹无纺布; 横向排水管采用 DN100 双壁波纹管, 间距 10 m, 将汇水引入中央排水沟。

本项目防水系统采用 1.5 mm 厚 EVA 高分子材料, 搭配 350 g/m² 无纺布, 运用无钉搭接配合双焊缝热熔焊接技术进行施工。施工过程中严格控制搭接区域与焊缝宽度, 并通过充气测试验证其性能是否达标; 对于施工缝及变形缝等特殊节点, 则选用中埋式与背贴式复合橡胶止水带, 利用热熔对接工艺实施精准安装, 以增强结构的整体防渗效果并确保可靠性。

3.4 支护施工质量控制措施

针对软弱围岩隧道支护施工的质量通病, 项目建立全过程质量管控体系, 明确各工序质量验收标准, 核心实测项目及允许偏差见表 2。

与结构质量。针对软岩大变形的长期演化规律、支护参数动态优化等问题, 仍需结合现场监测数据开展进一步研究, 持续完善软弱围岩隧道施工技术体系。

参考文献:

- [1] 毛立厦. 软弱围岩隧道开挖支护优化与施工安全风险管控 [J]. 科技创新与生产力, 2025, 46(10): 81-84.
- [2] 梁亚东. 高速公路软弱围岩隧道施工技术应用分析 [J]. 交通科技与管理, 2025, 06(09): 61-63.
- [3] 王磊. 隧道软弱围岩大断面开挖支护施工工艺研究 [J]. 中华建设, 2025(02): 163-165.
- [4] 焦治豪. 富水软弱围岩浅埋小净距隧道开挖稳定性及方案优化研究 [D]. 洛阳: 河南科技大学, 2024.
- [5] 林航. 软弱围岩大断面隧道开挖支护施工技术及应用 [J]. 运输经理世界, 2023(33): 89-91.
- [6] 熊安正. 隧道软弱围岩大断面开挖支护施工工艺研究 [J]. 工程技术研究, 2023, 08(17): 23-25.