

公路隧道软弱围岩段机械开挖防坍塌施工技术优化

姚顺治

(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 针对公路隧道软弱围岩段采用传统爆破开挖扰动大、易引发拱顶坍塌、掌子面失稳等工程难题, 本文依托四川川汶高速穆肃堡隧道工程, 聚焦软弱围岩段机械开挖施工核心场景, 系统分析了机械开挖模式下隧道坍塌事故的核心诱因, 从开挖工法、设备选型、工序协同、动态管控四个维度开展防坍塌施工技术优化研究。结果表明, 优化后的机械开挖施工体系可最大限度降低对围岩的扰动, 实现“开挖—支护—封闭”全流程高效衔接, 有效控制围岩收敛与拱顶下沉, 旨在为西南山区同类型软弱围岩隧道机械开挖安全管控提供参考。

关键词 公路隧道; 软弱围岩; 机械开挖; 防坍塌施工技术

中图分类号: U455.41

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.015

0 引言

随着我国西南山区高等级公路网的持续完善, 深埋长隧道成为山区公路建设的关键控制性工程。软弱围岩具有岩体破碎、自稳能力差、遇水易软化泥化等特征, 传统爆破开挖方式易对围岩产生剧烈扰动, 大幅扩大围岩松动圈范围, 是诱发隧道坍塌、初支大变形等安全事故的重要原因。近年来, 以悬臂式掘进机、液压破碎锤为核心的机械开挖工艺, 凭借低扰动、高可控性的优势, 在软弱围岩隧道施工中得到广泛应用。但在实际施工中, 仍存在开挖工法不合理、设备选型与围岩特性不匹配、开挖与支护工序衔接脱节等问题, 未能充分发挥机械开挖的防坍塌优势, 坍塌风险依然突出。本文依托穆肃堡隧道工程, 系统分析机械开挖模式下软弱围岩段坍塌风险的核心诱因, 提出针对性的防坍塌施工技术优化措施, 以期为同类山区公路隧道工程提供实践依据。

1 工程概况

穆肃堡隧道为川汶高速 TJ9 标段控制性工程, 隧道设置 1# 施工支洞与 1 座施工斜井, 其中支洞总长 391 m, 纵坡 12.4 994%, 最大埋深 236 m; 斜井总长 1 673 m, 纵坡 5.2 835%, 最大埋深 1 168 m。隧道主洞与支洞、斜井交叉口段、洞口浅埋段、断层破碎带均以 IV、V 级软弱围岩为主, 岩体破碎、自稳能力极差, 传统爆破开挖易引发围岩失稳^[1], 因此设计阶段明确 IV、V 级软弱围岩段优先采用机械开挖工艺, 配套上

下台阶预留核心土法施工, 初期支护采用“喷射混凝土+型钢钢架+钢筋网+系统锚杆”联合支护体系, 二次衬砌采用 C35 防水钢筋混凝土。同时, 隧道为微瓦斯隧道, 施工过程中同时面临瓦斯防控、涌水突泥、软岩大变形等多重风险, 对机械开挖施工的精细化管理与防坍塌技术提出了极高要求。

2 机械开挖模式下软弱围岩段坍塌风险核心诱因

2.1 开挖工法与参数设计不当

机械开挖工法与参数设计不合理, 是引发围岩失稳坍塌的首要因素。部分施工环节未遵循“短进尺、分块开挖”的核心原则, 存在单次开挖进尺过大、台阶划分不合理的问题, 上台阶一次性开挖高度超过 5 m, 下台阶采用两侧同步开挖, 导致拱架悬空长度过大、支护体系无法及时闭合, 围岩应力持续释放引发失稳。同时, 核心土预留面积不足、掌子面开挖坡率过陡, 无法形成有效的掌子面反压, 极易发生掌子面溜塌事故^[2]。

2.2 开挖设备选型与操作不规范

设备选型与围岩特性不匹配、机械操作工艺不规范, 是造成围岩过度扰动、诱发坍塌的重要原因。针对破碎千枚岩、板岩地层, 若选用大扭矩、大切削量的掘进设备, 易造成掌子面与拱部围岩过度破碎, 扩大围岩松动圈范围; 若选用设备功率不足, 则会出现开挖循环时间过长、围岩暴露时间增加的问题, 同样提升坍塌风险。同时, 在机械操作过程中, 存在开挖轨迹控制不当、超挖欠挖严重的问题, 拱部超挖形成

作者简介: 姚顺治 (1988-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 道路与桥梁。

的空洞无法及时回填,易引发拱顶局部坍塌;欠挖则会导致钢架安装无法密贴围岩,形成支护体系受力缺陷,最终引发整体失稳^[3]。

2.3 开挖与支护工序衔接严重脱节

机械开挖与支护工序衔接不畅、封闭成环不及时,是机械开挖模式下隧道坍塌的核心诱因。相较于爆破开挖,机械开挖可实现逐榀进尺、精细化开挖,但现场施工中普遍存在“重开挖、轻支护”的问题,单次连续开挖多榀钢架间距后才集中开展支护作业,导致围岩暴露时间超过 12 h,软弱围岩在无支护状态下持续变形,最终引发失稳坍塌。同时,各工序之间未形成流水作业,开挖、找顶、初喷、钢架安装、锁脚锚管施作各环节衔接脱节,工序间隔时间过长,无法实现“开挖一榀、支护一榀、封闭一榀”的闭环管控。

2.4 全过程动态管控与应急保障缺失

机械开挖全过程的动态管控缺失,是坍塌事故发生的重要管理因素。传统监控量测模式存在量测频率不足、数据反馈不及时的问题,无法根据围岩变形数据动态调整机械开挖进尺、台阶长度等参数,导致施工参数与围岩实际状态不匹配,变形持续发展最终引发坍塌^[4]。同时,超前地质预报工作流于形式,未通过机械开挖过程中的地质编录精准探明前方不良地质体,无法提前调整开挖工法与预加固措施,易引发突发坍塌事故。

3 机械开挖模式下防坍塌施工技术优化措施

3.1 软弱围岩段机械开挖工法系统性优化

针对软弱围岩“扰动即失稳”的特性,严格遵循“短进尺、分块开挖、快封闭、少扰动”的核心原则,对机械开挖工法进行系统性优化,核心开挖参数优化对比见表 1。

表 1 优化前后机械开挖核心参数对比表

施工参数	优化前	优化后
V 级围岩上台阶单循环进尺	2 榀钢架间距	1 榀钢架间距
上台阶开挖高度	4.5 m ~ 5.5 m	≤ 3.5 m
下台阶开挖方式	两侧同步开挖	左右侧错步开挖
仰拱单次开挖长度	8 m ~ 10 m	≤ 5 m
核心土预留面积	隧道断面 30%	≥ 隧道断面 50%
初喷混凝土封闭时间	开挖后 2 h 内	开挖找顶后立即施作
钢架封闭成环时间	开挖后 24 h 内	开挖后 12 h 内

1. 核心开挖工法优化,IV、V 级围岩段全面采用上下台阶预留核心土法机械开挖,上台阶开挖高度严

格控制在 3.5 m 以内,核心土长度不小于 3 m,面积不小于隧道断面总面积的 50%,利用核心土对掌子面形成稳定反压,从根本上规避掌子面溜塌风险。下台阶采用左右侧错步开挖,严禁两侧同时落底,单次开挖进尺不超过 2 榀钢架间距,避免拱架单侧悬空长度过大引发整体失稳。仰拱开挖一次长度不超过 5 m,开挖后立即施作仰拱初支封闭成环,严格控制仰拱、二衬与掌子面的安全步距,杜绝步距超标引发的支护体系失稳。

2. 开挖顺序精细化优化,采用“先拱部、后边墙、先两侧、后中间”的分层分块机械开挖顺序,上台阶先采用悬臂式掘进机开挖拱部两侧弧形导坑,预留中间核心土,弧形导坑开挖完成后立即开展初支作业,再逐步开挖核心土区域,最大限度减少拱部围岩的暴露时间。针对断层破碎带等极破碎围岩段,采用“三台阶七步流水法”机械开挖,各台阶错开长度控制在 3 m ~ 5 m,实现各工序平行流水作业,确保开挖与支护的高效衔接^[5]。

3.2 机械开挖设备选型与操作工艺优化

结合隧道围岩特性与断面尺寸,开展开挖设备选型与操作工艺优化,实现“围岩特性—设备性能—开挖工法”的高度匹配,最大限度降低机械开挖对围岩的扰动。

1. 设备适配性选型优化,针对隧道 IV、V 级千枚岩、板岩软弱围岩段,主洞开挖选用 EBZ160 型悬臂式掘进机作为核心开挖设备,配套 PC220 型液压挖掘机、破碎锤进行辅助开挖与出渣作业;支洞、斜井小断面区域选用小型挖掘机配合液压破碎锤开挖,避免大型设备对围岩的过度扰动。针对不同围岩状态动态调整设备组合,完整性相对较好的 IV 级围岩段,采用掘进机连续开挖提升施工效率;破碎严重的 V 级围岩、断层破碎带,采用挖掘机配合破碎锤逐块剥离开挖,精准控制开挖轮廓,减少对周边围岩的扰动。同时,配套两臂拱架安装台车、凿岩台车开展支护作业,实现“开挖—支护”机械化配套作业,大幅缩短工序衔接时间。

2. 机械操作工艺精细化优化,悬臂式掘进机采用“先切周边、后挖中间”的切削顺序,严格控制切削深度与行进速度,单次切削深度控制在 30 cm 以内,避免全断面强力切削造成围岩破碎。拱部开挖过程中,严格控制掘进机悬臂抬升角度,沿隧道设计轮廓线精准切削,杜绝超挖、欠挖问题,确保开挖轮廓圆顺,为后续钢架安装密贴围岩创造条件。挖掘机配合破碎锤开挖时,采用“自上而下、分层剥离”的方式作业,严禁掏底开挖,避免造成掌子面整体失稳。同时,制定设备作业安全管控规则,严禁机械设备在作业过程中碰撞已施工初支结构,设备行走路线避开已完成的锁脚锚管、钢架基础,防止支护结构受损。

3.3 机械开挖与支护工序协同衔接优化

以“快封闭、强支护”为核心,优化机械开挖与支护工序的协同衔接模式,构建“开挖—找顶—初喷—钢架安装—锁脚锚管施作—复喷”全流程流水作业体系,最大限度缩短围岩暴露时间,实现支护体系快速受力。

1. 工序衔接时间刚性管控,明确各工序的时间节点与责任主体,机械开挖完成后,立即采用挖掘机配合人工开展找顶排危作业,清除拱部、掌子面松动岩块,找顶完成后立即采用湿喷台车进行初喷混凝土封闭,初喷厚度 4 cm ~ 5 cm,确保围岩在开挖后 30 min 内完成封闭。初喷混凝土初凝后,立即采用拱架安装台车开展钢架安装作业,两臂拱架安装台车可同步完成钢架抓举、空中拼装、精准对位,大幅缩短钢架安装时间,钢架安装完成后 1 h 内完成锁脚锚管施作与焊接固定,确保支护体系快速形成受力结构。

2. 锁脚锚管与钢架安装协同优化,将锁脚锚管施作作为下一台阶开挖的前置条件,软弱围岩段锁脚锚管采用 $\Phi 42$ 无缝钢管,长度不小于 3 m,采用凿岩台车钻孔,钻孔方向垂直岩面向下倾斜 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$,杜绝“斜锁脚”问题。锚管安装后采用 M20 水泥砂浆注浆,确保注浆饱满,砂浆强度达到设计强度 70% 后方可进行下一台阶开挖。锁脚锚管与型钢钢架采用 L 形钢筋双面焊接,确保钢架与锁脚锚管形成整体受力结构,有效控制钢架拱脚下沉,规避支护体系整体失稳风险。

3. 支护封闭成环效率优化,采用上下台阶错步开挖工艺,单侧边墙钢架安装完成后立即施作边墙初支,避免两侧边墙同时悬空,仰拱开挖后 8 h 内完成仰拱初支施工,实现支护体系全断面闭合。针对极破碎围岩段,采用临时横撑、临时仰拱工艺,在上台阶钢架底部设置型钢横撑,进一步提升支护体系的整体刚度,约束围岩变形发展,杜绝坍塌风险。

3.4 机械开挖全过程动态监测与应急管控优化

建立“监测—分析—预警—处置—调整”的闭环管控体系,实现机械开挖全过程动态管控,根据监测数据实时优化开挖参数与支护措施,筑牢坍塌风险防控防线。

1. 监控量测体系优化,将洞内外观察、周边位移、拱顶下沉、地表下沉纳入必测项目,V 级围岩段量测断面间距不大于 20 m,测点在开挖完成后 12 h 内完成埋设,24 h 内获取初始读数。围岩变形速率 ≥ 5 mm/d 时,立即将量测频率提升至 1 次/d ~ 2 次/d,实时跟踪围岩变形动态。同时,将钢架内力、围岩压力列为选测项目,精准掌握支护结构受力状态,为开挖参数调整提供数据支撑。建立围岩变形分级管控标准,当变形值达到橙色预警阈值时,立即加密监测频率、暂停掌

子面开挖,采取补强支护措施;达到红色预警阈值时,立即撤离作业人员,启动应急预案,采取围岩注浆加固措施,待变形稳定后再恢复施工。

2. 开挖参数动态联动优化,建立监测数据与施工参数的联动机制,根据围岩变形监测结果,动态调整机械开挖进尺、台阶长度、支护参数。当监测到围岩变形速率持续偏大时,立即缩短单次开挖进尺,减小台阶长度,增加钢架密度、加厚喷射混凝土层,同时缩小锁脚锚管间距、增加锚管长度,提升支护体系刚度。针对开挖过程中揭示的不良地质体,立即调整开挖工法,采用超前小导管预加固后再进行开挖,从源头规避坍塌风险。

3. 应急管控体系优化,隧道内设置 $\Phi 800$ mm、壁厚 ≥ 10 mm 的逃生管道,从二衬端头延伸至距掌子面 2 m ~ 4 m 处,管内提前预留应急食品、急救药品与救生绳等物资;掌子面附近定点配备应急钢拱架、注浆设备、抽水泵等抢险物资,确保险情发生时可快速投入使用。编制机械开挖坍塌事故专项应急预案,每月开展一次应急演练,提升作业人员应急处置与避险逃生能力。同时,严格执行班前技术交底、工序三检制,层层压实安全责任,确保各项防坍塌措施落地执行。

4 结束语

本文依托穆肃堡隧道工程,聚焦软弱围岩段机械开挖施工场景,系统分析了机械开挖模式下隧道坍塌的核心诱因,从开挖工法、设备选型、工序协同、动态管控四个维度形成了机械开挖防坍塌施工优化技术体系。工程实践表明,该优化体系可最大限度降低机械开挖对软弱围岩的扰动,实现开挖与支护的高效衔接,有效约束围岩收敛与拱顶下沉,实现了隧道施工全过程零坍塌事故,保障了施工安全与工期进度。本次研究主要针对千枚岩、板岩地层展开,未来需进一步研究不同岩性软弱围岩的机械开挖设备与工法动态适配方法,以及智能化监测与机械开挖参数的实时联动体系,持续完善软弱围岩隧道机械开挖防坍塌技术体系。

参考文献:

- [1] 杨继才.公路隧道软弱偏压大变形控制施工技术[J].四川建材,2024,50(08):183-185.
- [2] 李文浩.公路隧道软弱围岩变形段的加固施工分析[J].工程技术研究,2023,08(23):64-66.
- [3] 张潘.公路隧道软弱偏压大变形控制施工工法研究[J].交通科技与管理,2023,04(09):114-116.
- [4] 王清.公路隧道软岩大变形路段洞身施工技术探析[J].江西建材,2023(01):193-195.
- [5] 张舜,蒋云东,王余.公路隧道软弱围岩大变形段的注浆加固施工分析[J].建筑安全,2022,37(10):70-73.