浅埋隧道下穿高速公路冷开挖施工技术研究与应用

王艳江

云南云岭隧道智能建造有限公司 云南 昆明 650200

【摘　要】：本文以国道 G219 线莲花滩隧道下穿开河高速公路工程为依托，针对超浅埋、V 级破碎富水围岩、紧邻高流量运营高速的复杂施工工况，系统开展悬臂式掘进机冷开挖成套施工技术研究。该下穿区段隧道最小埋深仅 16m，围岩完整性差、自稳能力弱，上方高速车流密集、安全管控标准严苛，传统钻爆法振动扰动大、易引发路面沉降开裂，常规施工工艺安全风险极高。本文严格遵循隧道施工十八字核心原则，通过施工方案比选，确定悬臂式掘进机二台阶冷开挖施工方案，系统阐述超前大管棚预支护、机械化冷开挖、快速支护衬砌、自动化监控量测及高速交通保通全套核心工艺与管控要点。工程实践表明，该技术无爆破扰动、围岩损伤小、变形可控，可有效控制高速路基路面沉降变形，保障高速公路不间断安全通行。研究形成的成套施工技术与管控体系，可为同类浅埋隧道下穿既有交通干线工程提供可复制的技术参考。

【关键词】：浅埋隧道；下穿运营高速公路；悬臂式掘进机；冷开挖；二台阶法；超前大管棚；监控量测；交通保通

DOI:10.12417/2705-0998.26.14.046

1 引言

1.1 行业发展背景与现状

随着我国干线公路改扩建工程持续推进，山岭隧道近距离下穿既有高速公路、市政主干道的施工场景日益普遍。山区道路受地形、线形及征地条件限制，隧道线路调整空间极小，多采用超浅埋下穿方案，衍生出围岩破碎、地层敏感、构筑物保护要求高等一系列施工难题。

传统隧道钻爆法施工效率高、适用性广，但爆破产生的冲击波与地震波会剧烈扰动浅层地层，对于埋深小于 20m 的超浅埋隧道，极易引发地表不均匀沉降、路面开裂甚至路基塌陷，严重影响既有道路运营安全，无法满足下穿高等级公路的低扰动施工要求。在此背景下，无爆破、低损伤的机械冷开挖技术成为浅埋敏感区段施工的优选方案。

目前国内冷开挖技术多应用于城市地铁、小断面市政隧道，针对大断面公路隧道超浅埋下穿运营高速的成套施工技术研究较为匮乏。莲花滩隧道工程工况典型、风险突出，依托该工程开展技术研究，可有效填补同类工程技术应用空白，具备较高的实践价值。

1.2 研究目的与研究意义

研究目的：对比分析 CD 法与悬臂式掘进机二台阶冷开挖法的适配性，确定最优施工方案；梳理下穿段超前支护、机械化开挖、支护衬砌、监测预警及交通保通核心工艺参数；构建信息化动态施工管控体系，总结标准化施工流程，为同类工程提供技术借鉴。

研究意义：理论层面，完善大断面浅埋隧道低扰动机械化施工理论，构建“预加固-低扰开挖-快闭支护-动态监测-交通管控”一体化技术体系，弥补现有冷开挖技术在大断面山岭隧道应用的理论短板。工程实践层面，冷开挖工艺彻底规避爆破风险，保障高速持续通行，减少交通中断带来的经济损失；机械化施工可有效缩短工期、降低施工成本，整套技术可广泛推广应用于各类近构筑物浅埋隧道工程。

1.3 研究内容与技术路线

主要研究内容：剖析工程地质与施工重难点；开展施工方案多维度比选；细化超前大管棚、悬臂掘进机二台阶冷开挖、支护衬砌施工工艺；搭建多维度自动化监控量测与三级预警体系；制定高速交通保通与应急联动方案；总结成套施工技术与应用效果。

技术路线：梳理工程勘察资料→分析施工重难点→比选确定冷开挖施工方案→细化各工序施工工艺与参数→搭建自动化监测体系→编制交通保通及应急预案→现场施工实施与数据采集→分析施工效果→总结成套施工技术。

2 工程概况与难点分析

2.1 工程概况

莲花滩隧道为国道 G219 线改扩建工程关键控制性工程，隧道总长 1278m，为单洞单向大断面山岭隧道，建筑限界净宽 10.0m、净高 5.0m，最大开挖断面宽 12.14m、高 9.79m，设计行车速度 40km/h。隧道在 K30+040～K30+100 区段以 35°斜交角度下穿运营开河高速公路，核心下穿段长度 60m，拱顶最小埋深仅 16m。

下穿段上部为半填半挖路基，填筑层为含碎石粉质黏土，下部为强风化～中风化灰岩，岩体节理裂隙发育、破碎性强，综合判定为 V 级软弱围岩。区域裂隙水发育，雨季降水易下渗软化岩体，大幅降低围岩稳定性。上方开河高速为区域核心运输通道，日均车流量超 1.2 万辆，重型货车占比 30%，车辆动荷载持续扰动浅层地层，进一步增加施工管控难度，施工期间严禁出现路面结构性破损与长时间交通中断。

2.2 核心施工难点

本工程下穿区段多重风险耦合，施工管控难度极大，核心难点主要分为四点：一是超浅埋地层稳定性差，人工填筑路基固结度不足，隧道开挖易引发地层应力重分布，造成高速路基不均匀沉降、路面开裂，塌陷风险突出；二是 V 级破碎富水围岩自稳能力弱，施工中易出现掌子面掉块、片帮、涌水坍塌等病害，对工序衔接速度、支护及时性要求极高；三是运营高速管控标准严苛，禁止爆破施工产生振动扰动，必须采用零爆破、低扰动施工工艺；四是大断面适配大型掘进设备，传统分导洞施工空间不足、易产生二次围岩扰动，机械化施工组织难度大。

3 施工方案选择与比选

3.1 原设计 CD 法及缺陷分析

原设计针对 V 级围岩推荐采用 CD 中隔壁法，通过设置临时中隔墙将大断面分割为左右小导洞，分步开挖、分步支护，适配小断面隧道无大型机械施工场景。但该工法在本工程中存在明显缺陷：一是导洞开挖后作业空间狭小，无法适配 XTR7/360 大型悬臂式掘进机作业，机械化施工优势完全丧失，工期大幅延长；二是施工后期拆除临时中隔墙会引发围岩二次应力扰动，超浅埋地层对应力变化高度敏感，极易造成高速路面沉降突变，存在重大安全隐患；三是工序繁琐、临时耗材投入大、建筑垃圾多，施工效率低、综合成本高。

3.2 二台阶冷开挖方案优势论证

结合工程实际，最终选用悬臂式掘进机二台阶冷开挖法，核心优势如下：一是空间适配性强，上下台阶分区后作业空间充足，可保障掘进机连续切削、自由回转，充分发挥机械化施工效率；二是施工零爆破、低扰动，机械切削破碎岩体无振动损伤，开挖轮廓规整，超欠挖量小，有效保护围岩完整性；三是无临时支撑拆除工序，地层应力释放平缓，规避二次扰动风险，地表变形可控性强；四是工序简洁、交叉干扰小，可实现多工序平行作业，大幅缩短工期；五是无需临时支护耗材，设备与人力投入更少，综合施工成本更低。

3.3 方案比选汇总

对比维度	CD 中隔壁法	悬臂掘进机二台阶冷开挖法
设备适配性	空间狭小，大型掘进机无法作业	空间充足，完全适配大型机械化施工
地层扰动程度	爆破+拆撑二次扰动，扰动大	零爆破、无二次扰动，地层稳定性好
地表变形风险	高，易出现路面沉降、开裂	低，变形平缓，满足高速管控要求
施工效率	工序繁琐，单循环工期长	工序简洁，机械化连续作业，效率高
经济成本	临时耗材多、工期长，成本高	无临时投入、工期短，综合成本低
适用场景	小断面、深埋、无重要构筑物隧道	大断面、超浅埋、下穿运营主干道隧道

综上，悬臂式掘进机二台阶冷开挖方案完全适配本工程超浅埋、大断面、下穿运营高速的复杂工况，为最优施工方案。

4 冷开挖关键施工技术体系

4.1 总体管控原则

下穿高速核心风险区段严格遵循“管超前、严注浆、短开挖、强支护、快封闭、勤量测”十八字施工方针，划分分区管控：K29+960～K30+200 下穿影响区为绝对禁爆区，全程采用机械冷开挖；远离高速区段可根据岩石硬度采用微震控制爆破。整体构建“超前预加固-机械低扰开挖-快速永久支护-动态监测反馈”的闭环管控体系，严控施工风险。

4.2 超前大管棚预支护施工技术

超前大管棚是控制浅埋地层沉降的核心前置工序，可形成刚性拱形承载结构，阻隔上部路基荷载与地层变形传递。下穿段 100m 范围布设拱部环形大管棚，采用Φ108×6mm 热轧无缝钢管，沿拱顶 120°范围布设，环向间距 40cm，外插角 7°～9°，单段施工长度 14m，纵向搭接 5m。管身布设φ8mm 溢浆孔，梅花形布置，采用水灰比 1:1 纯水泥浆液注浆，注浆压力 0.5～2.0MPa。

施工流程为：导向架安装→奇数孔钻孔、顶管、注浆→养护 24h→偶数孔施工→注浆质量检测。施工采用分序钻孔注浆工艺，规避注浆空洞；全程严控管棚倾角与接头质量，注浆完成后采用地质雷达检测加固效果，空洞部位二次补浆，确保管棚与围岩形成整体承载结构，未达到养护强度严禁开挖作业。

4.3 二台阶冷开挖核心工艺

隧道断面分为上下两个台阶，上台阶开挖高度 6.07m，单次循环进尺 1.0m，纵向延伸长度 40m；下台阶开挖高度 2.8m，纵向长度 20m，上下台阶错距不小于 40m，遵循“先上后下、短进尺、快封闭”原则。

上台阶施工时，掘进机就位后开启喷雾降尘系统，由拱顶向两侧分层切削岩体，渣土通过机载运输机直接卸入自卸汽车，单循环开挖完成后设备后撤让位，2h 内完成清危、挂网、立拱、锚杆注浆、湿喷混凝土等初支工序。上台阶推进稳定后，开展下台阶开挖，上下工序平行作业，提升施工效率。

施工采用移动式仰拱栈桥，实现洞内运输与仰拱施工平行作业，栈桥通行荷载满足施工设备通行要求，下方同步开展基底清渣、钢筋绑扎、混凝土浇筑，大幅缩短全断面成环封闭周期。出渣采用 15t 自卸汽车循环运输，洞口设置洗车平台，严控路面污染，渣土统一合规处置。

开挖过程严格控制施工参数，破碎围岩段进尺缩减至 0.5m，超挖控制在 10cm 以内，严禁欠挖爆破处理，定期检修掘进机截齿，降低岩体扰动。

4.4 支护与衬砌施工技术

下穿段采用高强度初期支护体系，选用 I20b 工字钢拱架，纵向间距 50cm，配套Φ22 纵向连接钢筋形成刚性框架；采用 C25 湿喷混凝土，分两层喷射，总厚度 28cm；拱部布设Φ25 中空注浆锚杆，边墙布设Φ42 钢花管，梅花形布设，锚固深部稳定岩体。监测异常区段增设临时钢支撑与仰拱，强化支护体系稳定性。

待围岩沉降收敛速率连续 7 天低于 0.1mm/d 后，开展二次衬砌施工。采用 12m 全断面液压衬砌台车，浇筑 C30、P8 抗渗防水混凝土，衬砌厚度 50cm。防水系统采用 EVA 防水板+土工布缓冲层，施工缝、变形缝设置止水构件。衬砌养护 7 天后通过预埋注浆管开展低压回填注浆，填充衬砌与初支间隙，杜绝脱空开裂病害。

5 自动化监控量测与信息化施工

本工程搭建自动化监测+人工复核的一体化监测体系，24 小时实时监控隧道围岩、高速路基路面变形状态，实现数据指导施工、风险提前预警。监测范围覆盖洞内围岩与高速下穿影响区段，核心布设拱顶沉降、周边收敛、GNSS 地表位移、静力水准仪、深部位移计、路面裂缝计及高清视频监控设备。

系统设置三级预警机制，标准化落实处置流程：黄色预警为单日沉降速率超标、出现细微裂缝，立即暂停掘进、缩短进尺、加密监测与支护；橙色预警为累计沉降超标、裂缝扩展，全面停工，实施洞内加固与地表注浆处置；红色预警为路面贯通裂缝、路基塌陷险情，立即封闭高速交通，撤离人员设备，启动专项应急预案。

监测数据每 10 分钟自动上传，人工每日两次复核校准，平台自动生成变形曲线，每日报送监测报表，根据变形趋势动态优化开挖、注浆、支护参数，实现信息化动态施工管控。

6 高速交通保通专项方案

为保障开河高速不间断通行，项目联合高速交警、路政、运营养护单位制定专项保通方案，管控范围覆盖高速 K159+900～K162+500 路段，采用半幅封闭、半幅双向交替通行模式，规范设置警告区、过渡区、作业区等安全分区，布设水马、爆闪灯、警示标牌等安全设施。

建立分时段值守巡查制度，日间车流高峰配置专职人员现场指挥交通、清理路障；夜间每 2 小时全线巡查，特殊加密天气巡查频次。建立多方应急联动机制，高风险工序提前 24 小时报备，突发险情多方协同处置，定期开展应急演练，提升处置效率。同时储备充足应急物资，常态化开展保通人员安全培训，最大限度降低施工对高速通行的影响。

7 工程效果与结论

7.1 工程实施效果

本工程下穿高速核心区段施工全程无爆破作业、无安全事故、无长时间交通中断，各项指标均满足规范及运营要求。高速路面最大累计沉降 11.2mm，单日最大沉降速率 0.42mm/d，远低于规范 20mm 预警阈值，未出现结构性贯通裂缝；隧道围岩变形平缓，支护结构稳定无病害；120 天施工期内高速始终保持半幅通行，仅短暂限速管控；相较于 CD 法，施工工期缩短 28 天，综合成本降低 11%，施工安全、质量、效益成果显著。

7.2 核心结论

（1）超浅埋大断面公路隧道下穿运营高速工程，钻爆法振动风险不可控，CD 法存在设备适配差、围岩二次扰动等缺陷，悬臂式掘进机二台阶冷开挖法是最优施工方案，适配性与安全性优势显著。（2）超前大管棚预支护可有效阻隔地层变形传递，是超浅埋下穿工程控制地表沉降的核心关键技术，必须严格把控钻孔、注浆、搭接施工质量。（3）“短进尺、强支护、快封闭”是破碎围岩施工核心准则，1m 循环进尺、2h 快速初支、移动式栈桥快速成环，可有效保障围岩稳定。（4）自动化多维度监测与三级预警体系，可实现施工风险闭环管控，结合多方联动交通保通方案，可同步保障施工安全与既有道路运营安全。

7.3 应用前景

本文形成的冷开挖成套施工技术，工艺标准化、风险可控、适用性广，可广泛应用于国省干线隧道下穿高速、城市浅埋隧道下穿市政主干道、爆破受限区域隧道施工等同类工程。随着绿色低扰动施工技术的普及，机械化冷开挖工艺将逐步替代传统钻爆法，成为近地表敏感构筑物隧道施工的主流技术，具备极高的工程推广价值。

参考文献：

[1] 公路隧道施工技术规范 JTG/T 3660-2020.

[2] 铁路隧道监控量测技术规程 Q/CR 9218-2020.

[3] 浅埋暗挖隧道大管棚支护施工技术指南.

[4] 悬臂式掘进机隧道机械化施工应用技术研究.

[5] 下穿高速公路隧道施工安全管控技术规程.