

山岭公路隧道浅埋段开挖施工安全管控措施研究

王 威

新疆北新路桥集团股份有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘 要：山岭公路隧道浅埋段因覆盖层薄、围岩自稳能力差，施工中极易引发地表沉降、掌子面坍塌甚至冒顶事故，是隧道建设安全管控的核心难点。本文基于浅埋段“围岩—支护—地表”协同作用机理，系统分析了该区段失稳的主要致灾因子，包括地形偏压、降雨入渗、爆破振动及支护时机不当等。在此基础上，从超前地质预报、开挖工法优化、超前支护体系、初期支护强化、监控量测反馈及施工组织管理六个维度，构建了覆盖施工全过程的动态安全管控框架。研究强调，浅埋段安全管控的本质在于“主动预控”与“动态调整”相结合，需将监测数据实时转化为施工决策依据。本文所提措施可为类似工程提供系统性的技术参考。

关键词：山岭公路隧道；浅埋段；开挖施工；安全管控；超前支护

引言

随着我国公路网向西部山区和复杂地形区延伸，山岭公路隧道数量与规模持续增长，隧道穿越浅埋地层的工程需求日益突出。浅埋段通常指隧道顶部覆盖层厚度小于两倍洞径或不足隧道洞跨的地段，其最显著特征在于围岩无法形成有效的“成拱”效应，上部荷载直接传递至支护结构，使得施工力学行为与深埋隧道存在本质差异。据统计，山岭隧道施工安全事故中，浅埋段相关事故占比超过四成，且多表现为突发性坍塌、地表过大沉降或支护结构失稳，后果往往极为严重。与此同时，工程实践中仍普遍存在地质信息掌握不足、开挖方法选择失当、支护参数调整滞后等突出问题，表明理论认知与工程应用之间仍存明显鸿沟。

1 山岭公路隧道浅埋段工程特征与风险分析

1.1 浅埋段围岩力学行为特征

浅埋段隧道与深埋隧道的根本区别在于围岩能否形成自然承载拱。在深埋条件下，围岩开挖后能够通过应力重分布形成自承拱，将上部荷载传递至两侧稳定岩体，支护结构主要承受局部松动压力。而在浅埋条件下，由于覆盖层厚度有限，围岩剪切破坏面可直接延伸至地表，无法形成闭合拱圈，隧道结构必须承担上覆岩土体的全部或大部分重量^[1]。此时，围岩压力主要表现为“全土柱压力”，其值远大于深埋条件下的松动压力，且受地表地形、地下水位及施工扰动影响显著。此外，浅埋段往往伴随偏压受力状态。当隧道穿越山脊斜坡或沟谷一侧时，两侧埋深差异导致围岩压力分布极不均匀，深埋侧压力明显大于浅埋侧，使支护结构承受不

对称荷载，易产生扭转和过大弯曲变形。偏压效应不仅加剧了初期支护的受力复杂性，也显著提高了拱部失稳和地表开裂的风险。

1.2 主要致灾因子识别

浅埋段施工安全的主要致灾因子可从地质条件、施工扰动和气象环境三个层面加以识别。地质条件是基础性风险因素。浅埋段多位于强风化岩层、破碎带或土石混合堆积体中，围岩等级普遍偏低（IV~V级），节理裂隙发育，结构面组合不利于自稳。尤其当隧道穿越含软弱夹层或富水地层时，围岩遇水软化，强度急剧衰减，极易引发局部塌方乃至泥石流式涌突。此外，隐蔽性不良地质体（如溶洞、古滑坡体、采空区）的存在，进一步增加了地质预测的难度。施工扰动是触发因素。浅埋段开挖打破了原始地应力平衡，若施工方法不当或支护措施不及时，围岩应力释放速率将超过可控范围。其中，爆破震动对浅埋围岩的扰动尤为突出，震动波可直达地表，引起松动圈扩大和地表沉降加速。台阶法施工中若上下台阶距离过长或封闭成环时间滞后，则初支结构无法及时形成完整受力环，易导致拱顶下沉失控。气象环境属于外部诱导因素。强降雨条件下，地表水迅速入渗，不仅增加围岩容重和孔隙水压力，还会软化结构面，降低抗剪强度。对于浅埋段，雨水下渗路径短、影响速度快，往往在数小时内即可导致围岩稳定性急剧恶化。

1.3 浅埋段施工失稳模式与危害

浅埋段施工失稳主要表现为三种模式：其一，掌子面整体坍塌，多发生于自稳能力极差的土质或全风化岩

层中,由于未及时封闭掌子面或超前支护失效,临空面围岩失稳并迅速发展为连锁破坏;其二,拱顶冒顶,即顶部围岩崩落直达地表,形成塌陷坑,这种破坏突发性强,且对地表构筑物 and 行车安全构成直接威胁;其三,地表过度沉降与开裂,表现为纵向和横向不均匀沉降,严重时可导致地表道路中断或管线破坏。上述失稳模式的核心危害在于其突发性和连锁性,一旦触发,抢险难度极大,故必须将管控重心前移至预防阶段。

2 浅埋段开挖施工安全管控措施体系

本文提出“预控-施工-反馈”三位一体的安全管控框架,涵盖超前地质预报、开挖工法、超前支护、初期支护、监控量测和施工组织六大环节,各环节之间通过信息流形成动态闭环。

2.1 超前地质预报与风险评估

超前地质预报任务不仅在于查明掌子面前方岩性变化、断裂构造和地下水赋存状况,更在于定量评价风险等级。预报手段应坚持“物探先行、钻探验证、地测跟进”的综合原则。常用的物探方法包括地震波反射法(如TSP)、地质雷达和瞬变电磁法,但单一物探手段存在多解性,必须结合超前钻孔和掌子面编录予以修正。对于浅埋段,宜加密超前钻孔布置,并辅以孔内电视或取芯鉴定,准确获取围岩强度、完整性及含水率等参数。在预报成果基础上,应建立动态风险评估机制^[2]。依据围岩级别、埋深比、地下水条件和地表环境,将掌子面前方每延米划分为不同风险等级,对应制定差异化的施工预案。风险评估需每循环更新,并形成书面报告供施工决策使用。

2.2 开挖工法选择与工序控制

开挖工法的合理选择直接决定浅埋段围岩扰动程度。对于V级及以下围岩或埋深比小于0.5的极端浅埋段,宜优先采用双侧壁导坑法或中隔壁法(CD法),该类工法将大断面分割为多个小断面分部开挖,每分部及时封闭成环,显著降低单次开挖释放能量,控制地表沉降效果明显。对于IV级围岩且埋深相对较大的浅埋段,可采用环形开挖预留核心土法,但需严格控制循环进尺(每循环不宜超过0.5~1.0m)并确保核心土尺寸合理。台阶法仅在围岩条件较好、埋深比大于1.0且经专项论证后方可谨慎采用,且台阶长度应控制在3~5m范围内,仰拱与掌子面距离不得大于30m。工序控制的核心要义在于“快封闭、早成环”。仰拱施工必须紧跟开挖面,及时形成封闭受力体系,避免支护结构长期处于开口受力状态。同时,应严格控制各工序衔接时间,明确规定

开挖后初喷混凝土的时效要求(一般不超过4小时),以及下一循环开挖前的养护时间。

2.3 超前支护体系设计与实施

常用的超前支护措施包括超前管棚、超前小导管注浆和超前锚杆,三者适用条件和作用机理各有不同。超前管棚适用于洞口段或极浅埋断层破碎带,一般采用 $\phi 80 \sim \phi 150\text{mm}$ 钢管,环向间距30~50cm,外插角 $1^\circ \sim 3^\circ$,长度10~40m,管内注水泥砂浆以增强刚度。管棚体系可形成纵向“梁效应”,将上部荷载传递至两侧稳定岩体,有效抑制拱顶沉降。超前小导管注浆适用于一般浅埋段,采用 $\phi 42 \sim \phi 50\text{mm}$ 钢管,长度3~5m,环向间距30~40cm,注入水泥-水玻璃双液浆,注浆压力控制在0.5~1.5MPa,一方面通过浆液胶结破碎围岩,另一方面形成“伞状”承载壳。超前锚杆则适用于围岩相对完整的IV级浅埋段,长度2.5~4m,起悬吊和组合梁作用^[3]。实施超前支护时需注意三个要点:一是注浆参数应依据现场围岩孔隙率和渗透性动态调整,避免盲目套用经验值;二是超前支护应与钢架支撑形成有效连接,确保共同受力;三是注浆效果需通过检查孔或弹性波检测予以验证,未达要求时必须补注。

2.4 初期支护与二次衬砌协同承载

初期支护是浅埋段承担围岩压力的主力结构,通常由喷射混凝土、钢筋网和钢拱架(或格栅钢架)组成。钢拱架型号应根据荷载计算选定,V级围岩浅埋段宜采用I20~I22工字钢,间距0.6~0.8m,且钢架脚部应设置锁脚锚管以抵抗偏压滑移。喷射混凝土强度等级不应低于C25,厚度宜为25~30cm,且需分两层施作,初喷厚度4~6cm以快速封闭岩面,复喷至设计厚度前应埋设厚度标志。初期支护与围岩之间应确保密贴,超挖部位必须用喷射混凝土或同级填充物回填密实,避免出现空洞。对于偏压浅埋段,还应在一侧增设抗偏压挡墙或增加锚杆长度,以平衡不对称荷载。值得注意的是,初期支护并非最终受力终点,应通过监测数据判断其受力发展是否趋于稳定,据此确定二次衬砌施作时机。通常情况下,浅埋段要求初期支护变形速率明显下降且累积沉降量满足设计预留量后,方可浇筑二次衬砌,且二次衬砌宜采用钢筋混凝土结构以增强抗裂能力。

2.5 监控量测体系与预警机制

量测项目应包括必测项目和选测项目两大类:必测项目包括洞内拱顶下沉、净空收敛、地表下沉,以及初期支护结构应力;选测项目包括围岩内部位移、锚杆轴力、钢架应变等。对于浅埋段,地表下沉监测尤为重

要,测点应沿隧道中线和横断面布设,量测范围覆盖隧道周边 2~3 倍洞径区域,频率应随开挖面接近而加密(距掌子面小于 2 倍洞径时,每日至少量测 2 次)。预警机制应基于累计值和速率值双重控制指标。参照相关规范和工程经验,建议设定三级预警:当累计沉降量达到设计允许值的 60%或变形速率持续大于 2mm/d 时,发布黄色预警,加强监测频次并检查支护质量;达到 80%或速率大于 3mm/d 时,发布橙色预警,暂停开挖,采取补强措施(如增设临时支撑或地表注浆);达到 90%或速率出现突变时,发布红色预警,立即启动应急预案,人员撤离并组织专家会商^[4]。需要强调的是,预警阈值不应一成不变,而应依据实测数据分析变形发展趋势,动态修正临界值,使其更加符合现场实际。

2.6 施工组织与应急管理

安全管控措施的有效落地,离不开科学施工组织和严密应急管理。施工组织方面,应编制专项浅埋段施工方案和安全技术交底书,明确各工序责任人、作业标准和质量验收要求。开挖、支护、量测三类作业必须密切协同,避免“开挖快、支护慢、量测脱节”的被动局面。现场宜建立每日安全调度会制度,依据当日监测数据和掌子面地质记录,研判下一循环的风险水平,必要时调整施工参数。应急管理方面,应针对坍塌、冒顶和涌水等典型事故类型,制定专项应急预案,配齐应急物资(如注浆设备、临时支撑钢管、排水泵等),并定期组织实战演练。尤其重要的是,必须建立地表变形与地下施工的联动响应机制,当监测到地表沉降超限时,能够在第一时间通知地表人员疏散和管线防护。此外,应强化作业人员的安全培训,确保每一位现场操作者熟悉预警信号、撤离路线和基本抢险技能。

3 动态反馈与管控效能提升

上述措施体系的有效运行,关键在于构建“监测-分析-决策-执行”的动态反馈回路。具体而言,现场量测数据每日输入信息管理平台,由技术团队进行数据拟合和趋势预测,判别围岩稳定性状态;当判定当前支护参数或施工工法无法有效控制变形时,应及时启动变更程序,重新计算承载力和调整支护强度。这一过程并非一次性的,

而是随开挖推进逐循环迭代,形成“边施工、边监测、边调整”的动态管控模式。在管理层面,应强化数据分析的时效性,避免“重采集、轻分析”现象。宜采用移动平均法或灰色预测模型对变形趋势进行短期预判,辅助决策者提前采取预防措施。同时,建立安全管控措施的效果评价机制,每循环结束后对支护效果进行回顾性评估,总结经验教训并写入施工日志,为后续同类工程积累知识库。唯有将技术手段与管理机制深度融合,才能真正提升浅埋段施工安全的主动可控性。

4 结语

山岭公路隧道浅埋段开挖施工安全管控,是一项涉及地质认知、工法选择、支护设计、监测预警和施工组织等多维度协同的系统工程。本文基于浅埋段围岩力学特征和失稳机理,系统提炼了主要致灾因子及其作用路径,并据此构建了涵盖超前预报、开挖工法、超前支护、初期支护、监控量测和应急管理等环节的全链条安全管控体系。核心认识可归纳为三点:其一,浅埋段安全管控必须坚持“主动预控”思维,将风险识别和超前加固作为首要防线;其二,施工过程须以动态监测为决策依据,通过“反馈-调整”循环实现精准控制;其三,技术措施的有效性依赖管理执行力,制度化、标准化的施工组织和应急机制是不可或缺的保障。期望本文所提措施框架能为同类工程的安全施工提供有益参考,也呼吁业界进一步深化浅埋段围岩时变特性及智能化预警技术的研究。

参考文献

- [1] 王明年,张艺腾,刘大刚.浅埋隧道围岩压力计算方法及其工程应用[J].岩石力学与工程学报,2022,41(3):456-467.
- [2] 李术才,李利平,许振浩.隧道超前地质预报技术现状与发展趋势[J].岩土工程学报,2021,43(8):1379-1392.
- [3] 陈卫忠,谭贤君,伍国军.浅埋大断面隧道围岩变形控制技术[J].岩土力学,2020,41(12):3897-3908.
- [4] 张顶立,房倩,陈峰.隧道支护结构协同工作机理与设计方法[J].中国公路学报,2022,35(7):1-14.