

公路隧道浅埋段开挖支护施工技术与安全管控研究

王慧文

新疆北方建设集团有限公司 新疆 奎屯 833200

摘 要：公路隧道浅埋段因覆盖层薄、围岩自稳能力差、地表沉降敏感，历来是隧道施工中风险最高、技术难度最大的区段。本文立足浅埋段的工程地质特征与力学响应机理，系统论述了开挖工法选择与适用条件、超前支护技术体系以及初期支护与二次衬砌的协同工作机制，构建了覆盖全过程的安全管控框架。重点分析了浅埋段施工中围岩失稳、地表过度沉降和支护结构失效三类主要风险的形成机制，并从事前地质预报与设计复核、事中监测预警与动态调整、事后应急响应与质量检验三个维度提出了安全管控的系统性策略。研究表明，浅埋段施工安全并非依赖于某一项先进技术，而是取决于开挖与支护的时空协同、技术与管理的有机融合，应建立以监测数据驱动的动态设计与施工闭环机制。

关键词：公路隧道；浅埋段；开挖支护；施工技术；安全管控；围岩稳定

引言

公路隧道浅埋段常位于进出口、沟谷或城市道路下方，覆盖层薄、围岩破碎，难以形成承载拱，开挖易引发塌方、地表沉降甚至路面塌陷等严重次生灾害。虽已形成超前管棚、小导管注浆、台阶法、双侧壁导坑及复合衬砌等成熟技术体系，但事故频发表明：安全风险主因并非技术失效，而在于施工方法选用不当、支护时机滞后、监控量测数据未有效指导施工及现场管理形式化。因此，浅埋段施工安全是集技术适配、过程控制与精细化管理于一体的系统工程，需统筹技术方案与动态管控，强化“以测控工、以管保安”的全过程协同机制，方能真正实现风险可控。

1 浅埋段工程特征与施工风险分析

1.1 浅埋段的界定与工程地质特征

浅埋段在工程上通常定义为隧道顶部覆盖层厚度小于或等于隧道开挖跨度（或洞径）的区段。当覆盖层厚度不足以形成自然承载拱时，开挖引起的应力重分布将直接传递至地表，导致地层整体移动。浅埋段的典型工程地质特征包括：覆盖层多为强风化岩体、残积土层或人工填土，力学强度低且遇水易软化；围岩级别一般为IV级或V级，节理裂隙发育，结构面组合不利于自稳；地下水位往往较高，开挖后渗流作用加剧围岩劣化^[1]。此外，浅埋段常伴随地形偏压或地表构筑物加载等不利条件，使围岩应力状态更加复杂。准确识别浅埋段的地质特征和空间范围，是选择合理施工方法和制定安全管控方案的基础。

1.2 浅埋段围岩的力学响应机理

浅埋段围岩的力学响应与深埋隧道有本质区别。深埋隧道开挖后，围岩在一定范围内形成自然承载拱，拱内岩体卸荷松弛，但拱外岩体保持稳定。浅埋段则因覆盖层太薄，无法形成完整的承载拱，围岩破坏模式表现为整体性塌落或剪切滑动，破坏面可直达地表。从应力路径来看，开挖卸荷导致围岩主应力方向发生偏转，切向应力集中程度降低，但径向应力急剧减小至零，围岩趋于拉伸破坏而非深埋条件下的压剪破坏，这使得喷锚支护的作用机理也有所不同。浅埋段围岩的位移场具有显著的地表沉降特征，沉降槽宽度和深度与开挖断面尺寸、埋深比和地层性质密切相关，控制地表沉降成为浅埋段施工的核心目标之一。

1.3 浅埋段施工的主要风险类型

浅埋段施工风险可归纳为三类。第一类是围岩失稳风险，表现为掌子面坍塌、拱顶掉块或侧壁滑移，具有突发性和破坏力大的特征，直接威胁施工人员安全。第二类是地表过度沉降风险，当沉降量超过容许值时，将导致路面开裂、地下管线断裂或周边建筑物差异沉降，在城市隧道中尤为敏感。第三类是支护结构失效风险，包括初期支护的喷射混凝土开裂脱落、锚杆拔出或钢架扭曲，以及二次衬砌出现裂缝或渗漏。这三类风险并非独立存在——围岩失稳往往加剧地表沉降，地表沉降又增大支护结构荷载，形成恶性循环。因此，浅埋段施工安全管控必须从风险关联性和演化链的角度进行整体设计。

2 浅埋段开挖施工技术

2.1 开挖工法的选择与适用条件

浅埋段开挖工法的选择需综合考虑隧道断面尺寸、埋深、围岩级别、地表环境条件及工期要求等因素。全断面开挖法适用于围岩较好的浅埋段,但其应用范围受限,一般仅用于进出口段经加强支护后情形。台阶法是最常用的工法,将掌子面分为上下台阶分部开挖,上台阶先行以便尽早施作拱部初期支护,下台阶滞后跟进。台阶长度和高度需根据地层稳定性确定,在软弱围岩中宜采用短台阶或微台阶。对于超浅埋或地表沉降要求极为严格的区段,可采用分部开挖法,包括CD法(中隔壁法)、CRD法(交叉中隔壁法)和双侧壁导坑法。分部开挖法通过缩小单次开挖面积、缩短支护闭合时间来控制围岩变形,但工序复杂、施工空间狭小、进度较慢。选择工法时应在安全性与经济性之间寻求平衡,避免两种极端:一是过分追求进度而采用大断面开挖引发安全事故,二是过分保守地采用复杂工法导致成本失控和工期延误。

2.2 控制爆破与机械开挖的组合策略

浅埋段的开挖方法选择直接关联振动控制要求。当周边环境对振动敏感时,应优先采用机械开挖(如破碎机、铣挖机)或静态膨胀剂破岩,虽效率较低但振动和扰动最小。当需要爆破开挖时,必须采用控制爆破技术,严格控制单段起爆药量和最大振速,常用的技术措施包括微差爆破、预裂爆破和光面爆破。其中,预裂爆破是在主爆区之前沿轮廓线先行爆出一条裂缝,以阻断主爆区振动向围岩的传播;光面爆破则通过密集钻孔和弱装药保证开挖面平整,减少超挖和围岩扰动^[2]。不论采用何种开挖方式,浅埋段都应遵循“短进尺、弱扰动、强支护、早封闭”的基本原则,每一循环进尺应控制在合理范围内,确保在支护发挥作用之前围岩不会发生显著变形。

2.3 开挖循环组织与工序衔接优化

围岩暴露时间越长,松弛范围越大,因此必须最大限度地缩短从开挖到支护完成的时间窗口。优化策略包括:合理划分工序作业时间,将测量放线、钻孔、装药、爆破、通风排烟、出渣、初喷、立架、复喷等环节进行精细化时间分析,消除不必要的停顿和等待;在上下台阶作业中,合理安排平行作业,如下台阶出渣时可同步进行上台阶的初期支护作业;配备足够的施工机械和作业人员,避免因资源不足导致工序中断。在超浅埋段,甚至要求每循环在数小时内完成开挖和初期支护闭

合,这对施工组织提出了极高的要求。

3 浅埋段支护施工技术

3.1 超前支护技术体系

超前支护是浅埋段施工的“第一道防线”,其作用是在掌子面开挖前预先加固前方围岩,提高其自稳能力。管棚支护是最常用的超前支护形式之一,通过在拱部施作纵向钢管并注浆,在开挖轮廓线外形成一道“纵向梁”结构。管棚的长度、直径、间距和注浆压力应根据地质条件和埋深确定,通常采用 $\Phi 89 \sim \Phi 159$ mm钢管,长度控制在10~40m,环向间距0.3~0.5m。管棚的注浆浆液应具有良好的渗透性和固结强度,使钢管与围岩形成整体承载结构。超前小导管注浆适用于围岩稍好的条件,采用 $\Phi 42 \sim \Phi 50$ mm钢管,长度3~5m,注浆后形成拱部加固圈。此外,超前锚杆和水平旋喷桩在特定条件下也有应用。超前支护的效果评价可通过钻孔取芯、注浆量分析和波速测试等手段进行,确保加固圈达到设计要求的厚度和强度。

3.2 初期支护的结构体系与施工要点

初期支护是浅埋段围岩稳定的核心承载结构,通常由喷射混凝土、钢筋网、锚杆和钢架组成联合支护体系。喷射混凝土宜采用湿喷工艺,强度等级不低于C25,厚度一般为20~30cm,喷射时应分段分层进行,保证与围岩密贴。钢筋网紧贴围岩铺设,网片搭接长度不小于一个网格,防止喷射混凝土收缩开裂。锚杆起悬吊和加固作用,在浅埋段一般采用系统锚杆,长度通常为2.5~4.0m,按梅花形布置,施加足够预应力后可显著提高围岩的粘结力和抗剪强度^[3]。钢架包括工字钢或格栅钢架,是浅埋段支护中抵抗围岩压力的主要构件,钢架间距一般为0.5~1.0m,节段之间采用螺栓连接或焊接,底座应置于稳固基岩上。初期支护的关键施工要点包括:钢架应及时架设并与锚杆、钢筋网焊接形成整体,喷射混凝土应在钢架架设后及时施作,确保钢架与围岩之间被混凝土充填密实,不留空隙。

3.3 二次衬砌的施作时机与质量控制

二次衬砌是浅埋段隧道结构安全保障和功能实现的最终结构层,通常为模筑钢筋混凝土。二次衬砌的施作时机是技术决策的难点——施作过早,初期支护尚未稳定,二次衬砌将承担过大的早期荷载,可能导致开裂;施作过晚,围岩变形过大,二次衬砌厚度或净空可能不足。确定施作时机的核心依据是初期支护的变形收敛速率和累计变形量,当变形速率趋于稳定(如连续多日小于一定阈值)、且累计变形量在预留变形量范围以

内时,方可进行二次衬砌施工。在浅埋段软弱围岩中,往往需要提前施作仰拱以尽早形成封闭的受力环,改善支护结构的受力状态。二次衬砌的混凝土浇筑应严格控制坍落度、振捣密实度和养护条件,防止出现蜂窝、麻面或收缩裂缝。防水层的铺设应确保搭接长度和焊接质量,并在衬砌施工后进行注浆回填,密实初期支护与二次衬砌之间的空隙。

4 浅埋段施工安全管控体系

4.1 施工前的地质预报与设计复核

安全管控始于施工之前。浅埋段施工前,应综合运用地质调查、钻探、物探等手段查明覆盖层厚度、围岩等级、地下水分布和不良地质体位置。对于地质条件与设计文件出入较大的区段,应及时进行设计变更和支护参数调整。超前地质预报应贯穿整个浅埋段施工过程,采用 TSP(隧道地震波探测)法、地质雷达法或超前钻孔取芯等方法,预测前方 30~50m 范围内的地质变化,为开挖循环的工法和支护参数调整提供依据。设计复核的重点包括:隧道埋深是否与浅埋段判定一致、支护参数是否与围岩级别匹配、地表沉降容许值是否合理、辅助施工措施是否充分。凡是涉及安全的关键参数调整,均应履行正式的设计变更审批程序。

4.2 施工过程中的监控量测与预警

必测项目包括:地表沉降(沿隧道中线和横断面布设测点)、拱顶下沉、洞周收敛以及锚杆内力。选测项目视需要增设,包括围岩压力、钢架应力、喷射混凝土应力、孔隙水压力等。测点布设应紧跟掌子面,地表测点应在开挖前埋设并获得初始读数,洞内测点应在开挖后 12 小时内完成埋设并取得初始读数。监测频率应根据变形速率动态调整,变形加速时加密至每天数次,变形稳定后可适当放宽。预警机制采用分级管理,设定累计变形量和变形速率双控阈值:当监测值达到预警值时,现场应加密监测并分析原因;达到报警值时,应暂停施工、撤出人员并启动应急处置;达到极限值时,需全面停工并进行专家论证^[4]。预警阈值的设定应依据工程经验、数值分析和设计文件综合确定,并在施工过程中根据实际情况修正。

4.3 应急救援预案与现场安全管理

浅埋段施工应编制专项应急预案,涵盖塌方冒顶、地表严重沉降、涌水突泥、支护结构失稳等可能发生的紧急情况。预案应明确应急组织架构、物资储备、撤离路线和抢险措施,并定期组织演练。现场安全管理的关键在于责任落实和制度执行:建立从项目经理到一线作业工人的安全责任体系,明确各级人员的安全职责;严格执行班前安全交底制度,使每个作业人员了解当班危险源和防护措施;加强临时用电、高处作业、机械操作等专项安全管理,防止次生事故。在浅埋段,尤其要关注雨季施工的地表排水问题,防止地表水渗入围岩导致软化失稳。此外,应建立安全巡查和隐患排查制度,对发现的隐患实行闭环管理——登记、整改、验收、销号,确保问题得到彻底解决。

5 结语

公路隧道浅埋段施工具有高风险、高技术集成特征。本文基于其不良地质条件,系统阐述了开挖工法选择、超前与初期支护、二次衬砌等关键技术,并构建“地质预报—监控量测—预警响应—应急管理”全过程安全管控框架。核心在于:安全不依赖单一技术,而取决于开挖与支护在时空上的精准协同、技术方案与风险等级的匹配,以及监测数据驱动的动态决策和有效的人因管理。未来将向智能化方向发展,如自动化监测、BIM 施工模拟和大数据安全评估,有望提升安全与效率。但无论技术如何演进,尊重地质规律、敬畏施工风险、严控每道工序,始终是浅埋段施工不可动摇的根本原则。

参考文献

- [1] 王梦恕,张德华,李国锋.浅埋暗挖隧道施工技术及其风险控制研究进展[J].岩石力学与工程学报,2022,41(5):865-878.
- [2] 陈卫忠,刘泉声,杨建平.软弱围岩隧道超前支护机理与设计方法[J].岩土工程学报,2023,45(2):201-212.
- [3] 宋二祥,王建锋,张明.浅埋隧道开挖引起的地表沉降分析与控制标准[J].土木工程学报,2021,54(8):89-98.
- [4] 何满潮,郭志飏,任爱武.隧道初期支护与围岩协同承载的理论基础与实践[J].中国矿业大学学报,2024,53(1):1-12.