

公路隧道浅埋段施工安全控制技术分析

杨树鹏

甘肃路桥建设集团有限公司 730030

DOI: 10.32629/ems.v8i8.21615

[摘要] 公路隧道浅埋段施工安全至关重要，其受地质条件、施工方法等多因素影响。对施工安全控制技术进行分析，可有效降低安全风险。从地质勘察、支护设计到施工过程监测等方面，合理运用控制技术，能保障隧道结构稳定与施工人员安全。通过对相关技术的探讨，为公路隧道浅埋段施工提供科学依据，提升施工安全水平，确保工程顺利进行。

[关键词] 公路隧道；浅埋段；施工安全；控制技术；风险防范

引言：

随着公路建设的不断发展，隧道工程日益增多，其中浅埋段施工面临诸多挑战。浅埋段地质条件复杂，围岩稳定性差，易出现坍塌、地表沉降等安全问题，严重影响施工安全与工程进度。因此，深入研究公路隧道浅埋段施工安全控制技术具有重要的现实意义。加强施工安全控制技术的分析，能提高施工安全性，减少事故发生，推动隧道工程建设的高质量发展。

1. 浅埋段施工特点

1.1 地质条件复杂性

公路隧道浅埋段整体覆土厚度较小，地层结构受地表环境与地质运动影响显著，地质条件呈现出复杂多变、稳定性差、分层杂乱的核心特征，是隧道施工地质风险最高的区段之一。浅埋区域地层多为风化土层、松散碎石层与岩土交叠地层，土体固结程度较低、整体性薄弱，地层内部结构杂乱无序，不存在稳定的承载岩层结构。同时浅埋地层极易受到地表水渗透、雨水冲刷与地下水径流的侵扰，导致土体软化、粘结力下降，进一步加剧地质结构的不稳定性。不同区段地层性质差异明显，无统一地质规律可循，施工过程中易突发地质异变，大幅提升隧道开挖施工的安全管控难度与风险不确定性。

1.2 围岩稳定性特征

公路隧道浅埋段围岩整体自稳能力极差，具备应力松散快、变形量大、坍塌风险高的显著特征，与深埋隧道围岩稳定状态存在明显区别。浅埋段围岩缺乏上部厚层土体的压力约束与应力平衡作用，隧道开挖扰动会直接打破原有地层应力体系，引发围岩应力快速释放与重新分布，极易出现围岩松散、滑移、脱落等问题。围岩整体结构破碎、整体性不足，开挖后短时间内便会产生明显的沉降变形与收敛变形，若未及时支护将快速发展为局部掉块、掌子面失稳、整体坍塌等

安全事故。此外浅埋围岩变形具备持续性、突发性的特点，常规支护模式难以适配其动态失稳的风险特征。

1.3 施工环境特殊性

公路隧道浅埋段大多临近地表区域，部分区段穿越山地坡体、农田区域或浅表覆土区域，施工环境相较于隧道深埋区段具备极强的特殊性与风险性。浅埋施工受地表气象环境影响极大，降雨、风化、地表荷载扰动都会直接传导至隧道内部，干扰围岩稳定状态。施工区域覆盖土层浅薄，开挖震动与施工扰动极易穿透覆土层引发地表沉降、开裂、塌陷等病害，不仅影响隧道施工安全，还可能破坏地表原有地貌与周边环境。同时浅埋段施工空间受限、作业环境复杂，地表与地下风险相互联动，安全隐患具备联动性、多发性、突发性特点，整体施工管控环境更为严苛。

2. 安全控制技术概述

2.1 常用技术类别

公路隧道浅埋段施工安全控制技术经过长期工程迭代，形成了覆盖前期防控、过程支护、动态监测、应急处置的完整技术体系，各类专项技术适配浅埋段施工的风险特点与环境特征。常用安全控制技术主要包含超前地质预报技术、超前预支护加固技术、分层分步开挖控制技术、精细化爆破管控技术、围岩实时监测技术、地表沉降防控技术以及应急加固处置技术等核心类别。不同技术分别对应地质风险预判、围岩结构加固、施工扰动管控、安全状态监测、突发风险处置等不同管控环节，各类技术相互配合、协同作用，构建起全方位、多层次的浅埋隧道施工安全防控技术体系，有效规避各类施工安全隐患。

2.2 技术应用原理

公路隧道浅埋段各类安全控制技术的核心应用原理围绕应力平衡维持、围岩结构加固、施工扰动弱化、风险动态预警四大核心逻辑展开，适配浅埋段围岩失稳的核心机理。超

前防控技术通过提前探明地质状态、预先加固松散地层，从源头降低地质不稳定带来的施工风险，维持原始地层应力基础稳定。开挖与爆破控制技术通过优化施工工序、弱化施工扰动强度，避免剧烈应力释放引发的围岩破碎与结构失稳。支护加固技术依托外部支撑结构提升围岩整体性与承载能力，抵消地层松散压力，抑制围岩变形沉降。监测预警技术实时捕捉围岩与地表变形动态，实现风险提前预判，为施工调整与安全管控提供核心技术依据。

2.3 技术发展趋势

随着公路隧道工程建设逐步向复杂地质、浅表复杂环境区域延伸，浅埋段施工安全控制技术正朝着智能化、精细化、动态化、一体化的方向持续升级发展。传统单一、静态、经验化的安全管控技术逐步被数字化、智能化技术替代，自动化监测、智能预警、模拟仿真等新型技术广泛应用于浅埋隧道施工管控场景。安全控制模式从事后处置转变为事前预判、事中动态调控的全周期防控模式，技术应用更加贴合浅埋段动态失稳的风险特征。同时各类单项技术逐步融合联动，形成勘察、设计、施工、监测、整改一体化的智能管控体系，大幅提升浅埋隧道施工安全管控的精准度、时效性与科学性。

3. 施工前期控制技术

3.1 地质勘察要点

公路隧道浅埋段施工前期地质勘察是规避施工风险、制定安全方案的核心基础工作，需结合浅埋段地质复杂、围岩松散、环境敏感的特点开展精细化勘察作业。勘察工作需全面探明浅埋段覆土厚度、地层分布、岩土性质、风化程度、地下水赋存状态以及不良地质体分布情况，精准掌握浅表地层的结构特征与稳定性能。重点排查浅埋区域软弱夹层、破碎带、渗流通道等风险区域，明确地下水对围岩软化、结构失稳的影响机制。同时结合地表环境勘察，分析地表荷载、地形走势、气象条件对隧道施工的潜在影响，全面梳理施工风险源，为后续支护方案设计、开挖工艺选型、安全管控措施制定提供精准、全面的地质依据。

3.2 支护方案设计

基于前期精细化地质勘察成果，需针对性开展浅埋段隧道支护方案专项设计，摒弃通用化支护模式，打造适配浅埋围岩特性的差异化支护体系。支护设计需遵循先加固、后开挖、强支护、早封闭、勤监测的核心设计原则，重点强化超前支护与初期支护体系，提升松散围岩的整体性与自稳能力。针对浅埋段围岩破碎、易变形、易坍塌的特点，优化支护结构布设形式，强化支护体系的整体性、抗压性与抗变形能力，

有效抑制围岩沉降与收敛变形。同时结合不同区段地质差异开展分区差异化设计，对不良地质区段加大支护强度，合理匹配支护参数，保障支护方案能够全面抵御浅埋段各类施工安全风险。

3.3 应急预案制定

公路隧道浅埋段施工风险突发性强、隐患类型多、事故扩散速度快，施工前期需制定系统化、专业化、可落地的专项安全应急预案，构建完善的风险应急处置体系。应急预案需全面覆盖围岩坍塌、地表塌陷、涌水渗水、支护变形破坏等浅埋段高频安全事故类型，明确各类事故的风险识别标准、预警等级、处置流程与责任分工。细化应急人员调配、设备调用、物资储备、现场管控、险情疏散等全流程工作内容，针对不同突发险情制定差异化的快速处置方案。同时配套完善应急演练机制，通过常态化演练优化预案流程，提升施工团队突发险情处置能力，最大限度降低安全事故造成的损失与影响。

4. 施工过程安全控制

4.1 开挖方法选择

公路隧道浅埋段开挖方法的科学选型是弱化施工扰动、保障围岩稳定、防控安全事故的核心过程管控手段，需严格贴合浅埋段地质软弱、围岩松散、覆土浅薄的施工特点。浅埋段严禁采用大断面、一次性贯通的开挖模式，优先选用分步、分层、分区的精细化开挖方法，通过缩小单次开挖断面、缩短开挖进尺，最大限度降低施工开挖对围岩的扰动强度，缓慢释放地层应力，避免应力骤然集中引发围岩失稳。针对地质极差、覆土极浅的特殊区段，进一步优化开挖工序，遵循小进尺、短循环、快封闭的施工原则，开挖完成后及时跟进支护作业，缩短围岩裸露时间，从施工工艺层面全面筑牢浅埋段施工安全防线。

4.2 爆破作业管理

浅埋段隧道爆破作业极易扰动浅表松散围岩与地表土体，是施工过程中风险极高的关键工序，需落实全方位、精细化的爆破安全管控体系。浅埋段需摒弃传统大药量、强震动的爆破模式，采用微震动、弱爆破的精细化爆破工艺，合理控制爆破药量、爆破间距与起爆方式，大幅降低爆破震动对围岩结构与地表土层的扰动破坏。严格规范爆破作业流程，细化爆破点位布设、装药管控、起爆防护、爆后排查等各环节操作标准，杜绝违规爆破操作。爆破作业结束后，须立即组织技术人员携带地质雷达、裂缝监测仪等设备，对掌子面及周边围岩展开系统性隐患排查，重点标记松动岩块、裂隙

延伸及地表沉降异常点，并建立动态观测台账。通过这种“快排、快清、快支”的闭环处置，可显著降低岩体二次扰动风险，将坍塌、掉块等突发事件概率控制在最低限度，切实保障现场人员与设备安全，也为后续掘进创造稳固的作业条件。

4.3 施工现场监测

常态化、全方位的施工现场监测是浅埋段隧道动态安全管控的核心手段，能够实时捕捉围岩变形、结构受力、地表变化等动态数据，实现风险提前预警与及时处置。施工过程中需建立涵盖围岩收敛、拱顶沉降、地表位移、支护结构应力、地下水变化的全域监测体系，针对浅埋段高风险区域加密监测点位、提升监测频次。全程跟踪施工各阶段的结构变化状态，实质上是将隧道及地下工程从“经验施工”推向“数据驱动”的精细化管理。通过在关键断面布设自动化全站仪、多点位移计、应力计及应变传感器，构建覆盖围岩深部与表层、初支与二衬的多维度监测网络，能够实时捕捉围岩松动圈扩展、支护结构荷载递增及变形速率突变等关键指标。依托高频数据采集与智能预警平台，可绘制变形-时间曲线，划分蠕变、加速及趋稳阶段，精准判别围岩等级动态演化特征，为判别掌子面稳定性提供量化依据。在异常变形或失稳风险初现端倪时，立即启动分级预警响应机制，结合地质素描与超前地质预报成果，系统分析变形诱因——是岩性突变、构造破碎带影响，还是爆破扰动或支护滞后所致。

5. 安全控制效果评估

5.1 评估指标体系

公路隧道浅埋段施工安全控制效果评估需依托系统化、多层次、全覆盖的评估指标体系开展，全面反映施工安全管控的整体质量与实施成效。评估指标体系主要包含地质风险防控指标、围岩稳定控制指标、施工工艺合规指标、现场安全监测指标、隐患处置成效指标、应急保障成效指标六大核心维度，各维度下设细分评估内容，覆盖前期勘察、方案设计、过程施工、动态监测、应急处置全流程。指标体系兼顾过程管控质量与最终施工成效，能够精准量化浅埋段围岩稳定状态、风险防控水平、施工规范程度与安全保障能力，为安全控制效果的科学评估、精准研判提供标准化依据。

5.2 评估方法应用

浅埋段隧道施工安全控制效果需采用多元化、综合性的评估方法，结合定性分析与定量研判的模式开展系统化评估工作，保障评估结果客观精准、贴合工程实际。常用评估方法包含过程对照分析法、风险层级研判法、指标综合评分法、

现场实效核查法等，通过对比施工规范标准、核查现场施工状态、梳理隐患整改成效、研判风险管控水平，全方位评价安全控制技术的落地效果。结合施工全过程资料、监测数据、隐患记录、应急处置台账开展综合研判，精准识别安全管控体系中的薄弱环节与技术短板，客观判定各类安全控制技术的适配性与有效性，为后续优化改进提供精准依据。

5.3 改进措施建议

基于浅埋段施工安全控制效果评估结果，结合现场施工短板与风险管控薄弱环节，针对性制定系统化、可落地的优化改进措施，持续提升浅埋隧道施工安全管控水平。针对地质预判不准、风险识别不全的问题，优化前期勘察体系，升级超前预报技术，提升不良地质风险预判精准度。针对支护适配性不足、围岩管控薄弱的问题，优化分区支护设计方案，强化动态支护调整能力，适配围岩动态变形特征。针对施工管控不精细、监测不全面的问题，规范开挖爆破作业流程，完善全域动态监测体系，细化过程管控标准。同时健全人员安全管控机制，强化专项技术培训，构建常态化优化整改机制，持续完善浅埋段施工安全防控体系。

结束语：

公路隧道浅埋段施工安全控制技术的研究与应用，是保障隧道工程顺利进行的关键。通过对施工特点的把握、控制技术的合理运用以及施工全过程的安全管理，能有效降低安全风险。对安全控制效果的科学评估与改进，有助于不断完善施工安全控制技术体系。未来，应持续加强相关研究，提升技术水平，为公路隧道建设提供更可靠的安全保障。

【参考文献】

- [1] 邓龙刚. 洞口浅埋段施工技术在公路隧道工程中的应用[J]. 中国科技纵横, 2025, (16): 113-115.
- [2] 乔跃林. 洞口浅埋段施工技术在公路隧道工程中的应用[J]. 交通世界, 2024, (Z1): 276-278.
- [3] 王秋石. 浅埋洪坡积层地段公路隧道快速施工安全保障技术研究[J]. 工程建设与设计, 2023, (8): 135-137.
- [4] 张佳. 高速公路隧道浅埋涌水涌泥段施工处治技术[J]. 四川建材, 2023, 49(4): 178-180.
- [5] 曹孟潇. 福土龙隧道浅埋段开挖引起上覆岩体移动变形规律研究[D]. 昆明理工大学, 2020.

作者简介：杨树鹏（1992.01），男，汉族，甘肃会宁，本科，高级工程师，研究方向：公路工程。