

高速公路隧道施工超前支护施工技术的应用

涂臻

重庆成渝垫丰武高速公路有限公司, 重庆 408512

DOI:10.61369/ETQM.2025060019

摘 要 : 本文研究目的在于探讨超前支护施工技术在高速公路隧道施工中的应用。研究期间, 基于文献阅读、工程材料翻阅与梳理, 对高速公路隧道施工特点、超前支护概念与作用加以分析。随后, 从准备阶段到质量检测, 贯穿超前支护整个生命周期进行引用策略探讨。期望本文对我国高速公路施工团队、建设单位提供技术借鉴、参考价值, 从而全面降低隧道施工安全风险, 推动隧道工程经济与社会效益的双重获取。

关 键 词 : 隧道施工; 超前支护; 钻孔布置; 支护结构安装

Application of Advance Support Construction Technology in Highway Tunnel Construction

Tu Zhen

Chongqing Chengdu-Chongqing Dianfengwu Expressway Co., Ltd. Chongqing 408512

Abstract : The purpose of this study is to explore the application of advance support construction technology in highway tunnel construction. During the study, based on literature reading and review of engineering materials, the characteristics of highway tunnel construction, the concept and role of advance support were analyzed. Subsequently, from the preparation stage to quality inspection, the entire life cycle of advance support is explored through referencing strategies. It is hoped that this article will provide technical reference and reference value for China's highway construction teams and construction units, thereby comprehensively reducing the safety risks of tunnel construction and promoting the dual acquisition of economic and social benefits of tunnel engineering.

Keywords : tunnel construction; advance support; drilling layout; support structure installation

在高速公路隧道施工期间, 超前支护技术是通过提前加固隧道开挖面, 全面提高施工阶段安全性的重要技术。在复杂、不稳定的地质条件下, 如围岩破碎、存在突水风险地带, 这些安全隐患都会严重阻碍施工进度, 带来施工安全风险^[1]。超前支护, 可有效减小开挖的影响范围, 防止坍塌事故的发生同时一并优化施工进度, 减少围岩暴露时间, 降低施工风险以及可能面临的经济损失。故而, 对于隧道工程, 特别是地质复杂、对安全性有要求的高速公路隧道中, 超前支护无疑已经成为不可或缺的关键技术手段^[2]。

一、高速公路隧道施工特点

(一) 高度强调围岩稳定性评估

高速公路隧道通常会穿越山体, 因此, 隧道施工阶段围岩稳定性直接影响工程的安全^[3]。故而, 施工团队必须对围岩进行详细勘察、分类, 如利用地质雷达、钻探等手段深入了解岩层的结构、水文条件, 从而制定出具有针对性的科学支护方案。

(二) 多样化技术的应用

依据施工期间不同的围岩条件, 施工团队需要采用喷锚网、钢拱架、管棚等多样化的支护施工技术来确保隧道稳定性。如在隧道初期支护采用喷锚、钢拱架加固围岩, 形成初步的支撑结构。针对软弱围岩、富水地段, 需要使用管棚防止出现坍塌、突水现象。只有综合使用不同的支护技术组合, 才可以让施工过程适应复杂、多变的地质条件^[4]。

(三) 强调施工质量与环境保护并重

高速公路隧道施工, 强调施工质量控制与环境保护并重。一方面, 施工阶段, 需严格控制工程质量, 确保支护结构的可靠性、耐久性。例如使用前置录像、全断面收敛监测等技术手段及时发现、处理施工中的问题。另一方面, 为减小施工对环境、周边居民带来的消极影响, 施工团队需采取污染控制措施, 例如降尘降噪处理手段、废水处理等, 实现质量、环境保护的兼顾, 在确保隧道安全、使用寿命同时落实绿色工程建设目标^[5]。

二、超前支护技术概念与作用

(一) 超前支护技术概念

所谓超前支护技术, 是隧道开挖期间, 通过在开挖面前方预先设置支护结构来有效加固围岩、并减小其变形水平, 将潜在地

质灾害风险降至最低甚至杜绝的施工技术。超前支护技术核心是在隧道掘进施工的前期，利用对管棚、旋喷桩、超前小导管等支护结构的设置来有效控制围岩变形、支撑开挖面。具体实施过程中，施工各团队需要依据地质条件、工程的设计要求合理选择适当超前支护方式，保证隧道开挖施工过程中结构始终处于高度稳定状态^[6]。

（二）超前支护技术作用

1.提高围岩稳定性

隧道施工中，超前支护技术可以显著提高围岩稳定性。通过提前设置支护结构，继而加强围岩的自承能力，减缓围岩的变形速率。从技术层分析，超前支护通过设置管棚、钢拱架、超前锚杆等手段，能够有效地将围岩内的应力均匀分布，降低应力集中水平，提高围岩整体稳定性，

2.控制地表沉降

超前支护，可通过预先加固隧道周围土体来有效减缓失稳所导致的地表沉降现象。具体而言，超前支护如旋喷桩、管棚结构，可在隧道开挖前就形成一个稳定的支撑体系来维持地层完整性，继而达到减小地表沉降、幅度、范围的作用，避免地表建筑物、市政基础在施工中遭到损坏^[7]。

3.保障施工安全

施工安全为隧道工程项目的核心管理目标之一。超前支护技术，可为施工团队提供可靠的安全保障，有效预防塌方、涌水等一系列地质灾害。特别是在不良地质条件下，超前支护不仅可以保护施工人员生命安全，亦可保证施工机械设备长期处于正常运转状态^[8]。

三、超前支护施工技术在高速公路隧道工程中的应用

（一）准备阶段

隧道工程中，超前支护施工技术在高速公路隧道工程中的应用，准备阶段的核心在于精确的地质预报与详细的材料设备准备。其一，地质预报、风险预判为施工前必须开展的关键环节，旨在确保施工过程的安全性、可靠性。这一过程，可运用地质雷达（GPR）技术结合各隧道地震波预报（TSP）技术，在隧道开挖前探测前方30~50m范围内围岩富水、裂隙分布情况，确保项目团队能够绘制出详细的地质剖面图。其二，材料与设备的适配方面，为确保施工连续性，针对不同围岩等级（例如Ⅲ至Ⅴ级）需要选择适宜的支护材料，如钢拱架、喷射混凝土。围岩等级的差异，意味着差异化的物理性质、力学稳定性。同时，施工前，施工团队需确保注浆泵、钻机等设备调试完毕，保证其始终处于最佳工作状态避免施工中断。该环节下，地质预报精度需误差满足 $\leq 10\%$ ，材料储备应能保证连续72小时施工的需求。

（二）钻孔布设

超前支护的实施阶段，钻孔布设设计对于后续施工质量、效果有直接影响。布局优化设计阶段，需考虑科学布局与经济性。通常，可采用“梅花形”或“矩形”布孔形式，确保浆液可以覆盖开挖轮廓线之外3~5m范围，实现全面加固的效果。具体参数

设定方面，通常孔距应严格控制于0.8~1.5m之间，排距可设定在1.0~1.2m，保证支护结构具备均匀性、整体性。

钻孔阶段，钻孔参数控制同样至关重要。其中，仰角、深度设定直接影响浆液渗透、稳定性。钻孔仰角通常可设定为 $1^{\circ} \sim 3^{\circ}$ 之间，轻微上仰角可以防止浆液回流且保证注浆效率。钻孔的深度，必须穿透松散层，同时需深入到稳定岩层至少2m深度，确保支护稳固性、长期效果。此外，孔径的设置需根据围岩硬度进行灵活调整，通常可设定40mm~80mm之间，适应不同地质条件下，为后期注浆创造良好条件。具体钻孔参数布置可参照表1：

表1 钻孔参数配置表

| 围岩等级 | 孔径 (mm) | 孔深 (m) | 孔距 (m) | 排距 (m) | 仰角 ($^{\circ}$) |
|------|------------|-----------|-----------|-----------|----------------------|
| V级 | 80 | 12~15 | 0.6 | 0.6 | 3 |
| Ⅳ级 | 60~80 | 10~12 | 0.8 | 0.8 | 3 |
| Ⅲ级 | 50~60 | 8~10 | 1.0 | 1.0 | 2 |

（三）注浆加固

注浆加固施工，旨在保证超前支护实现预期效果，注浆施工技术方法涉及浆液配比、渗透控制。浆液配比期间，应用水泥-水玻璃双液浆工艺，能够满足不同围岩条件下对注浆的需求，浆液配制阶段，水灰比控制在0.8~1.0范围，而水玻璃的浓度则应控制在30至35°Be’，模数设定为2.4~3.0。为进一步提高浆液早期强度，可加入2%~3%速凝剂，确保将凝结时间缩短至3~5min，大幅提升初期承载力。

注浆施工阶段，注浆压力、扩散半径的控制直接影响填充效果。注浆期间，压力必须经过精确、分阶段管理。初始阶段以0.5~1.0MPa低压力渗透为宜，保证初步的均匀灌注、裂隙填充，终压阶段可将压力提升至2.0~3.0MPa，达到高压固结的效果。扩散半径方面应设定 $\geq 1.5\text{m}$ ，确保浆液能够覆盖所有目标区段下的裂隙。针对不同浆液类型，应制定合理的水灰比、注浆压力以及扩散半径，具体注浆作业技术参数可参照表2：

表2 注浆施工参数参照表

| 参数 | Ⅲ级围岩 | Ⅳ级围岩 | Ⅴ级围岩 |
|-----------|---------|---------|---------|
| 浆液类型 | 水泥-水玻璃 | 水泥-水玻璃 | 超细水泥浆 |
| 水灰比 | 0.8~1.0 | 0.9~1.0 | 0.6~0.8 |
| 注浆压力（MPa） | 1.0~2.0 | 1.5~2.5 | 2.0~3.0 |
| 扩散半径（m） | 1.2~1.5 | 1.5~2.0 | 2.0~2.5 |
| 凝结时间（min） | 3~5 | 4~6 | 5~8 |

此外，注浆期间应使用声波检测仪来对浆体密实度进行检测，应确保密实度始终满足 $\geq 90\%$ 。

（四）支护结构安装

在支护结构安装过程中，应遵循分层渐进式安装原则，以优化施工效率和支护效果。具体实施步骤如下：

1.分段吊装

钢拱架安装期间，应采用“分段吊装+临时支撑”的工艺形式，确保安装精度以及操作阶段的安全性。安装期间，每榀拱架的间距应设置在0.5~1.0m之间，具体参数需根据不同围岩条件进行灵活调整。安装时，应安排专人利用激光投线仪对拱架轴线进行实时监测、控制，保证轴线偏差 $\leq 5\text{cm}$ ，提高安装精度且避免高位置操作引发安全隐患。

2. 喷射混凝土层

喷射混凝土层阶段，应采取2段喷射工艺，即实施初喷、复喷。初喷层厚度应控制在3cm，用于提供基础支撑。复喷层厚度则应控制在2cm，达到进一步增强整体支护效果的作用，喷射期间必须采用湿喷工艺，减少施工过程中的粉尘污染，达到改善施工环境目的。喷射混凝土初凝时间应严格控制5min以内，终凝时间控制10min以内，利用快速凝固特性确保施工进度顺利推进。

3. 动态调平与锁固

钢拱架完成安装后，应使用全站仪进行实时监测，确保支护结构高度稳定。检测期间，一旦发现任何节点出现 > 1cm 下沉或是偏移，立即使用液压千斤顶进行有效校正至拱架设计位置。此外，拱脚使用锁脚锚杆加以固定，锚杆长度应满足 ≥ 4m，直径 ≥ 25mm，通过锚杆、喷射混凝土的紧密结合来形成一个整体，提供强大抗拔力（ > 100kN ）。此外，针对不同围岩等级，应合理选择拱架材质，并合理设置喷射混凝土材料等级、拱架厚度以及脚锁锚杆间距，具体可参照表3：

表3 拱架动态调平与锁固技术参数

| 围岩等级 | 拱架材质 | 锁脚锚杆间距（m） | 拱架厚度（mm） | 喷射混凝土强度（MPa） |
|------|--------------|-----------|----------|--------------|
| V级 | 钢管混凝土拱架 | 0.6×0.6 | 20-25 | C35 |
| IV级 | 工字钢（400×300） | 0.8×0.8 | 15-20 | C30 |
| III级 | H型钢（600×300） | 1.0×1.0 | 12-15 | C25 |

（五）质量检测

在高速公路隧道工程超前支护施工阶段，质量检测为确保施工安全、隧道稳定性之核心环节。质检阶段，施工团队应使用数据驱动的检测形式结合无损检测、破坏性试验^[9]，全面评估支护结构的完整性、强度、变形控制性能。其中，无损检测技术负责提供实时数据，揭示潜在的问题。破坏性试验负责对关键结构性

能开展深入验证。二者的结合可以使检测过程兼具广度、深度。

同时，施工阶段应引入 BIM（建筑信息模型）技术，利用模型对比实测数据形式来对施工阶段的偏差动态调整^[10]。具体检测项、检测方法、检测频率、合格标准可参照表4：

表4 超前支护质量检测项与方法

| 检测项目 | 检测方法 | 检测频率 | 合格标准 |
|---------|--------------------|-----------|-----------------------------|
| 初期支护强度 | 回弹仪法； 钻芯取样抗压试验 | 每50m² 测1组 | C25 ≥ 25MPa； C30 ≥ 30MPa |
| 注浆体密实度 | 声波检测仪； 取芯抗压强度试验 | 每20m 测1断面 | 密实度 ≥ 90%； 单轴抗压 ≥ 5MPa |
| 钢拱架安装精度 | 全站仪测量； 超声波探伤 | 每榀拱架全检 | 轴线偏差 ≤ 5cm； 焊缝无裂纹 |
| 拱顶沉降量 | 水准仪监测； 三维激光扫描 | 连续3天观测 | 日沉降量 ≤ 2mm； 累计 ≤ 10mm |

四、结语

本文系统性地讨论高速公路隧道工程中超前支护技术的实施框架、核心机理。作为一种通过多阶段协同作用，实现隧道开挖阶段围岩稳定性强化的技术。研究阶段，应结合围岩评估，制定针对性的超前支护方案。准备阶段，应开展高质量的地质预报、材料适配。钻孔布设阶段，应合理选择钻布置形式，同时落实浆液渗透全覆盖，注浆加固时基于水泥-水玻璃双液浆、配比优化结合分阶段压力调控达成裂隙充填、早期强度提升的目的。支护结构安装阶段，本文提出分段吊装、动态调平技术策略，同时提出无损检测+破坏检测、BIM模型比对实现质量闭环控制的策略。本文提出的该技术体系，可以有效解决隧道开挖阶段软弱围岩变形控制的难题，可以为我国复杂地质条件下的隧道施工提供安全、可靠的解决方案。

参考文献

[1] 陈彤. 汾石高速公路范火泉隧道超前支护施工技术[J]. 四川建材, 2025, 51(3): 174-177.
[2] 郗秀丽. 高速公路隧道工程超前支护结构及施工技术研究[J]. 河南科技, 2025, 52(1): 64-68.
[3] 杨洪. 超前支护技术在高速公路隧道施工中的应用研究[J]. 运输经理世界, 2024(12): 78-80.
[4] 叶道华. 高速公路隧道工程中的超前支护施工技术[J]. 科学技术创新, 2023(21): 169-172.
[5] 赵丰革. 高速公路岩石隧道穿越岩体破碎带超前支护施工技术应用[J]. 石材, 2024(2): 95-97.
[6] 陆志涛. 高速公路改扩建工程大断面隧道超前支护技术研究[J]. 工程质量, 2024, 42(12): 55-60.
[7] 姚力. 隧道工程超前支护施工技术与质量管控要点[J]. 四川建材, 2024, 50(12): 199-201.
[8] 李青友. 高速公路隧道开挖支护施工技术研究[J]. 工程建设和设计, 2025(4): 112-114.
[9] 李文杰, 申铁军. 隧道超前支护双液注浆(C-S)施工技术[J]. 河南建材, 2025(2): 57-60.
[10] 杨文方. 高速公路隧道工程中的洞口超前支护施工技术[J]. 高铁速递, 2022(1): 171-173.