

高速公路软弱围岩隧道施工技术应用分析

李成江

(四川川交路桥有限责任公司隧道分公司, 四川 广汉 618300)

摘要 本文围绕高速公路软弱围岩隧道施工中围岩稳定性差等问题, 明确施工技术的科学应用路径。结合软弱围岩隧道施工技术特性, 系统梳理超前支护预加固等技术体系, 从围岩等级适配、复杂地质协同等维度分析技术应用要点, 提出多场景技术适配方案, 形成协同衔接方式, 构建安全质量导向的综合应用模式, 以为同类工程施工提供技术参考。研究结果表明, 高速公路软弱围岩隧道核心技术体系能够提高软弱围岩隧道施工稳定性。

关键词 高速公路隧道; 软弱围岩; 超前支护预加固技术; 分步开挖减扰技术; 围岩稳定性控制

中图分类号: U45

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.015

0 引言

随着高速公路建设不断向山区等地质条件复杂区域推进, 软弱围岩条件已经成为高速公路隧道施工中较为常见的地质条件之一。软弱围岩条件下施工技术选用是否合理, 影响着隧道施工安全及施工效率。结合当前工程建设实际, 分析高速公路软弱围岩隧道施工技术的应用情况, 总结不同条件下的技术要点, 为相关工程施工提供技术借鉴, 对提高施工质量具有现实意义。

1 高速公路软弱围岩隧道施工技术特性

1.1 围岩稳定性控制特性

伴随我国公路建设的持续发展, 高速公路建设里程持续升高, 各种复杂地质条件的施工项目也逐渐增多。相较于深埋隧道而言, 软弱围岩隧道施工在围岩稳定性控制方面, 更具有动态性。软弱围岩本身力学强度低, 且结构松散, 容易产生变形, 施工扰动会破坏原有应力平衡, 引起围岩位移, 稳定性控制需要适应围岩应力的动态变化规律。其核心特性是抗扰能力低, 施工过程中必须持续控制围岩稳定, 并准确识别应力变化, 达成动态平衡调控。同时, 稳定性控制效果影响着施工安全基础, 是后续支护结构发挥作用的前提^[1]。

1.2 支护结构适应性特性

支护结构适应性特性, 主要体现为匹配高速公路软弱围岩隧道施工要求及围岩特性。软弱围岩力学性能薄弱, 变形具有持续性, 这要求支护结构具备相应的力学承载能力, 以及变形协调能力。支护结构能够跟随围岩应力变化, 在施工全过程中, 与围岩保持受力平衡。支护结构的适应性, 体现在其结构形式及围

岩条件的协调匹配, 影响施工操作的安全性, 并关系到支护结构的长期稳定性。同时, 该特性符合高速公路隧道施工的质量要求, 是顺利推进施工的重要技术属性, 为优化施工技术提供参考^[2]。

1.3 施工监测与预警特性

施工监测预警特性, 主要体现为高速公路软弱围岩隧道施工中, 监测的实时性及预警的精准性。软弱围岩变形反应快, 且变形量明显, 监测需动态记录围岩及支护结构的受力状态, 保证及时传递数据, 为施工决策提供支持。监测指标应该贴合围岩稳定性控制要求, 覆盖主要安全参数, 监测频率要适应施工进度及围岩应力变化节奏。预警环节应建立合理阈值体系, 快速判断异常情况, 并及时响应。此特性贯穿整个施工过程, 能够防控施工风险, 是保证施工安全的重要技术手段。同时, 为调整施工技术提供参考, 在不同阶段顺利推进施工方案^[3]。

2 高速公路软弱围岩隧道核心技术体系

2.1 超前支护预加固技术

超前支护预加固技术, 是高速公路软弱围岩隧道施工技术体系的前置保障环节, 其主要作用是在施工开挖前, 对围岩进行加固处理, 提高围岩承载能力。该技术凭借调整软弱围岩应力状态, 减小开挖扰动引起的围岩变形风险, 为后续施工提供稳定条件。同时, 改善软弱围岩的力学性能, 提前防控施工风险, 弥补围岩自身强度低, 以及结构松散的不足。作为施工技术体系的基础组成部分, 该技术符合软弱围岩隧道施工的质量要求。预先建立稳固的围岩支护体系, 可为顺利进行开挖及支护作业提供技术支撑。

作者简介: 李成江 (1998-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 公路工程现场管理。

2.2 分步开挖减扰技术

分步开挖减扰技术, 凭借将开挖作业划分为多个阶段, 降低每次开挖对软弱围岩的集中扰动, 从而减轻围岩应力重分布的剧烈变化。技术依靠合理安排开挖顺序及空间分布, 控制围岩扰动范围, 减少一次性开挖引发的失稳风险。该技术可在开挖过程中, 使围岩应力状态保持相对平稳, 为支护结构提供良好条件, 便于顺利实施支护措施。分步开挖减扰技术衔接超前支护及后续支护作业, 在保证施工稳定性方面发挥重要作用, 为施工安全管理提供参考支持^[4]。

2.3 初期支护强化技术

初期支护强化技术, 是高速公路软弱围岩隧道施工核心技术体系中, 维持开挖后围岩稳定的支撑技术。其能在完成开挖作业后, 快速构建具有高承载能力及变形约束能力的支护结构, 承接围岩释放的应力, 抑制围岩后续变形。该技术的价值在于, 调控开挖后围岩应力, 增强支护体系的力学性能, 弥补软弱围岩开挖后整体强度下降的不足, 防止围岩变形加剧致使失稳。作为衔接开挖作业及后续永久支护的技术环节, 其逻辑符合软弱围岩隧道施工稳定性控制要求, 为安全推进施工提供防护支持, 是保障工程质量及施工安全的重要手段^[5]。

3 高速公路软弱围岩隧道施工技术应用分析

3.1 不同围岩等级条件下技术适配应用

不同围岩等级条件下技术适配应用, 重点在于依据围岩力学性能差异, 确立针对性施工技术体系。施工区段按软弱围岩等级划分, 施工技术也据此确定, 结合围岩强度及变形特点, 选用合适的施工方法。技术适配要把围岩稳定性控制作为目标, 凭借准确匹配, 达成施工扰动最小化及支护效能最大化。合理的技术适配, 能够提高施工安全性, 是高速公路软弱围岩隧道施工质量控制的关键要素。

例如: 对于 V 级软弱围岩隧道施工, 需要采用超前小导管注浆预加固技术, 注浆材料选用水泥浆及水玻璃双液浆, 凝胶时间控制在 30 秒至 60 秒, 注浆压力维持在 0.5 兆帕至 1.0 兆帕, 提高围岩承载能力。开挖时选用 CRD 法分步开挖, 每步开挖进尺控制在 0.5 m 至 0.75 m, 减少单次开挖对围岩的扰动。在施工过程中, 需要严格控制各分步开挖的时间间隔, 保证在前一分部支护完成, 并且达到设计强度 70% 以上, 再开展下一分部开挖, 以此降低围岩应力叠加效应, 强化施工过程的稳定性控制。初期支护采用 I22b 工字钢拱架, 间距设置为 50 cm, 配合 $\Phi 8$ mm 钢筋网, 网格间距 20 cm \times 20 cm, 喷射 C25 混凝土, 厚度 25 cm, 形成高强度初

期支护体系, 抑制围岩变形。对于 IV 级软弱围岩, 超前支护可选用超前锚杆, 锚杆长度 3.5 m, 间距 1.2 m, 梅花形布置。开挖采用台阶法, 上台阶每步开挖长度控制在 1.5 m 至 2 m, 台阶高度设置为 3 m, 合理控制上下台阶的开挖落差, 避免因落差过大致使围岩受力不均, 配套实施锁脚锚杆加固, 锚杆长度 4 m, 增强台阶开挖后的围岩稳定性。初期支护选用 I18 工字钢拱架, 间距 80 cm, 喷射 C25 混凝土厚度 20 cm, 支护体系强度适配 IV 级围岩承载需求。两种等级围岩施工中, 都同步配套施工监测技术, 基于围岩等级调整监测频率, V 级围岩每 2 小时监测一次, IV 级围岩每 4 小时监测一次, 保证技术适配效果实时可控, 稳定推进施工过程。

3.2 复杂地质环境下施工技术协同应用

复杂地质环境下施工技术协同应用, 主要在于整合多种施工技术, 适应复杂地质条件对施工稳定性的要求。高速公路软弱围岩隧道, 常遇到多种不良地质叠加场景, 单一技术不能保障施工安全, 需要借助技术协同, 达成风险防控全覆盖。协同应用需以围岩稳定性控制为重点, 统筹超前支护、分步开挖及监测预警等技术, 形成技术间的互补适配关系, 保证施工全过程风险可控。

例如: 高速公路软弱围岩隧道穿越富水破碎带地质区域, 该区域围岩为 V 级软弱围岩, 且含水量达 25% 至 30%, 岩体完整性系数仅 0.2 至 0.3。施工中需达成超前支护、排水减压、分步开挖、初期支护及监测预警技术的协同应用。超前支护采用超前小导管注浆结合井点降水技术, 小导管选用 $\Phi 42$ mm 无缝钢管, 长度 4.5 m, 间距 0.3 m, 注浆材料采用水泥-水玻璃双液浆, 注浆压力控制在 0.8 兆帕至 1.2 兆帕。同时, 在隧道两侧设置井点降水井, 井深 12 m, 间距 8 m, 降水后, 将地下水位控制在隧道拱顶以下 2 m, 为开挖作业创造干燥的稳定环境。开挖环节采用 CRD 法分步开挖, 每步开挖进尺 0.5 m, 开挖完成后, 立即实施初期支护, 选用 I22b 工字钢拱架, 间距 0.5 m, 配合 $\Phi 8$ mm 钢筋网, 网格间距 20 cm \times 20 cm, 喷射 C25 早强混凝土, 厚度 25 cm, 混凝土初凝时间控制在 3 小时内, 保证快速形成支护强度。同步配套实时监测技术, 监测指标涵盖围岩收敛位移、拱顶下沉及地下水压力。围岩收敛位移监测精度 0.1 mm, 每 1 小时监测一次拱顶下沉情况, 地下水压力监测采用孔隙水压力计, 数据实时传输至监控中心。当监测数据达到预警阈值的 80% 时, 立即调整施工参数, 强化支护措施。

借助多技术协同, 控制富水破碎带软弱围岩的变形, 隧道拱顶下沉量控制在 15mm 以内, 围岩收敛位移控制在 20 mm 以内, 保障安全推进施工。

3.3 施工阶段转换过程中技术衔接应用

施工阶段转换过程中技术衔接应用,主要在于让不同施工阶段技术体系平稳过渡,维持施工全过程围岩稳定性。高速公路软弱围岩隧道施工,各阶段的技术目标存在一些差异,阶段转换可能引起围岩应力二次扰动,需要借助衔接措施,达成技术配合。衔接应用以围岩稳定性控制为目标,明确各阶段技术衔接节点标准,统筹支护体系转换及开挖方式调整等环节,保证转换过程风险可控。

例如:高速公路V级软弱围岩隧道施工,涉及CRD法分步开挖阶段向二衬施工阶段的转换,该阶段需达成初期支护及二衬施工的技术衔接。衔接前需验收初期支护质量,使工字钢拱架间距偏差控制在 ± 5 cm内,喷射混凝土厚度达标,且表面平整度误差不超过10 mm,围岩收敛位移速率连续7天控制在0.5 mm/d以内,拱顶下沉速率控制在0.3 mm/d以内,适配阶段转换条件。衔接过程中,进行初期支护背后回填注浆,采用水泥浆,注浆压力控制在0.3兆帕至0.5兆帕,填充支护与围岩间隙,增强支护整体性。注浆完成后静置7天,检测注浆密实度达到90%以上,才能进入下一环节。同时,进行二衬施工准备,铺设防水板,搭接宽度控制在10 cm,采用热焊焊接,焊接强度达到母材80%。防水板铺设完成后绑扎钢筋,间距20 cm,保护层厚度5 cm。钢筋绑扎完成后,安装二衬模板,垂直度偏差不超过3%,模板间距偏差 ± 2 cm。模板验收合格后,浇筑C30混凝土,坍落度控制在160 mm至180 mm,采用插入式振捣器振捣,频率200 Hz至250 Hz,保证混凝土密实。另外,同步监测围岩变形,若出现变形速率突增,立即暂停浇筑,加强支护措施。二衬混凝土浇筑完成后,养护14天,养护期间强度达到设计75%以上,方可拆除模板。凭借各环节衔接控制,达成开挖阶段向二衬施工阶段平稳转换,转换过程中,围岩收敛位移累计增量控制在5 mm以内,拱顶下沉累计增量控制在3 mm以内,保障施工整体稳定性。

3.4 安全与质量控制导向下技术综合应用

安全及质量控制导向下技术综合应用,是把工程安全及施工质量贯穿整个过程,形成完整的施工体系。在高速公路软弱围岩隧道施工中,要做好安全风险防控及质量管控,合理配合技术,顺利开展各环节施工。综合应用借助施工技术特性及施工体系,建立技术应用及安全质量管理的联系,保证施工过程符合安全及质量要求,体现出施工技术的实际作用。

例如:高速公路V级软弱围岩隧道施工,整个过程采用安全及质量控制的技术综合应用,该隧道围岩

强度低,结构松散。施工前基于围岩特性,制定技术方案,整合超前支护预加固、分步开挖减扰等技术,形成全流程管理体系。施工前期采用超前小导管注浆预加固技术,选用 $\Phi 42$ mm无缝钢管,长度4.5 m,间距0.3 m,注浆材料为水泥-水玻璃双液浆,注浆压力控制在0.8兆帕至1.2兆帕,并进行注浆检测,使注浆密实度符合要求,为后续施工提供安全条件。开挖阶段采用CRD法分步开挖,每步开挖进尺控制在0.5 m。开挖后,立即实施初期支护,选用I22b工字钢拱架,间距50 cm,配合 $\Phi 8$ mm钢筋网,网格间距20 cm \times 20 cm,喷射C25早强混凝土,厚度25 cm。混凝土浇筑后,及时养护,保证3天强度达到设计要求。施工全过程配套实时监测技术,监测指标涵盖围岩收敛位移、拱顶下沉及支护应力。围岩收敛位移监测精度0.1 mm,支护应力监测采用钢筋应力计,数据实时传输至监控中心。建立三级预警,当监测数据达到80%阈值启动预警,达到90%暂停施工并加强支护。同时,设置质量管理节点,验收每道施工工序,工字钢拱架偏差控制在 ± 5 cm内,钢筋网铺设平整度误差不超过10 mm,混凝土表面平整度不超过8 mm。凭借技术综合应用,该隧道施工全过程未发生安全事故,围岩收敛位移在合理范围内,拱顶下沉稳定,各分项工程验收合格,为同类工程提供参考。

4 结束语

高速公路软弱围岩隧道施工技术的科学应用,能够保障工程安全,为提高工程建设水平提供支撑,具有重要的实践价值。超前支护、分步开挖、初期支护强化的核心技术体系,经多等级围岩、复杂地质场景的适配与协同应用验证,可切实把控施工全流程稳定性。未来,应该通过技术创新,继续优化施工技术体系,结合工程实际,探索更具适配性的技术方案,让施工技术朝着高效化方向发展,为同类隧道工程建设提供可靠技术保障。

参考文献:

- [1] 方绍君.复杂地质条件下公路隧道施工技术要点研究[J].运输经理世界,2025(16):93-95.
- [2] 梁亚东.高速公路软弱围岩隧道施工技术应用分析[J].交通科技与管理,2025,06(09):61-63.
- [3] 吴常灿.软弱围岩隧道全断面加固施工技术探究[J].中国公路,2024(12):102-103.
- [4] 张尚应.浅埋软弱围岩隧道的施工技术探讨[J].交通世界,2024(16):178-180.
- [5] 李兵兵.高速公路浅埋软弱围岩隧道施工工艺[J].四川建材,2023,49(06):75-77.