

铁路隧道穿越活动断层带施工工艺优化及稳定性控制

李亮

山西集大原高速铁路有限公司, 山西 太原 030000

DOI:10.61369/ERA.2026050018

摘 要 : 针对铁路隧道穿越活动断层带施工难度大、围岩稳定性差及易受构造运动影响等难题, 本文开展了施工工艺优化及稳定性控制研究。构建宏观预判与微观探测相结合的综合超前地质预报体系, 并结合数值模拟与现场监测建立了围岩稳定性评价方法。在分析传统工艺局限性的基础上, 提出了短进尺、弱扰动的开挖方法优化方案, 以及大管棚与小导管联合超前支护、早强高强初期支护与加强型二次衬砌的协同优化工艺。此外, 重点研究了围岩变形控制技术, 提出了包含监测预警、主动应力释放及被动防护的全方位控制体系, 并制定了针对地震动的减震层与抗剪设计策略, 以及适应断层错断的可动铰结构与柔性接头设计。研究旨在通过精准的地质预报、适配的施工工法及抗断抗震综合措施, 有效提升穿越活动断层带隧道的施工安全性与长期稳定性。

关 键 词 : 铁路隧道; 活动断层带; 超前地质预报; 施工工艺优化

Construction Process Optimization and Stability Control for Railway Tunnels Traversing Active Fault Zones

Li Liang

Shanxi Jidayuan High-Speed Railway Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030000

Abstract : Addressing the challenges of significant construction difficulties, poor surrounding rock stability, and susceptibility to tectonic movements when railway tunnels traverse active fault zones, this paper conducts research on optimizing construction processes and stability control. A comprehensive advanced geological prediction system integrating macroscopic pre-assessment and microscopic detection is established, along with a surrounding rock stability evaluation method based on numerical simulation and field monitoring. Analyzing the limitations of traditional techniques, this study proposes an optimized excavation method featuring short advance lengths and minimal disturbance, as well as a collaborative optimization process combining large pipe roofing with small pipe advance support, early-strength and high-strength initial support, and reinforced secondary lining. Furthermore, the research focuses on surrounding rock deformation control technology, introducing a comprehensive control system encompassing monitoring and early warning, active stress release, and passive protection. It also formulates strategies for seismic isolation layers and shear-resistant design against ground motion, as well as movable hinge structures and flexible joint designs adaptable to fault displacements. The research aims to significantly enhance construction safety and long-term stability of tunnels traversing active fault zones through precise geological forecasting, adaptive construction methods, and integrated fault and seismic resistance measures.

Keywords : railway tunnel; active fault zone; advanced geological prediction; construction process optimization

引言

随着国家交通基础设施建设的快速推进, 铁路路网不断向地质条件复杂的山区延伸, 穿越活动断层带的隧道工程日益增多。活动断层带不仅岩体破碎、自稳能力差, 且具有显著的蠕变或突发错动特性, 在施工期极易引发坍塌、大变形及突水突泥等灾害, 在运营期则面临地震动及断层错动导致结构破坏的严峻挑战。因此, 如何安全高效地穿越活动断层带, 实现施工工艺的优化与长期稳定性的控制, 已成为隧道工程领域亟待解决的关键技术难题。基于此, 本文以铁路隧道穿越活动断层带为工程背景, 深入分析断层带地质特征与工程响应。构建综合超前地质预报与围岩稳定性评价体系, 实现对断层信息的精准掌握; 针对传统施工工艺的局限性, 对开挖方法、超前支护及衬砌结构进行针对性优化; 结合围岩变形控制技术, 提出系统的抗减震设计策略与抗活动断层错断结构设计方案。旨在形成一套集地质预报、施工优化与稳定性控制于一体的综合技术体系, 为同类恶劣地质条件下的隧道工程建设提供理论依据与技术参考。

一、隧道施工超前地质预报与围岩稳定性评价

（一）综合超前地质预报技术

活动性断裂带围岩稳定性较差、围岩自稳时间短,容易出现坍塌、冒顶等事

故,是隧道施工过程中需要重点考虑的问题之一^[1]。活动断层带地质条件复杂多变,单一超前地质预报技术难以满足施工需求,需构建宏观预判+微观探测+验证反馈综合体系,实现断层地质信息精准识别与动态更新^[2]。宏观预判依托区域地质资料、测绘成果及遥感解译,明确断层基本特征与影响范围,结合地表钻探、物探剖面测量补充验证,提供风险评估基础数据。微观探测采用多技术组合,TSP探测100–200m范围地质构造,GPR短距离判断围岩含水与破碎情况,超前水平钻探获取岩芯并可预加固^[3]。验证反馈阶段对比分析探测与预判数据,结合开挖揭露修正参数,动态调整施工及支护方案,保障施工安全。

（二）围岩稳定性分析与评价方法

围岩稳定性评价是隧道穿越活动断层带施工工艺优化与稳定性控制的核心前提,需结合地质条件、施工扰动、应力状态等多因素,构建定性定量相结合的评价体系^[4]。定性评价依托BQ、RMR等围岩分类标准,结合活动断层带地质特征,初步判定围岩完整性、强度、地下水影响程度及稳定性等级,针对断层破碎带还会重点分析岩体松散程度、胶结状态与抗剪强度,研判坍塌、滑移等失稳风险。定量评价采用数值模拟与现场监测相结合的方式,前者运用FLAC3D、Midas GTS等软件构建三维地质力学模型,模拟隧道开挖过程中围岩的应力分布、位移变形规律,分析不同施工工艺的影响并量化评价围岩稳定状态;后者布设围岩收敛、拱顶下沉、锚杆轴力、钢拱架应力等监测点,实时采集并分析施工数据,判断围岩变形是否超出预警值,既验证数值模拟结果,也为稳定性评价提供实时依据。

二、穿越活动断层带施工工艺优化研究

（一）传统施工工艺及其局限性分析

铁路隧道施工常用的台阶法、CD法、CRD法等传统工艺,在常规地质条件下具备施工效率高、工艺成熟的优势,但穿越活动断层带时存在显著局限性^[5]。其中台阶法开挖后围岩暴露面积大,在断层破碎带松散岩体中易引发围岩坍塌、拱顶过量下沉,且对围岩应力扰动大,易造成断层带岩体二次破碎,加剧围岩失稳风险;CD法与CRD法虽通过设置中隔壁和临时仰拱减小了围岩暴露面积、提升了施工稳定性,却因传统支撑参数设计无法适配断层带岩体的不均匀变形与构造应力释放,易出现中隔壁开裂、临时支撑失效问题。

（二）开挖方法优化

针对断层带地质特点,结合传统开挖方法的局限性,优化提出适配断层带施工的开挖方案,核心原则为短进尺、弱扰动、快支护、勤监测^[6]。对于断层破碎带宽度大于10m、岩体极度松散的区域,采用双侧壁导坑法开挖,导坑开挖进尺控制在0.5–1.0m/

循环,核心土采用分层分段方式开挖且每段长度不超过2m,同时严格控制开挖速度以避免岩体失稳;对于断层破碎带宽度3–10m、岩体稳定性相对较好的区域,优化采用CRD法开挖,将中隔壁厚度增加至30–40cm(采用C25喷射混凝土+双层钢筋网+工字钢组合支护形式),临时仰拱间距缩短至1.0–1.5m并与中隔壁紧密连接形成闭合支护结构,同时按左导坑上台阶→左导坑下台阶→右导坑上台阶→右导坑下台阶的顺序开挖以均衡释放围岩应力。

（三）超前支护与预加固工艺优化

超前支护与预加固是保障隧道穿越活动断层带施工安全的关键环节,通过优化工艺参数与支护形式,提升对围岩的预加固效果与超前支护能力^[7]。超前支护采用大管棚+小导管联合体系,大管棚($\phi 108\text{mm}$ 无缝钢管,长15–20m)与小导管($\phi 42\text{mm}$ 无缝钢管,长4–6m)梅花形布置,小导管采用水泥–水玻璃双液浆注浆(压力0.5–1.0MPa),增强支护整体性与岩体胶结强度。预加固采用超前钻探+注浆堵水+岩体加固一体化方案,探明地下水后分段注浆,极度松散区域增设径向注浆锚杆($\phi 25\text{mm}$ 螺纹钢,长3–4m),提升岩体完整性与承载能力。

（四）初期支护与二次衬砌优化

初期支护与二次衬砌优化核心是提升结构承载、抗变形及耐久性能,适配活动断层带应力与变形特征^[8]。初期支护采用喷射混凝土+钢筋网+工字钢+锚杆联合体系,其中C30早强喷射混凝土厚度为25–30cm, $\phi 8\text{mm}$ 双层钢筋网间距 $15\times 15\text{cm}$,I20b–I22b工字钢间距0.8–1.0m, $\phi 25\text{mm}$ 全长粘结式锚杆长度4–5m、环纵间距均为1.0m,断层核心区额外增设临时仰拱与横撑以强化整体稳定^[9]。二次衬砌需在围岩日变形量 $\leq 0.1\text{mm/d}$ 、累计变形量达预留变形量80%–90%时及时施作,采用厚度50–60cm的C35钢筋混凝土,纵向配置 $\phi 22\text{mm}$ 螺纹钢(间距20cm)、环向配置 $\phi 16\text{mm}$ 螺纹钢(间距15cm),隧道穿越断层段落设置间距5–8m的变形缝,并采用中埋式+背贴式双重止水带防范地下水渗漏与结构变形破坏。

三、隧道结构稳定性控制技术与抗断设计

（一）围岩变形控制技术

隧道穿越活动断层带时,围岩变形控制是保障施工安全与结构稳定的核心,需建立监测预警+主动控制+被动防护全方位变形控制技术体系。监测预警需优化方案,在断层破碎带及前后5–10m范围加密围岩收敛、拱顶下沉等监测点,按变形情况将监测频率调整为1–2次/天至2–4次/天,同时增设深层位移与应力监测点,建立三级预警机制,达到预警值立即停工并启动应急处置^[10]。主动控制需结合超前预加固与施工工艺优化,采取短进尺、快支护、强支护策略,及时施作初期支护与临时支撑,通过超前注浆提升岩体承载能力,同时布设孔径 $\phi 108\text{mm}$ 、深度5–8m、间距2–3m的应力释放孔释放构造应力,主动抑制围岩变形。被动防护方面,需在掌子面布设临时钢支撑与喷射混凝土封闭层防止坍塌,储备应急物资,一旦发生围岩失稳立即启动应急响应,快速实施加固防护以控制灾害扩大。

（二）隧道抗减震设计策略

活动断层带易发生地震等构造运动，隧道结构需具备良好抗减震性能以抵御地震动与断层错动影响，需结合活动断层活动性特征优化抗减震设计策略，提升结构抵御能力。在减震层设计上，于隧道初期支护与二次衬砌之间设置5-10cm 厚的高分子材料（如聚乙烯泡沫板）或橡胶减震垫，可有效吸收地震动能量、减小地震波对二次衬砌的冲击，降低结构应力响应避免开裂，同时在减震层与衬砌间设置防水层保障防水性能；为增强结构抗剪能力，在二次衬砌中增设 $\phi 25\text{mm}$ 螺纹钢抗剪钢筋（间距15-20cm）形成抗剪骨架，在断层破碎带段落优化采用曲墙式衬砌，提升抗剪承载力以规避剪切破坏；隧道穿越断层带段落设置由外套管、内套管、密封装置组成的柔性接头，通过可伸缩式衬砌结构适应断层错动变形防止开裂，接头处增设加强环强化承载与密封性能，避免地下水渗漏。此外，结合地震动参数采用数值模拟方法分析验证隧道抗减震性能，优化设计参数，确保结构在地震作用下的稳定性与安全性。

（三）抗活动断层错断结构设计

活动断层错动是隧道结构破坏的重要诱因，隧道抗错断结构设计需结合断层错动的方向、幅度与速率优化结构形式和构造，以此提升结构抗错断能力。在可动铰结构设计上，于隧道穿越活动断层带的核心段设置该结构，将衬砌划分为多个由球形铰或弧形铰连接的独立单元，这类铰体可实现多向转动与少量平移，适

配断层错动变形、避免衬砌单元因强制变形受损，同时铰体处配套密封与止水构造保障隧道防水性能。伸缩缝与沉降缝设计则结合断层错动特征优化布设间距与构造，在断层破碎带及前后5-10m 范围，将缝间距缩至3-5m，采用遇水膨胀橡胶等柔性密封材料填充缝隙，并在缝两侧增设加强钢筋，兼顾缝隙的密封与变形适应性、衬砌结构的整体性与抗裂能力。针对活动断层的长期活动性，还会选用耐久性强的支护与衬砌材料提升结构抗老化、抗腐蚀性能，同时建立长期监测体系，实时监测断层错动和隧道结构变形，为后期维护加固提供数据支撑。

四、结束语

铁路隧道穿越活动断层带的施工是一项具有极高挑战性的系统工程，其成功与否不仅关系到施工期间的安全与进度，更直接决定了隧道运营期的长期稳定与防灾能力。本文针对活动断层带地质条件复杂、围岩稳定性差及构造运动强烈的特点，系统阐述了从超前地质预报、施工工艺优化到结构稳定性控制的综合技术体系。通过地质预报、施工工法与结构设计的协同优化，能够有效缓解活动断层带对隧道工程的不利影响，保障穿越段隧道施工与运营的双重安全。随着新材料、智能化监测技术及韧性设计理念的不断发展，隧道穿越活动断层带的建设技术将进一步完善，为极端复杂地质环境下的铁路建设提供更加坚实的技术支撑。

参考文献

[1] 印建文. 铁路隧道穿越茂汶—汶川活动断裂段施工技术研究 [J]. 铁道勘察, 2023, 49(3): 131-138. DOI: 10.19630/j.cnki.tdke.202302060001.

[2] 杨恒洪. 穿越活动断裂带铁路隧道三级可变形性结构设计方法研究 [D]. 四川: 西南交通大学, 2023.

[3] 独云龙. 高海拔特长铁路隧道穿越断层带安全施工管理 [J]. 中国铁路, 2021(6): 74-78. DOI: 10.19549/j.issn.1001-683x.2021.06.074.

[4] 同飞跃. 穿越活动断层隧道韧性支护体系研究 [D]. 四川: 西南交通大学, 2023.

[5] 宋恒宇. 穿越活动断层隧道地震动力响应及抗震措施研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.

[6] 孙红林, 肖遥, 刘府生, 等. 穿越活动断裂带深埋隧道围岩地震响应分析 [J]. 结构工程师, 2024, 40(5): 66-78. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0159.2024.05.008.

[7] 王开明. 穿越活动断层隧道的抗震缝减震效果及设防范围研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.

[8] 郭凯. 活动断层错动和地震动耦合作用下跨断层隧道的损伤机理及控制研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2024.

[9] 姬云平. 穿越活断层铰链式衬砌隧道减震措施动力响应研究 [J]. 地震工程学报, 2021, 43(4): 909-919. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.04.909.

[10] 夏雨成, 彭述权. 断层错动作用下穿越断层隧道地震响应特性研究 [J]. 湖南交通科技, 2022, 48(3): 64-71. DOI: 10.3969/j.issn.1008-844X.2022.03.014.