

隧道穿越断层破碎带支护方案比选与工程应用

廖胜宇¹ 董凤山¹ 白佳楠¹ 唐高洪²

1 中建交通建设集团有限公司

2 中建基础设施有限公司

DOI:10.32629/btr.v8i11.5021

[摘要] 针对隧道穿越断层破碎带时围岩自稳性差、易产生大变形乃至坍塌的工程难题,本文结合广西江桂高速工程实际,分别对单一超前支护、组合超前支护及双层初期支护三种方案进行数值模拟和现场实测,分析三种方案对围岩变形控制的力学响应和实际效果。结果表明,优化后的双层初期支护组合方案能有效抑制拱顶沉降速率,有效化解施工安全风险,在保证安全的同时兼顾经济性和环保性,为类似复杂地质条件下的隧道安全、高效、绿色建筑提供了可靠的技术路径与工程借鉴。

[关键词] 断层破碎带; 支护方案比选; 双层初期支护; 监控量测; 工程应用

中图分类号: Q819 文献标识码: A

Comparison and engineering application of support schemes for tunnel crossing fault fracture zone

Shengyu Liao¹ Fengshan Dong¹ Jia'nan Bai¹ Gaohong Tang²

1 China construction Communications Construction Group Co., Ltd.

2 Zhongjian infrastructure Co., Ltd.

[Abstract] in view of the engineering problems of poor self stability, large deformation and even collapse of surrounding rock when the tunnel crosses the fault fracture zone, this paper, combined with the actual situation of jianggui expressway project in Guangxi, respectively carries out numerical simulation and field measurement on three schemes of single advance support, combined advance support and double-layer initial support, and analyzes the mechanical response and actual effect of the three schemes on surrounding rock deformation control. The results show that the optimized double-layer initial support combination scheme can effectively inhibit the settlement rate of the arch crown, effectively resolve the construction safety risks, and take into account the economy and environmental protection while ensuring the safety, which provides a reliable technical path and engineering reference for the safe, efficient and green construction of tunnels under similar complex geological conditions.

[Key words] fault fracture zone; Comparison and selection of support schemes; Double layer primary support; Monitoring measurement; engineering application

1 引言

随着我国交通网络向深山腹地不断延伸,隧道工程遭遇断层破碎带、富水区等地质条件越来越普遍。由于断层破碎带、富水区等地质的岩体松散、自稳性差,施工时极易发生坍塌或大变形,影响人员安全,造成工期耽误、成本增加^[1]。传统设计多依赖初勘资料,难以与开挖后真实地质情况相适应,使得单一支护方案在极端条件下面临较大困境。国内外诸多工程事故表明,在施工前未能进行针对性的支护方案比选与动态设计,是造成严重后果的重要原因之一。本文针对广西江桂高速公路隧道实际面临的断裂带和浅埋难题,通过对比不同支护体系的力学和

实施效果,找到安全、经济和环保的平衡点,为解决初勘与实况偏差造成的技术困境提供一定的工程经验。

2 断层破碎带地质特征与支护方案体系构建

广西江桂高速公路一标段的洞井隧道与保良隧道地处喀斯特地貌发育区,不仅断裂构造纵横交错,而且地下水系发达,浅埋段占比高。传统的二维地质勘察报告往往只能提供剖面信息,难以直观呈现地下空间的立体复杂性,导致施工中对突水突泥风险的预判存在盲区^[2]。因此,本项目引入了三维地质模型系统,将钻探、物探及地表调查数据整合,重构了隧道沿线的地质环境,并据此构建待比选的支护方案体系。

2.1 工程地质重构与灾害源识别

我们基于三维建模技术对隧道穿越关键段落进行重构。研究发现,目标断层破碎带岩体破碎,多为碎裂或散体结构,遇水易软化崩解。在雨季,大量雨水导致地下水活动加剧,致使围岩力学参数下降。由几个典型高风险断面地质参数和风险评价结果看,且处在富水断裂带核心,围岩级别为V级,同时伴有股状涌水风险,属于极高等级风险源。相比之下,部分干燥断裂带虽岩体破碎但水文作用可控,风险等级较低。由此可见,后续支护方案的选型不能“一刀切”,需要根据具体断面的水文地质特征进行差异化设计。

2.2 多维支护方案体系设计

在明确灾害源的基础上,我们构建了三种梯次递进的支护方案体系。在明确灾害源分布与风险等级的基础上,我们设计了三种梯次递进的支护方案。这些方案针对不同风险情景进行系统化配置,旨在通过对比寻找安全、经济与环保的最佳平衡点。

方案A为常规支护,适用于地质条件较好、风险级别为中低的段落。该方案按照传统设计思路,利用单层超前小导管或短管棚进行预加固,同时配合单层初期支护结构^[3]。主要原理是依靠围岩自身短期自稳能力,利用喷锚封闭来避免松动。但当遇到物探异常区或富水断裂带时,其单一刚性支护体系会面临困境:当遇到突发涌水或围岩快速流变时,单层结构容易因受力不足而变形过大甚至发生坍塌,无法应对复杂地质突变。

方案B为加强型支护,重点加强开挖前的预加固工作。针对中等风险以及局部高风险区域,采用“管棚加小导管”的双层组合超前支护或加密双层小导管注浆。方案B试图在隧道轮廓线外形成更厚、更致密的加固拱圈,以提前改善围岩力学性能,阻断地下水通道。虽然方案B提高了超前支护的可靠性,但是初期支护部分仍为单层结构。在实际工程中,即使超前支护效果良好,极破碎围岩在开挖卸荷后的后期流变作用仍然显著,单层初期支护在长期荷载作用下仍可能出现裂缝扩展,难以杜绝大变形隐患^[4]。

方案C为针对极高风险的断层破碎带及浅埋富水区,提出“针对性超前注浆”结合“双层初期支护”的综合治理方案。本方案的核心创新在于分阶段受力机制:第一层柔性支护允许可控变形以释放应力;待变形稳定后,施作第二层刚性支护承担长期荷载。该理念在国内外类似工程中均有成功先例。首先,通过高压注浆对断层核心区进行定向加固,改善岩土体性质。其次,方案C突破了传统单层支护的限制,引入双层初期支护结构:第一层支护允许围岩发生少量可控变形以释放部分地应力,待变形速率趋于平稳后,立即施作第二层加强钢筋混凝土支护或高韧喷射混凝土层;通过分阶段受力,第二层支护得以承受围岩长期流变荷载和剩余地应力,显著提高了结构刚度和抗灾能力。不仅如此,方案C融入了绿色施工理念。鉴于广西多雨且属于生态敏感地带,双层支护之间预留了净水排水接口与盲管系统,将施工期浑浊废水与后期地下水分类导排,保证排放水质符合牛江

河自然保护区标准。最后,方案C建立了动态调整机制,根据监控量测数据实时调整第二层支护施作时机,实现从“被动抵抗”到“主动调控”的转变。

3 方案比选分析与工程应用实效

本章依托广西江桂高速公路隧道项目的实际监测数据与数值模拟结果,对前文提出的三套方案进行全方位对比。我们不再单纯依赖理论计算,而是将目光投向施工现场的真实反馈,通过量化指标来验证不同支护策略在复杂地质条件下的实际表现。这种基于实测数据的比选分析,不仅能为当前项目提供决策依据,也能为同类地质条件下的隧道建设提供可复制的经验范本。

3.1 力学性能与经济成本综合比选

针对断层破碎带的大变形特征,需要考察各方案控制围岩位移的能力^[5]。通过有限元数值模拟和现场监控量测结果验证发现,方案A通过极破碎带时,拱顶沉降量均超过警戒值,收敛速度难以在短时间内稳定,存在较大安全隐患;方案B强化了超前支护,虽然在开挖初期控制了松动,但在长时间流变作用下,单层初期支护应力集中依然存在,个别断面出现混凝土开裂。而方案C由于双层初期支护的协同作用,具备良好的变形控制能力,第一层支护释放一部分能量,第二层支护提供强大的后期刚度,使围岩变形曲线极速趋于平缓。为方便观测三套方案在力学指标上的差异,我们将典型高风险断面的监测数据整理为表1。由表可知,方案C将拱顶最大沉降量控制在35毫米以内,较方案A减少近60%,二衬受力更均匀,安全性大大提高。

表1 不同支护方案力学响应与变形控制效果对比表

评估指标	方案A (常规型)	方案B (加强型)	方案C (创新型)	规范允许值
拱顶最大沉降量 (mm)	88.5	52.3	34.6	100
水平收敛最大值 (mm)	65.2	38.7	21.4	80
初期支护最大主应力 (MPa)	24.8(局部超限)	18.5	14.2	20
塑性区最大深度 (m)	3.8	2.5	1.6	-
变形稳定时间 (天)	>45	28	15	-
安全储备系数	1.15	1.35	1.68	≥1.2

然而,质量的提高必然伴随成本的上升。工程决策需要在安全与效益之间寻求平衡。方案C虽然增加了第二层支护材料和人工投入,但是工期缩短效应和风险规避效应不容忽视。方案A尽管投入最少,但是频繁抢险加固和返工风险使得其综合成本非常不确定。方案B各项指标介于二者之间,但在应对本文所述的极端地质条件时,其性价比不具优势。表2给出了三种方案在典型百米段落内的直接工程造价和间接成本估算。根据分析结果可知,方案C的直接工程造价虽然比方案A高出约36%,但是由于减少了20天的工期和避免了可能发生的坍塌事故处理费用,其全生命周期综合成本反而最低。这种“以技换安、以安促效”的经济逻辑在实际工程管理中得到了验证。

表2 不同支护方案经济效益与工期对比分析表(按每100米计)

成本项目	方案A(常规型)	方案B(加强型)	方案C(创新型)	备注
直接材料费(万元)	180.8	234.4	250	含钢材、混凝土等
人工及机械费(万元)	112	130	143.2	含注浆、双层施工
措施及辅助费(万元)	50	60	72.8	含监控、排水系统
直接总造价(万元)	342.8	424.4	466	-
预计施工工期(天)	65	50	45	含潜在抢险时间
风险预留金(万元)	130	50	5.0	基于风险评估计提
综合总成本(万元)	472.8	474.4	471.0	直接成本+风险金

3.2 工程应用实效与绿色施工评价

在洞井隧道高风险富水断裂带的施工中,项目团队最终采用优化后的方案C。实际应用效果良好,隧道开挖面均处于稳定状态,未发生坍塌和大量涌水事故。在雨季施工时,由于方案中设置了净水排水接口和分类导排系统,施工废水经过初步沉淀和过滤后达标排放,保护了牛江河周边的生态环境。该工程验证了双层初期支护控制大变形的优势,展现了绿色施工理念在复杂隧道工程中的可行性。

现场监测与实体检查证实采用方案C的段落,二次衬砌表面平整,无结构性裂缝,防水板施工质量优良。施工人员反映,双层支护工艺工序虽多,但由于围岩变形可控,作业环境安全,减少了心理负担。同时,采用动态调整机制后,技术人员可根据每日量测数据随时调整第二层支护的施作时机,避免盲目施工造成材料浪费。由此可见,方案C在力学性能、经济合理性和环保效

益上都达到了最佳匹配,克服了由于初勘资料偏差造成的技术难题,为广西乃至全国类似地质条件下的隧道建设提供了经验。

4 结论与展望

本文针对广西江桂高速隧道工程中断层破碎带和富水岩溶地质的复杂情况,利用三维地质模型重建地质信息,确定灾害源分布,然后据此设计了常规、加强和创新三种支护方案。通过力学性能和经济成本的比对,最终选定了创新型双层初期支护方案。该方案具备优越的变形控制能力和全生命周期成本优势,同时实现了围岩大变形控制和绿色排水目标。本研究为类似地质条件下的隧道安全高效建设提供了一条有效的技术路线。

[参考文献]

- [1]范俊敏.基于双侧壁导坑法在超大断面隧道穿越断层破碎带施工关键技术[J].交通建设与管理,2025(2):168-170.
- [2]吴子瀛.大跨隧道穿越断层破碎带支护及施工技术研究[J].山西建筑,2024,50(3):158-160.
- [3]黄解放.东天山隧道穿越断层破碎带初期支护变形分阶段控制标准研究[J].隧道建设(中英文),2022,42(S1):155-165.
- [4]王茜,凌同华,刘唐利,等.穿越断层破碎带隧道入口段施工数值模拟[J].交通科学与工程,2019,035(004):78-84.
- [5]王涵,高永涛,李建旺.隧道穿越断层破碎带施工方案及力学效应研究[J].公路,2021,66(2):8.

作者简介:

廖胜宇(1991--),男汉族,湖南省岳阳市人,本科,中级工程师,研究方向:路桥隧施工管理。