公路隧道不良地质段施工处理技术

李 鑫

(四川路航建设工程有限公司, 四川 成都 610000)

摘 要 本文以某山区高速公路隧道项目为例, 结合项目内容以及施工过程中涉及的不良地质段, 重点分析了隧道穿越的断层破碎带、岩溶发育区、富水区及软弱围岩段的地质特征及施工风险, 针对不同地质问题提出超前探测、注浆加固、排水处理及支护优化等施工技术, 并结合监测手段确保施工安全, 旨在为复杂地质条件下的公路隧道施工提供科学的技术方案。

关键词 公路隧道; 不良地质段; 施工处理技术

中图分类号: U455.49

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.15.012

0 引言

公路隧道在我国山区公路建设中具有重要作用, 但隧道施工过程中常遇到软弱围岩、断层破碎带等不良地质问题。这些不良地质条件不仅影响施工进度, 还会引发工程质量问题, 增加建设成本。因此, 针对不良地质段的施工处理技术研究具有重要的现实意义。目前, 我国在公路隧道施工领域已积累了丰富的经验, 并采用超前地质预报、超前支护等综合处理措施, 以提高施工安全性。同时, 随着隧道施工技术的发展, 数值模拟、智能监测新技术逐步得到应用, 为复杂地质条件下的隧道施工提供了科学高效的解决方案。

1 公路隧道工程概况

本项目为山区高速公路隧道, 采用双向四车道设计, 设计时速 80 km/h。隧道全长 4 180 m, 最大埋深 315 m, 纵坡约 2.4%。隧道进出口分别位于陡峭山体及缓坡地形区, 施工条件较为复杂。地质及水文条件: 隧道主要穿越中等风化花岗岩、砂岩及泥质粉砂岩, 局部段落存在断层破碎带及富水区。围岩级别以 III、IV 级为主, 部分短距离段落为 V 级, 围岩稳定性一般。地下水较丰富, 以裂隙水为主, 部分区域有溶蚀作用, 需采取超前探水和注浆加固。

1. 设计方案: (1) 洞身断面: 单洞双车道, 净宽 10.4 ~ 10.6 m, 净高 4.9 ~ 5.1 m。初支采用 C25 喷射混凝土 + 系统锚杆 + 钢拱架, 局部 IV、V 级围岩段加强支护。二衬采用 C35 钢筋混凝土, 部分软弱围岩段增加防水层。(2) 通风方式: 纵向通风 + 射流风机, 局部区域风速较高需优化布置。隧道中部设紧急通风竖井, 局部可能增设横向通风措施。(3) 排水系统: 上、下分层排水, 设置环向 + 纵向排水系统, 重点防

范渗漏对结构的影响。局部富水区段需设置临时导排水管, 降低涌水对施工影响。(4) 照明及机电: LED 节能照明, 配合智能调光系统优化能耗。设智能监控系统, 远程监测洞内环境及机电设备状态。

2. 施工组织: (1) 开挖方式: 采用台阶法 + 全断面法结合, 遇软弱围岩及破碎带区域, 超前管棚 + 注浆加固确保稳定。(2) 施工设备: 采用双向掘进方式, 配置三台湿喷机械手、两台全液压钻机、一台地质超前钻机等高效设备。(3) 工期计划: 预计工期约 35 ~ 37 个月, 分四个阶段实施: 洞口施工 (约 4 ~ 5 个月), 洞身开挖 (约 18 ~ 20 个月), 衬砌施工 (约 10 ~ 12 个月), 机电安装及调试 (约 3 ~ 4 个月)。

(4) 安全及环保措施: 安全防护包括实时监测围岩变形、拱顶下沉、支护应力, 确保施工安全; 采用自动化监测系统, 结合人工巡检, 及时调整施工方案。环保措施包括施工废水经过污水沉淀池处理后达标排放; 隧道出渣采用密闭运输, 减少粉尘污染, 部分渣料回填利用。

2 公路隧道不良地质段概述

本隧道工程穿越山区地质复杂区域, 部分路段存在不良地质条件, 主要包括断层破碎带、岩溶发育区、富水区及软弱围岩段, 对施工安全和结构稳定性提出较高要求。以下为主要不良地质段及其特点: (1) 断层破碎带: 隧道穿越 F3、F5 两条主要断层, 破碎带宽度分别为 34 ~ 36 m 和 18 ~ 21 m, 岩体破碎, 节理裂隙发育, 围岩级别以 IV ~ V 级为主。断层处应力松弛, 易发生大变形甚至塌方。(2) 岩溶发育区: 隧道部分区段位于碳酸盐岩地层, 勘察发现多处溶洞及暗河, 溶洞最大空间达 4.5 × 3.2 m, 部分洞内充填泥质沉积

物,存在坍塌及突水风险。(3)富水区:富水区主要分布在隧道中段,地下水位高,透水性较强,隧道涌水量预测达 $1\ 150\sim 1\ 250\ \text{m}^3/\text{d}$,局部渗水压力高,可能引发围岩失稳及支护失效。(4)软弱围岩段:部分区段围岩为泥质粉砂岩及强风化岩层,岩体强度低,易发生大变形及围岩蚀变,导致初期支护受力超限。

3 公路隧道不良地质段施工处理技术

3.1 断层破碎带处理——超前探测,注浆稳固

针对断层破碎带,施工人员采用地质雷达精确探测断层破碎带,探测范围覆盖隧道设计断面外 $30\sim 50\ \text{m}$,探测精度需达到厘米级,以明确断层走向、宽度及破碎程度。根据探测数据,制定分区注浆方案,利用差异化处理破碎程度不同的区域^[1]。对于中等破碎区域,使用超前小导管注浆技术,预埋 $\phi 42\ \text{mm}$ 注浆管,间距 $0.8\sim 1.2\ \text{m}$,注浆材料选用水泥—水玻璃双液浆,水灰比 $0.8:1$,注浆压力控制在 $0.8\sim 1.2\ \text{MPa}$,注浆扩散半径达到 $1.5\sim 2\ \text{m}$,注浆后岩体抗压强度需提升至 $3\sim 5\ \text{MPa}$ 。对于严重破碎区域,采取帷幕注浆技术,钻孔间距 $1\sim 1.5\ \text{m}$,注浆材料选用超细水泥浆或化学浆液,注浆压力 $1.2\sim 1.5\ \text{MPa}$,扩散半径 $2\sim 3\ \text{m}$,将岩体渗透系数降至 $1\times 10^{-5}\ \text{cm/s}$ 以下。在注浆过程中,利用实时监测系统,记录注浆压力、流量及浆液扩散范围,避免浆液流失或压力过高导致岩体劈裂。注浆完成后,结合取芯试验验证注浆效果,岩体完整性系数需达到 0.75 以上,单轴抗压强度不低于 $5\ \text{MPa}$ 。开挖阶段,采用短进尺、弱爆破或非爆破机械开挖,每循环进尺控制在 $0.5\sim 1\ \text{m}$,开挖后立即施作初期支护,喷射 $\text{C}25$ 混凝土,厚度 $10\sim 15\ \text{cm}$,铺设钢筋网($\phi 6.5\ \text{mm}$,网格间距 $15\times 15\ \text{cm}$),并且架设 $\text{I}18$ 钢拱架,间距 $0.5\sim 0.75\ \text{m}$ 。对于局部极不稳定区域,增设管棚支护,预埋 $\phi 108\ \text{mm}$ 钢管,横向间距 $30\ \text{cm}$,纵向间距 $2\sim 3\ \text{m}$,钢管内注浆以增强整体性。

在初期支护完成后,立即监测围岩变形程度,采用收敛计、应力计及位移计等监测设备,实时跟踪围岩变形情况。若发现异常变形,及时增加钢拱架密度、加厚喷射混凝土或追加辅助支护,以防止围岩失稳^[2]。在断层破碎带开挖施工过程中,还需加强超前支护措施。对于高地应力或围岩自稳性较差的区域,采用大管棚支护,管棚长度控制在 $15\sim 30\ \text{m}$,倾角 $5\sim 10^\circ$,钢管规格选用 $\phi 108\times 4.5\ \text{mm}$,环向间距 $30\sim 40\ \text{cm}$,管内注浆饱满,以提高围岩承载能力。对于局部突出的软弱破碎带,增加锁脚锚杆,增强围岩稳定性。在隧道掘进施工方面,采取短进尺、快封闭、强支护的原则。爆破开挖时,宜采用光面爆破技术,减小对围

岩的扰动。爆破采用小药量、密集孔布置方式,以降低振动影响。对于极破碎岩体或存在突涌水风险的区域,使用液压破碎锤开挖,以减少对围岩的扰动。

3.2 岩溶发育区处理——精确探查,注浆填充

对于岩溶发育区处理,施工人员利用高密度电法(测区电极距宜为 $2\sim 5\ \text{m}$,精度达 $\pm 5\%$),初步探测地下介质异常电阻率,判断可能存在的岩溶空洞、裂隙带位置。同时,结合地震波 CT (接收传感器布设间距不超过 $2\ \text{m}$,成像分辨率达 $\pm 1\ \text{m}$),识别岩溶区内部结构,精确刻画空洞、软弱夹层等不良地质特征,并配合瞬变电磁法(发射线圈面积 $> 25\ \text{m}^2$,探测深度达 $50\ \text{m}$),识别深部溶洞^[3]。探测数据需经三维建模处理,并采用 GIS (地理信息系统)技术进行可视化分析,以形成完整的地质信息数据库。钻探验证时,施工人员布设网格化钻孔,孔距控制在 $5\sim 10\ \text{m}$,重点区段加密至 $3\sim 5\ \text{m}$,钻孔深度须超出隧道拱顶 $3\sim 5\ \text{m}$,钻孔取芯率 $\geq 85\%$,并结合水压测试分析裂隙渗透性,精确评估岩溶地层稳定性及充填物特性。处理岩溶孔洞及裂隙应采用分区、分级、分步注浆策略,控制浆液扩散范围。

针对大规模空洞($> 1\ \text{m}^3$),采用水泥—水玻璃双液浆(水灰比 $0.8\sim 1.2:1$,凝固时间控制在 $10\sim 30\ \text{min}$),以快速填充并形成高强度胶结体。对细微溶蚀裂隙(宽度 $< 5\ \text{mm}$),可使用丙烯酰胺化学浆液(渗透能力 $> 2\ \text{m}$),提高浆液渗透性。注浆施工采用多级注浆法,先低压($0.3\sim 0.5\ \text{MPa}$)封堵微裂隙,再高压($1.0\sim 1.5\ \text{MPa}$)填充大孔隙,以保证浆液充分扩散而不引发围岩破坏。另外,实时监测注浆量(应达到理论计算孔隙率的 90% 以上)、浆液扩散半径($\geq$ 设计值 85%)、注浆压力波动范围(控制在 $\pm 0.2\ \text{MPa}$ 内)等参数。施工完成后,进行钻孔抽芯(核心完整率 $\geq 85\%$)、波速测试(充填区波速提升 $\geq 40\%$)及水压试验(渗透系数降低至 $1\times 10^{-6}\ \text{cm/s}$ 以内),验证注浆密实性及防渗效果。在隧道掘进过程中,实施超前地质预报,采用 TSP (地震波透射法,预报距离 $20\sim 50\ \text{m}$,误差控制 $< 10\%$)、地质雷达(探测深度 $10\sim 15\ \text{m}$)等手段,动态掌握前方岩溶发育情况。对于突发性岩溶灾害(如暗河、突水突泥),采取帷幕注浆(孔距 $0.5\sim 1\ \text{m}$,形成连续止水屏障)、超前小导管注浆($\phi 42\ \text{mm}$ 钢管,孔内设排气阀,浆液扩散 $\geq 2\ \text{m}$)等加固措施。

3.3 富水区段处理——帷幕加固,分层排水

公路隧道穿越富水区段时,施工人员可采用帷幕加固与分层排水相结合的施工技术,以提高结构稳定性。帷幕加固采用超前帷幕注浆与径向注浆联合技术,

在隧道轮廓外3~5 m范围布设注浆孔,环向间距控制在0.5~1.0 m,形成封闭止水屏障。注浆孔深度不小于围岩富水层厚度的1.5倍。注浆材料根据围岩渗透性选择合适配比的水泥—水玻璃双液浆,水灰比控制在1:1~1.5:1,高渗透岩层或断裂带可采用超细水泥浆,提高浆液渗透能力^[4]。注浆压力控制在0.5~2.0 MPa,保证浆液扩散半径达到设计值的90%以上。注浆效果借助钻孔抽芯验证,要求取芯率达到85%以上,渗透系数降低至 1×10^{-7} cm²/s以内。径向注浆采用“由外向内、先低后高”的顺序进行,注浆孔间距控制在0.8~1.5 m,以增强围岩整体自稳能力。

分层排水系统包括超前导水孔、围岩排水系统及二次衬砌防排结合结构。超前导水孔在掌子面前方15~30 m布设,孔深10~20 m,倾角控制在10°~15°,引导地下水有序排泄。导水孔出水量降低至初始值的30%以下后,方可进入正式开挖。围岩排水系统由环向排水盲管、径向疏水孔及纵向排水管构成,环向排水盲管布设间距控制在1.5~3 m,径向疏水孔孔径50 mm,深度3~5 m,纵向排水管直径110 mm,使渗流量降低至设计允许值以内,同时降低围岩水压力50%以上。二次衬砌采用复合防排水结构,先敷设厚度2~3 mm的防水板,焊接接缝密封度达到95%以上,再设置透水性不小于0.1 cm/s的排水层,常用材料为聚乙烯排水网,最终形成封闭衬砌结构,防止隧道内部渗漏水。施工过程中,采用测斜仪监测围岩变形程度,控制误差在≤2 mm,同时监测地下水渗流量,保证流速下降幅度超过70%,并检测衬砌渗水点。

3.4 软弱围岩段处理——分步开挖,支护加强

在软弱围岩段地质段,施工人员采用分步开挖与支护加强相结合的施工技术,以控制围岩变形,提高结构稳定性。开挖方式采用台阶法、环形开挖留核心土法或中隔壁法,依据围岩级别选择合理方案^[5]。V级围岩宜采用环形开挖留核心土法,核心土宽度控制在1.5~2.5 m,确保围岩自稳能力,降低扰动;IV级围岩可采用台阶法,步距控制在1.0~2.0 m,以减少围岩松弛变形。开挖过程中设置超前地质预报,采用超前钻探、地质雷达及TSP(地震波透射法)联合探测,预报范围≥30 m,预测误差控制在10%以内。

支护加强采用超前支护、初期支护及二次衬砌联合实施。超前支护采用管棚或超前小导管,管棚采用Φ108 mm无缝钢管,长度9~12 m,间距300~400 mm,成环状布设,提高围岩稳定性。超前小导管采用Φ42 mm钢管,间距400~600 mm,外插角5°~10°,长度3~5 m,采用水泥—水玻璃双液浆注浆,注浆压力

0.5~1.5 MPa,扩散半径≥1.5 m,形成预加固区域,降低围岩收敛速率。初期支护采用钢拱架、喷射混凝土及系统锚杆联合施工,钢拱架间距0.5~1.0 m,采用I20~I25型工字钢,拱架闭合误差≤5 mm。喷射混凝土厚度≥30 cm,28 d强度≥25 MPa,分层喷射,每层厚度5~7 cm,间隔时间≤2 h,采用速凝剂提高早期强度,降低回弹率≤15%。系统锚杆采用Φ25 mm全螺纹钢筋,长度3~5 m,间距1.5~2.0 m,外插角10°~15°,采用水泥砂浆或树脂锚固剂锚固,锚固体强度≥30 MPa,提高围岩抗剪能力。二次衬砌采用复合衬砌结构,混凝土强度≥C30,厚度≥40 cm,衬砌表面光滑,接缝密封度≥95%,采用钢筋网加固,提高整体刚度。在施工过程中,采用收敛计,监测围岩变形程度,监测频率每日1次,围岩收敛速率控制在≤2 mm/d,累计变形量≤30 mm。

4 结束语

公路隧道穿越不良地质段时,需要综合考虑地质特征、施工安全及结构稳定性,采取科学合理的处理技术。断层破碎带、岩溶发育区、富水区及软弱围岩等不良地质条件对隧道施工构成了较大的挑战,但借助超前探测、注浆加固、排水系统优化以及合理的开挖与支护方式,可以有效降低施工风险,确保工程顺利推进。在施工过程中,施工人员应充分利用现代地质探测技术,实时掌握围岩状况,并结合超前支护与动态调整施工参数,保证隧道结构的安全性。同时,加强施工监测,采用自动化监测系统结合人工巡检,将围岩变形、支护受力等关键指标控制在安全范围内。本项目的施工处理技术可为类似工程提供有价值的经验借鉴。未来,随着施工技术的进步,不良地质隧道的处理方案将更加精细化,进一步提升公路隧道的施工安全性,为交通基础设施建设提供有力的支撑。

参考文献:

- [1] 周志勇,陈文达.公路隧道工程不良地质段施工技术研究[J].中国设备工程,2025(01):247-249.
- [2] 陈增旭.公路隧道工程不良地质段施工技术[J].工程建设与设计,2024(23):272-274.
- [3] 补彬.公路隧道不良地质段施工技术应用研究[J].资源信息与工程,2024,39(04):95-98.
- [4] 李奎.公路隧道工程不良地质段施工技术分析[J].科学技术创新,2022(23):128-131.
- [5] 马奇.公路隧道工程不良地质段施工技术分析[J].运输经理世界,2022(11):82-84.