

大断面隧道贯通段塌方处理施工技术

李璇, 刘振波

(中交一航局城市交通工程有限公司)

摘要: 为解决大断面隧道施工中贯通段塌方造成的安全威胁与工期延误问题, 以广西平南高速银岭隧道塌方段为研究对象, 综合采用地质雷达勘探、超前管棚加固、三台阶中隔壁法开挖等关键技术, 提出了一套动态监测与分阶段治理相结合的塌方处理方案。通过现场实践, 塌方体得到有效回填与加固, 隧道初支及二衬变形量均小于规范允许值(1 mm), 未发生二次塌方或渗水现象。结果表明, 该方案通过“先加固后分步开挖、短进尺强支护”的施工原则, 显著提升了围岩稳定性与施工安全性, 可为类似大断面隧道塌方治理提供技术参考。

关键词: 大断面隧道; 塌方处理; 管棚加固; 三台阶法; 施工安全

0 引言

隧道工程作为交通基础设施建设的核心领域, 安全性是确保施工顺利推进的重要前提。近年来, 我国隧道建设规模与技术能力实现跨越式发展, 截至 2023 年, 全国运营隧道总里程已突破 6 万 km, 其中大断面隧道占比逐年上升。然而, 随着隧道断面尺寸的增大, 围岩应力分布复杂化, 贯通段塌方事故频发。据统计, 随着隧道开挖跨度的增大, 塌方事故逐渐增多, 隧道跨度小于 7 m 时塌方次数仅占总塌方次数的 6%, 隧道跨度大于 10 m、12 m 和 15 m 时塌方次数占比分别为 74%、44%和 11%^[1]。此类事故不仅威胁施工人员安全, 更可能导致工期延误、结构隐患等连锁问题, 亟需系统性解决方案。

在塌方处理技术研究领域, 国内外学者已取得一定成果。国外研究方面, 如 Hoek^[2]提出基于岩体质量分级(RMR)的支护设计方法, 但其适用于常规断面隧道, 对大断面贯通段的动态荷载响应分析不足; 国内研究方面, 甘小江^[3]针对塌方段注浆锚固技术进行优化, 通过短进尺开挖结合径向注浆控制围岩变形, 但未解决大断面塌方体回填后的结构稳定性问题。李春^[4]采用长短管棚联合支护技术, 有效提升破碎围岩承载力, 然而管棚参数设计缺乏对大断面隧道矢跨比的适应性分析。此外, 现有研究多聚焦于塌方后的被动治理, 对施工过程中的动态监测与风险预警体系构建关注不足, 导致加固措施滞后于围岩劣化进程。

当前大断面隧道贯通段塌方处理面临三大技

术瓶颈: 1) 传统支护方法(如小导管注浆)加固范围有限, 难以覆盖大断面塌方体的应力松弛区; 2) 富水地层中注浆材料易被地下水稀释, 浆液扩散可控性差; 3) 施工监测以人工巡检为主, 难以实时捕捉围岩裂隙扩展趋势。

针对上述问题, 本文以广西平南高速银岭隧道塌方段为工程依托, 提出了融合动态监测、分序加固与短进尺支护的综合性处理方案。首次将三台阶中隔壁法与大管棚超前支护结合, 通过中隔壁临时支撑减少开挖暴露面, 同时利用 $\phi 108$ mm 大管棚按照环向间距 30 cm 布置形成“拱壳效应”, 显著提升富水破碎围岩的自稳能力。构建“地质雷达+自动化传感器”多层级监测网络, 实现塌方体空腔分布与初支变形的实时反馈, 预警响应时间缩短至 2 h 内。提出“分阶段回填+分序注浆”工艺, 采用 M20 砂浆分次泵送填充空腔, 结合分段式注浆压力控制(阈值 2 MPa), 避免初支结构因浆液膨胀应力导致的二次破坏。

本文研究成果不仅成功应用于银岭隧道塌方段治理, 使初支变形量控制在 0.8 mm 以内, 低于规范允许值(1 mm), 且为类似地质条件下大断面隧道贯通段的安全施工提供了理论依据与技术范式, 具有显著的工程应用价值与社会效益。

1 工程概况

平南高速银岭隧道位于广西南宁市, 为双洞分离式隧道, 左洞起讫桩号 ZK160+845—ZK162+358, 全长 1 513 m, 净宽 15.25 m, 净高 5 m, 最大埋深 84 m。隧道穿越低山地貌区, 地层以泥盆

系中风化砂岩、石英砂岩及泥岩为主,岩体破碎,层间胶结较差,围岩等级为IV级。施工采用复合式衬砌(SJ-IV型),上下台阶法结合光面爆破工艺开挖掘进,初支采用间距0.75 m的I25a工字钢架与C25喷射混凝土联合支护。

2022年1月13日,左线K161+563—K161+590段在开挖过程中发生多次溜塌。塌方段长27.8 m,揭露围岩为强风化泥岩夹杂黄泥,局部渗水,与设计中预期的中风化砂岩差异显著。地质勘察表明,该段存在隐伏断裂带(实际位置较设计前移75 m),岩层斜向发育且富水,导致开挖后岩体顺层滑脱。塌方体迅速填满上台阶,最大塌腔高度达4.2 m,严重威胁施工安全。

2 大断面隧道贯通段塌方原因分析

银岭隧道塌方段事故的发生是地质条件、设计偏差、施工扰动及监测滞后等多因素耦合作用的结果。通过现场勘查与相关资料对比,本文从以下4个方面系统解析塌方成因。

2.1 地质条件复杂性

1) 断裂带前移与岩性突变

设计阶段断裂带位于ZK161+655,实际施工中前移至ZK161+580(偏移75 m),导致围岩由预期的中风化砂岩突变为强风化泥岩夹黄泥。岩体单轴抗压强度由原设计的35 MPa降至12 MPa,层间胶结系数(JRC)不足3,远低于IV级围岩稳定阈值($JRC \geq 6$)。

2) 富水环境诱发岩体软化

通过对塌方段水文情况调查,地下水位持续稳定在隧道底板上方3.2 m位置,岩层渗透系数达 1.8×10^{-4} cm/s,属中等透水性地层。该水文地质条件导致施工期隧道拱顶及掌子面周边发生持续渗流,掌子面后方泥岩层呈现明显水饱和状态。室内岩石力学试验表明,含水率升高使泥岩黏聚力产生结构性衰减,由初始0.150 MPa锐减至0.057 MPa(降幅达62%),同时内摩擦角退化至 12° 水平。这种强度参数的劣化过程直接导致围岩抗剪强度下降约58.6%,形成软弱滑动面,使得原本设计的支护结构无法有效控制围岩变形发展。

3) 裂隙网络扩展

三维激光扫描显示,塌方段裂隙密度为8.2条/ m^3 ,远超IV级围岩允许值(≤ 4 条/ m^3)。裂隙倾角以 $45^\circ \sim 60^\circ$ 为主,与隧道轴线呈 30° 斜交,形成贯通性滑移面。

2.2 设计与施工适配性

1) 支护强度偏低

原设计采用间距0.75 m的I25a工字钢架与C25喷射混凝土支护体系,但富水环境下岩体受地下水长期侵蚀,含水率显著升高导致泥岩软化,其自稳能力大幅削弱。根据新奥法原理,围岩作为主要承载体的功能失效后,初期支护需动态补充承载需求。然而,原支护结构因刚度偏高且缺乏变形适应性,在围岩持续软化过程中无法协调释放变形与提供约束的平衡关系,喷混凝土层出现贯通裂缝,钢架发生屈曲,最终因支护体系与围岩力学响应失配而丧失整体稳定性。

2) 开挖工法缺陷

上下台阶法开挖步距为5 m,导致未支护段暴露时间长达72 h。数值模拟表明,大断面隧道(净宽21.6 m)在无临时支撑时,围岩塑性区半径达4.5 m,远超支护范围(2.8 m)。

2.3 动态监测完备性

1) 监测频率与精度不足

塌方前7 d,人工巡检仅发现2处宽度小于1 mm的微小裂隙,而高频传感器数据回溯显示,拱顶位移速率已从0.3 mm/d增至1.2 mm/d。现有研究多依赖经验阈值(如1 mm/d),但未考虑大断面隧道的位移梯度效应。

2) 风险预警滞后

塌方发生前12 h,围岩声发射事件数激增至58次/min(背景值 < 5 次/min),但未触发预警。

2.4 既有研究局限性

既有塌方成因分析多聚焦单一因素(如支护不足或地质突变),缺乏多场耦合分析。通过引入“地质-施工-监测”三元评价模型,首次量化了断裂带偏移量(75 m)、富水软化系数(0.62)与支护滞后时间(72 h)对塌方风险的贡献权重(分别为42%、35%、23%),弥补了传统定性分析的不足。

3 贯通段塌方处理准备

3.1 处理原则

1) 遵循分析原因和地勘,还原过程判规模;先外部后内部,先加固后分步开挖;

2) 根据坍塌规模、围岩自稳状态、机械化程度等因素尽量减跨,降低因为矢跨比过小而导致的围岩失稳或坍塌;

3) 最大限度抵抗不稳定体自重应力的继续发展和约束岩体次生应力场再次集中释放而导致的

跨径范围内每 5 m 布设一环监控量测点。塌体处理过程中每进尺 3 m 布设一环监控量测点。洞内观察在溜塌体未进行体内处理阶段观测频率不小于 2 h/次；塌腔体处理过程中安排专人在安全位置 24 h 观测。观测内容包括：1) 塌体处理过程中围岩情况；2) 喷射混凝土表面是否有裂缝、剥落、渗水等；3) 锚杆、钢架的表面外观状况等；4) 洞外地表按不小于 1 次/d 的观测频率执行，观测地表是否出现塌陷、裂缝、地表是否存有积水等；5) 净空、水平收敛和拱顶下沉量测采用相同的量测频率，量测频率为 3 次/d。

4.7.2 安全管理

施工现场进出口各设 1 名经过培训具有担任安全工作资格的专职安全员，负责全天候监督施工安全。监控量测及地质雷达纳入工序管理，按照实施细则严格执行，相关数据处理及分析在监测完成后不晚于第 2 天上报。机械作业均安排专人盯控，机械作业半径内严禁站人。机械定机、定人、定岗，认真执行安全操作规程，坚持交接班检查制度，作好记录。溜塌体体内处理严禁开挖循环进尺过大，支护不及时，每循环不得超过 1 榀。严格执行开挖后先素喷后支护的要求。加强隧道拱顶下沉及水平收敛的观测，发现洞内位移值等于或大于允许位移值(1 mm)。地面或洞内出现裂缝时，必须立即通知作业人员撤离现场，待制订处理措施后再施工。

5 施工效果

处理方案实施后，塌方体得到了有效的填充加固，银岭隧道左线顺利贯通。初支拱顶最大下沉量为 0.78 mm，周边收敛值为 0.65 mm，均低于规范允许值(1 mm)；二衬施作后，变形速率趋近于 0。塌方段二衬表面无可见裂缝，渗水量 $<0.1 \text{ L}/(\text{m}\cdot\text{d})$ ，远低于设计阈值 $0.5 \text{ L}/(\text{m}\cdot\text{d})$ 。施工全程未发生二次塌方、掉块或支护结构失稳事故。运营期 6 个月后，采用地质雷达复测显示，塌方段拱

顶无空腔残留，围岩与初支接触密实(密实度 $\geq 95\%$)。所有监测指标均符合 JTG/T 3660—2020《公路隧道施工技术规范》要求，实现了围岩稳定性控制与结构耐久性的双重目标。

6 结语

本文针对大断面隧道贯通段塌方治理难题，以广西银岭隧道工程为实践载体，提出了涵盖地质风险动态识别、分级防控体系优化与协同施工技术集成的系统性解决方案，揭示了复杂地质环境下塌方治理的关键机制。通过构建“地质-施工-监测”三元耦合分析模型，量化了断裂带偏移(42%)、富水软化(35%)及支护滞后(23%)对塌方风险的贡献权重，突破了传统单因素分析框架的局限性；创新性地将三台阶中隔壁法与大管棚超前支护结合，辅以分阶段注浆压力控制技术(0.5~1.2 MPa)，使围岩承载力提升 30%~40%，成功解决了富水地层浆液扩散可控性难题。工程实践表明，该方案将初支变形量稳定在 0.8 mm 以内，工期缩短 33%，综合成本降低 12%，为高风险隧道的安全高效治理提供了可复制的技术范式，同时为城市地下空间开发、深埋矿山支护等领域拓展了应用前景。然而，当前研究在极端地质适应性、智能监测技术及抗水蚀材料方面仍需突破，未来应通过多学科交叉创新完善隧道全周期风险管控体系，并推动绿色智能技术研发，实现行业安全可持续发展。

参考文献：

- [1] 李奥. 大断面隧道塌方机理与安全性控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [2] Hoek E. Practical Rock Engineering[M]. Toronto: Roescience, 2007: 56-89.
- [3] 甘小江. 隧道贯通段塌方处理施工技术[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(6): 168-171.
- [4] 李春. 长短大管棚法处理隧道塌方施工技术[J]. 西部交通科技, 2011(2): 64-67.