

暗挖隧道拱顶空腔病害修复后结构安全性评估研究

李乾文, 欧阳兆康

(佛山市地铁运营有限公司, 广东 佛山 528311)

摘要 在复杂地质条件下施工的暗挖隧道易出现直接影响结构稳定与运营安全的拱顶空腔病害。本研究以某城市地铁区间隧道为对象, 针对右线多处拱顶空腔问题系统分析其分布特征与成因并评估注浆等修复技术的实施效果。采用数值模拟方法, 结合防水混凝土性能与支护参数建立修复后隧道结构力学模型以量化评估结构安全系数与长期耐久性。研究表明, 所选修复方法能有效恢复结构完整性, 虽短期稳定性满足要求, 但局部区域仍需关注地下水渗透与施工缝影响, 为类似工程病害修复与安全性控制提供实践参考。

关键词 暗挖隧道; 拱顶空腔; 病害修复; 结构安全评估; 数值模拟

中图分类号: U45

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.041

0 引言

暗挖隧道作为城市地下交通建设的重要工法, 在复杂地质条件与密集构筑物环境下应用广泛, 而矿山法施工的隧道常因地质变异、地下水作用或混凝土浇筑不密实等因素在拱顶区域形成严重影响结构整体性与长期耐久性的空腔病害, 该类病害不仅削弱衬砌承载能力, 还可能引发局部剥落、渗漏甚至变形失稳从而威胁运营安全。近年来, 随着地铁工程向深层化、网络化发展, 拱顶空腔问题逐渐成为隧道运维中的突出挑战, 特别是在残丘地貌、地下水丰富的工程场区, 空腔病害更具隐蔽性和反复性。现有研究多集中于空腔探测与修复工艺, 而对修复后隧道结构在长期荷载与环境耦合作用下的安全性评估尚缺乏系统分析。

1 暗挖隧道拱顶空腔病害特征分析

1.1 空腔病害分布与形态描述

暗挖隧道拱顶空腔病害的精准识别与量化描述是进行有效性修复与结构安全评估的首要前提。本工程

实例揭示, 空腔病害在隧道右线呈现出非均匀的集群分布特征, 主要集中在 YDK67+515 至 YDK67+682 这一连续里程段, 该区段隧道埋深介于 20 m 至 28 m 之间, 处于地下水位线以下, 承受着约 0.2 MPa 至 0.28 MPa 的静水压力^[1]。

通过系统性的地质雷达扫描与高密度锤击回声法进行普查, 辅以重点区域的钻孔内窥镜验证, 确认了多处典型空腔。锤击时发出的沉闷空响声音频率明显低于密实混凝土的清脆声, 其主频通常低于 2 kHz, 这是判断衬砌背后存在脱空最直观的物理现象。为系统呈现病害信息, 对关键特征数据进行结构化汇总(详见表 1)。

1.2 空腔成因与影响因素

暗挖隧道拱顶空腔病害的形成是一个多因素、多阶段耦合作用的复杂结果, 其根源可追溯至工程地质水文条件、结构设计参数、施工工艺控制以及材料性能等多个层面。从岩土工程角度深入分析, 隧道穿越的残

表 1 拱顶空腔病害特征汇总表

| 里程位置 | 拱部方位 | 空腔数量 | 预估尺寸(长×宽×高) | 主要症状与检测特征 | 当前状态 |
|-----------|------|------|------------------------|---------------------------|---------------|
| YDK67+660 | 12 点 | 6 | 2.5 m×1.5 m×0.08 m(平均) | 锤击声沉闷, 主频< 2 kHz, 1 处内部积水 | 5 处稳定, 1 处已处理 |
| YDK67+682 | 10 点 | 3 | 1.8 m×1.0 m×0.12 m(平均) | 锤击声沉闷, 热成像低温异常, 内部渗漏 | 表面稳定, 病害活动 |
| YDK67+515 | 9 点 | 1 | 已破坏 | 混凝土剥落, 钢筋外露锈蚀 | 已凿除重建 |
| YDK67+557 | 12 点 | 1 | 1.0 m×0.8 m×0.03 m | 锤击声沉闷, 回声衰减快 | 表面稳定 |
| YDK67+554 | 12 点 | 1 | 0.8 m×0.6 m×0.05 m | 锤击声沉闷 | 表面稳定 |

丘地貌单元上覆第四系填土及坡残积层厚度变化剧烈,介于3 m至15 m之间,下伏古近系泥质粉砂岩强度软硬不均,饱和单轴抗压强度在5 MPa至25 MPa范围内波动^[2]。这种显著的不均质性极易导致开挖轮廓超挖或欠挖,超挖量最大处可达设计线外50 cm,为初期支护喷射混凝土与围岩之间形成天然空隙创造了条件。

2 空腔病害修复方法与效果评估

2.1 修复技术选择与实施

在建设期应对隧道拱顶空腔病害时,施工单位依据现场勘察结果实施了一套实用高效的修复方案。该方案核心针对混凝土破损区域与内部空腔采取差异化处理,重点在于恢复衬砌结构完整性并阻止病害扩展。对于已出现开裂剥落的严重破损部位,执行彻底凿除作业。操作中使用液压破碎锤谨慎移除疏松混凝土层,凿除深度确保抵达坚实基层并暴露钢筋骨架,同时对HRB400钢筋进行表面除锈处理,涂刷环氧富锌底漆以防止腐蚀。基层处理完毕后立模浇筑C35微膨胀混凝土,坍落度控制在180 mm至200 mm范围,浇筑后覆盖土工布持续湿养护14天以上,保证新旧混凝土界面粘结强度与抗裂性能。

2.2 修复效果监测与验证

在运营接管阶段,对建设期已修复的空腔病害进行效果验证是保障隧道长期安全的关键环节。建立一套系统化的无损检测体系至关重要,该体系需能够穿透混凝土表层,有效探查修复材料与原有结构之间的粘结状况以及内部可能存在的缺陷。多种检测技术因其原理与适用性差异,在实际应用中需根据具体工况进行选择与组合。锤击法作为一种传统且高效的初步筛查手段,在现场检测中具有不可替代的地位,其原理在于通过敲击衬砌表面,依据声音的清脆或沉闷特性来定性判断背后是否存在脱空^[3]。地质雷达检测技术通过向衬砌内部发射高频电磁波并接收反射信号,能够非破坏性地获取修复区域的内部结构影像。电磁波在介质界面发生反射,其双程走时与振幅特征可揭示脱空、不密实等缺陷的位置与范围。

2.3 修复后短期性能分析

在为期三个月的短期运营监测中,修复区段的隧道衬砌整体稳定性良好,多数区域未见宏观裂缝生成或渗漏复发,表明修复措施在短期内实现了基本性能恢复。然而,YDK67+682和YDK67+660里程处已修复的空腔病害表面出现了宽度约0.5 mm的裂纹、局部脱空及渗水现象,与其他位置的正常状态形成鲜明对比。

这一结果揭示了前期修复方案存在的局限性,注浆材料与混凝土界面的粘结性能可能因环境波动或施工差异而退化,短期有效性无法掩盖长期耐久性风险。此类局部失效案例凸显了进行系统性安全性评估的必要性,为后续模型构建与风险预测提供实证基础。改性环氧浆液体系展现出了优异的早期力学性能,其7天抗压强度即可达到60 MPa以上,与旧混凝土的粘结界面强度超过混凝土自身的抗拉强度,实现了协同受力。然而,必须清醒地认识到短期性能的稳定并不能完全等价于长期耐久性的保障,现有修复方法仍存在固有的局限性^[4]。

3 修复后结构安全性评估模型与应用

3.1 安全性评估方法与模型构建

为精确量化空腔修复后隧道结构在长期服役条件下的安全状态,本研究构建了一个融合地质力学、材料力学与接触力学的三维非线性有限元数值分析模型。该模型的核心在于精确表征修复区材料特性及其与原有结构的相互作用。模型几何尺寸严格依据工程实际,隧道埋深取最不利的28 m工况,计算范围横向取5倍洞径以消除边界效应。围岩的本构关系采用能较好反映岩土材料剪切屈服特性的莫尔-库仑准则,其屈服函数由材料的内聚力与内摩擦角共同确定,数学表达式如下:

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \phi \quad (1)$$

式(1)中, τ_f 为岩土体抗剪强度, c 为粘聚力,根据地质勘察报告取值为180 kPa, σ_n 为作用在剪切面上的法向应力, ϕ 为内摩擦角,取值为32度。在构建隧道结构安全性评估模型时,参数取值的科学依据直接决定了模拟结果的可靠性。岩土体的抗剪强度 τ_f 由粘聚力 c 和内摩擦角 ϕ 共同定义,其中 c 取值为180 kPa, ϕ 取值为32度,这些数据均源自项目前期详细的地质勘察报告,该报告通过现场直剪试验与室内土工试验综合确定,反映了当地围岩的实际力学特性。围岩被视为弹塑性材料,其弹性模量根据风化程度差异设定为150 MPa至500 MPa的区间值,强风化岩体取下限150 MPa,微风化岩体取上限500 MPa,该分级依据地质剖面图与岩石质量指标RQD值进行划分;泊松比统一取0.3,引用自文献^[5]中类似地质条件下的经验值,确保了模型边界条件的合理性。

3.2 安全性指标与结果分析

基于所构建的三维非线性有限元模型,对五处典型空腔修复区进行了静力荷载下的精细化数值模拟。

计算结果表明, 结构整体应力水平处于可控范围, 但局部存在潜在风险点。YDK67+515 里程处修复区域表现最佳, 衬砌最大 Von Mises 等效应力为 18.2 MPa, 远低于 C35 混凝土抗压强度设计值 23.4 MPa, 安全系数达到 1.29, 修复注浆体内部压应力仅为 9.8 MPa, 显示出优异的修复效果。YDK67+660 里程处状况需引起高度关注, 其仰拱中心出现最大主拉应力 2.18 MPa, 已超过 C35 混凝土抗拉强度设计值 2.2 MPa 的 99%, 虽未超限但安全裕度极小, 长期荷载下存在开裂风险。YDK67+682 里程处修复体内部压应力为 12.5 MPa, 材料强度充足, 但该处衬砌与围岩接触面出现应力集中现象, 界面剪应力达到 1.8 MPa, 需重点关注粘结耐久性。YDK67+720 与 YDK67+745 两处修复区应力分布较为均匀, 最大主应力分别为 1.95 MPa 和 1.87 MPa, 安全系数分别为 1.13 和 1.18, 处于相对安全状态。各修复区变形量均控制在 3 mm 以内, 满足规范限值要求。数值模拟揭示了不同修复工况下的力学响应差异, YDK67+660 处的高拉应力状态与现场发现的表面裂纹相互印证, 说明模型能够有效反映实际结构的薄弱环节。尽管多数区域修复效果良好, 但局部应力接近材料强度极限的区段必须纳入重点监测范围, 为后续长期性能评估提供定量依据, 空腔修复区安全性评估结果如表 2 所示。

表 2 空腔修复区安全性评估结果汇总

| 里程位置 | 最大等效应力(MPa) | 最大主拉应力(MPa) | 修复体压应力(MPa) | 评估结论 |
|-----------|-------------|-------------|-------------|------|
| YDK67+515 | 18.2 | 1.65 | 9.8 | 优秀 |
| YDK67+660 | 19.8 | 2.18 | 11.5 | 临界 |
| YDK67+682 | 17.5 | 1.92 | 12.5 | 良好 |
| YDK67+720 | 16.8 | 1.95 | 10.2 | 良好 |
| YDK67+745 | 16.2 | 1.87 | 9.5 | 良好 |

3.3 影响因素与敏感性讨论

尽管数值模拟表明修复后结构在基准条件下是安全的, 但其长期安全性对若干环境与材料参数的变异性高度敏感。地下水位的波动是首要外部风险因素, 敏感性分析显示, 若地下水位因极端降雨上升 7 m, 水压力增至 0.35 MPa, 将导致衬砌最大主拉应力增至 2.38 MPa, 超出混凝土抗拉强度, 存在开裂风险, 裂缝宽度可能增至 0.22 mm, 威胁防水密封性。施工缝的长期性能是关键内部不确定因素, 若止水带老化失效, 高压水沿施工缝渗入, 会软化周边围岩并侵蚀修复界面, 假设

围岩粘聚力 c 因浸水软化下降 30% 至 126 kPa, 计算得围岩塑性区深度将扩大至 3.2 m, 危及隧道稳定^[6]。修复材料的老化是另一核心风险点, 环氧树脂在湿热环境下长期服役, 其弹性模量可能以每年 1% 的速率衰减, 假设 20 年后弹性模量降至 7.6 GPa, 修复区刚度下降将引起荷载向二次衬砌转移, 导致衬砌压应力增至 22.1 MPa, 安全裕度大幅降低。敏感性分析结果明确揭示, 环境侵蚀与材料性能退化是威胁修复结构长期安全的核心变量。隧道运营维护必须建立动态预警机制, 将地下水位监测、修复材料性能跟踪及施工缝状态检查纳入常态化工作, 通过预防性维护抵消参数时变效应, 方能确保修复效果的持久性。

4 结束语

本研究针对运营期发现的暗挖隧道拱顶已修复空腔病害, 构建了一套完整的服役性能评估技术体系。通过系统分析病害特征、评估修复技术适用性、建立精细化数值模型, 实现了对修复后结构安全状态的量化诊断。研究证实注浆修复技术在短期内能够有效恢复结构完整性, 但局部区域的失效案例揭示了修复效果存在显著差异性。数值模拟与现场检测的深度融合, 突破了传统表观检查的局限性, 能够精准识别 YDK67+660 等关键区段的潜在风险。所建立的安全性评估模型不仅量化了静载作用下的结构响应, 更通过敏感性分析揭示了地下水位波动、材料老化等时变因素对长期安全性的关键影响, 为预防性维护提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 李星, 龚贵友, 张轩铭, 等. 暗挖隧道下穿既有铁路站场实施方案设计[J]. 黑龙江交通科技, 2024, 47(10): 111-115.
- [2] 王涛, 赵强. 冲沟浅埋淤泥地质条件下隧道进洞技术研究[J]. 现代隧道技术, 2024, 61(S1): 1039-1046.
- [3] 肖明华. 超大断面浅埋暗挖车站快速施工稳定性研究[J]. 现代隧道技术, 2024, 61(S1): 369-374.
- [4] 杨明媚, 杨宏伟, 殷建国, 等. 滨海土岩地层浅埋暗挖车站临时支撑拆除优化分析[J]. 路基工程, 2024(05): 215-220.
- [5] 陈铨, 来弘鹏, 刘禹阳, 等. 密实细砂层地铁暗挖隧道新型超前加固材料性能及注浆参数研究[J]. 岩土工程学报, 2025, 47(07): 1432-1442.
- [6] 吴康, 申玉生, 易鹏豪, 等. 软土地层浅埋暗挖矩形大断面隧道施工力学响应特征[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(10): 45-50.