

运营隧道衬砌空洞无损检测应用与病害整治措施

杨尉明

山西省交通建设工程质量检测中心(有限公司) 山西 太原 030032

摘要:隧道衬砌空洞是影响运营隧道结构安全与行车稳定的核心病害,多由施工、运营及环境因素共同引发,易造成结构开裂、渗漏水甚至坍塌等风险。本文系统剖析衬砌空洞的成因、分布特征与工程危害,对比地质雷达、瞬变电磁等无损检测技术的优劣与应用工艺,结合工程案例验证检测有效性,依据病害等级制定差异化整治方案,构建检测、整治、监测一体化防控体系,为隧道运维安全提供技术支撑。

关键词:运营隧道;衬砌空洞;无损检测应用;病害整治措施

引言:随着轨道交通与公路隧道运营年限持续增长,衬砌空洞病害频发,严重制约隧道服役寿命与运营安全。此类病害具有隐蔽性强、扩展速度快、危害程度高的特点,传统检测方式效率低、精准度不足,难以适配不停营运维需求。为精准排查空洞病害、科学开展整治作业,本文聚焦运营隧道衬砌空洞问题,探究高效无损检测技术的工程应用,细化分级整治措施与质量管控手段,旨在解决隧道病害运维难题,保障隧道长期安全稳定运营。

1 运营隧道衬砌空洞病害成因及危害分析

1.1 衬砌空洞主要类型与分布特征

(1) 按位置分类,衬砌空洞可分为拱顶空洞、边墙空洞、衬砌层间脱空及围岩接触面空洞四类。拱顶空洞最为常见且危害最大,多位于拱部混凝土与围岩之间;边墙空洞分布于隧道两侧边墙部位;衬砌层间脱空指初期支护与二次衬砌之间的分离空隙;围岩接触面空洞则发生在衬砌背后与围岩的界面处。(2) 按形态尺寸分类,可分为小型点状空洞(直径 $\leq 0.5\text{m}$)、中型条状空洞(长度 $0.5\sim 2\text{m}$,宽度 $\leq 0.5\text{m}$)及大型连片空洞(面积 $> 2\text{m}^2$)。其中小型点状空洞分布最广,大型连片空洞虽出现频率较低,但对结构安全威胁最为严重^[1]。(3) 运营隧道空洞病害高发区段主要集中于隧道洞口段、断层破碎带穿越段、围岩级别变化界面处以及曲线上坡区段。分布规律表现为:拱顶出现频率约占空洞总量的 $55\%\sim 65\%$,进口段 200m 范围内病害密度显著高于中部区段,且地下水发育区段空洞扩展速率明显加快。

1.2 衬砌空洞病害形成机理

(1) 施工因素是衬砌空洞形成的首要原因。混凝土浇筑不饱满致使拱顶区域形成原始空隙,超挖回填不密

实造成围岩与衬砌间存在松散夹层,防水板铺设过程中张弛不当或破损变形,均会在衬砌背后遗留隐蔽空腔,成为病害萌生的先天隐患。(2) 运营因素是空洞扩展与恶化的主要驱动力。围岩蠕变随时间持续发展,导致接触面逐渐松弛剥离;地下水长期侵蚀引发衬砌混凝土钙质流失和围岩软化,加速脱空进程;列车或车辆动荷载反复作用产生的振动与冲击,使原本密实的界面逐渐疲劳损伤,最终发展为可见空洞。(3) 环境因素对病害发展起显著促进作用。温湿度周期性变化引起衬砌与围岩差异胀缩,破坏界面粘结;寒冷地区冻融循环导致衬砌内部微裂隙扩展贯通;不均匀地质沉降改变衬砌受力状态,促使既有隐伏空洞快速扩展,加剧病害恶化速度。

1.3 衬砌空洞病害的工程危害

(1) 结构危害方面,空洞切断了衬砌与围岩的有效接触,改变了衬砌实际受力模式,导致结构承载能力显著降低。在外部荷载作用下,空洞周边易产生应力集中,引发衬砌开裂、掉块,严重时导致衬砌侵限变形,直接影响隧道结构长期耐久性。(2) 安全危害方面,衬砌掉块坠落直接威胁轨道交通及公路行车安全,高速列车通过时空洞引发的衬砌振动响应异常,可能诱发突发性坍塌事故,造成重大人员伤亡和财产损失,安全风险等级高。(3) 运维危害方面,空洞为地下水提供了储存和运移通道,加剧渗漏水病害的发展,加速衬砌材料劣化。同时空洞病害隐蔽性强、检测难度大,处治施工需中断交通,显著增加隧道后期养护维修成本。

2 运营隧道衬砌空洞无损检测技术及工程应用

2.1 常用无损检测技术原理对比

(1) 地质雷达检测技术利用高频电磁波在衬砌介质中的传播与反射原理,通过发射天线向衬砌发射电磁

波,接收反射信号以识别介电常数突变界面。该技术适用于干燥或弱含水地层中的衬砌空洞探测,空洞界面通常表现为强振幅反射波同相轴中断或弯曲特征。其优势在于分辨率高、探测速度快、图像直观,短板在于受金属构件和含水层干扰严重,探测深度受介质导电率制约,一般有效探测深度为0.5~5m。(2)瞬变电磁检测技术基于电磁感应原理,通过向发射线圈施加阶跃脉冲电流,观测二次衰减涡流场的变化规律。该技术对富水地层中的含水空洞具有显著探测优势,因水体导电率远高于围岩,二次场衰减曲线呈现明显异常特征。其特点是不需耦合介质、抗干扰能力较强,适用于强干扰环境下的深层空洞普查,但浅层分辨率低于地质雷达^[2]。(3)三维激光扫描技术通过高速激光测距获取衬砌表面密集点云数据,构建隧道内壁高精度三维模型。该技术可识别衬砌表面变形、错台、剥落等宏观异常特征,间接推断表层空洞存在可能,作为辅助识别手段具有全覆盖、非接触、高效率的优点,但无法直接探测衬砌内部空洞,需与其他物探方法联合应用。

2.2 无损检测现场施工工艺

(1)检测前期准备包括现场踏勘掌握隧道结构类型、衬砌厚度及围岩条件,查阅设计施工资料明确检测重点区段;设备调试需进行仪器自检、天线标定和参数校验,确保系统工作状态正常;检测区段划分应结合病害历史与地质条件,将隧道划分为一般检测段、重点检测段和加密检测段;交通防护布置需按运营管理要求设置作业标志、限速标识和警戒区域,确保检测作业安全有序^[3]。(2)现场检测作业流程为:沿隧道纵向按预定测线布设方案敷设检测线,拱顶、左右拱腰及边墙部位均需布置测线,测线间距一般不大于0.5m;数据采集过程中保持天线与衬砌表面紧密贴合,行进速度均匀,地质雷达法采集速度宜控制在3~5km/h;全程质量控制要点包括记录异常信号点位、复测可疑区段、校验数据完整性,确保原始数据真实可靠。(3)运营隧道不停营检测的安全管控措施需建立检测作业与行车调度的联动机制,利用天窗点或行车低谷期集中作业;现场设置专职安全员全程瞭望监控,配备无线通信设备保持与车站值班室实时联络;作业人员需穿戴高可视警示服,检测设备车应安装警示灯和声光报警装置,严格划定作业安全区域边界,确保检测作业与运营行车互不干扰。

2.3 检测数据处理与病害识别方法

(1)检测信号预处理技术包括零时校正去除起始时间误差,背景去噪消除系统固有噪声,滤波处理采用带通滤波或小波变换滤除高频干扰成分,增益调节补偿信

号传播衰减,数据校准利用已知厚度标定值进行介电常数反演修正,确保后续解译数据准确可靠。(2)空洞病害图像特征解译依据反射波振幅、频率及同相轴形态进行综合判定。典型空洞表现为双曲线形态的强反射同相轴或反射波相位反转特征,通过双程走时计算可精准判定空洞位置、水平尺寸及顶部埋深,解译精度可达厘米级。(3)多技术融合检测通过地质雷达初筛、瞬变电磁复核、三维激光辅助验证的递进式组合方案,取各技术之长弥补单一方法的局限性,在复杂地质条件下可将空洞识别准确率由单一方法的65%~75%提升至90%以上,有效降低漏判误判风险^[4]。

2.4 检测工程应用案例分析

(1)依托某运营铁路隧道工程,制定专项无损检测方案:采用地质雷达为主、瞬变电磁为辅的技术组合,在洞身段共布设测线5条,沿纵向每5m设置标记点,检测总延长米约1.5km,重点区段加密至2.5m测点间距。(2)检测结果统计显示:共发现各类衬砌空洞缺陷27处,其中拱顶空洞11处、拱腰空洞9处、边墙空洞7处;按等级划分,小型点状空洞占比约63%,中型条状空洞约26%,大型连片空洞约11%;空洞主要集中在洞口段150m范围和断层破碎带区段,与病害高发区段分布规律基本吻合。(3)应用效果表明:地质雷达法对拱顶浅层空洞检出率达92%,瞬变电磁法成功识别出3处富水隐蔽空洞,经钻孔验证综合识别精度达88.6%。检测成果有效指导了后续整治方案设计,验证了多技术综合检测方案在实际运营隧道中的工程适用性和可靠性。

3 运营隧道衬砌空洞病害分级整治措施与质量控制

3.1 衬砌空洞病害分级标准

(1)基于空洞尺寸、埋深及位置的病害等级划分依据如下:按最大尺寸划分为小型($\leq 0.5\text{m}$)、中型($0.5\sim 2\text{m}$)、大型($\geq 2\text{m}$);按空洞顶部至衬砌内表面最小距离划分为浅层($\leq 0.3\text{m}$)、中层($0.3\sim 0.8\text{m}$)、深层($\geq 0.8\text{m}$);按位置划分为拱顶、拱腰、边墙三类。综合三项指标将空洞划分为I级(轻微)、II级(一般)、III级(严重)三个技术等级。(2)结合结构风险与运营风险的病害危险等级分级体系采用风险矩阵法,划分为A、B、C三级。A级为极高风险,指拱顶大型浅层空洞或存在显著掉块隐患者;B级为高风险,指拱腰中型以上空洞或伴有渗漏水的深层空洞;C级为一般风险,指边墙小型点状空洞或埋深较大的稳定空洞,同时纳入隧道净空限界与线路等级等因素综合判定。(3)不同等级病害的处置优先

级界定为：A级病害须立即处置，发现后48h内启动应急整治，必要时采取限速或封闭措施；B级病害应安排计划性整治，1个月内完成处治；C级病害纳入年度养护计划统筹安排，持续跟踪观测。

3.2 差异化病害整治技术措施

(1) 小型浅层空洞采用低压注浆填充结合表层封闭修复技术。注浆压力控制在0.2~0.5MPa，选用水泥基微细浆液或环氧树脂类化学浆液，通过预埋注浆管将浆液注入空洞空间，填充密实后进行表层聚合物砂浆封闭修复，恢复衬砌表面完整性和外观质量。(2) 中型深层空洞采用高压注浆加固与衬砌围岩协同补强技术。注浆压力提升至1.0~2.0MPa，采用水泥-水玻璃双液浆或超细水泥浆，注浆孔按梅花形布置，孔间距0.8~1.2m，使浆液充分扩散渗透至围岩裂隙，实现空洞填充与周边围岩加固的协同效应，恢复围岩-衬砌联合承载体系。(3) 大型连片空洞采用局部衬砌拆除重建结合锚杆加固与复合注浆的综合整治技术。先实施围岩锚杆加固，锚杆长度3~5m、间距1.0m×1.0m；再对空洞区域进行分层复合注浆，浆液由外围向内逐级灌注；最后拆除受损衬砌并重新浇筑高性能混凝土，新设衬砌厚度及配筋按提高一级荷载标准设计，确保整治后结构安全富裕度^[5]。

3.3 病害整治施工关键工艺

(1) 钻孔、清孔、浆液配比及注浆压力控制构成核心工艺链。钻孔采用潜孔钻机按设计孔位施工，孔径42~50mm，孔深穿透衬砌进入空洞或围岩0.3~0.5m；清孔采用高压风或水洗清除孔内碎屑；水泥浆水灰比0.8:1~1:1，双液浆水泥与水玻璃体积比1:0.6~1:1；注浆采用分级升压法，终压稳定时间不少于5min。(2) 整治施工过程中隧道结构变形监测管控措施包括：布设收敛计和拱顶下沉观测点，每5~10m设置监测断面，施工期间每2h监测一次，变形速率超0.5mm/h时须暂停作业并调整参数。(3) 不停营整治施工采用“天窗集中作业+分段流水施工”模式，工序分解为准备、钻孔注浆、养护、复检四个单元。安全保障实行作业区硬隔离，配置声光报警与视频监控

系统，建立调度命令传递确认机制。

3.4 整治效果检测与长期运维防控

(1) 整治完成后进行无损复检和结构承载力核验。采用地质雷达全覆盖复测判定填充密实度，钻取芯样检测结石体强度，通过荷载试验或有限元反演核验承载力是否达标。(2) 隧道衬砌空洞病害长期监测体系包括：设置永久监测点并建立电子档案，采用分布式光纤或振弦式传感器实时监测应力应变。整治后前3月每月1次，后续每季度1次，每年出具年度评估报告。(3) 病害预防管控与常态化养护机制要求建立“检测-评估-整治-复检-监测”闭环流程，将无损检测纳入年度定期检查必检项目，每5年开展一次全面专项检测；完善病害台账信息化管理系统，加强养护人员早期识别能力培训，实现从被动整治向主动防控转变。

结束语

本文梳理了运营隧道衬砌空洞的病害规律，验证了多技术融合无损检测的高精度优势，建立了分级处置、精准施策的病害整治体系。通过规范施工工艺、强化过程监测、落实常态化运维防控，可有效解决衬砌空洞病害隐患，修复隧道结构承载性能。研究成果可为同类隧道病害检测整治提供参考，推动隧道运维从被动修补转向主动防控，提升隧道工程长效服役安全水平。

参考文献

- [1] 李木功. 基于地质雷达的隧道内部病害多目标建模与识别研究[J]. 现代隧道技术, 2026, 63(01): 261-270.
- [2] 耿庆桥. 隧道衬砌背后脱空识别的改进瞬变电磁雷达法[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(04): 218-232.
- [3] 章俊, 刘书奎. 基于旋转敲击空气耦合冲击回波的衬砌壁后注浆缺陷快速检测方法[J]. 工程力学, 2025, 42(06): 156-164.
- [4] 嵇诚, 龚伦. 运营隧道拱部衬砌厚度不足及脱空病害危害与整治技术[J]. 工程科学与技术, 2024, 56(05): 187-195.
- [5] 武贤龙. 基于gprMax的衬砌脱空三维正演分析与检测应用[J]. 深圳大学学报(理工版), 2023, 40(02): 127-135.