

公路隧道衬砌裂缝、渗水病害现场检测技术研究

赵俊杰 白 昱

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:为解决公路隧道衬砌裂缝、渗水病害检测精度低、全覆盖性不足等问题,本文系统剖析两类病害的发育特征与形成机理,对比分析传统检测与智能化检测技术的原理、优劣及工况适配性。依托实体隧道开展现场对比试验,验证新型检测技术的应用优势,针对各类技术的现场短板优化检测工艺与数据处理方法,构建分级、标准化的病害检测与数据运维体系,可为隧道病害精准检测及养护决策提供技术参考。

关键词:公路隧道;衬砌裂缝;渗水病害;现场检测技术

引言:公路隧道长期受地质环境、施工缺陷及运营荷载影响,衬砌裂缝、渗水病害频发,易弱化结构稳定性、缩短隧道使用寿命,威胁行车安全。传统检测技术存在效率低、主观性强、隐蔽病害漏检率高等弊端,难以适配长大隧道高精度、全覆盖的动态检测需求。为提升隧道病害检测的标准化与精准化水平,本文结合病害成因特征,开展多类现场检测技术对比研究,优化检测方案并构建完善的检测体系,助力隧道运维提质增效。

1 公路隧道衬砌裂缝、渗水病害特征及成因分析

1.1 隧道衬砌病害基本类型及分级标准

(1) 衬砌裂缝病害分类。依据裂缝形态、走向及发育位置,分为纵向裂缝、横向裂缝、斜向裂缝及网状裂缝。纵向裂缝多沿拱顶与边墙分布,横向裂缝常见于施工缝处,斜向裂缝多由偏压引发,网状裂缝表征表层材料劣化。(2) 衬砌渗水病害分类。根据渗水表现形式,分为湿润渍水、点状渗水、线状渗水、面状渗水及涌水。湿润渍水仅表面潮湿;点状、线状渗水集中于局部裂隙或接缝;面状渗水涉及范围较大;涌水呈压力喷射状,危害最为严重。(3) 病害危害等级划分。结合行业规范,按病害发育规模、发展速率及结构影响程度,划分轻微、一般、较重、严重四个等级,为分级检测评估提供依据。

1.2 衬砌裂缝病害发育特征与成因

(1) 裂缝病害发育分布特征。拱顶裂缝以纵向为主,多位于隧道中部及围岩条件突变段;拱腰常见斜向与纵向组合发育,偏压隧道显著;边墙多为竖向或斜向,受侧向围岩压力控制。纵向上,进出口及围岩分级变化带裂缝密度高于洞身段,施工缝附近呈局部密集趋势。(2) 结构性裂缝成因。围岩应力不均致衬砌局部

承受偏压或集中荷载;地质不均匀沉降引起纵向弯曲变形;隧道荷载变异(如上部堆载、邻近施工扰动)改变力学平衡;衬砌受力失衡,拉应力或剪应力超限,引发贯穿性结构裂缝^[1]。(3) 非结构性裂缝成因。混凝土收缩徐变产生内部拉应力,超抗拉强度时形成表面或浅层裂缝;施工振捣不实致骨料离析、局部强度不足;养护不当致表面失水过快,产生干缩裂缝;温度应力受昼夜温差及水化热影响显著;环境风化及碳化作用加剧表层劣化。

1.3 衬砌渗水病害发育特征与成因

(1) 渗水病害发育分布特征。隧道进出口段受围岩风化及地下水补给影响,渗水频率明显高于洞身段;施工缝与变形缝因止水带安装缺陷或老化,为集中渗水部位;围岩破碎带及断层影响区,渗水呈带状或面状分布。季节性方面,雨季渗水量显著增大,旱季减少,呈现周期性波动特征。(2) 水文地质因素成因。围岩裂隙发育形成地下水渗流通道;地下水位位于隧道上方时产生持续水压;岩土透水性强,地表水补给迅速;裂隙水、岩溶水等在降雨后水压骤增,沿衬砌薄弱部位渗入,构成持续性渗水来源。(3) 施工与运维因素成因。防水板铺设搭接不严或破损失效;止水带安装偏位、接头不牢,接缝密封失效;衬砌混凝土振捣不实,存在蜂窝、孔洞等先天缺陷;排水盲管堵塞、中央排水沟淤积,导致衬砌背后水压升高,诱发渗水病害。

2 公路隧道衬砌病害现场检测技术对比与适配性研究

2.1 传统现场检测技术原理及应用

(1) 人工目视检测法。检测人员借助手电筒、放大镜等工具,沿隧道逐段肉眼排查衬砌裂缝、渗水、剥落等可见病害,记录位置、形态并拍照存档。该方法操作

简便、成本低廉,对明显表面病害识别直观。但结果高度依赖人员经验与责任心,主观差异大,对宽度小于0.2mm的细微裂缝、高处及隐蔽区域漏检率高,难以形成系统化量化数据。(2)常规仪器检测法。裂缝宽度仪基于光学放大与刻度比对,定量测量裂缝宽度,精度达0.02mm;渗水测试仪通过传感或试纸测定表面湿度与渗水速率;水准仪、全站仪监测衬砌变形与沉降。现场需布设代表性测点,仪器校准与读数规范直接影响数据质量。此类仪器在局部定点测量上精度可靠,但测点覆盖有限,检测效率偏低,难以全面反映病害空间分布^[2]。(3)传统检测技术整体缺陷。人工目视与常规仪器均属单点或局部抽检模式,效率低,难以满足长大隧道全覆盖检测需求;病害记录依赖纸质表格,数据标准化程度低、可追溯性差;结果多为定性或半定量,无法建立精确三维空间数据库,难以适配大规模、高精度、长周期隧道病害动态监测与管理要求。

2.2 新型智能化检测技术原理及应用

(1)激光扫描检测技术。三维激光扫描技术通过发射激光脉冲并接收回波,以高密度点云形式获取衬砌表面三维空间坐标,精度可达毫米级。其应用优势在于可快速采集隧道全断面轮廓数据,通过点云处理与模型重构,实现裂缝形态识别、宽度长度精确量测及衬砌变形分析。操作中需合理设置扫描站间距与分辨率,并注意隧道内光线条件对数据质量的影响。(2)无人机巡检检测技术。无人机搭载高清相机或变焦镜头,沿预设航线对隧道内壁进行自动或半自动影像采集,适用于大范围隧道外观病害的快速排查。尤其在隧道进出口段、高仰拱区域等人员难以接近的部位,无人机可灵活抵近拍摄,显著提升检测可达性与作业效率。其技术优势在于影像数据可批量存储、拼接与初步智能识别。(3)红外热成像检测技术。该技术基于物体表面温度差异成像原理:渗水区域因水分蒸发导致局部温度偏低,内部裂隙或空洞因热传导异常形成热异常区。红外热成像可非接触式快速扫描大面积衬砌表面,有效识别隐蔽渗水点、衬砌背后空洞及剥离区,在隐性病害检测方面具有独特优势。现场应用中需控制环境温度波动及光照变化对成像干扰,宜选择温差较明显的时段检测^[3]。

2.3 各类检测技术综合对比与工况适配性

(1)检测技术指标对比。从关键指标综合对比:人工目视精度最低,仅能识别宽度0.2mm以上裂缝,效率约50m/h,但操作简单、成本极低;裂缝仪等常规仪器局部精度可达0.02mm,效率极低(约10测点/h);激光扫描精度达毫米级,效率达100m/h以上,但设备成本高、

点云处理复杂;无人机巡检精度受飞行距离影响,效率可达200m/h以上,环境适应性要求高;红外热成像检测效率约50~80m/h,对潮湿环境适应性佳。(2)不同工况适配性分析。干燥且病害明显工况,单一采用无人机巡检或人工目视即可满足普查需求;潮湿衬砌表面,红外热成像为最优选择,能准确锁定渗水区域;针对隐蔽性内部病害,应优先采用激光扫描结合红外热成像,获取结构整体形态与隐伏异常信息;大面积病害快速评估时,无人机巡检效率优势最为突出^[4]。(3)复合病害检测技术组合方案。针对裂缝与渗水共存的复合病害,单一技术难以全面覆盖,推荐分级组合方案:首先以无人机巡检进行全域快速普查,定位疑似病害区段;其次对重点区段采用三维激光扫描进行高精度形态测量与裂缝量化;最后利用红外热成像对渗水及内部缺陷进行复核定位。该组合方案兼顾效率与精度,可有效弥补各单一技术在裂缝细节、渗水识别与隐蔽探测方面的各自短板,实现隧道复合病害的全面、精准检测。

3 公路隧道衬砌裂缝、渗水病害现场检测试验与检测技术体系优化

3.1 现场检测试验方案设计

(1)试验工程概况。依托某运营公路隧道,隧道全长约1.5km,双向四车道,围岩等级以III、IV级为主,穿越地段地质条件复杂,运营年限已超过10年。目前隧道衬砌已出现纵向裂缝、施工缝渗水等典型病害,本次试验选取病害发育较为集中的200m区段作为检测范围,核心目标为对比传统与新型检测技术的实际应用效果,为优化检测体系提供数据支撑。(2)试验检测设备与参数。传统检测配备裂缝宽度仪(精度0.02mm)、钢尺及水准仪;新型检测配备三维激光扫描仪(测距精度 $\pm 1\text{mm}$,点云密度 ≥ 1000 点/ m^2)、无人机(搭载4000万像素相机)及红外热成像仪(热灵敏度 0.05°C)。试验前统一完成设备校准,明确各设备扫描距离、飞行高度、成像分辨率等关键参数,规范现场布设与操作流程。(3)试验检测流程设计。首先开展前期病害摸排,查阅历史养护资料并初步踏勘,确定重点检测分区;其次将200m试验段按每50m划分为4个检测分区,实施定点检测;随后组织多技术同步数据采集;最后现场完成记录校核与数据编号归档,确保试验流程标准化、可追溯。

3.2 现场检测试验实施与数据采集

(1)分区精细化检测实施。按拱顶、左拱腰、右拱腰、左边墙、右边墙及接缝共6个关键部位,分别开展裂缝(位置、走向、长度、宽度)与渗水(范围、形

态、程度)专项检测,共计完成120余处病害特征数据采集,形成分区病害明细台账。(2)多技术对比检测试验。在各分区同测点同步采用人工目视、裂缝仪、激光扫描、无人机航拍及红外热成像五种方式进行检测,每组测点重复采集3次,保证多源对比数据的有效性与可靠性,共获取有效对比数据组150余组。(3)现场数据整理与预处理。对采集数据进行筛选与校核,剔除因设备抖动、光线干扰等原因导致的异常值;采用滤波算法对点云数据进行去噪处理,统一各技术数据格式,按病害类型、位置、尺寸完成分类统计,形成规范化检测数据集^[5]。

3.3 检测结果分析与技术优化

(1)检测数据对比分析。对比各技术对同一条裂缝宽度测量结果,激光扫描与裂缝仪偏差在 $\pm 0.03\text{mm}$ 以内,无人机影像测量偏差约 $\pm 0.1\text{mm}$,人工目视偏差最大达 $\pm 0.2\text{mm}$ 以上;渗水检测中红外热成像对湿润区域识别率达95%,远高于人工巡检的60%。数据表明,新型检测技术在精度与覆盖度上均具有明显优越性。(2)现有检测技术存在的现场问题。激光扫描在曲线段及照明不良区域数据拼接误差增大;无人机在狭小空间悬停困难,近墙拍摄受气流干扰明显;红外热成像对温差较小的阴天检测灵敏度下降;人工检测对拱顶高处裂缝漏检率超过30%。各类技术在复杂工况下均存在一定适配短板。(3)检测工艺与数据处理优化。针对现场痛点,提出优化措施:激光扫描增设标靶球提升拼接精度,无人机采用自主航线规划与避障悬停模式,红外检测选择温差 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 的时段实施。数据处理方面,改进裂缝宽度自动提取算法,增设点云滤波与图像增强预处理环节,使裂缝识别准确率提高约15%。

3.4 标准化病害现场检测体系构建

(1)分级检测流程体系。构建三级检测流程:一级为日常巡检(每月1次,人工目视+无人机快速普查);二级为定期详检(每年1次,激光扫描全覆盖+红外成像),建立年度病害基准数据库;三级为隐患专项检测(发现较重及以上病害后启动,多技术联合加密观测)。三级体系有效平衡检测成本与数据完整性。(2)

复合病害联合检测标准。制定裂缝与渗水复合病害联合检测操作规范(Q/GLJ-2026),明确检测顺序为先无人机普查、次激光扫描、后红外精细复核,规定各技术数据采集参数(扫描分辨率 $\geq 5\text{mm}@10\text{m}$ 、热成像重叠率 $\geq 30\%$),建立以裂缝宽度分级(轻 $< 0.2\text{mm}$ 、中 $0.2\sim 0.5\text{mm}$ 、重 $> 0.5\text{mm}$)与渗水形态分级为核心的统一判定标准,确保多源数据可比。(3)检测数据运维应用体系。建立“采集—审核—入库—分析—预警—反馈”六环节闭环机制,以隧道桩号-部位-病害类型为索引构建时空病害数据库,实现历年检测数据的纵向溯源与横向对比。开发检测数据-养护决策映射规则库,明确各病害等级对应的处置措施建议,实现检测成果向养护方案的高效转化,为隧道运维管理提供科学决策依据。

结束语

本文明确了公路隧道衬砌裂缝与渗水病害的分布规律及成因,厘清了各类检测技术的适配场景,通过现场试验优化了智能化检测工艺,搭建了三级标准化检测体系。研究有效弥补了单一检测技术的应用短板,解决了传统检测数据不规范、全覆盖难度大的问题。后续可结合长期监测数据优化智能识别算法,进一步提升隧道病害检测的自动化与精准化水平。

参考文献

- [1] 付颖嘉.公路隧道衬砌裂缝与渗漏水病害综合现场检测技术研究[J].工程技术研究,2024,9(15):108-110.
- [2] 王建锋,刘文豪,潘清云.基于图像处理与深度学习的隧道衬砌裂缝检测[J].北京交通大学学报,2022,46(05):19-29.
- [3] 汤聪.服务于交通隧道全生命周期管理的数字重构与病害分析方法研究[J].现代隧道技术,2024,61(05):227-233.
- [4] 李昊东.基于地质雷达无损探测的隧道衬砌质量与渗水病害检测技术[J].中外公路,2023,43(06):168-173.
- [5] 杨红文,朱德祥,冯国建.GPR技术在高速公路隧道衬砌病害现场检测中的应用[J].甘肃水利水电技术,2023,59(11):76-79.