

地铁运营期隧道结构检测方法

郭满鸿 李科委 张名远

南京地铁运营有限责任公司 江苏南京 210012

DOI:10.12238/ems.v7i12.16472

[摘要] 地铁是现代城市的主要交通方式，在运营期间每日需承载大量客运需求。隧道结构作为整个系统的核心组成部分，稳定性与安全性是保障地铁顺畅运行的关键。由于隧道在运营阶段，会持续受到列车运行产生的荷载作用，这种长期、反复的荷载会对隧道结构造成一定程度的损伤。因此，对隧道结构进行定期检测是提升地铁整体运营效率与运行质量的关键工作。文章通过阐述地铁运营期隧道结构检测原理，分析隧道结构检测主要内容，提出隧道结构检测技术应用与检测质量控制措施，以期对相关领域提供参考意见和借鉴。

[关键词] 地铁；运营期；隧道结构检测；技术应用

引言

隧道结构作为轨道交通基础设施的主体框架，在长期承受列车动荷载、地质环境变化及材料劣化等复合因素作用下，可能会产生裂缝扩展、衬砌脱空、材料强度衰减等结构性损伤。这些隐蔽性缺陷如果没有及时进行检测与处置，会逐渐累积并威胁隧道整体稳定性。地铁运营期隧道结构检测工作，是保障地铁服务可靠性的关键技术环节。检测流程应包括缺陷观测、内部质量诊断，具体检查地铁隧道结构是否存在裂缝与钢筋锈蚀等问题。检测部门可使用激光扫描与地质雷达等检测技术对隧道结构进行定期检测与评估，通过整理和分析各项检测数据准确掌握隧道结构的健康状态，为后续维修与加固作业提供科学数据基础。在实施检测作业前，检测部门应编制设备管理、人员资质等全流程质量控制措施，提升地铁运营期隧道结构检测质量与数据准确性。

1. 地铁运营期隧道结构检测原理

地铁运营期隧道结构检测原理是基于专项采集的数据开展结构安全性分析，为轨道交通持续稳定运行及维护决策提供技术支撑。在实施检测工作前，检测部门需明确隧道结构形式、建造历程、地质环境参数及初始施工方案等基础信息，通过现场实地勘明确检测区域的环境特征与作业条件，制定具有针对性的检测方案。由于检测作业需在地铁正常运营状态下开展，对既有设施设备的防护需贯穿全过程：技术层面要求全部检测工作采用非侵入式物理探测原理，确保不对既有结构造成任何形式损伤。管理层面需建立人员准入制度与作业规范，通过专项培训强化检测人员对地铁设备保护的意识，并制定现场行为约束条款，严禁未经授权的设备接触

或状态变更操作，制定双重保障机制维护地铁运营系统的完整性。

2. 地铁运营期隧道结构检测主要内容

2.1 裂缝观测

裂缝是地铁隧道结构中常见的病害之一，可能会影响隧道的整体稳定性和防水性能。因此，对裂缝进行观测是隧道结构检测的重要内容。裂缝观测通常采用目测方式进行，检测部门通过肉眼观察隧道衬砌表面的裂缝情况，记录裂缝的位置、长度、宽度等信息。为了对裂缝宽度进行准确测量，还要采用裂缝测宽仪。裂缝测宽仪能够精确测量裂缝宽度，并对测量误差进行严格控制。在测量结束之后，检测部门要将裂缝的各种参数进行整合，在整个地铁隧道线路上清晰地展示出裂缝的具体情况，帮助后期及时进行维护。

2.2 密实度无损检测

在地铁运行期间，隧道结构密实度不足可能导致隧道结构出现空洞、松散等病害，影响结构整体性能。密实度无损检测主要采用地质雷达进行检测，通过发射雷达信号并接收反射信号，对地铁隧道结构的衬砌厚度、衬砌背后的空洞分布情况等进行检测。检测部门对反射信号的进行分析和处理后，可以判断隧道结构的密实度情况。地质雷达检测具有非破坏性、检测速度快、精度高等优点，能大幅度提高地铁隧道结构密实度检测效率与准确性。

2.3 钢筋锈蚀受力检测

钢筋是地铁隧道结构中的主要承力构件，在地铁长期使用过程中可能会出现腐蚀现象，导致承载能力下降。钢筋锈蚀受力检测主要采用电位法进行检测，通过测量钢筋锈蚀后

的电位值可以明确钢筋的锈蚀程度。电位值的变化与钢筋锈蚀程度呈正相关关系,即电位值越高,说明钢筋锈蚀程度越严重。检测部门可通过对钢筋锈蚀程度检测发现钢筋锈蚀问题,及时采取相应的修复措施,防止因钢筋锈蚀对地铁隧道结构产生破坏。

3. 地铁运营期隧道结构检测技术应用

3.1 隧道激光扫描限界检测技术

地铁运营期激光测距技术可以构建隧道净空尺寸检测体系,核心流程包含数据采集、空间配准与限界分析三个环节。数据采集阶段以水平基准轴为空间参考方向,检测部门通过高精度旋转扫描装置按预设角度间隔(通常为 1°)获取仪器旋转中心至隧道壁面的径向距离及对应的方位角参数,各测点空间矢量端点连接形成实际内轮廓几何模型。空间配准过程依托隧道控制测量导线网获取监测断面的绝对坐标系参数,检测部门可采用三维坐标变换算法将实测轮廓数据与设计模型进行空间几何配准,建立实测轮廓与设计限界的空间对应关系。限界分析模块通过计算实测轮廓各采样点至设计限界的最小距离值,生成超限区域分布图输出具体超限数值,为隧道结构是否满足行车安全要求提供量化判断依据^[1]。现场实施检测时,检测部门可以既有隧道控制网为基准框架,沿线路纵向每20米布设一个监测断面,每个断面采用等角度扫描方式获取不少于35个空间采样点。完成现场数据采集后,检测部门通过专业软件对原始测距数据进行噪声滤除、坐标转换与曲面拟合处理,生成包含绝对坐标信息的隧道横断面轮廓数据集。这种检测技术可以对隧道限界状态的非接触式实施快速检测,为地铁运营期隧道结构变形监测与限界管理提供标准化解方案。

3.2 隧道结构内部缺陷地质雷达检测技术

地铁运营期间,隧道结构内部缺陷地质雷达检测技术是运用高频电磁波反射原理构建隧道衬砌质量无损检测体系,通过向地下发射高频电磁脉冲并接收反射信号,识别介质分布特征解析与隐蔽缺陷。在实施检测工作时,检测部门应在隧道底板、侧墙及拱顶三个典型断面布设纵向测线,采用非接触式扫描方式获取衬砌结构厚度及内部密实度参数。隧道结构内部缺陷地质雷达检测技术虽具备现场实施效率优势,但作为地球物理探测方法,数据解析需结合工程设计文件、地质勘察报告及施工记录开展多源信息融合分析,通过地质、

施工、检测数据交叉验证确保缺陷定位准确性^[2]。因此,检测部门在进行设备选型时要综合考虑探测分辨率、介质穿透能力及信号稳定性指标,例如:采用600 MHz频段屏蔽天线实施检测作业。关键技术参数设置如下:(1)检测装置移动速度控制在4 km/h匀速状态,(2)单次扫描采集256个时域采样点,(3)天线系统设置20 ns时窗记录深度范围,(4)根据介质电性特征实施分段线性增益控制,增益曲线按0.5 dB/ns梯度由浅至深递增,(5)全程采用连续动态检测模式,确保空间采样间隔不大于5 cm。原始数据需要使用专业处理软件完成预处理与解释分析,处理流程包括:雷达波形文件头参数校正、测线桩号空间定位、剖面数据增益补偿、检测轨迹三维配准,分析环节涵盖异常回波特征提取、频谱能量分析、数字滤波去噪、信号振幅补偿、异常体空间定位及地质成因解释。最终生成包含缺陷位置、尺寸及严重程度的检测报告,为隧道结构维护提供科学量化依据,为地铁运营期隧道健康监测提供标准化技术方案。

3.3 隧道结构混凝土强度综合检测技术

地铁运营期间,隧道结构混凝土强度检测技术采用回弹值与超声传播参数联合分析原理对混凝土强度无损检测。检测部门可通过回弹仪获取混凝土表面硬度指标,利用超声波检测仪测定弹性波在混凝土介质中的传播速度,结合回弹、超声双参数耦合模型推算隧道结构实体强度。实施检测作业时,检测部门应在隧道衬砌及路面典型断面布置测区,每个测区设置不少于16个测点,采用网格化布点方式确立空间采样代表性^[3]。检测流程应严格遵循标准化操作规程:首先,使用回弹仪在测点位置施加标准冲击能量,记录碳化深度修正后的回弹值。其次,在对应位置耦合超声探头,发射频率为50 kHz的纵波脉冲并采集首波到达时间,通过测距校准计算波速参数。双参数采集完成后,检测部门应依据CECS03:2008《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》建立强度推定模型,具体计算规则如下:

当有效测点数量超过15个时,混凝土抗压强度推定值按以下公式计算:

$$f_{cu, e} = m_f - k \cdot s_f \quad (1)$$

式中: m_f 为测区强度换算值算术平均值; s_f 为测区强度换算值标准差; k 为与置信水平相关的修正系数,取1.5。

当有效测点数量不足15个时,混凝土抗压强度推定值按

最小强度换算值确定:

$$f_{cu, e} = \min\{f_{cu, i}\} \quad (2)$$

式中: $f_{cu, i}$ 为各测点强度换算值

数据处理需采用专用分析软件完成参数校准与模型计算, 处理流程包括: 原始数据有效性筛查、碳化深度修正、双参数相关性分析、异常测点剔除、强度换算值计算及推定值生成。最终形成包含测区强度分布图、离散性指标及强度等级判定的检测报告, 为隧道结构质量评定与耐久性评估提供量化依据。这种检测技术可以规避传统取芯法的结构损伤风险, 更适用于地铁运营期隧道衬砌质量的周期性监测。

3.3 隧道结构健康检测技术

在地铁运营期间, 隧道结构健康检测是保障车辆运行稳定性的主要作业之一。这类检测技术包含隧道结构表观缺陷观测与防排水系统评估两大模块, 通过多参数联合检测对隧道结构健康状态进行全面诊断。在结构表观缺陷检测环节, 检测部门应采用三级检测流程: 通过人工巡查定位可见裂缝, 使用精度 0.02mm 的裂缝测宽仪获取开口宽度参数, 采用分辨率 0.5mm 的钢卷尺完成裂缝几何量测, 主要测区单条裂缝最长延伸长度达 3.2 米, 间距分布数据通过网格化采样获取。检测数据经过数字化处理后生成裂缝展布图, 为隧道结构耐久性评估提供可视化依据。在进行防排水系统检测时, 检测部门可每季度对全线排水沟、积水井开展淤积度检测, 采用激光测距仪对重点区段沉沙厚度进行测量^[4]。年度专项检测包含结构完整性评估与水质腐蚀性分析, 同步采集地下水样进行化学成分检测, 检测指标包括 pH 值、硫酸根离子浓度及氯离子含量。当检测到硫酸根离子浓度超过 1500mg/L 或氯离子渗透深度达 15mm 时, 判定存在腐蚀风险, 检测部门应制定专项维护。隧道结构健康检测技术可以从微观缺陷到系统功能实施全方位监测, 提高地铁运营期间隧道全寿命周期健康性能。

4. 地铁运营期隧道结构检测质量控制

地铁运营期实施隧道结构检测实施前, 为了提升检测质量与数据准确性, 检测部门要制定系统化质量保障体系, 涵盖技术方案编制、装备状态管控、人员资质管理等核心模块。技术方案编制阶段需根据检测目标特征、对象工况条件及环境制约因素制定系统性实施方案, 明确检测参数边界、技术路线选择、设备配置清单及人员职责划分。在装备保障方面, 建立覆盖全寿命周期的仪器设备管理体系, 实施使用前功能

验证、运行中状态监测、定期专业校准的三级维护机制, 配套开发设备健康管理系统对关键参数实施动态跟踪与故障预警^[5]。人员资质管理采用双轨制培训考核体系, 检测人员需完成标准化理论课程认证与实操场景测试, 通过专业能力评估后方可获取上岗资质。数据分析阶段建立三级审核机制, 运用概率统计方法对原始数据进行预处理, 生成包含空间分布图、时程变化曲线及异常预警的可视化分析报告。同时, 开展测量不确定度评估与误差溯源分析, 确保检测结论科学性与可追溯性。

结语

综上所述, 地铁运营期隧道结构检测是保障轨道交通安全运行的核心技术环节, 通过建立覆盖表观缺陷观测、内部介质诊断、材料性能评估的多层次检测框架, 可精准识别隧道结构健康状态。在检测阶段, 检测部门通过应用激光扫描形变监测、地质雷达探测等专业技术, 提升地铁运营期隧道结构缺陷识别精度与病害诊断效率。同时, 建立方案策划、装备状态管控、人员资质管理、成果三级审核的全要素质量控制体系, 保障检测结论科学性与工程适用性。这种检测体系与实施流程可为地铁运维部门提供结构健康管理的量化决策依据, 对延长隧道使用寿命、优化维护策略、确保地铁安全运营具有重要支撑作用。

[参考文献]

- [1] 钱政彦, 潘恺. 三维激光在地铁隧道结构检测中的应用[J]. 测绘, 2025, 48 (02): 141-145.
 - [2] 聂亮. 移动式三维激光扫描在地铁隧道结构检测中的应用[J]. 城市勘测, 2024, (06): 176-178.
 - [3] 乔宇, 张立舟, 李志涛, 等. 运营期地铁隧道结构病害现状检测分析[J]. 工程技术研究, 2024, 9 (16): 1-3+7.
 - [4] 陈斌辉. 公路隧道缺陷检测及其对隧道结构安全性影响分析[J]. 河南科技, 2023, 42 (07): 84-87.
 - [5] 路耀邦, 刘永胜, 樊晓东. 地铁隧道结构表观病害快速检测方法与应用[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41 (S2): 655-663.
- 作者简介: 郭满鸿, 男, 汉族, 1971.08, 副高级职称, 本科学历;
李科委, 男, 汉族, 1991.08, 工程师, 硕士研究生;
张名远, 男, 汉族, 1996.07, 工程师, 本科学历。