

基于无损检测技术的混凝土桥梁内部缺陷诊断方法研究

文 / 张全 广东交科检测有限公司

摘要: 本文旨在探索高效精准的无损检测技术实现早期识别混凝土桥梁内部缺陷并进行定量评估, 研究基于超声波检测、红外热成像、冲击回波法等技术, 结合工程案例分析典型内部缺陷的物理力学特性, 通过无线声波 CT 检测系统采集分析混凝土桥梁的内部数据。根据采集到的数据结果表明, 通过波速分布特征发现边缘及表层低波速异常区, 据此提出压力灌浆、表面封闭等针对性处理方案并建立“日常巡查-季度抽检-年度全面检测”的三级维护机制。结论证实, 无损检测技术能为混凝土桥梁缺陷诊断提供可靠的数据支撑。

关键词: 无损检测技术; 混凝土桥梁; 内部缺陷; 诊断方法

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.21.040

引言

混凝土桥梁在施工过程中受振捣工艺、配合比设计、结合面处理等因素影响, 易产生空洞、分层、裂缝等内部缺陷; 在服役期间, 荷载作用、环境侵蚀及材料劣化进一步加剧缺陷扩展, 从而出现桥梁内部钢筋锈蚀、结构承载力下降等风险^[1]。传统检测方法依赖钻芯取样等破损手段, 存在检测范围有限、对结构造成二次损伤等局限。因此, 探索高效、精准的无损检测技术, 实现混凝土桥梁内部缺陷的早期识别与定量评估, 对保障桥梁安全运营、延长使用寿命具有重要意义^[2]。本文基于超声波检测、红外热成像、冲击回波法等无损检测技术, 系统分析典型内部缺陷的物理力学特性, 结合工程案例验证检测方法的有效性, 为混凝土桥梁缺陷诊断与维护提供科学依据。

一、混凝土桥梁典型的内部缺陷

(一) 混凝土内部空洞

混凝土内部空洞的形成与浇筑工艺密切相关, 振捣过程中若振捣棒插入深度不足或移动间距过大, 会造成混凝土局部区域骨料堆积、水泥浆流失, 形成架空结构; 若混凝土配合比设计不合理也会加剧骨料沉降与浆体分离现象, 增加混凝土空洞的风险。空洞的形态多为不规则空腔, 尺寸从数厘米至数十厘米不等, 常分布于梁体腹板、横隔板等钢筋密集区域或模板角落位置, 空洞内部残留未排出的空气或水分, 在硬化后形成疏松多孔结构, 其声学特性表现为波速显著降低、振幅衰减加快, 可通过超声波检测或冲击回波法识别。

(二) 混凝土结合面分层

分阶段浇筑时结合面处理质量直接影响新旧混凝土的粘结性能, 若凿毛深度不足(通常需 $\geq 6\text{mm}$), 仅能去除表层浮浆而无法暴露粗骨料, 导致机械咬合力不足; 若未彻底清理结合面残留的脱模剂、油污或松散颗粒会使混凝土形成弱界面层, 降低化学粘结力; 若未涂刷界面剂或未设置剪力键, 在荷载作用下, 结合面易沿水平缝发生错动。分层缺陷的扩展路径通常与浇筑方向平行, 常见于预制构件拼接处、施工缝位置或预应力管道周边。

通过红外热成像检测可发现结合面温度场异常, 或通过钻芯取样观察粘结界面是否密实^[3]。

(三) 混凝土裂缝

在弯矩作用下, 梁体底部受拉区易出现垂直裂缝, 其宽度随荷载增加逐渐增大; 在剪力作用下, 腹板可能产生 $45^\circ \sim 60^\circ$ 的斜向裂缝, 在收缩或温度应力作用下混凝土表面形成无规则龟裂或网状裂缝, 裂缝的深度可通过超声波平测法或雷达波反射时间判断。表面裂缝波速正常, 深度裂缝波速明显降低, 贯穿裂缝则出现波阻抗突变。裂缝内若渗入水分会加速氯离子传输, 诱发钢筋锈蚀; 若裂缝宽度超过 0.2mm 则需采用压力灌浆或表面封闭处理。

(四) 钢筋锈蚀

钢筋锈蚀的电化学过程需同时满足氧气、水分与氯离子三要素。混凝土碳化深度超过钢筋保护层厚度时碱性环境被破坏, 钢筋表面钝化膜逐渐溶解; 氯离子穿透混凝土孔隙后会破坏钢筋表面氧化膜, 形成局部腐蚀电池。锈蚀产物的体积膨胀系数可达原钢筋的 $2 \sim 6$ 倍并对周围混凝土产生径向压力, 当应力超过混凝土抗拉强度时使混凝土保护层开裂甚至剥落^[4]。锈蚀钢筋的力学性能显著退化, 屈服强度与极限强度降低, 延性变差; 通过半电池电位法快速定位锈蚀区域, 结合电阻率测试评估钢筋锈蚀的发展程度。

二、案例分析

(一) 工程概况

某桥梁所处地区地质条件复杂多变, 地下水位普遍较高且土壤中存在一定程度的腐蚀性, 容易破坏桥梁的长期稳定性与耐久性, 该桥梁采用预应力混凝土连续箱梁结构, 自投入使用以来, 桥梁已历经多年的风雨和重载交通考验, 近期巡查发现桥梁表面出现多条裂缝, 局部区域混凝土有剥落现象, 为确保桥梁结构安全, 决定采用先进的无损检测技术全面诊断桥梁混凝土内部存在的缺陷问题。

(二) 检测方案与方法

1. 选择检测设备

本次检测选用的无线声波 CT 检测仪是针对桥梁混凝土

土内部缺陷检测需求定制开发的第三代产品，其工作模式见图 1 所示。

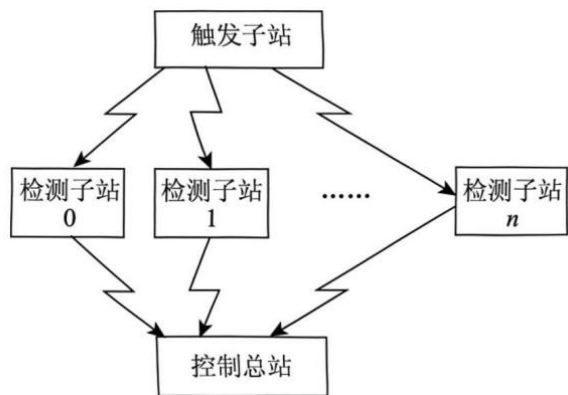


图 1 无线声波 CT 检测仪工作模式

该设备在硬件设计上突破了传统有线检测仪的局限性，采用高集成度电路板与低功耗无线通信模块，使整体重量较前代产品减轻 40%，同时数据传输速率提升 3 倍。设备核心架构由 1 个控制主站、8 个分布式检测从站及智能震源触发模块构成，各模块间通过自适应跳频技术实现抗干扰通信，确保在桥梁施工区域的复杂电磁环境下仍能保持 99.8% 以上的数据传输成功率。控制主站内置工业级处理器，可实时处理 8 通道并行数据流，而检测从站采用模块化设计，支持快速更换传感器组件以适应不同检测场景。

2. 测线规划与布置

结合桥梁结构力学特性与混凝土浇筑工艺特点制定测线布置方案，箱梁底部采用密集的网络化布设，重点覆盖预应力张拉锚固区与腹板变截面位置。两侧翼缘板

区域则根据配筋密度调整测线角度布置 30° -45° 斜向交叉网络，以增强对横向裂缝的检测灵敏度。技术人员在实际布设过程中使用激光定位仪确保测线起点误差不超过 ±2cm，并通过预制标记点实现检测从站的快速精准定位。对于曲线段箱梁，测线布置采用极坐标投影法，将直线测距转换为弧长参数，保证波速反演的几何准确性。

3. 数据采集流程

现场操作时，震源触发模块采用可调频式机械锤击装置，通过更换不同质量锤头分级控制振动能量，来适应表层混凝土与深层结构的检测需求。检测从站配置三向加速度传感器，同步采集纵波、横波与表面波信号，控制主站通过时间同步协议（PTP）确保各从站时钟误差小于 50ns，系统在发起采集指令后自动记录首波到达时间并生成带时间戳的原始数据包。操作人员在采集过程中通过手持终端实时监控各通道信噪比，当信号质量低于阈值时自动触发重复采集。

4. 数据处理与分析

原始数据经无线传输至控制主站后，首先进行带滤波（1kHz-50kHz）与异常值剔除处理，随后通过互相关算法提取初至波走时，生成包含激发点坐标、走时值及信号质量的标准化文件。观测系统建模阶段，软件根据测线几何参数自动生成不规则网格模型，通过 Delaunay 三角剖分算法优化单元划分，使波速反演分辨率较规则网格提升 25%。SIRT 算法迭代过程中，采用自适应松弛因子控制收敛速度，当相邻两次迭代结果的标准差小于 0.5 时自动终止计算。最终生成的波速分布图（图 2）。

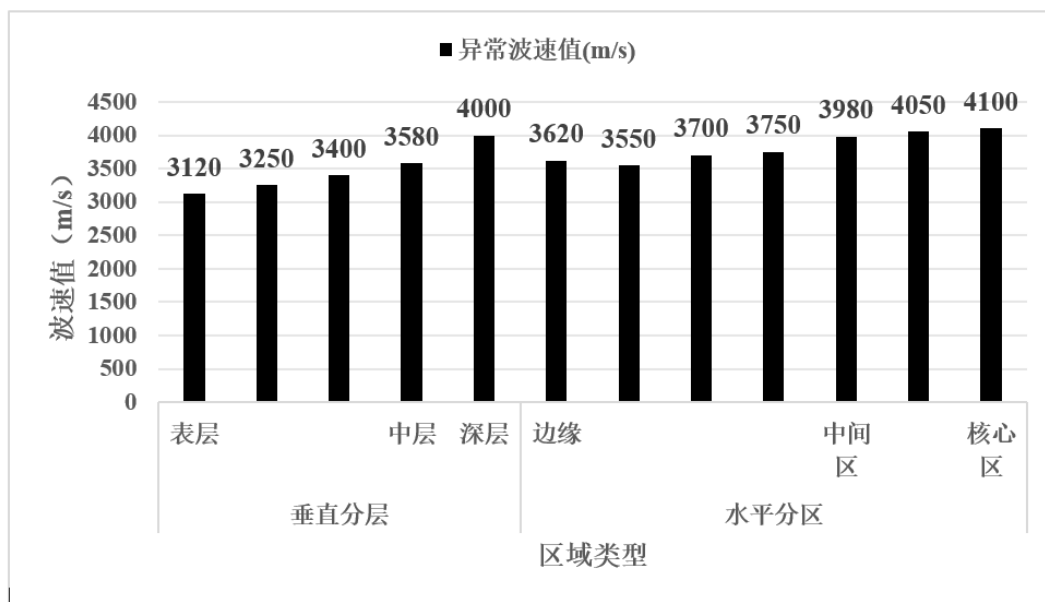


图 2 波速分布图

由图 2 可得，边缘存在 4 处低波速点，波速最低值 3620m/s，中间区存在 2 处低波速点，波速 3980m/s，核

心区未检测到显著异常。表层存在 3 处低波速异常区，波速最低值 3120m/s，中层存在 1 处低波速点，波速

3580m/s, 深层未检测到显著异常。

(三) 混凝土桥梁内部缺陷判定

1. 系梁顶部表面检测分析

经无线声波 CT 多阶段检测, 系梁顶部表面混凝土质量呈现显著分层特征, 检测结果见图 3 所示。

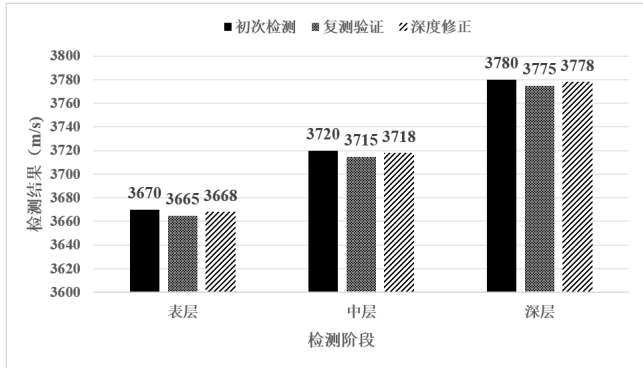


图 3 系梁顶部表面检测结果

初次检测显示, 表层 0.3m 范围内平均波速为 3670m/s, 较 C30 标准值 (3800m/s) 偏低 3.4%; 中层 (0.3-0.8m) 平均波速 3720m/s, 偏差 2.1%; 深层 (0.8-1.2m) 平均波速 3780m/s, 偏差 0.5%。结合裂缝分布, 表层异常区与纵向裂缝完全重合, 中层异常点位于横向裂缝下方 0.2m 处, 推测裂缝扩展深度达 0.8m, 导致表层混凝土密实性显著下降。

2. 系梁斜截面检测分析

斜截面混凝土质量呈现边缘弱化、核心区优化的特征。初次检测显示 (图 4), 边缘 0.2m 范围内平均波速为 4120m/s, 较 C30 标准值高 8.4%; 中间区 (0.2-0.6m) 平均波速 4280m/s, 高 12.6%; 核心区 (0.6-1.0m) 平均波速 4350m/s, 高 14.5%。

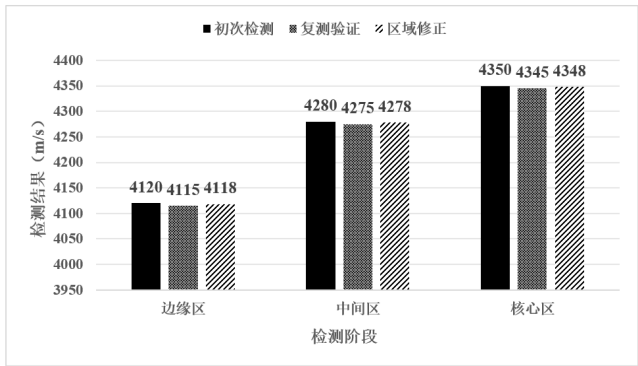


图 4 系梁斜截面检测

空间定位显示, 边缘低波速点均位于预应力管道周边 0.1m 范围内, 推测为管道压浆不密实所致; 中间区低波速点与表层蜂窝麻面区域对应, 影响范围直径 0.3m。

(四) 综合判断与建议

综合系梁顶部表面和斜截面的波速分布图像分析结果, 可以判断该桥梁系梁混凝土质量整体良好, 但顶部表面存在一定程度的内部缺陷, 主要由表面裂缝扩展引

起。针对这些缺陷, 采用压力灌浆工艺修补裂缝及空洞区域, 先清理缺陷区域表面, 去除浮浆、杂物及松散混凝土, 根据裂缝分布情况在缺陷区域布设注浆孔, 选用低粘度环氧树脂灌浆材料, 按照一定配比搅拌均匀后通过注浆泵以 0.2-0.4MPa 的压力从下至上、从左至右依次注浆直至浆液从相邻孔溢出, 浆液要充分填充裂缝及空洞。采用专用封闭剂进行涂刷处理表层裂缝, 施工前先采用高压空气清理裂缝表面的灰尘及碎屑, 然后分 2-3 次涂刷封闭剂, 每次涂刷间隔时间不少于 4 小时, 直至裂缝表面形成连续均匀的封闭薄膜厚度^[5]。加强桥梁的日常巡查和维护工作, 每月对桥梁系梁顶部表面及斜截面进行一次外观检查, 重点关注预应力张拉锚固区、腹板变截面位置及翼缘板配筋密集区等关键部位, 记录裂缝长度、宽度变化情况以及新增缺陷位置; 每季度采用便携式声波检测仪对上述重点区域进行一次无损检测, 对比分析波速变化数据; 每年开展一次全面的无线声波 CT 检测, 参照原测线布置方案, 全面复查桥梁混凝土内部缺陷, 建立缺陷跟踪档案并采用数字化平台对检测数据进行管理并趋势分析。

结语

根据以上内容分析, 得出以下结论:

(1) 无损检测技术可精准识别与定位混凝土桥梁内部缺陷, 通过无线声波 CT 检测的波速分布特征能有效区分空洞、结合面分层、裂缝等缺陷类型及空间分布, 为定量评估混凝土内部缺陷提供可靠数据支撑。

(2) 结合检测结果制定针对性的混凝土桥梁内部缺陷的处理方案。对于表层裂缝可采用表面封闭处理, 深层空洞及分层缺陷宜选用压力灌浆技术, 同时需建立“日常巡查-季度抽检-年度全面检测”的三级维护机制, 避免出现锈蚀膨胀、裂缝扩展等次生灾害。本文的研究成果为桥梁全生命周期健康管理提供相关的理论支持, 对提升基础设施运维智能化水平具有实践价值。

参考文献

[1] 杨兰兰. 声波检测技术在混凝土桥梁检测中的应用 [J]. 江苏建材, 2025, (03): 46-48.
 [2] 罗洋. 混凝土桥梁检测中超声波技术的实践应用 [J]. 北方建筑, 2023, 8(05): 14-18.
 [3] 温晓光. 基于弹性波 CT 成像法的混凝土桥梁内部缺陷检测评估 [J]. 公路, 2023, 68(01): 124-128.
 [4] 黄春强, 孙勇. 冲振回声法在混凝土桥梁内部病害无损检测中的应用研究 [J]. 交通世界, 2021, (30): 46-47.
 [5] 姚伟, 张荣, 沙龙, 等. 混凝土桥梁内部缺陷的 CT 检测技术应用 [J]. 福建交通科技, 2021, (05): 77-80.

作者简介: 张全 (1992.09--), 男, 安徽省铜陵市人, 本科, 助理工程师, 主要研究方向: 道路与桥梁工程。