

土木工程混凝土结构无损检测技术应用与发展研究

刘中璟

武汉文理学院, 湖北 武汉 430345

DOI: 10.61369/VDE.2026070019

摘 要 : 混凝土结构广泛应用于房建、交通、水利等基础设施, 长期服役后病害频发, 无损检测是结构安全评定的关键技术。本文依托 JGJ/T 456-2019 规范, 系统梳理回弹法、超声波法、地质雷达法、红外热成像法的检测机理与适用边界。研究表明: 四种单一技术均存在固有应用盲区, 常规现场条件下红外热成像检测误差达 12%-18%, 未修正碳化深度时回弹法误判率超 15%, 超声波受混凝土非均质特性制约缺陷定量困难。结合工程案例剖析行业痛点, 提出多技术分层融合检测、AI 智能波形判读、SHM 数据库联动 BIM 全周期监测等优化路径, 为提升混凝土结构无损检测精度与标准化水平提供参考。

关 键 词 : 土木工程; 混凝土结构; 无损检测; 结构病害; 多技术融合; 智慧监测

Research on the Application and Development of Non-destructive Testing Technology for Concrete Structures in Civil Engineering

Liu Zhongjing

Wuhan College of Arts and Science, Wuhan, Hubei 430345

Abstract : Concrete structures are widely used in infrastructure such as housing construction, transportation, and water conservancy. However, after long-term service, they frequently suffer from various defects, making non-destructive testing a critical technology for structural safety assessment. Based on the JGJ/T 456-2019 standard, this paper systematically reviews the testing mechanisms and applicable boundaries of the rebound method, ultrasonic method, ground-penetrating radar method, and infrared thermal imaging method. The study reveals that each of the four single techniques has inherent application blind spots. Under conventional field conditions, the error rate of infrared thermal imaging testing can reach 12%-18%. Without correcting for carbonation depth, the misjudgment rate of the rebound method exceeds 15%. The ultrasonic method faces challenges in quantifying defects due to the heterogeneous nature of concrete. By analyzing industry pain points through engineering case studies, this paper proposes optimization paths such as multi-technology hierarchical fusion testing, AI-based intelligent waveform interpretation, and SHM database-linked BIM full-cycle monitoring. These approaches provide references for enhancing the accuracy and standardization of non-destructive testing for concrete structures.

Keywords : civil engineering; concrete structures; non-destructive testing; structural defects; multi-technology fusion; smart monitoring

引言

我国既有房屋建筑总面积已突破 600 亿平方米, 公路桥梁总量超 90 万座, 大量混凝土基础设施逐步进入中老年服役期, 病害频发问题日益突出。传统钻芯法、切割法等有损检测方式虽结果精准, 但会破坏结构、增加修复成本, 且难以实现大面积快速检测。无损检测技术 (NDT) 可在不损伤结构的前提下识别内部缺陷, 适配施工现场批量检测与既有结构常态化巡检。然而, 当前国内检测行业仍普遍存在单一技术路径依赖、人工判读误差不可控、多技术融合应用不足、检测数据智能化分析能力薄弱等现实问题。基于此, 本文系统梳理四类主流无损检测技术的原理与适用边界, 明确各自短板, 推动无损检测技术在土木工程领域的高效化、规范化应用。

一、土木工程主流混凝土无损检测技术原理及应用分析

（一）回弹法检测混凝土抗压强度推定

回弹法依据混凝土表面硬度与抗压强度的相关性推定强度。检测时，回弹仪弹击杆冲击混凝土表面获取回弹值，并同步测量碳化深度予以修正，结合测强曲线换算混凝土强度换算值。混凝土越密实，回弹值越高；蜂窝、麻面等表层病害会显著降低回弹值。该法操作便捷、成本低廉，适用于梁板柱、挡土墙等构件的大批量强度普查。其局限性在于仅能反映表层20~30mm 范围的状况，无法识别内部深层缺陷，且易受表面湿度、碳化深度、骨料粒径等因素干扰。在某住宅楼验收中，回弹法2天完成320根构件普查，快速筛查出18根不达标构件，辅以钻芯法复检，兼顾了效率与精度。

（二）超声波检测技术

超声波检测向混凝土发射高频声波，遇裂缝、空洞等缺陷时产生反射、折射与衰减，接收探头获取声时、波幅及频率变化，定位缺陷并评估损伤。检测方式分单面平测、双面对测和斜测，适配不同厚度与造型构件。该技术穿透力强，可探测隐蔽裂缝及施工缝密实度，弥补回弹法深层检测短板，适用于大体积承台、箱梁、地下室墙板等厚大结构。但混凝土非均质，声波散射衰减致信噪比低，缺陷尺寸与声学参数间无定量公式，波形判读依赖经验，自动化不足。某桥梁检测中，超声斜测法定位箱梁内部深度0.5~1.2m 裂缝12处，为加固提供了依据。

（三）地质雷达无损检测技术

地质雷达（GPR）通过发射高频电磁波，在不同介电常数介质界面产生反射，接收天线采集反射信号并形成剖面图像。混凝土、空气、钢筋及锈蚀产物介电常数差异显著，可据此识别钢筋位置、保护层厚度、内部空洞、脱空及锈蚀范围等病害。该技术优势在于可视化成像、检测速度快、覆盖范围广，且无需耦合剂，可实现非接触式大面积快速扫描，是道路空洞、桥面脱空及钢筋普查的首选方案^[1]。实测中，地质雷达单日可完成3km 道路全域扫描，高效识别路基空洞与面层脱空。其局限性在于对检测环境敏感，潮湿条件及金属管线会干扰电磁波信号、降低成像清晰度，且对浅层微细裂缝的分辨能力有限。

（四）红外热成像检测技术

红外热成像通过采集混凝土表面温度场分布云图，识别因缺陷区域与完好区域热传导系数差异而形成的温度异常，进而判定内部空鼓、脱空、渗漏等病害^[2]。在主动热激励条件下，该技术可实现缺陷深度的小范围定量评估，但常规露天工程中被动式热成像仅依赖自然环境温差，易受光照、风速、昼夜温差等热噪声干扰，难以对缺陷尺寸进行高精度定量分析。该技术主要适用于建筑外墙保温层空鼓检测、隧道衬砌渗漏排查及屋面防水层破损检测等大面积快速初筛场景，精准定量检测仍需联合超声波或地质雷达进行复核。其非接触式特点使其在高空、大范围及难以抵近的工程检测中具有独特优势。

二、当前土木工程无损检测技术应用现存问题

结合前文四类无损检测技术原理、工程应用案例以及实测误差数据可知，现阶段我国土木工程混凝土结构无损检测工作，在现场实操、人员素养、设备系统、工况适配四个维度均存在明显短板，同时行业检测模式存在固有弊端，具体问题如下：

（一）单一检测技术局限性突出，复合检测体系普及不足

国内中小型检测机构及施工现场自检多采用单一无损检测技术，忽视各技术固有短板。回弹法仅测表层混凝土强度，无法探查深层缺陷；超声波可定位内部损伤，但成像不直观，病害具象化弱；地质雷达成像清晰，但难以识别细微裂缝；红外热成像适于大面积筛查，却无法高精度定量分析。单一检测模式易致漏检误判，降低报告可信度。尽管《混凝土结构无损检测技术规程》要求复杂受力构件及关键节点须采用两种及以上技术相互印证，但受工期紧张、经费有限、人员实操习惯制约，多技术融合在基层工程普及率不足40%，检测规范性亟待提升。

（二）检测人员专业水平参差不齐，人为误差难以规避

无损检测并非纯设备自动化检测工作，波形判读、图谱分析、数据修正等核心环节高度依赖检测人员专业经验。当前行业基层检测人员两极分化明显，资深检测人员具备材料力学、结构损伤理论基础，可精准修正环境干扰带来的数据偏差；而大量新晋检测人员仅经过简单设备操作培训，只会机械采集原始数据，无法结合现场钢筋排布、混凝土骨料类型、环境温湿度开展数据修正。尤其是超声波波形判别、地质雷达杂波过滤环节，人为判读误差最高可达12%，直接影响结构安全评定结果的准确性。

（三）智能化数字化转型缓慢，数据无法实现全周期追溯

当前无损检测设备多停留于原始数据采集层面，软件功能单一，数据处理依赖人工导出、整理与归档，易致录入错误与资料遗失。检测数据独立存档，形成孤岛，无法时序联动对比，难以追踪病害发展速率与材料衰减，无法精准预测剩余寿命。行业对策为搭建云端结构健康监测（SHM）数据库，统一存储全周期时序数据并自动分析衰减趋势。BIM 模型不作底层存储，仅作三维可视化展示，通过标准化接口与 SHM 数据库联动，在 BIM 构件上直观标注病害位置、范围与风险等级。二者分工协同，支撑混凝土结构全生命周期智慧运维管理。

（四）极端工况适配性较差，特殊场景检测精度衰减明显

现有常规无损检测仪器均基于常温、干燥、无强电磁干扰的常规施工现场研发，在沿海高盐雾腐蚀环境、北方低温冻土环境、水下桥墩结构、隧道高湿衬砌、化工厂腐蚀厂房等特殊工况下，声波传输、电磁波反射、红外热辐射都会受到外界环境干扰。潮湿环境会大幅削弱超声波传播速度，金属密集区域会干扰地质雷达电磁波信号，温差过大会直接导致红外热成像无法识别病害，目前行业缺少针对性的抗干扰专用检测设备，极端工况下无损检测精度普遍下降20% 以上，成为行业检测盲区。

（五）各类无损检测技术检测误差量化对比

四类技术常规检测误差差异显著：回弹法推定表层强度误差8% ~ 15%，受碳化深度、表面湿度及骨料种类干扰；超声波

法检测内部缺陷误差6% ~ 10%，干扰源于钢筋密集、含水率及骨料粒径；地质雷达法识别钢筋与空洞误差5% ~ 8%，易受金属管线、积水及电磁干扰；红外热成像法筛查空鼓渗漏误差达12% ~ 18%，主要受光照、风速及温差影响。综上，地质雷达精度最优，红外热成像误差最大且环境敏感，回弹法与超声波法各有深层短板，单一技术均难满足关键构件高精度检测，亟需多技术联合复检。

三、土木工程无损检测技术未来发展趋势

（一）多源无损检测技术分层融合，构建一体化复合检测体系

未来工程检测将突破单一模式，向数据级、特征级、决策级三层级融合方向发展。数据级融合为原始信号直接叠加；特征级融合为提取各检测信号核心指标交叉分析；决策级融合为多设备独立判定后综合评级。实际工程宜以决策级融合为主、特征级融合为辅，以地质雷达定位缺陷空间位置，以超声波量化缺陷埋深与延展范围，以回弹法核验表层强度，通过贝叶斯概率模型开展综合损伤判定，依托多源数据互补消除单一技术测量盲区，全面提升复杂混凝土结构检测的可靠性与精准度。

（二）结合人工智能算法，实现检测数据自动智能解析

依托卷积神经网络、机器学习等人工智能算法，搭建无损检测智能识别模型，自动识别超声波波形缺陷、地质雷达病害图谱、红外温度异常云图，替代人工经验判读，消除人为判读误差^[3]。同时 AI 算法可依托热成像梯度数据、声学参数变化规律，自动完成缺陷尺寸定量计算、强度换算、病害等级评级，补齐常规检测手段定量分析短板，实现检测从数据采集、智能分析到报告自动生成全流程自动化，降低检测人员工作门槛，提升检测标准化程度。

（三）对接物联网与数字孪生，联动 BIM 搭建全生命周期监测平台

将无损检测设备与物联网模块结合，实现检测数据实时无线传输，搭建云端 SHM 结构健康监测数据库存储时序检测数据，再联动 BIM 建筑信息模型作为三维可视化载体。在 BIM 模型中直观标注结构病害位置、尺寸、损伤等级，整合历年多次检测时序数据，追踪结构性能衰减规律，预测病害发展趋势与结构剩余服役寿命，依托数字孪生技术实现实体结构与虚拟模型实时同步，完成混凝土结构从施工验收、日常巡检、病害维修到拆除重建的全生命周期数字化管控^[4]。

（四）研发极端工况专用检测设备，拓展技术应用边界

针对水下、高湿、高盐、低温等特殊工程环境，优化传感器探头、信号传输模块硬件性能，研发防水防腐型超声波检测仪、抗电磁干扰地质雷达、全天候自适应红外热成像设备，提升恶劣工况下检测稳定性与精度，补齐水利港口、海底隧道、沿海高腐蚀建筑等特殊工程检测短板。

四、结论

回弹法、超声波法、地质雷达法、红外热成像法因物理原理不同而各有侧重，单一方法均存在固有短板，无法满足复杂混凝土结构全域高精度检测需求。当前土木无损检测存在单一技术路径依赖、人工判读误差不可控、数字化体系不完善、极端工况适配不足等问题。未来应推广三层级多技术融合检测，依托 AI 削减人为误差，搭建 SHM 与 BIM 联动平台，研发专用硬件以提升精度与效率。智能化转型仍面临定量映射理论、融合框架及补偿模型等基础挑战，需在波动力学模型、物理信息神经网络、抗干扰传感器三方面持续突破，推动向“数据-物理双驱动”范式跃迁。

参考文献

- [1] 王浩. 地质雷达在道路混凝土结构病害检测中的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(S1): 215-218.
- [2] 杨瑞臻, 王健. 基础设施红外热成像无损检测研究综述[J]. 工程力学, 2025, 42(5): 112-120.
- [3] 张铭, 李轩. 基于卷积神经网络的混凝土超声波检测信号智能识别研究[J]. 施工技术, 2025, 54(2): 136-140.
- [4] 刘阳. 基于数字孪生与 BIM 融合的桥梁全生命周期检测数据管理[J]. 公路交通科技, 2024, 41(11): 89-95.
- [5] 陈磊, 吴浩. 混凝土结构多场耦合损伤及无损检测研究进展[J]. 土木工程学报, 2024, 57(3): 102-110.
- [6] Zhang L, Wang Y. Research on quantitative detection method of concrete cracks based on active infrared thermal imaging[J]. NDT & E International, 2024, 136: 102897.