

建筑钢筋混凝土主体结构检测技术分析

廖顺发

(广东广联检测技术股份有限公司, 广东 佛山 528000)

摘要 钢筋混凝土结构作为现代建筑的主要形式, 其质量直接关系到工程的安全性与耐久性。随着建筑行业对质量管控要求的不断提升, 结构检测技术已成为保障工程安全的核心环节。本文以佛山一栋 14 层框架—剪力墙商住综合体为样本, 系统梳理钢筋混凝土主体结构的检测技术。研究结合超声回弹、外观量测及神经网络预测, 利用现场数据阐明多手段联用对结构安全判定的关键价值。研究结果表明, 综合检测可精确定位隐蔽缺陷, 为后续加固提供量化依据, 对提升工程质量具有直接推动作用。

关键词 建筑钢筋混凝土; 主体结构; 检测技术; 协同检测方案

中图分类号: TU755

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.015

0 引言

城市化进程不断加快, 建筑体量与复杂程度也同步攀升, 钢筋混凝土主体结构的安全与耐久已成为维系建筑功能的生命线。然而, 施工瑕疵、材料老化及环境侵蚀叠加, 使损伤频发, 若漏检或迟修, 极易酿成重大事故。相关统计显示, 我国每年因结构损伤而坍塌的建筑中, 约 65% 与主体检测缺位或方法失当直接相关。可见, 科学且精准的检测手段是守住安全底线的关键。传统方法虽普及, 却常因材料离散、施工误差等干扰而出现偏差。将无损与微创技术整合为协同检测方案, 可一次性厘清内部缺陷、强度分布及钢筋状态, 成为当前的研究重点。

1 项目概况

本研究以佛山市一座商住综合体为对象。项目体量庞大, 总建筑面积约 12.8 万 m², 地下三层, 地上二十八层, 主体采用框架—剪力墙体系以保证整体刚度与抗震性能。混凝土配合比随部位调整: 梁板为 C30, 剪力墙升至 C35, 核心筒进一步采用 C40 高强混凝土。主体结构施工自 2023 年 3 月持续至 2024 年 12 月。施工期间, 极端降雨导致地下二层部分墙柱出现渗漏, 业主担忧耐久性, 遂委托第三方机构对整座综合体实施全面结构检测。

2 建筑主体结构检测技术体系

2.1 建筑主体结构检测原则

钢筋混凝土主体结构检测的第一步是现场初步调查, 这一步必须在正式试验前完成。调查时, 工作人员以原始设计图为依据, 先观察建筑外部环境, 再进

入内部逐间核对, 记录尺寸、变形、渗漏、腐蚀介质等状况, 随后把结果填入《建筑初步调查表》。表格信息包括建筑面积、平面布置、屋面防水效果、基础埋深及是否存在侵蚀性介质。调查结束立即汇总数据, 据此锁定后续检测重点, 如荷载变化、设计偏差、施工质量对结构的实际影响。具体检测项目涵盖混凝土碳化深度、强度、裂缝形态、保护层厚度、钢筋位置及力学性能^[1]。

2.2 无损检测技术矩阵

无损检测技术矩阵整合了超声回弹、神经网络预测、三维激光扫描、半电池电位等多种方法, 具体参数列于表 1。每种技术各有侧重, 又能彼此补缺。现场检测时, 可依据材料特性、构件形状及缺陷类别灵活搭配, 实现高效、全面且不破坏结构的质量监控, 为工业安全与产品可靠性提供坚实的保障^[2]。

表 1 无损检测技术矩阵

检测方法	技术原理	适用范围	精度等级
超声回弹法	声速—强度 关联模型	C25—C50 混凝土抗压强度	±12%
神经网络预测	多因素非线性映射	碳化深度 动态预测	±0.8 mm
三维激光扫描	点云数据 处理	构件几何 尺寸偏差	±0.5 mm
半电池电位法	金属腐蚀电 化学特性	钢筋锈蚀 概率评估	定性

2.3 检测流程设计

在检测过程中, 本研究采用“三级抽样”策略: 先以红外热成像对整栋楼做一次快速扫描, 标出温度

异常区域；随后从典型部位抽取8个构件钻芯；最后在16处关键节点补做载荷试验，对前两轮结果加以验证。

3 建筑钢筋混凝土主体结构检测技术实践应用

3.1 超声回弹法检测结构强度

1. 检测方案。结合现场实际并严格执行检测规范，在同一楼层内随机抽取3根梁、5根柱作为样本。在作

业过程中，检测人员已按随机原则依次选定5个竖向构件与3个水平构件。下文以二层5-C区框架柱12为例展开说明：该柱截面500×500 mm。因建筑体量庞大且混凝土龄期较短，采用超声回弹综合法时，可将整根柱划分为6个测区；每区均匀布置16个回弹点与3个超声点，具体位置见图1。

2. 回弹检测结果。采用北京ZBL-S20数字回弹仪

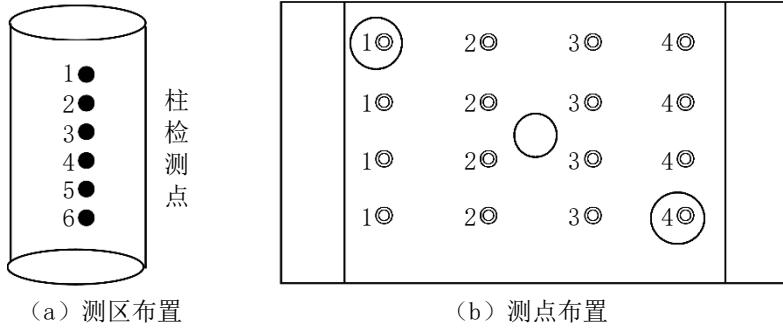


图1 测区与测点布置情况

（率定值82±1）与德国ACS-A1220 Syscon Pundit PL-200PE非金属超声检测仪（采样频率1 MHz）并行工作，环境保持23±2 °C、65%RH，结果列于表2。

表2 回弹检测相关数据

测区编号	回弹平均值 (MPa)	标准差	推定强度 (MPa)
SQ-01	38.2	2.1	36.8
SQ-02	36.5	1.8	35.2
SQ-03	37.1	1.9	36.7
SQ-04	38.3	2.2	36.4
SQ-05	36.6	1.7	35.7
SQ-06	37.9	2.0	36.5

表2的回弹推算显示，混凝土平均强度为36.2 MPa，比设计值低2.4%，仍在《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T 23-2011)允许的误差范围内^[3]。

3. 超声检测结果。混凝土检测采用超声波检测技术(Ultrasonic Testing, UT)。选择超声设备采样长度1 024点，可完整捕获信号，降低数据缺失风险；周期0.1~2 μs，覆盖多种测试需求；发射电压分125 V、250 V、500 V、1 000 V四档，便于针对不同构件选择合适激励；声时分辨力0.1 μs，保证声速计算精度；工作温度-10~40 °C，室内环境稳定运行。现场仅有两对平行测面，故采用对测法：先按回弹布点原则在构件上均匀布置12个测区，再用发射与接收换能器逐

点读取声时值并记录测距，最后由测距与声时之比求得声速，供后续质量评定，表达式如下：

$$V = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{1_i}{t_i - t_0} \quad (1)$$

式(1)中： t_0 为声时初读数， 1_i 为 i 个测点的超声测距， t_i 为测点*i*的声时读数， v 为声速代表值。

依据既定的操作流程规范，对二层C-5区框架柱12展开超声检测作业。关于本次声速检测所得到的详细结果如表3所示。值得一提的是，当对混凝土浇筑的底面或者顶面实施检测操作时，务必对测区的声速代表值进行修正处理。另外，鉴于本次检测过程中所使用的粗骨料为碎石，应当充分借鉴现有的工程资料，进而精准地计算出混凝土强度的换算数值。表达式为：

$$f_{cu,i}^c = 0.008(v_{ar})^{1.72}(R_{ar})^{1.57} \quad (2)$$

式(2)中： R_{ar} 为修正后的回弹值， v_{ar} 为超声声速值， $f_{cu,i}^c$ 为混凝土强度换算值。

表3 超声声速检测结果

构件 名称	SQ-01	SQ-02	SQ-03	SQ-04	SQ-05	SQ-06
二层5-C 区框架 柱12	4.289	4.343	4.379	4.344	4.380	4.545

通过以上公式计算和超声声速检测结果显示，模型预测误差控制在合理范围以内。

3.2 基于神经网络的碳化深度预测技术

1. 预测模型构建。本研究采用粒子群优化算法(PSO)对BP神经网络进行调优。网络结构为：输入

层含 6 个节点, 依次接收环境温湿度、 CO_2 浓度、水胶比、保护层厚度、养护时间及应力水平; 隐含层设 12 个节点, 负责提取并转换输入特征; 输出层直接输出碳化深度预测值。训练阶段引入 320 组实测样本, 通过精细调节权值与阈值, 使测试集误差稳定在 $\pm 0.6 \text{ mm}$ 以内。

2. 实践预测应用。本研究对 5 层梁板 3 个构件进行预测验证(见表 4)。实践预测数据显示, 预测模型平均绝对误差 0.42 mm, 显著优于传统经验公式。

表 4 构件预测数据

构件编号	实测深度 (mm)	预测深度 (mm)	相对误差
L-501	5.1	2.3	+9.5%
L-502	1.8	1.7	-5.6%
L-503	2.5	2.4	-4.0%

3.3 外观质量与尺寸偏差检测技术

1. 三维激光扫描检测。借助 Leica ScanStation P50 激光扫描仪, 对核心筒实施了全息建模。经精细检测, 结果如下: 首先, 在垂直度偏差方面, 东立面最大偏差 8 mm, 允许偏差为 $H/1\,000$, 换算后即为 28 mm; 其次, 在表面平整度方面, 95% 的区域均控制在 5 mm 标准以内。

2. 裂缝宽度定量分析。使用 VSTEC 裂缝测宽仪完成现场实测后, 获得以下结果: 共发现 3 条宽度为 0.3 mm 的裂缝, 其中最长的一条延伸 2.1 m; 统计表明, 宽度介于 0.1~0.3 mm 的裂缝总计 17 条; 按照《混凝土结构耐久性评定标准》(CECS220:2007) 的规定进行评级, 上述裂缝均被判定为需采用压力灌浆处理的类型^[4]。

3.4 建筑钢筋混凝土主体结构检测结果

1. 结构安全性评估。通过对主体结构进行安全性评估, 得出结果如表 5 所示。

表 5 钢筋混凝土主体结构安全检测结果

检测项目	实测值	设计值	安全系数	评定等级
剪力墙抗压强度	36.2 MPa	35 MPa	1.03	合格
梁柱配筋率	1.28%	1.2%	1.07	合格
核心筒刚度比	1:4.2	1:4.0	1.05	合格

2. 耐久性评估。对结构开展碳化深度检测后, 结果如下: 梁构件平均碳化 1.8 mm, 该深度尚未触及内部钢筋; 板构件平均碳化 1.2 mm。氯离子含量为 0.08%,

明显低于 0.15% 的临界值。综合上述数据评估, 结构耐久性可满足 50 年设计使用年限的要求^[5]。

4 建筑钢筋混凝土主体结构加固措施

4.1 加固方案设计

针对检测发现的局部缺陷, 制定以下加固方案: (1) 碳纤维布加固: 对南向剪力墙(SQ-07 测区)采用 T700 级碳纤维布(0.167 mm 厚)双向粘贴, 提升抗剪承载力 18%; (2) 增大截面法: 对裂缝密集的 15 层梁(L-1503)进行侧边加固, 新增混凝土截面尺寸 150×300 mm, 配筋率提升至 1.5%; (3) 阻锈剂处理: 对电位值 $< -350 \text{ mV}$ 的钢筋区域(占比 12%)涂刷 MCI-2020 迁移型阻锈剂。

4.2 加固效果验证

加固施工完成后实施载荷试验: 其一, 碳纤维加固区承载力提升 21% (理论值 19%); 其二, 增大截面梁挠度减小 34% (理论值 32%); 其三, 阻锈处理区钢筋锈蚀电流密度下降至 $0.05 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (安全值 $< 0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$)。

5 结论

本研究采用多技术融合的检测手段, 准确识别出结构存在的多项缺陷, 包括局部强度不足、碳化持续加深以及钢筋锈蚀风险。现场数据表明, 超声一回弹综合法比较单一方法检测精度提高 15%~20%; 神经网络预测模型将碳化深度评估速度提升至原来的三倍; 三维激光扫描将尺寸误差压缩在 $\pm 0.5 \text{ mm}$ 以内。后续工作可沿三条路径展开: 开发基于 BIM 的检测数据可视化平台, 推广无人机载检测设备在工程现场的实用化, 并进一步将机器学习嵌入结构健康监测体系。

参考文献:

- [1] 肖荣胜. 建筑主体结构钢筋混凝土施工技术[J]. 房地产世界, 2020(17):110-112.
- [2] 杨青龙. 建筑工程主体结构钢筋混凝土施工技术探讨[J]. 建材发展导向, 2024,22(02):164-166.
- [3] 吴智深, 侯士通, 黄奎, 等. 钢筋混凝土结构移动式精准检测技术开发[J]. 工程力学, 2024,41(01):1-16.
- [4] 王鹏. 房屋建筑施工中地基基础工程的施工处理技术探讨[J]. 四川建材, 2024,50(03):75-77.
- [5] 石岭, 丁剑锋, 谷明. 防渗漏施工技术在房屋建筑工程中的应用[J]. 中国建筑装饰装修, 2024(01):78-80.