

建筑工程中混凝土回弹法与超声法联合检测技术分析

赵伟

芜湖科欣建设工程检测有限责任公司, 安徽 芜湖 241100

[摘要]建筑工程里,混凝土回弹法和超声法是常用无损检测手段,混凝土强度评估中回弹法靠表面硬度、超声法依据声波传播特性,二者检测原理和敏感因素互补,联用以提升检测精度与稳定性挺有效,单一检测方法易受环境、碳化、缺陷等因素干扰,数据融合与模型拟合技术能克服这一问题,给混凝土结构质量评估更全面可靠的技术支撑。

[关键词]混凝土强度;无损检测;回弹法;超声检测;数据融合

DOI: 10.33142/ect.v3i6.16858

中图分类号: TU5

文献标识码: A

Analysis of the Combined Testing Technology of Concrete Rebound Method and Ultrasonic Method in Construction Engineering

ZHAO Wei

Wuhu Kexin Construction Engineering Testing Co., Ltd., Wuhu, Anhui, 241100, China

Abstract: In construction engineering, concrete rebound method and ultrasonic method are commonly used non-destructive testing methods. In concrete strength evaluation, rebound method relies on surface hardness, and ultrasonic method relies on sound wave propagation characteristics. The detection principles and sensitive factors of the two complement each other, and their combination is effective in improving detection accuracy and stability. A single detection method is easily affected by environmental, carbonization, defects and other factors. Data fusion and model fitting technology can overcome this problem and provide more comprehensive and reliable technical support for concrete structure quality evaluation.

Keywords: concrete strength; non destructive testing; rebound method; ultrasonic testing; data fusion

引言

建筑工程质量要求不断提高使得混凝土结构强度的精准评估成为工程安全控制的关键环节,而传统破损检测方式有结构破坏风险难以满足现代工程精细化管理需求,无损检测技术因高效、便捷、非破坏性得到广泛应用,其中回弹法和超声法操作性强、适应性广尤其常见,在工程实践中大家关注的焦点是融合两者优势以让检测结果更准确、更稳定。

1 混凝土强度检测方法概述

1.1 混凝土强度检测的技术分类

混凝土强度对于建筑结构可靠性和耐久性而言是个重要指标,其检测方法有破坏性检测与无损检测这两大类,其中标准立方体或钻芯取样试压法是破坏性检测的主要方式,通过破坏样本获取实际抗压强度,在当下是最具权威性的检测手段,虽然这种方法能直接体现混凝土实际承载力,但操作麻烦、成本高且会破坏结构完整性,不适合大面积检测。

无损检测技术靠物理信号(像声波、弹性、磁性等)间接推断混凝土强度,跟别的技术比起来操作简单、响应快且检测时不用损坏构件,常见无损检测方法有回弹法、超声法、电磁法、冲击弹性波法等,由于回弹法和超声法技术成熟、设备容易得到、适应性广,常用于现场快速评估混凝土质量,在工程检测中是重要补充手段。

1.2 无损检测法与破损检测法对比分析

破损检测结果直接且精度高,人们常把它用作仲裁性检测手段,在争议项目或者关键节点验收时有着不可替代的作用,不过它有局限性,检测范围有限不能覆盖整个结构体,而且破坏性采样也许会影响结构稳定性甚至带来安全隐患,在实际工程里往往要加上无损检测来做整体评估。

无损检测方法精度比破损检测略低些,不过它能在不影响结构使用的情况下快速得到大面积数据,在对结构整体性要求高、检测频次多的工程项目里特别适用,若建立和破损法的强度换算关系,再结合现场实际参数校正,就能在确保精度的实现快速检测和质量监控。

1.3 无损检测的适用范围与工程价值

施工阶段,混凝土浇筑质量通过无损检测能及时反馈,若有缺陷或强度异常也能及时发现,从而方便技术人员调整施工工艺或者优化配合比。运营阶段,建筑物结构性能评估、改扩建可行性分析、灾后应急检测等场景都能使用无损检测,为工程维护和管理提供有力支撑。

绿色建筑理念推广开来,无损检测因环保、高效被愈发重视,且在大体积混凝土、重要基础设施、预制构件和历史建筑保护等领域应用前景广阔,随着检测方法与数据分析模型不断优化,无损检测技术在现代工程质量控制体系里会发挥更重要的作用。

2 回弹法技术分析

2.1 工作原理：基于弹性反弹原理

回弹法核心原理是借弹性冲击原理测定混凝土表面硬度并凭经验公式或者曲线间接推算其抗压强度，具体做法是用弹簧驱动冲锤撞击混凝土表面，依据冲锤反弹距离或者高度（就是回弹值）判断材料硬度等级进而推算混凝土抗压强度，该方法物理响应很直观且测试逻辑清晰，适合现场快速检测。

回弹值和混凝土强度的关系不是线性固定的，会受很多因素影响，得结合试验室标定曲线修正，而且检测精度要提高的话，现场就该按规范选有代表性的部位多点测量，用均值反映材料整体状态，这样检测结果才有可比性和参考价值。

2.2 操作方式与常用设备（如回弹仪）

便携式弹性回弹仪常被用于回弹检测，像国家标准推荐的 HT-225 型回弹仪就挺好，因它有体积小、操作容易、数据读取直观的优点，操作人员使用的时候要让仪器垂直对着混凝土检测面施加冲击，读取反弹指针显示的回弹值，在多次测试之后将平均值当作这个部位的代表强度指标。

要确保测试稳定又准确，就得适当处理被检测的混凝土表面，去掉浮浆和附着物，以免表面不规则影响数据读取，回弹仪需定期校准，操作人员要接受专业培训并按相关标准（像《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》）操作，防止人为误差。

2.3 影响因素：碳化深度、表面硬度、施工质量等

混凝土回弹值受其表层碳化的重要影响，碳化层一旦形成硬度就会升高从而容易让回弹值虚高进而高估混凝土强度，检测之前得测定碳化深度，必要时把碳化层剔除后再测试或者结合别的方法修正计算结果以减少误判风险。

检测结果受施工质量、养护条件、龄期变化、骨料种类、含水率等因素影响显著，并且混凝土表面若有蜂窝麻面、空鼓、开裂等缺陷，回弹值的获取就会被严重干扰，实际应用时要充分筛查检测部位，选择结构完整、代表性强的区域来测试。

2.4 方法优劣

回弹法测试过程快、设备成本低、操作简单，这是它能大面积快速筛查的突出优点，在现场施工质量控制中常用，且它不用切割或破坏结构，在桥梁、隧道、构件等混凝土表面状态较好的场景中尤其适用。

该方法局限性明显，它尤其依靠表面硬度且和混凝土内部强度间接相关，碳化、温度、湿度、结构形状等对其影响大而难以全面反映材料内部情况，强度评价精度要求高的时候往往得结合超声法等其他检测方法补充验证。

3 超声法技术分析

3.1 工作原理：声波传播速度与混凝土致密性、强度的关系

超声检测法靠分析声波在混凝土里的传播特性来间

接判定混凝土的密实程度与强度，在致密度高、连续性佳的混凝土里声波传播速度快，否则就传播得慢，并且声波穿过混凝土结构时若有裂缝、孔洞或者不均匀之处，声速就会下降且波形也会失真，这样就能判断内部结构是否完整。

纵波常被用于检测混凝土，其弹性模量、密度和泊松比与纵波传播速度关系密切，在混凝土两端设置发射和接收换能器，通过测量声波传播时间来算出声速，再结合经验模型就能估算强度，该方法直观、数据量多、探测范围深，对评估混凝土内部均质性和缺陷分布很合适。

3.2 测试参数：声速、波形衰减、信噪比

声速作为最关键的检测参数，其数值会受材料性质、传播路径以及耦合状态等因素影响，一般采用直达波或者折射波测量方式，实际应用时需综合多点测量结果才能建立可靠的声速分布图像或者评估曲线。

我们用波形衰减和信噪比来判断信号质量与材料内部状态，若混凝土存在孔隙、水分或者裂缝，声波能量就会被大量吸收或者散射，致使接收信号强度下降，合理评估衰减程度和信噪比，有助于剖析检测区域结构稳定性和材料一致性，能给后续强度计算和质量评价提供数据基础。

3.3 影响因素：内部缺陷、水灰比、钢筋干扰等

混凝土内部状态对超声检测极为敏感，内部若存在裂缝、孔洞或者材料分布不均的情况会严重影响声速传播路径进而使测量误差加大，高水灰比会让混凝土密实性与声波传播效率降低影响检测准确性地结合实际配合比修正分析。

声波传播会被钢筋的存在干扰而产生反射与绕射现象，尤其是在配筋密集的区域，声波可能被屏蔽或者绕道传播从而使波形识别与速度测定受到影响，结构复杂或者钢筋含量高的部位需调整探头布置方式或者采用多通道技术来提升信号解析能力才能确保检测结果的稳定性和可信用度。

3.4 方法优劣

超声法挺好，它能很好识别混凝土内部缺陷且提供深层结构信息，用来评估混凝土质量连续性与隐蔽性缺陷挺有效，它适用于不同形状、不同厚度的混凝土构件且适应性强，在工程里应用价值挺广泛。

然而，超声法对操作人员的专业性要求颇高，操作人员得有声学基础并且具备设备使用经验才行，而且试件表面粗糙度、耦合介质均匀性、结构构造等因素对检测结果影响很大，检测结果容易产生误差，想要实现理想的检测效果，设备校准、探头接触状态、环境噪声干扰等问题也得严格控制。

4 联合检测技术原理与方法

4.1 联合检测的基本原理：补充与修正单一检测结果

回弹法和超声法获取混凝土强度信息所基于的物理

机制不同,单独使用都会有偏差,而超声法能反映混凝土内部结构的均匀性,回弹法对表面硬度更敏感,将二者结果融合是联合检测的基本思想,这样可优势互补且能提高检测的全面性和准确性,有效修正各自的偏差。

实际工程应用里,强度预测置信度被联合检测提升,且它能提供不同龄期、不同结构位置下较高一致性的检测结果,在碳化层厚、内部缺陷复杂的环境中尤其如此,联合检测能让误判概率显著降低,是构建科学质量评价体系的重要技术路径。

4.2 常见联合公式与拟合模型(如超声-回弹综合强度计算模型)

工程上要实现回弹值和超声声速协同计算时,常拿多元回归分析或者神经网络模型来建立预测强度的经验公式,比较常见的形式如下:

$$f_c = aR + bV + c$$

其中混凝土强度用 f_c 表示,回弹值为 R ,超声声速为 V ,回归系数为 a 、 b 、 c ,不同项目得结合现场试验数据来定标,某工程基于回弹值和超声声速的回归模型结果如下表(表1)。

表1 回弹值与超声声速的回归模型

回弹值 R	声速 V (km/s)	实测强度 (MPa)	预测强度 (MPa)
35	3.90	32.0	31.8
38	4.10	35.5	35.2
40	4.30	38.0	37.6

4.3 数据融合方法与结果判定流程

加权平均、最小二乘拟合、模糊逻辑算法等都能用于数据融合且各方法的权重可依据现场状况设置,混凝土碳化显著时超声法的权重就要提高、结构内部缺陷明显时回弹法的修正系数就得提高,融合结果需综合施工龄期、构件类型和环境因素来评定。

结果判定流程得设定强度分级标准和误差容限以明确每项检测值的处理方式,数据点超出预警范围时就得复测且分析误差来源以保证最终强度评估稳当可靠,这一流程必须严格按照国家或者行业技术规范执行并形成完整记录留作备查。

4.4 检测步骤与标准化操作流程

一般来说,联合检测遵循“区域划分—数据采集—数据融合—结果校验”这样的四步流程,要依据构件类型和检测目的合理划分区域,布点需均匀且要避开像边缘部位、孔洞区或者钢筋密集区域,这样能减少数据偏差,在检测的时候,回弹值和超声声速要同步采集,且保持两个数据来源的空间与时间一致,从而增强数据的匹配度和可追溯性。

数据处理阶段,要拿统一的回归模型或者经过验证的融合算法来计算原始数据,再靠误差分析机制识别并剔除异常值,全过程得用专门的检测记录表把采样点编号、检

测时间、设备型号以及操作人员信息详细登记好以建立完整的数据链条,这么个流程能让检测成果在后期评估、质量审核与工程复核的时候有良好的技术可验证性和规范性。

5 联合检测的优势分析

5.1 提高检测结果的可靠性和代表性

单一检测方法常被局部因素限制,结果容易片面或者偏差较大,而回弹法和超声法联合运用既能获取表面和内部信息,又能多维度评估混凝土整体性能,使检测数据的真实性和代表性大幅提升,同步比对、交叉验证能防止偶然性误差干扰判断结果。

大体积混凝土或者关键结构部位采用联合检测能获得更均衡、稳定的检测数据,给后续结构安全评估、施工调整和质量追踪提供可靠依据且能进一步增强工程管理的科学性与预判能力。

5.2 降低误差率,适应复杂结构或不同龄期混凝土

混凝土龄期会变且养护条件有差异、构件受力情况也不同,传统检测方式在这些不同条件下误差很明显,而联合检测靠多源数据补偿和计算修正,能让碳化、水灰比、施工质量波动等引起的偏差大大降低。

复杂结构像剪力墙、框架柱、桥梁承台之类的整体状态很难用单点检测结果来代表,这时候用回弹法识别表面异常再加上超声法深入探测内部质量,检测策略就能全面适应结构多样性和现场条件的变化,把高容错率和高准确性结合起来。

5.3 优化工程质量评估体系

联合检测结果构建起的质量评估体系技术支撑力强且推广适应性也好,检测结果能量化、可对比且易于形成批次性评估报告,施工单位、监理单位与质检机构的决策效率和管理水平能借此共同提升。

联合检测数据归档与分析后能构建起完整的混凝土强度数据模型和技术档案,从而给后续工程维护、二次改造以及质量追责提供数据支撑,促使闭环式质量控制机制形成并推动工程质量管理朝着标准化、数据化方向发展。

5.4 在现行规范和标准中的适用性

多项国家和行业标准写入了联合检测方法,像《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》(JGJ/T23)还有《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T23-2011)就包含在内,这给联合检测的工程推广提供了合规依据,并且规范明确了检测流程、修正方法、数据拟合模型以及报告标准,联合检测的可执行性挺好。

大量实际工程案例里,结构质量验收、灾后重建评估、古建筑保护以及市政基础设施检测等领域广泛运用联合检测,其标准化操作程序和法定认可的技术框架增强了检测结果的权威性,也促进了检测技术的广泛普及和在工程实践中的规范应用。

6 结语

混凝土强度检测将回弹法和超声法联合起来,突破

了单一检测手段的局限，能充分发挥各自优势，提升检测的准确性和代表性。建筑工程质量控制日益严格，该技术高效、可靠、适应性强，成为现代无损检测的重要发展方向。应用规范化操作流程和数据融合模型，优化了混凝土强度评估体系，也为结构安全性分析提供了科学依据。以后，随着检测标准不断完善、设备智能化升级，联合检测技术在更多复杂工程场景中将有更广阔的应用前景。

[参考文献]

- [1]徐青青.水下结构的混凝土强度无损检测和机器学习预测模型研究[D].福建:福州大学,2020.
- [2]贾宝.南京地区高强混凝土回弹法测强曲线试验研究[D].江苏:东南大学,2021.
- [3]翟子泰.隧道火灾后衬砌结构混凝土损伤的超声检测及试验研究[D].浙江:中国计量大学,2020.
- [4]陈金明.乌鲁木齐地区高强混凝土回弹法和超声回弹综合法测强曲线试验研究[D].新疆:新疆农业大学,2024.
- [5]高博英.基于机器学习的混凝土检测强度回归方法研究[D].西安:长安大学,2023.

作者简介:赵伟(1986.10—),毕业院校:大连理工大学,所学专业:土木工程,当前就职单位:芜湖科欣建设工程检测有限责任公司,职务:结构室主任,职称级别:中级。