回弹法检测混凝土强度的误差分析

陈伟才

广东省有色工业建筑质量检测站有限公司 广东 广州 510725

【摘　要】：回弹法因检测快捷、操作便捷，被广泛用于混凝土抗压强度现场推定，但表面碳化、含水状态、检测角度、仪器状态及测区选择均可能改变回弹值，使推定强度偏离构件真实强度。针对检测过程中易产生的系统偏差和随机误差，从仪器校准、测区布置、碳化深度测定、异常值处理及强度换算等环节实施控制，并结合钻芯结果进行必要修正，可压缩检测数据离散范围，减少强度误判，提高回弹法现场检测的准确性和工程质量判定可靠度。

【关键词】：回弹法；混凝土强度；检测误差；碳化深度；强度修正

DOI:10.12417/2705-0998.26.14.006

引言

混凝土结构实体强度直接关系工程质量判定，而现场检测又受到结构条件、检测环境及操作过程的共同影响。回弹法能够在基本不损伤构件的条件下快速获得表面硬度信息，但回弹值并不等同于混凝土实际抗压强度。龄期变化、表层碳化、湿度差异、测点位置甚至回弹仪率定状态，都可能使同一构件出现不同推定结果。若仅依据换算强度作出判断，容易放大检测偏差。因此，有必要从误差形成过程入手，厘清各影响因素，并将误差控制落实到测区设置、现场操作、数据修正及结果复核等具体环节。

1 回弹法强度检测的技术依据及数据形成特征

1.1 回弹值同表层硬度的对应关系

回弹法以弹击装置冲击混凝土表面后产生的回弹距离作为基础参数，回弹值本质上反映表层材料抵抗局部冲击变形的能力，并非混凝土抗压强度的直接测量值。表层硬度较高时，弹击能量损失相对较小，回弹体反弹距离增加；表层疏松、受潮或存在微裂缝时，局部能量吸收增大，回弹读数随之下降。强度推定依赖表层硬度与内部抗压性能之间的统计相关关系，因此混凝土配合比、骨料类型、龄期、养护制度及碳化程度都会改变这种对应关系。当前检测理念更加重视实体结构状态识别，单一回弹值需要结合碳化深度、检测面状态和构件成型条件进行综合判读，才能降低表层特征对强度推定造成的放大效应。

1.2 测区回弹数据的离散规律

测区数据并不会呈现完全一致的回弹水平，其离散程度与混凝土内部均匀性、表面施工质量及测点分布密切相关。同一构件受浇筑振捣、泌水、骨料分布、模板接触条件和局部养护差异影响，不同位置可能形成硬度梯度，导致回弹值出现一定波动。测点过于集中时，所得数据容易受局部高硬度区或低硬度区支配，难以反映构件整体状态；测点邻近气孔、外露骨料、蜂窝区域或边缘位置时，异常读数发生概率进一步增加[1]。检测数据处理需要关注平均水平之外的离散特征，通过合理布置测区、剔除明显异常值、控制测点间距，并比较不同测区的波动范围，可识别局部缺陷对结果的干扰，使强度评定从单点读数判断转向多测区数据一致性控制。

1.3 强度换算结果的形成过程

回弹检测形成强度结果需要经历原始回弹值整理、方向修正、碳化深度修正、测区代表值确定以及测强曲线换算等多个环节，任一环节处理不当均可能使最终推定值发生偏移。原始数据首先需要排除受异常测点影响的极端读数，再依据检测角度和测试条件进行修正，随后结合测区碳化深度进入相应测强曲线或换算表，得到测区混凝土强度换算值。构件级强度判定还需综合各测区均值、标准差及保证率要求，避免直接以算术平均值替代实体强度结论。近年来工程检测更强调区域测强曲线、专用测强曲线及钻芯校核的结合使用，使换算关系更加贴合当地材料体系和施工条件，减少全国统一曲线在骨料、胶凝材料及养护差异较大情况下产生的系统性误差。

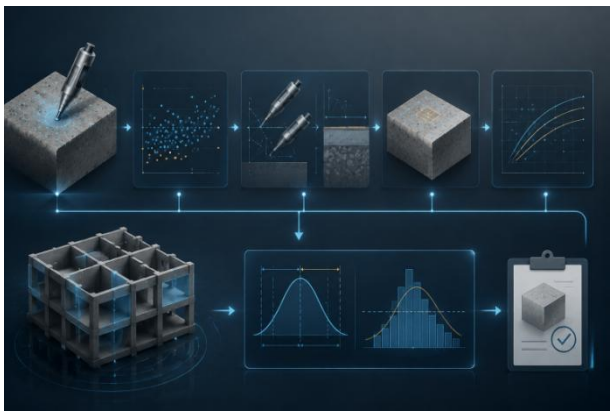

图 1 回弹法混凝土强度换算与推定流程图

2 混凝土强度回弹检测中的主要误差来源

2.1 表层碳化引起的强度高估偏差

混凝土表层发生碳化后，氢氧化钙持续与二氧化碳反应，表面组织趋于致密，硬度明显提高，但内部混凝土实际抗压强度并不会按相同比例增长。回弹仪获取的是表层弹击响应，碳化层越厚，回弹值越容易偏大，进而造成强度换算值高于实体

真实水平。碳化深度测定不足、取值位置单一或修正参数套用不当，会进一步放大这种系统性偏差。对服役年限较长、表面干燥程度较高的构件而言，碳化影响往往比普通操作误差更具隐蔽性。

2.2 含水状态造成的回弹数值波动

混凝土表面含水率变化会直接改变弹击能量的传递和耗散路径。表层处于潮湿状态时，孔隙内部水分增加，局部缓冲效应增强，回弹值容易降低；表面过度干燥时，硬化层刚度上升，又可能使读数偏高[2]。同一构件若不同测区受雨淋、渗水、养护条件或通风状态影响，所得数据便可能出现明显差异。检测前若未识别表面湿度状态，仅按照统一换算关系处理，容易将环境因素造成的数值变化误判为强度差异，削弱测区数据之间的可比性。

2.3 仪器状态及操作条件产生的测值偏移

回弹仪弹击弹簧疲劳、指针摩擦增大、中心导杆污染以及率定值异常，都会改变仪器实际输出，使读数形成持续性偏移。操作环节同样具有较强影响，弹击方向偏离检测面法线、施压速度不稳定、测点距离构件边缘过近、检测面未充分打磨，均可能造成回弹值失真。仪器未按规定周期率定时，系统误差容易长期累积；现场检测动作缺乏一致性时，随机误差则会明显增大。数字化回弹设备虽然提高了数据采集效率，但传感器校准和过程质量控制仍是保证测值稳定性的关键环节。

3 测区布置及数据处理环节的偏差成因

3.1 测区位置选择不当造成样本失真

测区位置直接决定回弹数据能否反映构件真实强度状态。若测区集中于表面平整、施工质量较好的局部区域，所得结果容易偏高；靠近施工缝、模板接缝、预埋件、边角部位或受力状态特殊区域时，又可能受到局部结构特征干扰。构件不同高度、不同浇筑层次之间还可能存在密实度差异，单一位置取样难以覆盖这种空间变化。测区布置缺少代表性时，后续计算即使严格执行统计程序，也无法消除样本源头造成的偏差，最终推定强度容易偏离实体整体水平。

3.2 异常测点保留引起代表值偏离

单个测点受表面孔洞、骨料集中、局部疏松、打磨质量或弹击状态影响，可能产生明显高于或低于正常区间的读数。若异常值未经识别直接进入测区代表值计算，平均回弹值会被极端数据拉动，强度换算结果随之产生偏移。数据处理不能仅依赖机械平均，还应结合测点离散程度、相邻读数变化和检测面质量判断异常来源[3]。数字化检测系统可通过离群识别、数据轨迹记录和测点关联分析提高异常数据筛查效率，但剔除标准必须符合检测规程，避免人为扩大或缩小有效数据范围。

3.3 统一测强曲线套用导致换算误差

测强曲线建立于特定原材料、配合比、龄期和养护条件，其统计关系具有明显适用边界。不同地区骨料岩性、水泥品种、掺合料比例以及施工环境发生变化后，相同回弹值对应的实体抗压强度可能并不一致。直接套用统一曲线，会把材料体系差异转化为系统性换算误差，尤其在高性能混凝土、矿物掺合料占比较高或长期服役构件中更为突出。当前检测技术更强调地区测强曲线、专用测强曲线及芯样修正系数的协同使用，并利用历史检测数据动态校核换算模型，使强度推定关系更加贴合工程实体条件。

4 回弹法检测误差的针对性控制方法

4.1 校准回弹仪并规范现场检测操作

回弹仪技术状态直接影响原始数据质量，检测前应完成率定检查，确认弹击拉簧、指针系统、中心导杆及弹击杆运行稳定，钢砧率定值处于规程允许范围后方可投入使用。设备经历长距离运输、连续高频检测或较长时间停用后，应重新核验机械性能，防止弹簧疲劳、摩擦阻力增大及零部件污染造成系统性漂移。现场操作需保持弹击杆轴线垂直于检测面，施压过程连续平稳，避免冲击速度忽快忽慢改变能量传递状态；测点应避开边缘、预埋件、明显气孔及松散区域，并控制相邻测点间距，防止前一次弹击形成的局部损伤影响后续读数。检测面存在浮浆、疏松层或明显不平整情况时，应进行必要清理和打磨，使弹击接触条件趋于一致。数字化回弹设备可同步记录测点位置、弹击时间、原始值及修正信息，减少人工抄录误差，但自动采集不能替代设备校准和动作规范。通过设备状态、检测姿态、测点质量、数据记录四个环节同步控制，可把仪器误差和操作误差压缩到可识别范围。



图 2 回弹仪现场检测全过程质量控制示意图

4.2 修正碳化湿度因素并优化测区设置

碳化和含水状态属于回弹检测中最容易造成系统偏差的表层因素，控制重点不能停留于事后换算，而应前移至测区调

查和现场状态识别环节。碳化深度应选择具有代表性的检测位置进行测定，取值需要反映构件不同暴露条件下的差异，避免单点结果替代整片区域状态；碳化层明显不均匀时，可按照不同区域分别确定修正参数，减少统一修正带来的二次误差。表面湿度也需纳入检测条件控制，雨淋、渗水、养护残余水分及局部潮湿都会改变回弹响应，检测时间宜尽量保持构件表面状态稳定，对湿度差异较大的区域应分区采样，防止不同含水水平的数据直接混合。测区布置还应兼顾构件受力部位、浇筑层次、表面状态和空间分布，避免测点集中于局部优质区域或特殊缺陷区域[4]。信息化检测可引入测区编码、位置标识和环境状态记录，将回弹值、碳化深度、湿度信息对应到具体区域，实现参数关联分析，使修正过程从统一系数处理转向分区识别和差异化修正，提高强度推定对实体状态的适配程度。

4.3 结合钻芯验证建立强度修正关系

回弹法属于间接测强方法，检测结果依赖统计曲线和表层硬度信息，面对龄期较长、材料体系特殊、回弹结果离散较大或强度判定接近临界值的构件，仅依靠统一测强曲线容易形成较大换算偏差。钻芯法能够直接获得实体混凝土抗压强度数据，可作为校核回弹结果的重要依据。芯样位置应根据回弹测区分布和强度差异合理确定，使钻芯结果能够与对应区域的回弹值形成有效匹配，取芯后需控制芯样尺寸、端面加工、含水状态和加载条件，降低验证数据自身误差。获得芯样抗压强度后，可比较回弹换算值与实测值之间的差值和变化趋势，依据相关性建立修正系数或局部修正关系，不宜只以单个芯样结果直接替代整构件强度。检测数据积累达到一定规模后，可结合地区原材料、配合比、龄期和施工工艺形成区域化数据库，通过回弹—钻芯配对数据持续校核测强模型，逐步降低通用曲线与实际工程材料之间的不适配。数字化数据平台还可保存历史检测结果，使同类工程的修正参数具有可追溯性，提升后续强度评定的一致性。

5 误差控制后的检测结果评价及质量判定

5.1 测区数据离散程度的变化分析

误差控制完成后，测区数据的评价重点应由单纯比较平均回弹值转向离散程度识别。规范测点位置、统一弹击条件并剔除异常数据后，同一构件各测区之间的极差和标准差通常会明显收敛，局部异常值对整体结果的干扰随之减弱。若部分测区仍保持较大波动，应结合构件浇筑层次、表面质量、碳化深度及受潮状态重新核查，避免把材料不均匀造成的真实差异误判为检测误差。通过建立测区离散系数、异常点占比和重复检测偏差等指标，可更加准确地识别数据稳定性，为后续强度评定提供具有统计基础的判断依据。

5.2 推定强度同实体强度的符合程度

回弹推定强度是否接近实体真实强度，需要借助钻芯抗压结果、同条件试件资料或可靠的历史检测数据进行校核。完成碳化修正、湿度控制和测强曲线调整后，可计算回弹推定值与实体强度之间的绝对误差、相对误差及相关系数，观察偏差是否呈现稳定收缩趋势[5]。若多测区结果均出现同方向偏高或偏低，说明仍可能存在系统性修正不足；若误差随机分布且幅度处于合理范围，则说明检测模型适配程度较高。借助数字化检测平台建立配对数据库，还可持续修正区域性换算参数，使强度推定逐步贴近实际材料特征。

5.3 检测结果可靠性的综合判定

检测结果的质量判定不宜依赖单一回弹值，应综合考虑仪器率定状态、测区代表性、数据离散水平、碳化修正合理性及实体校核结果。可靠性较高的检测数据应具备测点分布合理、异常值比例较低、重复检测差异稳定、换算参数适配性较强等特征。对接近设计强度临界值或不同检测方法结论不一致的构件，还需提高复核等级，避免因单次检测偏差作出质量结论。信息化质量管理可将原始数据、检测位置、环境条件和修正过程同步留痕，形成可追溯的数据链，使最终判定具备技术依据和复核条件。

6 结语

回弹法检测结果受表层状态、测区布置、仪器性能及数据换算影响。规范检测操作，细化碳化湿度修正，优化测区设置并结合钻芯校核，可降低数据离散程度和强度推定偏差，使检测结果贴近实体质量，为混凝土结构质量判定提供有效依据。

参考文献：

[1] 黄泽福.回弹法测混凝土强度结果准确性的探究[J].江苏建材,2025,(6):52-53.

[2] 张飞,张世豪,马亮.基于回弹法的输水工程混凝土质量检测研究[J].工程技术研究,2025,10(22):151-153.

[3] 张霖.回弹法与芯样法检测混凝土抗压强度差异分析及工程控制措施研究[J].福建建材,2025,(11):29-32.

[4] 戴佳雍.回弹法检测混凝土质量与误差校正——确保混凝土强度满足工程质量要求[J].中国品牌与防伪,2025,(14):61-63.

[5] 陈鸿飞.回弹法-超声法联合检测混凝土强度的误差与修正分析[J].江西建材,2025,(8):116-118.