

超声回弹综合法在土木工程实体强度检测中的实践研究

任 鲜

建研院检测中心有限公司 北京 100020

摘 要: 为精准检测土木工程混凝土实体强度, 规避单一检测方法的局限性, 本文依托轨道交通与房建工程开展试验研究, 阐述超声回弹综合法的检测原理、设备规范与工艺流程。通过设置多等级混凝土构件检测试验, 结合钻芯法对比验证, 分析碳化、潮湿等工况引发的检测偏差, 梳理各类误差来源, 并提出参数修正、标准化操作等优化策略。结果表明该方法检测精度高、稳定性好, 可广泛应用于土木工程混凝土实体无损检测工作。

关键词: 超声回弹综合法; 土木工程; 实体强度检测; 实践

引言: 混凝土实体强度是判定土木工程结构质量与服役安全性的核心指标, 传统单一回弹法、超声法易受碳化、含水率等因素干扰, 检测精度不足。为解决常规无损检测技术的局限性, 超声回弹综合法凭借双参数耦合检测优势, 可兼顾混凝土表层与内部质量特性。基于此, 本文结合实际工程试验, 系统探究该方法的应用流程、检测误差与优化路径, 旨在完善标准化检测体系, 提升土木工程混凝土实体强度检测的科学性与精准度。

1 超声回弹综合法核心理论与检测技术体系

1.1 超声回弹综合法检测基本原理

(1) 回弹法检测原理: 基于混凝土表面硬度与抗压强度的相关性, 通过回弹仪测定回弹值, 反映构件表层约2~3cm深度范围内的砂浆硬度与弹性性能, 据此初步判定表层强度特性。(2) 超声法检测原理: 利用超声波在混凝土介质中的传播速度与介质弹性模量、密度的相关性, 通过测量声时计算声速, 反映混凝土内部密实度、均匀性及裂缝、空洞等缺陷状况。(3) 综合法耦合原理: 将回弹法表层硬度敏感性与超声法内部整体响应特性相耦合, 建立回弹值-声速双参数强度推算模型, 消除碳化、含水率等单一因素干扰, 弥补单一方法的局限性。

1.2 检测设备与技术参数要求

(1) 核心检测设备: 回弹仪宜选用标准能量2.207J的指针直读式或数字式, 使用前须经钢砧率定(率定值 80 ± 2); 超声波检测仪应具备波形显示与声时测读功能, 换能器主频50~100kHz, 声时测量精度 $0.1 \mu\text{s}$ 。(2) 辅助检测工具: 游标卡尺精度不低于 0.1mm , 钢卷尺精度不低于 1mm ; 测温设备误差 $\leq \pm 1^\circ\text{C}$; 表面处理采用砂轮或钢丝刷打磨平整, 除去浮浆及附着物。(3) 设备日常校验规范: 回弹仪每2000次或每季度进行率定校验; 超声仪每日使用前进行声时零校准, 标准棒偏

差 $\leq \pm 0.5 \mu\text{s}$, 校验不合格仪器不得用于检测^[1]。

1.3 标准化检测工艺流程

(1) 检测前期准备: 现场踏勘明确构件类型与支承条件, 测区面积不宜大于 1m^2 , 优先布置于受力侧面, 每构件测区数不少于10个, 测区先回弹后超声避免耦合干扰。(2) 现场数据采集: 回弹操作确保弹击杆垂直于测试面, 每测区读取16个回弹值, 剔除3个最大和3个最小值后取平均; 超声采用对测法, 测距精确至 1mm , 声时精确至 $0.1 \mu\text{s}$, 每测区读取3个声时值取平均。(3) 数据初步筛选: 单测点回弹值超出平均值 ± 6 时应予剔除; 声时值偏差超过平均声时 $\pm 5\%$ 时需核查耦合与测距, 无效数据修正须注明原因, 确保有效数据不少于8个回弹值与3个声时值。

1.4 混凝土强度推定计算方法

(1) 通用测强曲线选用: 按JGJ/T23及CECS02:2020规定, 优先采用地区或行业专用曲线; 不具备时采用全国统一公式, 但粗骨料应为碎石、砂率及坍落度须在适用范围内。(2) 专项测强曲线拟合: 原材料、养护或强度等级超出通用曲线适用范围时, 须制作同条件试块, 采用最小二乘法二元回归拟合, 相关系数 ≥ 0.90 , 剩余标准差 $\leq 4.0 \text{MPa}$ 。(3) 强度推定值判定: 计算各测区强度换算值的平均值与标准差。当变异系数 $\delta \leq 0.14$ 时, 推定值=平均值 $-1.645 \times$ 标准差; 当 $\delta > 0.14$ 时, 取各测区换算值中的最小值作为推定值, 并对照强度等级表完成等级判定。

2 超声回弹综合法在土木工程实体强度检测中的实践研究

2.1 工程试验概况

(1) 工程基本信息: 选取某市轨道交通工程标准高架段及附属房建主体结构作为试验对象, 桥梁段全长约 2.1km , 上部结构采用预应力混凝土现浇箱梁, 标准

跨径30m; 房建主体为框架-剪力墙结构, 地上12层。混凝土设计强度等级涵盖C30、C40、C50三个等级, 骨料为5~25mm连续级配碎石。(2) 试验工况条件: 现场检测于主体结构完工后第28~60天集中实施, 环境温度为12~28℃, 相对湿度55%~75%。梁、板构件采用自然养护, 柱构件采用覆膜养护, 龄期差异控制在±3d以内。检测时段避开雨天及高温暴晒时段, 确保混凝土表面干燥、无明水。(3) 试验方案设计: 选取梁构件6件、板构件6件、柱构件8件, 总计20个构件。每构件按规范布置10个测区, 测区总面积约0.5m²。同步设置钻芯法对比试验, 每构件钻取直径100mm芯样2个, 芯样总数为40个, 钻芯位置紧邻综合法测区边缘且不影响测区完整性。

2.2 现场检测试验实施过程

(1) 构件测区布置: 梁测区布置于侧面跨中L/3~2L/3区段, 距梁底约300mm高度处; 板测区布置于板底跨中区域, 避开钢筋密集区; 柱测区布置于柱侧面中部, 距楼面约800~1200mm高度。各测区测点间距均匀, 回弹测点与超声测点交替布置, 间距不小于30mm。

(2) 现场数据采集: 回弹检测采用HT-225型回弹仪, 每测区读取16个有效回弹值; 超声检测采用NM-4A型非金属超声波检测仪, 换能器主频50kHz, 采用对测法跨缝布置, 每测区读取3组声时值, 测距采用游标卡尺精确量测至0.1mm。所有数据同步记录于标准化表格, 每构件检测耗时约15~20分钟^[2]。(3) 平行对比试验: 钻芯法采用ZS-200型钻芯机, 在测区邻近区域钻取直径100mm芯样, 高径比严格控制在1:1。芯样经切割、端面修整后, 在压力试验机上进行抗压强度试验, 加载速率0.5~0.8MPa/s, 获取各构件混凝土芯样抗压强度实测值。

2.3 试验数据整理与结果分析

(1) 数据统计处理: 按规范分别对回弹值与超声声速值进行统计处理。各测区回弹值剔除3个最大值和3个最小值后取平均, 超声声速取3组读数的平均值。计算各构件回弹均值范围38.2~48.6, 声速均值范围4.15~4.82km/s, 组内离散系数均小于0.08, 数据稳定性良好。(2) 强度结果推定: 采用CECS02:2020全国统一测强曲线计算各测区换算强度, 按变异系数 δ 确定各构件强度推定值。结果显示: C30构件推定强度均值32.8MPa, C40构件推定强度均值42.3MPa, C50构件推定强度均值51.6MPa, 各构件强度推定值均达到设计强度等级要求, 合格率100%。(3) 对比结果分析: 将超声回弹综合法推定强度与钻芯法实测强度进行配对对比, C30、C40、C50三组综合法推定值与钻芯法实测值的平均相对误差分别为

5.2%、4.8%、6.1%, 总体相关系数 $R^2 = 0.92$, 两种方法检测结果呈现良好线性相关性, 验证了超声回弹综合法在土木工程实体强度检测中具有较高的精度与可靠性。

2.4 典型检测问题案例分析

(1) 表层碳化构件检测偏差案例: 某柱构件碳化深度实测达3.5mm, 综合法测强为48.2MPa, 而钻芯法实测仅为44.5MPa, 偏差约8.3%。分析原因为碳化层导致表层硬度增高、回弹值偏高, 而芯样反映内部真实强度。处理方案: 对该批次构件按碳化深度修正回弹值, 采用碳化修正系数0.92进行折减, 修正后综合法推定值45.1MPa, 与钻芯法偏差缩减至1.3%。(2) 潮湿工况检测异常案例: 雨后检测某梁构件时, 表面含水率较高, 超声声速均值达4.65km/s (较干燥状态偏高约7%), 导致综合法推定强度偏高约12%。处理方案: 暂停检测, 采用热风机对测区表面进行干燥处理, 静置至表面干燥后再行测试, 声速值回落至4.35km/s, 强度推定回归正常范围。后续规程明确潮湿构件须采取烘干或晾干措施, 确保测试面处于干燥状态后方可实施检测。

3 检测误差来源分析与技术优化策略

3.1 检测误差核心来源分析

(1) 设备因素误差: 回弹仪弹击弹簧性能衰减导致标称动能不足, 超声仪声时测读晶振漂移引发系统误差, 换能器压电陶瓷老化致使接收灵敏度下降, 上述因素可使回弹值偏低2~3、声速偏差±3%以上。(2) 人为操作误差: 测区布置时测点间距不足30mm或测区选在钢筋密集区, 回弹操作弹击杆未垂直侧面或读值估读偏差, 超声换能器耦合压力不均导致声时波动, 数据记录时测距、测值誊写错误等, 均可引入不可忽视的人为偏差。(3) 工况环境误差: 碳化深度每增加1mm可使回弹值偏高约1.5~2.0; 含水率升高导致超声声速提升, 偏差幅度可达5%~10%; 粗骨料粒径过大或石英含量高会增大声速离散性, 环境温度低于5℃或高于40℃均影响仪器电子元件稳定性^[3]。(4) 材料自身误差: 水胶比波动0.01可使强度偏差约1.5MPa; 振捣不密实导致局部蜂窝、气孔集中区超声信号衰减异常; 养护温差造成表层与内部强度梯度差异, 使回弹法与钻芯法结果产生系统性偏差。

3.2 误差修正与数据优化方法

(1) 环境参数修正: 依据JGJ/T23规定, 当环境温度超出10~30℃范围时, 回弹值按每5℃偏差修正±0.5; 含水率修正采用烘干称重法建立声速-含水率关系曲线, 按实测含水率查表折减声速值。(2) 碳化深度修正: 采用酚酞酒精溶液测定碳化深度, 碳化深度小于2mm时可不修

正,介于2~6mm时按碳化修正系数 $\alpha = 1.00 - 0.02d$ (d 为碳化深度,mm)折减回弹值,超过6mm时建议采用钻芯法替代。(3)离散数据优化:测区回弹值以3倍标准差为临界值剔除离群点,超声声速以Grubbs检验法判定异常值,剔除后补充测点重新测试;当有效测区数据少于10个时,整构件数据不予采用^[4]。

3.3 现场检测技术优化策略

(1)标准化操作管控:编制作业指导书明确设备每日校验、测区统一编号、数据双人复核制度;操作人员须持证上岗,每年度进行盲样比对考核,确保手法一致性。(2)差异化检测方案:C30及以下低强混凝土优先选用大能量回弹仪(4.5J),高强混凝土(C50以上)须采用专用高强回弹仪并配套高强测强曲线;大体积混凝土增加测区数量至15个,薄壁构件(厚度<100mm)采用对测法时须修正边界效应。(3)全过程质量管控:检测前核查构件龄期、养护记录,满足龄期 $\geq 14d$ 方可实施;检测中按10%比例随机复测检验数据一致性;检测后对异常数据溯源分析,形成闭环质量控制记录^[5]。

3.4 技术应用推广建议

(1)常规土木工程检测标准化应用:建议将超声回弹综合法列为房建主体、桥梁墩柱、水工构筑物等常规混凝土结构强度普查的首选无损方法,测区布置、数据采集及强度推定全流程严格遵循CECS02:2020规程。(2)老旧建筑与加固改造工程适配:既有建筑混凝土碳化普遍较深(多大于6mm),建议以超声声速为主导参数、回弹值仅作参考,综合法推定强度偏低时应以钻芯

法最终核定;加固层厚度大于50mm的部位须采用预埋声测管方案。(3)智能化数字化升级方向:研发集成回弹与超声功能的一体化智能检测终端,实现测值自动采集、异常实时预警;建立云端区域测强曲线数据库,基于大数据挖掘实现强度智能推定;引入BIM模型定位测区空间分布,实现检测数据三维可视化与全生命周期追溯管理。

结束语

本文通过工程试验证实,超声回弹综合法可有效弥补单一检测技术的缺陷,检测结果与钻芯法契合度高,具备良好的可靠性与实用性。研究明确了设备、操作、环境等核心误差来源,形成了针对性的误差修正与现场检测优化策略。未来可推进该技术智能化、数字化升级,适配新旧各类土木工程检测场景,进一步拓宽其应用范围,为工程结构质量管控提供有力技术支撑。

参考文献

- [1]李生初.超声回弹综合法混凝土测强曲线建立与研究[J].建筑结构,2023,53(S2):171-175.
- [2]吴海涛,黄建平,杨文涛.超声脉冲波在混凝土缺陷与强度检测中的应用研究[J].工程质量,2023,31(03):223-228.
- [3]郭建华,林伟.回弹法与超声回弹综合法混凝土强度检测误差对比分析[J].建筑科学,2022,38(08):78-84.
- [4]王筱玥,陈顺超.龄期对混凝土回弹值与超声波速检测结果的影响规律研究[J].重庆建筑,2024,23(12):74-77.
- [5]丘河钰.超声回弹综合法混凝土实体强度检测误差来源及修正技术[J].工程技术研究,2024,9(19):156-158.