

桥梁结构混凝土强度无损检测方法探讨

赵文贤

苏交科集团检测认证有限公司 江苏 南京 210000

摘要：桥梁结构混凝土强度无损检测是保障工程安全的关键环节，检测方法需兼顾精度与效率。本文围绕无损检测技术体系展开探讨，涵盖回弹法、超声法、雷达法及综合法等技术原理与操作要点，分析检测结果影响因素、优化措施及精度验证方式，并展望多技术融合、智能化与便携化发展趋势，为桥梁健康监测提供科学支撑。

关键词：桥梁结构；混凝土强度；无损检测

引言：桥梁作为交通基础设施核心，其结构安全直接关系到公共安全与经济发展。混凝土强度是评估桥梁健康状态的关键指标，传统破坏性检测需取样钻孔，耗时费力且成本高昂，还会削弱结构完整性。无损检测技术凭借高效、非破坏性特点，成为研究热点，对保障桥梁长期安全运营具有不可替代的重要意义，推动检测模式向主动预防转变。

1 桥梁结构混凝土强度无损检测的重要性

桥梁结构混凝土强度是保障其安全运营的核心指标，无损检测技术通过非破坏性手段获取强度数据，对预防结构失效、延长使用寿命具有重要意义。（1）实时监测与隐患预警是无损检测的核心价值：传统破坏性检测需取样或钻孔，可能削弱结构承载力，而无损技术如超声波、回弹法可在不损伤构件的前提下完成全截面扫描，快速识别局部强度不足、内部空洞或裂缝等缺陷，为早期干预提供依据，避免小隐患演变为重大安全事故。（2）检测效率与经济性优势显著：大型桥梁结构复杂、体量庞大，传统检测需搭建脚手架或封闭交通，耗时耗力且成本高昂。无损检测设备便携、操作灵活，可在不影响正常通行的情况下完成快速检测，单日检测面积可达数百平方米，大幅缩短工期并降低人力、交通管制等间接成本。（3）科学评估与维护决策支持：混凝土强度随时间、环境及荷载作用逐渐衰减，无损检测可动态追踪强度变化趋势，结合历史数据建立寿命预测模型，为养护周期制定、加固方案选择提供精准依据。例如，通过连续监测发现某区域强度持续下降，可针对性加强该区域维护，避免盲目全面维修造成的资源浪费^[1]。无损检测技术的应用，实现了从“被动抢修”到“主动预防”的转变，通过精准、高效的强度评估，有效提升桥梁结构的安全储备与全生命周期管理水平，是现代桥梁工程中不可或缺的技术支撑。

2 桥梁结构混凝土强度主要无损检测方法

2.1 回弹法检测原理与技术要点

回弹法检测混凝土强度基于表面硬度与抗压强度的相关性原理，通过回弹仪的弹击锤冲击混凝土表面，测量其回弹距离并转化为回弹值，结合碳化深度修正，推算混凝土抗压强度。该方法的优势在于操作便捷、无损检测，适用于大面积快速筛查。技术要点需聚焦仪器状态、检测环境及数据处理三方面。仪器使用前需进行率定试验，确保重锤回弹位置与标准值一致，避免因仪器误差导致检测偏差；检测面需清洁平整，无浮浆、蜂窝或疏松层，必要时需打磨处理，确保弹击点与混凝土基体直接接触。测区布置应避开钢筋密集区、裂缝或施工缝，每测区面积控制在0.04平方米左右，测点均匀分布且间距不小于20毫米。回弹操作时，弹击方向应与检测面垂直，避免斜向弹击导致数值偏差，每个测点需记录回弹值，并剔除异常值后取平均值；碳化深度测量需在每个测区钻取小孔，滴入酚酞试剂，通过颜色变化确定碳化层厚度，进而对回弹值进行修正，最终强度推算需结合地区专用测强曲线，避免直接采用通用曲线导致的误差。全程需规范操作，确保数据真实可靠，为结构安全评估提供科学依据。

2.2 超声法检测原理与技术要点

超声法检测混凝土强度基于声波传播特性与材料力学性能的关联性。超声波在混凝土中传播时，其波速受弹性模量、密度及内部孔隙结构影响，衰减系数则反映材料均匀性与缺陷分布。检测需采用高频脉冲仪器，频率范围通常为20kHz至500kHz，高频段可提升分辨率，减少低频干扰导致的精度损失。操作前需对检测面进行清洁处理，去除浮浆、油污或松散层，必要时进行打磨，确保换能器与混凝土表面良好耦合。测点布置需避开钢筋密集区、裂缝或蜂窝缺陷，避免声波路径异常导致数据失真。耦合剂需均匀涂抹，厚度控制在2-3mm，避免气泡残留或厚度不均影响信号传递。数据采集时需同步记录环境温度、湿度

及混凝土龄期,因温度每变化 5°C 可能导致声速波动 $0.5\%-1\%$,需建立温度补偿模型修正偏差。分析阶段采用时域法测量声波传播时间计算波速,频域法通过频谱分析评估材料均匀性。需注意换能器间距误差需控制在 3% 以内,耦合不良或表面粗糙度过高可能导致信号衰减超 20% 。通过多次测量取平均值及结合回弹法或钻芯法校准,可提升结果可靠性。该方法以非破坏性、操作便捷优势,成为既有桥梁快速评估的核心手段。

2.3 超声回弹综合法检测原理与技术要点

超声回弹综合法通过结合超声波速与回弹值,综合评估混凝土强度,兼具两种方法优势,提升检测精度。

(1)原理互补性增强可靠性:超声波速反映混凝土内部密实度、弹性模量及孔隙结构,回弹值关联表面硬度与局部抗压性能。二者结合可抵消单一方法局限,如表面疏松但内部密实的构件,单独回弹法易低估强度,而超声波速能补充深层信息,使综合结果更接近真实强度值。(2)操作流程需规范严谨:检测前需彻底清理构件表面,去除浮浆、油污及松散层,必要时打磨至平整;回弹仪弹击方向须严格垂直测点,施压力度均匀,避免倾斜导致数值偏差;超声波检测需在相对两面布置换能器,间距精确控制,确保声波路径穿透待测区域,同步记录声时、波幅及主频数据。每个测区需采集16个以上回弹值与3-5组有效声速值,剔除异常值后取算术平均值参与计算。(3)数据处理需科学校准:综合法需基于当地骨料类型、水灰比及养护条件建立专用测强曲线,避免直接套用通用曲线导致系统误差;检测结果需结合环境温湿度、混凝土龄期等因素,通过修正系数动态调整强度推算值,确保与实际状态匹配^[2]。该方法适用于表面与内部质量同步评估场景,是桥梁结构检测中高效、精准的核心技术手段。

2.4 雷达法检测原理与技术要点

雷达法通过发射高频电磁波探测混凝土内部结构,依据波速、衰减及反射信号特征间接评估强度,具有非破坏、高效等优势,适用于桥梁结构快速检测。(1)电磁波传播特性与强度关联性:混凝土强度影响电磁波传播速度及衰减程度,高强度混凝土内部结构更致密,波速更快、衰减更小;低强度混凝土可能存在孔隙或裂缝,导致信号散射增强、波速降低。通过分析波速-衰减关系,可建立强度推算模型,实现无损评估。(2)检测参数优化与操作规范:设备需根据检测深度选择合适频率,高频探头适用于浅层,低频探头适用于深层探测。检测时需调整增益、时窗等参数,确保信号清晰且覆盖目标区域;探头需与构件表面紧密贴合,避免空气间隙

干扰。(3)数据处理与结果修正:采集的雷达信号需通过专业软件处理,识别有效反射信号并剔除干扰波;结合混凝土材料特性(如骨料类型、水灰比)建立专用测强曲线,将电磁波参数转化为强度值。需考虑环境温湿度、构件表面状况对信号的影响,进行必要修正,确保结果准确反映实际强度状态。该方法通过电磁波与混凝土介质的相互作用,实现了从“表面检测”到“内部评估”的延伸,为桥梁结构安全状态诊断提供了高效、可靠的技术手段。

3 桥梁结构混凝土强度无损检测方法的优化与应用考量

3.1 检测结果影响因素分析

混凝土强度无损检测结果可靠性需精准把控多维度影响因素,材料组成方面,骨料类型如碎石、卵石或再生骨料会显著改变声波传播路径与衰减特性,例如高吸水性骨料可能导致声速测量值偏低 $5\%-8\%$,需根据骨料特性调整检测参数并建立专用测强曲线。环境温度通过影响混凝土孔隙水饱和度及声波传播速度产生作用,昼夜温差或季节变化可能使声速波动 $0.5\%-1\%$,检测时需优先选择恒温时段,或通过温度补偿算法实时修正数据。操作过程中,测点需采用网格法均匀布置,避开钢筋密集区、施工缝及已有裂缝,确保声波路径均匀;换能器间距误差需严格控制在 2% 以内,避免波速计算偏差;耦合剂需根据混凝土表面粗糙度选择适配类型,如凝胶型耦合剂适用于光滑表面,膏状型适用于粗糙表面,防止气泡残留导致信号衰减。设备性能方面,超声波仪器需定期校准频率稳定性,信号处理算法需具备抗干扰能力,换能器需每3个月验证性能,避免设备老化引入系统性误差^[3]。通过材料特性分析、环境参数控制、操作规范执行及设备性能维护的综合管理,可显著提升检测结果的可信度与重复性,为桥梁结构健康评估提供科学依据。

3.2 检测方法优化措施

桥梁结构混凝土强度无损检测方法的优化需聚焦技术融合、操作规范与数据处理三大维度,以提升检测精度与效率。(1)多技术协同增强检测可靠性:将超声回弹综合法与雷达法结合,利用超声波速反映内部密实度,雷达波分析表面与近表面缺陷,两者数据互补可更全面评估强度分布;例如超声法探测深层结构,雷达法捕捉表层裂缝,综合结果能更精准定位强度薄弱区域。(2)标准化操作流程减少人为误差:需制定详细的检测规范,如表面清洁度要求、探头施压角度控制、数据采集点间距等;操作时需使用校准过的仪器,确保每次检测条件一致;对特殊部位如拐角、边缘需调整检测策

略,避免信号失真。(3)智能算法优化数据处理效率:引入机器学习模型对检测数据进行自动分析,通过训练模型识别异常信号,快速筛选有效数据并修正环境干扰因素;例如利用深度学习算法建立本地化测强曲线,结合实时温湿度数据动态调整强度推算值,使结果更贴合实际状态。通过上述优化措施,可显著提升无损检测的准确性、可靠性与适用性,为桥梁结构安全评估提供更科学的技术支撑,实现从“经验判断”到“数据驱动”的检测模式升级。

3.3 检测精度验证方式

无损检测精度验证需构建多层次校准体系以确保结果可靠,基准验证采用钻芯法,在结构典型区域钻取芯样进行抗压强度测试,通过线性回归分析无损检测结果与芯样强度的相关性,要求二者趋势一致且偏差在允许范围内,以此确认无损方法的基准可靠性。重复性测试通过同一测点多次测量声速、波幅等参数,分析参数波动范围,若连续测量结果稳定且差异微小,则判定方法具有良好重复性。方法对比验证可联合超声法与回弹法、电磁感应法等不同原理的技术,通过多维度数据交叉印证,排除单一方法可能存在的系统误差,提升综合评估准确性。设备性能校准需定期使用标准试块对超声波仪进行声速测量偏差校验,同时检查换能器频率响应特性及信号采集稳定性,确保仪器处于最佳工作状态。环境因素修正需建立温度、湿度等参数对声速影响的补偿模型,通过现场实测环境参数调整检测结果,提升复杂环境下的适用性。通过基准校准、重复性验证、方法对比、设备维护及环境修正的综合应用,可系统提升无损检测精度,为桥梁结构强度评估提供科学、可靠的依据,确保检测结果在工程实践中的有效应用与长期可信度。

3.4 无损检测技术发展趋势

无损检测技术正朝着多技术融合、智能化与便携化方向演进。技术融合方面,超声法与电磁感应法、红外热成像的联合应用逐渐普及,通过多物理场数据交叉

分析,可更全面评估混凝土内部缺陷分布与强度特征,提升检测结果的立体性与可靠性。智能化发展聚焦数据驱动的智能分析,结合机器学习算法对声波信号、波形特征进行自动识别与分类,实现缺陷类型、尺寸及强度的快速判定,减少人工解读误差。便携化设备研发注重现场操作便捷性,手持式超声波仪、无线数据采集模块的推广,使检测不再受场地限制,适用于高空、狭窄空间等复杂环境,提升作业效率。数据管理平台的建设成为趋势,通过云端存储与实时数据共享,实现检测数据的长期追踪与动态分析,为结构健康状态演化提供连续监测依据。此外,标准体系的完善与检测规范的动态更新,推动技术应用的统一性与可比性,确保不同检测方法、设备间的结果互认^[4]。未来,随着传感器精度提升、算法优化及新材料应用,无损检测将更精准、高效,为桥梁结构安全评估与维护决策提供更科学的支撑,推动行业向智能化、精细化方向发展。

结束语:未来,检测方法将依托多技术融合与智能化升级实现更精准高效。技术融合如超声法与电磁感应法联合应用,提升检测立体性;智能化通过机器学习自动识别缺陷,减少人工误差。便携化设备拓展复杂环境适用性,数据管理平台实现长期动态追踪。标准完善推动结果互认,最终为桥梁健康监测与维护决策提供科学支撑,助力基础设施安全水平持续提升。

参考文献

- [1]穆江飞,严超群,吴彩星.现役高铁桥梁结构混凝土内部缺陷无损检测方法研究[J].科技与创新,2025(16):20-23.
- [2]谢书建,蒋纤纤.无损检测技术在桥梁道路工程中的应用[J].建材发展导向,2025,23(6):31-33.
- [3]郑晓旭.桥梁高性能混凝土早期力学性能及无损检测分析[J].交通世界,2023(7):127-129.
- [4]朱振江,黄礼和.超声回弹综合法在混凝土桥梁结构检测中的应用[J].交通世界,2023(23):174-176.