

水利工程混凝土结构碳化深度检测方法优化实践

徐海亮 李阳

江苏禹衡工程质量检测有限公司

DOI:10.32629/btr.v8i6.4785

[摘要] 混凝土结构碳化是水利工程耐久性的关键影响因素,深度检测结果关联结构服役性能评价与养护策略制定,现有检测方法在操作适应性、结果稳定性及现场环境适配方面存在局限,碳化程度判断与实际状况存在误差,结合水利工程运行环境特点,对比分析常用碳化深度检测方法,针对精度影响关键环节优化工艺与参数。经现场试验与结果校核,明确优化方案可行性与适用范围,分析检测效率、稳定性及数据一致性的改善效果,结果显示优化后的检测方法可真实呈现结构碳化发展状态,提升耐久性评估准确度,对水利工程安全运维与寿命预测具备实际应用价值,为后续检测体系完善与监测标准改进奠定技术基础。

[关键词] 水利工程; 混凝土结构; 碳化深度; 检测方法; 耐久性评估

中图分类号: TV331 **文献标识码:** A

Optimization Practice of Carbonation Depth Detection Methods for Concrete Structures in Hydraulic Engineering

Hailiang Xu Yang Li

Jiangsu Yuheng Engineering Quality Testing Co., Ltd.

[Abstract] Carbonation of concrete structures is a key factor affecting the durability of hydraulic engineering. The results of depth detection are directly related to the assessment of structural service performance and the formulation of maintenance strategies. Existing detection methods have limitations in terms of operational adaptability, result stability, and adaptation to on-site environments, leading to discrepancies between the determined carbonation degree and the actual condition. Considering the operational environmental characteristics of hydraulic engineering, this study compares and analyzes common carbonation depth detection methods, optimizing the process and parameters for key precision-influencing steps. Through on-site experiments and result verification, the feasibility and scope of application of the optimized scheme are clarified, and the improvements in detection efficiency, stability, and data consistency are analyzed. The results indicate that the optimized detection method can accurately reflect the development state of structural carbonation, enhancing the accuracy of durability assessments. This approach has practical application value for the safe operation, maintenance, and lifespan prediction of hydraulic engineering, laying a technical foundation for subsequent improvements in detection systems and monitoring standards.

[Key words] Hydraulic Engineering; Concrete Structures; Carbonation Depth; Detection Methods; Durability Assessment

引言

混凝土碳化是水利工程劣化机理之一,长期服役环境中会造成钢筋保护性能下降、结构耐久性减弱,水利工程服役条件复杂,碳化发展规律具环境敏感性,准确掌握结构碳化深度是安全评估与状态监测的重要组成部分,现有碳化深度检测方法应用广泛,实际工程中受材料差异、湿度变化与表层处理因素干扰,检测结果代表性与稳定性无法适配高精度评估需求。本研究结

合水利工程现场特点,优化探索碳化深度检测方法,提升数据可靠性与工程适用性,支撑耐久性评价体系完善。

1 水利工程混凝土碳化研究的基础认知框架

水利工程混凝土结构长期服役性能与抗碳化能力关联紧密,碳化是二氧化碳在特定湿度下渗入混凝土孔隙,与氢氧化钙等碱性产物反应,降低孔隙溶液碱度,碱度无法维持钢筋表面钝化膜时,腐蚀介质更易侵袭钢筋,造成承载性能下降。水利工程服

役具潮湿循环频繁、水介质浸泡时间长、环境温度变化幅度大等特点,碳化发展规律与普通建筑结构差异显著,表现为湿度依赖性强、碳化前锋推进不均、表层性能波动明显,认识碳化机理需结合水利工程特定环境条件,搭建契合水工结构特性的研究框架。

混凝土材料属性是碳化行为的重要基础,水胶比、孔隙率、矿物掺合料类型与掺量、碱度水平及致密度,改变二氧化碳扩散路径与反应速率,高性能水工混凝土常掺入粉煤灰、矿渣粉或硅灰等掺合料,提升抗渗与抗水化热能力的同时,可能因氢氧化钙含量降低影响抗碳化性能,材料组成与碳化行为的平衡关系是水利工程耐久性设计的重要考量,表层处理方式、浇筑工艺、施工季节及后期养护效果,改变混凝土表层致密度,造成碳化深度分布离散性明显^[1]。水利工程环境作用,是该类结构碳化研究的关键环节,长期接触水体让混凝土处于潮湿与干燥交替循环状态,水分迁移规律呈周期性变化直接影响二氧化碳扩散速度,部分结构常年浸没,碳化作用受限,波浪冲刷区与周期性干湿交替区碳化速率更为明显,溢洪道、输水隧洞及闸门埋件周边区域,存在局部气流扰动、负压吸附等微环境特性,碳化前锋推进不再呈典型一维扩散模式,理论框架中正确描述水利工程独特水-气介质耦合作用,是碳化行为研究的重要基础。

研究方法上水利工程碳化分析依赖实验室加速试验,结合现场实测数据验证,结构体积大、服役时间长、材料批次复杂,碳化发展具明显时空差异性,建立多尺度分析框架十分必要,宏观层面关注结构整体服役环境与运行工况,中观层面分析材料孔隙结构与水分迁移规律,微观层面探讨碱性物质消耗与碳酸盐生成机制。多维度认知体系为后续检测方法优化与耐久性评价标准完善提供理论基础,该认识框架下水利工程混凝土碳化研究核心是将机理认知、材料特性、环境作用与结构表现系统化整合,形成适用于该工程领域的理论体系,为后续检测、评估与优化方法研究提供统一学术基础。

2 碳化深度检测实践中暴露出的关键矛盾

水利工程混凝土碳化深度检测中,显现规范要求与工程客观条件的矛盾,标准方法编制于理想条件,对试件尺寸、龄期、养护制度及环境参数明确要求,水工结构大体积、构件形态复杂、施工年代跨度大,难以完全满足标准前提,检测人员多在局部区域取点测量,以点代面、局部替代整体,数据代表性不足。同一坝段或闸室,结构表层致密度、表面缺陷、渗漏状况差异明显,碳化深度空间变异性较大,有限测点难以真实反映整体耐久状态,“局部精细与整体模糊并存”成为检测实践的突出矛盾。

现场常用酚酞指示法操作简便、成本较低,在水利工程特定环境下存在适用性问题,部分构件长期处于潮湿或间歇性浸泡状态,孔隙溶液中氢氧化物稀释或迁移,尚未形成明显碳化带时,指示剂变色边界可能偏移,引发“假碳化”或“假未碳化”判断误差,含矿物掺合料较多的水工混凝土,碱度分布与普通配合比不同,界限pH值变化,传统判定方式依据统一临界值,难以区分碱度衰减与真实碳化前沿位置。检测结果数值看似精确,实质上

存在机理层面偏差,形成“数据准确与物理意义不完全一致”的矛盾,检测手段的破损性与结构安全、业主诉求形成一定冲突,获取碳化深度信息需在结构表面钻孔、剔凿,局部破坏防护层或装饰层,已运行多年的水工建筑物,此类操作易引发渗漏隐患或美观损伤,管理单位严格限制开凿数量与位置,检测工作需在有限孔洞内完成统计分析,导致样本数量不足、空间分布不均,非破损检测技术尚处推广验证阶段,回弹、电化学、表面波等方法与碳化程度的相关性未形成统一评价体系,工程实践中说服力不足,“检测需求增加与手段选择受限”的矛盾日益突出^[2]。

3 提升检测可靠性的技术路径探索

提升水利工程混凝土碳化深度检测可靠性,需从检测体系、技术手段与数据处理多层面协同优化,针对现场条件复杂、测点代表性不足,采用分区分层抽样策略,按受水位变动、日照条件、风向通风环境特征划分结构检测单元,每个单元内按统计原则布设测点,结合构件受力特点和渗流通道分布调整权重,检测结果既具空间覆盖性,又能突出关键部位。运行年限较长的水工建筑物,可引入历史维修记录与渗漏分布信息,作为现场布点指导依据,从源头减小“以点代面”引发的系统误差。

检测方法层面,改进传统酚酞指示法应用条件是提升检测可靠性的关键环节,高矿物掺合料混凝土和长期潮湿环境构件,以预处理干燥制度控制孔隙含水率,让指示剂反应界面清晰,结合碱度实测结果分级设定临界pH,构建契合材料配合比的颜色判读标准^[3]。碳化带边界模糊的测孔,采用多点重复喷洒与剖面拍照记录相结合的方式,借助图像后处理技术提取变色界面位置,降低人为读数误差,条件允许的工程中,搭配钻孔碳化检测与粉末pH滴定、热重分析等微观测试,交叉验证确认碳化前锋位置,提升单次检测结果可信度。

非破损或微破损检测技术综合运用,是拓展碳化深度评价维度的关键路径,回弹值、超声波传播时间、表面电位、混凝土电阻率等参数,可建立与碳化发展程度相关的经验关系或机器学习预测模型,少量标定孔洞的实测碳化深度校正模型,达成“少钻孔、多信息”检测模式,数据处理中采用概率统计与不确定性分析方法,给出单测点结果的置信区间和空间插值范围,不将单一测值简单等同于真实前锋位置。秉持长期监测理念典型构件布置固定测点,定期重复检测形成时间序列数据,支撑碳化发展速率反演与耐久寿命预测,现场工艺优化、方法组合应用与数据智能分析有机衔接,碳化深度检测的稳定性与解释力实现实质性提升,为水利工程结构耐久性评估提供更可靠技术支撑。

4 优化方法在工程情境中的应用表现

具体水利工程实际应用优化后的碳化深度检测方法时,分区分层布点策略切实提升结果的工程代表性,典型枢纽工程中,重力坝、溢流坝段、闸墩、消力池及引水建筑物按水位变动带、飞溅带、常年干燥带等环境区划分检测单元,各单元内结合构件受力状态及渗流通道合理布置测点,使碳化数据与环境作用分布相对应。对比传统零散取点方式,同一结构在不同高程和朝向上的碳化梯度更清晰,为后续划分耐久性等级和确定重点维护

区域提供可靠技术依据,避免样本布设不合理所导致的误判和漏判。

检测工艺层面引入干燥预处理、差异化pH判读标准及图像辅助识别等措施,酚酞法所得碳化前锋界面更稳定,现场应用时对不同配合比和龄期的混凝土分组标定,形成针对性颜色判读曲线,破解高掺量矿物掺合料混凝土中“颜色边界不清”和“碱度衰减与碳化难以区分”的难题^[4]。对比同一断面重复测量结果,变异系数显著减小,孔间差异更贴合材料与环境实际情况,部分潮湿环境构件中合理控制孔隙含水率后,假碳化现象显著减少,碳化深度与钢筋锈蚀状况的对应关系更清晰。

非破损与微破损检测联合应用,工程层面信息获取能力明显提升,大型闸室和厂房结构中,少量钻孔获取基准碳化深度,同步测试回弹值、超声波传播时间、表面电位与电阻率等参数,拟合模型推断未开孔区域,形成近似连续的碳化分布图。管理单位直观判断碳化发展较快的构件和区段,结合渗漏监测、裂缝观测等资料,统筹安排修补、涂层加固或表层疏水处理措施,部分长期跟踪工程定期重复检测,对比不同时段碳化等效深度和发展速率,修正原有耐久性设计假定,为运行期延寿决策提供量化参考,优化后的检测技术体系在工程情境中应用,提高数据可靠性和可解释性,增强检测成果向运维管理、结构评估和加固设计转化的有效性。

5 检测体系完善方向的未来思考

水利工程混凝土碳化深度检测体系的完善,需相关理论发展、技术创新与管理模式的持续融合与深化,工程体量增大、服役期延长、运维精细化需求提升,传统以单次厚度测量为核心的常规检测模式无法满足长期安全管理的实际要求。未来体系构建侧重多源信息融合与全过程监测核心理念,将碳化作为材料劣化机制之一纳入耐久性评价综合框架,检测不再孤立存在,成为结构健康监测链条的关键环节。

技术发展方向上碳化检测亟需建立跨尺度、可量化的参数体系,打通微观结构演化与宏观性能变化的有效关联,依托碳化产物分布、孔隙结构演变、pH时空变化规律等指标,构建更贴合实际的碳化动力学模型,检测结果既给出深度数值,也能反映材料未来阶段的劣化趋势,微破损与非破损技术的耦合应用仍有拓展空间,提升敏感度、噪声抑制能力及现场环境适配性,使其可在大型水工建筑物中承担更多基础检测任务^[5]。图像识别、机器学习及信号分析技术的引入,为提升判读精度、自动化水平与数据一致性提供新的可能,数据处理与评价体系方面,建立标准

碳化信息数据库将成趋势,整合不同地区、不同结构类型、不同材料配合比的检测成果,统一格式规范,形成具统计学意义的行业基准,为识别碳化敏感构件、推断碳化发展速率、制定合理维护周期提供数据支撑,依托数据库发展,可逐步构建概率化耐久性评价模型,以置信区间表达检测结果的不确定性,结合环境作用模型与材料衰减曲线开展寿命反演,让碳化检测与工程决策建立可量化且可追溯的联系。

管理理念与制度创新层面,碳化检测需从“事件式检测”向“规划化、周期化监测”转变,制定适用于不同水利工程类型和运行阶段的检测周期、布点原则与数据管理规范,让检测成果真正融入长期运维体系,碳化深度监测与渗漏监测、裂缝监测、钢筋锈蚀监测等多项指标联动分析,在结构健康评估平台实现数据共享与协同判断,形成具备预测能力和预警功能的耐久性监控系统。体系化构建路径下,水利工程混凝土碳化检测逐步从单项技术发展为综合性、动态化、智能化评价手段,为结构安全保障和寿命延长提供更坚实技术支撑。

6 结语

系统分析水利工程混凝土碳化行为、检测矛盾、技术优化路径及工程应用表现,碳化深度检测不再是单纯的材料测试问题,而是与结构安全、运维策略和耐久性管理紧密相关的综合性环节,检测方法持续完善,现场工艺、数据处理与技术组合的协同作用逐步凸显,碳化信息在工程决策中的价值愈发明确。构建多源数据支撑的检测体系、推动非破损技术进步、形成长期监测机制,是提升耐久性评估能力的关键方向,持续优化检测手段与评价体系,水工结构的安全保障水平进一步强化,耐久服役能力更趋可控与可预测。

[参考文献]

- [1]朱国伟,张洁.水利工程混凝土结构裂缝修复技术研究及应用[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(27):192-194.
- [2]何彭.水利工程混凝土结构防裂缝施工技术的应用研究[J].治淮,2025,(09):73-74.
- [3]姚菊香.基于无损检测技术的水利工程混凝土结构质量评估方法[J].中国品牌与防伪,2025,(08):197-199.
- [4]孔莉.水利工程混凝土结构施工技术探究[J].科技资讯,2025,23(14):127-129.
- [5]徐建,杨莉,孙国焯.水利工程混凝土施工质量控制技术研究[J].现代工程科技,2025,4(09):181-184.