

水利工程混凝土质量检测技术改进与实践

石玉珠

河南百川工程质量检验有限公司 河南新乡 453000

DOI: 10.32629/ems.v8i2.18448

[摘要] 混凝土是水利工程的主要筑坝材料,混凝土质量的好坏直接影响工程结构的安全性、稳定性和耐久性。本文以水利工程混凝土质量检测为研究对象,定义检测的基本概念和核心价值,整理出现有的检测方法种类及应用情况,分析传统检测技术存在的问题及改进的关键领域,重点阐述非破坏性检测技术升级、先进传感器的应用、数据分析技术优化等改进途径,用具体工程案例检验改进技术的应用效果,最后总结研究结论并预测未来的发展方向。研究成果给水利工程混凝土质量检测精准度的提高、检测技术智能化的发展提供理论和实践上的支持。

[关键词] 水利工程; 混凝土质量; 检测技术; 非破坏性检测

1 引言

近些年来,白鹤滩、乌东德等超级水电站的兴建,我国水利工程朝着大型化、复杂化、高海拔化方向发展,对混凝土质量的要求越来越高,但是传统的混凝土质量检测技术存在着精度不够、破坏性大、实时性差等缺陷,不能满足全流程精细化管控的需求,部分工程由于检测疏忽出现裂缝、渗漏等病害,造成重大经济损失。在此背景下,推动混凝土质量检测技术改进创新、提高检测的精确性和智能化程度成为研究的热点,本文根据现有的技术应用情况,分析它的局限性,探索改进的方法,结合工程案例来验证效果,从而为水利工程混凝土质量控制提供可靠的技术支持,保证水利工程长期安全稳定的运行。

2 水利工程混凝土质量检测概述

2.1 混凝土质量检测的基本概念

水利工程混凝土质量检测就是利用专业技术手段和设备,对混凝土原材料、配合比、浇筑过程、硬化后性能、长期运行状态等关键环节进行指标检测和性能评价的全过程技术活动,其主要目的就是通过准确获取混凝土的相关质量参数,判断混凝土的性能是否符合设计标准和规范要求,及时发现混凝土内部缺陷和质量隐患,为工程施工质量控制、运维决策制定提供科学依据;从检测阶段划分,可分为施工前检测、施工过程检测和运行期检测,其中施工前检测主要对原材料质量进行控制,对混凝土配合比设计及试配试验进行检测,施工过程检测主要对混凝土搅拌均匀性、坍落度、浇筑温度、振捣密实度等进行检测,防止出现离析、蜂窝等质量问题,运行期检测主要对已建成结构进行强度衰减、裂缝发展等指标检测,评估耐久性及其安全性,从检测原理划分,可分为破坏性检测和非破坏性检测,两类技术各有优劣,在

实际工程中常常联合使用^[1]。

2.2 混凝土质量检测的重要性

水利工程混凝土结构长期处在水下、干湿交替等复杂恶劣的环境中,其质量直接影响工程的承载能力、耐久性以及抗灾能力,混凝土质量检测的重要性主要体现在四个方面,施工质量控制上贯穿全流程,通过检测原材料、配合比、浇筑过程等参数及时纠正问题,检测坍落度调整水胶比、检测强度验证配合比,保证浇筑质量符合要求,工程安全保障上作为识别隐患、防范事故的关键手段,可以提前发现结构缺陷和性能衰减趋势并及时加固,某大型水电站定期检测避免坝体破坏,运维成本节约上精准检测实现病害早发现早处置,降低维修成本,数据优化工艺与运维策略,提升耐久性、延长使用寿命以降低全生命周期成本,行业标准完善上技术实践积累的数据可以为标准制定更新提供支撑,推动质量标准优化升级,提升行业整体管控水平^[2]。

2.3 现有混凝土质量检测方法概述

现有水利工程混凝土质量检测方法主要分为破坏性检测与非破坏性检测两大类,二者在检测精度、适用场景等方面存在差异,需按需选用;其中破坏性检测通过破坏结构获取试样并实验室试验评估质量,核心优势是精度高、结果可靠,是强度等关键指标检测的基准,常用立方体抗压强度(150mm标准试块养护28d测试)、轴心抗压强度、劈裂抗拉强度等方法,但存在损伤结构、难大面积检测、周期长、无法实时监测的局限性;非破坏性检测则在不破坏结构完整性前提下利用物理力学原理检测,具有速度快、范围广、可实时监测、无损伤等优势,适用于已建成结构大面积检测与长期监测,常用回弹法、超声回弹综合法、钻芯法、雷达法、红外热成像法等方法。

3 现有混凝土质量检测技术分析

3.1 现有检测方法的局限性

尽管现有的混凝土质量检测方法在水利工程中被广泛应用,但是由于技术原理、设备性能等因素的限制,仍然存在很多不足,不能满足全流程精细化智能化管控的要求,检测精度和可靠性不高,传统的非破坏性检测如回弹法、超声回弹综合法受表面状态等多因素影响误差大,破坏性检测虽然精度高,但是结果容易与实际性能存在偏差,且不能反映整体质量,破坏性检测的局限性明显,需要破坏结构获取试样,不能对已建成结构大面积检测,周期长,难以实现施工实时质量控制,实时监测与动态管控能力不足,现有的方法多为离线或阶段性检测,不能实时连续掌握浇筑、养护等关键阶段性能变化,容易漏判隐患,也不能动态跟踪运行期性能衰减趋势,数据处理与解读能力滞后,大量数据需要人工整理分析,效率低且容易出错,缺少有效数据融合模型,不同方法、阶段的数据难以整合分析,与工程全生命周期数据关联性不足,难实现数据驱动决策,复杂环境适应性差,水利工程多建于偏远山区、高海拔等复杂环境,现有设备易受低温、高海拔、潮湿等影响,导致检测精度下降或设备损坏如低温环境下回弹仪性能变化、高海拔地区超声波传播速度受影响等^[3]。

3.2 需要改进的领域

根据目前混凝土质量检测技术的不足和现代水利工程质量控制的要求,在五个主要方面进行改进突破,即提高非破坏性检测技术的精度和可靠性,优化检测原理,研发抗干扰高精度设备,结合多方法协同体系来减少误差;发展无损原位实时监测技术,依靠新型传感和物联网技术,实现浇筑振捣、养护温度等指标的全流程连续监测;推进检测数据智能化处理升级,引入大数据和人工智能技术,建立融合分析模型,实现数据自动解读和全生命周期数据关联,支撑数据驱动决策;增强复杂环境适应性,研发耐温抗潮抗干扰的便携式设备,提高复杂地形和恶劣环境下的检测稳定性;完善检测标准规范体系,根据新型技术制定检测方法、设备和数据评价标准,规范应用流程,提高结果权威性。

4 混凝土质量检测技术的改进

4.1 非破坏性检测技术的应用

非破坏性检测技术是混凝土质量检测技术改进的主要方向,通过技术优化创新可以明显提高检测精度、效率和适用范围,满足精细化管控的要求,近年来多种改进型技术应用效果较好,超声回弹综合法采用多因素修正模型和便携式一

体化设备,检测误差从 $\pm 15\%$ 降低到 $\pm 8\%$ 以内,提高了检测效率和大面积适用性,高频雷达检测技术采用超宽带脉冲技术提高分辨率,三维雷达成像可以准确识别5mm以上的内部缺陷并直观显示分布,某水库大坝加固工程中成功找到3处空洞,红外热成像技术通过主动加热和被动检测相结合克服环境限制,配合无人机完成高空高危部位快速检测,某山区渠道工程1天完成10km渗漏检测,效率提高5倍,声发射检测技术使用多通道传感器阵列和定位算法,可以实时跟踪裂缝的发展并准确找到位置,为大型水电站大坝运维及时预警,保证加固的时效性。

4.2 先进传感器技术的应用

先进传感器技术是实现混凝土质量实时精准监测的关键,可以冲破传统检测的束缚,达成指标连续监测和数据自动采集。近几年来,光纤传感、压电陶瓷传感、无线传感等技术已经被广泛使用。光纤传感技术由于具有高精度、抗干扰能力强等优点而被选为优选,其中光纤光栅传感器(应变精度 $1\mu\epsilon$ 、温度精度 $0^{[4]}$. 1°C)可以用来监测浇筑温度和运行时的应变;某大型水闸工程用它来优化养护控制温度裂缝;分布式光纤传感依靠光时域反射技术可以实现长距离连续监测;某水库大坝用它精准定位渗漏通道(监测距离10km、精度0.1mm);压电陶瓷传感响应快、灵敏度高、成本低;通过阵列布置可以主动探测内部缺陷、被动跟踪裂缝发展;某混凝土梁试验成功监测了裂缝从加载到破坏全过程的监测;无线传感网络由分布节点组成,不需要布线,适应复杂地形;改进后低功耗设计加上太阳能供电可以实现长期稳定运行;引入边缘计算可以提高数据处理效率。

4.3 数据分析与处理技术的改进

随着先进检测与传感器技术的应用,混凝土质量检测数据具有海量、多维、实时等特点,传统的处理方法已经不能满足要求,采用大数据、人工智能等技术改进分析处理方法可以实现数据深度挖掘和精准解读,提高管控智能化水平。大数据融合分析技术搭建起融合平台,对不同方法、阶段、指标的多源数据展开数据清洗、标准化等流程整合之后,可以全面、精准地评判质量,某科研团队创建的平台把多种检测数据融合起来,借助主成分分析创建评价模型,准确率大于92%;机器学习算法被广泛地应用到质量预测和缺陷识别当中,基于BP神经网络的强度预测模型可以及时预测强度的发展,误差控制在 $\pm 5\%$ 以内,从而避免了28天的等待时间,卷积神经网络(CNN)处理检测图像可以自动识别缺陷,准确率超过90%,某水利工程使用CNN完成缺陷识别只需30分钟,

效率比人工提高很多且精度提高 15%；数字孪生技术创建虚拟模型来映射实时数据，可以对运行状况实施可视化监测并加以仿真分析，能够模仿工况变化并预估隐患^[5]。大型水电站大坝工程中，创建大坝混凝土数字孪生模型，把光纤传感、雷达检测等实时监测数据融合起来，对大坝混凝土温度、应变、裂缝等指标实施可视化监测并展开动态仿真，给大坝运维赋予精确的决策支撑。

5 混凝土质量检测改进技术实践

5.1 案例概况

本文以某中型水利枢纽工程的大坝混凝土质量检测项目为实践案例，该水利枢纽工程主要功能为防洪、灌溉、供水，大坝为混凝土重力坝，最大坝高 68m，坝顶长度 280m，混凝土浇筑总量约 12 万 m³。工程所在地处于亚热带季风气候区，夏季高温多雨，冬季温和湿润，施工期为三年。传统混凝土质量检测方法在工程施工过程中存在检测精度

低、实时性差等问题，不能满足大坝混凝土质量精细化控制的要求。因此项目组采用了改进的混凝土质量检测技术，即超声回弹综合法、光纤传感实时监测技术、大数据融合分析平台等，实现了大坝混凝土质量的全过程、精细化控制。本案例检测范围包括大坝混凝土施工前原材料检测、施工过程浇筑质量检测、施工后强度及缺陷检测三个阶段，检测指标有混凝土原材料性能、配合比合理性、浇筑温度、振捣密实度、28d 抗压强度、内部缺陷（空洞、裂缝）等。采用改进技术来弥补传统检测方法在实时温度监测、强度精确检测、内部缺陷识别等各方面的不足，从而提高大坝混凝土质量控制水平。

5.2 技术改进后的成效评估

该水利枢纽工程大坝混凝土质量检测应用改进技术之后效果明显，四大维度核心指标的改进前后对比见下表，实践经验对同类工程具有推广价值。

表 1 水利枢纽工程大坝混凝土质量检测改进券后对比分析

成效维度	核心指标	改进后	传统情况
检测精度	超声回弹强度检测误差	±6%	±15%
检测精度	三维雷达缺陷识别准确率	>95% (发现 2 处遗漏空洞)	未发现遗漏空洞
检测精度	温/应变监测精度	0.1℃/1 μ ε	精度较低
检测效率	强度检测效率	15 天完成 1.2 万 m ² (提升 3 倍)	效率低下
检测效率	坝面检测效率	提升 6 倍 (覆盖高空区域)	难以覆盖高空
检测效率	数据处理效率	提升 10 倍以上 (无人工误差)	人工处理 (效率低、易出错)
管控及时性	养护时间	7~14d (精准适配)	固定 14d
管控及时性	管控模式	事前预防、事中控制	事后检测
工程质量保障	28d 抗压强度合格率	100%	95%
工程质量保障	表面裂缝发生率	降低 60% (无重大缺陷)	裂缝发生率较高

6 结语

混凝土质量检测是保证水利工程安全稳定运行的重要环节，随着工程建设规模的扩大和技术要求的提高，传统的检测技术已经不能满足精细化、智能化的管控需求；本文通过对现有技术局限性的分析，确定改进的重点领域，重点阐述非破坏性检测优化、先进传感器的应用、数据分析升级等途径，并用工程案例验证了改进技术的明显效果。经过实践证明，改进的技术可以大幅度提高检测精度、效率、实时性，实现对混凝土质量全流程控制，给工程质量保证提供可靠的支撑；未来要不断推进新型传感器和人工智能的研发，加强数字孪生等技术与检测技术的融合，构建全生命周期智能管控平台，完善新型技术标准规范体系，推动质量管控模式向

数据驱动型转变，为我国水利工程高质量发展提供更强保障。

[参考文献]

- [1] 魏冰. 水利工程混凝土常见损伤及质量检测方法研究[J]. 水上安全, 2025, (19): 124-126.
- [2] 王亚鑫. 水利工程混凝土浇筑质量无损检测与缺陷修复技术[J]. 产品可靠性报告, 2025, (09): 120-121.
- [3] 屈鑫平. 水利工程中混凝土检测试验及其质量标准化控制的措施[J]. 大众标准化, 2025, (14): 108-109+112.
- [4] 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.
- [5] 林洪凯. 水利工程混凝土质量检测中的多尺度分析方法[J]. 工程建设与设计, 2025, (10): 249-251.