

水利水电工程质量检测的方法分析

唐俏伶

河南省水利第二工程局集团有限公司 河南 郑州 450000

摘要: 水利水电工程是国家重要基础设施,其质量关乎工程安全、运行效率及人民生命财产安全。随着我国水利水电事业发展,工程规模扩大、结构复杂,对质量要求更高。质量检测是保障工程质量的关键,其方法科学性、先进性与适用性极为重要。本文梳理了水利水电工程质量检测的内涵与重要性,重点分析了主流检测方法,包括无损检测(超声波等)、有损检测(钻芯取样)、实验室检测以及基于现代信息技术的智能监测方法(BIM、物联网等)。同时,探讨了各类方法在实际应用中的优势、局限性与适用场景。最后,针对当前检测体系存在的问题,提出优化建议并展望未来发展趋势,为提升我国水利水电工程质量检测水平提供参考与指导。

关键词: 水利水电工程; 工程质量; 质量检测; 无损检测; 智能监测; 方法分析

引言

水利水电工程集防洪、灌溉、供水等多功能于一体,对保障国家水、能源和生态安全至关重要。近年来,随着“双碳”目标提出与国家水网建设加速,白鹤滩、乌东德等重大工程相继开工。这些工程投资大、技术复杂、服役周期长,质量事故后果严重。工程质量是生命线,质量检测则是贯穿工程全流程的核心控制手段,能及时发现隐患,为决策提供依据。建立科学高效精准的质量检测方法体系,对确保工程长期安全运行意义重大。但传统检测方法效率低、破坏性大、覆盖有限,难满足现代工程精细化管理需求。而新一代信息技术正变革工程建设领域,为质量检测创新升级带来机遇。因此,系统分析现有检测方法,探索智能化检测路径,成为亟待解决的重要课题。

1 水利水电工程质量检测概述

1.1 质量检测的内涵与目标

水利水电工程质量检测是指依据国家法律法规、技术标准和合同约定,运用科学的检测技术和设备,对工程原材料、中间产品、构(配)件及工程实体的质量特性进行测定、检查、试验和验证的活动。其核心目标在于验证工程是否满足设计文件、施工规范及验收标准的要求,及时识别混凝土裂缝、内部空洞、钢筋锈蚀、基础渗漏等质量隐患,并对结构的强度、耐久性、稳定性等关键性能指标进行量化评价,最终为施工过程控制、竣工验收、安全鉴定及运行维护提供可靠的数据支撑^[1]。可以说,质量检测不仅是工程质量控制的“眼睛”,更是工程全生命周期安全管理的“神经中枢”。

1.2 质量检测的主要内容

根据工程生命周期的不同阶段,质量检测的内容各

有侧重。在施工前,主要针对水泥、骨料、钢筋、外加剂等原材料进行进场复检,确保其性能符合设计要求;在施工过程中,则需对混凝土拌合物的工作性、浇筑密实度、钢筋安装位置、灌浆饱满度以及土石方填筑的压实度等进行动态监控,实现过程质量的闭环管理;进入施工后或验收阶段,检测重点转向混凝土强度、结构几何尺寸、外观质量、金属结构焊缝完整性以及机电设备安装精度等,以形成完整的质量验收证据链;而在工程投入运行后,质量检测则演变为长期健康监测,通过持续观测大坝变形、渗流状态、应力应变响应及水工建筑物的老化病害,为工程安全运行和延寿决策提供依据。

2 主流水利水电工程质量检测方法分析

2.1 无损检测(NDT)技术

无损检测技术不破坏被测对象、可重复且适用广,是水利水电工程检测主流,能高效安全获取材料内部信息。

2.1.1 超声波检测法

超声波检测法利用高频声波在介质中传播时遇到界面或缺陷会产生反射、散射和衰减的物理特性,通过分析接收信号的时间、幅度和波形变化,推断结构内部是否存在空洞、蜂窝、离析或裂缝等缺陷。在水利水电工程中,该方法广泛应用于混凝土内部质量评估、表面裂缝深度测定以及隧洞衬砌灌浆密实度检验。例如,在高坝混凝土浇筑质量控制中,技术人员常沿网格布设测点,通过跨缝与非跨缝声速对比,有效判断裂缝的延伸深度^[2]。尽管超声波法具有穿透力强、对深层缺陷敏感的优势,但其检测结果易受混凝土骨料粒径、含水状态及操作人员经验的影响,且难以实现缺陷体积的精确量化,通常需与其他方法配合使用以提高判读准确性。

2.1.2 地质雷达(GPR)

地质雷达通过向结构内部发射高频电磁脉冲,并接收由介电常数差异界面反射回来的信号,从而实现对内部构造的非接触式探测。在水利水电工程中,地质雷达常用于检测混凝土中钢筋的分布间距与保护层厚度、堤坝内部是否存在脱空或动物洞穴,以及隧洞衬砌背后是否出现空腔等。其最大优势在于扫描速度快、分辨率高,且能生成直观的二维或三维剖面图像,便于工程人员快速识别异常区域。然而,地质雷达的探测深度受限于介质的电磁波衰减特性,在高含水率或高导电性材料(如饱和黏土)中信号衰减迅速,有效探测深度往往不足1米。此外,雷达图像的解释高度依赖专业软件和经验丰富的技术人员,误判风险不容忽视。

2.1.3 红外热成像技术

红外热成像技术基于物体表面温度场分布的差异来识别内部结构异常。当混凝土内部存在空洞、渗漏通道或分层时,其热传导性能会发生改变,进而在外部环境激励(如日照、降雨或人工加热)下形成可被红外相机捕捉的温度异常区。该技术在水利工程中主要用于大坝渗漏点的快速定位、混凝土模板脱空区域的筛查以及冬季施工保温效果的评估。其突出优点是非接触、大面积同步扫描、结果可视化程度高,特别适合于应急排查和大面积普查。但该方法对环境条件极为敏感,风速、日照角度、空气湿度等因素均会干扰表面温度场,导致假阳性或漏检;同时,其探测深度通常仅限于表层几厘米,难以反映深层结构状态,因此多作为辅助手段与其他检测方法联合使用。

2.2 实验室检测技术

2.2.1 混凝土试块强度测试

该方法通过在混凝土浇筑现场按规范要求制作标准尺寸(通常为150 mm×150 mm×150 mm)的立方体试块,并在标准养护条件(温度20±2℃、相对湿度≥95%)下养护至规定龄期(通常为7天、28天),随后送至实验室进行抗压强度试验。测试结果直接反映所用混凝土是否满足设计强度等级(如C25、C30等)的要求,是判断结构承载能力与耐久性的核心依据。在水利工程中,由于大体积混凝土温控防裂、抗渗抗冻等特殊性能要求,试块还常用于辅助评估配合比合理性及施工工艺稳定性。此外,《水工混凝土施工规范》(SL 677)明确要求对重要部位(如坝体、闸墩、廊道等)实行“同条件养护”试块制度,即试块与结构实体处于相同环境条件下养护,以更真实地模拟实际强度发展。尽管该方法属于破坏性试验,但因其操作标准化、结果可靠、成本可控,被广泛应用于全过程质量验收与责任追溯。

2.2.2 钢筋拉伸试验

钢筋拉伸试验是验证钢筋力学性能是否符合设计与规范要求的核心检测项目,广泛应用于水利水电工程的原材料进场检验环节。试验依据《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1)进行,将标准长度的钢筋试样安装于万能材料试验机中,以恒定速率施加轴向拉力直至断裂,同步记录荷载-位移曲线,并据此计算出屈服强度、抗拉强度、断后伸长率及强屈比等关键指标。这些参数直接关系到结构的承载能力、延性及抗震性能。例如,在高坝、泄洪洞或压力钢管等关键部位,若钢筋屈服强度不足,可能导致结构过早开裂;而伸长率偏低则会削弱构件的变形能力,增加脆性破坏风险。水利行业对钢筋质量控制尤为严格,通常要求每批次(同牌号、同炉号、同规格)钢筋均须抽样送检,并留存检测报告作为隐蔽工程验收的必要资料。

2.3 无损检测技术

2.3.1 钻芯取样法

钻芯取样法被视为评定混凝土强度的“金标准”。该方法通过在结构关键部位钻取圆柱形芯样,经端面平整处理后进行标准抗压试验,所得强度值最接近混凝土的真实力学性能。在水利水电工程中,钻芯法常用于对无损检测结果存疑区域的验证、重要承重构件(如泄洪闸墩、主厂房柱)的强度复核,以及老旧水工建筑物的安全性鉴定^[9]。除强度外,芯样还能直观反映混凝土的密实度、骨料级配、裂缝走向及施工冷缝等内部状况,为结构评估提供多维信息。然而,钻芯作业不仅成本高、周期长,还会在结构上留下永久性孔洞,可能影响局部受力性能,因此其取样位置、数量和时机需经严格论证,并在事后进行可靠封堵。

2.4 智能化与信息化检测方法

2.4.1 基于BIM(建筑信息模型)的质量管理

BIM技术通过构建工程全要素、全生命周期的三维数字化模型,将设计参数、施工进度、材料信息、检测数据等有机集成。在质量检测领域,BIM平台可实现检测计划的可视化模拟与优化,确保关键部位全覆盖;检测结果可自动关联至模型中的具体构件,形成“一物一档”的质量追溯档案;当发现质量问题时,系统可自动定位缺陷位置、推送整改任务并跟踪闭环,极大提升了质量管理的协同效率与透明度。更重要的是,BIM为多源检测数据的融合分析提供了统一的空间基准,为后续的结构性能评估与运维决策奠定了坚实基础。

2.4.2 物联网(IoT)与传感器网络

物联网技术通过在工程关键部位预埋或布设各类微

型传感器(如光纤光栅应变计、振弦式渗压计、GNSS位移站、温湿度探头等),构建覆盖全工程的感知网络。这些传感器通过无线通信模块将实时监测数据上传至云端平台,实现对大坝变形、渗流压力、结构应力、环境温度湿度等关键参数的连续、自动化采集。例如,在高土石坝施工中,智能碾压系统通过GPS定位与加速度传感,实时监控碾压遍数、行进速度与激振力,确保每层填筑均达到设计压实度;在运行期,大坝安全监测系统可基于阈值或趋势分析,提前预警潜在失稳风险^[4]。这种“感知—传输—分析—预警”的闭环机制,使质量与安全管理工作从被动响应转向主动预防。

2.4.3 大数据与人工智能(AI)分析

随着检测数据的海量积累,传统人工分析已难以应对复杂模式识别与趋势预测的需求。人工智能技术,特别是机器学习与深度学习算法,为此提供了强大工具。通过对历史检测图像、传感器时序数据、材料性能记录等进行训练,AI模型可自动识别混凝土裂缝的形态与宽度、分类灌浆缺陷类型、预测结构性能退化趋势,甚至优化未来检测点的布设方案。例如,基于卷积神经网络(CNN)的无人机巡检图像分析系统,可在数小时内完成对数百米长坝面的裂缝筛查,准确率远超人工目视。

3 当前检测体系存在的问题与优化建议

3.1 存在的主要问题

当前水利水电工程质量检测体系虽已取得长足进步,但仍面临若干挑战。首先,标准体系相对滞后,许多新兴技术如无人机巡检、AI图像识别、数字孪生仿真等尚缺乏统一的技术规程与验收标准,导致应用混乱、结果互认困难。其次,数据孤岛现象严重,勘察、设计、施工、监理、检测等各方使用的系统异构,数据格式不一,难以实现跨阶段、跨单位的高效共享与融合分析。再次,基层检测人员对新技术掌握不足,部分单位仍停留在“仪器操作员”层面,缺乏对数据背后物理机制的理解与综合判读能力。最后,存在“重硬轻软”倾向,过度关注检测设备的先进性,而忽视数据分析模型、知识库构建、智能算法开发等“软实力”的培育。

3.2 优化建议

为应对上述问题,建议从四个方面推进优化:一是加快新型检测技术的标准体系建设,由行业主管部门牵头组织编制针对智能检测、绿色检测等领域的技术指南与验收规范,填补制度空白;二是构建基于BIM/CIM的统一工程质量数据平台,打通“规、设、建、管、养”各环节数据链,实现检测数据的标准化采集、结构化存储与智能化应用;三是加强复合型人才培养,推动高校与职业院校开设“智能检测”交叉课程,同时开展面向一线技术人员的数字化技能轮训,提升整体队伍素质;四是推动“检测+”深度融合模式,将检测数据反哺至施工工艺优化、新材料研发、运维策略制定等环节,使质量检测从“末端把关”转变为“全过程赋能”的核心驱动力。

4 结语

水利水电工程质量检测工作系统性强、技术要求高。单一检测方法已无法满足现代工程需求,需走“多方法融合、全过程覆盖、智能化驱动”之路。无损检测高效便捷,是日常检测主体;有损检测与实验室检测在关键验证中不可或缺;智能检测以BIM等为代表,能实现从“被动响应”到“主动预防”的转变。展望未来,质量检测将向更高精度、更广覆盖、更强智能与更深融合发展。量子传感等前沿技术有望突破检测极限;无人机等将承担高危复杂环境检测任务;人工智能将参与检测方案生成优化;检测系统将多平台集成。唯有持续推动技术创新、完善标准、升级管理,才能筑牢水利水电工程质量基石,保障国家水安全与高质量发展。

参考文献

- [1]张颖.水利水电工程质量检测的方法分析[J].建材发展导向,2024,22(07):18-20.
- [2]江华雄.浅谈水利水电工程质量检测的方法[J].内蒙古水利,2022,(04):63-64.
- [3]马志飞.水利水电工程质量检测技术研究[J].水上安全,2025,(20):151-153.
- [4]王丽峰.水利水电工程质量常见试验检测方式探讨[J].山东水利,2025,(03):50-52.