

水利工程质量检测中的关键技术及应用

房明宇

山东黄淮质量检测有限公司 山东 菏泽 274000

摘要: 水利工程质量检测是保障工程安全稳定运行的核心环节,对把控施工质量、规避安全隐患至关重要。本文梳理水利工程质量检测的基础理论与体系,系统阐述无损检测、原材料岩土检测、结构专项检测及智能化检测等关键技术,结合各类工程应用实例,剖析当前技术应用存在的效率偏低、智能普及不足、管控体系不完善等问题,并提出优化对策,展望智能化、全生命周期的行业发展趋势,为水利质检工作提供技术参考。

关键词: 水利工程;质量检测;关键技术;应用

引言:水利工程是民生基建的核心组成,工程质量直接关乎防洪、供水、灌溉等功能发挥,影响区域安全与民生福祉。质量检测作为工程质管控的核心手段,贯穿施工与运维全过程。随着水利工程建设标准不断提升,传统检测技术弊端逐渐凸显,智能化检测技术逐步推广。基于此,本文系统研究水利工程质检关键技术,分析其应用现状与现存问题,探索优化路径,助力提升水利工程质量管控精细化、科学化水平。

1 水利工程质量检测基础理论与体系

1.1 水利工程质量检测核心内涵与检测对象

(1) 质量检测的定义、原则与行业规范标准。水利工程质量检测是采用专业方法对工程材料、产品或结构性能进行测定与评定的技术活动,其核心原则为公正、科学、规范。主要依据《水利工程质量检测管理规定》《水利水电工程施工质量检验与评定规程》及相应检测方法标准开展。(2) 原材料、中间产品、工程实体检测分类。原材料检测针对水泥、钢材、砂石骨料等进场物资;中间产品检测覆盖混凝土拌合物、钢筋接头、预制构件等工序产物;工程实体检测则对已成型结构进行强度、几何尺寸及外观质量综合评定。(3) 隐蔽工程、主体结构、附属设施检测重点。隐蔽工程强调地基承载力、灌浆密实度、锚固质量等不可见指标;主体结构聚焦混凝土强度、钢筋分布、防渗性能等核心安全参数;附属设施侧重金属结构防腐、机电设备安装精度及观测设施有效性。

1.2 水利工程质量检测基本准则与流程

(1) 检测公正性、准确性、时效性核心准则。公正性要求检测不受外界干扰,准确性强调数据误差在标准允许范围,时效性规定取样至出具报告必须在合理周期内完成,确保检测结果及时服务施工决策。(2) 现场取样、试验检测、数据核验、报告出具完整流程。现场

取样执行随机与见证制度;试验检测按标准步骤操作并记录;数据核验通过平行试验与比对确认;报告须经三级审核签章,明确结论并附原始记录。(3) 检测数据溯源与质量管控机制。建立样品编码、设备编号、操作人员、环境参数的全链条电子档案,采用留样复测与能力验证等质控手段,确保检测结果可追溯、可复现^[1]。

1.3 质量检测技术分类与适用场景

(1) 无损检测技术的分类及基础适用范围。无损检测包括声波(超声波测强、完整性)、电磁(钢筋定位、保护层厚度)、射线(焊缝探伤)及红外热成像(脱空检测)等,适用于不破坏结构前提下的内部质量评定。(2) 常规理化检测技术的应用场景。理化检测涵盖化学成分分析(水泥、钢筋)、物理力学性能试验(抗压、抗渗、土工击实)等,主要应用于进场材料验收、配合比验证及施工过程控制。(3) 智能化检测技术的发展应用基础。以物联网传感实时采集应变、渗流数据,机器视觉识别结构表观缺陷,无人机搭载检测设备实现高空巡检,当前已在智慧水利框架下逐步推广。

2 水利工程质量检测中的关键核心技术

2.1 无损检测关键技术

(1) 超声波检测技术:原理、参数指标与缺陷识别优势。超声波检测依据声波在介质中传播的波速、频率及衰减特性,通过换能器发射并接收透射或反射信号,反演结构内部质量状况。关键参数包括声速、波幅、主频及波形畸变程度,当混凝土存在蜂窝、空洞或裂隙时,声速明显降低、波幅急剧衰减。该技术优势在于穿透能力强、灵敏度高,可准确定位缺陷位置与范围,且对结构无任何损伤,适用于大体积混凝土、隧洞衬砌及灌浆密实度检测。(2) 回弹检测技术:混凝土强度检测原理与操作要点。回弹法利用弹簧驱动重锤撞击混凝土表面,通过测量回弹距离推算表面硬度,并依据经验

曲线换算抗压强度。操作要点包括：测区布置须均匀覆盖构件检测面，每区不少于16个测点；测点间距不小于20mm，避开蜂窝、麻面及钢筋密集区域；测试前须进行钢砧率定；结果须根据碳化深度进行修正，且仅适用于14d龄期以上、湿度适中的普通混凝土^[2]。（3）雷达探测技术：隐蔽工程内部缺陷检测技术特性。探地雷达通过发射高频电磁波（频率范围100~2000MHz），接收不同电性界面反射回波，生成连续剖面图像。技术特性表现为：对介电常数差异敏感，可有效识别钢筋分布、管线走向、空洞、不密实区及含水带；探测深度与分辨率呈负相关，高频天线分辨率高但深度浅；数据处理需结合滤波、增益及偏移校正，解释成果依赖专业经验，适用于衬砌脱空、路面厚度及坝体隐患探测。

2.2 原材料与岩土检测关键技术

（1）水泥、砂石、钢筋等主材理化性能检测技术。水泥检测涵盖细度（筛析法或勃氏透气法）、凝结时间（维卡仪）、安定性（雷氏夹法）及胶砂强度（ISO法）；砂石检测包括颗粒级配（筛分法）、含泥量、泥块含量及压碎指标；钢筋检测聚焦屈服强度、抗拉强度、伸长率及冷弯性能（万能试验机），同时控制重量偏差与表面质量。（2）土体压实度、渗透系数、承载力检测技术。压实度检测采用环刀法（细粒土）或灌砂法（粗粒土），依据最大干密度计算压实系数；渗透系数运用变水头或常水头渗透仪测定；承载力通过平板载荷试验或标准贯入试验获取地基容许承载力，结合静力触探进行综合判定。（3）水工混凝土抗渗、抗冻、抗压性能检测技术。抗渗等级采用逐级加压法（圆柱体试件）测定，评定其抵抗压力水渗透的能力；抗冻性能通过快冻法测定质量损失率与相对动弹性模量，判定抗冻等级；抗压强度采用标准立方体试件在压力试验机上测定，严格控制加载速率，取三个试件平均值为代表值^[3]。

2.3 工程结构专项检测技术

（1）大坝、水闸结构裂缝与变形检测技术。裂缝检测采用裂缝宽度观测仪（精度0.01mm）测量缝宽，超声波平测法测定缝深，绘制裂缝分布图。变形检测运用精密水准仪监测垂直位移、全站仪观测水平位移；大坝布设垂线坐标仪和引张线仪实现连续自动监测，施工期每日1次，运行期每周1次。（2）堤防、渠道填筑质量与防渗性能检测技术。填筑质量以环刀法或核子密度仪检测压实度，控制含水率在最优含水率 $\pm 3\%$ 范围内；防渗性能采用现场双环注水试验或钻孔取芯室内渗透试验测定渗透系数，渠道衬砌进行闭水试验（充水24h）检验整体防渗效果。（3）水工钢结构焊缝、锈蚀质量检测技术。焊

缝质量采用超声波探伤或磁粉探伤检测气孔、夹渣、未熔透及裂纹；锈蚀程度通过涂层测厚仪（磁性法，精度 $\pm 5\%$ ）测定防腐层厚度，结合自然电位法或现场割样称重法判定截面锈蚀损失率。

2.4 智能化新型检测技术

（1）无人机航拍巡检与可视化检测技术。无人机搭载高清相机、红外热成像及激光雷达，按预设航线（相对高度50~200m）对高坝、长堤防、渡槽等开展周期性巡检。实时回传影像后通过三维重建生成正射影像与三维实景模型，实现裂缝、渗水、滑坡等表观缺陷的快速筛查与历史对比分析。（2）物联网动态监测与实时数据传输检测技术。在关键部位布设振弦式应变计、差阻式渗压计、温度传感器等智能终端，通过LoRa、NB-IoT、4G/5G无线组网实时上传云平台。平台端支持多级阈值报警（超限即推送短信与APP通知），管理人员可远程查看实时曲线与历史趋势，实现全天候在线监控^[4]。（3）大数据分析 with AI缺陷智能识别检测技术。基于长期积累的检测数据构建标准化特征数据库，采用卷积神经网络（CNN）等深度学习算法对雷达图谱、超声波波形、裂缝图像进行自动特征提取与分类识别，实现缺陷类型智能判定、严重程度分级评估及质量趋势预测，辅助检测人员精准决策。

3 水利关键检测技术工程应用、问题与发展展望

3.1 关键检测技术典型工程应用实践

（1）大型水库主体结构质量检测应用案例。某百米级高混凝土重力坝建设中，综合运用超声波透射法对坝体内部全断面扫描，发现局部浇筑不密实区后以钻孔电视验证；采用回弹法批量抽检坝面强度，雷达法检测坝基固结灌浆效果，形成“面—线—点”立体检测方案。同时布设分布式光纤测温系统实时监测大体积混凝土温度梯度，有效预防温度裂缝，为大坝安全鉴定与蓄水验收提供可靠数据支撑。（2）河道堤防及输水工程质量检测应用实践。某大型输水渠道采用探地雷达（400MHz与900MHz组合天线）对衬砌板脱空进行全覆盖检测，准确圈定脱空范围与程度；堤防填筑阶段以核子密度湿度仪替代环刀法，压实度检测效率提高3倍以上；管道焊缝全面推行相控阵超声检测（PAUT），无辐射风险且检测速度显著优于传统射线拍片，保障了通水节点目标。（3）小型农田水利工程简易检测技术应用。针对灌排渠道、小型塘坝及泵站等，推广便携式回弹仪检测混凝土强度、轻型动力触探仪检测地基承载力、简易注水试验检测防渗性能等低成本技术。设备操作简便、携带方便，无需复杂电源条件，施工队可自行完成日常自检，有效

弥补了小型工程专业检测力量不足的短板。

3.2 当前质量检测技术应用存在的问题

(1) 传统检测技术效率低、误差可控性差。回弹法受碳化深度、表面湿度、龄期等因素影响显著,测强曲线地区适用性差,换算强度与芯样抗压结果相对偏差常达15%以上;环刀法检测压实度需烘烤8~12小时得出含水率,无法及时反馈施工调整;人工读数记录方式易引入主观误差,检测数据离散性大。(2) 智能化检测设备普及率低、操作规范性不足。探地雷达、相控阵超声等高端设备单价数十万至百万元,中小型检测机构无力购置;已配备智能设备的单位,操作人员在天线频率选择、参数设置、数据后处理等环节缺乏系统培训,随意性大,成果可靠性下降。(3) 检测标准落地不严、数据管理体系不完善。部分现场检测未严格按标准布置测区或加密测点,取样代表性不足;原始记录缺失、电子数据未长期保存,溯源困难;不同标段检测数据格式不统一,难以进行系统统计分析,制约检测数据向工程质量评价的有效转化。

3.3 水利工程质量检测技术优化策略

(1) 完善检测标准体系,规范现场检测作业流程。修订滞后于技术发展的老旧标准,补充新型检测方法的技术规程;制定统一现场检测作业指导书,明确设备校准、测区布设、数据采集、异常复测全流程要求;推行检测方案审批与过程旁站制度,确保标准执行不走样。(2) 推广智能化、一体化检测技术与设备应用。通过政府引导与设备租赁共享模式降低应用门槛;鼓励研发集数据采集、处理、判定于一体的手持式检测终端,实现"现场检测、即时判定";对地市级检测中心配置探地雷达、相控阵超声等设备,提升区域检测服务能力。(3) 强化检测人员专业能力与质量管控意识。建立分级培训与考核认证制度,将无损检测操作资格纳入执业管理;定期组织比对试验与技术比武;将检测质量与个人绩效挂钩,增强责任意识,杜绝数据造假与敷衍应付^[5]。

3.4 行业发展趋势与未来展望

(1) 检测技术智能化、数字化、精准化发展趋势。检测技术正向智能传感、自动采集、云端存储、AI判读方向演进,人为干预大幅减少,检测结果更加客观精准,技术迭代周期显著缩短。(2) 全过程动态检测与全生命周期质量管控发展方向。检测将从竣工验收的"终点检查"延伸至施工全过程动态监控及运行期健康监测,构建涵盖建设期质量检测、运行期安全监测、老化期评估检测的"全生命周期"质量管控体系。(3) 绿色、高效、集成化检测技术的研发与应用前景。未来聚焦无辐射、少取样的绿色检测技术,无人机集群自动巡检、爬壁机器人检测平台、多传感器集成检测车等装备将逐步成熟,实现检测作业高效化与集成化,大幅降低人力成本与环境影响。

结束语

综上,各类传统与智能化检测技术在水利工程质检中各司其职、互为补充,是保障工程质量的重要支撑。当前行业仍存在传统技术短板、智能设备普及不足、质控体系不健全等诸多问题。未来需持续完善检测标准、推广智能集成检测技术、强化人员专业能力,推动质检工作向数字化、精准化、高效化转型,构建全生命周期质量管控体系,助力水利工程行业高质量可持续发展。

参考文献

- [1]王强,张磊,赵敏.水利工程混凝土无损检测技术创新与应用[J].水利学报,2023,54(09):1121-1128.
- [2]董天奥.辽宁省水利工程质量检测控制关键技术探讨[J].水利技术监督,2023,13(05):67-82.
- [3]赵鹏飞.无损检测技术在水利工程质量检测中的应用研究[J].低碳世界,2022,12(12):76-78.
- [4]高振慧.激光扫描技术在水利工程混凝土表面裂缝检测中的应用[J].水泥,2025,26(07):109-112.
- [5]王林.无损检测技术在水利工程质量检测中的应用研究[J].现代工程科技,2025,4(03):153-156.