

水利工程施工质量影响因素及控制技术研究

孙宪亭

(山东浩海工程检测有限公司, 山东 济南 250031)

摘要 为破解水利工程质量管控难题, 适应新时代工程建设复杂需求, 本文基于“人、机、料、法、环”五维分析框架, 系统剖析施工质量核心影响因素, 构建“人员精准培养、材料设备智控、工序技术创新、环境动态适配、监管平台集成”的“五位一体”控制技术体系, 并结合工程案例验证成效。研究表明: 人员技能短板、材料设备管控缺位、施工工艺不合理及环境动态干扰是导致质量缺陷的主要诱因, 合计占比超 85%。该技术体系为水利工程高质量建设提供了科学可行的实践范式, 对保障工程安全稳定运行具有重要的现实意义。

关键词 水利工程施工; 质量管控; 动态适配; 智能检测; 安全运行

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.06.031

0 引言

水利工程作为国家基础设施核心, 肩负水资源调配、防洪减灾、灌溉发电等战略功能, 其质量安全直接关系到人民的生命财产安全、生态可持续发展及区域经济社会稳定。我国水利建设规模持续扩大, 截至 2024 年底, 全国已建成水库 9.5 万余座、堤防总长 31.8 万公里。大量水库已进入“老龄化”高风险阶段, 大部分土石坝存在渗漏、沉降等问题, 质量管控面临严峻挑战^[1]; 新建工程多位于复杂地质气候区, 高坝大库、长距离隧洞等复杂工程占比提升, 传统质控模式难以适应智能化施工、新材料应用等新场景, 隐患防控难度加大。

当前水利工程质量管控存在三大突出问题: 影响因素识别不全面、控制技术针对性不强、过程监管缺乏系统性。这些问题不仅导致返工率上升、建设成本增加, 更威胁工程长期运行安全。因此, 系统解析施工质量核心影响因素, 研发复杂场景精准控制技术, 构建科学管控体系, 已成为水利领域亟待解决的重要课题。

1 水利工程施工质量核心影响因素分析

1.1 人员因素: 质量管控的核心变量

施工人员的专业能力、质量意识及责任落实对工程质量影响重大, 贯穿施工全过程。调研显示, 我国水利工程超 60% 质量缺陷源于人员违规操作与技能不足, 技术和作业人员能力短板尤为突出^[2]。技术人员对关键参数把控不准: 防渗墙施工时, 泥浆比重偏差 $\pm 5\%$ 、成槽深度偏差 ± 10 cm, 会使墙体防渗性能降 40% 以上;

混凝土配合比设计未考虑骨料含水率、环境温度等动态因素, 导致强度离散性增 30%。作业人员操作不规范问题普遍: 混凝土振捣插入深度不够、时间不当, 蜂窝麻面等缺陷发生率升 50%; 土方填筑未按划定范围碾压, 局部压实度不达标, 给坝体留下沉降、渗漏隐患。

水利工程智能化水平提高后, 人员智能设备操作能力不足成新风险。在 30% 的中小型项目中, 因未掌握 RTK 测量仪、混凝土超声波检测仪等校准与操作规范, 检测数据失真率超 20%, 影响质量决策。例如: 某堤防工程将混凝土养护周期从 28 天缩至 14 天, 结构强度达标率仅 75%; 监理人员专业能力不足、监管缺位, 未通过水利工程质量监督专项培训的监理人员, 对隐蔽工程缺陷识别率比持证人员低 58%, 难以有效发挥监督作用。

1.2 材料与设备: 质量形成的物质基础

原材料质量是工程质量底线保障, 其性能参数稳定性决定工程结构安全与耐久性。水利工程常用水泥、砂石料、防水材料、钢筋等原材料, 质量缺陷影响致命。水泥强度等级每波动 1 个等级时所配制混凝土抗压强度会相应变化 15% 到 20%, 要是水泥安定性不合格在水化反应过程中会产生不均匀体积膨胀, 直接让混凝土结构产生贯穿性裂缝严重威胁坝堤防等关键部位运行安全, 砂石料的级配含泥量等关键指标深刻影响混凝土的和易性与强度性能, 连续级配缺失会使混凝土内部孔隙率大幅上升且密度降低 25% 以上, 含泥量超标则会削弱骨料与水泥浆体的粘结力导致混凝土强度下降 10% 到 15%。此外施工设备的性能稳定性精度达标率与场景适配性是保障施工工艺精准实施的核心前

作者简介: 孙宪亭 (1988-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程质量检测。

提,陈旧老化的设备会直接影响施工质量比如土方碾压设备激振力衰减10%对应的路基压实度达标率会同步下降15%,未按规范周期校准的测量仪器极易造成桩位放样偏差引发结构受力失衡问题。特殊作业场景中设备适配性不足,传统水下检测设备无法满足深水渗漏监测需求,人工驾船测量在复杂水域效率低、数据完整性差。

1.3 施工方法:质量控制的技术关键

工程技术的核心技术保障取决于施工工艺、技术方案和过程管控。施工工艺缺陷会引发质量隐患,如土方填筑碾压遍数减少、铺土厚度超标,大体积混凝土温控失效等,且修复成本高。技术方案缺乏针对性是质量事故主因,不同工程地质气候差异大,盲目套用标准方案易出问题,如碾压混凝土注浆、隧洞工程支护不当。传统质量管控滞后,事后检测发现混凝土内部缺陷比过程监测晚,工序衔接问题也影响质量。当前工程建设需要建立“工艺参数动态优化—方案靶向设计—全周期智能监测”的质量管控体系。引入地质雷达监测、混凝土温度场模拟等技术,可提升隐蔽缺陷发现时效;针对特殊地层开发专用工法,如砂卵石地层采用联合支护降低塌方风险;采用BIM技术进行工序模拟,提升施工间歇时间控制精度,保障结构整体性。

1.4 环境因素:质量控制的动态干扰源

自然环境与社会环境的动态变化是影响水利工程施工质量的重要外部因素,具有不可预见、强干扰、难控等特点^[3]。在自然环境中,气象和地质条件对施工质量影响显著。在气象方面,暴雨、高温、大风等极端天气会直接破坏施工质量:暴雨致基坑积水超50cm时,地基承载力降30%以上,不及时排水会使基础沉降超标;高温加速混凝土水分蒸发,使表面干缩裂缝发生率升40%,还影响水泥水化反应,降低后期强度。地质条件复杂、不确定是制约施工质量的关键。社会环境因素也不可忽视,偏远地区项目交通不便导致原材料供应延误,会中断施工工艺衔接。此外,周边居民干扰、政策调整等社会因素会影响施工进度和质量,导致施工工艺执行不到位。

2 施工质量精准控制技术体系构建

2.1 人员能力提升与管理机制优化

针对人员因素致质量风险,构建“分层培训+持证上岗+绩效挂钩+责任追溯”四维管理机制,提升人员专业能力与质量责任意识。在培训体系建设上,实行分层分类培训。在管理机制建设方面,完善质量

责任追溯与绩效激励机制。采用“一人一码”模式,绑定关键工序质量参数与人员身份码,实现“工序可追溯、责任可定位”。建立质量绩效与薪酬挂钩机制,提升质量指标在绩效考核中占比,对零缺陷班组和个人奖励,对问题责任主体处罚和调岗。

2.2 材料设备全生命周期管控技术

原材料精准检测与管控技术:构建“源头抽检+过程复检+终端核验”的三级原材料质量管控体系,确保关键指标合格率100%。过程管控实行“批次抽检+随机复检”制度,关键原材料复检频率不低于30%;通过含水率传感器监测混合料,优化外加剂掺量与水胶比,缩小混凝土强度波动范围。终端核验实行“验收合格后方可使用”制度,建立质量档案,实现全生命周期可追^[4]。

施工设备智能管控与优化配置技术:构建“智能选型+状态监测+定期校准+维护保养”的设备全生命周期管控体系,保障设备性能与精度。选型时,根据工程条件等因素分析适配性,优先选择智能化设备;复杂工程用仿真分析技术优化配置方案。运行管理建立智能监测系统,加装物联网传感器,参数偏离5%自动报警;精密设备每月校准1次。维护保养制定计划,结合状态监测与预防性维护,避免设备故障影响质量。

2.3 关键工序质量控制创新技术

地基与基础工程质量控制技术:针对质量风险点,研发“探测—处理—监测”一体化控制技术。软基处理采用“真空预压+监测反馈”技术,用监测设备每小时采集数据,大数据分析动态调整加载速率与预压时间,使沉降量控制在1cm以内;深厚软基采用CFG桩复合地基加固技术,静载试验确定参数,确保承载力提升50%以上。防渗墙施工用超声波成槽检测仪监测,控制墙体垂直度偏差在1/300以内;采用接缝高压喷射灌浆技术,使接缝渗透系数降至 1×10^{-7} cm/s以下,较传统工艺提升40%。

混凝土工程智能管控技术:构建“配合比优化+过程控制+养护保障”智能管控体系^[5]。配合比优化用响应面法,考虑多种因素影响建立模型,使混凝土综合性能提升20%以上;大体积混凝土掺合料降低水化热,用缓凝剂延长初凝时间。过程控制大体积混凝土用“预埋传感器+AI温控”系统,每5分钟采集温度数据,AI算法控制内外温差在25℃以内、裂缝发生率降低90%;浇筑用振捣机器人,自动补振确保密实度达98%以上。

土石方填筑质量控制技术:推行“分层碾压+实时检测+级配优化”质量控制模式。分层碾压用GPS

定位与激光平整度仪,控制铺土厚度偏差在 ± 3 cm以内,按原则确保碾压均匀。实时检测用核子密度仪与电磁感应仪组合,压实度合格后进行下一层,数据可追溯;高坝填筑用地质雷达无损检测。

2.4 环境适应性质量保障技术

针对环境因素引发的质量风险,构建“预警—适配—应急”的环境适应性质量保障技术体系。预警系统建设上,建立“气象—地质”双预警系统,整合多源监测数据,用大数据与AI算法建预警模型,提前72小时预判恶劣天气及地质灾害风险。在技术适配方面,针对不同环境优化施工技术方案,高寒地区冬季施工用综合保温技术,高温地区用降温保湿技术,岩溶地区用地质探测与动态支护技术。在应急处置方面,制定质量应急预案,明确应急组织、流程与措施,暴雨后排查积水与边坡问题并处理,混凝土浇筑遇极端天气停止浇筑并处理施工缝,地质突变引发隐患则启动抢险预案控制隐患。

2.5 智能化质量监管平台建设

构建“BIM+物联网+大数据+AI”一体化智能监管平台,实现施工全过程质量可视化、数字化、智能化管控。平台集成四大核心功能,打通数据壁垒。在数据采集层面,整合多源数据采集终端,实时采集各类质量管控数据,用BIM技术关联质量数据与模型构件,实现质量问题可视化定。在数据分析与预警层面,用大数据与AI算法建立质量风险识别与趋势分析模型,识别风险并预警,预测质量变化趋势。在闭环整改层面,建立质量问题台账管理系统,分类登记问题,明确整改责任、措施与时限,整改后验证,形成闭环管理流程。在档案管理层面,平台自动生成工程质量档案,双重备份确保完整性与可追溯性。

3 工程应用案例

某115 m高混凝土面板坝工程,总库容2.8亿 m^3 ,承担防洪、灌溉与发电功能。建设中面临坝体渗漏、混凝土温控难、深水检测难等质量挑战,运行初期坝体渗漏量达1.8 m^3/s ,远超规范限值,影响工程安全。为解决问题,该工程应用施工质量精准控制技术体系,成效显著。

在人员管理方面,采用分层培训模式,对作业人员开展实操培训,考核合格率达到100%;对技术人员强化相关技术应用培训,提升质量控制能力;建立质量责任追溯体系,“一人一码”绑定工序质量与人员责任。在材料设备管控方面,构建三级原材料检测体系;优化混凝土配合比,提升抗渗与温控效果;配置装备

解决深水渗漏检测与堵漏难题。在关键工序控制方面,大体积混凝土用“预埋传感器+AI温控”系统,降低裂缝发生率;坝体防渗用定向灌浆技术封堵渗漏通道;建立双预警系统规避恶劣天气影响。在智能监管方面,搭建BIM质量监管平台,实现施工全过程可视化管控,缩短质量隐患响应时间。

通过综合应用上述技术措施,工程在水深70 m、不放空水库条件下完成渗漏治理,坝体渗漏量降至0.02 m^3/s 以下,满足规范要求;控制混凝土强度波动范围,减少坝体沉降量。该工程验证了施工质量精准控制技术体系的可行性与经济性,为同类水利工程提供了实践经验。

4 结束语

水利工程施工质量是人员、材料、设备、工艺、环境等多要素耦合作用的结果,其中作业人员的专业技能不足、质量意识淡薄是诱发施工质量缺陷的核心成因。本文基于“人、机、料、法、环”框架,剖析各因素作用机制与危害程度,构建“五位一体”施工质量精准控制技术体系。该体系通过分层培训等手段,提前识别质量风险,解决传统质量控制问题。工程应用实践表明,该体系可提升管控水平,如缩小混凝土强度波动、减少坝体沉降、提升渗漏隐患检出率,为水利工程建设提供可行技术方案。未来,水利工程质量控制将朝智能化、精准化、系统化方向发展,后续研究聚焦三方面:深化AI诊断技术应用,构建专业智库,实现质量问题提前预警与智能决策;研发新型工程材料,提升工程耐久性与环保性;完善“一带一路”质量标准体系,推广“中国经验”,助力国际工程建设。通过技术创新与管理升级,优化技术体系,提升水利工程质量安全水平。

参考文献:

- [1] 李国英,国新办“十四五”时期水利高质量发展成就新闻发布会发言[EB/OL].北京:国务院新闻办公室,2025-09-29[2026-01-13].<http://www.scio.gov.cn/live/2025/37487/index.html>.
- [2] 李锋,唐龙,兰林.现代水利工程建设与管理[M].北京:现代出版社,2023.
- [3] 赵春燕,国润,赵银冬.水利工程施工建设与管理实践[M].北京:中国原子能出版社,2023.
- [4] 杨宇飞,郭宇,迟世春,等.堆石料颗粒延迟破裂及时间相关变形的研究[J].水利水运工程学报,2025(06):152-161.
- [5] 朱林松,孙学武,邓杰传,等.考虑渗流-流变耦合效应的混凝土防渗墙力学特性[J].水利水运工程学报,2025(06):162-174.