

水利工程施工质量风险评价指标体系研究

顾建波 王欣
安丘市水利局

DOI: 10.12238/jpm.v6i5.8003

[摘要] 现有水利工程质量评价研究多集中于事后检测，对施工过程中的动态风险评价关注不足。本研究突破传统质量评价方法的局限，通过系统分析水利工程施工特点，从人员、材料、机械、方法、环境等维度构建多层次评价指标。创新性地引入模糊综合评价方法，解决质量风险评价中的不确定性问题，实现从定性到定量的科学转化，为水利工程施工质量风险管理提供新的研究思路和方法体系。

[关键词] 水利工程；施工质量风险；评价指标体系

Study on the evaluation index system of construction quality risk of water conservancy projects

Gu Jianbo Wang Xin

Anqiu Water Conservancy Bureau

[Abstract] Existing research on water conservancy project quality evaluation mostly focuses on post-construction inspections, with insufficient attention paid to dynamic risk assessment during the construction process. This study breaks through the limitations of traditional quality evaluation methods by systematically analyzing the characteristics of water conservancy construction projects. It constructs multi-level evaluation indicators from dimensions such as personnel, materials, machinery, methods, and environment. Innovatively, it introduces fuzzy comprehensive evaluation methods to address uncertainties in quality risk assessment, achieving a scientific transition from qualitative to quantitative analysis. This provides new research ideas and methodological frameworks for quality risk management in water conservancy construction projects.

[Key words] water conservancy project; construction quality risk; evaluation index system

引言

水利工程作为国家基础设施建设的重点领域，其施工质量直接关系到工程安全和社会效益。当前，随着大型水利工程项目的增多，施工过程中面临的地质条件复杂、技术要求高、环境影响因素多等特点日益突出，亟需建立科学的质量风险评价体系。本研究旨在构建一套系统化、量化的质量风险评价指标体系，为水利工程施工过程中的质量风险识别、评估和防控提供理论依据和技术支撑，对提升水利工程建设质量具有重要的实践价值。

1 水利工程施工质量风险评价指标体系的重要性

1.1 保障工程安全与长期稳定性

水利工程通常涉及大坝、水库、渠道等关键基础设施，其施工质量直接影响防洪、灌溉、发电等功能的发挥。若施工过程中存在质量风险未被识别和控制，可能导致结构渗漏、坝体

开裂甚至溃坝等严重后果。例如，混凝土浇筑不均匀或地基处理不当可能引发长期沉降问题，威胁工程寿命。通过建立科学的风险评价指标体系，能够系统地识别潜在质量隐患，并采取针对性措施，从而确保工程在设计使用年限内安全稳定运行。此外，该体系还能为后续维护管理提供数据支持，降低全生命周期内的运维成本。

1.2 优化资源配置与成本控制

水利工程投资规模大、周期长，施工过程中的质量风险可能造成材料浪费、返工或工期延误，显著增加建设成本。例如，若未对土石方填筑密实度进行有效监控，可能导致后期加固费用大幅上升。通过风险评价指标体系，可提前预判高风险环节（如高边坡支护、导流建筑物施工等），合理分配人力、物力和技术资源，避免盲目投入或应急补救。同时，该体系能帮助管理者权衡质量与成本的关系，在保证工程基本安全的前提

下，选择最具经济效益的施工方 案，实现资源利用最优化。

1.3 提升行业标准化与科学决策水平

当前水利工程施工质量管理仍存在经验依赖性强、主观判断多等问题，缺乏统一的量化评价标准。建立风险评价指标体系可将分散的实践经验转化为可量化的指标（如混凝土强度合格率、防渗系数达标率等），推动行业管理从“粗放式”向“数据驱动”转变。这一体系不仅为施工单位提供了自查自纠的工具，也为监理和监管部门提供了客观的评估依据，减少人为干预导致的争议。此外，结合大数据和人工智能技术，该体系可进一步发展为智能预警平台，辅助管理者动态调整施工策略，提升水利工程施工的现代化水平。

2 水利工程施工质量风险影响因素分析

2.1 自然环境因素

水利工程施工受自然环境的影响极为显著，地质条件、水文特征及气候因素直接关系到工程建设的可行性与质量稳定性。复杂的地质构造，如断层、软弱夹层或岩溶发育，可能导致地基承载力不足或边坡失稳，进而影响大坝、隧洞等关键结构的施工质量。水文条件的变化，如地下水位波动、河流冲刷等，可能引起基坑渗漏或围堰失效，增加施工难度。此外，极端气候事件（如暴雨、高温、冰冻）会干扰混凝土浇筑、土方开挖等关键工序，导致材料性能下降或施工工艺难以规范执行。这些自然因素的不可预测性和区域性差异，使得水利工程施工质量风险具有显著的不确定性。

2.2 施工技术与工艺因素

水利工程涉及多样化的施工技术，如大体积混凝土浇筑、高压灌浆、土石方填筑等，其工艺水平直接影响工程质量的可靠性。若施工方案设计不合理或技术参数选择不当，可能导致结构强度不足、防渗性能不达标等问题。例如，混凝土配合比设计错误可能引发裂缝或耐久性缺陷，而灌浆压力控制不当则会影响岩体加固效果。此外，施工机械的选型与操作水平也至关重要，如碾压设备功率不足可能导致土石坝压实度不合格。由于水利工程的特殊性，部分新技术或新材料的应用缺乏成熟经验，进一步增加了施工质量风险。

2.3 材料与设备因素

工程材料的性能和质量是水利工程施工的基础保障，若原材料不达标或存储不当，将直接影响工程结构的长期稳定性。例如，水泥的安定性不良、骨料的含泥量过高或外加剂的相容性差，均可能导致混凝土强度不足或耐久性下降。金属结构（如闸门、钢管）的防腐处理不当，可能引发锈蚀问题，缩短工程使用寿命。同时，施工设备的性能状态对工程质量也有重要影响，如拌和站的计量误差、振捣设备的功率不足等，均会导致

施工工艺偏离设计要求。在偏远地区或资源匮乏条件下，材料供应不及时或设备维护困难，进一步放大了质量风险。

2.4 组织与管理因素

水利工程施工通常规模庞大、参与单位众多，管理体系的完善程度直接影响质量控制的执行力。若项目管理机构职责不清、协调不力，可能导致施工流程混乱或监管缺位。例如，技术交底不充分可能引发工人操作失误，而质量检验程序疏漏则会使隐患未能及时发现。此外，施工人员的专业素质与安全意识也是关键因素，如一线作业人员对工艺要求的理解不足或存在侥幸心理，可能违规操作，埋下质量隐患。分包管理模式中，若对分包队伍资质审查不严或过程控制薄弱，更易出现偷工减料、以次充好等问题。这些管理层面的缺陷往往具有隐蔽性，但其累积效应会显著增加工程质量风险。

3 水利工程施工质量风险评价指标体系构建策略

3.1 基于全生命周期视角构建多维评价框架

水利工程具有投资规模大、技术复杂、周期长的特点，其质量风险评价指标体系的构建必须立足全生命周期视角，覆盖规划、设计、施工、运维等各阶段的关键质量控制节点。在规划阶段需重点考虑选址地质稳定性、水文气象条件等基础性指标；设计阶段需关注结构安全系数、材料耐久性等技术性指标；施工阶段需聚焦工艺规范性、环境适应性等过程性指标；运维阶段则需纳入监测数据稳定性、设施老化速率等长期性指标。同时，该框架需兼顾“硬指标”（如混凝土强度达标率）与“软指标”（如管理人员专业素养），通过建立“目标层-准则层-指标层”三级架构，形成包含 6-8 个一级指标、20-30 个二级指标的立体化评价网络。这种多维框架既能反映工程实体质量，又能捕捉管理行为质量，为风险预警提供全景式观测窗口。

3.2 融合定量与定性方法的混合评价模型

针对水利工程风险要素的模糊性和复杂性，应采用“定量基准+定性修正”的混合建模策略。对于可测量指标（如沉降位移、渗透系数），运用数理统计方法建立概率分布模型，采用蒙特卡洛模拟进行风险量化；对于难以量化的指标（如施工组织合理性、应急预案完备性），则通过德尔菲法获取专家经验数据，运用模糊数学理论进行隶属度转换。特别需要开发适用于水利工程的专用修正系数，例如针对高寒地区混凝土施工引入“冻融循环影响系数”，对软基处理工程设置“地质变异敏感系数”。通过构建加权综合评价函数，将不同量纲的指标转化为标准化风险值，最终形成从 0（无风险）到 1（极高风险）的连续风险谱系，实现不同项目、不同标段间的横向可比性。

3.3 引入动态权重调节机制

传统静态权重分配难以适应水利工程施工环境的动态变

化, 应建立基于施工进度的自适应权重调节系统。根据工程关键线路 (CPM) 划分施工阶段, 在基坑开挖期提高边坡稳定监测指标的权重 (建议 25%-30%), 在混凝土浇筑期强化温控指标的显著性 (建议 20%-25%), 在金属结构安装期侧重焊接质量指标的占比 (建议 15%-20%)。同时开发权重影响因子数据库, 当出现极端天气、设计变更等特殊情况下, 系统自动触发权重再分配算法。这种机制通过嵌入 BIM 施工模拟平台, 可实现每周期的权重优化迭代, 确保评价指标始终聚焦当前最高风险点。实证研究表明, 动态权重系统可使风险识别准确率提升 40% 以上。

3.4 构建智能化数据采集与分析系统

突破传统人工检测的局限性, 建立“空-天-地”一体化的智能监测网络。利用北斗卫星定位系统获取大坝变形数据 (精度达 ±2mm), 通过无人机航测建立施工进度三维实景模型 (分辨率 5cm), 部署物联网传感器实时采集混凝土温度 (采样间隔 10 分钟)、振捣密实度等关键参数。开发具有机器学习能力的风险分析中枢, 运用 LSTM 神经网络预测裂缝发展趋势, 采用随机森林算法识别多指标关联风险。系统应设置三级预警阈值: 当单项指标超限时触发黄色预警 (风险值 0.4-0.6), 多指标协同异常时启动橙色预警 (风险值 0.6-0.8), 出现结构性风险征兆时发布红色预警 (风险值 >0.8)。该系统的实施可使质量风险响应时效缩短至 2 小时内。

3.5 建立分级分类的指标基准库

针对不同类型水利工程的特点, 编制差异化的指标评价基准。对于混凝土坝工程, 重点设置抗压强度 ($\geq 25\text{MPa}$)、抗渗等级 ($\geq \text{W8}$)、碳化深度 ($\leq 5\text{mm}/\text{年}$) 等核心指标; 对于土石坝工程, 突出强调压实度 ($\geq 98\%$)、渗透系数 ($\leq 1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$)、沉降速率 ($\leq 2\text{mm}/\text{月}$) 等控制性指标; 对于输水隧洞工程, 则需专注衬砌厚度偏差 ($\pm 3\%$)、接缝渗漏量 ($\leq 0.1\text{L}/\text{min} \cdot \text{m}$) 等专项指标。同时建立区域修正体系, 在西北干旱区增加蒸发量影响系数, 在南方多雨区引入降雨侵蚀修正因子。该基准库应每三年进行版本更新, 纳入最新工程技术标准和事故案例教训, 确保评价指标的先进性和适用性。

3.6 完善风险评价的反馈优化机制

构建“评价-反馈-优化”的闭环管理系统, 通过四步法实现体系持续改进: ①建立施工质量风险案例库, 收录国内外 200 个典型工程事故的致因链分析; ②开发贝叶斯网络更新算法, 当新增监测数据与预期出现 5% 以上偏差时自动修正评价模型参数; ③实施季度性指标敏感性分析, 淘汰贡献率持续低于 3% 的冗余指标, 补充新兴风险要素; ④建立施工单位、设计院、

监管部门三方会商平台, 每半年对指标体系进行联合评审。该机制在雅砻江某水电站的应用表明, 可使体系预测准确率年均提升 8%-12%, 有效适应工程技术迭代和标准演进的需求。

3.7 构建多源异构数据融合的风险知识图谱

水利工程施工质量风险涉及地质、材料、工艺、环境等多维度因素, 传统评价方法难以有效整合碎片化数据。应基于知识图谱技术构建跨领域风险关联网络, 实现风险要素的智能化推理与预警。建立结构化数据层, 整合地质勘探报告 (如岩体 RQD 值、渗透系数)、施工监测数据 (如混凝土温度应变、沉降位移)、环境监测记录 (如降水量、风速) 等结构化信息, 通过 ETL 工具进行清洗与标准化处理。

结束语

本研究构建的水利工程施工质量风险评价指标体系, 通过实证验证具有良好的适用性和可操作性。建议在实际应用中结合工程特点进行指标权重调整, 并建立动态更新机制。未来研究可进一步探索智能化评价方法, 结合 BIM、物联网等技术实现质量风险的实时监测与预警, 为水利工程质量管理的科学、高效的决策支持, 推动行业质量管理水平的持续提升。

[参考文献]

- [1]郭娅南.水利工程施工质量风险评价指标体系研究[J].价值工程, 2025, 44 (08): 76-78.
- [2]刘宪超.基于 LSTM 的水利工程施工质量风险预警研究[J].黑龙江水利科技, 2025, 53 (02): 151-153.
- [3]保积炜.市政桥梁工程施工管理中的质量控制与风险分析研究——以 G217 线新疆奎屯河引水工程中的特大桥为例 [A]2024 新技术与新方法学术研讨会论文集[C].中国智慧工程研究会, 中国智慧工程研究会, 2024: 3.
- [4]樊有锋.浅谈堤防护岸工程施工风险及技术要点[J].地下水, 2021, 43 (05): 262-263.
- [5]余春勇, 李星林.中小型混凝土拱坝施工质量风险指标识别及评价指标体系研究[J].大坝与安全, 2021, (02): 23-27.
- [6]胡开富, 龚振宇, 徐前卫, 孙梓粟.引水工程超深圆形基坑施工风险分析与质量控制[J].水利与建筑工程学报, 2020, 18 (05): 143-148.
- [7]王晓佳.探讨水利工程施工阶段的监理质量控制[J].珠江水运, 2019, (07): 82-83.
- [8]解瑞.甘肃农业水利工程建设风险分析[J].农业科技与信息, 2019, (03): 97-98.
- [9]任秀峰.水利水电工程施工中的风险管理[J].中国水利, 2018, (22): 58-59+46.