

水利工程施工安全风险识别与防控机制研究

李 明

山东齐鸿工程建设有限公司 山东 淄博 255000

摘 要：本文系统分析了水利工程施工中主要安全风险类型，包括坍塌与滑坡、高处坠落、淹溺、机械伤害、触电及物体打击等，并剖析了风险产生的深层次原因。在此基础上，构建了涵盖风险识别、评估、预警与响应全过程的防控机制框架。从风险识别方法（安全检查表法、作业条件危险性分析法、故障树分析法）的适用性比较出发，提出了基于LEC法改进的多维风险评估模型。进一步设计了包括组织责任体系、技术标准体系、培训教育体系、应急管理体系在内的四维防控机制，并探讨了物联网、BIM与智能监测技术在实时风险预警中的应用。研究认为，水利工程施工安全防控应从“事后处置”转向“事前预控”，构建动态循环的风险管理闭环系统。本文为水利工程施工安全管理提供了理论依据与方法参考。

关键词：水利工程；施工安全；风险识别；防控机制；风险评估；动态预警

引言

水利工程作为国家基础设施的重要组成部分，具有投资规模大、建设周期长、技术复杂程度高、环境不确定性显著等特点。施工过程中，由于涉及深基坑开挖、高边坡支护、围堰填筑、隧洞掘进、大体积混凝土浇筑及大型机械设备作业等多种高危工序，加之河流水文条件的动态变化，使得安全风险显著高于一般建筑工程。据统计，水利工程施工安全事故中，坍塌、高处坠落和淹溺三类事故占比较高，且往往造成群死群伤的严重后果。当前，许多水利施工企业的安全管理仍停留在经验型和事后处理层面，缺乏系统性的风险识别方法和常态化的防控机制。尽管国家层面颁布了《水利工程建设安全生产管理规定》等法规，但在实际执行中仍存在责任落实不到位、风险评估不精准、预警响应不及时等问题。因此，从理论层面构建一套覆盖风险全生命周期的识别与防控机制，对于提升水利工程施工本质安全水平具有重要意义。

1 水利工程施工安全风险识别

1.1 主要风险类型与特征

水利工程施工安全风险按致险因素可分为以下主要类型：坍塌与滑坡风险，发生于基坑开挖、边坡削坡、隧洞掘进、围堰填筑等工序，其成因包括地质条件不良（软弱夹层、破碎带）、地下水渗透压力、开挖坡率过陡、支护不及时或强度不足等。高处坠落风险，集中于大坝浇筑仓面、脚手架、模板支撑系统、闸门井及起重设备检修平台等部位，临边与洞口防护缺失是主要诱因。淹溺风险，发生于围堰内作业、导流隧洞施工、水上作业平台等临水区域，洪水突涨、围堰溃决、船只倾

覆等情景下风险显著增大。机械伤害风险，涉及挖掘机、装载机、塔吊、门式起重机、隧洞掘进机等大型设备，其运行轨迹复杂、视野盲区大且常多人协同作业。触电风险，源于临时用电线路敷设不规范、设备接地缺失、电缆破损漏电及潮湿环境下的电气作业。物体打击风险，常见于高处物料坠落、爆破飞石、钢筋及模板弹出等场景。上述风险并非独立存在，常呈现时空耦合特征，例如隧洞施工中坍塌往往伴随涌水，同时可能引发机械伤害。

1.2 风险产生的深层次原因

水利工程施工安全风险的根源可归纳为四个层面：第一，自然与地质条件的不可控性，如突降暴雨引起围堰水位骤升、施工中揭露未预见的断层破碎带、地下河等。第二，施工技术与工艺的局限性，例如深基坑降水效果不达预期、高边坡锚固质量离散性大、大体积混凝土温度裂缝控制不当等。第三，管理因素，包括安全责任制未落实到具体岗位、技术交底流于形式、安全投入不足、分包单位管理失控等^[1]。第四，人的不安全行为，表现为违章操作、劳动防护用品佩戴不规范、疲劳作业、安全意识淡薄等。风险识别应当穿透表层致险因素，挖掘其系统性根源，方能制定有效的防控对策。

1.3 常用风险识别方法及比较

水利工程施工安全风险识别可采用以下方法：安全检查表法（SCL），依据相关规范（SL398-2007《水利水电工程施工通用安全技术规程》）及工程特点编制检查项目清单，逐项排查隐患。该方法系统性强、易于操作，但依赖检查表的质量且难以发现未知风险。作业条件危险性分析法（LEC），通过评价事故可能性L、人员

暴露频率 E 及后果严重性 C ，计算风险值 $D = L \times E \times C$ 并划分等级。该方法半定量、简洁直观，但参数取值存在主观性。故障树分析法（FTA），以某一特定事故为顶事件，逆向演绎导致该事故的基本事件组合，适用于复杂系统的深度分析，但构建完整故障树工作量较大。危险与可操作性分析法（HAZOP），以工艺参数偏离为导向识别偏差原因及后果，适用于隧洞开挖、围堰填筑等流程性作业。实践中建议采用SCL进行常规排查，LEC进行风险分级，对重大风险采用FTA或HAZOP深挖根本原因。

2 施工安全风险评估与分级

2.1 风险评估指标体系的构建

风险评估需要建立多维度指标体系。一级指标包括：事故可能性指标（地质条件复杂程度、水文气象影响、施工技术难度、管理水平、设备状况、人员素质）、事故严重性指标（可能造成的伤亡人数、直接经济损失、社会影响及工期延误）及风险可接受程度指标（法律法规要求、公众关注度）^[2]。二级指标分解为可量化的子项，例如地质条件复杂程度可按岩土类别、断层发育程度、地下水水位等进行赋值。权重可采用层次分析法（AHP）由专家评分确定。评估单元按单位工程或施工区段划分，如导流工程、大坝工程、泄洪工程、引水隧洞工程等，分别计算各单元的风险指数。

2.2 基于改进LEC法的风险分级模型

传统LEC法中 L 、 E 、 C 的取值过于依赖个体判断，且乘积的物理意义模糊。改进LEC法引入客观修正系数：（1）对 L 值，引入地质修正系数 α （根据勘察报告量化）、水文修正系数 β （施工期水位变幅与频率）、管理修正系数 γ （依据历年安全检查评分），修正后 $L' = L \times \alpha \times \beta \times \gamma$ 。（2）对 E 值，考虑不同作业位置的空间受限程度及设备密集度，增加暴露修正因子 δ ， $E' = E \times \delta$ 。（3）对 C 值，除人员伤亡与经济损失外，增加环境损害系数 ε 和社会影响系数 ζ ， $C' = C \times (1 + \varepsilon + \zeta)$ 。风险分值 $D' = L' \times E' \times C'$ 。分级标准： $D' \geq 320$ 为重大风险（红色），160~319为较大风险（橙色），70~159为一般风险（黄色）， < 70 为低风险（蓝色）。各级风险制定相应的管控层级与响应措施，重大风险由企业总部直接监控。

2.3 动态风险评估与预警阈值

水利工程施工安全风险随工况和环境变化而动态演化。应建立基于实时监测数据的动态风险评估机制。在关键部位布设传感器：如基坑边坡安装位移监测桩及测斜仪，围堰布设渗压计及水位计，隧洞布设收敛计及应力计，大坝仓面布设温度及应变传感器。采集数据实时传入安全监控平台，与预置的预警阈值比对。预警阈值

分为三级：黄色预警（监测值达到设计允许值的70%）、橙色预警（85%）、红色预警（95%）。红色预警时立即停止相关作业并启动应急响应。动态风险评估本质上将静态的LEC打分转化为连续的状态监控，显著提升了风险响应的及时性。

3 防控机制的设计框架

3.1 防控机制的总体架构

水利工程施工安全防控机制应遵循“风险预控、关口前移、分级管控、闭环管理”的原则，构建组织保障、技术支撑、制度约束、文化引领四维一体的框架。纵向分为三个层级：企业层（制定安全目标与资源配置）、项目层（编制专项方案与风险清单）、作业层（执行隐患排查与现场处置）。横向贯通风险识别、评估、预警、响应、反馈五个环节，形成PDCA循环。该机制的运行需要明确的权责匹配与信息沟通渠道。

3.2 组织责任体系

成立由项目法人、施工、监理、设计单位共同参与的安全生产委员会。施工单位必须设置独立的安全生产管理机构，配备专职安全管理人员，且数量不少于施工总人数的1%（特种作业人员不少于3%）。建立从项目经理到班组长的逐级安全责任书制度，并缴纳安全风险抵押金^[3]。推行“一岗双责”，技术负责人对方案的安全性负责，工长对作业过程的安全负直接责任。安全管理人员拥有现场停工权与隐患整改督办权。对于分包单位，实行安全准入审查，明确安全投入比例（不低于合同额的1.5%）并由总包方代管安全费用，防止截留或挪用。

3.3 技术标准与专项方案

针对水利工程特有的高风险作业，必须编制专项施工方案并组织专家论证。覆盖的作业类型包括：深基坑开挖（深度 $\geq 5\text{m}$ ）、高边坡（高度 $\geq 30\text{m}$ ）、围堰工程、隧洞开挖（长度 $\geq 100\text{m}$ 或Ⅳ类以上围岩）、爆破作业、大型模板支撑体系（高度 $\geq 8\text{m}$ 或跨度 $\geq 18\text{m}$ ）、起重吊装（单件重量 $\geq 100\text{t}$ ）等。专项方案应包含危险源辨识、风险评价、技术措施（如降水方案、支护参数、监测布点）、应急措施及验收标准。方案实施前进行三级技术交底（项目技术负责人→施工员→班组长→作业人员）。工艺参数的变更必须经原审批程序重新确认。

3.4 安全培训教育体系

建立分层分类的培训体系：新入场人员必须完成72学时三级安全教育（公司级、项目级、班组级），考核合格后持“安全上岗证”作业。特种作业人员（电工、焊工、起重工、爆破工等）须持有应急管理部门或住建部门颁发的有效证书，并每两年复审一次^[4]。每年至少组

组织两次全员安全知识更新培训,培训内容包括风险识别方法、操作规程、事故案例警示(不点名具体案例但阐述类型)及急救技能。采用VR安全事故体验设备,模拟坍塌、坠落、淹溺等场景,增强培训效果。建立培训档案,未完成规定学时或考核不合格者不得上岗。

4 风险监测预警与应急响应

4.1 物联网与智能监测系统

在水利工程施工现场部署基于物联网的智能安全监测系统。系统架构包括感知层(各类传感器、智能摄像头、RFID标签)、网络层(无线传感网、4G/5G、光纤)、平台层(数据存储、分析及可视化)及应用层(预警发布、指挥调度)。具体监测项目:边坡及基坑位移监测(精度 $\pm 1\text{mm}$)、地下水位及孔隙水压力监测、围堰渗流量监测、隧洞拱顶沉降与周边收敛监测、大型设备运行参数(起重量、力矩、幅度)及操作人员身份识别。监测数据设定阈值,超出后现场声光报警并自动推送至相关人员手机端。BIM模型与监测数据融合,可三维展示风险区域分布,辅助决策。

4.2 预警分级与响应机制

根据动态风险评估结果及监测数据超限程度,预警分为四个等级。四级蓝色预警(一般风险):现场安全员口头提示,班组自行整改。三级黄色预警(较大风险):项目部召开分析会,调整施工方案或增加监测频率。二级橙色预警(严重风险):暂停该区域危险性较大作业,疏散非必要人员,组织专家评审处置方案。一级红色预警(特别严重风险):全面停工,启动应急预案,上报上级主管部门及地方政府。从预警发布到响应行动的时间要求:蓝色及黄色 ≤ 2 小时,橙色 ≤ 30 分钟,红色 ≤ 10 分钟。所有预警及响应过程应记录存档,作为事后回溯的依据。

4.3 应急管理体系建设

水利工程施工单位应编制综合应急预案(涵盖洪汛、坍塌、淹溺、触电、火灾等)、专项应急预案(针

对围堰溃决、隧洞塌方、爆破事故等)及现场处置方案。预案内容至少包括:应急组织架构及职责、危险源及风险分析、应急资源清单(设备、物资、人员)、处置程序及措施、疏散路线及集合点。每年至少组织一次综合应急演练,每半年组织一次专项或现场处置演练。演练后形成评估报告,修订预案缺陷。应急物资库房应储备:救生衣、皮划艇、排水泵、发电机、千斤顶、破拆工具、急救箱、担架及应急照明设备,并定期检查有效期与完好性。建立与地方应急管理、水利、气象、医疗等部门的联动机制,实现信息共享与资源调度。

5 结语

水利工程施工安全风险具动态、耦合及环境敏感特征,传统经验式管理已难适应。本文构建了覆盖识别、评估、预警、响应的全过程防控机制。研究表明:风险识别应综合scl、lec等方法挖掘系统根源;评估需引入多维指标与实时数据,建立分级预警模型以克服主观性;防控需组织、技术、培训、应急四体系协同,强化专职机构权威与方案刚性执行;物联网与bim技术是实现风险动态感知的关键;制度考核、安全文化与信息化保障机制可持续运行。该框架为水利工程安全管理标准化、精细化与智能化提供理论支撑,推动行业从事故驱动向风险预控转型,对提升本质安全水平具有重要实践价值。

参考文献

- [1]王振宇,刘建平,陈晓东.水利工程施工安全风险识别与评价方法研究[J].水利水电技术,2021,52(6):112-119.
- [2]张洪,杨涛,李明.基于改进LEC法的水利隧洞施工风险动态评估模型[J].中国安全生产科学技术,2020,16(8):97-103.
- [3]刘志强,孙国华,赵宇.水利工程深基坑施工安全监测与预警技术研究[J].岩土工程学报,2022,44(增1):189-194.
- [4]陈永刚,周海涛.基于BIM和物联网的水利工程施工安全智能防控系统[J].水利信息化,2021,(4):28-33.