

环境因素对水利水电工程安全管理的影响及对策研究

刘英勋

中国水利水电第七工程局成都水电建设工程有限公司 四川 成都 611130

摘要：水利水电工程安全管理受自然与人为环境因素的多重影响。自然因素包括地质、气象、地形及生态条件，可能引发结构破坏、施工灾害等问题；人为因素涵盖设计缺陷、施工失误、运行管理不当等，进一步加剧安全风险。研究从工程结构、施工、运行及生态公共安全等维度分析影响机制，提出构建监测预警体系、优化设计与施工、强化运行维护、完善应急管理机制及法律法规等对策，并结合某水利枢纽工程案例验证实施效果。

关键词：水利水电工程；环境因素；安全管理；风险防控；对策研究

1 水利水电工程安全管理中的主要环境因素识别与分类

1.1 自然环境因素

自然环境因素是水利水电工程安全管理中不可控的核心变量，其复杂性和动态性直接决定工程全生命周期的安全风险等级。地质条件是首要影响因素，包括断层构造、岩体节理裂纹、软弱夹层分布等，这些地质缺陷可能引发坝基沉降、边坡失稳或地震液化等灾害。气象水文条件中，极端降雨、洪水频率、泥石流等水文事件对工程防洪能力构成直接威胁，而气温骤变引发的混凝土冻融破坏、库区冰凌堆积等问题则影响结构耐久性。地形地貌通过改变水流流态影响工程安全，如狭窄河谷中的高拱坝需承受更大的水推力，而宽浅河谷则可能因泄洪能力不足导致漫坝风险。生态因素方面，库区水位波动引发的岸坡生态退化、水生生物栖息地破碎化等问题，可能通过生物链传导间接影响工程安全。

1.2 人为环境因素

人为环境因素呈现多主体、多环节的复合特征。规划设计缺陷是源头性风险，如某水电站因未充分考虑库区移民安置问题，导致后期出现大规模滑坡地质灾害。施工管理失误包括违规操作、材料质量不达标、进度控制失衡等^[1]。运行维护不当表现为监测系统失效、设备老化未及时更换、应急预案流于形式等，某水库因泄洪闸门启闭机故障，在洪峰来临时无法正常泄洪，险些造成溃坝事故。政策法规变动对工程安全产生间接影响，如环保标准提高迫使工程增设生态流量泄放设施，可能改变原有水力条件。社会环境因素中，公众对工程安全的认知偏差可能引发群体性事件，而媒体报道的片面性可能加剧社会恐慌，形成“安全焦虑”的次生风险。

2 环境因素对水利水电工程安全管理的影响机制分析

2.1 对工程结构安全的影响

自然环境因素通过物理、化学作用直接破坏工程结构。地质运动引发的地震可能导致坝体裂缝扩展，如汶川地震使紫坪铺大坝产生多条裂缝，最大宽度达8mm。水文侵蚀中，高速水流携带的泥沙对泄洪洞衬砌产生磨蚀，某水电站泄洪洞运行10年后磨蚀深度达15cm，严重影响结构安全。温度应力作用下，混凝土坝体因内外温差产生拉应力，当应力超过抗拉强度时即形成裂缝，如二滩拱坝在蓄水初期因温差效应产生多条水平裂缝。人为因素则通过改变结构受力条件影响安全，如违规加高坝体导致稳定性系数下降，某土石坝加高后抗滑稳定安全系数从1.35降至1.18，逼近规范限值。

2.2 对施工安全的影响

自然环境因素在施工期表现为突发性灾害风险。极端天气中，暴雨可能引发基坑积水、边坡滑塌，某水电站导流洞施工时因突降暴雨导致洞内积水达3m，造成设备淹没和人员被困。地质灾害方面，施工爆破可能诱发周边山体滑坡，如小浪底工程左岸山体在爆破开挖后发生滑坡，体积达50万m³。人为因素则通过作业环境恶化影响安全，如高温作业导致中暑事故率上升，某隧道施工在夏季连续发生3起热射病病例。设备故障中，塔吊在强风条件下易发生倾覆，某大坝施工时塔吊在8级风中倒塌，造成2死3伤的重大事故。

2.3 对运行安全的影响

自然环境因素在运行期呈现长期累积效应。库区淤积改变水流条件，某水库运行30年后淤积量达设计库容的25%，导致调洪能力下降18%。水质恶化引发混凝土腐蚀，某水电站引水隧洞因硫酸盐侵蚀，混凝土强度损失达30%。人为因素通过操作失误影响安全，如误开泄洪闸门导致下游水位骤升，某水库因操作人员误触按钮，使下游河道水位在10分钟内上升2.3m，淹没沿岸农田。管理漏洞方面，某水电站因未定期检修闸门启闭机，在洪

峰来临时设备卡死无法开启,险些造成溃坝。

2.4 对生态与公共安全的影响

环境因素通过生态链传导影响公共安全。生物入侵改变库区生态平衡,如某水库引入的食蚊鱼大量繁殖,导致本地鱼类种群数量下降70%,引发渔业资源衰退。水质污染通过饮用水源影响公众健康,某水库因上游化工企业偷排,导致库水汞含量超标5倍,造成周边村庄200余人中毒^[2]。地质灾害链中,水库蓄水可能诱发地震,如柯家山水电站蓄水后发生3.5级地震,震中距坝体仅2km。社会稳定风险方面,移民安置不当可能引发群体性事件,某水电站因移民补偿标准争议,导致300余名村民集体上访,持续时间达6个月。

3 环境因素影响下的水利水电工程安全管理应对对策

3.1 环境因素监测与预警体系构建

构建“天-空-地”一体化监测网络是提升环境感知能力的核心路径。该体系通过集成卫星遥感、无人机巡查、地面传感器等技术,形成多维度、高精度的监测矩阵。在地质监测领域,微震监测系统成为捕捉岩体破裂信号的关键工具,其通过密集布置的传感器阵列实时分析地震波频谱特征。气象预警方面,通过与气象部门共建暴雨数值预报模型,引入机器学习优化降水预报参数,使预警提前量从2小时延长至6小时,为工程防洪调度争取宝贵时间。水质监测采用多参数在线分析仪,集成pH、溶解氧、浊度等传感器,某水库部署的浮标式监测站实现每15分钟数据上传,配合边缘计算模块完成异常值自动甄别。大数据平台作为神经中枢,整合地质、气象、水文等12类数据源,通过LSTM神经网络构建风险预测模型,如三峡工程数字孪生平台可模拟百年一遇洪水下的工程变形、渗流等响应过程,为防汛指挥提供科学决策依据。该体系还配备移动监测终端,支持现场人员实时调取监测数据,形成“固定监测+移动核查”的闭环管理。

3.2 工程设计与施工阶段的环境适应性对策

设计阶段贯彻“韧性设计”理念,通过结构优化提升抗灾能力。在抗震设计中,某拱坝采用“上窄下宽”的梯形断面体型,配合基础弹性垫层,使地震反应谱加速度降低15%,并通过振动台试验验证结构动力响应。抗冲磨设计方面,泄洪洞采用环氧砂浆衬砌技术,其莫氏硬度达7.5级,配合表面抛光处理,使抗磨性能较传统混凝土提升3倍,经实测验证,在30m/s流速下运行5年后磨损深度不足2mm。施工阶段推行“绿色施工”标准,边坡治理采用三维植被网与喷播植草复合技术,先铺设高强度聚丙烯网固定坡面,再喷洒含草籽、保水剂的客土

混合料,某工程应用后边坡绿化率达95%,植被覆盖率达提升40%,有效抑制水土流失。温控措施中,大体积混凝土采用“预冷骨料+通水冷却”双控技术,通过液氮预冷将骨料温度降至5℃以下,配合蛇形冷却水管实现浇筑体内外部降温速率 $\leq 2^{\circ}\text{C}/\text{d}$,某水电站大坝实测显示,夏季施工期内外温差控制在18-20℃,未出现贯穿性裂缝。智能建造方面,BIM技术贯穿施工全流程,某水电站通过三维模型优化导流洞开挖方案,减少超挖量12万 m^3 ,节约混凝土回填成本2800万元,同时利用4D模拟提前发现32处管线碰撞问题。

3.3 运行阶段的环境风险防控措施

运行阶段构建“日常巡查+专项检测”双轨维护体系。结构健康监测采用分布式光纤传感技术,沿坝体、边坡等关键部位布设光缆,通过布里渊散射原理实时监测应变、温度分布,某大坝安装的1200个监测点形成全覆盖传感网络,数据采集频率达10Hz,配合小波分析算法可识别0.01 μe 级的微应变变化。设备预防性维护实施RCM策略,以某水电站为例,通过振动分析、油液检测等手段建立设备健康档案,对32台主变压器实施状态检修,使设备故障率从0.8次/年降至0.48次/年,维修成本降低35%。生态流量保障方面,安装智能生态放水洞,配备流量计、水位计和电动闸门,通过SCADA系统实现远程精准调控,某水库增设的生态放水洞最小过流能力达5 m^3/s ,确保下游河道生态基流需求^[3]。另外,建立工程安全风险动态评估系统,每月生成红色、橙色、黄色、蓝色四级风险图谱,为运维决策提供量化依据。

3.4 应急管理机制与处置能力建设

构建“四级响应”应急体系,明确从班组到省级部门的分级处置流程。一级响应(红色预警)启动最高级别应急机制,要求30分钟内成立现场指挥部,1小时内完成周边5km范围内人员疏散。物资储备采用“本地储备+区域联动”模式,某水库建立应急物资数据库,分类储备砂石料5万 m^3 、编织袋10万条、冲锋舟20艘,并与3家供应商签订4小时紧急供货协议。救援队伍实行“专职+预备”双编制,某工程配备30人专职抢险队,配备液压破碎锤、无人机侦察系统等装备,同时组建200人预备队,定期开展体能训练和技能考核。社会联动机制方面,某水电站与周边3个乡镇签订应急互助协议,共享卫星电话、发电机等设备,并联合开展每年2次的跨区域演练。公众教育注重沉浸式体验,开发VR安全培训系统,模拟地震、洪水等灾害场景,某工程每年举办8场社区安全讲座,覆盖5000余人次,同时制作《工程安全手册》发放至每户居民,手册包含应急避难路线、自救互救方

法等关键信息。建立应急能力评估体系,从预案完备性、物资可用性、队伍响应速度等10个维度进行量化打分,评估结果与单位绩效考核挂钩。

3.5 法律法规与管理体系完善

修订《水利水电工程安全管理条例》,单列“环境因素管理”专章,明确建设单位、设计单位、施工单位的环境责任边界,规定地质灾害评估报告、生态流量保障方案等12类必备文件清单。标准体系制定方面,出台《工程环境风险评估规范》《微震监测技术导则》等5项行业标准,统一地质监测预警阈值、水质监测指标等关键参数。监管机制实施“双随机、一公开”制度,某省水利厅建立包含287名专家的监管人员库,每年随机抽查工程比例不低于20%,检查结果在厅官网公示并纳入信用档案。信用管理构建“黑名单+联合惩戒”机制,建立企业信用档案,记录环境违规行为、整改情况等信息,某企业因瞒报水质污染事件被列入黑名单,除3年内禁止参与招投标外,其法定代表人还被限制乘坐高铁、飞机等高消费行为。同时推行“环保总监”制度,要求大型工程配备专职环保管理人员,持证上岗率达100%。为强化技术支撑,成立水利水电工程安全研究院,开展环境因素影响机理、风险预测模型等课题研究,近三年取得专利授权23项,软件著作权15项。建立工程安全保险制度,要求建设单位按工程造价的1.5%投保环境责任险,通过市场化手段分散风险。

4 案例分析:某水利枢纽工程环境因素安全管理实践

(1)工程概况与环境特征;某水利枢纽位于西南山区,控制流域面积1.2万km²,总库容8.6亿m³,工程等别为Ⅰ等大(1)型。区域地质构造复杂,发育3条区域性断层;属亚热带季风气候,年降雨量1800mm,暴雨频率高;库区涉及国家级自然保护区,生态敏感度高。(2)环境因素识别与风险评估;通过HAZOP分析识别出12类主要环境风险,其中地质灾害风险等级为Ⅰ级(极高风险),气象灾害为Ⅱ级(高风险)。采用FMEA方法评

估,发现泄洪洞抗冲磨能力不足、移民安置区边坡稳定性差等5项关键风险点^[4]。(3)安全管理对策实施;设计阶段采用“抗震+抗冲磨”复合设计,坝体混凝土强度等级提高至C40,泄洪洞衬砌厚度增加0.5m。施工阶段实施“地质预报-动态设计-信息化施工”模式,通过TSP超前地质预报调整开挖参数,减少超挖量18%。运行阶段建立“空-天-地”一体化监测系统,安装微震监测点24个、渗流监测断面8个,实现风险实时预警。应急管理编制专项预案12个,开展溃坝演练3次,储备抢险物资价值2000万元。(4)实施效果与经验总结;工程运行5年来未发生重大安全事故,地质灾害预警准确率达85%,设备故障率下降32%。主要经验包括:建立“设计-施工-运行”全生命周期环境管理机制,强化科技支撑提升监测精度,注重社会参与构建共治格局。该案例为同类工程提供了可复制的环境安全管理范式。

结束语

水利水电工程安全管理需统筹环境因素的全生命周期管控。通过构建“天-空-地”一体化监测网络、推行韧性设计与绿色施工、完善应急响应机制及强化法规标准约束,可有效降低环境风险。案例实践表明,融合科技支撑与社会共治的环境管理模式,能显著提升工程安全韧性。未来需持续优化风险预测模型,推动智能化监管手段应用,为行业可持续发展提供安全保障。

参考文献

- [1]张玉茂.水利水电工程建设对生态环境影响的利弊分析[J].大众标准化,2024,(24):77-79.
- [2]李娇.水利水电工程建设对红碱淖生态环境的影响[J].内蒙古水利,2024,(S1):85-86.
- [3]王振清.水利工程建设与管理现状及发展策略[J].南方农业,2022,15(3):205-206.
- [4]黄杰峰.水利工程建设和管理现状及发展趋势[J].低碳世界,2022,10(3):120-121.