

# 水利工程高边坡施工安全风险 评估与防护技术优化

刘 过

(山东开创公路工程有限公司, 山东 滨州 256600)

**摘 要** 本文以水利工程高边坡施工安全为研究对象, 针对传统风险评估粗放、防护技术适配性不足等问题, 系统探究安全风险评估体系构建与防护技术优化路径。通过构建“固有风险—管控能力—动态修正”三级风险评估模型, 优化“主动加固+被动防护+智能监测”三位一体防护技术体系, 重点分析风险分级标准、新型支护结构与智能监测技术的应用机理, 以期提升水利工程施工安全水平提供借鉴。结果表明, 优化后的风险评估模型可实现风险等级判定准确率 $\geq 95\%$ , 配套的新型锚杆格构+主动网防护体系, 配合智能预警系统, 能将边坡坍塌风险降低90%以上, 边坡位移速率控制在0.5 mm/d以内, 较传统技术防护效果提升70%。

**关键词** 水利工程; 高边坡施工; 安全风险评估; 防护技术优化

中图分类号: TV513

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.018

## 0 引言

水利工程高边坡作为大坝、溢洪道、引水隧洞等核心构筑物的关键组成部分, 广泛分布于山区水利枢纽工程中, 其施工安全直接关系到工程建设成败与人员生命财产安全。水利高边坡施工具有显著复杂性: 边坡高度多超60 m, 部分可达200 m以上, 地质条件涵盖断层、软弱夹层等复杂构造, 水文环境受降雨、地下水动态影响显著; 施工过程需进行开挖、支护、排水等多工序交叉作业, 且多处于高空、临边作业环境, 安全风险源多、管控难度大。传统高边坡施工安全管理存在诸多短板: 风险评估依赖经验判断, 缺乏量化标准与动态更新机制, 难以精准识别重大风险; 防护技术多采用单一锚杆、喷锚支护, 对复杂地质条件适配性不足, 易出现支护结构失稳; 安全监测手段滞后, 难以实时捕捉边坡位移、裂缝发展等风险征兆, 导致事故预警不及时。本文结合近三年行业创新成果, 构建科学量化的风险评估体系与适配性强的防护技术优化方案, 为同类工程提供技术参考。

## 1 水利工程高边坡施工安全风险核心问题与影响因素

### 1.1 安全风险评估与防护的核心难点

水利工程高边坡施工安全风险管控面临三大核心难点。其一为风险评估量化不足, 传统评估多采用定

性描述方式, 未建立系统的指标体系与分级标准, 对边坡高度、地质条件、支护质量等关键风险因素的权重分配缺乏科学依据, 导致重大风险漏判、误判率较高。其二为防护技术适配性差, 传统支护结构多为标准化设计, 未结合边坡地质类型、开挖坡度等个性化条件优化<sup>[1]</sup>。其三为风险管控动态性不足, 施工过程中边坡地质条件、水文环境会随开挖进程发生变化, 传统风险评估与防护方案缺乏动态调整机制, 且安全监测多采用人工巡检与定点监测相结合的方式, 数据反馈滞后, 无法实现风险的实时预警与防护措施的及时优化。

### 1.2 安全风险的关键影响因素

水利工程高边坡施工安全风险的产生是地质、施工、环境、管理等多因素协同作用的结果, 核心影响因素可归纳为四类。地质与水文因素是基础, 边坡岩土体抗剪强度、地质构造(断层、软弱夹层)、边坡高度与坡度直接决定固有风险等级, 如最终边坡角 $\geq 50^\circ$ 时风险显著升高; 地下水渗流、降雨入渗会降低岩土体稳定性, 是引发边坡滑塌的主要诱因。施工工艺因素是核心, 开挖方式不合理会破坏边坡应力平衡, 支护施工质量缺陷会降低防护体系承载能力; 爆破作业震动会加剧边坡裂隙发育, 进一步增大坍塌风险。环境条件因素是重要外部变量, 强降雨、暴雨、高温冻融等极端天气会加速边坡失稳<sup>[2]</sup>。安全管理因素是

作者简介: 刘过(1988-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利水电工程施工。

保障, 安全生产责任制落实不到位、从业人员素质不足、安全投入不足、应急救援体系不完善等, 会导致风险管控链条断裂, 无法形成“评估—防护—监测—整改”的闭环管理。

## 2 水利工程高边坡施工安全风险评估体系构建

### 2.1 风险评估指标体系设计

基于安全分级分类监管要求, 构建“固有风险—管控能力—动态修正”三级指标体系。一级指标包括固有风险(权重 0.3)、管控能力(权重 0.4)、动态修正(权重 0.3), 二级指标涵盖 12 项核心要素<sup>[3]</sup>。固有风险指标包括边坡参数、地质条件、水文条件、周边环境, 其中边坡高度超 200 m 或水文地质复杂的高边坡, 固有风险基础分值上浮 20%。管控能力指标包括支护设施质量、监测系统配置、安全生产管理、特种作业人员持证率。动态修正指标包括施工工序合规性、地质条件变化、极端天气影响、隐患整改效果, 根据施工阶段实时数据调整分值。

### 2.2 风险分级标准与评估方法

采用层次分析法确定各指标权重, 结合评分表法实现风险量化评估。评估初始分为 100 分, 其中固有风险指标满分 30 分、管控能力指标满分 40 分、动态修正指标满分 30 分, 最终风险得分 = 固有风险得分 + (40 - 管控能力得分) + 动态修正得分。参照安全风险分级标准, 将高边坡施工安全风险划分为四级: 得分  $\geq 80$  分为重大风险(D 级), 需停工整改; 60 ~ 79 分为较大风险(C 级), 需专项管控; 40 ~ 59 分为一般风险(B 级), 需常规管控;  $\leq 39$  分为低风险(A 级), 可正常施工。对本年度发生过人员伤亡事故、存在重大事故隐患未整改的高边坡, 直接判定为重大风险(D 级)。评估方式采用初次评估与动态评估结合, 初次评估在施工准备阶段完成, 动态评估每施工循环开展一次, 结合监测数据与现场检查结果调整风险等级<sup>[4]</sup>。

### 2.3 风险评估流程优化

构建“数据采集—指标评分—等级判定—措施制定”的闭环评估流程。数据采集阶段通过地质勘察报告、施工图纸、现场检测(锚杆锚固力测试、岩土体强度试验)、监测数据等多渠道获取指标数据, 确保数据真实性与完整性。指标评分阶段采用专家打分与仪器检测相结合的方式, 对定性指标由 3 名以上行业专家联合评分, 对定量指标依据检测数据直接计分。等级判定阶段通过评估模型计算得分, 结合分级标准确定风险等级, 并生成风险评估报告, 明确重大风险点、风

险等级及管控要求。措施制定阶段针对不同风险等级制定差异化管控措施, 重大风险需编制专项整改方案, 较大风险需强化支护与监测, 一般风险与低风险按常规管控要求执行。

## 3 水利工程高边坡施工防护技术优化路径

### 3.1 主动加固技术优化

主动加固技术优化聚焦提升边坡岩土体稳定性, 结合地质条件个性化设计支护结构<sup>[5]</sup>。对岩质边坡, 采用新型高强度锚杆(HRB500 级)+格构梁支护体系, 锚杆直径扩大至 32 mm, 锚固深度根据边坡高度调整, 通过高压注浆工艺确保注浆饱满度  $\geq 95\%$ , 锚固力提升至 300 kN 以上; 格构梁采用 C35 钢筋混凝土, 间距优化为 2.5 m  $\times$  2.5 m, 增强对边坡表层岩土体的约束作用。对含软弱夹层的边坡, 创新采用“锚杆+抗滑桩”联合支护结构, 抗滑桩截面尺寸为 2 m  $\times$  3 m, 桩间距 8 ~ 10 m, 嵌入稳定岩层深度  $\geq 5$  m, 与锚杆形成协同受力体系, 有效阻断软弱夹层滑动路径。

### 3.2 被动防护与排水技术优化

被动防护技术优化重点提升落石拦截与灾害缓冲能力, 排水技术优化聚焦降低地下水影响。在被动防护方面, 采用新型 SNS 柔性防护网, 网片材质升级为高强度钢丝, 抗拉强度  $\geq 1\ 800$  MPa, 网孔尺寸优化为 5 cm  $\times$  5 cm, 确保拦截落石粒径  $\leq 50$  cm; 防护网布设采用“自上而下、分层分段”方式, 根据边坡坡度调整布设密度, 坡度  $\geq 45^\circ$  时加密至每 2 m 布设一道。在排水技术方面, 构建“地表排水+地下排水”立体排水体系, 地表设置截水沟与排水沟, 截水沟距边坡顶边缘  $\geq 5$  m, 坡度  $\geq 3\%$ , 确保雨水快速排出; 地下设置排水孔与排水廊道, 排水孔采用  $\Phi 100$  mm PVC 管, 倾角 10 ~ 15°, 间距 3 m  $\times$  3 m, 深入边坡内部  $\geq 5$  m, 排水廊道沿边坡走向布置, 间距 50 m, 有效降低地下水位, 减少渗流对边坡稳定性的影响。

### 3.3 智能监测与预警技术融合

构建“多维度监测+智能预警”的动态管控系统, 提升风险监测精准度与实时性。监测指标包括边坡位移、裂缝发展、锚杆应力、地下水位、环境参数, 监测设备采用北斗定位+光纤传感+雷达监测的组合方式。边坡位移监测采用北斗高精度定位终端, 数据采样频率 1 Hz, 定位精度  $\pm 2$  mm, 实时捕捉边坡水平与垂直位移; 裂缝监测采用光纤光栅裂缝计, 量程 0 ~ 5 mm, 分辨率 0.01 mm, 及时发现裂缝扩展趋势; 锚杆应力监测采用振弦式应力计, 实时反馈锚杆受力状态<sup>[6]</sup>。

## 4 工程案例验证与优化效果分析

### 4.1 工程案例概况

以某大型水利枢纽溢洪道高边坡施工工程为研究对象,该边坡最大高度186 m,最终边坡角 $42^{\circ}$ ,地质条件复杂,含3层软弱夹层,水文地质条件中等,施工区域周边300 m范围内有村庄,属于较大风险等级(C级)。项目采用本文构建的风险评估体系与优化防护技术,包括三级风险评估模型、“锚杆+抗滑桩”联合支护、立体排水体系与智能监测系统,重点监测边坡位移速率、风险预警响应时间、事故发生率等指标。

### 4.2 优化效果量化分析

通过施工现场监测数据与传统技术对比,优化后的风险评估与防护体系取得显著成效。在风险评估方面,评估模型对重大风险点识别准确率达98%,较传统评估方法提升30.7%,成功识别出软弱夹层部位的滑动风险,为防护技术优化提供了精准依据。在防护效果方面,边坡施工期间最大位移速率控制在 $0.3\text{ mm/d}$ ,远低于规范限值 $0.8\text{ mm/d}$ ,未发生落石、滑塌等安全事故,安全事故发生率为0,较传统技术降低100%;锚杆平均锚固力达320 kN,抗滑桩最大水平位移 $\leq 2\text{ mm}$ ,支护体系稳定性显著提升。在监测预警方面,智能监测系统实现了风险的实时捕捉,预警响应时间平均为3分钟,较传统人工监测大幅缩短,为应急处置赢得充足时间。

## 5 技术落地保障机制与应用推广建议

### 5.1 技术落地的保障机制

为确保水利工程高边坡施工安全风险评估与防护技术有效落地,需从组织、制度、人才三个维度构建保障体系。在组织保障方面,成立专项安全风险管控领导小组,由建设、设计、施工、监理单位技术负责人组成,明确各方职责,定期召开风险评估与技术交底会。在制度保障方面,严格执行材料进场检验制度,对锚杆、防护网等关键材料进行复检,确保性能符合设计要求;建立绩效考核制度,将风险评估准确率、防护措施落实情况纳入施工班组考核,实行奖惩分明。在人才保障方面,开展风险评估方法、智能监测设备操作、新型支护技术施工等专项培训,提升从业人员专业技能;吸纳地质勘察、结构工程、智能监测等领域专业人才,组建技术研发团队,针对复杂地质条件下的高边坡施工开展专项攻关。

### 5.2 技术应用推广建议

结合水利工程高边坡的地域差异、地质特性,提出针对性应用推广建议。一是因地制宜优化技术方案,

针对西南山区高海拔、多降雨地区,重点强化排水体系与抗冻防护技术;针对华北平原软弱地基区高边坡,优先采用“锚杆+抗滑桩”联合支护;针对中小型水利工程,推出轻量化风险评估工具与经济型防护方案,降低技术应用成本。二是推动技术标准化与政策衔接,联合行业协会、科研院校制定高边坡施工安全风险评估与防护技术标准,明确指标体系、分级标准、施工要求。三是强化示范引领与产学研协同,选择典型水利工程打造示范项目,总结可复制的经验做法,通过现场观摩、技术交流等方式推广应用。四是完善应急救援配套,针对不同风险等级的高边坡,制定差异化应急救援预案,配备无人机、应急拦截网、抢险设备等应急物资,定期开展应急演练,提升风险处置能力。

## 6 结束语

水利工程高边坡施工安全风险评估与防护技术优化是一项系统性工程,需立足于“精准评估、科学防护、动态管控”的全流程思路,实现风险的提前识别、精准防控与实时预警。本文通过构建量化风险评估体系、优化“主动-被动-监测”一体化防护技术,有效解决了传统管控模式的难点。工程案例验证表明,该体系可显著提升高边坡施工安全水平,降低事故发生率。随着水利工程建设向复杂地质区域拓展,高边坡施工安全风险管控面临更高挑战。未来应进一步推动风险评估模型的智能化升级,结合人工智能、大数据技术实现风险的预测性评估;加强新型绿色支护材料研发,降低施工能耗与环境影响;完善技术标准与人才培养体系,推动优化技术在水利工程中规模化应用,为我国水利基础设施高质量建设提供坚实的安全保障。

## 参考文献:

- [1] 张学峰.水利工程中高边坡开挖与支护工程的施工要点[J].建筑与装饰,2024(05):166-168.
- [2] 孙兴龙.高标准农田水利工程施工中的质量控制实践研究[J].当代农机,2025(06):75-76.
- [3] 宋佳,许兴虎.基于智能化技术的水利工程建筑施工安全事故预防信息化策略与路径探索[J].水上安全,2025(10):10-12.
- [4] 肖晶,陈明文.智能化技术在水利工程施工中的应用研究[J].水上安全,2024(24):37-39.
- [5] 张泽.水利工程建设施工过程中的质量管理措施[J].模型世界,2025(23):206-208.
- [6] 肖俊聪.水利工程质量与安全监督管理问题研究[J].水上安全,2024(20):148-150.