

公路高边坡施工风险源辨识与防控措施

廖伟志 陈飘平

西藏交发项目管理有限公司 西藏 拉萨 85000

【摘要】：公路高边坡施工区域地质条件复杂、结构面发育不均及水文气象作用显著，易诱发滑坡、坍塌及局部失稳等风险。施工扰动叠加原始应力重分布，使坡体稳定性持续波动，风险识别不精准与防控措施滞后问题突出。基于地质勘察信息整合与施工工序全过程分析，构建多源信息融合风险识别体系，结合分级管控机制与动态响应流程，强化支护优化、排水控制及实时监测预警等综合技术应用。实施后边坡变形得到有效约束，孔隙水压力波动减弱，风险事件发生频率显著降低，施工安全水平与工程推进效率同步提升。

【关键词】：公路高边坡；风险源辨识；施工安全控制；边坡防护；风险分级管控

DOI:10.12417/2811-0536.26.08.098

1 地质条件及施工环境风险构成

1.1 高边坡岩土结构不稳定因素

高边坡区域岩土结构受成因环境与构造作用影响明显，常表现为节理裂隙发育、软弱夹层分布不均及岩体完整性差异较大等特征。不同岩性组合在空间上呈现明显非均质性，使坡体内部形成潜在滑移界面。风化作用持续削弱岩体强度，导致表层与深部力学性质差异扩大，局部应力重分布现象突出。结构面之间的贯通性增强后，易形成贯通滑动通道，对整体稳定性产生控制性影响。岩体抗剪强度参数在长期地质演化中逐步弱化，结构面摩擦系数降低后，极易在外部扰动作用下发生失稳响应。高陡边坡中应力集中区分布不均，局部破坏可沿结构面扩展并诱发整体失稳链式反应，对施工阶段安全形成基础性约束。

1.2 施工扰动引发失稳因素

施工活动对原始地层应力状态具有直接扰动效应，开挖卸荷过程中坡体内部应力重新分布，局部区域应力集中程度显著提高。分层开挖方式若控制精度不足，易导致临空面快速扩大，岩土体自稳能力下降。爆破振动与机械荷载叠加作用下，结构面原有胶结状态逐步破坏，裂隙扩展速度加快。支护体系滞后或刚度不足时，难以及时形成有效约束，导致局部变形向深部传递^[1]。施工顺序与坡体力学响应不匹配时，剪切带逐步形成并扩展，产生渐进性破坏路径。施工扰动还会改变地下水渗流路径，使孔隙水压力局部升高，进一步降低抗剪强度，形成多因素耦合作用下的不稳定演化过程。

1.3 气象水文条件影响机制

高边坡区域气象水文条件对岩土体稳定性具有持续性调控作用，降雨入渗过程改变坡体含水状态，引起孔隙水压力动态变化。水分沿裂隙网络快速迁移，

使结构面润滑效应增强，抗剪强度显著下降。短时强降雨作用下，地表径流集中汇集，坡脚冲刷加剧，支撑约束条件逐步削弱。温度变化引发岩体热胀冷缩循环，长期作用下结构面张开度增加，裂隙扩展趋势明显。地下水位波动导致渗流场重新分布，局部软弱层发生软化与蠕变变形。风力作用对表层松散物质产生剥蚀效应，加速坡面结构破碎化进程，多种气象水文因素叠加后形成复杂耦合影响机制。

2 风险来源识别方法体系构建

2.1 地质勘察信息整合方法

高边坡风险识别过程中，地质勘察信息整合需以多尺度数据协同为基础，将钻探成果、物探结果与原位测试参数进行结构化归集与统一表达。岩土层序划分需结合空间分布特征建立三维地质模型，对岩性变化界面、断裂构造带及软弱夹层进行精细刻画。结构面产状信息通过统计分析转化为优势方向参数，用于识别潜在滑移控制面。岩体完整性指标与风化程度分级需与力学参数库进行映射关联，形成参数化评价体系。地层渗透性与地下水赋存条件通过渗流场重构实现动态表达，为孔隙水压力分布分析提供基础数据支撑。信息整合过程中引入数字化地质建模与空间插值算法，提高隐伏结构识别精度，使复杂地质条件下的风险源空间定位更加清晰，为后续施工安全控制提供基础数据框架。

2.2 施工工序风险识别流程

施工工序风险识别需基于全流程动态分解机制，将开挖、支护、排水及监测等关键环节进行阶段性划分，并构建工序与风险因素的映射关系模型。开挖阶段重点识别卸荷效应引发的应力重分布路径变化，支护阶段关注结构体系刚度形成与滞后时间差对稳定性的影响。排水施工过程需分析地下水通道改变对孔隙

压力的响应机制,监测阶段则侧重数据异常波动与变形演化趋势之间的关联性。各工序之间通过时间轴与空间域双重约束实现耦合分析,使风险识别由静态判别转向过程追踪^[2]。施工参数变化需纳入实时计算模型,通过阈值控制机制识别潜在失稳节点。工序衔接关系通过逻辑约束链条进行校核,避免因施工节奏不匹配导致的局部风险叠加,从而形成贯穿施工全过程的风险识别路径体系。

2.3 多源信息融合判定机制

多源信息融合判定机制以数据协同计算为核心,将地质信息、施工监测数据与环境动态参数纳入统一分析框架,通过权重分配模型实现信息融合表达。不同来源数据在时间尺度与空间分辨率上存在差异,通过标准化处理与时间同步校正实现可比性转换。监测数据中的位移、应力与孔压变化趋势与地质结构参数进行关联分析,构建多维风险判别矩阵。环境数据中的降雨强度、温度变化及渗流状态被纳入动态修正因子,用于调整风险等级判定阈值。融合判定过程引入数据驱动与机理分析相结合的方式,通过特征提取与模式识别算法增强异常状态识别能力。多源信息之间通过耦合关系模型实现交叉验证,提高风险识别的稳定性与准确性,使复杂工况下的风险演化路径呈现更高可解释性与连续性。

3 分级管控机制设计

3.1 风险等级划分标准体系

高边坡施工风险等级划分标准体系以定量指标与定性评价相结合为基础,通过多维参数构建分级判定模型。地质条件指标涵盖岩体完整性指数、结构面发育程度及软弱夹层连续性,用于反映坡体内在稳定潜力差异。施工扰动指标包括开挖强度、支护滞后时间及振动影响程度,用于刻画人为作用对稳定状态的改变幅度。水文气象指标引入降雨强度、地下水位变化速率及渗流压力波动幅度,用于表征外部环境对边坡稳定性的动态影响。各类指标通过标准化处理后纳入综合评价函数,并采用分段阈值划分方式形成多级风险结构,使不同危险程度边坡单元具备清晰边界。权重分配过程结合地质敏感性与施工阶段差异进行动态调整,使风险等级划分具备阶段适应性与空间差异性,从而实现由静态分级向动态分级的转变,提升风险识别与管控的前置能力。

3.2 分级响应控制执行流程

分级响应控制执行流程以风险等级判定结果为驱动核心,通过多层级联动机制实现施工安全状态的动

态干预。低等级风险状态下侧重常规监测与参数跟踪,数据变化通过趋势分析模型进行周期性评估,中等级风险状态进入强化控制阶段,施工参数调整与支护措施优化同步实施,高等级风险状态触发紧急响应机制,施工活动进入限制或暂停状态。响应流程中设置数据触发阈值与时间响应窗口,用于控制干预时机的精确性。监测系统与施工管理系统之间通过数据接口实现实时联动,使风险信息能够快速转化为控制指令^[3]。各响应阶段均设置反馈校核环节,对控制措施实施后的边坡响应进行持续验证,确保调整措施与地层力学反应保持一致性。流程设计强调闭环控制特征,使风险识别、等级判定与执行措施形成连续反馈链条,提升施工全过程的动态安全调控能力。

3.3 责任划分及落实机制

责任划分及落实机制以施工全过程管理结构为基础,通过多层级职责分解实现风险控制任务的精细化配置。技术决策层负责风险评价模型构建与关键参数设定,对风险判定标准与控制策略进行统一约束。施工管理层承担现场执行与过程协调职责,将风险等级要求转化为具体施工指令,并对工序衔接进行动态调整。监测与检测单元负责数据采集与异常识别,对边坡变形、应力变化及水文状态进行连续跟踪,并形成数据反馈链条。各责任单元之间通过信息共享平台实现数据同步与状态互通,使风险信息在不同管理层级间实现快速传递。责任落实机制引入过程追溯与节点考核体系,对关键施工环节的执行质量进行量化评估。通过职责边界清晰化与执行流程标准化,使风险管控措施能够在施工全过程中持续落地,避免管理断层与执行偏差,从而提升整体安全控制效率与稳定性。

4 施工过程防控技术措施

4.1 支护结构优化加固技术

高边坡支护结构优化以力学稳定性重构为核心,通过多类型支护体系协同作用提升整体抗滑能力。锚固体系设计基于结构面产状与潜在滑移面分布特征,通过预应力调控增强深部岩体约束能力,使浅层松散体与深部稳定岩体形成整体受力结构。喷射混凝土层与钢筋网组合体系用于强化表层完整性,抑制裂隙扩展与局部剥落现象。框架梁结构通过空间网格化布置实现荷载再分配,将局部集中应力传导至稳定基岩区域。加固过程强调分级施作与同步协调,避免支护滞后导致的结构失稳窗口。材料性能选择侧重耐久性与抗腐蚀能力,适应复杂水文条件下的长期服役需求。支护体系设计引入变形协调机制,使刚度分布与边坡

变形模式保持一致,从而降低结构内力集中效应,提升整体协同稳定能力。

4.2 排水截水综合控制措施

高边坡排水截水系统以地下水动力路径重构为目标,通过地表与地下双层排水体系实现水压力分级释放。地表截水结构沿坡顶及坡面关键汇水线布设,用于拦截外部径流并引导至安全排放通道,减少入渗补给量。地下排水系统通过水平排水孔与竖向泄水通道组合布置,实现坡体内部孔隙水压力的梯度释放。排水结构设计依据渗透系数差异与含水层分布特征进行分区优化,使水流路径由无序扩散转变为可控导流状态^[4]。渗流场调整过程中需控制排水速率与坡体变形响应之间的匹配关系,避免快速降压引发结构扰动。防渗措施通过表层封闭与裂隙注浆处理降低水体渗入能力,减少软化效应对岩体强度的削弱。整体排水体系强调连续性与冗余性设计,使不同降雨条件下均能维持稳定的水力平衡状态。

4.3 实时监测预警技术应用

实时监测预警技术以多参数协同感知体系为基础,通过空间布设与时间连续采样实现边坡状态动态捕捉。位移监测系统用于识别坡体表层与深部变形差异,反映滑移趋势演化路径。应力监测单元布设于关键受力结构区域,用于追踪荷载传递过程中的应力集中变化。孔隙水压力监测反映地下水动力条件变化,对降雨入渗及渗流场重构过程进行实时反馈。数据采集系统通过高频率传输机制实现信息实时汇聚,并通过滤波与异常识别算法提升数据可靠性。预警模型基于多指标阈值组合与趋势预测方法,对风险演化速度进行分级判定。预警响应机制与施工控制系统联动,使监测结果直接转化为施工调整指令。系统设计强调数据连续性与预测前移能力,使边坡状态变化在失稳前期即可被识别并干预,从而提升整体安全控制时效性与准确性。

5 稳定控制效果及安全提升路径

5.1 边坡稳定性指标改善表现

高边坡稳定性评价指标在系统化风险辨识与多措施协同作用下呈现结构性优化趋势,主要体现在位移收敛速度降低、剪切变形发展受控及整体安全系数提升等方面。坡体水平位移与垂直沉降的时序曲线趋于平缓,变形增长由阶段性突变转向渐进收敛状态,表明内部应力重分布趋于稳定。深部位移监测结果显示潜在滑移面活动频率下降,结构面滑移活化程度受到有效抑制。孔隙水压力变化幅度明显减小,渗流场在

排水系统作用下趋于均衡状态,降低了软化效应对岩体强度的影响。支护体系约束效应增强后,局部应力集中现象得到缓解,荷载传递路径更加均匀。整体稳定性评价模型中安全储备指标上升,风险敏感区范围缩小,表明边坡从局部不稳定向整体可控状态转变,力学响应呈现更高一致性与连续性。

5.2 事故发生控制结果分析

施工安全事件控制效果在风险识别与分级管控体系作用下表现出显著下降趋势,主要风险类型发生概率明显降低。坡面坍塌与局部滑移事件的触发条件被提前识别并有效干预,使失稳过程在形成初期即被阻断。结构性破坏事件减少源于支护体系及时性提升与施工扰动控制强化,使边坡处于受控变形区间。监测预警机制对异常位移与孔压突变的响应能力增强,使风险演化窗口期缩短,减少突发性事故发生空间。施工工序优化后减少了不合理开挖与滞后支护情况,使人为诱发失稳因素得到系统抑制^[5]。气象水文影响在排水体系调控下得到削弱,雨季阶段风险波动幅度下降。事故控制结果呈现由点状发生向区域性稳定转变特征,安全事件呈现低频化与低强度化趋势,整体风险暴露水平持续降低。

5.3 工程推进效率提升情况

工程推进效率在安全控制体系完善基础上实现结构性提升,主要表现为施工组织连续性增强与工序衔接效率优化。风险等级动态判定机制减少了非必要停工时间,使施工决策依据更加明确,降低了不确定因素对进度的干扰。支护、开挖与排水作业之间的协调性增强,使关键工序等待周期缩短,施工节奏更加稳定。实时监测反馈机制提高了施工调整的及时性,使参数优化与现场作业同步进行,减少返工与重复施工情况。风险前置识别能力提升后,施工资源配置更加精准,设备与人员调度效率得到改善。稳定状态区域扩大使连续作业空间增加,提高了机械化施工利用率。整体进度控制由经验驱动转向数据驱动,施工过程呈现更高计划性与可控性,工程推进在安全约束下保持持续稳定增长态势。

6 结语

公路高边坡施工风险源辨识与防控体系在地质结构解析、施工扰动控制及环境耦合分析基础上逐步完善,形成覆盖风险识别、分级管控与动态响应的整体框架。多源数据融合与智能监测技术提升了风险识别精度,支护与排水协同措施强化了边坡稳定能力,分级响应机制优化了施工安全调控节奏,工程全过程呈

现更高安全性与连续性,整体施工风险处于可控状态, 安全管理水平与工程推进质量同步提升。

参考文献:

- [1] 石艳.预应力锚索抗滑桩技术在公路高边坡施工中的运用[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2025(1):056-059.
- [2] 曹会芳.预应力锚索施工技术在公路高边坡施工中的应用研究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2025(10):087-090.
- [3] 张俊.高速公路高边坡施工安全风险评估与控制[J].中国储运,2022(2):117-118.
- [4] 张腾霄,田海涛.高速公路高边坡施工及其风险评价与过程控制[J].云南水力发电,2023,39(10):72-76.
- [5] 李哲.多传感器与北斗高精度定位技术在高速公路高边坡自动化监测中的应用研究[J].科学与信息化,2025(20):163-165.