

边坡防护工程施工安全风险动态管理对策

王 威

新疆北新路桥集团股份有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘 要：边坡防护工程施工因其地质条件复杂、环境不确定性突出、工序交叉密集，长期面临较高的安全风险。传统静态管理模式难以适应施工过程中风险因素的快速演化，亟需向动态管理模式转型。本文从边坡防护工程施工安全风险的基本特征入手，系统分析了地质构造不确定性、气候水文时变性、施工扰动累积性及人为因素波动性等主要风险来源及其耦合机理。在此基础上，阐明了安全风险动态管理的理论内涵与基本原则，构建了涵盖风险识别动态化、风险评估实时化、风险预警智能化、风险控制精准化的全流程动态管理体系。进而从制度设计、技术支撑与组织保障三个维度，提出强化动态风险辨识与交底机制、建立多源信息融合的实时评估模型、完善分级预警与应急响应联动机制、推进数字化监控技术集成应用、构建全员参与的动态安全责任网络等系统化对策。研究旨在为边坡防护工程施工安全风险管控提供具有操作性的理论框架与管理路径。

关键词：边坡防护工程；施工安全；动态管理；风险辨识；实时预警

引言

边坡防护工程广泛分布于交通基础设施建设、水利水电工程、矿山露天开采及城市深基坑建设等领域，其施工质量与安全直接关系到主体结构稳定性和周边环境安全。然而，边坡防护工程施工常在复杂地质条件和开放作业环境中进行，面临滑坡、崩塌、滚石、脚手架失稳、高处坠落等多重致灾因素。近年来，随着工程建设向山区、深挖、高填方向发展，边坡高度不断增加、地质条件日趋复杂，施工安全风险呈上升态势。当前，多数边坡防护工程的安全管理仍沿用“编制预案—现场执行—事后检查”的静态模式，对施工过程中风险因素的动态演化关注不足。事实上，边坡防护工程施工周期虽相对较短，但工序转换频繁，且受降雨、开挖暴露时间、爆破震动等随机因素显著影响，风险状态在时空上持续变化。静态管理难以捕捉这种动态性，往往导致风险认知滞后、控制措施错位。因此，引入动态管理理念，建立适应边坡防护工程施工特点的安全风险动态管理机制，已成为提升施工安全水平的关键路径。本文立足于边坡防护工程施工实际，系统解析风险来源与演化规律，构建动态管理框架并提出具体对策，以期为现场安全管理实践提供参考。

1 边坡防护工程施工安全风险的来源与演化特征

1.1 风险来源的系统解析

边坡防护工程施工安全风险可归纳为四类来源：地质环境风险是首要因素，包括断层破碎带、软弱夹层、岩体产状不利组合、地下水位突增等，这类风险具有隐蔽性强、突发性高的特点；气候水文风险主要表现为强

降雨导致坡体饱和度骤增、孔隙水压力升高，以及冻融循环引发的岩体强度劣化，其作用具有显著的季节性波动特征；施工扰动风险源于开挖卸荷、爆破震动、机械振动及堆载等人工活动，可能打破原有坡体平衡状态，诱发失稳；人为因素风险涉及施工方案合理性、操作规程执行度、现场指挥协调性及作业人员安全意识等方面，属于可控性相对较高但波动性较大的风险类别^[1]。四类风险并非孤立存在，而是通过应力场-渗流场-损伤场的多场耦合相互关联，形成复杂的风险耦合系统。

1.2 风险在时间维度上的演化规律

边坡防护工程施工安全风险在时间维度上呈现显著的阶段性演化特征。施工准备阶段，风险主要源于地质勘察精度不足与方案设计缺陷，属于“潜在隐患期”；主体施工阶段，随着开挖面暴露、支护结构逐级施作，风险逐步释放并动态转移——锚杆钻孔可能揭露未预见的破碎带，混凝土喷射厚度不足可能削弱坡面约束力，风险处于“活跃波动期”；竣工验收阶段，虽然主体工程已完成，但临时防护措施拆除、排水系统通水试验等环节仍可能触发局部破坏，属于“残余风险释放期”。值得注意的是，风险演化并非单向递增或递减，而是受降雨事件、工序衔接等触发因素影响呈现“脉冲式”波动，这对动态管理提出了实时响应的要求。

1.3 风险在空间维度上的分布与迁移

边坡防护工程沿坡面纵向（高度方向）和横向（走向方向）均存在明显的风险差异性。一般而言，坡体中上部以拉应力控制为主，易产生张拉裂缝；坡脚以压应力集中为特征，可能发生剪切挤出；坡面局部凸起或凹

槽部位则为应力集中敏感区。随着施工推进,风险空间分布亦发生迁移:开挖卸荷使最大剪应力区向坡体内部转移,支护施作后应力峰值又向外迁移。这种空间迁移规律决定了风险管控必须“因段施策、动态调整”,而非全坡面采用统一控制标准。

2 安全风险动态管理的理论框架

2.1 动态管理的内涵与基本原则

安全风险动态管理是指以施工全过程风险信息持续采集为基础,以实时评估与预警为手段,以控制措施快速调整为特征的管理模式。其核心内涵可概括为“三个转变”:由事前静态预案向事中动态调控转变,由单因素分析向多因素耦合分析转变,由被动响应向主动预控转变^[2]。动态管理遵循四项基本原则:全程性原则——覆盖施工准备至竣工收尾的每个阶段;实时性原则——风险信息的采集、传输与处理须满足现场决策的时间分辨率要求;闭环性原则——形成“辨识-评估-预警-控制-反馈-再辨识”的完整循环;可操作性原则——管理流程和控制指令须简明清晰,适应一线作业班组的接受能力。

2.2 动态管理的流程框架设计

基于上述原则,构建五环节闭环动态管理流程:①动态辨识——通过地质复核、日常巡检、实时监测等手段,持续捕获风险状态变化信号;②实时评估——将辨识信息输入评估模型,确定当前风险等级与影响范围;③智能预警——依据预设阈值或趋势判定规则,发出分级预警信号;④精准控制——针对预警等级启动对应处置方案,调整施工参数或增补防护措施;⑤效果验证——对控制后风险状态进行再评估,确认风险降至可接受水平后进入下一循环。该流程以信息流为主线,以时间戳为标记,确保每个环节均有据可查、有时可溯。

2.3 动态管理与传统管理模式的区别

传统管理模式以施工组织设计中的安全专篇为基本依据,采用“编制-审批-交底-执行”的线性流程,其优势在于标准化程度高,但缺陷在于缺少中间环节的风险反馈与方案修正机制。动态管理则在传统模式基础上嵌入“监测感知层-数据分析层-决策调控层”,使安全方案成为一个“活文件”。两者并非替代关系,而是递进与互补——动态管理以传统管理为制度底座,叠加实时信息驱动的调节能力,从而在保持管理规范性的同时增强对不确定性的适应力。

3 边坡防护工程施工安全风险动态管理的关键对策

3.1 强化基于施工全过程的风险辨识与动态交底机制

风险辨识是动态管理的起点。针对边坡防护工程,应在设计阶段地质勘察基础上,于每道工序开工前开展

“二次地质复核”,重点核查开挖揭露的实际地质条件与勘察报告的偏差。建立“日辨识-周汇总-阶段更新”的动态辨识制度:每日由班组长会同安全员记录当班发现的异常迹象(如坡面渗水增大、微小裂缝扩展、锚杆钻孔异常等);每周由项目技术负责人组织风险状态评审;每完成一个施工台阶(或锚固区段)进行一次系统性风险清单更新。动态交底应摒弃“一次性交底”做法,改为“工序前交底+风险变化时补充交底+异常天气前专项交底”模式,确保作业层始终掌握当前关键风险点。

3.2 构建多源信息融合的实时风险评估模型

实时评估需要充分利用多源异构信息,包括地质勘探数据、施工监测数据(坡面位移、锚杆应力、地下水位等)、气象水文数据以及施工记录数据(开挖方量、喷锚进度等)。建议采用层次分析与模糊综合评价相结合的方法,构建边坡施工安全风险动态评估指标体系,各指标权重根据施工阶段动态调整——如开挖阶段“坡体位移速率”权重应提高,而支护阶段“锚固力”权重加大^[3]。在数据融合层面,可引入贝叶斯网络或D-S证据理论,将先验地质知识与实时监测数据进行概率推理融合,输出风险等级及置信区间。模型应具备轻量化特征,运算周期控制在30分钟以内,以适应现场快速决策需求。

3.3 完善分级预警机制与应急响应联动体系

预警是连接评估与控制的桥梁。建议将边坡防护施工安全风险预警划分为四级(红/橙/黄/蓝),每级对应明确的触发条件(如位移速率阈值、降雨强度-历时组合、锚杆轴力超限比例等)和响应措施。关键在于建立“预警发布-指令下达-措施执行-落实反馈”的快速链路。对于红色预警,应在5分钟内通知项目经理和监理单位,同步启动应急抢险预案;橙色预警应在30分钟内召开现场技术碰头会;黄色和蓝色预警则通过信息化平台自动推送至相关责任人并记录处理情况。应急联动体系需明确各岗位在预警状态下的职责清单,实行“预警即指令、指令即行动”的准军事化管理。

3.4 推进数字化监控技术在动态管理中的集成应用

数字化监控是实现动态管理的技术底座。边坡防护工程应根据坡体地质条件和风险等级,合理布设表面位移监测点(GNSS或全站仪)、深部位移测斜孔(阵列式位移计)、锚杆锚索测力计、雨量计及孔隙水压力计等传感设备。监测数据通过物联网上传至云端管理平台,结合GIS(地理信息系统)在三维地形模型上实时显示风险云图。推荐引入边缘计算节点,在施工现场完成初步数据处理与异常识别,减少数据传输延迟。此外,可探

索利用无人机定期巡检获取坡面高清影像,通过AI图像识别技术自动识别裂缝发育、坡面鼓包等变形迹象,作为定点监测的有效补充。数字化系统的建设应遵循“实用性优先、适度冗余”原则,避免片面追求设备高端而忽视现场维护能力。

3.5 建立全员参与的全过程动态安全责任网络

动态管理的有效运行最终依赖于人的执行力。应建立“项目部-作业队-班组-岗位”四级动态安全责任网络,层层分解动态管理任务。项目部负责总体风险评估与资源调配,作业队负责本区段风险状态跟踪与措施落实,班组长负责当班风险辨识上报,岗位人员负责本操作面的异常报告^[4]。创新推行“安全状态交接牌”制度——每班次作业前,由当班负责人对照动态风险清单逐项确认防护措施到位情况并签字移交。同时,将动态管理绩效纳入考核指标,对主动发现重大风险隐患并有效处置的人员给予即时奖励,形成“人人都是风险哨兵”的组织氛围。此外,定期组织动态管理专题培训,使全体人员理解并熟练运用辨识-上报-处置的基本流程,确保制度不流于形式。

4 动态管理实施保障条件与持续改进路径

动态管理的有效实施需要三类保障条件。制度保障方面,项目部应制定《边坡防护施工安全风险动态管理实施细则》,明确各岗位在动态管理中的具体职责、工作流程与考核标准,并将动态管理要求纳入分包合同和班组承包协议,实现管理要求的契约化约束。技术保障方面,需配置必要的监测设备和信息化管理平台,并建立设备定期校准与数据质量检查制度,确保信息源可靠。资源保障方面,应预留应急物资储备和动态调控专项经费,避免因成本压力导致控制措施滞后。持续改进是动态管理保持生命力的关键。每个施工区段完成后,应组织“动态管理复盘会”,比对各阶段风险预测值与

实测值的偏差,分析辨识盲区与评估模型缺陷,据此修正风险清单权重和预警阈值。通过多个项目的长期积累,逐步形成针对不同边坡类型(岩质、土质、岩土混合)、不同高度等级、不同气候区划的动态管理参数数据库,推动行业标准的迭代升级。

5 结语

边坡防护工程施工安全风险具有来源多样、演化动态、空间分布差异显著的特点,传统静态管理模式难以有效应对。本文通过系统解析风险来源与演化规律,构建了以动态辨识、实时评估、分级预警、精准控制、效果验证为主线的动态管理框架。围绕管理流程各环节,提出了强化全过程风险辨识与动态交底、构建多源信息融合的实时评估模型、完善分级预警与应急响应联动、推进数字化监控集成应用以及建立全员动态安全责任网络等系统化对策。动态管理的本质是将安全管理从“一次性设计”转化为“持续性适应”,其有效实施依赖于制度设计、技术装备与组织文化的协同支撑。未来研究可进一步探索基于人工智能的自动化风险评估方法,以及动态管理流程与企业安全标准化体系的深度衔接,持续提升边坡防护工程施工安全治理的精细化与智能化水平。

参考文献

- [1]黄润秋.岩石高边坡稳定性工程地质分析[J].工程地质学报,2021,29(1):1-13.
- [2]许强,汤明高,李为乐.滑坡监测预警技术研究进展[J].地质灾害与环境保护,2020,31(4):1-9.
- [3]张永双,吴瑞安,郭长宝,等.中国西部重大工程边坡稳定性研究新进展[J].工程地质学报,2022,30(3):621-636.
- [4]王浩,周志刚,林孝松.基于动态风险评估的山区公路边坡施工安全管理[J].公路交通科技,2021,38(5):45-53.