

强降雨诱发斜坡失稳施工防控体系研究

党 超

四川省第五地质大队 四川成都 610000

摘 要:强降雨作为诱发斜坡失稳的关键因素,在工程施工场景中极易引发滑坡、坍塌等严重安全事故,不仅威胁施工人员生命安全,还可能导致重大经济损失与工期延误。本文聚焦强降雨条件下斜坡失稳的复杂机理展开深入剖析,结合岩土力学理论与水文地质特性,揭示降雨入渗、孔隙水压力变化等因素对斜坡稳定性的影响机制。基于此,创新性提出一套科学、系统的施工防控体系,从高精度实时监测预警、主动与被动相结合的防护措施,到分级分类的应急处置预案等维度进行全方位构建。研究通过工程实例验证表明,该防控体系具备显著的可操作性与实用性,能够有效降低斜坡失稳风险,为类似工程的安全施工与稳定建设提供重要借鉴。

关键词:强降雨;斜坡失稳;施工防控;监测预警

斜坡失稳作为地质灾害的典型代表,在强降雨的持续作用下,其发生概率呈指数级增长。在工程建设进程中,斜坡失稳不仅严重威胁施工人员的生命安全,还会导致工程进度被迫停滞、建设成本大幅攀升,甚至对工程质量造成不可逆转的损害。因此,深入探究强降雨诱发斜坡失稳的内在机理,并构建一套科学完备、切实可行的施工防控体系,无论是从理论层面完善地质灾害防治研究,还是在工程实践中保障施工安全,均具有关键意义。本文系统梳理斜坡岩土体特性、降雨强度与历时、地形地貌等核心影响因素,紧密结合大量工程实践案例,从智能化监测预警系统搭建、多类型防护措施优化、分级应急处置流程制定等维度,构建全方位防控体系,为工程施工筑牢安全防线,提供强有力的技术支撑。

一、强降雨诱发斜坡失稳的机理分析

(一)强降雨对斜坡稳定性的影响

强降雨作为诱发斜坡失稳的关键诱因,其作用机制复杂且具有多维度影响。在降雨过程中,雨水通过土壤孔隙持续渗入斜坡内部,致使土体含水量显著增加。随着水分不断饱和,土体颗粒间的有效应力降低,孔隙水压力则呈指数级上升,直接削弱土体抗剪强度,使斜坡逐渐丧失力学平衡。同时,坡面径流在重力作用下加速流动,其强大的冲刷力不仅会剥离坡表细小颗粒,形成

侵蚀沟壑,还会持续掏空坡脚,破坏斜坡的支撑结构。研究表明,当降雨量超过土体渗透阈值时,斜坡失稳风险呈非线性增长,威胁工程安全与周边环境。强降雨条件下的斜坡稳定性示意图如图1所示。

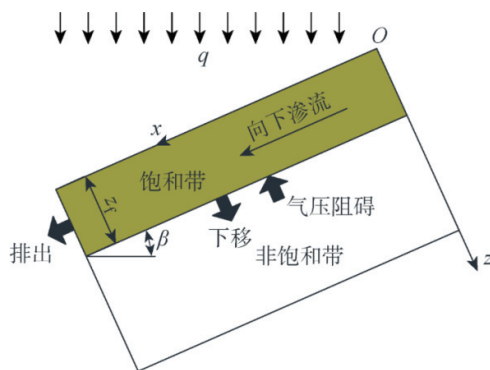


图1 强降雨条件下的斜坡稳定性示意图

(二)斜坡失稳的主要类型及特征

斜坡失稳主要表现为滑坡、崩塌和泥石流三种类型,各有独特运动特征与破坏模式。滑坡指斜坡土体或岩体沿圆弧状或平面状滑动面,发生缓慢且持续的整体性位移,大型滑坡体规模可达数万立方米,对工程设施和交通线路造成持续性破坏。崩塌具有极强突发性,岩土体在重力作用下瞬间脱离母体,高速坠落、翻滚冲击下方区域,伴随巨大冲击力与气浪。泥石流由强降雨驱动,土体、石块与水混合成特殊流体,运动速度快、携物多,凭借强大侵蚀、搬运和堆积能力,所经之处大面积淤积,摧毁建筑设施。虽然三者成因存在差异,但强降雨都是关键触发因素,因此需针对不同特性制定相应防控策略^[1]。

作者简介:党超(1986.7-),男,汉,陕西渭南人,硕士研究生,高级工程师,主要从事地质灾害防治和岩土工程勘察设计相关生产与科研工作。

（三）斜坡失稳的影响因素分析

斜坡失稳受地质、气象、地形及人类活动等多因素耦合作用。地质条件作为内在基础，岩土体的岩性、结构面发育程度及风化状态直接决定斜坡的先天稳定性：岩质坚硬、结构完整的斜坡抗变形能力强，而松散堆积层或节理裂隙发育的岩体则易失稳。降雨强度作为直接诱因，其持续时间与雨强大小决定土体饱和度与孔隙水压力增量，暴雨常成为斜坡失稳的导火索。坡面形态通过坡度、坡高与坡形间接影响稳定性，高陡斜坡因重力作用显著、临空面大，稳定性天然弱于缓坡。人类工程活动如切坡开挖、填方加载、排水不畅等，会人为改变斜坡应力分布与水文条件，加剧土体失衡风险。这些因素相互关联、共同作用，需系统分析以精准识别失稳隐患。

二、强降雨条件下斜坡失稳的监测预警

（一）监测技术及设备

在强降雨条件下，斜坡失稳监测预警是施工安全的关键防线。传统监测技术中，GPS、全站仪等实现毫米级坡面位移追踪，水位计、渗压计揭示坡体水力状态，雨量计与气象站记录降雨关键参数，为风险评估奠基。随着科技进步，新型监测技术应运而生：遥感技术凭借卫星和无人机影像，实现大面积斜坡形变的宏观监测，快速锁定风险区域；光纤传感技术通过埋植传感器，实时感知斜坡内部应力应变，具备高灵敏度与强抗干扰性。传统与新型技术协同运用，构建起空天地一体化监测网络，从微观形变到宏观态势全面把控，显著提升斜坡失稳监测的精准度与覆盖范围^[2]。

（二）预警模型的构建

斜坡失稳预警模型是监测系统的“智慧中枢”，其核心在于通过数据挖掘与机理分析实现风险预判。基于统计分析的模型，运用回归分析、相关性检验等手段，量化历史降雨数据与斜坡失稳事件间的关联，从而构建经验性预测模型；基于机器学习的模型，借助神经网络、随机森林等算法，对海量监测数据进行特征提取与模式识别，自动探寻斜坡失稳的潜在规律；基于物理机制的模型，依据岩土力学理论，结合斜坡地质结构与水文条件，搭建数值模型以模拟不同工况下的失稳过程。实际应用时，需综合考量工程地质条件、监测数据可获取程度及计算资源状况，灵活选择或融合多种模型。

（三）监测预警系统的实施

监测预警系统的有效实施是斜坡失稳防控的重要保

障，涉及多环节协同运作。设备安装阶段，需结合斜坡地形地貌、地质条件及潜在滑动面位置，科学规划监测点布局，确保关键区域全面覆盖；数据采集系统与专业处理软件紧密配合，实时采集、传输并分析位移、水位、雨量等数据，借助阈值报警机制自动识别异常变化。预警信息发布采取“多渠道、广覆盖”策略，综合运用短信、邮件、广播、APP推送等方式，及时将预警信号传递给施工人员、管理人员及应急部门。

三、强降雨条件下斜坡失稳的防护措施

（一）工程防护措施

工程防护措施作为斜坡失稳防控的核心技术手段，通过结构性工程干预增强坡体稳定性。挡土墙凭借重力式、悬臂式等多种结构形式，在坡脚形成刚性支撑，有效抵御土体下滑力；护坡工程采用浆砌石、混凝土网格等材料覆盖坡面，构建物理屏障，防止雨水冲刷与风化侵蚀。排水系统通过地表排水沟、地下排水管与集水井的立体布局，快速疏导坡体内部积水，降低孔隙水压力，削弱渗透破坏风险。锚固工程则借助锚杆、锚索深入稳定岩土层，将滑动土体与稳定岩体连接，形成锚固力以增强整体稳定性。实际应用中，需结合斜坡高度、坡度、岩土特性及失稳模式，经力学计算与方案比选确定防护措施，并严格遵循《建筑边坡工程技术规范》等标准开展设计施工，确保工程防护的长期有效性与安全性。

（二）植被防护措施

植被防护作为生态友好型防控手段，通过植物群落的生态功能提升斜坡稳定性。选择耐旱、根系发达的草本、灌木及乔木品种，利用其深扎根系在土壤中形成三维网络结构，增强土体黏聚力与抗剪强度；植物冠层如同天然雨棚，拦截雨滴直接冲击坡面，减缓雨水动能，减少坡面径流冲刷。此外，植被通过蒸腾作用降低土壤含水量，其凋落物分解后形成腐殖质，改善土壤结构、增加孔隙度，提升土壤保水保肥能力与抗侵蚀性能。实际应用中，需综合考虑区域气候条件、土壤酸碱度及斜坡坡度，选择乡土植物为主的适生品种，采用喷播、植生袋等多样化种植技术，并结合坡面修整、客土改良等预处理措施，常见植被的生态功能见表1。

（三）综合防护体系的构建

综合防护体系打破单一措施局限性，通过工程与植被防护的有机融合，构建多层次、立体化的斜坡防控网络。在体系设计阶段，基于斜坡稳定性分析与风险评估结果，因地制宜组合挡土墙固脚、植被护坡、排水降压

表1 植被防护对斜坡稳定性提升的植物种类及其生态功能表

植物种类	类型	耐旱性	根系发达程度	提升土体黏聚力	提升抗剪强度	土壤保水能力	土壤保肥能力	适用坡度
薯蓣	草本	高	深根型	强	中	高	中	10° -30°
沙枣	灌木	中	深根型	中	强	中	高	10° -45°
柞树	乔木	高	深根型	强	高	高	高	20° -50°
黑枸杞	灌木	高	浅根型	中	中	高	高	15° -40°
旱柳	乔木	高	深根型	强	高	高	中	10° -45°

等措施，形成“上截、中固、下挡”的系统防护布局。同时，将综合防护体系与自动化监测预警系统深度对接，利用位移传感器、渗压计等设备实时感知坡体变化，实现风险早发现、早处置^[3]。

四、强降雨条件下斜坡失稳的应急处置

（一）应急预案的制定

应急预案是应对斜坡失稳突发事件的行动纲领，其制定需紧密围绕斜坡地质结构、水文条件及潜在失稳类型展开。预案内容应涵盖应急组织架构搭建、物资储备规划、通讯网络构建及实战演练安排四大核心模块。应急组织作为指挥中枢，需明确应急指挥部各成员职责分工，确保决策指令高效传达；应急物资储备则需依据风险等级，足量配备支护材料、排水设备、救援器械等物资。

（二）应急处置技术

应急处置技术是控制斜坡失稳态势的关键手段，包含临时支护、排水处理与坡面修复等核心技术。临时支护通过架设钢支撑、打入抗滑桩等方式，快速增强坡体抗滑力，遏制滑动趋势；排水处理借助开挖临时排水沟、布设排水孔等措施，降低坡体孔隙水压力，减轻渗透破坏；坡面修复则采用挂网喷混凝土、植被护坡等技术，恢复坡面结构强度与生态防护功能。实际应用中，需依据斜坡坡度、岩土特性及失稳程度，科学组合处置技术。

（三）应急处置案例

应急处置案例是总结防控经验、优化技术方案的重要依据。通过对实际工程案例的深度剖析，可提炼出具有普适性的处置策略。如某山区铁路建设中，强降雨致使高陡边坡发生局部滑塌，施工方迅速启动三级响应，采用钢管桩临时支护稳定坡脚，配合大功率抽排水设备降低地下水位，并同步开展坡面锚固修复作业，成功化

解险情。

五、结论与展望

（一）结论

本文以强降雨诱发斜坡失稳为研究对象，深入剖析其力学、水文等失稳机理，针对工程施工场景，构建起一套涵盖监测预警、防护措施、应急处置的科学防控体系。研究中，系统梳理岩土特性、降雨参数、地形地貌等影响因素，结合实际工程案例，在预警环节引入智能传感器实时监测，防护阶段采用坡体加固与排水结合方案，应急时制定分级响应流程。经实践验证，该体系具备高可行性与实用性，能为同类工程施工安全提供有效借鉴。

（二）展望

伴随科技快速迭代，斜坡失稳防控技术将迎来革新突破。高分辨率遥感技术可实现大面积坡体形变的宏观监测，大数据与人工智能深度融合，能精准分析海量监测数据，提前预判失稳风险；生态防护技术通过植被根系固土与坡面防护协同，提升坡体稳定性；综合防护体系整合工程措施与生态治理，增强坡体抗灾韧性。后续研究需聚焦前沿技术落地应用，持续优化防控体系，为工程施工筑牢安全屏障。

参考文献

- [1] 冯合军. 铁路工程不稳定斜坡路段的预加固桩施工技术[J]. 浙江水利水电学院学报, 2023, 35(03): 86-90.
- [2] 张鑫. 基于过程的斜坡监测设计与预警方案研究[D]. 河南理工大学, 2023.
- [3] 王琰. 高速公路斜坡路基施工技术要点[J]. 交通世界, 2022, (10): 38-39.