

乌蒙山区雨季道路施工边坡稳定性动态监测与预警体系研究

杨海华

中国水利水电第十四工程局有限公司 云南 曲靖 655000

摘要：乌蒙山区雨季道路施工中，边坡稳定性是保障施工安全的关键。本研究综合运用多种先进技术，如位移传感器、倾角传感器、雨量计等，实时监测边坡变形及降雨量，通过智能化数据处理算法整合分析数据，构建动态监测与预警体系。该体系能及时发现边坡失稳征兆，迅速发出预警，为采取应急措施提供宝贵时间，有效避免边坡灾害，保障施工安全与进度。

关键词：乌蒙山区雨季道路施工；边坡稳定性；动态监测；预警体系

引言：乌蒙山区地形复杂，雨季时降雨量充沛，给道路施工带来了巨大挑战，尤其是边坡稳定性问题尤为突出。边坡滑坡、坍塌等灾害不仅威胁施工安全，还可能造成重大经济损失和人员伤亡。因此，本研究旨在探索建立一套适用于乌蒙山区雨季道路施工的边坡稳定性动态监测与预警体系，以保障施工安全，减少灾害发生，具有重要的现实意义和应用价值。

1 乌蒙山区雨季边坡稳定性影响因素分析

1.1 自然因素

降雨强度与持续时间：乌蒙山区雨季多暴雨，短时间高强度降雨使边坡土体迅速饱和，孔隙水压力骤增，抗剪强度大幅降低；持续降雨则通过入渗不断软化深层岩土，加剧滑坡风险。地形地貌与地质结构：该区多陡峭斜坡，坡度多在30°以上，易形成应力集中；且断层发育、岩层破碎，节理裂隙为雨水渗透提供通道，降低岩土体整体性。土壤类型与植被覆盖：以砂质土和粉质土为主，透水性虽强但黏聚力低；植被覆盖率低的区域，根系固坡作用弱，雨水直接冲刷地表易引发水土流失。

1.2 人为因素

道路施工活动对边坡的扰动较大。修建公路时的开挖、爆破等行为，会破坏原有边坡应力平衡，使坡体结构松散，雨季易发生坍塌。排水系统的设计与维护至关重要。若排水设施设计不合理，如排水沟坡度不足、未与天然水系衔接，或维护不当导致堵塞，会使雨水在坡面积聚，加重边坡渗水问题。施工材料的选择与堆放有影响。选用透水性差的材料会阻碍雨水排出，材料随意堆放在坡顶会增加坡体荷载，在雨水作用下易诱发滑坡。

1.3 综合因素分析

各因素间相互作用显著。例如，暴雨（自然因素）

会加剧排水系统缺陷（人为因素）的影响，而不良地质结构（自然因素）在道路施工扰动（人为因素）下更易失稳。乌蒙山区特有因素包括：高海拔导致的强降雨与冻融交替作用，喀斯特地貌的溶洞发育使边坡支撑力减弱，以及山区村民不合理垦殖加剧的植被破坏等。

2 乌蒙山区雨季道路施工边坡稳定性动态监测技术与方法

2.1 地面测量技术

全站仪与GPS设备的应用在乌蒙山区雨季监测中尤为关键。全站仪通过高精度角度和距离测量，可对边坡关键点位进行实时定位，尤其适用于地形复杂区域的局部监测；GPS设备则能实现全天候、大范围的三维坐标监测，结合RTK技术可将精度控制在厘米级，有效捕捉边坡整体位移趋势，弥补全站仪在恶劣天气下作业受限的不足。位移监测与沉降观测需制定系统化方案。位移监测通过在坡顶、坡脚及坡体中部布设监测点，定期测量水平与垂直位移量，绘制位移-时间曲线，判断边坡是否进入加速变形阶段；沉降观测则重点关注路基及坡体基础的竖向变形，采用水准测量法结合自动化沉降仪，实时记录雨后地基土软化引发的沉降数据，为边坡稳定性预警提供基础依据^[1]。

2.2 裂缝监测技术

裂缝计与光纤传感器的安装与使用需贴合山区特点。裂缝计多安装于坡体表面可见裂缝处，通过机械传动将裂缝宽度变化转化为电信号，量程通常为0-50mm，精度达0.01mm；光纤传感器则采用分布式布设，沿裂缝走向埋入岩土体，利用光信号衰减特性监测微小形变，抗干扰能力强，适合长期埋设在潮湿、多尘的施工环境中。裂缝变化评估方法包括定性与定量结合。定性评估

通过观察裂缝是否出现新的分支、是否伴随掉块现象判断稳定性；定量评估则依据裂缝计数据计算日变化速率、累计变形量，当速率超过3mm/d或累计变形达50mm时，需发出预警，同时结合裂缝走向与边坡应力分布，分析潜在滑动面位置。

2.3 地下水位与孔隙水压监测

水位计与渗压计的应用是雨季监测的核心。水位计采用投入式或浮子式设计，布设在边坡不同深度的钻孔中，实时记录地下水位变化，分辨率可达1mm；渗压计埋设于岩土体内部，通过测量孔隙水压力变化反映雨水入渗程度，尤其在粘性土边坡中，可精准捕捉孔隙水压骤升引发的抗剪强度降低信号^[2]。地下水活动对边坡稳定性的影响分析需结合监测数据。当地下水位上升速率超过5cm/d时，易导致坡体自重增加、有效应力减小；而孔隙水压峰值出现时间与降雨强度的关联性分析，可预判边坡失稳滞后效应，例如持续降雨后3-5天可能出现孔隙水压峰值，需提前采取排水措施。

2.4 遥感与无人机监测技术

高分辨率相机与雷达系统的应用提升了监测效率。无人机搭载高分辨率相机（像素 ≥ 2000 万），可获取边坡表面厘米级分辨率影像，通过三维建模对比分析坡体形态变化；雷达系统（如合成孔径雷达）则能穿透云雨，实现全天候监测，对植被覆盖区域的形变监测精度可达毫米级。大范围边坡变化的快速发现与评估依赖智能分析算法。通过无人机影像的时序对比，可自动识别新增裂缝、滑塌区域；雷达数据则通过干涉测量技术生成形变速率图，快速圈定不稳定区域，为施工单位提供大范围、低成本的宏观监测支持，尤其适合乌蒙山区狭长道路沿线的边坡监测。

2.5 综合监测平台的构建

多种监测手段的数据融合需解决时空匹配问题。通过统一坐标系将地面测量、裂缝监测、地下水监测等数据关联，采用卡尔曼滤波算法消除不同设备的系统误差，形成边坡稳定性综合数据集，例如将GPS位移数据与孔隙水压数据耦合分析，提升预警准确性。云计算与大数据技术的应用实现智能化管理。平台搭载云计算服务器，可实时处理每秒数十组监测数据，通过机器学习训练边坡失稳预测模型，结合历史降雨数据与滑坡案例，自动生成风险等级报告；同时利用大数据技术挖掘监测参数与边坡失稳的关联规律，为乌蒙山区雨季施工提供动态预警与决策支持。

3 乌蒙山区雨季道路施工边坡稳定性预警体系的建立

3.1 预警指标与阈值的设定

关键参数的预警阈值需结合山区特性制定：位移速率方面，日常监测中水平/垂直位移速率超过2mm/d即触发关注，连续3天超5mm/d进入预警状态；地下水位单日涨幅超10cm或孔隙水压达20kPa时需警惕；降雨量以12小时为单位，超过50mm设为警戒值，100mm以上直接关联高风险。这些阈值通过历史滑坡案例反演与现场试验数据校准，确保贴合乌蒙山区岩土体特性。不同预警级别的划分采用三色分级机制：蓝色预警适用于单一参数轻微超标（如位移速率3-5mm/d），提示加强监测频率；黄色预警针对两项及以上参数接近阈值（如水位涨幅8cm+降雨量60mm），需启动局部管控；红色预警对应多项参数超限（如位移速率超8mm/d+裂缝扩展3mm/d+暴雨持续），意味着边坡濒临失稳，需立即停工撤离^[3]。

3.2 预警机制与流程

数据采集、处理与分析流程形成闭环：监测设备每15分钟自动采集数据，经边缘计算节点预处理（剔除异常值）后上传至云平台；平台通过特征提取算法（如小波变换）识别数据突变点，结合时空关联模型分析多参数耦合关系，生成稳定性评估报告，全程耗时控制在30分钟内。预警信息的发布渠道与方式实现立体覆盖：蓝色预警通过平台弹窗通知技术人员；黄色预警增加管理人员短信推送，现场声光报警器启动低频提示；红色预警采用“三同时”机制—平台强弹窗、全员短信、现场高分贝报警+灯光闪烁，同步联动施工区广播系统。预警响应措施与应急预案分级对应：蓝色预警时加密监测至每小时1次，检查排水系统；黄色预警暂停坡底作业，调配应急物资（如沙袋、水泵）；红色预警执行“人、机、料”全撤离，设置警戒区，启用备用施工通道，同时联系地质专家远程会商。预案需每月演练，结合雨季特点动态更新撤离路线^[4]。

3.3 智能预警云平台的实现

云平台的架构与功能采用分层设计：感知层接入各类监测设备数据接口；数据层通过分布式数据库存储历史与实时数据；应用层包含稳定性评估、阈值管理、报表生成等模块；展示层提供Web与移动端可视化界面，支持边坡三维模型动态更新。数据实时监控与分析依托智能算法：平台每秒刷新关键参数曲线，通过LSTM神经网络预测未来24小时位移趋势；设置异常值自动标记功能，对突变数据触发人工复核机制，避免误报。针对雨季数据波动大的特点，内置降雨影响修正模型。预警信息的智能推送与反馈机制实现闭环管理：根据用户角色（施工员、监理、专家）推送差异化信息；接收方需在15分钟内确认反馈，未响应则自动升级推送层级；平台

记录每次预警的响应时长与处置结果，通过机器学习优化推送策略，提升应急效率。

4 乌蒙山区雨季道路施工边坡稳定性监测与预警体系应用实例

4.1 实例背景与监测方案设计

4.1.1 监测区域的选择与特点

选取乌蒙山区某高速公路边坡滑塌处置工程K12+230-K12,320作为监测对象，该区域为典型的碎屑岩陡坡，坡度45°-60°，表层覆盖厚5-8m的碎石土，基岩为中风化泥质粉砂岩，节理裂隙发育，雨季易发生浅层滑坡。区域年均降雨量1200mm，6-8月暴雨频发，且道路施工曾引发3处小型滑塌，对施工安全构成严重威胁。

4.1.2 监测设备的布置与安装

沿边坡走向布设3条监测剖面，每条剖面设置5个地面监测点，采用全站仪与GPS双模定位；在坡体表面可见裂缝处安装8台裂缝计，深部埋设4组分布式光纤传感器；钻孔布设6套水位计与渗压计，深度覆盖5-20m范围；同时配备无人机每周2次航拍，云平台实时接收数据。设备安装时避开施工扰动区，传感器与岩土体紧密耦合，确保数据准确性。

4.2 监测数据分析与预警效果评估

4.2.1 典型监测数据的分析

2025年6月30日暴雨期间，该区域12小时降雨量达86mm，监测显示坡顶GPS点水平位移达6.2mm/d，地下水位单日上升12cm，孔隙水压峰值达28kPa。裂缝计数据显示最大裂缝宽度从2mm扩展至11mm，光纤传感器捕捉到坡体内部3-5m深度的微小形变，各项参数均超过黄色预警阈值。

4.2.2 预警机制的触发与响应情况

当日16时系统自动触发黄色预警，10分钟内施工管理人员收到短信与平台弹窗，现场声光报警器启动。施工单位立即暂停作业，组织20名工人及6台设备撤离至50m外安全区，同时启用4台应急排水泵降低地下水位。

4.2.3 预警效果与实际验证

预警后24小时内，边坡未发生大规模滑塌，但坡脚

出现约20m³的小型坍塌，与预警提示的风险区域一致。经后期勘察，该体系成功提前6小时捕捉到失稳前兆，验证了预警阈值设定的合理性，响应措施有效减少了潜在损失。

4.3 问题与挑战

4.3.1 监测过程中遇到的问题与解决方案

暴雨导致部分GPS信号失锁，通过增加地面基准站数量、采用北斗/GPS双模定位解决；光纤传感器因土体挤压出现3处断点，后期改用铠装光纤并优化埋设工艺，提高抗干扰能力；地下水位计受泥沙堵塞影响数据连续性，定期采用高压水冲洗维护。

4.3.2 预警体系的挑战与改进方向

山区信号不稳定导致数据传输延迟，计划增设本地边缘计算节点；预警响应流程中各部门协同效率待提升，需建立常态化联合演练机制；未来拟引入AI图像识别技术，通过无人机影像自动识别初期滑塌迹象，进一步缩短预警响应时间。

结束语

乌蒙山区雨季道路施工边坡稳定性监测与预警体系的研究，通过深入分析自然与人为影响因素，综合应用多种高新技术手段，构建了一套科学、高效的监测与预警机制。实例验证表明，该体系能准确捕捉边坡失稳前兆，有效指导应急响应，显著降低施工安全风险。未来，我们将持续优化监测技术，强化预警体系智能化水平，提升跨部门协同效率，为乌蒙山区乃至更多复杂地质条件下的道路施工安全提供坚实保障。

参考文献

- [1]王海波.山区道路边坡支护设计与施工技术分析[J].交通科技,2022,(03):33-34.
- [2]李建伟,陈晓东.山区道路边坡稳定性分析与治理对策[J].岩土工程技术,2021,(04):48-49.
- [3]赵宇,王立刚.山区公路工程边坡支护及稳定性控制研究[J].现代公路,2023,(06):58-60.
- [4]杨柳.复杂地质条件下边坡支护设计及生态治理探讨[J].建筑施工技术,2022,(08):70-71.