

山区路桥服务区滑坡监测预警系统构建与处治效果评估

许鹏飞

湖北交投荆州投资开发有限公司, 湖北 荆州 434000

DOI:10.61369/ERA.2026030015

摘 要 : 随着人口的急剧增长和城市化的快速发展, 人类活动的空间范围逐渐扩展, 人类工程活动的规模不断加大, 加之受到暴雨、地震等极端自然因素的影响增多, 我国的滑坡灾害发生的次数和造成的损失呈增多趋势。以下聚焦山区路桥服务区滑坡防控核心需求, 系统阐述监测预警系统构建、处置技术体系及效果评估体系, 结合利咸高速纳水溪 A 服务区滑坡案例验证实践可行性, 为山区交通基础设施滑坡灾害防控提供技术参考与工程借鉴, 保障路网安全稳定运行。

关 键 词 : 山区路桥服务区; 滑坡监测预警; 滑坡处治技术; 处治效果评估

Construction and Treatment Effect Evaluation of a Landslide Monitoring and Early Warning System for Road and Bridge Service Areas in Mountainous Regions

Xu Pengfei

Hubei Communications Investment Jingzhou Investment and Development Co., Ltd., Jingzhou, Hubei 434000

Abstract : With the rapid population growth and urbanization, the spatial extent of human activities has gradually expanded, and the scale of engineering activities has continuously increased. Coupled with the increasing influence of extreme natural factors such as heavy rainfall and earthquakes, the frequency and losses caused by landslides in China have shown an upward trend. This paper focuses on the core needs of landslide prevention and control in road and bridge service areas in mountainous regions, systematically elaborates on the construction of monitoring and early warning systems, disposal technology systems, and effect evaluation systems. It validates the practical feasibility through a case study of the landslide at the Nashuixi A Service Area on the Lixian Expressway, providing technical references and engineering insights for landslide disaster prevention and control in transportation infrastructure in mountainous areas, ensuring the safe and stable operation of road networks.

Keywords : road and bridge service areas in mountainous regions; landslide monitoring and early warning; landslide disposal technology; treatment effect evaluation

山区路桥服务区是交通路网的关键节点, 承担着服务保障及路网衔接的关键作用, 但其多选址于地形复杂的汇水负地形或易滑地层区域, 滑坡灾害隐患突出。此类灾害不仅会直接损毁服务区建筑、路基桥梁等工程设施, 还会引起交通中断、路网瘫痪等连锁反应, 带来极大经济损失, 如利咸高速纳水溪 A 服务区滑坡造成多跨桥梁倾倒、60m 路基挡土墙毁坏及地方道路被覆盖封堵。山区滑坡防控存在监测精准度达不到要求、处治方案针对性欠缺、效果评估标准不统一的状况, 难以符合路桥服务区高水准的安全防控要求。基于此, 本文围绕滑坡监测预警系统搭建、处治技术体系应用与效果评估开展深入分析, 结合典型工程案例探索科学高效的防控路径, 旨在填补山区路桥服务区滑坡防治的技术空白, 为同类工程提供实践指引, 助力提高山区交通基础设施的抗灾能力与安全保障程度。

一、山区路桥服务区滑坡监测预警系统构建

(一) 监测指标体系设计

设计监测指标体系需全面覆盖滑坡形成及演化的核心节点, 结合山区路桥服务区地形地质方面特征与工程场景, 构建“地质环境、诱发因素、动态演化”三维指标体系。地质环境指标把焦点放在滑坡孕灾基底条件上, 涉及深部变形、岩体应力及地下水

位, 参考纳水溪滑坡的勘察结果, 重点关注易滑地层分布、崩坡积体厚度等关键参数。诱发因素指标以强降雨为核心, 搭配地表径流量、坡体含水量监测, 适配山区汇水负地形的水文效应。动态演化指标涵盖地表位移、坡面裂缝的发育进程、滑体整体稳定性水平, 直接反映滑坡从表层变形过渡到快速滑移的递进过程。单北斗监测系统可量化水平及垂直位移, 裂缝宽度及延伸的速率能直观体现滑坡活跃程度。各指标要明晰监测频率以及精度标

作者简介: 许鹏飞 (1980.02-), 男, 汉族, 湖北省荆门市, 工程师, 本科, 研究方向: 路桥。

准, 依靠多维度数据对接, 达成对滑坡风险的全面感知, 为后续预警分析给予齐全的数据支撑。

(二) 监测技术集成与优化

监测技术集成需同时兼顾常规手段及智能化技术, 形成优势互补的监测网络。常规技术方面, 留存采用人工巡查、钻孔勘探、挖探等普通手段, 用来核实滑坡边界、开展地质条件补充勘察, 如纳水溪滑坡应急处置期间的补充地质调绘与钻探工作, 为技术选定提供基础地质佐证。智能化技术聚焦高效精准监测, 融合单北斗自动位移监测、工程物探、无人机航测等技术, 达成地表与深部变形的实时动态捕捉。针对山区呈现出的复杂环境, 应实施技术适应性优化: 采用无线与有线融合传输方案解决信号遮挡问题, 为监测设备配置可起到防水、抗冲击作用的防护装置, 应对极端天气, 结合地形状况对监测点布局进行优化, 保证能覆盖滑坡后缘裂缝、前缘滑移带等关键地段。通过技术聚合与优化, 增进监测数据的连续性、精准度, 为预警决策筑牢数据后盾^[1]。

(三) 预警阈值确定与分级响应机制

预警阈值需借助监测数据统计分析、数值模拟以及工程案例复盘来综合量化。参考纳水溪滑坡的监测数据, 通过分析滑坡位移速率、裂缝扩展速率、地下水位涨幅等参数与滑坡失稳存在的相关性, 找出各指标的临界值, 如地表日位移超出5mm、裂缝单日的扩展量超出2mm, 即触发高风险预警。形成“低、中、高、极”四级风险的分级判定标准, 对应差异化的应对手段: 低风险阶段扩充巡查频次, 中风险阶段启动监测的加密化模式, 高风险阶段迅速组织施工人员、设备撤离, 极风险阶段开展交通封路及区域管控。建立多主体协同应急机制, 明确施工、设计、监理各单位及地方政府的职责界定, 如纳水溪滑坡中“发现险情、上报研判、应急处置”的闭环流程, 保证预警信息发布后1小时内即刻启动响应, 及时落实各项防控手段, 尽量把灾害损失降到最低。

(四) 监测预警系统整体架构

系统整体采用“四层架构”设计, 达成数据采集、传送、解析、发布的全流程闭环。数据采集层把单北斗地表位移监测站、深部测斜仪、应力传感器、雨量计、水文观测设备等不同类型监测设备整合起来, 适应纳水溪滑坡在地表形变、深层位移、地下水水位、应力全维度的监测需求, 保障数据采集的整体全面性。数据传输层采用无线与有线融合方案, 5G和北斗短报文守护无线传输的稳定性, 光纤为有线传输给予支撑支持, 解决山区信号传输不稳定问题, 保证监测数据实时完成上传^[2]。数据分析层采用专业数据处理平台, 具备数据筛选、趋势判定、阈值核对能力, 采用算法模型分析滑坡的演变趋向, 生成风险等级评定结果。预警发布层组建多渠道通知体系, 涉及手机APP推送、短信预警和应急指挥平台联动, 同时对接交通管控部门, 促成预警信息与封路、分流措施的快速搭连。系统具备可扩展性, 支持依据不同山区服务区滑坡规模及风险特征, 灵活调整监测设备的配置以及分析模型的参数。

二、山区路桥服务区滑坡处治技术体系与应用

(一) 核心处治技术应用与优化

核心处治技术以“支挡稳坡+排水减载+生态防护”作为核

心内容, 结合山区地质状况与工程要求不断优化。支挡工程是稳定边坡的核心手段, 矩形抗滑桩可按照滑坡规模对桩径、桩长与间距进行调整, 以满足巨型堆积土滑坡的承载要求, 钢轨桩则针对敏感构筑物防护场景, 通过密集排布强化抗滑刚度。排水工程聚焦汇水地形的水文隐患, 截水沟沿滑坡后缘环形布置, 支撑盲沟以树枝状形态分布来疏导坡面的渗水, 仰斜式排水孔直接到达滑体富水层, 形成“截、排、导”立体排水体系。生态防护与整形技术同步实施, 坡面整形可封闭裂缝、让坡体变得平顺, 喷播植草能实现固土与生态的恢复, 清方填方精准清除滑坡堆积体并回填损毁路基, 保障稳定状态并控制工程扰动范围, 平衡技术实用性与环境适应性。

(二) 复杂滑坡分区处治方案设计

复杂滑坡分区处理需根据滑坡规模、变形阶段以及风险等级精准施策。以纳水溪滑坡为例, 借助滑体编号HP1、HP2、HP3对区域加以划分, 并采取区别化的方案。HP1作为前期整治区域, 在原有抗滑桩基础上添设单排桩, 减小服务区场坪规模, 以降低荷载扰动, 坡体衔接处采用放坡设计。HP2为滑动呈现活跃态势的区域, 借助上下两排抗滑桩加强支护, 桩顶冠梁跟格宾挡墙协同受力, 配套采用钢轨桩挡土墙保护外侧电塔, 同时清除桩前堆积体降低下滑推力。HP3目前处于表层变形阶段, 以实施监测预案为主, 预先为抗滑桩布置预留位置, 若变形加剧则快速开启支挡施工, 分区设计充分顾及各区域地形高差、滑体厚度和周边构筑物的具体分布, 避免采取单一的处治手段, 提高处治针对性及经济性^[3]。

(三) 施工关键技术与质量控制

施工关键技术着重山区复杂环境下效率与安全的把控, 全流程均贯穿质量控制。施工组织按照“先排水后支挡、先上后下”原则进行操作, 先完成截水沟与排水系统, 为后续施工缔造稳定的环境。抗滑桩施工重点把控嵌岩的深度, 凭借渣样核对与地质补勘对桩长加以调整, 实现锚固效果; 桩间板、冠梁建设施工严格把控钢筋绑扎和混凝土浇筑质量, 维持结构的整体特性。安全管控适配山区天气特点, 雨天暂停边坡的开挖, 开辟施工便道与平台以减轻对坡体的干扰。同步实施质量监测工作, 实时监测桩体的垂直程度、坡面的平整程度与排水系统的畅通程度, 结合滑坡动态监测的结果调整施工参数, 对钢轨桩间距、挡土墙埋深等关键指标开展全程旁站监督工作, 保障工程质量符合I级防治要求。

三、山区路桥服务区滑坡处治效果评估体系

(一) 评估指标体系构建

评估指标体系依照“稳定性、工程质量、生态效益、经济社会效益”四维核心构建, 保证覆盖处治全效能。稳定性指标为核心, 涉及滑坡地表的位移速率、深部变形量、地下水位控制效果与稳定性系数, 直接体现处治对滑坡失稳风险的管控成效, 参考纳水溪滑坡监测数据的维度设定量化标准。工程质量指标聚焦关键设施性能, 涵盖抗滑桩承载力与入岩深度、排水系统的通行顺

畅率、挡墙结构的整体稳固性、坡面整形的表面平整度等，适应支挡与排水工程的关键技术要求。生态效益指标关注环境适配性，涉及坡面植被恢复率、水土流失管控程度、生态景观协调性，与喷播植草等生态防护措施的目标相契合。经济社会效益指标涉及交通恢复时效、工程投资控制、灾害损失降低比例，体现处治工程的实际应用意义。各指标明确权重及量化标准，形成科学全面的评价维度^[4]。

（二）评估方法与技术路径

评估方法运用“数据驱动+实地验证+综合研判”的多元融合方式。数据对比法通过处治前后监测数据，分析位移、水位、应力等指标变化趋势，量化稳定性改善效果，如对比纳水溪滑坡处理前后地表位移速率的区别。现场踏勘法直观核查工程实体质量，重点查看抗滑桩的完整度、排水系统功能的有效性、坡面植被生长的状态等，检查施工与设计的契合水平。数值模拟法借助专业软件计算滑坡稳定性系数，对不同工况下的处治效果进行模拟，为评估给出理论支撑。综合评价法借助加权评分机制，结合各指标表现得出整体评估结果，同时参考专家的评审意见对结论加以优化。技术路径遵循“数据收集、指标量化、分项评估、综合研判”的流程开展，确保评估结果客观精准，为后续优化途径提供支撑。

（三）评估流程与周期

评估流程分为阶段性评估、完工综合评估以及运营期跟踪评估三个环节。阶段性评估随施工进度同步开展，在截水沟、抗滑桩等关键工序完工后开展，关键检查单工序质量及初步稳坡效果，及时发现施工偏差并整改。完工综合评估在处治工程整体竣工后的1-3个月内实施，全面审查四维指标的具体表现，形成完整评估报告，明确处治工程是否达到设计标准^[5]。运营期的跟踪评估按每年进行开展，结合长期监测积累的数据，剖析滑坡稳定性的长期变化走向，检测处治效果的持久程度与适应状态。周期设定兼顾短期时效与长期成效，阶段性评估跟随施工节点灵活调整，完工评估聚焦短期成效，运营期评估看重长期稳定，形成包含“施工、完工、运营”阶段的全周期评估闭环，保障处治效果

始终符合规范。

四、案例分析—以利咸高速纳水溪 A 服务区滑坡为例

利咸高速纳水溪 A 服务区 K19+180~K19+560 段滑坡，是山区路桥服务区巨型堆积土滑坡典型案例，由 HP1、HP2、HP3 滑体组成，总体积 284.7 万 m³，危害等级为特严重。其成因是三叠系巴东组易滑地层为基底，受 2024 年 7 月强降雨诱发，叠加服务区场坪开挖造成的人工干扰，造成坡体急速地滑动，造成桥梁倒塌、路基破坏、交通阻塞。监测预警方面，采用单北斗地表位移监测、深部测斜、地下水位监测等多种方式，提前发现坡体下沉、裂缝等潜在险情，按照四级响应机制及时撤离人员、管控通行，未造成人员伤亡。处治方案实行分区施策：HP1 额外设置抗滑桩强化支挡，HP2 采用双排布抗滑桩联合钢轨桩和立体排水的组合方案，HP3 以实施监测预案为主，预留处治的空间。目前，截水沟全部完工，1360m 长坡面支撑盲沟和 19800 m² 坡面整形的工作推进有序，26 根抗滑桩施工已结束，滑坡的稳定性实现显著提升。该案例验证了“监测预警、分区处治”模式的有效性，为山区服务区巨型滑坡防控提供了实践借鉴^[6]。

五、结语

综上所述，山区路桥服务区滑坡防控需构建“监测预警、处治实施、效果评估”的闭环体系，把精准监测作为起始前提、科学处治作为核心要务、系统评估作为保障后盾。本文提炼的监测预警架构、分区处治方案以及综合评估手段，经纳水溪案例检验，具备较高的实践适配性。未来应进一步促进监测技术智能化、处治技术绿色化进步，优化防控标准与相关规范，为山区交通基础设施防滑坡灾害提供有力技术后盾，有利于实现路网安全稳定运作与区域交通可持续发展。

参考文献

- [1] 梁东, 冯茂秘. 北斗卫星导航系统在山体滑坡实时监测中的应用 [J]. 电子技术, 2025, 54(06): 154-155.
- [2] 赵丽华, 史康怀, 翟伟. 复杂山区滑坡监测设备抛投无人机智能路径规划 [J]. 大地测量与地球动力学, 2025, 45(03): 319-324.
- [3] 丁沛君. 山区高速公路边坡稳定性监测分析 [J]. 交通世界, 2024, (09): 48-51.
- [4] 张海生. 无人机贴近视摄影测量技术在贵州山区滑坡监测中的应用 [J]. 工程技术研究, 2024, 9(02): 208-210.
- [5] 陶宜权, 范文, 曹琰波, 等. 秦巴山区浅表层滑坡灾害监测预警平台设计与实现 [J]. 灾害学, 2023, 38(02): 219-225.
- [6] 陈磊, 李斌, 彭程, 等. 岩溶山区滑坡监测预警云平台设计与实现 [J]. 长江科学院院报, 2022, 39(06): 138-144.