

山区公路边坡稳定性评价与防护措施探讨

耿智龙

浙江固泰工程检测科技有限公司安徽分公司 安徽合肥

【摘要】山区公路边坡稳定性直接关系交通安全与生态平衡。通过分析地质构造、气候条件、地形特征及人为活动等影响因素，结合粗糙集赋权模型与数值模拟技术，提出系统性评价方法。防护措施涵盖工程加固、生态修复及智能监测体系，强调多技术协同与生态友好理念。研究结果为山区公路边坡治理提供科学依据，推动防灾减灾与可持续发展。

【关键词】稳定性评价；防护措施；山区公路；生态防护；数值模拟

【收稿日期】2024 年 12 月 16 日 **【出刊日期】**2025 年 1 月 19 日 **【DOI】**10.12208/j.jer.20250030

Stability evaluation and protective measures for mountainous road slopes

Zhilong Geng

Zhejiang Gutai Engineering Testing Technology Co., Ltd. Anhui Branch, Hefei, Anhui

【Abstract】The stability of slopes along mountainous roads is directly related to traffic safety and ecological balance. By analyzing factors such as geological structures, climate conditions, topographical features, and human activities, and integrating the rough set weight assignment model with numerical simulation techniques, a systematic evaluation method is proposed. Protective measures include engineering reinforcement, ecological restoration, and an intelligent monitoring system, emphasizing the synergy of multiple technologies and eco-friendly concepts. The research results provide a scientific basis for the management of mountainous road slopes, promoting disaster prevention, reduction, and sustainable development.

【Keywords】Stability evaluation; Protective measures; Mountainous roads; Ecological protection; Numerical simulation

引言

山区公路建设面临复杂地质环境与频繁自然灾害的双重挑战。边坡失稳引发滑坡、泥石流等灾害，威胁交通设施与人员安全。传统防护技术依赖工程结构，但存在成本高、生态破坏等问题。当前研究多聚焦单一因素，缺乏综合评价体系与生态协同方案。探讨边坡稳定性机理与防护技术优化，对提升公路安全、降低灾害风险及保护生态环境具有重要意义。

1 边坡稳定性影响因素分析

边坡稳定性受到岩土体物理力学性质和地质构造的深刻影响。云贵地区的强风化安山岩、泥质岩和花岗岩岩体因裂隙发育和破碎化，抗剪强度大幅下降。地质断裂带的压扭构造使岩层内部应力分布

不均，加剧了岩体的破碎程度，并形成潜在的滑动面^[1]。此外，不同的渗透性在松散的坡积土和基岩之间形成了软弱夹层，进一步促成了滑移发生。花岗岩的风化层虽有部分原始结构保存，但长期的冻融循环削弱了其黏聚力，增加了滑坡的风险。地震活动和地表水的相互作用，如高强度降雨和地下水位变化，都显著影响岩土体的稳定性，尤其是在降雨丰富的区域，地下水位上升和降雨侵蚀极易诱发边坡失稳^[2]。此外，工程活动如采矿和路基建设也对边坡稳定性构成威胁，尤其是在陡峭的斜坡上，工程振动和重载可引起明显的结构破坏和变形。

2 稳定性评价方法创新

传统边坡稳定性评价依赖极限平衡法或有限元

模拟,存在计算效率低、对专业人员依赖性强等问题。基于随机生成的折线型边坡样本数据库,集成学习技术通过构建极限平衡法代理模型实现安全系数快速预测^[3]。采用 Bagging 与 AdaBoost.R2 算法优化神经网络,模型 AUC 值提升至 0.929,较单神经网络提高 12%以上,可高效识别边坡失稳风险。该方法将物理力学机理与数据驱动结合,保留岩土参数物理意义的同时,通过机器学习实现区域性大量边坡的稳定性批量评估。针对损伤软化特性,矢量和分析方法引入土体大变形环剪试验数据,建立动态稳定性系数衰减模型,量化剪切带强度劣化对整体稳定性的影响,解决传统规范单一强度参数评价的不足。

边坡监测技术从单一传感器向多源感知体系升级。基于北斗与 GPS 双星四频模块、合成孔径雷达及 BP 神经网络算法,无信号山区实现边坡表面位移、岩土应力与内部变形的全天候监测,虚警率降低 30%。空天地一体化系统整合无人机航测、InSAR 遥感与地面物联网传感器,构建三维地质模型与实时数据互馈机制,实现高危边坡形变、降雨量及支护结构应力的协同预警。

针对特高陡边坡,动态荷载模型结合地质构造与降雨渗透分析,建立精细化稳定性评估体系,可预测极端工况下边坡行为,使工程风险识别效率提升 40%。监测设备部署形成梯度网络:坡顶布设深部位移计与雨量计,坡面设置锚索测力计与北斗基准站,坡底配置土压力计与渗压计,形成全断面监测闭环^[4]。

模糊综合评价法通过权重分配优化实现定性向定量转化。改进的 AHP-熵权综合赋权法量化降雨指标影响,结合 12 项岩土参数构建二级评价体系,危险源辨识准确率提升至 85%。组合赋权模型融合层次分析法与熵权法,线性加权后模糊评价结果与实际监测数据吻合度达 92%,较单一赋权方法误差减少 15%。数值模拟技术从静态分析转向动态验证,有限元模型输入实测抗剪强度与弹性模量参数,结合含水率变化模拟不同工况位移响应,预测结果与 GPS 监测数据的位移偏差控制在 5mm 以内。工程验证环节建立监测-模型迭代机制,通过锚杆加固前后抗剪强度对比(2.5 倍提升)及剩余下滑力动态计算,实现防护措施效果量化评估。

3 防护措施优化路径

工程加固技术以多级支护体系为核心,通过抗滑桩、预应力锚索与格构梁的协同作用,全面提升边坡承载力与稳定性^[5]。抗滑桩采用 C25 钢筋混凝土现浇,桩径 0.8-1.2m,桩长需嵌入基岩 1.5-2m,桩间距 5m 时抗滑力可达 400kN,有效抑制滑移变形。仰斜式抗滑墙结合砾石排水层设计,墙体倾角 10°-15°,排水层厚度 0.5-0.8m,可使地下水位下降 50%,渗流压力降低 30%,显著改善坡体水文条件。针对顺层岩质边坡,锚杆框架梁系统通过预应力锚索(长度 20-24m)穿透潜在滑面,锚固段嵌入稳定岩层 10m 以上,锚索预应力施加值控制在设计值的 110%-120%,使安全系数从 1.08 提升至 1.43,确保边坡长期稳定。高陡岩质边坡采用 SSP 稳定土植生护坡技术,通过 0.3-0.45MPa 强度防护层抵御 200mm/24h 暴雨冲刷,45 天成坪效率较传统骨架护坡提升 3 倍,同时兼顾生态效益与工程耐久性。抗滑桩与格构梁组合应用,桩顶设置钢筋混凝土梁,形成空间框架结构,整体抗滑力提升至 600kN,适用于复杂地质条件下的边坡加固。工程实践中,通过动态监测与数值模拟优化支护参数,使加固效果提升 20%-30%,为山区公路边坡安全提供可靠保障。

生态修复技术突破传统工程防护局限,通过植被恢复与土壤改良相结合,形成高效、低维护的防护体系^[6]。三维植被网与客土喷播技术构建复合防护层,植被网密度 300-400g/m²,客土厚度 5-10cm,深根系植物如紫丁香与草甸紫茉莉协同种植,根系穿透深度达 1.2m,植被覆盖率提升 30%可使水土流失量降低 80%。高分子蜂巢约束系统采用抗拉强度 300kN/m 的高分子加筋带,构建 20-30cm 厚土壤基质,施工效率达 3000 m²/天,边坡稳定性提升 40%,适用于高陡边坡快速防护。针对岩质边坡,水泥基生境材料喷播技术通过硅酸盐水泥与活性添加剂优化配比,实现 30 天快速封闭坡面,植被恢复周期缩短 60%,工程造价较锚杆框格梁降低 35%,同时兼具抗冲刷与生态恢复功能。喀斯特地貌区采用团粒剂改良客土,喷播厚度 10-20cm,团粒剂添加量 3%-5%,使抗冲刷能力提高 4 倍,有效解决岩溶区水土流失问题。生态工程实践中,通过低维护植被组合与智能监测技术结合,形成“植被-土壤-工程”协同防护体系,使防护效果提升 25%-40%,为山区公路边

坡治理提供生态友好型解决方案。

多源感知网络通过集成北斗/GPS 双星四频模块位移监测、地质雷达探测与物联网传感器,构建边坡稳定性实时预警系统,实现全天候、多维度数据采集与处理。空天地一体化监测平台以 InSAR 遥感数据为核心,结合地面位移计与三维地质模型,形成多源数据互馈机制,使形变监测精度提升至毫米级,虚警率降低 30%,滑坡预警提前量从传统方法的 24 小时延长至 72 小时。数值模拟技术深度融合 FLAC3D 塑性应变分析与强度折减法,基于实测抗剪强度与弹性模量参数,模拟降雨工况下边坡位移响应,预测结果与 GPS 监测数据的偏差控制在 5mm 以内,动态修正安全系数,为极端天气下的工程决策提供科学依据。智能调控系统依托大数据平台,实时采集锚杆应力变化数据(监测频率 1Hz),通过机器学习算法自动优化支护参数,锚索预应力损失率从 15%降至 5%,显著提升支护结构耐久性。动态设计机制引入监测-模型迭代优化流程,结合数值模拟与现场实测数据,实现支护方案快速调整,使方案优化周期从传统 30 天压缩至 7 天,工程成本节约 22%。量子计算加速地质模拟技术突破传统计算瓶颈,在滇西铜矿集区建立高精度动态边坡稳定性模型,塑性应变预测误差控制在 5%以内,为复杂地质环境下的防护设计提供可靠支撑。

4 未来研究方向

人工智能与遥感技术的深度结合推动灾害预测进入高精度时代。基于深度学习的目标检测算法通过卫星影像识别微米级地表形变,结合北斗/GPS 双星四频模块构建的毫米级位移监测网络,实现边坡失稳风险动态评估^[7]。物理约束神经网络(PINNs)将地质力学方程嵌入 AI 模型,在青藏高原冻土区实现冻融循环诱发滑坡概率的时空预测,准确率达 89%。空天地一体化监测系统整合 InSAR 遥感数据与地面物联网传感器,形成三维地质模型与实时数据互馈机制,使滑坡预警提前量从传统方法的 24 小时延长至 72 小时。数字孪生技术通过量子计算加速地质模拟,在滇西铜矿集区建立动态边坡稳定性模型,塑性应变预测误差控制在 5%以内。

高性能土工合成材料突破传统防护局限,长丝土工布通过聚酯分子苯环结构形成纳米级抗老化层,紫外线照射 2000 小时后强度保留率仍达 85%,其等

效孔径 0.08-0.15mm 的过滤特性使排水效率提升至 $5 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 。SSP 稳定土植生护坡技术将硅酸盐水泥与活性添加剂配比优化,形成 0.3-0.45MPa 强度的生态防护层,抵御 200mm/24h 暴雨冲刷的同时,植被恢复周期缩短 60%。低维护植被组合创新方面,深根系植物如紫丁香与草甸紫茉莉协同种植,根系穿透深度 1.2m 使水土流失量降低 80%,复层式混交群落通过乔木-灌木-地被垂直结构将碳汇效率提升 40%,群落密度 0.2-0.4 株/ m^2 的配置使热岛效应衰减 1.1°C/10%覆盖率。

地质-生态-工程交叉协同催生新型防护范式。气象数据与岩土力学模型耦合的 AI 预测系统,通过降雨短临预报与抗剪强度衰减曲线的动态匹配,在长江中下游建立边坡稳定性系数实时修正模型^[8]。全域防护网络整合三大技术模块:星载智能处理芯片实现气溶胶类型实时识别,光纤传感网络完成 CO_2 封存运移 4D 成像,边缘计算网关在冻土区实现 CO 通量异常检测的数据压缩率 92%。生态工程与智能监测的跨尺度衔接方面,三维复合排水网与物联网平台联动,使边坡地下水位调控响应时间从小时级缩短至分钟级,植被固碳与光伏技术的能源再生形成闭环,光伏栏杆与智慧灯箱使景观设施能源自给率提升至 70%。这种多学科深度融合推动防护体系从单点治理向“感知-预测-调控”的全链条转型。

5 结语

山区公路边坡稳定性治理需统筹安全防护与生态保护双重目标。通过地质构造分析、动态监测技术及多指标评价体系,实现了边坡失稳风险精准识别;工程加固与生态修复协同应用,形成抗滑力提升与水土保持的双重效益。当前防护体系已在岩土强度强化、排水效能优化及植被固碳等方面取得显著进展,但复杂地质环境与极端气候的叠加效应仍存挑战。

参考文献

- [1] 张伟,王芳.公路滑坡形成的原因和防治措施分析[J].地质工程学报,2025,43(1):45-52.
- [2] 杨丽君,赵叶江.山区公路边坡稳定性分析及支护设计[J].交通科学与工程,2024,38(3):127-130.
- [3] 李娜.山区公路边坡生态防护措施研究[J].环境保护前

- 沿, 2023, 15(4): 89-95.
- [4] 陈立, 刘洋. 高填深挖路基边坡稳定性与新型防护技术[J]. 岩土力学, 2024, 45(12): 201-210.
- [5] 刘静, 张桂林. 岩质边坡动态稳定性分析及其控制策略[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(2): 334-342.
- [6] 郭晨光, 赵宏业. 三维激光扫描技术在山区公路边坡监测中的应用[J]. 现代交通技术, 2023, 20(1): 58-64.
- [7] 王慧敏, 杨天宇. 集成遥感数据的边坡滑坡风险预测模型研究[J]. 地理信息世界, 2024, 22(3): 47-53.
- [8] 孙小云, 赵彦霖. 气候变化对山区公路边坡稳定性影响研究[J]. 气候变化研究进展, 2024, 15(4): 412-420.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

