

# 公路边坡稳定性监测预警技术与防灾减灾对策研究

王洪涛

河北九门口复线建设发展有限公司 河北 秦皇岛 066000

**摘要:**公路边坡作为保障道路安全运营的关键结构,其稳定性直接关系到人民生命财产安全和交通运输效率。近年来,受极端气候事件频发、人类工程活动加剧等因素影响,公路边坡失稳灾害呈多发、突发、群发态势,严重威胁公路交通安全。本文系统梳理了公路边坡失稳的主要诱因与破坏模式,深入分析了当前主流的边坡稳定性监测预警技术体系,包括传统监测手段与现代智能感知技术,并探讨了基于多源数据融合的预警模型构建方法。在此基础上,从工程治理、生态防护、管理机制和应急响应四个维度提出了系统化的防灾减灾对策。研究表明,构建“空-天-地”一体化的智能监测预警平台,结合精准的风险评估与科学的综合防治策略,是提升公路边坡灾害防控能力、保障国家交通大动脉安全畅通的根本路径。

**关键词:**公路边坡;稳定性;监测预警;防灾减灾;智能感知;风险评估

## 引言

公路交通是国民经济发展的命脉,而边坡工程则是公路建设中不可或缺的重要组成部分。据统计,我国已建成的高速公路总里程已超过17万公里,其中大量路段穿行于山岭重丘区,形成了数量庞大的人工与自然边坡。这些边坡在长期服役过程中,受到降雨入渗、地震扰动、冻融循环、植被根系作用以及车辆荷载等多种内外部因素的耦合作用,极易发生滑坡、崩塌、泥石流等失稳灾害。2020年贵州水城“7·23”特大山体滑坡、2022年四川雅安“6·1”芦山地震引发的系列边坡垮塌等事件,均造成了重大人员伤亡和经济损失,凸显了公路边坡安全问题的严峻性与紧迫性。传统的边坡安全管理主要依赖于定期的人工巡检和经验判断,存在时效性差、主观性强、覆盖范围有限等固有缺陷,难以应对突发性、隐蔽性强的边坡灾害。随着物联网(IoT)、大数据、人工智能(AI)等新一代信息技术的飞速发展,边坡监测预警技术正朝着自动化、智能化、网络化方向演进。如何有效整合多源异构监测数据,构建高精度、低延时的预警模型,并配套实施科学、高效的防灾减灾对策,已成为当前岩土工程与交通工程领域的研究热点与实践难点。

## 1 公路边坡失稳机理与主要诱因

### 1.1 边坡失稳的基本机理

公路边坡失稳的本质是边坡内部剪应力超过其抗剪强度,导致岩土体沿某一潜在滑动面发生整体或局部的位移破坏。根据极限平衡理论,边坡稳定系数( $F_s$ )定义为抗滑力矩与滑动力矩之比:

其中,和分别为第条块的黏聚力和内摩擦角,为滑

弧长度,为条块重量,为滑面倾角,为孔隙水压力。当 $< 1.0$ 时,边坡处于不稳定状态。这一理论框架虽为简化模型,但清晰揭示了影响边坡稳定性的核心力学参数,也为后续监测指标的选取和预警阈值的设定提供了理论依据。

### 1.2 主要诱发因素

降雨入渗是边坡失稳最普遍关键因素。持续强降雨增加岩土体自重,提高含水率,降低有效应力和抗剪强度,黏性土黏聚力急剧衰减;渗流产生静、动水压力,削弱边坡稳定性,多数滑坡发生在降雨后。地震以突发性和强大瞬时能量成为高危诱因,惯性力叠加下滑力,易触发临界稳定或含软弱夹层边坡失稳,汶川地震后灾区次生滑坡激增即为例证<sup>[1]</sup>。人类工程活动影响大,不合理切坡开挖削弱抗滑段,坡顶堆载增加下滑力,爆破施工扰动岩土体,地下开采牵动边坡变形,人为因素常与自然因素交织加速边坡劣化。长期风化使岩体强度劣化,边坡开挖应力释放可能催生新裂隙;特定条件下,大型乔木遇强风、动物洞穴也会破坏边坡结构。

## 2 公路边坡稳定性监测预警技术体系

### 2.1 传统监测技术

传统监测技术构成了边坡安全监测的基础。地表位移监测方面,全站仪和水准仪通过定期测量布设在边坡表面的监测点坐标或高程变化,能够获取高精度的累积位移量,但其依赖人工操作,无法实现连续观测,对于捕捉突发性、加速性的变形过程显得力不从心。相比之下,全球导航卫星系统(GNSS)技术实现了全天候、全自动的毫米至厘米级三维位移监测,特别适用于大范围、长距离的边坡监测,但其设备成本较高,且在峡谷、密

林等信号遮挡严重的区域性能会大打折扣。为了探知边坡内部的变形特征,深部位移监测不可或缺。测斜仪技术通过在钻孔中预埋测斜管,并利用探头逐段测量不同深度处的水平位移,能够有效揭示潜在滑动面的具体位置和深度,是目前深部位移监测领域公认的“金标准”。与此同时,地下水活动是影响边坡稳定的核心变量,因此对地下水位及孔隙水压力的监测至关重要。通过在边坡关键部位埋设渗压计或孔隙水压计,可以实时捕捉降雨入渗引起的水压力动态变化,为评估边坡在极端天气下的安全裕度提供直接依据。

## 2.2 现代智能感知技术

现代信息技术的发展催生了一系列更为先进和高效的智能感知技术。光纤传感技术(如BOTDR/BOTDA/OFDR)将普通的通信光缆转变为连续的分布式传感器,能够实现长达数十公里范围内应变和温度的准实时、分布式监测,空间分辨率可达厘米级。这种“感知即线路”的特性使其特别适合于线状分布的公路边坡,实现了真正意义上的无缝、长距离健康监测。合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术则从宏观视角提供了区域性的解决方案。它利用卫星或无人机搭载的SAR传感器,通过处理不同时相的雷达影像,反演出地表毫米级的形变信息。这种方法能够周期性地对广大区域内的边坡活动进行普查,成本效益极高,但其时间分辨率受限于卫星的重访周期,且对植被茂密地区的监测效果不佳<sup>[2]</sup>。无人机(UAV)与三维激光扫描(LiDAR)技术为边坡的精细化、快速化调查提供了强大工具。无人机摄影测量通过航拍获取高分辨率影像,并利用运动恢复结构(SfM)算法生成高精度的数字表面模型和正射影像,可快速掌握边坡宏观形态的变化。而机载或地面LiDAR则通过主动发射激光脉冲,能够穿透部分稀疏植被,获取真实地表的精细三维点云数据,从而精确计算土方量变化、识别微小裂缝等细节特征。此外,微震或声发射监测技术聚焦于边坡内部的破裂过程。岩土体在失稳前的破裂会释放出微弱的弹性波,通过布设传感器阵列捕捉并分析这些信号,可以反演内部破裂的位置、能量及其演化趋势,为判断边坡是否进入不可逆的加速破坏阶段提供关键的前兆信息。

## 2.3 多源数据融合与智能预警模型

面对来自不同传感器的海量、异构数据,单一技术手段的局限性愈发明显。因此,将多种监测技术获取的数据进行时空对齐与深度融合,构建一个全面、鲁棒的边坡健康状态画像,已成为行业共识。数据融合技术,如卡尔曼滤波、粒子滤波或多传感器信息融合算法,能够有效整合位移、应力、水压、降雨量等多维信息,消

除单一数据源的噪声与不确定性,显著提升监测结果的可靠性。在此基础上,预警模型的智能化是实现精准预警的核心。传统的阈值预警法虽然简单直观,但其静态的阈值设定难以适应不同边坡千差万别的地质条件和动态变化的环境因素。机器学习模型为此提供了新的思路。通过利用历史监测数据和对应的灾害记录,可以训练支持向量机(SVM)、随机森林(RF)或长短时记忆网络(LSTM)等算法,建立监测指标与边坡稳定状态之间复杂的非线性映射关系,从而实现动态、自适应的预警。更进一步,物理-数据双驱动模型代表了未来的发展方向。这类模型将经典的边坡稳定性力学理论(如极限平衡法、有限元强度折减法)与实时监测数据紧密结合,通过数据同化技术(如集合卡尔曼滤波EnKF)不断修正和优化模型中的关键参数,使得预测结果既能反映物理规律,又能紧贴实际工况,极大地提高了预警的科学性和前瞻性。最终,预警信息通常被划分为蓝(注意)、黄(预警)、橙(警报)、红(临灾)四个等级,每一级都对应着明确且可执行的应急响应预案。

## 3 公路边坡防灾减灾综合对策

### 3.1 工程治理对策

针对不同成因和规模的边坡隐患,采取针对性的工程措施是治本之策。首要任务是优化排水系统,遵循“截、排、疏”的综合治理原则。通过在坡顶设置截水沟拦截外来地表水,在边坡平台上布置排水沟疏导坡面汇水,并在坡体内部布设深层排水盲沟或倾斜排水孔,快速疏排地下水,从根本上降低孔隙水压力,这是提升边坡稳定性的经济而有效的方法。对于已经存在明显滑动迹象或推力巨大的边坡,则需采用强有力的支挡加固结构。抗滑桩因其能将巨大的抗滑力传递至深层稳定地层,常被用于治理大型深层滑坡;而预应力锚索框架梁或格构梁则通过将不稳定岩土体锚固于稳定基岩,并由梁体均匀传递锚固力,不仅加固效果显著,还便于后期进行生态绿化,应用极为广泛<sup>[3]</sup>。此外,对于几何形态不利的边坡,如上部过陡而下部平缓的情况,可通过在坡顶进行削方减载以减少下滑力,或在坡脚实施填土反压以增加抗滑段的重量,从而有效提高边坡的整体稳定性。

### 3.2 生态防护对策

将刚性的工程措施与柔性的生态修复相结合,不仅能提升边坡的长期稳定性,还能改善路域生态环境,实现安全与美观的统一。植被护坡是一种重要的生态防护手段,通过选择根系发达、适应性强的乡土植物进行喷播、植生袋或三维植被网防护,植物根系能像天然的“加筋材料”一样有效固结表层土体,显著减少雨水冲刷造

成的水土流失。同时,植物的蒸腾作用有助于持续降低土体含水率,从源头上抑制滑坡的发生。为了兼顾防护强度与生态功能,生态混凝土或植生混凝土等新型材料也得到了广泛应用。这类材料在保证必要力学性能的同时,通过预留孔隙或添加保水、保肥材料,为植物的生长创造了有利条件,成功实现了刚性防护结构与柔性生态系统的有机融合。

### 3.3 管理与制度对策

技术手段的有效发挥离不开健全的管理体系和制度保障。首先,必须开展常态化的风险普查与动态评估工作,建立覆盖全域的公路边坡风险数据库,对所有边坡进行风险评级,并利用实时监测数据进行动态更新,实现对风险隐患的精准画像和分级分类管理。其次,应大力推进智慧管养平台的建设,集成地理信息系统(GIS)、建筑信息模型(BIM)、物联网(IoT)和人工智能(AI)等前沿技术,打造一个集“监测-预警-评估-决策-处置”于一体的综合性管理平台,彻底改变过去被动抢险的局面,转向主动预防和精准治理<sup>[4]</sup>。最后,亟需健全和完善相关的法规与技术标准体系,对公路边坡从勘察、设计、施工到后期监测、养护的全生命周期各环节,制定统一、科学的技术规范和管理要求,明确建设、管理、养护各方的责任边界,为边坡安全提供坚实的制度支撑。

### 3.4 应急响应与公众参与

再完善的预防体系也无法完全杜绝灾害的发生,因此高效的应急响应能力是最后一道防线。必须针对不同的预警等级,制定详尽、可操作的应急预案,明确人员疏散路线、临时安置点、救援力量调配方案等关键内容,并定期组织跨部门的实战演练,确保在灾害真正来临时能够迅速、有序地展开行动。与此同时,预警信息的有效传达至关重要。应建立权威、高效、多渠道的预警信

息发布机制,通过手机短信、交通广播、车载导航APP推送等方式,确保预警信息能在第一时间触达所有可能受影响的司乘人员和周边居民。在此基础上,加强全社会的防灾减灾知识普及教育,提升公众的风险意识和自救互救能力,也是减轻灾害损失的重要一环。长远来看,还可以探索引入巨灾保险等金融工具,通过市场机制分散和转移边坡灾害可能带来的巨大经济损失风险,为灾后重建提供资金保障。

## 4 结语

公路边坡稳定性问题是复杂系统工程,涉及多学科。研究表明,单一监测技术难满足现代公路边坡精细、智能管理需求,“空-天-地”一体化立体监测网络,结合多源数据融合与AI智能预警模型,是未来核心方向。要坚持“以防为主、防治结合”,强化监测预警,注重源头治理和过程管控,提升边坡自身“免疫力”。构建基于数字孪生的公路边坡智慧管养平台,实现风险可视化、预警智能化、决策科学化,是提升行业治理能力现代化的必由之路。未来,随着5G等技术成熟应用,监测预警将更实时精准,防灾减灾对策更主动高效,最终构建韧性、安全、绿色的现代化公路交通网络,护航国家经济社会高质量发展。

## 参考文献

- [1]张继成,王剑松.公路路基陡峭边坡稳定性及变形评估分析[J].中国新技术新产品,2025,(19):94-96.
- [2]马盛盛,李文,李邦涛.公路路基破碎地质边坡稳定性及加固措施分析[J].黑龙江交通科技,2025,48(09):25-28.
- [3]张越超.公路路基边坡稳定性及防治措施应用探析[J].城市建设,2025,(17):74-76.
- [4]王亨.公路路基高边坡稳定性要求及防护措施[J].汽车周刊,2025,(09):83-84+93.