

Research on road disaster chain monitoring and risk control under complex geological environment

Jinhui Ye

XinJiang Transportation Planning Survey and Design Institute Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830006, China

Abstract

under the background of the continuous promotion of transportation infrastructure construction in mountainous areas, the frequent occurrence of extreme weather events and the intensification of geological environment disturbance, the disaster chain risk faced by Road Engineering presents the characteristics of diverse types, complex trigger mechanism and high uncertainty of transmission path. The traditional engineering disaster prevention mode with single disaster as the core can not meet the safety requirements of road system under the condition of coupling evolution of disaster chain, which leads to the increase of the occurrence probability of landslide accumulation blockage, collapse impact destruction, debris flow blockage overflow and other disaster sequences, and has a superimposed and even amplified impact on the safety of road operation. This study shows that the comprehensive method of multi-dimensional monitoring, dynamic identification and risk hierarchical management and control can significantly improve the resilience level of the road system in the disaster chain environment, which is of great significance to promote the transformation of transportation infrastructure in mountainous areas from "post disaster recovery" to "active prevention".

Keywords

complex geological conditions; Road works; Disaster chain; Monitoring system

复杂地质环境下道路灾害链监测与风险控制研究

冶金辉

新疆交通规划勘察设计研究院有限公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830006

摘要

在山区交通基础设施建设不断推进、极端气候事件频发及地质环境扰动加剧的背景下, 道路工程所面临的灾害链风险呈现出类型多样、触发机制复杂、传播路径不确定性高等显著特征。传统以单灾种为核心的工程防灾模式难以满足灾害链耦合演化条件下道路系统的安全需求, 导致滑坡—堆积—堵塞, 崩塌—冲击—摧毁, 泥石流—堵塞—漫溢等灾害序列的发生概率提升, 并对道路运行安全形成叠加性乃至放大性影响。本研究表明, 采用多维监测、动态识别及风险分级管控的综合方法, 可显著提升道路系统在灾害链环境中的韧性水平, 对于推动山区交通基础设施进入从“灾后恢复”向“主动预防”转型具有重要意义。

关键词

复杂地质条件; 道路工程; 灾害链; 监测体系

1 引言

山地丘陵地区在我国西北地区、新疆及周边干旱-半干旱地带广泛分布, 其地形起伏大、地质构造活动强、岩土体结构破碎, 决定了道路工程长期处于高地质灾害暴露度环境。随着山区高速公路、国省干道以及乡村交通网络展开大规模建设, 人类工程活动如边坡开挖、弃渣堆放、隧道施工、坡脚扰动等改变地表能量平衡以及岩土结构, 致使原本潜伏的地质灾害链拥有了更易被触发的条件。

2 复杂地质环境下道路灾害链的形成机理与演化特征

在西北地区尤其是新疆常见的构造活跃、岩性非均质与强烈干湿循环共同作用的地带, 道路工程把山体、坡麓、沟谷以及河滩等不同地貌单元硬性连接起来^[1]。引发了边坡—路基—桥涵—河道的多场耦合系统, 其致灾源首先来自介尺度斜坡单元稳定性的削弱, 岩体节理裂隙的连通度在卸荷松弛、风化劣化以及施工扰动作用下有了明显提高, 软弱夹层与断层泥在降雨入渗或者库水涨落时产生渗透—软化效应, 孔隙水压力快速上升并降低有效应力, 剪切带逐渐贯通形成潜在滑移面。当暴雨、地震或者交通循环荷载提供外部能量脉冲时, 局部破坏超过临界阈值, 由点性失稳扩展成面性失稳, 工程材料的力学—水化—温度耦合同样不能被忽

【作者简介】冶金辉(1984-), 男, 本科, 工程师, 从事智慧交通、机电工程、交通信息化、地质灾害监测研究。

视, 细粒土路基在长期饱水与冻融循环中出现结构性衰退, 粒径级配失衡引发细料迁移与管涌, 刚柔复合防护一旦局部失效, 会在界面处形成应力集中与渗流短路, 促使破坏前沿迁移。以上这些因素借助物质通量与能量通量在系统中的传递与放大, 构成从边坡失稳、碎屑汇流、堵排失灵到路基沉降或桥台掏蚀的一体化致灾链条, 其内在逻辑是多源触发、阈值控制与通道效应协同主导的跨尺度演化。

灾害链的演化有十分突出的阶段性、放大性以及记忆效应^[2]。从时间序列方面来看, 前期属于隐性累积阶段, 具体表现为裂隙张开度呈现缓慢增长态势, 含水率存在季节性波动情况, 细观结构逐渐松弛, 微小变形长期叠加在一起, 中期进入触发一级联阶段, 短历时的强降雨或者地震剪切扰动会使孔压急剧上升, 浅层土体或者卸荷层首先出现滑移与坍塌现象, 碎屑在沟谷或者路堑内汇聚形成高含水率的泥石流与滚石流, 接着冲击挡墙与排水构造物并造成堵塞, 局部漫顶以及水流改道使得冲刷点位向前移动并对桥涵基础产生掏蚀, 后期为扩展—重构阶段, 路基差异沉降与路面开裂改变了表面径流路径, 新的汇流通道与回流渗透带巩固破坏格局, 导致同一暴雨重现时阈值降低、响应提前, 体现出系统记忆。从空间组织角度而言, 灾害沿着“坡面—沟槽—路面—桥涵—河道”呈现网络化传播, 有顺坡向的重力输运链, 也存在“河岸冲刷—坡脚失稳—上部滑塌”的逆向反馈链, 在不同地质条件控制下可归纳出若干典型路径: 在强风化花岗岩与厚层残积土区域, 常见“浅滑—沟汇—泥石流—涵洞堵塞—漫沟冲刷—路基淘空”的高频链, 在岩溶发育区域, 溶洞—陷穴体系诱发“暗河顶托—地表塌陷—路面断裂—排水失灵”的突发链, 在高寒季冻区, 则表现为“冻胀松弛—消融增水—孔压超限—台背空洞—台身掏蚀”的季节性链。

3 道路灾害链的多源监测体系构建与链式识别方法

在灾害链主导的山区道路工程里进行多源监测体系构建时, 监测体系构建需摆脱传统“单点—单灾种—单参量”模式, 形成“多源数据—多尺度响应—多物理场耦合”的综合监测框架^[3]。此框架核心在于把地表、地层内部、区域尺度以及道路运营状态的多维信息耦合成一条连续的链式监测序列, 以此来反映孕灾体从隐伏累积、加速失稳到链式扩展的整个过程动力特征。地表监测着重捕捉宏观变形与裂隙活动, 借助 GNSS、全站仪、倾斜计以及高密度光纤传感技术来获取位移、应变及散裂能量的连续时序数据, 光纤沿着坡面与路基布设后, 可形成“分布式敏感带”, 实时记录坡体应变梯度的细微变化, 特别适合用于识别裂缝扩展与局部剪切带发育的早期迹象。地表微震阵列用于捕捉岩土体微破裂事件, 其能量等级、事件密度与空间聚集性可作为孕灾体进入不稳定阶段的关键指标。

地下监测着重关注渗流场以及应力场在底层的变化情

况, 由孔压计、深部位移计、地下水位监测井以及孔内视频探测共同构成内部观测体系, 借助该体系可识别降雨入渗之后孔隙水压力的峰值时滞现象、深部剪切带的活动频率以及结构面错动所产生的突发变化, 在软弱夹层与堆积层厚度比较大的区域有着不可替代的作用。遥感监测可在西北干旱区提供区域尺度上的整体视角, 其中 InSAR 可用于识别毫米级的慢变形区, LiDAR 以及倾斜摄影则用于重建沟谷的几何形状、识别细微裂缝以及落石源区, UAV 定期进行巡航可快速获取雨前后坡面的变化信息, 为链式灾害提供关键的证据, 道路运营监测依靠沉降传感器、加速度计、车辆轨迹异常识别以及交通流量分析来反映系统响应层面的安全状态, 其作用是判断灾害链是否已经传递到道路结构或者运营容量层面, 实现结构安全与交通安全的协同评价。

链式识别方法对于灾害链的识别而言, 不能仅仅依靠某一个监测指标出现超限情况, 而是需要对多个物理场的协同变化状况加以判断, 构建起“环境因子—触发因子—响应指标—链式路径”这样一个综合判断模型, 孕灾环境识别依靠地质剖面、节理裂隙统计、覆盖层厚度、软弱带位置以及坡脚支挡条件等方面, 来构建坡体结构与水文动力的基础模型, 以此判定潜在危险单元。触发因子识别着重关注降雨强度、累计雨量、孔压增幅速率、微震活动突跳以及渗流方向突变等信号, 借助动态阈值模型来识别“由稳态向非稳态”的那个关键时刻, 链式演化识别强调多参量时序的耦合判断, 像“位移加速度—孔压峰值—微震密度”同步提高就意味着坡体已经进入加速蠕变阶段, “沟道堵塞—水位突涨—冲刷能突增”这种组合代表泥石流链条正在形成, “路基差异沉降—路面裂缝扩展—交通轨迹异常”则是灾害链传递到道路结构与运营层的关键信号。

如图 1 所示, 灾害链从“复杂地质环境—孕灾体变化—触发因子—初始失稳—链式扩展”按因果序列推进; 多源监测作为贯穿全链的感知底座, 将地表形变、地下孔压与渗流、遥感慢变形以及道路运行状态在同一时间轴上汇聚, 实现对关键阈值跃迁的联合刻画。基于此, 风险识别由单指标超限转向多物理场协同判读, 预警触发机制不再依赖单一雨强或位移阈值, 而是识别“位移加速度—孔压峰值—微震密度”同步增强等复合信号^[4]。

4 基于灾害链机理的道路风险控制策略体系

在链式灾害背景之下, 主动控制与源头削弱策略里, 道路风险控制的核心已不再仅仅局限于针对单一灾害单元开展事后治理, 而是一定要依照“源头削弱—路径阻断—系统韧性提升”这样的整体逻辑, 达成对链式传播路径的前置干预, 源头削弱所强调的是, 在孕灾体还没有进入非稳态阶段以前, 借助结构性工程措施去改变边坡与路基的能量储备以及力学特性, 以此减弱初始扰动的触发可能性。在强风化层与厚积层坡体当中, 借助削坡缓坡、卸载减载、坡面修形

以及重塑地形单元,可降低坡面重力势能,借助锚索、抗滑桩、框架梁与微型桩联合体系提高坡体整体黏聚力与抗剪强度,让潜在滑动面难以贯通,水动力控制在源头治理方面有着主导作用,高效截排水系统可降低孔隙水压力,再加上暗排井、水平排水孔与地表排水沟的组合布置,可以形成渗流场的渐变层,使水压峰值滞后且减弱,从根本上降低由降雨触发的链式破坏风险。在崩塌源区,依靠岩体针固、喷射混凝土—钢筋网加固、主动防护网与锚杆加固可改善结构面稳定性,减少岩块初始脱落,而在泥石流易发沟道源区,对松散堆积体进行清理、固结或者植被固坡,可减少物源供给量并提高坡面拦截能力,在链条的最初环节实施削弱,道路布局与工程设计中的前置控制同样十分关键。借助沿线地质分区与危险性评价来优化路线方案,在高风险斜坡、断层破碎带与沟谷出口避免大规模开挖与重工程布置,在不可避免的高危险段,则要实施本构改良技术,比如采用抗震型挡墙、柔性半柔性防护带、消能结构与深基础结构,让道路在灾害初始阶段保持结构稳定,为后续控制留出时间窗口。依靠上述源头削弱策略,可有效抑制灾害链的初始激发,使系统从根本上降低进入加速破坏阶段的概率^[5]。

在灾害链已然形成或者呈现出明显演化趋势的情形下,路径阻断以及系统韧性提升变成了防止链式灾害蔓延以及道路功能丧失的关键所在,路径阻断是要针对链式传播的关键节点去构建隔离以及能量耗散机制,让灾害不容易跨越从“源—道—路”的连续路径,在滑坡—堆积—路基冲击链里,可借助抗冲刷型挡墙、分级拦截沟、阻滑台阶以及缓冲平台来削减碎屑体的运动能量,在崩塌链当中,借助柔性防护网、拦石坝、加高加厚抗冲墙等结构达成对落石运行轨迹的空间约束,在泥石流链条中,在沟道沿线布置拦渣坝、减能坎、沉砂池,保障漂砾与泥浆的拦截、沉淀以及分流,并且保证涵洞进口的防堵与导流能力,以此避免“堵塞—漫溢—冲刷—淘空”的二次链式放大。对于渗流致使的路基沉陷链,可借助竖向排水井、塑料排水板与砂井系统改变地下水动力路径,让路基形成“快速泄压—缓释水头”的调节层,阻断孔压突涨引发的结构性破坏。

系统韧性的提升聚焦于道路整体针对灾害链的承受、吸收以及恢复能力,这是防止灾害链在道路系统内造成全域性破坏的关键要点,借助路基与路面材料的本构提高方式,像运用土工格栅、加筋体、多级复合结构以及高模量基层等,可提高整体刚度并提高差异变形适应性,桥隧结构借助由抗冲刷设计、深基础扩散桩、洞口缓冲平台与反压结构所构成的安全系统,在灾害链冲击下可维持承载能力与稳定性。

5 结语

复杂地质环境下,道路灾害已不再是孤立的单灾种问题,而是由多源扰动、多物理场耦合与多环节放大共同驱动的链式演化过程。本研究在系统梳理道路灾害链机理的基础上,构建了多源监测体系与链式识别方法,并提出源头削弱、路径阻断与系统韧性提升相结合的综合风险控制策略。研究表明,只有在工程建设、运行管理与应急防控等关键环节形成连续化、前置化与智能化的协同机制,才能真正提升道路系统在复杂地质环境中的适应力与恢复力。

参考文献

- [1] 敬麒麟,王宇,吕玉海. 基于地质环境分析的复杂山区道路防护工程设计[J]. 科技资讯,2024,22(18):195-197.
- [2] 颜良超,严俊龙,吴辉通,等. 复杂地质条件下道路与桥梁施工的关键技术研究[J]. 模型世界,2025(16):187-189.
- [3] 周文博,刘静. 城市道路在复杂地质条件下线路选择及边坡治理理念研究[J]. 城市道桥与防洪,2024(11):91-93.
- [4] 刘秋红,王倩,朱家栋. 露天煤矿区环境地质灾害链风险评价[J]. 能源与环保,2025,47(9):96-103.
- [5] 李兴江. 浅析复杂地质环境下高边坡多级消能技术[J]. 科技创新,2022(29):60-64.

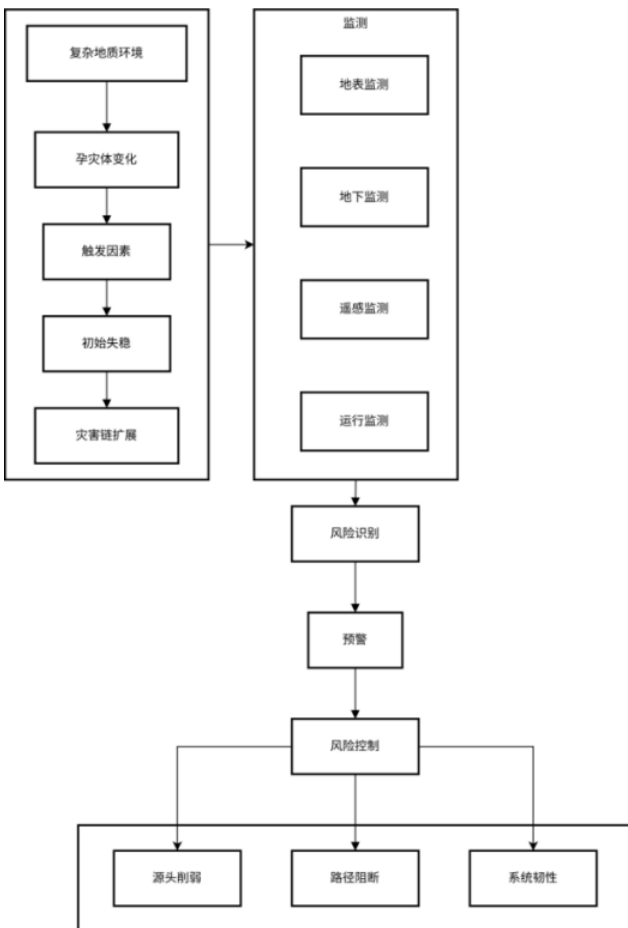


图1 道路灾害链的“监测—识别—预警—控制”一体化框架