

基于边坡雷达技术的重大突发性滑坡应急预测研究

辛鸿成

北京京能地质工程有限公司

DOI:10.12238/gmsm.v8i3.2176

[摘要] 本研究着重分析北京地区突发性重大滑坡应急预测技术,结合北京某滑坡案例,积极引入边坡雷达监测,系统性开展非接触式全天候实时监测。通过采集测点累计视向变形量、变形速率、加速度等参数,构建滑坡区变形云图和时间序列曲线,准确识别不同变形区域的演化阶段。研究表明,边坡雷达技术能够有效判识滑坡残留体和复活体的变形特征,动态预警潜在的滑移区,大幅度提高地质灾害应急响应能力,在保障监测人员安全的同时,加强数据获取的准确性,为类似复杂地形条件下重大滑坡的应急监测预警预报提供了可靠的技术支撑。

[关键词] 边坡雷达; 变形规律; 匀速变形阶段; 应急预测

中图分类号: TN95 文献标识码: A

Research on Emergency Prediction of Major Sudden Landslides Based on Slope Radar Technology

Hongcheng Xin

Beijing Jingneng Geological Engineering Co., Ltd.

[Abstract] This study focuses on analyzing the emergency prediction technology for sudden major landslides in Beijing. Combining with a landslide case in Beijing, slope radar monitoring is actively introduced, and non-contact all-weather real-time monitoring is systematically carried out. By collecting parameters such as cumulative visual deformation, deformation rate, acceleration, etc. from measurement points, a deformation cloud map and time series curve of the landslide area are constructed to accurately identify the evolution stages of different deformation areas. Research has shown that slope radar technology can effectively identify the deformation characteristics of residual and resurgent landslide bodies, dynamically warn potential sliding areas, greatly improve the emergency response capability of geological disasters, and enhance the accuracy of data acquisition while ensuring the safety of monitoring personnel. It provides reliable technical support for emergency monitoring, warning, and forecasting of major landslides under similar complex terrain conditions.

[Key words] slope radar; Deformation law; Uniform deformation stage; Emergency prediction

引言

我国北京地区虽然群测群防体系在长期实践中取得了不错效果,但在突发性重大滑坡应急响应中仍然存在现场调查受到限制、监测手段不足等问题。近年来,边坡雷达技术凭借其非接触式、全天候、高精度等应用优势,在地质灾害形变监测领域得到广泛应用。本研究以北京某滑坡案例为对象,采用地基合成孔径雷达(GB-SAR)开展应急监测,实时获取各测点的累计视向变形量、变形速率、加速度等参数,并以此为基础绘制变形云图和时间序列曲线,精准识别滑坡演化阶段。研究表明,边坡雷达能够有效捕捉滑坡体微米级形变特征,精准判识滑坡动态变形过程,解决传统监测手段在高山峡谷区应用的局限性。

1 工程概况

北京某滑坡案例滑坡平面形态呈现不规则长方形,中部后缘宽大而前缘狭窄,平均宽度约570m,斜坡长度为1420m,滑坡区总面积为 $60 \times 10^4 m^2$ 。滑坡剖面呈现典型的上陡—中缓一下陡折线型结构,右侧发育冲沟并且有着季节性水流,进一步加剧了边坡岩土体的稳定性劣化趋势。在滑坡发生后,根据现场调查及遥感解译结果,残留体被划分为K1、K2、K3三个变形区域,分别对应不同稳定状态的潜在风险区。其中,K1区位于滑坡后部残余体,估计方量约 $55 \times 10^4 m^3$,属于二次滑动后的相对稳定区域;K2区分布于滑坡右侧坡体,估计残留体方量达 $240 \times 10^4 m^3$,是典型的次级滑移带,存在局部复活的可能性;K3区则位于滑坡上游侧,细分为K3-1(上部)与K3-2(下部),方量分别为 $120 \times 10^4 m^3$ 和 $62 \times 10^4 m^3$,两者之间存在明显的剪切拉张区,很容易形成新的滑移面。滑坡

剪出口位于河面以上约70m处,表明滑动破坏主要发生在坡脚软弱带,受到河流侵蚀、重力卸荷影响。

2 基于边坡雷达技术的重大突发性滑坡应急预测

2.1 主要架构

在本次突发性滑坡应急预警研究中,项目组选用了中国安全生产科学研究院研发的S-SAR-I型边坡雷达系统,该系统由雷达主机、直线轨道、运动控制单元、电源控制单元、连接线缆及数据采集电脑模块等核心部件组成。其中雷达主机采用步进频连续波信号(SFCW)技术,具有卓越的距离分辨能力,可精准捕捉复杂地质目标的形变特征。其运行机制依赖于微波干涉成像原理,通过小型天线在直线轨道上匀速移动完成信号收发,并借助信号合成技术构建等效1米长度的虚拟天线阵列,从而提高空间采样精度。同时,控制运动控制单元和电源管理模块进行同步作业,加强雷达运行的稳定性,数据采集终端则实时接收,实时处理测点变形信息,形成动态监测数据流(见图1)。

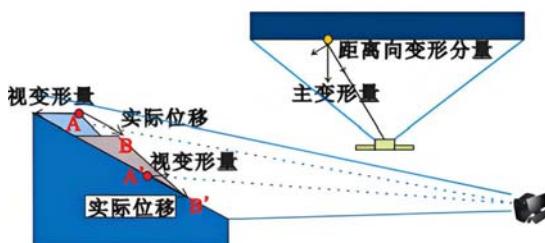


图1 边坡雷达形变监测原理图

该边坡雷达系统具有全天候运行能力,能够有效穿透空气中的雾气、粉尘、轻度雨雪等,解决光学与激光设备受天气影响较大的局限性,监测范围达到5km,扫描角度覆盖120°,空间分辨率达 $0.25\text{m} \times 4\text{m}$ @1km,形变测量精度为0.1mm,适合进行大范围地质体表面位移场的精准捕捉。此外,其数据采集周期短、响应迅速,满足滑坡应急监测对时效性的严苛要求。但由于该系统在微观尺度上无法识别物体表面质点,仅发生局部移动而整体没有出现宏观变形的情况,只能实现滑坡自动预警,无法独立预报破坏时间和破坏规模,所以在实际应用中要结合人工判读和多源数据分析,进一步提高滑坡预测的可靠性。

2.2 数据处理流程

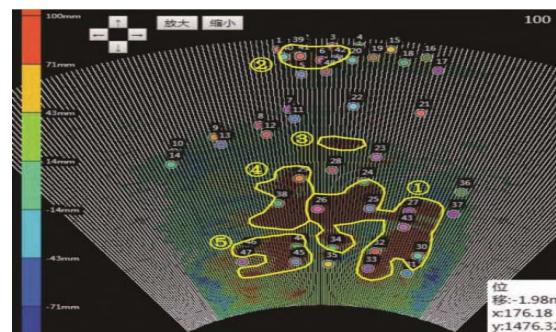
在本次基于边坡雷达的重大滑坡应急监测研究中,系统采集的原始回波信号先经过成像处理模块进行合成孔径成像,随后进入噪声抑制、大气影响校正阶段,有效消除环境干扰,大幅度提高测量信噪比,最终生成具有较高空间分辨率的雷达形变成像图。在此基础上,选取相邻两组成像图进行干涉相位计算,并通过相干系数评估图像质量,生成对应的干涉相干图,精准识别具有稳定散射特性的区域。针对长期保持高相干特性的地物点(如裸露基岩、硬化地面等),技术人员通过PS(Persistent Scatterer)技术筛选关键监测点,随后生成雷达视线方向的二维形变分布图,从而精准描绘滑坡区域的变形特征。

为了将雷达观测数据和实际地理坐标体系进行有效融合,

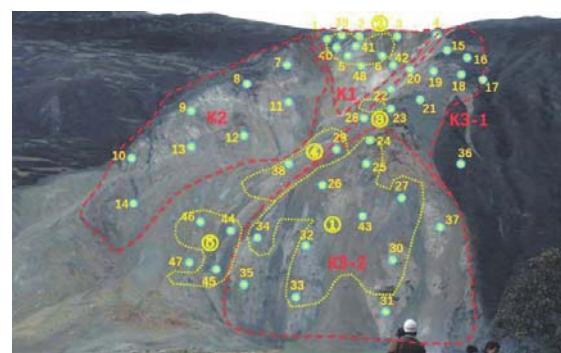
工作人员要建立雷达轨道坐标系和目标边坡三维坐标之间的映射关系。通过分析雷达方位角及斜距信息,确定每个PS点在雷达扫描坐标中的位置,并且将其和真实地理坐标进行匹配,完成二维形变图的地理配准。该过程生成索引文件(M, N, X, Y, Z),使每个像素点(M, N)可对应多个三维空间点(X, Y, Z),从而提升形变图的空间定位精度。最后,结合时间序列叠加多期二维形变图,利用实景三维模型可视化呈现滑坡体整体变形趋势,增强监测结果的直观性^[1]。

2.3 滑坡残留体应急监测分析

在北京某滑坡案例滑坡应急监测过程中,边坡雷达系统被部署于滑坡对岸视野开阔、地形稳定的场地,保证扫描区域完整覆盖K1、K2、K3变形区,没有植被遮挡干扰,满足高精度形变监测的基本条件^[2]。系统采用全天候连续监测模式,数据采集间隔设为15分钟,监测时段从2018年11月8日14:20持续至11月16日4:04,累计运行时长8天。通过点云数据处理和永久散射体(PS)提取,系统生成了累计视向变形量—时间曲线及变形速率—时间序列图,用于判识不同区域的变形演化特征(见图2)。



(a) 实时点云视向形变图



(b) 测点的实际位置

图2 实时点云视向形变图

以K1变形区为例,其累计视向变形量—时间曲线呈现出阶段性波动变化趋势,并在多个时间窗口内出现明显加速现象。其中,11月10日16:30起,该区域整体变形速率陡增,曲线斜率显著变大,显示出潜在失稳信号^[3]。通过对K1区上部监测点的形变速率变化发现,自11月10日13:45起多个监测点出现频繁波动,至11月11日9:45期间共监测数据显示14次明显波动峰值,说明该区域此时已开始出现局部滑动迹象(见图3)。J5点位在施工

期间累计变形量最大达49.7mm,泄流后J40点位变形加剧,达到75.8mm。特别是在11月13日19:10至14日3:27、14日19:03至15日2:05两个时段,变形速率分别提升至1.88mm/h和1.39mm/h,体现出短期应力释放或地质结构调整引发的瞬态加速过程^[4]。上述监测成果实时反馈至前线指挥部,专家组依据雷达数据与其他监测手段(如裂缝计实测曲线)进行综合研判,并于11月11日15:50发布预警信息,成功指导现场人员安全撤离,约30分钟后K1区上部发生局部垮塌,有效避免人员伤亡,验证了边坡雷达在突发性滑坡应急响应中的关键作用。

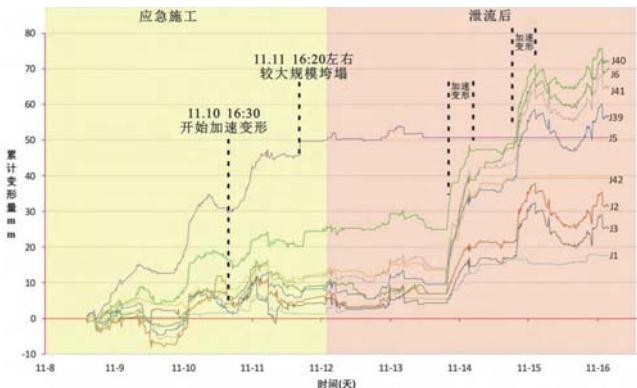


图3 K1区各测点累计视向变形量-时间曲线图

此次应用实践表明,边坡雷达能够精准捕捉滑坡残留体微米级变形动态,实现对复杂地形条件下高位滑坡的全天候、非接触式实时监测。通过对各变形区的视向位移、速率、加速度变化规律进行分析,可准确识别临界变形区并预测可能失稳时序^[5]。同时,雷达监测结果与传统裂缝计数据高度吻合,进一步提高了监测数据的可信度^[6]。

3 结语

本研究依托边坡雷达监测手段,对于北京某滑坡案例开展

为期8天的紧急监测,完整记录了K1变形区在工程施工期间与堰塞湖泄洪阶段的关键形变过程。监测数据显示,累计最大形变量分别达到49.7毫米和75.8毫米,准确捕捉到两次突发性加速变形现象,平均速率分别为每小时1.88毫米和1.39毫米,充分揭示了滑坡残留体在外界扰动作用下的动态响应规律。通过时间序列分析发现,K1区上部在11月10日至11日期间出现14次显著速率峰值,表现出明显的局部加速变形趋势,雷达监测数据和裂缝计观测结果高度一致。实践表明,边坡雷达在突发性滑坡应急预测中具有较高的可靠性,未来可进一步拓展其在多灾种耦合监测、智能预警模型构建、三维形变反演中的应用,以提升地质灾害防控的科技水平。

参考文献

- [1] 马思远,许冲,陈晓利.地震崩塌滑坡危险性应急评估模型效果对比——以2022年6月1日MW5.8芦山地震为例[J].地震地质,2023,45(4):896–913.
- [2] 贺明晓,刘阳,唐怡.考虑频率因子的VMD-GRA-BP库区滑坡位移预测模型[J].中国安全生产科学技术,2024,20(9):96–104.
- [3] 冯文杰,王习东,叶永.基于ARIMA改进的实时动态滑坡预测模型[J].信息技术与信息化,2024(2):7–11.
- [4] 郭一兵,姜鑫.甘肃舟曲县果耶镇磨里滑坡成因及堵江危险性预测分析[J].中国地质灾害与防治学报,2023,34(3):58–68.
- [5] 杨明钰,陈红旗,祁小博,等.基于可靠度理论的地震滑坡运动距离预测模型[J].中国地质调查,2023,10(3):102–109.
- [6] 郑玲静.基于TRIGRS与Scoops3D耦合模型的潜在滑坡稳定性时空动态预测[J].自然灾害学报,2023,32(2):199–209.

作者简介:

辛鸿成(1997--),男,山西省朔州市人,本科,单位:北京京能地质工程有限公司,职称:助理工程师,研究方向:边坡测绘。