

基于 Rockfall Analyst 的滚石运动参数反演及 三维轨迹分析

宗朝正, 吉锋, 陈利鑫

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

摘要: 崩塌是高陡边坡中常见的一类地质灾害, 滚石运动轨迹和进行危险性量化评价对崩塌灾害防治具有重要意义。以某灰岩高边坡为研究对象, 在对危岩和滚石发育分布特征精细地质调查的基础上, 采用 Rockfall Analyst 反演滚石运动参数, 并对边坡上发育的高位危岩进行三维运动轨迹预测。结果表明: (1) 研究区岩土坡面滚石运动特征参数分别是法向恢复系数 R_n 为 0.25~0.28, 切向恢复系数 R_t 为 0.78~0.82, 动摩擦角 F_n 为 $20^\circ \sim 25^\circ$; (2) 滚石运动过程中最大速度 88.05 m/s, 最大弹跳高度 29.02 m, 最大冲击能量 10 857 kJ, 大部分与厂房撞击, 危险性极高, 需要及时治理。研究成果对区域内防灾减灾工程具有一定的参考价值。

关键词: 滚石轨迹; 滚石运动参数; Rockfall Analyst; 危险性评价

中图分类号: P642.21 **文献标识码:** A

PARAMETER BACKANALYSIS AND 3D TRAJECTORY ANALYSIS OF ROLLING STONE MOTION BASED ON ROCKFALL ANALYST

ZONG Chao-zheng, JI Feng, CHEN Li-xin

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Rockfall is a common type of geologic hazard in high and steep slopes, and the trajectory of rockfall movement and the quantitative evaluation of hazard are of great significance for the prevention and control of avalanche disaster. Taking a gray rock high slope as the research object, based on the fine geological investigation of the distribution characteristics of hazardous rock and rolling stone development, Rockfall Analyst was used to invert the rolling stone movement parameters and predict the three-dimensional movement trajectory of the high hazardous rock developed on the slope. The results show that: (1) the characteristic parameters of the rolling stone motion on the geotechnical slopes in the study area are normal recovery coefficient R_n of 0.25~0.28, tangential recovery coefficient R_t of 0.78~0.82, and kinetic friction angle F_n of $20^\circ \sim 25^\circ$, respectively; (2) the maximum velocity of falling stone during the motion is 88.05m/s, the maximum bouncing height is 29.02m, and the maximum impact energy is 10857kJ. Most of them collided with the plant, which is extremely dangerous and needs to be managed in time. The research results have

收稿日期: 2024-04-20 **改回日期:** 2024-05-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41977237); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主研究项目(SKLG2022Z013)

certain reference value for disaster prevention and mitigation works in the region.

Key words: rockfall trajectory; stone motion parameters; Rockfall Analyst; hazard evaluation

崩塌落石作为一种常见的地质灾害,是指坡体表面的部分危岩体在外力作用下失稳并向下运动的现象,对人类的生命财产安全构成极大威胁。近年来,随着我国经济的飞速发展,交通基础设施的建设逐渐深入丘陵山地地区,边坡落石对道路、桥梁、建筑物及人员造成了严重危害。研究失稳块体的运动特性及轨迹预测,对于减少落石危害程度和制定合理的防护结构具有重大意义。对落石运动轨迹的探讨,学术界已积累了许多研究成果。黄润秋等基于正交试验揭示了坡表植被特征、滚石质量等因素对滚石运动的主次关系^[1];蔡培等基于 Rockfall 对某煤矿已崩塌落石进行参数反演,并根据参数计算出区域内危岩运动特征^[2];何宇航等基于 Rockfall 对某地危岩建立风险评价模型并进行量化^[3]。随着计算机技术的迅猛发展,数值模拟方法在落石分析领域取得了巨大进步,衍生了许多模拟软件和理论方法。通过将运动学原理与接触动力学相结合,数值模型能够有效地模拟和预测裂隙岩体失稳、运动至停止的整个过程^[4]。王明辉等通过无人机精细调查和 Unity3D 集成物理引擎 PhysX 真实再现某山区危岩体失稳运动路径和解体形态,实时记录了危岩运动轨迹和运动特征参数^[5];刘福臻等运用无人机提供的地形数据和基于 Arc GIS 平台的三维落石模拟软件 Rockfall Analyst 对某斜坡进行研究,有效评估了斜坡落石灾害影响范围^[6];王军义等人运用 Gis 技术对某一地区的崩塌现象进行三维模拟分析,并通过熵权法确立各类危险性评价因子的权重,进一步划分崩塌落石的危险区域^[7];赵炼恒等基于 RocPro3D 模拟不同条件下的落石轨迹并评估防护网性能,认为三维分析比二维分析结果更加全面和更具有参考价值^[8];郭晨等利用无人机倾斜摄影测量技术及现场调查查明高位危岩体发育特征,并结合 Rockfall Analyst 软件模拟危岩落石轨迹,为防灾减灾工程提供依据^[9]。

由于研究区近年发生崩塌,对坡脚建筑物造成较严重损坏(图 1)。本研究以某高边坡为对象,采用现场调查为主、无人机倾斜摄影技术为辅的方式查明该区域危岩体发育特征,并结合 Rockfall Analyst 软件反演危岩区坡表特征参数,模拟危岩落石三维运动特征并对落石危险性进行评价分析,

为落石灾害防治提供依据。



图 1 坡脚建筑物破坏

1 研究区概况

研究区南北长约 1 000 m,东西宽约 450 m,地势西高东低,最高点位于西侧山顶,海拔高程约 290 m,最低点位于东侧农田,海拔高程约 80 m,属溶蚀剥蚀低山地貌,周边山体自然斜坡坡度 $40^{\circ}\sim 70^{\circ}$,山坡上植被发育,以灌木、藤类植物为主。自西向东地势按照高程大致分为 3 段。高高程段高程 200~290 m,范围内多生长有针叶林及阔叶林,地势相对较缓,坡度多为 $25^{\circ}\sim 30^{\circ}$;中高程段高程 128~199 m,生长有灌木,地势最陡,坡度多为 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$,部分陡峭地段坡度可达 $75^{\circ}\sim 90^{\circ}$;低高程段高程 80~127 m,生长有竹林,分布有耕地,地势最缓,坡度多为 $10^{\circ}\sim 17^{\circ}$,研究区坡度分布见图 2。地貌成因中的外应力在勘查区主要以构造溶蚀、侵蚀为主,构造剥蚀较次。根据 2015 年版的 1:400 万《中国地震动参数区划图》,研究区地震动峰值加速度为 0.05 g,且历史地震震级较小,属于区域地壳稳定区。地层岩性为中石炭统黄龙组(C_2l-h),灰白色块状灰岩,隐晶质结构,厚层状到块状构造。坡表为第四系崩滑堆积碎块石土(Q^{col+dl}),灰黄色松散状黏性土,碎石含量 10%~20%,成分以风化灰岩为主。该地区 10 a 内年均降雨量约 1 500 mm,且多为酸雨,在外界环境作用下研究区内灰岩溶蚀裂隙发育,岩体稳定性较差。

2 危岩发育特征

研究区边坡高陡,植被覆盖稀疏,主要为灌木,

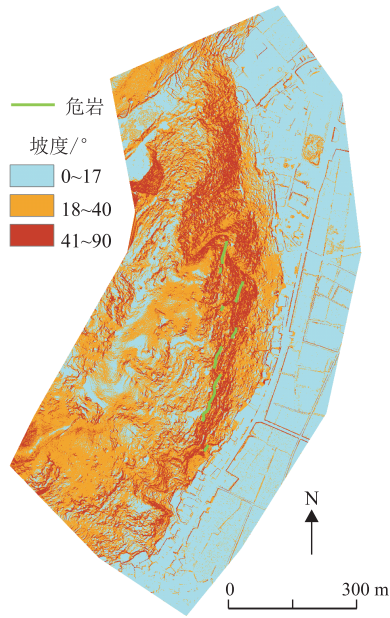


图 2 研究区地势图

边坡危岩发育,其对下部的村道、居民住房、农田及过往车辆行人构成严重威胁。区内构造剥蚀较为严重,且位于华东沿海酸雨区,2020 年该地酸雨率为 100%,降水 pH 平均值为 5.16。研究区内岩体受溶蚀、风化作用,裂隙发育,岩体结构整体破碎,加上坡段陡峭,危岩临空,使得危岩整体稳定性较低(图 3)。在长期降雨的作用下,地表水渗入裂缝洞隙,使其不断扩展加深,裂隙与裂隙之间相互贯通,形成横向、纵向的裂隙面。裂隙面的存在进一步切割岩体,致使岩体结构的稳定性进一步减弱,最终发生破坏,其变形破坏模式以倾倒式、坠落式为主(图 3)。根据倾斜摄影测量解译和现场精细调查获得研究区危岩分布图(图 4)。危岩主要发育于中高程段,该段陡峭坡面分布较多,岩层反倾,层面产状 $290^{\circ}/50^{\circ}$,临空面产状 $102^{\circ}/38^{\circ}$,危岩区主要发育 2 组优势节理,产状 $130^{\circ}/70^{\circ}, 50^{\circ}/70^{\circ}$ 。

3 三维运动轨迹模拟

3.1 三维模型建立

本研究基于 Rockfall Analyst 进行三维落石轨迹模拟。模型建立方式如下:

(1) 数据获取:无人机倾斜摄影技术作为一种新兴遥感技术,其通过无人机平台所搭载的相机与传感器,从多个角度对地表进行数据采集,经过处理后生成三维模型、数字高程模型(DEM)、正射影像图等。所得三维模型具备高分辨率且能从不同视角进行展示,有利于细节信息的提取和对研究区地质

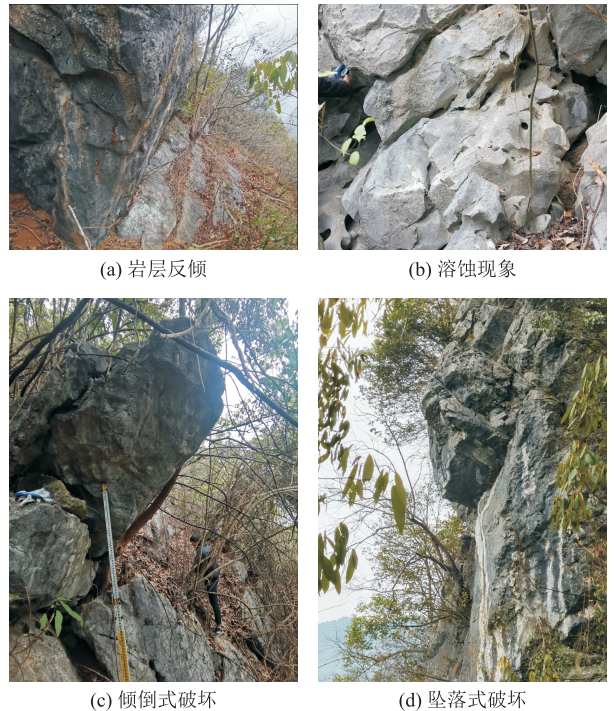


图 3 危岩发育特征及破坏模式

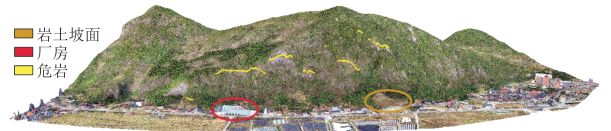


图 4 危岩分布图

情况的全面了解,协助调查人员进行地质评价。该技术已成为危岩落石调查的有效手段之一。

(2) 模型建立:在 Arc GIS 软件中加载 DEM 模型和正射影像图,通过三维模型和现场勘察确定危岩落石来源、划分坡表植被特征和提取坐标。根据坐标在正射影像图中划分区域和确定危岩位置,所得坡表特征空间分布见图 5。

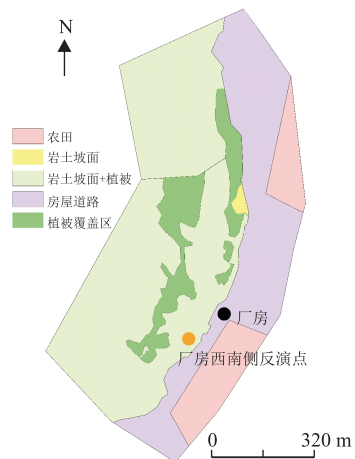


图 5 研究区坡表特征

(3) 落石三维模拟: Rockfall Analyst 在 Arc GIS 平台可以实现三维落石仿真, 获得落石轨迹和各项落石运动特征参数, 将参数进行加权处理后可得危险性划分分布图^[10]。

(4) 坡表特征计算参数: 落石在运动过程中与坡体、坡表植被、碎石等发生碰撞, 从而改变其运动路径并导致能量损失, 现将因碰撞产生的影响以 R_n (法向恢复系数)、 R_t (切向恢复系数) 和 Friction (摩擦角) 来表征, 各项恢复系数取值通过模拟反演和参考文献取得。

3.2 滚石堆积特征及运动参数反演

厂房曾经历过崩塌灾害, 坠落的最大块石直径约为 2.9 m, 体积大概 24 m³, 落石滚动过程中沿途砸毁竹子、灌木, 最终撞入厂房内, 厂房后则停留部分小块石, 其直径约为 1 m。将该处作为落石反演点。厂房西南侧也有一历史崩塌, 痕迹较明显, 且坡表特征与危岩发育带相似, 因此也将该处作为落石反演点。该处崩塌源为灰色-灰白色块状灰岩, 表部覆盖砖红色黏土, 在降雨、风化作用的影响下发生倾倒破坏, 最终大部分滚落至房屋前方, 崩塌落石直径约为 1 m。落石最终停留地与崩塌源高差约 30 m, 该段坡体陡峭, 坡度约 70°, 下方为房屋, 屋前有一平地, 落石大部分停积在此 (图 6)。Rockfall Analyst 模型建立后, 结合现场勘察, 确定危岩发育位置并标记作为落石源, 考虑到崩塌落石大多为直径 1 m 的小块石, 所以将落石源设为直径 1 m 的块体, 其质量为 2 800 kg, 模拟过程中设定落石平面初始速度 $V_{xy}=0.1$ m/s, 垂直速度 $V_z=0$ m/s, 每个落石源在母岩处以不同的平面方向抛掷落石, 最终得到落石反演轨迹 (图 6)。

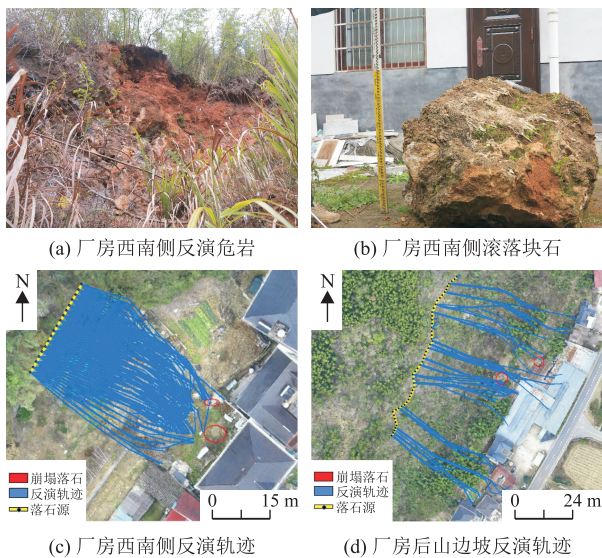


图 6 反演危岩及结果

厂房后山落石启动后沿坡面滚动, 其轨迹与厂房相撞, 与历史崩塌结果符合。将该参数用于厂房西南侧反演危岩, 其轨迹大部分停留在房屋前方, 与现场勘察结果一致。因此将该反演参数作为其余危岩模拟的计算参数 (表 1)。

表 1 研究区坡表特征取值

坡面特征	法向恢复系数 R_n	切向恢复系数 R_t	动摩擦角 $F_{\alpha}/^{\circ}$
农田	0.40	0.90	10
岩土坡面	0.28	0.82	20
岩土坡面+植被	0.25	0.78	25
房屋道路	0.40	0.85	10
植被覆盖区	0.25	0.65	30

3.3 危岩运动轨迹预测模拟

采用上述反演参数, 对所有危岩进行三维轨迹模拟, 落石运动过程中最大运动特征值见表 2。将落石轨迹导入 ArcScene 软件, 可从三维角度展示 (图 7)。由图 7 分析可知: 大量落石越过植被停留于坡脚, 部分落石甚至与房屋发生碰撞, 有较大危险, 如不加以防护, 将会对下方居民生命财产安全有较大威胁; 岩土坡面处落石轨迹在边坡中部有明显归槽现象, 即危岩体失稳后沿地形上凹陷的主滑槽运动^[9], 该处落石轨迹最终越过岩土坡面坡脚至道路。由 Rockfall Analyst 软件得到落石危险性分布图 (图 8)。由图 8 可见, 厂房所在区域是极高危险性区, 运动到该处的落石速度大、能量大; 岩土坡面所在区域为中危险区, 虽然该处落石轨迹较长, 且危岩落石源高程高, 但其受到植被的耗能作用, 最终落石的危险性反而低于厂房。结合落石危险性评价结果, 厂房后方岩体破碎, 加之坡度较陡、植被稀少, 该处落石失稳后对房屋建筑有较大破坏作用, 建议清除该处裂隙发育的危岩, 并设置主动防护网进行防护; 岩土坡面处因其阻力条件较好, 建议设置多道被动防护网防护。

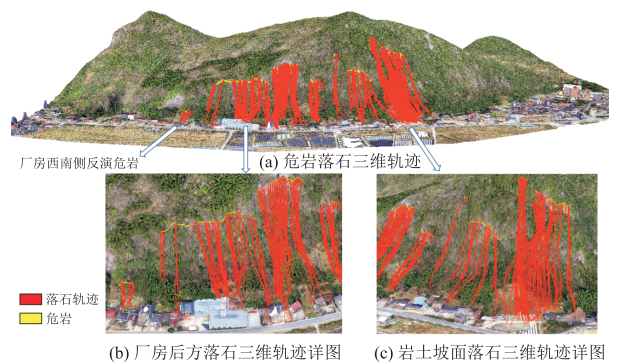


图 7 三维落石轨迹结果

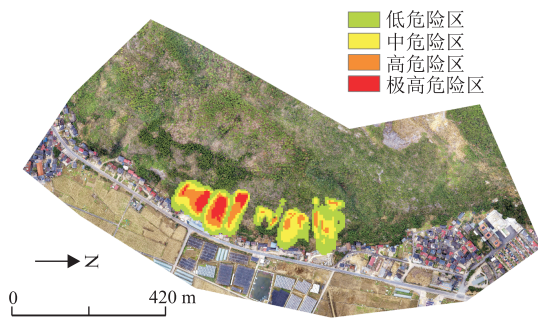


图 8 落石危险性分布图

表 2 研究区危岩最大运动特征值

坡面位置	弹跳高度/m	速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	冲击能量/kJ
厂房后方	29.02	88.05	10 857.00
岩土坡面	17.29	54.90	6 471.00

4 结论

基于现场调查和无人机技术,对某高边坡危岩进行精细调查,并运用 Rockfall Analyst 对落石轨迹进行参数反演和三维运动轨迹预测数值模拟,主要结论如下:

(1) 危岩区坡度陡峭,节理发育,岩体完整性较差,溶蚀作用强烈,变形破坏模式以倾倒式和坠落式为主。

(2) 通过历史崩塌反演运动特征参数,危岩区岩土坡面运动特征参数分别为法向恢复系数 R_n 为 0.25~0.28,切向恢复系数 R_t 为 0.78~0.82,动摩擦角 F_n 为 $20^\circ \sim 25^\circ$ 。

(3) 根据三维模拟结果,厂房处落石最大运动速度 88.05 m/s,最大弹跳高度 29.02 m,最大冲击能量 10 857 kJ;岩土坡面处落石最大运动速度

54.90 m/s,最大弹跳高度 17.29 m,最大冲击能量 6 471 kJ。厂房落石危险性高于岩土坡面,危险性较大,治理迫切性较高。

致谢: 兰恒星研究员为本项研究提供了 Rockfall Analyst 软件,在此谨表感谢!

参考文献

- [1] 黄润秋,刘卫华.基于正交设计的滚石运动特征现场试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(5):882-891.
- [2] 蔡培,王刘文,王彤标,等.基于运动特征分析的高陡边坡崩塌落石防治措施建议[J].地质灾害与环境保护,2023,34(3):23-27+35.
- [3] 何宇航,裴向军,梁靖,等.基于 Rockfall 的危岩体危险范围预测及风险评价——以九寨沟景区悬沟危岩体为例[J].中国地质灾害与防治学报,2020,31(4):24-33.
- [4] 熊良文.集安市南部鸭绿江沿岸边坡崩塌落石运动特性及风险评估研究[D].长春:吉林大学,2023.
- [5] 王明辉,曹熙平,谯立家.危岩体精细调查与崩塌过程三维场景模拟——以西南某水电站高边坡为例[J].中国地质灾害与防治学报,2023,34(6):86-96.
- [6] 刘福臻,李旭德,王军朝,等.基于无人机和 Rockfall Analyst 的崩塌落石特征分析与运动学模拟——以察雅县崩塌落石为例[J].自然灾害学报,2021,30(3):171-180.
- [7] 王军义,梁风,彭雄武,等.基于 GIS 技术的单体崩塌危险范围评价方法研究[J].工程地质学报,2023,31(1):188-198.
- [8] 赵炼恒,金昶睿,黄栋梁,等.复杂地形下的危岩落石被动防护网三维防护效果评估研究[J].铁道学报,2023,45(5):143-150.
- [9] 郭晨,陶玉敬,宋章,等.川西北某拟建高速公路隧道口高位危岩特征及危险性评价[J].铁道技术标准(中英文),2024,6(1):20-28.
- [10] 仇义星,兰恒星,李郎平,等.综合统计模型和物理模型的地质灾害精细评估——以福建省龙山社区为例[J].工程地质学报,2019,27(3):608-622.

作者简介: 宗朝正(2000—),男,硕士研究生,主要从事地质灾害稳定性预测研究。E-mail:2398283861@qq.com