

引用格式: 柳万里, 晏鄂川, 魏鹏飞, 李丽华. 落石运动特征试验及影响因素敏感性分析[J]. 山地学报, 2021, 39(1): 47-58

LIU Wanli, YAN Echuan, WEI Pengfei, LI Lihua. Experimental study on rockfall and sensitivity analysis of influencing factors[J]. Mountain Research, 2021, 39(1): 47-58

落石运动特征试验及影响因素敏感性分析

柳万里¹, 晏鄂川^{1*}, 魏鹏飞², 李丽华²

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074; 2. 湖北省地质局第八地质大队, 湖北 襄阳 441000)

摘要: 危岩崩落时会与坡面碰撞解体为块径不同的落石, 而落石运动特征影响因素众多, 导致难以准确预测落石运动全过程。本文以湖北汤池峡崩塌为例, 在调查分析崩塌区地质条件的基础上, 开展现场危岩清除试验, 通过拍摄危岩崩落过程获取落石运动数据, 并采用 Rockfall 软件对比研究落石运动特征, 结果表明, 当法向恢复系数 $R_n = 0.37$ 、切向恢复系数 $R_t = 0.87$ 、粗糙度 $f = 6^\circ$ 、摩擦角 $\alpha = 30^\circ$ 时, 模拟结果与现场试验吻合较好, 该参数组合可准确表征落石运动过程。基于 Rockfall 软件的影响因素敏感性分析发现, 不同因素对落石运动特征的影响程度和作用机制存在差异, 尤以 α 对落石运动的影响机制最为复杂。当选取因素单位变化率为敏感性排序依据时, 对于落石运动距离、弹跳高度和总动能而言, R_n 、 R_t 、 f 、 α 、 m (落石质量)、 H (初始高程) 等因素的敏感性排序分别为: $R_t > R_n > f > H > m$ 、 $H > R_t > R_n > f$ 、 $m > R_n > H > R_t > f$ 。本文相关成果可指导落石影响范围与危害程度判定, 并为崩塌防治设计提供参考依据。

关键词: 落石; 运动特征; Rockfall 软件; 因素敏感性; 汤池峡

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

落石具有较大的运动速度、弹跳高度和冲击动能, 严重威胁影响范围内的人员与设施安全^[1]。鉴于此, 研究人员采用理论分析、公式推导、现场试验和数值分析等方法, 研究了落石或滚石的形成条件、运动形式、阶段方程及其影响因素的作用贡献率等^[2-6]。同时, 鉴于运动特征分析有助于准确判定落石影响范围与危害程度, 专家学者还探讨了落石运动速度与形式及其运动规律^[7-12]。现有研究多利用运动学公式、牛顿碰撞与瞬间作用原理等开展理论计算, 但受限于场地条件, 落石运动现场试验仍存在不足, 如试验对象多针对特定尺寸或限定形状的滚石, 试验场地多是事先选定的理想坡面, 试验分析多未深入至探讨落石运动对防护措施的破坏影响

上^[13, 14]。而且, 现有分析多没能全面考虑危岩崩落过程中碎裂解体形成落石的特征多样性。此外, 以往的理论计算研究多假设一定条件, 但实际上落石的运动是包含崩落、碰撞、滚动、弹跳、滑动等多种形式的复杂过程^[15-17], 最终导致计算结果存在一定程度的失真。同时, 落石运动特征受斜坡坡角、坡面性质、自身形状与力学性质等因素影响显著, 已有研究却多集中在落石距离、坠落位置、影响范围、运动轨迹等运动特征的分析上, 明显欠缺关于落石运动影响因素的研究, 而且通常只探讨某单一类因素对落石运动特征的影响规律^[18-21], 未能对比分析各类因素的作用贡献程度差异, 使得计算分析落石运动特征时, 影响因素的参数取值误差较大, 因而不能有效

收稿日期 (Received date): 2019-10-22; 改回日期 (Accepted date): 2020-12-06

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (41672313, 41702378)。[National Natural Science Foundation of China (41672313, 41702378)]

作者简介 (Biography): 柳万里 (1993-), 男, 安徽宿州人, 博士研究生, 主要研究方向: 岩土体稳定性与评价。[LIU Wanli (1993-), male, born in Suzhou, Anhui province, Ph.D. candidate, research on stability and evaluation of rock and soil mass] E-mail: lw18056@qq.com

* 通讯作者 (Corresponding author): 晏鄂川 (1969-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 岩土工程与地质灾害。[YAN Echuan (1969-), male, Ph.D., professor, specialized in geotechnical engineering and geological hazard] E-mail: yecyec6970@163.com

指导崩塌灾害防灾减灾工作的高效实施。因此,如何在开展落石运动现场试验的基础上,通过直观再现落石失稳崩落全过程,结合数值模拟对比落石运动特征,并分析影响因素敏感性高低,揭示不同类型影响因素的作用机制与程度,已成为国内外亟待解决的重要问题。

根据湖北南漳、保康两县的崩塌灾害调查^[22],地处襄阳市西南的保康县因地形坡度陡、高差大且碳酸盐岩分布广泛,县境内崩塌落石频发,已造成严重经济损失与人员伤亡,亟需开展落石运动特征研究来指导防治设计与监测预警等。因此,本文以保康县这一崩塌灾害高发区为研究区,选取汤池峡崩塌为研究对象,开展野外危岩清除试验,同步跟踪拍摄落石崩落运动全过程,采用 Rockfall 软件对比分析落石运动过程与特征数据。同时,考虑到落石运动的影响因素众多且各因素作用机制与程度不明,又以敏感性分析原则为依据、Rockfall 软件为工具,揭示各因素的敏感性高低。本文研究成果旨在指导汤池峡崩塌防治设计,并为同类型落石运动特征的计算参数取值提供借鉴指导。

1 危岩区工程地质条件

汤池峡崩塌位于湖北省襄阳市保康县城关镇陈家河村矿山公路 8.9 km 处(111°11'13.5" E;31°50'31.2" N)。斜坡呈西高东低的“V”字形沟谷地貌,坡表散布第四系崩坡积物(Q_4^{col+dl}),地形由上至下呈陡—缓—陡形态,上部坡度 75°~85°,中部坡度 42°~55°,下部坡度 70°~84°、局部呈倒崖状(图 1)。危岩岩性为寒武系下统石牌组(ϵ_1s)灰色、深灰色的灰岩,中厚层—厚层状,厚约 45~60 cm,岩层产状为 50°∠30°,岩体溶蚀明显、节理裂隙发育,优势结构面产状为 210°∠70°。

危岩区位于通城河断裂与新华断裂交接处,多个呈北东向展布的次级小断裂对危岩岩体结构与构造裂隙发育影响显著。区内地下水类型为松散岩类孔隙水与裂隙岩溶水,前者赋存于第四系冲洪积层内,并以孔隙潜水为主,受地表径流和裂隙岩溶水补给;后者赋存于基岩裂隙和岩溶管道,中等富水。区内含水层受充沛的大气降水补给,雨水沿渗流通道(岩层面、节理裂隙和岩溶管道)入渗至坡内,弱化岩体与结构面强度,促进了危岩体的发育。



图 1 斜坡地形地貌图

Fig. 1 Geomorphologic map of slopes

2 落石运动现场试验

2.1 危岩体发育特征

现场试验中清除的危岩体高程为 640 m,位于斜坡上部陡崖,图 2 为危岩区工程地质平面图。危岩体均宽 2.0 m、均高 2.5 m、均厚 1.7 m,体积约 10.5 m³,整体呈上宽、下窄形态(图 3)。危岩体表面风化溶蚀明显,受多条溶蚀、节理裂隙切割,后部发育窄—宽—窄状的贯通性长大裂缝,最宽处达 70 cm,使危岩体近乎与母岩完全脱离。危岩体目前处于欠稳定状态,失稳坠落趋势明显,后期在降雨等不利因素的作用下,极易发生失稳崩落。采用凿岩机对危岩体进行破碎处理,并跟踪拍摄落石运动全过程。

2.2 落石块径统计与监测数据分析

2.2.1 监测仪器

为准确分析落石运动特征并获取相关过程数据,采用 FASTCAM SA1.1 型高速摄像机记录落石运动轨迹。为最大限度拍摄落石运动过程,将摄像机布设在危岩体上方 1.5 m 的地形凸起处,位置如图 1。为全方面、多角度的拍摄落石运动全过程,采用 PHANTOM 4 PRO V2.0 型无人机跟踪拍摄,以获取落石移动影像。

FASTCAM SA1.1 型摄像系统具备的图像传感器可记录落石移动轨迹,配套的解析软件 Motion Plus 可以不同的播放速率回放录像以便清晰观察落石运动过程细节,并解析获取各时刻的运动特征数据,如位移、速度、加速度等。PHANTOM 4 PROV2.0 型无人机采用新一代的 OcuSync 高清图传,相机配备 1

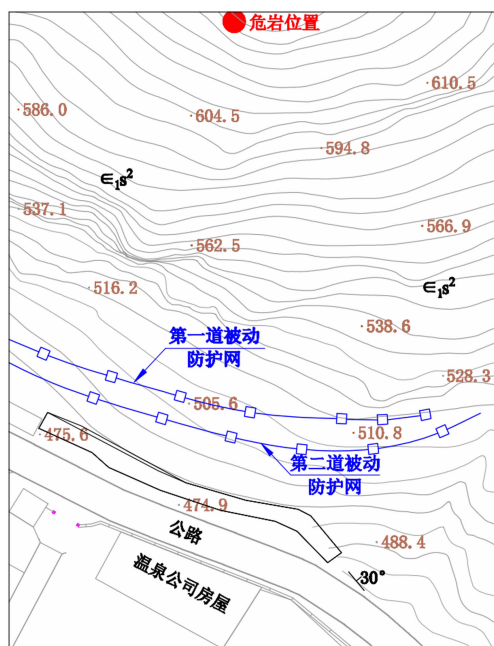


图2 工程地质平面图(比例尺:1:1000)

Fig. 2 Engineering geological map(scale: 1:1000)

英寸 2000 万像素影像传感器,支持 2.4&5.8 Ghz 的双频信号,能清晰拍摄落石运动过程影像。

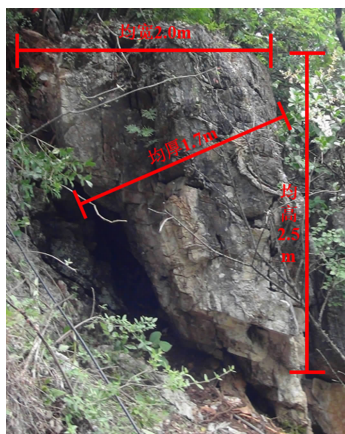


图3 危岩体几何形貌图

Fig. 3 Photo of unstable rock

2.2.2 监测数据分析

落石运动特征数据中的位移与速度基于拍摄影像并依据软件计算得到,冲击动能则根据解析数据计算而来。落石运动数据表明:不同块径的落石从初始位置(高程 640 m)运动至防护网(高程 505 m),落距为 135 m、纵长约 150 m,用时 5.34 ~ 7.66 s,与防护网碰撞时的速度介于 19.5 ~ 28.09 m/s,最大冲击动能高达 1.92×10^6 kJ。

在采用凿岩机破碎危岩体时,获得质量约 4860 kg 形状较规整的块石,选取其作为重点监测对象,将块石运动数据作为开展落石运动过程模拟再现与对比分析的依据。结果表明,落石从初始位置运动至防护网时,速度为 37.27 m/s、冲击动能为 3961 kJ。

2.2.3 落石块径大小与分布位置

凿除的破碎危岩在崩落运动中不断与坡面和拦挡物碰撞,坡面物质组成又以岩体为主,导致危岩体碎裂解体为块径不同的落石,大部分都被防护网拦截包裹并堆积在其底部(图 4),少部分在砸穿防护网后,运动至斜坡下部公路与温泉公司门口(图 5)。统计停积于防护网底部的落石块径发现:块径在 0.25 ~ 0.3 m、0.45 ~ 0.5 m 内的落石数量为 37 个、7 个;落石平均块径为 0.3 m,最大的落石块径是 0.75 m。数块尺寸较大的落石碰撞门柱后停留在温泉公司门口(图 5a)。



图4 堆积于防护网底部的落石

Fig. 4 Rockfalls at the bottom of the protective net

2.2.4 落石影响范围与危害程度

试验后落石的分布位置表明,部分块径不一的落石散落分布于路面与温泉公司门口或院内,考虑到斜坡上并无房屋建筑等,在无防护网拦截情况下,坡脚的公路与温泉公司是受落石影响最严重的区域。房屋墙壁、玻璃受落石迸射出现明显的破碎、裂痕等现象也证明了这一点。

落石运动影像资料显示:率先失稳的落石首先冲击碰撞防护网钢柱,落石动能大于钢柱屈服强度,致使钢柱弯曲变形;紧随其后的落石陆续与防护网碰撞,部分因为防护网的缓冲作用且自身能量被防护网吸收而停积在其底部,余下动能较大的落石在

与防护网碰撞后,使靠近冲击位置右侧的 3 根钢柱产生弯曲变形,导致钢绳网破裂成洞、钢柱基础锚杆拔出(图 6)。

落石的持续冲击碰撞,导致被动防护网整体朝坡外倾倒变形,对防护网造成的变形破坏包括:支撑钢柱的弯曲变形、钢柱基础锚杆的拉拔破坏、横向支撑钢绳网的断裂、减压环的大位移变形和拉锚绳断裂等。

3 落石运动过程模拟对比

3.1 模拟分析过程

采用 Rockfall 软件,以试验数据与实际坡面形态为依据,基于规范推荐的参数取值范围,选取法向恢复系数 R_n 、切向恢复系数 R_t 、摩擦角 f 和粗糙度 α 为计算参数,通过迭代试算,模拟重现落石运动过程,并对分析试验数据与模拟结果。

3.1.1 软件介绍与假设条件

Rockfall 软件以概率分析为基础,通过大率

模拟和统计分析落石随机下落过程,获得运动轨迹分布特征,进而据此解析得到全过程任一时刻的落石水平距离、弹跳高度、速度和总动能等运动特征指标。Rockfall 软件模拟落石运动时遵循如下假设:(1)落石为质量分布均匀的刚性球体;(2)不考虑落石形状尺寸、相互间作用和空气摩阻力对结果的影响;(3)模拟所用坡面与落石均被视为各向同性弹塑性体;(4)落石与坡面碰撞后,可保持自身形态完整。

3.1.2 模拟分析过程

具体模拟分析过程为:(1)对三维激光扫描仪获取的崩塌区点云数据(图 7)进行过滤拼接与前处理,并叠加无人机摄影数据后,构建斜坡三维地质影像模型(图 8);(2)根据危岩体发育位置和试验获取的运动轨迹确定落石主崩方向,据此切割地质模型绘制计算坡面(图 9);(3)将地形坡面线导入 Rockfall 软件,建立坡面计算模型,并根据坡面特征和落石性质(质量 4860 kg 的块石为模拟对象)确定计算参数取值范围;(4)通过迭代运算参数的不同



图 5 砸穿防护网的大块径落石分布位置:(a)滚落至温泉公司门口的落石;(b)滚落至路面的落石

Fig. 5 Distribution of large diameter rockfalls: (a) rockfall at the gate of company; (b) rockfall at the road pavement

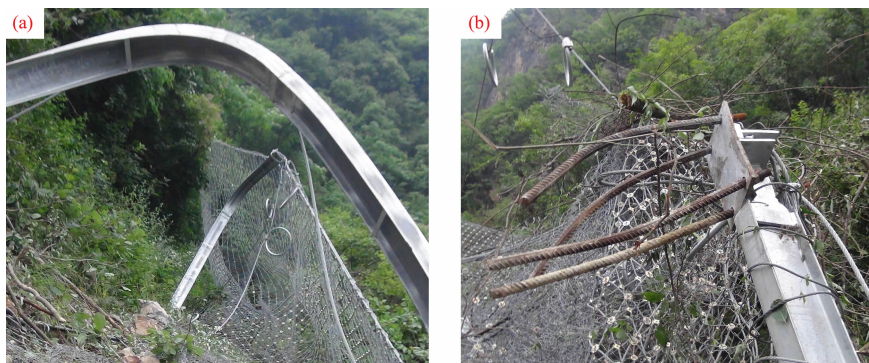


图 6 落石碰撞导致的防护网破坏:(a)弯曲变形的钢柱;(b)钢柱基础锚杆

Fig. 6 Damage of protective net caused by rockfalls: (a) bending deformed steel column; (b) steel column foundation bolt

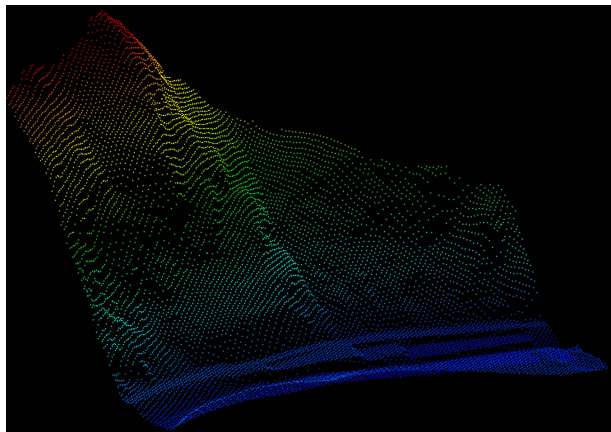


图 7 崩塌区点云数据

Fig. 7 Point cloud data of collapse area



图 8 叠加无人机摄影数据的三维地质影像模型

Fig. 8 3D geological image model superimposed with UAV photography data

组合,模拟落石运动过程,获取各项运动特征数据。

3.2 模拟结果与对比分析

3.2.1 模拟结果

反复试算后,确定当 R_n 取 0.37、 R_t 取 0.87、 f 取 6° 、 α 取 30° 时,模拟的落石运动特征结果与现场试验数据吻合较好,图 10 为表征落石运动特征的各类曲线。结果显示落石最终散布在距初始位置 170 ~ 190 m 水平距离的范围内(图 10b),与现场试验中的落石停积位置有所差异,原因是斜坡现场处于不同位置的防护网、植被、公路和房屋建筑等均会阻拦落石的运动,而 Rockfall 软件中无法准确模拟设置拦挡结构物,落石需要运动至能量为零后才会停止。

3.2.2 对比分析

表 1 为两种手段获取的质量为 4860 kg 的落石自初始位置(高程 640 m)运动至防护网(高程 505 m)的特征数据。可见,两种手段获取的落石运

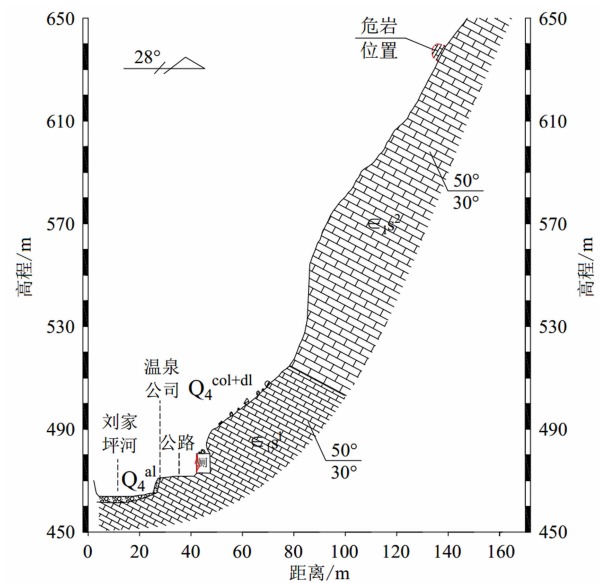


图 9 模拟计算所用的坡面

Fig. 9 Slope surface used in simulation

动数据存在一定程度的误差,表现为试验数据小于模拟结果,其中速度与总动能误差分别为 6.82%、1.44%。误差产生的原因是:现场试验中基于拍摄影像解析得到的落石运动特征数据,存在人为主观与影像清晰度造成的误差,而且落石在运动中受到的空气摩阻力、植被拦挡作用力等影响无法在 Rockfall 软件模拟中得以充分体现。

表 1 落石运动特征数据

Tab. 1 Data of rockfall movement characteristic

试验类型	落石运动特征数据		
	最远运动 距离/m	速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	总动能/ kJ
现场试验	113.16	37.27	3961
室内模拟	186.09	39.81	4018

4 影响因素敏感性分析

4.1 影响因素与模拟工况

落石运动受斜坡特征与自身性质影响显著,前者包括坡度、坡形、粗糙度、摩擦角和碰撞恢复系数等;后者包括落石形状、质量、力学性质、初始高程等。

4.1.1 影响因素确定

(1) 斜坡特征因素

截取图 9 中高程 550 m 以下的坡面线作为敏感

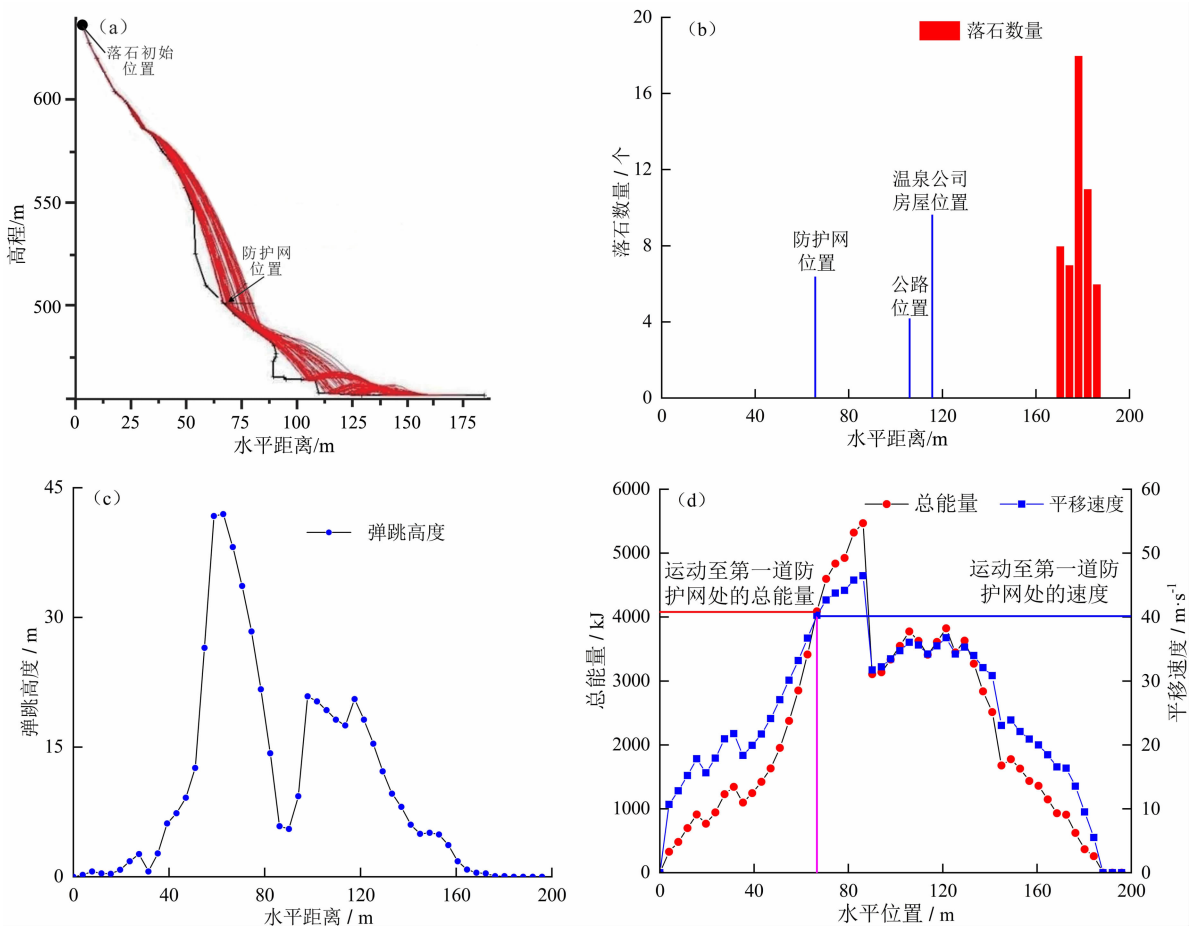


图 10 落石运动模拟计算结果:(a)运动轨迹;(b)水平位置分布图;(c)弹跳高度曲线;(d)总能量与速度曲线

Fig. 10 Simulation results of rockfall movement;

(a) rockfall trajectory; (b) histogram of horizontal distribution; (c) curve of bouncing height; (d) curve of total energy and velocity

性分析的计算剖面,即坡面形态已经确定,可不考虑坡度、坡形因素的影响。选取表征斜坡覆盖层物质组成与植被发育的法向恢复系数、切向恢复系数、粗糙度和摩擦角作为反映斜坡特征变化的因素。调查发现整个计算剖面的坡面特征虽然存在区别,但整体差异不明显,同时为适当简化参数取值,有关斜坡特征因素的取值没有逐段选取,整个计算坡面采用相同参数,变化参数范围。依据规范与坡面特征,综合确定斜坡特征因素取值为: R_n 取 0.28、0.32、0.36、0.40; R_t 取 0.78、0.82、0.86、0.90; f 取 3° 、 6° 、 9° 、 12° ; α 取 5° 、 15° 、 25° 、 35° 。

(2) 落石性质因素

危岩体岩性为单一的灰岩,风化程度差异不明显,可不考虑落石力学性质的影响。由于 Rockfall 软件中无法指定落石形状,最终选取初始高程与落

石质量作为反映落石性质变化的因素。根据危岩发育特征与因素作用机制,综合确定落石性质因素取值为:质量 m 取 $1400\text{ kg}(0.5\text{ m}^3)$ 、 $2800\text{ kg}(1\text{ m}^3)$ 、 $14\,000\text{ kg}(5\text{ m}^3)$ 、 $56\,000\text{ kg}(20\text{ m}^3)$;初始高程 H 取 530、535、540、545 m。

4.1.2 模拟工况确定

基于各影响因素的具体取值范围,遵循参数敏感性分析原则,剔除重复工况后,共确定分析落石运动特征的 19 种模拟工况(表 2),其中基础工况 GK-3 用于与其他工况比较分析。

4.2 各因素对落石运动特征的影响机制

为使模拟结果更具规律性可寻,敏感性分析时采用 Rockfall 软件中的伪随机计算模式,来模拟落石运动特征,各工况均设置 50 个落石进行运动计算,据此揭示落石水平位置分布规律。同时,考虑到

表 2 影响因素敏感性分析的模拟工况

Tab.2 Simulation conditions for factor sensitivity analysis

工况编号	影响因素	斜坡特征参数				落石性质参数	
		R_n	R_t	$f/(^{\circ})$	$\alpha/(^{\circ})$	m/kg	H/m
GK-1	法向恢复系数	0.28	0.82	6	25	2800	540
GK-2		0.32	0.82	6	25	2800	540
GK-3		0.36	0.82	6	25	2800	540
GK-4		0.40	0.82	6	25	2800	540
GK-5	切向恢复系数	0.36	0.78	6	25	2800	540
GK-6		0.36	0.86	6	25	2800	540
GK-7		0.36	0.90	6	25	2800	540
GK-8	粗糙度	0.36	0.82	3	25	2800	540
GK-9		0.36	0.82	9	25	2800	540
GK-10		0.36	0.82	12	25	2800	540
GK-11	摩擦角	0.36	0.82	6	5	2800	540
GK-12		0.36	0.82	6	15	2800	540
GK-13		0.36	0.82	6	35	2800	540
GK-14	落石质量	0.36	0.82	6	25	1400	540
GK-15		0.36	0.82	6	25	14000	540
GK-16		0.36	0.82	6	25	56000	540
GK-17	落石初始高程	0.36	0.82	6	25	2800	530
GK-18		0.36	0.82	6	25	2800	535
GK-19		0.36	0.82	6	25	2800	545

各因素的敏感性分析过程类似,仅以法向恢复系数为例,详细阐述了 R_n 对落石运动特征的影响规律分析过程,其余因素仅阐述分析结论。

4.2.1 R_n 对落石运动特征的影响

(1)对运动轨迹与水平位置分布的影响

在保持其余五类因素初始值不变,只变化法向恢复系数取值的情况下,模拟得到落石运动轨迹图 11 和水平位置分布图 12。由图可知,受限于坡形特征,各 R_n 取值条件下,落石均首先沿上部陡坡面滚动,随后在斜坡凸起处(高程 490 m)改变运动模式,转为以弹跳形式继续运动。 R_n 的大小还决定了落石产生二次弹跳的可能性高低,随 R_n 增大,落石水平运动距离增加,两者呈正比例关系,表明落石水平位置的分布情况受 R_n 影响明显。

(2)对落石弹跳高度的影响

由图 13a 可见,当 R_n 依次取 0.28、0.32、0.36、

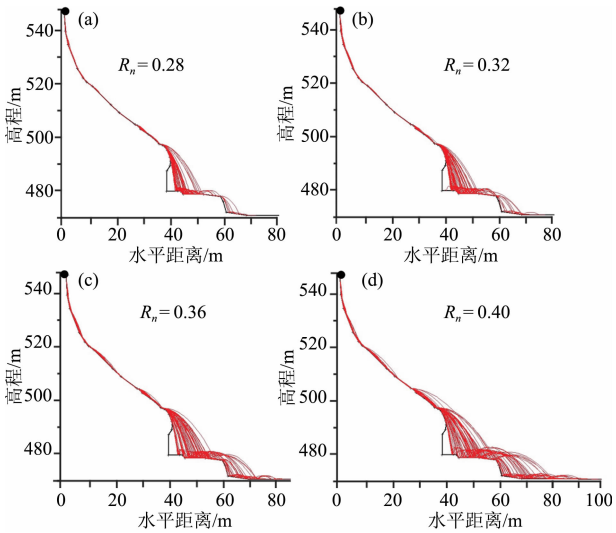


图 11 不同 R_n 条件下的落石运动轨迹

Fig. 11 Rockfall trajectory under different R_n conditions

0.40 时,落石最大弹跳高度分别为 15.06、15.40、16.16、16.31 m,均对应于水平距离为 40.68 m 时发

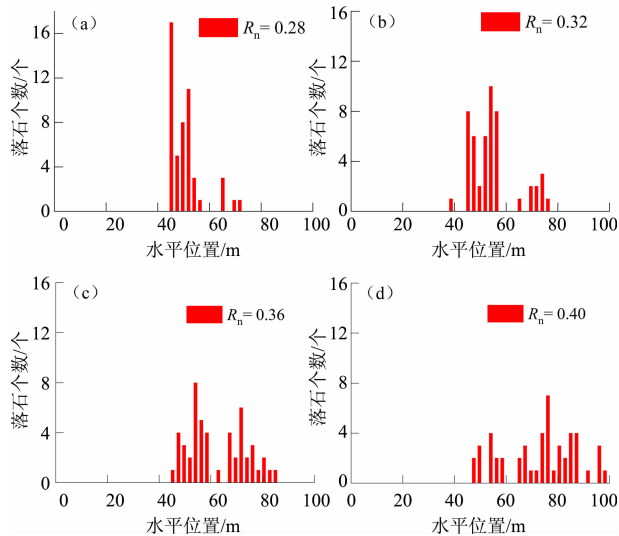
图 12 不同 R_n 条件下的落石水平位置分布

Fig. 12 Horizontal distributions of rockfalls under different R_n conditions

生。同时,随 R_n 的增加落石最大弹跳高度增大,但增幅不明显,而且落石弹跳跨度也在增加,落石与坡面的碰撞渐趋于弹性碰撞。

(3) 对落石总动能的影响

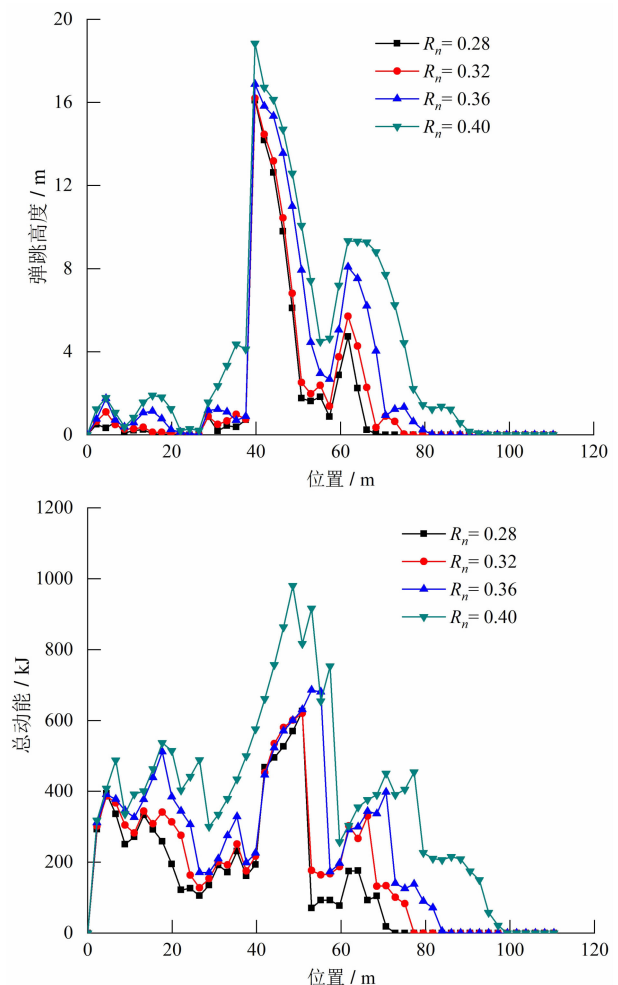
由图 13b 可知,随 R_n 的增加,落石总动能增加明显, R_n 由 0.36 增加至 0.40 时,总动能增加 42.9%;但在 $R_n = 0.28, 0.32$ 时,落石的总动能曲线距离较近,两者无明显差别,表明只有当 R_n 达到某一临界值后,才会对落石总动能影响显著。

4.2.2 R_t 对落石运动特征的影响

切向恢复系数对落石运动特征的影响表现为: R_t 对落石运动距离具有突变性影响,两者呈正比例关系; R_t 越大,落石愈发趋于以弹跳运动方式为主,落石的水平位置分布具有集聚性特征;当 R_t 增加到某一临界值后,落石的弹跳高度才会显著增加; R_t 对落石总动能具有一定程度的影响,但影响趋势并不像 R_n 那样具有突变性, R_t 对动能的影响趋势偏于缓和。

4.2.3 f 对落石运动特征的影响

粗糙度对落石运动特征的影响表现为: f 对落石运动距离的影响程度不如恢复系数明显;随着 f 增加,落石的水平位置分布趋于均匀; f 对落石弹跳高度的影响不明显;只有当 f 增加到某一临界值后,才会对落石总动能产生明显影响。

图 13 不同 R_n 条件下的落石运动特征曲线:

(a) 弹跳高度曲线; (b) 总动能曲线

Fig. 13 Motion characteristic curves of rockfalls under different R_n conditions:

(a) curve of bouncing height; (b) curve of total kinetic energy

4.2.4 α 对落石运动特征的影响

摩擦角对落石运动特征的影响表现为: α 对落石运动距离影响明显,两者呈反比例关系,即 α 对落石运动具有显著抑制作用; α 对落石弹跳高度与总动能的影响程度较低,而且影响趋势比较复杂,并非单纯表现为增加或降低的趋势。

4.2.5 m 对落石运动特征的影响

落石质量对运动特征的影响表现为: m 较小时对落石运动距离具有一定程度的影响,但当 m 超过某一临界值后,质量对落石水平位置分布与运动轨迹的影响变得不明显;随着 m 增加,落石弹跳高度稍有降低,而且当 m 达到某一临界值后,落石弹跳高度趋于平稳,不再随 m 的变化产生显著改变; m

对落石总动能影响明显,表现为 m 越大,总动能越大。

4.2.6 H 对落石运动特征的影响

落石初始高程对运动特征的影响表现为:随着 H 增加,落石运动距离不断增大,落石的弹跳高度也明显增加;只有当 H 超过某一临界值后,才会对落石总动能产生显著影响。

4.3 因素敏感性分析结果

综合分析各因素对落石运动特征的影响程度与作用机制后,选取因素单位变化率作为敏感性排序的判断依据,即采用因素单位变化范围内的落石运动特征数据变化作为判别指标,计算公式如下:

$$A = \frac{\Delta I}{\Delta F} = \frac{I_4 - I_1}{I_1} \bigg/ \frac{F_4 - F_1}{F_1} \quad (1)$$

式中, A 为因素单位变化率,数值大小决定了因素的敏感性高低; ΔI 为落石运动特征指标的单位区间变化率; ΔF 为影响因素的单位区间变化率; I_4 与 I_1 为因素的取值上限与下限对应的落石运动特征指标值; F_4 与 F_1 分别为因素的取值上限与下限数值。

图 14 中根据式(1)计算的各影响因素的单位变化率直观呈现了各因素的敏感性高低变化。该图表明,各影响因素的敏感性排序为:

(1)对于落石运动距离、弹跳高度以及总动能而言,因素的敏感性排序分别为: $R_i > R_n > f > H > m, H > R_i > R_n > f, m > R_n > H > R_i > f$;

(2)与其余因素的影响机制相反, α 对落石运动距离有反比例影响、 m 对落石弹跳高度有反比例

影响;

(3)与其余因素的影响机制不同, α 对落石弹跳高度和总动能的影响机制较复杂,均并不单纯表现为单调递增或单调递减。

4.4 对落石防治的启示

前文 4.3 节阐述的影响因素敏感性排序结果,对落石防治措施的确定具有指导作用。表征斜坡坡面特征的 R_n 、 R_i 、 f 三个因素均对落石运动特征(运动距离、弹跳高度、总动能)具有正相关影响,在防治措施设计中,可从调整与优化坡面特征的角度考虑。比如对斜坡坡面凸起处和物质组成较坚硬地段等落石运动方式可能转变的部位,进行坡表物质组成替换处理,采用土体或碎石土等替换原先的崩塌/砾石堆积体、基岩覆盖层等,可实现通过减小坡面法切向恢复系数来缩短落石运动距离与降低落石弹跳高度、总动能的目的。

落石质量 m 对运动距离与总动能等也具有正比例影响,而落石动能又决定了防护拦挡结构(如被动防护网)的设计参数取值,即冲击动能越大,拦挡结构物的强度也需要相应提高。因此,在条件允许的情况下,设计拦挡结构物之前,可采用凿岩机等对大尺度危岩体进行破碎处理,或沿结构面清除被裂隙切割的小块径危岩,此举旨在减小落石失稳时的质量,进而降低落石冲击动能。同时,由于落石初始位置与拦挡结构间的相对高差对运动距离、动能等也具有正相关影响,因此在地形与施工条件允许时,可适当缩短两者间的距离,实现降低落石冲击动能等的目的。

5 结论与讨论

文章基于现场试验与室内模拟对比分析了落石运动特征,并采用 Rockfall 软件探讨了落石运动特征各影响因素的敏感性高低,结论如下:

(1)现场试验中,落石从初始位置运动至防护网用时 5.34 ~ 7.66 s,落距约 130 m;与防护网碰撞时,落石速度介于 19.5 ~ 28.09 m/s,最大落石冲击动能达到 1.92×10^6 kJ。

(2)当 $R_n = 0.37$ 、 $R_i = 0.87$ 、 $f = 6^\circ$ 、 $\alpha = 30^\circ$ 时,模拟结果与现场试验吻合较好。两种研究手段中,质

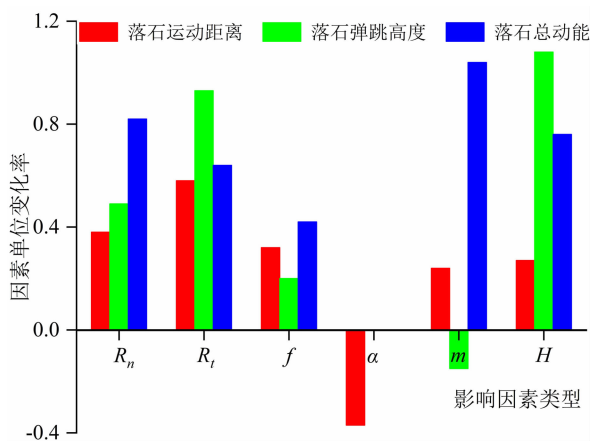


图 14 因素敏感性分析结果

Fig. 14 Factor sensitivity analysis results

量为 4860 kg 的落石从初始位置运动至防护网时, 速度分别为 37.27 m/s、39.81 m/s, 总动能分别为 3961 kJ、4018 kJ。误差的产生主要与解析计算时的人为主观因素和 Rockfall 软件的假设条件限制有关。

(3) 敏感性分析结果表明, 不同影响因素对落石运动特征的影响程度和作用机制存在差异。当以因素单位变化率为敏感性排序的依据时, 对于落石运动距离、弹跳高度和总动能而言, 因素敏感性排序分别为: $R_i > R_n > f > H > m$ 、 $H > R_i > R_n > f$ 、 $m > R_n > H > R_i > f$ 。

(4) 摩擦角 α 对落石运动特征的影响机制与其他因素不同, α 对落石运动距离具有反比例影响, 对落石弹跳高度和总动能的影响更为复杂。

本研究基于现场危岩体的清除试验, 依据监测的数据信息分析落石运动特征, 采用 Rockfall 软件模拟对比落石运动过程, 并据此开展落石运动的影响因素敏感性分析, 有效指导了落石防治措施的选取。但本研究也存在一定不足, 其中, 本文依托特定危岩体的凿岩清除工程开展的落石运动现场试验, 缺乏危岩体结构特征对崩塌落石规模影响机制的深入探讨; 其次, 敏感性分析研究中, 对危岩体在不同运动特征下的影响因素分析关注不足。鉴于此, 今后将在阐明危岩体裂隙发育和结构面交切关系的基础上, 探讨危岩体结构特性差异对崩塌落石规模的影响。此外, 还将着重研究落石运动特征及其影响因素间的内在联系, 揭示落石在不同运动特征下的影响因素作用机制, 为研究区崩塌落石风险防控与防灾减灾工作提供决策指导。

参考文献 (References)

- [1] 袁志辉, 倪万魁, 陈志新. 拉裂式崩塌的运动特征分析——以陕西延川县为例[J]. 灾害学, 2014, **29**(4): 111 – 115. [YUAN Zhihui, NI Wankui, CHEN Zhixin. Analysis on movement characteristics of pull – splitting Collapses—taking Yanchang county of Shanxi province[J]. Journal of Catastrophology, 2014, **29**(4): 111 – 115] DOI:10.3969/j. issn. 1000 – 811 X. 2014. 04. 021
- [2] BOZZOLO D, PAMINI R. Simulation of rock falls down a valley slide[J]. ActaMechanica, 1986, **63**(1): 113 – 130. DOI:10.1007/BF01182543
- [3] GIANI G P, GIACOMINI A, MIGLIAZZA M, et al. Experimental and theoretical studies to improve rock fall analysis and protection work design[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2004, **37**(5): 369 – 389. DOI:10.1007/s00603 – 004 – 0027 – 2
- [4] BOURRIER F, DORREN L, NICOT F, et al. Toward objective rockfall trajectory simulation using a stochastic impact model[J]. Geomorphology, 2009, **110**(3): 68 – 79. DOI: 10.1016/j.geomorph.2009.03.017
- [5] 易伟, 余斌, 刘秧, 等. 滚石冲击力计算方法研究[J]. 山地学报, 2016, **34**(3): 310 – 316. [YI Wei, YU Bin, LIU Yang, et al. Research on calculation method of rockfall impact force [J]. Mountain Research, 2016, **34**(3): 310 – 316] DOI:10.16089/j.cnki.1008 – 2786.000133
- [6] 孙金龙, 段绍臻. 滚石颗粒随机碰撞模型的理论分析[J]. 山地学报, 2020, **38**(3): 416 – 424. [SUN Jinlong, DUAN Shaozhen. Theoretical analysis of the random collision model of rolling stone particle[J]. Mountain Research, 2020, **38**(3): 416 – 424] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 – 2786.000521
- [7] 唐红梅, 易朋莹. 危岩落石运动路径研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2003, **25**(1): 17 – 23. [TANG Hongmei, YI Pengying. Research on dangerous rock movement route [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2003, **25**(1): 17 – 23] DOI:10.3969/j. issn. 1674 – 4764. 2003. 01. 004
- [8] 赵旭, 刘汉东. 运动学在边坡落石计算中的应用[J]. 华北水利水电学院学报, 2004, **25**(2): 46 – 50. [ZHAO Xu, LIU Handong. Application of kinematics in the calculation of falling rocks[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2004, **25**(2): 46 – 50] DOI: 10.19760/j.cnwu. zk. 2004. 02. 014
- [9] 赵丽娜, 周科平, 高峰, 等. 露天矿边坡滚石运动特征及控制[J]. 灾害学, 2008, **23**(3): 76 – 79. [ZHAO Lina, ZHOU Keping, GAO Feng, et al. Motion characteristics and control of rockfall of open – pit slope[J]. Journal of Catastrophology, 2008, **23**(3): 76 – 79] DOI:10.3969/j. issn. 1000 – 811X. 2008. 03. 018
- [10] 裴向军, 黄润秋, 裴钻, 等. 强震触发崩塌滚石运动特征研究[J]. 工程地质学报, 2011, **19**(4): 498 – 504. [PEI Xiangjun, HUANG Runqiu, PEI Zuan, et al. Analysis on the movement characteristics of rolling rock on slope caused by intensive earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, **19**(4): 498 – 504] DOI:10.3969/j. issn. 1004 – 9665. 2011. 04. 010
- [11] 蔡红刚, 裴向军, 吴景华, 等. 强震抛射型崩塌滚石运动特征研究[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2011, **12**(3): 1 – 4. [CAI Honggang, PEI Xiangjun, WU Jinghua, et al. Research on the movement features of rock fall by strong earthquake projection type collapse[J]. Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Science Edition), 2011, **12**(3): 1 – 4] DOI:10.3969/j. issn. 1009 – 8984. 2011. 03. 001
- [12] 程强, 苏生瑞. 汶川地震崩塌滚石坡面运动特征[J]. 岩土力学, 2014, **35**(3): 772 – 776. [CHENG Qiang, SU Shengrui.

- Movement characteristics of collapsed stones on slopes induced by Wenchuan earthquake[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, **35**(3): 772 – 776] DOI:10.16285/j. rsm. 2014. 03. 011
- [13] 黄润秋, 刘卫华, 周江平, 等. 滚石运动特征试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2007, **29**(9): 1296 – 1302. [HUANG Runqiu, LIU Weihua, ZHOU Jiangping, et al. Rolling tests on movement characteristics of rock blocks[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, **29**(9): 1296 – 1302] DOI:10.3321/j. issn: 1000 – 4548. 2007. 09. 003
- [14] 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. [HUANG Runqiu, LIU Weihua. In – situ test study of characteristics of rolling rock blocks based on orthogonal design[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, **28**(5): 882 – 891] DOI:10.3321/j. issn: 1000 – 6915. 2009. 05. 003
- [15] 张奇华, 彭光忠, 付少兰, 等. 链子崖危岩体变形破坏系统辨识[J]. *岩石力学与工程学报*, 1998, **17**(5): 544 – 551. [ZHANG Jihua, PENG Guangzhong, FU Shaolan, et al. System identification of deformation – failure for the dangerous rock body of Lianzi cliff [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1998, **17**(5): 544 – 551] DOI: 10.3321/j. issn: 1006 – 3021. 2003. 04. 016
- [16] 陈洪凯, 王蓉, 唐红梅. 危岩研究现状及趋势综述[J]. *重庆交通大学学报*, 2003, **22**(3): 18 – 22. [CHEN Hongkai, WANG Rong, TANG Hongmei. Review on current situation to study and trend of dangerous rock mass[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University*, 2003, **22**(3): 18 – 22] DOI:10.3969/j. issn. 1674 – 0696. 2003. 03. 005
- [17] 叶四桥, 唐红梅, 祝辉. 基于落石运动特性分析的拦石网设计理念[J]. *岩土工程学报*, 2007, **29**(4): 566 – 571. [YE Siqiao, TANG Hongmei, ZHU Hui. Design conception of safe net system based on analysis of motion trace of rockfall[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, **29**(4): 566 – 571] DOI: 10.3321/j. issn: 1000 – 4548. 2007. 04. 016
- [18] 黄润秋, 刘卫华. 滚石在平台上的运动特征分析[J]. *地球科学进展*, 2008, **23**(5): 517 – 523. [HUANG Runqiu, LIU Weihua. Study on the movement characteristics of rolling rock blocks on platform[J]. *Advances in Earth Science*, 2008, **23**(5): 517 – 523] DOI:10.3321/j. issn: 1001 – 8166. 2008. 05. 012
- [19] 秦志英, 陆启韶. 基于恢复系数的碰撞过程模型分析[J]. *动力学与控制学报*, 2006, **4**(4): 294 – 298. [QIN Zhiying, LU Qishao. Analysis of impact process model based on restitution coefficient[J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2006, **4**(4): 294 – 298] DOI:10.3969/j. issn. 1672 – 6553. 2006. 04. 002
- [20] 何思明, 吴永, 李新坡. 滚石冲击碰撞恢复系数研究[J]. *岩土力学*, 2009, **30**(3): 623 – 627. [HE Siming, WU Yong, LI Xinpo. Research on restitution coefficient of rock fall [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, **30**(3): 623 – 627] DOI:10.16285/j. rsm. 2009. 03. 005
- [21] 罗田. 岩质边坡危岩落石运动特征和防护研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013: 12 – 13. [LUO Tian. Study on movement characteristics and protection work design of rockfall on the rock slope [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013: 12 – 13] DOI:10.7666/d. Y2334463
- [22] 柳万里, 晏鄂川, 戴航, 等. 南漳保康两县碳酸盐岩崩塌发育特征及影响程度分区[J]. *地质科技通报*, 2020, **39**(2): 104 – 112. [LIU Wanli, YAN Echuan, DAI Hang, et al. Development characteristics and influence degree zoning of carbonate rock collapse in Nanzhang and Baokang counties [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2020, **39**(2): 104 – 112] DOI: 10.19509/j. cnki. dzkq. 2020. 0211

Experimental Study on Rockfall and Sensitivity Analysis of Influencing Factors

LIU Wanli¹, YAN Echuan^{1*}, WEI Pengfei², LI Lihua²

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Eighth Geological Brigade of Hubei, Xiangyang 441000, Hubei, China)

Abstract: In the process of rockfall, it often collides with the cliff surface and disintegrates into falling rocks with different block diameters. There are many factors affecting the characteristics of rock movement, which makes it difficult to accurately predict the whole process of rockfall movement. In this paper, taking collapse in Tangchi

Gorge of Hubei Province as example, based on the investigation and analysis of the geological conditions in the area, it carried out a unstable rock removal test in the field, and tracked the process of the collapse and monitored the data of the falling rocks movement. Subsequently, the results of a comparative study on the characteristics of falling rocks carried out by Rockfall software showed that when the normal restitution coefficient $R_n = 0.37$, the tangential restitution coefficient $R_t = 0.87$, the roughness $f = 6^\circ$, the friction angle $\alpha = 30^\circ$, the test data were in good agreement with the simulation results. That is, the parameter combination can accurately characterize the process of falling rock movement. Based on the sensitivity analysis of Rockfall software, it was found that, different factors had different degrees of influence on the characteristics of rockfall and the mechanism of action, especially with the influence mechanism of α on rockfall was the most complicated. When the unit change rate of the factor was used as the basis for sorting sensitivity, for the distance of rockfall movement, the height of bounce and the total kinetic energy, the sensitivity of R_n , R_t , f , α , m (rockfall mass), and H (initial elevation) was ranked as follows: $R_t > R_n > f > H > m$, $H > R_t > R_n > f$, $m > R_n > H > R_t > f$. The results can be used to determine of the impact range and damage degree of rockfall, and provide reference for design of collapse prevention and control.

Key words: rockfall; motion characteristic; Rockfall software; factor sensitivity; Tangchi Gorge