

基于 Rocfall 的危岩落石运动特性数值模拟分析

杨炆 孔庆莉 陈俊林 覃柏松 刘军亮

(山东正元地质资源勘查有限责任公司, 山东 济南 250000)

【摘要】危岩落石通常具有突发性、难预测性、高破坏性、随机性等特点,且落石碰撞过程机制复杂,影响因素众多。以某工程实例为背景,通过对已经发生落石的数值模拟计算,基于 Rocfall 软件模拟还原不同样本数据的落石运动路径、停积位置,验证了有关模拟参数取值的合理性。并在此基础上,通过数值模拟获得了落石运动的最大弹跳高度、最大平移速度。为危岩落石防治工程中被动防治位置以及落石的拦截高度等参数的确定提供参考依据。

【关键词】落石; Rocfall; 运动轨迹; 数值模拟

引言:

崩塌危岩落石通常具有突发性、难预测性、高破坏性、随机性等特点,基于失稳模式不同,将危岩将分为坠落式危岩、滑塌式危岩和倾倒式危岩^[1-2]。落石碰撞过程机制复杂,影响因素众多,如坡面岩土体特征、物理力学性质、边坡形态、落石大小、强度等初始条件都会影响到落石的碰撞过程^[3-4],目前国内外大部分研究方法都基于 Hertz 弹性碰撞理论和碰撞恢复系数^[5-7]。本文以某工程实例为背景,通过

Rocfall 软件建立二维数值模型,模拟还原了落石运动轨迹、停积位置,并在此基础上,对落石平移速度、弹跳高度进行分析,为危岩落石防治中被动防治工程包括落石的拦截高度、防护网能级等参数,警戒位置的确定提供重要依据。

一、工程背景

某陡崖位于黔西县城北东 75° 花溪乡湘河村,直距县城约 50km 左右,陡崖南部 300m 为一煤矿工业场地以及零星分布的湘河村村民住宅。陡崖呈阶

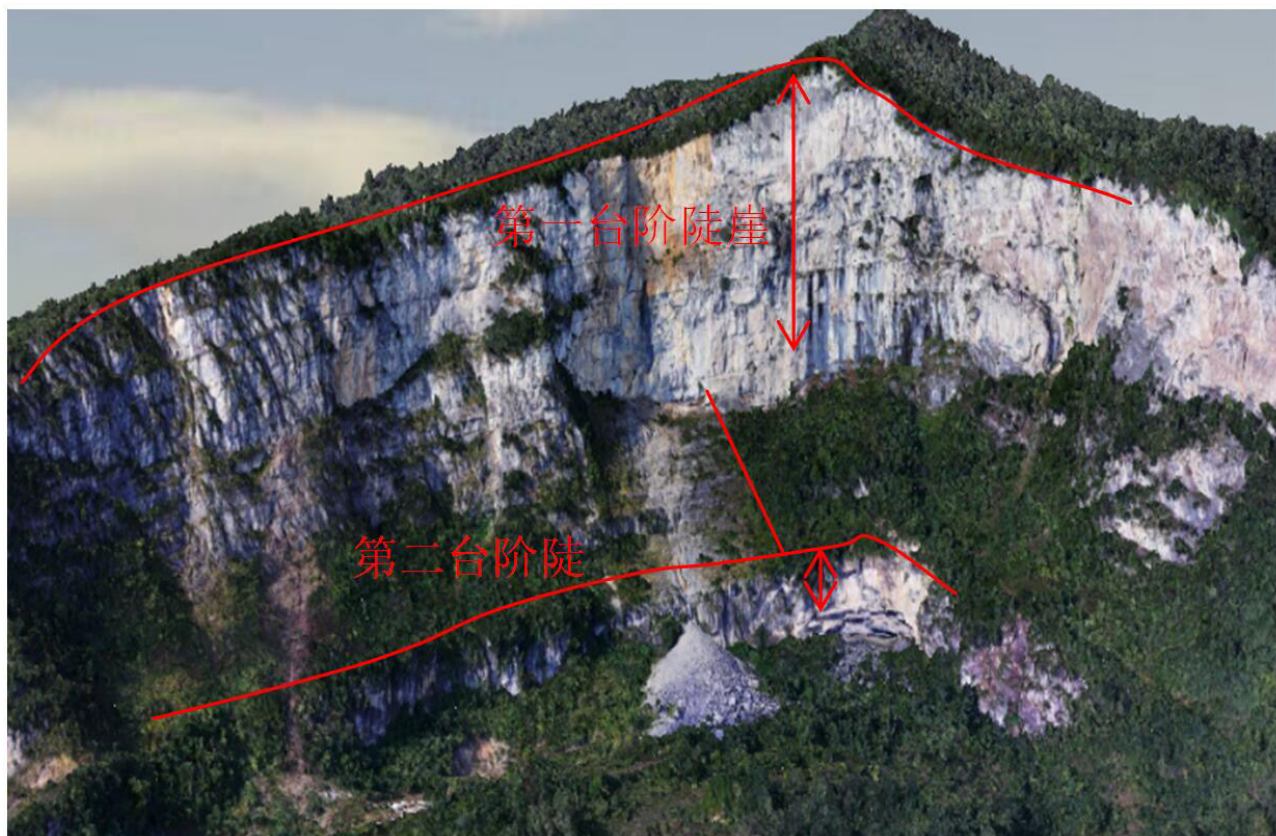


图 1 陡崖展布情况航拍照片

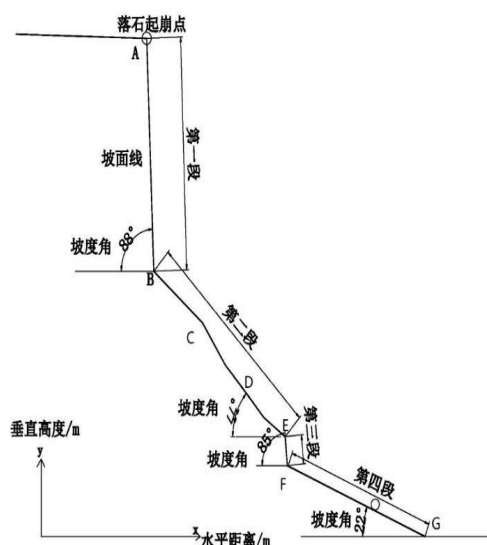


图2 崩塌边坡分段情况

梯式发育，第一台阶（较高）陡崖长约1.2km，坡顶高程911~1214m，坡脚高程874~1096m；第二台阶的陡崖长约520m，坡顶高程970~1036m，坡脚高程956~1004m。两个台阶之间的斜坡坡度在40~50°（图1）。

二、Rocfall 模型建立及参数选取

Rocfall 软件可以分析出整个边坡落石的动能、速度和弹跳高度，以及落石滚动终点的位置。同样也可以获得沿坡面线的动能、速度和弹跳高度分布。其分布规律可用柱状图显示，并自动计算其统计学规律^[8]。

（一）基本假设

一般情况下，边坡岩土体性质、表观形态、植被发育情况、坡脚覆盖物等因素，是影响崩塌落石运动模式的主要因素。为方便研究，针对落石运动做出以下假设（理想状态）^[9]：

1. 落石假定为各向均质同性的规则块体或球体；
2. 落石之间的相互影响忽略不计，且运动中不出现破碎；
3. 模拟运动过程中，空气阻力忽略不计。

（二）参数选取

不同下垫面的岩性、表观形态、坡度、植被覆盖度、坡脚覆盖物等特征均存在明显差异，从而导致危岩落石的运动特性如运动速度、弹跳高度、能量大小及停积位置不同，因此落石运动过程中下垫面参数的选取十分关键。

在 Rocfall 数值模拟软件中，选取碰撞恢复系数和摩擦系数作为危岩边坡特性的参考系数。碰撞恢复系数和摩擦系数均与边坡性质、角度等因素密切相关

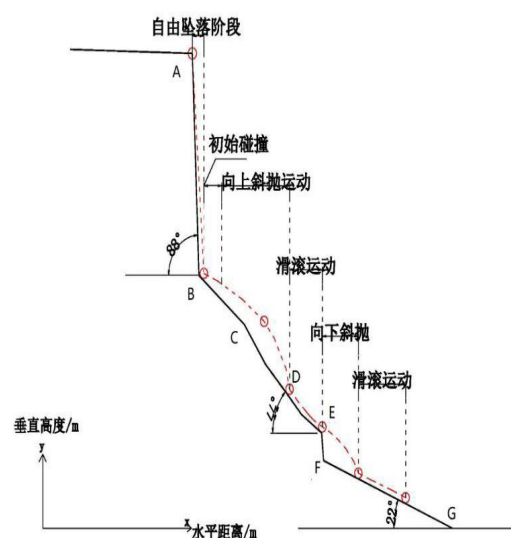


图4 Rocfall 模拟落石运动轨迹简化图

^[10]。根据陡崖边坡的岩性、表层覆盖物、形状、坡度等特征将陡崖边坡分为四段（见图2），第一段边坡为基岩边坡表面；第二段边坡为强风化硬岩坡面，夹生少量灌木草皮；第三段边坡为强风化硬岩坡面；第四段边坡为植被发育良好土质边坡。本次模拟各段边坡参数取值见表1。

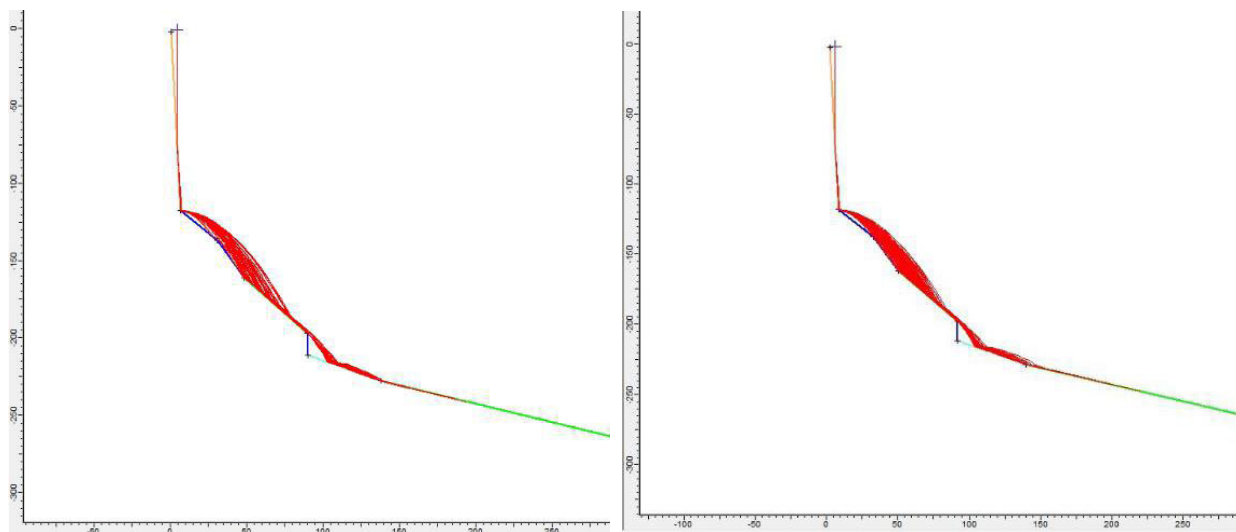
表1 各段边坡参数表

坡面特征	切向恢复系数 Rt	法向恢复系数 Rn	滚动摩擦系数
第一段 AB	0.87	0.37	0.3
第二段 BE	0.8	0.30	0.47
第三段 EF	0.82	0.32	0.35
第四段 FG	0.78	0.28	0.59

三、Rocfall 模拟结果及分析

（一）落石运动轨迹

通过 Rocfall 软件分别以50个落石样本、100个落石样本数据进行分析，样本落石重量1000kg。通过模拟图（图3-a, b）看出落石运动路径大致为：落石从第一段陡崖（AB段）顶部下坠、自由落体运动后，与BC段发生初始碰撞，向上斜抛运动后再次回落到斜坡表面CD、DE段，落石回落后沿着斜坡表面进行滚动运动，至第二段陡崖顶部（DE段）后，飞过EF段做向下斜抛运动，落石与斜坡（FG段）碰撞接触后，因斜坡表面为松散粉质黏土碎石表面，碰撞后落石做滚动运动直至停止（图4）。



(a) 50 样本轨迹

(b) 100 样本轨迹

图3 Rocfall 模拟落石运动轨迹

通过 Rocfall 软件, 以 50 个样本分析计算得出, 落石最大水平停止距离 L (以落石初始位置为起点) 集中分布在 161–187m (样本数 41 个), 少数分布在 196–239m (样本数 9 个)。以 100 个样本分析计算得出, 落石最大水平停止距离 L 集中分布在 161–187m (样本数 71 个), 其余少数分布在 196–257m (样本数 29 个), 见图 5。

现状崩塌堆积物停积位置范围为 156–173m (以崩塌落石起始位置为起点)。通过现状堆积物停积位置与 50 样本、100 样本模拟结果对比得出, 总体上数值模拟的落石运动路径与实际情况较为吻合, 表明本次数值模拟参数取值合理。

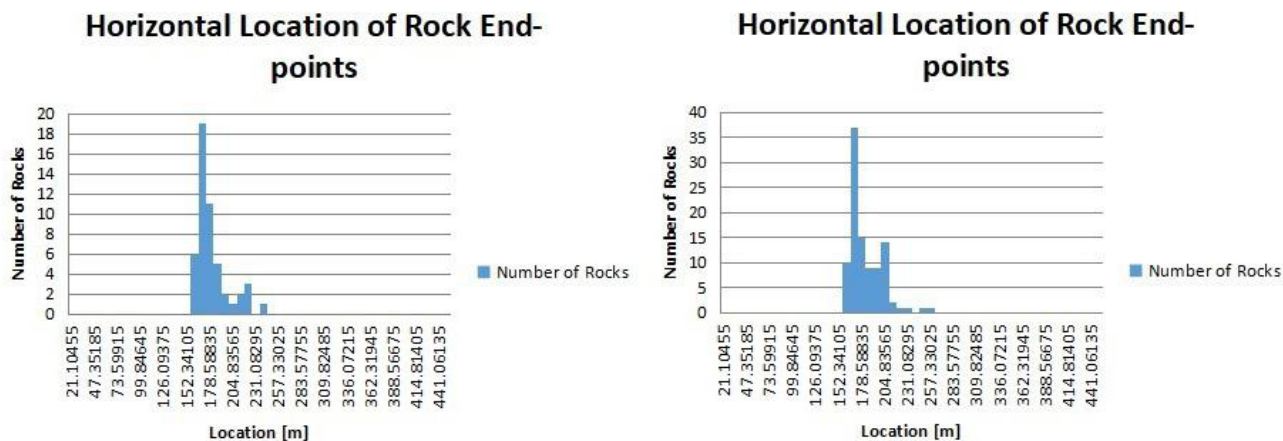
(二) 落石的弹跳高度

数值模拟的落石的弹跳高度有一个明显的峰值

区, 大概在水平距离 60–69m 范围 (见图 6), 即 CD 段斜坡中下段位置。落石在 BC 段经历初始碰撞, 由于下垫面为强风化硬岩坡面, 坡度较大, 落石发生弹跳运动, 空中飞行至 D 点, 弹跳最大高度为 18.69m。之后落石回落至 DE 段斜坡, 发生滑滚运动, 由于下垫面摩擦, 弹跳高度直线下降, 并在 E 点发生向下斜抛运动, 飞跃 EF 段后回落至 FG 段斜坡, 再次发生弹跳运动, 由于能量损失以及下垫面性质, 弹跳高度较 D 点高度小, 此后落石沿 FG 段斜坡不断地碰撞和滚动摩擦, 直至停止。

(三) 落石的平移速度

初始阶段, 危岩失稳脱离母岩形成的落石, 初始速度为 0, 危岩落石在自重作用下自由落体运动。落石在下落至 B 点过程中速度呈线性增加, 由势能



(a) 50 样本水平停积位置分布

(b) 100 样本水平停积位置分布

图5 Rocfall 模拟落石水平停积位置分布图

转化成动能。落石在撞击到坡面后,一部分动能转化成内能,速度也随之降低;在B点发生碰撞、弹跳,空中飞行一段距离后重新回落至斜坡CD、DE段,平移速度也随势能的减小而不断增加,在D点达到最大,为41.61m/s;由于下垫面因素影响以及能量损失,落石在DE段发生滑滚运动,经过不断地碰撞和滚动摩擦,落石速度不断减小;于E点发生向下斜抛运动,飞跃EF段后回落至FG段斜坡,最后经过不断地碰撞和翻滚摩擦,落石运动速度不断减小直至运动停止。

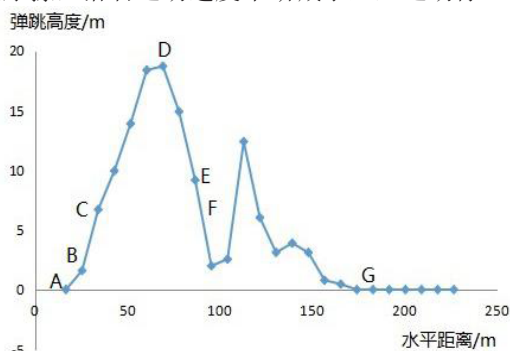


图6 落石各点弹跳高度包络图

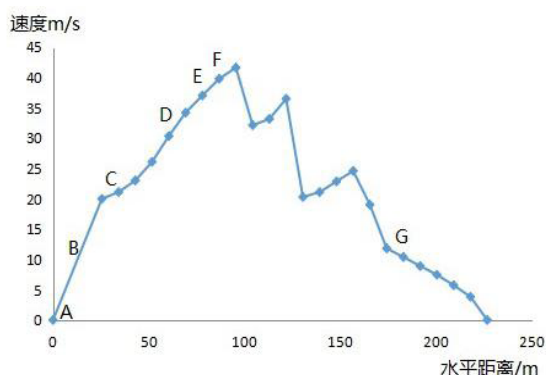


图7 落石水平位移速度包络图

四、结论

本文以黔西县某危岩落石为研究对象,选取合理的下垫面参数,通过 Rocfall 软件对已崩落危岩落石的运动轨迹进行了数值模拟,获得了落石的最大弹跳高度、最大平移速度等特征参数,并对不同样本数的落石进行了对比性模拟,结果显示:

1. 落石的数值模拟运动路径、最终停积位置与实际情况吻合,模拟参数选取合理。
2. 落石运动弹跳高度最大值为 18.69m,最大平移速度为 41.69m/s。

通过 Rocfall 软件输入有关边坡和落石的基本参数,对落石的运动轨迹的预测,来模拟孤石在斜坡上的运动路径和弹跳高度、平移速度变化,可以为防护治理设计提供直观有效的依据。防治落石危害的建议:

(1) 拦石网:参考 Rocfall 模拟落石停积位置,结合现状崩塌落石停积位置,于安全距离以外即 173m 以外设置 500kJ 能级的柔性拦石网。

(2) 边坡最下部斜坡植被发育,可以考虑被动防护系统与森林防护相结合,用建筑纽扣将拦石网、钢绳织网固定在树木主干上,将树木练成连成一片,利用地表下垫面的粗糙度、树木的拦挡,减缓落石体水平运动速度,提高防护有效性。

(3) 于拦石网外围 20m 处,设置安全警示距离,安置警示牌,防止人畜误入造成意外。

参考文献:

- [1] 陈洪凯,唐红梅,刘丽,等. 地质灾害理论与控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [2] 陈洪凯,唐红梅,王林峰,等. 危岩崩塌演化理论及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [3] BOURRIER F, DORREN L, NJCOT F, et al . Toward objective rockfall trajectory simulation using a stochastic impact model [J]. Geomorphology. 2009, 110(3/4):68-79.
- [4] 杨海清,周小平. 边坡落石运动轨迹计算新方法 [J]. 岩土力学. 2009,(11):3411-3416.
- [5] 章广成,向欣,唐辉明. 落石碰撞恢复系数的现场试验与数值计算 [J]. 岩石力学与工程学报. 2011,(6):1266-1273.
- [6] 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.
- [7] 黄雨,孙启登,许强. 滚石运动特性研究新进展 [J]. 振动与冲击. 2010,(10):31-35.
- [8] 张帅,罗永健. 基于 Rocfall 模拟的高陡岩质建筑边坡孤石滚落防治方法探讨 [J]. 广东土木与建筑. 2019,(2):54-57.
- [9] 陈洪凯,董平,唐红梅. 危岩崩塌灾害研究现状与趋势 [J]. 重庆师范大学学报: 自然科学版. 2015,(6):53-60.
- [10] 唐红梅,李阳,王林峰. 三峡库区陡高边坡落石运动特性数值模拟分析 [J]. 重庆师范大学学报: 自然科学版. 2019,(4):49-54.

作者简介:

通讯作者: 杨炆, 男, 1990 年生, 硕士, 水工环专业工程师, 研究方向为灾害地质与环境地质。