

文章编号: 1006-4362(2023)03-0023-05

基于运动特征分析的高陡边坡崩塌落石防治措施建议

蔡培, 王刘文, 王彤标, 胡应全, 陈金宏

(贵州省煤矿设计研究院有限公司, 贵阳 550025)

摘要: 崩塌落石具有突发性、随机性、隐蔽性及致灾严重性等特征。为对其进行有效防治,以某煤矿内崩塌落石为研究对象,采用 RocFall 软件对已崩落石的运动轨迹进行了模拟,反演拟合了垫面参数,在此基础上对拟崩落石区域进行数值模拟和理论计算得出其运动特征,为崩塌落石防治措施选择提供了合理依据。

关键词: 崩塌落石;数值模拟;运动特征;防治措施

中图分类号: P642.21 **文献标识码:** A

PREVENTION AND CONTROL MEASURES OF ROCKFALL IN HIGH AND STEEP SLOPE BASED ON MOTION CHARACTERISTICS ANALYSIS

CAI Pei, WANG Liu-wen, WANG Tong-biao, HU Ying-quan, CHEN Jin-hong

(Guizhou Coal Mine Design and Research Institute Co. Ltd, Guiyang 550025, China)

Abstract: Rockfall has the characteristics of sudden, random, concealment and disaster severity. In order to carry out effective prevention and control, Rockfall in one coal mine is taken as the research object. Rockfall software is used to simulate the movement track of caved rocks, and the underlying surface parameters are obtained through inverse fitting. On this basis, numerical simulation and theoretical calculation are carried out for the quasi caved rock area to obtain its movement track characteristics, providing a reasonable basis for the selection of prevention and control measures for rock collapse.

Key words: rockfall; numerical simulation; motion characteristics; prevention and control measures

1 引言

崩塌落石是边坡尤其是高陡边坡的一种浅表部破坏方式,为贵州山区主要地质灾害类型之一,其具有突发性、随机性、隐蔽性及致灾严重性等特征^[1-2],科学分析崩塌落石的运动特征是采取合理防治措施的基础^[2]。崩塌落石运动特征复杂,影响因素较多。唐红梅等^[3]将崩塌落石的运动过程分为初始运动过

程、碰撞过程、滑动过程和滚动过程。孙金龙等^[4]选取了滚石颗粒碰撞过程中入射速度、初始旋转角速度、入射角度以及碰撞角度几个主要因素,建立了滚石颗粒随机碰撞模型,为滚石的运动轨迹以及冲击能量的预测提供了理论依据。黄润秋^[5]等基于正交设计的落石现场实验研究,得出斜坡坡度是影响滚石运动加速度的主要因素,斜坡覆盖层和植被特性为落石碰撞恢复系数的控制因素。宋波等^[6]以室内

收稿日期: 2023-01-06 改回日期: 2023-04-08

基金项目: 贵州省煤矿安全高效开采技术支撑与服务人才基地基金项目(GMY-RD2022. KJ-010)

振动台试验研究场地类型、地震动强度、落石大小和形状等对落石运动距离的影响。柳万里等^[7]根据现场试验和数值模拟对影响落石运动特征的影响因素敏感性进行了分析。许强等^[8-10]采用地面合成孔径雷达监测、无人机航拍、三维激光扫描等技术阐述了崩塌落石的动力学过程和成因机理,并针对不同发育特征提出了不同的防治措施。蔡向阳等^[11]系统总结了崩塌落石运动现有计算模型的研究现状,提出应当进一步研究落石的主要影响因素以及各因素之间相互制约的作用机制。程宇等^[12-15]通过采用半定量打分表、室内岩土体力学实验、落石运动过程数值模拟对崩塌危岩的稳定性及危害范围进行了评价。许泽鹏等^[16]通过开展不同质量落石在不同冲击高度、缓冲层厚度的冲击力研究,为崩塌落石灾害防治设计提供了计算依据。

以上研究极大的丰富了崩塌落石的运动特征分析方法及其影响因素,但大都只是针对单一运动状态进行分析,而其在实际运动过程中通常是几种运动状态的组合与叠加。同时对下垫面的参数很多采用经验值,进行参数反演拟合和可靠性分析的较少。本文在总结分析前人研究的基础上,以某煤矿内高陡边坡崩塌落石为研究对象,采用 RocFall 软件对已崩落石的运动轨迹进行了恢复模拟,反演拟合了下垫面参数。在此基础上对拟崩落石区域进行数值模拟和理论计算,得出拟崩落石的运动轨迹、弹跳高度、移动速度、落石能量等运动特性,对其危害范围、危害程度及危害对象进行预测,推翻了原预定的搬迁避让方案,提出了基于崩塌落石运动特征分析的被动防护措施,节省了治理投资,可为类似高陡边坡崩塌落石的治理提供借鉴。

2 崩塌落石概况

2.1 地质环境条件

研究区属溶蚀剥蚀高原山地中山地貌,出露地层从老至新为二叠系上统龙潭组煤系地层、二叠系上统长兴组灰岩、三叠系下统夜郎组灰岩、泥质灰岩及第四系残坡积层、崩塌堆积体。区内位于一背斜构造核部,地层倾角约为 15° ,地形起伏大,形成高陡岩坎,危岩带为近乎直立的山体,高度最大可达 200 m,为崩塌落石的形成产生有利条件。坡下为煤系地层分布地段地势稍平缓,民房众多。

2.2 危岩特征

危岩岩性为三叠系下统夜郎组玉龙山段灰岩,下伏基岩为三叠系下统夜郎组沙堡湾段泥质灰岩,岩质相对较软,易受风化剥蚀。坡下为煤系地层分

布区,覆盖层主要为第四系残坡积层、崩塌堆积体。危岩带地势陡峭,坡度 $75^\circ \sim 90^\circ$,南北走向约 600 m,距坡脚高度 60~220 m,平均高度约 140 m。

危岩崩塌区岩体节理裂隙发育,层面、坡面、节理面相互构成不利组合结构面,表层岩体破碎,采煤塌陷引起的拉裂变形破坏使得岩体产生应力重分布,在采空区、结构面、风化、植物根劈等因素影响下,引起岩体崩落的可能性较大,当底部凹腔发育时,易形成坠落式崩塌^[17]。陡峭的岩壁表面现状发育多处危岩崩塌体,较为典型的主要有 4 处(WY1、WY2、WY3、WY4),陡崖段可见崩塌痕迹,坡下崩塌落石分布较多,详见图 1。



图 1 研究区地形地貌图

2.3 下垫面概况

下垫面的性质将会影响落石的恢复系数、摩擦系数。根据现场勘查,研究区下垫面主要为强风化灰岩、强风化泥质灰岩、基岩露头 and 灌木、崩坡积层和突出基岩、崩坡积层和杂草以及水泥路面等。详见图 1~2。

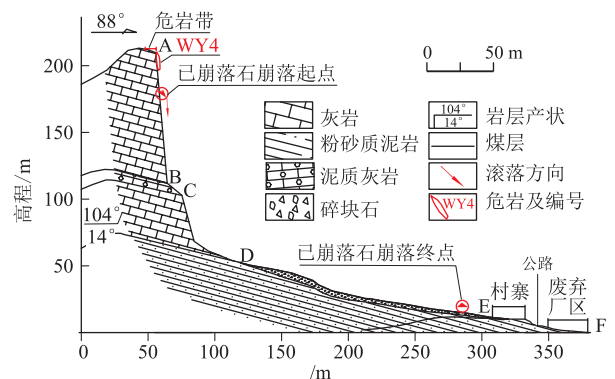


图 2 研究区工程地质剖面图

3 已崩塌落石数值模拟

3.1 模拟分析过程

采用 RocFall 软件,以现场调查的已崩落石的

崩落起点、落石特征、停留位置以及实际坡面形态为依据,基于规范推荐^[18]的运动阻力参数取值范围,通过迭代试算,模拟重现落石运动过程,得到和已崩落石拟合度较好的法向恢复系数 R_n 、切向恢复系数 R_t 、摩擦角 α 和粗糙度 f 等计算参数,采用反演拟合后的计算参数,去预测拟崩落的其他危岩落石的运动轨迹、弹跳高度、运动速度、运动距离及落石能量等运动特性参数,从而分析崩塌落石的危害范围及危害对象,采取有针对性的防治措施。

3.2 软件介绍与假设条件

RocFall 是一个基于统计的软件程序,通过大概率模拟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。由于落石运动特性具有复杂性且其影响因素众多,在运用 RocFall 软件对落石运动模拟时软件进行了如下假设:落石崩落过程当作一个质点;不考虑空气阻力和升力对落石的影响;模拟所用坡面与落

石均被视为各向同性弹塑性体;落石在滚落过程中不考虑破碎解体,保持完整。

3.3 已崩单体落石的数值模拟

采用 RocFall 软件,对 2017 年 6 月在该危岩带一块直径为 1.0 m、质量约为 2 600 kg 的落石进行数值模拟。如图 2 所示,岩体起崩点相对高程 175.5 m,落石经过一系列的崩落、碰撞、滚动等运动,最终停靠于距崩落起点 229.5 m 的位置,离村寨约 20 m。根据实际坡面形态及下垫面特性的不同,模拟实验坡面分成 5 段。依据下垫面特征不同,各段下垫面的法向恢复系数 R_n 、切向恢复系数 R_t 、摩擦角 α 和粗糙度 f 等计算参数也有所不同(表 1)。依据实际情况,取落石起始速度与角速度为 0,建立了该崩塌落石数值模型。通过 RocFall 数值软件赋值获得了已崩落石的运动路径、停靠位置分布、弹跳高度、运动平移速度及总能量包络线图,见图 3~7。

表 1 落石下垫面各段的参数取值

坡段	下垫面特征	法向恢复系数 R_n	切向恢复系数 R_t	摩擦角 α	粗糙度 f
AB	干净坚硬的基岩	0.70	0.92	30	6
BC	基岩外露	0.70	0.87	30	6
CD	基岩与植被和少量碎屑堆积物	0.4	0.82	30	6
DE	崩坡堆积体,少量块石和突出基岩,植被与灌木杂草为主	0.35	0.82	30	6
EF	土壤与灌木	0.30	0.80	25	9

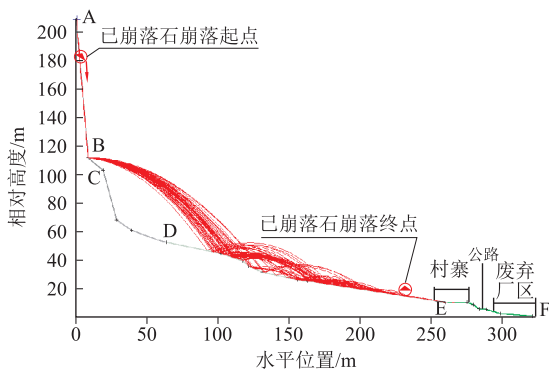


图 3 已崩落石运动轨迹模拟图

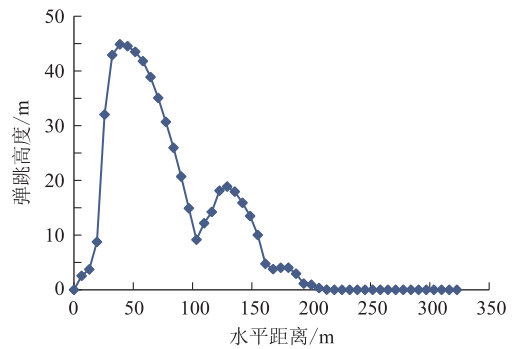


图 5 已崩落石弹跳高度包络线图

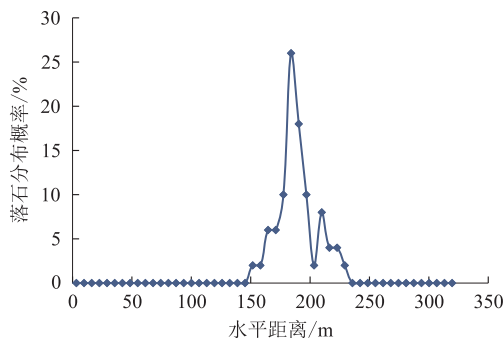


图 4 已崩落石分布概率图

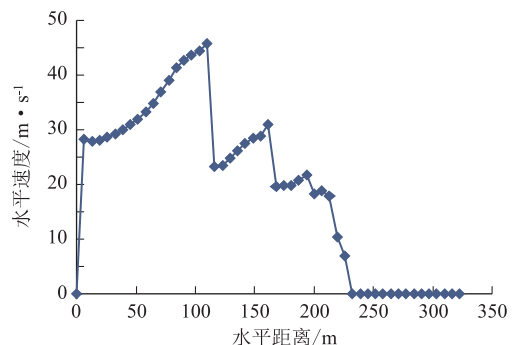


图 6 已崩落石水平速度包络线图

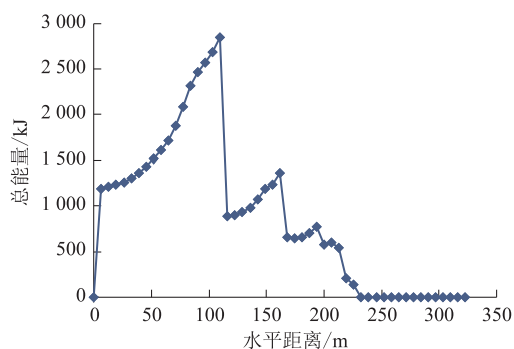


图7 已崩落石总能量包络线图

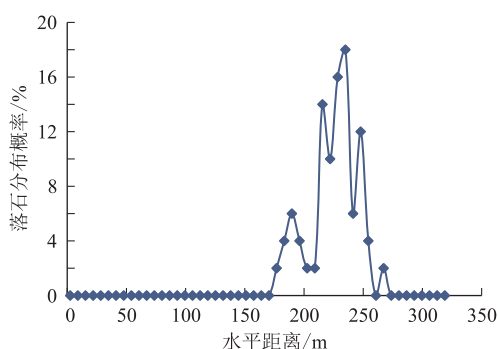


图9 拟崩落石分布概率图

4 拟崩塌落石运动特征分析

4.1 拟崩落石运动特征数值模拟

通过采用 RocFall 软件数值模拟反迭代得到的已崩落石拟合度较好的法向恢复系数 R_n 、切向恢复系数 R_t 、摩擦角 α 和粗糙度 f 等计算参数(见表1),预测拟崩落落石的运动轨迹、弹跳高度、运动速度、运动距离及落石能量等运动特性参数。根据现象调查对崩塌危岩带的调查,取直径 1.5 m、质量约为 4 600 kg 落石进行数值模拟。如图 8 所示,岩体起崩点相对高程 208.6 m,取落石起始速度与角速度为 0,建立了拟崩落石数值模型。预测落石经过一系列的崩落、碰撞、滚动等运动,最终将距起点水平距离 267.2 m 处,坡下村寨将受到威胁。通过对 RocFall 数值软件赋值获得了拟崩落石的运动路径、停靠位置分布、弹跳高度、运动平移速度及总能量包络线图,详见图 8~12。

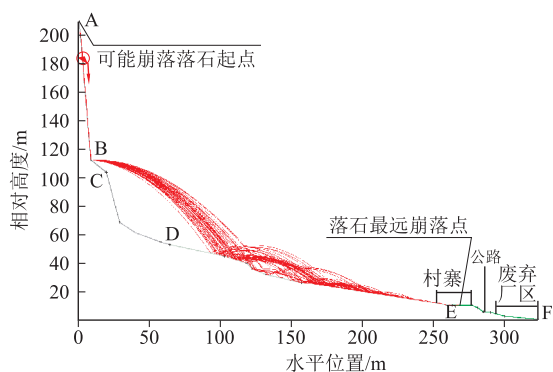


图8 拟崩落石运动轨迹模拟图

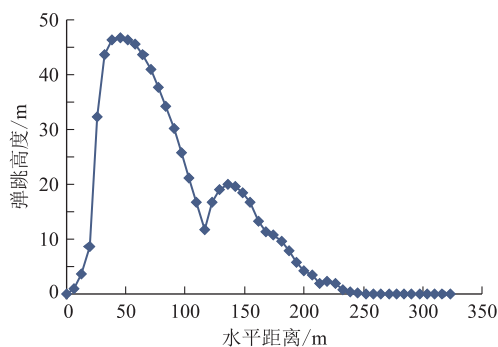


图10 拟崩落石弹跳高度包络线图

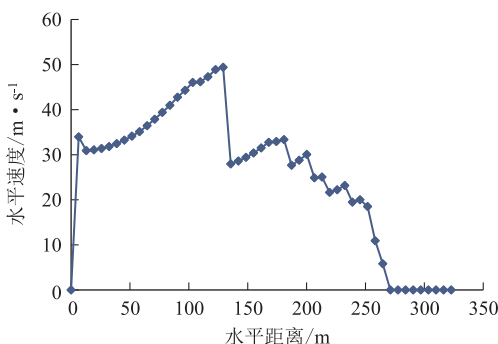


图11 拟崩落石水平速度包络线图

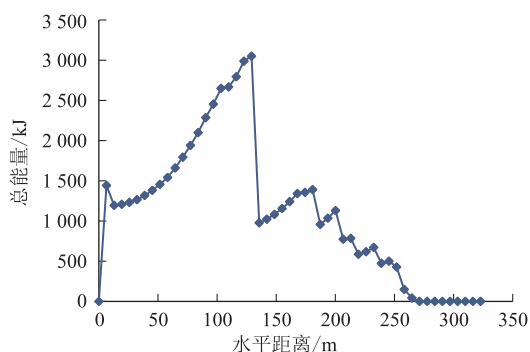


图12 拟崩落石总能量包络线图

4.2 拟崩落石运动特征理论计算

为验证 RocFall 软件模拟的准确性,采用坡面防护工程设计规范推荐公式进行落石最大停靠距离的验算。按照坡形和下垫面的变化,将崩落过程划分为两个阶段,分段计算过程如下:

ABCD段:坡度取 $\alpha_1 = 87^\circ$, $\alpha_2 = 45^\circ$ 计算;高度

$H_1 = 154 \text{ m}$, $H_2 = 29 \text{ m}$;崩落的摩擦系数

$$K_1 = 1.05 - 0.1025\alpha + 0.0000025\alpha_1^2 = 0.1517$$

(1)

$$K_2 = 0.543 - 0.0048\alpha_2 + 0.000162\alpha_2^2 = 0.65 \quad (2)$$

$$\mu_1 = \sqrt{1 - k\text{ctg}\alpha_1} = 0.99 \quad (3)$$

$$\mu_2 = \sqrt{1 - k\text{ctg}\alpha_2} = 0.59 \quad (4)$$

$$\epsilon_1 = \mu_1 \sqrt{2g} = 4.39 \quad (5)$$

$$\epsilon_2 = \mu_2 \sqrt{2g} = 2.62 \quad (6)$$

$$V_R = \epsilon_1 \sqrt{H_1} = 54.5 \text{ m/s} \quad (7)$$

$$V_{i(0)} = (1 - \lambda)V_R \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha_2) = 35.8 \text{ m/s} \quad (8)$$

$$V_i = \sqrt{V_{i(0)}^2 + \epsilon_2^2 \times H_2} = 38.5 \text{ m/s} \quad (9)$$

DE段:平均坡度为 11° ,以滚动为主,按动力学运动方程计算:

崩落的摩擦系数

$$K_3 = 0.41 + 0.0043\alpha = 0.46 \quad (10)$$

加速度

$$a = g\sin\alpha - gk\cos\alpha = -2.53 \text{ m/s}^2 \quad (11)$$

$$v_0 = 38.5 \times \cos(45 - 11) = 31.92 \text{ m/s} \quad (12)$$

D点距离坐标原点的距离为64.12 m,设停靠位置距离D点为 s ,则 $s = \frac{0 - 31.92^2}{-2 \times 2.53} = 201.36 \text{ m}$,距离坐标原点的距离为 $S = 201.36 + 64.12 = 265.48 \text{ m}$,而通过上述 RocFall 软件模拟的拟崩落石运动轨迹模拟图中落石停靠距离为267.20 m(参见图8),两者非常接近,更验证了采用 RocFall 软件预测拟崩落石运动特征的正确性。

5 防治措施

通过对已崩落石的反演计算,采用 RocFall 软件模拟及理论计算验证的方法得出了拟崩落石运动特征。根据落石影响范围及危害程度,结合场地的建设需求,提出了以“落石槽+被动网”相结合的被动防治措施。防治工程的布设以保护危害对象,充分利用场地条件,尽可能布设在弹跳高度小、剩余总能量小的地段为原则,达到技术可行经济合理的治理目标。根据此原则本项目布设的防治工程在距崩落起点水平位置为205~235 m位置。

(1) 落石槽:本项目区危岩带落差高、落石质量大、冲击能量大,在危岩带下方坡脚处设置一条落石槽,以减小崩塌岩体的影响范围及程度。落石槽挖至基岩,深度不超过3 m,梯形断面,开口宽6.0 m,底宽3.0 m,背坡面坡度为 90° ,全长290.0 m。落石槽底部纵向坡率设置为0.2%,南高北低,在落石槽北侧集中排水。

(2) 被动网:落石弹跳高度及总能量采用

RocFall 软件数值模拟,根据软件输出的计算成果,根据防治措施布设原则,结合现场施工条件,在距起点水平距离219.5 m处布设被动网,弹跳最大高度为2.13 m,剩余总能量为586 kJ,为在此设置 RXI-75 型被动防护网。考虑到安全超高,防护网高度确定为3.5 m,设置长度为295 m。

治理项目从2018年开始施工,于2020年7月竣工验收完成,治理效果良好,采用“被动网+落石槽”的被动防护措施(费用331万元),避免了大量搬迁(费用2100万元),表明分析结论的正确性。在保障人民生命财产安全的基础上,减轻了地质灾害的治理成本。

6 结论与认识

(1) 本文以某煤矿内崩塌落石为研究对象,采用 RocFall 软件对已崩落石的运动轨迹进行了模拟,经过参数反演拟合得出下垫面参数,对拟崩落石区域进行数值模拟和理论计算,得出了拟崩落石的运动轨迹,确定了落石的威胁范围、弹跳高度和总能量分布,为崩塌落石灾害防治提供了合理依据。

(2) 在分析崩塌落石运动特征的情况下,结合场地建设条件,选择在弹跳高度小、总能量小的地段采用被动防护的治理措施能取得良好的防治效果。

参考文献

- [1] 苏胜忠. 边坡工程勘察中崩塌落石运动模式及轨迹分析[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 577-581.
- [2] 陈洪凯, 秦鑫. 危岩稳定性分析研究现状及趋势[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 17(10): 49-60.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 宋波, 李吉人, 郝晓敏, 等. 边坡崩塌落石运动距离振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(增1): 366-372.
- [7] 柳万里, 晏鄂川, 魏鹏飞, 等. 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.
- [8] 许强, 陈伟. 单体危岩崩塌灾害风险评估方法——以四川省丹巴县危岩崩塌体为例[J]. 地质通报, 2009, 28(8): 1039-1046.
- [9] 肖锐铨, 陈红旗, 冷洋洋, 等. 贵州纳雍“8·28”崩塌破坏过程与变形破坏机理初探[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(1): 3-9.
- [10] 庄明水. 厦门岛内孤(滚)石破坏模式及分布规律研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2021, 32(4): 34-38+44.

(下转第35页)