

基于三维模拟的落石运动特性研究

李 帅, 罗崎磷, 王洪峰, 李文俊
(贵州省煤矿设计院有限公司, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 危岩落石运动特性研究可为危岩治理设计提供精准科学依据。为了定量获取危岩落石运动相关参数, 文章以大坝田煤矿危岩落石为例, 通过现场调查已经发生的落石点位及数量反演试算获取该崩塌危岩的碰撞恢复系数及滚动摩擦系数, 并使用 RocPro3D 软件对该崩塌危岩建立了三维实景模型, 运用模型进行定量计算。研究结果表明: 1) 利用构建模型可以利用软件定量计算落石实时的水平距离、弹跳高度、最大能量; 2) 数值模拟计算结果与规范公式计算结果较为接近, 误差较小。本文结果可为危岩治理设计提供科学依据, 避免过度治理, 造成资源浪费。

关键词: 危岩落石; 反演; 碰撞恢复系数; 滚动摩擦系数; 水平距离

中图分类号: P642. 21

文献标志码: A

文章编号: 1673 - 8993(2025)10 - 0037 - 09

doi: 10. 13402/j. gcjs. 2025. 10. 123

Research on the characteristics of rockfall motion based on 3D simulation

LI Shuai, LUO Qilin, WANG Hongfeng, LI Wenjun
(Guizhou Coal Mine Design Research Institute, Guiyang 550025, Guizhou, China)

Abstract: Studying the movement characteristics of unstable rock and falling rocks is crucial for providing precise and scientific basis for the design of unstable rock management. In order to obtain relative parameters of rockfall motion, taking the unstable rock and rockfall at the Damaotian coal mine as its research object, through on-site investigations of the locations and quantities of rockfalls that have already occurred, the inversion method is used to calculate the collision recovery coefficient and rolling friction coefficient of the unstable rock. Subsequently, the RocPro3D software is used to construct a three-dimensional realistic model of the unstable rock, and the model is employed for quantitative calculations. The research results indicate: 1) The established model can quantitatively calculate the real-time horizontal distance, bounce height, and maximum energy of rockfalls; 2) The numerical simulation results are closely aligned with those obtained from standard formula calculations, with minimal error. This study provides scientific basis for hazardous rock management design, effectively avoiding resource waste caused by excessive management.

Key words: rockfall; inversion; collision recovery coefficient; rolling friction coefficient; horizontal distance

危岩落石是一种常见的地质灾害, 在西南山区尤其是贵州较为常见。落石危岩一般在陡峻斜坡地带发育, 危岩落石一般方量不大, 点多面广, 随机性强, 突发性强等特点^[1-2]。通过对危岩运

动特性研究, 定量获取相关参数, 提出合理经济安全支护措施。

关于落石危岩其形成条件及诱发因素研究成果颇丰, 理论较为成熟。刘凯栋^[3]主要研究贵州

收稿日期: 2025 - 07 - 08

基金项目: 贵州煤设地质工程有限责任公司创新资助项目(GMS - 2024. KJ - 004); 贵州省科技支撑计划基金资助项目(黔科合支撑[2023]一般 143)

作者简介: 李 帅(1991—), 男, 高级工程师, 从事岩土工程勘察、地质灾害防治等工作。

通信作者: 罗崎磷(1998—), 男, 助理工程师, 从事岩土工程勘察、地质灾害防治等工作。

山区崩塌危岩形成机理及致灾因素,系统阐述了落石危岩的分布特征,并根据具体成因提出相应治理措施。王军义^[4]通过模型实实验获取的崩塌计算所需的物理参数,利用三维数值模拟危岩带落石运动过程,评价评估区的危险程度,创建了贵州地区针对小规模崩塌的较为适用评价方法。唐红梅等^[5]提出危岩的运动可以归纳为初始运动过程、碰撞过程、滑动过程和滚动过程等4个过程,并推演了4个运动轨迹方程,并将该方程结合工程实例,验证其适用性。黄润秋等^[6]提出正交试验理论,以落石运动加速度作为评价指标,以滚石的质量、滚石形状和坡面状况作为要素,分析了落石运动特征,为危岩体防治确定提供了依据,对落石防治具有指导意义。向欣^[7]通过采用 FASTCAM SA1.1 高速摄影仪展开危岩落石运动的现场试验,通过影像资料解析获取了落石运动的相关数据。对落石运动距离影响因素地层岩性、坡度、落石质量本身硬度及形态进行了归纳总结,系统研究了碰撞入射角对落石碰撞恢复系数的作用,并采用现场试验总结出理论计算公式。

在前人研究基础上,本文以大坝田煤矿崩塌(危岩)为例,通过三维数值计算,可以得出每块落石运动轨迹的能量、弹跳高度、水平最大运动距离,从而精确地反映落石运动轨迹和能量分布。本文通过危岩落石运动特性结合现场实际情况,布置科学合理措施,以求在安全可靠合理前提下,节约投资与缩短工期,为支挡设计提供参考。

1 落石危岩工程地质条件

贵州大坝田煤矿北东侧山体后缘出现裂缝,山体前缘出现滚石崩落现象,现形成长约 700 m 左右的危岩带,危岩带下方存在村寨、国道及大坝田煤矿瓦斯泵房等建构物。

(1) 区域构造:该崩塌带所属大地构造单元属上扬子地块(Ⅲ)黔北隆起区(Ⅳ)织金穹盆构造变形区(Ⅴ)。变形区展布于赫章县垭都-普定县丁旗一线之北东,安顺-平坝一线之北西,赫章县水塘坪-遵义一线之南,遵义-贵阳白云区一线之西。构造样式以穹窿-构造盆地及短轴背向斜组合为主,部分为侏罗山式紧闭褶皱组合。

(2) 气候条件:该崩塌带属北亚热带高原山地季风气候区,四季分明,气候温和湿润,冬无严寒,夏无酷暑,冬季多凝冻。年平均降雨量为 1 243.9 mm,一年中 6 月份为降雨量最多月,平均降雨量为 223.0 mm;12 月份降水量最少,约为 22.5 mm,区内还有春旱、冰雹、凝冻等气象灾害,高原气候特征较为突出。

(3) 地震:落石危岩区地震动峰值加速度为 0.05g,反应谱特征周期为 0.4 s,建筑场地类别为Ⅱ类。经调查及查询,场地内的断裂均为非全新活动断裂,地震频率小,区域及评估区地壳基本稳定,区域地质背景环境简单。

(4) 水文条件:落石区内未见河流地表水体,地表水以冲沟为主,为山区雨源性冲沟,沟水主要由大气降水补给,雨季随降水量增大而增大,枯季流量较小甚至完全干涸。以大坝田煤矿矿区中部的山脊为分水岭,山脊北面的沟水向北径流,山脊南面的沟水向南径流,最后均在矿区外北东方向汇入河流。

(5) 地形地貌:落石区属侵蚀-剥蚀低中山斜坡沟谷地貌,除局部出现陡崖外,其余区域地势相对平缓,地形坡度为 10°~30°,局部地段 50°以上,季节性冲沟相对发育。崩塌区总体地势呈中部高四周低,最高点约为 1 900 m,最低点位于东南角的冲沟沟底,海拔为 1 520 m,相对高差为 380 m。村寨主要分布于崩塌危岩南部的缓斜坡地带。

(6) 地层岩性。落石区内出露地层为二叠系和三叠系地层,覆盖层为第四系(图 1)。现由新至老叙述如下。

①第四系:分布于区内地势相对平缓的低洼地带、斜坡下部及沟谷内,主要为残坡积层,岩性主要为含碎石黏土,与下伏地层呈不整合接触,厚度为 0~5 m。

②三叠系(T):下统飞仙关组(T₁f):出露于落石区北东部,根据岩性组合自下而上分为三段:第一段(T₁f¹)主要为薄至中厚层状粉砂岩、粉砂质泥岩等。第二段(T₁f²)主要为厚层状灰岩、泥质灰岩及鲕粒灰岩,局部夹泥质粉砂岩薄层。第三段(T₁f³)主要为薄至中厚层状粉砂岩、粉砂质泥岩等。

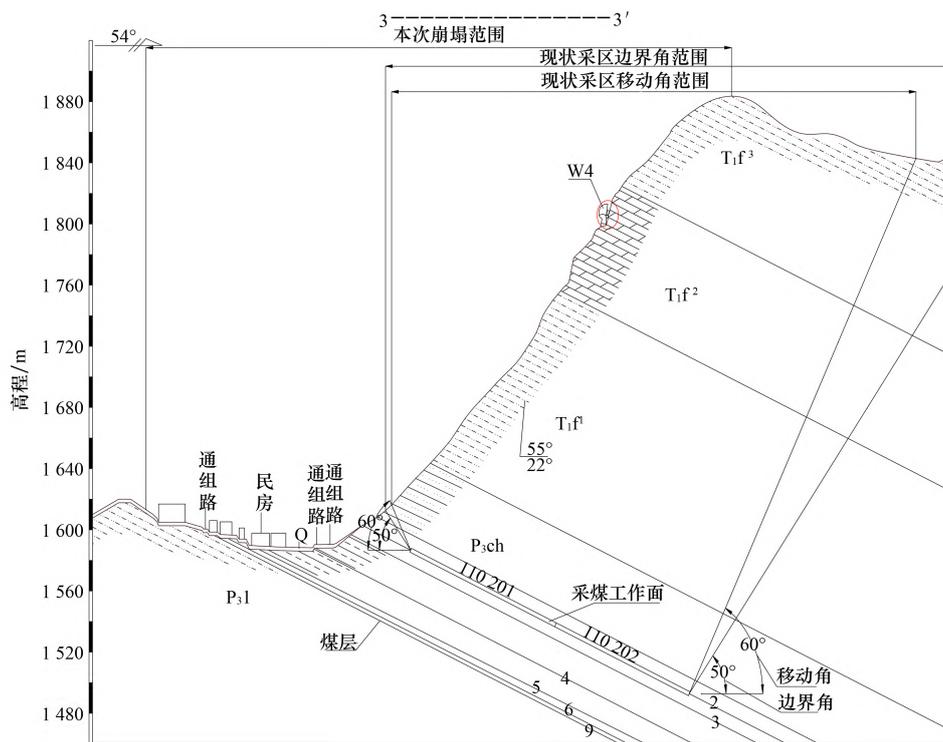


图 1 地质剖面

③二叠系(P):乐平统长兴组(P_3ch):出露于落石区中部,其岩性主要泥质粉砂岩及粉砂质泥岩等。乐平统龙潭组(P_3l):出露于落石区,岩性主要是薄至中厚层状粉砂岩、泥岩、炭质泥岩及煤层等。

(7) 人类工程活动对危岩落石的影响。危岩位于大坝田煤矿采矿范围内,目前该煤矿属于生产矿山,受采动影响,容易引起地表变形和地面塌陷,对地质环境造成破坏。存在大坝田煤矿的瓦斯泵房、村寨以及国道,人类活动强烈,对地质环境的影响、破坏严重,引起地质灾害的可能性大。

2 危岩落石特性及稳定分析

2.1 危岩落石特征

根据本次现场调查、资料收集,发现该地质灾害为两处危岩带组成,展布方向为北东向,主要由 5 处危岩体和两处崩塌地质灾害组成。危岩带 WYD1 长度为 300 m,高度为 20.0 ~ 58.0 m,主崩方向西偏南 15° ,分布 3 处危岩体(编号:W10 ~ W12)。危岩带 WYD2 长度为 350 m,高 20.0 ~ 57.0 m,主崩方向 241° ,分布 9 处危岩体(编号:W1 ~ W9)(图 2)。



图 2 危岩带分布

WYD1 和 WYD2 出露岩性主要为泥灰岩,岩层产状为 $55^\circ \angle 22^\circ$ 。危岩带岩体破碎,节理裂隙发育,局部见贯通性裂缝。危岩带临空面坡向 250° ,坡角近垂直,部分岩体下部悬空,易发生危岩下切坠落式破坏。

BT1(崩塌堆积体):该崩塌位于 WYD1 下方,该崩塌发生于 2023 年 12 月,崩落块体最远置于大坝田煤矿瓦斯泵房。崩落区海拔为 1 772.0 m,坡向 250° ,坡面近直立,厚层状灰岩、泥质灰岩,地层产状为 $55^\circ \angle 22^\circ$ 。崩落区与堆积体最大高差为 170 m。崩塌堆积体展布长度为 15 m,宽度为 4 m,最大块体长度为 3.0 m,宽度为 2.0 m,高度为 1.0 m,体积为 6.0 m^3 ,最小块体体积为 0.3 m^3 ,堆积成分的岩性为二叠系飞仙关组二段灰岩、泥灰岩,总方量为 200 m^3 (图 3)。经实地调查,该堆积体零散分布于陡崖下部

的缓斜坡处耕地及瓦斯泵房区域,地形坡度为 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$,耕地土层厚度为 $1.5 \sim 4.0$ m。



图 3 BT1 堆积块体

BT2: 崩塌堆积体展布长度为 245 m, 宽度为 50 m, 最大块体长度为 4.5 m, 宽度为 2.8 m, 高度为 3.0 m, 体积为 37.8 m^3 , 最小块体体积为 0.3 m^3 , 堆积体岩性为二叠系飞仙关组二段灰岩、泥灰岩, 总方量为 $5\,000 \text{ m}^3$, 下伏基岩主要由黄灰色、深灰色、紫灰色泥质粉砂岩及粉砂质泥岩(图 4)。



图 4 BT2 堆积块体

BT3: 崩塌堆积体展布长度为 75 m, 宽度为 35 m, 大部分堆积于国道 G246 内侧, 崩落块体置于国道 G246 路堑及外侧沟谷内耕地内: 1) 路堑位置: 崩落块体长度为 1.1 m、宽度为 1 m, 高度为 0.9 m, 体积为 0.99 m^3 ; 2) 沟谷内耕地内: 最大崩落块体长度为 2.3 m, 宽度为 2.0 m, 厚度为 1.8 m, 体积为 8.28 m^3 (图 5)。堆积体主要为灰岩、泥灰岩, 总方量约为 81 m^3 。



图 5 BT3 崩落块体

2.2 危岩稳定性特征

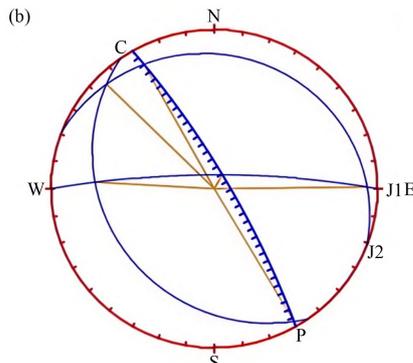
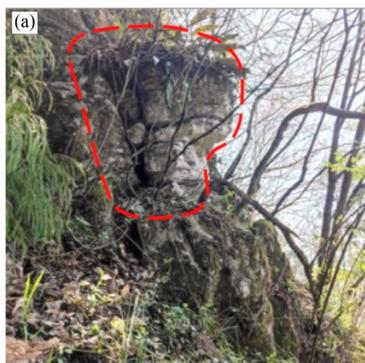
危岩体(W1)(图 6): 位于北侧陡崖一带, 灰岩、泥灰岩, 产状为 $55^{\circ} \angle 22^{\circ}$, 宽度为 1.4 m, 高度为 1.5 m, 厚度为 0.6 m, 体积为 1.26 m^3 , 可能垮落方向 240° 。崖面坡度为 $75^{\circ} \sim 90^{\circ}$, 崖面节理裂隙发育, 裂缝 J1 产状 $180^{\circ} \angle 80^{\circ}$, 可视长度为 1.58 m, 张开度 $10 \sim 30$ cm, 无充填; 裂缝 J2 产状 $201^{\circ} \angle 10^{\circ}$, 可视长度为 1.33 m, 张开度 $15 \sim 25$ cm, 无充填。裂缝 J1、J2 的组合交线倾向与坡面 P 倾向夹角 29° , 小于 30° , 为外倾结构面, 节理组合交线的倾角为 4° , 平缓, 整体处于稳定状态。裂缝 J1、J2 与层面 C 的组合交线与坡面倾向夹角均大于 30° , 位于坡面对侧, 处于稳定状态, 但岩体裂隙发育, 部分裂缝贯穿深度较大, 且因其经受长时间风化剥蚀作用, 岩体较破碎; 在危岩底部局部存在“凹腔”, 岩体悬空, 岩体发生崩塌的可能性大, 此时为坠落式危岩^[8]。

其余危岩体分析类似, 限于篇幅, 不再一一赘述。

3 落石运动特征分析

3.1 数值模拟分析

采煤活动引发的危岩落石失稳分析通过采取无



编号	结构名称	倾向	倾角
P	坡面	240	80
C	层面	55	22
J1	节理1	180	80
J2	节理2	201	10
组合交线			
	倾向	倾角	
P—C	330	2	
P—J1	210	78	
P—J2	151	6	
C—J1	93	18	
C—J2	135	4	
J1—J2	269	4	

图 6 W1 现场照片及赤平投影分析

人机航拍及成图软件获取正射影像和地形图, 创建三维实景模型并导入 RocPro3D 软件进行数值模拟计算, 模拟落石沿坡面运动的情况及运动特征。

三维激光扫描技术通过采取实物表面密集点的三维坐标和反射率信息, 得到实景的三维点云数据。通过点云数据可创建三维实景模型。在点云数据中, 每个点都附带了其三维坐标信息, 点与点之间精度高, 数量巨大, 点线面构成实体模型。采集数据过程可能会收到植被、电塔、线路的干扰。为了提高地形图精度, 数据成图之前需进行“去噪”工作。将植被等数据剔除, 进而将数据按地形图精度要求使用 Subsample 功能实现筛选, 导出三维坐标点至文本中, 通过 CASS 软件生成地形图。对于房屋、建筑、道路等地面附着物, 可在点云数据中进行精确的定位, 圈定轮廓, 通过投影变换, 可在地形图中反应出地物的实际情况。并且通过测量控制点, 进行相应的坐标转换, 可实现与大地坐标系统, 从而得到完备的地形图。

崩塌落石崩落后的终速度与危岩落石高度、本身形状、重量等息息相关; 另外落石的运动受坡面坡度、坡面植被发育情况、运动过程接触岩性等因素影响^[9-10]。

根据现场调查, 本次落石运动区域范围内的岩土体表面参数可分为3个区域取值^[11]。分区主要为灰岩(植被发育区)、松散碎屑(堆积体)、覆盖层区域。运动特征参数碰撞系数、动摩擦系数由反演推出, 通过软件多次试算模拟获得块石沿途堆积分布情况, 与现场调查的实际崩塌堆积区进行对比(图7), 当两者较为接近时, 即可确定本次危岩碰撞系数、动摩擦系数等参数。

模拟结果可见: 崩塌大部分块石主要堆积在崩塌斜坡中部平台上, 少部分块石崩落至斜坡下部缓坡地带。模拟结果与现场调查结果基本吻



图7 崩塌软件模拟落石分布与现场调查位置(局部)对比

合, 通过多次模拟最终获得模型坡面物质计算参数, 如表1所示。

根据现场对崩塌堆积块石的调查, 其中崩塌落石最大块径为 $2.0\text{ m} \times 2.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ 。本次模拟假设最不利条件, 孤石为球形。则反算出: 最大块径的球体粒径为 2.0 m 。因此, 本设计模拟采用粒径(半径): 1.0 m , 暂定约有1 200块球形落石被释放。

3.1.1 崩塌落石运动轨迹分析

通过软件模拟: 一定数量的落石沿陡崖崩塌区域随机释放, 模型模拟轨迹如图8所示。

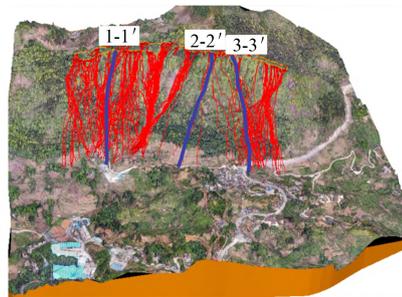


图8 三维模型粒径落石运动轨迹

3.1.2 落石运动能量分析

以1-1'、2-2'、3-3'为例, 计算运动过程中的落石撞击能量, 如图9~11所示。

3.1.3 落石速度计算

以1-1'、2-2'、3-3'为例, 计算运动过程中的落石速度, 如图12~14所示。

表1 剖面材料赋值

位置	恢复系数		摩擦系数	
	法向恢复系数($\mu - R_N$)	切向恢复系数($\mu - R_T$)	平均值($\mu - k$)	标准偏差($\sigma - k$)
灰岩(植被发育区)	0.53	0.80	0.55	0.045
松散碎屑(堆积体)	0.45	0.75	0.70	0.450
松散土壤	0.35	0.60	0.55	0.040

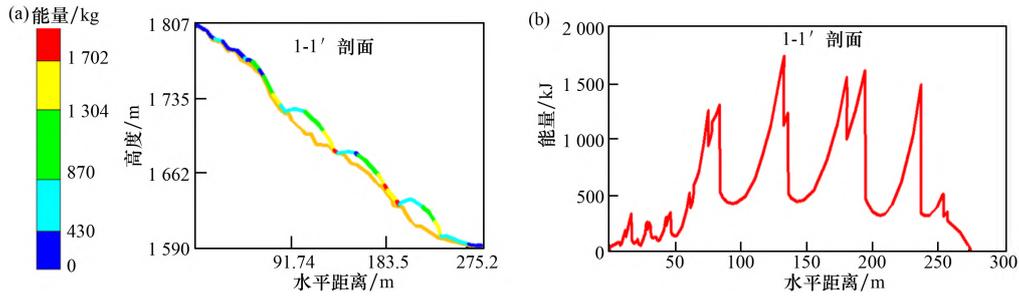


图 9 1-1'剖面运动过程撞击能量

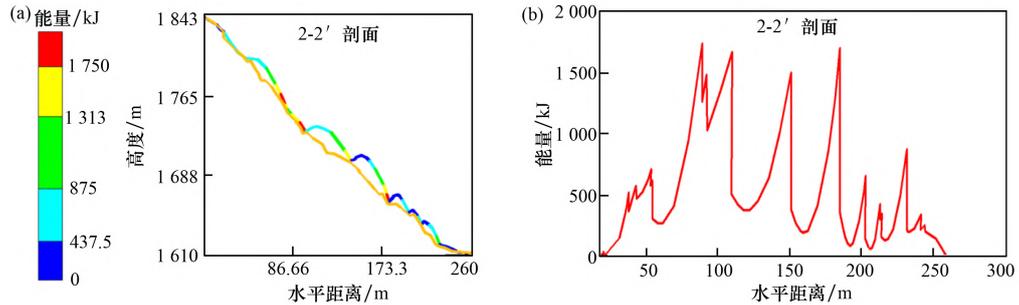


图 10 2-2'剖面运动过程撞击能量

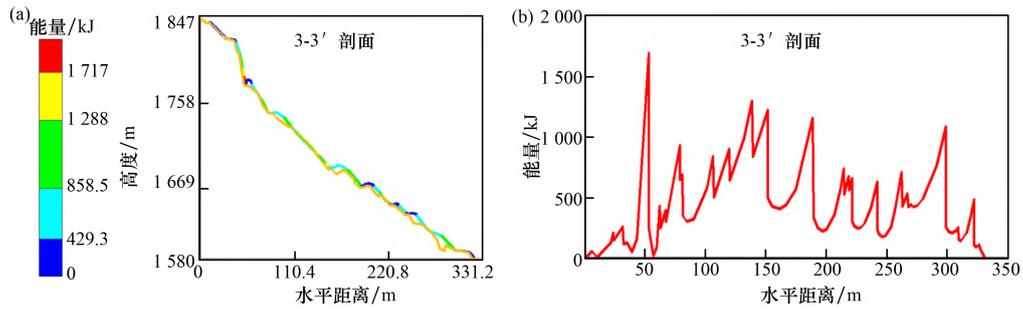


图 11 3-3'剖面运动过程撞击能量

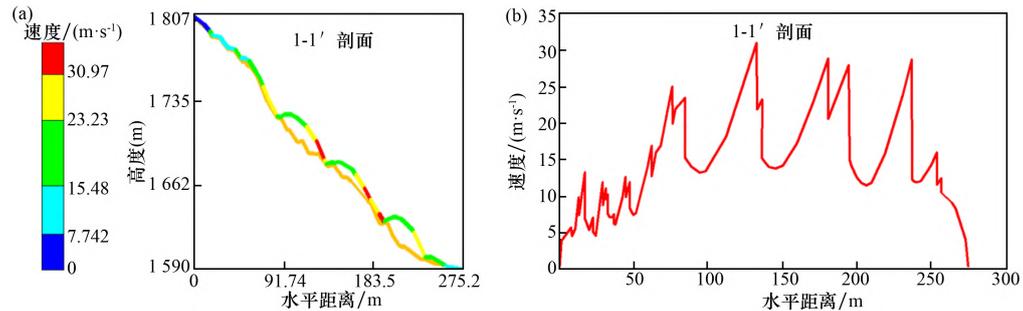


图 12 1-1'剖面运动过程速度

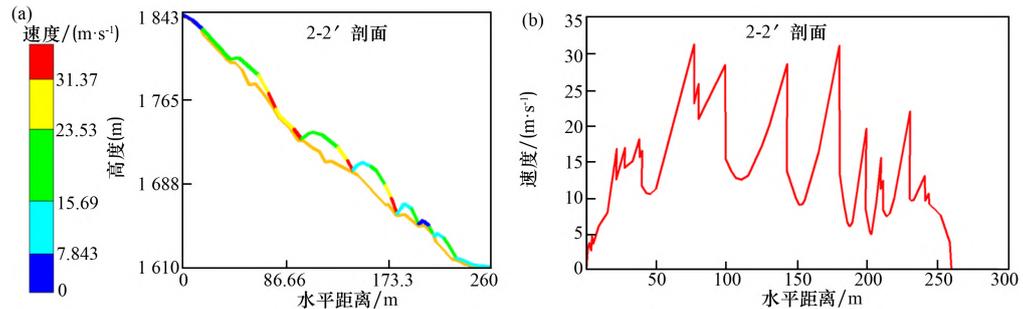


图 13 2-2'剖面运动过程速度

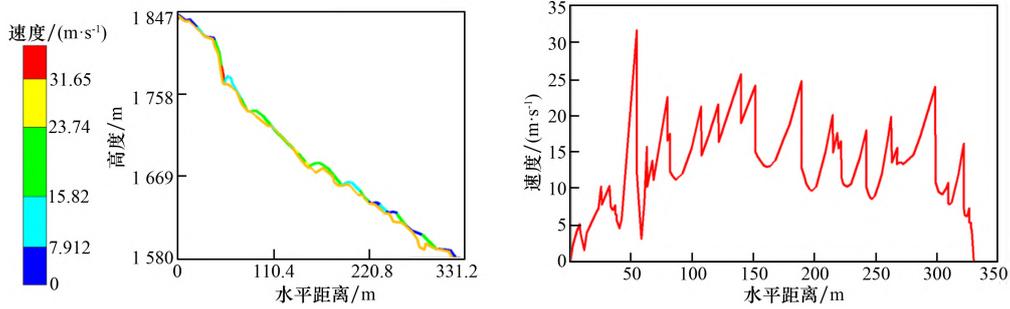


图 14 3-3' 剖面运动过程速度

3.1.4 落石运动弹跳高度计算

数值模拟能够模拟危岩运动的每个瞬时动态, 实时记录各个高程及运动距离下具有的能量及速度, 且相对精确。

从模拟结果(图 15 ~ 17)得出, 在运动过程中, 1-1'、2-2'、3-3' 剖面落石运动的最远距离分别为 275.2、260、331.2 m。

3.2 规范公式计算

3.2.1 速度计算

对于崩塌落石的速度计算, 采用胡厚因^[13]、亚南等^[14]提出的落石运动速度的计算方法, 按折线形山坡(图 18)计算。

落石运动至坡脚的速度:

$$V_R = \varepsilon_1 \sqrt{H_1} \tag{1}$$

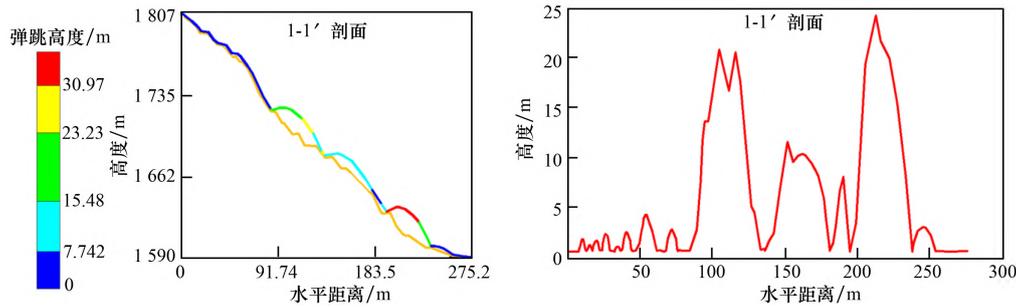


图 15 1-1' 剖面弹跳高度计算

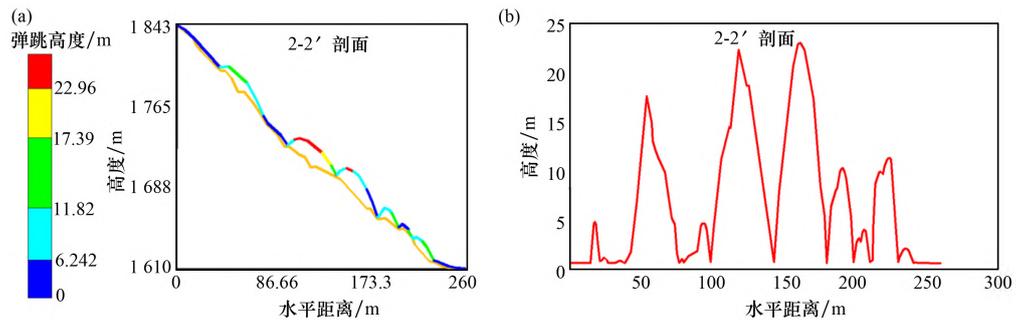


图 16 2-2' 剖面弹跳高度计算

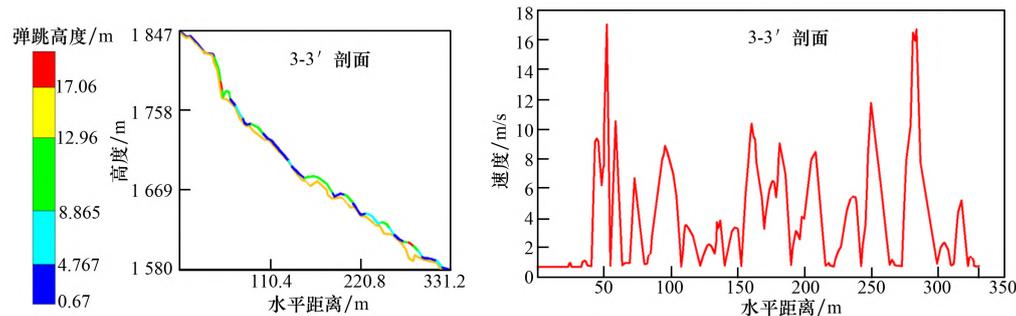


图 17 3-3' 剖面弹跳高度计算

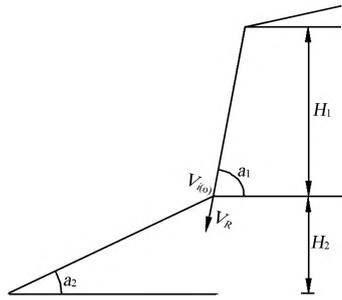


图 18 折线山坡崩塌落石速度计算图

折线交点速度计算:

$$V_{i(0)} = (1 - \lambda) V_R \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \quad (2)$$

最终速度:

$$V_i = \sqrt{V_{i(0)}^2 + \varepsilon_2^2 \times H_2}; \varepsilon = \mu \sqrt{2g};$$

$$\mu = \sqrt{1 - k \cot \alpha} \quad (3)$$

式中: H_1 、 H_2 为每段坡的高度, m; λ 为瞬间摩擦系数; α_1 、 α_2 为坡角, ($^\circ$); ε_1 、 ε_2 为陡坡段计算速度系数; g 为重力加速度, m/s; k 为阻力特性系数。

拟设置防护措施处落石速度计算结果如下: 1-1' 剖面在距离坡顶 162.9 m 处速度为 21.2 m/s, 2-2' 剖面在距离坡顶 191.0 m 处速度为 8.2 m/s, 3-3' 剖面在距离坡顶 190.0 m 处速度为 10.9 m/s。

3.2.2 落石弹跳高度计算

落石弹跳高度即为落石与坡面的垂直高度, 可以为设计被动防护网高度提供依据。落石的运动轨迹简化为质点在斜坡上的类平抛运动(图 19)。

根据卢传福所提理论^[15], 落石在运动过程中, 首次与斜坡碰撞时的垂直高度最大。通常拦截措施设置缓坡地段。其运动轨迹的方程式:

$$y = \frac{gx^2}{2v_0^2 \sin^2 \beta} + x \cot \beta \quad (4)$$

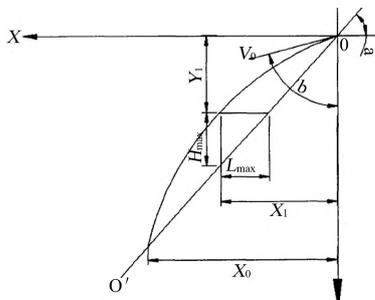


图 19 运动轨迹曲线

最大水平距离计算为

$$L_{\max} = \frac{v_0^2 (\tan \alpha - \cot \beta)^2}{2g \tan \alpha (1 + \cot^2 \beta)} H_{\max} = L_{\max} \tan \alpha \quad (5)$$

式中: v_0 为崩塌体在该斜坡面的初速度, m/s; β 为岩石的反射速度方向与 Y 轴的夹角, ($^\circ$); α 为岩石的初始速度方向与 X 轴的夹角, ($^\circ$)。

拟设置防护措施处落石速度计算结果: 1-1' 剖面在距离坡顶 162.9 m 处落石弹跳高度为 9.3 m, 2-2' 剖面在距离坡顶 191.0 m 处落石弹跳高度为 4.3 m, 3-3' 剖面在距离坡顶 190.0 m 处落石弹跳高度为 3.6 m。

3.2.3 撞击能量计算

落石的动能: $E = 1/2mv^2$ 。v 为落石运动的速度, m/s; m 为落石质量, kg。

拟设置防护措施处落石速度计算结果: 1-1' 剖面在距离坡顶 162.9 m 处落石动能 1 783.8 kJ, 2-2' 剖面在距离坡顶 191.0 m 处落石动能为 1 093.5 kJ, 3-3' 剖面在距离坡顶 190.0 m 处落石动能为 1 404 kJ。

3.2.4 落距计算

根据能量守恒定律, 落石的重力势能变化转化为动能和克服摩擦所做的功:

$$\sum mg \Delta h_i = 1/2 m (V_i^2 - V_0^2) + \sum mg \cos d_i \cdot \text{tg} \varnothing \cdot L_i \quad (6)$$

式中: V_i 为落石在斜坡面上的速度, m/s; d_i 为直线段的平均坡度, ($^\circ$); Δh_i 为落石距离斜坡的垂直高度, m; \varnothing 为坡面综合摩擦角, ($^\circ$); L_i 为各斜坡长度, m; 当最终速度 $V_i = 0$ 时, 即可求得 $\sum L_i$, 而 $\sum L_i \cos d_i$ 即为落石水平向最大位移, m。

现以剖面 1-1'、2-2'、3-3' 为例进行计算。根据危岩分布的坡体结构特征, 可能发生的崩塌最大水平落距分别为 276.3、288.4 m 和 312.4 m, 与场地已经崩落块体较为吻合。

分析表 2 可知, 除了能量误差较大以外, 其他均在 9% 以下, 处理合理范围之内, 由于动能是速度的二次方, 因此误差较大, 不过也在合理范围之内。

为防止危岩清理期间掉落块石对下方居民、村道造成威胁, 清危前应先设置被动防护网; 根据现场调查, 该危岩带地形坡度较陡, 掉落块石冲击力较大, 通过模拟结果, 根据现场调查, 该危岩带地形坡度较陡, 掉落块石冲击力较大, 结合模拟结果, 在距离危岩带水平距离 245 m 处落石弹跳最大高度为 4.0 m, 能量为 1 521 kJ。故本次应急治理工程

表2 数值模拟与规范计算结果对比

计算剖面	速度数值模拟值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	速度规范计算值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	速度计算结果误差/%	崩落水平距离数值模拟值/m	崩落水平距离规范计算值/m	崩落水平距离计算误差/%
1-1'	17.5	18.2	4.0	275.2	264.2	4.0
2-2'	9.0	8.2	8.9	260.0	246.1	5.3
3-3'	10.2	10.9	6.4	331.2	304.4	8.1
计算剖面	弹跳高度模拟值/m	弹跳高度规范计算值/m	弹跳高度计算误差/%	能量数值模拟值/kJ	能量规范计算值/kJ	能量计算误差/%
1-1'	8.9	9.3	4.3	1 653.8	1788.7	7.5
2-2'	4.0	4.3	7.0	437.4	363.1	17.0
3-3'	3.4	3.6	5.6	561.8	641.6	12.4

拟在距离危岩带水平距离 245 m 处设置 1 道被动防护网,防护网型号为 RXI-200 型,考虑足够的安全储备和现场地形条件限制,被动防护网设置高度 5 m,总长度为 180 m,面积为 900 m^2 。被动防护网结构配置为:钢柱+支撑绳+拉锚绳+缝合绳+减压环。每隔 10 m 设置一根工字型钢柱,被动防护网钢柱水泥墩尺寸为 80 cm \times 100 cm \times 100 cm(长 \times 宽 \times 高)(遇土层较厚时应加大基础尺寸),采用 C30 混凝土浇筑。

4 结 论

(1) 本文通过调查的块石沿途堆积分布情况反演试算确定危岩带碰撞系数、动摩擦系数等参数,当模拟结果与现场情况较为接近时,确定计算所需参数。

(2) 危岩落石失稳分析通过无人机航拍和雷达航测技术,获取了崩塌区的正射影像和地形,使用 RocPro3D 软件创建三维实景模型,模拟计算崩塌落石沿坡面运动特征。

(3) 依据数值模拟的危岩落石运动特征结合现场实际情况,确定防护措施及对应的被动防护网尺寸、高度、型号,为后续设计提供依据和参考。

(4) 通过建模分析数值模拟结算结果与规范进行比较,除了动能(由于是速度二次方)误差较大外,其他在合理范围之内(小于 9%),模拟结果比较精确。

(5) 数值模拟可以计算落石每个瞬间动态的状态,如果按照规范去计算每个瞬间状态的运动特性,比较繁琐,因此数值模拟提供了一个解决问题的方法,可以以此为参考。

参考文献:

- [1] 毛宇祥. 拟建线路工程昌都段崩塌发育分布特征及其滚石运动过程研究[D]. 成都:成都理工大学,2020.
- [2] 胡厚田. 崩塌落石研究[J]. 铁道工程学报. 2005(增刊1):387-391.
- [3] 刘凯栋. 贵州崩塌灾害及其影响因素[J]. 贵州地质,1993(4):345-349.
- [4] 王军义. 河谷区崩塌带多期次落石运动过程数值模拟与风险评价研究[D]. 贵阳:贵州大学,2021.
- [5] 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(1):17-23.
- [6] 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(9):1296-1302.
- [7] 向欣. 边坡落石运动特性及碰撞冲击作用研究[D]. 武汉:中国地质大学(武汉),2010.
- [8] 成永刚,范安军,李兵,等. 川藏高速公路汶(川)马(尔康)段崩塌危岩发生机制与防治[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(6):18-24.
- [9] 赵激光. 张家口西太平山崩塌稳定性评价及危险性分区研究[D]. 石家庄:石家庄经济学院,2015.
- [10] 梁靖,裴向军,何宇航,等. 四川九寨沟地震区芦苇海危岩崩塌成因机理分析[J]. 水利水电技术,2020,51(7):124-131.
- [11] 严克丽,梁风,史文兵,等. 多期次崩塌灾害的数值模拟研究[J]. 自然灾害报,2022,31(6):248-260.
- [12] 坡面防护工程设计规范(试行):T/CAGHP027-2018[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [13] 胡厚田. 崩塌与落石[M]. 北京:中国铁道出版社,1989.
- [14] 亚南,王兰生,赵其华,等. 崩塌落石运动学的模拟研究[J]. 地质灾害与环境保护,1996(2):25-32.
- [15] 卢传福. 悬崖落石抛射计算原理及计算方法[J]. 路基工程,1994(2):48-56.