

# Rockfall 数值模拟在零星高位崩塌地质灾害勘查中的应用

孙全福, 胡才源, 李小玲, 张 忠, 杨世林

(贵州省地质环监测院, 贵州 贵阳 550001)

[摘 要] 贵州省大方县小屯乡法启村一组崩塌地质灾害为一高位崩塌地质灾害隐患, 崩塌方式以零星崩落为主, 威胁下部 83 户 510 名居民及法启火车站安全。本文以贵州省大方县小屯乡法启村一组崩塌地质灾害隐患为例, 根据勘查及调查测绘, 模拟剖面的选取, 坡面的参数确定, 运用 Rockfall 软件数值模拟, 模拟出崩塌落石运动过程中的特征参数, 掌握了崩塌落石的运动特征, 为该地质灾害防治提供了重要的参数依据。研究表明, Rockfall 数值模拟在零星高位崩塌地质灾害勘查中可分析出崩塌落石的主要堆积停留区、最远崩落距离和各点位的落石动能、最大弹跳高度等详细数据, 避免了公式计算的单一性, 体现了模拟的随机性, 与崩塌地质灾害的实际运动特征更接近, 可更有效的指导崩塌地质灾害的防治, 具有重要实践意义。

[关键词] 高位崩塌; Rockfall; 数值模拟; 地质灾害勘查

[中图分类号] P642. 21 [文献标识码] A [文章编号] 1000-5943(2020)-02-214-07

## 1 引言

Rockfall 是 Roscience 公司开发的用于计算落石运动轨迹与冲击能量的软件 (Hoek, E 1987)。Rockfall 软件是一款通过矢量化模拟剖面, 根据实际调查赋予崩塌源位置及坡面的特征值, 模拟落石在坡面上的运动轨迹及运动特征。根据危岩按所处相对崖底高度的分类 (T /CAGHP 011—2018): 危岩体相对崖底高度在  $50\text{ m} < H \leq 100\text{ m}$  之间, 属高位危岩; 危岩体相对崖底高度  $H > 100\text{ m}$ , 属特高位危岩。本文所称高位崩塌地质灾害是指崩塌危岩体位置相对陡崖底高差大于  $50\text{ m}$  的崩塌危岩体失稳形成的崩塌地质灾害。高位崩塌地质灾害一般处于高陡山坡的上部, 隐蔽性强, 危害性大, 运动轨迹复杂, 威胁范围难以确定, 是崩塌地质灾害勘查工作中的重点和难点。

本文以贵州省大方县小屯乡法启村一组崩塌地质灾害隐患为例, 基于对该崩塌地质灾害的详细调查测绘, 选取代表性剖面, 对坡面特征进行赋值,

使用 Rockfall 软件模拟崩塌落石的运动轨迹和运动特征, 总结 Rockfall 数值模拟在零星高位崩塌地质灾害勘查中的应用, 为高位零星崩塌地质灾害的进一步研究和防治提供一种可行的技术方法。

## 2 崩塌地质灾害隐患概况

贵州省大方县地处乌蒙山脉东麓的黔西高原向黔中山原丘陵过渡的斜坡上, 县内地形具有地势高, 起伏大, 山高坡陡, 沟多谷深的高原山地特征。法启村一组崩塌地质灾害隐患位于大方县小屯乡法启火车站北侧的陡崖带上, 陡崖带长约  $700\text{ m}$ , 高约  $400\text{ m}$ , 呈南北向展布, 中心地理坐标为: 东经  $105^{\circ}34'28.06''$ , 北纬  $27^{\circ}01'20.82''$  (见图 1)。陡崖带自下而上又可划分为两级陡崖带: 一级陡崖带位于斜坡中部, 水平距离法启村一组居民区  $200 \sim 300\text{ m}$ , 陡崖高差在  $40 \sim 120\text{ m}$ , 海拔高程在  $1\ 220 \sim 1\ 420\text{ m}$  之间; 二级陡崖带位于一级陡崖带上部, 距居民区水平距离  $400 \sim 600\text{ m}$ , 陡崖高差  $90 \sim 200\text{ m}$ , 海拔高程在  $1\ 390 \sim 1\ 570\text{ m}$

[收稿日期] 2019-11-10 [修回日期] 2020-02-28

[作者简介] 孙全福 (1986—), 男, 贵州大方人, 工程师, 长期从事地质灾害防治勘查、设计及相关技术服务工作。Email: 458118517@qq.com



图 1 法启村一组崩塌地质灾害隐患全貌

Fig. 1 A group of potential collapse geological danger in Faqi village

之间,两级陡崖中间为陡斜坡。陡崖带表层岩体结构破碎,风化强烈,节理裂隙发育,植物根劈作用强,常发生零星掉块,威胁斜坡坡脚法启村一组 83 户 510 名居民及法启火车站,潜在经济损失约 3 000 万元。整个陡崖带可划分为 5 个典型危岩带,崩塌危岩体总规模约 74 000 m<sup>3</sup>,为典型的高位崩塌地质灾害隐患,崩落方式为零星崩落。

法启村一组崩塌地质灾害隐患崩落时间跨度较大,自上世纪初以来就时有发生零星崩塌掉落,多数崩落危岩体堆积于斜坡体上的灌木林及耕地内,少数崩落体到达居民区。近年来崩落越发频繁,其中 2018 年 2 月 14 日发生一次小规模崩塌,损坏一户村民房屋及火车站设防的被动防护网(见图 2、图 3)。



图 2 房屋损坏现状

Fig. 2 Current state of house damage



图 3 被动网破坏现状

Fig. 3 Status quo of passive network damage

### 3 Rockfall 数值模拟的应用

要通过落石运动计算软件或数值模拟得到相对客观的落石运动轨迹和运动参数,必须先有切向、法向恢复系数和滚动摩擦系数等的合理取值(叶四桥等 2018)。坡面铺装、坡度、落石质量、下落高度对切向恢复系数均有明显的影响,落石形状则无明显影响(叶四桥等 2018)。坡面铺装和坡度是影响落石碰撞边坡法向恢复系数取值的主要因素,而落石质量、落石形状和入射速度对法向恢复系数取值没有明显影响(叶四桥等 2015)。由于坡面的不均一性,落石形状的不规则性,落石的碰撞过程及落石坡面滚动的过程中具有一定的随机性(邹维勇等 2017)。因此,数值模拟过程中,坡面参数特征、落石质量和下落高度的合理取值是 Rockfall 数值模拟的关键。

#### 3.1 模拟剖面的选取

危岩带 5 位于法启村一组崩塌地质灾害隐患

表 1 落石理力学指标建议值

Table 1 Recommended value of rockfall mechanics index

类别	重度 kN/m <sup>3</sup>	天然抗压强度 (Mpa)	天然抗拉强度 (Mpa)	岩体内聚力 (Mpa)	岩体内摩擦角 (°)	结构面内聚力 (kpa)	结构面内摩擦角 (°)
灰岩	26.38	40.34	4.03	3.55	44.27	712	35.42

#### 3.3 坡面参数特征的确定

根据现场调查及无人机低空影像测量,模拟坡面自上而下为陡崖面(有少量零星植被)、灌木植被发育坡面、光滑岩面,灌木植被发育坡面、耕

表 2 数值模拟坡面特征

Table 2 Numerical simulation of slope characteristics

坡段	坡面特征	滚动摩擦系数	法向回弹系数	切向回弹系数
ab 段	光滑岩面	0.3	0.4	0.86
bc 段	硬土坡面、植被(灌木丛为主)发育	0.55	0.3	0.81
cd 段	光滑岩面	0.3	0.4	0.86
de 段	硬土坡面、植被(灌木丛为主)发育	0.55	0.3	0.81
ef 段	软土坡面、植被不发育或少量杂草	0.50	0.26	0.75
fg 段	居民区	0.50	0.26	0.75
gh 段	火车轨道区	0.50	0.26	0.75

的最高危岩带分布区的“煽鸡岩”,为全面掌握崩塌落石的最大威胁范围和服务地质灾害防治设计的有效性,选取了切割“煽鸡岩”陡崖带两条剖面(2-2'和 3-3')作为模拟剖面。

#### 3.2 模拟落石的确定

法启村一组崩塌地质灾害隐患在崩落时间上跨度较大,现场可调查的崩塌落石最早时间大于 100 年,最近一次为 2018 年 2 月 14 日。在崩塌落石方量上,根据现场落石现状,最大的方量为早期的崩塌落石块体,方量约 245 m<sup>3</sup>,近 100 年以来落石块体方量多在 1~3 m<sup>3</sup>,以零星掉落为主,偶有小规模崩塌出现。其中,2018 年 2 月 14 日发生的小规模崩塌为较典型的一次,其落石块体方量均小于 3 m<sup>3</sup>。

为有效的模拟落石最大威胁范围及运动轨迹,掌握落石主要堆积区域,本次模拟落石选择块体方量为 3 m<sup>3</sup>,落石位置为“煽鸡岩”最高处,失稳方式为自然失稳,模拟过程中假设 50 块落石突然失稳进行模拟。落石物理力学参数根据实验统计后,按相关规范取值,具体见表 1。

作区、居民区及火车轨道。模拟过程中根据实际对坡面进行分段,各段岩块回弹系数及滚动摩擦系数取值根据《崩塌防治工程勘察规范(试行)》(T/CAGHP 011—2018)附表 F.1 和 F.2,取值情况见表 2。

### 3.4 模拟分析

#### 3.4.1 2-2'剖面模拟分析

由图4-图7可知,崩塌危岩体自最高点失稳后,以滚动、碰撞、弹跳及空中飞行的方式组合运动。在坡面上部(一级陡崖带上部),以滚动、碰撞和弹跳运动为主;在一级陡崖带区域以空中飞行方式直接向其下部斜坡体运动;在一级陡崖带下部斜坡区域以碰撞和弹跳运动为主,最终集中停留在村民耕作旱地区(e f段),少量崩塌落石运动到居民区停留。在动能变化方面,崩塌落石的动能与落石的运动方式、运动块体数量、运动距离及落差有关。

根据数值模拟成果表(表3),可详细的掌握到崩塌落石的集中停留区,主要集中在距落石失稳处的330~343 m之间,可到达的最远距离为438.37 m;同时,还可详细的了解各点位运动落

石的最大弹跳高度、平移速度、旋转速度、平移动能、旋转动能和总动能等相关运动过程数据。

#### 3.4.2 3-3'剖面模拟分析

由图8-图11可知,崩塌危岩体自最高点失稳后,以滚动、碰撞、弹跳及空中飞行的方式组合运动。其中在坡面上部(一级陡崖带上部),以滚动运动为主,在一级陡崖带区域以中飞行方式直接向其下部斜坡体运动,在一级陡崖带下部斜坡区域以滚动、碰撞和弹跳运动能变化方面,崩塌落石的动能与落石的运动方式、运动块体数量、运动距离及落差有关。

根据数值模拟成果表(表4),可详细的掌握到崩塌落石的集中停留区,主要集中在距落石失稳处的413~427 m之间,可到达的最远距离为487.96 m;同时,还可详细的了解各点位运动落石的最大弹跳高度、平移速度、旋转速度、平移动能、旋转动能和总动能等相关运动过程数据。

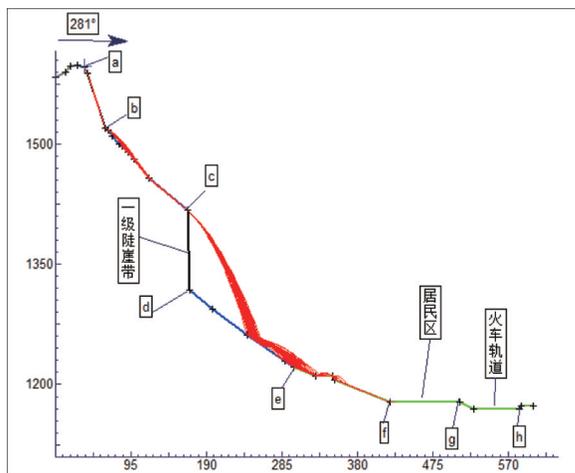


图4 2-2'剖面模拟弹跳轨迹图

Fig. 4 Bounce trajectory of 2-2' profile

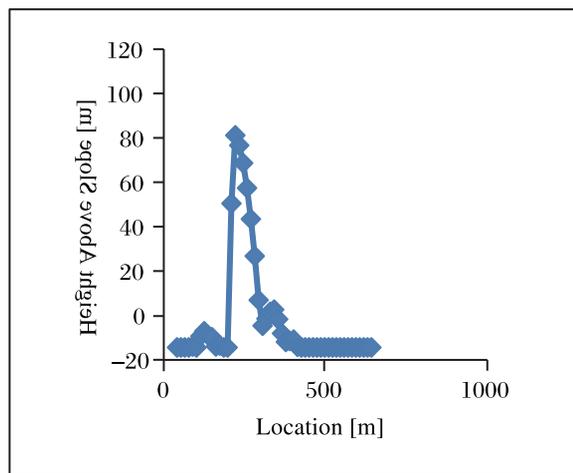


图5 2-2'剖面模拟弹跳高度图

Fig. 5 Bounce height envelope of 2-2' profile

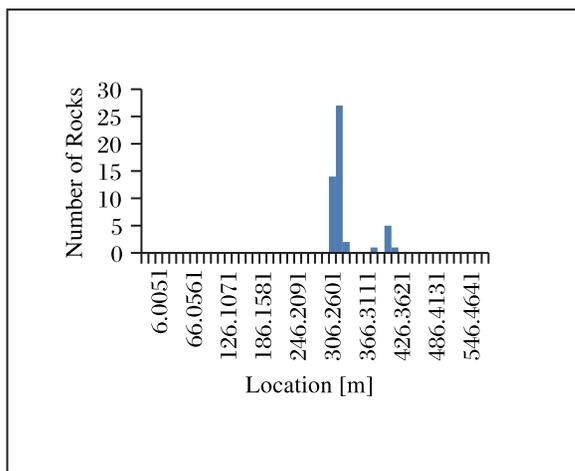


图6 2-2'剖面模拟停留位置图

Fig. 6 End-points location of 2-2' profile

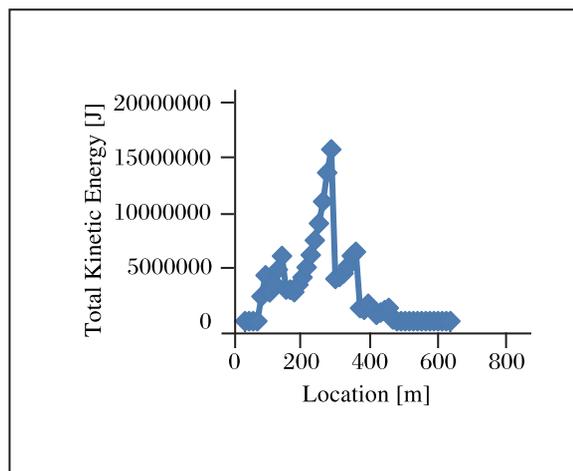


图7 2-2'剖面模拟总动能图

Fig. 7 Total kinetic energy of 2-2' profile

表 3 2-2'剖面数值模拟成果表

Table 3 Numerical simulation results of 2-2' profile

位置 [m]	最大弹跳高度 (m)	平移速度 [m/s]	旋转速度 [rad/s]	平移动能 [J]	旋转动能 [J]	总动能 [J]	落石停止位置 (m)	停留落石数量 (m)
0	0	0	0	0	0	0	6.01	0
..	..	..	..	..	..	..	..	..
312.27	12.76	36.62	24.29	5 330 134	877 191	5 991 473	318.27	0
324.28	6.35	37.51	24.29	5 593 826	877 191	6 352 507	330.28	14
336.29	2.49	14.76	15.13	865 488	340 051	1 205 539	342.29	27
348.30	2.96	13.84	13.90	761 908	287 069	1 048 977	354.30	2
360.31	3.51	18.12	13.90	1 305 295	287 069	1 592 364	366.31	0
384.33	0.00	11.76	10.29	550 172	157 247	590 964	390.33	0
396.34	0.00	13.81	10.29	757 954	157 247	798 746	402.34	1
408.35	0.00	15.59	10.29	965 736	157 247	1 006 528	414.35	0
420.36	0.00	17.18	10.29	1 173 518	157 247	1 214 310	426.36	5
432.37	0.00	4.04	8.05	64 883	96 379	161 263	438.37	1
444.38	0.00	0.00	0.00	0	0	0	450.38	0

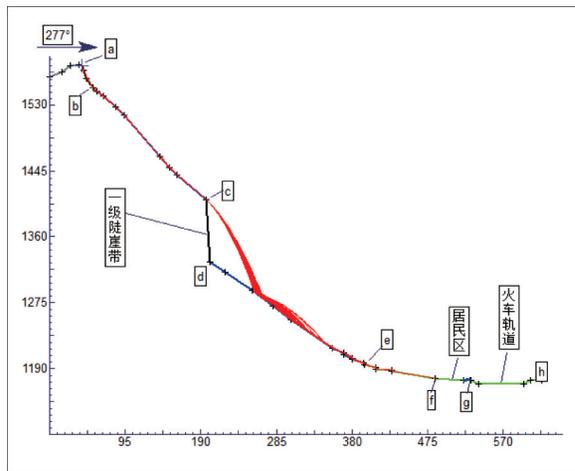


图 8 3-3'剖面模拟弹跳轨迹图

Fig. 8 Bounce trajectory of 3-3' profile

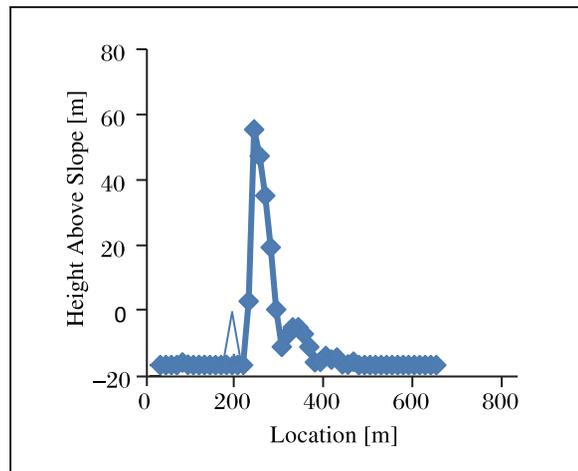


图 9 3-3'剖面模拟弹跳高度图

Fig. 9 Bounce height envelope of 3-3' profile

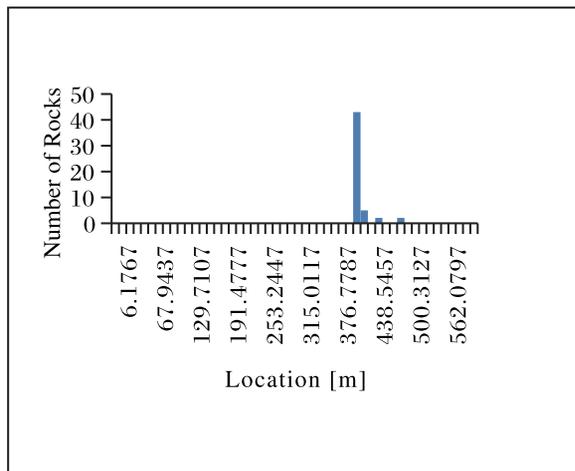


图 10 3-3'剖面模拟停留位置图

Fig. 10 End-points location of 3-3' profile

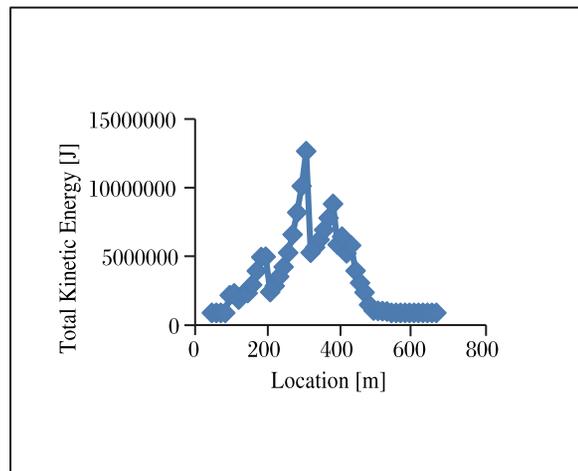


图 11 3-3'剖面模拟总动能图

Fig. 11 Total kinetic energy of 3-3' profile

表4 3-3'剖面数值模拟成果表  
Table 4 Numerical simulation results of 3-3' profile

位置[m]	最大弹跳高度(m)	平移速度[m/s]	旋转速度[rad/s]	平移动能[J]	旋转动能[J]	总动能[J]	落石停止位置(m)	停留落石数量(块)
0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0	6.18	0
..	..	..	..	..	..	..	..	..
395.31	2.29	23.79	23.43	2 249 581	815 966	3 065 547	401.49	0
407.66	0.25	19.92	20.32	1 577 075	613 969	2 191 044	413.84	43
420.02	0.16	16.45	16.81	1 075 254	419 904	1 495 158	426.19	5
432.37	1.02	9.93	11.59	391 724	199 720	591 444	438.55	0
444.72	0.00	5.47	6.66	118 723	66 016	172 273	450.90	1
457.08	0.00	4.90	6.00	95 592	53 549	149 141	463.25	0
469.43	0.00	4.27	6.00	72 461	53 549	126 010	475.61	0
481.78	0.00	3.52	6.00	49 330	53 549	102 879	487.96	1
494.14	0.00	0.00	0.00	0	0	0	500.31	0

### 3.5 模拟成果及其运用

通过数值模拟可知,崩塌危岩体自最高点失稳后,以滚动、碰撞、弹跳及空中飞行的方式向斜坡坡脚运动,最终主要堆积于一级陡崖部下部的斜坡体上的耕地内,少量可到达居民区。这与调查的以往发生的崩塌落石的情况基本一致,说明Rockfall数值模拟选取的参数较合理,模拟过程切合实际,模拟结果较为可靠。

运用Rockfall数值模拟,可有效掌握崩塌地质灾害隐患的威胁范围及运动轨迹,了解落石堆积停留区、各区域可能的运动方式及该处的能量变化,减少了崩塌勘查中复杂而大量的计算,为后期的设计提供准确有效的数据服务。因此,在崩塌地质灾害勘查中,其成果运用主要有以下几点:

(1)通过Rockfall数值模拟,可以掌握崩塌落石可能到达的最远距离,为崩塌落石的威胁范围的划定提供了可靠的数据支撑。

(2)通过Rockfall数值模拟,可以了解落石的主要停留区,可结合实际及防治需要为崩塌落石的选择最佳设防位置提供参考。

(3)运用Rockfall数值模拟,可以分析出落石在各点最大弹跳高度、平移速度、旋转速度、平移动能、旋转动能和总动能等详细数据,为崩塌落石防治措施的选取提供了较准确的参数依据。

## 4 结论与存在的问题

### 4.1 结论

(1)Rockfall数值模拟随机性强,避免公式计算的单一性,可分析出崩塌落石的主要堆积停留区和最远崩落距离,对崩塌威胁范围的划定具有重要的指导意义,在零星高位崩塌、无崩塌历史的崩塌地质灾害勘查、调查具有重要的参考意义。

(2)运用Rockfall数值模拟,可以获得崩塌落石运动过程中的详细特征数据,为崩塌地质灾害防治设防位置、设防措施的选取提供了较准确的参数依据,是精准设计和治理的有效保障,在高位零星崩塌地质灾害勘查设计中具有重要的参考价值。

### 4.2 存在的问题

(1)Rockfall数值模拟针对的是零星或小规模崩塌灾害的落石模拟,大型崩塌地质灾害体量大,运动特征复杂,崩落块体间相互作用强烈,其运动特征需做进一步的深入研究。

(2)Rockfall数值模拟过程中对剖面模型进行了简化,坡面参数取值根据调查测绘情况参考相关规范确定,在实际应用中容易受调查测绘精度的影响。

[参考文献]

叶四桥,巩尚卿. 2015. 落石碰撞法向恢复系数的模型试验研究 [J]. 中国铁道科学, 36(4):13-19.

叶四桥,巩尚卿,王林峰,等. 2018. 落石碰撞切向恢复系数的取值研究[J]. 中国铁道科学, 39(1):8-14.

邹维勇,王金梅,王潘. 2017. 落石运动路径按区间分段算法[J]. 防灾减灾过程学报, 37(1):79-84.

中国地质灾害防治工程行业协会. 2018. 崩塌防治工程勘查规范(试行)(T/CAGHP 011—2018)[S]. 中国地质大学出版社.

Hoek, E. . 1987. RockFall-A Program for the Analysis of Rockfalls from slopes [J]. Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, (3):121-125.

## Application of Rockfall Numerical Simulation in Geological Disaster Investigation of Sporadic High-level Collapse

SUN Quan-fu, HU Cai-yuan, LI Xiao-ling, ZHANG zhong, YANG Shi-lin

(Guizhou Institute of Geo-environment Monitoring, Guiyang 550001, Guizhou, China)

[Abstract] A group of collapse geological disaster in Faqi village, Xiaotun Township, Dafang County, Guizhou Province, is a hidden danger of high-level collapse geological disaster. Taking a group of collapse geological disasters in Faqi village, Xiaotun Township, Dafang County, Guizhou Province as an example, according to the investigation and mapping, the selection of simulation profile, the determination of slope parameters, the numerical simulation of Rockfall software, the characteristic parameters in the process of rockfall movement are simulated, and the movement characteristics of Rockfall are mastered, which provides an important parameter basis for the geological disaster prevention and control. The research results show that Rockfall numerical simulation can analyze the detailed data of the main accumulation area, the farthest distance of Rockfall, the kinetic energy of Rockfall and the maximum jumping height of Rockfall at each point, etc. , it avoids the singleness of Formula Calculation, reflects the randomness of simulation, and is closer to the actual movement characteristics of collapse geological disaster, which can guide the prevention and control of collapse geological disaster more effectively.

[Key Words] High-level collapse; Rockfall; Numerical simulation; Geological disaster reconnoitre