

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221911

基于数值模拟的危岩崩塌特征及防治研究

杨岚峣^{1,2,3}, 易武^{1,2,3}, 黄晓虎^{1,2,3}, 李娜⁴

(1. 湖北长江三峡滑坡国家野外科学观测研究站, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002; 3. 防灾减灾湖北省重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 4. 河南科技职业大学, 河南 周口 466000)

摘要: 针对兴山县赵家娅危岩崩塌的高位危岩崩塌破坏, 运用数值模拟手段, 对区域危岩体稳定性、演化规律及崩塌破坏运动特征进行模拟分析, 获得崩塌落石的运动轨迹、弹跳高度、冲击能量等。结果表明, 赵家娅危岩在天然状况下稳定性较好, 在连续降雨或暴雨条件下, 裂隙水逐渐渗透, 存在主控结构面失稳发生崩塌破坏的可能; 危岩发生崩塌破坏后, 大部分落石将停留在坡面上, 少部分落石碰撞回弹后停止在坡脚公路; 结合现场实际情况及 RocFall 模拟提出“清危+坡面平整+被动防护网”的治理措施。研究成果可为类似高位危岩崩塌灾害治理工程提供参考。

关键词: 危岩崩塌; 数值模拟; 稳定性分析; 运动特征; 防治工程

中图分类号: TV698.2⁺32; TU94⁺3.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)03-0132-04

1 概况

兴山县高桥乡龙潭村赵家娅路段上方崩塌区, 其坡脚为 G209 国道, 高程为 775 m, 坡顶高程为 975 m, 垂直高差为 200 m; 出露岩性以三叠系下统嘉陵江组(T_{1j})灰白色中厚层状灰岩为主, 岩层产状 127°∠27°。根据现场调查, 将崩塌危害研究区从北至南划分为危岩体 1~3、崩塌体、危岩体 4 五个部分, 见图 1。分析现场调查结果, 区内危岩体破坏模式以倾倒式为主, 分布高程为 890~975 m, 体积约 1 400~5 600 m³。危岩体周围植被发育, 岩体在风化作用及植物根劈作用影



图 1 研究区全貌图

Fig. 1 Overview of the study area

响下, 节理裂隙发育, 表面结构破碎, 且局部在岩溶作用下形成凹腔。针对兴山县赵家娅危岩崩塌的高位危岩崩塌破坏, 通过研究其变形破坏机理, 分析其运动过程中落石轨迹、弹跳高度、冲击能量等特征, 可为危岩治理方案设计提供依据, 并为类似高位崩塌治理工程提供借鉴。

2 危岩崩塌变形破坏机理分析

危岩崩塌成因机理复杂, 灾害突发性强, 为量化再现赵家娅危岩崩塌形成和失稳过程, 采用 UDEC 离散元模拟软件数值模拟其变形特征及失稳过程。根据勘测剖面简化典型危岩体的离散元模型(图 2), 模型的尺寸为 80 m×60 m(宽×高), 在模型上、中、下部共设置 6 个监测点, 监测

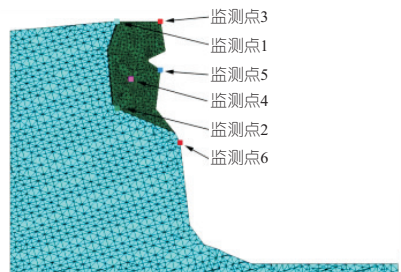


图 2 典型危岩体离散化模型

Fig. 2 Discrete model of typical dangerous rock mass

收稿日期: 2022-09-14, 修回日期: 2022-10-18

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U21A2031-4)

作者简介: 杨岚峣(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为地质灾害预报与防治, E-mail: 1003758526@qq.com

通讯作者: 易武(1966-), 男, 博士、教授、博导, 研究方向为滑坡机理及滑坡监测与预报, E-mail: yiwu@ctgu.edu.cn

对应部位的位移和速度变化。

计算采用的岩体物理力学参数通过综合考虑室内试验结果并类比鄂西^[1]地区相似工程经验所得,见表 1。

表 1 岩体和结构面物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of rock mass and structural plane

项目	强风化	强风化	弱风化	弱风化	节理	节理	岩层面	岩层面
	灰岩 (天然)	灰岩 (饱和)	灰岩 (天然)	灰岩 (饱和)	节理 (天然)	节理 (暴雨)	岩层面 (天然)	岩层面 (暴雨)
密度/(kg·m ⁻³)	2 760	2 850	2 760	2 850				
体积模量/GPa	33	31	56	56				
剪切模量/GPa	25	23	42	42				
粘聚力/MPa	1.75	0.9	3.0	1.75	0.03	0.016	0.02	0.01
内摩擦角/(°)	41	39	43	42	32	31	36	35
法向刚度/GPa					55	52	80	75
切向刚度/GPa					35	33	60	57

(1)天然工况下模拟分析。在未降雨的天然工况下,危岩后缘裂缝内未充水,只考虑自身重力影响。模拟分析典型危岩体在天然工况下的变形破坏过程,其变形破坏位移过程可概括为 4 个阶段,见图 3(a)~(d)。首先,危岩体内应力因其表面凹腔的存在而重新调整分配,导致后缘形成陡

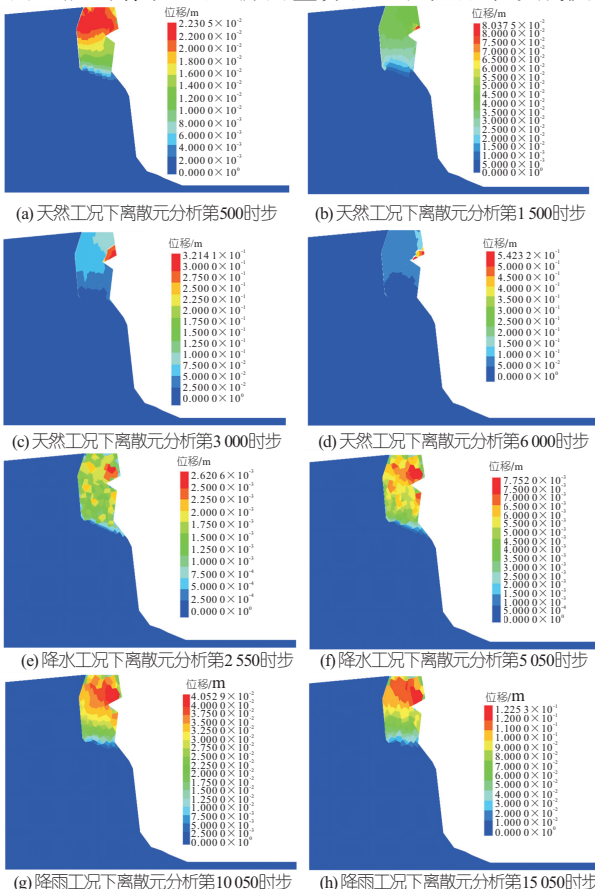


图 3 天然工况、降雨工况下块体位移矢量图

Fig. 3 Block displacement vector diagram under natural conditions and rainfall conditions

倾拉裂缝;其次,危岩体后缘边界的主控拉裂面不断扩展,致使凹腔处向临空面出现微小变形;然后,危岩体后缘的主控拉裂面即将贯通,危岩体下部出现剪切位移,凹腔处变形不断增大;最终,危岩后缘主控拉裂面完全贯通,危岩体倾向临空面加速运动,而危岩体凹腔处因风化作用而破碎的岩体,先于危岩体发生掉块、崩落。

(2)降雨工况下模拟分析。在天然工况基础上,考虑持续降雨条件下,孔隙水压力对危岩体稳定性的影响,其块体位移矢量图见图 3(e)~(h)。由图 3(e)~(h)可知,随着降雨持续时间的增加,危岩体竖向位移逐渐增大,其中以凹腔处位移最大,危岩体上部有发生整体倾倒坠落变形的趋势,但下部基座处变形不明显。分析认为,在持续降雨或暴雨作用下,危岩体后缘裂缝拉伸断裂应力迅速增大,主控结构面抗拉强度降低,当岩体所能承受抗拉强度小于裂隙水压力时,危岩体极易发生失稳破坏。

综上所述,在天然状况下,危岩体凹腔处局部产生破坏,但整体仍未发生明显变形,因此判断危岩体目前处于基本稳定状况;在暴雨或持续降雨条件下,裂隙水逐渐渗入,岩体内抗拉应力不断变小而断裂拉应力不断增大,导致主控节理面不断扩展直至全贯通,出现块体脱离,最终导致崩塌。

3 危岩崩塌运动特征研究

3.1 三维落石运动特征分析

坡表特性往往对落石运动特征起决定性作用,因此拟采用法向恢复系数(R_n)、切向恢复系数(R_t)、动摩擦角(F_{rc})和粗糙度四个因素量化坡表特征对落石运动的作用,同时结合 RocFall Analyst(RA)模拟软件,以线状崩塌源代替崩塌体,点状崩塌源代表单体危岩(图 4),模拟危岩崩塌的运动轨迹特征。



图 4 崩塌源(点和线)

Fig. 4 Collapse source (point and line)

在确定研究区恢复系数、动摩擦角及粗糙度时,根据历史崩塌落石的堆积位置,采用参数反演

方法,先根据铁道部运输局推荐的恢复系数取值范围确定大概数值,并进行试验模拟,然后对比模拟结果与现场实际情况,最终确定研究区下垫面的恢复系数、内摩擦角及粗糙度^[2-4]。

通过调整参数模拟,获得崩塌源下方危岩体4的运动轨迹(图5),发现其与现场调查的落石轨迹

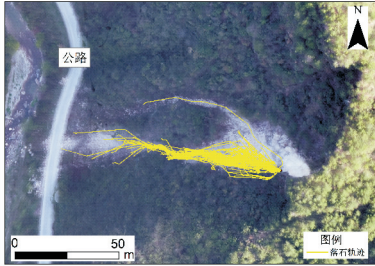


图5 危岩体4模拟运动轨迹

迹及堆积区基本吻合,且未越过下方公路。因此确定研究区坡表特征值见表2。

表2 坡表特征参数取值

Tab. 2 Value of slope surface characteristic parameters

名称	法向恢复系数(R_n)	切向恢复系数(R_t)	摩擦角 / (°)	斜坡粗糙度
基岩段	0.53~0.59	0.90~0.94	8~10	3
基岩段+植被	0.30~0.34	0.83~0.87	20~23	4
崩塌积物+植被	0.37~0.41	0.80~0.84	25~27	4
公路段	0.4~0.44	0.82~0.84	8~10	0
残坡积物	0.28~0.32	0.82~0.83	85~89	1

(1)崩塌体轨迹及运动特征。在统计现场落石和危岩体体积的基础上,对线性崩塌体平均质量的模拟参数赋值为1 500 kg;根据坡面落石和危岩空间分布特征,设定每个滚石源间隔1 m。模拟结果见图6(a)~(e),大部分落石停留在坡面上,少部分落石碰撞回弹后,停止在坡脚公路。落石在向下运动过程中其最大速度达到32 m/s,碰撞后能量损失严重,速度迅速减小,最远着落点的水平距离为182 m,在坡脚公路上停止运动。

(2)典型危岩体轨迹及运动特征。在对典型危岩体进行三维运动模拟时,以点性分布表示危岩体。如图6(j)所示危岩体失稳后,由静止状态向下做自由落体运动,初始速度小,但在重力作用下重力势能急剧向动能转化,速度成线性增加;落石运动水平距离为38.5 m时,速度达到最大,与坡面碰撞导致速度急剧减小;之后落石在重力作用下沿坡面继续滚动,最终在坡面上停止运动。

综上所述,崩塌区落石主要从坡体正前方通过,最远可到达公路,但概率极低;典型危岩体崩塌后主要从坡体正前方通过,且左侧落石的运动距离大于右侧,但对下方公路威胁较小,该模拟结果与现场实际崩塌落石情况相吻合。危岩体由静

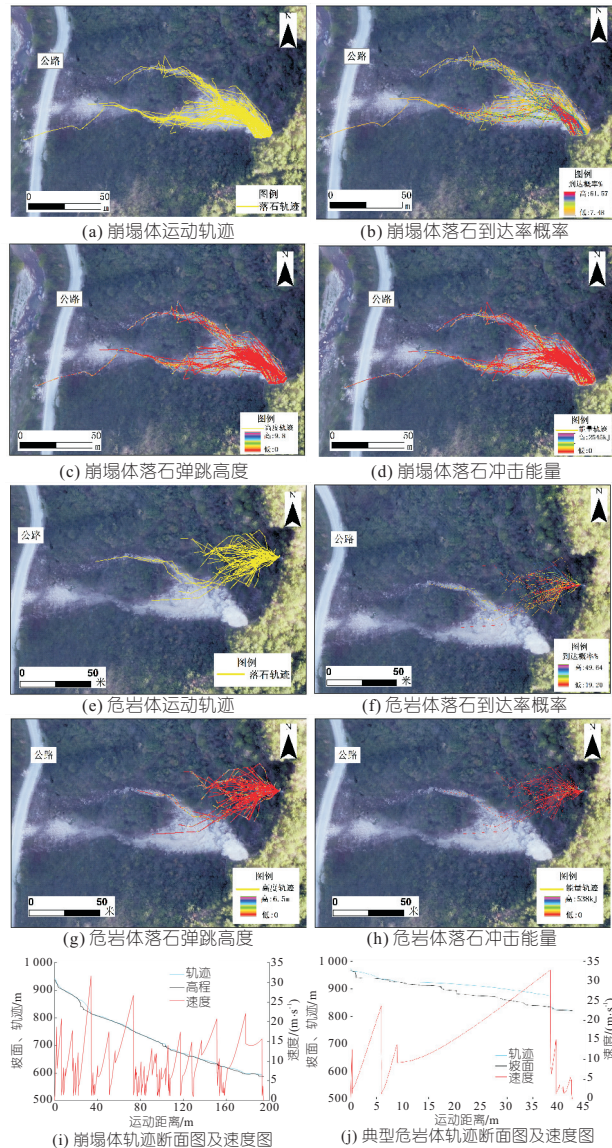


图6 崩塌体、典型危岩体轨迹及运动特征

Fig. 6 Trajectory and motion characteristics of collapse mass and typical dangerous rock mass

止状态突然向下运动的过程,重力势能不断转化为动能,因此整体上动能在初期不断增加,而当落石发生碰撞后,势能和动能又将转化为其他形式能(热能、声能等)而不断减小,直至落石停止运动。

3.2 二维落石运动特征分析

在DEM和RocFall Analyst(RA)软件模拟落石运动路径的基础上,从Profile内提取轨迹断面图对应的边坡剖面线,获得二维落石运动典型剖面图,如图7。

根据现场调查的崩塌落石分布情况进行反演分析,确定其初始条件及生成参数见表3。利用RocFall软件模拟崩塌体和典型危岩体1 000次落石下落过程,获得其运动轨迹及运动特性曲线(图8)。危岩体从坡顶向下运动过程中,动能持续增加,在发生碰撞弹跳前达到峰值,碰撞后动能将迅速减小,但整体仍呈增大趋势;落石弹跳高度

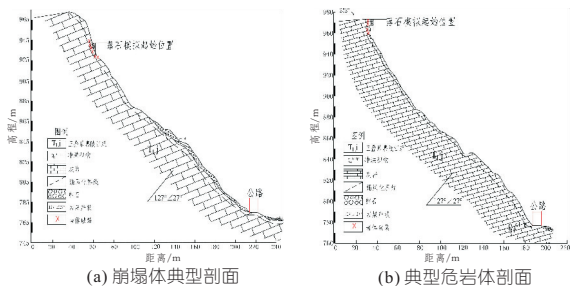


图 7 典型剖面图

Fig. 7 Typical section

与动能变化呈正相关,其变化曲线与动能变化曲线相似。模拟得到运动路径与实际情况大致吻合,故参数取值较合理。

表 3 初始条件及生成参数

Tab. 3 Initial conditions and generation parameters

名称	块体的平均质量/kg	块体数量/个	最小速度减少	抽样间隔/个	初始速度	初始角速度	块体生成方式
崩塌体	1 500	500	0.15	50	0	0.5	随机
危岩体	3 899	500	0.15	50	0	0.5	随机

注:最小速度减少、初始速度单位均为 m/s;初始角速度单位为 rad/s。

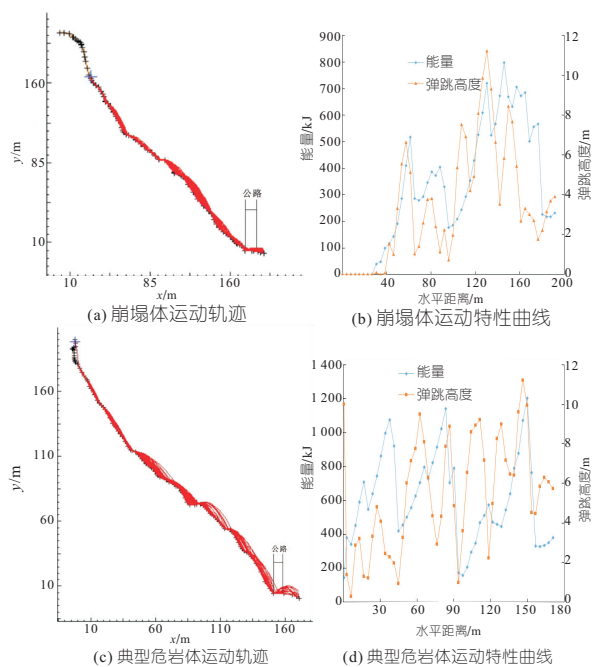


图 8 运动路径及运动特性曲线

Fig. 8 Motion path and motion characteristic curve

4 防治措施建议

研究区危岩体已在极端天气下产生崩塌,造成下方公路受损。危岩体失稳后在坡面上运动过程中,有少部分落石将到达坡脚公路处,对下方行人车辆及公路构成威胁,因此需采取有效工程防护措施。

常见的危岩崩塌治理措施可概括为两大类:

①以主动防护网、喷锚支护、静态爆破等手段为主

的主动防护措施;②以被动防护网、落石槽、棚洞等为主的被动防护措施。而根据赵家娅崩塌现场实际情况、危岩体稳定性分析及 Rocfall 数值模拟结果,结合实际资金投入和施工条件等因素,建议采取“清危+坡面平整+被动防护网”的治理措施。

在 845 m 高程处设置被动防护网后,通过数值模拟得到落石的运动轨迹见图 9。由图 9 可知,在坡面设置被动防护网后,可有效拦截坡面落石,极大降低了落石对下方公路及人员安全的威胁。根据数值模拟结果,落石在 845 m 高程处的最大弹跳高度为 5.75 m,冲击能量约 600 kJ,因此建议采用高 6 m 的 RXI-075 型被动防护网,网型 R7/3/300,结构配置为钢柱+支撑绳+拉锚系统+缝合绳+减压环。同时也要加强对危岩崩塌的宏观地质巡查及裂缝变形监测,保证施工安全进行。

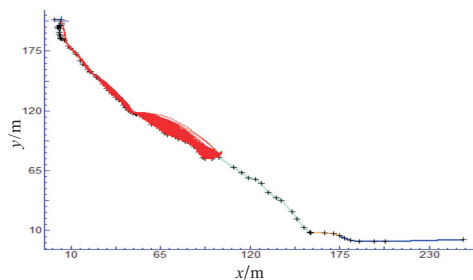


图 9 落石运动路径

Fig. 9 Rockfall path

5 结论

a. 赵家娅危岩在天然状况下整体稳定性较好;但在持续降雨或暴雨条件下,危岩体后缘节理面扩展贯通,存在失稳破坏可能。

b. 通过模拟分析危岩体,发现其破坏后大部分落石将停留在坡面上,少部分落石碰撞回弹后到达下方公路,对公路造成威胁;结合现场地形,建议采取被动防护网拦截落石,以达到防治目的。

参考文献:

[1] 王旭. 鄂西三叠系灰岩岩体的 REV 及强度参数研究[D]. 武汉:中国地质大学, 2007.

[2] 占建琴,唐辉明,熊承仁,等. 鄂西恩施地区岩石物理力学参数的相关性[J]. 煤田地质与勘探, 2010, 38(4): 42-46,51.

[3] 吕庆,孙红月,翟三扣,等. 边坡滚石运动的计算模型[J]. 自然灾害学报, 2003(2): 79-84.

[4] 刘福臻,李旭德,王军朝,等. 基于无人机和 Rocfall Analyst 的崩塌落石特征分析与运动学模拟——以察雅县崩塌落石为例[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(3): 171-180.

的射流区范围大;远场区内的断面平均流速沿流程在管道平均流速上下浮动,变化剧烈程度 $D = 80 \text{ mm} > D = 70 \text{ mm} > D = 60 \text{ mm}$;随着下游远场区距离的增加,断面平均流速的波动幅值渐渐减小,流场逐渐趋于稳定。

c. 管道车下游流场的空间涡结构具有类似涡环特征,但一方面由于管道车料筒端面支脚的影响,另一方面由于流场的高程度湍动,其空间涡环结构高度破碎;且涡结构在靠近环形缝隙一侧较多,靠近管轴线一侧涡结构较少。

参考文献:

[1] 乔永亮,桂洪斌,刘祥鑫. 三维圆柱绕流数值模拟湍流方法的选择[J]. 水利水电工程学报, 2016(3): 119-125.

[2] 杨彩虹,康庄,张橙. 基于改进 SPH 方法的圆柱绕流尾迹特性研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020,48(3):41-45,68.

[3] 王智慧,翟红岩,李庆领,等. 椭圆柱绕流尾迹的 PIV 测量及 DMD 分析[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2020,41(1):91-96.

[4] 刘娟,董启明. 大涡模拟方法下的四圆柱绕流数值模拟[J]. 低温建筑技术, 2013(12): 86-87.

[5] TAICHI IGARASHI, HIROSHI NAITO, KOJI FUKAGATA. Direct numerical simulation of flow around a circular cylinder controlled using plasma actuators[J]. Mathematical problems in engineering, 2014:591807.

[6] PRASANTH T K, MITTAL S. Flow-induced oscillation of two circular cylinders in tandem arrangement at low Re [J]. Journal of fluids and structures, 2009,25(6):1029-1048.

Downstream Hydraulic Characteristics of Stable Moving Wheeled Capsule in Pressured Pipeline

LU Yi-fan, ZHAO Yi-ming, SONG Xiao-teng, QIANG Yi-peng

(College of Water Resource Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: As an efficient, environmental and energy-saving transportation technology, the wheeled capsule transportation has promising application prospects. When the pipeline carriage was stationary in the pipe, it could be regarded as a crossing-cylinder structure. When water flowed around the structure, the vortices existed, which would cause energy loss. Therefore, the hydraulic characteristics at the downstream of the flow field around a pipeline car and the spatial vortices structure after the stabilized flow field were studied by numerical simulation, model test and theoretical analysis. The results show that the near-field areas of the downstream flow field of wheeled capsule with different diameters could be divided into the reflux zone and the jet zone. As the distance rose, the section-averaged velocity had a tendency of declining then rising in the near-field, and recovered the section-averaged velocity of pipe at the distance of the length of capsule. And in far-field, with the distance rose, the fluctuation of section-averaged velocity was gradually decreased, and the flow became stable. The eddy ring structures in the field were highly fractured, eddy structures were more on the side near the annular gap and less on the side near the pipe axis.

Key words: wheeled capsule transportation; hydraulic pipeline transportation; LES simulation; wake flow field

(上接第 135 页)

Research on Characteristics and Prevention of Dangerous Rock Collapse Based on Numerical Simulation

YANG Lan-yao^{1,2,3}, YI Wu^{1,2,3}, HUANG Xiao-hu^{1,2,3}, LI Na⁴

(1. National Field Observation and Research Station of Landslides in Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River, Yichang 443002, China; 2. Collaborative Innovation Center for Geo-Hazards and Eco-Environment in Three Gorges Area, Yichang 443002, China; 3. Hubei Key laboratory of Disaster Prevention and Reduction(China Three Gorges University), Yichang 443002, China; 4. Henan Vocational University of Science and Technology, Zhoukou 466000, China)

Abstract: Aiming at the collapse and failure of high dangerous rock in Zhaojiaya, Xingshan County, numerical simulation methods were used to simulate the stability, evolution law and movement characteristics of the regional dangerous rock mass, so as to obtain the movement track, bounce height and impact energy of the collapsed rock. The results show that the Zhaojiaya dangerous rock has good stability under natural conditions. Under continuous rainfall or rainstorm, the fissure water gradually permeates, and there is the possibility of collapse and failure of the main control structural plane. After the collapse and destruction of the dangerous rock, most of the fallen rock will stay on the slope, and a few of the fallen rock will stop on the road at the foot of the slope after the collision and rebound. Combined with the actual situation of the site and RocFall simulation, the governance measures of "danger clearing + slope leveling + passive protection net" were proposed. The research results can provide reference for similar disaster control projects of high dangerous rock collapse.

Key words: dangerous rock collapse; numerical simulation; stability analysis; motion characteristics; prevention and control engineering