

文章编号: 1006-4362(2024)02-0042-07

基于 RockFall 与 RA 的危岩体二维和三维运动特征对比研究

张利民¹, 宗朝正^{2*}, 刘新文¹, 武军¹, 吉锋²

(1. 山西省交通规划勘察设计院有限公司, 太原 030032;
2. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

摘要: 崩塌是常见的一类地质灾害, 其运动轨迹和危险性量化评价是目前研究热点之一。研究以某山区高边坡为对象, 分别采用 RockFall 二维落石轨迹仿真和 RockFall Analyst 三维落石仿真, 对危岩失稳后崩塌落石运动特征进行模拟, 并进行对比分析。结果表明: 坡段上部属于落石高风险区, 坡段下部属于低风险区, 三维软件落石模拟结果比二维更加准确, 对预测危岩落石轨迹和危岩防治工程具有重大意义。

关键词: 危岩体; 落石轨迹; RockFall Analyst; RockFall; 危险性评价

中图分类号: P642.21; TU457; TU458; X4 **文献标识码:** A

COMPARATIVE STUDY ON 2D AND 3D MOTION CHARACTERISTICS OF DANGEROUS ROCK MASS BASED ON ROCKFALL AND RA

ZHANG Li-min¹, ZONG Chao-zheng^{2*}, LIU Xin-wen¹, WU Jun¹, JI Feng²

(1. Shanxi Province Communications Planning Surveying and Designing Institute Co., Ltd., Taiyuan 030032, China;
2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Avalanche is a common class of geological hazards, and its movement trajectory and quantitative evaluation of hazard are one of the hot spots in current research. Taking a high slope in a mountainous area as an object, the study used RockFall 2D rockfall trajectory simulation and RockFall Analyst 3D rockfall simulation respectively to simulate the movement characteristics of avalanche rockfalls after the instability of hazardous rocks and to make comparative analyses. The results show that: the upper part of the slope section belongs to the high-risk area of rockfall, and the lower part of the slope section belongs to the low-risk area, and the results of the 3D software rockfall simulation are more accurate than 2D, which is of great significance to the prediction of the trajectory of rockfall and the control engineering of dangerous rocks.

Key words: dangerous rock mass; rockfall trajectory; RockFall Analyst; RockFall; risk assessment

收稿日期: 2023-12-04 改回日期: 2024-02-19

基金项目: 山西交控集团资助科研项目: 太行山高山峡谷区公路工程高位危岩崩塌灾害防治关键技术研究, 项目编号: 2022-JKKJ-17(2022-JKKJ-17)

1 引言

危岩体是指由结构面切割并处于不稳定状态的岩石,其形貌通常表现为块状、柱状,危岩失稳后产生的落石在滚动过程中积蓄一定动能后对周围的建筑物和道路有较大危害,而落石被动防治工程的布设往往与落石轨迹、落石高度和落石能量联系较为紧密。唐红梅等^[1]对危岩失稳后的落石轨迹进行了许多研究,基于落石各阶段运动形式提出了落石的轨迹方程;黄润秋等^[2]通过现场落石试验得出影响落石在边坡上运动加速度的 3 个主要因素:斜坡坡度、落石形状和坡表植被特征;章广成等^[3]根据现场落石试验结果与仿真软件分析得出落石恢复系数和坡表特征之间的关联性;蔡向阳等^[4]运用 RockFall 软件对典型边坡进行了落石运动全过程模拟;许泽鹏^[5]等通过进行不同落石重量和不同缓冲层厚度下的崩塌落石冲击试验,推导出落石有效冲击力的计算公式;兰恒星等^[6]通过单一样本在同一位置同一高度的边坡落石物理实验发现落石轨迹具有随机性;王栋等^[7]采用 RockFall Analyst 软件对某隧道高位危岩进行三维运动轨迹数值模拟;黄雨等^[8]对比了不同危岩落石模拟软件的计算方法。现有文献对危岩落石轨迹的研究已相当丰富,但绝大部分是现场落石试验得出的结果,在数值仿真上二维层面研究居多,少有涉及三维落石运动轨迹。

某山区斜坡后方危岩发育,危岩裂隙张开开裂变形显著,严重威胁坡脚居民正常生活。危岩发育带下方村落聚集,道路、农田交汇,为预测危岩落石轨迹和布设相应的防护措施,本研究采用 RockFall 二维落石轨迹仿真软件和兰恒星课题组基于 ArcGis 平台开发的 RockFall Analyst(RA)三维落石仿真软件对危岩失稳后崩塌落石运动特征进行相关模拟研究,综合对比二维和三维软件边坡落石模拟结果,为边坡危岩崩塌落石防治工程提供一定的参考价值。

2 地质背景

该地为中低山区,山脉走向与褶皱构造线方向均呈北东东向。区域内地形西高东低,山势高陡,最高处高程 1 600 m,最低处高程 223 m,相对高差达 1 377 m。地貌成因中的外应力以构造溶蚀、侵蚀为主,构造剥蚀较次。勘查区地层由第四系崩积碎块石土(Q^{col+dl})、二叠系地层组成,第四系崩滑堆积碎块石土(Q^{col+dl})厚 1.5~3.0 m,主要分布在危岩陡崖坡脚地带,崩滑堆积物岩性为含碎石黏土、粉质黏

土,碎石土与崩积块石,均厚 12 m,碎块石成分以燧石结核微晶灰岩及炭质灰岩为主。

根据现场调查,危岩带发育有 11 处危岩体和 1 处孤石群,危岩区面积 25 005 m^2 ,方量约 337 576 m^3 ,危岩发育高程最低为 1 010 m,最高为 1 490 m,最大相对高差 480 m。为进行二维 RockFall 模拟,现根据危岩分布和地形特征提取 3 条剖面线(图 1)。

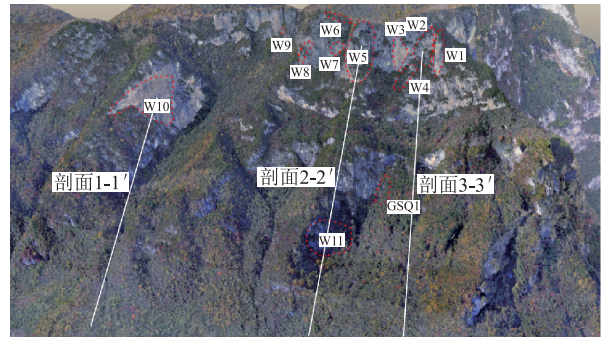


图 1 危岩分布和剖面示意图

3 落石运动轨迹模拟

3.1 二维运动轨迹模拟

RockFall 是美国著名的 Rocscien 公司 E. Hoek 教授团队开发的 Rocscien 商业软件,运用该软件的落石统计分析模块对危岩体失稳后的运动过程进行二维路径模拟和分析。为了计算方便,模拟过程中,进行以下假设:(1)块体初始速度以 0 m/s 脱离;(2)块体在运动过程中不分解;(3)失稳后落石的运动遵从运动学原理;(4)落石形状为质量分布均匀的球体(质点);(5)危岩体边坡坡面概化为若干连续折线;(6)忽略空气阻力。

根据图 1 所选剖面进行计算,剖面 1-1' 起始为危岩 W10,剖面 2-2' 起始为危岩 W5,剖面 3-3' 起始为危岩 W1~W4 集中发育区域。W10 危岩位于坡体左侧 500 m 处,平均宽 68 m,高 100 m,厚 10 m,面积为 6 800 m^2 ,体积为 68 000 m^3 ,坡度 82°,坡向 93°,危岩体呈椭圆形,裂隙发育,稳定性较差,块石易坠落;W5 危岩下文具体阐述;W1~W4 集中发育于顶部危岩带右侧,危岩呈扇形分布,所在坡面近直立,坡度 78°,坡向 102°,裂隙发育,落石主要以坠落式为主。坡体上部基岩裸露,下部植被覆盖,因此将高程 1 300 m 至坡顶段设为基岩段,高程 1 300 m 以下为绿植段。各剖面相关参数的取值参考原铁道部工务局碰撞恢复系数建议值(表 1),同时结合了边坡坡度、岩性和植被等实际情况进行综合取值如

下(表2)。全过程运动模拟计算结果如图2~4所示。各危岩落石模拟统计结果见表3。

表1 铁道部工务局碰撞恢复系数建议值

| 坡面特征 | 法向阻尼系数数值(R_n) | 坡面特征 | 切向阻尼系数数值(R_t) |
|----------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| 光滑坚硬铺砌面或光滑的基岩面 | 0.3~0.42 | 光滑坚硬铺砌面或光滑的基岩面 | 0.87~0.92 |
| 基岩表面和砾石边坡 | 0.33~0.37 | 基岩表面和无植被的崩塌堆积体 | 0.83~0.87 |
| 崩塌堆积体和坚硬的土质边坡 | 0.30~0.33 | 有少量植被的崩塌或砾石堆积体 | 0.82~0.85 |
| 软土质边坡 | 0.28~0.30 | 植被覆盖的崩塌堆积体和植被稀少的土质边坡 | 0.80~0.83 |

表2 斜坡体材料参数

| 名称 | 法向阻尼系数(R_n) | 切向阻尼系数-基岩段(R_t) | 切向阻尼系数-绿植段(R_t) |
|--------|-----------------|---------------------|---------------------|
| 1-1'剖面 | 0.30~0.40 | 0.83~0.90 | 0.80~0.82 |
| 2-2'剖面 | 0.30~0.40 | 0.83~0.90 | 0.80~0.82 |
| 3-3'剖面 | 0.30~0.40 | 0.83~0.90 | 0.80~0.82 |

表3 RockFall 数值模拟结果统计表

| 危岩体编号 | 发育高程/m | 停留高程/m | 运动水平距离/m | 运动高差/m |
|-------|-------------|-------------|----------|--------|
| W1 | 1 372~1 457 | 750~760 | 683 | 706 |
| W2 | 1 400~1 460 | 760~770 | 703 | 690 |
| W3 | 1 387~1 443 | 750~760 | 668 | 679 |
| W4 | 1 361~1 400 | 750~760 | 681 | 647 |
| W5 | 1 359~1 484 | 740~750 | 672 | 588 |
| W6 | 1 483~1 488 | 780~790 | 660 | 700 |
| W7 | 1 408~1 433 | 790~800 | 621 | 628 |
| W8 | 1 397~1 442 | 770~780 | 636 | 665 |
| W9 | 1 448~1 459 | 1 200~1 210 | 245 | 255 |
| W10 | 1 267~1 367 | 730~740 | 710 | 724 |
| W11 | 1 011~1 081 | 760~770 | 420 | 303 |

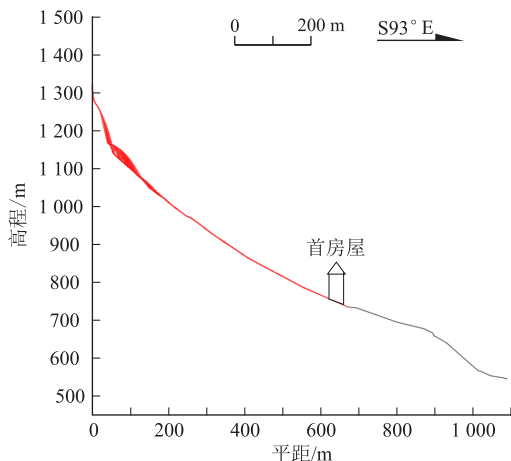


图2 1-1'剖面运动全过程模拟

如表3所示,绝大部分危岩体停留在730~800 m高程范围内,仅有W9因地形原因停留在1 200~1 210 m高程范围。通过观察剖面运动全过程模拟

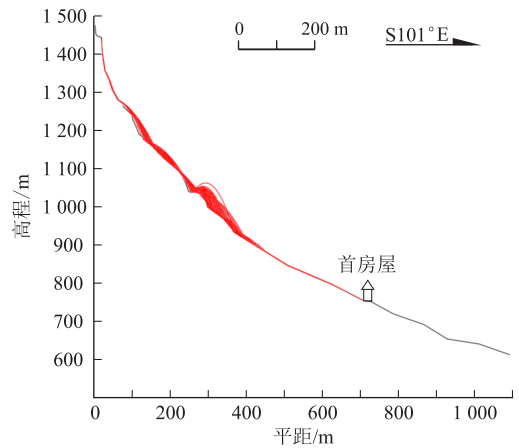


图3 2-2'剖面运动全过程模拟

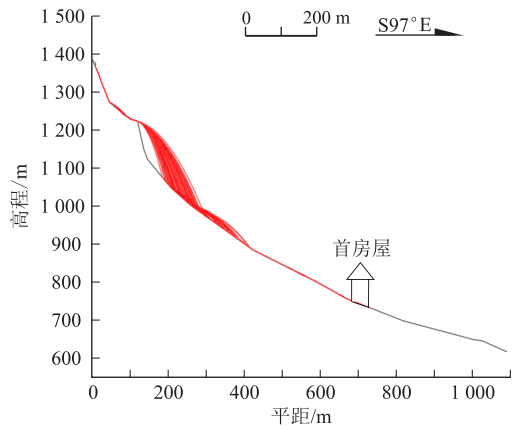


图4 3-3'剖面运动全过程模拟

图可知,高程1 300 m至坡顶段落石无太大弹跳高度,这是因为该段落石速度较小,尽管基岩裸露、表面光滑,且法向恢复系数也较高,可以减少碰撞耗散的能量,但碰撞发生时落石本身积蓄的动量不足以使得落石发生较大弹跳,因此落石在该段主要特性表现为动能的积累。高程1 300 m至1 100 m,该段植被发育,坡表坑洼不平,落石积蓄一定动能后与坡面发生碰撞且弹跳剧烈,遇到陡坎部位落石甚至出现空中飞行的运动状态。可见,落石的弹跳与落石当前所拥有的动能相关,落石弹跳高度较大部分不宜布设挡墙和其他拦挡措施。3个剖面的落石运动轨迹均通过首房屋,意味着如果危岩失稳,落石将极大可能冲击房屋,造成严重破坏。

3.2 三维运动轨迹模拟

RockFall Analyst(RA)软件是兰恒星课题组基于ArcGIS平台开发的一套3D、分布式的崩塌落石动力学分析软件。该软件将落石看为质点,在三维地形模型上模拟计算落石在下落过程中的飞行、碰撞和跳动造成的能量损失,最后给出落石碰撞后的

速度、弹跳高度和运动路径,完成对落石的危险性分析。RockFall Analyst 将遥感技术和地质灾害风险防控有机结合^[9],并充分发挥 ArcGIS 软件在空间数据管理、分析与展示方面的优势,对滑坡灾害的移动路径与能量演化进行仿真,并对其发生频率、能量与危险性进行空间预测。

Rockfall Analyst 数据源是模拟落石运动不可或缺的因素,包括地形、落石源和坡表特征。地形是落石灾害的动力条件,通常以数字高程模型(DEM)来表征,这些数据被用作样本扩展的输入,以量化研究区地形特征;落石源是落石灾害的物质条件,以点、多段线和多边形来表征,点是落石源的元件,多段线和多边形可以看成点的集合;坡表特征是落石灾害在运动过程中的阻力条件,主要以 R_n (法向恢复系数)、 R_t (切向恢复系数)和 Friction(摩擦角)来表征,各项恢复系数参考表 1 及国内外相关典型工程经验数值,取值见表 4。

表 4 研究区坡表特征取值

| 坡面特征 | 法向恢复系数 R_n | 切向恢复系数 R_t | 摩擦角 $Frc/^\circ$ |
|---------------|--------------|--------------|------------------|
| 大量植被覆盖的风化岩石坡面 | 0.33 | 0.75 | 19 |
| 杂草灌木丛覆盖的碎石土路面 | 0.26 | 0.65 | 30 |
| 局部基岩裸露坡面 | 0.33 | 0.83 | 12 |
| 无植被覆盖的碎石土路面 | 0.28 | 0.68 | 27 |

在进行数值模拟前,先在 ArcGis 中加载 DEM 数据、危岩体落石来源及斜坡表面特征文件,之后加载研究区正射图影像(DOM),以便确定危岩体的具体位置。设置危岩体相关特征参数,模拟过程中假定危岩平面初始速度 $V_{xy}=0.1\text{ m/s}$,垂直速度 $V_z=0\text{ m/s}$,在母岩处以不同的平面方向抛掷落石。

(1) 落石运动轨迹

准备好所需数据后,运用 3D 解析技术,根据 DEM 数据,并结合空间坐标转换与动态计算,定量刻画落石在三维空间上的移动路径。生成的移动路径可导入 ArcScene 进行观察,危岩体失稳后的三维运动轨迹如图 5 所示,危岩失稳后,基岩裸露段横向偏移相对坡段下部较小,落石最后沿坡表滚落至崩塌堆积体。崩塌堆积体坡度整体比较平稳,坡表有植被,对滚落的危岩具有良好的耗能效果,因此落石主要停积在该段。

(2) 落石频率

落石频率是指单元格内落石轨迹的统计数量,单位 Num/cell,反映了落石在该范围内活跃程度。在计算前,通过重新划分落石移动路径的向量数据,

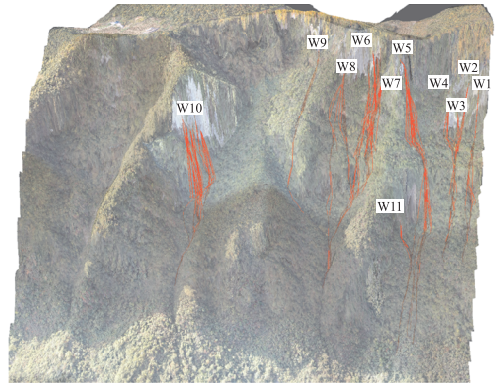


图 5 三维落石轨迹模拟结果

从而构建出落石次数的网格模型,并使用邻居聚焦法进行聚类,同时基于自然断点法分类结果将风险等级划分为低频~超频 4 个级别。利用该方法,对各危岩体失稳后落石运动路径进行分析,并按照自然断点法进行归类,见图 6。图中红色和橘色区域为落石高频区,意味着落石经过该区域的概率较高,需要重点防范注意。相反,绿色和黄色区域则意味着落石通过该地的可能性较低,但依旧需要加以防范。

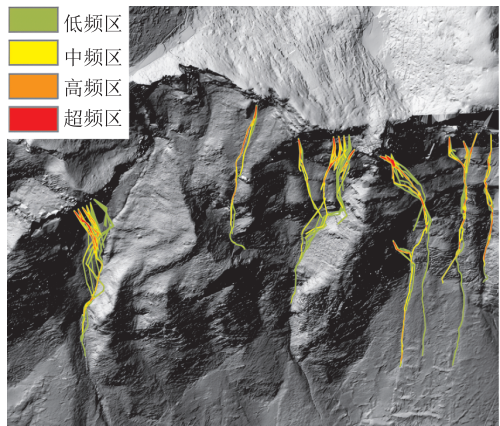


图 6 三维落石频率模拟结果

(3) 落石运动能量、速度和弹跳高度

落石启动后其运动速度通常受到地形和坡表特征的影响,逐渐减速直至停止。运动过程中,落石弹跳、滚动、滑动均会导致速度发生变化。

基于 DEM 和落石运动轨迹的矢量数据,按照落石弹跳高度重新分类,将其划分为 0~5 m、5~15 m、15~35 m、>35 m 这 4 个高度范围,见图 7。

根据图 7 中所示,落石高跃区集中于坡体上段,而下段为低跃区。据现场观察,坡顶区域基岩裸露,陡崖居多,该区域内阻力条件较弱,落石与基岩直接碰撞,因此弹跳高度较大。而坡体下部坡表植被发育,崩塌堆积体和滑坡堆积体较多,阻力条件良好,

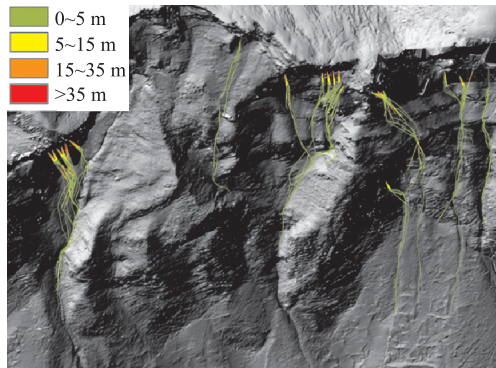


图7 落石弹跳高度区域预测

落石在碰撞过程中有一定缓冲,再加上地形变缓,落石运动主要以滚动方式为主。

将各危岩体失稳后落石运动速度重分类,按计算后最大运动速度将区间统一划分为 0~10 m/s、10~20 m/s、20~30 m/s、>30 m/s 这 4 个速度范围,见图 8。落石质量越大,则落石运动能量越高,冲击力越强,对物体的破坏能量也越大。将危岩失稳后落石的最大冲击能量进行重分类,根据落石最大冲击能量将区间统一划分为 0~500 kJ、500~1 000 kJ、1 000~1 500 kJ、>1 500 kJ 等 4 个能量范围,见图 9。落石速度和能量均是上部基岩裸露处大、下部地形较缓处小,与坡表特征联系紧密。

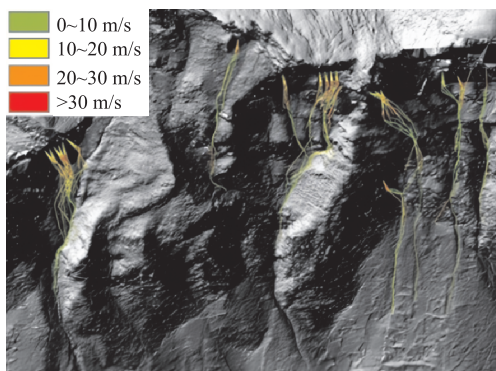


图8 落石运动速度区域预测

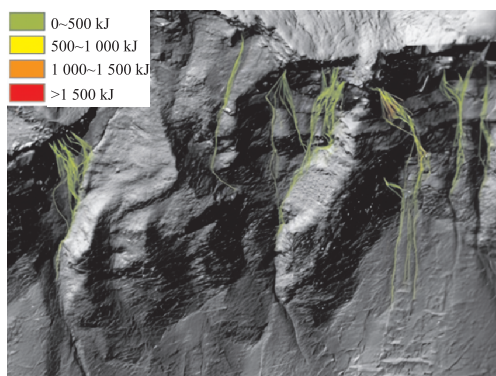


图9 落石运动能量区域预测

3.3 运动轨迹对比分析

RockFall Analyst 和 RockFall 都是基于概率统计模型的危岩落石滚动路径模拟软件^[10]。二者在计算时运用集中质量法将危岩看为一个质点,忽略落石与坡面碰撞所导致的变形和崩解,对比结果见表 5。

表5 RockFall Analyst 和 RockFall 对比

| 特性 | RockFall Analyst | RockFall |
|------|-------------------|-------------------|
| 几何层次 | 3-D | 2-D |
| 计算模型 | 质点模型 | 质点模型 |
| 地形数据 | 数字高程模型(DEM) | 剖面 |
| 统计变量 | 落石抛掷次数、落石抛掷方向 | 落石抛掷次数 |
| 其他 | 可以改变恢复系数和摩擦角、岩石质量 | 可以改变恢复系数和摩擦角、岩石质量 |

RockFall、CRSP 等二维落石模拟软件都局限于落石的竖向作用而不考虑落石的水平相互作用,且对于大范围落石灾害,不能得出该区域的灾害危险性评价结果。而 RockFall Analyst 则可以利用多因子的评价方式,给予各影响因素一定的权重系数从而得到适合当地的危险性评价公式。落石模拟的仿真结果在很大程度上取决于输入数据的质量^[11]。二维落石模拟软件 RockFall 输入的地形数据是剖面线,在开始模拟落石坠落时已经人为预设了落石轨迹的方向,软件计算仅仅只是提供沿该路径垂直方向下的落石运动参数。由于人的主观偏差,不同的剖面线的选择导致同一落石在同一高度会有着不同的运动特征参数。

为进一步说明二维软件在剖面选择上的随机性,以 W5 危岩为例进行比较。W5 危岩宽 45 m,高 125 m,厚约 38 m,危岩体正面呈椭圆形(图 11)。危岩体所在坡面近直立,坡度 78°,坡向 102°,主要受 4 组结构面切割(图 10),其中层面产状为 335°∠13°,层状厚度 2~5 m;节理 1 为主控结构面,产状为 100°∠89°,结构面裂隙宽 0.1~1 m,纵向延伸 60~70 m,结构面弯曲光滑,局部岩屑填充;节理 2 产状为 170°∠86°,结构面裂隙宽 0.5~0.7 m;节理 3 产状为 146°∠31°,结构面裂隙宽 1~15 cm,延伸长 5~10 m。

裂隙面的存在进一步切割岩体,致使岩体结构的稳定性进一步减弱。W5 危岩在横向裂隙面的影响下,部分区域岩体出现顺坡、中陡倾角、贯通或断续贯通的主控结构面,当主控结构面的上覆岩体下滑力超过该面抗滑力时,岩体迅速滑动发生崩落。

W5 为剖面 2-2' 起始危岩,现另取一剖面进行计算(图 12)。图 3 和图 12 剖面起始位置皆取自 W5 危岩,二者模拟结果相对比:图 3 在高程 1 000

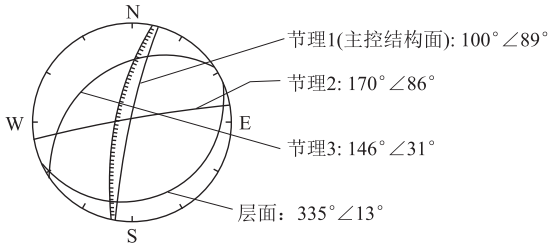


图 10 W5 危岩赤平投影图

m 处有一平台, 落石运动到该处弹跳次数最多, 最大弹跳高度 25.4 m, 落石运动速度 71.89 m/s, 但图 12 弹跳集中部分高程为 1 150 m, 最大弹跳高度 13 m, 落石运动速度 58.54 m/s。可见, 二维落石运动特征与剖面选取有较大关系。

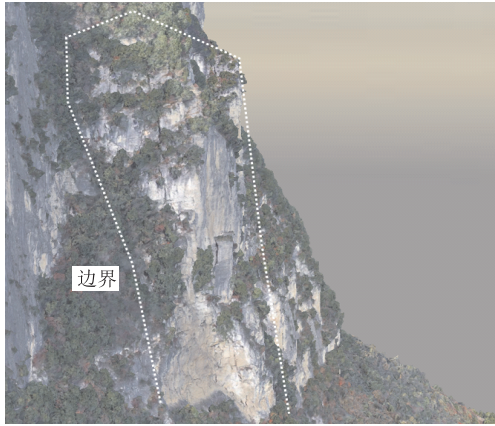


图 11 W5 危岩整体特征

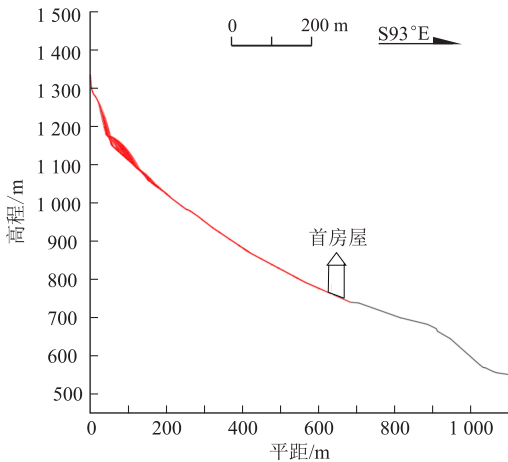


图 12 W5 危岩运动过程全模拟

相对于二维 RockFall, 三维 Rock Analyst 软件计算方式则有所不同, 其无需考虑剖面的选择, 只需要确定危岩位置和相关参数, 就可得到落石轨迹的概率统计结果。在计算开始前预设不同的落石掷出方向, 然后抛掷一定的次数用于统计模拟, 不同的抛射方向致使落石在不同的剖面穿插, 地形因素的影

响被放大。三维模拟结果中, 危岩 W5 在 1 150 m 高程弹跳较为集中, 最大速度 47 m/s, 最大弹跳高度 44 m, 与二维模拟结果相对比(表 6), 发现: 二维软件选择剖面不同导致落石弹跳集中位置不同, 并且最大弹跳高度和最大速度也出现较大差异; 三维模拟结果中落石弹跳高度和速度比二维要低, 且停留高程也较高, 唯有最大弹跳高度较大; 二者弹跳集中高程水平方向基岩裸露, 因此弹跳概率统计次数多。三维模拟过程中落石在不同剖面移动, 统计变量的增加使得落石在运动过程中受到阻力的概率变大, 从而导致落石速度和弹跳高度比二维偏小, 停留高程也相应较高。该方法避免了地形数据方面的人为误差, 从而使得模拟结果更加准确和贴切实际。

表 6 W5 危岩模拟结果对比

| 计算模型 | 最大弹跳高度/m | 弹跳集中高程/m | 最大速度 /m·s ⁻¹ | 停留高程 /m |
|-----------------|----------|----------|-------------------------|---------|
| 二维剖面 2-2' | 25.4 | 1 200 | 71.89 | 740~750 |
| 二维剖面 W5 危岩 | 13 | 1 150 | 58.54 | 740~750 |
| 三维 DEM 模型 W5 危岩 | 44 | 1 150 | 47 | 910~920 |

3.4 危岩体危险性评价

危岩体危险性评价是地质灾害风险评价的重要组成部分, 主要评估地质灾害的破坏能力。通过危险性评价可以得知地质灾害在一定时间内在某一地点的灾害频率和破坏程度^[12]。现对落石运动中的主要影响因素(落石频率、弹跳高度、落石运动能量)进行近邻解析。利用公式 1 对其进行权重赋值计算, 采用自然断点法将其危险性划分为“低危险性~极高危险性”4 个等级(图 13), 从而完成落石风险性评估^[13]。

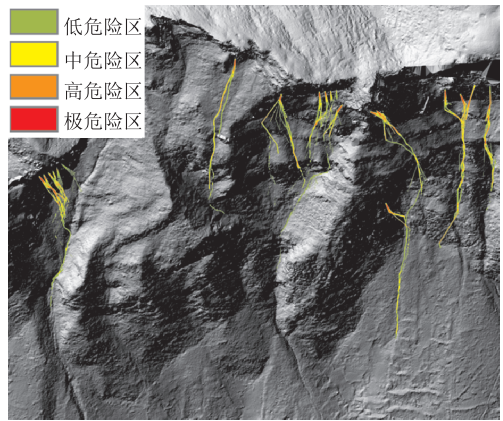


图 13 落石危险性分布

$$Hazard(i) = a \times P_{Frequency(i)} + b \times P_{Height(i)} + c \times P_{Energy(i)} \quad (1)$$

式中, Hazard(i) 表示第 i 个栅格单元的危险度;

$P_{\text{Frequency}(i)}$ 、 $P_{\text{Height}(i)}$ 、 $P_{\text{Energy}(i)}$ 分别表示第 i 个栅格单元的落石频率、弹跳高度和运动能量; a 、 b 和 c 分别表示权重系数。在 RockFall Analyst 的落石危险评估模块中,将落石频率权重定为 0.3,弹跳高度权重定为 0.2,运动能量权重定为 0.5。

从整体上看,极高危险性区域和高危险性区域主要分布在坡体上部,该高程范围坡体基岩裸露,危岩失稳后落石在此段加速后弹跳明显,具备较高的冲击能量。而坡体下部基本被崩滑体覆盖,且坡表植被发育,对落石有一定的消能作用,落石在该高程段的危险性为低-中。

4 结论

本研究通过 RockFall 和 RockFall Analyst (RA) 软件对危岩落石进行运动轨迹模拟,获得了落石的轨迹、速度、频率、动能和弹跳高度等特征参数,并比较了二维 RockFall 软件和三维 RockFall Analyst 软件在模拟方面的差异。结果表明:

(1) 该区域内,坡体上部基岩裸露段属于落石高危险区,落石在该段易发生(落石频率高)、速度快、能量高、弹跳高度大,究其原因,该段基岩裸露,植被稀少,落石耗能少。坡体下部植被发育,落石阻力条件较强,可在落石各项特征参数较小的区域布设拦挡措施。

(2) 二维模拟软件没有考虑落石水平方向的相互作用,难以对大范围落石危险性作出风险评价,因此二维落石软件仅适合研究小范围内落石运动。

(3) 二维软件由于剖面选择的随机性,不同剖面运动特征有较大差异,三维软件危岩模拟结果比二维更加精准。

参考文献

[1] 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

报,2003,47(1):17-23.

[2] 黄润秋,刘卫华. 基于正交设计的落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.

[3] 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,2011,30(6):1266-1273.

[4] 蔡向阳,铁永波,徐伟,等. 单体危岩危险性评价与防治建议——以云南省大关县危岩体为例[J]. 地质灾害与环境保护,2018,29(3):55-61.

[5] 许泽鹏,胡卸文,贺书恒,等. 基于落石冲击试验的落石冲击力研究[J]. 地质灾害与环境保护,2020,31(2):87-92.

[6] Lan H, Li L, Wu Y. Stochasticity of Rockfall Trajectory Revealed by a Field Experiment Repeated on a Single Sample [M]//LOLLINO G, GIORDAN D, CROSTA G B, et al. Engineering Geology for Society and Territory - Volume 2. Cham: Springer International Publishing,2015:1713-1721.

[7] 王栋,王剑锋,李天斌,等. 西南山区某铁路隧道口高位落石三维运动特征分析[J]. 地质力学学报,2021,27(1):96-104.

[8] 黄雨,孙启登,许强. 滚石运动特性研究新进展[J]. 振动与冲击,2010,29(10):31-35+248-249.

[9] Lan H, Martin C D, Lim C H. RockFall analyst: A GIS extension for three-dimensional and spatially distributed rockfall hazard modeling[J]. Computers & Geosciences, 2007, 33(2):262-279.

[10] Li L, Lan H. Probabilistic modeling of rockfall traj Geology and the Environ ectories: a review[J]. Bulletin of Engineering ment,2015,74(4):1163-1176.

[11] Lan H, Martin C D, Zhou C, et al. Rockfall hazard analysis using LiDAR and spatial modeling[J]. Geomorphology, 2010, 118(1-2):213-223.

[12] Corominas J, van Westen C, Frattini P, et al. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk [J]. Bulletin of engineering geology and the environment, 2014,73(2):209-263.

[13] 仇义星,兰恒星,李郎平,等. 综合统计模型和物理模型的地质灾害精细评估——以福建省龙山社区为例[J]. 工程地质学报,2019,27(3):608-622.

作者简介: 张利民(1977—),男,硕士,高级工程师,主要从事地质灾害防治研究。E-mail:83361120@qq.com

通讯作者: 宗朝正(2000—),男,硕士研究生,主要从事地质灾害稳定性预测研究。E-mail:2398283861@qq.com