

西南山区某铁路隧道口高位落石三维运动特征分析

王 栋¹, 王剑锋^{2,3}, 李天斌^{2,3}, 曾 鹏^{2,3}, 马俊杰^{2,3}, 陈 伟^{2,3}
WANG Dong¹, WANG Jianfeng^{2,3}, LI Tianbin^{2,3}, ZENG Peng^{2,3}, MA Junjie^{2,3}, CHEN Wei^{2,3}

1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031;

2. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059;

3. 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, 四川 成都 610059
1. *China Railway Er-yuan Engineering Group Co. Ltd, Chengdu 610031, Sichuan, China;*

2. *College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;*

3. *State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geo-environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China*

WANG D, WANG J F, LI T B, et al. , 2021. Analysis of three-dimensional movement characteristics of rockfall: A case study at a railway tunnel entrance in the southwestern mountainous area, China [J]. Journal of Geomechanics, 27 (1): 96-104. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.01.010

Abstract: High unstable rock masses are widely distributed in the upper part of a railway tunnel entrance in the southwestern mountainous area, which causes serious hazards to the construction of the lower tunnel. The Rockfall Analyst software was used to simulate the three-dimensional movement track of five kinds of high unstable rock masses in the upper part of the tunnel, and it shows that the rockfalls in the study area have the characteristics of high bounce height, fast speed and high impact energy. There is no relation between the bounce height, the movement speed and the mass of rockfall, while the impact energy is proportional to the mass of rockfall. The analysis shows that multiple and comprehensive protective measures should be recommended for the protection of unstable rock masses in this area instead of single protective measure.

Key words: unstable rock mass; rockfall; movement characteristics; tunnel entrance; protection

摘 要: 西南山区某铁路隧道口上部广泛分布着高位危岩体, 对下部隧道建(构)造物具有严重的威胁。采用 Rockfall Analyst 软件对该隧道上部五类不同尺寸的高位危岩体进行三维运动轨迹数值模拟, 研究表明: 研究区的高位危岩落石具有弹跳高度大、速度快、冲击能量高的特点; 弹跳高度、运动速度与危岩落石的质量无关, 冲击能量大小与落石质量成正比。分析表明: 该地区高位危岩体的防护应避免单一防护措施, 建议综合使用多种防护措施。

关键词: 危岩; 高位落石; 运动特征; 隧道口; 防护

中图分类号: P642; TU457 文献标识码: A

基金项目: 四川省科技厅重点研发项目 (2019YFG0460); 中铁二院工程集团有限公司科研项目 (科 2017-10); 中国铁路总公司科技研究开发计划课题 (2017G008-F)

第一作者简介: 王栋 (1982-), 男, 高级工程师, 主要从事铁路工程地质工作。E-mail: 99927394@ qq. com

通讯作者: 李天斌 (1964-), 男, 博士, 教授, 主要从事地下工程、斜坡地质灾害领域的教学与研究。E-mail: ltb@ cdut. cn

收稿日期: 2019-10-13; 修回日期: 2020-6-13; 责任编辑: 范二平

引用格式: 王栋, 王剑锋, 李天斌, 等, 2021. 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, 27 (1): 96-104. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.01.010

0 引言

近年来,随着国家西部大开发战略的逐步实施,铁路建设飞速发展。在国内西南山区基础设施修建和运营过程中,高陡边坡危岩体崩塌产生的落石严重威胁到交通线路及人员的安全(胡聪,2014),例如:2018年7月31日,受持续降雨影响,四川理县辖区国道317线K176路段发生山体落石,造成道路双向中断,车辆无法通行。

落石是山区常见的地质灾害之一,具有点多、面广、暴发突然等特点,通常规模较小,但致灾严重(叶四桥等,2010;张佳佳等,2018;王军朝和孙金辉,2019)。在落石灾害防治研究中,落石运动轨迹的预测和运动特征分析是决定防护措施位置和高度选择的先决条件(古贺泰之和王天威,1992;刘卫华,2008;黄润秋和刘卫华,2009)。相关学者已对危岩落石的运动轨迹特征做了大量研究,唐红梅和易朋莹(2003)将危岩落石的运动过程分为初始运动、碰撞、滚动和滑动四个阶段,获取了各个阶段运动轨迹方程。胡杰等(2018)以在建的成都—兰州(成兰)铁路某隧道出口仰坡为对象,系统研究了不同落石形状对恢复系数的影响。王玉锁和杨国柱(2010)从系统/问题的定义入手,将隧道工程系统分为洞口段工程和洞身段工程等子系统,以使问题分析更加明确;提出了采用初步定性评估和细部定量评估的隧道洞口段危岩落石风险评估方法。向欣(2010)通过现场实验研究了落石形状、质量等对落石运动特征的影响。虽然相关研究已取得丰富的成果,但对于高海拔地区危岩落石三维运动轨迹特征的研究较少(Guzzetti et al., 2002; Agliardi and Crosta, 2003; 杨海清和周小平, 2009)。

危岩落石的运动特征通常与工程地质条件相关(贾艳昌等,2017;吴明等,2017;许腾晖等,2019;王健等,2020)。在高海拔地区常年受到风化剥削及冰雪融化作用,危岩落石非常发育。由于地形高差较大,对于高位危岩体的初始状态,往往具有较大的重力势能,由能量守恒定律可知,当落石到达地势较低点时会具有较大的冲击动能,传统的单一防护措施难以满足要求。

文中以西南某在建铁路隧道洞口段(叶四桥,2008)为研究对象,对五类不同尺寸的高位落石进行三维运动轨迹模拟,并详细分析不同落石尺

寸的运动特征,为铁路的防治措施提供依据。

1 落石的运动方式

落石运动是指由于某种原因(内部因素或外界因素)使得潜在危岩体脱离母体经过一系列运动方式(滑动、自由飞落、碰撞弹跳、滚动等)后,最终停积在较平缓地带或拦挡物附近的一个动态过程。

1.1 落石的滑动

落石的滑动通常运动距离从几厘米到几米不等,这是由于滑动通常发生在边坡坡度较缓的坡段上,且由于摩擦力的存在,滑动阶段的速度往往较低。由滑动的速度公式可知:滑动距离与速度的平方成正比。

对滑动结束时速度 V 的计算公式如下:

$$V = \sqrt{2gs(\sin a - u \cos a)} \quad (1)$$

公式中: g 为重力加速度; u 为滑动摩擦系数; a 为边坡滑动段的坡度; s 为滑动距离; a 和 s 可根据边坡的具体形状确定。

1.2 落石的自由飞落

在边坡坡角变化的地方,碰撞发生后往往会形成落石的自由飞落(图1)。由于重力作用,落石的重力势能最终将转化为动能。为了规避落石飞行时对空气阻力的讨论,把落石的自由飞落假定为一系类碰撞点之间的抛物线,这样落石的运动抛物线主要由碰撞回弹速度及坡面线决定。

根据落石的自由飞落是否会撞击拦挡结构可将其分为两类问题。

1.2.1 未撞击拦挡结构

对未撞击拦挡结构,关心的是在任意时刻 t ,落石的坐标 (x, y, z) 。假定落石撞击坡面的时间为 t_1 , 则其计算公式如下:

$$\begin{cases} x = V_{1x}(t - t_1) + x^* \\ y = V_{1y}(t - t_1) + y^* \\ z = -1/2g(t - t_1)^2 - V_{1z}(t - t_1) + z^* \end{cases} \quad (2)$$

公式中: g 为重力加速度; V_{1x} , V_{1y} 和 V_{1z} 分别为落石碰撞反弹后沿 x , y 方向的水平速度和沿 z 方向的竖向速度(以向下为正); x^* , y^* 和 z^* 为碰撞点的位置(图1)。

1.2.2 撞击拦挡结构

对落石会撞击拦挡结构时,为更有效设置拦挡结构模型,更关心落石在撞击拦挡结构时的高

度 h 和冲击速度 V , 具体公式如下:

$$\begin{cases} h = -1/2g\left(\frac{x_D - x^*}{V_{1x}}\right)^2 - V_{1z}\left(\frac{x_D - x^*}{V_{1x}}\right) + z^* - z_D \\ V = \sqrt{V_{1x}^2 + V_{1y}^2 + \left(V_{1z} + g\frac{x_D - x^*}{V_{1x}}\right)^2} \end{cases}$$

(3)

公式中: x_D , y_D 和 z_D 为落石与拦挡结构撞击点在坡面上竖向投影的空间坐标 (图 1), 其余符号含义同上。

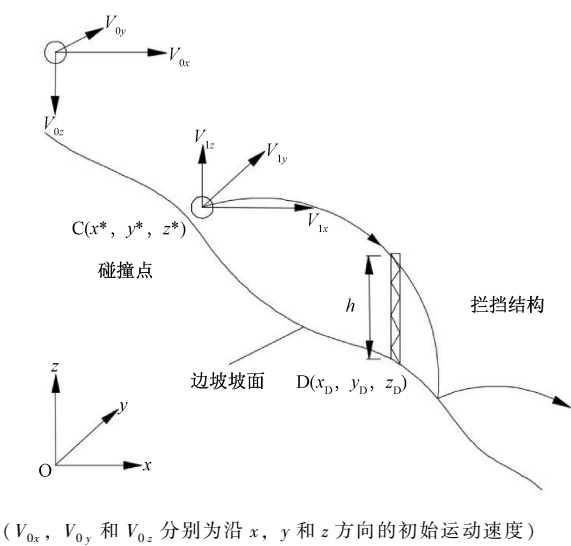


图 1 落石自由飞落模型
Fig. 1 Free falling model of rockfall

表 1 落石碰撞恢复系数及滚动摩擦系数 (吕庆等, 2003)

Table 1 Restitution coefficients and rolling friction coefficient of the rockfall collision (Lv et al., 2003)

坡面特征	法向恢复系数 e_N	坡面特征	切向恢复系数 e_T	坡面特征	滚动摩擦系数 $\tan\beta_\gamma$
光滑而坚硬的表面和铺砌面, 如人行道或光滑的基岩面	0.37~0.42	光滑而坚硬的表面和铺砌面, 如人行道或光滑的基岩面	0.87~0.92	光滑岩面、混凝土表面	0.40~0.60
多数为基岩或砾岩区的斜面	0.33~0.37	多数为基岩和无植被覆盖的斜坡	0.83~0.87	块石堆积坡面	0.55~0.70
硬土边坡	0.30~0.33	多数为有少量植被的斜坡	0.82~0.85	密实碎石堆积坡面、硬土坡面	0.55~0.85
软土边坡	0.28~0.3	植被覆盖的斜坡或有稀少植被覆盖的土质边坡	0.80~0.83	松散碎石坡面、软土坡面	0.50~0.85
		灌木林覆盖的土质边坡	0.78~0.82		

考虑。落石在运动过程中什么时候进入滚动状态, 以及滚动的最终距离是研究落石滚动的关键。

对于落石在运动过程中什么时候进入滚动问题, 假定:

$$\tan\gamma = \sqrt{V_{iDip}^2 + V_{iTrend}^2} / V_{iN}$$

(5)

公式中: γ 为落石碰撞回弹角, 其余符号含义同上。落石碰撞后, 当 $\tan\gamma < \varepsilon_\gamma$ (其中 ε_γ 为一任意

1.3 落石的碰撞弹跳

落石的碰撞弹跳通常发生在落石自由飞落过程中与边坡坡面撞击的时刻, 是所有运动形式中最复杂、最不确定的运动。为了避免对落石碰撞过程中非线性变形以及摩擦问题的直接讨论, 把落石的碰撞问题看作刚体碰撞, 通过恢复系数来考虑碰撞前后落石速度之间的关系 (何思明等, 2009; 章广成等, 2011; 章广成等, 2012; 姚文莉和岳嵘, 2015)。具体公式如下:

$$\begin{cases} V_{rDip} = e_T V_{iDip} \\ V_{rTrend} = e_T V_{iTrend} \\ V_{rN} = e_N V_{iN} \end{cases}$$

(4)

公式中: V_{rDip} , V_{rTrend} 和 V_{rN} 为碰撞后的倾向速度、走向速度和法向速度; e_N 和 e_T 为碰撞点的法向恢复系数和切向恢复系数 (铁道部推荐值见表 1); V_{iDip} , V_{iTrend} 和 V_{iN} 为碰撞前的倾向速度、走向速度和法向速度。

1.4 落石的滚动

落石的滚动是指落石紧贴着边坡坡面滚动。在自然界中, 这种滚动很少, 多为一种短距离的弹跳模式, 往往形成一系列连续的、弹跳距离很小的、弹跳高度很低的抛物线。为避免复杂的分析, 将落石的滚动模型简化为圆形刚体在斜坡上的摩擦滚动, 将所有复杂的控制因素归结到滚动摩擦系数 (铁道部推荐值, 见表 1) 中加以概化考

大于 0 的无穷小的数, 可根据计算精度确定其大小) 时, 可以认为落石进入滚动状态, 而没有回弹。否则继续按照弹跳来分析计算。

对于落石最终停积发生的滚动距离 s 的计算见下式:

$$s = \frac{V_0^2}{2Bg\cos\alpha(\tan\alpha - \tan\beta_\gamma)}$$

(6)

B 为一个与落石质量和形状有关的常数, 其定义为:

$$B = \frac{m}{m + \frac{I}{R^2}}$$

(7)

公式 (6) 和 (7) 中: g 为重力加速度; m 为落石的质量; R 为落石的半径; I 为落石的运动冲量; α 为边坡滚动段的坡度; V_0 为滚动状态初始速度; β_γ 为动摩擦角。

2 研究区高位落石三维轨迹模拟

2.1 工程概况

西南地区某在建铁路地理位置属喜马拉雅山、念青唐古拉山系地形地貌单元段。主要包括帕隆藏布与尼洋河地区, 东至唐古拉山, 西至米拉山, 念青唐古拉山之东延余脉东西横贯本区。地段高耸, 群峰林立, 山势雄伟, 海拔一般在 4500~5500 m。由于河谷的深切使印度洋西南季风沿江伸入本区, 加之四周群山的隔阻, 使本区具有独特的高山温湿气候环境。河谷宽窄相间, 以峡谷为主, 多悬崖绝壁 (临空面), 并且常年受到风化作用及冻融循环作用, 使得岩体存在大量陡倾裂隙, 大量的自然作用为潜在高位危岩体的形成提供了有利条件。

研究点 (拟建隧道位置) 地貌上属高山峡谷

地貌, 具体地形地貌及潜在危岩源分布概况见图 2, 地形起伏较大, 坡高大约 300~400 m, 坡底为 318 国道, 局部有居民住宅。坡顶大量基岩出露并形成悬崖峭壁, 在潜在危岩体上部植被茂密, 坡底有大量落石堆积, 岩性主要以花岗岩为主, 质量主要分布范围在 10~10000 kg, 其中以 50~1000 kg 居多。由于潜在危岩源地势高, 测量不便, 因此, 根据现场坡底落石堆积区选取五类典型的落石尺寸作为研究对象, 具体见表 2。

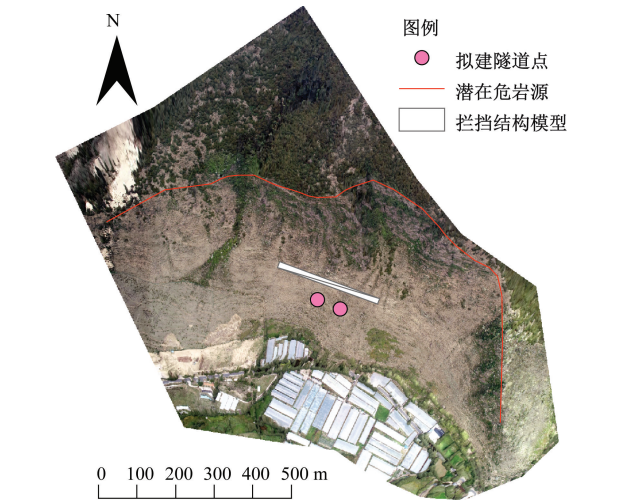


图 2 研究点危岩体分布图
Fig. 2 Distribution map of the unstable rock masses at the study site

表 2 危岩落石尺寸

Table 2 Sizes of the rockfalls

危岩编号	长 L/m	宽 B/m	厚 H/m	不规则系数 k	岩性	体积 V/m^3	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	质量 m/kg
W1	0.18	0.19	0.10	0.90	花岗岩	0.0031	2850	约 10
W2	0.46	0.23	0.22	0.75	花岗岩	0.0175	2850	约 50
W3	1.30	1.00	0.37	0.65	花岗岩	0.3127	2850	约 1000
W4	2.47	1.63	0.89	0.60	花岗岩	2.1499	2850	约 6200
W5	3.82	3.89	3.10	0.70	花岗岩	32.2458	2850	约 92000

注: ①不规则系数 k 根据现场不规则程度决定; ② $V = L \times B \times H \times k$; ③ $m = \rho \times V$

2.2 典型高位落石三维轨迹模拟研究

为了对典型高位危岩落石发生的运动轨迹、能量分布和弹跳高度等特征参数进行定量计算。采用 Lan et al. (2007) 基于 ArcGIS 开发的 Rockfall Analyst 软件模拟落石的运动特征。

计算模型采用如下假定: ①边坡简化为光滑的坡面; ②落石形状假定为球体, 质量均匀分布; ③落石和坡面视为刚体; ④不考虑运动过程中落石间的相互作用; ⑤不考虑落石碰撞破裂的影响, 假定落石始终保持完整。

计算过程如下: ①根据工程地质图的地层岩性和无人机摄影图 (刘海洋, 2017; 焦盼飞, 2017; 陈宙翔等, 2019) 的坡面覆盖层和植被特征, 并参考铁道部建议的落石碰撞恢复系数值, 确定危岩体的法向恢复系数、切向恢复系数和动摩擦角等计算参数 (表 3, 图 3); ②根据危岩的几何形状、大小和密度 (表 2) 确定危岩的初始运动状态 (表 4), 为使落石运动, 赋予一个较小的初始速度; ③通过危岩体的运动方程计算危岩体的运动特征; ④危岩体与坡面碰撞后, 计算出撞

击点的坐标、能量、弹跳高度；⑤输出危岩的运动轨迹、能量分布、弹跳高度等计算结果；⑥计算每个单元的危险度，并输出危岩的危险性区划分布图，危险度由崩塌频率、弹跳高度、冲击能量进行加权处理获得，见公式（8）：

$$D_i = a \times Rf_i + b \times Rh_i + c \times Re_i \tag{8}$$

公式中： D_i 表示第 i 个单元的危险度； Rf_i 代表第 i 个单元的崩塌频率； Rh_i 为第 i 个单元的弹跳高度； Re_i 为第 i 个单元的冲击能量； a 、 b 、 c 均为权重系数，分别取值为 0.5，0.2，0.3（刘洪江和兰恒星，2012）；危险性根据 ArcGIS 内部的自然间断点分级法划分为五个等级：低危险区、较低危险区、中危险区、较高危险区和危险区。

表 3 坡面特征计算参数表

坡面特征	法向恢复 系数 e_N	切向恢复 系数 e_T	动摩 擦角 / (°)
硬岩+大量植被	0.37	0.85	13
风化岩石坡面	0.35	0.85	15
风化岩石坡面+少量植被覆盖	0.33	0.75	18
岩堆	0.30	0.82	20
岩土坡面	0.28	0.82	23
岩土坡面+少量植被	0.25	0.78	25
岩土坡面+大量植被	0.20	0.60	30
房屋	0.40	0.85	10
泥坡+植被	0.30	0.75	21
路基路面	0.40	0.90	10
水（遇水停止）	0.00	0.00	89
大棚	0.10	0.30	50

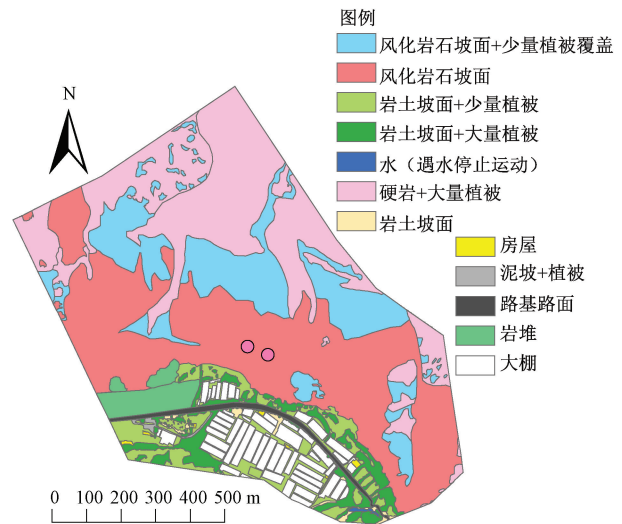


图 3 地表特征空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of the surface characteristics

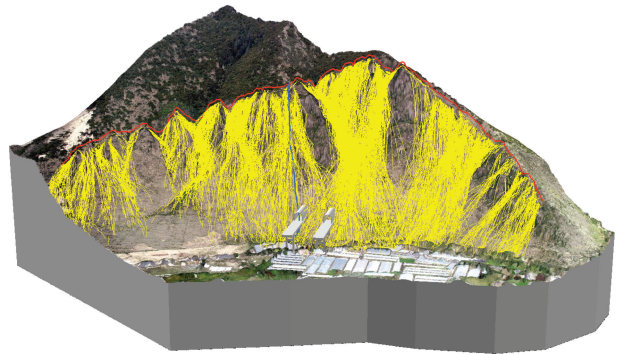
将某拟建隧道口的 DEM 高程数据模型导入 ArcGIS 并通过 Rockfall Analyst 软件对潜在高位落石的三维运动轨迹进行模拟，这里只展示 W1 号危

表 4 落石初始运动参数

Table 4 Initial motion parameters for the rockfalls				
危岩 编号	质量 m/kg	初始水平速度 $V_p/(m/s)$	初始竖向速度 $V_{0z}/(m/s)$	初始弹跳高度 h/m
W1	约 10	0.30	0.30	0.05
W2	约 50	0.30	0.30	0.05
W3	约 1000	0.30	0.30	0.05
W4	约 6 200	0.30	0.30	0.05
W5	约 92 000	0.30	0.30	0.05

注： $V_p = \sqrt{V_{0x}^2 + V_{0y}^2}$ (V_{0x} 和 V_{0y} 为沿 x 和沿 y 向的初始水平速度)

岩体的运动轨迹和危险性区划分布图。具体运动轨迹计算结果和危险性区划分布见图 4 和图 5。由图分析可知：大量落石将穿越隧址区，隧址区整体在中危险性区域。由此可见，隧道口如果不加以防护，将会对铁路隧道口的建设及后期运营造成较为严重的威胁。



红色线条代表潜在危岩源，黄色线条代表运动轨迹，蓝色线条代表典型轨迹线

图 4 危岩落石三维轨迹

Fig. 4 Three-dimensional trajectory of the rockfalls

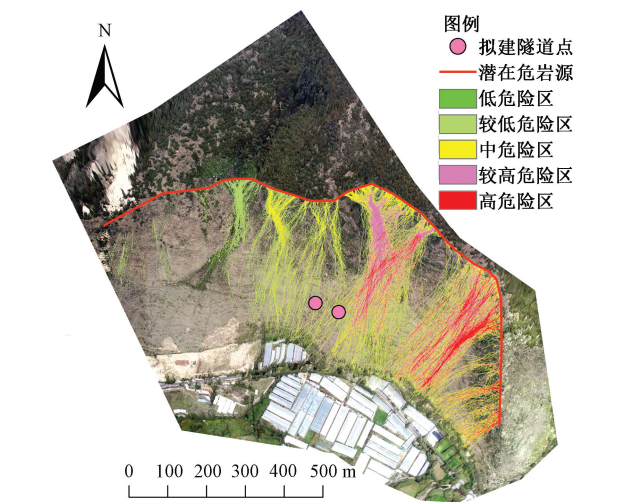


图 5 危险性区划分布图

Fig. 5 Hazard zoning map

2.3 数据结果分析

从穿越隧址区中选取一条典型轨迹线（图 4

中蓝色线条) 获取其运动特图 (图 6)。根据落石运动轨迹线分析可知, 落石运动多以碰撞弹跳、自由飞落为主, 在局部地形平缓地带, 落石也会发生滚动。这是由于隧址区地形高差变化较大, 在落石运动过程时, 将足够大的重力势能转化为动能, 获得较大的速度。

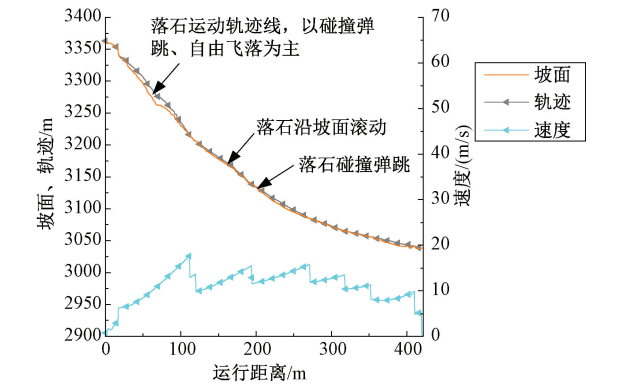


图 6 运动轨迹特征曲线

Fig. 6 Trajectory characteristics of the rockfalls

具体五类危岩落石尺寸的最大速度和最大弹跳高度及最大冲击速度见表 5 和图 7。由于冲击能量变化范围较大, 因此以对数坐标进行显示, 速度和弹跳高度以线性坐标显示。对数据分析可知: 速度和弹跳高度随落石质量的增大而变化不大, 这是由于在分析时忽略空气阻力等外界因素, 将落石滚动完全考虑为落石与坡面之间的刚性碰撞, 因此落石的速度和弹跳高度与落石质量大小无关; 由图 7 可得出, 落石冲击能量与质量成正比, 这是由于落石的冲击能量主要由动能组成, 由动能公式 (9) 可知, 落石的动能与质量成正比。

$$E = \frac{1}{2}mV^2 \tag{9}$$

公式中: E 为落石的动能, m 为落石的质量, V 为落石的速度。

表 5 不同落石尺寸的最大运动特征值

危岩 编号	质量 m / kg	弹跳高度/ m	速度/ (m/s)	冲击能量/ kJ
W1	约 10	77.07	71.16	22.21
W2	约 50	57.77	68.31	116.10
W3	约 1000	45.90	61.33	2864.00
W4	约 6200	45.92	61.06	11423.00
W5	约 92000	43.00	61.00	170974.00

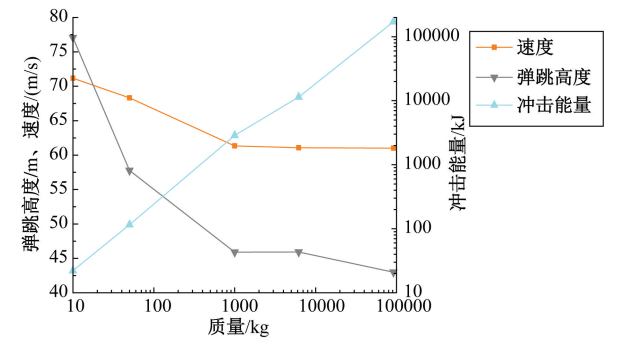


图 7 最大运动特征值图

Fig. 7 Chart showing the maximum motion eigenvalues

3 拦挡结构分析

基于上文对危岩落石运动轨迹分析可知: 隧址区处于中危险性区域, 另外危岩落石的运动速度可达到 71.16 m/s, 弹跳高度可到达 77.07 m; 而冲击能量主要与落石质量有关, 当落石质量在 1 t 左右时, 冲击能量在 3000 kJ 左右, 当落石质量到达 5 t 时, 落石冲击能量可高达 10000 kJ 以上。由常见防护结构选取的依据分析可知 (表 6): 落石被动防护措施所能达到的最大能量 (柔性挡石墙) 为 5000 kJ, 因此对于研究区隧道口上部危岩落石的防护采用传统防护措施不可行, 需要更具针对性的防护措施。根据危岩体空间的分布位置是否可供人类进行工程活动, 可分为两类。

(1) 危岩体空间的分布位置可供人类进行工程活动

对于小粒径落石且分布范围面积小于 1000 m², 防护可采用柔性防护网; 对于中等粒径且孤立危岩落石 (冲击能量小于 3000 kJ, 具体应根据危岩体发生造成的经济损失或人身安全进行判别), 可采用清除危岩、混凝土喷锚或在隧道口处设置棚洞; 对于大粒径危岩体 (如表 5 中的 W5), 此时应建议采取清除危岩。当危岩体分布范围广、粒径分布范围大时, 采用单类防治措施无法取得良好的防护效果, 因此, 建议综合使用多种防护措施。

(2) 危岩体空间的分布位置人类无法进行工程活动

对于小粒径落石 (冲击能量小于 5000 kJ), 防护可采用柔性挡石墙; 对于大粒径落石, 应尽量将线路避开该区域, 当无法避开该区域时, 可修建引导滚石改变运动方向的拦挡物, 即拦挡结

构横向与危岩体潜在运动轨迹方向不相互垂直，滚石撞击拦挡结构时，拦挡结构会改变滚石的潜在运动轨迹，改变后的运动轨迹对下部的建（构）

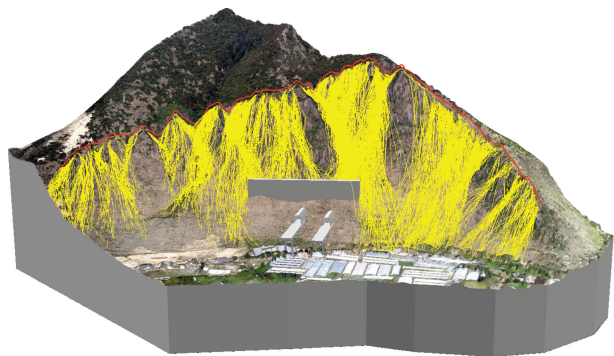
筑物不具有危险性，即达到风险转移的效果。当存在多类危岩落石时，也可综合使用多种防护措施。

表 6 常见滚石防护结构选择的依据（何思明等，2015）

Table 6 Basis for choosing protective structures for common rockfalls（He et al.，2015）

主动防治				被动防治		
清除危岩/m ³	混凝土喷锚/m ²	主动柔性防护/m ²	被动柔性防护/m ³	棚洞/kJ	落石槽/kJ	柔性挡石墙/kJ
0~500	300~1500	100~1000	200~1000	1000~3000	100~500	1000~5000

针对 W1 危岩体采用拦截法规避下部隧道结构的危险性，运动轨迹和危险性区划见图 8 和图 9。从图中分析可知，当设置拦挡结构时可大幅降低隧道结构物的危险性，同时隧址区的危险性降为低危险性区域。



红色线条代表潜在危岩源，黄色线条代表运动轨迹

图 8 存在拦挡结构危岩落石三维轨迹

Fig. 8 Three-dimensional trajectory of the rockfalls with barrier

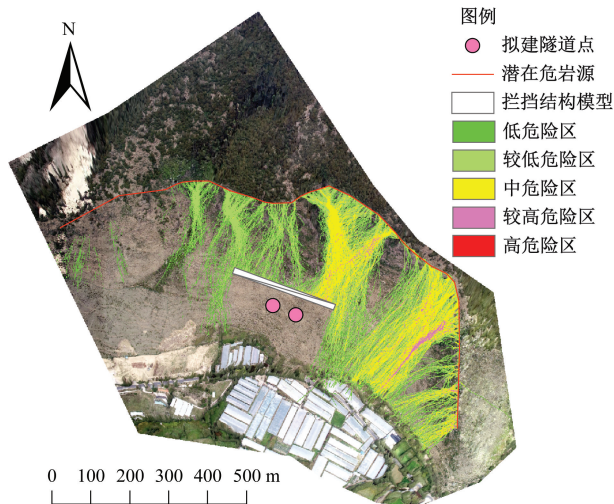


图 9 存在拦挡结构危险性区划分布图

Fig. 9 Hazard zoning map with barrier

4 结论

文章对西南山区某隧道进口高位危岩体运动

特征进行了详细分析，通过不同尺寸落石的三维轨迹数值模拟分析，主要获得以下认识。

（1）由于地形高差较大，落石易具有较大冲击速度，使得危岩落石以弹跳飞跃运动为主。

（2）落石的弹跳高度、运动速度与落石质量无明显关系；冲击能量与落石质量成正比。

（3）滚石的最大弹跳高度可达 77.07 m，最大速度可达 71.16 m/s，最大冲击能量可达 170 974.00 kJ，具有高速度、高能量的特点。因此在设置拦挡措施时，应根据实际情况综合使用各类防护措施，或采用引导法，使高位落石不威胁到下部隧道口建（构）筑物。

致谢：兰恒星研究员为本项研究提供了 Rockfall Analyst 软件，在此谨表感谢！

References

AGLIARDI F, CROSTA G B, 2003. High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40 (4): 455-471.

CHEN Z X, YE X, ZHANG W B, et al, 2019. Formation mechanism analysis and stability evaluation of dangerous rock collapses based on the oblique photography by unmanned aerial vehicles [J]. China Earthquake Engineering Journal, 41 (1): 257-267, 270. (in Chinese with English abstract)

GU H T Z, WANG T W, 1992. Research on prediction method of rockfall trajectory [J]. Railway Engineering (8): 8-13. (in Chinese)

GUZZETTI F, CROSTA G, DETTI R, et al, 2002. STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls [J]. Computers & Geosciences, 28 (9): 1079-1093.

HE S M, WU Y, LI X P, 2009. Research on restitution coefficient of rock fall [J]. Rock and Soil Mechanics, 30 (3): 623-627. (in Chinese with English abstract)

HE S M, WANG D P, WU Y, et al, 2015. Formation and evolution mechanism of collapse and rockfall disaster and key technology of disaster reduction [M]. Beijing: Science Press: 6-19. (in Chinese)

HU C, 2014. Instability mechanism of high steep dangerous rock body and law of motion of rolling stones [D]. Jinan: Shandong University.

(in Chinese with English abstract)

HU J, LI S C, SHI S S, et al, 2018. Model test study of rockfall impacts on tunnel heading slope and discussion of related mechanisms [J]. Rock and Soil Mechanics, 39 (7): 2527-2536. (in Chinese with English abstract)

HUANG R Q, LIU W H, 2009. In-situ test study of characteristics of rolling rock blocks based on orthogonal design [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 28 (5): 882-891. (in Chinese with English abstract)

JIA Y C, XIE M W, CHANG S X, et al, 2017. A model for evaluation of stability of sliding- and falling-type dangerous rock blocks based on natural vibration frequency [J]. Rock and Soil Mechanics, 38 (7): 2149-2156. (in Chinese with English abstract)

JIAO P F, 2017. Study on Rockfall hazard assessment of mountainous highway based on the digital image processing [D]. Xi'an: Chang'an University. (in Chinese with English abstract)

LAN H X, MARTIN C D, LIM C H, 2007. Rockfall analyst: a GIS extension for three-dimensional and spatially distributed rockfall hazard modeling [J]. Computers & Geosciences, 33 (2): 262-279.

LIU H J, LAN H X, 2012. Rockfall disaster simulation and risk assessment on the Dujiangyan-Wenchuan highway after “5.12” earthquake [J]. Resources Science, 34 (2): 345-352. (in Chinese with English abstract)

LIU H Y, WANG X L, LI L H, et al, 2017. Application of UAV aerial photogrammetry for Rockfall disaster survey [J]. Journal of Engineering Geology, 25 (S1): 82-87. (in Chinese with English abstract)

LIU W H, 2008. Study on stability, movement characteristics and countermeasures of potential unstable rock mass in high-steep slope [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. (in Chinese with English abstract)

LV Q, SUN H Y, ZHAI S K, et al, 2003. Evaluation models of rockfall trajectory [J]. Journal of Natural Disasters, 12 (2): 79-84. (in Chinese with English abstract)

TANG H M, YIP Y, 2003. Research on dangerous rock movement route [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 25 (1): 17-23. (in Chinese with English abstract)

WANG J C, SUN J H, 2019. Characteristics and stability analysis of rock collapse of low-angled Red-bed slope in East Sichuan [J]. Journal of Geomechanics, 25 (6): 1091-1098. (in Chinese with English abstract)

WANG J, HUANG B L, ZHANG Q, et al, 2020. Study on generalized model of collapse-deposit characteristics of cataclastic and columnar dangerous rock mass [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 51 (2): 136-143. (in Chinese with English abstract)

WANG Y S, YANG G Z, 2010. Rockfall risk assessment for a tunnel portal section [J]. Modern Tunnelling Technology, 47 (6): 33-39. (in Chinese with English abstract)

WU M, HE W G, ZHANG B, et al, 2017. Investigation of late quaternary activity along Subei fault [J]. China Earthquake Engineering Journal, 39 (2): 285-293. (in Chinese with English

abstract)

XIANG X, 2010. Research on motion characteristics and impact force of rockfall [D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan). (in Chinese with English abstract)

XU T H, JIN W X, SUN S Q, et al, 2019. Study on feature of dangerous rock of Purple Mountain in Tibet and its stability and movement characteristics [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 50 (1): 169-178. (in Chinese with English abstract)

YANG H Q, ZHOU X P, 2009. A new approach to calculate trajectory of rockfall [J]. Rock and Soil Mechanics, 30 (11): 3411-3416. (in Chinese with English abstract)

YAO W L, YUE R, 2015. Advance in controversial restitution coefficient study for impact problems [J]. Journal of Vibration and Shock, 34 (19): 43-48. (in Chinese with English abstract)

YE S Q, 2008. Research and mitigation of rockfall hazards at tunnel entrance and exit [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University. (in Chinese with English abstract)

YE S Q, CHEN H K, TANG H M, 2010. Rockfall mitigation techniques and its characteristics [J]. Highway (7): 80-85. (in Chinese with English abstract)

ZHANG G C, XIANG X, TANG H M, 2011. Field test and numerical calculation of restitution coefficient of rockfall collision [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 30 (6): 1266-1273. (in Chinese with English abstract)

ZHANG G C, TANG H M, XIANG X, 2012. Characteristic parameters theoretical analysis of rockfall impact on ground [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 31 (S1): 2839-2846. (in Chinese with English abstract)

ZHANG J J, CHEN L, WANG J C, et al, 2018. Study of disaster-inducing geological conditions of collapse and landslide along Lulang-Tongmai in Se Tibet [J]. Journal of Geomechanics, 24 (4): 474-481. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

陈宙翔, 叶咸, 张文波, 等, 2019. 基于无人机倾斜摄影的强震区公路高位危岩崩塌形成机制及稳定性评价 [J]. 地震工程学报, 41 (1): 257-267, 270.

古贺泰之, 王天威, 1992. 落石运动轨迹预测方法的研究 [J]. 铁道建筑 (8): 8-13.

何思明, 吴永, 李新坡, 2009. 滚石冲击碰撞恢复系数研究 [J]. 岩土力学, 30 (3): 623-627.

何思明, 王东坡, 吴永, 等, 2015. 崩塌滚石灾害形成演化机理与减灾关键技术 [M]. 北京: 科学出版社: 6-19.

胡聪, 2014. 高陡边坡危岩体失稳机理及其崩塌滚石运动规律 [D]. 济南: 山东大学.

胡杰, 李术才, 石少帅, 等, 2018. 隧道仰坡落石冲击模型试验研究与机制探讨 [J]. 岩土力学, 39 (7): 2527-2536.

黄润秋, 刘卫华, 2009. 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, 28 (5): 882-891.

贾艳昌, 谢谟文, 昌圣翔, 等, 2017. 基于固有振动频率的滑移式和坠落式危岩块体稳定性评价模型研究 [J]. 岩土力学, 38 (7): 2149-2156.

焦盼飞, 2017. 基于图像处理的边坡崩塌危险性评价研究 [D]. 西

安：长安大学.

刘海洋, 王学良, 李丽慧, 等, 2017. 无人机航空摄影测量技术在崩塌灾害调查中的应用 [J]. 工程地质学报, 25 (S1): 82-87.

刘洪江, 兰恒星, 2012. “5.12”震后都江堰-汶川公路崩塌灾害模拟及危险性评价 [J]. 资源科学, 34 (2): 345-352.

刘卫华, 2008. 高陡边坡危岩体稳定性、运动特征及防治对策研究 [D]. 成都: 成都理工大学.

吕庆, 孙红月, 翟三扣, 等, 2003. 边坡滚石运动的计算模型 [J]. 自然灾害学报, 12 (2): 79-84.

唐红梅, 易朋莹, 2003. 危岩落石运动路径研究 [J]. 重庆建筑大学学报, 25 (1): 17-23.

王健, 黄波林, 张全, 等, 2020. 碎裂化柱状危岩体崩塌-堆积特征概化模型研究 [J]. 水利水电技术, 51 (2): 136-143.

王军朝, 孙金辉, 2019. 川东红层缓倾角岩质崩塌特征与稳定性分析 [J]. 地质力学学报, 25 (6): 1091-1098.

王玉锁, 杨国柱, 2010. 隧道洞口段危岩落石风险评估 [J]. 现代隧道技术, 47 (6): 33-39.

吴明, 何文贵, 张波, 等, 2017. 野马河-大雪山断裂带北段晚第四纪活动特征研究 [J]. 地震工程学报, 39 (2): 285-293.

向欣, 2010. 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).

许腾晖, 金文祥, 孙书勤, 等, 2019. 西藏紫金山危岩特征及稳定性和运动特性研究 [J]. 水利水电技术, 50 (1): 169-178.

杨海清, 周小平, 2009. 边坡落石运动轨迹计算新方法 [J]. 岩土力学, 30 (11): 3411-3416.

姚文莉, 岳嵘, 2015. 有争议的碰撞恢复系数研究进展 [J]. 振动与冲击, 34 (19): 43-48.

叶四桥, 2008. 隧道洞口段落石灾害研究与防治 [D]. 成都: 西南交通大学.

叶四桥, 陈洪凯, 唐红梅, 2010. 危岩落石防治技术体系及其特点 [J]. 公路 (7): 80-85.

章广成, 向欣, 唐辉明, 2011. 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, 30 (6): 1266-1273.

章广成, 唐辉明, 向欣, 2012. 冲击地面过程中落石特征参量的理论分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 31 (S1): 2839-2846.

张佳佳, 陈龙, 王军朝, 等, 2018. 藏东南鲁朗-通麦崩塌滑坡孕灾地质背景特征研究 [J]. 地质力学学报, 24 (4): 474-481.

开放科学（资源服务）标识码（OSID）：

可扫码直接下载文章电子版，也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资

