

地震作用下公路斜坡落石运动特征研究

王宏益^{1,2}, 沈军辉², 陶盛宇¹, 师华鹏¹

(1. 广西交通设计集团有限公司, 南宁 530029;

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: 以剑(阁)青(川)公路斜坡落石为研究对象, 结合斜坡微地貌, 在现场调绘落石运动痕迹与停积位置的基础上, 建立地震作用下落石运动特征的二维数值模型。运用 Rockfall 软件进行落石的运动特征模拟, 探究地震作用下的公路斜坡落石运动规律及致灾影响, 模拟成果与汶川特大地震造成的既有落石现场运动痕迹吻合。根据模拟成果获取落石停积位置、平移速度、弹跳高度等运动特征参数, 为地震作用下公路斜坡落石的工程防治的位置、拦挡高度及能级大小等提供了重要参考依据。

关键词: 地震; 公路斜坡; 落石; 数值模拟; 运动特征

中图分类号: P315; P694; U417.1 **文献标识码:** A

STUDY ON ROCKFALL MOVEMENT CHARACTERISTICS OF HIGHWAY SLOPE UNDER EARTHQUAKE

WANG Hong-yi^{1,2}, SHEN Jun-hui², TAO Sheng-yu¹, SHI Hua-peng¹

(1. Guangxi Communications Design Group Co., Ltd., Nanning 530029, China;

2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu 610059, China)

Abstract: Taking the highway slope rockfall from Jiange County to Qingchuan County as the research object and combining with the slope microlandform, a two-dimensional numerical model of rockfall movement characteristics under earthquake is established based on the field mapping of rockfall movement traces and settling positions. The Rockfall simulation software is used to simulate the movement characteristics of rockfalls, exploring the laws and disaster impacts of rockfall movements on highway slopes under earthquake. The simulation results are consistent with the movement traces observed in previous rockfalls caused by the Wenchuan earthquake. Based on these simulation results, important reference parameters such as rockfalls stop positions, translation speed, and bouncing heights of rockfalls can be obtained, providing valuable guidance for engineering prevention and control measures for road slope rockfalls under earthquake action including earthquake.

Key words: earthquake; highway slope; rockfall; numerical simulation; motion feature

汶川特大地震直接诱发崩塌、滑坡等次生地质灾害, 致使公路受损严重, 四川境内就有近 10 条高

速公路、大量不同等级的公路干线与高山峡谷区公路遭受严重破坏。其中, 落石灾害使得国道 G213、

G350等局部区段瘫痪,给抢险救灾带来极大困难^[1]。

落石的运动特征分析是研究落石灾害被动防治工程的先决条件^[2-5]。国内外学者对落石的运动特征研究取得丰硕成果,一般将落石运动轨迹主要划分为滑动、滚动、碰撞弹跳及自由落体等4类基本运动形式及其不同组合^[6-8]。目前,落石运动特征的研究方法主要分为现场试验、理论计算、物理模拟及数值模拟等^[9]。现场试验,利用高速摄影机等先进设备,提高了落石运动轨迹、速度、碰撞、冲击等数据采集的准确性,在现场环境中研究落石运动特征,结论具有较高的参考价值^[10],但现场试验准备周期长、试验成本高、人工作业繁重。由于落石运动具有随机性,理论计算采用了较多的简化条件,致使计算结果与落石的实际运动特征差别较大^[11]。物理模拟的成本较低,且不受时间、地点限制,可研究不同的影响因素对落石运动特征的影响,有助于研究落石的一般运动规律^[9]。数值模拟方法,移植性强,越来越受科研和工程领域的重视^[12],研究落石运动特征的软件达10余种,较常用的有Stone、Georock、Rockfall、Rockfall Analyst等。

本文以剑(阁)青(川)公路斜坡落石为研究对象,建立地震作用下落石运动特征的二维数值模型,运用Rockfall软件进行落石的运动特征模拟,探究地震作用下的公路斜坡落石运动规律及致灾影响,为地震作用下公路斜坡落石的工程防治提供重要参考依据。

1 危岩区工程地质条件

危岩区出露震旦系元吉组(Zy)白云岩,呈灰黑色,块状结构,岩层产状 $300^{\circ}\sim 320^{\circ}\angle 35^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 。岩体发育2组节理(J1与J2),J1产状 $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\angle 75^{\circ}\sim 85^{\circ}$,间距3~6 m;J2产状 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}\angle 65^{\circ}\sim 75^{\circ}$,间距2~4 m。J1与J2将岩体切割成楔形体(图1)。

2 落石运动特征分析

2.1 落石运动轨迹

根据落石运动遗留痕迹,结合斜坡微地貌,将落石的主要运动轨迹划分为3条(图2)。

2.2 落石停积特征

汶川特大地震致使危岩体发生楔形破坏,总方量达 $0.55\times 10^4\text{ m}^3$,落石以巨石与大块石为主,本次对体积 $\geq 5\text{ m}^3$ 的单个块石进行不完全统计(图3),体积 $\geq 150\text{ m}^3$ 的单个块石共3块,均位于崖脚停积



图1 岩体结构特征

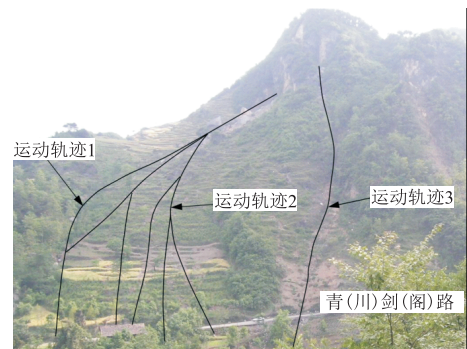


图2 落石运动轨迹

区,其中最大块石体积达 $1\ 200\text{ m}^3$,其距离崖脚平距分别为53 m、64 m及78 m。

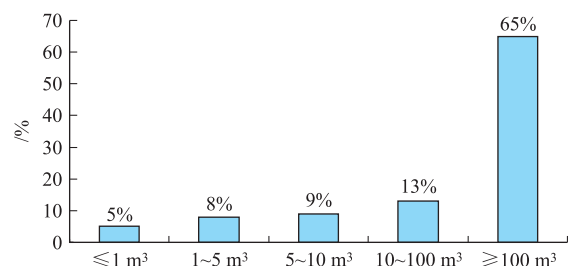


图3 不同块径的块体体积百分比

根据现场调查,落石空间停积范围主要分布在崖脚,距离崖脚150 m平距范围内落石停积量 $> 90\%$ 的落石总方量(图4),少数落石停积在斜坡中部与下部,极个别落石沿坡面运动至坡脚剑(阁)青(川)公路与居民区(图5)。

3 地震对危岩体的抛射作用

斜坡高程对地震加速度的水平向分量、竖直向分量均具有放大作用,且地震加速度在坡顶时往往急剧增大^[13-15]。水平向、竖直向的地震力共同克服岩体内部抗力及其重力等作用后,突然脱离母岩,作具有一定初始速度的斜向上的抛射运动。

取单位宽度计算,将地震力 F 分解为水平向地



图4 崖脚停积落石特征



图5 居民区停积落石

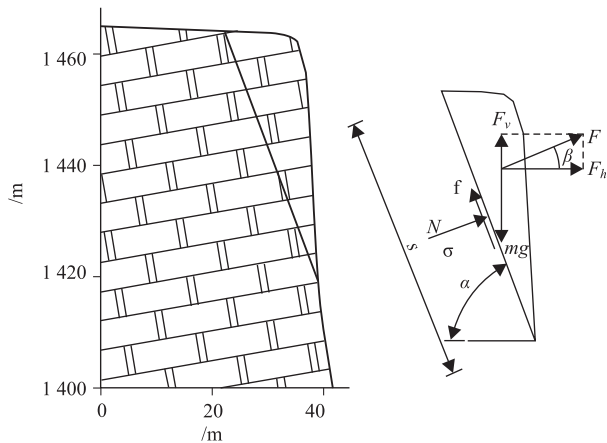


图6 地震抛射岩体的力学模型

震力 F_h 与竖直向地震力 F_v (图6), 由静力平衡可知^[15-18]:

$$N = mg \cos \alpha - F_h \sin \alpha - F_v \cos \alpha \quad (1)$$

$$f = F_h \cos \alpha - F_v \sin \alpha + mg \sin \alpha \quad (2)$$

$$f = N \tan \varphi_1 + c_1 s \quad (3)$$

式中, m 为岩体质量(kg); g 为重力加速度(m/s^2); α 为结构面倾角($^\circ$); f 为结构面的抗滑力(N); N 为结构面的法向压力(N); s 为结构面的长度(m); c_1 、

φ_1 为结构面内聚力(Pa)和内摩擦角($^\circ$)。

水平向地震加速度峰值与竖直向地震加速度峰值比值在 1.5~2.0 之间^[19-21]。假设斜坡高程对地震加速度的水平向分量与竖直向分量的放大倍数相同, 则 $F_h/F_v = 1.5 \sim 2.0$, 带入公式计算出 F_h 、 F_v , 并计算出水平向与竖直向初始地震加速度分量 α_h 、 α_v :

$$\begin{cases} \alpha_h = F_h/m \\ \alpha_v = F_v/m \end{cases} \quad (4)$$

在地震过程, 假设危岩体在地震加速度最大时 T 的 $1/4$ 时脱离母岩产生斜向上的抛射运动, 从而计算出水平向与竖向初始速度分量 v_h 、 v_v :

$$\begin{cases} v_h = \alpha_h T/4 \\ v_v = \alpha_v T/4 \end{cases} \quad (5)$$

针对汶川特大地震对危岩体的斜向上的抛射运动, 取 $F_h/F_v = 1.5$ ^[19-20], 即 $\cot \beta = 1.5$ 。单位宽度危岩体的相关参数取值如下: $v = 320 \text{ m}^3$, $p = 2.75 \text{ g/cm}^3$, $\alpha = 70^\circ$, $s = 48.5 \text{ m}$, $c_1 = 80 \text{ kPa}$, $\varphi_1 = 35^\circ$ 。

将上述参数带入公式(1)~(4), 计算出 $\alpha_h = 1.127 \text{ g}$, $\alpha_v = 751 \text{ g}$ 。根据相关资料^[21], 汶川特大地震的周期 T 主要集中在 5 s 与 20 s, 则取 $T = 5 \text{ s}$, 并假设危岩体在 $T/4$ 时, 地震加速度最大脱离母岩, 带入公式(5), 计算出斜向上的抛射运动危岩体的水平向与竖直向初始速度分量 $v_h = 11.92 \text{ m/s}$, $v_v = 7.91 \text{ m/s}$ 。

4 落石运动特征模拟

选取典型的落石运动轨迹 1, 建立二维模型, 采用 Rockfall 模拟落石运动特征。按现场调查的坡面特征, 设定各坡段运动参数的标准偏差值, 并在该参数范围内动态取值(表 1), 使得落石模拟运动特征与实际情况更加接近。

表 1 运动参数取值

坡段	法向恢复系数 e_n		切向恢复系数 e_t		摩擦角/ $^\circ$	
	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差
1	0.38	0.04	0.88	0.04	23	2
2	0.34	0.04	0.84	0.04	38	2
3	0.34	0.04	0.84	0.04	38	2
4	0.25	0.04	0.56	0.04	32	2
5	0.25	0.04	0.56	0.04	32	2
6	0.25	0.04	0.56	0.04	32	2
7	0.25	0.04	0.56	0.04	32	2
8	0.25	0.04	0.56	0.04	32	2
9	0.25	0.04	0.56	0.04	32	2
10	0.25	0.04	0.56	0.04	32	2
11	0.25	0.04	0.56	0.04	32	2
12	0.25	0.04	0.56	0.04	32	2

落石初始启动高程 1 460.0 m, 选取落石体积 10.0 m^3 , 模拟样本总数取 50 个。在地震作用 ($v_h = 11.92 \text{ m/s}$, $v_v = 7.91 \text{ m/s}$) 下, 模拟各样本的运动特征。

汶川特大地震作用致使落石具有斜向上的抛射初始速度 $v = 14.31 \text{ m/s}$, 落石着地前的速度呈现先减小后增大的发展过程, 落石与坡面碰撞前的瞬间速度达到最大 $v_{\max} = 42.35 \text{ m/s}$ 。碰撞产生的最大弹跳高度达 $H_{\max} = 11.3 \text{ m}$, 碰撞致使能量损耗巨大, 使得运动速度直线下降, 当速度降低到一定程度后, 运动方式由弹跳转化为滚动、滑动(图 7~图 9)。

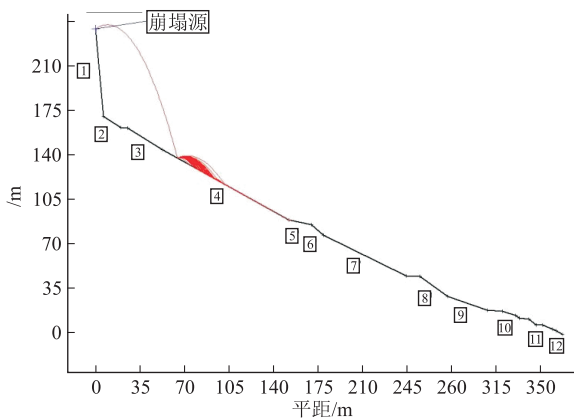


图 7 地震作用下落石的运动轨迹

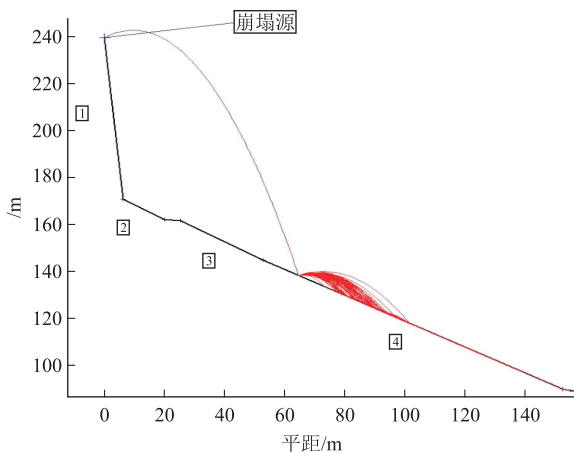


图 8 地震作用下落石的运动速度曲线

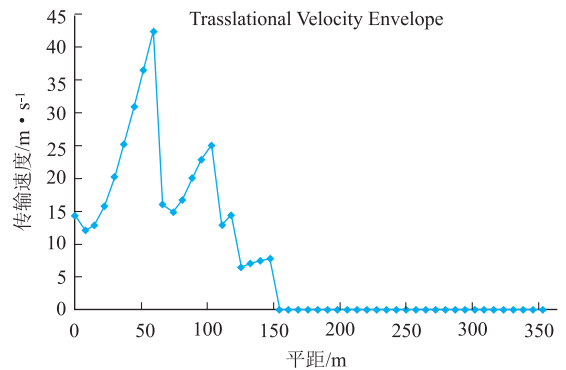


图 9 地震作用下落石的弹跳高度曲线

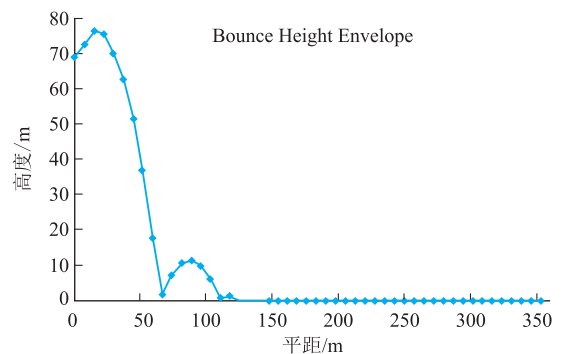


图 10 地震作用下落石的停积位置

根据数值模拟概率统计显示, 落石主要停积在距离崖脚 80~150 m 平距范围内的缓坡地带, 共 42 个, 占 84%, 其余停积在距离崖脚平距 $> 150 \text{ m}$ 范围外; 极个别落石滚动至剑(阁)青(川)公路或坡脚居民区(图 10)。因此, 在危岩体下方, 距离崖脚平距 150 m 至公路之间的缓坡地带设置被动防治工程对落石进行拦挡较合理。

通过对汶川特大地震造成的既有落石现场运动痕迹与本次落石的运动特征数值模拟成果进行对比分析, 二者吻合, 数值模拟成果基本还原落石的运动

过程, 也可预测潜在落石的运动特征。根据模拟成果获取落石停积位置、平移速度、弹跳高度等运动特征参数, 为地震作用下公路斜坡落石的被动防护工程的位置、拦挡高度及能级大小等提供了重要参考依据。

5 结论

本文以剑(阁)青(川)公路斜坡落石为研究对象, 运用 Rockfall 模拟软件对汶川特大地震造成落石的运动特征进行了数值模拟, 结果显示:

(1) 地震作用致使落石具有斜向上的抛射初始速度 $v = 14.31 \text{ m/s}$, 落石与坡面碰撞前的瞬间速度达到最大 $v_{\max} = 42.35 \text{ m/s}$ 。

(2) 落石碰撞产生的最大弹跳高度达 $H_{\max} = 11.3 \text{ m}$, 碰撞致使能量损耗巨大, 使得运动速度直线下降, 当速度降低到一定程度后, 运动方式由弹跳转化为滚动、滑动。

(3) 除极个别落石运动至剑(阁)青(川)公路或坡脚居民区外, 落石主要停积在距离崖脚 80~150 m 平距范围内的缓坡地带。因此, 在危岩体下方, 距离崖脚平距 150 m 至公路之间的缓坡地带设置被动防护网、拦石墙等拦挡措施较合理。

参考文献

- [1] 成良霞. “5.12”汶川地震后映卧公路边坡崩塌灾害形成机理与危险性评估研究[D]. 西安:长安大学, 2014.
- [2] 古贺泰之, 王天威. 落石运动轨迹预测方法的研究[J]. 铁道建筑, 1992, (7): 8-13.
- [3] 刘卫华. 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, 2008.
- [4] 黄润秋, 刘卫华. 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, 2009, 28(5): 882-891.
- [5] 王宏益. 四川省青川县麻柳沟斜坡形成演化机制及失稳运动特征[D]. 成都:成都理工大学, 2012.
- [6] Descoedres F, Zimmermann T H. Three-dimensional dynamic calculation of rockfalls [C]. The 6th international Congress on Rock Mechanics, Montreal, Canada, 1987.
- [7] Alejano L R, Pons B, Bastante F G, et al. Slope geometry design as a means for controlling rockfalls in quarries [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(6): 903-921.
- [8] 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, 25(1): 17-23.
- [9] 高常奇. 辽宁省公路边坡落石灾害发育特征及防治研究[D]. 长春:吉林大学, 2016.
- [10] 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.
- [11] 郭俊. 陡崖危岩体稳定性分析与滚石运动特性研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2013.
- [12] 万志文. 崩塌落石沿直线型斜面的运动特征室内试验研究[D]. 成都:成都理工大学, 2017.
- [13] 刘洪兵. 地震中地形放大效应的观测和研究进展[J]. 世界地震工程, 1999, 15(3): 20-25.
- [14] 徐光兴, 姚令侃, 李朝红, 等. 边坡地震动力响应规律及地震动参数影响研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 918-923.
- [15] 王运生, 徐鸿彪, 罗永红, 等. 地震高位滑坡形成条件及抛射运动程式研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11): 2360-2368.
- [16] 魏鹏, 王运生, 王福海, 等. 龙池乡高位滑坡抛射机理分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2010, 21(1): 83-91.
- [17] 李世凯. 强震作用下岩质边坡崩塌的动力响应分析[D]. 成都:成都理工大学, 2010.
- [18] 丁月双. 东河口滑坡成因机理与运动特征研究[D]. 成都:成都理工大学, 2009.
- [19] 何永林译. 在水平和竖向地震加速度综合作用下的土壤滑坡[J]. 地下空间, 1998, 18(4): 243-250.
- [20] 万卫. 汶川地震反应谱衰减关系研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所, 2013.
- [21] 殷跃平. 汶川八级地震地质灾害研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(4): 433-444.

作者简介: 王宏益(1984—), 男, 汉族, 甘肃靖远人, 水工环工程师, 博士研究生, 主要从事地质灾害的预测与防治工作、岩土工程勘察与设计。E-mail: why@cwnu.edu.cn