

滚石运动过程中关键参数的影响分析

陈宇龙

(东京大学土木工程系, 日本 东京 113-8656)

摘 要: 边坡滚石是一种常见的工程地质灾害, 滚石运动的复杂性往往与其影响因素密切相关。针对滚石从发源地到终止点之间的运动形态, 对影响滚石运动轨迹和能量转换的诸多参数进行了探讨, 通过理论比对分析, 筛选出主要的影响参数, 即边坡坡面还原系数、坡面摩擦角、坡面粗糙度、滚石自转的角速度和滚落状态 5 方面进行了系统的模型试验和数值模拟分析, 总结出了外在因素以及内部因素耦合作用下的滚石的运动形态。为进一步深入研究滚石运动奠定了基础, 为制定相应的工程防护措施提供了参考依据。

关键词: 滚石; 关键参数; 影响分析; 数值模拟; 模型试验

中图分类号: TU457 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)S2-0191-06

作者简介: 陈宇龙(1988-), 男, 四川泸州人, 博士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: 673054399@qq.com。

Influence of key factors on trajectories of rockfalls

CHEN Yu-long

(Department of Civil Engineering, the University of Tokyo, Tokyo 113-8656, Japan)

Abstract: The downslope movement of detached rock blocks along steep slopes is an important process endangering the safety of the infrastructures along the slope foot and on the valley bottom. The complexity of rockfall movement is determined by several external and internal factors. But only limited knowledge is available on the influence of various factors on the velocity and distance of movement of such blocks. The factors the kinematic properties and energy conversions of rockfalls are studied. Through theoretical comparison and analysis, the main parameters for the trajectories of the rockfalls are selected (coefficient of restitution, friction angle of slope, slope roughness, angular velocity of rotation and rolling motion) for numerical simulations and model tests. The results may help us determine the corresponding engineering protection measures.

Key words: rockfall; key parameter; influence analysis; numerical simulation; model test

0 引 言

滚石是指个别块石因某种原因从地质体表面失稳后经过下落、回弹、跳跃、滚动或滑动等运动方式中的一种或几种的组合沿着坡面向下快速运动, 最后在较平缓的地带或障碍物附近静止下来的一个动力演化过程^[1]。当滚石运动范围内有人类活动或人类构筑的设施并引起一定的损失时, 就构成了滚石灾害^[2]。

随着中国国民经济的高速发展, 尤其实施西部大开发战略后, 国家每年投入数百亿资金用于西部基础设施建设。由于西部山区特有的地形地貌等地质条件, 使得工程建设不仅难度大, 在建设过程中会遇到各种地质灾害, 而且工程投入运营后, 地质灾害事故也是频繁发生, 滚石灾害的严重性也随之突显出来^[3]。

滚石运动具有多发性、突发性、随机性, 决定了滚石运动影响因素的相关研究变得复杂。自 20 世纪五六十年代开始, 国外学者便开始进行滚石运动影响

因素方面的研究并取得了一些有价值的成果^[4-10]。国内在这方面的研究起步比较晚, 对滚石运动影响因素的探讨多限于某单一因素的试验研究^[11-12]或局部的工程防护^[13-15], 且尚未形成较为完整的体系。因此, 有必要对影响滚石运动轨迹和能量转换的诸多参数做进一步研究。

1 滚石运动的影响因素

滚石在滚落过程中一般会呈现两种运动状态: 在边坡坡面上跳跃和沿边坡坡面滚动或滑动。滚石运动状态与坡面角有关, 坡面角较大时, 则滚石主要呈跳跃状, 偶尔也有滚动; 坡面角较小时, 则呈现滚动甚至滑动状态, 呈滚动还是滑动与滚石本身的形状关系密切, 如: 近球形滚石则为滚动状态, 板状滚石则为

收稿日期: 2013-06-07

滑动状态。

通过研究滚石滚落过程的运动轨迹,可以获得滚石在不同时刻的位置、弹跳高度、着落点距坡脚的距離等信息,可为确定工程防护设施的安裝位置及其高度提供依据。研究滚石滚落过程中的能量转化,则可以获得滚石滚落过程中不同时刻的能量数据,这样可为工程防护设施的抵抗能力设计以及最佳防护位置选择提供依据。

由于滚石的滚落过程非常复杂,为了便于定量分析,在研究过程中,假定滚石为理想的、质量分布均匀的坚硬球体,因此,影响边坡滚石运动轨迹和能量转化的相关参数主要有:边坡坡面还原系数、坡面摩擦角、坡面粗糙度、滚石自转的角速度和滚落状态。下面从理论分析和数值模拟的角度来分别讨论各参数对滚石运动轨迹的影响。

1.1 边坡坡面还原系数

边坡坡面还原系数是指滚石在跳跃下落的过程中与坡面碰撞之后,其运动速度还原或者说恢复、剩余的比例系数,分为边坡坡面法向还原系数 R_N 和边坡坡面切向还原系数 R_T ,表达式分别为

$$R_N = V_{NA} / V_{NB} \quad (1)$$

$$R_T = V_{TA} / V_{TB} \quad (2)$$

式中 V_{NB} , V_{NA} 分别为滚石在当前坡面法向方向上碰撞前和碰撞后的速度; V_{TB} , V_{TA} 分别为滚石在当前坡面切向方向上碰撞前和碰撞后的速度。

由式(1)(2)可知, R_N , R_T 量纲为 1, 理论上的取值范围在 0~1.0 之间, 即

$$0 \leq R_N(R_T) \leq 1.0 \quad (3)$$

现实情况中, R_N , R_T 不可能等于 0 或 1.0, 只是因为边坡坡面和滚石之间的接触不可能呈完全非弹性和完全弹性, 所以有

$$0 < R_N(R_T) < 1 \quad (4)$$

由式(1)(2)可知, 由于 R_N , R_T 决定着滚石与坡面碰撞后的速度大小, 所以, 它们对滚石的运动轨迹和能量转化的影响是很大的。下面, 利用加拿大 Rocscience 公司的边坡滚石数值模拟软件 Rocfall 来直观地研究 R_N , R_T 对滚石运动轨迹和能量转化的影响。

为了使滚石产生较好的轨迹并便于分段研究, 假定坡面由若干直线段组成。为此, 现设定一模型边坡(为了能在室内进行模拟研究, 边坡的高度取值比较小), 如图 1, 其高度为 1.27 m, 边坡角为 45° , 坡面由 7 段直线组成。沿坡顶往下依次给 7 个线段编号, 即 a, b, c, d, e, f, g 。其中, 编号为 c 和 g 的线段呈水平状。

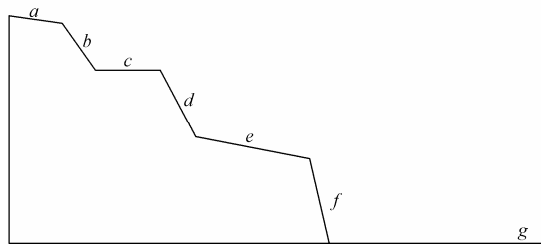


图 1 边坡模型示意图

Fig. 1 Sketch of a slope model

初始状态下这 7 段坡面的 R_N , R_T 的平均值均设定为 0.9, 标准差为 0.04 (即允许 R_N 和 R_T 的大小按正态分布的方式出现细小变化) 并将边坡坡面摩擦角和坡面粗糙度设为 0 (使滚石可以在 a 段能顺利滚落, 后面会解释, 这样可以更好地研究各参数的敏感性); 而滚石的初始条件假设为: 质量 10.0 kg, 初速为 0.0 m/s, 置于坡顶能自由滚落。

为了使模拟实验结果可靠, 按照这样的初始条件, 重复进行了 50 次滚石模拟试验 (每次模拟互不影响), 滚石的运动轨迹如图 2。从图 2 可见, 滚石与各个坡面碰撞后的速度降低或者说能量损失都比较小, 滚石每次碰撞后法向弹起的高度和切向的运动速度都无明显减小。

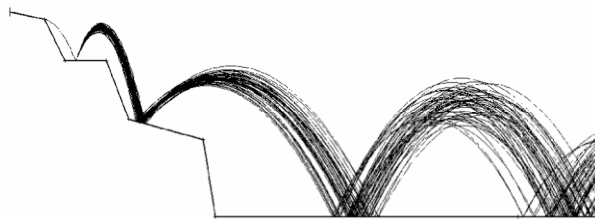


图 2 边坡滚石滚落模拟轨迹

Fig. 2 Simulative trajectories of rockfalls

为此, 选择 c 段坡面作为代表进行重点分析。调整 c 段的坡面法向还原系数 R_N 和切向还原系数 R_T , 其它参数不变, 再重复进行 50 次滚石模拟。1 组的 R_N 和 R_T 分别为 0.5 和 0.9。2 组的 R_N 和 R_T 分别为 0.9 和 0.5。结果如图 3, 4 所示。

对比图 2, 3 的滚石运动轨迹, 当其它参数不变, c 段的 R_N 值降低到 0.5 时, 滚石与 c 段坡面碰撞后, 在坡面法向方向上的弹起高度会明显降低。

对比图 2, 4, 同样, 当其它参数不变, c 段的 R_T 值降为 0.5 时, 则滚石与 c 坡面碰撞后, 在坡面切向方向上的运动距离会明显减小。

从上面的模拟结果可以很直观地得出: R_N , R_T 不仅影响滚石与坡面碰撞后的速度的大小, 而且是影响边坡滚石运动轨迹和能量变化的重要参数。

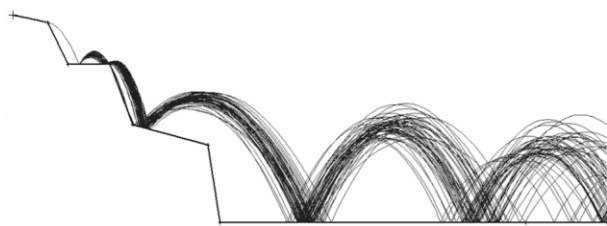


图 3 第 1 组边坡滚石模拟轨迹

Fig. 3 Simulative trajectories of 1st group of rockfalls

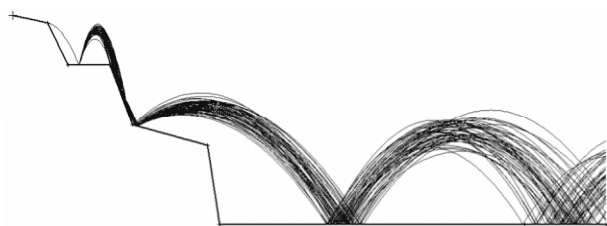


图 4 第 2 组边坡滚石模拟轨迹

Fig. 4 Simulative trajectories of 2nd group of rockfalls

1.2 边坡坡面法向还原系数的特性

已有研究成果表明, 边坡坡面法向还原系数 R_N 的大小主要由构成边坡的材料决定。一般硬质岩质坡面的 R_N 比土质边坡的 R_N 要大。但边坡坡面法向还原系数 R_N 并非定值, 即在同一坡面上 R_N 的值还与滚石的质量、岩性、滚动速度、形状、碰撞前入射角度等^[16-17]有关, 也就是说与滚石的能量大小及其对坡面作用力大小有关系。

例如, 一个滚石分别以低速和高速滚落到同一土质坡面上, 针对该土质边坡坡面上的 R_N 是不相同的, 如果滚石的速度达到一定程度后, 滚石不仅不会弹起, 而有可能会嵌入坡面土体中。这也就是为什么可以用松软的土体来防护边坡滚石的原理。

Pfeiffer 等^[18]经过试验研究, 给出了一个 R_N 的折减比例系数 S_f (scaling factor), 具体的计算公式为

$$S_f = \frac{1}{1 + \frac{V_{NB}}{K}}, \quad (5)$$

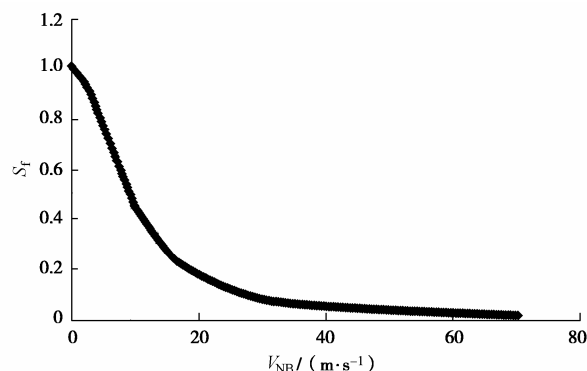
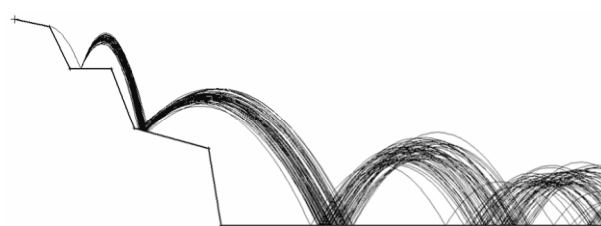
式中, K 为常量, 其数值为 9.144 m/s。 S_f 和 V_{NB} 的关系见图 5^[19]。

这样, 考虑 S_f 后的坡面法向还原系数 R_{NS} 的计算式为

$$R_{NS}(\text{scaled}) = R_N S_f. \quad (6)$$

那么, 考虑 S_f 后的滚石滚落运动轨迹如图 6。

对比图 2 和图 6 (其余各参数相同), 则可以看出, 在考虑了 S_f 以后, 滚石的运动轨迹发生了变化, 滚石每次的落地点统一向靠近坡脚的方向移动, 特别是当滚石速度比较大时 (如与 g 坡面碰撞后), 滚石的弹起高度会降低, 说明滚石与坡面碰撞后速度减小了。

图 5 S_f 与 V_{NB} 关系曲线Fig. 5 Relationship curve between S_f and V_{NB} 图 6 考虑 S_f 后的滚石模拟轨迹Fig. 6 Simulative trajectories of rockfalls considering S_f

1.3 边坡坡面摩擦角

边坡坡面摩擦角 φ (friction angle) 是滚石与边坡坡面之间的动摩擦系数反正切值。滚石在滚落过程中与坡面产生摩擦时, 它会对滚石的运动产生影响。当滚石沿坡面滚动或滑动下落时, 边坡坡面摩擦角决定了滚石能量损失的大小。若滚石主要是跳跃下落时, 边坡坡面摩擦角的影响力度就比较小, 甚至可以忽略。

另外, 边坡坡面摩擦角 φ 对滚石运动的影响还与坡面角 θ 的大小有关系。滚石在坡面上滚动时的受力分析如图 7。

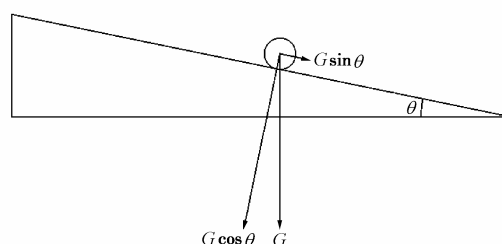


图 7 滚石在坡面上的滚动示意图

Fig. 7 Sketch of a rockfall rolling down slope

如图 1 中的 a 段坡面, 假定其坡面角 θ 为 12° , 如果滚石在该坡面匀速运动, 则有

$$G \cos \theta \tan \varphi = G \sin \theta. \quad (7)$$

这样, $\varphi = \theta$, 当 $\varphi < \theta$ 时, 滚石受到的下滑力大于阻力, 它就一直在坡面上做加速向下运动, 且动能随之增大; 当 $\varphi > \theta$ 时, 滚石受到的阻力大于下滑力,

它就会减速,直至停止。

所以在前面的模拟计算中(图2),均假设 a 坡面的坡面摩擦角为 0 ,主要是为了让滚石能顺利滚下并产生较好的运动轨迹。下面改变 a 坡面的坡面摩擦角,研究其滚石运动的影响,当然,其它参数与图2中各初始参数数值相同。

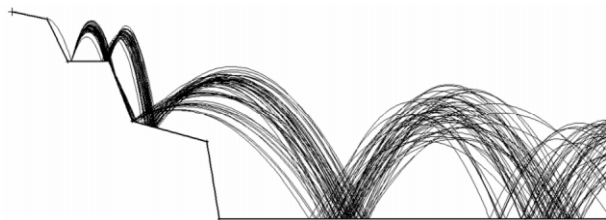


图8 a 段坡面摩擦角为 5° 时滚石轨迹

Fig. 8 Trajectories of segment a with of rockfalls friction angle of 5°

如图8所示,当 a 坡面的坡面摩擦角为 5° 时,滚石从 a 坡面滚落后,由于受到摩擦力的作用,其速度降低了许多,运动轨迹亦发生了比较明显变化。如果把 a 坡面的坡面摩擦角设为 12° 时,当滚石的初速为 0 ,则滚石静止不动,不会滚下。

从上面的研究结果,可以发现,坡面摩擦角在滚石运动过程中对滚石速度和能量的影响亦是很大的。

1.4 边坡坡面粗糙度

边坡坡面粗糙度指坡面具有的较小间距和微小峰谷不平程度,亦是边坡坡面固有的属性。滚石的运动速度和运动位移与坡面的粗糙度成负相关,即坡面越粗糙,则滚石在坡面上滚动(或滑动)受到的阻力就越大,滚石的运动轨迹和能量转换就会更显著,坡面粗糙度对滚石运动的影响与坡面摩擦角相近。

但边坡坡面粗糙度还与滚石几何尺寸有关。如图9,对于同一个坡面,图9(a)中的滚石受到坡面粗糙度的影响显然要比图9(b)中的滚石的大许多。

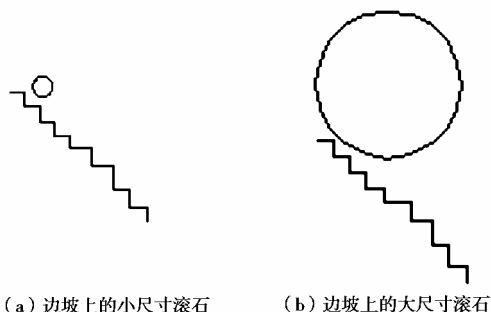


图9 坡面粗糙度对不同大小滚石的影响

Fig. 9 Influence of slope roughness on rockfalls with different sizes

1.5 滚石自转角速度影响分析

滚石在滚落过程中与坡面产生碰撞,自身必然会

产生转动。因此,在研究滚石运动中应该考虑滚石自转对滚石的运动轨迹和能量转化的影响,这样使研究成果更接近实际情况。

图10显示了考虑滚石角速度和不考虑角速度滚石运动轨迹上的差异^[18],从图10中可以看出,考虑滚石角速度后,滚石弹跳得更远,说明滚石角速度对于滚石运动轨迹和以及能量转换有影响。图11显示了按照图2所做的滚石滚落全程中的动能变化情况。从图11中可以看出,滚石总动能的变化趋势(图11(a))与滚石平移动能的变化趋势(图11(b))基本一致,数值也比较接近。而滚石滚落全程的转动动能变化分段明显,当达到最大值时则处于平稳阶段,与运行距离无关。不过,滚石转动动能在滚石滚落过程中所占的份额比较小,不到总动能的10%。

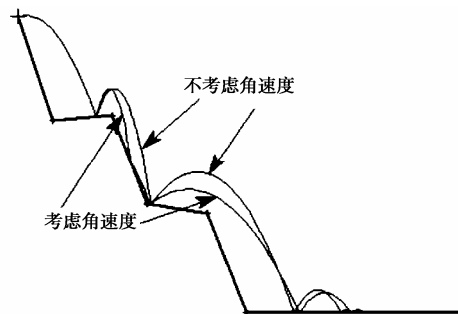


图10 考虑滚石自转的滚石模拟轨迹示意图

Fig. 10 Sketch of trajectories considering rotation of rockfalls

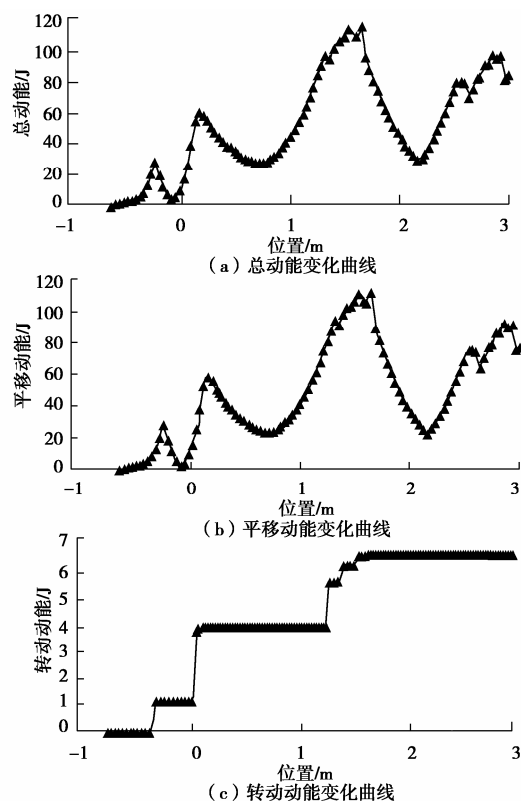


图11 滚石滚落全程总动能变化与自转动动能变化情况

Fig. 11 Kinetic energy and rotational kinetic energy of rockfalls

当然,实际情况中,影响滚石自转角速度的因素比较多,如:坡面材料、坡面角、坡面形态、滚石形态、滚石入射角、滚石和坡面接触位置等。由于其能量在总的能量中所占的份额比较小,所以一般可以忽略,这样对于防护设施的设计应该更偏于安全。

1.6 滚石滚落状态

对于非近圆形的滚石而言,其滚落状态对它的运动亦有较大的影响。如图 12,同一块梭型滚石,图 12 (a)表示尖端朝下,由于其尖端朝向滚落方向,故其没有向下倾倒的趋势,不会沿坡面滚动下落,而是沿坡面滑动,又因为物体运动过程中受到的滑动摩擦力大于滚动摩擦力,所以其滚落速度肯定比右图滚落状态小,甚至有可能无法滚下。所以在研究实际问题时,应予以考虑。

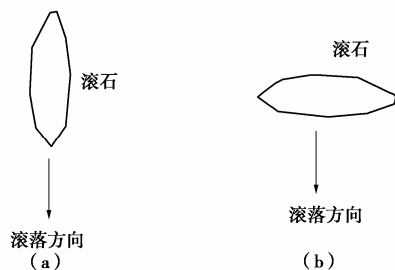


图 12 滚石滚落状态俯视图

Fig. 12 Planform of rockfalls

2 结 论

(1) 边坡坡面还原系数(边坡坡面法向还原系数 R_N 和边坡坡面切向还原系数 R_T)的大小不仅决定了滚石弹跳高度和弹射距离,同时也影响到滚石能量的转换与损耗,所以,显得尤为重要。因此,在滚石防护设计中应该特别注意。

(2) 边坡坡面摩擦角对于滚石在滚动和滑动阶段的运动轨迹和能量转化起着重要的作用,也应特别注意。

(3) 边坡粗糙度越小越利于滚石运动,其运动的速度和距离就越大;相反表面粗糙度越大速度和运动的位移越小。但边坡坡面粗糙度还与滚石几何尺寸有关。

(4) 滚石自转角速度对于滚石运动轨迹和以及能量转换有影响,但可以忽略。

(5) 滚落状态对于非近圆形的滚石的运动有较大的影响。

(6) 当然,在边坡滚石的实际防护中,存在滚石只沿着边坡坡面滚动或者滑动的现象,针对这一类滚石,则可根据现场试验来确定滚石的整个运动过程和相关参数。

参考文献:

- [1] MANGWANDI C, CHEONG Y S, ADAMS M J, et al. The coefficient of restitution of different representative types of granules[J]. Chemical Engineering Science, 2007, **62**(2): 437 – 450.
- [2] LUUK K, DORREN A. A review of rockfall mechanics and modelling approach[J]. Progress in Physical Geography, 2003, **27**(1): 69 – 87.
- [3] 朱 彬. 岩质边坡滚石运动特性及防护研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010. (ZHU Bin. Study on motion characteristic and protection of rockfalls on rock slope[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010. (in Chinese))
- [4] AZZON A, GLA Barbera, ZANINETTI A. Analysis and predicting of rockfalls using a mathematical model[J]. Journal of Rock Mechanics Science & Geomechanical Abstract, 1995, **32**(7): 709 – 724.
- [5] DUSSAUGE Peisser C, HELMSTETTER A, GRASSO J R, et al. Probabilistic approach to rock fall hazard assessment: potential of historical data analysis[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2002(2): 15 – 26.
- [6] JABOYEDOFF M, LABIOUSE V. Preliminary assessment of rockfall hazard based on GIS data[C]// ISRM 2003 Technology Roadmap for Rock Mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003: 575 – 578.
- [7] NORIKAZU Mat suoka, HIROAKI Sakai. Activity from an alpine cliff during thawing periods[J]. Geomorphology, 1999, **28**: 309 – 328.
- [8] 张路青, 杨志法, 许 兵. 滚石与滚石灾害[J]. 工程地质学报, 2004, **12**(3): 226 – 231. (ZHANG Lu-qing, YANG Zhi-fa, XU Bing. Rockfalls and rockfall hazards[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, **12**(3): 226 – 231. (in Chinese))
- [9] 黄润秋, 刘卫华. 滚石在平台上的运动特征分析[J]. 地球科学进展, 2008, **23**(5): 517 – 523. (HUANG Run-qiu, LIU Wei-hua. Study on the movement characteristics of rolling rock blocks on platform[J]. Advances in Earth Science, 2008, **23**(5): 517 – 523. (in Chinese))
- [10] HUANG Run-qiu, LIU Wei-hua, ZHOU Jiang-ping, et al. Experimental field study of movement characteristics of rock blocks falling down a slope[J]. Journal of Earth Science, 2010, **21**(3): 330 – 339.
- [11] 王坛华, 陈剑平, 安鹏程. 边坡滚石灾害的作用机理与防治对策[J]. 世界地质, 2008, **27**(1): 68 – 72. (WANG Tan-hua, CHEN Jian-ping, AN Peng-cheng. Mechanism of action and prevention methods of slope rock fall hazard[J]. Global

- Geology, 2008, **27**(1): 68 – 72. (in Chinese))
- [12] 赵旭, 刘汉东. 水电站高边坡滚石防护计算研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(20): 3742 – 3748. (ZHAO Xu, LIU Han-dong. Research on protective structures for high slopes rockfall around a hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(20): 3742 – 3748. (in Chinese))
- [13] 陈敬刚, 李爱兵. 铜山口露天采场东帮滚石灾害与预防措施[J]. 采矿技术, 2007, **7**(4): 21 – 24. (CHEN Jing-gang, LI Ai-bing. rockfall disaster and preventive measures in east of Tongshankou open-pit[J]. Mining Technology, 2007, **7**(4): 21 – 24. (in Chinese))
- [14] 刘永平, 佘磊, 李广杰. 某高陡边坡崩塌落石运动特征分析及其防治[J]. 水文地质工程地质, 2005(1): 30 – 33. (LIU Yong-ping, NAI Lei, LI Guang-jie. Falling rock movement characteristic and reinforcement measures of a high steep slope[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005(1): 30 – 33. (in Chinese))
- [15] 林育玄. 坡面回弹系数及粗糙性于单粒落石运动轨迹之影响[D]. 台湾: 私立中原大学, 2002. (LIN Yu-xuan. Influence of coefficient of restitution and roughness of slope on trajectories of the single rockfall[D]. Taiwan: Chung Yuan Christian University, 2002. (in Chinese))
- [16] PICHLER B, HELLMICH C H, MANG H A. Impact of rocks onto gravel design and evaluation of experiments[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, **31**(4): 559 – 578. (in Chinese))
- [17] 何思明, 吴永, 杨雪莲. 滚石坡面冲击回弹规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(1): 2793 – 2798. (HE Si-ming, WU Yong, YANG Xue-lian. Study of rock-fall motion on slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(1): 2793 – 2798. (in Chinese))
- [18] PFEIFFER T J, BOWEN T D. Computer simulation of rockfalls[J]. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 1989, **25**(1): 135 – 146.
- [19] Warren Douglas Stevens. Rocfall: A tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls[D]. Toronto: University of Toronto, 1998.

(本文责编 孙振远)