

文章编号:1001-8166(2008)05-0517-07

# 滚石在平台上的运动特征分析\*

黄润秋,刘卫华

(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)

**摘要:**平台对危岩体失稳后运动有很好的减速拦阻作用,是危岩体防治的有效措施。采用运动学和力学的方法推导了滚石与平台碰撞过程的速度计算公式;探讨了滚石在平台上运动的水平距离的计算方法;在此基础上通过现场滚石试验,分析了滚石形状对滚动摩擦系数的影响。结果表明:滚石与平台碰撞后的速度可由法向恢复系数、切向恢复系数和碰撞前滚石的运动速度确定;滚石在平台上运动的水平距离由第一次碰撞前在平台上飞跃的水平距离、两次碰撞之间水平距离和碰撞结束后滚动的距离3部分组成,其值可通过运动学分析确定,法向恢复系数、切向恢复系数和滚动摩擦系数是计算滚石在平台运动水平位移的重要参数;滚石与表面为块碎石的平台的滚动摩擦系数的值在0.19~1.05之间,按长条形、方形、球形和薄片状的顺序逐渐减小,滚石形状与表面为块碎石的平台之间滚动摩擦系数呈良好的直线关系。所得成果为将平台作为危岩体防治对策时确定平台的宽度提供理论依据,对危岩体与落石的防治有指导意义。

**关键词:**危岩体;滚石;平台;运动距离;现场试验;滚动摩擦系数

**中图分类号:**P694;TD854.6 **文献标志码:**A

## 1 前言

危岩体(potential unstable rock mass)是指陡峭边坡上被多组结构面切割,在重力、风化营力、地震和渗透压力等外力作用下可能与母岩分离而坠落失稳的岩石块体<sup>[1~3]</sup>。当危岩体与母岩彻底分离,以某种形式向坡下运动时则称为“滚石”<sup>[4]</sup>。滚石对其前方的建(构)筑物会造成很大的危害,必须采取有效措施进行防治。目前,滚石常用防治措施有:以锚固、清除和支撑为主的主动防护措施,以拦石墙(堤、栅栏)、被动柔性防护为主的被动防护措施。这些措施从技术上来看都是可行的,但一般造价都比较高。近年来,我们做了大量的现场滚石运动试验,发现设置“减速平台”对滚石的运动有显著的阻止作用。但减速平台的设计需要对滚石在平台上的

运动规律做深入的研究。本文在对滚石在平台上运动过程进行深入分析的基础上,通过现场滚石试验对理论分析成果进行了试验验证,建立了滚石在平台上运动的水平距离计算方法。从而为减速平台的设计提供了重要的理论依据,也为危岩体的防治找到了一种有效、经济的措施。

## 2 滚石与平台碰撞过程分析

滚石沿坡面运动一段距离后,将以一定的速度落入平台,与平台发生相互作用,这种作用主要表现为碰撞弹跳。碰撞弹跳是滚石运动过程中最复杂、最不确定的一种运动,受平台表面的性质、滚石碰撞时的入射角、滚石质量和入射速度等诸多因素的影响,碰撞可能是近乎完全弹性碰撞,也可能是完全的非弹性碰撞。因此,这个过程的分析是十分困难的,

\* 收稿日期:2008-04-12;修回日期:2008-04-17.

\* 基金项目:国家自然科学基金雅砻江水电开发联合研究基金重点项目“雅砻江流域高边坡发育的动力过程及其工程适宜性评价”(编号:50539050)资助.

作者简介:黄润秋(1963-),男,湖南长沙人,教授,博士,博士生导师,主要从事地质工程和岩土工程教学科研工作.

E-mail:hrq@cdu.edu.cn

需要进行一定的简化和假设。目前,研究这个过程的主要方法是恢复系数法,假定滚石的碰撞问题为刚体碰撞,通过恢复系数来考虑碰撞过程中的动能损失,从而将问题简化。本文也采用这一基本思路对滚石在平台上的运动过程进行分析。

危岩失稳后从陡坡落入平台,与平台发生的碰撞属于非弹性碰撞(图 1),在这一碰撞过程中,根据滚石在边坡上的运动过程,确定滚石碰撞的入射速度  $V_0$ ,这里设为已知的,其水平和竖直分量分别为  $V_{0h}$  和  $V_{0v}$ ,相对于平台的切向和法向分量分别是  $V_{0t}$  和  $V_{0n}$ ;碰撞后速度的水平和竖直分量分别为  $V_{1h}$  和  $V_{1v}$ ,切向和法向分量分别是  $V_{1t}$  和  $V_{1n}$ 。

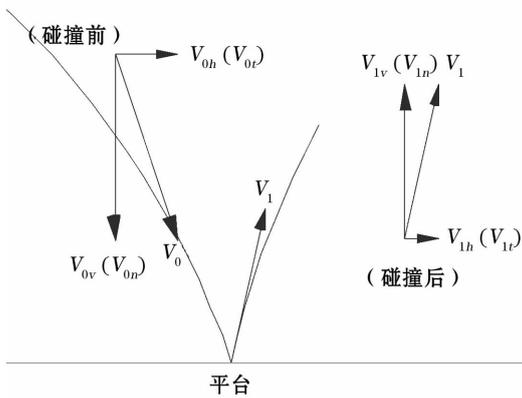


图 1 滚石与平台碰撞弹跳示意图

Fig. 1 Impact and bouncing of rock block and platform

由于平台与水平方向的夹角为  $0^\circ$ ,因此有:

$$\begin{aligned} V_{0h} &= V_{0t} & V_{0v} &= V_{0n} \\ V_{1h} &= V_{1t} & V_{1v} &= V_{1n} \end{aligned}$$

碰撞过程中部分动能转化为其它形式的能量,使得速度降低,并且这个过程包含极为复杂的非线性变形,影响因素也很多,准确地分析是十分困难的。为了解决这个问题,这里采用恢复系数来考虑碰撞过程的动能损失,恢复系数是指在碰撞过程中某一物理量的恢复程度<sup>[5]</sup>,这里采用法向恢复系数  $R_{1n}$  和切向恢复系数  $R_{1t}$  来表征,即定义:

$$R_{1n} = \frac{V_{1n}}{V_{0n}} \quad R_{1t} = \frac{V_{1t}}{V_{0t}} \quad (1)$$

因此,有:

$$\begin{aligned} V_{1n} &= V_{1v} = R_{1n} V_{0n} \\ V_{1t} &= V_{1h} = R_{1t} V_{0t} \end{aligned} \quad (2)$$

碰撞后,滚石在平台继续运动,切向分量为  $V_{1n}$  (水平分量  $V_{1h}$ ) 保持不变,法向分量(竖直分量)以加速度  $-g$  减小,当其减为零时滚石达到最高处;然

后切向分量为  $V_{1t}$  (水平分量  $V_{1h}$ ) 仍保持不变,法向分量(竖直分量)以加速度  $g$  增加,其大小增到  $V_{1n}$  ( $V_{1v}$ ) 时,与平台发生第二次碰撞。设第二次碰撞后,滚石速度的切向分量为  $V_{2t}$  (水平分量  $V_{2h}$ ),法向分量  $V_{2n}$  (竖直分量  $V_{2v}$ )。同时定义第二次碰撞过程的法向恢复系数和切向恢复系数分别为  $R_{2n}$  和  $R_{2t}$ ,从而有:

$$\begin{aligned} V_{2n} &= V_{2v} = R_{2n} V_{1n} \\ V_{2t} &= V_{2h} = R_{2t} V_{1t} \end{aligned} \quad (3)$$

将(2)式代入(3)式,得:

$$\begin{aligned} V_{2n} &= V_{2v} = R_{2n} R_{1n} V_{0n} \\ V_{2t} &= V_{2h} = R_{2t} R_{1t} V_{0t} \end{aligned} \quad (4)$$

对于同一滚石而言,每次碰撞的切向恢复系数和法向恢复系数是相同的,因此有:

$$\begin{aligned} V_{2n} &= V_{2v} = R_{2n} R_{1n} V_{0n} = R_{1n}^2 V_{0n} \\ V_{2t} &= V_{2h} = R_{2t} R_{1t} V_{0t} = R_{1t}^2 V_{0t} \end{aligned} \quad (5)$$

依次类推,滚石与平台碰撞  $m$  次时,速度的法向分量  $V_{mn}$  (水平分量  $V_{mv}$ ),切向分量  $V_{mt}$  (竖直分量  $V_{mh}$ ) 为:

$$\begin{aligned} V_{mn} &= V_{mv} = R_{mn} R_{(m-1)n} \cdots R_{2n} R_{1n} V_{0n} = R_{1n}^m V_{0n} \\ V_{mt} &= V_{mh} = R_{mt} R_{(m-1)t} \cdots R_{2t} R_{1t} V_{0t} = R_{1t}^m V_{0t} \end{aligned} \quad (6)$$

从(2)~(6)式可以看出,滚石碰撞恢复系数  $R_{1n}$  和  $R_{1t}$  是正确估算滚石在平台运动轨迹的两个重要的参数。这两个参数与平台表面岩土体的力学性质、滚石自身的大小、形状等因素有关。相关研究成果表明:平台覆盖土越松散,碰撞就越趋向完全非弹性碰撞,相应的法向和切向恢复系数就越小,相反,平台出露的基岩越硬,碰撞就越趋向弹性碰撞,相应的法向和切向恢复系数就越大<sup>[6]</sup>。胡厚田等<sup>[7]</sup> 研究认为,考虑瞬间摩擦的作用,切向分量为  $V_{1t}$  (水平分量  $V_{1h}$ ) 其损失率为 10%,即切向恢复系数  $R_{1t}$  的值为 0.9;唐红梅<sup>[8]</sup> 认为法向恢复系数可由表 1 确定。铁道部运输局也推荐了法向和切向恢复系数的取值方法,如表 2 和表 3 所列。

表 1 推荐的法向恢复系数<sup>[8]</sup>

Table 1 Recommendatory normal restitution coefficient<sup>[8]</sup>

顺序	平台表层覆盖物的情况	法向恢复系数
1	基岩外露	0.7
2	密实的岩块堆积层	0.5
3	长有草皮的光滑坡面	0.3
4	松散的坡积层,堆积层等	0.3
5	基岩埋藏不深( $\leq 0.5$ m)的山坡	0.5

需要补充说明,滚石在碰撞后存在着滚动动能。

定义  $\beta = E_r/E_t$ ; 其中  $E_r$  为滚石的滚动动能,  $E_t$  为滚石的平动动能,  $\beta$  称为滚石滚动动能与平动动能的比例因子。在理论上很难给出  $\beta$  值的准确解答, 一般都是按照经验来取值。日本公路协会 (JRA) 在近 60 个现场试验的基础上, 建议滚石的滚动动能取为平动能 0.1, 即取  $\beta = 0.1$ 。铁道部运输局建议用取  $\beta = 0.2$  来估算滚石的滚动动能<sup>[9]</sup>。

表2 法向恢复系数2(据铁道部运输局)

Table 2 Normal restitution coefficient (transport Department of the Ministry of Railways)

平台表面特征	法向恢复系数
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
多数为基岩和砾岩	0.33 ~ 0.37
硬土	0.30 ~ 0.33
软土	0.28 ~ 0.30

表3 切向恢复系数(据铁道部运输局)

Table 3 Tangential restitution coefficient (transport Department of the Ministry of Railways)

平台表面特征	切向恢复系数
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
多数为基岩和无植被覆盖	0.83 ~ 0.87
多数为有少量植被	0.82 ~ 0.85
植被覆盖的斜坡和有稀少植被覆盖的土质	0.80 ~ 0.83
灌木林覆盖的土质	0.78 ~ 0.82

### 3 滚石在平台运动的水平距离分析

定义滚石在平台上运动为其在平台表面以及平台竖直方向空间范围内运动的所有过程。因此滚石在平台上运动的水平距离首先包括滚石与平台第一次碰撞前滚石在平台上空跳跃的水平距离。同时, 滚石在两次碰撞之间也存在水平距离。从上一节的分析可以看出, 切向恢复系数  $R_{tr}$  为法向恢复系数  $R_{tn}$  的 2 ~ 3 倍, 法向恢复系数一般在 0.3 ~ 0.4 之间, 滚石与平台碰撞 6 次之后, 速度的竖直分量仅为第一次碰撞前的 0.07% ~ 0.4%, 可以忽略不计。此时, 速度的水平分量为第一次碰撞前的 20% ~ 50%, 这是一个比较大的值。此时, 滚石近似于在平台滚动, 受平台表面阻力作用, 速度逐渐减小, 直至停止运动, 这个过程滚石也要在平台上运动一段距离。因此, 在一般情况下, 滚石在平台上运动的水平距离由这 3 部分组成, 即第一次碰撞前在平台上飞跃的水平距离、两次碰撞之间水平位移和碰撞结束

后滚动的距离 3 部分组成。要分析滚石在平台的停留位置 (水平距离), 就应分别分析这 3 部分。

#### 3.1 第一次碰撞前在平台上运动的水平距离分析

滚石在边坡上运动, 到达距平台一定位置, 边坡坡度发生变化, 或者边坡上出现突出坡表的岩体、土坎等, 滚石的运动状态改变, 速度出现垂直于坡面的法向分量, 滚石发生跳跃, 在空中跳行一段距离。如果在空中的这段时间内, 位移的水平分量大于该位置到平台与边坡交线的水平方向的长度时, 滚石落入平台内, 与平台第一次碰撞。碰撞点到平台与边坡交线的距离就是滚石第一次碰撞前在平台上的水平位移 (图 2)。因此有:

$$S_0 = S' - S'_0 \quad (7)$$

式中,  $S_0$  为滚石第一次碰撞前在平台上运动的水平距离;  $S'$  为滚石跳向平台过程总的水平距离;  $S'_0$  为滚石起跳点到坡脚的水平距离。

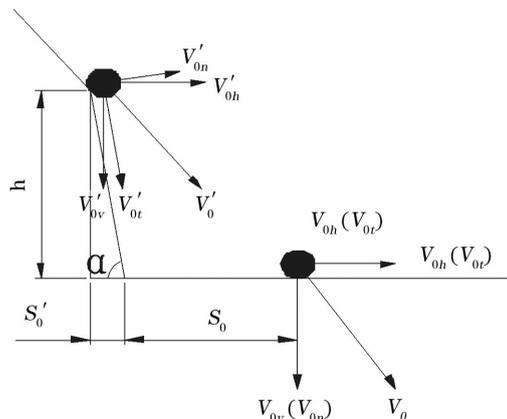


图2 第一次碰撞前在平台上位移分析

Fig. 2 The distance analyzed on the platform before the first impact

$S'$  可以由下式计算:

$$S' = V'_{oh}t \quad (8)$$

式中,  $V'_{oh}$  为起跳时速度的水平分量,  $V'_{oh} = V'_0 \cos\beta$ 。  $V'_0$  为起跳时的速度, 其大小可以采用经验公式或运动学公式进行计算; 滚石起跳前的运动状态一般为滚动或者滑动, 因此可以认为  $V'_0$  的方向与坡向相同。  $\beta$  为起跳时滚石所在坡段的坡角。

$t$  为滚石从起跳到与平台第一次碰撞运动的时间。取决于起跳点距离平台的高度  $h$ 、滚石起跳时速度的竖直分量  $V'_{or}$ 。三者之间有如下关系:

$$h = V'_{or}t + \frac{1}{2}gt^2$$

从而:

$$t = \frac{\sqrt{V'_{0v}{}^2 + 2gh} - V'_{0v}}{g} \quad (9)$$

这里,  $g$  为重力加速度,  $V'_{0v} = V'_0 \sin\beta$ 。

将(9)式代入(8)式可得:

$$S' = V'_0 \cos\beta \cdot \frac{\sqrt{V'_{0v}{}^2 \sin^2\beta + 2gh} - V'_0 \sin\beta}{g} \quad (10)$$

$S'_0$  可由(6)~(11)式计算:

$$S'_0 = h/\tan\alpha \quad (11)$$

式中:  $\alpha$  为滚石跳跃段的坡角。

将(10)式和(11)式代入(7)式, 可得到第一次碰撞前, 滚石在平台上的水平距离为:

$$S_0 = V'_0 \cos\beta \cdot \frac{\sqrt{V'_{0v}{}^2 \sin^2\beta + 2gh} - V'_0 \sin\beta}{g} - h/\tan\alpha \quad (12)$$

显然, 第一次碰撞前, 滚石在平台上的水平运动距离大小取决于滚石在边坡上起跳时刻初始速度、起跳点所在段的坡角、起跳点距平台的高度和跳跃段的坡角。需要特别指出, 只有当:

$$V'_0 \cos\beta \cdot \frac{\sqrt{V'_{0v}{}^2 \sin^2\beta + 2gh} - V'_0 \sin\beta}{g} \geq h/\tan\alpha \text{ 时,}$$

滚石才能在该次跳跃后进入平台, 如果不能满足, 滚石还将落在边坡上, 与边坡相互作用, 再次跳跃、滚动或者其它形式进入边坡。这时, 需要对滚石与边坡相互作用的运动状态进行分析, 如果是再次跳跃, 仍按(12)式分析第一次碰撞前, 滚石在平台上的水平位移。而发展为滚动或者滑动等形式进入平台, 那么  $S_0 = 0$ 。

由于第一次碰撞前, 滚石在平台上的水平运动距离与起跳点关系密切, 因此起跳点的确定就显得十分重要。众多试验研究表明, 滚石在边坡上运动, 运动状态从滚动、滑动发展为跳跃绝大部分出现在坡角发生变化的部位(突出坡表的岩土体也可以认为是坡角发生变化)。因此, 在进行平台设计, 计算第一次碰撞前滚石在平台上的水平运动距离时, 要特别注意调查距平台较近的坡角变化位置, 将其作为滚石可能跳跃点进行分析, 从而计算出  $S_0$ 。另外, 进行以平台为主要措施的危岩体防治设计时, 还可以设计平整离平台较近的坡面, 避免岩土体突出坡面, 减小滚石在平台上运动的水平距离, 从而减小平台宽度, 降低防治费用。

### 3.2 滚石在两次碰撞之间的水平运动距离

前面的分析已经得到碰撞前后滚石的运动速度的计算方法, 以此为基础来分析滚石在2次碰撞之

间的水平运动距离(图2)。

第一次碰撞与第二次碰撞之间的水平距离  $s_1$ , 可由下式计算:

$$s_1 = V_{1h} t_1 \quad (13)$$

$t_1$  为第一次碰撞与第二次碰撞之间, 滚石运动的时间, 与第一次碰撞后速度的竖向分量  $V_{1v}$  有关, 即:

$$t_1 = \frac{2V_{1v}}{g} \quad (14)$$

将(14)式、(2)式代入(13)式可得:

$$s_1 = \frac{2R_{1l} R_{1n} V_{0h} V_{0v}}{g} \quad (15)$$

同样地, 第2次碰撞与第3次碰撞之间的水平距离  $s_2$  为:

$$s_2 = \frac{2V_{2h} V_{2v}}{g} = \frac{2R_{1l}^2 R_{1n}^2 V_{0h} V_{0v}}{g} \quad (16)$$

依次类推, 第  $m$  次与第  $(m+1)$  碰撞之间的水平距离  $s_m$  为:

$$s_m = \frac{2V_{mh} V_{mv}}{g} = \frac{2R_{1l}^m R_{1n}^m V_{0h} V_{0v}}{g} \quad (17)$$

因此, 2次碰撞之间, 滚石总的水平运动距离  $S_1$  为:

$$S_1 = s_1 + s_2 + \dots + s_{m-1} + s_m = \frac{2V_{0h} V_{0v}}{g} \sum_{i=1}^m R_{1l}^i R_{1n}^i \\ = \frac{2V_{0h} V_{0v} R_{1l} R_{1n} (1 - (R_{1l} R_{1n})^m)}{g(1 - R_{1l} R_{1n})} \quad (18)$$

### 3.3 滚石在平台滚动的距离分析

由于碰撞过程的切向恢复系数远大于法向恢复系数, 滚石与平台发生多次碰撞后, 滚石的竖直方向的速度分量几乎降为零时, 水平方向的分量仍相当大, 此时滚石运动状态发展为在平台内滚动。设与平台发生  $(m+1)$  次碰撞之后, 滚石变为滚动状态, 其速度为  $V_{(m+1)h}$ 。这时, 滚石在平台摩擦阻力的作用下, 速度逐渐降低, 直至停止运动, 设滚动摩擦系数为  $\mu$ 。那么, 滚石在平台滚动的距离  $S_2$  可以由下式确定:

$$S_2 = V_{(m+1)h} t_2 + \frac{1}{2} a_2 t_2^2 \quad (19)$$

式中,  $a_2$  为滚动过程的加速度,  $a_2 = \mu g$ ;  $t_2$  为滚动过程的时间,  $t_2 = -V_{(m+1)h}/a_2 = V_{(m+1)h}/\mu g$ 。因此有:

$$S_2 = V_{(m+1)h}^2/\mu g - \frac{1}{2} \mu g V_{(m+1)h}^2/(\mu g)^2 \\ = \frac{V_{(m+1)h}^2}{2\mu g} \quad (20)$$

从(20)式可见, 滚动摩擦系数  $\mu$  与  $S_2$  成反比,

因此,  $\mu$  是计算滚石滚动距离  $S_2$  一个重要参数。滚动摩擦系数与滚石的大小、形状以及平台表层岩土体的物理力学性质有关,前人研究表明,滚石形状是最主要的因素。胡厚田<sup>[7]</sup>认为其值可取为 0.4; Guzzetti 等<sup>[10]</sup>认为,其值在 0.3 ~ 1.0 之间。

从上面的分析可以得到,滚石在平台上运动的水平距离  $S$  (停留位置)可由下式计算:

$$S = S_0 + S_1 + S_2$$

$$= V'_0 \cos\beta \cdot \frac{\sqrt{V'^2_0 \sin^2\beta + 2gh} - V'_0 \sin\beta}{g} - h/\tan\alpha + \frac{2V_{0h} V_{0v} R_{1t} R_{1n} (1 - (R_{1t} R_{1n})^m)}{g(1 - R_{1t} R_{1n})} + \frac{V^2_{(m+1)h}}{2\mu g} \quad (21)$$

## 4 现场试验研究

碰撞恢复系数和滚动摩擦系数是影响滚石在平台运动过程的 2 个重要的参数。大量的研究成果表明:法向恢复系数  $R_{1n}$  和切向恢复系数  $R_{1t}$  主要由平台表面岩土的性质决定,各项研究所给出的值也较为一致;滚动摩擦系数  $\mu$  的大小主要由滚石的形状决定,滚石形状是其最主要的影响因素,但其大小存在着较大的争议。因此,本节以前人给出的碰撞恢复系数为基础,通过现场滚石试验,分析滚石形状对滚动摩擦系数  $\mu$  的影响。

### 4.1 试验设计

#### 4.1.1 试验场地

试验选在四川省冕宁县境内 108 国道外侧的安宁河岸坡进行(图 3),该边坡原为冲沟,当地居民不断地在其中堆积石灰渣和花岗岩废石材。形成了上陡下缓的边坡。坡面长度约为 62.8 m,垂直高度约为 38.1 m。AC 段坡角约为  $40^\circ$ , CE 段坡度约为  $35^\circ$ 。AD 段坡面主要为石灰渣,胶结较好,结合紧密,DE 段坡表主要为花岗岩石材碎渣,较松散,边坡整体平顺。坡脚与平台相连,平台表面为块碎石。

#### 4.1.2 试验岩块

试验选用的 16 块岩块,岩性为砂岩。形状为长条状、方形、球形和薄片状,每种形状各 4 块。

为了区分长条状、方形、球形和薄片状,设岩块的几何尺寸长为  $a$ ,宽为  $b$ ,高为  $c$ ,  $a \geq b \geq c$ 。定义  $1 \leq a/b \leq 1.5$ 、 $1 \leq a/c \leq 1.5$  的岩块,棱角分明时为方形,不分明时为球形;  $1 \leq a/b \leq 1.5$ 、 $a/c \geq 2$  且  $b/c \geq 2$  的岩块形状为薄片状;  $a/b \geq 2$ 、 $a/c \geq 2$  且  $1 \leq b/c \leq 1.5$  的岩块形状为长条状;其它岩块的形状介于四者之间。

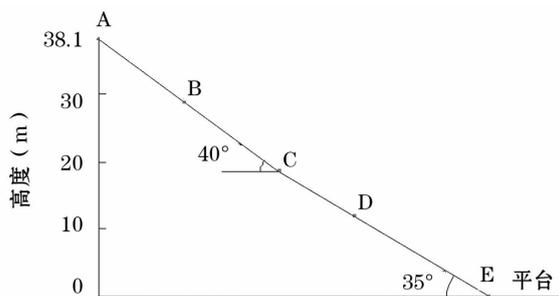


图 3 试验场地剖面图

Fig. 3 The profile of slope used for the tests

#### 4.1.3 测量和记录仪器

为了准确测量滚石进入平台时的初始速度,采用美国迪凯特公司生产的 CR1K 型专用运动场雷达测速仪进行速度测量。其它仪器包括摄像机、秒表、照相机等。

#### 4.1.4 试验步骤

- (1) 测量岩块的质量,描述其形状,并予以标记。
- (2) 在坡顶分别将 16 块岩块滚下,采用测速仪分别记录各岩块从坡顶到达平台运动的全过程。
- (3) 在平台和河边搜索各岩块的停留位置,采用皮尺测量其与坡脚的距离。

### 4.2 试验分析

由于本试验旨在分析形状对滚石与平台滚动摩擦系数  $\mu$  的影响,因此需要计算滚石不同形状时滚动摩擦系数  $\mu$  的值。从(21)式可以看出,要计算滚动摩擦系数  $\mu$ ,需要的已知量有滚石在平台的运动距离、滚石进入平台时的初速度、滚石与平台碰撞恢复系数以及滚石进入平台前起跳点的高度。这些物理量中,滚石在平台的运动距离可以通过测量其与坡脚的距离得到,滚石进入平台时的初速度的大小可由雷达测速仪测到,由于边坡平顺,滚石一般不会发生大的跳跃,滚石与平台第一次碰撞前在平台运动的距离和进入平台前起跳点的高度可以认为是零,同时可以认为滚石进入平台时速度与水平方向的夹角与边坡坡脚一致,至于碰撞恢复系数可以根据前人推荐和试验综合取:法向恢复系数取 0.25,切向恢复系数取 0.82,据此分别计算各岩块与平台之间的滚动摩擦系数,如表 4 所列。

从表 4 可以得到,滚石在平台运动的滚动摩擦系数与滚石的形状关系密切,一般来说,滚石与平台的滚动摩擦系数按长条形、方形、球形和薄片状顺序依次减小。长条形岩块与表面为块碎石的平台滚动

摩擦系数在 0.77 ~ 1.05 之间,平均值为 0.92; 方形岩块的滚动摩擦系数在 0.48 ~ 0.73 之间,平均值为 0.58; 方形岩块的滚动摩擦系数在 0.32 ~ 0.64 之间,平均值为 0.46; 薄片状的滚动摩擦系数在 0.19 ~ 0.34 之间,平均值为 0.26。相对而言,方形岩块与球形岩块与表面为块碎石的平台的滚动摩擦系数差别较小,它们与其它两种形状岩块与平台的滚动摩擦系数差别较大(图 4)。

表 4 试验记录及滚动摩擦系数计算表

Table 4 The experimental note and computing of rolling friction coefficient

试验编号	质量 (kg)	形状	速率 (m/s)	运动距离 (m)	滚动摩擦系数	平均值 $\bar{\mu}$
1	20.5	长条形	11.78	3.90	0.80	0.92
2	6.0	长条形	12.13	4.00	1.05	
3	16.0	长条形	13.04	4.80	0.77	
4	12.5	长条形	14.86	6.00	1.05	
5	15.5	方形	13.74	5.80	0.48	0.58
6	15.0	方形	14.16	6.10	0.50	
7	8.0	方形	14.51	6.00	0.73	
8	9.5	方形	14.35	6.00	0.63	
9	20.0	球形	18.77	12.00	0.32	0.46
10	11.0	球形	18.93	11.00	0.48	
11	6.5	球形	16.39	7.80	0.64	
12	12.5	球形	14.51	6.8	0.38	
13	13.5	薄片状	18.15	11.00	0.34	0.26
14	9.5	薄片状	16.12	10.00	0.22	
15	12.0	薄片状	17.99	11.00	0.32	
16	20.0	薄片状	17.13	12.00	0.19	

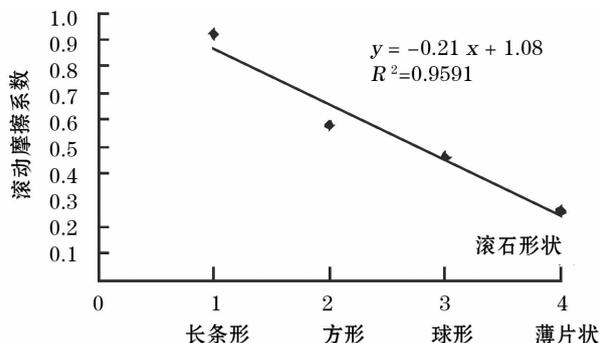


图 4 不同形状岩块滚动摩擦系数

Fig. 4 Rolling friction coefficient of the different shape rock block

从图 4 还可以得到,如果分别令长条形、方形、球形和薄片状滚石的形状参数为 1、2、3 和 4,滚石形状与滚动摩擦系数(表面为块碎石的平台)之间

呈良好的直线关系,其表达式为  $y = -0.21x + 1.08$ 。由于岩块的形状除了长条形、方形、球形和薄片状 4 种基本形状以外,大多数的岩块的形状介于这 4 种基本形状之间,因此,可以根据岩块与基本形状的相似程度确定形状参数,利用插值法或回归公式  $y = -0.21x + 1.08$  确定其与表面为块碎石平台之间的滚动摩擦系数。由于滚石与平台之间的滚动摩擦系数主要由滚石的形状决定,因此,对于平台表面为其它性质的岩土体时的滚动摩擦系数可以根据经验适当调整之后确定。

## 5 结 语

本文的研究表明:

(1) 滚石与平台发生的碰撞属于非弹性碰撞,是十分复杂的过程,可采用法向恢复系数  $R_{1n}$  和切向恢复系数  $R_{1t}$  来分析碰撞过程的动能损失,进而分析碰撞过程速度的变化,得出滚石与平台碰撞  $m$  次时速度的计算方法。

(2) 滚石在平台上的水平运动距离由第一次碰撞前在平台上飞跃的水平运动距离、两次碰撞之间水平距离和碰撞结束后滚动的距离 3 部分组成。利用运动学和力学方法可分别计算这 3 部分距离,从而得到滚石在平台上运动的总水平距离。法向恢复系数  $R_{1n}$ 、切向恢复系数  $R_{1t}$  和滚动摩擦系数  $\mu$  是正确分析滚石在平台上运动水平距离的重要参数。

(3) 滚石与表面为块碎石的平台的滚动摩擦系数的值在 0.19 ~ 1.05 之间,其值依长条形、方形、球形和薄片状的顺序逐渐减小。设长条形、方形、球形和薄片状滚石的形状系数为 1、2、3 和 4,本文获得了滚石形状与平台之间滚动摩擦系数的直线关系。

除滚石形状外,其它因素如:平台表面岩土性质、滚石质量等对滚石与平台之间的滚动摩擦系数也有一定的影响,这将是下一步研究的重点。

## 参考文献 (References):

- [1] Chen Hongkai, Tang Hongmei, Hu Ming, et al. Research on anchorage calculation method for unstable rock [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24 (8): 1 321-1 327. [陈洪凯,唐红梅,胡明,等.危岩锚固计算方法研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(8):1 321-1 327.]
- [2] Chen Hongkai, Wang Rong, Tang Hongmei. Review on current situation to study and trend of dangerous rock mass [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University*, 2003, 22 (3): 18-22. [陈洪凯,王蓉,唐红梅.危岩研究现状及趋势综述[J].重庆交通学院学报,2003,22(3):18-22.]
- [3] Huang Runqiu, Wang Xianneng, Tang Shengchuan. Thermal

- stress effect on near-surface failure of rock slopes[J]. *Progress in Natural Science*, 1999, 9(8):716-722. [黄润秋, 王贤能, 唐胜传. 热应力的交变作用对边坡危岩体形成的影响[J]. 自然科学进展, 1999, 9(8):716-722.]
- [4] Huang Runqiu, Liu Weihua, Zhou Jiangping, *et al.* Rolling tests on movement characteristics of rock blocks[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(9):1 296-1 302. [黄润秋, 刘卫华, 周江平, 等. 滚石运动特征试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9):1 296-1 302.]
- [5] Yang Ruiping. Application area about the definition of coefficient of restitution[J]. *Journal of Heze Teachers College*, 1999, 21(4):63-65. [杨瑞萍. 关于恢复系数定义的适用范围[J]. 菏泽师专学报, 1999, 21(4):63-65.]
- [6] Day R W. Case studies of rockfall in soft versus hard rock[J]. *Environmental and Engineering Geoscience*, 1997, 3(7):133-140.
- [7] Hu Houtian. Collapse and Rock Fall[M]. Beijing:China Railway Publishing House, 1989:37-53. [胡厚田编著. 崩塌与落石[M]. 北京:中国铁道出版社, 1989:37-53.]
- [8] Tang Hongmei, Yi Pengying. Research dangerous rock movement route[J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2003, 25(1):17-23. [唐红梅, 易朋莹. 危岩落石运动特征研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2003, 25(1):17-23.]
- [9] Lü Qing, Sun Hongyue, Zhai Sankou, *et al.* Evaluation models of rockfall trajectory[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(2):79-84. [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, 12(2):79-84.]
- [10] Guzzetti F, Crosta G, Detti R, *et al.* STONE: A computer program for the three dimensional simulation of rockfalls[J]. *Computers & Geosciences*, 2002, 28:1 079-1 093.

## Study on the Movement Characteristics of Rolling Rock Blocks on Platform

HUANG Runqiu, LIU Weihua

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** Platform has a good function to baffle potential unstable rock masses movement after their falling. In this paper, using the kinematics and mechanics theoretical theories, the velocity calculation formula of collision process between rolling rock and platform were put forward, and the horizontal movement calculation method of rolling rock moving on platform was studied. Furthermore, the rolling friction coefficient was researched on the basis of the test and the shape analysis of rolling rock. The test result showed that, the rolling rock moving velocity after collided with platform was ascertained by the normal restitution coefficient, tangential restitution coefficient and the rolling rock moving velocity before collided. The horizontal displacements of the rolling rock on platform have three parts: the horizontal span displacement above the platform before collision, the horizontal displacement between two collisions with the platform, and the rolling displacement after final collision. The displacement value can be ensured with kinematics analysis. The normal restitution coefficient, tangential restitution coefficient and the rolling friction coefficient are the important parameters to calculate the horizontal displacement of the rolling rock movement on platform. The rolling friction coefficient value between rolling rock and platform with rock blocks and detritus surface is between 0.19 and 1.05, and the value is reduced in turn according to rolling rock shape of rectangle, square, spherical and slices shape. The relationship of the rolling friction coefficient between the rolling rock shape and the platform with rock blocks and detritus surface is a good linear relation. The rolling friction coefficient of others shape rolling rock can be confirmed by interpolation method or regression formula. Then the new feasible methods to prevent potential unstable rock masses are put forward. The results help us make out a draft of geohazards prevention.

**Key words:** Potential unstable rock masses; Rolling rock block; Platform; Horizontal displacement; In-situ test; Rolling friction coefficient.