

滚石运动特征试验研究

黄润秋¹, 刘卫华¹, 周江平², 裴向军¹

(1. 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; 2. 二滩水电开发有限责任公司, 四川 成都 610021)

摘要: 选择坡面长度为 176.4 m, 坡度为 $39^\circ \sim 60^\circ$, 局部坡度约为 90° 的边坡作为试验场地, 对质量为 9.5~92.5 kg, 形状为长条状、薄片状和方形等的岩块进行 256 次滚石试验。在试验的基础上, 分析了坡面特征对滚石停留位置的影响, 坡面对滚石运动时间 (到达坡底动能) 和对不同形状滚石的运动特征的影响。同时, 利用正交试验理论, 采用滚石在坡面上运动的平均加速度作为评价指标, 对影响岩块在边坡上运动的 3 个重要因素——滚石的质量、滚石形状和坡面状况 (包括坡度以及与坡度相关的坡表覆盖层) 进行了分析。结果表明: 在这 3 个因素中, 坡度及坡面状况是主要因子, 其次是滚石的形状, 再次是滚石质量。当滚石质量 $15 \leq m < 27$ kg, 其形状为薄片状, 坡度平均为 59.6° , 基岩基本裸露, 滚石运动的平均加速度最大; 当滚石质量 $9.5 \leq m < 15$ kg, 其形状为长条状, 坡度为 39° , 坡面有碎石浮土时, 平均加速度最小。所得成果为危岩体防治时冲击能量的确定提供了依据, 提出危岩体整体防治的新的可行方法, 对坡面地质灾害的防治有指导意义。

关键词: 危岩体; 滚石试验; 运动特征; 正交试验; 防治措施

中图分类号: TU452 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2007)09-1296-07

作者简介: 黄润秋(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 从事工程地质、岩土工程教学科研工作。E-mail: hrq@cdut.edu.cn。

Rolling tests on movement characteristics of rock blocks

HUANG Run-qiu¹, LIU Wei-hua¹, ZHOU Jiang-ping², PEI Xiang-jun¹

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059,

China; 2. Ertan Hydropower Development Company Ltd., Chengdu 610021, China)

Abstract: Taking a typical slope as the test site, 176.4 m in length and with slope gradient of $39^\circ \sim 60^\circ$, nearly 90° in local, 256 times rolling tests on rock blocks with the weight of 9.5 ~ 92.5 kg, whose shapes are strip, flaky and square, etc., were done. Based on the results, the effects of slope features on the rock stopping position, the moving time (The kinetic energy arriving at the slope root) and the moving track of different rock block shapes were analyzed. Meanwhile, with the orthogonal test theory, the average acceleration velocity was chosen to be the evaluation index, and three important factors including the mass, the rock block shape and the slope condition (the slope gradient and overburden) were discussed. The results showed that the slope condition was the main factor, the second was the rock block shape, and the third was the rock block mass. The average acceleration was the maximum when the mass of the flaky rock block was $15 \leq m < 27$ kg and the average slope was 59.6° and the bedrock was exposed; the average acceleration is the minimum when the mass of strip rock block was $9.5 \leq m < 15$ kg and the average slope was 39.0° , and there was some debris. The results provided the bombardment energy for the potential unstable rock mass prevention. A new feasible method for the potential unstable rock mass prevention was put forward. It would be important and helpful to the geohazard control work.

Key words: potential unstable rock mass; rolling tests on rock block; moving characteristic; orthogonal test; control measure

0 引言

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、渗透压力等作用下与母岩逐渐分离, 稳定性较差的岩体^[1-4]。当危岩体与母岩彻底分离, 以某种形式向坡下运动则称为“滚石”。20 世纪中期以来, 我国对危岩体研究给予了高度重视, 在危岩体的特性、发育环境、

防治措施等方面积累了丰富的资料和经验, 取得了较多有应用价值的成果。对滚石的运动特征以及对建 (构) 筑物可能造成的危害也做了一些有益的探索,

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资助项目 (50539050)

收稿日期: 2006-09-08

如唐红梅、易朋莹^[5]根据危岩体的不同的破坏模式，推导了落石的运动轨迹方程；亚南等^[6]以链子崖东侧猴子岭为例，研究了崩塌落石运动学特征；赵旭，刘汉东^[7]运用运动学原理，计算了宝泉抽水蓄能电站开关站周围高边坡的落石速度、动能和弹跳高度。这些研究基本上都是在运动学的基础上做一些假定后进行数值模拟或推导物理学公式，对滚石的质量、形状和坡面特征等因素对滚石运动特征的影响涉及较少。因此分析不同质量、形状的岩块在不同坡面状况等情形下的运动特征，为危岩体的被动防护措施提供理论依据，对保障建构物的安全运行具有重要的意义。本文选择不同质量、不同形状的岩块在同一边坡坡面状况不同的坡段，进行滚石试验，分析了试验现象，并采用正交试验设计法揭示了滚石质量、滚石形状和坡面状况对滚石运动特征的影响。

1 试验方案设计

1.1 试验场地

试验选在四川省冕宁县泸沽铁矿进行，所选边坡

大部分坡段覆盖层很薄，多处基岩裸露，除少量杂草和松树外，植被稀疏，坡度有所起伏，多在 39~60° 之间，局部约为 90° 的陡坎，如图 1 所示。

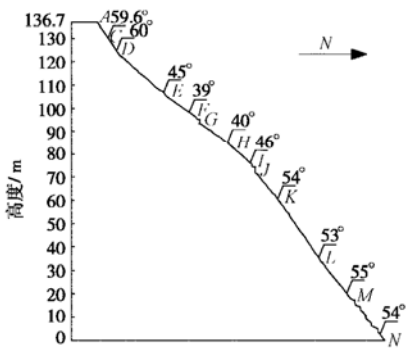


图 1 试验场地剖面图

Fig.1 The profile of experimental ground

坡面长度约为 176.4 m，垂直高度约为 136.7 m，基岩岩性为砂岩。根据坡面的不同特征，将坡面分为 12 段，各段的特征如表 1。

1.2 试验用岩块特征

试验所选用的岩块为 256 块，岩性为砂岩，有少

表 1 试验边坡各段特征表

Table 1 The characteristics of slopes

坡段	坡度/(°)	坡面长度/m	植被特征	覆盖层等其他特征
AC	59.6	11	少量杂草；5 棵松树，最高 1 m，最低 0.3 m	上部为一段高度不大的浆砌片石挡墙，下部基岩基本裸露，基岩突出坡面 0.3 m 左右
CD	60	5.4	少量枯草	基岩裸露，突出坡面
DE	45	25	几棵矮小松树，少量灌木	左侧为沟状，坡面为碎石土和煤渣，松散；右侧基岩裸露，基岩突出坡面约 0.2 m
EF	39	16	极少	坡面浮有碎石土，较 DE 段稍紧密，碎石直径为 2~3 cm
FG	90	1.5	无	此处为突出坡面的基岩，在 F 点形成宽 1 m 左右的平台
GH	40	13.5	7 棵松树，几无植被	基岩裸露，在距 G 点下方约 6 m 处有两块突出坡面，分别突出 0.6 m 和 0.4 m
HI	46	15	10 棵松树，少有植被	碎石土覆盖和基岩裸露部分各占一半左右，基岩突出坡面约有 10 处，突出高度为 0.2~0.25 m，碎石直径为 2~3 cm
IJ	90	2	无	为突出坡面的基岩，在 I 点形成宽 1.2 m 左右的平台
JK	54	16	少量松树和灌木	块碎石土所占比例较大，有部分基岩裸露，突出坡面高度较小
KL	53	29	无	为一冲沟，沟内为块碎石，粒径为 3~20 cm，以 7~10 cm 居多，在距 K 点 15 m 左右坡度相对较为平缓；沟两侧坡度约为 65°，有少量灌木和松树
LM	55	20	无	为一冲沟，沟内为块碎石，粒径为 3~20 cm，以 7~10 cm 居多，在距 L 点下方 2~5 m 左右坡度平缓；沟两侧坡度约为 65°，有少量灌木和松树
MN	54	22	无	基岩裸露，坡面凹凸不平

量的铁矿石,质量从 9.5~92.5 kg,多数在 20~30 kg。形状主要有长条状(图 2)、薄片状(图 3)和块状(图 4)等。



图 2 长条状岩块

Fig. 2 Strip rock

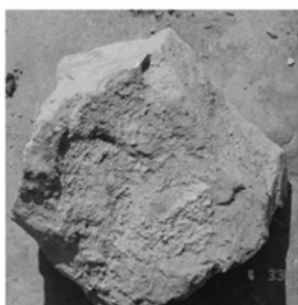


图 3 薄片状岩块

Fig. 3 Flake rock



图 4 块状岩块

Fig. 4 Square rock

为了区分长条状、薄片状和块状,设岩块的几何尺寸长为 a , 宽为 b , 高为 c , $a \geq b \geq c$ 。定义 $1 \leq alb \leq 1.5$ 、 $1 \leq alc \leq 1.5$ 的岩块形状为块状; $1 \leq alb \leq 1.5$ 、 $alc \geq 2$ 且 $b/c \geq 2$ 的岩块形状为薄片状; $alb \geq 2$ 、 $alc \geq 2$ 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三者之间。

1.3 试验步骤

(1) 测量岩块的尺寸,描述其形状,测定其质量等,对各岩块予以标记,并照相。

(2) AC , CE , EF 三段坡面状况(坡度及与坡度相关的坡表覆盖层)有如下特征: AC 段坡度 59.6° ,

基岩基本裸露; CE 段坡度 47.5° (CD , DE 段加权平均所得),大部分基岩裸露,部分碎石土和煤渣,松散; EF 段坡度 39° , 碎石土和煤渣浮于坡面平均。为了分析坡面状况对滚石运动的影响,选择在坡面 A 点、 C 点和 E 点将岩块分三组滚下(根据实际试验的次序,将从 E 点滚落的岩块称为第一组试验,从 C , A 点滚落的分别称为第二、三组),记录其起始滚落方法和位置。

(3) 在坡面上 C , $E(F)$, H , I , K , L , M 和 N 点处布置竖直方向的标尺,标尺高度为 10 m,最小刻度为 10 cm。在 C , $E(F)$, H , I , K , L , M 和 N 点同高程处分别设记录员,试验时,挥动红旗为号,各记录员按下秒表,分别记录滚石通过坡面上各点的时间、运动状态,以及运动状态发生改变时的位置(如由滑动转变为滚动、滚动转变为跳跃、跳跃转变为滚动等)。当滚石跳跃时,记录跳跃的高度。

2 试验现象分析

2.1 滚石运动停止位置分析

岩块从坡面不同位置滚落后,在坡面上运动,与坡面不断碰撞,同时受覆盖层、树木拦挡和坡面平台的作用,部分停留在坡面上,部分滚入坡脚,表 2 是各组试验滚石停留位置分布情况。图 5 为滚石在坡面停止运动时所处位置分布的柱状图。

从表 2 和图 5 可以得到,3 组试验运动到坡脚的滚石,所占比例分别仅为该组 31.25%, 21.88% 和 32.02%,有 70% 左右的滚石停留在坡面上。停留在坡面上的滚石集中在 L 下方 2~5 m、 E , F (包括 F 点)之间、和 I , K (包括 I 点)之间,其中各组试验停留在 L 下方 2~5 m 处,占该组的比例分别为 21.88%, 12.5% 和 25.78%; 停留在 E , F (包括 F 点)之间,占该组试验的比例分别为 18.76%, 29.68% 和 11.72%; 停留在 I , K (包括 I 点)之间,占该组试验的比例分别为 14.06%, 14.07% 和 12.51%。而 L 下方 2~5 m 坡度平缓,且存在平台; E , F 之间坡度较缓,基岩基本不出露,坡面又有一定的覆盖层,且 F 点存在宽 1 m 左右的平台; I 点存在宽 1 m 左右的平台,且 I , K 之间坡面碎石较多。这说明缓坡、较厚的坡面覆盖层和坡面平台对滚石在坡面运动的阻滞作用是十分显著的。

因此,在处理危岩体的过程中,局部坡段削坡和设置平台,对降低危岩体对建(构)筑物的威胁是有效的,可以作为处理危岩体的一种工程措施。

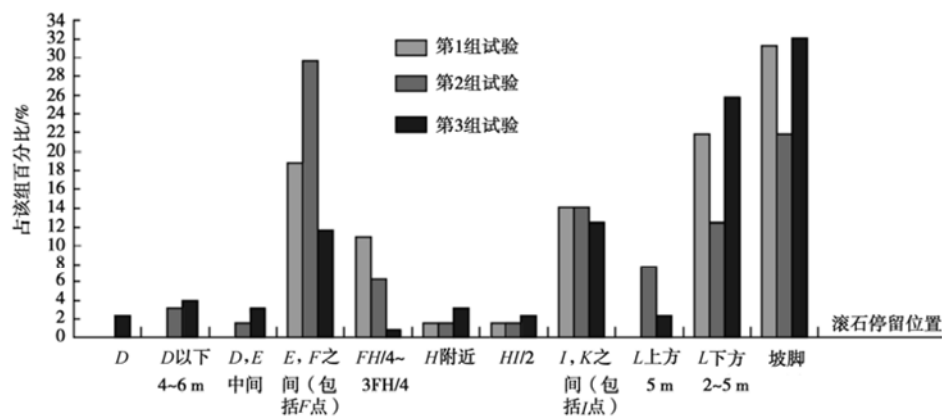


图 5 滚石停留位置柱状图

Fig. 5 The stopping position of rocks

表 2 试验滚石停留位置分布表

Table 2 The stopping position of rocks

岩块停留位置	第一组试验（起始点为 E 点）		第二组试验（起始点为 C 点）		第三组试验（起始点为 A 点）	
	停留数目	所占百分比/%	停留数目	所占百分比/%	停留数目	所占百分比/%
D					3	2.34
D 以下 4~6 m			2	3.13	5	3.91
D、E 中间			1	1.56	4	3.13
E、F 之间（包括 F 点）	12	18.76	19	29.68	15	11.72
FH/4~3FH/4	7	10.93	4	6.25	1	0.78
H 附近	1	1.56	1	1.56	4	3.13
HII/2	1	1.56	1	1.56	3	2.34
I、K 之间（包括 I 点）	9	14.06	9	14.07	16	12.51
L 上方 5 m			5	7.81	3	2.34
L 下方 2~5 m	14	21.88	8	12.5	33	25.78
坡脚	20	31.25	14	21.88	41	32.02
合计	64	100	64	100	128	100

表 3 落入坡底的滚石所用时间对比表

Table 3 Time for rocks to arrive at the slope root

试验分 组	用时最少的		用时最长的		平均		自由落下	
	时间/s	平均速度 /(m·s ⁻¹)	时间/s	平均速度 /(m·s ⁻¹)	时间/s	平均速度 /(m·s ⁻¹)	时间/s	平均速度 /(m·s ⁻¹)
一	12.9	10.5	29.7	4.55	20.3	6.64	4.59	22.9
二	12.3	13.5	32.9	5.02	21.6	7.64	5.05	25.3
三	12.0	14.6	39.6	4.40	19.6	8.90	5.19	25.9

2.2 滚石运动时间分析

滚石质量、形状以及滚石在坡面运动路径的不同，决定了其与坡面碰撞、受树木和平台拦阻以及坡面阻滑作用有所差异，因而滚石运动到坡面的某一点和坡脚的时间（平均速度）就各不相同，表 3 为各组试验到达坡脚的滚石所用平均时间、用时最长、最短的所用的时间和滚石从 136.7 m 高度（试验边坡的高度）自由落下所用时间的对比。

由表 3 可见，滚石运动到坡脚的时间最快为自由落下的 2 倍左右，最慢的约为 5 倍，平均约为 3 倍。

利用运动学公式进行分析，设岩块的平均加速度为 $\bar{a}(\text{m/s}^2)$ ，则

$$\bar{a} = \frac{2S}{t^2} \quad , \quad (1)$$

运动到坡底的动能 E_m 为

$$E_m = \frac{1}{2}M\bar{a}^2t^2 = \frac{1}{2}M\left(\frac{2S}{t^2}\right)^2t^2 = \frac{2MS^2}{t^2} \quad . \quad (2)$$

式中， M 表示滚石的质量 (kg)， S 表示滚石运动的距离 (m)， t 表示滚石运动的时间 (s)。

将到达坡底的滚石运动的距离 (176.4 m)、时间与滚石自由落下的距离 (136.7 m)、时间分别代入式 (2) 进行对比，可得到达坡底时滚石的动能为自由落下时的 1/15~5/12，平均为 5/27。

2.3 滚石运动状态分析

滚石运动状态以跳跃为主,局部有滚动和滑动的可能。滚石跳跃时,受多种因素作用,跃起高度有所不同,表4为运动到坡脚的滚石在坡面跳跃的最大高度、最小高度以及平均高度的统计。

表4 滚石跳跃高度分析表

	最大高度/m			最小高度/m			平均高度/m		
	一	二	三	一	二	三	一	二	三
FH段	4	5	8	0	0	0	0.6 8	1.7 1	3.3 2
HI段	3.5	5	15	0	0	0	1.3 2	2.1 8	4
LM段	2.3	2.5	3.8	0	0	0	1.2 4	1.5 7	1.7 5
MN段	3.5	3.8	4.7	0	0.5	0	1.5 0	2.2 1	2.3 5

说明:表中一、二、三分别表示第一、二、三组试验。

由表4可见,岩块跳跃时,跃起的高度最高可达15 m,一般为2~3 m。在同一记录点,滚石跳跃的最大高度和平均高度按第一、二、三组试验依次增加,而这三组试验中,岩块的初始滚落点(E,C,A点)与记录点距离以第一组最近、第二组次之、第三组最远,即滚石运动到某一记录点的速度按第一、二、三组试验依次减小,这说明滚石的跳跃高度与滚石碰撞前的速度有关,碰撞前速度越大,跳跃高度越大。然而,在同一组试验中,跳跃高度并不随滚石初始滚落点与记录点的距离增大而增大,这说明跳跃高度,除了与碰撞前,滚石的运动速度有关外,还与碰撞处的坡面状况有关。另外,从力学的角度看,碰撞前速度方向与接触面交角越大,碰撞后跳跃的高度越大。

2.4 滚石破碎情况

滚石在坡面运动,与坡面不断碰撞,在此过程中,部分破碎,部分保持完整。滚石破碎与否取决于滚石的硬度、结构面的发育情况、碰撞时的速度、接触面的特征和接触的角度等。本试验的256块岩石中的有114块破碎,占总数的44.5%。

破碎的滚石半数以上全部停留在坡面上,部分落入坡底。落入坡底的部分由于质量大为减小,单个的动能大为降低。

3 各影响因素的正交试验分析

滚石在坡面上运动,影响其运动特征的因素多种多样,如果能够确定各因素哪个影响较大,哪个影响较小,各因素依什么样的水平搭配起来影响最大或最小,就可以在危岩体的治理设计中区别对待各个因素,将重点放在对危岩体运动影响较大的因素上,使治理方案设计更安全、更经济。而正交试验设计^[8-11]是解决这一问题的有效工具。正交试验设计是用于多因素试验的一种方法,用这种方法可判断出较优的试验条件,如果对试验结果进行直观分析,还可更全面、更

系统地掌握试验结果,做出正确的判断。

3.1 正交试验设计

影响滚石运动的因素很多,要在一次试验中考虑所有的因素是不太现实的,因此选取3个因子:滚石的质量,滚石的形状和坡面状况(包括坡角以及与坡角相关的坡表覆盖层)。根据各次试验岩块的形状(主要有薄片状、块状和长条状)以及岩块质量和坡面条件,每个因子分别取3个水平,如表5所列。

表5 正交试验的因素及水平

Table 5 Factors and levels of orthogonal tests			
水平	A 岩块质量 m/kg	B 岩块形状	C 边坡坡度和覆盖层状况
1	9.5≤ m<15	薄片	坡度39°,碎石土和煤渣浮于坡面(坡面EF段) 平均47.5°,大部分基岩裸露,部分,碎石土和煤渣,松散(坡面CE段)
2	15≤ m<21	块状	平均59.6°,基岩基本裸露(坡面AC段)
3	21≤ m<27	长条	

由于A,B,C都是三水平的因子,可以选 $L_9(3^4)$ 表安排因素影响分析的试验方案,试验内容见表6。表中的第四列空着,作为估计试验误差。

在实际试验中,满足表6中所列的各组试验分别进行了多次,将各次试验作为该组试验的平行试验,计算其运动的平均时间,并以此作为该组试验分析的基础。

表6 试验方案

Table 6 Test schemes				
试验号	1(A)	2(B)	3(C)	4
1	1(9.5≤ m<15)	1(薄片)	1[坡度39°,碎石土浮于坡面(EF)]	1
2	1(9.5≤ m<15)	2(块状)	2[平均47.5°,大部分基岩裸露,部分,碎石土和煤渣,松散(CE)]	2
3	1(9.5≤ m<15)	3(长条)	3[平均59.6°,基岩基本裸露(AC)]	3
4	2(15≤ m<21)	1(薄片)	2[平均47.5°,大部分基岩裸露,部分,碎石土和煤渣,松散(CE)]	3
5	2(15≤ m<21)	2(块状)	3[平均59.6°,基岩基本裸露(AC)]	1
6	2(15≤ m<21)	3(长条)	1[坡度39°,碎石土浮于坡面(EF)]	2
7	3(21≤ m<27)	1(薄片)	3[平均59.6°,基岩基本裸露(AC)]	2
8	3(21≤ m<27)	2(块状)	1[坡度39°,碎石土浮于坡面(EF)]	3
9	3(21≤ m<27)	3(长条)	2[平均47.5°,大部分基岩裸露,部分,碎石土和煤渣,松散(CE)]	1

由于相同质量的岩块的运动速度越大,对建(构)筑物的威胁越大,同时岩块以初速度为零开始运动,

因此平均加速度决定运动速度, 从而可以采用岩块在边坡上运动的平均加速度作为考察指标。

3.2 试验结果与极差分析

记录各次试验的结果, 并做分析计算, 如表 7。其中 $R = \max(\bar{I}_j, \bar{II}_j, \bar{III}_j) - \min(\bar{I}_j, \bar{II}_j, \bar{III}_j)$ 。将表中各列 I_j, II_j, III_j 及 $\bar{I}_j, \bar{II}_j, \bar{III}_j$ 分别算出并填入表内, 再计算出九次试验结果的总和

$$\sum_{i=1}^9 y_i = 3.64 + 2.27 + \cdots + 2.17 + 1.97 = 23.66,$$

以及 9 次试验结果的平均值

$$\bar{y} = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 y_i = 2.63。$$

表中最后一行是同一列的 $\bar{I}_j, \bar{II}_j, \bar{III}_j$ 之中最大值与最小值的差, 称之为极差, 记为 R 。它是度量数据波动大小的一个重要指标, 极差值大的因子对指标的影响大, 是影响指标的主要因子; 反之, 极差值小的因子对指标的影响就小, 是影响指标的次要因子。据此分析, 从表 6 的最后一行的极差看出, 因子 C (坡面状况 (包括坡角以及与坡角相关的坡表覆盖层)) 是主要因子, 其次是因子 B (滚石形状), 再次是因子 A (滚石质量)。

空列的极差 $R=0.22$, 相对误差为 8%, 说明试验的误差可以满足要求。

表 7 试验分析计算表

Table 7 Analysis and computation

试验号	1(A)	2(B)	3(C)	4	平均加速度 $y_i/(m \cdot s^{-2})$
1	1	1	1(EF)	1	2.64
2	1	2	2(CE)	2	2.27
3	1	3	3(AC)	3	2.81
4	2	1	2(CE)	3	2.95
5	2	2	3(AC)	1	2.91
6	2	3	1(EF)	2	1.96
7	3	1	3(AC)	2	3.98
8	3	2	1(EF)	3	2.17
9	3	3	2(CE)	1	1.97
I_j	7.72	9.57	6.77	7.52	$\sum_{i=1}^9 y_i =$ 23.66
II_j	7.82	7.35	7.19	8.21	
III_j	8.12	6.74	9.70	7.93	
$\bar{I}_j$	2.57	3.19	2.26	2.51	$\bar{y} = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 y_i$ = 2.63
$\bar{II}_j$	2.61	2.45	2.40	2.73	
$\bar{III}_j$	2.71	2.25	3.23	2.64	
R	0.14	0.94	0.97	0.22	

3.3 试验成果分析

(1) 表 7 的结果表明, 第 7 号试验的平均加速度最大为 3.98 m/s^2 , 其试验条件是 A3B1C3, 即滚石质量 $21 \leq m < 27 \text{ kg}$, 形状为薄片状, 边坡坡角平均 59.6° , 基岩基本裸露。第 6 号试验的平均加速度最大为 1.96 m/s^2 , 其试验条件是 A2B3C1, 即滚石质量为 $15 \leq m < 21 \text{ kg}$, 形状为长条状, 边坡坡角平均 39° , 坡面浮有碎石土。

(2) 图示法分析: 为了更直观形象地比较各因子对指标影响的大小, 选出各因子对指标最有利的水平, 作因子和指标的关系图来分析。

把每个因子的 $\bar{I}_j, \bar{II}_j, \bar{III}_j$ 点在坐标纸上 (图 6), 从而有如下结论。

a) 岩块质量 A 取 A₃ ($15 \leq m < 27 \text{ kg}$) 时, 平均加速度最大; 取 A₁ ($9.5 \leq m < 15 \text{ kg}$) 时, 平均加速度最小。

b) 滚石形状 B 取 B₁ (薄片状) 时, 平均加速度最大; 取 B₃ (长条状) 时, 平均加速度最小。

c) 坡面状况 C 取 C₃ (坡角平均 59.6° , 基岩基本裸露) 时, 平均加速度最大; 取 C₁ (坡角平均 39° , 坡面浮有碎石土) 时, 平均加速度最小。

综合起来 A₃B₁C₃ 时, 平均加速度最大。A₁B₃C₁ 时, 平均加速度最小。

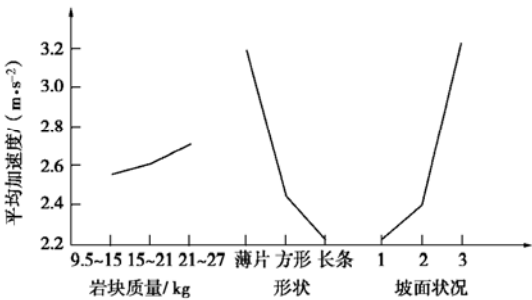


图 6 各影响因子直观图

Fig. 6 Visual analysis of the influencing factors

在一项试验中, 诸因素对响应的影响是有主有次的, 对危岩体失稳后运动试验, 从图上很容易看出, 一个因子对平均加速度影响大, 是指这个因子不同的水平, 其相应的平均加速度之间的差异比较大, 则这个因子为主要的; 一个因子对平均加速度影响不大, 是指相应的平均加速度的差异较小, 则这个因子是次要的。反映在图上, 点子散布大的因子是主要的, 散布小的是次要的。

根据上述原则, 从图上看, 坡面状况 (包括坡角以及与坡角相关的坡表覆盖层) 点子散布最大, 是主要的因子; 滚石的形状 3 个点子散布稍小, 它的影响居第二位; 滚石的质量点子散布最小, 它的影响为第三位, 即可将它们对平均加速度影响排序为 C, B, A。

4 结 语

(1) 在与试验场地类似的边坡处, 危岩体失稳后在坡面运动, 将约有 70% 的岩体将停留于坡表, 只有 30% 左右的岩块落入坡底。缓坡、覆盖层和坡面平台对滚石在坡面运动的阻滞作用是十分明显, 因此, 在危岩体处理对策研究时, 可以考虑采用局部削坡和在坡面设置积渣平台的措施。

(2) 在与试验场地类似的边坡, 危岩体失稳后在坡面运动, 到达坡底时的动能为自由落下时的 $1/15 \sim 5/12$, 平均为 $5/27$ 。这可作为危岩体被动防护设计时, 岩体接触防护网时冲击能量的重要参考。

(3) 滚石在此类边坡运动时, 运动状态以跳跃为主, 在覆盖层较厚处会发生滚动, 局部有滑动的可能。与坡面不断碰撞, 有近 44.5% 的破碎。落入坡底的部分由于质量大为减小, 单个的动能大为降低。

(4) 滚石在边坡上运动时, 平均加速度与许多因素有关, 其中滚石的质量, 滚石的形状和坡面状况(包括坡角以及与坡角相关的坡表覆盖层) 是重要的 3 个因素。正交试验分析表明, 这 3 个因素中, 坡面状况是最主要的因素, 滚石本身的形状次之, 再次是滚石的质量。综合起来, 试验组合取 $A_3B_1C_3$ 时, 即滚石质量 $21 \leq m < 27$ kg、其形状为薄片状、坡度 59.6° , 基岩基本裸露时, 滚石在坡面运动的平均加速度最大, 坡面对滚石运动的阻挡作用最小; 试验组合为 $A_1B_3C_1$ 时, 即滚石质量取 $9.5 \leq m < 15$ kg, 其形状为长条状, 坡度为 39° , 坡面浮有碎石土时, 平均加速度最小, 坡面对滚石运动的阻挡作用最大。

随着坡度以及滚石质量的增大, 滚石运动的平均加速度增大, 因此滚石在大坡度以及大质量情形时的运动特征, 将是下一研究的重点。

参考文献:

- [1] 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): 1321 - 1327. (CHEN Hong-kai, TANG Hong-mei, HU Ming, et al. Research on anchorage calculation method for unstable rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(8): 1321 - 1327. (in Chinese))
- [2] 杨淑碧, 董孝璧. 重庆市中心区危岩稳定性研究[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1994: 38 - 41. (YANG Shu-bi, DONG Xiao-bi. Stability study on the dangerous rockmasses in the central area of Chongqing city[M]. Chengdu: Chengdu Science and Technology University Press, 1994: 38 - 41. (in Chinese))
- [3] 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. (CHEN Hong-kai, WANG Rong, TANG Hong-mei. Review on current situation to study and trend of dangerous rock mass[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2003, **22**(3): 18 - 22. (in Chinese))
- [4] 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. (HUANG Run-qiu, WANG Xian-neng, TANG Sheng-chuan. The influence of alternating thermal stress on the dangerous rockmass formation of slopes[J]. Progress of Natural Sciences, 1999, **9**(8): 716 - 722. (in Chinese))
- [5] 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. (TANG Hong-mei, YI Peng-ying. Research dangerous rock movement route[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2003, **25**(1): 17 - 23. (in Chinese))
- [6] 亚南, 王兰生, 赵其华, 等. 崩塌落石运动学的模拟研究[J]. 地质灾害与环境保护, 1996, **7**(2): 25 - 32. (YA Nan, WANG Lan-sheng, ZHAO Qi-hua, et al. Simulation study of rockfall kinematics[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1996, **7**(2): 25 - 32. (in Chinese))
- [7] 赵旭, 刘汉东. 运动学在边坡落石计算中的应用[J]. 华北水利水电学院学报, 2004, **25**(2): 46 - 50. (ZHAO Xu, LIU Han-dong. Application of kinematics in the calculation of falling rocks[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2004, **25**(2): 46 - 50. (in Chinese))
- [8] 方开泰, 马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 35 - 63. (FANG Kai-tai, MA Chang-xing. Study of normal and even test[M]. Beijing: Science Press, 2001: 35 - 63. (in Chinese))
- [9] 朱万成, 唐春安, 黄明利. 基于正交试验原理的喷锚参数设计系统及其应用[J]. 岩土力学, 1999, **20**(2): 87 - 81. (ZHU Wang-cheng, TANG Chun-an, HUANG Ming-li. Bolt-spray parameters design system based on the orthogonal experimental principle and its application[J]. Rock Mechanics and Soil Mechanics, 1999, **20**(2): 87 - 81. (in Chinese))
- [10] 杨有贵. 概率统计及其在土建中的应用[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1986: 164 - 175. (YANG You-gui. Probability & statistics and their application in civil engineering[M]. Beijing: China Construction Materials Publishing House, 1986: 164 - 175. (in Chinese))
- [11] 孙树林, 吴绍明, 裴洪军. 多层支撑深基坑变形数值模拟正交试验设计研究[J]. 岩土力学, 2005, **26**(11): 1771 - 1774. (SUN Shu-lin, WU Shao-ming, PEI Hong-jun. Orthogonal design study for numerical modeling of deformation of multipropped deep foundation pit[J]. Rock Mechanics and Soil Mechanics, 2005, **26**(11): 1771 - 1774. (in Chinese))