

# 散体滑落与堆积规律的实验研究

许连坡 刘以钢 李金华

(中国科学院力学研究所,北京100080)

**摘要** 本文用模型实验研究了被炸碎的岩石自山坡滑落进入河道的堆积问题,得到用松动爆破和滑坡效应进行定向爆破筑坝是可能的,当山坡摩擦系数 $f$ 较小时,它对最远滑移距离有影响;而当 $f$ 较大时,滑移的最远距离减少。散体自然滑落可能有二个临界角:一是它从静止到开始滑落的角度;另一个是它从运动到停止时的角度。实验还表明,为了增加堆积体的最远距离和河心堆积高度,增加第一排爆破的最小抵抗线是有效的。

**关键词** 定向爆破筑坝 散体 滑落 堆积 摩擦系数

定向爆破筑坝中被炸碎和抛出的岩体已变成松散体,其运动规律可用散体力学理论描述。但散体力学的现有成果还不能解决此问题。统计理论在散体力学中的突出贡献是从理论上证明了<sup>[1]</sup>散体的运动满足流体运动方程组,即满足流体力学的运动方程和连续性方程;自然,其中的密度 $\rho$ ,速度 $u$ 和应力张量 $p_{ij}$ 都是统计意义上的平均值。但统计理论在本构关系方面的作用却不能令人满意;尽管忽略了许多重要因素,而所得到的散体本构关系仍复杂的难以应用。

近十年来散体力学的主要工作多集中在简单剪切流和薄层流动方面,C. C. Григорян的方程<sup>[2]</sup>用了上述二个方面的条件;而S. B. Savage<sup>[3]</sup>的工作则主要集中在后者。用他们的方程对堆积过程进行计算将会遇到困难;因此,我们通过模型实验进行研究。

## 1 抛掷堆积计算的现状及问题

### 1.1 现状和问题

我国在抛掷堆积计算中实际应用的方法有三个;即体积平衡法,分散弹道法和整体弹道法。体积平衡法是我国铁道部门根据实际工程资料于六十年代提出的,经过后来的进一步完善,在实践中得到了普遍的应用。这一方法包括一整套的计算公式<sup>[4]</sup>,其核心是质心抛距和最远抛距的计算公式;它们均和爆破的最小抵抗线 $w$ 成正比。对大规模的爆破,计算的结果偏大;对小规模的爆破,其计算的结果偏小。

分散弹道法是苏联Г. И. 波克罗夫斯基<sup>[5]</sup>提出来的。六十年代在我国的一些工程上进行了试用;由于计算工作量大等原因,这一方法在七十年代至八十年代没有得到进一步的应用和发展。近年,随着现代计算机的普及和应用,这一方法由水科院进行了完善,并完成了计算机辅助设计<sup>[6]</sup>的研究工作。本方法的核心问题是关于抛掷速度 $u_0$ 的计算公式;

1991年1月24日收到原稿,7月25日收到修改稿。

$$u_i = \frac{A_{0i}}{R_i^3} \quad (1)$$

这里  $R_i$  是第  $i$  个分块的矢径,  $A_{0i}$  为一常数。因  $u_i^2$  表示第  $i$  个分块的动能, 故  $A_{0i}$  实际是能量利用率。对于单药包爆破, 实验证明, 关系(1)是正确的<sup>[7]</sup>。关键是  $A_{0i}$  如何选取。工程上的办法是利用已成的工程资料反算  $A_{0i}$ , 再使用到新的工程上去。但由于工程上都是多排爆破, 而后排距河心远, 爆破的最小抵抗线大; 故这样得来的  $A_{0i}$  值便和最小抵抗线  $w$  值有关。 $w$  大则  $A_{0i}$  也大。因而导致能量利用率和爆破规模有关, 从而违反了几何相似律。在有关因素的分析中, 只有渗漏<sup>[8]</sup>的影响才能出现这一效应; 而渗漏的影响尚待研究。

整体弹道法是由平地定向爆破实验<sup>[9]</sup>发展起来的, 并在有关工程上进行了应用。这一方法中也有抛掷速度; 由于实际测试的困难, 故其所用的抛速值也是由实际堆积情况反算出来的。而实际堆积情况是由多种因素形成的, 因而反算出来的抛速值存在着很大的任意性。

## 1.2 过程和分析

定向爆破筑坝的抛掷堆积过程应包括三个阶段: 鼓包运动阶段, 弹道飞行阶段和滑移堆积阶段。

鼓包运动阶段是满足几何相似律的。因而在这阶段中, 介质运动的距离  $s_1$  和  $w$  成正比; 而抛速和  $w$  无关, 只和比药量  $Q/w^3$  有关; 这里  $Q$  是该药包的装药量。

弹道飞行阶段中, 由于重力  $g$  起重要作用, 故几何相似律不再成立: 即岩块的弹道抛掷距只和初抛速  $u_0$ , 落差  $H$  及抛射角  $\theta$  有关。因  $u_0$  和  $w$  无关, 故只要  $H$  和  $w$  无关, 则这一阶段的抛距  $s_2$  即不能和  $w$  有关。但若  $H$  和  $w$  成比例, 且抛距不很远时, 则  $s_2$  可以和  $H$  成比例<sup>[10]</sup>, 因而  $s_2$  也可和  $w$  成比例。这也是工程中常见的情况。

滑移堆积阶段实际包括两个效应, 一是抛掷体落地后, 其沿地表切线方向的速度还比较大, 因而将造成抛掷体落地后质心前移。另一效应是抛掷体落地的坍塌, 其坍塌宽度(沿抛掷方向)应和  $w$  成正比, 并和落地速度有关。我们以  $s_3$  和  $s_4$  表示这二个距离。

综上所述我们得到, 对于质心抛距则有:

$$s_c = s_1 + s_2 + s_3$$

对于最远抛距则有

$$s_M = s_1 + s_2 + s_3 + s_4$$

对质心抛距, 当  $s_2$  较大, 而  $s_2$  和  $s_3$  较小时, 如对小规模的平地定向爆破, 则  $s_c \approx s_2$ , 由于  $H=0$ , 故这时抛距  $s_c$  不能和  $w$  有明显关系。当  $w$  比较大,  $s_2$  和  $s_3$  较小时, 如对松动大爆破,  $u_c < 10\text{m/s}$ , 则  $s_2 < 10\text{m}$ ; 这时如  $H$  不大, 且抛掷体落地处的地面坡度不大, 则  $s_1$  是主要的。因而  $s_c$  和  $w$  有关, 如  $s_c = (3 \sim 5)nw$  等关系。对于一般的定向爆破筑坝工程,  $u_c \leq 20\text{m/s}$ , 若  $H=100\text{m}$  时, 则  $s_2 < 100\text{m}$ , 它比  $s_1$  大, 另外, 由于这时是斜坡地形,  $s_3$  可能和  $s_2$  相同。这样, 对于通常的定向爆破筑坝工程,  $s_c$  可能和  $w$  有正比关系; 当然,  $H$  不变只改变  $w$ , 则  $s_c$  和  $w$  却不能是正比关系, 即  $s_c$  对  $w$  的改变不应很敏感。

由于  $s_4$  的影响, 最远抛距  $s_M$  对  $w$  的依赖关系更应敏感些。

由此我们看到,  $w$  对抛距  $s_c$  和  $s_M$  的影响不能一概而论;  $w$  对抛距有影响不能导致  $w$  对抛速也有影响。而由现场的实际堆积情况反算抛速将不可避免地导致  $w$  影响的出现。

由于最终堆积情况是多因素决定的,因而用它反算抛速是不科学的。做为工程方法它仍未离开经验的范畴。这就是现用弹道法的主要弱点。

对于体积平衡法,则主要是受工程经验的限制;且  $s_x, s_y$  和  $w$  成正比是有条件的。同时由于滑移过程的存在,其主要公式中只用  $w$  是不够的。对多排爆破,则抛距公式应和爆破岩层的总厚度有关。

在定向爆破筑坝研究中,尽管对  $s_1$  和  $s_2$  的研究仍不够充分和深入,但还是有些规律可循,如几何相似律和弹道飞行时,空气阻力的影响很小<sup>[1]</sup>等。而对  $s_3$  和  $s_4$  我们几乎一无所知。本工作就是针对这一内容的一项实验研究工作。

## 2 实验布置

### 2.1 实验的布置

实验装置为一木制滑槽,如图1所示,宽29cm。滑槽可分为上下两部分,上部用以储砂,模拟被炸碎的山体,其底面是一抽板(后改为翻板),下部模拟山坡和河道,由一曲率半径为14.5cm的圆弧和二条45°的直线构成。当抽板快速抽出后,上部的砂即沿坡下滑,堆积于河道。为了减少摩擦,抽板敷设聚四氟乙烯薄膜(F<sub>4</sub>薄膜)。实验表明,只要抽板抽出的速度足够快,则抽板抽出速度的某些变化,对堆积结果无影响。

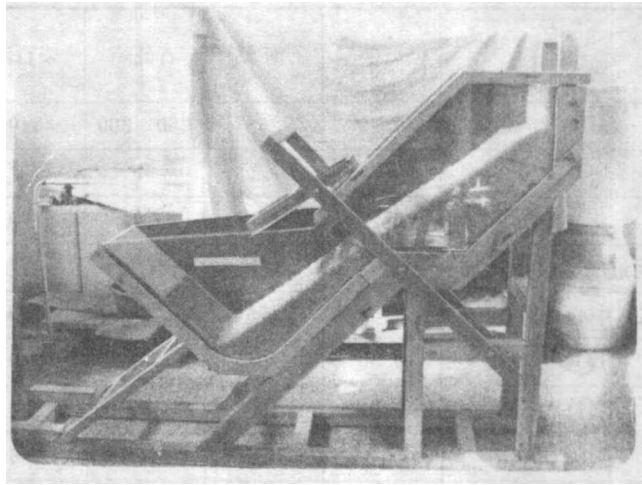


图1 实验装置

Fig. 1 Experimental equipment

我们研究的是平面问题。为了克服滑槽侧壁的影响,在木制的侧壁上也敷设了F<sub>4</sub>薄膜以减少其摩擦系数。对于玻璃侧壁,由于砂对玻璃的摩擦系数比对F<sub>4</sub>薄膜还要小,故可满足实验要求。

所用砂为一般建筑用机碎砂,最大粒径1cm左右,小的为几毫米,对级配未做统计和处理。其静内摩擦系数 $\mu=0.84$ 。由于砂粒下滑时产生岩粉,当岩粉太多时须予清除。

滑槽下部底板上可以用不同的材料敷面,以改变其摩擦系数,实验中用了F<sub>4</sub>、木板、60#砂布和橡皮板等四种材料。砂对这四种材料的静摩擦系数如表1。

表 1

Table 1

材 料	$F_t$	木板	60#砂布	橡皮
静摩擦系数	0.39	0.55	0.76	0.90

## 2.2 参数的选取

实验装置的尺寸是根据实验需要和可能确定的,具体尺寸大体决定于抽板处滑槽的高度,我们取为20cm。这样砂层的流动厚度便不能超过此值,因而选取砂粒的最大粒径不超过1cm。山坡坡角取为 $45^\circ$ 。

我们的实验装置能够改变砂体下滑的落差 $H$ 可从60cm分五挡降到35cm。只进行了 $H=60\text{cm}$ 和 $H=35\text{cm}$ 的实验。前者用于研究散体滑落和堆积的机理;后者则用以模拟现场情况和分析堆积参数。

低落差时实验参数和现场爆破的比较如表2。可以看到,本装置所提供的参数大体符合现场的情况。

表 2

Table 2

项 目	模型实验	南水	石砭峪	柴石滩
山高 $H_s/m$	0.70	256	250—300	340
坝高 $H_b/m$	0.15	62	57	70
爆厚 $B/m$	0.17	50	70	100
河道曲率半径 $R/m$	0.145	32.5	57.4	80
取方中心高度 $H_c/m$	0.55	155	150	190
可爆坡长 $S/m$	0.50	258	290	240
坝长 $L_b/m$	0.41	150	180	220
$L_b/R$	2.8	4.6	3.1	2.8
$H_b/R$	1.0	1.9	1.0	0.88
$K_s/H_b$	4.7	4.3	4.8	4.9
$S/L_b$	1.2	1.7	1.6	1.1
$H_s/R$	4.8	8.2	4.8	4.3
$B/R$	1.2	1.5	1.2	1.25

## 2.3 参数分析

砂在滑槽中的初始堆积和滑入河道后的堆积情况如图2所示。

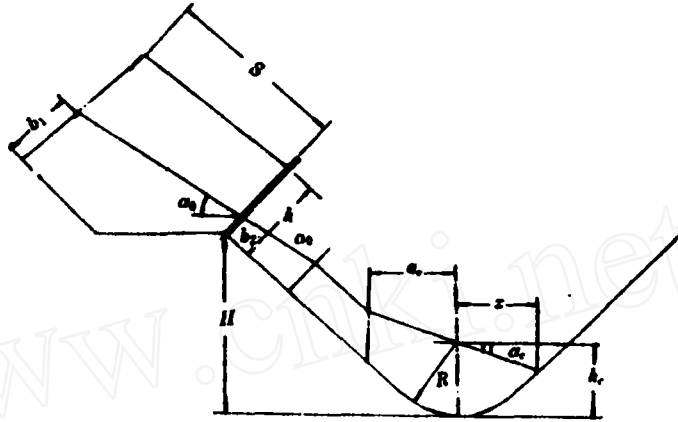


图 2 砂的初始堆积和滑落后的堆积情况

Fig. 2 Initial stack condition and stack condition after sliding down of sands

初始堆积情况可用二个参数表示; $S$ ——堆积坡长, $h$ ——堆积厚度。所用砂的内摩擦角为 $\delta$ ,故其内摩擦系数 $\mu = \tan \delta$ ;砂和底板的摩擦系数是 $f$ 。落差为 $H$ ,重力加速度为 $g$ 河道曲率半径为 $R$ ,砂的平均密度为 $\rho_c$ ,砂粒的特征尺度为 $d_c$ 。共九个参数。它们可以组成六个独立的无量纲参数; $f, \mu, h/R, H/R, S/R$ 和 $d_c/R$ 。我们看到, $\mu$ 和 $d_c/R$ 实际上是不变的;故实际有意义的参数只有四个。此外,这里不出现 $\rho_c$ 和 $g$ ,因此本问题是几何相似的。同时,当保持上述六个参数不变而改变 $\rho_c$ 时,所得结果不变。因此,对我们所选用的砂是石英砂,大理石砂,还是花岗岩砂,只要 $f$ 和 $\mu$ 相同,则所得结果相同。此外由于重力 $g$ 不出现,故实验结果和重力的大小无关;但 $g$ 不能为零。

实验用砂的静内摩擦角可达 $40^\circ$ ,故 $\mu = \tan 40^\circ = 0.84$ 。实验中 $S$ 坡的坡角即为 $40^\circ$ ;如我们仔细堆积,此角可略有增加,但很困难。由于初始参数中这一角度不变,故未予列出。至于实验用砂的动内摩擦角,后文将予说明。

### 3 实验结果及分析

由于实验中只有 $f, h/R, H/R$ ,和 $S/R$ 是可变的,故我们实际是研究这四个参数对堆积形状的影响。

#### 3.1 堆积的基本特征

堆积特征和滑落方量( $h$ 和 $S$ 的大小)有关。当方量小,即 $S$ 小或 $h$ 小时,则堆积体的表面线为曲线,如图 3。当滑落的方量大,即 $S$ 大或 $h$ 大时,则堆积的表面线接近于直线。这一现象和 $f, H$ 无关,其变化过程是:当方量由小变大,特别是 $S$ 增加时,滑落的砂首先充填堆积曲线的凹处,并逐渐填满直至形成直线。此后方量再增加时,则直线的形式大体不变,位置前移斜率略有增加。

由于堆积曲线具有上述特点,我们描述它时使用了三个参数; $x, h_c$ 和 $\alpha_c$ ,如图 2。

#### 3.2 大落差的情况

这时  $H=60\text{cm}$ 。由于  $R$  不变,故参数  $H/R$  不变;我们只研究  $f$ 、 $h/R$  和  $S/R$  的影响就行。

### 3.2.1 $x$ 的变化

$x$  是从河心算起的堆积体前沿的距离,如图 2。实验表明:当滑落方量不太大时, $x$  值只取决于  $h$  和  $S$  中的小者;即固定  $h$ ,在  $S \geq h$  的条件下增加  $S$  时,则  $x$  不变,图 4 表示了这一结果。同样,当固定  $S$ ,在  $h \geq S$  的情况下增加  $h$  时, $x$  的变化也不明显。由于实验中使用抽板放砂,在抽板时对其附近砂粒可能产生扰动;另外也由于这一组实验较难做,误差较大;

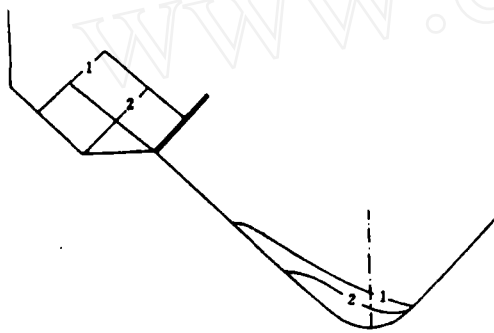


图 3  $S$  对堆积形状的影响,木底板

Fig. 3 Effect of  $S$  to stack form, plank bottom

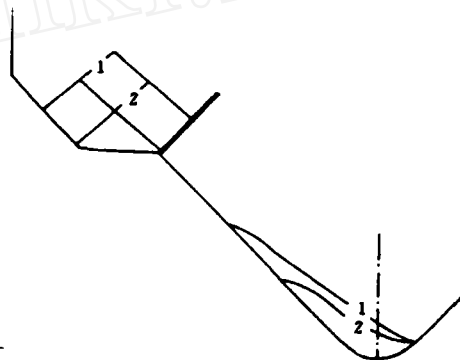


图 4  $S$  对  $x$  的影响,橡皮底板

Fig. 4 Effect of  $S$  for  $x$  rubber bottom

大;故结论只肯定为“变化不明显”,情况如图 5。

实验表明,方量减少时  $x$  趋于有限的正值  $x_0$ ,即只要初始堆积断面有一个砂粒下落,则其滑落距离也可超过河心。自然  $x_0$  值取决于  $f$  和  $H/R$ 。

综上所述,由于  $H$  和  $\mu$  不变,对确定的底板材料  $f$  也不变,因而上述影响参数中只有  $h/R$  和  $S/R$  是变的。虽然它们都可对  $x$  产生影响,但实验表明, $x$  值可能是它们中小的一个参数确定的;至少,当  $S \geq h$  时, $S$  对  $x$  不产生影响。实验表明,对确定的一次滑落和堆积,存在一个头部和尾部。当  $S \geq h$ ,固定  $h$  改变  $S$  时, $x$  值固定,增加  $S$  时只增加堆积体的厚度和堆积体的尾部。当然,如果滑落的方量太大时,即从某一  $S$  开始, $x$  值又开始增加;但这时堆积体的上表面线即转为直线了。

在  $S \geq h$  的条件下, $x$  和  $h$  的关系如图 6。我们看到  $x$  随  $h$  的增加而增加,对不同的  $f$  值其增加的规律是不同的。当摩擦系数  $f$  值小时, $f$  的影响较大,而当  $f$  达到或超过  $\mu$  时,它的影响消失,即对橡皮和砂布底板, $x-h$  关系几乎是重合的。这一现象是重要的,我们给予简单的解释。

砂粒沿本体滑落只能滚动,不能滑动,这是砂粒的多棱角状态决定的。把砂粒放置斜坡上,当坡角增加时,砂粒可以产生滑动,但很快即转变成滚动。且  $f$  值越大时这一现象越显著,即对大的  $f$  值,在砂体滑落时,滚动比滑动更易实现。砂体流动的下临界角约为  $32^\circ$ 。在我们实验的情况下,砂的下落是从本体开始的,因而是滚落的。当它进入坡道后,摩擦系

数  $f$  便产生影响:对于小  $f$  值的底板,如  $F_1$  底板,由于  $f < \tan 32^\circ$ ,故对某些受制不能滚动的砂粒还可产生滑动。这时砂在坡道上下落可能是滑动和滚动并存,甚至主要是滑动。显然,随  $f$  的增加,滑动成分逐渐减少,滚动成分逐渐增加。当滑动成分全部消失,砂粒全部滚动下落时,则  $f$  的影响便不出现了。因为  $f$  就是滑动摩擦系数,既然滑动成分消失,故  $f$  就不出现,因此当  $f \geq \mu$  时, $f$  对  $x-h$  关系的影响即不再改变。

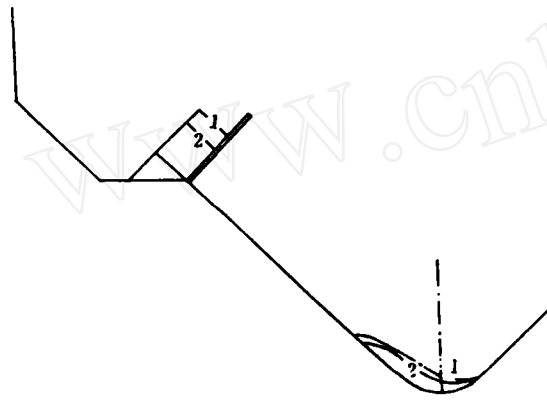


图 5  $h$  对  $x$  的影响,60# 砂布  
Fig. 5 Effect of  $h$  to  $x$ , 60# emery cloth bottom

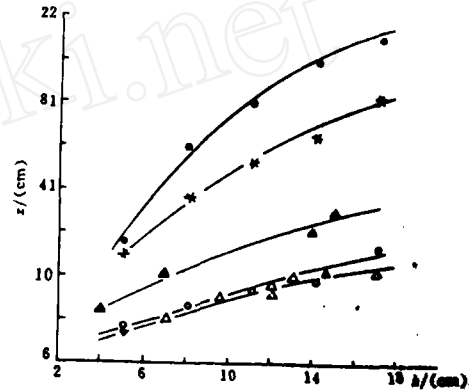


图 6  $x$  和  $h$  的关系曲线  $S \geq h$   
•  $F_1$  底板, \*  $F_1$  底板(有破口), ▲ 木底板,  
• 橡皮底板, △ 60# 砂布底板  
Fig. 6 relation of  $x$  with  $h$   
• PTFE bottom, \* PTFE bottom (rupture),  
▲ Plank bottom, • Rubber bottom,  
△ 60# Eemery cloth bottom

图 6 表明,减少  $f$  值可显著增加  $x$  值。实验还表明,对  $F_1$  底板,尽管堆积头部上冲很高,但未见回流现象,对其他底板材料也是如此。

### 3.2.2 河心堆积高度 $h_c$ 的变化

实验表明,对各底板材料,当固定  $h$  时, $h_c$  随  $S$  的增加而增加,同样,对固定的  $S$  值, $h_c$  随  $h$  的增加而增加,情况如图 7。

从堆积图上还可看出,摩擦系数  $f$  的影响主要表现在堆积头部的  $x$  值上。 $f$  值对  $h_c$  的影响并不显著, $f$  值对堆积体尾部的影响也不大,如图 8。当  $f \geq \mu$  时, $f$  对  $x$  的影响便不再改变。

### 3.3 小落差的情况

这时  $H = 35\text{cm}$ ,实验表明,不论方量大小如何摩擦系数  $f$  对堆积形状均无影响,情况如图 9。这样,实验中实际有意义的可变参数就只有  $h$  和  $S$  了。我们对  $h$  使用三个值,即  $h = 17\text{cm}$ ,  $h = 13\text{cm}$  和  $h = 9\text{cm}$ 。

堆积参数则较为复杂,我们取了八个参数。对头部取四个:即  $x, h_c, \alpha_c$ ——河心处堆积曲线的倾角和  $\alpha_c$ ——下段堆积曲线的转角位置。由于堆积体断面线大致为二段直线,上下

直线不同,其接头处产生转角, $a_c$ 表示下转角处至河心的距离,如图2。对上段直线,我们也用四个参数,即 $b_1, b_2, a_0$ 和 $\alpha_0$ ,均如图2。

实验结果如图10-13,据此我们看到:

a 对堆积体的头部,三个参数 $x/h, h_c/h$ 和 $\alpha_c$ 都是重要的。 $x/h$ 和 $h_c/h$ 均随 $S/R$ 的增加而增加;如用幂函数去拟合实验关系,则幂指数均小于1,当 $S \rightarrow 0$ 时, $x$ 可趋于有限正值,其原因已如前述。这一类十分重要。利用图6的曲线外推,当 $h \rightarrow 0$ 时, $x_0 = 60\text{cm}$ ;利用图14外推,则得 $x_0 = 4\text{cm}$ 。这表示被炸碎的岩体从爆破漏斗滚落形成的堆积体的头部可以超过河心,达到对岸。这一点,在一定意义上决定了用滑坡原理进行定向爆破筑坝的可能性。

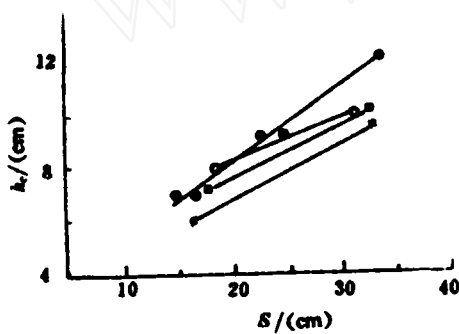


图7 不同 $f$ 时, $h_c$ 和 $S$ 的关系

• 木底板,  $h=15\text{cm}$ , • F<sub>1</sub>底板,  $h=14\text{cm}$

□ 橡皮底板,  $h=14\text{cm}$ , \* 60# 砂布底板,  $h=14\text{cm}$ ,

Fig. 7 Relation of  $h_c$  with  $S$ , for different  $f$

• Plank bottom,  $h=15\text{cm}$ , • PTFE bottom,  $h=14\text{cm}$ ,

□ Rubber bottom,  $h=14\text{cm}$ ,

\* 60# Emery cloth bottom  $h=14\text{cm}$

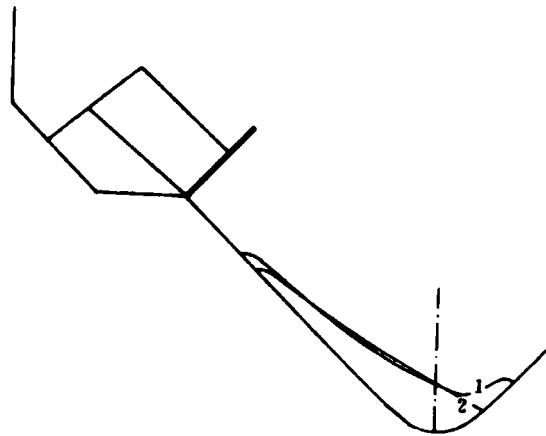


图8 堆积体尾部的对比

1. F<sub>1</sub>底板, 2. 橡皮底板

Fig. 8 Comparison of stacking tails

1. PTFE bottom, 2. Rubber bottom

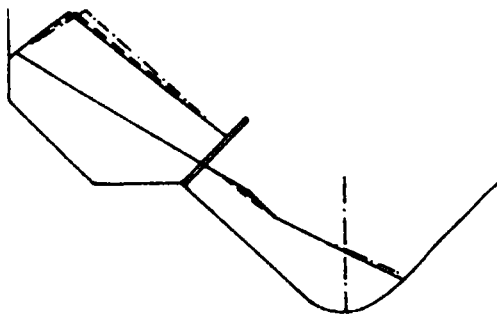


图9 底板摩擦系数 $f$ 不影响堆积形状

——橡皮底板, ---F<sub>1</sub>底板, - · - 木底板

60# 砂布的堆积线与橡皮的堆积线重合

Fig. 9 Friction coefficient of bottom no

affects the stack form

—— Rubber bottom, ---PTFE bottom,

- · - Plank bottom

stack curve of 60# emery bottom coincides with

the stack curve of the rubber bottom



另一方面,  $S \rightarrow 0$  时,  $h_c \rightarrow 0$  这是因为  $S \rightarrow 0$  时滑落的方量趋于零, 因而堆积厚度趋于零。

对于  $\alpha_c$  和  $S/R$  的关系, 我们看到, 当  $\alpha_c < 32^\circ$  时,  $\alpha_c$  和  $S/R$  大致为直线关系, 如图 10, 而当  $\alpha_c$  接近  $32^\circ$  时, 其关系变成曲线, 如图 12, 且  $\alpha_c$  逐渐趋于  $32^\circ$  左右的渐近值。  $S/R$  从 1 增加到 4 时,  $\alpha_c$  从  $20^\circ$  增加到  $32^\circ$  左右, 变化并不显著。随  $h$  的减少, 对同样的  $S$  值,  $\alpha_c$  是增加的; 但它接近于  $32^\circ$  左右时, 便不再增加。这时, 不同  $S$  的堆积表面线在河心处的斜率相等; 即堆积表面线大体平行, 与之相适应的  $x/h$ , 和  $h_c/h$  与  $S/R$  的关系也发生变化,  $(x/h) - (S/R)$  关系由不敏感变成较敏感的线性关系。由此, 我们可以得到, 对现场爆破, 增加爆破的最小抵抗线  $w$  和减少延发时间是有利的。因这时  $h$  值较大, 从而  $x$  和  $h_c$  均较大而  $\alpha_c$  较

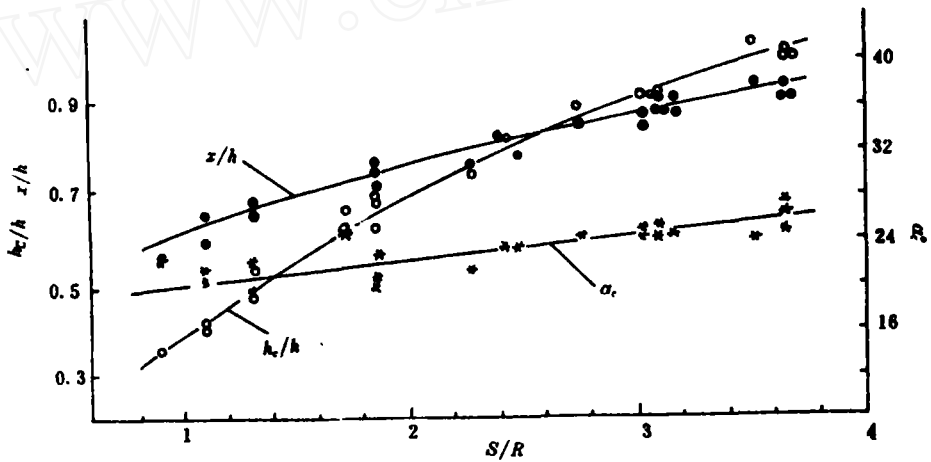


图 10  $x/h, h_c/h$  和  $\alpha_c$  与  $S/R$  的关系,  $h=17\text{cm}$

Fig. 10 Relation of  $x/h, h_c/h$  and  $\alpha_c$  with the  $S/R$

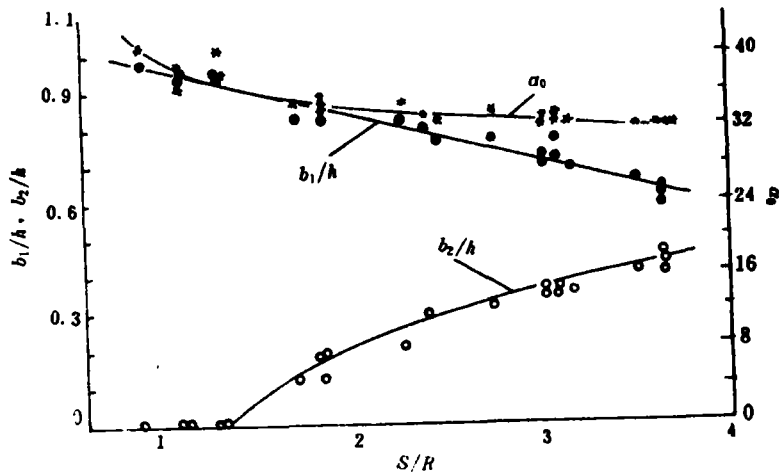


图 11  $b_1/h, b_2/h$  和  $\alpha_c$  与  $S/R$  的关系,  $b=1\text{cm}$

Fig. 11 Relation of  $b_1/h, b_2/h$  and  $\alpha_c$  with  $S/R$

小,即增加了坝体有效方量。

b 对堆积体的尾部,最重要的参数为二个,即  $b_2$  和  $\alpha_0$ 。抽板处的堆积厚度  $b_2$  随  $S/R$  的增加而增加。当  $S/R$  在 1 和 1.5 之间时,堆积体上段和下段可能断开;当  $S/R < 1$  时它一定断开。

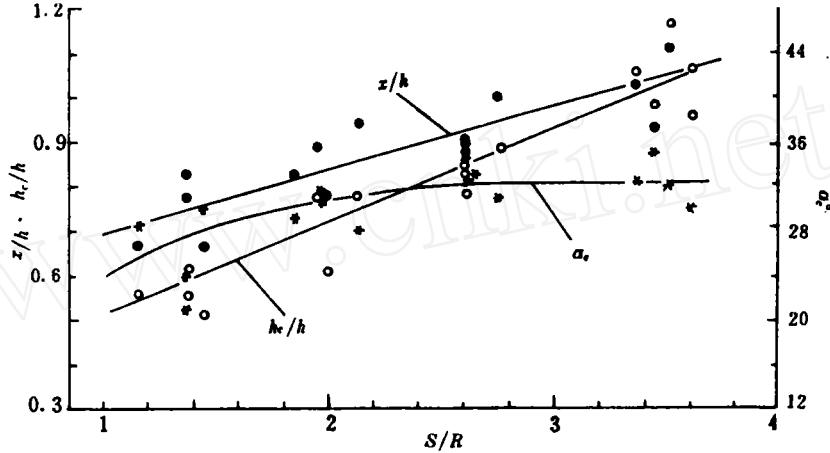


图 12  $x/h, h_c/h$  和  $\alpha_c$  与  $S/R$  的关系,  $h=9\text{cm}$

Fig. 12 Relation of  $x/h, h_c/h$  and  $\alpha_c$  with  $S/R$

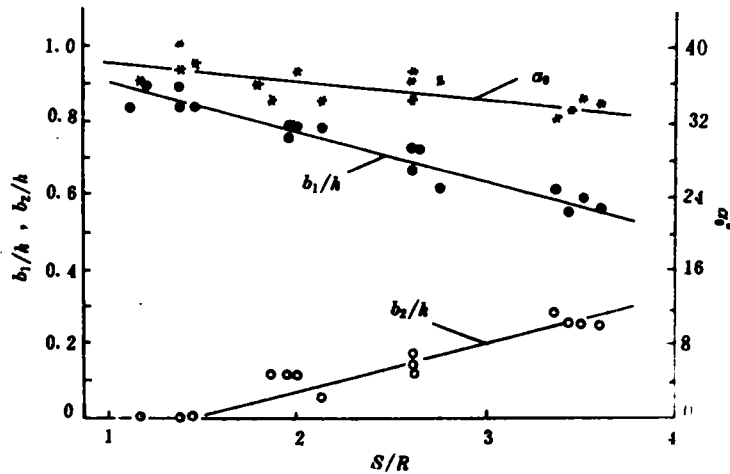


图 13  $b_1/h, b_2/h$  和  $\alpha_0$  与  $S/R$  的关系,  $h=9\text{cm}$

Fig. 13 Relation of  $b_1/h, b_2/h$  and  $\alpha_0$  with  $S/R$

$\alpha_0$  则随  $S/R$  的增加而减少。值得注意的是,对于较大  $h$  值,  $\alpha_0$  的减少也有渐近值,同样也是  $32^\circ$ ;而当  $\alpha_0 < 32^\circ$  时,  $\alpha_0$  和  $S/R$  的关系也是直线。显然,  $32^\circ$  是一个特征角;我们用  $\alpha_2$  表示,即  $\alpha_2 = 32^\circ$ 。由前,这个角表示:在自然滑坡情况下,砂体从运动状态到静止时,其坡角不能超过  $\alpha_2$ ,这是一个由动到静的临界角。砂的另一个临界角,即由静到动的临界角为  $\alpha_1$ 。由前文和  $\alpha_0 \sim S/R$  曲线可知,如图 11 和图 13,  $\alpha_1 = 40^\circ$ 。即砂体能够自然下滑,则其坡角必须超过  $\alpha_1$ 。对于  $\alpha_0 \sim S/R$  关系,我们给出如下说明:当堆积体上下段断开时,  $\alpha_0 = \alpha_1$ ;而当堆积体上下段联接后,  $\alpha_0$  的变化并不大;由  $36^\circ$  变化到  $32^\circ$ 。这时  $32^\circ$  实际上也是  $\alpha_2$ ,即动

转静的临界角;这是因下段的阻挡而致的上段流动逐渐停止的结果。

由此可见,用滑坡原理进行定向爆破筑坝时,其山坡坡度应超过 $40^\circ$ ;而当山坡坡度在 $32^\circ$ 左右时,滑坡的作用即很小。这时的定向爆破筑坝只能靠抛掷作用。对于爆区的后坡,其临界坡度约为 $\alpha_2$ ,爆破方量它对可能略有影响。

c  $a_c$  的规律性较强,实验表明,对于我们所用的三个 $h$ 值, $a_c$ 和 $S$ 关系不大,均为17cm左右,但 $a_0$ 却无明显的规律性,其值由零改变到30cm。

d 当 $f \geq \mu$ 时, $H$ 对堆积形状的影响不大。图14是 $x-S$ 系,可以看到,当 $f \geq \mu$ 时, $H$ 对 $x$ 的影响不明显;同样,实验也表明, $H$ 对 $h_c$ 的影响也不大。因此,当 $f \geq \mu$ 时, $H=60\text{cm}$ 和 $H=35\text{cm}$ 的堆积体的差别并不显著。当然,这是 $S$ 不超过40cm的结果。

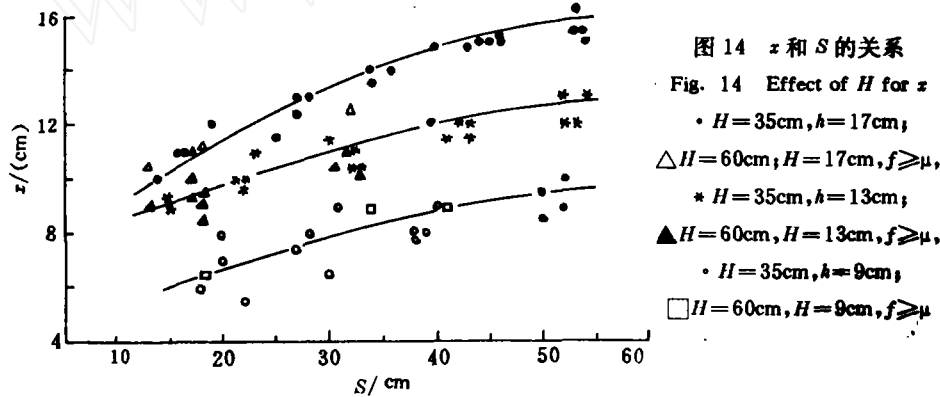


图14  $x$ 和 $S$ 的关系

Fig. 14 Effect of  $H$  for  $x$

•  $H=35\text{cm}, h=17\text{cm};$

$\triangle H=60\text{cm}, h=17\text{cm}, f \geq \mu,$

\*  $H=35\text{cm}, h=13\text{cm};$

$\blacktriangle H=60\text{cm}, h=13\text{cm}, f \geq \mu,$

•  $H=35\text{cm}, h=9\text{cm};$

$\square H=60\text{cm}, h=9\text{cm}, f \geq \mu$

这样,对参数 $f$ 和 $H$ 来说,当 $H=35\text{cm}$ 时, $f$ 对堆积形状无影响;当 $H=60\text{cm}$ 时, $f < \mu$ 时,它只影响堆积体头部的 $x$ 值,当 $f \geq \mu$ 时,它对堆积形状无影响。此外,实验还表明,当 $f \geq \mu$ 时, $x$ 对 $H$ 的变化不敏感。

e  $h=17\text{cm}, S/R$ 取大值时,符合我国当前定向爆破筑坝的实际情况参见表2。这时 $\alpha_c$ 为 $26^\circ$ 左右。可见在较好的地形条件下,用松动爆破炸碎岩体,并使之推出爆破漏斗,沿山坡下滑,最后堆积成坝是完全可能的。它可减少用药量和废方,改善边坡状况,为了把更多的方量推出爆破漏斗,使用平面布药是合理的。

#### 4 结论和问题

a 抛距并非无条件地和最小抵抗线 $w$ 成正比关系;抛速不能和最小抵抗线 $w$ 有关。故当前使用的三个抛掷堆积算法,均是经验性的和工程性的。

b 在较好的地形条件下,用松动爆破进行定向爆破筑坝是完全可能的。在散体从静止状态下滑落的问题中,几何相似律是成立的,本实验结果可供工程实践参考。

c 堆积体可分为头部和尾部,影响坝体形状和拦洪高程的主要是堆积体的头部。当山坡上有泥土复盖时, $x$ 值可能增加,且爆破区高度有影响。若山坡无复盖层时,则 $x$ 较小,爆区高度的影响也不大;这时的影响因素很简单。

d 散体从静止状态下沿山坡流下时,可能存在二个临界角:一是砂体能保持稳定的

最大倾角  $\alpha_1$ , 我们用的砂, 其  $\alpha_1 = 40^\circ$  左右; 二是砂体停止下流的最大坡角  $\alpha_2$ , 对我们的用砂,  $\alpha_2 = 32^\circ$  左右, 这是二个重要参数。

e 砂粒是滚动下落的, 因此我们不能指望堆积有很大的密度。在现场中, 由于落差  $H$  值较大(可达 100m 以上)因此, 滚落时岩块受力较大。受力大的岩块将产生破坏。随着岩块的破坏, 受力将均匀化; 岩块的级配将趋于合理, 故堆积体的密实度也不会太小。

f 我们的实验是从静止状态下滑落的, 实际上即使是松动爆坡, 其初抛速也可达  $5 \sim 10\text{m/s}$ 。本实验不能反映这一因素。更重要的是, 对材料参数我们只取了  $\mu$  值, 显然, 对一般的散体这是不够的。如散体的固体的含量  $\nu$ 、岩块碰撞的破坏率、变形的恢复率等我们均未予考虑; 因此, 本文的相似律, 严格讲是近似的。至于河水和山坡坡度的影响, 我们尚未考虑。

### 参 考 文 献

- 1 Lun C K K, Savage S B, Jeffery D J, et al. *J Fluid Mech*, 1984, 140, 223
- 2 Григорян С С, и др. *Нижнерная Геология*, 1983, 6 : 61
- 3 Savage S B, Hutter H. *J Fluid Mech*, 1989, 99 : 177
- 4 冯叔瑜, 朱忠节, 马乃耀. 体积平衡法, 土岩爆破文集, 北京: 冶金工业出版社, 1980 : 19
- 5 波克罗斯基 Г И. 定向爆破筑坝的理论与实践, 北京: 水利出版社, 1957
- 6 霍永基, 钱瑞伍, 马贵臣. 定向爆破抛掷堆积计算, 水科院抗震防护所. 北京, 1978
- 7 黄元清. 爆破介质抛掷运动的观测与研究, 土岩爆破文集. 北京: 冶金工业出版社, 1980, 35
- 8 许连坡. 爆炸与冲击, 1985, 5(4), 1-10
- 9 金星南, 许连坡, 周家汉. 平地定向爆破试验研究. 土岩爆破文集, 冶金工业出版社, 1980
- 10 许连坡. 爆炸与冲击, 1990, 10(3), 198-208
- 11 许连坡. 爆炸与冲击, 1986, 6(3), 238-245

## EXPERIMENTAL STUDIES FOR THE SLIDING FALL OF DIVIDUAL BODIES AND ITS PILE LAW

Xu Lianpo Lu Yiang Li Jinhua

(*Institute of Mechanics, Academia, Sinica, Beijing 100080*)

**ABSTRACT** In this paper, the problem of broken stones piled in river is studied by model experiments, those stones are broken by explosion and slid from the hillside. The conclusion obtained is that it is possible to built a dam by directional blasting with the effects of flexible blasting and slid from the hillside.

**KEY WORDS** directional blasting dam construction, granular material sliding down, stacking up friction coefficient