

“填石排淤法”中的泥石回流效应*

许连坡 章培德

(中国科学院力学研究所, 北京, 100080)

提 要

本文对“填石排淤法”中的泥石回流效应进行了分析研究, 其结果为淤泥的粘性始终起阻力的作用; 当重力与粘滞力之比超过150时, 淤泥的粘性和初始堆积形状的影响即可忽略。

一、前 言

研究表明^[1]: “填石排淤法”中石舌的产生原因, 首先是爆炸空腔的膨胀作用把淤泥挤入堆石体中, 从而把岩块挤出; 其次是当爆炸空腔中的气体压力降低到低于大气压力和重力之和时, 在大气压力和重力的作用下, 海水和淤泥产生回流把岩块带入爆炸空腔中。本文的目的是研究这一泥石回流的过程。

二、试验布置和参数分析

(一) 试验布置

由于泥石回流过程的复杂性, 不能准确知道回流开始时水、泥和岩块的初始堆积状态, 因而采用效应较明显的“溃坝”布置形式, 情况如图1。试验是在经防水处理的木槽中进行的。木槽宽30cm, 高37cm, 长150cm。左端开口, 右端封闭。距右端65cm处设抽板。抽板的右侧装满泥石混合料。抽板的上部是可变角度的斜板, 其倾角分别为 65° , 55° , 45° 和 35° 等。当抽板快速抽出后, 其右侧的泥石混合料即产生流动。流动停止后, 测量堆石体的堆积曲线AOB。

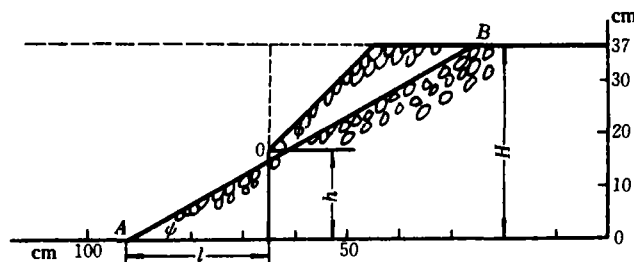


图1 试验布置图

*国家自然科学基金资助课题。

到稿日期: 1991-07-19.

由于“填石排淤法”在现场施工时,泥石的运动基本是平面运动,故试验中研究的也是平面运动,这就要求尽量减少木槽侧壁的影响,增加木槽的宽度;但木槽太宽又必然增加试验工作量。为此我们结合其它试验考查了槽宽对运动的影响。在1m宽槽中的试验结果表明:①对于纯石块,1m宽的槽中和30cm宽的槽中,其中心断面的堆积曲线相同,侧壁的影响局限于距侧壁5cm之内;②对于泥石混合物,当泥的粘度较大时,即 $w_s=80\%$ 和 $w_s=93.6\%$ 时,木槽的宽度对流动有较大的影响。因此,本文中的这两组试验值是1m宽槽中的数据。当含水量 w_s 达到和超过122.5%时,两种试验槽中的堆积曲线相同。

每次试验均在堆积体中部的均匀部分测3个断面,然后进行平均,从而可得堆积曲线AOB, AO的水平距离即为 l 。

岩块为平均粒径 $d_c=5\text{cm}$ 的机碎石,重度 $\gamma=16\text{kN/m}^3$ 。淤泥为连云港海淤,天然含水量 $w_s=80\%$,密度 $\rho=1.55\text{g/cm}^3$ 。泥石混合物中,泥石的体积比为2:3,即泥的体积为40%,岩块的体积为60%。也就是岩块的孔隙为淤泥所充满。试验中此参数不变,因此在参数分析中不再写出此参数。

试验表明,当抽板抽出的速度达到某一数值后,再加快抽板速度,对试验结果已无影响。

(二) 参数分析

本问题中有4个独立的几何参数:泥石堆积高度 H ,抽板处的泥石堆积高度 h ,岩块的平均粒径 d_c 和泥石堆积体头部的坡角 ϕ ,见图1;岩块的物理参数有3个:岩块的重度 γ ,岩块间的摩擦系数 μ_0 和岩块与底板的摩擦系数 μ_1 ,淤泥的独立参数只有2个:淤泥的粘度系数 η ,幂律指数 α 。试验给出,当淤泥的含水量 w_s 增加时, α 不变,故本试验中控制 α 不变。淤泥的含水量 w_s 和其粘度系数 η 的关系已在文献[2]中给出;饱和淤泥的密度 ρ_n 和 w_s 有如下关系:

$$\rho_n = \frac{(1+w_s)\rho_c}{1+w_s\rho_c} \quad (1)$$

这里 ρ_n 是其固体颗粒的密度,一般为 $2.65\sim 2.7\text{g/cm}^3$ 。因而 ρ_n 不是独立的。为了便于分析,列下表给出不同含水量时淤泥的 η 和 ρ_n 值。 η 的量纲是 $\text{Pa}\cdot\text{s}^\alpha$,详见文献[2]。

表1 不同含水量时淤泥的 η 和 ρ_n 值

$w_s(\%)$	80	93.6	122.5	131	145.1	167.8	180.1	184.2	199.8	219.6
$\eta(\text{Pa}\cdot\text{s}^\alpha)$	2830	355	80.7	62.3	43.7	28.0	23.0	21.7	17.6	13.9
$\rho_n(\text{g/cm}^3)$	1.54	1.48	1.39	1.37	1.35	1.31	1.29	1.28	1.27	1.25

加上重力加速度 g ,一共有10个参数,可以组成7个独立的无量纲参数: h/H , d_c/H , ϕ , μ_0 , μ_1 , α , π_r 。 π_r 即重力与粘滞力之比($\pi_r = \frac{\gamma_0 H}{\eta \left(\frac{\sqrt{gH}}{d_c}\right)^\alpha}$)。由于本文中 H , μ_0 , μ_1 , d_c 和 α 都不变,故可变参数只有3个,即 h/H , π_r 和 ϕ 。因此,我们将研究这3个参数对滑移距离 l 的影响。

根据 π 定理,有

$$l/H = f(h/H, \pi_r, \phi) \quad (2)$$

原则上,其目的是找到这一关系,但通过试验寻求这3个参数的关系曲线的工作量之大是可想而知的。为此,本文主要研究参数 π_r 的影响,并结合参数 h/H 和 ϕ 的变化来研究初始堆积形状的影响。

三、试验结果和分析

(一) 纯石块情况

作为问题的基础,首先要了解纯石块时溃坝的塌落距离。这时,由于没有淤泥,参数 π_r 消失。由于现场抛填体的自然坡度为 45° ,故取 $\phi = 45^\circ$ 。这样,式(2)中只有一个可变参数 h/H 。

1. 塌落现象

试验表明,当抽板快速抽出后,堆石体的头部端面是以倾倒的方式塌落的,且这一现象和 h 的大小无关。端面顶点的石块落点最远,其右侧的石块依次落点渐近。原堆积在顶面的石块,塌落后也在表面,塌落情况如图2所示。其中带箭头的斜线表示几个特征石块塌落后的位置。经常是端面顶点尖角处的石块落在连续堆积体之前。在泥石混合料的滑落中,当泥的粘度较大时,这一现象仍有表现。

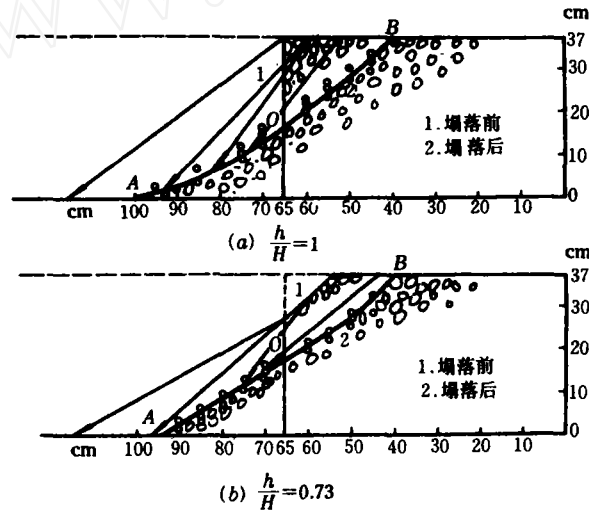


图2 堆石体塌落情况

应当指出的是,端面倾倒的特征是在平板的条件下出现的。当底板的倾角为 45° 时,则堆石体是从端面的底部先流出的,而不是端面的倾倒。

2. 塌落距离

相对塌距 l/h 和 h/H 的关系如图3所示。由图见数据较为分散,得不到 l/h 和 h/H 之间明确的变化关系,但堆石体的塌落距离 l 和其端面高度 h 大体相等,或 l 比 h 稍大一些。

3. 塌落后的坡度

ϕ 和 h/H 的关系如图4所示。由图知坡角 ϕ 随 h 的增加而减少,且有一个渐近值。非常有趣的是,曲线的特征和斜坡上散体(砂粒)滑落的情况十分类似^[9], h 小时,滑落后的上部堆积角为初始堆积角,即 $\phi = 45^\circ$;渐近值 $\phi \approx 32^\circ$,即散体滑落的第二临界角,也就是散体由

运动状态到静止状态的可能最大坡角。超过此角,运动便不能停止。散体的第一临界角为初始堆积角,即静摩擦角,这里是 45° 。散体堆积坡角超过此角时,堆积便不能稳定。它也是散体在重力作用下由静止状态到运动状态的最小临界角。低于此角,散体便不能产生流动。

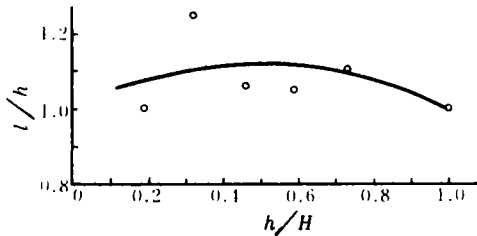


图3 塌落距离 l/h 和 h/H 的关系

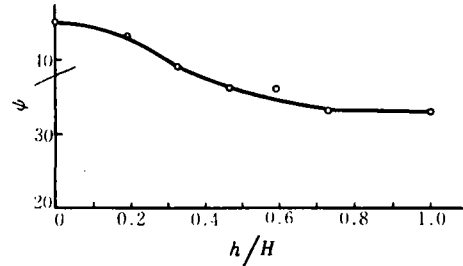


图4 堆石体塌落后的坡角 ψ 和 h/H 的关系

(二) 泥石混合料的情况

这里专门研究参数 π_r 的影响。为此取参数 $h/H=1$,见图1。这时堆积体端面的斜坡部分消失,故参数 ϕ 消失。因此前述的3个参数中只有 π_r 是可变的。改变 η 以观察 π_r 对 l 的影响。

1. 塌滑现象

当参数 π_r 较小时,粘滞力较大。这时当抽板抽出后,泥石堆积体的端面不能立即产生倾倒,情况如图5(a):端面上部逐渐产生倾倒以至塌落,下部不动。当 $w_s=93.6\%$, $\eta=355\text{Pa}\cdot\text{s}^a$ 时,情况如图5(b):端面上部现象如前,只是过程快些。下部淤泥带动石块开始产生流动,但过程很慢。

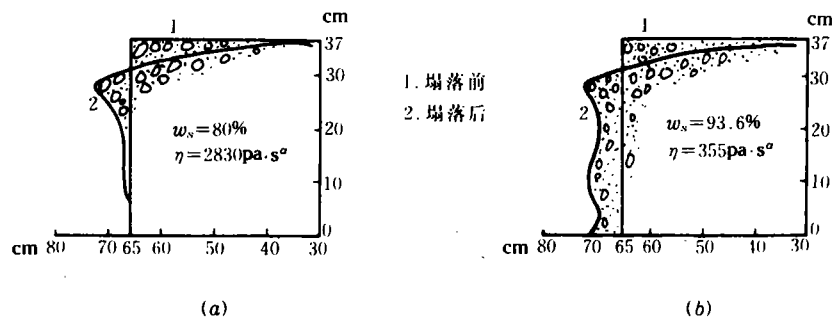


图5 端面变化情况

当 π_r 值达到100左右时,粘性已较小。这时泥石体端面已不再出现倒塌现象,只出现沿底板的流动,如图6。流动的距离比纯石块时略大。

当 π_r 值达到150时,情况如图7。其基本特征和 $\pi_r=107$ 时相近,流动的距离增加,其 l 值只比纯水时少20%左右。即这时粘滞力的影响已经不大了。

因此,当淤泥的粘度较大时,泥石堆积体在溃坝条件下不能产生流动。这时泥石混合料的运动表现出纯石块的运动特征——端面倾倒,但因泥的影响,过程进行得较慢。当粘性较小时,淤泥的运动特征表现出来,混合料产生沿底板的流动。且随着 π_r 的增加,这一流动特征逐渐占优势。

2. l/H 和 π_r 的关系

由图8可以看到,随 π_r 的增加或粘滞力的减少,流动距离 l 单调增加。可见,淤泥的粘性

在这一过程中始终起阻力的作用。π_r在80~160之间，l/H随π_r迅速增加；当π_r超过160再增加时，l/H的变化就不显著了。可见当π_r>150时，粘滞力的影响已经很小了。

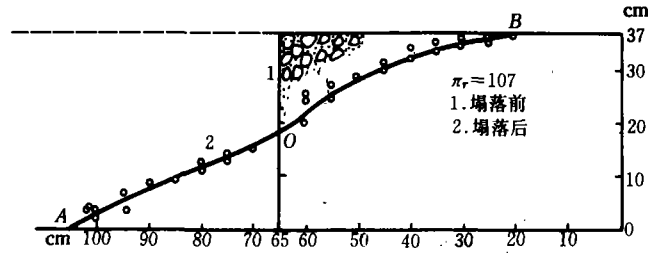


图6 泥石堆积体产生流动

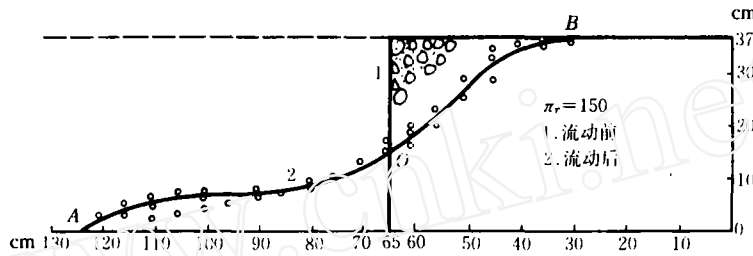


图7 泥石堆积体的流动

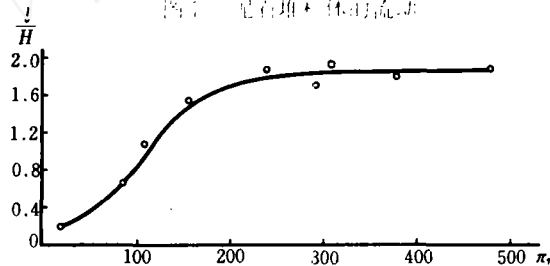


图8 l/H和π_r的关系曲线

前文定义π_r是岩块重力与淤泥的粘滞力之比，而实际上导致淤泥流动的是淤泥的重力而不是岩块的重力，故π_r表达式中的γ₀H应换成淤泥的重力γ_nH似更合理。因此对应π_r>150的

是 $\frac{\gamma_n H}{\eta \left(\frac{\sqrt{gH}}{d_c}\right)^\alpha} > 80$ 。现场情况如果是纯原状泥，则当泥深达到22~23m时，粘性的影响才能忽略。

考虑到现场是有水的，且是经过爆破扰动稀释的淤泥，如其含水量能达到93.6%，则2~3m泥深时，其粘滞力就可忽略了。估计现场的实际情况可能在二者之间。

由于填石排淤法的第一个过程是动压ρ₀D²起主要作用^[1]，这里ρ₀是炸药的密度，D是炸药的爆速，因而粘滞力的影响可以忽略，几何相似律成立。对于第二个过程，当淤泥较深时，粘滞力也可忽略。此时重力加速度g不出现在式(2)中，因而几何相似律也成立。这样，填石排淤法的前两个过程，对较深的淤泥几何相似律成立，这一点很重要，它给工程实践带来极大的方便。

(三) 初始堆积形状的影响

首先取h/H=1，φ消失，即泥石堆积体斜坡部分消失；其次取h/H=0.4，即h=15cm，

ϕ 取 35° , 45° , 55° 和 65° 。 $\pi_r=150$, 即粘滞力的影响可以忽略。相应的堆积曲线如图9。由图见, 各堆积曲线的滑移距离 l 是相同的。试验表明, 当 $\pi_r>150$ 时, 这一结果也成立。由此我们得到: 在粘滞力可以忽略的情况下, 初始堆积形状对滑移距离的影响也可以忽略。这里的滑移距离系指石块被淤泥流动冲出的距离, 它对工程是有意义的。

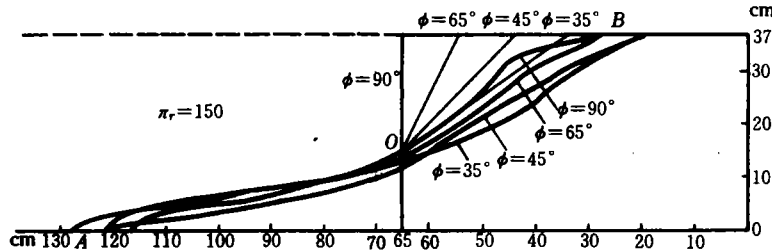


图9 初始堆积形状的影响

综上所述, 在式(2)中, 当 $\pi_r>150$ 时, 各参数的影响均不出现了。这时参数 l/H 可以写成

$$l/H = f(d_c/H, \mu_1, \mu_0, \alpha) \quad (3)$$

对于连云港淤泥, α 是常数; 对新采下的岩块, μ_0 的变化不大。因此, 当 $\pi_r>150$ 时, l 只和 d_c/H 与 μ_1 有关, 即

$$l/H = f(d_c/H, \mu_1) \quad (4)$$

应当指出的是, 本试验中采用 $d_c/H=0.135$; 而对其它的 d_c/H 值, 形式上, 粘滞力可以忽略时所对应的 π_r 值可能是不同的, 但因 $\pi_r>150$ 表示重力比粘滞力大得多, 故这一物理条件不应受 d_c/H 的影响, 因而对不同的 d_c/H 值, 条件 $\pi_r>150$ 不会有太大的变化。此外, 试验中泥石混合料的泥石体积比为2:3, 是不变的。事实上, 在保证混合料均匀的前提下, 改变泥石体积比是很难做到的。当然, 这一参数所反映的物理机制, 可以通过其它途径予以研究。本文未做这方面工作。

四、结 语

1. 对纯石堆积体在溃坝形式下倒塌时, 其端面的运动特征是倾倒。显然, 纯淤泥作为流体, 它产生溃坝时的运动是流动。

2. 对泥石混合体, 当泥的粘度大时, 端面顶部产生倾倒, 底部不动; 当泥的粘度减小时, 端面顶部倾倒, 底部产生流动; 以后随泥的粘度进一步减小, 流体运动的特征逐渐增加; 当泥的重力与泥的粘滞力之比超过80时, 则粘滞力即可忽略, 混合料的运动为流动。

3. 当 $\pi_r>150$ 时, 岩块的流动距离基本不再随 π_r 的增加而增加, 这时堆积体的原始形状对岩块的运动距离已无大影响。

4. 在现场爆破中, 在适当的泥水深度下, 填石排淤法的前两个过程是几何相似的。

参 考 文 献

- [1] 许连坡. 填石排淤法中的爆炸作用. 爆炸与冲击, 1992, 12(1): 54~61.
- [2] 许连坡. 在爆炸载荷作用下连云港淤泥的粘性特征. 爆炸与冲击, 1990, 10(4): 297~301.

- [3] 许连坡, 刘以纲, 李金华. 散体滑落与堆积规律的实验研究: 中科院力学所“七五”攻关研究报告. 北京: 中科院力学所, 1990.

Back Flow Effect of Ooze-rock in the Toe-shooting Method

Xu Lian-po Zhang Pei-de

(Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing)

Abstract

The back flow effect of ooze-rock in toe-shooting method was analyzed. It concluded that the viscosity of ooze is a drag of motion of the ooze-rock all along; when the ratio of gravity to viscous resistance is over 150, i.e. the $\pi_r > 150$, the influences of viscosity of ooze and initial fill form of the ooze-rock can be all neglected in the back flow of the ooze-rock.

www.cnki.net