

填石排淤法中的爆炸作用

许连坡

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 通过模型实验, 本文研究了填石排淤法的作用机理; 得到: 石舌的产生是爆炸空腔把淤泥挤入堆石体中挤出的; 当爆炸空腔的压力降低到低于大气压力和重力之和时, 由于水和淤泥的回流又把岩块冲入空腔或爆坑; 以后爆破的强烈震动又把堆石体中的淤泥挤出, 从而形成稳固的基本落底的堤坝。本文还给出了现场爆破效率和炮位的关系。文中的比药量值可供工程参考。

关键词 填石排淤法 石舌 淤泥 堆石体

一、前言

填石排淤法, 在国外称“Toe-Shooting Method”, 在美国1954年以前这一方法已成熟^[1]。在苏联^[2], 六十年代就把此法用于工程实践。其工程布置情况如图1。

本文的目的是研究石舌产生的原因和有关参数的影响。

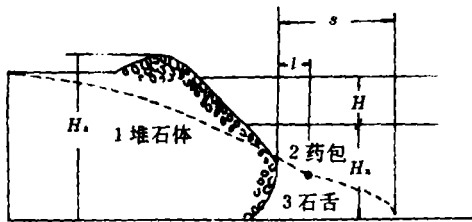


图1 填石排淤法布药图

Fig. 1 Arrangement of the Toe-Shooting method

1—Rock fill, 2—Explosive package,
3—Rock tongue

二、实验布置和参数分析

1. 现场情况

工程中使用的参数为: 泥深 H , 和装药半径 R 之比为40—80; 水深 H 和 H_0 之比约为0.4~0.6。这时效率 SH_0/q 和炮位的关系如图2。其中 S 为石舌的长度, l 为药包到堆石体前沿的水平距离, q 为单位长度(m)的装药量。显然, 纵坐标是1kg炸药所能处理的淤泥体积。图2表明, 处理淤泥的效率和炮位有关, 且存在一个最优炮位。

现场爆破时发现: 堆石体下落是在淤泥被抛出之前。因此石舌的产生应和爆炸空腔的膨胀有关, 而不是和爆坑有关。此外, 爆后堆石体的前端沉入水中, 且产生横向裂缝; 越往后, 塌陷越少, 离爆破点适当距离后, 抛填的堆石体便不受影响。

2. 实验布置

由于装药半径 R , 布药距离 l 均比装药长度 L 小很多, 故本问题基本是平面问题。实验在铁箱中进行。为了能大致模拟现场的情况, 实验布置如图3。实验铁箱长为3.0m, 宽为1.0m, 深为0.5m。为了减少变形的影响, 箱的四周进行了加固处理; 为了防止爆炸时, 铁箱

1991年2月23日收到原稿, 6月18日收到修改稿。

的跳动,箱底用地脚螺钉固定在基础上,基础为砼基座,长宽和箱底尺寸相同,厚 0.4m。用导爆索作爆源,电雷管一端起爆。导爆索系工业用塑料皮导爆索,每米 12g 和 25g 装药;实验中发现其装药不太均匀,这对实验精度有一定影响。为了用泥的方便,实验工作主要在现场进行,所用淤泥的含水量 w_s 为 80—90%。

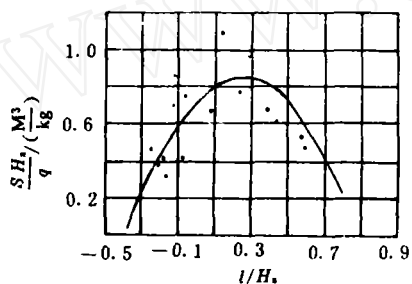


图 2 工程中的 SH_s/q 和 l/H_s 的关系
Fig. 2 Relation between SH_s/q and l/H_s .

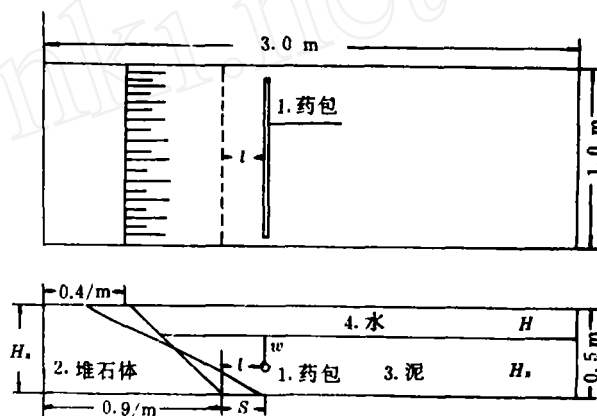


图 3 实验布置图 (S —— 石舌)
Fig. 3 Arrangement of test

S —— Rock tongue, 1. Explosive package,
2. Rock fill, 3. Ooze, 4. Water

3. 参数分析

本问题的独立参数有 19 个,如图 3: H_s 为堆石体的高度, H 为水深, H_s 为泥深, w 为药包埋深或最小抵抗线, l 为药包中心距堆石体坡角的水平距离, d 为石块的特征尺寸, R 为装药半径, $\alpha^{[3]}$, $\tau^{[2]}$ 为淤泥的粘度系数, $p_s \cdot S^a$, μ 是堆石体的摩擦系数, μ_1 是堆石体与底板的摩擦系数, ρ_s 是石块的密度, ρ_s 是淤泥的密度, ρ 是水的密度, ρ_b 是炸药的密度, D 是炸药的爆速, U 是炸药的比能, p_0 是大气压力, g 是重力加速度, 它们可以组成 16 个独立的无量纲参数。其中几何参数为 6 个: H_s/H_s , H/H_s , l/H_s , w/R , d/H_s 和 w/H_s ; 关于介质性质的参数有: α , μ , μ_1 , ρ/ρ_s , ρ/ρ_s 和 ρ/ρ_b ; 另 4 个参数是大气压力 p_0 与粘滞力之比 $p_0/[\eta(D/H_s)^a]$, 重力与粘滞力比 $(\rho_s g H_s)/\eta(D/H_s)^a$, 爆压与粘滞力之比 $(p_b D^2)/\eta(D/H_s)^a$ 和克服粘滞力所做的功与爆炸能量之比 $\eta(D/d)^a/(\rho_b g U)$ 。

本问题中共有 5 个作用力: 爆炸载荷, 大气压力, 重力, 粘滞力和摩擦力。前三个是主动力, 后二个是被动力。由于 $\alpha=0.11^{[3]}$, H_s 有两个数量级的改变, D 变化不大, 故粘滞力变化不大。此外, 爆压和大气压力的变化也不大; 但重力 $\rho_s g H_s$, 则有两个数量级的变化。这一情况是不能模拟的。我们实验中大体保持几何相似, 则几何参数均不变; 由于材料的选取, 第二类参数的变化也不大。对于最后 4 个参数, 我们则不要求它们不变, 而实际变化较大的为参数 $(\rho_s g H_s)/[\eta(D/H_s)^a]$ 。我们则因势利导, 使得重力比粘滞力小, 单靠重力不能产生泥石流, 则在石舌的产生中重力不起作用, 此外, 由于石舌的产生和空腔运动有关, 而不是和爆坑有关, 故实验中首先令 $H=0$, 然后再分析水的影响。

三、石舌的产生机制和变化规律

实验表明,参数 w/R 的大小对石舌产生的机理有重要影响。

1. w/R 较大的情况

这时药量小($H_0/R=140$ ($H_0=340\text{mm}$, $R=2.5\text{mm}$))埋深大, ($w/H_0=0.71$); ($w/R=100$). 实验结果均如图 4: 石舌的产生不伴有堆石体下滑现象。石块的数量不变, 它所占的体积却增加了。这时只有石块的间隙被淤泥撑开; 如实验前, 石块间不充以泥而充以水时, 则爆后伴有堆石体下滑的现象。由于石块间充泥时, 泥的粘度较大, 可以撑住石块, 不使之下落。这是因为重力比粘滞力小。当石块间充水时, 尽管爆炸时有部分泥进入石块间, 但因水的影响, 石块不能被支撑住, 因而下滑, 如图 5。

在药包埋置较深, 药量又不大时, 爆破发展过程较长, 空腔压力小于大气压力时, 鼓包仍未破裂^[4]。对图 4 的情况, 当药包起爆后, 由于爆炸空腔的膨胀作用, 淤泥被挤入堆石体的石块间隙中, 因堆石体较厚, 淤泥不能通过它自表面流出, 因而在堆石体中形成高压区。当这一压力超过空腔压力。特别当爆炸空腔和堆石体相接时, 石块便可从堆石体中挤出, 形成石舌。可见这时石舌是“置换”作用形成的。

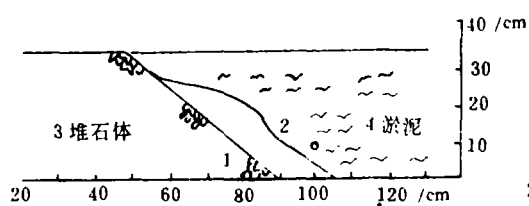


图 4 埋深较大时的石舌、石块间隙中充泥

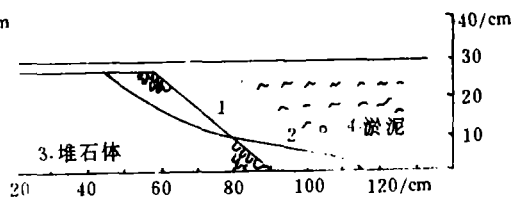


图 5 堆石体中充水的情况

1. 炸前堆石体, 2. 炸后堆石体, 3. 堆石体, 4. 淤泥

Fig. 4 Rock tongue of deep buried, among rocks

Fig. 5 Among rocks brimming with water

brimming with the ooze

1. Rock fill before blasting, 2. Rock fill after blasting,

3. Rock fill, 4. Ooze

2. w/R 较小情况

这时药包埋深较浅, $w/H_0=0.4\sim 0.6$, ($w/R=60$ 左右)。其爆破发展过程较快。爆炸空腔压力较高时鼓包即已破裂^[4]。鼓包中介质运动速度较大。当鼓包破裂后, 空腔压力即为大气压力, 但由于爆炸产物和被抛出的介质的高速运动。因而形成负压, 由于堆石体中有淤泥, 其表面压力为 p_0 , 于是在运动介质的负压和大气压力的共同作用下, 石舌即被拉出。显然这一过程将伴有堆石体下落现象, 情况如图 6, 我们称这一机理为吸引作用。此时参数 $p_0/\eta(D/d)^2$ 起主要作用, 此值在模型中和现场中相差不显著。但现场中这一作用机理可能并不重要。

当参数处于上述二种情况之间时, 则两种效应都存在。由于置换作用是空腔运动引起的, 其作用在前。显然, 现场是由这一机理起主要作用的; 自然, 吸引作用是和介质抛掷有关, 其作用在后。

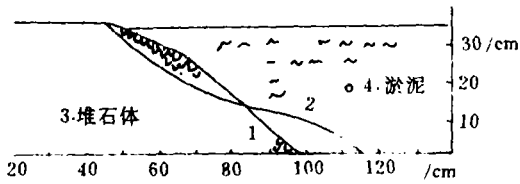


图 6 浅埋的炸破情况, 石间充泥

1. 炸前堆石体, 2. 炸后堆石体

Fig. 6 Circumstance of blasting of shallow burdied among rocks brimming with ooze

1. Rock fill before blasting,
2. Rock fill after blasting,
3. Rock fill, 4. Ooze

3 布药距离的影响

主要考虑参数 l/H_s 对清淤效率的影响。这时装药半径 $R=2.5-2.6\text{mm}$ 。实验表明, 埋深 w 对 $(SH_s)/q-l/(H_s)$ 关系有较大影响。

当 $H=0, H_s=34\text{cm}, w=24\text{cm}$ 时, 效率 $(SH_s)/q$ 和 l/H_s 的关系如图 7。和图 2 相比, 大体类似。只是由于安全上的考虑, 当 $l/H_s < 0$ 时, 我们进行实验。当 $H=0, H_s=30-34\text{cm}, w=20\text{cm}$ 时, $SH_s/q \sim l/H_s$ 关系如图 8。类似地, $H=0, H_s=25-30\text{cm}, w=15\text{cm}$ 的 $(SH_s/q) \sim (l/H_s)$ 关系如图 9。由此我们看到:

(1) $(SH_s/q) \sim (l/H_s)$ 关系的基本特征相

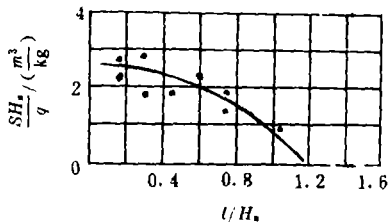


图 7 $w=24\text{cm}$ 时 $(SH_s/q) \sim (l/H_s)$ 关系, $H_s=34\text{cm}$

Fig. 7 Relation of $(SH_s/q) \sim (l/H_s)$, $w=24\text{cm}, H_s=34\text{cm}$

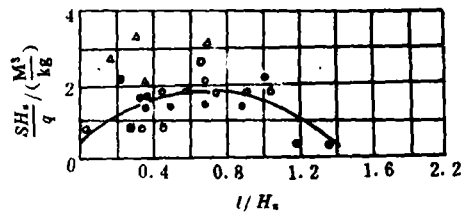


图 8 $w=20\text{cm}$ 时的 $(SH_s/q) \sim (l/H_s)$ 关系, $H_s=30 \sim 34\text{cm}$

Fig. 8 Relation between (SH_s/q) and l/H_s

• — $H_s=30\text{cm}, w=20\text{cm};$
• — $H_s=34\text{cm}, w=20\text{cm};$
 Δ — $H_s=28\text{cm}, w=18\text{cm}, H=12\text{cm}$

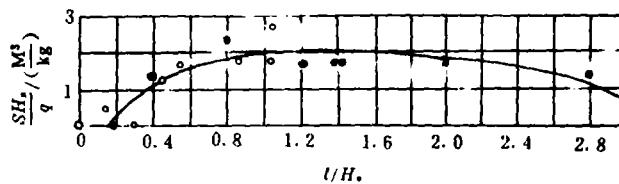


图 9 $w=15\text{cm}$ 的 $(SH_s/q) \sim (l/H_s)$ 关系, $H_s=25 \sim 34\text{cm}$

Fig. 9 Relation between (SH_s/q) and (l/H_s) , $w=15\text{cm}, H_s=25\text{cm} \sim 34\text{cm}$

• — $H_s=25\text{cm}, w=15\text{cm},$ • — $H_s=34\text{cm}, w=15\text{cm}$

同; (l/H_s) 小时和大时, 效率 (sH_s/q) 均较低, 对 l/H_s 的某一适当中间值, 效率值较大; 这些特征和现场情况相同。当 l/H_s 小时, 挤入堆石体的淤泥量小, 自然石舌较短, 当 (l/H_s) 较大时, 爆炸作用对堆石体的影响小, 自然石舌也小了。

(2) 图 8 和图 9 表明, 当 $R=2.5 \sim 2.6\text{mm}$ 时, 泥深 H_s 的某些变化不影响效率曲线。

(3) 埋深 w 对 $(SH_s/q) \sim (l/H_s)$ 关系有较明确的影响: w 小时, 吸引作用加强, $(SH_s/q) \sim (l/H_s)$ 曲线的范围变大, 曲线右移, 当 w 大时, 情况相反, 这时置换作用为主。我们还可

看到:当 w 处中间值时,两种作用均有影响。但对 $(SH_n/q) - (l/H_n)$ 曲线的左端则主要是置换作用。原因是置换作用在前,石舌被挤出后,它已离药包中心较近,因而后期的吸引作用就小了。对于 $(SH_n/q) - (l/H_n)$ 曲线的右端,则吸引作用是主要的,因这时由于布药较远,置换作用已经不大了。

(4) w 对 $(SH_n/q) - (l/H_n)$ 曲线的极值 $(SH_n/q)_m$ 有影响,但不很敏感。

(5) 对图 9,当 w 很小,主要是吸引起作用时,对小 l 值,药包和堆石体之间的泥被炸飞,没有带动堆石体下滑的泥,因而 $S=0$,石舌不能出现;当 l 适当增加时,抛掷体和堆石体之间有适当的泥量,这时 p_0 和负压形成的泥石流可出现,从而石舌被拉出。由于流动的泥层不厚,抛速大,影响范围广,因而 (l/H_n) 较大时仍有石舌出现。

四、水的影响

无水时,则重力作用减少,在石舌的形成中泥石流不起作用;但在有水时, $H \neq 0$,水的回流将对石舌产生影响:对置换作用时,在石舌被挤出后,当爆炸空腔的压力小于重力和大气压力之和时,水在重力和大气压力作用下将向空腔中回流,进而带动石块运动,部分石块被冲入空腔中。这是石舌形成的第二个原因。

1. $(SH_n/q) \sim (l/H_n)$ 曲线的变化

$R=2.5 \sim 2.6 \text{ mm}$, $H_n=25 \text{ cm}$, $w=15 \text{ cm}$,不同水深的 $(SH_n/q) \sim (l/H_n)$ 关系如图 10。和图 9 比较,我们看到:水的出现导致 $(SH_n/q) - (l/H_n)$ 曲线左移,特别是其左端。其特点类似无水深埋的情况。实际上,水的出现,相当于增加了埋深 w ,使爆炸发展过程变慢,因而

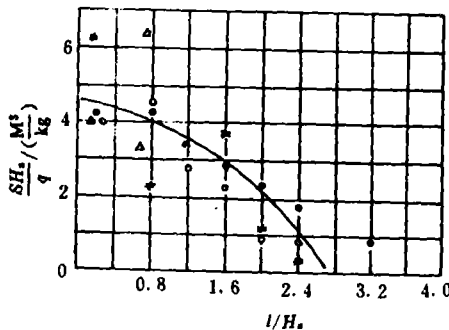


图 10 有水时的 $(SH_n/q) - (l/H_n)$ 关系

Fig. 10 Relation between (SH_n/q) and (l/H_n) , $H \neq 0$

* — $H=15 \text{ cm}$, $H_n=25 \text{ cm}$, $w=15 \text{ cm}$;

• — $H=10 \text{ cm}$, $H_n=25 \text{ cm}$, $w=15 \text{ cm}$;

• — $H=5 \text{ cm}$, $H_n=25 \text{ cm}$, $w=15 \text{ cm}$;

Δ — $H=20 \text{ cm}$, $H_n=20 \text{ cm}$, $w=10 \text{ cm}$

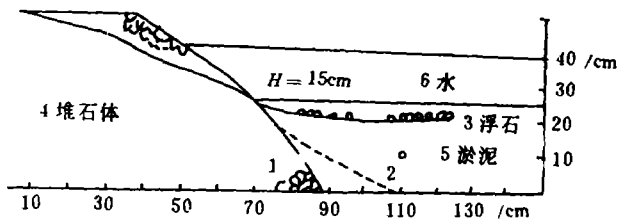


图 11 出现浮石

Fig. 11 Float rocks emerged on the ooze

1. 爆前堆石体, 2. 爆后堆石体, 3. 浮石

1. Rock fill before blasting, 2. Rock fill after blasting, 3. Float rocks,

4. Rock fill, 5. Ooze, 6. Water

其作用机理便成为置换作用了。同时由于水的回流冲击作用增加了石舌的长度,提高了爆破效率。和图 7 相比,我们看到,水的出现导致有效布药范围的增加。但从实验结果上,我们却不能明确肯定水深变化的定量影响,即 H 在 5cm 到 15cm 之间时,或 $H/H_n=0.2-0.6$ 时, SH_n/q 对水深的改变不敏感。

2. 效率(SH_n/q)提高

从图 8 图 9 和图 10 上可以看到,水可以导致清淤效率的提高;但 w 不同时,其增加的比例可能不同;对图 8 的情况只增加 60%;而图 10 比图 9 的情况则增加一倍多。

3. 出现浮石

图 11 表示了这一现象:在爆后,产生一落底的石舌的同时,在淤泥表面上出现一层浮石。有时这一层浮石和落底的石舌中间夹有相当厚的淤泥。这一现象出现的机率约为 20%左右。现场爆破的情况也类似。这应当引起足够的重视,因现场测试的困难,往往把浮石做为真正的石舌看待,而浮石又比石舌要长,这可能给施工带来隐患。浮石产生的原因,显然是水回流冲击石块引起的。关于浮石出现更详细的条件,我们没有找到。

五、现场情况与药量计算

1. 模型实验与现场爆破的比较

由于我们不能保持前述的 16 个参数在现场中与模型中均不变,因此,这里必须研究有关参数变化时的影响。我们可以保持几何参数 $H_n/H_n, d/H_n$ 和 w/H_n 不变;同时研究了参数 $H/H_n, w/R$ 和 l/H_n 改变时的影响。对于六个介质参数中, μ_1 在模型中和现场中是不同的, ρ_n 的变化不大。现场中使用的炸药的爆压 $\rho_n D^2$ 比实验中低一半左右,其能量比实验中低 1/3。现场中大气压力 p_0 与重力 $\rho_n g H_n$ 之比约为 1 左右,实验中此值约为 20。

由上我们看到:实验中突出了 p_0 的影响,这导致了吸引作用的出现和加强;而现场中可能不出现这一机理。因而 $SH_n/q - (l/H_n)$ 关系对现场爆破,其右端有效值不应达到 3 左右;如图 2,其值只达到 1;由于置换机理是由动压引起的,参数 $\rho_n D^2$ 起重要作用,此值在实验中较高,又由爆炸能量在实验中也较高,故实验中清淤效率约为现场中的五倍。

现场爆破时增加了重力的作用,故当石舌被淤泥挤出后,一旦空腔压力小于重力和大气压力之和,则泥石流即可产生;淤泥和海水的回流将把石块继续冲入空腔和爆坑;有的石块被冲到泥面,形成浮石。挤入石缝中的泥,在爆破的强烈震动下又被挤出,从而形成爆后堤头堆石体下沉的现象。经多次强震,泥被挤出的同时,石块调整了位置,堆石体得到密实,并基本落到硬土层上,从而形成了稳固的海堤。这就是填石排淤法修筑海堤,填土加固的全过程。

2. 关于药量公式

形式上,根据量纲分析,我们可以写出

$$S/H_n = f(H_n/H_n, H/H_n, l/H_n, w/R, d/H_n, w/H_n, \alpha, \mu, \mu_1, \rho/\rho_n, \rho/\rho_0, \rho/\rho_s, p_0/\eta(D/H_n)^\alpha, \frac{\rho_n g H_n}{\eta(D/H_n)^\alpha}, \frac{\rho_n D^2}{\eta(D/H_n)^\alpha}, \eta(\frac{D}{d})^\alpha/\rho_n g U) \quad (1)$$

这里 S 是石舌的长度。(1)式即可理解为药量公式。为了工程的方便,(1)式左端可写成效率 SH_n/R^2 的形式,其右端的宗量不变。对现场爆破情况,我们对关系(1)进行分析,以使之简化。

(1)对置换过程 这时主要是爆炸载荷起作用。要把淤泥挤入堆石体,并把石块挤出,其压力不会很低,这时淤泥的粘滞力可以忽略^[4]。这样对确定的炸药品种,参数 $(\rho_n D^2)/[\eta(D/H_n)^\alpha]$ 和 $[\eta(D/d)^\alpha]/(\rho_n g U)$ 是不变的。对确定的抛填料和淤泥,参数 $\alpha, \mu, \mu_1, \rho/\rho_n, \rho/\rho_0$

和 ρ/ρ_0 是不变的。此外有关系

$$H_s \doteq H_0 + H \quad (2)$$

这是工程实际情况所决定的。因此, (1)式可化成

$$\frac{SH_0}{R^2} = f\left(\frac{H}{H_0}, \frac{l}{H_0}, \frac{w}{R}, \frac{d}{H_0}, \frac{w}{H_0}, \frac{p_0}{\rho_0 g H_0}, \eta\left(\frac{D}{d}\right)^2 / \rho_0 g H_0\right) \quad (3)$$

(2)回流过程 当爆炸空腔的压力低于大气压力和重力之和时,回流即开始。实验表明(这一内容将另文分析),在泥石流回流过程中,粘滞力主要起阻力作用。当参数 $[\rho_0 g H_0 / \eta(g/d)^{0.2}] > 50$ 时,粘滞力的影响就不大了。对对应到现场的情况,考虑到淤泥是经过扰动稀释的,故当 $H > 5\text{m}$, $H_0 > 5\text{m}$ 时,对回流过程中,粘滞力的影响即可不考虑了。这时回流的停止主要是对面泥水的回流引起的。

(3)强震过程 其作用主要是把堆石体中的淤泥挤出,其主要影响参数为 $(\rho_0 - \rho_1)gH_0 / [\eta(a+g)/d]^{0.2}$ 。这里 a 是地震加速度。这是一个重复的周期作用。由于 a 是个因变量,它不能出现在(3)中,故(3)中的 $\eta(D/d)^2 / \rho_0 g H_0$ 应用 $\eta(g/d)^{0.2} / [\rho_0 g H_0]$ 代替。

考虑到一般工程中 d 的变化是不大的;对连云港, H 的变化也不大,于是我们得到

$$\frac{SH_0}{R^2} = f\left(\frac{l}{H_0}, \frac{w}{R}, \frac{w}{H_0}, \frac{p_0}{\rho_0 g H_0}\right) \quad (4)$$

由此可以看到:效率和比药量有关,即可能存在最优比药量,此时效率最高。对不太浅的泥深和水深,淤泥的粘性主要影响震动密实过程;而导致几何相似不能成立的因素为重力。

图 2 的曲线 1,可用关系

$$\frac{SH_0}{q} = 0.86 - 2\left(\frac{l}{H_0} - 0.25\right)^2 \quad (5)$$

近似;其中 $(w/H_0) \doteq 0.6$, H_0 由 4m 增加到 12m,而 $w/R = 30-50$ 。对于较好的炮位,效率 $SH_0/q = 0.86$,即清除一方淤泥要 1kg 多炸药。这是一组成功的参数。根据(4)还可能有其他更好的参数,同样可完成填土加固工程。但我们没有找到,在实验中,由于大气压力 p_0 的影响,要寻求 w/R 对效率 SH_0/q 的影响也较为困难;关系(5)表明,可能存在二个量纲为 (kg/m^3) 的量,即 0.86 和 2 是本问题中的重要特征量。

六、几点结论和问题

1. 石舌是爆炸空腔推动淤泥自堆石体中挤出的;当空腔压力低于大气压力和重力之和时,泥石流的回流是产生石舌的第二个原因;爆破的强烈震动可以把堤中的淤泥再挤出,从而可形成稳定的堤坝。

2. 水的作用能提高清淤效率;但也可产生浮石;水不是填石排淤法的必须条件。

3. 高爆压和高比能可提高清淤效率。

4. 清淤效率不仅和炮位有关;而且和比药量有关,因此它不能做为一般意义下的药量公式;在泥深变化不太大时,几何相似律有可能近似的成立,因而参数 (R/H_0) 的值可供计算药量时参考。

5. 由于实验条件的限制,我们对 H/H_0 , w/R , 和 w/H_0 的影响没得到系统的资料,因而不能给出它们对 S 的影响;由爆源等因素的影响,实验数据较为分散; l 取负值的情况尚未做。这些都有待进一步研究。

参加此项实验工作的还有章培德,杨振声,任京生和张名根等。

参 考 文 献

- [1] Du Pont E I. Blasters Handbook. Sesquicentennial Edition Revised, Wilmington; E I Du Pont de Nemours & Compant(INC) Explosives Department, 1954. 374~375
- [2] Иванов П. Л. Уплотнение МолосвязныФ Грунтов Взрывами. Москва; Недра, 1983. 170~171
- [3] 许连坡,爆炸与冲击,1990,10(4),297~301
- [4] 许连波等,爆炸与冲击,1989,9(4),328~337

EFFECT OF BLASTING ON FILL SETTLEMENT IN TOE-SHOOTING METHOD

Xu Lianpo

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

ABSTRACT The action mechanism of Toe-shooting method is analysed by model test in this paper. It indicates that the rock tongue is extruded from the fill by the action of explosion cavity through the squeezing of ooze into the fill. When the pressure in the cavity decreases to the extent of less than the sum of atmospheric pressure and the gravity force, the water and ooze taking the rocks together will flow back into the cavity and the crater. Owing to the severe vibration caused by the blasting, ooze in the fill will then gradually squeezed out. At last, a steady, nearly settled on the hard bottom and stable fill settlement is therefore achieved.

Relation between cleavage efficiency and the shooting—hole position is also given. The specific charge quantities choosed in practice offered in this paper may be used as a reference in engineering work.

KEY WORDS toe—shooting method, rock tongue, ooze, rock fill