

# 淤泥的爆坑与表面条形药包装药 处理软基的实验研究

邢维复 任京生 周燕军 王小京 陶俊

(中国科学院力学研究所,北京 100080)

**摘要** 提出用泥面爆炸填石排淤方法代替常用的泥下爆炸填石排淤。用模型实验研究了药量、水深和药包埋深之间的相互关系,给出了泥面爆炸的药量公式,揭示了覆盖水深和药包埋深与爆坑形状的关系。在此基础上可以进行爆炸处理软基的优化设计。

**关键词** 泥面爆炸 爆坑 软基处理

## EXPERIMENTAL STUDY ON TREATMENT OF SOFT FOUNDATION OF BLASTING SLUDGE PIT BY LINEAR CHARGE SURFACE BLASTING

Xing Weifu Ren Jingsheng Zou Yanjun Wang Xiaojing Tao Jun  
(Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing 100080)

**ABSTRACT** In this paper, a new method, in which squeezing the sludge by a blasting on sludge surface replaces the general method of blasting inside the sludge is introduced. A series model experiments on the relationship among the quantity of the charge, the depth of cover water and the depth of the charge under the surface of the sludge are carried out. The results of the model experiments give a charge formula of the surface blasting and the relationship between the shape of blasting pit and the depth of cover water and the depth of the charge under the surface of the sludge. Based on the results, design of the treating soft foundation by blasting can be optimized.

**KEY WORDS** Blasting on surface of sludge Blasting pit Treatment of soft foundation

### 1 前言

在软弱基础上修筑防波堤和护岸等水工结构时,处理海淤的常规方法是爆炸填石排淤法。其原理是药包埋入堆石体前方一定深度淤泥下,起爆后药包上方和附近的覆盖水及淤泥向上飞散,堆石体的前端向下塌落到爆坑内,完成石块对淤泥的置换。1986年这种方法在连云港首次研究成功并在西大堤的施工中得以应用,已显示出极大的优越性。就施工方法而言,这种方法仍有不足之处:为了将药包埋入淤泥下,施工中需要船只和特殊的装药机具,在修筑防波堤时,风浪将对船只能否进行正常的施工作业起决定性的作用,即工期受

邢维复:爆炸力学实验室高级工程师。

气候影响；使用船只和特殊装药机具加大了施工费用,经济效益有待改善。

爆炸填石排淤法的技术关键是瞬态成坑,堆石体坍塌下滑坑内。在有较深覆盖水施工时,我们有时将药包置放在泥面上,也取得良好的效果。这意味着泥面爆炸也能成坑到底。由于对爆坑形成的研究没有积累系统的数据,根据模型律的原则,本文对淤泥爆炸成坑做了系统的模拟实验和探讨,并说明泥面置放药包爆炸可以达到置换目的,这样大大简化了施工工艺,提高了经济效益。

## 2 基本原理

在实际的处理软基爆破中,大多采用分布在一条直线上间距较小的群药包,可近似认为其载荷分布与条形药包相当,在本实验研究中采用条形药包装药。

在泥面条形药包爆炸时,淤泥在强爆炸动载荷作用下,作用时间较短,粘性力和重力可以忽略不计。因此,爆坑的形成基本符合几何相似律<sup>[1]</sup>。

在同一种淤泥情况下,决定爆坑形状的参数有淤泥厚度  $H_0$ 、覆盖水深  $H_w$ 、药包在淤泥中的埋深  $h_s$  以及由单位长度药量  $Q$  和炸药密度  $b$  组成的特征长度  $(Q/b)^{1/2}$ ,而爆坑深度  $h$ 、半径  $R$  和截面积  $A$  等都是因变量。由于上述参量均是几何量,根据 定理,可得到下面的几何相似律,即无量纲爆坑深度可写成:

$$ce \quad g \quad \frac{h}{H_0} = f \left[ \frac{(Q/b)^{1/2}}{H_0}, \frac{h_w}{H_0}, \frac{h_s}{H_0} \right] \quad (1)$$

如果一种参数选 5 炮,原则上需做 125 次试验可得到完整的曲线。

当无量纲的水深和药包埋深一定时,(1)式可写为:

$$er \quad \frac{h}{H_0} = K \left[ \frac{(Q/b)^{1/2}}{H_0} \right]^m \quad (2)$$

式中:  $K = f_1(h_w/H_0, h_s/H_0)$ ;  $m = f_2(h_w/H_0, h_s/H_0)$ 。

当无量纲的药包置于淤泥表面上,而且无覆盖水的特殊的情况下,可整理为:

$$\frac{h}{H_0} = K_1 \left[ \frac{(Q/b)^{1/2}}{H_0} \right] \quad (3)$$

式中  $K_1$  和 是常数,由模型实验确定。

当无量纲的药量一定,加覆盖水、药包无埋深的情况下,公式可整理为:

$$h/H_0 = (h_0/H_0) + K_2(h_w/H_0) \quad (4)$$

式中:  $h_0$  为无水深、无埋深、相同无量纲的药量时的爆坑深度;  $K_2$  和 是常数,由模型实验确定。

当无量纲的药量一定、不加覆盖水、而药包有埋深的情况下:

$$h/H_0 = (h_0/H_0) + K_3(h_s/H_0) \quad (5)$$

式中  $K_3$  和 是常数,由模型实验确定。

为了简化试验,我们将分别做以下单参数实验: 药量与爆坑深度的关系; 药量不变的情况下,覆盖水深与爆坑深度的关系; 药量不变的情况下,埋深与爆坑深度的关系。

## 3 试验装置

针对珠海南泾湾防波堤进行小型模型试验,从文献 [1] 和通常爆破得知,模型比例在 30

倍之内满足几何相似律。模型试验按 1/20 缩小,所做的结果对于放大 30 倍以内都适用。试验装置为 200cm × 150cm × 100cm 的薄壁钢板箱,并将它平埋在土中,以减少爆炸后冲击波的反射。箱底置 10cm 夯实的硬土层,模拟淤泥底部亚粘土持力层。淤泥深度 52 ~ 66cm。试验装置如图 1 所示。

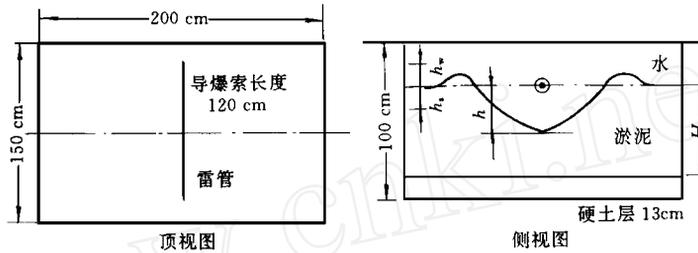


图 1 试验装置布置示意图

Fig. 1 Scheme of layout experiment equipment

淤泥主要性质为:含水量 58.8%;容重  $1.66\text{g}/\text{cm}^3$ ,土粒相对密度  $2.73\text{g}/\text{cm}^3$ ;凝聚力  $4.36\text{kPa}$ ;内摩擦角  $3.4^\circ$ ;压缩系数  $1.11\text{MPa}^{-1}$ 。

由于装药临界起爆直径的要求,在模型试验中,条形药包采用装药密度为  $12\text{g}/\text{m}$  导爆索、直径 5mm,用 8 号电雷管起爆。爆后直接测量爆坑形状。为了避免箱壁和起爆雷管的影响,在箱中心部分 5 个剖面上测量爆坑形状并取平均的深度  $h$  和半径  $R$  值。

## 4 实验结果

### 4.1 泥面爆炸(无覆盖水)

无覆盖水泥面爆炸结果见表 1。

表 1 无覆盖水爆炸结果

Table 1 Test results of blasting without covered water

$Q, \text{kg}/\text{m}$	0.012	0.024	0.036	0.048	0.060	0.072	平均
$h, \text{cm}$	8.6	11.5	14.6	17.4	19.8	22.2	
$R, \text{cm}$	19.5	26.5	29.5	33.5	40.0	43.0	
$Q^{1/2}/h, (\text{kg}/\text{cm}^3)^{1/2}$	1.274	1.347	1.300	1.259	1.237	1.209	$1.27 \pm 6\%$
$Q^{1/2}/R, (\text{kg}/\text{cm}^3)^{1/2}$	0.562	0.585	0.634	0.654	0.612	0.624	$0.61 \pm 8\%$
$A, \text{cm}^2$	228	361	481	650	872	1018	
$Q/A, \text{kg}/\text{m}^3$	0.526	0.665	0.748	0.738	0.688	0.707	

经整理得:

$$\text{和} \quad \frac{h}{H_0} = K_1 \left( \frac{Q^{1/2}}{H_0} \right) \quad (6)$$

其中:  $H_0 = 0.515$ ,  $K_1 = 0.89$ ,  $K_1 = K_1/b^{1/2}$ ,  $= 1.12$ , 则:

$$\text{确} \quad \frac{h}{H_0} = 0.89 \left( \frac{Q^{1/2}}{H_0} \right)^{1.12} \quad \text{由模} \quad (7)$$

$$\text{计算得: } Q^{1/2}/h = 1.27, Q^{1/2}/R = 0.62 \quad (8)$$

$h, R$  与  $Q^{1/2}$  成正比,表明淤泥表面爆炸能量准则成立。

本实验做了单位长度药量相同、总药量不同,即导爆索长度不同的两组实验,结果比较接近,如图 2 所示。

### 4.2 有覆盖水下爆炸

有覆盖水下爆炸结果列于表 2。在试验中,单位长度药量取 0.024kg/m,泥厚  $H_0 = 66\text{cm}$ ,比药量为  $0.235(\text{kg}/\text{m}^3)^{\frac{1}{2}}$ 。

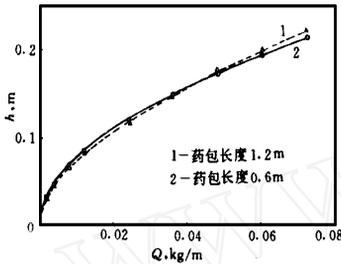


图 2 爆坑深度与单位长度药量的关系

Fig.2 Curve of depth of blasting pit to charging amount

经整理,当  $Q^{\frac{1}{2}}/H_0 = 0.235(\text{kg}/\text{m}^3)^{\frac{1}{2}}$  并有  $h_0 = 11.5\text{cm}$ 、 $K_2 = 0.56$ 、 $\alpha = 0.58$  时则:

$$\frac{h}{H_0} = 0.174 + 0.56 \left( \frac{h_w}{H_0} \right)^{0.58} \quad (9)$$

该式为给定药量下爆坑深度  $h$  和覆盖水深  $h_w$  的关系式,等式右边第二项为覆盖水深对爆坑深度的贡献。

### 4.3 有埋深泥下爆炸

有埋深泥下爆炸结果如表 3 所示。单位长度药量为 0.024kg/m。

经整理,当  $H_0 = 66\text{cm}$ 、 $h_0 = 11.5\text{cm}$ 、 $K_3 = 0.90$ 、 $\alpha = 0.60$  时:

$$h/H_0 = 0.174 + 0.90(h_s/H_0)^{0.60} \quad (10)$$

该式为给定药量下爆坑深度  $h$  和药包埋深  $h_s$  的关系式,等式右边第二项为药包埋深对爆坑深度的贡献。

水下爆炸和泥下爆炸所产生的爆坑深度与水深和药包埋深关系曲线示于图 3。

## 5 模拟堤实验

按 1:20 比例模拟实际防波堤,做一定药量、有覆盖水的泥面爆填来验证模型分解实验所得到的公式的合理性。实验装置如图 1,堆石体的石块级配为 30~200g,条形药包药量 24g/m。爆前爆后断面如图 4 所示。

第一次无水泥面爆炸,药包置于堆石体前方 0.15m 处。爆后淤泥坑内表面只有少许石

表 2 有覆盖水爆炸结果

Table 2 Test results of blasting with covered water

$h_w, \text{cm}$	0	5.0	10.0	15.0	18.0	25.0
$h, \text{cm}$	11.5	19.6	23.5	27.5	29.0	32.0
$R, \text{cm}$	26.5	33.4	29.6	26.1	24.2	21.1
$Q^{\frac{1}{2}}/h, (\text{kg}/\text{cm}^3)^{\frac{1}{2}}$	1.347	0.790	0.659	0.563	0.534	0.484
$Q^{\frac{1}{2}}/R, (\text{kg}/\text{cm}^3)^{\frac{1}{2}}$	0.585	0.464	0.523	0.594	0.640	0.734
$A, \text{cm}^2$	361	753	800	825	807	776
$Q/A, \text{kg}/\text{m}^3$	0.665	0.318	0.300	0.290	0.297	0.309

表 3 有埋深泥下爆炸结果

Table 3 Test results of blasting in soft sludge

$h_s, \text{cm}$	0	2.5	5.0	7.5	10.0
$h, \text{cm}$	11.5	19.4	24.2	27.6	30.2
$h - h_s, \text{cm}$	11.5	16.9	19.2	20.1	20.2
$R, \text{cm}$	26.5	46.2	49.4	52.1	54.5
$Q^{\frac{1}{2}}/h, (\text{kg}/\text{cm}^3)^{\frac{1}{2}}$	1.347	0.799	0.640	0.561	0.513
$Q^{\frac{1}{2}}/R, (\text{kg}/\text{cm}^3)^{\frac{1}{2}}$	0.585	0.360	0.310	0.300	0.280
$Q^{\frac{1}{2}}/R, (\text{kg}/\text{cm}^3)^{\frac{1}{2}}$	0.912	0.807	0.771	0.767	
$A, \text{cm}^2$	361	896	1235	1438	1748
$Q/A, \text{kg}/\text{m}^3$	0.665	0.268	0.194	0.167	0.137

$R_1$  是爆坑深度为  $h - h_s$  时的爆坑半径。

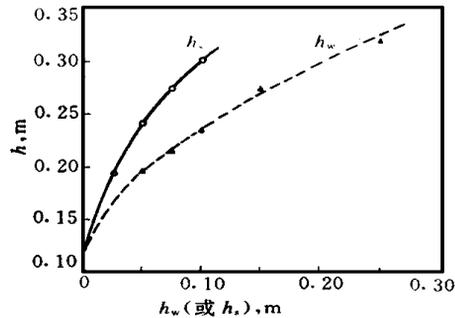


图 3 爆坑深度与覆盖水深,药包埋深的关系

Fig.3 Curve of depth of blasting pit to water depth and immersed charge depth in sludge

块,爆坑深 0.11m,与无堆石体试验爆坑结果相符。

将堆石体向前抛填,形成第二次爆前线,坡比仍为 1:1,药包置于堆石体前方 0.1m 处,第二次爆炸为水下泥面爆破,覆盖水深 0.2m。爆后将淤泥做分层开挖,发现爆心正下方石块深度为 0.24m,浅于小实验结果;而石块最大深度为 0.33m,略大于小试验,并发生在距爆心水平前方 0.25m 处。这种爆坑中心向前移动、深度增加的现象由多种原因产生:爆炸可使淤泥形成爆坑,爆坑下的淤泥强度降低,在震动条件下,向爆坑内滑动的石体有较大的动能碰撞淤泥,有可能一些石块嵌入淤泥内,因此石块落底深度有可能大于爆坑深度;实验证实,石块向下滑落的速度大于淤泥回淤的速度,即石块先到达爆坑底部;爆炸时实际瞬态爆坑较大,在无堆石体情况下,得到的爆坑是回淤完成后的最终静态爆坑,即所谓可见爆坑。实际上,所有爆坑都有回淤,这一点是非几何相似的。爆坑向前方的滑移取决于回淤速度,回淤决定于静水压力,而静水压力与重力有关;爆炸使堆石体前方成坑,堆石体底部静水压力较大,加上爆炸的震动作用,堆石体底部淤泥向爆坑内运动,将运动中落入爆坑的石块向前推移。

比较无水 and 不同覆盖水深试验可以清楚地看出,覆盖水深起着关键作用。无水时,石块几乎不滑动;覆盖水深度不大时,石块滑动,但不能完全填充爆坑;只有当水足够深时,石块才会充分下滑入爆坑。覆盖水在整个过程中使爆坑加深,同时使堆石体加强坍塌滑动。

应当指出,由于重力不能按相似律模拟,小模型试验中重力影响小,而在实际爆炸处理海淤时,重力影响虽使淤泥回淤速度增加,但也使石块更充分地向爆坑内滑落,爆坑填充大量石块。

## 6 工程实践

1994 年开始设计和施工的珠海南泾湾防波堤于 1996 年 12 月竣工。堤头爆填设计条件是水深 6m,淤泥深 7m。我们采用 10 个 30kg 的集中药包,均布在 20m 宽堤内,等效线装药密度为 15kg/m。按公式(8)可得到爆坑深度  $h_1 = 3.05\text{m}$ 。

考虑到水深影响,可按公式(9)或表 2 得到 6m 覆盖水深情况下,爆坑深度较无覆盖水深时增加了 2.9 倍,即爆坑深度  $h = 8.85\text{m}$ 。如果装药改为 10kg/m,爆坑深度为 7.3m,这对于堆石落底仍是可行的,因为珠海防波堤处理的淤泥深度为 4.75~6.70m。

## 7 结论和讨论

上述实验结果和分析表明:

(1) 无水、无埋深的泥面爆炸,爆坑深度  $h$  和半径  $R$  与药量  $Q^{1/2}$  的比值为常数,即:

$$Q^{1/2}/h = 1.27(\text{kg}/\text{m}^3)^{1/2}, Q^{1/2}/R = 0.62(\text{kg}/\text{m}^3)^{1/2}, \text{遵守能量准则。}$$

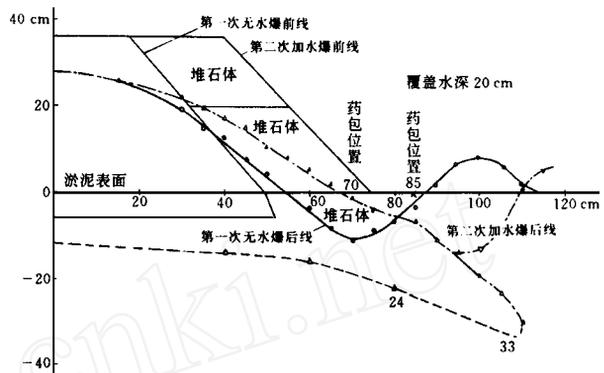


图 4 模拟堤爆前爆后断面示意图

Fig. 4 Profile of model embankment before and after blasting

(2) 当水深增加到一定深度后,在相同药量下爆坑深度将不再增加。同时,爆坑半径减小,这是回淤造成的。

(3) 当埋深增加到一定深度后,爆坑深度增值与药包埋深近似相等,即  $h - h_s$  近似不变。

(4) 对比图 3 中爆坑深度相同时的覆盖水深  $h_w$  和药包埋深  $h_s$ ,发现  $h_w/h_s = 2.1$ 。这表明,在药量相同的情况下,2.1 倍覆盖水深所产生的爆坑深度等于 1 倍埋深时的爆坑深度。这一现象的发现改变了过去传统的看法:覆盖水深和药包埋深对爆坑深度的贡献可用淤泥容重与水容重之比(本文中淤泥容重为 1.66)加以换算。产生这种差异是合理的,由于淤泥与水不同,有粘性力和强度,即使是在强抛掷爆破的动载荷下也不能完全忽略不计。

(5) 模拟堤试验结果表明,覆盖水深对堆石体向下滑动起关键作用。爆坑的实际深度与实验结果相符,最大爆坑向前平移,有利于确定下次爆炸处理的进尺,但在大实验时还需确定回淤速度,这一课题将另行研究。

(6) 实验表明,在有水情况下泥面爆炸时,爆坑比较陡峭。因此,在有埋深泥下爆炸和无埋深泥面爆炸时,药包距堆石体的距离应有所不同,前者应大些,后者可小些。

(7) 实验数据表明,有水或有埋深情况下,炸药能量利用率高,这可从  $Q/A$  看出来。

(8) 公式(3)、(4)、(5)中的  $K_1$  和  $K_2$  和  $K_3$  和 都是  $(Q/b)^{1/2}$ 、 $h_w/H_0$  和  $h_s/H_0$  的函数,有待于进一步用模型实验加以确定,本文给出的实验结果有一定的应用范围。

应当指出,最终爆坑尺寸是在爆后静止时测量的。虽然爆炸飞出的淤泥基本上不回落至爆坑内,但由于淤泥流动性大、受重力影响,爆坑四周的淤泥也会淤回爆坑内,致使爆坑几何尺寸减小。

本文仅是模型实验研究,要将此问题更好地解决,仍需对条形药包所形成爆坑的动态过程、回淤的动态过程和最终尺寸用脉冲 X 光摄影方法和数学力模型计算加以确认和解决。

本文实验结果可以作为泥面爆炸填石排淤这一简单而经济的方法的理论依据,它不但证实了泥面爆炸排淤法可行,而且可以通过给出的公式进行可靠的工程优化设计。

致谢:在课题的提出、研究过程及总结中,郑哲敏院士、杨振声研究员、谈庆明研究员给予了指导和有益的建议及帮助,作者在此表示诚挚的谢意!

## 参 考 文 献

- 1 Zheng Zhemin, Yang Zhensheng, Jin Liu, Underwater Explosion Treatment of Marine Soft Foundation. China Ocean Engineering. 1990, 5(2): 213 ~ 234.
- 2 杨振声,赵成福,任京生等. 爆夯水下挤淤的机理与模拟实验研究. 第四届全国工程爆破学术会议论文汇编. 1989.
- 3 许连坡,顾道良,李世海. 海淤中爆破的一些现象和问题. 第四届全国工程爆破学术会议论文汇编. 1989.
- 4 张建华,张亮,顾道良等. 爆炸排淤填石法的试验研究. 第四届全国工程爆破学术会议论文汇编. 1989.
- 5 赵成福,顾道良,章培德等. 水下触地爆炸挤淤处理海淤软基实验研究. 第四届全国工程爆破学术会议论文汇编. 1989.

(收稿日期:1997 - 02 - 17)