

水下爆炸覆盖薄砂层淤泥地基上 爆坑形成规律的研究

李世海

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

摘要 通过在覆盖薄砂层淤泥地基上进行水下触地、悬挂药包爆炸现场试验和水下淤泥表面触地爆炸室内试验研究,给出了爆后地基上形成爆坑形状、大小随药量和药包位置变化的规律。提出了爆坑直径随药量和水深变化的计算公式,引入了临界埋深的概念,说明了药包埋深小于该值时,爆炸效果有明显的减弱,所给出计算爆坑直径和临界埋深的公式,对水下爆炸工程设计提供了依据。

关键词 水下爆炸;触地爆炸;爆坑;药量公式

中图分类号 TD 235.1

Formation Law of Under water Blasted Cavity on Sludge Foundation Bruied by a Thin Layer of Sand

Li Shihai

(Mechanics Institute of China Science Academy, Beijing 100080)

Abstract

An experiment about blasting on sludge foundation buried by a thin layer of sand was performed. The variation law between shape and size of blasted cavity formed by blasting and dose and location of cartridge is presented. A calculation formula for diameter of blast cavity changing with the depth of water and dose of cartridge is provided, A conception of critical embedment depth is introduced, the blasting effectiveness is remarkably weakened when embedment depth is less than the threshold. This formula provides a basis for blasting engineering underwater.

Key words: underwater explosion, blast pit, calculation formula, dose of cartridge

1 前言

用爆炸法加密抛石、抛砂基床,填石排淤建筑防波堤,是近年来我国岩土工程中采用的一种新工艺,已经为工程界认同。然而,工程中人们经常提出这样的问题:当水较浅时,爆炸的效果如何?药包作用的范围有多大?怎样设计药包间距?分析和研究浅水中爆炸爆坑尺度与药量和水深的关系,有助于人们对上述问题的理解。

对深水中爆炸问题 Cole^[1]总结了大量的试验及理论研究工作,本文作者^[2]给出了松散石体上触地爆炸高压气泡脉动周期的变化规律。所谓浅水中爆炸是指爆炸后高压气泡没有脉动过程,作者以淤泥中爆炸为背景,研究了浅水中爆炸鼓包运动的规律并与岩土中爆炸问题进行了比较^[3,4]。但是,对浅水中爆炸爆坑大小与药量及水深的关系研究较少。

本文通过在表层覆盖薄砂层的淤泥地基上进行浅水中爆炸试验,研究了爆坑的形状、大小随药量变化以及药包在不同挂高时水中爆炸爆坑形状的变化规律,给出了计算爆坑大小的计算公式。

2 实验条件

试验分室内试验和现场试验。

室内试验是在试验箱内完成的,试验箱的尺寸长×宽×高为1.5m×1.5m×1.0m,试验时首先在箱内装满淤泥,整平后将药包放在泥面,然后向池内冲水,当水达到规定的深度后,起爆炸药,爆炸后排出试验箱内的水,并测量爆坑形状。

现场试验是在连云港墟沟海滩进行的,土层地质条件自上而下为粉细砂0.4m,淤泥层2.5~3.0m亚粘土持力层。试验时,在退潮时将药包固定在砂层表面选好的位置,药包可以触地也可以离底板有一定的距离。涨潮时,观测药包位置处的水深,当水位达到要求水深时起爆,退潮后测量爆坑的形状。

3 试验现象及结果

3.1 室内试验

炸药用粉状TNT,由雷管起爆,试验采用的药量(含雷管炸药1.5g)分别为6.5g、11.5g和16.5g,对应的水深为0.1m、0.1m和0.15m。爆炸时,有水和少量淤泥飞出试验箱,爆后泥面上形成爆坑,爆坑壁陡直,四周淤泥隆起,隆起部分呈被挤压状。如图1为药量11.5g,水深10cm的爆坑形状测量图,不同工况的爆坑尺寸见表1。

3.2 现场触地爆炸试验

现场试验采用散装硝铵炸药,由雷管起爆导爆索,导爆索起爆炸药。试验用药量从1~80kg范围内变化,水深变化范围是0.95~2.8m。爆炸时,首先在水面上形成十至几十米的白色柱状水雾,而后伴有浑浊水柱上升,有时呈喷射状,上升高度几米至十几米。白色水雾是由于水中爆炸产生的冲击波到达水表面,产生拉伸波,将表层水拉断形成的,浑浊水柱是爆炸产生的高压气体推动药包周围的水运动所致。爆后地表形成爆坑,坑壁呈斜坡状,坑周围隆起,上部砂层未被破坏,个别爆坑底部有淤泥。图2给出了药量3kg,水深2m,触地爆炸爆坑形状测量结果。

当药量较大时,爆后飞出的淤泥很多,爆后形成的爆坑形状也不同,即爆坑内的砂层全部被破坏,中心处有淤泥堆积,爆坑周围砂层向中心塌落,没有隆起现象。由于爆坑内是淤泥,测量困难,爆坑的形状的规律性较差,图3给出了现场描绘的示意图。

室内试验和现场试验的主要区别在于:室内试验爆坑周围隆起的高度大于坑的深度,而现

场试验隆起的高度相对较低;室内试验爆坑壁比较陡直,坑深较浅。这主要与现场试验中表层砂有关。砂层有一定的强度,当爆炸压力卸载后,表层砂起着阻止淤泥回缩的作用,对爆炸产生的强动荷载,砂层的强度是可以忽略的,而对离爆源较远的区域,砂层减少了淤泥向外运动的速度,导致爆坑周围的砂层隆起不高。

3.3 悬挂药包试验

为了减少爆炸对底板材料(如块石)的破坏,有时爆炸工程中采用悬挂药包的方法,即爆炸时药包在离地面一定高度的水中。为此进行了悬挂药包试验,试验是在相同水深,不同挂高(药包到海底的距离)或埋深(药包到水面的距离,触地爆炸时,埋深)的对比试验。试验用药量 3 kg,表面砂层没有破坏。在相同水深条件下,当挂高较低时,爆坑形状没有大的变化,但是,当药包埋深的减少到某一值后,爆坑的直径相对减小很多,爆坑的深度也有所降低。

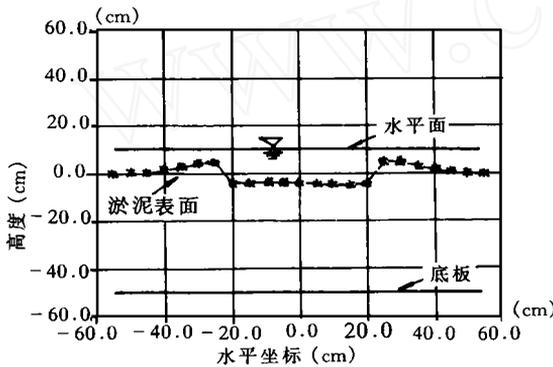


图 1 药量 11.5 g、水深 10 cm 爆坑形状实测图

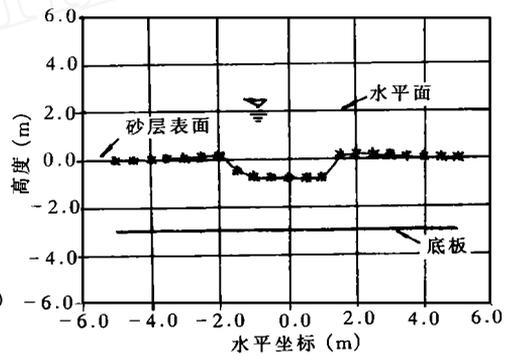


图 2 药量 3 kg、水深 2 m 爆坑形状实测图

4 试验结果及分析

4.1 特征长度

水下爆炸爆坑的形成是爆炸后形成的强冲击荷载与周围流体、淤泥及表层砂相互作用的结果。在高压作用下,砂土及淤泥的强度都是比较小的,因此爆坑直径基本上能够反映爆后爆炸荷载的作用范围。引入文献[4]反映水下爆炸气泡半径的特征长度的概念,用以分析爆坑尺度与水深及药量的关系。特征长度:

$$L_b = \left[\frac{Q_c Q r_0^3 (-1)}{P_s} \right]^{\frac{1}{3r}} \quad (1)$$

式中, Q 、 Q_c 分别为炸药量(kg)和爆热 J/kg, ρ 、 ρ_c 为水和炸药的密度 kg/m^3 , P_s 为药包处的静水压(Pa)。

$$Q = \frac{4}{3} \rho_c r_0^3, \quad P_s = P_0 + gh$$

式中, P_s 为大气压力(Pa), g 重力加速度 m/s^2 , h 为药包埋深(m)。

将上式代入(1)式,得

$$L_b = \left[\left[\frac{3}{4} \frac{Q_c}{\rho_c} \right]^{\frac{1}{3}} \frac{Q_c}{(P_0 + gh)} \right]^{\frac{1}{4}} Q^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

4.2 触地爆炸试验爆坑直径计算公式及临界埋深

分析试验结果,将一组触地爆炸的试验数据、特征长度及有关无量纲量列入表1:

表1中, $\frac{D}{L_b}$ 是表征爆坑直径大小的无量纲量,而 $\frac{L_b}{h}$ 、 $\frac{h}{L_b}$ 是表征药量和埋深的特征量,类似于岩土中爆破,我们称前者为比药量后得为比水深(悬挂药包时为比埋深)。

由表1的结果可以看出:

对 $\frac{h}{L_b}$ 大于 0.93,即药包埋深较深的试验, $\frac{D}{L_b}$ 的变化不大,在 2.5 左右,而当比水深 $\frac{h}{L_b}$ 小于 0.6 时, $\frac{D}{L_b}$ 减小,其值为 1.7 左右。事实上,当药包埋深减少时,高压气泡膨胀后因为没有足够的上覆流体,高压气体作用的时间减少,从而对底部介质的作用削弱,导致爆坑直径偏小。

表1 不同药量、水深条件下爆坑直径测量结果表

药量 (kg)	爆热 Q_c (10^6J/kg)	炸药密度 (kg/m^3)	水深 h	爆坑直径 D (m)	特征长度 L_b	$\frac{D}{L_b}$	$\frac{L_b}{h}$	$\frac{h}{L_b}$
1.0	3.48	800	2.0	2.4	0.94	2.55	0.47	2.12
2.0	3.48	800	2.0	3.0	1.18	2.54	0.59	1.69
3.0	3.48	800	2.0	3.3	1.36	2.42	0.68	1.47
4.0	3.48	800	2.0	3.4	1.49	2.28	0.74	1.34
5.0	3.48	800	2.0	3.5	1.61	2.17	0.85	1.24
9.0	3.48	800	2.0	5.03	1.96	2.56	0.98	1.02
12	3.48	800	2.0	5.0	2.15	2.31	1.08	0.93
60	3.48	800	2.8	9.7	3.47	2.79	1.24	0.81
21	3.48	800	2.0	6.93	2.60	2.66	1.30	0.76
80	3.48	800	2.6	11.06	3.87	2.86	1.48	0.67
3.0	3.48	800	0.95	2.95	1.51	1.95	1.58	0.62
6.0	3.48	800	0.95	3.3	1.90	1.73	2.00	0.50
0.0165	4.18	1000	0.15	0.45	0.31	1.45	2.07	0.48
0.0065	4.18	1000	0.1	0.36	0.23	1.57	2.30	0.43
0.0115	4.18	1000	0.1	0.50	0.28	1.79	2.80	0.35

在比水深 $\frac{h}{L_b}$ 大于 0.67 而小于 0.81 的一组试验中,当药量较大,爆炸后砂层被破坏时,爆坑的直径偏大。观察大药量爆炸的试验现象,爆炸时有淤泥飞出,这时,周围的淤泥向爆坑周围收缩,飞出的淤泥又落回爆坑,其结果是爆坑较浅,边缘砂层没有隆起现象。这样,测量爆坑时,爆坑的直径相对大一些,见图3。

在这里,为了更好地描述水下爆炸爆坑的大小或爆炸作用的有效范围,我们引入临界水深的概念:

$$h_c = \times \left[\left(\frac{3}{4} \right)_e^{\frac{1}{3}} \frac{Q_c}{(P_0 + gh)} \right]^{\frac{1}{4}} Q^{\frac{1}{3}} \quad (0.7) \quad (3)$$

因受试验条件的限制,临界水深还不能给出更为准确的数值,但是,由此可以为工程设计提供一个参考的判据。

根据表 1 给出的试验数据,我们总结出如下的爆坑直径计算公式:

$$D = \times \left[\left(\frac{3}{4} \right)_e^{\frac{1}{3}} \frac{Q_c}{(P_0 + gh)} \right]^{\frac{1}{4}} Q^{\frac{1}{3}}$$

式中

$$= 2.51 \quad h > h_c \quad (4a)$$

$$= 1.70 \quad h < h_c \quad (4b)$$

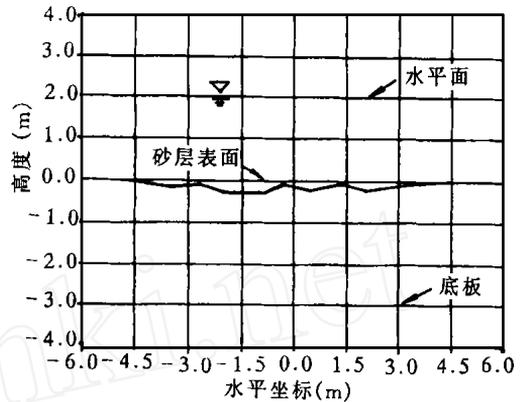


图 3 药量 21 kg、水深 2 m 爆坑形状示意图

4.3 悬挂药包试验

表 2 给出了相同药量(3 kg)、相同水深(2m)、不同挂高及相应埋深条件下的爆坑直径和爆坑体积的试验结果及其他形状参数。

表 2 悬挂药包试验表

挂高 B	埋深 L _b	直径 D	特征长度 L _b	$\frac{L_b}{h_f}$	$\frac{h_f}{L_b}$	$\frac{D}{L_b}$	体积 (m ³)
0.15	1.85	2.7	1.37	0.74	1.35	1.97	2.67
0.30	1.70	2.8	1.39	0.81	1.22	2.01	
0.45	1.55	3.1	1.41	0.90	1.10	2.20	
0.60	1.40	2.8	1.43	1.02	0.97	1.96	2.45
0.75	1.25	3.2	1.46	1.17	0.86	2.19	2.73
0.90	1.10	2.9	1.48	1.35	0.74	1.96	2.51
1.20	0.80	2.0	1.53	1.91	0.52	1.30	0.85

从表中可以看出:

在一定范围内,随着药包挂高的提高(埋深相应减少),即 $B < 0.9 \text{ m}$, ($L_b > 1.1 \text{ m}$) 时爆坑直径变化不大。

而当 $B = 1.2 \text{ m}$, $L_b = 0.8 \text{ m}$ 时,爆坑直径和体积明显减少。这时, $h_f > h_c$, 药包埋深小于临界深度,由于上覆水层厚度不够,爆炸效果会明显降低,所以,爆坑直径相对很小。比较图 4、图 5 可以知道,无论是触地爆炸还是水中爆炸,爆坑直径相对减少的结果均可以用临界埋深的概念予以解释。

由于试验误差和药包挂高(在 $h_f > h_c$ 范围内)对爆坑直径的影响不大,因此,在本试验中,没有定量地给出爆坑直径随药量变化的规律公式。

5 结论

(1) 药包在浅水中爆炸,可以给出临界埋深。当药包埋深小于该值时,爆炸荷载作用于底板上的效果会明显降低。

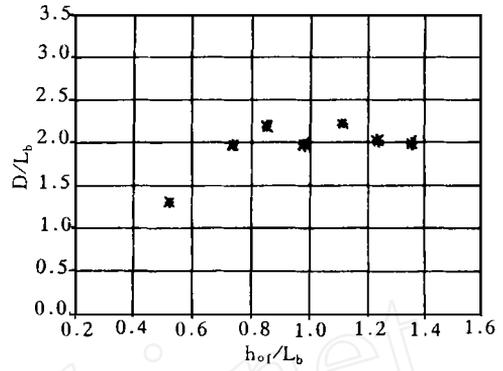
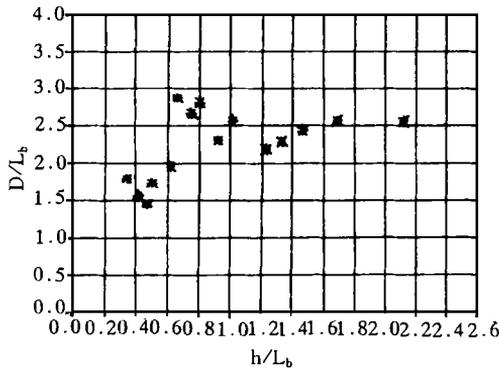


图 4 触地爆炸 D/L_b 与比水深 h/L_b 的关系

图 5 悬挂药包爆炸 D/L_b 与比埋深 h_o/L_b 的关系

(2) 爆坑的直径与特征长度成正比,药包埋深大于临界水深和小于临界水深的比例系数分别在 2.5 和 1.7 左右。

(3) 特征长度与药量的 $1/3$ 次方成正比,并且与水深的关系不大。

本文是在作者参加连云港爆炸处理软基课题组所作的试验工作的基础上完成的,特此向参加该项试验工作的赵成福、徐国强高级工程师等表示感谢。

参考文献

- 1 Cole, R. H. Underwater Explosion. Princeton University Press
- 2 李世海、燕琳、郭铁栓. 水下爆炸加密基床引起地基及水中结构二次振动的规律. 土动力学理论与实践. 大连:大连理工大学出版社,1998
- 3 Study on fluid motion in shallow water explosion by variational method. Li Shihai, Zheng Zhemin. Proceedings of international symposium on intense dynamic loading and its effects. Chengdu. June 9 - 12, 1992 Sichuan University Press pp:561 - 564
- 4 李世海、许连坡、徐小鸿. 淤泥、岩土中爆炸鼓包运动规律的研究. 爆破. 1997(1)