文章编号: 1006 - 7051(2001)02 - 0029 - 05

水中爆炸气泡脉动周期的试验研究

方　正,李世海,乔继延,丁汉
(中国科学院力学研究所,北京 100080)

摘　要: 通过工程试验研究,观测到水下爆炸引起的地基及水中结构物的二次地震波现象。借助已有的水下爆炸理论,分析试验结果,总结了地基及结构振动的规律,指出二次振动现象与水中爆炸产生的气泡脉动有关。试验特别给出了紧贴壁面爆炸时气泡脉动的规律及其脉动周期的计算结果。气泡脉动诱发的结构物二次振动的幅值与第一次振动的幅值相近,其危害性应引起重视。

关键词: 水下爆炸; 爆破震动; 气泡脉动; 结构振动
中图分类号: O383^{+}.1; TV542^{+}.5　　**文献标识码**: A

STUDY ON PERIOD OF BUBBLE IMPULSION INDUCED BY UNDERWATER EXPLOSION

FANG Zheng, LI Shi-hai, QIAO Ji-yan, DING Han-kun
(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, *China)*

ABSTRACT: The phenomena of secondary vibration of structures induced by underwater explosion are observed in the experiments. According to the existing theories on underwater explosion and based on the analysis of experimental results, the laws of foundation and structure vibrations are summarized. It's indicated that the secondary vibration phenomena are related to the bubble impulsion caused by underwater explosion. The law of bubble impulsion from the explosion nestled against a wall and the calculated period of bubble impulsion are specially given in this paper. Since the amplitude of secondary structural vibration induced by bubble impulsion is approximate to the amplitude of primary vibration, a great attention should be paid to the harm of secondary vibration to structures.

KEY WORDS: Underwater explosion; Blasting vibration; Bubble impulsion; Structural vibration

1　引　言

Cole (1948)给出了水中爆炸气泡脉动周期随药包到自由表面和刚性边界距离变化的规律[1]。李世海等(1998)通过水下爆夯工程试验发现了水下触地爆炸引起远区结构的二次振

收稿日期: 2000 - 11 - 20
作者简介: 方　正,硕士研究生。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

动,通过分析认为,产生二次振动的原因是高压气泡的脉动。然而,由于水下爆夯时的水下抛石基床为松散石层,总结出的触地爆炸气泡脉动规律仍然借助了“等效挂高”的概念。当水下药包接触结构时,爆炸引起的大型结构振动及波在结构中的传播规律研究较少,对该问题的研究有助于对水下爆炸荷载与结构相互作用规律的认识。

本文通过现场试验,观测到水下爆炸引起的水中结构物的多次振动现象,指出多次振动与水下爆炸产生的高压气泡的脉动有关。分析了水中爆炸各个物理量对脉动周期的影响。将试验结果与 Friedman 公式进行比较,两种结果的相关性很好。试验中还研究了垂直刚性边界对气泡脉动周期的影响。

试验表明,Friedman 公式用于计算气泡脉动周期,从工程应用的角度是可以接受的;更准确的计算还有待于进一步的理论分析和数值模拟。

2 试验条件及布置

2.1 试验布置

本次试验选址在某水利工程。该工程的主坝上游有一长为 179.5m、顶宽为 5.0m 的纵向碾压砼围堰,其典型横剖面见图 1。试验在上游纵向围堰处进行。药包布置在纵向围堰上游端部或距离端部一定距离的水中,沿上游纵向围堰轴线顺序布置测振点,典型布置见图 2。

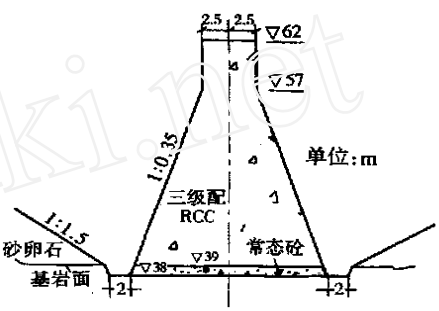

图 1 上游纵向围堰剖面图

Fig. 1 Section view of upstream longitudinal cofferdam

2.2 测试分析系统配置

(1)传感器:采用北京测振仪器厂生产的 CD-21 振动速度传感器,其主要技术指标:灵敏度 200mV/(cm·s^{-1});频率范围:10～1000Hz;振幅测量范围 1mm(单振幅)幅值线性,误差 3%。

(2)放大器:采用北京测振仪器厂生产的 GZ-2B 和 GZ-5B 型放大器,这两套系统的频响范围分别为 10～500Hz 和 0.5～20Hz(实际标定时发现可测至 25Hz,误差不超过 10%),测量范围分别为 0～28cm/s 和 0～8cm/s。

(3)记录设备:Quatech 公司生产的 12 位 A/D 卡(PCMCIA 卡),最高采样频率为 100kHz(试验中实际采样频率为 10kHz);联想昭阳笔记本电脑,Intel 公司 Celeron366 的 CPU,32M 内存。

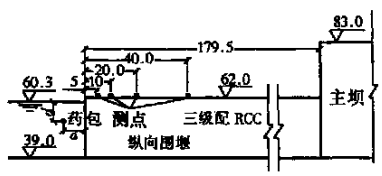

图 2 爆源和测点位置

Fig. 2 Locations of explosion source and measuring points

2.3 数据采集

试验数据的采集流程如下:传感器拾取信号→放大器放大信号→A/D 卡转换成数字信号→存入计算机中的文件。

3 波形分析

爆点设在围堰端部水下距围堰一定距离处,以不同的药量进行了多次试验。

图 3 是试验中测到的振动波形(图中的“距离”指堰体上测点至围堰前端的距离,“周期”指第 1 次脉动的周期)。从中可见,炸药爆炸引起结构物振动,首先到达的振动波波幅值升到最

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

大后逐渐衰减,直至为零或接近于零,第 1 次振动结束。静止状态持续一段时间后,结构再次振动,振动速度迅速到达峰值,然后衰减。从图中还可以看出,爆炸产生的结构物二次振动与一次振动的幅值相近,其潜在的对结构体的危害性应当引起关注(多药包爆炸产生的波的叠加可能形成破坏性较大的低频振动)。分析振动波形有如下特点:

(1) 在一次爆炸中,第二波形(简称后波)与第一波形(前波)的位相相同,形状也相似(图 3),区别在于前波的高频成分较后波多;第三、第四波也有相同的规律。

(2) 在爆源到测点距离及布药形式相同的情况下,前、后波的时间间隔不同,其时间差随着药量的增大而增大[图 3 的(a)、(b)、(d)]。

(3) 同一次爆炸,不同测点观测到的前后两次波形的时间间隔基本相同[图 3 的(b)、(c)]。

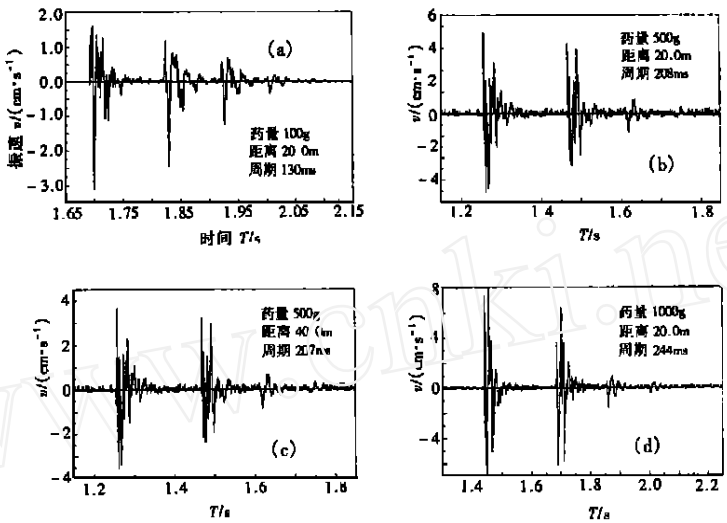

图 3　垂直振动速度波形

Fig. 3　Wave shapes of vertical vibration velocities

(4) 第 1 个周期值较第 2 个周期值大,第 3 个周期值更小。

(5) 前、后波幅值的大小相近:考虑第 1 次振动和二次脉动引发的结构体振动,发现其幅值大小相近。

根据冲击波和地震波的传播规律并从波形特点可以判断,测点的两次波形不是直达波与反射波或折射波分别作用于结构的结果,也不是冲击波和地震波因为波速不同而到达测点的时间不同的结果。事实上,按照波的传播规律,水中压力波和地震波的传播速度基本不变,由此我们可以推出:①在测点到爆源距离相同的情况下,两种波到达的时间差应基本上保持不变,即不应随药量的变化而改变;②对相同的药量,当测点到爆源的距离不同时,波到达的时间差应当是不同的。推论①、②与试验中观测到的规律不相符。试验结果表明两次波的时间差主要与药量有关,因此研究气泡的脉动是解释两(多)次波现象的主要途径。

4　试验结果分析

4.1　脉动周期

试验中进行了不同布药方式的多次试验,变化的参量有单药包药量 Q、药包距围堰端部的距离 a、药包距水面的距离 d (图 2)。

Friedman 导出了考虑自由表面和水底影响的爆破脉动周期计算法[1],他建议采用如下公

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

式计算周期:

$$T(d+10.3)^{5/6} = 4.38(\eta Q_c Q)^{1/3}\{1+1.45(\eta Q_c Q)^{1/3} F(x)/[b_0(d+10.3)^{1/3}]\} \quad (1)$$

$$F(x) = (1-x)\left[2x\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{(2n+1)^2-x^2} - \ln 2\right]; \qquad x = \frac{d-b_0}{d+b_0} \quad (2)$$

式中: T 为脉动周期,s;η 为炸药用于推动流体运动的能量利用率;Q_c 为炸药爆热,J/kg;Q 为药包质量,kg,d 为药包距水面的距离,m;b_0 为药包距水底的距离,m。

在关系式(1)中,Q_c 为试验用乳化炸药的爆热 3.59×10^6J/kg (TNT 的爆热为 4.43×10^6J/kg,取 TNT 的 81 %)[2];$\eta = 0.5$ 表示炸药能量的 50 %用于推动流体运动。

Friedman 公式适用于有自由表面和刚性底板的情况。本次试验药包置于纵向围堰端部的水中,因此首先需要分析具有一定宽度的垂直刚性边界对脉动周期的影响。带入两个特征量:特征长度 $L_0 = [3\eta Q_c Q/4\pi\rho(d+10.3)]^{1/3}$,其中 ρ 为水的密度,其它符号与前面定义相同;特征时间 $T_0 = T$,T 与公式(1) 相同。考虑两个无量纲量:测得的周期与特征时间的比值、药包距围堰的距离 a 与特征长度 L_0 的比值,二者的关系见图 4。给出的试验结果可分为三种情况:①$a/L_0 > 1$;②$0 < a/L_0 < 1$;③$a/L_0 = 0$。对这三种情况分析如下:

(1) 对于第 1 种情况,围堰端部对本次试验中气泡脉动周期的影响不大,Friedman 公式的计算结果应与试验值有较好的相关性,图 5 给出二者的关系。由于试验中所用炸药的爆热不易准确给出,本文前面采用 TNT 爆热的 81 %作为试验中炸药的爆热值,情况①符合 Friedman 公式,根据拟合的结果,依该公式反推,得出 $\eta Q_c = 1.83\times10^6$J/kg ($\eta = 0.5$),即试验中采用的乳化炸药对气泡脉动产生作用的爆热值为 3.66×10^6J/kg,根据这个值,分析情况②和③。

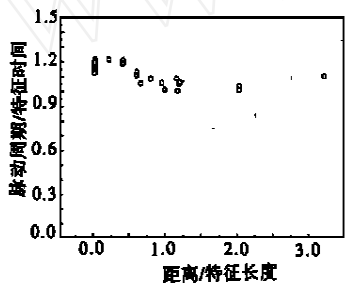

图 4 固壁边界对脉动周期的影响

Fig. 4 Effect of solid-wall boundary on implosion period

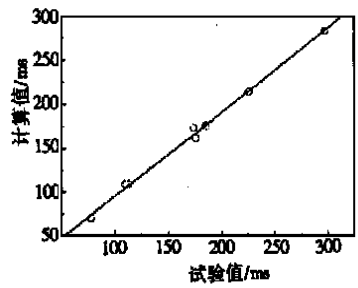

图 5 脉动周期试验值与计算值的关系

Fig. 5 Measured vs calculated impulsion periods

(2) 图 4 可以看出,药包距离壁面越近,气泡的脉动周期相对越大,这与 Cole 关于刚性边界影响脉动周期的规律是一致的。观察图 4 中相关数据,对试验结果进行简单的线性拟合(图 6),可以得到如下公式:

$$T_l = T_0(1.28 - 0.27\,a/L_0) \quad (3)$$

其中,T_l 表示 $0 < a/L_0 < 1$ 情况下的气泡脉动周期,T_0 即公式(1) 中的 T,其余符号定义与前同。

(3) 在试验中,我们同样研究了药包紧贴壁面的试验,该情况与前面所述的药包在水中爆炸情况在作用机理上有很大不同,但二者还是有许多相同的地方。在这里尝试使用研究水下爆炸的方法对贴壁爆炸现象做出某种较为简便的解释。如图 7,试验中测得的脉动周期与特征时间(即公式计算所得的周期)存在良好的线性关系。我们可以用 $T_b = 1.17\,T_0$ 表示二者的关系,其中 T_b 表示紧贴壁面的脉动周期,T_0 即公式(1) 中的 T。从此式中可以看出,药包紧贴

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

壁面,使脉动周期有一定的增大。

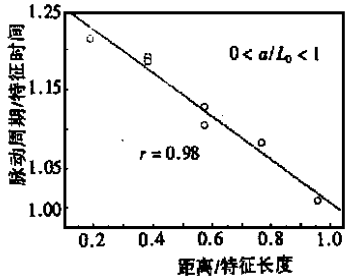

图 6　0 < a/ L_0 < 1 情况下的线性拟合结果

Fig. 6　The result of linear fit at 0 < a/L_0 < 1

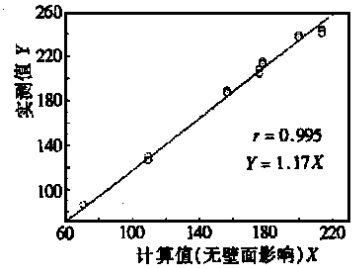

图 7　a = 0 情况下的线性拟合结果

Fig. 7　The result of linear fit at $a = 0$

4.2　水下爆炸对结构的作用

爆炸产生的压力波作用于混凝土结构物使结构产生振动,从试验测得的波形上可以看出(图 3),混凝土的第 1 次振动的幅值与第 2 次振动的幅值相近。水下爆炸的破坏力取决于许多因素,这些因素与压力波和结构的性质有关,因此我们很难说水下爆炸的哪些特性决定破坏的发生,只能根据特定的问题进行研究。如果压力波的持续时间比其他特征时间(指数衰减波的时间常数)小得多,那么压力的作用基本上是对结构物的局部冲击力,这时结构的运动主要取决于作用的冲量。这对于灵敏度很小而结构相当大的物体(就像我们试验中的堰体)更是如此。二次脉动的压力峰值虽然比冲击波峰值小很多,但其作用时间较长,其产生的冲量与冲击波产生的冲量相差不大,因此二者对于结构物的作用效果相差不大。从图 3 可以看出,结构物第 3 次振动与前两次振动相比有明显的减小,这是符合气泡脉动规律的: 随气泡脉动次数的增加,能量损失越来越大,用于气泡脉动的能量越来越小,有关其损失的系数已有较为完整的研究[1]。

试验中药包距离围堰边界 0～3m 不等,根据水下爆炸产生的压力波在水中衰减的理论,3m 的距离是数十倍药包尺寸,与较近距离的布药情况相比,其压力峰值小很多,对应的结构物的振动速度峰值也应当小很多。而实际测量表明,其响应的振动速度虽然表现为随药包至围堰距离的增大,振动速度减小,但减小幅度并没有预期的大。因此,有关试验中压力波的传播有待于进一步研究。

5　结　论

本次试验测量效果较好,数据较为丰富,从现有的数据上可以看出如下规律:

(1) 水下爆破产生的气泡运动是引起结构物二次振动的原因。

(2) 水下爆炸气泡的脉动周期已有较完善的公式描述,当爆炸点周围有固定边界面时,边界面的存在使脉动周期相应增大,其影响可参照本文中的方法加以分析。

(3) 当药包紧贴壁面爆炸时,气泡脉动周期与特征时间(依照 Friedman 公式计算所得的周期)的比是一个常数。

(4) 结构物的二次振动的幅值接近第 1 次振动的幅值。气泡的脉动周期较长、频率低,对建筑物的危害远大于陆上爆炸的高频振动,这在爆破设计中应当引起注意。

(5) 关于结构物二次振动的危害还应更深入、全面地研究。

(下转第 72 页)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

验情况。

4 双筒过水围堰

基础孔开挖以及混凝土浇筑都要求有很高的质量和精度,但水下流速大、视线不良,在不断流的情况下,定位不准,施工质量难以保证,为此采用了双铁筒过水围堰的方法。铁筒围堰由内、外铁筒、防渗布、密封材料、固定环等组成,具体尺寸按水工钢结构设计规范进行计算。密封材料为用土工布包成的条形粘土。先放置铁筒并定位,钢管支撑固定,将密封材料填入两铁筒之间,并夯捣密实,然后将围堰内的水抽干。作业过程中有少量渗水,可边作业边用水泵抽水。用此方法,既能保证施工质量,又不会因断流而影响供水。

5 效 果

该工程采用了上述的施工方法,水下控制爆破时,白浪涌起,声音沉闷,没有飞石。爆破后岩石疏松,80 %的岩块小于 20cm,仅有 2 %超过 40cm,清碴容易,岸坡完整、厉岩稳定。基础孔开挖尺寸准确,边墩工作桥浇筑表面平整、外光内实,质量好,符合设计要求。17 个单元工程中 15 个优良,优良率 88. 2 %。

6 结 语

上述水下控制爆破、周边预裂爆破和双铁筒围堰的方法,对于无法断流的水下工程,具有速度快、投资省、设备简单、安全可靠的特点,实用价值十分明显。但有些做法和参数是凭经验及现场实验得出,不一定很完善,有待于进一步研究探讨。

参考文献:

[1] 刘殿中. 工程爆破实用手册[M]. 北京:冶金工业出版社,1999.
[2] 刘清荣. 控制爆破[M]. 武汉:华中工学院出版社,1986.
[3] 霍永基. 水下爆炸[J]. 爆破,1986,(3):1～7; 1986,(4):5～13.

(上接第 33 页)

参考文献:

[1] Cole R H. Underwater Explosion[M]. Princeton University Press, 1948.
[2] 熊代余. 水下爆炸测试炸药能量方法的试验与研究[A]. 工程爆破文集第五辑(C). 武汉:中国地质大学出版社,1993.
[3] 鲁传敬. 三维水下爆炸气泡的数值模拟[J]. 航空学报,1996, 17(1): 92～95.
[4] 李玉民,倪芝芳. 水中爆炸气泡脉动流场的数值计算[J]. 爆炸与冲击,1996,16(4): 377～381.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net