

文章编号: 1001-1455(2006)04-0361-06

浅层水中爆炸冲击波对混凝土墩 斜碰撞作用试验研究*

顾文彬, 郑向平, 刘建青, 李丹俊, 陆 鸣

(解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 通过含铝炸药 JHL-3 的实爆试验, 得到混凝土墩在单个装药浅层水中爆炸、两个装药浅层水中对称及不对称设置同步起爆爆炸作用下、混凝土墩迎爆面上的冲击波压力响应数据; 获得了迎爆面中心反射压力峰值计算模型; 分析了两个装药浅层水中爆炸冲击波对混凝土墩绕射及透射作用效应。

关键词: 爆炸力学; 压力响应; 试验研究; 浅层水中爆炸; 冲击波; 斜碰撞作用

中图分类号: O383.1

国标学科代码: 130 · 3520

文献标志码: A

1 引 言

单个及多个装药层水中爆炸对目标破坏作用研究是个非常复杂的问题, 它涉及目标破坏的作用荷载的多样性、在爆炸作用下目标的运动、变形和上下界面(水面、水底)对爆炸载荷的影响等^[1], 这是个涉及水、目标运动、目标的动态破坏强度、边界等影响的复杂爆炸动力学问题。

为深入全面研究装药浅层水中爆炸对目标的破坏作用机理, 除了采用理论研究、数值模拟方法外, 试验研究是必不可少的手段^[2]。

2 试验测试方案介绍

试验在 100 m × 80 m 的水池中进行, 水底为坚硬红黏土, 水底平整, 水深 0.9 ~ 1.2 m。试验中, 装药和传感器中心距水底 0.2 m, 测点距装药中心水平距离在 2.6 ~ 8.1 m 范围内变化。测试系统由 WM138A50 型自由场压力传感器、KISTLER 和 WM109C11 型反射压力测量传感器^[3]、低噪声电缆、482B05 型信号适配器、国产 TOP 和瑞典 DEW 数据采集系统等组成。混凝土墩尺寸为上底面 0.3 m × 0.3 m、下底面 0.5 m × 0.5 m、高 0.4 m, 静态抗压强度为 30 ~ 35 MPa。两个装药与混凝土墩之间的相对位置关系和设置方向如图 1 所示, 水下装药的设置如图 2 所示, 单个装药和四个装药的设置与两个装药的设置类似。试验采用 2.395 kg 的 JHL-3 集团装药。

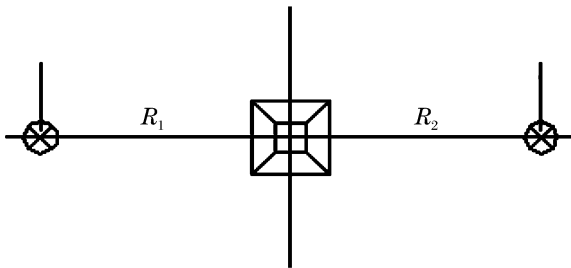


图 1 装药与混凝土墩相对位置

Fig. 1 The relative position of charge and concrete frustum

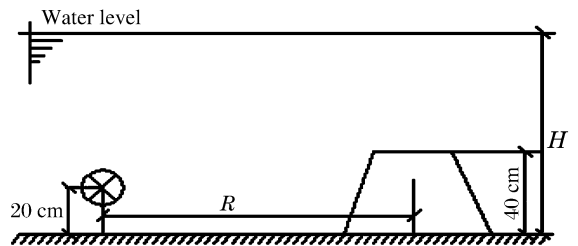


图 2 水下装药的设置

Fig. 2 Underwater charge setting

* 收稿日期: 2005-05-15; 修回日期: 2006-03-10

作者简介: 顾文彬(1961—), 男, 博士, 教授。

3 试验结果与分析

3.1 自由场中爆炸冲击波峰值压力试验结果统计与分析

试验测得 JHL-3 装药在深度 1.2 m 左右的浅层水中爆炸时,距装药 2.60、3.45、4.05 和 7.05 m 处得的自由场压力时程曲线,如图 3 所示。对应峰值压力统计结果列于表 1 中。

在无限水中爆炸理论中 P. Cole^[4] 指出:在一定测量范围内,峰值压力为

$$p_m = k(C^{1/3}/R)^\alpha \quad (1)$$

式中: k 、 α 为由试验确定的常数, C 为装药量(kg), R 为装药中心到测点的距离(m)。

根据表 1,5.05 m 处测点压力偏高,属于异常数据,被剔除。利用式(1)形式,运用非线性最小二乘回归方法,得到单个装药浅层水中爆炸时,自由场中冲击波峰值压力半理论半经验计算公式表示为

$$p_m = 111.09(C^{1/3}/R)^{1.683}$$

表 1 单个装药浅层水中爆炸冲击波自由场峰值压力

Table 1 Pressure statistics for single charge blast in shallow-water

R/m	p_m^1/MPa	R/m	p_m^2/MPa
3.25	30.860	5.65	7.708
3.45	26.562	5.85	5.906
4.05	27.041	6.25	8.000
4.25	19.066	6.45	7.361
4.45	15.597	6.85	7.949
4.65	13.442	7.05	6.882
5.05	14.684		

1) TOP 数据采集系统测量;2) DEW 数据采集系统测量。

$$0.190 < C^{1/3}/R < 0.514 \quad (2)$$

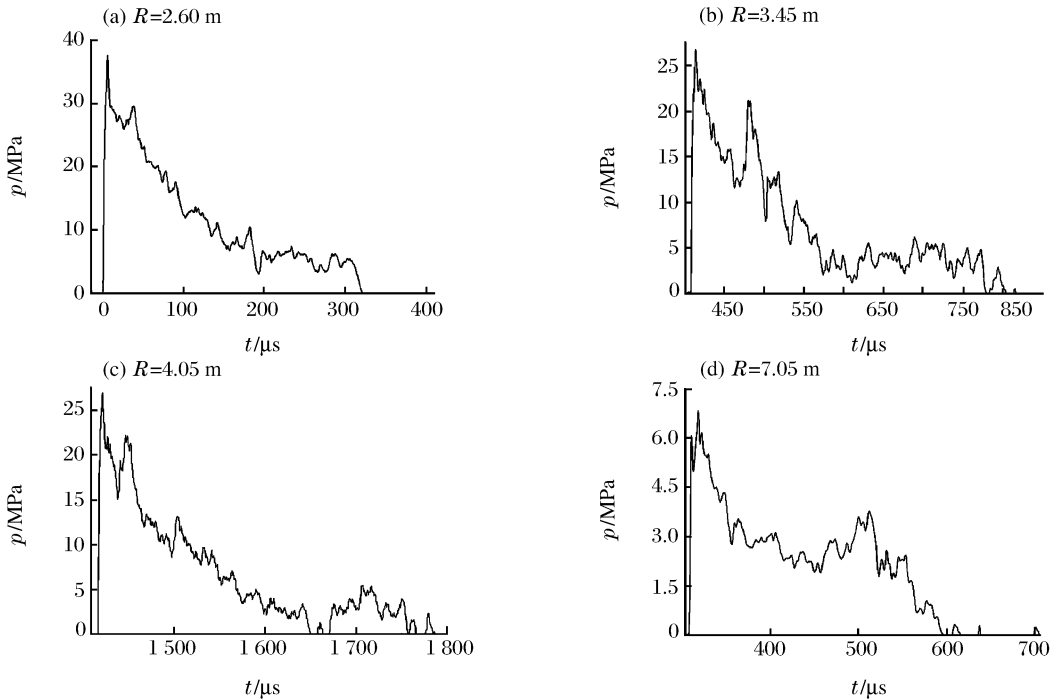


图 3 JHL-3 装药自由场中爆炸冲击波实测典型压力曲线

Fig. 3 Measured pressure curves of shock wave for JHL-3 explosive

3.2 单个装药爆炸冲击波对混凝土墩斜碰撞作用试验研究

试验得到的单个装药浅层水中爆炸时,距装药中心 3.25、4.85 m 处的混凝土墩迎爆面压力时程曲线如图 4 所示。表 2 是不同距离处混凝土墩迎爆面中心处冲击波峰值压力试验结果。

根据表 2,6.45 m 处压力偏低,属于异常数据,被剔除。运用非线性最小二乘回归方法,得到单个装药爆炸时,混凝土墩迎爆面中心处反射冲击波峰值压力半理论半经验计算公式

$$p_m = 339.50(C^{1/3}/R)^{1.753} \quad 0.190 < C^{1/3}/R < 0.723 \quad (3)$$

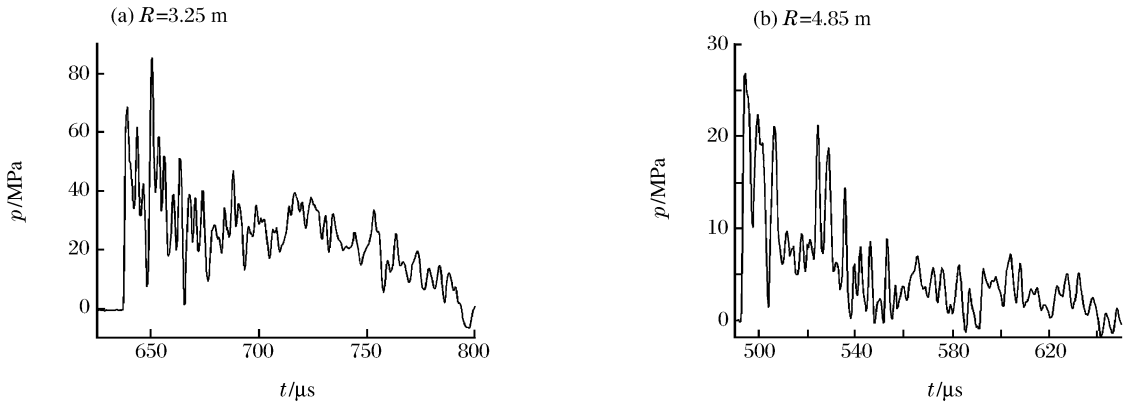


图 4 不同距离处混凝土墩迎爆面中心典型压力曲线

Fig. 4 Pressure curves on concrete frustum frontpiece in different distances

表 2 JHL-3 爆炸作用下混凝土墩迎爆面中心峰值压力实测结果

Table 2 Measured values of peak pressures on concrete frustum frontpiece

R/m	$(C^{1/3}/R)/(kg^{1/3}/m)$	p_m/MPa	R/m	$(C^{1/3}/R)/(kg^{1/3}/m)$	p_m/MPa
1.85	0.7232	135.384	4.85	0.2759	26.857
2.05	0.6527	136.621	5.05	0.2649	26.360
2.25	0.5946	149.611	5.25	0.2548	22.532
3.05	0.4387	97.770	5.65	0.2368	28.589
3.25	0.4117	68.550	5.85	0.2287	21.648
3.45	0.3878	59.703	6.25	0.2141	25.307
3.65	0.3666	65.070	6.45	0.2074	12.816
4.05	0.3304	60.249	6.65	0.2012	26.007
4.25	0.3148	48.317	6.85	0.1953	21.898
4.45	0.3007	46.579	7.05	0.1898	9.943

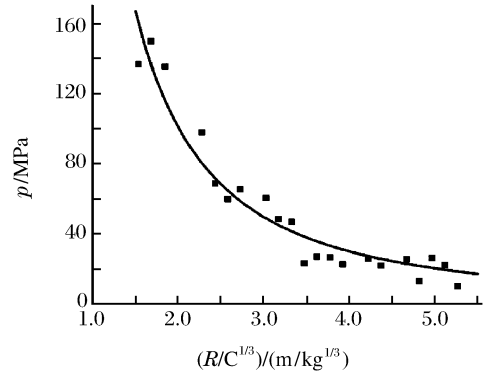


图 5 迎爆面反射压力与比距离关系曲线

Fig. 5 Echo pressure vs scale distance

表 3 自由场压力与反射压力计算值对比及反射因数

Table 3 Reflectance and comparison between calculated and measured values of echo pressure

$(R/C^{1/3})/(m/kg^{1/3})$	p_{fm}/MPa	p_{rm}/MPa	r	$(R/C^{1/3})/(m/kg^{1/3})$	p_{fm}/MPa	p_{rm}/MPa	r
1.39	63.82	190.67	2.99	3.34	14.60	40.93	2.81
1.52	54.91	163.45	2.97	3.49	13.56	37.90	2.80
1.69	45.93	135.29	2.95	3.64	12.63	35.20	2.79
1.84	39.81	116.53	2.93	3.79	11.80	32.80	2.78
1.99	34.89	101.55	2.91	3.94	11.05	30.63	2.78
2.14	30.87	89.39	2.90	4.24	9.77	26.93	2.76
2.29	27.55	79.37	2.88	4.40	9.18	25.34	2.76
2.44	24.76	71.01	2.87	4.55	8.67	23.89	2.75
2.59	22.39	63.95	2.86	4.70	8.21	22.57	2.74
2.74	20.37	57.93	2.85	5.00	7.40	20.24	2.73
3.04	17.10	48.28	2.83	5.15	7.04	19.22	2.72
3.19	15.77	44.37	2.82	5.30	6.71	18.27	2.72

由回归公式计算与试验结果对比结果(见图5)可以看出,回归公式计算结果有足够的工程精度。表3是自由场压力峰值 p_{fm} 、迎爆面中心反射压力峰值 p_{rm} 和压力反射因数 r 的计算结果。由表3可知,与自由场冲击波峰值压力变化规律^[5]相比,*JHL-3*炸药浅层水中爆炸时,混凝土墩迎爆面反射压力的反射因数远大于2.0,在距装药较远的地方,混凝土墩的冲击波压力反射因数接近3.0,在比例距离小于5.3处的压力反射因数均大于2.7。表明混凝土墩迎爆面反射压力的反射因数很大,有利于混凝土墩的破坏,这与数值模拟结果也基本吻合^[5]。

3.3 两个装药同时爆炸对混凝土墩迎爆面斜碰撞作用试验结果及其分析

3.3.1 两个装药对称设置爆炸典型测试压力波形分析

两个装药关于混凝土墩对称设置且同时起爆条件下,两个相向运动的入射冲击波将在混凝土迎爆面上发生斜反射、在定部和侧面的对称面上发生正碰撞。图6是两个*JHL-3*装药相对于混凝土墩对称设置条件下,混凝土墩迎爆面中心的压力时程曲线。两个装药理论上同时起爆条件下,迎爆面冲击波压力时程曲线应包括迎爆面入射直达波、背爆面绕射波、背爆面入射冲击波作用于混凝土产生的透射冲击波。由于水底界面的存在,会产生先于直达波的前驱波;由于直达波在目标拐角的绕射会产生短时间的负压区;由于直达波的透射波波速大于绕射波波速,通常透射波超前于绕射波。图6(a)是装药间距8.0 m条件下,迎爆面中心的反射压力时程曲线,图中第一个波峰为迎面装药爆炸波的反射波峰值压力,为约44.99 MPa,式(3)预测的对应点反射冲击波峰值为48.76 MPa,两者的相对误差7.73%;第二个压力荷载大约从2 220 μs 开始,与第一个入冲击波作用的时间间隔约85 μs ,由背爆面装药爆炸作用产生,根据背爆面冲击波透射和绕射作用路径和传播速度,该压力波应为混凝土墩内的透射波到达测点的响应,因为绕射冲击波到达测点的时间间隔应大于250 μs 。图6(b)是装药间距12.0 m条件下,迎爆面中心的反射压力时程曲线。由于迎面装药爆炸波传播距离较长,球面冲击波对于水底的反射作用角逐渐增大,并引起不规则反射,形成先于直达波的水底反射波,又称为前驱波,见3 750 μs 之前的波形;直达冲击波在迎爆面中心的反射作用形成了图中的第一个压力波峰;压力曲线的第一和第二个峰值之间的时间间隔约220 μs ,该值刚好接近背爆面冲击波绕射作用传播时间,从而形成了绕射压力波形;又由于拐角处绕射作用形成水流涡流,导致绕射压力波形出现短时间的负压区。

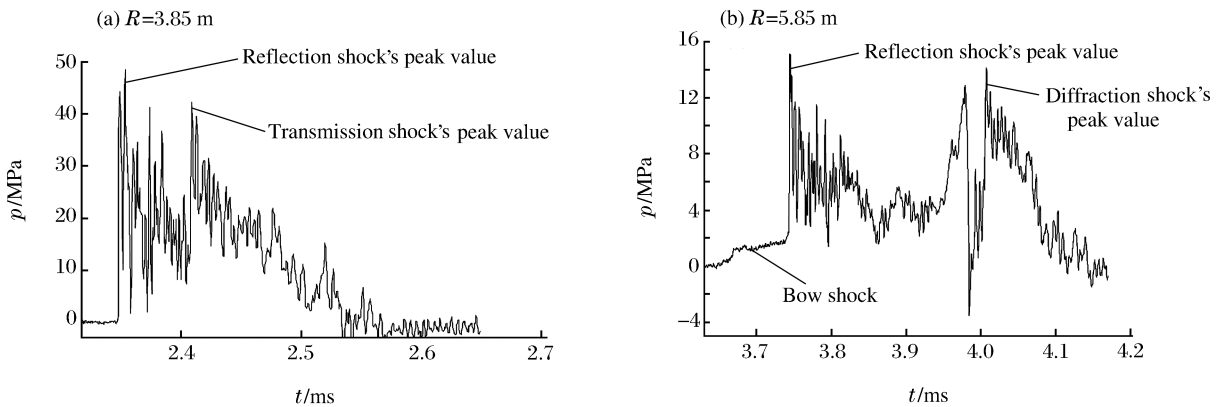


图6 混凝土墩迎爆面典型压力曲线

Fig. 6 Pressure curves on concrete frustum frontispiece

3.3.2 两个装药不对称设置同步起爆试验结果分析

当图1中 $R_1 \neq R_2$ 时,两个装药爆炸为不对称设置情况。对6.0 m间距的两个*JHL-3*装药进行不对称设置爆炸试验。图7是混凝土墩距两装药对称点的距离偏差分别为0、0.2、0.4、0.6 m条件下,混凝土墩迎爆面中心压力时程曲线测量结果。图中可以看出,关于混凝土墩不对称设置同时起爆时,所测得的混凝土墩迎爆面上的压力时程曲线的大部分形状与单个装药爆炸时混凝土墩迎爆面上的压力测量曲线相似,且压力峰值也比较相近。

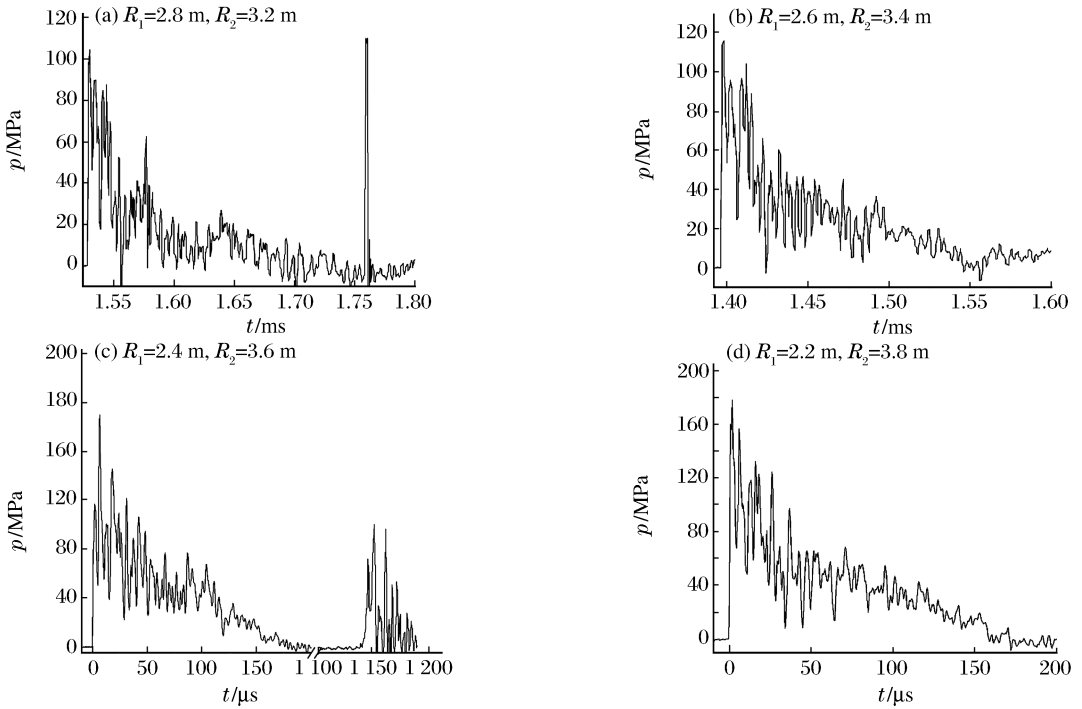


图 7 不对称装药爆炸混凝土墩迎爆面压力曲线

Fig. 7 Pressure curves on concrete frustum frontpiece in the case of two non-symmetrical charges explosion

混凝土墩迎爆面中心实测反射峰值压力和利用公式(3)计算得到的值见表 4。表 4 中, R_1 为较近装药距迎爆面距离, d 为混凝土墩中心距装药对称点距离, p_{tm} 为实测的峰值压力, p_{sm} 为单个装药回归峰值压力, ϵ_p 为峰值压力相对误差。

由表 4 可知, 两个装药不对称设置同步起爆时, 爆炸作用对迎爆面反射压力几乎没有增强, 同时也表明迎爆面反射压力随比距离变化的回归公式有足够的精度。

表 4 两个装药爆炸作用下混凝土墩迎爆面压力峰值计算与实测结果对比

Table 4 Comparison between calculated and measured peak pressures on concrete frustum frontpiece

R_1/m	d/m	p_{tm}/MPa	p_{sm}/MPa	$\epsilon_p/\%$
2.8	0	94.176	92.206	2.09
2.6	0.2	104.556	104.997	0.42
2.4	0.4	115.642	120.814	4.28
2.2	0.6	116.151	140.721	17.46
2.0	0.8	177.513	166.611	6.14

4 结 论

(1) 单个装药爆炸对混凝土墩作用试验研究结果表明迎爆面以反射超压破坏作用为主, 背爆面以绕射作用冲量为主; JHL-3 装药在比距离小于 5.3 时, 迎爆面反射作用因数大于 2.7, 且随比距离增加而减小。

(2) 两个装药关于混凝土墩对称设置同步起爆时, 混凝土墩迎爆面先后受到直达冲击波、背爆面冲击波的投射波和绕射波作用; 装药间隔足够大时, 迎爆面首先受前驱波作用; 绕射波使迎爆面受到负压拉伸作用。

(3) 回归得到的迎爆面入冲波反射超压计算半理论半经验公式, 在试验比距离范围内具有足够精度。

(4) 两个装药对称和非对称设置同时爆炸作用试验结果表明, 在两个装药对混凝土墩侧面和顶面的先后作用仍然有显著的破坏叠加效应。

参考文献:

- [1] 顾文彬. 装药浅层水中爆炸冲击波特性试验与数值模拟研究[R]. 南京:解放军理工大学, 2000.
- [2] 周昕清. 爆炸动力学及其应用[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2001.
- [3] US Army Corps of Engineers. Underwater blast monitoring (engineering and design)[R]. Washington, DC: Department of the Army, ETL1110-8-11, 1991.
- [4] Cole P. 水下爆炸[M]. 罗耀杰, 韩润泽, 官信, 等译. 北京:国防工业出版社, 1960.
- [5] 顾文彬. 浅层水中沉底爆炸冲击波相互作用数值模拟[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2003, 4(6): 64-68.
GU Wen-bin. Numerical simulation of explosive shockwave interaction in shallow-layer water[J]. Journal PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2003, 4(6): 64-64.

Experimental investigation of the oblique collision effects of explosion shock wave on concrete frustum in shallow water

GU Wen-bin^{*}, ZHENG Xiang-ping, LIU Jian-qing, LI Dan-jun, LU Ming
(*Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, Jiangsu, China*)

Abstract: Pressure response data on the concrete frustum frontispiece were gotten by simulation experiment detonating the aluminized explosives JHL-3, under the conditions of single charge being initiated, and two charges being initiated symmetrically and non-symmetrically respectively. The calculation model of peak pressure was obtained and the diffraction and transmission effects of explosion shock wave on concrete frustum in shallow water were analyzed.

Key words: mechanics of explosion; pressure response; experimental investigation; explosion in shallow water; shock wave; oblique collision effect

* Corresponding author: GU Wen-bin
E-mail address: guwenbin2@yahoo.com.cn
Telephone: 025-84272400