

水中爆炸冲击波作用下混凝土墩动态响应初步分析

顾文彬 叶序双 王自力

(工程兵工程学院 南京 210007)

摘要 用水下爆炸冲击分析(U SA)方法,在假设条件下,数值模拟了混凝土结构物水中爆炸冲击波作用下的加速度及压力响应,是对浅层水中爆炸“流-固”耦合动力学问题数值解的初步尝试。

关键词 水下爆炸 数值模拟 动力学分析

中图法分类号 TV 331*

1 概 述

浅层水中爆炸对目标破坏作用研究是一个十分复杂的问题。一方面,使目标产生破坏的作用载荷是多样的,有水中冲击波压力、高速冲击水流的动压以及爆炸产物的直接冲击作用等;另一方面,爆炸作用下,障碍物或目标的运动、变形也影响爆炸载荷的变化;还有,浅层水中爆炸时,上下界面对爆炸载荷存在着影响。因此,它是一个涉及水、目标运动及边界影响等的复杂爆炸动力学问题。

研究爆破混凝土墩的优化装药结构,最大限度地发挥爆炸破坏能力,目前迫切要求深入、全面地研究装药浅层水中爆炸对目标的破坏作用机理。随着高新技术和基础理论的发展,除了对该问题进行进一步实验和理论研究外,还可借助计算技术对水中爆炸作用进行数值研究。对水中爆炸作用过程、爆炸场参量、边界对爆炸场影响及爆炸载荷对目标的动态作用等复杂问题进行系统、完整的计算与分析。

2 数值模拟的基本假设与动力学分析模型

2.1 基本假设

1 不计水底对爆炸冲击波的影响,且混凝土墩底面由弹簧系统支撑,从而计及水底对目标的影响; 2 混凝土墩是由均匀、连续、各向同性材料组成,混凝土结构属于弹性拉伸或压缩屈服破坏。满足上述假设条件时,目标的爆炸破坏效果应是较为保守的。

2.2 模拟分析动力学模型

在上述假设和爆炸装药设置条件下,装药浅层水中爆炸对混凝土墩动力破坏的力学分析模型如图 1 所示。装药与混凝土墩底部近面的距离为 3.0m,装药距混凝土墩下底面 500mm,装

* 顾文彬:男,1962年12月生,博士,副教授。
1997-07-21收到原稿,1998-01-12收到修改稿。

药为 33kg TNT 炸药; 通常装药在沉深大于 2.0m 的浅层水中爆炸, 不考虑气泡的脉动过程。装药浅层水中爆炸对目标的破坏属于较远距离爆炸破坏, 目标的破坏主要由水中冲击波作用造成。

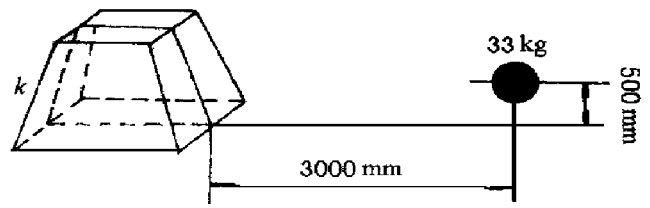


图 1 单个装药水中爆炸对目标作用的分析模型

Fig. 1 Dynamic model of object acted by single charge explosion

3 数值模拟基本理论

数值模拟是从动力学系统封闭偏微分方程组出发, 用数值方法求解。它涉及基本守恒方程、混凝土本构关系、流体高压状态方程等方面。

3.1 守恒控制方程

水下爆炸冲击波与混凝土结构物相互作用是典型的“流-固”耦合动力学问题, 常采用 DAA 方法进行分析处理。采用公式的形式为

$$\ddot{M} P_{sc} + d_c A P_{sc} + d_c \Omega_f A P_{sc} = d_c (M_t \ddot{X}_{sc} + \Omega_{sc} M_t \ddot{X}_{sc}) \quad (1)$$

式 (1) 中: M_t 是附加质量矩阵, Ω_f 是频率矩阵, Ω_{sc} 是散射频率矩阵, P_{sc} 是散射节点压力矢量。采用分步求解法与阻尼增量法相结合, 与线性结构有限元动力方程联立后, 水下爆炸冲击波与混凝土结构物相互作用的“流-固”耦合非线性动力学控制方程的增量形式为

$$\begin{cases} M_s^{\# \Delta t} \ddot{X}_s + C_s^{\# \Delta t} \dot{X}_s + K_s X_s = -G_s A_f [Q_m + (I - \Gamma) P_f] + R^i (X_s^i) \\ A_f Q_m + d_c (D_{f_1} + D_s) Q_m + Z d_c^2 D_{f_2} Q_m = K_{f_1}^{\# \Delta t} X_s - d_c K^i X_s + F^Q X_s^i \end{cases} \quad (2)$$

式 (2) 中: M_s 、 C_s 、 K_s 分别表示结构物质量、阻尼及切线刚度矩阵; X_s 表示结构物节点位移矢量; G_s 是固体与流体界面上节点面力之间关系的变换矩阵; A_f 是关于流体网格单元面积的对角矩阵; Q_m 是离散压力积分函数矢量; P_f 是流体网格上的压力增量矢量; Γ 是单元方向余弦对角矩阵, I 是一致性矩阵; ρ 、 c 分别表示流体密度及声速; Z 是比例系数, $Z \leq 1$; $R^i (X_s^i)$ 是固体结构 t 时刻的内力矢量; X_s^i 是 t 时刻结构的位移列矢量; X_s 是 t 到 $t + \Delta t$ 时刻结构的位移增量矢量; 列矢量 D_{f_1} 、 D_{f_2} 是平面波假设和虚质量假设条件下, 流体的相当阻尼矩阵及刚度矩阵, D_s 是阻尼增量法在流体阻尼矩阵中的增量。 K_{f_1} 、 K 、 F^Q 分别表示“流-固”耦合方程中的耦合项

$$\begin{cases} D_{f_1} = A M_f^{-1} A_f \\ D_{f_2} = D_{f_1} M_f^{-1} A_f \\ D_s = A G_s^T M_f^{-1} G_s A_f \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} K_{f_1} = Z d_c^2 D_{f_1} G_s^T - d_c A G_s^T M_s^{-1} C_s \\ K = A G_s^T M_s^{-1} K_s \\ F^Q = Z d_c^2 [D_{f_2} - (1/d_{f_1}) D_{f_1} R^{-1}] (Q_m - Q_s) - \\ d_c [D_s - D_s + (1 - Z) D_{f_1} + (1/d) A R^{-1}] \Gamma P_f \end{cases} \quad (4)$$

R 是冲击波原点到“流-固”界面上流体节点距离 R_i ($i = 1, 2, 3$) 构成的对角矩阵。

3.2 混凝土材料模型

混凝土单向拉伸、压缩应力应变曲线分段表示, 在弹性拉伸屈服段

$$e = E_0 X \quad (5)$$

在反向压应力及应变屈服段

$$\frac{1}{e} = \frac{1}{E_0} \left[1 + A \frac{X}{\lambda} + B \left(\frac{X}{\lambda} \right)^2 + C \left(\frac{X}{\lambda} \right)^3 \right] \quad (6)$$

式中: E_0 表示拉伸弹性模量; X 为应变; λ 表示压应力屈服时的应变; A 、 B 、 C 为

$$\begin{cases} A = \frac{E_0 E_c + (\lambda^3 - 2\lambda^2)E_0 E_c - (2\lambda^3 - 3\lambda^2 + 1)}{\lambda(\lambda^2 - 2\lambda + 1)} \\ B = 2E_0 E_c - 3 - 2A \\ C = (2 - E_0 E_c) + A \\ \lambda = \frac{X_0}{X} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $E_c = \left. \frac{de}{dX} \right|_{X=X_c}$, 表示压应力屈服模量; X_0 表示反向压应力破坏极限应变。

3.3 高压状态流体状态方程

根据实验研究, 高压状态下水的状态方程为

$$p = (109 - 93.7v)(T - 348) + 5010v^{-5.58} - 4310 \quad (8)$$

式中: p 为压力 (10^5 Pa), v 为比容 (cm^3/g), T 为绝对温度 (K)

4 爆炸冲击波对混凝土墩动力破坏作用初步模拟分析

图 1 所示混凝土墩结构, 上底边长 600mm, 下底边长 1200mm, 高度 1000mm。对混凝土墩进行有限元网格离散化, 整个墩体离散成 512 个六面体单元, 计 829 个节点, 图 2 图 3 所示是网格节点、单元编号情况。通过计算结果分析, 讨论了单个装药浅层水中爆炸情况下, 混凝土墩离散节点加速度响应及冲击绕射作用下墩体表面单元压力响应情况。

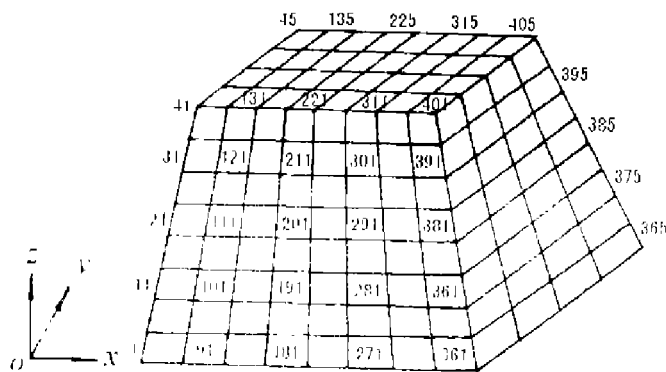


图 2 混凝土墩 (一半) 网格节点分布

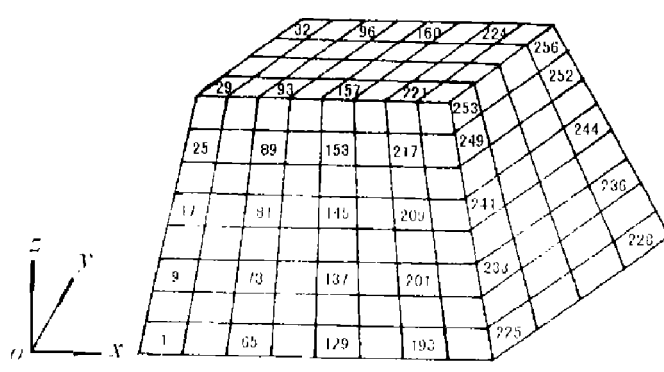


图 3 混凝土墩离散单元分布图

Fig. 2 Node distribution scheme of concrete body Fig. 3 Element distribution scheme of concrete body

4.1 混凝土墩结构加速度响应

图 4(a)~ 图 4(c)所示分别是节点 31 211 391 加速度时程曲线。由图 4(a)可知背爆面上自由节点 31 的加速度变化平滑, 没有振动现象, 当冲击波正压作用结束, 节点的加速度基本上保持不变。由图 4(b)和图 4(c)可见, 墩体内部及迎爆面节点的加速度响应曲线是不光滑的, 伴随着不规则振动。内部节点 211 的 x 方向加速度最大值与水中冲击波作用的方向相反 (见图 4(b)), 可见背爆面反射拉伸波作用使墩体内部产生较大的附加反向载荷, 这些载荷使墩体内

混凝土材料受力状态发生较大变化,这是结构破坏的重要因素之一。分析迎爆面节点 391 加速度响应曲线(图 4(c)所示),节点一开始获得的加速度与冲击波作用方向相反。实际上,这不是冲击波作用下节点加速度响应,而是由于节点下部材料受冲击波作用产生的 z 方向压缩变形,进而引起节点 391 的 x 方向拉伸变形的结果。分析爆炸作用过程可知,水中爆炸冲击波首先到达底部单元 225 表面,该单元较大的压缩变形对区域附近的相邻单元都会产生一定的拉伸效应。只有当水中冲击波对该单元表面作用时,这一效应才会消失,压缩变形才会表现出来,数值模拟定量地反映了这一力学现象。图 4(c)所示加速度时程曲线的振荡,是由于混凝土结构迎爆面较大压缩变形产生的稀疏波,引起水下爆炸冲击波载荷的衰减,结果使表面节点压力下降;另一方面,混凝土结构 x 方向的刚体位移对水中爆炸冲击波也有衰减作用,这是迎爆面节点加速度时程曲线振荡的另一个原因。这正是“流-固”耦合算法把水下爆炸冲击波与混凝土结构的变形、运动作为一个分析系统的优点,使数值模拟研究更接近实际。

4.2 混凝土墩表面上冲击波压力响应

在静载作用下,结构物表面的压力就是外加载荷。但高速、强冲击波动载荷作用下,由于波的反射,结构物表面压力响应与入射冲击波压力有很大差别。图 5(a)~图 5(e)分别是水中爆炸球面入射冲击波作用过程中,迎爆面、侧面、背爆面及顶面单元压力时程曲线。图 5(a)~图 5(c)是迎爆面上不同单元表面压力时程响应曲线。分析迎爆面单元表面压力时间关系曲线可知:(1)墩体底部单元 211 距爆心最近,冲击波首先到达该单元,随着单元距爆心距离的增加,水中爆炸冲击波按 225 236 256 顺序依次到达这些单元的表面,单元受冲击波作用而获得表面压力的时间各不相同;(2)随着单元距爆心距离的增加,如墩体下部二个邻近单元 225 236 表面压力响应幅值依次减小。另一方面,虽然 236 256 二个单元距爆心距离也是逐渐增加,入射冲击波压力也逐渐下降,但单元表面压力反而有所增加(见图 5(b),图 5(c))。这是由于冲击波作用过程中,混凝土结构表面变形历程引起的。图 5(d)是混凝土侧面单元 124 压力时程响应曲线。单元表面压力基本上是逐渐增加到压力峰值,然后迅速衰减。分析水中爆炸冲击波对混凝土侧面的作用可知,球形波阵面与侧面的夹角很大,此时冲击波在侧面上的反射是非规则反射,即“马赫反射”,马赫杆与墩体侧面近似正交。马赫反射的过程使侧面反射压力逐渐增加,直至入射波作用过程结束,表面反射压力达到最大值。这种现象对墩体顶面单元压力响应同样存在。图 5(e)是背爆面单元 278 表面压力时程曲线。由图可知,单元表面压力时程曲线是光滑振荡曲线。该表面压力响应是由水中爆炸冲击波经侧面、顶面作用形成环流后,对背爆面继续作用的结果。由于顶面与侧面 x 方向的尺寸不同,环流到达的时间不同,两个环流波的迭加形成了单元表面压力响应发生振荡。背爆面上不同单元表面压力响应的振荡变化规律有较大的

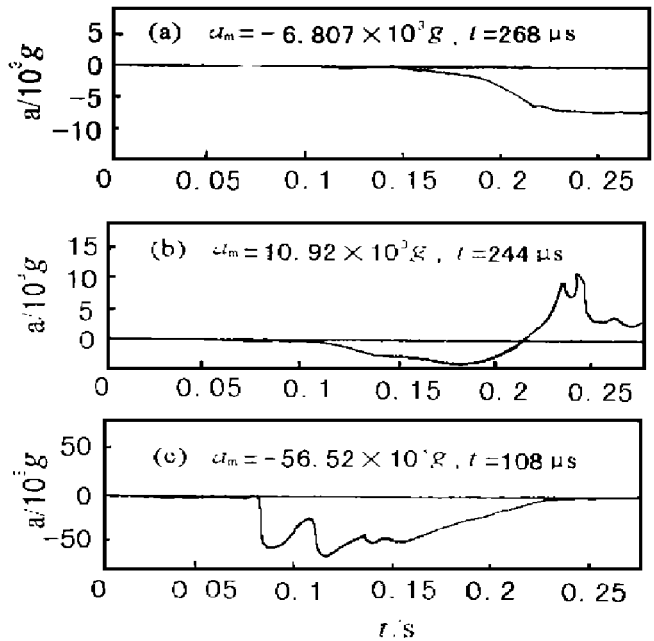


图 4 节点 31 211 391 x 方向加速度时程曲线

Fig. 4 Acceleration curves of 31st 211st and 391st nodes at x direction

差异。

5 小 结

通过计算及结果分析,对浅层水中爆炸冲击波与混凝土墩相互作用有如下认识:

(1)冲击波作用下,迎爆面压力响应是入射冲击波压力的 2 倍以上,最大可达到 2.26 倍。在迎爆面上沿表面,由于水中冲击波入射角增大,表面压力响应的增加倍数更高。

(2)爆炸作用过程中,混凝土墩顶面、侧面及背爆面也会受到冲击波压力作用,顶面及侧面压力响应可达 3 MPa 以上,该压力对墩体的破坏也有贡献。

(3)在迎爆面及墩体内部,节点的加速度变化是随机的,有时发生很大的振荡,表明在强冲击波载荷作用下,结构内部及表面材料的受力状态是复杂的。这是“流-固”耦合算法把爆炸冲击波、流体介质、混凝土结构变形与运动作为一个系统来研究的结果。

(4)在平行于水平面的横截面上,沿冲击波作用方向,混凝土材料的加速度变化很大,表明冲击波作用引起的墩体内部压应力波衰减较快。另外,墩体内部加速度最大值有时与冲击作用方向相反,表明墩体内部不一定是压应力波作用下的压缩破坏。而背爆面加速度与冲击波作用方向相同,也不是压应力波作用的结果,而是反射拉伸波拉伸的作用。因此,背爆面的破坏总是拉伸破坏。

(5)由于迎爆面及墩体内部加速度的振荡,其速度响应也有振荡,但振荡频率、幅度等变化规律不同,这是由结构材料动态阻尼特性决定的。因此,结构物的动态破坏不仅与材料的强度有关,还与材料的微观结构、加载速率等因素有关。

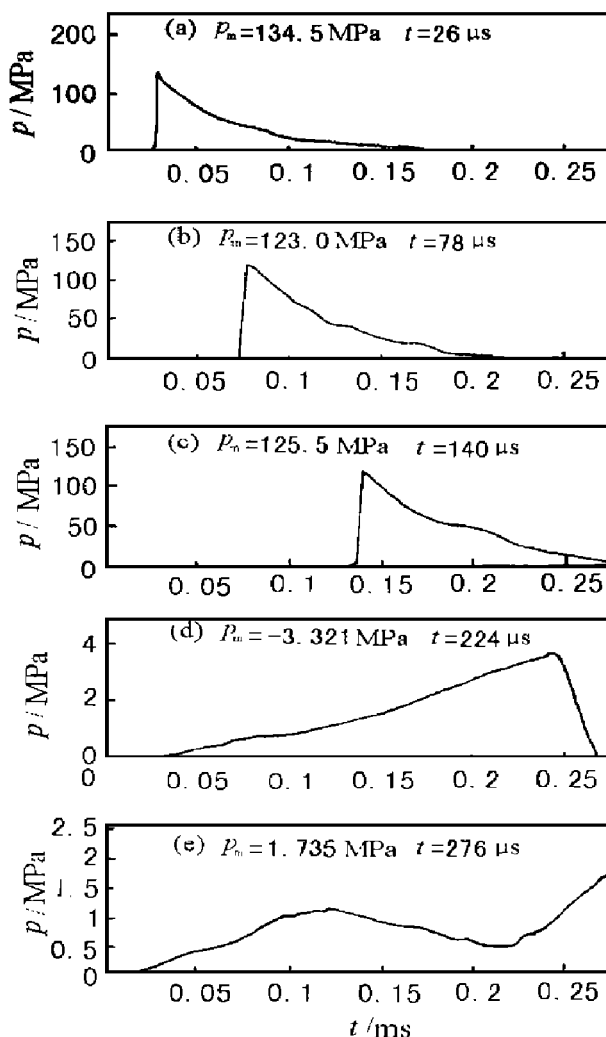


图 5 单元 225 236 256 124 278 表面压力时程曲线
Fig. 5 Pressure curves of 225th, 236th, 256th, 124th and 278th elements on surface

参 考 文 献

- 1 钱胜国,等. 近自由水面水下爆炸时水中激波特性. 爆炸与冲击, 1983 3(4): 53~ 63
- 2 Kamagai M, Inat et al. A Study of Near-Surface and Underwater Explosions by Computer Simulation. U-CRL-ID-116360 Feb. 1994

DYNAM IC RESPONSE ANALYSIS OF CONCRETE BODY FOR UNDERWATER SHOCK WAVES

G u W enbin, Y e X ushuang, W ang Zhili

(N anjing Engineering Institute, N anjing, 210007)

ABSTRACT In the condition of some hypotheses, making use of method of underwater shock analysis, the acceleration and pressure response of the concrete structure are numerically simulated during charge explosion under shallow water.

KEY WORDS underwater explosion, numerical simulation, dynamic analysis