

不同起爆方式对水下深孔爆破危害效应影响的数值模拟*

郭涛 冯彬 李裕春 丁文 周守强

解放军理工大学工程兵工程学院(江苏南京,210007)

[摘要] 文章以连续介质力学和动力非线性有限元理论为基础,推导炸药、水底介质和水的多物质 ALE (multi-material arbitrary lagrangian eulerian) 控制方程,采用多物质 ALE 算法模拟了水下深孔爆破产生的水中冲击波、水底介质中应力波及爆破振动传播过程,并模拟了装药不同位置起爆时对爆破危害效应的影响。不同起爆方式产生水中冲击波由小到大的顺序为:顶端起爆,两端起爆,中间起爆,底端起爆;而爆破振动由小到大的顺序为:底端起爆,中间起爆,顶端起爆。

[关键词] 水下深孔爆破 水中冲击波 爆破振动 数值模拟

[分类号] TD235.33 TJ51

引言

近年来在各种深水港湾新建工程、港口改扩建工程以及水下国防工程中,水下深孔爆破技术被广泛采用。水下爆破作业在给工程建设带来极大便利的同时,由于其在装药结构、起爆方式、爆破环境、冲击波的传播途径上的复杂性和特殊性^[1],因此水下爆破作业的安全问题显得尤为重要。水下爆破的主要危害有:爆破振动、水中冲击波、爆破飞石、爆破涌浪以及对水环境的污染等^[2-4],其中又以水中冲击波及爆破振动危害效应最为突出。本文采用 ANSYS/LS-DYNA 软件,对水下爆破过程进行数值模拟,研究装药的不同起爆方式对冲击波及爆破振动危害效应的影响。

1 有限元模型

计算模型如图 1 所示。设置参数为:装药量 4 kg,填塞长度 0.5 m,孔径 90 mm,水深 2 m。采用流固耦合算法,水底材料采用 Lagrange 网格;炸药、水介质、空气介质采用 Eulerian 网格;在水底材料相同位置使用 Eulerian 网格建立多物质 ALE 空间,供炸药在 ALE 空间内流动。模型的底面、侧面采用透射边界。为了减小模型的计算量,将装药的侧面设定为对称边界,采用 cm-g- μ s 单位制建模。

2 材料模型与状态方程^[5]

2.1 炸药状态方程

炸药采用 JWL 状态方程 (Jones-Wilkens-Lee equation of state), JWL 状态方程定义压力为相对体积 V 和单位初始能量 E 的函数,即:

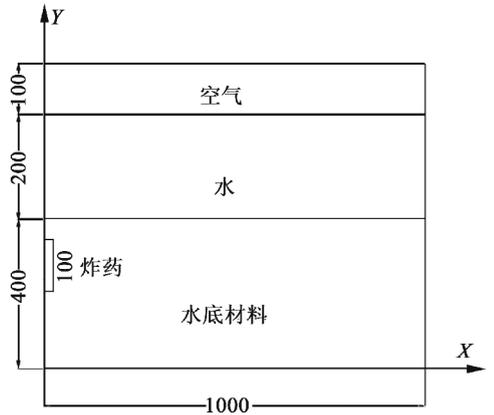


图 1 有限元模型示意图(单位:cm)

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (1)$$

式中: A, B, R_1, R_2, ω 为材料常数; p 为压力; V 为相对体积; E 为初始比内能。

2.2 水底材料本构模型

水底材料采用 PLASTIC_KINEMATIC 状态方程。此方程可模拟水底在爆破条件下的屈服、变形过程,计算效率较高,屈服应力与应变率关系如下:

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^P \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_{\text{eff}}) \quad (2)$$

式中: σ_0 为初始屈服应力; $\dot{\epsilon}$ 为应变率; C, P 为 Cowper Symonds 应变率参数; β 为硬化参数; ϵ_{eff} 为有效塑性应变; E_p 为由 $E_p = E_{\text{tan}} E / (E - E_{\text{tan}})$ 给出的塑性硬化量。

* 收稿日期:2011-08-18

作者简介:郭涛(1978~),硕士,讲师,主要从事地雷与爆破器材应用技术的教学和科研工作。E-mail:guotaogu@sina.com

2.3 水与空气材料模型

对于水材料,采用空白材料模型,并与状态方程联用。该材料模型可有效模拟流体和水动力介质,并可评估材料的失效以及热效应。对于空气,由于其密度小,可压缩性大,也被视为流体,同样采用空白材料模型。

流体材料与 Gruneisen 状态方程联用,材料压力为:

$$p_1 = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right] (\gamma_0 + a \mu) E} \quad (3)$$

μ 可用以下公式表示:

$$\mu = \frac{1}{V} - 1 \quad (4)$$

质点速度 μ_p 与冲击波速度 μ_s 相关联,即:

$$\mu_s = C + S_1 \mu_p S_2 \left(\frac{\mu_p}{\mu_s} \right)^2 \mu_p + S_3 \left(\frac{\mu_p}{\mu_s} \right)^3 \mu_p \quad (5)$$

膨胀材料的压力为:

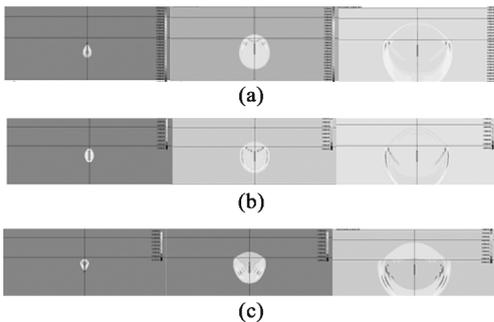
$$p = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + a \mu) E \quad (6)$$

以上式中: C 为冲击波速度 μ_s 和质点速度 μ_p 曲线的截距; γ_0 为 Gruneisen 系数; a 为对 γ_0 的一阶体积修正; S_1 、 S_2 和 S_3 为 $\mu_s - \mu_p$ 曲线斜率的系数; E 为初始比内能, J ; V 为相对体积; ρ_0 为材料初始密度, g/cm^3 。

3 数值模拟

3.1 不同起爆方式的应力场分布

对于水下深孔爆破,不同的起爆方式,其应力场具有不同的特征,图 2 模拟装药不同位置起爆后应力场的分布情况,分为顶端起爆、底端起爆及中间起爆 3 种情况。



(a) 底端起爆; (b) 中间起爆; (c) 顶端起爆

图 2 不同单点起爆方式应力分布图

应力场分布受起爆位置的影响较大。药包在一端起爆,先后产生的应力波沿药柱方向传播并叠加,并使两端起爆产生的应力场最大值出现在远离起爆

点的另一侧。

底端起爆的应力场最大值小于顶端起爆方式,原因在于底端起爆时上部与水接触岩石产生的变形吸收了较多的能量。

中间起爆产生的应力波叠加,其叠加范围只能在 $1/2$ 药柱长度范围内,因此在中点及附近区域应力波强度最小。

通过对 3 种起爆方式的数值模拟发现:顶端和底端爆破产生的应力场分布不均匀,呈现起爆端附近区域为低应力区、另一端为高应力区的情况,而中间起爆产生的应力场分布则相对比较均匀^[6]。

3.2 不同起爆方式对水中冲击波的影响

根据图 2 所示,不同起爆方式产生的水中冲击波将有以下规律,即:底端起爆冲击波峰值压力最大,中间起爆冲击波峰值压力次之,顶端起爆冲击波峰值压力最小。

为确定以上规律的存在,模拟计算 4 种起爆方式产生的水中冲击波情况,分别为顶端起爆、底端起爆、中间起爆以及两端起爆,并将 4 种起爆方式时水深 1m、距炮孔 1m 处压力时程曲线叠加,如图 3 所示。

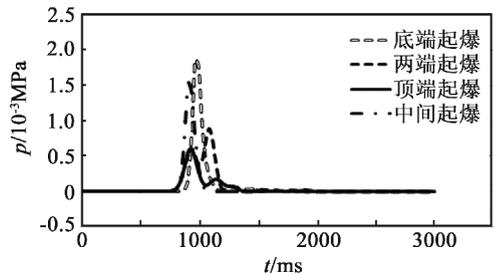


图 3 不同起爆方式水中冲击波压力时程曲线

图 3 显示:顶端起爆方式产生的水中冲击波峰值压力小于底端起爆的 $1/2$,两端起爆水中冲击波出现两个连续峰值,第一个较低的峰值与顶端起爆峰值基本重合,第二个峰值接近于底端起爆峰值的 $1/2$ 。

对比 4 种不同起爆方式产生的水中冲击波峰值压力,如图 4 所示,可得:顶端起爆方式水中冲击波峰值压力是底端起爆方式的 32.22%,是中间起爆方式的 39.15%;两端起爆方式水中冲击波峰值压力是底端起爆方式的 47.81%,是中间起爆方式的 58.09%,是顶端起爆方式的 148.39%。

由此得出结论,水下深孔爆破中采用顶端起爆方式可以大大减小水中冲击波的破坏效应,冲击波由小至大的其它三种方式分别为:两端起爆、中间起爆、底端起爆。

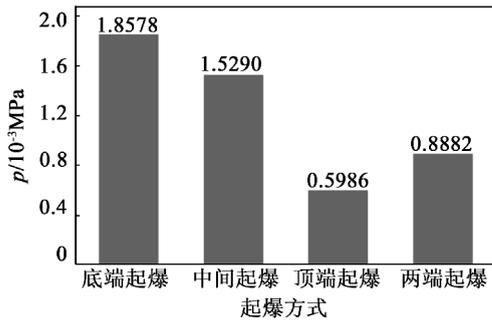


图4 不同起爆方式水中冲击波峰值压力对比

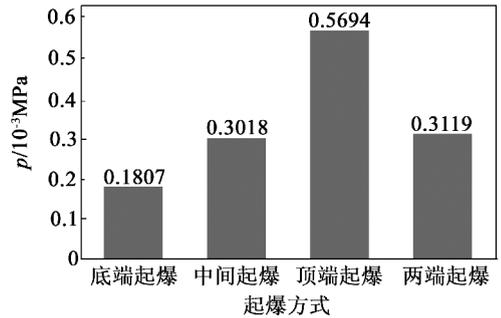


图5 不同起爆方式水底介质爆破振动最大幅值对比

3.3 不同起爆方式对水底爆破振动的影响

根据能量守恒原理,装药爆破的能量只能在水中和水底介质中进行分配,分配到水中的能量增加,则留在水底介质中的能量会相应减少。

可作如下推测:底端起爆方式分配到水中的能量最多,分配到水底介质中能量最少;顶端起爆方式分配到水中能量最少,分配到水底介质中能量最多。与此对应的是底端起爆方式水中冲击波峰值最大,水底介质中振动幅值最小;顶端起爆方式水中冲击波峰值最小,水底介质中振动幅值最大。

对4种起爆方式在水底介质中产生的爆破振动情况进行了模拟计算,并将距离水底介质表面1m、距爆心1m处某点作为振动测点,对4种起爆方式产生的最大振动幅值进行对比,如图5所示。

图5中显示:底端起爆方式产生的爆破振动最大幅值是顶端起爆方式的31.73%,是中间起爆方式的59.86%;两端起爆方式与中间起爆方式的爆破振动最大幅值基本相同,是底端起爆方式的172.61%,是顶端起爆方式的54.77%。

由此可证实先前的推测,即:顶端起爆产生的爆破振动幅值最大,中间起爆产生的振动幅值次之,底端起爆最小。

4 结论

为有效控制水中深孔爆破产生的危害效应,上述模拟计算可为爆破施工提供如下建议:

- 1) 如果施工对水下冲击波危害效应控制要求不高,而对水下爆破振动控制较严,可采用底端起爆方法;
- 2) 如果施工对水下冲击波危害效应控制要求较高,而对水下爆破振动控制要求较低,可采用顶端起爆方法;
- 3) 如果水中冲击波及水下爆破振动危害效应都需严格控制,可采取两端同时起爆的方式。

参考文献

- [1] 陈春歌,申志兵,张贤凯,等.水下爆破冲击波危害及安全控制措施的模拟分析[J].安全与环境工程,2011,18(1):58-61.
- [2] 齐世福,刘新波,史云.水下爆破的危害控制[J].爆破器材,2010,39(4):25-27.
- [3] 刘殿中,杨仕春.工程爆破实用手册[M].北京:冶金工业出版社,2003:452-457.
- [4] 杨光照.水下工程爆破[M].北京:海洋出版社,2008:303-341.
- [5] 修宗祥,杨秀娟,闰相祯,等.水下钻孔爆破不同起爆方式的数值模拟[J].中国港湾建设,2009(1):9-12.

Numerical Simulation of Harmful Effect of Underwater Deep-hole Blasting with Different Ignition Mode

GUO Tao, FENG Bin, LI Yuchun, DING Wen, ZHOU Shouqiang

Engineering Institute of Engineer Corps, PLA University of Science & Technology (Jiangsu Nanjing, 210007)

[ABSTRACT] Based on the principle of continuum mechanics and dynamical nonlinear finite element theory, the multi-material Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) governing equations of explosives, soil and water in the underwater bored blasting system was derived. Multi-material ALE finite method was applied to simulate the propagations of shockwave in water, stress wave and vibration in soil in underwater drilling blast, and the harmful effect of blasting when ignition at different charge areas. The simulation results of different ignition mode was like the follows: the sequence of shockwave in water from little to large was top ignition, both sides ignition, middle ignition and bottom ignition, while the sequence of vibration from little to large was bottom ignition, middle ignition and top ignition.

[KEY WORDS] underwater deep-hole blasting, shockwave in water, blasting vibration, numerical simulation