

The Numerical Simulation Research on Shock Wave Propagation of Underwater Drilling Blasting

Xingbo Xie, Mingshou Zhong*, Ge Song, Ying Liu, Tao Guo

College of Field Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu
Email: znbxie@126.com, *zhongms7@126.com

Received: Oct. 11th, 2015; accepted: Oct. 27th, 2015; published: Oct. 30th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

According to engineering practice, the numerical simulation of the propagation law of underwater deep hole blasting shock wave was made to study the propagation characteristic of underwater blasting shock wave. The results showed that, using water medium as blasting hole stemming could play a certain role, and the shock wave pressure peak of underwater blasting with center detonation was maximum in the direction of the rock and water interface at a certain angle.

Keywords

Shock Wave, Underwater Explosive, Numerical Simulation, Fluid-Solid Coupling

水下钻孔爆破冲击波传播规律的数值模拟研究

谢兴博, 钟明寿*, 宋歌, 刘影, 郭涛

解放军理工大学, 野战工程学院, 江苏 南京
Email: znbxie@126.com, *zhongms7@126.com

收稿日期: 2015年10月11日; 录用日期: 2015年10月27日; 发布日期: 2015年10月30日

*通讯作者。

文章引用: 谢兴博, 钟明寿, 宋歌, 刘影, 郭涛. 水下钻孔爆破冲击波传播规律的数值模拟研究[J]. 矿山工程, 2015, 3(4): 207-215. <http://dx.doi.org/10.12677/me.2015.34028>

摘要

本文根据工程实践,对水下深孔台阶爆破中冲击波的传播规律进行了数值模拟,研究了水下爆破冲击波的传播特点。结果表明:水下深孔爆破采用水介质作为炮孔堵塞物能够起到堵塞效果;采用中心起爆方式的水下爆破冲击波沿岩石与水介质交界面一定角度的方向上,压力峰值最大。

关键词

冲击波,水下爆破,数值模拟,流固耦合

1. 引言

海洋关系着中华民族崛起的安全和发展利益,我国的核电工程建设、航道疏通、水坝拆除、桥梁施工、港口码头建设、水下炸礁、油气田勘探等建设项目也日益增多。考虑到水下钻孔爆破具有爆炸能量利用好、岩石破碎均匀、工效高等优点,因此上述工程的前期基础开挖时大多采用水下钻孔爆破的方法进行施工。但水下钻孔爆破作业伴随产生的安全问题也较为突出,如水中爆破冲击波、爆破振动、涌浪、飞石、噪声等次生危害容易给爆破区域周边的生态环境及水生物等造成不同程度的安全威胁。尤其是水中爆破冲击波具有冲击作用特性且幅值大、传播远,是影响水下爆破安全的主要危害效应。水中大量渔业生物在受到水中爆破冲击波作用时不仅导致形态学改变、器官损伤,甚至可能导致大面积的死亡。因此,进行水下爆破工程水中冲击波的传播规律研究,对指导水下爆破施工设计及安全防护有重要意义。

在水下爆破理论研究领域,S. Temkin [1]通过对小药包水中爆炸冲击波衰减特性的研究。P. Cole [2]深入研究了水中爆炸的物理现象与基本规律,推导了水中爆破冲击波压力峰值、比冲量等基本参数的计算公式。在水下爆破数值模拟研究领域,M. Kamegai 等[3]采用 CARE 程序对水下爆破冲击波产生的水面非规则稀疏反射现象进行了数值模拟分析。M.B. Liu 等[4]采用率先采用 SPH 方法对炸药爆轰、产物与水介质的相互作用等问题进行了数值分析。

本文以水下深孔爆破工程为例,利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元程序对水下不耦合深孔装药台阶爆破的冲击波传播过程进行数值模拟,分析研究了水下深孔爆破工况下,冲击波在岩石介质与水介质中的传播规律,为爆破设计和研究提供了理论和技术上的支持。

2. LS-DYNA 程序简介

LS-DYNA 程序是一个通用显式非线性动力分析程序,可以求解各种二维、三维非线性结构的高速碰撞、爆炸和金属成型等接触非线性、冲击荷载非线性和材料非线性问题。DYNA 程序系列最初是 1976 年在美国 Lawrence Livermore National Lab 由 J.O. Hallquist 主持开发完成的。LS-DYNA 具有几何非线性、材料非线性、摩擦和接触分离状态非线性等程序,以 Lagrange 算法为主,兼有 ALE、Euler 和 SPH 算法,主要进行结构非线性动力分析,同时可以进行热分析、静力分析。是目前使用最为广泛的有限元显示非线性动力分析软件[5]。

3. 水下深孔爆破的数值计算模型

3.1. 材料模型

LS-DYNA 材料库中提供了多种材料模型可对炸药、金属、土壤、流体、岩石、混凝土等材料进行描

述。炸药及爆轰产物的材料模型采用关键字为 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 的高能燃烧模型，状态方程采用 JWL 方程[6]，其形式为：

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$

式中， A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 为材料参数， p 为压力， V 为爆轰产物的相对体积， E_0 为爆轰产物的初始化内能。本文选取 2 号岩石炸药，其参数如表 1。

岩石介质采用 Holmquist-Johnson-Cook (HJC)本构模型，在 LS-DYNA 中的关键字为 MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE。HJC 模型是 Holmquist、Johnson 和 Cook 提出的可以描述工程和地质材料在大应变、高变率下的非线性变形及断裂特性的损伤本构模型。其强度模型以特征化等效应力描述，如图 1，表达式为[7]：

$$\sigma^* = [A(1-D) + Bp^{*N}] (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (2)$$

式中： $\sigma^* = \sigma/f_c$ 为特征化等效应力 ($\sigma^* \leq S_{max}$, S_{max} 为材料所能达到的最大特征化等效应力)， σ 为实际等效应力， f_c 为准静态单轴抗压强度； D 为损伤变量。 $p^* = p/f_c$ 为特征化压力，其中 p 为单元内的静水压力， $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$ 为特征化应变率， $\dot{\epsilon}$ 为实际应变率， $\dot{\epsilon}_0 = 1.0 \text{ s}^{-1}$ 为参考应变率。 C 为应变率影响参数， A 、 B 、 N 和 S_{max} 统称为极限面参数，其中 A 为特征化黏性强度系数， B 为特征化压力硬化系数， N 为压力硬化系数。本文选取岩石参数如表 2。

水是流体介质，关键字为 MAT_NULL 的材料模型，状态方程采用 GRUNEISEN 状态方程，其形式如下[8]：

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

式中： p 为压力， C 为剪切—压缩波速曲线截距， S_1 、 S_2 、 S_3 为剪切—压缩波速曲线斜率系数， γ_0 为 GRUNEISEN 常数， E_0 为初始化内能， ρ 、 ρ_0 为材料密度和材料初始密度。

3.2. 计算模型

为了考察水下深孔爆破的炸药冲击波在岩石介质与水介质中的传播规律，拟建立二维模型参数如下：装药为不耦合装药，炮孔直径 14 cm，装药直径 12 cm，孔深 1200 cm，填塞长度 200 cm，台阶高度 1000 cm，

Table 1. Parameters for 2# rock explosive

表 1. 2 号岩石炸药的材料参数

P (g/cm ³)	D (m/s)	P_{Cl} (GPa)	A (GPa)	B (GPa)	R_1	R_2	ω	E_0 (J/m ³)
0.6	2670	1.5	132.75	0.439	5.3	1.2	0.21	3.2×10^8

Table 2. Parameters for HJC model

表 2. 岩石材料 HJC 模型的材料参数

P (g/cm ³)	f_c (MPa)	G (GPa)	T (MPa)	p_c (MPa)	U_c	S_{max}	
2.66	154	28.7	12.2	51	0.00162	15	
K_1 (GPa)	K_2 (GPa)	K_3 (GPa)	p_l (GPa)	U_l	A	B	N
12	25	42	1.2	0.012	0.3	2.5	0.79

超深 200 cm，最小抵抗线 250 cm，起爆方式为中心单点起爆；水面距离台阶顶层 1000 cm，距台阶底层 2000 cm；二维模型的长高分别为 5000 cm、3000 cm，如图 2。

计算模型利用 SOLID164 六面体单元对装药、空气、水、岩石进行网格划分。计算方法采用 ALE 算法，装药、水、空气为 ALE 网格，共节点连接。岩石介质为 Lagrange 网格，与 ALE 网格通过关键字 CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 进行耦合。由于计算模型采用三维六面体单元，建立单层网格模型，通过在模型的前后面施加约束实现对二维模型的计算效果。

4. 水下深孔爆破的数值模拟结果

4.1. 数值模拟结果

装药起爆方式为中心起爆，起爆时刻为 800 us。随着装药的起爆与爆轰波的传播，爆炸能量传入岩石介质，岩石中冲击波也呈近似椭圆形状从中心向两端传播。在起爆点水平方向上，冲击波率先抵达岩

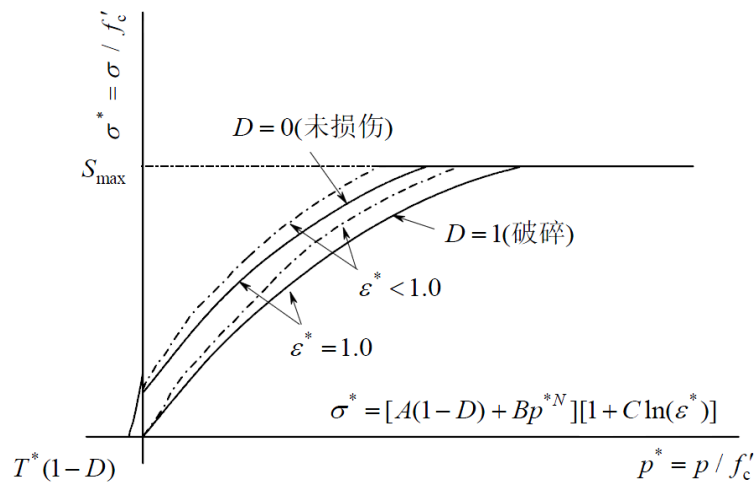


Figure 1. The strength mode
图 1. 强度模型

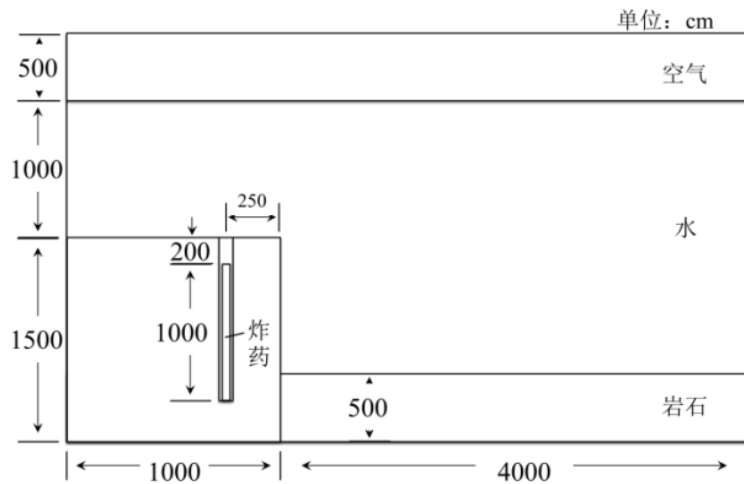


Figure 2. Calculation model
图 2. 计算模型

石介质与水介质交界面，爆炸能量开始传入水介质中，形成水中冲击波，并在岩石介质中形成反射波。图 3 为水下深孔爆破数值模拟不同时刻的应力云图。

4.2. 水中冲击波传播规律分析

装药起爆后，冲击波在岩石介质中呈近椭圆面传播，冲击波波震面依次达到岩石与水交界面，并由

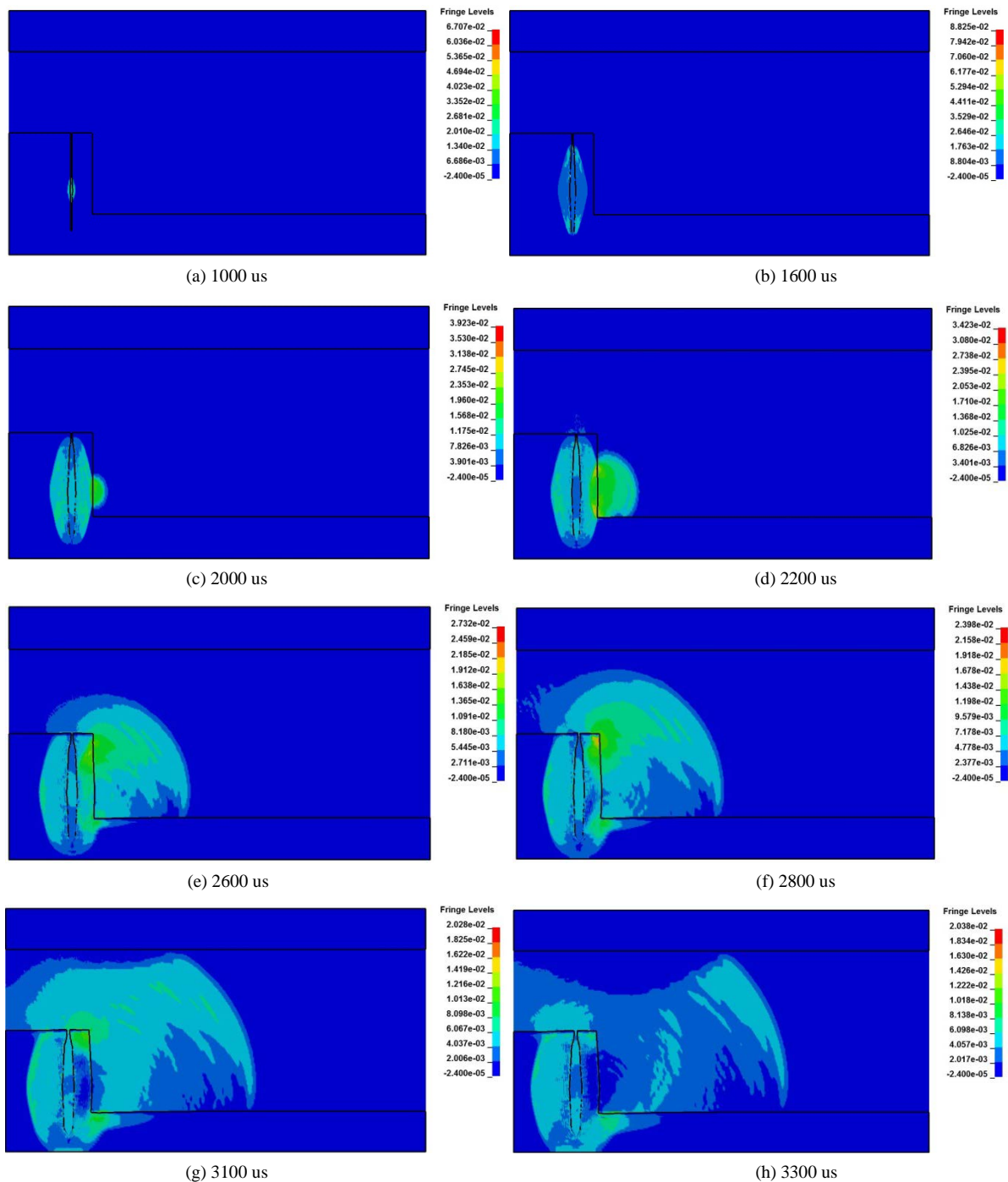


Figure 3. The stress nephogram of underwater deep hole blasting numerical simulation in different times

图 3. 水下深孔爆破数值模拟不同时刻的应力云图

此开始向水中传播。图 4 为以起爆点为中心，沿角度等距离取测点示意图。图 5 为各测点上的压力时程曲线。

由图 5 可知，冲击波抵达各测点的时间大致相同，其中 C 点的峰值压力最大。这是由于装药起爆后

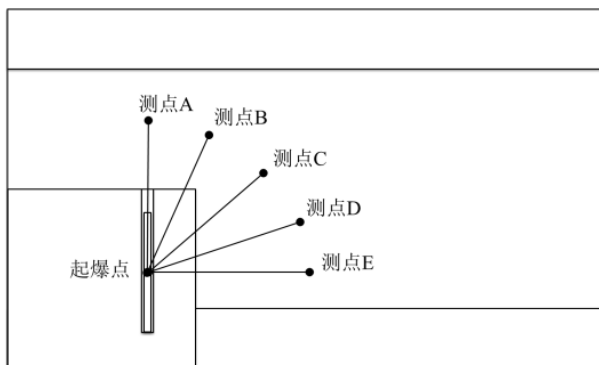


Figure 4. The schematic of shockwave measuring points
图 4. 冲击波测点示意图

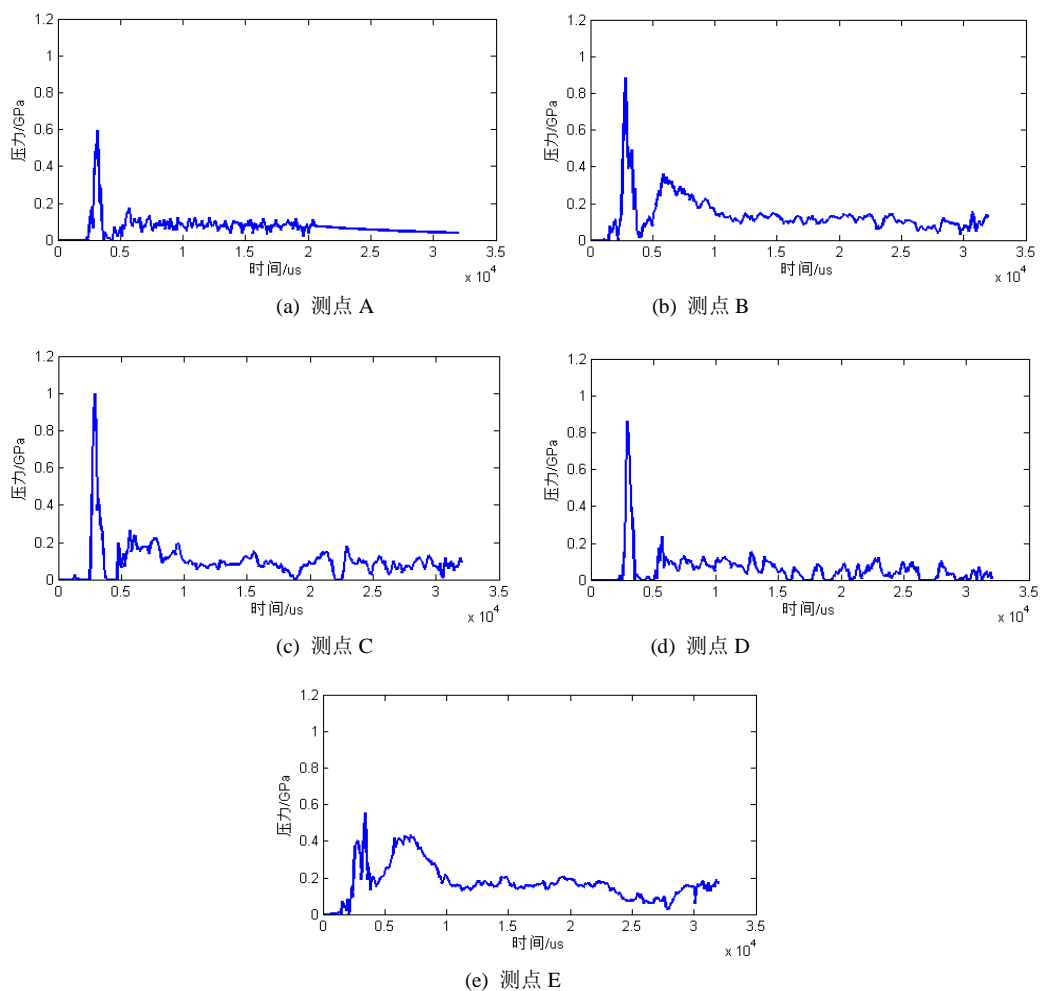


Figure 5. Time history curve of pressure on each test point
图 5. 各测点上的压力时程曲线

冲击波在岩石介质中传播，波阵面与岩石水介质交界面呈一定角度传入水中，交界面质点依次受到岩石冲击波作用发生振动，冲击波以此为中心向水中传入，沿交界面一定角度的方向上，先传入水中的冲击波与后传入水中的冲击波叠加使峰值压力增加。

深孔爆破采用 200 cm 水介质填塞，为分析装药爆炸后的能量从炮孔处溢出多少，在炮孔及距离炮孔 100 cm 处选取测点如图 6，图 7 为炮孔处各测点的压力时程曲线，图 8 为距离炮孔 100 cm 处各测点的压力时程曲线。

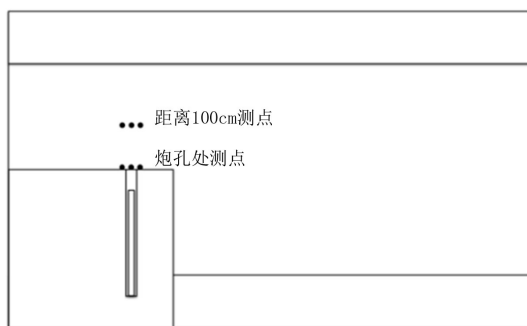
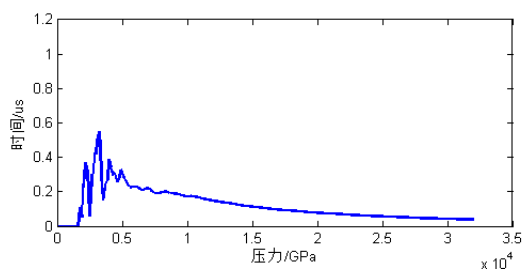
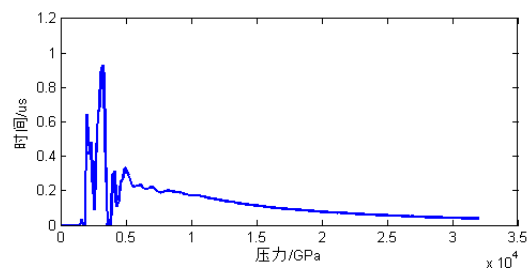


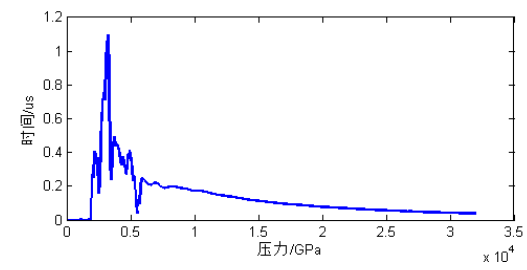
Figure 6. The schematic of shockwave measuring points
图 6. 冲击波测点示意图



(a) 左侧测点



(b) 中间测点



(c) 右侧测点

Figure 7. Time history curve of pressure on blasting hole
图 7. 炮孔处测点的压力时程曲线

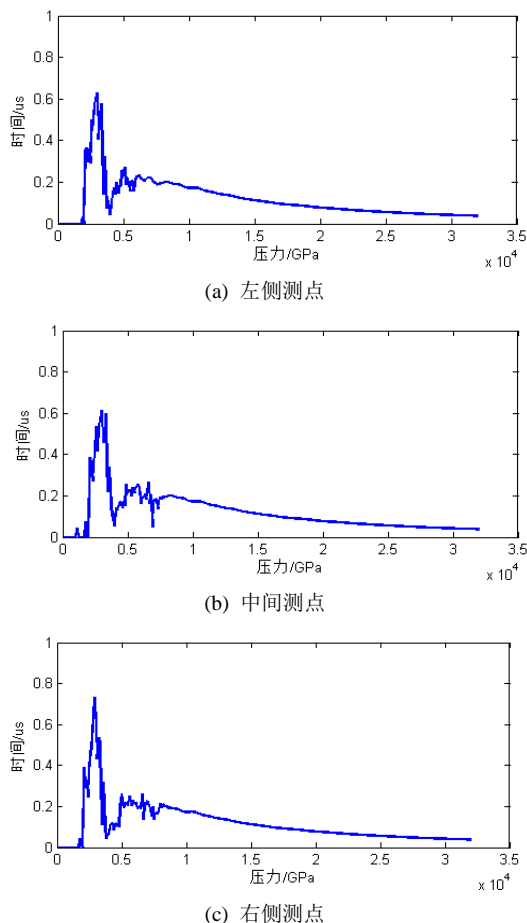


Figure 8. Time history curve of pressure 100 cm from blasting hole
图 8. 距炮孔 100 cm 处测点的压力时程曲线

由图 7、图 8 分析可知，在炮孔处，靠近临空面一侧的峰值压力较大，炮孔中心处及远离临空面处的峰值压力较小；距离炮孔 100 cm 处的三个测点的冲击波参数基本一致。这说明 200 cm 的水介质炮孔填塞起到了充分的填塞作用，装药爆炸产生的冲击波主要是在岩石介质内传播，且爆炸能量主要传递给靠临空面一侧的岩石介质，并从该侧岩石介质传入水介质。

5. 结语

利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元程序水下爆破进行数值模拟是非常有效的。本文通过对水下深孔爆破的数值模拟，预测了在实施爆破过程中冲击波在岩石和水介质中的传播规律。在今后的水下爆破实施之前，可以先通过 ANSYS/LS-DYNA 有限元程序数值模拟预计爆破效果和冲击波效应是否符合预先的爆破安全设计从而进步改进实施方案，对工程实践有重要的指导意义。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(51304218, 51339006, 51208508)。

参考文献 (References)

- [1] Temkin, S. (2003) Review of the propagation of pressure pulses produced by small underwater explosive charges.

AD-A194642.

- [2] P. 库尔, 著, 罗耀杰, 译 (1960) 水下爆炸. 国防工业出版社, 北京.
- [3] Kamegai, M., Klein, L.S. and Rosenkilde, C.E. (2009) Computer simulation studies on free surface reflection of underwater shock wave. UCRL-96960.
- [4] Liu, M.B., Liu, G.R., Lam, K.Y. and Zong, Z. (2013) Smoothed particle hydrodynamics for numerical simulation of underwater explosion. *Computational Mechanics*, **30**, 106-118.
- [5] 白金泽 (2005) LS-DYNA3D 理论基础与实例分析. 科学出版社, 北京.
- [6] 章冠人 (1991) 凝聚炸药起爆动力学. 国防工业出版社, 北京.
- [7] 方秦, 孔祥振, 吴昊, 等 (2014) 岩石 Holmquist-Johnson-Cook 模型参数的确定方法. *工程力学*, **3**, 197-204.
- [8] 时党勇, 李裕春, 张胜民 (2005) 基于 ANSYS/LS-DYNA8.1 进行显式动力分析. 清华大学出版社, 北京.