

地下结构震动响应数值方法研究

金晶¹, 尚晓江², 丁桦¹

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2. 中国建筑科学研究院结构研究所, 北京 100013)

摘要: 随着计算机技术的飞速发展, 数值计算已经成为模拟在各种介质中的爆炸过程及其近场波动效应的重要研究手段。针对目前爆炸技术在工程的重要应用课题之一, 即地下结构在爆炸载荷作用下的震动响应数值方法进行了较深入的研究, 研究了适用于松动爆破的爆破震动的等效模型, 该模型简单可行, 基本反映了爆破震动过程的物理特征。利用该模型对爆炸载荷作用下地下结构的震动过程进行了模拟, 分析爆破在介质中激发的瞬态扰动及其传播的特征, 如频率特征、振幅变化规律等, 通过与实验数据进行对比, 解释了近场爆炸现象并为实验提供理论依据。通过场地模拟实验的数值模拟验证了方法的有效性, 为后续工作打下了良好的基础。

关键词: 爆炸力学; 地下结构; 爆破震动; 等效模型; 数值模拟; 近场爆炸

中图分类号: O389 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2008)01-0085-05

Investigation of Numerical Method of the Vibration Response of Underground Structure

JIN Jing¹, SHANG Xiao-jiang², DING Hua¹

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Institute of Structure, Chinese Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract: With the help of rapidly developed computer technology, the numerical simulation has become an important research tool in simulating blasting processes in various medium and their near-field wave effects. Against one of the important application subjects of blasting technique in engineering, the vibration and response of underground structure under blasting load conditions were studied numerically. By analyzing an equivalent source model for the blasting vibrations of a fragmenting blasting, it may be seen that the model proposed in this paper reflects the main physical characteristics of the blasting vibrating processes, and it is simple and easy to implement in applications. By using the equivalent source model, vibration process of underground structure under blasting load conditions was realized in FEM for the purpose of numerical simulation. Transient disturbance and propagation characteristic, such as frequency characteristic and amplitude change rule were analyzed and compared with the experimental data. It explains the near-field explosion phenomenon and provides theoretical gist for experiments. The numerical simulation of in situ experiments verifies the validity of the method and provides good base for future work.

Key words: explosion mechanics; underground structure; blasting vibration; equivalent source model; numerical simulation; near-field explosion

爆炸是一种巨大能量在极短时间内迅速释放的物理现象。在实际工程应用中, 人们又习惯于将岩

土介质中的爆炸称为“爆破”, 传统的工程爆破是利用炸药爆炸瞬间所释放的巨大能量使周围邻近介质

收稿日期: 2007-04-18

作者简介: 金晶(1982—), 女, 工程师。E-mail: jinjing082@sina.com;

丁桦(1960—), 男, 研究员, 博士后。E-mail: hding@imech.ac.cn

受到破坏或者发生结构和形态上的改变,从而实现工程设计的目的。

近年来随着测量技术和计算机技术的不断进步,人们不再满足于简单的分析结果,希望能对实际场地情况下的爆破震动有更精确的描述,然而在实际场地条件下,由于条件的限制、测数精准性等因素的影响,岩土介质中的爆炸实验研究要比大气和水中的研究复杂得多。随着计算机技术的飞速发展,数值计算已经成为模拟在各种介质中的爆炸过程及其近场波动效应的重要研究手段。许多学者在这一领域做了大量的工作(如:廖振鹏^[1],王礼立^[2])。由于介质破坏特征等方面的认识的局限性,各个过程时间尺度的差异,目前计算机能力的限制等诸多方面的因素,尚不能有效地直接由炸药爆炸过程计算至爆破震动的传播过程(尤其是中远场)。但通过对爆破源的简化等效,利用数值模拟方法进行爆破震动的模拟还是大有前景的。

本文对目前爆炸技术在工程的重要应用课题之一,即地下结构在爆炸载荷作用下的震动响应数值方法进行研究。内容涉及通过数值模拟在土介质中实施爆破的过程,分析爆破在介质中激发的瞬态扰动及其传播(以地震波的形式)的特征,如频率特征、振幅变化规律等,通过与实验数据进行对比,从理论上解释近场爆炸现象并为实验研究提供理论依据,从而实现科学研究目的。

1 爆破震源等效模型

丁桦,郑哲敏提出了一种新的爆破震源等效模型^[3]。根据文献^[3]的观点,松动爆破震动的等效载荷模型可以作如下假设:1) 等效载荷为均布在爆破区(指爆破后介质性质变弱的区域)介质中的矩载荷,这一区域的范围取决于介质特性、布药方式、药量大小等。对于点爆炸源,可以近似认为等效载荷为一定体积的区域中均布的矩载荷。2) 矩载荷的特性由矩张量的形式来描述。3) 载荷的强度取决于时间函数的作用冲量。

这样,点爆炸松动爆破引起的震动的等效震源模型可以作如下描述:均布载荷矩

$$M(t) = f(t) [(1 - \nu) M_1 + M_2], \quad (1)$$

$$M_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad M_2 = \begin{bmatrix} 1 - \nu & 0 & 0 \\ 0 & 1 - \nu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: ν 为周边介质的泊松比; ν 为表征空腔与开裂的比例因子; $f(t)$ 为载荷作用时间函数。通过量纲分析,载荷作用区域的大小可近似取为

$$L = k_1 Q^{1/3}, \quad (3)$$

载荷时间函数的冲量可近似取为

$$I = \int f(t) dt = \frac{1}{L^2} k_2 Q (1 - k_3 e^{-k_4 H / Q^{1/3}}), \quad (4)$$

其中: L 、 I 、 Q 、 H 分别为载荷作用范围大小、载荷作用冲量大小、炸药药量和炸药埋深; k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 为与炸药和介质材料性质相关的常数。

当载荷作用时间明显短于爆破后爆破区邻近的地质结构的自振周期时,载荷时间函数的分布对震动传播的效果影响不大。这一点可以这样解释:设 v 为距震源一定距离的爆破震动响应, G 为脉冲响应函数, H 为地质结构的等效滤波函数, $f(t)$ 为震源时间函数,则:

$$v = G * H * f, \quad (5)$$

当 $f(t)$ 的持续时间远小于 H 的主高频的周期时,近似地有

$$\begin{cases} H * f = I_f H; \\ I_f = \int f(t) dt, \end{cases} \quad (6)$$

利用卷积的结合率就有

$$v = I_f G * H. \quad (7)$$

即震动响应此时只取决于震源作用冲量的大小和地质结构的等效滤波特征。

2 震动响应数值模拟

2.1 实验模型

如图 1 所示,这里选用普通钢筋混凝土管道模拟地下结构。实验前对管道性能进行了检验。观察到管内、外壁表面光洁平整、无蜂窝、塌落、露筋、空鼓和裂纹等宏观缺陷。管道结构的混凝土材料破坏载荷为 26 kN/m。其尺寸为: $\phi_{in} 800 \text{ mm} \times 2000 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。为了便于随时观察管道在不同距离爆炸过程中的破坏情况,管道竖立地埋置于地表以下的 2.3 m 深处。管道上顶面距地表面 0.3 m,下底面在地表以下 2.3 m 处。为了增加管的稳定性,管内填埋了 0.3 m 厚的原土,并对其进行了夯实处理,并对管道外壁的填土也进行了夯实处理。沿管内壁一母线安置 5 个单点正交三向加速度传感器 A、B、C、D 和 G。其距管顶面的距离分别为: 0.4、0.7、1、1.3、1.6 m,在其距管顶面 1.3 m 的圆周上,角度为 45 和 90 两处分别安置了两个传感器 E 和 F。爆炸

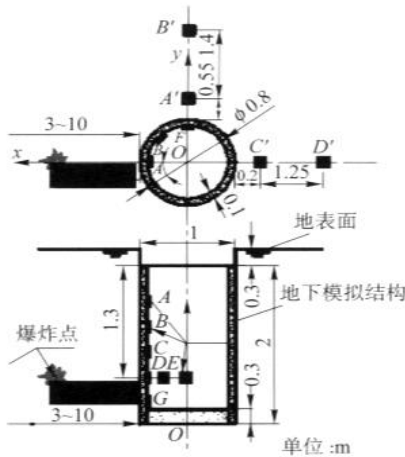


图 1 100 g TNT 当量爆炸载荷作用下地下结构在爆源近区破坏行为实验研究示意图

Fig. 1 Experimental research on the damage behavior of the underground structure with the blasting load of 100 g TNT equivalent explosion in the near area of the explosion source

距离指爆源与安置传感器母线处管外壁间与地表面平行的水平距离。具体量值为 5、7、10 m。爆源所处表面与传感器 E 和 F 所在平面共面，即爆源选取在距地面深度为 1.6 m 处。实验中药量统一选为 100 g TNT 当量(注：由于实验条件的限制，采用小药量的爆炸实验，此外本实验中土介质可以认为是均匀介质，用相似律描述可以成立)。这样的实验条件可以有效消除地表面产生的边界效应对爆炸振动波和地下结构响应的影响，并认为此爆炸过程是在含地下结构的无限大土介质中发生。实验用炸药为黑索金和 TNT 的混合物，引爆采用普通商用雷管，并近似认为是球形装药。爆炸振动波的测试采用 TDR5.0 遥测记录仪系统和单点正交三向加速度传感器。

2.2 数值模型

在数值模拟中，根据文献[3]提出的等效载荷模型，对爆破震动源的作用进行了如下的等效简化：设为等效载荷作用区域，利用加权余量法可以给出相应的变分方程

$$\int_V (\ddot{u}_i - \sigma_{ij,j} + e_i) v_i dx = 0, \quad (8)$$

设 $E_k, k = 1, \dots, K$ 为与 Ω 相交的单元，则对应于震源产生的节点力的变分为

$$\int_k E_k e_i v_i dx = f(t) \int_k E_k v_{i,j} M_{ij} dx = f(t) \int_k V_k^T P_k, \quad (9)$$

其中 $f(t)$ 为载荷作用时间函数，

$$P_k = E_k DN^T M dx. \quad (10)$$

DN 为有限元形函数微分矩阵，M 为震源矩阵，其具体形式见(1)~(2)式。

利用上面给出的简化关系以及上述的实验过程，建立了图 2 所示的模型对 100 g TNT 当量爆炸载荷作用下地下结构在爆源近区破坏行为进行数值模拟。模型采用边长 \times 宽 \times 高为 14.15 m \times 6.05 m \times 2.9 m 的弹性立方体，侧面、底面均施加无反射边界条件来模拟地下半空间，上表面为自由表面。软弱夹层位于钢筋混凝土管道外围，爆源中心位于模型的水平中轴面上，地表以下 1.6 m 深度处。爆炸作用被简化为一个等效膨胀源，在模型中施加相等的等效径向节点力到爆炸空腔单元的 6 个面的所有节点上。土层、钢筋混凝土管道和软夹层均近似的看作各向同性弹性体。

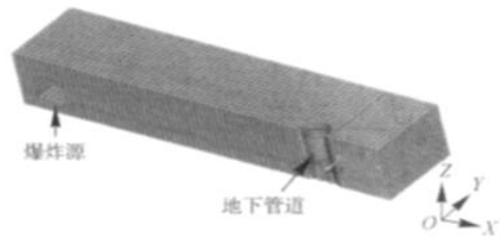


图 2 100 g TNT 当量爆炸载荷作用下地下结构在爆源近区的数值模拟的有限元模型剖面图

Fig. 2 Finite element model section of numerical simulation of the underground structure with blasting load of 100 g TNT equivalent explosion in the near area of the explosion source

2.3 实验参数标定

由于实验条件的限制，对于土层、钢筋混凝土管道和软夹层等介质的物理参数没有任何的参考，所以在上述的有限元模型中，只能通过计算中固定一种介质物理参数而改变另一种介质参数的做法来分析各个量的变化对爆破在介质中激发的瞬态扰动及其传播的频率特征、振幅变化规律等，通过与实验数据进行对比，将计算结果逐渐逼近实验结果，最终确定模型比较合理的参数(本文所采用的方法具有通用性，但参数的标定具有针对性。本文针对一定的土介质进行参数的标定。当介质不同时，我们可以通过设计一些实验，然后与数值模拟相结合进行参数标定。适用的区间范围取决于介质的非均匀性、非均匀尺度以及爆炸药量)。图 3 给出了数值模拟 10 m 爆炸的某观测点计算结果与相应实验结果

的逼近情况。

通过将爆炸距离为 10 m 时的爆炸的过程计算结果逼近相应的实验结果,得到模型中各介质的参数如下(其中 ρ 为密度, G 为剪切模量, K 为体积模量, ν 为泊松比):土层介质: $\rho = 2\,400\text{ kg/m}^3$, $G = 1.93 \times 10^7\text{ Pa}$, $K = 4.17 \times 10^7\text{ Pa}$, $\nu = 0.3$;钢筋混凝土管道: $\rho = 2\,125\text{ kg/m}^3$, $G = 1.2 \times 10^{10}\text{ Pa}$, $K =$

$1.227 \times 10^{10}\text{ Pa}$, $\nu = 0.14$;管道外围软弱夹层: $\rho = 2\,400\text{ kg/m}^3$, $E = 7.6 \times 10^4\text{ Pa}$, $\nu = 0.3$ 。

2.4 实验数据验证

确定了有限元模型的物理参数后,进一步对爆炸距离为 7 m 和 5 m 时的爆炸的过程进行数值计算,选取部分观测点计算结果与实验结果如图 4 和图 5 所示。

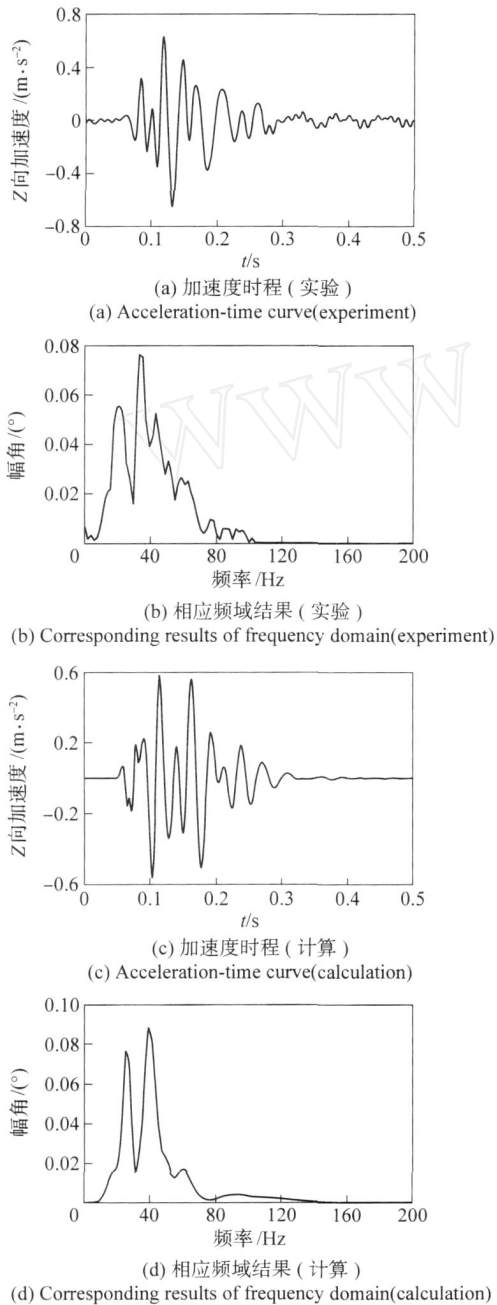


图 3 爆炸距离为 10 m 时测点 A 的轴向加速度时程及其频域分析结果

Fig. 3 Analysis results of time and frequency domains of axial acceleration of survey point A for 10 m burst distance

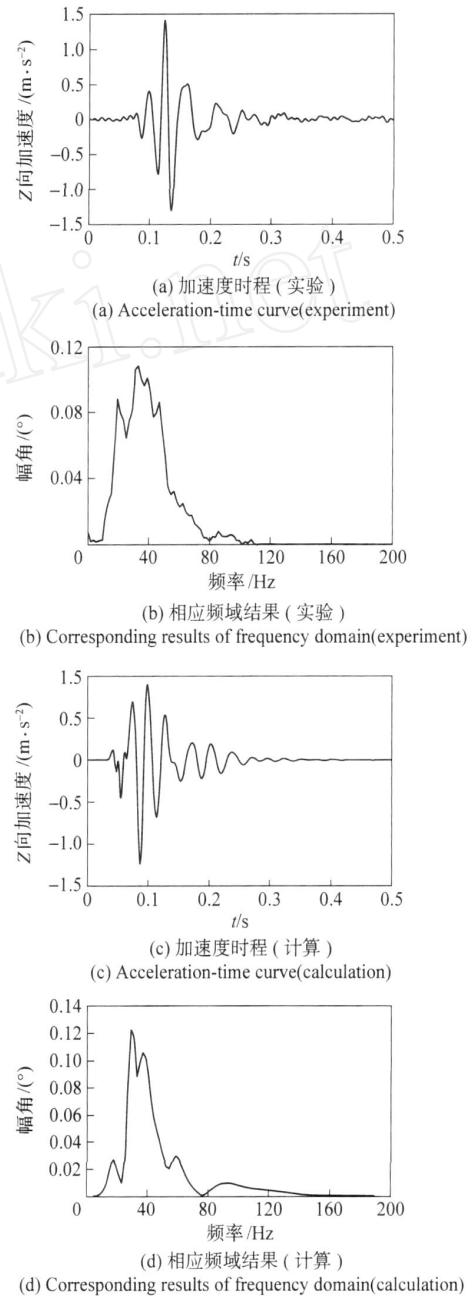


图 4 爆炸距离为 7 m 时测点 A 的轴向加速度时程及其频域分析结果

Fig. 4 Analysis results of time and frequency domains of axial acceleration of survey point A for 7 m burst distance

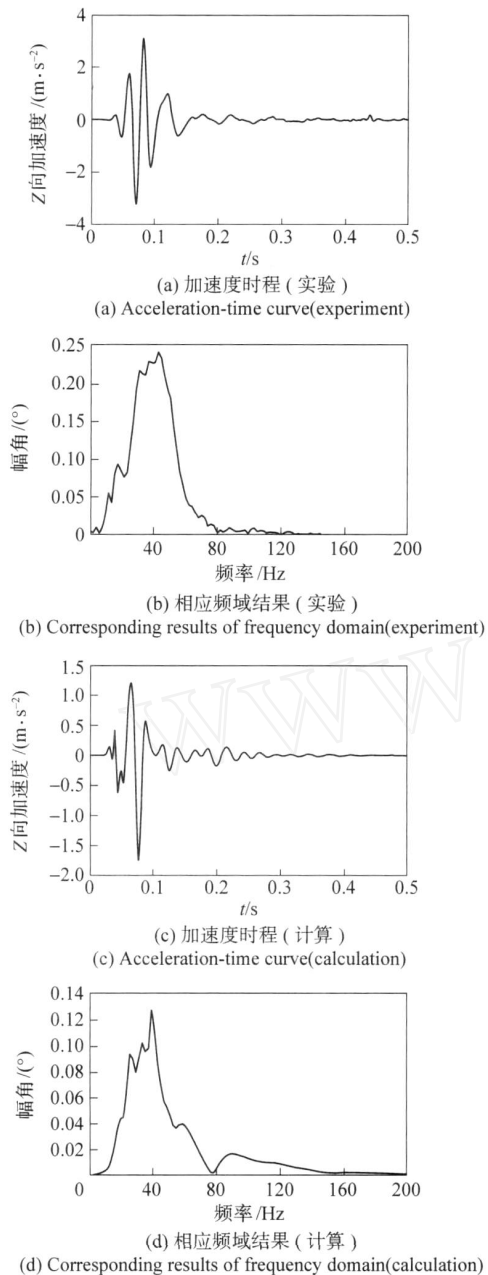


图 5 爆炸距离为 5 m 时测点 A 的轴向加速度时程及其频域分析结果

Fig. 5 Analysis results of time and frequency domains of axial acceleration of survey point A for 5 m burst distance

根据此结果,对参数标定过程中确定的数值模型材料参数进行验证,通过计算结果可以看出:爆炸距离为 7 m 时的爆炸的过程计算结果与实验结果基本吻合;爆炸距离为 5 m 时的爆炸的过程计算结果即观测点的 Z 向加速度的主频与实验结果相符,但幅值约为实验结果的一半,其原因可能是爆破震源模型忽略了击波的作用(在岩土介质中,对较远的爆炸由于长对高频的衰减,因而可以不考虑击波的影响),但近场击波很容易传到结构上并激发结构的自振,因而实际中的震动强度应大于数值模拟的结果。

3 结论

本文基于爆破震动的等效载荷模型,利用 LS-DYNA3D 程序,对地下结构的爆破震动过程进行了数值模拟。对采集的震动信号特征进行了分析,定性地验证了理论分析和数值模拟中得到的一些规律性认识。从与实验结果的对比来看,本文给出的模型简单可行,基本反映了爆破震动过程的物理特征,澄清了爆破震动等效载荷模拟中的一些模糊认识。进一步工作将有可能推动与爆破震动效应的评估、利用等相关领域的研究工作。

参考文献 (References)

- [1] 廖振鹏. 工程波动理论导论[M]. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 2004.
LIAO Zhen-peng. An introduction to theories of wave motion in engineering[M]. 2nd ed. Beijing: Sciences Press, 2004. (in Chinese)
- [2] 王礼立. 爆炸力学数值模拟中本构建模问题的讨论[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(2): 97 - 104.
WANG Li-li. On constitutive modeling in numerical simulation of explosion mechanics[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(2): 97 - 104. (in Chinese)
- [3] 丁桦, 郑哲敏. 爆破震动等效载荷模型[J]. 中国科学 E 辑, 2003, 33(1): 82 - 90.
DING Hua, ZHENG Zhe-min. Source model for blasting vibration [J]. Science in China, Series E, 2003, 33(1): 82 - 90. (in Chinese)