

文章编号: 1000-7598-(2006) 增-0841-05

# 爆炸荷载作用下浅埋结构动态响应有限元计算

上官子昌<sup>1, 2</sup>, 李守巨<sup>3</sup>, 程 冬<sup>3</sup>, 曹海云<sup>3</sup>

(1. 大连理工大学 土木水利学院, 大连 116023; 2. 大连水产学院 土木工程学院, 大连 116023;

3. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024)

**摘 要:** 采用有限元数值计算方法分析了地下浅埋结构的非线性动力响应, 得到了结构在不同时刻的动态响应模拟计算数据。该地下浅埋结构由金属壳体 and 上覆土体共同组成, 对于土体和金属壳体分别采用 Drucker-Prager 和 Mohr-Coulomb 屈服准则以及弹塑性本构关系, 分析其非线性动态位移场和应力场。根据爆炸试验数据, 研究了爆炸冲击波随距离和时间的变化过程, 并且将其作为作用在结构内部的爆炸荷载。有限元数值模拟结果表明, 采用非线性有限元模拟爆炸冲击荷载作用下地下浅埋结构的弹塑性动力响应是有效的, 并且证明所设计的地下防护结构是安全的。

**关 键 词:** 爆炸荷载; 动态响应; 防护结构; 屈服准则; 非线性有限元

**中图分类号:** TU 457, TU751.9 **文献标识码:** A

## Computational simulation of dynamic responses of underground structure acted by blasting loads

SHANGGUAN Zi-chang<sup>1,2</sup>, LI Shou-ju<sup>3</sup>, CHENG Dong<sup>3</sup>, CHAO Hai-yun<sup>3</sup>

(1. School of Civil and Hydraul. Eng., Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;

2. Institute of Civil Engineering, Dalian Fishery University, Dalian 116023, China;

3. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** Finite element method is applied to calculate nonlinear dynamic responses of underground structure and the data of dynamic responses of structure are available. The structure consists of steel shell and soil body. The elastic-plastic constitutive model is used to modeling deformation characteristic of soil body and steel shell. Drucker-Prager and Mohr-Coulomb yield criteria are applied to describe the soil body and the steel shell, respectively. The blasting load is determined according to experimental data of air explosion. Calculating results using finite element method show that it is effective to calculate dynamic responses of underground structure acted by blasting loads and the proposed defense structure is safety against explosion loads.

**Key words:** blasting loads; dynamic responses; defense structure; yield criteria; non-linear finite element method

## 1 引 言

在国防工程和某些民用工程中经常会涉及到地下或者地上结构的爆炸安全防护问题, 如何有效地进行结构的防护设计是该领域重要的研究课题之一。对于设计中或者使用中的防护结构, 采用有限元数值模拟方法进行结构的动态响应分析, 无论是对于结构安全评估预测和结构参数优化都具有重要的研究意义。Wei(2006)采用三维非线性有限元方法和概率理论, 模拟了爆炸荷载作用下结构的破坏机制和概率<sup>[1]</sup>。石少卿等(2003)运用 ANSYS 大型有限

元软件, 对箱形钢板-钢筋混凝土组合结构这种新型的防护结构和普通钢筋混凝土结构在相同爆炸荷载下的响应进行了数值模拟和对比分析<sup>[2]</sup>。Bogosian(1999)采用 ADINA 软件模拟分析了复杂结构的变形特性, 研究了框架结构在爆炸荷载作用下的抗力特性<sup>[3]</sup>。曹志远等(2003)针对实际地下工程中普遍存在的材料非线性以及半无限介质域的处理问题, 给出了基于时间有关基本解的时域边界元法与非线性动力有限元法的耦合方法, 应用该耦合方法计算了马蹄形截面地下防护结构与围岩受爆炸冲击波作用下非线性相互作用的时间历程, 并与线弹性

收稿日期: 2006-07-01

作者简介: 上官子昌, 男, 1959 年生, 副教授, 主要从事岩土力学方面的研究。

情况进行了比较分析<sup>[4]</sup>。Krauthammer(1999)研究了钢结构和混凝土结构在爆炸荷载作用下的动力响应特性,并且分析了结构的抗爆特性<sup>[5]</sup>。冯顺山等(2004)以被防护对象在爆炸冲击波作用下的最低损伤作为考虑防护设施的防护能力的基础,建立了以冲击波超压—冲量为防护依据的爆炸冲击波防护效应的评价方法<sup>[6]</sup>。李守巨(2002)应用遗传算法建立了爆炸冲击荷载参数估计方法,研究爆炸荷载峰值和衰减指数的估计方法<sup>[7]</sup>。本文以某浅埋地下防护结构为研究对象,采用有限元数值模拟方法研究该结构的动态响应特性,以及在不同时刻结构的应力场分布特性,为类似结构的设计和使用提供理论依据。

## 2 爆炸冲击荷载计算方法

炸药在空中爆炸时,在有限的时间和空间迅速释放出大量的能量,这就导致了爆炸气体生成物的压力和温度局部上升,使其周围介质受到高温、高压爆炸产物的作用。大量的理论分析和试验研究表明,炸药空中爆炸的冲击荷载的峰值与炸药的质量、距离和爆炸位置有关,其大小可按式计算<sup>[8]</sup>

$$p_0/p_a = \frac{808[1+(Z/4.5)^2]c}{\left\{ \left[ 1 + \left( \frac{Z}{0.048} \right)^2 \right] \left[ 1 + \left( \frac{Z}{0.32} \right)^2 \right] \left[ 1 + \left( \frac{Z}{1.35} \right)^2 \right] \right\}^{1/2}} \quad (1)$$

式中  $w$  为炸药的 TNN 当量(kg);  $Z$  为比例距离 ( $\text{m/kg}^{1/3}$ );  $Z=d/w^{1/3}$ ;  $p_0$  和  $p_a$  为冲击波压力幅值和大气压力(Pa);  $c$  为与爆炸位置有关的试验参数,对于空中爆炸,  $c=0.986$ , 对于地面爆炸  $c=1.883$ 。显然,爆炸冲击波超压的大小是直接衡量爆炸对目标破坏作用大小的重要参数。然而,爆炸冲击波正压作用时间也是衡量爆炸对目标的破坏程度的炸药参数之一。爆炸冲击波正压作用时间  $t_d$  可按式估算<sup>[9]</sup>

$$t_d = \frac{980[1+(Z/0.54)^{10}]w^{1/3}}{\{[1+(z/0.02)^3][1+(Z/0.74)^6][1+(z/6.9)^2]\}^{1/2}} \quad (2)$$

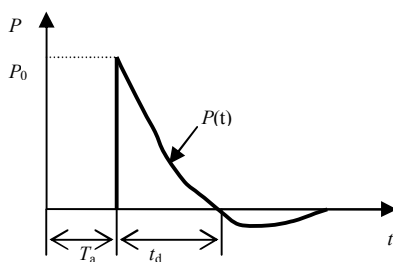


图 1 爆炸荷载曲线

Fig.1 Features of an ideal blasting wave

爆炸冲击荷载随时间变化的曲线可以表示成负指数衰减形式

$$p(t) = p_0[1 - (t - t_a)/t_d] \exp[-\xi(t - t_d)/t_d] \quad (3)$$

式中:  $p(t)$  为爆炸冲击波压力随时间变化的函数;  $t_d$  和  $t_a$  为正压作用时间和冲击波到达时间;  $\xi$  为冲击波衰减参数,其大小按下式计算

$$\xi = 3.18Z^{-0.58} \quad (4)$$

图 1 给出了爆炸冲击荷载随时间变化曲线形状。从图中可以看出,爆炸冲击荷载的波阵面为无限陡的形状,然后呈负指数衰减,爆炸荷载为压应力;随着时间的增加,爆炸产物继续膨胀,产生负压应力。

## 3 浅埋结构的动态响应有限元计算

在爆炸冲击荷载作用下,浅埋结构的有限元离散的动力响应控制方程为

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{P(t)\} \quad (5)$$

$$[M] = \int_v \rho [N]^T [N] dv \quad (6)$$

$$[K] = \int_v [B]^T [T]^T [E] [T] [B] dv \quad (7)$$

$$\{P(t)\} = \int_s [N]^T \{f(t)\} ds \quad (8)$$

式中:  $[M]$ ,  $[N]$ ,  $[C]$ ,  $[B]$ ,  $[T]$  和  $[E]$  分别为质量矩阵、形函数矩阵、阻尼矩阵、应变位移矩阵、坐标转换矩阵和本构矩阵;  $\rho$  代表材料的密度;  $\{u\}$  和  $\{P(t)\}$  是节点位移矢量和节点力矢量。上覆土的屈服准则为 Drucker-Plager 模型<sup>[10]</sup>

$$f(I_1, J_2) = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (9)$$

式中:  $I_1$  为第一应力不变量;  $J_2$  为偏应力第二不变量;  $\alpha$  和  $k$  为土的内聚力  $c$  和摩擦角  $\varphi$  的函数。

Drucker-Plager 推导的结果如下<sup>[11]</sup>

$$\alpha = \frac{\sin \varphi}{\sqrt{3} \sqrt{3 + \sin^2 \varphi}} \quad (10)$$

$$k = \frac{\sqrt{3} c \cos \varphi}{\sqrt{3 + \sin^2 \varphi}} \quad (11)$$

对于浅埋的地下防护结构,它由金属结构壳体和上覆土体组成。金属结构的采用 Von Mises 屈服准则

$$f(J_2) = \sqrt{J_2} - \sigma_y = 0 \quad (12)$$

式中  $\sigma_y$  为钢材的屈服应力。

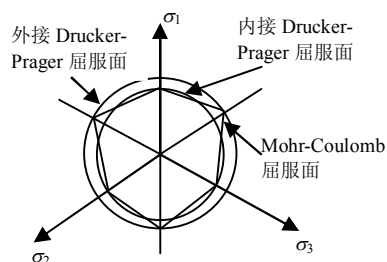


图2 Drucker-Prager 和 Mohr-Coulomb 的屈服面  
Fig.2 Drucker-Prager and Mohr-Coulomb yield surfaces represented in the deviatoric plane

土体的 Drucker-Prager 屈服准则和金属的 Mohr-Coulomb 屈服准则如图 2 所示。金属壳的弹塑性本构关系为双线性模型。土体和金属材料的力学参数如表 1 和 2 所示。

表 1 土体材料的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of soil body

| 材料参数 | 弹性模量<br>/MPa | 泊松比 | 内聚力<br>/kPa | 摩擦角<br>/(°) | 密度<br>/kg·m <sup>-3</sup> |
|------|--------------|-----|-------------|-------------|---------------------------|
| 数值   | 20.0         | 0.3 | 10          | 35          | 2000                      |

表 2 金属材料的力学参数

Table 2 Mechanical parameters of steel shell

| 材料参数 | 弹性模量<br>/GPa | 泊松比 | 屈服后弹性<br>模量 /GPa | 屈服强度<br>/MPa | 密度<br>/kg·m <sup>-3</sup> |
|------|--------------|-----|------------------|--------------|---------------------------|
| 数值   | 206.0        | 0.3 | 2.0              | 345.0        | 7800.0                    |

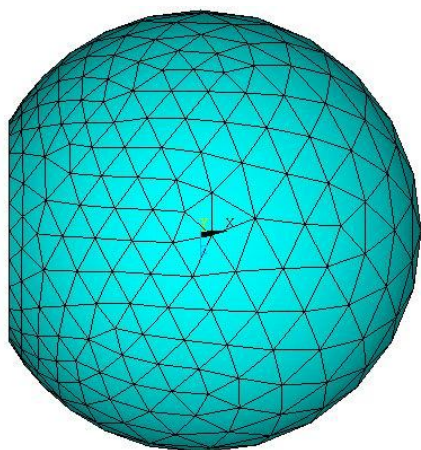


图3 薄壳结构的有限元模型  
Fig.3 FEM mesh of steel shell

如图 3 所示，浅埋地下防护结构的金属壳体的有限元模型采用壳元，而土体采用三维实体元，浅埋结构的几何模型如图 4 所示，模型长 40 m，宽 36 m，高 20 m。所计算的地下结构的半径为 18 m，金属结构的壁厚为 36 mm，内部等效的炸药 TNT

当量为 760 kg。图 5 和 7 为壳体不同时刻的垂直振动位移响应，图 6 和 8 给出了金属壳体在不同时刻 Von Mises 应力分布，其中 A 点坐标(0, 18, 0)，B 点的坐标(0, 9, 9)，C 点坐标(9, 9, 0)。图 9 和 10 给出了关键部位的应力—时间曲线和位移—时间曲线。

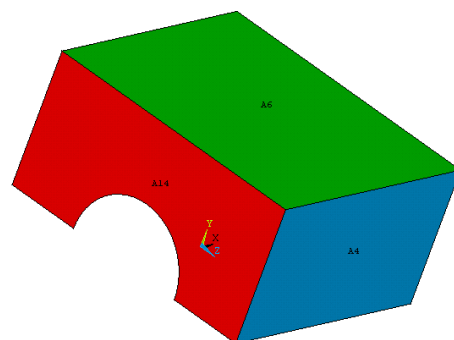


图4 浅埋地下结构的计算模型  
Fig.4 Calculating model of underground structure

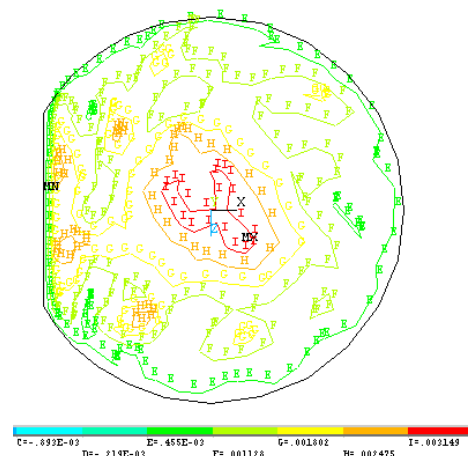


图5 3ms 时薄壳的垂直位移分布(单位:m)  
Fig.5 Vertical displacement distribution at 3ms (unit: m)

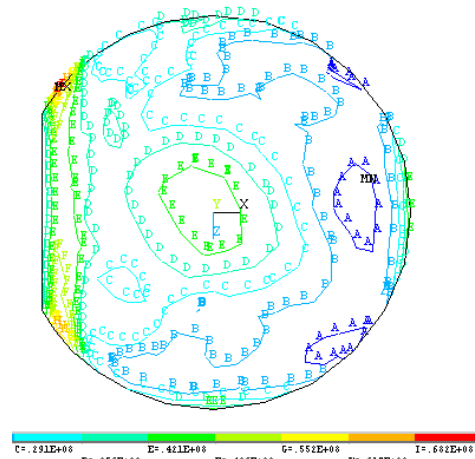


图6 3ms 时薄壳的 Mises 应力分布(单位: MPa)  
Fig.6 Von Mises stress distribution at 3 ms (unit:MPa)

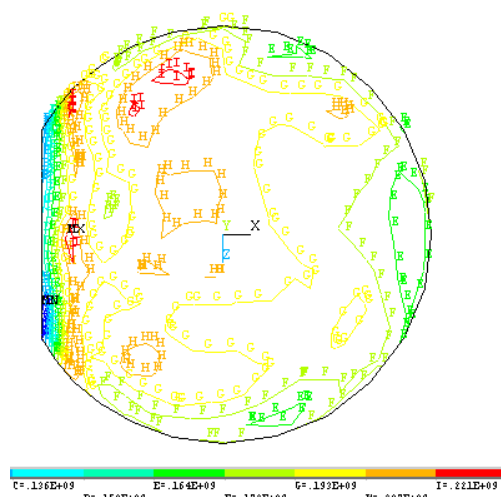


图 7 10 ms 时薄壳的垂直位移分布(单位:m)

Fig.7 Vertical displacement distribution at 10 ms (unit:m)

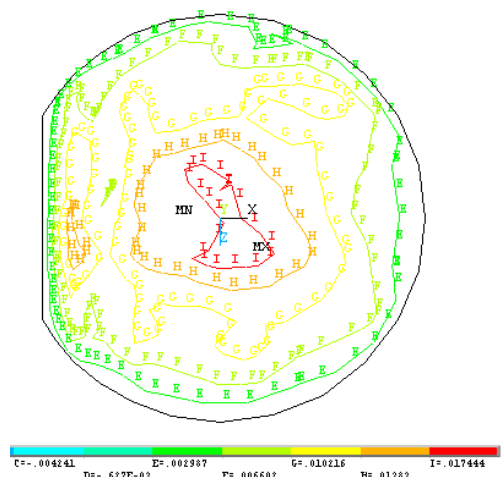


图 8 10 ms 时薄壳的 Mises 应力分布(单位: MPa)

Fig.8 Von Mises stress distribution at 10 ms (unit:MPa)

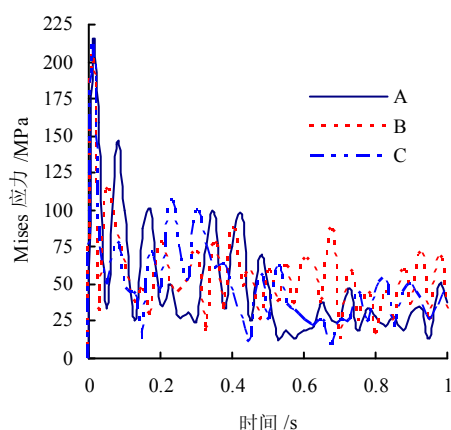


图 9 爆炸荷载作用下关键点的 Mises 应力-时间曲线

Fig.9 Von Mises stress versus time for different points

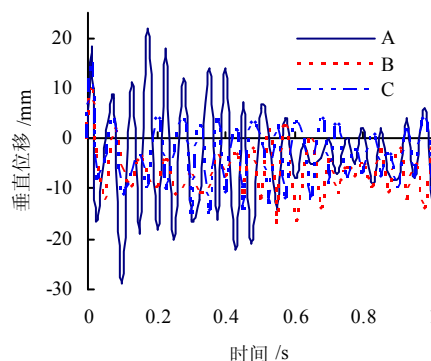


图 10 爆炸荷载作用下关键点的垂直位移-时间曲线

Fig.10 Vertical displacement versus time for different points

## 4 结 论

地下结构的抗爆设计和强度校核对于保证防护结构的正常使用是非常重要的。防护结构主要承受短暂的爆炸荷载作用,结构的变形特征除了与爆炸冲击波的强度有关外,还与结构的自振周期核爆炸冲击波的作用时间有关。数值计算结果表明,在给定的爆炸荷载条件下,该结构的抗爆性能是安全的,有关该结构的屈服分析和静载下的强度计算以及结构的细部构造不在本文的讨论范围之内。

## 参 考 文 献

- [1] J. Wei. Failure analysis of architectural glazing subjected to blastloading[J]. **Engineering Failure Analysis**, 2006, 13(7): 1 029—1 043.
- [2] 石少卿, 张湘冀, 尹平. 爆炸荷载作用下一种新型防护结构的静力分析[J]. **地下空间**, 2003, 23(1): 66—69.
- [3] D. D. Bogosian Blast analysis of complex structures using physics-based fast-running models, 1999, 72(1-3): 81—92.
- [4] 曹志远, 曾三平. 爆炸波作用下地下防护结构与围岩的非线性动力相互作用分析[J]. **爆炸与冲击**, 2003, 23(5): 385—391.
- [5] T. Krauthammer. Blast-resistant structural concrete and steel connections[J]. **Int. J. of Impact Engineering**, 1999, 22(9-10): 887—910.
- [6] 冯顺山, 王芳, 胡浩江. 爆炸冲击波防护结构效应的评价方法研究[J]. **安全与环境学报**, 2004, 4(增): 173—176.
- [7] 李守巨, 刘迎曦. 基于遗传算法的爆炸冲击荷载参数识别方法[J]. **爆炸与冲击**, 2002, 22(4): 295—301.
- [8] Jacinto A C. Experimental and computational analysis of plates under air blast loading[J]. **International Journal of Impact Engineering**, 2001, 25(10): 927—947.
- [9] Dharaneepathy M V. Critical distance for blast-resistant design[J]. **Computers & Structures**, 1995, 54(4): 587—595.
- [10] Mouazen A M. Tillage tool design by the finite element method: part 1. finite element modeling of soil plastic behaviour[J]. **J Agric Engng Res**, 1999, 72(1): 37—51.
- [11] Cela J J. Analysis of reinforced concrete structures subjected to dynamic loads with a viscoplastic Drucker-Prager model[J]. **Applied Mathematical Modeling**, 1998, 22: 495—515.