

文章编号 :1001-2486(2007)02-0034-05

## 混凝土板模爆方法数值模拟研究\*

张 舵 ,卢芳云

(国防科技大学 理学院,湖南 长沙 410073)

**摘 要** :分析混凝土结构在 1/4 模型中应变率对于爆炸相似律的影响,并用数值模拟的方法进行混凝土板的模爆方法研究,得出混凝土板在爆炸作用下复印比例定律近似成立的结论。考察数值模拟中产生计算误差的原因,发现混凝土板模型在采用 4cm 网格时会出现较大的计算偏差,其原因部分是由于网格尺寸引起的,部分是由于计算采用的混凝土局部损伤失效模型引起的。

**关键词** :爆炸力学;混凝土板;模爆试验;数值模拟

中图分类号 :O382.1 文献标识码 :A

## A Numerical Study of Scaling Modeling Method of Concrete Slab Subjected to Blast Loading

ZHANG Duo ,LU Fang-yun

(College of Science , National Univ. of Defense Technology , Changsha 410073 , China)

**Abstract** :The effect of strain rate in 1/4 model on blast scaling law was analyzed. The scaling method of simulation explosion test was studied by numerical simulation. Results from the simulation show that similarity of concrete slab subjected to the blast loading can be approximately obtained by using replica scaling law. The mesh size effect on the simulation was investigated. It is found that 4cm meshing results in worse deviations. The errors partly come from the local damage model for the concrete , partly from the coarse meshing.

**Key words** :explosive dynamics ; concrete slab ; scaling explosive test ; numerical simulation

爆炸作用的实验研究十分困难并且花费高昂,因此建筑物在爆炸作用下破坏机理试验研究通常希望在缩比模型下进行。霍普金森 1915 年最早提出了立方根比例定律。立方根比例定律指出,如果两块同种炸药,装药的几何形状彼此相似,尺寸不同,在相同大气中爆炸时,在相同的比例距离  $R/\sqrt[3]{\omega}$  下就会产生相似的爆炸波,其中  $R$  为空间距离,  $\omega$  为炸药的爆能。爆炸与结构的相互作用的模型律最早见于多林和伯克哈特 1944 提出的比例定律。1957 年布朗考虑了爆炸波与弹性结构的相互作用,并推出了相应的模型律。1958 年贝克推广了布朗的模型律,提出了适用于线弹性和简单非线性系统的“复印 (Replica)”比例定律<sup>[1-2]</sup>。国内也开展了一部分爆炸作用的模化研究,对包括空气中<sup>[2]</sup>、土中<sup>[3]</sup>、水下<sup>[4]</sup>爆炸作用下的模化试验设计进行了研究。

对于建筑物在爆炸作用下的缩比模型试验,由于其中包括混凝土这种准脆性材料的失效破坏,同时混凝土结构的强度还表现出明显的尺寸效应<sup>[5]</sup>,因此通过理论分析很难确定这种复杂非线性系统相似准则。本文用数值模拟的方法,采用非线性动力有限元程序 LS-DYNA 进行了包含混凝土断裂的模爆计算,并考察了网格尺寸对于计算结果的影响。

### 1 混凝土的 HJC 模型

采用 HJC 模型,其强度计算公式为(1)式,参数如表 1 所示<sup>[6-7]</sup>:

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

\* 收稿日期 2006-09-26

基金项目:国防科技大学基础研究项目(060201)

作者简介:张舵(1977—),男,博士生。

式中  $A, B, C$  及  $N$  是材料常数  $\sigma^* = \sigma/f'_c$ ,  $P^* = P/f'_c$ ,  $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ ,  $\dot{\varepsilon}$  为应变率  $\dot{\varepsilon}_0$  为参考应变率  $f'_c$  为准静态单轴压缩强度。损伤因子  $D$  ( $0 \leq D \leq 1$ ) 由等效塑性应变和塑性体积应变累加得到,  $D$  的表达式为

$$D = \sum \frac{\Delta\varepsilon_p + \Delta\mu_p}{D_1(P^* + T^*)^{D_2}} \quad (2)$$

其中  $\Delta\varepsilon_p$  及  $\Delta\mu_p$  分别为等效塑性应变增量和塑性体积应变增量。  $D_2, D_1$  为材料常数,  $T^* = T/f'_c$ ,  $T$  是最大静水拉伸强度,  $D=0$  表示完好,  $D=1$  表示失效。压力-体积变形关系类似于可压垮材料, 分为三个区, 第一个区是线弹性区  $P \leq P_{crush}$ , 第二个区域为过渡区  $P_{crush} \leq P \leq P_{lock}$ , 此时混凝土内的空洞逐渐被压缩从而产生塑性变形, 第三个区域为密实区:

$$P = K_1 \bar{\mu} + K_2 \bar{\mu}^2 + K_3 \bar{\mu}^3 \quad (3)$$

其中  $\bar{\mu} = \frac{\mu - \mu_{lock}}{1 + \mu_{lock}}$ ,  $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$ 。

从以上可以看出, HJC 模型是一种局部损伤模型。

表 1 混凝土材料常数<sup>[7]</sup>

Tab. 1 Summary of constants for HJC concrete model<sup>[7]</sup>

$\rho/\text{kg}/\text{m}^3$	$A$	$B$	$N$	$C$	$f'_c/\text{GPa}$	$S_{\max}$	$G/\text{GPa}$	$D_1$	$D_2$
2440	0.79	1.60	0.61	0.007	0.048	7.0	14.86	0.04	1.0
$\varepsilon_{\min}$	$P_c/\text{GPa}$	$\mu_c/\text{GPa}$	$K_1/\text{GPa}$	$K_2/\text{GPa}$	$K_3/\text{GPa}$	$P_1/\text{GPa}$	$\mu_1$	$T/\text{GPa}$	
0.01	0.016	0.001	85	-171	208	0.08	0.1	0.004	

## 2 模爆理论分析

对简单弹塑性结构在爆炸作用下的响应进行量纲分析, 假定重力的影响是可以忽略的。

$$\varepsilon = f(\omega, R, \rho_0, \alpha_0, \gamma, \rho_{st}, \sigma_i, E_i, E_{\text{tangent}}, L, \mu, t) \quad (4)$$

其中  $\varepsilon$  为应变,  $\omega$  为爆能,  $R$  为距离,  $\rho_0$  为空气密度,  $\alpha_0$  为空气声速,  $\gamma$  为比热比,  $L$  为结构的特征长度,  $\rho_{st}$  为结构密度,  $\sigma_i$  为结构中应力,  $E_i$  为结构材料的弹性模量,  $E_{\text{tangent}}$  为结构材料的塑性模量,  $\mu$  表示结构速度,  $t$  表示时间。利用白金汉定理(II 定理), 得到

$$\varepsilon = F\left(\frac{\omega}{\rho_0 \alpha_0^2 R^3}, \frac{R}{L}, \frac{E_i}{\rho_{st} \alpha_0^2}, \frac{\rho_{st}}{\rho_0}, \frac{E_i}{\sigma_i}, \frac{E_{\text{tangent}}}{\sigma_i}, \frac{u}{\alpha_0}, \frac{t E_i^{1/2} \rho_{st}^{-1/2}}{L}, \gamma\right) \quad (5)$$

在相同的空气中, 结构选用同种材料, 当  $\frac{\sqrt[3]{\omega_p}}{\sqrt[3]{\omega_m}} = \frac{R_p}{R_m} = \frac{L_p}{L_m} = \frac{t_p}{t_m} = s$  时,  $\varepsilon_m = \varepsilon_p$ ,  $\sigma_m = \sigma_p$ ,  $\mu_m = \mu_p$ , 其中

下标  $p$  代表原型,  $m$  表示模型,  $s$  为相似比, 这便是复印比例定律<sup>[1]</sup>。可以看出, 当药包尺寸、爆心距和模型几何尺寸采用同一尺寸比, 同时模型选材与原型相同时, 即可保持试验相似。其中所有具有压力和速度量纲的量是不变的。所有响应时间和位移的比例因子与长度比例因子相同。因为应变是无量纲的, 所以在时间相似点上, 模型和原型的应变是相等的。

考察应变率的影响, 首先对应变率  $\dot{\varepsilon}$  进行量纲分析,

$$\dot{\varepsilon} = f(\omega, R, \rho_0, \alpha_0, \gamma, \rho_{st}, \sigma_i, E_i, E_{\text{tangent}}, L, \mu, t) \quad (6)$$

由 II 定理得到

$$\frac{L \dot{\varepsilon}}{E_i^{1/2} \rho_{st}^{1/2}} = F\left(\frac{\omega}{\rho_0 \alpha_0^2 R^3}, \frac{R}{L}, \frac{E_i}{\rho_{st} \alpha_0^2}, \frac{\rho_{st}}{\rho_0}, \frac{E_i}{\sigma_i}, \frac{E_{\text{tangent}}}{\sigma_i}, \frac{u}{\alpha_0}, \frac{t E_i^{1/2} \rho_{st}^{-1/2}}{L}, \gamma\right) \quad (7)$$

在满足复印比例定律的条件下, 即  $\frac{\sqrt[3]{\omega_p}}{\sqrt[3]{\omega_m}} = \frac{R_p}{R_m} = \frac{L_p}{L_m} = \frac{t_p}{t_m} = s$  时, 可以得到  $\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_m} = \frac{L_m}{L_p} = \frac{1}{s}$ 。即在满足应

变相似的情况下,应变率之比为 $\frac{1}{s}$ ,也就是说,当 $\frac{L_p}{L_m} = 2$ 时 $\frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_m} = \frac{L_m}{L_p} = \frac{1}{2}$ 。(1)式中 HJC 模型的应变率硬化项系数 $C = 0.007$ ,当 $\frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_m} = \frac{L_m}{L_p} = \frac{1}{4}$ ,应变率 $\dot{\epsilon}_p = 500s^{-1}$ 时 $\dot{\epsilon}_p^* = 500$ , $\dot{\epsilon}_m^* = 2000$ , $\frac{1 + \text{Cln}(\dot{\epsilon}_p^*)}{1 + \text{Cln}(\dot{\epsilon}_m^*)} = 0.9907$ ,可以看出,在1/4缩比模型中,在 HJC 模型可以合理描述混凝土的应变率效应的条件下,这种应变率引起的差异是可以忽略的。但是在计算应变率依赖极强的材料中的应力和应变时,这种应变率引起的差异是不可以忽略的。

### 3 混凝土板模爆数值模拟

加载采用直接在固体模型上施加爆炸波( Load \_ Blast )<sup>[8]</sup>的方法,这种方法无需建立爆炸场计算网格,可以大大节省计算资源。爆炸波通过 CONWEP<sup>[9]</sup>算法获得,它通过结合反射压力和入射压力把入射角的影响考虑进来,在无遮挡作用面上其表达式为:

$$P_l = P_r \cdot \cos^2 \theta + P_i \cdot (1 + \cos^2 \theta - 2 \cos \theta) \tag{8}$$

其中 $P_l$ 表示加载压力, $P_i$ 表示入射压力, $P_r$ 表示正反射压力。这种方法在满足立方根比例定律的同时,可以很方便地给物体加载爆炸波作用。

本文计算的混凝土板模型如图1所示,对三种尺寸分别为 $8m \times 8m \times 64cm$ 、 $4m \times 4m \times 32cm$ 、 $2m \times 2m \times 16cm$ (尺寸比为4:2:1)的混凝土板,TNT药量分别为100kg、 $1000/2^3$ kg、 $1000/2^6$ kg,悬于平板中心上方4m、2m、1m处进行计算。三个混凝土板采用相同的网格分布,也就是说网格尺寸之比也为4:2:1。对混凝土板在四周固定的情况下进行模态分析,得到8m、4m、2m板的一阶固有振动周期分别为16.7ms、8.26ms、4.149ms,满足4:2:1条件,爆炸波在4m、2m、1m处作用时间约是0.84ms、0.42ms、0.21ms,满足4:2:1条件,因此爆炸作用时间和固有周期之比也是相同的,表明混凝土板的爆炸响应在弹性范围的动力响应是相似的。

	model1	model2	model3
$2h$ ( cm )	800	400	200
$n$ ( cm )	64	32	16
$\omega$ ( kg TNT )	100	$100/2^3$	$100/2^6$

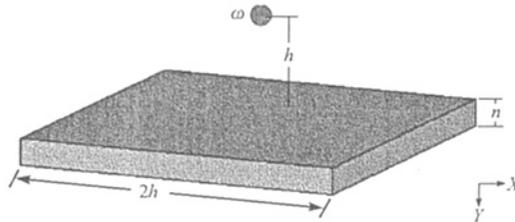


图1 爆炸模型示意图

Fig. 1 Blast model

从模拟结果图2可以看出三个尺寸混凝土板破坏分布相似。取三个混凝土板中部相同位置一点的

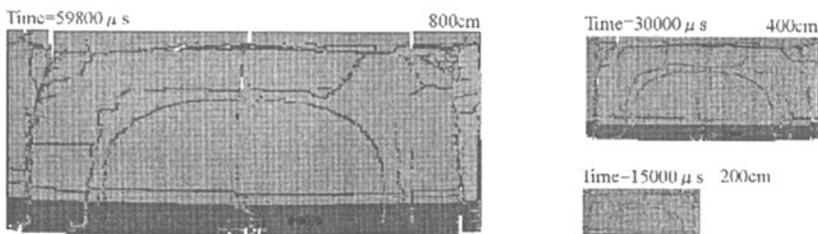


图2 混凝土板破坏图

Fig. 2 Damage distribution in 3 concrete slabs

垂直于板方向的位移  $d_y$  通过板厚  $n$  无量纲化 ( $d_y/n$ ) 之后作为纵坐标, 时间除以相似比  $s$  ( $t/s$ ) 作为横坐标, 如图 3 所示。取相同位置垂直于板方向的速度  $v_y$  作为纵坐标, 时间除以相似比  $s$  ( $t/s$ ) 作为横坐标, 如图 4 所示。从图 3、图 4 可以看出三条位移和速度曲线基本一致, 可以看出三个混凝土板的爆炸波响应具有一定的相似性。其中 2m 板和 4m 板具有较好的一致性, 8m 板的速度和无量纲位移比 2m 板和 4m 板稍大, 分析原因可能是由于 8m 板计算模型网格较粗 (4cm) 造成。

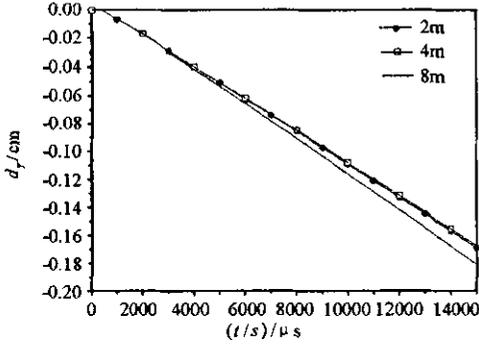


图 3 三个混凝土板中心点 Y 向位移时间曲线  
Fig. 3 Y displacement of middle point in 3 slabs

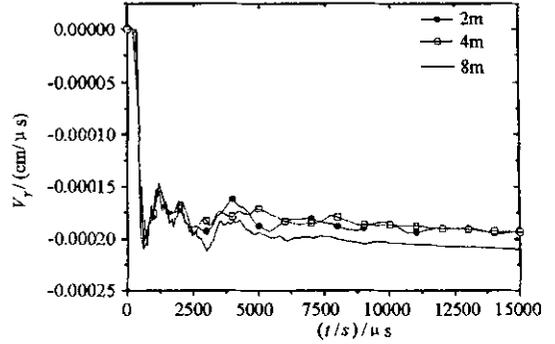


图 4 三个混凝土板中心点 Y 向速度时间曲线  
Fig. 4 Y velocity of middle point in 3 concrete slabs

对 2m 板分别采用 4cm、2cm、1cm 的网格尺寸进行计算, 考察计算结果的网格相关性。从图 5、6 可以看出 4cm 网格相对于 1cm 和 2cm 网格模型, 计算结果也有较大偏差。这说明在采用 4cm 网格计算时由于网格较粗, 计算会产生较大误差。

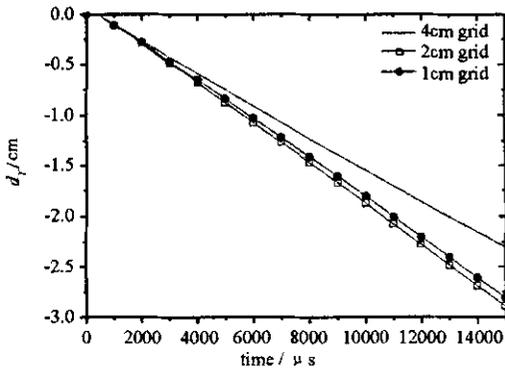


图 5 不同网格尺寸计算结果 Y 方向位移  
Fig. 5 Y displacement of the middle point by different meshing

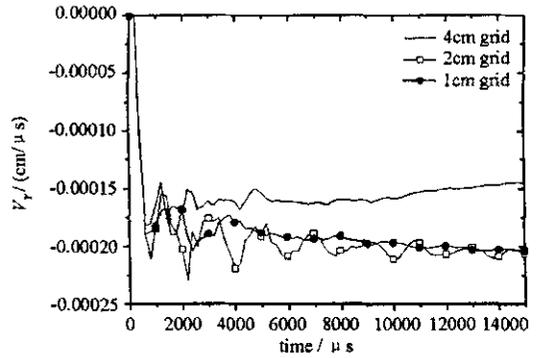


图 6 不同网格尺寸计算结果 Y 方向速度  
Fig. 6 Y velocity of the middle point by different meshing

混凝土 HJC 材料模型中采用的局部损伤失效的算法也可能造成计算结果具有一定的网格依赖性。下面进一步对 2m 混凝土板的 4cm 网格模型采用非局部 (nonlocal) 算法<sup>[9]</sup>来考察局部损伤模型引起的计算偏差。非局部算法认为积分点处的失效是由积分点周围某一半径范围内的材料的状态 (损伤度、塑性应变等) 决定的。采用不同的非局部积分范围 ( $\Phi 12\text{cm}$ 、 $\Phi 20\text{cm}$ 、 $\Phi 40\text{cm}$ ), 计算结果如图 7、图 8 所示, 可以看到计算结果随着非局部积分范围增大而趋近于 1cm 网格计算结果, 但是仍然无法完全一致, 图中箭头方向为非局部积分范围增大的方向, 因此 4cm 网格的计算偏差过大的原因部分是由于网格尺寸引起的, 部分是由于混凝土 HJC 材料的局部损伤失效模型引起的。

## 4 结论

在 HJC 模型可以合理描述混凝土的应变率效应的条件下, 在 1/4 的缩比模型中, 结构中的应变率对于爆炸相似律的影响可以忽略。混凝土板在爆炸作用下, 即使在局部发生失效断裂的情况下, 宏观破坏也能保持一定的相似性, 复印比例定律仍然近似成立。混凝土板模型在采用 4cm 网格时由于网格较粗会出现较大的计算偏差, 其原因部分是由于网格尺寸引起的, 部分是由于计算采用的混凝土 HJC 模

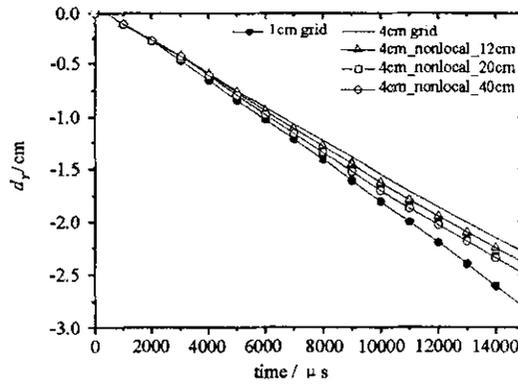


图7 非局部损伤模型计算Y方向位移

Fig. 7 Y displacement of the middle point by nonlocal damage model

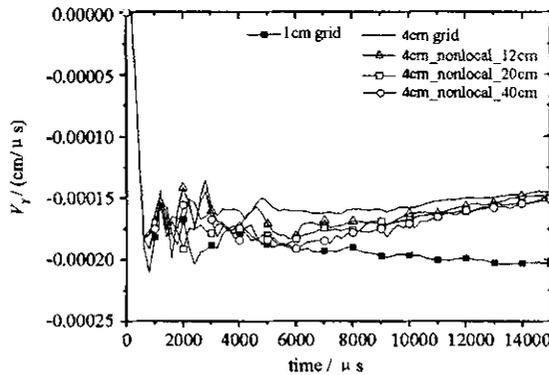


图8 非局部损伤模型计算Y方向速度

Fig. 8 Y velocity of the middle point by nonlocal damage model

型是一种局部损伤模型。

要进一步研究混凝土的模爆试验方法,混凝土材料模型必须采用非局部损伤模型或者其他考虑裂纹扩展区的混凝土破坏模型,有必要的话还需要考虑混凝土结构强度的尺寸效应。

## 参考文献:

- [1] 贝克 W E. 空中爆炸[M]. 江科译. 北京: 原子能出版社, 1982.
- [2] 郭仕贵, 康兴科. 复杂结构对爆炸响应的模化研究[J]. 爆破器材, 1998, 127(1): 21.
- [3] 凌贤长, 胡庆立. 土-结爆炸冲击相互作用模爆试验相似设计方法[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1249 - 1253.
- [4] 曾心平. 复杂非线性系统爆炸冲击试验模化分析[J]. 舰船科学技术, 1989(5): #7 - 57.
- [5] Bazant Z P. Size Effect in Blunt Fracture: Concrete, Rock, Meta[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1984, 110(4).
- [6] Holmquist T J, Johnson G R. A Computational Constitutive Model for Concrete Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Pressure[C]//14th International Symposium on Ballistics, 1993: 591 - 600.
- [7] 张凤国, 李恩征. 大应变、高应变率及高压强条件下混凝土的计算模型[J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(3): 198 - 202.
- [8] Randers-Pehrson G, Bannister K A. Airblast Loading Model for DYNA2D and DYNA3D[R]. Army Research Laboratory, Rept. ARL-TR-1310, 1997.
- [9] LS-DYNA. Livermore Software Technology Corporation, LS-DYNA Keyword User Manual[M], Version 970, Livermore, USA, 2003.



