

文章编号: 1001-1455(2002)03-0198-05

# 大应变、高应变率及高压强条件下 混凝土的计算模型

张凤国, 李恩征

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘要: 给出了混凝土在高速撞击条件下一种新的计算模型, 同以前的工作相比, 它可以很好地模拟在撞击过程中混凝土靶的成坑、层裂情况以及混凝土靶内出现的断裂现象。计算的结果同以前的模型计算结果和实验数据进行了比较。

关键词: 计算模型; 混凝土; 高速撞击; 层裂

\* 中图分类号: O347.1; O313.4 文献标识码: A

## 1 引言

分析刚体对混凝土的侵彻问题目前采取的方法有解析方法、数值模拟和经验公式, 但由于混凝土材料的非均匀性、结构的复杂性等特点, 限制了解析方法和经验公式的应用。随着计算机技术的迅速发展, 采用数值模拟方法分析侵彻问题在研究中逐渐占据了重要位置。数值计算程序有的是以经验公式或近似理论方法为基础而编制成的, 有的是严格的流体力学计算程序, 计算方法主要采用有限元法、有限差分法或独立元模型方法, 早在 80 年代, 仅美国就已开发出 EPIC、SHELL、DYNA 等 50 多种计算机程序。

早期计算机程序中采用的混凝土计算本构模型多是适用于小应变、低应变率和低压强情况, 而对于混凝土在撞击过程中出现的大应变、高应变率、高压强的情况模拟结果不太理想。1995 年, T. J. Holmquist 等<sup>[1]</sup>针对这种情况提出了一个新的计算模型, 即 Johnson-Cook 模型。由于它的计算结果与实验数据比较吻合, 因此在计算中被广泛地加以应用, 但是此模型并不能反映混凝土在撞击过程中出现的混凝土层裂等现象, 而且其计算模型对混凝土拉伸情况的处理也不合理。

我们在 Johnson-Cook 模型的基础上做了一定的改进, 正确处理了混凝土拉伸断裂以及断裂后重新受压的情况, 并提出了一种新的计算本构模型, 不但在计算结果上与实验数据相吻合, 而且更好地模拟了混凝土靶在弹体撞击过程中出现的成坑、脱落情况以及混凝土靶中出现的层裂现象, 同时采用新模型还可以分析弹体对厚混凝土靶的侵彻情况<sup>[2]</sup>。

## 2 计算模型

本文中采用的等效强度计算公式为

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

而

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

式中:  $\sigma^* = \sigma/f_c$ 、 $p^* = p/f_c$ 、 $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$ 、 $T^* = T/f_c$ ,  $\sigma$  为等效应力 ( $\sigma^* \leq S_{\max}$ ,  $S_{\max}$  为混凝土所能承受的最大强度),  $p$  为单元内的静压,  $T$  为材料的最大拉伸强度,  $\dot{\epsilon}$  为应变率,  $\dot{\epsilon}_0$  为参考应变率 ( $\dot{\epsilon}_0 = 1.0 \text{ s}^{-1}$ )

\* 收稿日期: 2000-10-15; 修回日期: 2002-01-17

作者简介: 张凤国(1969—), 男, 硕士, 助理研究员。

$f_c$  为材料的最大抗压强度,  $A, B, C, N, D_1, D_2$  为混凝土的材料常数,  $D$  为损伤度 ( $0 \leq D \leq 1.0$ , 且  $D_1(p^* + T^*)^{D_2} \geq \epsilon_{fmin}$ ,  $\epsilon_{fmin}$  为混凝土的最小断裂应变),  $\Delta\epsilon_p$  和  $\Delta\mu_p$  分别代表在一个积分步长内单元的等效塑性应变和塑性体积应变。单元的变形分为压缩和拉伸两种情况, 与此对应, 单元内的静压  $p$  和单元体积应变  $\mu$  的关系可分为下面几种情况。

### 2.1 混凝土压缩阶段

在混凝土压缩过程中采用了 Johnson-Cook 的计算模型(图 1), 图中  $p_1$  表示压实拐点处的压力,  $\mu_{pl}$  为其相应的单元体积应变,  $p_c$  表示压碎拐点处的压力,  $\mu_c$  为其相应的单元体积应变, 即混凝土的压缩变形过程分为三个阶段:

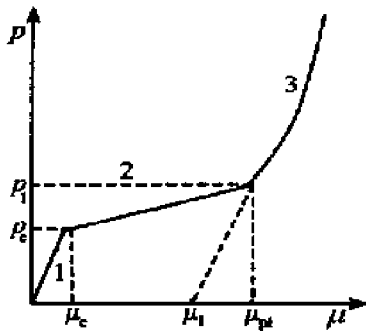


图 1 混凝土压缩过程中的计算模型

Fig.1 Johnson-Cook model description for concrete

(1)弹性阶段 ( $0 \leq \mu \leq \mu_c$ )

$$p = K\mu \tag{3}$$

式中:  $K$  为混凝土的弹性模量,  $K = p_c / \mu_c$ ,  $\mu = \rho / \rho_0 - 1$  为单元的体积应变,  $\rho$  和  $\rho_0$  分别表示单元的密度和初始密度。

(2)过渡阶段 ( $\mu_c < \mu \leq \mu_{pl}$ )

这一阶段是指混凝土内部的气泡开始破裂, 混凝土结构受到损伤, 并开始产生破碎性裂纹, 但混凝土结构还没有完全破碎。

$$p = p_c + K_1(\mu - \mu_c) \tag{4}$$

式中:  $K_1 = (p_1 - p_c) / (\mu_{pl} - \mu_c)$ ,  $\mu_{pl}$  为相对于  $p_1$  的单元体积应变。

卸载时

$$p = p_c + K_1(\mu_0 - \mu_c) + [(1 - F)K + FK_1](\mu - \mu_0) \tag{5}$$

式中:  $F = (\mu_0 - \mu_c) / (\mu_{pl} - \mu_c)$ ,  $\mu_0$  为混凝土单元卸载前的体积应变。

(3)压实阶段 ( $\mu \geq \mu_{pl}$ )

这一阶段混凝土已经完全破碎。

$$p = K_1\bar{\mu} + K_2\bar{\mu}^2 + K_3\bar{\mu}^3 \tag{6}$$

式中:  $\bar{\mu} = (\mu - \mu_1) / (1 + \mu_1)$ ,  $K_1, K_2, K_3$  为混凝土的材料常数。

卸载时

$$p = K_1\bar{\mu} \tag{7}$$

### 2.2 混凝土拉伸阶段

混凝土拉伸的应力、应变曲线如图 3, 在高速撞击情况下, 可以忽略混凝土的塑性变形过程, 即可以采用图 4 所示的模型<sup>[3]</sup> (其中  $T$  为混凝土的最大拉伸强度)。

即  $(0 \leq -p \leq T, 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_0)$   $p = K\mu$  (8)

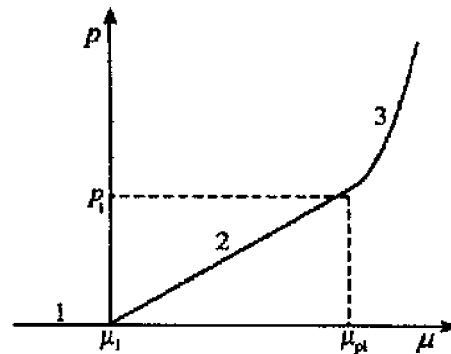


图 2 混凝土断裂后重新受压的计算模型

Fig.2 New model description for concrete

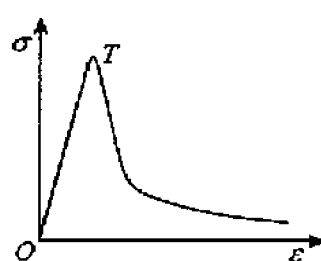


图 3 混凝土拉伸时的应力-应变实验曲线  
Fig.3 Tensile stress-strain curve of concrete

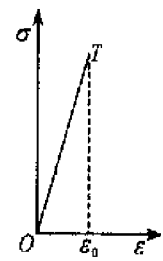


图 4 混凝土拉伸时的简化模型曲线  
Fig.4 Simple tensile stress-strain curve of concrete

当  $\epsilon \geq \epsilon_0$  时  $p = 0$  (9)

2.3 混凝土在断裂后重新受压

混凝土在断裂后重新受压, 此时混凝土结构已经存在裂纹, 因而不能采用压缩阶段的 Johnson-Cook 计算模型, 对于这种情况, 本文给出了另一种计算模型(如图 2), 同样它分为三个阶段。

(1) 恢复阶段 ( $\mu_1 \leq \mu < 0$ )

$\mu_1$  为混凝土单元在断裂后受压前的体积应变, 由于裂纹的存在, 体积应变  $\mu$  从  $\mu_1$  到 0 的过程中, 单元内的应力很小, 可以忽略, 即

$p = 0$  (10)

(2) 过渡阶段 ( $0 \leq \mu \leq \mu_{pl}$ )

$p = p_1^* \mu / \mu_{pl}$  (11)

卸载时

$p = p_c + K_1(\mu_0 - \mu_c) + [(1 - F)K + FK_1](\mu - \mu_0)$  (12)

式中:  $F = (\mu_0 - \mu_c) / (\mu_{pl} - \mu_c)$ ,  $\mu_0$  为混凝土单元卸载前的体积应变。

(3) 压实阶段 ( $\mu > \mu_{pl}$ )

$p = K_1 \bar{\mu} + K_2 \bar{\mu}^2 + K_3 \bar{\mu}^3$  (13)

同样,  $\bar{\mu} = (\mu - \mu_1) / (1 + \mu_1)$ ,  $K_1, K_2, K_3$  为混凝土的材料常数。

卸载时

$p = K_1 \bar{\mu}$  (14)

3 算 例

我们采用本文所给出的计算模型, 利用 Lagrange 弹塑性有限元程序 (LTZ-2D) 模拟了弹体侵彻混凝土靶的侵彻过程。弹体结构如图 5, 弹体材料为钢, 混凝土靶的厚度为 178mm, 材料常数在表 1 中给出, 计算结果与 Johnson-Cook 模型的计算结果、实验值的比较在表 2 中给出 (本文所采用的试验数据、实验图像以及材料常数均选自文献[1, 4], 关于混凝土的本构关系以及计算流程可以参考文献[5])。

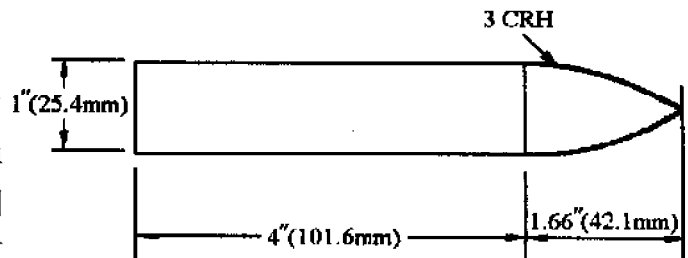


图 5 弹体结构 (0.5kg)

Fig. 5 Projectile geometry (0.5kg)

表 1 压缩强度  $f_c = 0.048\text{GPa}$  混凝土的材料常数

Table 1 Summary of constants for  $f_c = 0.048\text{GPa}$  concrete

密度 / (kg/m <sup>3</sup> )	A	B	N	C	$f_c$ / GPa	$S_{max}$	剪切模量 / GPa	$D_1$	$D_2$
2440	0.79	1.60	0.61	0.007	0.048	7.0	14.86	0.04	1.0
$\epsilon_{min}$	$p_c$ / GPa	$\mu_c$ / GPa	$K_1$ / GPa	$K_2$ / GPa	$K_3$ / GPa	$p_1$ / GPa	$\mu_1$	$T$ / GPa	
0.01	0.016	0.001	85	-171	208	0.80	0.10	0.004	

表 2 弹体剩余速度实验值和模型计算结果

Table 2 Impact velocity and residual velocity of test data and computational results

初速度 / (m/s)	剩余速度 / (m/s)			新模型值与实验值的误差 / (%)
	试验值	Johnson-Cook 计算模型	新的计算模型	
340	0	0	0	0
381	136	130.40	132.708	2.42
434	214	221.12	223.494	4.44
606	449	450.03	446.832	0.48
746	605	615.2	601.223	0.62
1058	947	920.10	931.200	1.67

### 4 结 论

图 6、图 7 为试验图像, 图 6 为弹体入射面, 图 7 为弹体射出面, 图中间的圆形孔洞为弹体射出后的弹孔, 孔的周围颜色较深区域为混凝土靶上成坑和脱落的地方。图 8、图 9 为表 2 中初速为 606m/s 的弹体在 1500 $\mu$ s 时穿过混凝土靶的计算图像, 其中图 8 为采用 Johnson-Cook 计算模型的计算结果, 图 9 为采用本文计算模型给出的计算结果。由图对比可以看出本文给出的计算模型可以很好地模拟弹体侵彻过程中混凝土靶上出现的成坑和混凝土靶层裂的情况, 图 9 中靶体上还显示了混凝土内部的断裂现象, 计算中我们还发现混凝土内部裂纹的方向、长度与弹体的初速、弹头形状以及靶体的约束条件有关, 而且由表 2 可以看出, 在不同的入射速度情况下, 本模型的计算结果与实验数据比较一致。

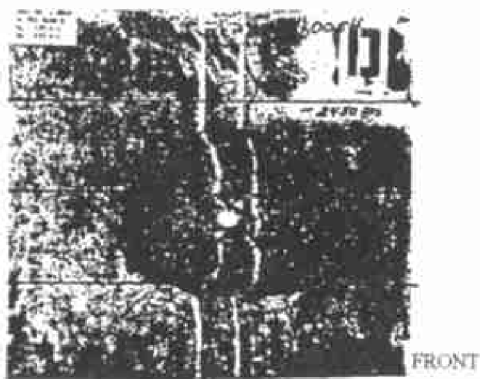


图 6 混凝土靶的弹体入射面

Fig.6 Post-test photographs of the impact surface



图 7 混凝土靶的弹体射出面

Fig.7 Post-test photograph of the exit surface

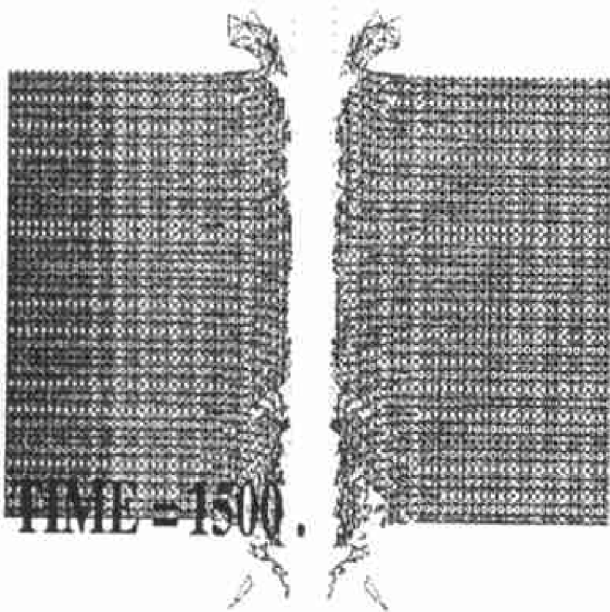


图 8 采用 Johnson-Cook 模型的计算结果  
Fig.8 Penetration result for Johnson-Cook model

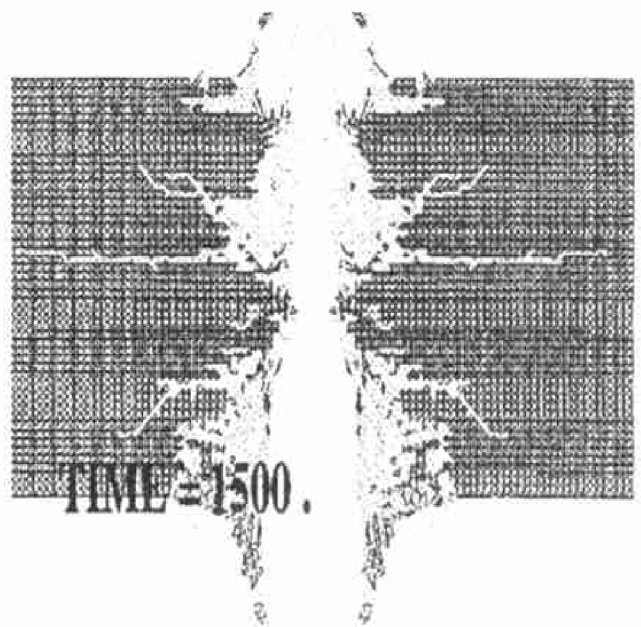


图 9 采用新模型的计算结果  
Fig.9 Penetration result for new model

## 参考文献:

- [1] Holmquist T J, Johnson G R. A Computational Constitutive Model for Concrete Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Pressure [A]. 14th International Symposium on Ballistics [C]. 1995, 591-600.
- [2] 张凤国, 李恩征. 弹体对半无限厚混凝土靶侵彻的数值分析[J]. 工程力学, 2001, 3(增刊): 336-340.
- [3] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999: 35-36.
- [4] Hanchak S J, Forrestal M J, Young E R, et al. Perforation of Concrete Slabs with 48MPa and 140MPa Unconfined Compressive Strengths [J]. International Journal of Impact Engineering, 1992, 12(1): 1-7.
- [5] Johnson G R, Stryk R A. User Instructions for the EPIC-2 code [R]. Honeywell Inc, Edina, MN, AFATL-TR-86-51, 1986.

## A Computational Model for Concrete Subjected to Large Strains, High Strain Rates, and High Pressures

ZHANG Feng-guo, LI En-zheng

(*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China*)

**Abstract:** A new computational constitutive model of concrete in the condition of high-speed impact is presented. Compared to previous works, this model simulates the crater formation, spall of concrete target, and the fracture occurring inside it in the process of impact very well. The computational results are compared with previous ones and the experimental data.

**Key words:** computational model; concrete; high-speed impact; spall