文章编号:1000-5773(2012)03-0313-06

混凝土 HJC 模型抗侵彻参数敏感性数值模拟研究*

陈星明[1,2],刘 彤[1,2],肖正学[2]

(1.中国工程物理研究院,四川绵阳 621900;
2.西南科技大学环境与资源学院,四川绵阳 621010)

摘要:混凝土是一种应用广泛的复合材料,其动态性能及抗侵彻毁伤效应的研究越来越依赖于数值模拟,其中混凝土 HJC 模型是应用最广泛的本构模型之一。在介绍 HJC 模型的基础上,应用 LS-DYNA 数值模拟方法进行 HJC 本构模型抗侵彻性能的参数敏感性研究,通过大量数值模拟得出 HJC 模型的抗侵彻敏感参数有:无侧限单轴抗压强度 f_c、压实点压力 p_{lock}、特征化粘性强度 A、特征化压力硬化因子 B 和压力硬化指数 N。在混凝土的抗侵彻数值模拟过程中,重点是确定敏感参数的取值,以提高数值模拟的精度和质量,做到合理地选择试验方法和安排试验量。

关键词:混凝土;HJC 模型;抗侵彻;敏感性;数值模拟
中图分类号:O389 **文献标识码**:A

1 引 言

混凝土作为一种特殊的复合材料,以其良好的易成型性、抗水耐火性、耐久性、承载能力强等特点,以及原料充沛、价格便宜、适于建设任何尺寸和形体复杂的结构等优点,已广泛应用于各类民用工程和军事设施的构筑(如机场、指挥中心、控制中心等)。对于一些重要建筑物和防护工程等,在设计时必须考虑其承受变化剧烈的冲击载荷的可能性,因此混凝土除了具备一定的力学性能外,还需要具备抗冲击和抗侵彻能力。

混凝土动态性能及抗侵彻毁伤效应研究已发展成为实验研究、理论研究和数值模拟(或计算)三级构成,特别随着计算机技术的飞跃发展,数值模拟的优越性越来越大,目前广泛应用数值模拟(或计算)方法研究混凝土的抗侵彻毁伤效应,但数值模拟的精确性取决于混凝土材料本构方程及其参数选取的正确性。由于混凝土介质的不均匀性及其动态行为的复杂性,大型数值软件(如 ANSYS/LS-DYNA、AUTODYN 等)中已有的混凝土本构关系的复杂性及其参数确定的困难性,造成模拟结果的精度或准确性不高,因此,在数值模拟中如何选用合适的本构模型以及模型中参数的确定,已经成为数值模拟的关键。

目前,ANSYS/LS-DYNA 软件已成为弹体侵彻混凝土等目标最常用的数值模拟软件之一,该软件系统中有多种混凝土的本构模型,其中 HJC 模型充分考虑了混凝土材料在大应变、高应变率和高压下的特性,比较适合于 Lagrange 和 Euler 方法。HJC 模型是目前普遍认为比较适用的本构模型之一,同时在已有的弹体侵彻混凝土数值模拟中也是使用最多的本构模型。

* **收稿日期**:2011-01-08;**修回日期**:2011-03-02
基金项目:西南科技大学国防重点项目(07zx6101);先进建筑材料四川省重点实验室培育基金(08zxxp04)
作者简介:陈星明(1972—),男,博士研究生,主要从事工程力学、采矿工程方面的教学与研究. E-mail:cxm@swust.edu.cn

本研究采用 LS-DYNA 数值模拟方法得出混凝土 HJC 模型抗侵彻效应敏感性参数为：无侧限单轴抗压强度、压实点压力、特征化粘性强度、特征化压力硬化因子、压力硬化指数等 5 个参数，因此在应用 HJC 模型模拟抗侵彻研究时，重点是准确确定这 5 个敏感性参数的取值，为确定进行进一步数值模拟时的参数提供理论支撑。

2 HJC 模型简介

Holmquist 等人[1]基于等效思想，即用一维等效应力代替三维方向上应力所产生的响应效果，在 JC 模型的基础上，提出了 HJC 强度模型，其具体表达式为

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

式中：$\sigma^*=\sigma/\sigma_{c,s}$ 为特征化等效应力，σ 为实际等效应力，$\sigma_{c,s}$ 为准静态单轴抗压强度；D 是损伤变量；$p^*=p/\sigma_{c,s}$ 为特征化压力，p 为单元内的静水压力；$\dot{\varepsilon}^*=\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ 为特征化应变率，$\dot{\varepsilon}$ 为响应应变率，$\dot{\varepsilon}_0=1.0\ \mathrm{s}^{-1}$ 为参考应变率；材料常数 A 是特征化粘性强度，B 是特征化压力硬化因子，C 是应变率影响系数，N 是压力硬化指数。HJC 模型是以累积塑性应变为衡量准则的唯象损伤本构关系模型，同时考虑了压力效应及应变率敏感性。

损伤因子 D 由等效塑性应变和塑性体积应变累加得到，它与 JC 材料模型一致，其具体表达式为[2]

$$D=\sum\frac{\Delta\varepsilon_p+\Delta\mu_p}{\varepsilon_p^f+\mu_p^f} \tag{2}$$

式中：$\Delta\varepsilon_p$ 及 $\Delta\mu_p$ 分别为等效塑性应变增量和塑性体积应变增量，而 $\varepsilon_p^f+\mu_p^f$ 是在压力 p 作用下发生断裂时的塑性应变。

在计算过程中，等效塑性应变 ε 和损伤度 D 被作为材料单元是否出现失效的双门开关，在物理上表示当单元的塑性变形积累至某一阈值时或损伤发展累积到某一阈值时，材料发生破坏，从而失去强度。强度效应失去后的单元被视为流体，只能承受静水压力的作用，其应力偏量被置为零，其中失效应变采用如下压力关系式进行定义[1]

$$\varepsilon_p^f+\mu_p^f=f(p)=D_1(p^*+T^*)^{D_2} \tag{3}$$

式中：T^* 为无量纲拉伸强度，为单轴抗拉强度与单轴抗压强度之比；D_1、D_2 为损伤参量。

模型采用状态方程描述混凝土材料的压力-体积关系，在弹性区、破碎区和压实区采用不同的方式描述，其加载曲线为

$$p=\begin{cases}K_e\mu & \text{弹性区}\\ p_{crush}+K_{crush}(\mu-\mu_{crush}) & \text{破碎区}\\ K_1\bar{\mu}+K_2\bar{\mu}^2+K_3\bar{\mu}^3 & \text{压实区}\end{cases} \tag{4}$$

式中：μ 为体积应变，p_{crush}、μ_{crush} 分别为压溃点的压力和体积应变，$\bar{\mu}$ 为修正的体积应变，K_e、K_{crush}、K_1、K_2、K_3 为材料参数，部分物理量分别定义如下

$$\begin{aligned}\mu&=\rho/\rho_0-1\\ K_{crush}&=\frac{p_{lock}-p_{crush}}{\mu_{lock}-\mu_{crush}}\\ \bar{\mu}&=\frac{\mu-\mu_{lock}}{1+\mu_{lock}}\end{aligned} \tag{5}$$

式中：p_{lock} 和 μ_{lock} 分别为材料压实点的压力和体积应变，$\mu_{lock}=\rho_{grain}/\rho_0-1$，$\rho_{grain}$ 为材料除去空穴后的介质密度，ρ_0 为混凝土材料的密度。

HJC 模型充分考虑了混凝土材料在大应变、高应变率和高压下的特性，比较适合于 Lagrange 和 Euler 方法，因此该模型广泛适用于 ANSYS/LS-DYNA 系统中模拟混凝土抗侵彻性能研究。

3　HJC 模型参数及其一般确定方法

根据 LS-DYNA 关键字手册[3],HJC 模型中的关键字可以分为以下类型。

物理参数:ρ(密度)。

强度参数:A(特征化粘性强度)、B(特征化压力硬化因子)、N(压力硬化指数)、C(应变率影响系数)、S_{FMAX}(特征化最大强度)、G(剪切模量)、f_c(无侧限单轴抗压强度)、T(单轴抗拉强度)。

损伤参数:D_1(损伤常数)、D_2(损伤常数)、ε_{EFMIN}(累积塑性应变)。

压力参数:p_{crush}(压溃点的压力)、μ_{crush}(压溃点的体积应变)、p_{lock}(压实点的压力)、μ_{lock}(压实点的体积应变)、K_1(压力常数)、K_2(压力常数)、K_3(压力常数)。

以上参数中,ρ 和 f_c 可以通过简单物理实验获取,根据模型定义有 $p_{crush}=f_c/3$,$\mu_{crush}=p_{crush}/K$(K 为体积模量),K_1、K_2 和 K_3 可由冲击 Hugoniot 数据确定或直接采用手册[4]中给定的数值,对于混凝土材料,$K_1=85$ GPa,$K_2=-171$ GPa,$K_3=208$ GPa。因此在参数敏感性研究中,只考虑剩下的其它参数。

在混凝土动态性能及其抗侵彻数值模拟研究中,广泛使用混凝土 HJC 模型,目前该模型中参数的确定方法主要有:借鉴前人(或他人)的数据,一般是套用模型提供的原始数据或在其基础上作适当调整[1,5-8];利用经验公式近似获得部分参数[9];通过实验的方法近似获得部分参数[10-11]。但是由于混凝土 HJC 本构模型形式较复杂,要求参数较多,并且混凝土是非线性、非均匀材料,因此其参数确定比较困难,并部分带有主观性和不确定性,影响了数值模拟的应用。

4　HJC 模型参数敏感性分析

敏感性分析是指在众多不确定性因素中找出对结果稳定性有重要影响的敏感性因素,是分析系统稳定性的一种方法[12]。敏感性分析的第 1 步是建立系统模型,即系统特性与因素之间的函数关系 $P=f(\alpha_1,\alpha_2,\cdots,\alpha_n)$;第 2 步是给出基准参数集;基准参数确定后,可对各参数进行敏感性分析,分析参数 α_k 对特性 P 的影响时,可令其余各参数基准值固定不变,而令 α_k 在其可能的范围内变动,若 α_k 的微小变化将引起 P 的较大变化,说明 P 对 α_k 很敏感;若 α_k 在较大范围内变化,而 P 变化甚微,说明 P 对 α_k 不敏感。

利用 ANSYS/LS-DYNA 软件系统,多次进行弹体侵彻混凝土靶板的数值模拟,在数值模拟中改变每一个参数的取值,观察该参数的变化对侵彻毁伤效应(本试验主要考虑弹体的过载特性和剩余速度)的稳定性,以此来判断混凝土 HJC 本构模型中参数的敏感性。本研究利用 LS-DYNA 软件对Hanchak 实验(不加筋)[12]进行数值模拟,其弹体模型为:长度 $L=14.37$ cm,直径 $d=2.54$ cm,CRH 为 3,密度 7 800 kg/m^3,质量 $m=0.5$ kg;靶体模型为:厚度 17.8 cm,密度 2 440 kg/m^3,单轴抗压强度 $f_c=48$ MPa。弹体冲击初始速度为 746 m/s;数值模拟中弹体采用 J-C 模型,混凝土靶体采用 HJC 模型。

根据前面的分析,在 HJC 模型参数敏感性数值试验中,应该考虑的输入参数为:f_c(混凝土无侧限单轴抗压强度)、p_{lock}(压实点压力)、μ_{lock}(压实点体积应变)、S_{FMAX}(特征化最大强度)、D_1(损伤常数)、D_2(损伤常数)、ε_{EFMIN}(破坏前累积塑性应变)、A(特征化粘性强度)、B(特征化压力硬化因子)、N(压力硬化指数)、C(应变率因子)、G(混凝土材料剪切模量)、T(混凝土材料抗拉强度)。在各参数可能变化的范围内,改变其中某一参数的取值,其它参数取值保持不变,进行混凝土抗侵彻数值模拟,即可以得到该参数对侵彻效应的敏感性。

通过以上大量的数值模拟试验可以发现,在 HJC 模型中,f_c、p_{lock}、A、B、N 参数对于抗侵彻效应是敏感的,其对弹体的过载-时间曲线、与剩余速度的关系曲线分别如图 1～图 5 所示。而其它参数则对侵彻效应基本不敏感,图 6 为参数 C 对弹体的过载-时间曲线和剩余速度曲线。

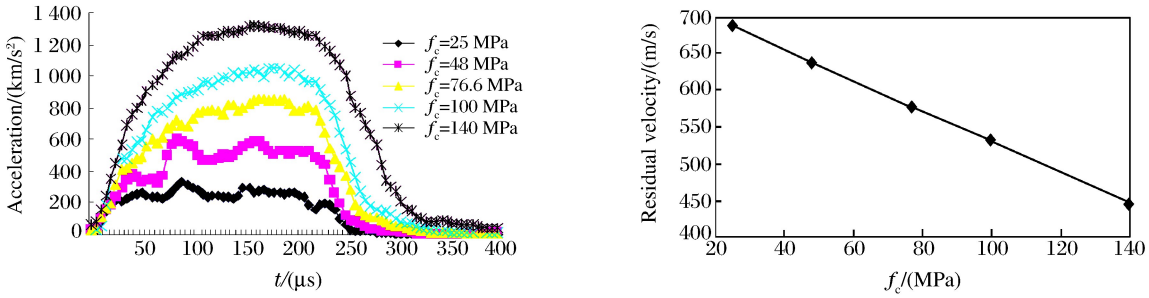


图 1 f_c 对侵彻效应(过载和剩余速度)的影响

Fig. 1 Influence of f_c on penetration effect

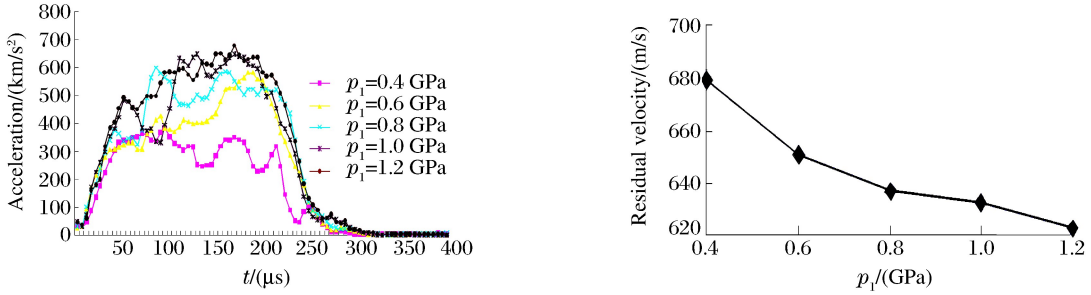


图 2 p_{lock} 对侵彻效应(过载和剩余速度)的影响

Fig. 2 Influence of p_{lock} on penetration effect

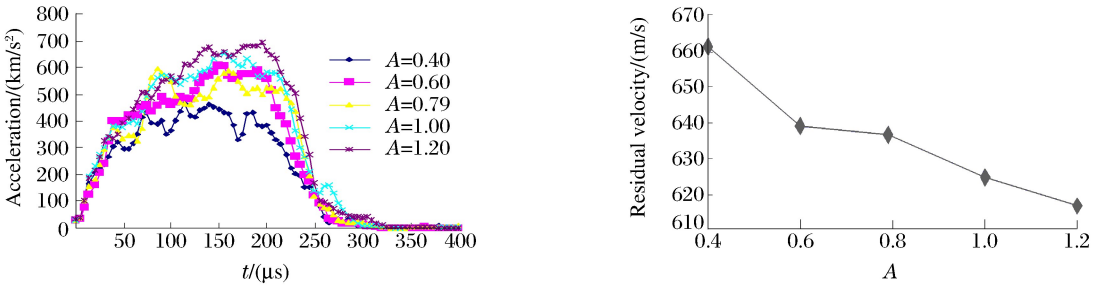


图 3 A 对侵彻效应(过载和剩余速度)的影响

Fig. 3 Influence of A on penetration effect

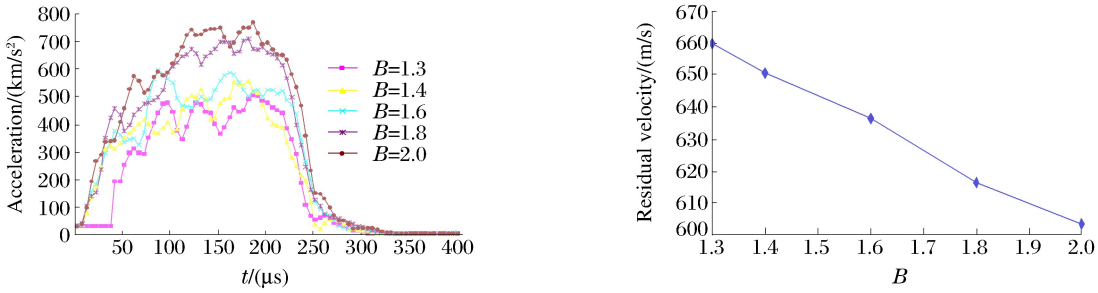


图 4 B 对侵彻效应(过载和剩余速度)的影响

Fig. 4 Influence of B on penetration effect

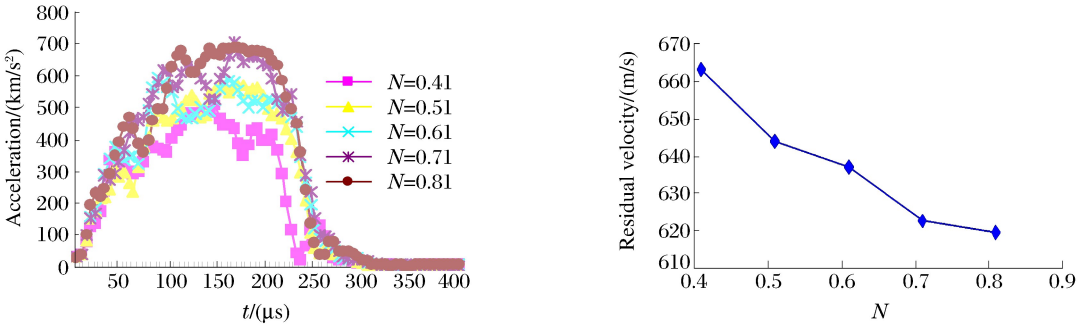


图 5　N 对侵彻效应(过载和剩余速度)的影响

Fig. 5　Influence of N on penetration effect

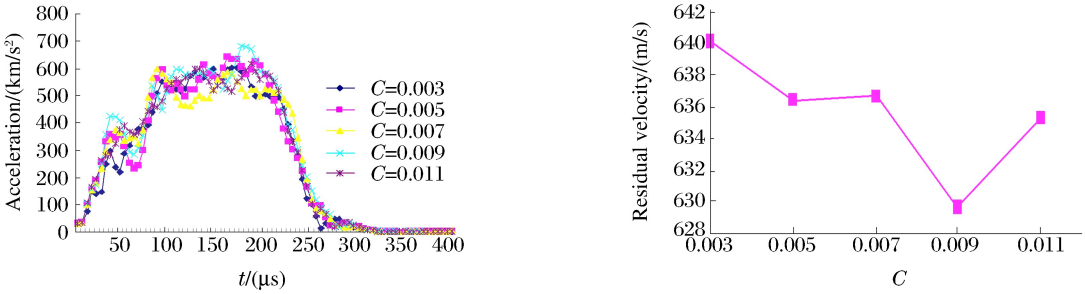


图 6　C 对侵彻效应(过载和剩余速度)的影响

Fig. 6　Influence of C on penetration effect

5　结　论

通过大量数值模拟试验，得到混凝土 HJC 模型参数中的敏感参数有：f_c(无侧限单轴抗压强度)、p_{lock}(混凝土压实点压力)、A(特征化粘性强度)、B(特征化压力硬化因子)、N(压力硬化指数)，而其它参数则不敏感。

在利用 HJC 模型对混凝土动态力学性能或抗侵彻性能进行数值模拟时，参数确定的重点是根据混凝土的性质准确确定敏感参数的取值，以提高数值模拟的精度和质量，以便合理地选择试验方法和安排试验量。

References:

[1] Holmquist T J, Johnson G R, Cook W H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures [A]//14th International Symposium on Ballistics [C]. Quebec, Canada, 1993: 591-600.

[2] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strain, strain rates, temperatures and pressures [J]. J Eng Fract Mech, 1985, 21(1): 31-48.

[3] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Keyword User's Manual [Z]. American: Livermore Software Technology Corporation, 2001.

[4] Marsh S P. LASL Shock Hugoniot Data [M]. California: University of California Press, 1980.

[5] Wang D W, Gao H Q, Du H X, et al. The analysis and simulation of penetrating movement of oblique projectile [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2006, 26(3): 121-123. (in Chinese)
汪德武，高洪泉，杜海霞，等. 斜侵彻弹体运动分析与仿真 [J]. 弹箭与制导学报，2006，26(3)：121-123.

[6] Feng G Z. The numerical simulation & analysis of penetration against concrete targets using ANSYS/LS-DYNA [D]. Beijing: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2006. (in Chinese)

冯国忠. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的混凝土靶板侵彻问题的数值模拟与分析 [D]. 北京:中国地震局工程力学研究所,2006.

[7] Zheng Z H, Yu W L, Wang T. Numerical analysis of the EPW penetration into high strength concrete target [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2008, 28(3): 144-147. (in Chinese)
郑振华,余文力,王 涛. 钻地弹侵彻高强度混凝土靶的数值模拟 [J]. 弹箭与制导学报,2008,28(3):144-147.

[8] Jiang H, Wang J J. Investigation on failure index of concrete in the projectile perforation simulation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(8): 30-35. (in Chinese)
姜 华,王君杰. 弹体侵彻混凝土数值模拟失效指标研究 [J]. 振动与冲击,2009,28(8):30-35.

[9] Zhang F G, Li E Z. A method to determine the parameters of the model for concrete impact and damage [J]. Journal of Ballistics, 2001, 13(4): 12-17. (in Chinese)
张凤国,李恩征. 混凝土撞击损伤模型参数的确定方法 [J]. 弹道学报,2001,13(4):12-17.

[10] Cui W F. Investigation on numerical simulation of penetration into concrete target [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003. (in Chinese)
崔伟峰. 动能弹丸侵彻混凝土的数值模拟研究 [D]. 长沙:国防科学技术大学,2003.

[11] Chen J L, Li X D, Liu K X. Experimental research on parameters of constitutive model for a cement mortar [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2008, 44(5): 689-694. (in Chinese)
陈建林,李旭东,刘凯欣. 素混凝土本构模型参数的实验研究 [J]. 北京大学学报(自然科学版),2008,44(5):689-694.

[12] Li Y H. Sensitivity analysis of rock and soil parameter [J]. Guangzhou Architecture, 2000, 2: 34-38. (in Chinese)
李艳华. 岩土参数敏感性分析 [J]. 广州建筑,2000,2:34-38.

[13] Hanchak S J, Forrestal M J, Young E R, et al. Perforation of concrete slabs with 48 MPa (7 ksi) and 140 MPa (20 ksi) unconfined compressive strengths [J]. Int J Impact Eng, 1992, 12(1): 1-7.

Numerical Simulation Study of Parameter Sensitivity Analysis on Concrete HJC Model

CHEN Xing-Ming[1,2], LIU Tong[1,2], XIAO Zheng-Xue[2]

(1. *Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621900, *China*;
2. *School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang* 621010, *China*)

Abstract: Concrete is a widely used composite. The study of dynamic performance and anti-penetration effects on concrete is dependent on the numerical simulation, and the HJC model is often used in numerical simulations. On the basis of introduction about HJC model, parameter sensitivity analysis on HJC model by LS-DYNA numerical simulations is studied in the paper. There are five parameters (f_c, p_{lock}, A, B and N) are sensitive. According to the sensitivity parameters, it can improve the accuracy and quality of numerical simulation and the reasonable test methods and arrangements for testing chosen.

Key words: concrete; HJC model; anti-penetration; sensitivity; numerical simulation