

文章编号: 1004-4353(2020)02-0164-05

# HJC 和 K&C 混凝土模型在爆炸荷载作用下的对比研究

谢 雷

( 延边大学 工学院, 吉林 延吉 133002 )

**摘要:** 在爆炸荷载作用下为比较 HJC 和 K&C 混凝土模型分析混凝土力学性能的准确性, 基于这两种模型的物态方程参数和强度模型参数对钢筋混凝土梁在爆炸荷载作用下的动力响应进行了数值分析. 研究结果显示, 在爆炸荷载作用下应用 K&C 混凝土模型分析混凝土力学性能的准确性显著优于 HJC 模型, 因此本研究结果可为爆炸荷载作用下分析混凝土的力学性能提供理论参考.

**关键词:** 爆炸荷载; 钢筋混凝土梁; HJC 混凝土模型; K&C 混凝土模型

**中图分类号:** TU312

**文献标识码:** A

## Comparative study the mechanical properties of HJC and K&C concrete models under explosion

XIE Lei

( College of Engineering, Yanbian University, Yanji 133002, China )

**Abstract:** To compare the mechanical properties accuracy of HJC and K&C concrete models under explosion, the dynamic response of reinforced concrete (RC) beams under blast load is numerically analyzed based on the comparison between their state of equation parameters and strength model parameters. The results show that the accuracy of using K&C concrete model to analyze the mechanical properties of concrete under explosion is significantly better than that of HJC model. The research results can provide reference for precise mechanics analysis of concrete structures under explosion.

**Keywords:** explosion; reinforced concrete beam; HJC concrete model; K&C concrete model

### 0 引言

混凝土结构受爆炸荷载作用后, 其受力状态变得极为复杂, 并产生多种破坏形态<sup>[1]</sup>. 目前, 对混凝土结构受爆炸荷载作用后其力学性能的研究大多采用的是 HJC 和 K&C 混凝土模型<sup>[2]</sup>. 如: 赵凯等<sup>[3]</sup>运用 HJC 模型研究了不同药形装药爆炸波在混凝土介质中的传播特性; E. S. Andrea 等<sup>[4]</sup>运用 HJC 模型对混凝土和钢纤维混凝土遮弹板在爆炸下产生的爆坑成坑过程进行了数值研

究; 张社荣等<sup>[5]</sup>研究了碾压混凝土 HJC 模型的应变率增强效应, 并对该模型的破坏准则进行了修正; Z. G. Tu 等<sup>[6]</sup>采用 K&C 模型研究了爆炸荷载作用下混凝土板的损伤响应; 张传爱等<sup>[7]</sup>运用 K&C 模型研究了 FOAM HEST 试验, 并预测了动荷载作用下混凝土构件的动态响应. 焦燊烽等<sup>[8]</sup>通过研究爆炸冲击作用下的框架柱的动力系数和破坏模式表明, 数值模型的选取对准确分析混凝土动态力学性能具有重要作用. 为对比 HJC

**收稿日期:** 2020-02-07

**基金项目:** 延边大学应用基础项目(602019057)

**作者简介:** 谢雷(1981—), 男, 讲师, 研究方向为结构抗爆.

和 K&C 混凝土模型在分析混凝土结构受爆炸荷载作用时的性能,本文研究了 HJC 和 K&C 混凝土模型本构方程中的相关参数,并运用数值仿真分析了这两种模型在爆炸荷载作用下的动力响应,旨在为在爆炸荷载作用下更好地分析混凝土结构的力学性能提供参考。

## 1 HJC 模型

### 1.1 HJC 状态方程

HJC 状态方程<sup>[9]</sup>是一种用来刻画系统输入和状态之间关系的控制方程,它可用于描述在压力作用下 HJC 模型的体积模量所产生的变化。在 HJC 状态方程中,压力与体积模量之间的关系如图 1 所示。

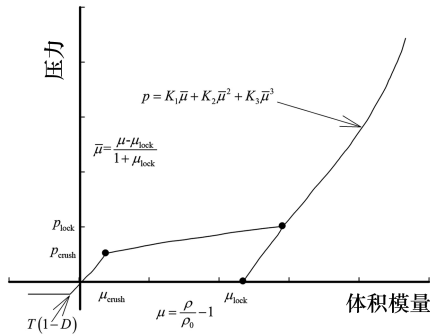


图 1 压力与体积模量的关系

HJC 模型的状态方程为

$$P = K_1 \bar{\mu} + K_2 \bar{\mu}^2 + K_3 \bar{\mu}^3. \quad (1)$$

其中:  $K_1$ 、 $K_2$  和  $K_3$  为材料常数;  $\bar{\mu}$  为修正的体积模量,可表示为

$$\bar{\mu} = (\mu - \mu_{\text{lock}}) / (1 + \mu_{\text{lock}}). \quad (2)$$

其中:  $\mu$  为标准的体积应变,  $\mu = \rho/\rho_0 - 1$  ( $\rho$  为当前密度,  $\rho_0$  为初始密度);  $\mu_{\text{lock}}$  为压实体积应变,  $\mu_{\text{lock}} = \rho_{\text{grain}}/\rho_0 - 1$  ( $\rho_{\text{grain}}$  为颗粒密度). 修正体积模量是为了在无孔材料的方程中能够使用常数  $K_1$ 、 $K_2$  和  $K_3$ .

### 1.2 HJC 强度模型

HJC 强度模型<sup>[9]</sup>是一种描述混凝土所受压力与其产生的应力之间关系的失效面模型,该模型可用于混凝土受到大应变、高应变率和高压力作用时的计算。

HJC 模型的等效应力  $\sigma^*$  的表达式<sup>[9]</sup>为

$$\sigma^* = [A(1-D) + BP^{*N}] \times [1 - C \ln(\dot{\epsilon}^*)]. \quad (3)$$

其中:  $D$  为损伤参数 ( $0 \leq D \leq 1.0$ ), 包括塑性体积应变和等效塑性应变;  $P^*$  为无量纲静水压力,  $P^* = P/f'_c$  ( $P$  为实际压力);  $\dot{\epsilon}^*$  为无量纲应变率,  $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$  ( $\dot{\epsilon}$  是实际的应变率,  $\dot{\epsilon}_0$  是参考应变率,  $\dot{\epsilon}_0 = 1.0 \text{ s}^{-1}$ );  $A$  为标准凝聚强度;  $B$  为标准强度增大系数;  $N$  为压力增大指数;  $C$  为应变率敏感系数。

图 2 为 HJC 混凝土模型的损伤状态曲线,该曲线能够体现混凝土模型的归一化压力与归一化等效应力之间的对应关系。

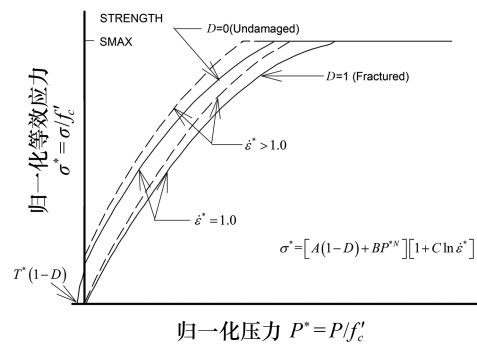


图 2 HJC 混凝土模型的损伤状态曲线

## 2 K&C 模型

### 2.1 K&C 状态方程

K&C 状态方程<sup>[10]</sup>也是一种用来刻画系统输入和状态之间关系的控制方程,它可用于描述在压力作用下 K&C 模型的体积应变所产生的变化。在 K&C 状态方程中,压力与体积应变之间的关系如图 3 所示。通常,采用三次曲线表示压力和体积应变之间的关系,其表达式为

$$p = C(\epsilon_v) + \gamma T(\epsilon_v) E. \quad (4)$$

其中:  $E$  为单位体积应变能,  $\gamma$  为拉伸控制参数。

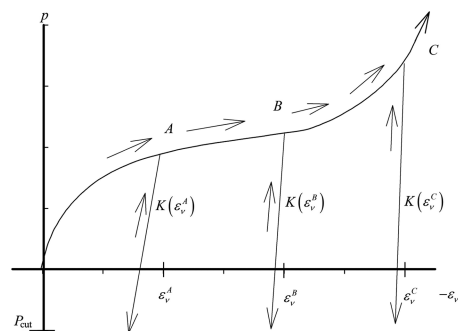


图 3 压力与体积应变的关系

## 2.2 K&C 强度模型

K&C 强度模型<sup>[11]</sup>是一种描述混凝土所受压力与其产生的应力之间关系的失效面模型。混凝土的塑性行为通常采用 K&C 强度模型中的 3 个独立固定的失效面来定义,如表 1 所示。

表 1 K&C 强度模型的失效面

屈服失效面	$\Delta\sigma_y = a_{0y} + p/(a_{1y} + a_{2y}p)$
最大失效面	$\Delta\sigma_m = a_0 + p/(a_1 + a_2p)$
残余失效面	$\Delta\sigma_r = p/(a_{1f} + a_{2f}p)$

表 1 中  $a_{0y}$ 、 $a_{1y}$ 、 $a_{2y}$ 、 $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_{1f}$  和  $a_{2f}$  是用户自定义参数,用以改变失效面形状。图 4 为 K&C 模型的失效面示意图。从图 4 中可以看出,材料的压力与应力增量表现为线性关系。当持续增加压力时,材料的内部应力增量先后到达的位置分别为点  $Pt1$ (屈服点)、点  $Pt2$ (最大塑性硬化反应点,材料最大强度处)和点  $Pt3$ (达残余强度点)。应力增量由点  $Pt2$  降至点  $Pt3$  的原因是应力增量到达点  $Pt2$  后材料出现了软化。

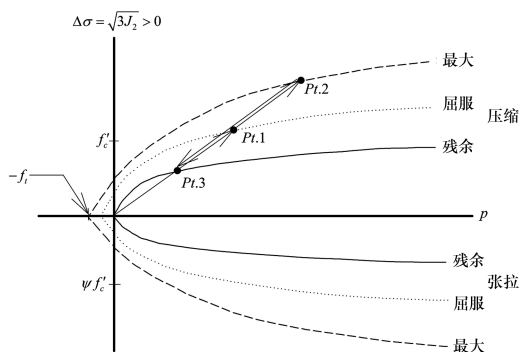


图 4 K&C 模型的失效面示意图

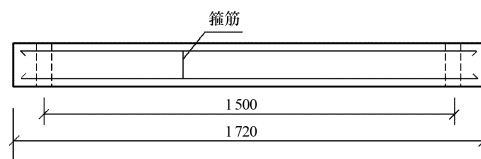
## 3 两种混凝土模型的对比分析

本文以瑞典武器防御研究所 J. Magnusson 等<sup>[12]</sup>对钢筋混凝土梁在爆炸荷载作用下的动力响应为原型试验,运用有限元分别计算 HJC 和 K&C 两种混凝土模型的物理参数,并通过仿真试验对比这两种模型分析混凝土力学性能的准确性。

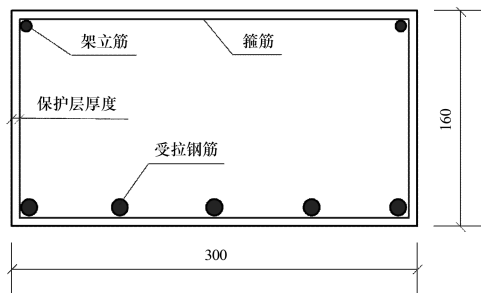
### 3.1 试验模型的建立

试验中选用的 RC 构件和截面配筋如图 5 所示。RC 构件的梁长为 1720 mm,高为 160 mm,宽为 300 mm,简支梁的有效支撑距离为 1500 mm。钢筋采用变形钢筋 B500BT<sup>[12]</sup>,屈服强度为 500

MPa;纵向受力钢筋采用 5 根  $\Phi 16$  mm 钢筋,架立筋采用 2 根  $\Phi 10$  mm 钢筋,箍筋采用  $\Phi 8$  mm 钢筋。试验用混凝土的等级为 C43,参数见表 2。



(a) RC 构件尺寸



(b) RC 构件截面配筋

图 5 RC 构件的尺寸和截面配筋

表 2 C43 混凝土的参数

质量密度 $\rho / (\text{kg}/\text{mm}^3)$	$2.50 \times 10^{-6}$
剪切模量 $G / \text{GPa}$	16.13
准静态单轴抗压强度 $f_c / \text{GPa}$	0.043
最大拉伸强度 $f_t / \text{GPa}$	$1.764 \times 10^{-3}$

RC 梁的爆炸试验模型如图 6 所示。试验中 TNT 的炸药量为 2.5 kg,爆炸距离为 10 m,RC 梁离地面的高度为 0.8 m。

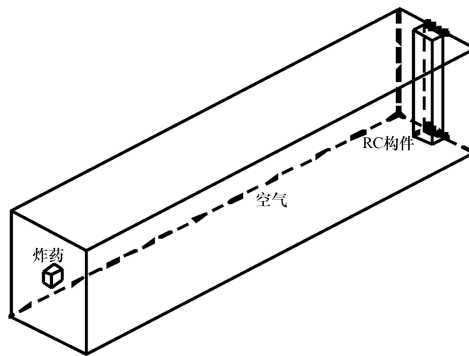


图 6 爆炸试验模型

图 7 为试验构件模型及网格尺寸。图 7(a)中空气模型的截面尺寸为  $1.2 \text{ m} \times 1.6 \text{ m}$ 。为了防止冲击波遇到边界发生反射,本文在长度方向上将空气边界设定为无反射边界条件,并将空气的四周边界条件设置为法向位移约束,以此模拟冲击波的反射。RC 梁两端的简支边界条件根据文献

[12]设定. 各网格单元的尺寸如图 7(b)、(c)所示, 其中炸药单元尺寸为  $32\text{ mm} \times 32\text{ mm} \times 32\text{ mm}$ , 空气的单元尺寸为  $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ , 钢筋和混凝土的单元尺寸为  $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ . 计算爆炸波传播时, 炸药和空气单元采用欧拉算法, 混凝土和钢筋单元采用拉格朗日算法, 爆炸冲击波与 RC 构件之间的相互作用采用流固耦合算法.

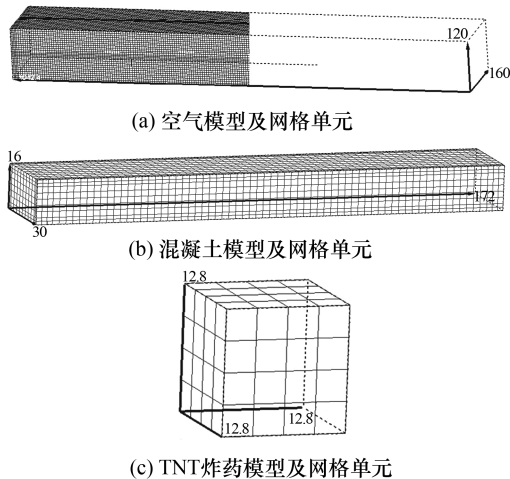


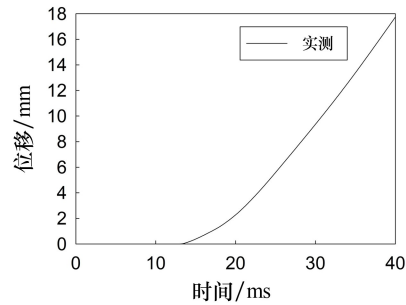
图7 试验模型及网格尺寸

### 3.2 计算结果的对比分析

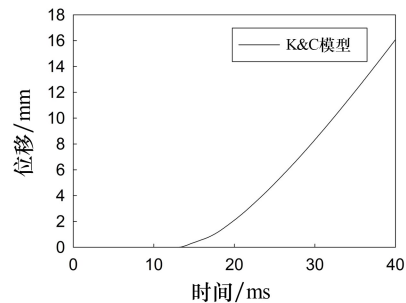
按 3.1 试验模型计算 K&C 和 HJC 模型的 RC 梁的跨中位移和梁端部的支反力, 并以其为参数与实测结果进行对比, 如图 8 和图 9 所示. 图 8 为在爆炸荷载作用下 K&C 模型、HJC 模型和实测的位移时程曲线. 由图 8 可知: 实测和 K&C 模型的最大位移时程的曲线形状及曲线光滑程度相近, 且位移最大值也相近; 而 HJC 模型的曲线光滑程度和最大位移时程均低于实测和 K&C 模型. 图 8(a) 和 (b) 中的曲线整体呈线性关系特征, 而图 8(c) 中的曲线则呈非线性特征. 图 8(a) 和 (b) 中的曲线整体呈线性特征的原因是二者的峰值位移较大, 这使得曲线在微小尺寸范围内表示出的非线性特征可以被忽略. 图 8(c) 中的曲线呈非线性特征的原因是其峰值位移较小, 曲线在微观尺度范围内的非线性特征较为明显.

图 9 为在爆炸荷载作用下 K&C、HJC 模型和实测的梁端部支座的反力时程曲线. 观察图 9 可知, 图 9(a) 和 (b) 中的曲线峰值接近, 且峰值显著大于图 9(c) 中的峰值. 另外, 从图 9 中的曲线

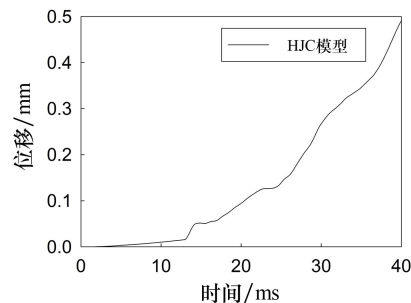
形状来看, 图 9(a) 和 (b) 的曲线其底部震荡较为缓和, 而图 9(c) 则较为剧烈. 上述结果表明, 在爆炸荷载作用下 K&C 模型、HJC 模型和实测的梁端部支座的反力时程曲线均表现为非线性特征, 但 K&C 模型的曲线更接近于实测的曲线.



(a) 实测的位移时程曲线



(b) K&C模型的位移时程曲线

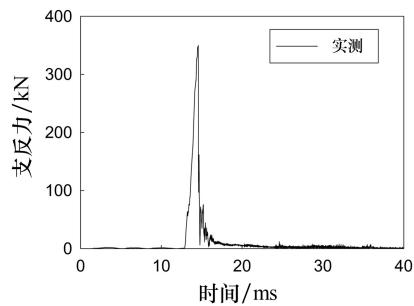


(c) HJC模型的位移时程曲线

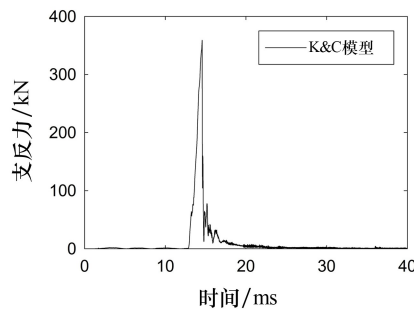
图8 位移时程曲线

为了进一步分析 HJC 和 K&C 模型的力学性能, 利用 HJC 和 K&C 模型分别计算 RC 混凝土梁的支座反力峰值和跨中位移峰值, 并与实测结果进行对比, 结果如表 3 所示. 由表 3 可知, K&C 模型的计算结果与实测结果较为接近, 而 HJC 模型所得结果与实测值相差巨大. 该结果进一步表明在爆炸荷载作用下利用 K&C 模型对混凝土的力学性能分析的准确性优于 HJC 模型. 其原因可能是 HJC 模型未能有效区分最大屈服面、最大失效面和残余失效面, 以及未能考虑失效面

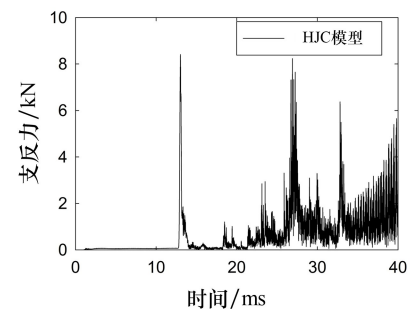
软化问题.



(a) 实测的反力时程曲线



(b) K&C模型的反力时程曲线



(c) HJC模型的反力时程曲线

图 9 反力时程曲线

表 3 梁端部的支座反力峰值与跨中位移峰值

方式	支座反力峰值/kN	跨中位移峰值/mm
实测	348	17.5
K&C 模型	358.82	16.08
HJC 模型	8.41	0.49

4 结论

本文利用仿真实验对 HJC 和 K&C 混凝土模型在爆炸荷载作用下的动力响应进行了研究,并与实测结果进行了对比.结果表明,K&C 模型的仿真结果与实测结果较为接近,而 HJC 模型的

仿真结果与实测结果差距较大.这表明,在爆炸荷载作用下利用 K&C 模型计算混凝土构件的受力情况其精度优于 HJC 模型.本研究结果可为爆炸荷载作用下分析混凝土的力学性能提供理论参考.

参考文献:

[1] 刘超. 预应力混凝土桥梁爆炸荷载作用效应研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.

[2] 赵均海, 董婧, 张冬芳. 爆炸荷载下 FRP 约束钢筋混凝土结构动力响应研究现状[J]. 世界地震工程, 2019, 35(1): 97-109.

[3] 赵凯, 王肖钧, 卞梁, 等. 混凝土介质中不同药形装药爆炸波传播特性的数值模拟[J]. 中国科技大学学报, 2007, 37(7): 711-716.

[4] ANDREA E S, DONALD W W, ROBERTO T L. Direct analysis for design evaluation of partially restrained steel framing systems[J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(9): 1376-1389.

[5] 张社荣, 宋冉, 王超, 等. 碾压混凝土 HJC 动态本构模型修正及数值验证[J]. 振动与冲击, 2019, 38(12): 25-31.

[6] TU Z G, LU Y. Evaluation of typical concrete material models used in hydrocodes for high dynamic response simulations[J]. Journal of Impact Engineering, 2009, 36(1): 132-146.

[7] 张传爱, 方秦, 陈力. 对 DYNA3D 中 K&C 混凝土模型的探讨[J]. 工业建筑, 2010, 40(s1): 288-292.

[8] 焦燊烽, 赵果, 侯延利. 框架柱在爆炸冲击荷载作用下动力系数及破坏模式研究[J]. 建筑科学, 2015, 31(9): 32-37.

[9] 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[C]//14th International Symposium on Ballistics. Quebec: International Ballistics Society, 1993: 591-600.

[10] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Keyword User's Manual[M]. California: Livermore Software Technology Corp, 2013.

[11] NOBLE C, KOKKO E, DARNELL I, et al. Concrete model descriptions and summary of benchmark studies for blast effects simulations: UCRL-TR-215024[R]. California: Lawrence Livermore National Lab, 2005.

[12] MAGNUSSON J, HALLGREN M, ANSELL A. Air-blast-loaded, high-strength concrete beams. Part I: Experimental investigation[J]. Magazine of Concrete Research, 2010, 62(2): 127-136.