

高压物理学报

钢纤维混凝土板在冲击与爆炸荷载下的K&C模型

尹华伟 蒋轲 张料 黄亮 王陈凌

K&C Model of Steel Fiber Reinforced Concrete Plate under Impact and Blast Load

YIN Huawei, JIANG Ke, ZHANG Liao, HUANG Liang, WANG Chenling

引用本文:

尹华伟, 蒋轲, 张料, 等. 钢纤维混凝土板在冲击与爆炸荷载下的K&C模型[J]. 高压物理学报, 2020, 34(3):024201. DOI: 10.11858/gywlb.20190853

YIN Huawei, JIANG Ke, ZHANG Liao, et al. K&C Model of Steel Fiber Reinforced Concrete Plate under Impact and Blast Load[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(3):024201. DOI: 10.11858/gywlb.20190853

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190853>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

近场爆炸作用下核电厂安全壳穹顶钢筋混凝土板的抗爆性能

Blast Resistance of Containment Dome Reinforced Concrete Slab in NPP under Close-in Explosion

高压物理学报. 2019, 33(2): 025101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180598>

钢筋混凝土墙抗冲击性能的数值模拟分析

Numerical Simulation Analysis of Impact Resistance of Reinforced Concrete Wall

高压物理学报. 2020, 34(1): 014201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190772>

落锤冲击下钢筋混凝土梁响应及破坏的数值模拟

Numerical Simulation of Responses and Failure Modes of Reinforced Concrete Beams under Drop-Weight Impact Loadings

高压物理学报. 2018, 32(3): 034102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20170693>

高速弹体对钢筋混凝土靶的侵彻/贯穿效应实验研究

Experimental Study of High-Speed Projectile Penetration/Perforation into Reinforced Concrete Targets

高压物理学报. 2019, 33(5): 055101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180672>

混凝土薄板侵彻贯穿问题的SPH数值模拟

Numerical Simulation of Penetration in Concrete Sheet Based on SPH Method

高压物理学报. 2019, 33(2): 024101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180634>

GFRP增强圆钢管在低速冲击荷载作用下的应变率效应

Strain Rate Effect of GFRP-Reinforced Circular Steel Tube under Low-Velocity Impact

高压物理学报. 2019, 33(4): 044203 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180653>

钢纤维混凝土板在冲击与爆炸荷载下的 K&C 模型

尹华伟^{1,2}, 蒋 轲¹, 张 料¹, 黄 亮¹, 王陈凌¹

(1. 湖南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 湖南湖大土木建筑工程检测有限公司, 湖南 长沙 410082)

摘要: 钢纤维混凝土 (Steel fiber reinforced concrete, SFRC) 具有优异的延性、韧性及能量吸收能力, 被广泛应用于各类防护结构。K&C 模型已成为研究普通混凝土构件动力响应的常用材料模型, 但仍无法准确表征 SFRC 的动力特性。为了提高 K&C 模型在冲击及爆炸荷载作用下预测 SFRC 板动力响应的能力, 对 K&C 模型进行了改进: 基于大量三轴压缩实验数据, 建立了新的失效强度面参数模型; 采用反复试验法, 建立了新的损伤演化模型, 并校准了拉、压损伤参数; 基于大量高应变率下 SFRC 的单轴压缩实验数据, 建立了新的受压动力增强因子模型。通过 LS-DYNA 显式有限元动力分析软件模拟了 SFRC 板的动力响应, 模拟结果验证了上述改进的有效性与可靠性。

关键词: 钢纤维混凝土; K&C 模型; 冲击荷载; 爆炸荷载; 动力响应

中图分类号: O347.3; TU375

文献标识码: A

普通混凝土具有显著的脆性特征, 钢纤维的引入极大地提高了混凝土的延性, 并可减少结构部件的剥落飞射, 避免了大量的人员伤亡, 因此被广泛应用于各类防护结构。近几十年来, 随着计算能力的高速发展, LS-DYNA 显式有限元动力分析软件被广泛应用于工程结构的动态行为研究。

K&C 模型常用于分析冲击荷载与爆炸荷载作用下混凝土结构的动力响应, 研究人员只需输入混凝土的单轴抗压强度, 其他参数可自动生成, 然而该模型存在以下不足: (1) 自动生成的强度面参数适用于普通混凝土, 但不适用于三轴强度显著变化的钢纤维混凝土 (Steel fiber reinforced concrete, SFRC); (2) K&C 模型的损伤机制能够表征普通混凝土的力学行为, 但对于韧性、延性、能量吸收能力显著增强的 SFRC, 不能准确表征其应变软化行为; (3) SFRC 的应变率效应在很大程度上依赖于钢纤维的体积分数、抗拉强度、几何形状和混凝土的基体强度, 因此普通混凝土的动力增强因子模型不适用于 SFRC。

本研究将针对以上不足, 对 K&C 模型进行改进, 并运用 LS-DYNA 显式有限元动力分析软件模拟高速弹丸侵彻 SFRC 靶板^[1]和爆炸荷载下 SFRC 板的动力响应^[2], 利用模拟结果论证改进后的 K&C 模型, 以期能够准确描述 SFRC 的动力响应。

1 改进 K&C 材料模型

1.1 改进失效强度面模型

K&C 模型采用压子午线定义了 3 个独立的失效强度面

$$\Delta\sigma_m = a_0 + \frac{p}{a_1 + a_2 p}, \quad \Delta\sigma_y = a_{0y} + \frac{p}{a_{1y} + a_{2y} p}, \quad \Delta\sigma_r = \frac{p}{a_{1r} + a_{2r} p} \quad (1)$$

式中: $\Delta\sigma_m$ 为最大强度面; $\Delta\sigma_y$ 为初始屈服强度面; $\Delta\sigma_r$ 为残余强度面; a_i 、 a_{iy} 、 a_{ir} ($i = 0, 1, 2$) 为混凝土三轴

* 收稿日期: 2019-11-01; 修回日期: 2019-11-25

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0701405)

作者简介: 尹华伟 (1972—), 男, 博士, 副教授, 主要从事爆炸与冲击动力学研究. E-mail: yhwzzy@163.com

压缩试验得到的一组参数; p 为静水压力, $p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$, 其中 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为第1、第2、第3主应力; 失效强度面偏应力 $\Delta\sigma = \sqrt{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}/2$ 。原 K&C 模型失效强度面参数为

$$a_0 = 0.296f_c, \quad a_1 = 0.446, \quad a_2 = 0.081/f_c \quad (2)$$

$$a_{0y} = 0.223f_c, \quad a_{1y} = 0.625, \quad a_{2y} = 0.258/f_c \quad (3)$$

$$a_{1f} = 0.442, \quad a_{2f} = 0.118/f_c \quad (4)$$

式中: f_c 为单轴抗压强度。

国内外学者研究发现, SFRC 的三轴压缩强度与素混凝土有显著差异, 且依赖于钢纤维体积分数^[3-11]。为了明确钢纤维体积分数对 SFRC 三轴压缩强度的影响, 本研究在原最大强度面参数模型的基础上, 根据大量实验数据, 采用最小二乘法建立了新的最大强度面参数模型

$$a_0 = (0.232 + 0.133V_f)f_c, \quad a_1 = 0.378 + 0.103V_f, \quad a_2 = (0.149 - 0.047V_f)/f_c \quad (5)$$

式中: V_f 为钢纤维体积分数, $0 < V_f < 3.0\%$ 。

图1给出了不同钢纤维体积分数 SFRC 的三轴压缩实验数据及根据式(2)、式(5)模型计算得到的预测值。由图1可知, 式(5)与不同钢纤维体积分数的 SFRC 三轴压缩实验数据^[3-11]的吻合程度优于式(2)。

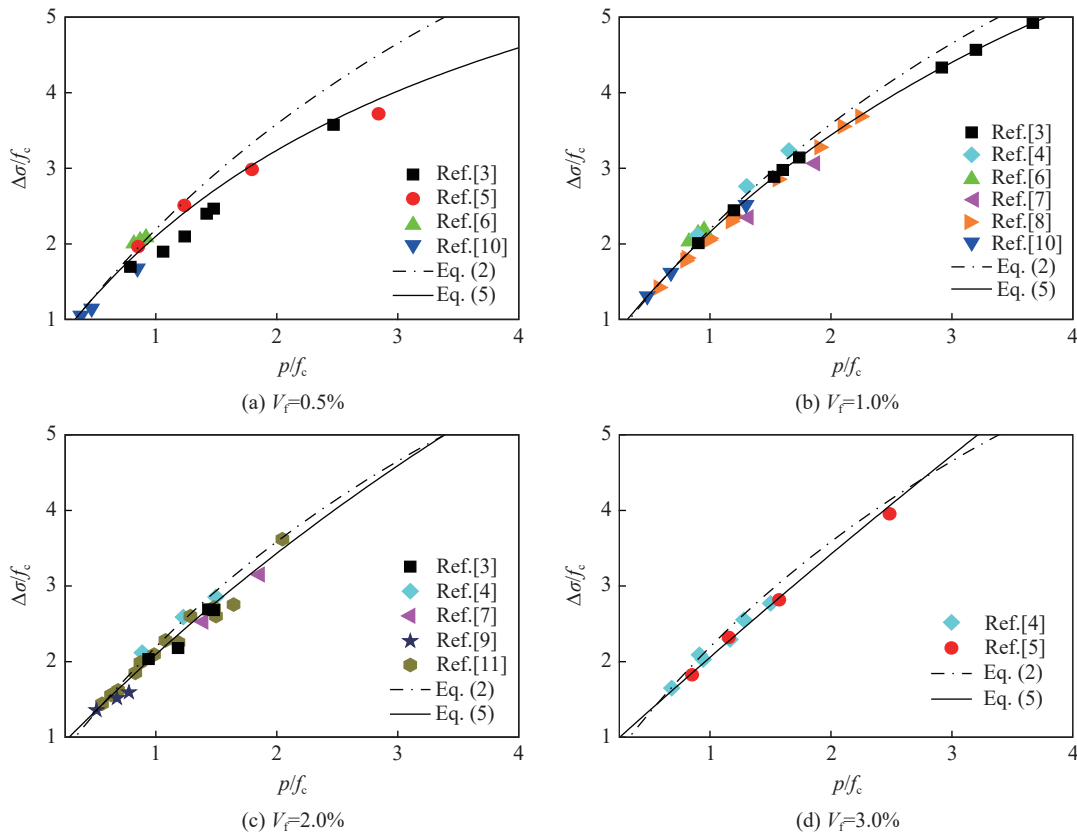


图1 钢纤维体积分数不同时的三轴压缩数据以及式(2)、式(5)的预测值

Fig. 1 Triaxial compression data of different fiber contents as well as predictions from Eq.(2) and Eq.(5)

为了确定初始屈服面, 必须首先确定 a_{0y} 、 a_{1y} 、 a_{2y} 。通常认为初始屈服面近似为三轴受压应力路径上 $\Delta\sigma = 0.45\Delta\sigma_m$ 处点的轨迹。最大破坏面上的点(p , $\Delta\sigma_m$)与屈服面上对应的点(p' , $\Delta\sigma_y$)的关系可表示为

$$\Delta\sigma_y = 0.45\Delta\sigma_m, \quad p' = p - 0.55\Delta\sigma_m/3 \quad (6)$$

根据式(6)的假定及已提出的最大强度面模型, 初始屈服面参数模型可表示为

$$a_{0y} = (0.194 + 0.068V_f)f_c, \quad a_{1y} = 0.524 + 0.202V_f, \quad a_{2y} = (0.452 - 0.142V_f)/f_c \quad (7)$$

残余强度面参数的确定需要用到三轴压缩实验的残余强度数据,但相关的实验数据难以得到。根据 Marlar 等^[12]的建议,残余强度面参数可表示为

$$a_{1f} = 0.374 + 0.102V_f, \quad a_{2f} = (0.218 - 0.068V_f)/f_c \quad (8)$$

改进的失效强度面模型应按式(5)、式(7)、式(8)进行修正,当 $f_c = 175.3 \text{ MPa}$, $V_f = 1.0\%$ 时, SFRC 的失效强度面模型如图 2 所示,该模型将应用于 2.1 节的讨论。

1.2 修正损伤演化函数

在 K&C 模型中,当偏应力超过初始屈服面,但未达到最大强度面时,当前多轴应力状态为两个强度面的线性插值;当偏应力超过最大强度面时,当前多轴应力状态取为最大强度面与残余强度面的线性插值,其关系式表示为

$$\Delta\sigma = \begin{cases} \eta(\Delta\sigma_m - \Delta\sigma_y) + \Delta\sigma_y & \lambda < \lambda_m \\ \eta(\Delta\sigma_m - \Delta\sigma_r) + \Delta\sigma_r & \lambda \geq \lambda_m \end{cases} \quad (9)$$

式中: λ 为有效塑性应变, η 为损伤比例因子,损伤演化函数 $\eta(\lambda)$ 由输入的 13 组 (η, λ) 数据定义。演化全过程分为两个阶段: (1) $\lambda < \lambda_m$ 时为硬化段, λ 从零开始逐渐积累到 λ_m , η 逐渐增大到 1, 材料的应变硬化发展到峰值,此时偏应力点位于最大强度面; (2) $\lambda \geq \lambda_m$ 时,材料进入应变软化阶段, λ_m 持续积累, η 逐渐减小为零,此时偏应力点位于残余强度面。

η 与 λ 的关系描述了应力-应变全过程曲线,必须谨慎定义。原 K&C 模型的损伤演化函数 $\eta(\lambda)$ 描述的损伤演化速度过快,不能正确表征 SFRC 的延性、韧性及断裂应变能。为了精准描述由塑性剪切应变和塑性体积应变引起的损伤演变过程,需要对损伤演化函数进行修正。

本研究使用分段函数^[13-14]建立新的损伤演化模型,其关系式表示为

$$\eta(\lambda) = \begin{cases} \alpha \left(\frac{\lambda}{\lambda_m} \right) + (3 - 2\alpha) \left(\frac{\lambda}{\lambda_m} \right)^2 + (\alpha - 2) \left(\frac{\lambda}{\lambda_m} \right)^3 & \lambda < \lambda_m \\ \frac{\lambda/\lambda_m}{\alpha_c(\lambda/\lambda_m - 1)^{\alpha_d} + \lambda/\lambda_m} & \lambda \geq \lambda_m \end{cases} \quad (10)$$

式中: α 为控制应变硬化段的常量, α_c 、 α_d 为控制应变软化段的常量, λ_m 为有效塑性应变峰值。在 LS-DYNA 软件中建立单个单元模型,单元尺寸为 2 mm,约束底面节点自由度,对顶面节点施加速度矢量。模拟 SFRC 的单轴压缩试验,通过反复试验法确定 α 、 α_c 、 α_d 、 λ_m ,直到模拟的应力-应变曲线与典型的 SFRC 应力-应变关系相符。基于大量试验研究,建议 $\alpha = 3$, $\alpha_c = 0.381$, $\alpha_d = 1.90$, $\lambda_m = 9.5 \times 10^{-5}$ 。改进的 $\eta(\lambda)$ 将用于接下来的讨论,与原损伤演化函数的比较如图 3 所示。

虽然本节对 $\eta(\lambda)$ 进行了修正,但是 K&C 模型中材料的软化行为由 $\eta(\lambda)$ 与损伤参数 b_1 、 b_2 协同控制,因此要准确描述 SFRC 的软化段特性,还需对损伤参数进行校准,1.3 节将介绍校准损伤参数 b_1 、 b_2 的简便方法,并进一步论证本研究所建立损伤演化函数 $\eta(\lambda)$ 的有效性。

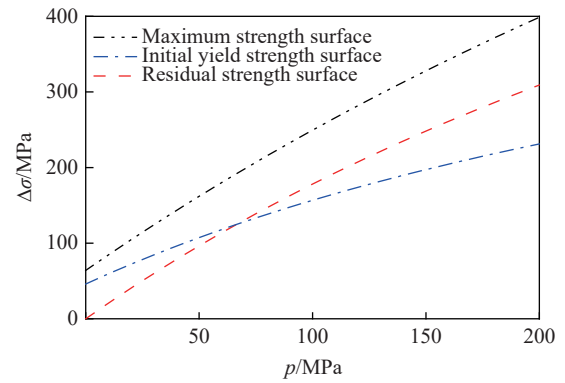


图 2 改进的失效强度面

Fig. 2 Modified failure strength surface

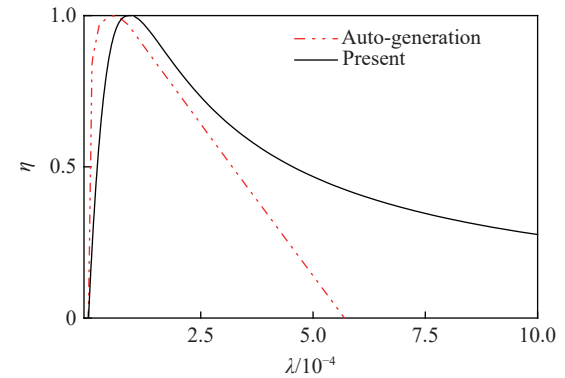


图 3 损伤演化函数 $\eta(\lambda)$ 的比较

Fig. 3 Comparisons of damage evolution function $\eta(\lambda)$

1.3 校准损伤参数

K&C 模型中,有效塑性应变积累函数为

$$\lambda = \begin{cases} \int_0^{\bar{\varepsilon}^p} \frac{d\bar{\varepsilon}^p}{\gamma_f(1+p/\gamma_f f_t)^{b_1}} & p \geq 0 \\ \int_0^{\bar{\varepsilon}^p} \frac{d\bar{\varepsilon}^p}{\gamma_f(1+p/\gamma_f f_t)^{b_2}} & p < 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\bar{\varepsilon}^p$ 为有效塑性应变增量; γ_f 为应变率增强因子; f_t 为单轴抗拉强度; b_1 、 b_2 为损伤参数, 分别控制单轴压缩与拉伸软化段的力学行为。

Malvar 等^[12] 建议损伤参数 b_1 的取值应与单轴压缩试验(UUC)下的应力-应变曲线相匹配, 建立单个单元模型, 模拟 $f_c = 175.3$ MPa、 $V_f = 1.0\%$ 时 SFRC 的单轴压缩试验^[1]。原 K&C 模型自动生成的损伤演化函数、损伤参数($b_1 = 0$)与修正后的损伤演化函数、损伤参数($b_1 = 0.75$)对应应力-应变曲线的描述如图 4 所示。由图 4 可知, 原 K&C 模型不能准确描述 SFRC 应变软化段的力学行为, 而修正后的损伤模型较好地预测了 SFRC 的峰后特性, 且与试验数据的吻合程度较高, 进一步论证了修正后损伤演化函数 $\eta(\lambda)$ 的有效性。

当应力点从最大强度面向残余强度破坏面移动时, 材料进入软化阶段, 参数 b_2 控制了受拉应力-应变曲线的软化行为。Bazant 等^[15] 认为, 只有当 SFRC 的软化行为受到局部或特征长度控制时, 网格细化后的应力-应变曲线才会客观, 否则它们将依赖于网格尺寸。他们提出消除网格依赖性的方法是强迫单轴拉伸应力-应变曲线下方的面积为 G_f/h_w , 其中, G_f 为断裂应变能, h_w 为裂缝正面宽度或裂缝局部宽度, 通常 h_w 为最大骨料直径的 1~6 倍。Malvar 等^[12] 归纳总结出 b_2 取值的表达式为

$$b_2 = (0.09h_w^2 - 0.98h_w + 3.06)(1 - 0.004f_c^2 + 0.097f_c - 0.484) \quad (12)$$

众所周知, 当钢纤维掺入混凝土中时, SFRC 的断裂能呈阶跃式增长, 且随着钢纤维体积分数的增长而增长。因此式 (12) 对于普通混凝土是适宜的, 却不能正确反映 SFRC 对能量的吸收能力。根据董振英等^[16] 的实验得到的 SFRC 的断裂应变能 481 N/m, 建立单个单元模型, 以模拟单轴拉伸试验(UUT), 采用 Bazant 建议的方法, 强迫单轴拉伸应力-应变曲线下方的面积为 G_f/h_w , 校准 SFRC 的拉伸损伤参数($b_2 = 0.2$), 由式 (12) 自动生成的拉伸损伤参数 $b_2 = 2.1$ 。原模型与校准损伤参数及修正损伤演化函数后的 K&C 模型对单轴拉伸应力-应变曲线的描述如图 5 所示。由图 5 可知, 修正后的 K&C 模型的应力-应变曲线软化段表现出更高的韧性、延性和断裂应变能, 且与实验数据的吻合程度较高。

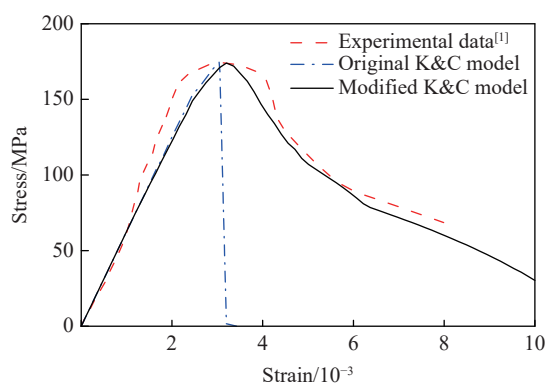


图 4 单轴压缩试验的应力-应变曲线与 K&C 模型的预测结果比较

Fig. 4 Comparisons of experiment at stress-strain curve of UUC test and prediction of K&C models

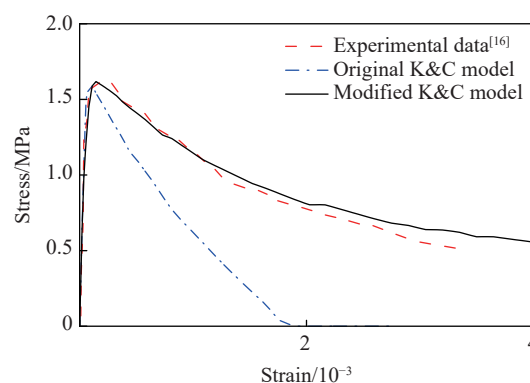


图 5 单轴拉伸试验的应力-应变曲线与 K&C 模型的预测结果比较

Fig. 5 Comparisons of experiment at stress-strain curve of UUT test and prediction of K&C models

1.4 改进 SFRC 的受压动力增强因子模型

SFRC 的骨料强度大于砂浆与交界面强度, 在高应变率下, 断裂机理发生改变, 裂纹扩展极为迅速, 裂纹的扩展可能直接通过骨料区域, 而不是骨料与砂浆的交界面, 混凝土的单轴受压强度增长可达 100% 以上, 而单轴受拉强度增长可达 600% 以上。目前, 已有几种应变率模型用于预测混凝土在动态压缩荷载下的强度增强效应。被广泛接受的模型由 CEB-FIP^[17] 模式规范提出, 定义动态强度和静态强度的比值与应变率的函数关系, 即受压动力增强因子(CDIF)表示为

$$\text{CDIF} = \frac{f_{c,d}}{f_{c,s}} = \begin{cases} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s} \right)^{1.026\delta} & \dot{\varepsilon} < 30 \text{ s}^{-1} \\ \gamma_s \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s} \right)^{1/3} & \dot{\varepsilon} \geq 30 \text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $f_{c,d}$ 为动态压缩强度; $f_{c,s}$ 为静态压缩强度; $\dot{\varepsilon}$ 为当前应变率; $\dot{\varepsilon}_s$ 为基准静态应变率, $\dot{\varepsilon}_s = 3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$; $\lg \gamma_s = 6.156\delta - 2$, $\delta = f_{c,0}/(5f_{c,0} + 9f_{c,s})$, $f_{c,0} = 10 \text{ MPa}$ 。

Wang 等^[18] 开展了 SFRC 的霍普金森压杆试验研究, 在 CEB-FIP 公式的基础上考虑了纤维效应, 修正了过渡应变, 提出了 CDIF 模型

$$\text{CDIF} = \begin{cases} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s} \right)^{1.026\delta} & \dot{\varepsilon} < (30 + 23i) \text{ s}^{-1} \\ \eta \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s} \right)^{(1+0.05i)/3} & \dot{\varepsilon} \geq (30 + 23i) \text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (14)$$

式中: i 为考虑纤维效应的参数, i 等于 0 或 1, 分别代表素混凝土及纤维增强混凝土; $\eta = \gamma_s(1 - 0.339 \cdot 2i)$, 其他变量同 CEB-FIP 模型。

CEB-FIP 模型能够较好地预测普通混凝土的 DIF 值, 但对 SFRC 的 DIF 值估计过高, 如图 6 所示。众多学者的研究数据^[19-23] 表明, 过渡应变率之后, SFRC 的应变率敏感性低于普通混凝土, 原因在于: (1) 根据 ACI446^[24] 的研究结果, 高应变率下混凝土强度的增长速率随着裂缝扩展速度的增大而增大, 而 SFRC 的高密实性和钢纤维的阻裂作用使得裂缝扩展速率与素混凝土相比较慢; (2) 钢纤维的应变率敏感性低于混凝土基体。因此需提出适用于 SFRC 的 CDIF 模型。

由于侧向惯性效应, 在过渡应变率之后, DIF 曲线的斜率急剧增大, 表明混凝土的物理性能发生了变化。钢纤维的约束效应有效地减少了混凝土的横向膨胀, 使得惯性效应更加显著, 需要更高的过渡应变率触发 SFRC 的物理性能变化, 因此有必要提出适用于 SFRC 的过渡应变率模型。

Wang 等^[18] 提出的模型虽与众多学者的试验数据边界大致相符, 但没有给出具体的钢纤维体积分数所对应的曲线, 对过渡应变率模型的描述也不够精确。本研究在式(14)的基础上, 引入了钢纤维体积分数 V_f , 并修正过渡应变率, 通过最小二乘法回归分析大量实验数据, 给出 CDIF 值, 即

$$\text{CDIF} = \begin{cases} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s} \right)^{1.026\delta} & \dot{\varepsilon} < \varepsilon_t \text{ s}^{-1} \\ \gamma_{V_f} \gamma_s \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s} \right)^{(1+0.018V_f)/3} & \dot{\varepsilon} \geq \varepsilon_t \text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (15)$$

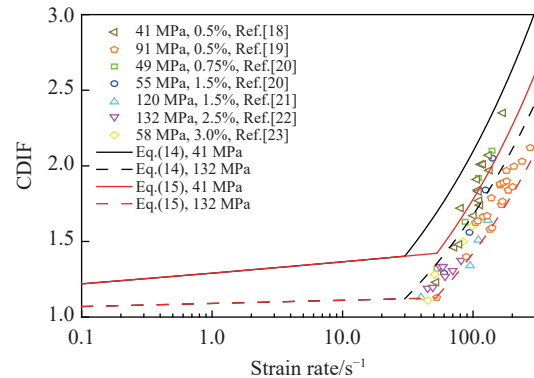


图 6 不同模型得到的 CDIF 值与实验数据的比较

Fig. 6 Comparisons of CDIF values obtained from different models and experiments

式中: ε_t 为过渡应变率, $\varepsilon_t = 41.087 + 7.677 V_f - 0.746 V_f^2$; $\gamma_{V_f} = 0.607 \exp(-V_f/4.972) + 0.294$, γ_{V_f} 为钢纤维体积分数因子; 其他变量同 CEB-FIP 模型。如图 7 所示, 式 (15) 得到的 CDIF 值与实验数据^[19-23] 吻合较好。

1.5 SFRC 受拉动力增强因子模型

混凝土的动态抗拉强度表现出比抗压强度更高的应变率敏感性。目前研究人员在各自实验研究^[17, 25-28] 的基础上, 提出了数种 SFRC 受拉动力增强因子模型 (TDIF), 如图 8 所示。由图 8 可以看出, TDIF 模型存在较大差异, 可能是因为混凝土的基体强度、纤维含量、形状、长径比、抗拉强度对 TDIF 值的影响较大。由于现有实验数据的分歧较大, 尚不具备提出新的 TDIF 模型的条件, 因此本研究中采用被广泛接受的 CEB-FIP 公式作为受拉增强因子模型

$$\text{TDIF} = \frac{f_{t,d}}{f_{t,s}} = \begin{cases} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s} \right)^{1.016\delta} & \dot{\varepsilon} < 30 \text{ s}^{-1} \\ \beta \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s} \right)^{1/3} & \dot{\varepsilon} \geq 30 \text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $f_{t,d}$ 为动态抗拉强度; $f_{t,s}$ 为静态抗拉强度; $\dot{\varepsilon}_s = 3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$; $\delta = f_{c,0}/(10f_{c,0} + 6f_c)$, $f_{c,0} = 10 \text{ MPa}$; $\lg \beta = 7.11\delta - 2.33$ 。

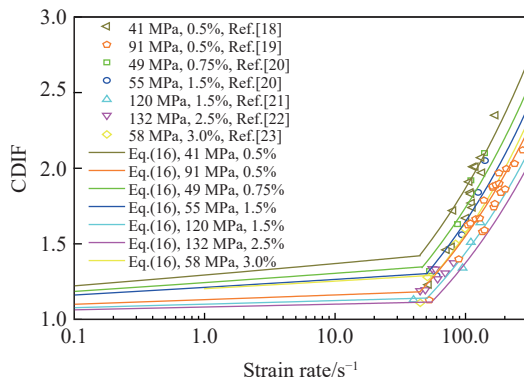


图 7 新模型得到的 CDIF 值与实验数据的比较

Fig. 7 Comparisons of CDIF values obtained from new models and experiments

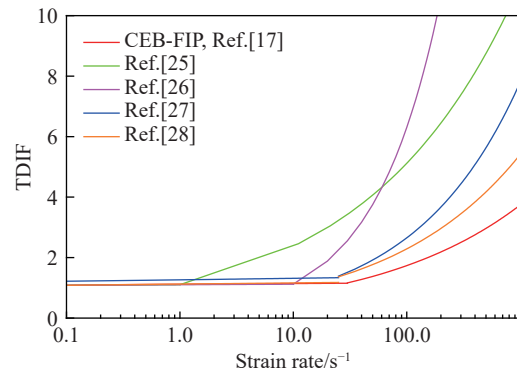


图 8 不同模型得到的 TDIF 比较

Fig. 8 Comparisons of TDIF values obtained from different models

2 数值模拟

2.1 SFRC 板受冲击荷载

为了论证第 1 节中改进的失效强度面参数模型、损伤模型、受压动力增强因子模型的有效性与可靠性, 对高速弹丸侵彻 SFRC 板^[1] 进行仿真分析。数值模拟所用 SFRC 板的钢纤维体积分数为 1%, 尺寸设定为 310 mm × 310 mm × 50 mm, 支撑于钢框架之上, 自由跨度为 240 mm。模拟所用的平头弹丸直径为 25 mm, 长度为 75 mm, 质量为 297 g; 弹丸材料为 SKH-51 工具钢, 洛氏硬度 HRC 设定为 60, 侵彻过程中塑性变形较小。弹丸分别以 58.2、76.0 和 104.0 m/s 的速度对 SFRC 板进行模拟冲击实验。

SFRC 板的 1/4 计算模型如图 9 所示, 对称面上施加对称约束。采用 SOLID164 单元对弹体和 SFRC 板进行离散, 单元尺寸为 2 mm, 采用单点高斯积分拉格朗日算法。SFRC 板采用改进的 K&C 材料模型, 耦合 *EOS_TABULATED_COMPACTION 状态方程。最大强度面、初始屈服强度面、残余强度面参数值分别按式 (5)、式 (7)、式 (8) 确定, 损伤演化函数按式 (10) 进行修正, 损伤比例因子按 1.3 节的方法校准, DIF 模型为式 (15) 和式 (16)。SFRC 板的主要材料参数列于表 1。其中, L_w 为裂缝局部宽度, ρ 为密度, ν 为泊松比, ω 为膨胀系数。表 1 中未给出的参数均采用自动生成值。

弹丸采用 *MAT_JOHNSON_COOK 材料模型。该模型适用于应变率变化范围较大及材料软化引

起的绝热温度升高问题,是弹丸冲击模拟研究中常用的模型,需耦合*EOS_GRÜNEISEN 状态方程。弹丸的主要材料参数如表 2 所示。其中: G 为剪切模量, A 、 B 、 N 、 C 、 M 为输入的材料常数, T_m 为熔化温度, T_R 为室内温度, ε 为基准静态应变率, c_p 为定压比热容, SPALL 为剥落处理方式, IT 为塑性应变迭代选项, D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 、 D_5 均为失效破坏参数。表 2 中未给出的参数均采用自动生成值。

表 1 改进的钢纤维混凝土 K&C 模型参数

Table 1 Parameters of the modified K&C model of SFRC

Strength surface												
a_0/MPa	a_1	a_2/MPa^{-1}	a_{0y}/MPa	a_{1y}	a_{2y}/MPa^{-1}	a_{1f}	a_{2f}/MPa^{-1}					
64.0	0.481	5.82×10^{-4}	45.93	0.726	1.77×10^{-3}	0.476	8.56×10^{-4}					
Damage								Others				
b_1	b_2	b_3	α	α_c	α_d	λ_m	L_w/mm	f_c/MPa	f_t/MPa	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	ν	ω
0.75	-1.50	1.15	3.00	0.381	1.90	9.5×10^{-5}	24	175.3	13.8	2 600	0.19	0.5

表 2 平头弹丸的材料参数

Table 2 Materials parameters of the flat ended projectile

$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	G/GPa	A/MPa	B/MPa	N	C	M	T_m/K	T_R/K
7.83	210	792	510	0.26	0.014	1.03	1 793	294
$\varepsilon/(\mu\text{s}^{-1})$	$c_p/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	SPALL	IT	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
1.0×10^{-4}	4.77×10^{-5}	3.0	0.0	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00

弹丸与靶板之间采用侵蚀接触算法 *CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE, 动摩擦因子与静摩擦因子均为 0.15。采用关键字 *INITIAL_VELOCITY_GENERATION 产生弹丸初速度。沙漏控制方式采用 LS-DYNA 软件的标准黏性方式, 计算时间步长比例因子为 0.6。

K&C 材料模型未包含侵蚀失效准则。为了模拟 SFRC 板的破坏失效模式, 还需引入侵蚀失效准则 *MAT_ADD_EROSION, 选取失效主应变 $\varepsilon_{\max}$ 作为破坏判据, 一旦单元主应变大于 $\varepsilon_{\max}$, 该单元将被立即删除。侵蚀失效值依赖于网格尺寸, 且因材料而异, 并适用于特定研究环境。本研究在选择侵蚀失效值时, 主要考虑避免单元的大量缺失和保持质量守恒。如图 4 中 SFRC 的峰值应变为 0.003, 考虑到在应变软化阶段, 断裂应变为压缩应变的 2 倍, 还需考虑应变率效应和纤维约束效应等其他影响(建议为 10 倍), 因此失效主应变取为 0.06。

实验结果^[1]及改进前后 K&C 模型预测的 SFRC 板动力响应的对比如图 10 所示。由图 10 可知, 原 K&C 模型的预测结果与实验结果的破坏模式吻合较差, 不能预测到实验中的破坏主裂缝, 而改进的 K&C 模型的预测结果与实验结果的破坏模式吻合良好, 准确描述了剪切裂缝和拉伸裂缝的发展。SFRC 板在弹丸侵彻下的结痂直径与实验结果的比较如表 3 所示, 原 K&C 模型预测的结痂直径与实验结果偏差较大, 而改进的 K&C 模型精准地预测了弹丸速度为 58.2、76.0 和 104.0 m/s 时的结痂直径, 与实验结果的相对偏差分别为 12.0%、4.0% 和 6.4%。综上所述, 原 K&C 模型的模拟结果表明, SFRC 的脆性破坏特征显著, 而改进的 K&C 模型则准确表征了 SFRC 的韧性、延性及能量吸收能力, 说明改进的 K&C 模型能更准确地预测 SFRC 板受冲击荷载时的动力响应。

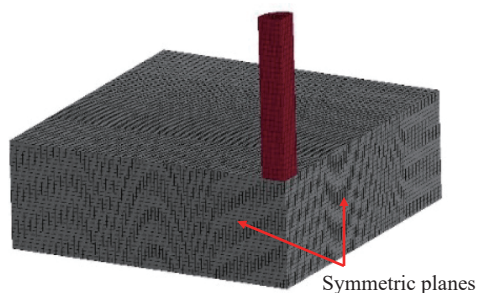


图 9 SFRC 靶板在平头弹丸冲击下的有限元模型
Fig. 9 Finite element model of flat-ended projectile impacting SFRC plate

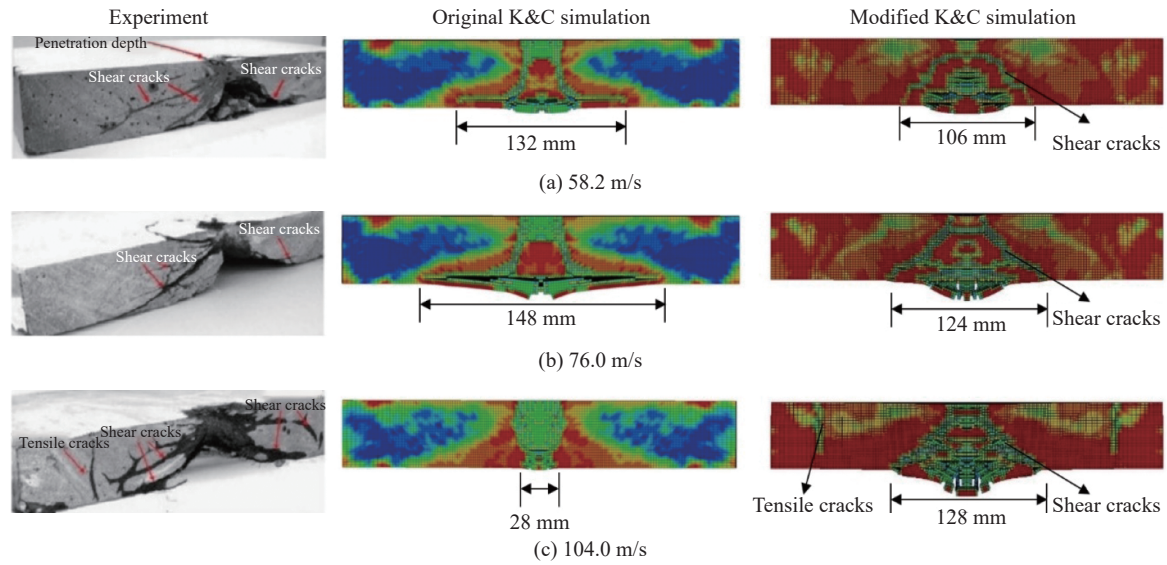


图 10 不同撞击速度下 SFRC 板破坏模式的实验结果^[1]与数值模拟结果对比

Fig. 10 Comparison of the damage patterns of SFRC plate from experimental results^[1] and numerical simulation under different impact velocities

表 3 实验数据与数值模拟结痂弹坑直径比较

Table 3 Comparisons of experimental data and numerical simulation of the scabbed crater diameter

Projectile velocity/(m·s ⁻¹)	Scabbed crater diameter/mm			Model error/%	
	Experiment	Original K&C	Modified K&C	Original K&C	Modified K&C
58.2	120.5	132	106	9.5	12.0
76.0	119.2	148	124	24.2	4.0
104.0	120.3	28	128	76.7	6.4

2.2 SFRC 板受爆炸荷载作用

K&C 模型常被用来分析爆炸荷载作用下混凝土结构的动力响应,赵春风等^[29]采用 K&C 模型分析安全壳穹顶钢筋混凝土板的抗爆性能。为进一步验证改进的 K&C 模型在爆炸荷载作用下预测 SFRC 板动力响应的有效性和可靠性,对 SFRC 板在爆炸荷载作用下的动力响应^[2]进行数值模拟。SFRC 板的尺寸设为 550 mm × 550 mm × 50 mm,支撑于钢框架之上,自由跨度为 460 mm。引爆圆柱形炸药对钢纤维体积分数分别为 0.5%、1.0% 的 SFRC 板进行冲击加载,TNT 炸药等效当量为 0.488 kg,炸药质心距 SFRC 板表面 0.272 5 m,比例距离为 0.35 m·kg^{-1/3}。

SFRC 的 1/4 模型如图 11 所示,在对称面施加对称约束,空气域的非对称面采用关键字 *BOUNDARY_NON_REFLECTING 施加无反射边界条件,模拟无约束爆炸条件。数值计算模型由钢纤维混凝土板、TNT 炸药和空气域组成。SFRC 板采用拉格朗日算法,TNT 炸药和空气域单元均采用单点多物质 ALE 算法。另需采用关键字 *ALE_MULTI_MATERIAL_GROUP 将 TNT 炸药与空气定义为 ALE 材料组,它代表一个独特的流体,可与模型中的拉格朗日 SFRC 结构产生相互作用。采用流固耦合机制 *CONSTRAINED_

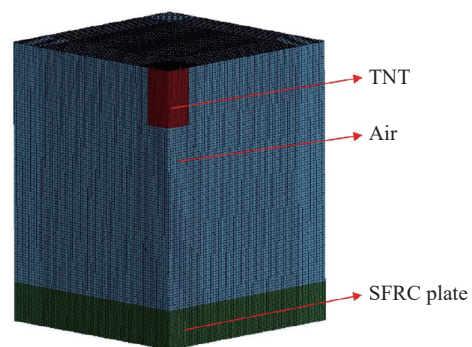


图 11 SFRC 板在爆炸荷载作用下的有限元模型

Fig. 11 Finite element model of SFRC plate under blast load

LAGRANGE_IN_SOLID 计算 SFRC 板与空气和炸药之间的相互作用。TNT 材料模型采用 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN, 并联合 *EOS_JWL 状态方程。空气域采用 *MAT_NULL 材料模型, 并联合 *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 状态方程。钢纤维混凝土材料模型为改进的 K&C 模型, 材料参数的校准方法及其他环境变量同 2.1 节。

当模拟爆炸冲击波到达 SFRC 板时, 前表面材料处于三轴压缩应力状态, 可导致弹坑状的材料局部破坏。另一部分冲击波透射到 SFRC 板后表面时, 后表面材料处于多轴拉伸应力状态, 可导致混凝土的剥落和碎片弹射。实验结果^[2]与改进的 K&C 模型模拟结果的对比如图 12 所示。由图 12 可知: 改进的 K&C 模型较好地预测了 SFRC 板背面混凝土的剥落现象; 数值模拟与实验的破坏模式均为典型的对角线破坏, 且吻合良好; 随着钢纤维体积分数的增加, SFRC 板损伤破坏的程度减轻。

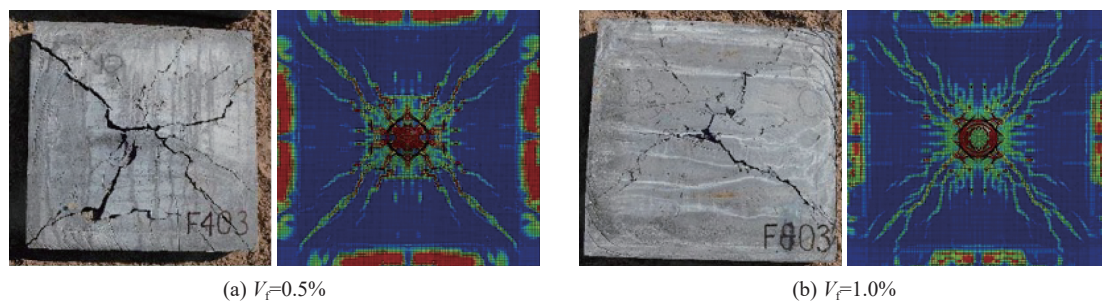


图 12 不同纤维体积分数时 SFRC 板挠曲破坏模式的实验结果^[2]与数值预测对比
Fig. 12 Comparisons of the damage patterns of SFRC plate from simulation predictions and experimental results^[2] under different fiber volume fractions

3 结 论

通过对原 K&C 混凝土模型进行改进, 研究了钢纤维混凝土板在冲击与爆炸荷载作用下的动力响应, 得出以下主要结论。

(1) 根据大量 SFRC 三轴压缩实验数据, 在原失效强度面模型的基础上, 考虑了钢纤维体积分数对三轴强度的影响, 采用最小二乘法建立了适用于 SFRC 的失效强度面模型。该模型能准确描述 SFRC 的失效强度面。

(2) 通过 LS-DYNA 软件模拟单元轴向拉、压试验, 采用反复试验法, 建立了 SFRC 的损伤演化模型, 介绍了校准拉、压损伤参数的简便方法, 模拟结果表明, 新的损伤机制能准确描述 SFRC 的应变软化段力学特征。

(3) 根据大量高应变率下 SFRC 的单轴压缩实验数据, 在 CEB-FIP 受压动力增强因子模型的基础上, 考虑了钢纤维体积分数对 DIF 值及过渡应变率的影响, 建立了 SFRC 的 CDIF 模型, 该模型能准确表征 SFRC 受压时的应变率效应。

(4) 通过 LS-DYNA 软件模拟了高速弹丸侵彻钢纤维混凝土靶板与爆炸荷载下钢纤维混凝土板的动力响应, 模拟结果验证了改进的 K&C 模型, 能够准确表征钢纤维混凝土板受冲击和爆炸荷载作用时的动力响应。

参考文献:

- [1] TAI Y S. Flat ended projectile penetrating ultra-high strength concrete plate target [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2009, 51(2): 117–128.
- [2] LUCCIONI B, ISLA F, CODINA R, et al. Effect of steel fibers on static and blast response of high strength concrete [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 107(1): 23–27.
- [3] 宋玉普, 赵国藩, 彭放, 等. 三向应力状态下钢纤维混凝土的强度特性及破坏准则 [J]. *土木工程学报*, 1994, 27(3): 14–23.

- SONG Y P, ZHAO G F, PENG F, et al. Strength behavior and failure criteria of steel fiber concrete under triaxial stresses [J]. *China Civil Engineering Journal*, 1994, 27(3): 14–23.
- [4] 王乾峰, 彭刚, 戚永乐. 围压条件下钢纤维混凝土动态压缩试验研究 [J]. *混凝土*, 2009(3): 29–31.
- WANG Q F, PENG G, QI Y L. Dynamical press test of SFRC under confined pressure [J]. *Concrete*, 2009(3): 29–31.
- [5] 王志亮, 诸斌. 钢纤维混凝土三轴压缩下的强度和韧性特性 [J]. *建筑材料学报*, 2012, 15(3): 301–305.
- WANG Z L, ZHU B. Strength and toughness characteristic of steel fiber reinforced concrete in triaxial compression [J]. *Journal of Building Materials*, 2012, 15(3): 301–305.
- [6] CHI Y, XU L H, MEI G D, et al. A unified failure envelope for hybrid fibre reinforced concrete subjected to true triaxial compression [J]. *Composite Structures*, 2014, 109: 31–40.
- [7] SIRIJAROONCHAR K, EL-TAWIL S, PARRA-MONTESINOS G. Behavior of high performance fiber reinforced cement composites under multi-axial compressive loading [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2010, 32(1): 62–72.
- [8] LU X, HSU C T T. Behavior of high strength concrete with and without steel fiber reinforcement in triaxial compression [J]. *Cement and Concrete Research*, 2006, 36(9): 1679–1685.
- [9] FARNAM Y, MOOSAVI M, SHEKARCHI M, et al. Behaviour of slurry infiltrated fibre concrete (SIFCON) under triaxial compression [J]. *Cement and Concrete Research*, 2010, 40(11): 1571–1581.
- [10] FANTILLI A P, VALLINI P, CHIAIA B. Ductility of fiber-reinforced self-consolidating concrete under multi-axial compression [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2011, 33(4): 520–527.
- [11] REN G M, WU H, FANG Q, et al. Triaxial compressive behavior of UHPCC and applications in the projectile impact analyses [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 113(1): 1–14.
- [12] MALVAR L J, CRAWFORD J E, WESEVICH J W, et al. A plasticity concrete material model for DYNA3D [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, 19(9/10): 847–873.
- [13] CHI Y, XU L, ZHANG Y. Experimental study on hybrid fiber-reinforced concrete subjected to uniaxial compression [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014, 26(2): 211–218.
- [14] MURUGESAN REDDIAR M K. Stress-strain model of unconfined and confined concrete and stress-block parameters [D]. Texas A & M University, 2009: 31–37.
- [15] BAZANT Z. P. Fracture mechanics of concrete structures [C]//Proceedings of the First International Conference on Fracture Mechanics of Concrete Structures. Amsterdam: Breckenridge, CO, 1992: 20–25.
- [16] 董振英, 李庆斌, 王光纶, 等. 钢纤维混凝土轴拉应力应变特性的试验研究 [J]. *水利学报*, 2002(5): 47–50.
- DONG Z Y, LI Q B, WANG G L, et al. Experimental study on stress-strain characteristics of steel fiber reinforced concrete under uniaxial tension [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002(5): 47–50.
- [17] Comité Euro-International du Béton, CEB-FIP Model Code 1990: Design Code [S]. London: Thomas Telford Limited, 1993.
- [18] WANG S S, ZHANG M H, QUEK S T. Effect of high strain rate loading on compressive behaviour of fibre-reinforced high-strength concrete [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2011, 63(11): 813–827.
- [19] HAO Y, HAO H. Dynamic compressive behaviour of spiral steel fibre reinforced concrete in split Hopkinson pressure bar tests [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 48: 521–532.
- [20] SUN X W, ZHAO K, LI Y C, et al. A study of strain-rate effect and fiber reinforcement effect on dynamic behavior of steel fiber-reinforced concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 158: 657–669.
- [21] WANG Y H, WANG Z D, LIANG X Y, et al. Experimental and numerical studies on dynamic compressive behavior of reactive powder concretes [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2008, 21(5): 420–430.
- [22] SU Y, LI J, WU C Q, et al. Effects of steel fibres on dynamic strength of UHPC [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 114(1): 708–718.
- [23] WANG Z L, LIU Y S, SHEN R F. Stress-strain relationship of steel fiber-reinforced concrete under dynamic compression [J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(5): 811–819.
- [24] ACI Committee 446. Report on dynamic fracture of concrete [R]. Michigan: American Concrete Institute, 2004.
- [25] MALVAR L J, ROSS C A. Review of strain rate effects for concrete in tension [J]. *Aci Materials Journal*, 1998, 95(6): 735–739.
- [26] THOMAS R J, SORENSEN A D. Review of strain rate effects for UHPC in tension [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 153: 846–856.

- [27] PARK J K, KIM S W, KIM D J. Matrix-strength-dependent strain-rate sensitivity of strain-hardening fiber-reinforced cementitious composites under tensile impact [J]. *Composite Structures*, 2017, 162: 313–324.
- [28] PARK S H, KIM D J, KIM S W. Investigating the impact resistance of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete using an improved strain energy impact test machine [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 125: 145–159.
- [29] 赵春风, 王强, 王静峰, 等. 近场爆炸作用下核电厂安全壳穹顶钢筋混凝土板的抗爆性能 [J]. *高压物理学报*, 2019, 33(2): 025101.
- ZHAO C F, WANG Q, WANG J F, et al. Blast resistance of containment dome reinforced concrete slab in NPP under close-in explosion [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2019, 33(2): 025101.

K&C Model of Steel Fiber Reinforced Concrete Plate under Impact and Blast Load

YIN Huawei^{1,2}, JIANG Ke¹, ZHANG Liao¹, HUANG Liang¹, WANG Chenling¹

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China;

2. Civil Engineering Inspection and Test Limited Company of Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China)

Abstract: Steel fiber reinforced concrete (SFRC) is widely used in protective structures due to its excellent ductility, toughness and energy absorption capacity. K&C model is a common constitutive model for studying the response of normal concrete components under impact and blast loads, but it cannot accurately characterize the dynamic response of SFRC. In order to improve prediction of K&C model for the dynamic response of SFRC plate under impact and blast load, this work improves K&C model: a new failure strength surface parameter model was established based on a large number of triaxial compression experimental data, a new damage evolution model was established by trial-and-error method, and the damage parameters of tensile and compressive were calibrated. A new compression dynamic increase factor (CDIF) model was established based on a large number of uniaxial compression experimental data of SFRC under high strain rate. The dynamic response of SFRC plate is simulated by explicit dynamic analysis software LS-DYNA. The effectiveness and reliability of the above improvements have been verified by simulation results.

Keywords: steel fiber reinforced concrete; K&C model; impact load; blast load; dynamic response