钢筋混凝土梁冲击响应的3D细观力学模拟

程劲松, 文鹤鸣*

中国科学技术大学, 中国科学院材料力学行为和设计重点实验室, 合肥 230027

*联系人, E-mail: hmwen@ustc.edu.cn

收稿日期: 2018-04-28; 接受日期: 2018-06-13; 网络出版日期: 2018-07-27

国家自然科学基金(批准号: 11572317)资助项目

摘要 钢筋混凝土结构在冲击载荷作用下响应和破坏的研究受到了广泛的关注. 本文通过建立3D细观力学模型, 并结合新近研发的混凝土动态计算本构模型, 模拟计算冲击载荷作用下钢筋混凝土梁的响应和破坏. 3D细观力学模型假定混凝土是由砂浆基体、粗骨料和界面过渡层(Interfacial Transition Zone, 简称ITZ层)三相组成的复合材料. 混凝土动态计算本构模型考虑了压力相关性、剪切损伤、拉伸损伤、Lode角效应和材料应变率效应等主要因素. 结果表明: 数值模拟得到的冲击载荷、梁跨中点挠度的时程曲线以及裂纹的分布和扩展模式与实验结果吻合得较好; 新提出的混凝土3D细观力学模型和新近研发的混凝土动态计算本构模型可以用来预测钢筋混凝土结构在冲击载荷作用下的响应和破坏.

关键词 钢筋混凝土梁, 冲击响应和破坏, 3D细观力学模型, 混凝土动态计算本构模型, 数值模拟

PACS: PACS: 46.70.De, 61.43.Gt, 61.43.Bn, 62.20.mm, 62.20.mt

1 引言

钢筋混凝土结构已经被广泛地应用在民用工程和军事设施中, 研究钢筋混凝土结构在冲击载荷作用下的响应和破坏对民用和防护工程的安全计算和安全评估具有十分重要的意义.

长久以来, 对钢筋混凝土靶板冲击响应进行了比较系统深入的研究, 取得了丰硕的成果^[1-9]. 然而, 对钢筋混凝土梁的研究相对比较少, Zhan等人^[10]、Travaš等人^[11]和Adhikary等人^[12]分别通过实验和数值模拟的方法研究了钢筋混凝土梁在高应变率冲击作用下的结构失效模式. 付应乾和董新龙^[13]采用落锤冲击的

方法研究了钢筋混凝土梁在不同冲击速度下的响应破坏机理.

本文的目的是利用新提出的3D细观力学模型^[14], 并结合新近研发的混凝土动态计算本构模型^[15], 通过ANSYS/LS-DANA有限元计算软件, 对钢筋混凝土梁冲击响应进行数值模拟, 并将模拟结果与相关实验^[13]进行比较分析.

2 混凝土3D细观力学模型的建立

在Xu等人^[14]提出的混凝土3D细观力学模型中, 假定混凝土是由砂浆基体、粗骨料和ITZ层组成的三相

引用格式: 程劲松, 文鹤鸣. 钢筋混凝土梁冲击响应的3D细观力学模拟. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 094613
Cheng J S, Wen H M. 3D meso-mechanical modelling of impact response of reinforced concrete beams (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2018, 48: 094613, doi: [10.1360/SSPMA2018-00153](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00153)

复合材料. 主要建模步骤可简单概括为:

(1) 把试样中的粗骨料近似地看成球体, 依据混凝土 Fuller 级配曲线^[16]确定粗骨料级配和粒径分布规律;

(2) 通过映射法对所研究的试样划分网格^[17], 单元属性首先全部设置为砂浆基体的材料属性, 单元网格尺寸的大小根据试样的尺寸和计算精度的要求来确定;

(3) 根据粗骨料的粒径分布规律在试样中随机地选择单元集, 把所选单元集的单元属性改变成为粗骨料的材料属性;

(4) 在与粗骨料单元相邻的砂浆基体单元内, 通过单元重构技术并利用 3D 壳单元来创建 ITZ 层.

利用该方法建立混凝土 3D 细观力学模型(如图 1 所示), 可以省去建立粗骨料几何模型的复杂过程, 避免了多相材料进行实体网格划分的困难, 同时引入 3D 壳单元来模拟 ITZ 层, 极大地提高了建模效率.

3 混凝土动态计算本构模型

Xu 和 Wen^[15]新近研发了一种新的混凝土动态计算本构模型, 该模型主要包括孔隙状态方程和强度面, 考虑了压力相关性、剪切损伤、拉伸损伤、Lode 角效应和材料的应变率效应等主要因素.

3.1 孔隙状态方程

混凝土的组成部分(砂浆基体、粗骨料和 ITZ 层)均可以看作是孔隙材料, 其压力体积应变关系可用孔隙状态方程来描述, 即 p - α 状态方程来表达, 对于完全压缩或实体材料的体积应变可用下式表示:

$$\bar{\mu} = \frac{\rho\alpha}{\rho_0\alpha_0} - 1 = \frac{\alpha}{\alpha_0}(1 + \mu) - 1, \quad (1)$$

式中 $\mu = \rho / \rho_0 - 1$ 是体积应变, ρ 和 ρ_0 分别是当前和起始密度; $\alpha = \rho_s / \rho$ 和 $\alpha_0 = \rho_{s0} / \rho_0$ 分别是当前和起始孔隙度, ρ_s 和 ρ_{s0} 分别是当前和起始实体材料密度.

当 $\bar{\mu} > 0$ 时, 混凝土材料处于压缩状态, 状态方程可以表示如下:

$$\alpha = \max \left\{ 1, \min \left[\alpha_0, 1 + (\alpha_0 - 1) \left(\frac{p_{\text{lock}} - p}{p_{\text{lock}} - p_{\text{crush}}} \right)^n \right] \right\}, \quad (2)$$

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

图 1 (网络版彩图)混凝土 3D 细观力学模型结构. (a) 整体 3D 细观力学结构; (b) 局部放大图

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of the 3D meso-mechanical model for concrete. (a) Overall view of the 3D meso-mechanical model; (b) partial enlarged sectional view.

式中 K_1 , K_2 和 K_3 是通过实验确定的实体材料的体积模量; p_{crush} 是混凝土材料由于载荷的作用孔隙开始坍塌时的压力; p_{lock} 是混凝土材料由于载荷的作用孔隙完全压实时的压力.

当 $\bar{\mu} < 0$ 时, 混凝土材料处于拉伸状态, 此时的状态方程为

$$p = K_1 \bar{\mu}. \quad (4)$$

3.2 强度面

混凝土材料的强度面可以表示为^[15]

$$Y = \begin{cases} 3(p + f_{\text{tt}})r(\theta, e), & p < 0, \\ [3f_{\text{tt}} + (f_{\text{cc}} - 3f_{\text{tt}}) \times 3p / f_{\text{cc}}]r(\theta, e), & 0 < p < f_{\text{cc}} / 3, \\ [f_{\text{cc}} + Bf'_{\text{c}}(p / f'_{\text{c}} - f_{\text{cc}} / 3f'_{\text{c}})^N]r(\theta, e), & p > f_{\text{cc}} / 3, \end{cases} \quad (5)$$

式中 $f_{\text{cc}} = f'_{\text{c}} DIF_{\text{m}_1} \eta_{\text{c}}$ 和 $f_{\text{tt}} = f_{\text{t}} DIF_{\text{t}} \eta_{\text{t}}$, 其中 f'_{c} 和 f_{t} 分别是静态压缩和拉伸强度^[15], DIF_{m_1} 和 DIF_{t} 分别是仅由于应变率效应引起的压缩和拉伸动态增强因子^[15, 18], η_{c} 和 η_{t} 分别是混凝土压缩和拉伸的形状函数^[15]; B 和 N 是实验参数; $r(\theta, e)$ 是 Lode 角效应^[15], 其中 θ 和 e 分别是 Lode 角和拉伸子午线和压缩子午线的比值.

4 模型设计和参数确定

在建立了3D细观力学模型后, 结合新近研发的混凝土动态计算本构模型, 借助于ANSYS/LS-DYNA有限元计算软件, 来模拟计算落锤冲击钢筋混凝土梁的实验^[13].

4.1 模型尺寸

钢筋混凝土梁的几何尺寸为1200 mm×1200 mm×120 mm, 支座跨度1000 mm. 纵向钢筋和箍筋也采用实体单元建模, 其中纵向钢筋上下各2根, 直径分别为10 mm和12 mm, 纵向钢筋外围混凝土保护层厚度20 mm; 箍筋直径8 mm, 间隔50 mm, 为了建模方便, 箍筋采用相同截面面积的矩形截面来代替圆形截面. 同时为了节约计算资源, 仅把落锤冲击的响应区(跨度为600 mm)建立为全级配粗骨料细观模型, 粗骨料的体积含量为40%, 粗骨料粒径范围从5 mm到15 mm, 非响应区采用有限元模型. ITZ层的典型厚度只有10~50 μm. 为了提高数值模拟的计算效率, 本文中采用壳单元且厚度取平均值30 μm^[14]. 考虑到各方向几何位置和尺寸的限制, 将钢筋混凝土部分的单元尺寸定为3.125 mm×4 mm×4 mm, 落锤和四个支座部分的单元尺寸定为10 mm×10 mm×10 mm, 建立后的模型效果如图2所示.

4.2 边界条件和约束

数值模拟中, 为了模拟实际的边界条件, 将梁支撑在所有自由度都被约束的四个刚性支座上, 落锤只在垂直方向上移动. 不同的材料建立的PART之间采用ANSYS/LS-DYNA中的面面侵蚀接触(CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE)算法来定义接触.

4.3 材料参数

数值模拟中, 砂浆基体、粗骨料和ITZ层均采用

图 2 (网络版彩图)钢筋混凝土梁的3D细观力学模型
Figure 2 (Color online) 3D meso-mechanical model for reinforced concrete beam.

Xu和Wen^[15]提供的材料本构关系, 参数列于表1. 落锤和四个支座采用刚体模型, 纵向钢筋和箍筋采用考虑了应变率效应(Cowper-Symonds模型)的理想弹塑性本构模型, 具体参数列于表2.

5 数值模拟与实验结果的比较和讨论

实验中, 两个压电式加速度传感器安装在锤头底部接近锤头与梁接触区, 用于测量冲击载荷; 梁跨中挠度位移采用激光位移传感器直接测量锤头位移; 同时, 采用高速摄影机拍摄落锤冲击区域梁的破坏形貌.

数值模拟中, 计算总时间设置为25 ms, 每间隔0.01 ms输出一个文件, 共计输出2500个文件, 通过后

表 1 混凝土3D细观力学模型参数^[13-15]

Table 1 The parameters of 3D meso-mechanical model of concrete [13-15]

参数	砂浆基体	粗骨料	ITZ层
ρ_0 (kg/m ³)	2200	2660	1800
ρ_{s0} (kg/m ³)	2680	2680	2680
p_{crush} (MPa)	10.6	20.0	6.4
p_{lock} (GPa)	3	3	3
n	3	3	3
K_1 (GPa)	14.2	16.4	12.8
K_2 (GPa)	30	-3.0×10 ³	30
K_3 (GPa)	10	1.5E5	10
G (GPa)	10.6	13.9	5.9
f'_c (MPa)	31.9	60.0	19.1
f_t (MPa)	3.0	4.2	2.4
B	1.54	1.95	1.54
N	0.8	0.76	0.8

表 2 落锤和支座、纵向钢筋和箍筋的材料参数^[13]

Table 2 The parameters of the drop-weight, support plate, longitudinal and shear reinforcements [13]

参数	落锤和支座	纵向钢筋	箍筋
ρ (kg/m ³)	7850	7850	7850
E (GPa)	210	210	210
μ	0.3	0.3	0.3
Y (MPa)	400	335	235
C	—	40.4	40.4
P	—	5.0	5.0

处理得到试件的冲击载荷力和跨中点挠度的数据, 以及不同时刻试件冲击区的破坏形貌和裂纹分布.

5.1 载荷、位移响应特征

表3给出了数值模拟和实验测量的关于落锤冲击力峰值和梁跨中点挠度最大值及对应时间的对比.

冲击力峰值方面, 在1.2 m高度冲击和4.8 m高度冲击条件下, 数值模拟得到的峰值和实验测量得到的峰值相差比较小, 相对误差分别只有10%和2%; 但在2.4 m高度冲击时, 数值模拟得到的峰值(136.6 kN)与实验测量得到的峰值(94.7 kN)存在很大的差距, 相对误差达到了44%, 而且该次实验峰值(94.7 kN)甚至低于在1.2 m高度冲击时的实验峰值(104 kN), 基本可以认为该次2.4 m高度冲击实验的冲击力测量结果存在异常或误差, 应不予考虑.

跨中点挠度最大值方面, 三个冲击高度下, 数值模拟得到的最大值和实验测量得到的最大值相差都很小, 相对误差分别为6%, 0和6%.

图3给出了试件在4.8 m高度冲击下, 冲击力和跨中点挠度响应曲线的数值模拟与实验测量的对比. 数值模拟和实验测量都表明, 试件在受到落锤冲击后首先会经历一个冲击力峰值, 数值模拟得到的冲击力峰值(176.9 kN)和实验测量得到的冲击力峰值(173.9 kN)也基本吻合, 然后逐渐震荡并最终趋近于一个水平平台. 试件中的挠度刚开始在不断增大, 最后由于试件变形恢复, 出现反弹回落, 不同的是数值模拟中挠度反弹趋势没有实验测量中的明显. 具体对比发现, 数值模拟得到的最大挠度(95.8 mm)比实验测量(90.4 mm)大了6%, 同时, 冲击力峰值在数值模拟中对应的时间比实验中对的时间早了0.5 ms, 这说明数

图3 (网络版彩图)钢筋混凝土梁冲击力和跨中点位移响应(4.8 m高冲击)

Figure 3 (Color online) Force- and displacement-time histories of reinforced concrete beam (4.8 m height impact).

值模拟中钢筋混凝土梁的刚度比实验中的要大. 换言之, 数值模拟中简化的支撑约束条件和实际情况有出入, 从而导致模拟结果与实验相比出现误差.

图4给出了三种高度冲击下, 数值模拟和实验测量得到的试件跨中点挠度时程曲线的对比. 可见相同高度冲击下, 在跨中点挠度达到最大值之前, 数值模拟跟实验测量的上升趋势是一致的, 数值也相差很小, 尤其在5 ms以前, 数值模拟数据跟实验测量数据几乎完全重合. 随后, 由于试件变形恢复, 跨中点挠度都出现了回落.

图5给出了不同高度冲击下, 试件冲击力-跨中点挠度响应曲线的数值模拟与实验结果的对比. 结合表2发现, 相同高度冲击下, 由于数值模拟的冲击力峰值对应的时间比实验测量的时间要早一些, 这导致在图5中, 1.2 m和4.8 m高度冲击时, 数值模拟得到的响应曲线在上升段比实验测量的响应曲线陡了很多. 由

表3 实验结果和数值模拟结果的对比^[13]

Table 3 Comparison of the experimental results and numerical simulations [13]

落锤高度(m)/落锤质量(kg)		冲击力		跨中点挠度	
		峰值(kN)	时间(ms)	最大(mm)	时间(ms)
实验结果RC16	1.2/124	104	1.45	28.3	11.2
数值模拟RC16	1.2/124	94.5	0.92	26.7	13.2
实验结果RC15	2.4/124	94.7	1.40	51.2	17.8
数值模拟RC15	2.4/124	136.6	0.76	51.2	17.3
实验结果RC17	4.8/124	173.9	1.20	90.4	19.2
数值模拟RC17	4.8/124	176.9	0.70	95.8	22.9

图 4 (网络版彩图)钢筋混凝土梁跨中点挠度时程曲线
Figure 4 (Color online) Displacement-time history of reinforced concrete beam.

图 5 (网络版彩图)钢筋混凝土梁冲击力-中点挠度响应曲线
Figure 5 (Color online) Force-displacement curve of reinforced concrete beam.

于没有2.4 m高度冲击下实验测量的响应曲线, 这里仅给出数值模拟得到的响应曲线, 该响应曲线中的冲击力峰值与跨中点挠度最大值均介于1.2 m和4.8 m高度冲击的数据之间, 响应曲线的趋势也符合经验预测, 可以认为是准确的。

5.2 裂纹发展及破坏

好的混凝土细观力学模型和混凝土计算本构模型不仅应该能够用于模拟计算混凝土梁受冲击载荷作用时的冲击力和位移关系, 还应该能给出响应的详细情况, 如钢筋混凝土梁的变形损伤、破坏形貌和裂纹扩展等。

图6给出了4.8 m高度冲击下, 数值模拟与实验观察得到的不同时刻梁的裂纹破坏形貌和跨中点挠度的对比, 时间间隔为5 ms。

图 6 (网络版彩图)钢筋混凝土梁的破坏过程 (4.8 m高冲击). (a) 0 ms, 跨中点挠度: 实验0 mm, 数值模拟0 mm; (b) 5 ms, 跨中点挠度: 实验38 mm, 数值模拟39 mm; (c) 10 ms, 跨中点挠度: 实验61 mm, 数值模拟66 mm; (d) 15 ms, 跨中点挠度: 实验82 mm, 数值模拟85 mm; (e) 20 ms, 跨中点挠度: 实验90 mm, 数值模拟94 mm

Figure 6 (Color online) Failure process of reinforced concrete beams (4.8 m height impact). (a) 0 ms, mid-span displacement: test (0 mm), simulation (0 mm); (b) 5 ms, mid-displacement: test (38 mm), simulation (39 mm); (c) 10 ms, mid-span displacement: test (61 mm), simulation (66 mm); (d) 15 ms, mid-span displacement: test (82 mm), simulation (85 mm); (e) 200 ms, mid-span displacement: test (90 mm), simulation (94 mm).

(1) 5 ms时刻, 由于落锤初始冲击能量很大, 落锤与试件接触部分出现损伤, 向下辐射扩展出剪切裂纹, 同时试件下部出现大量弯曲裂纹, 数值模拟重现了实验观察的结果, 而且此时二者的挠度(实验38 mm, 数值模拟39 mm)几乎没有差别;

(2) 5 ms时刻之后, 落锤与试件接触部分的损伤区域逐渐变大, 并形成塑性铰, 试件的挠度也逐渐变大, 试件下部的裂纹继续沿着原裂纹的方向向外扩展, 裂纹的方向与长度也和实验吻合得较好;

(3) 数值模拟中, 试件在靠近支座位置部分, 产生了若干条破坏裂纹, 而实验中则没有发现裂纹, 这主要的原因可能是数值模拟与实验中梁的支撑约束条件差异导致的. 在数值模拟中, 支撑约束采用的是四个约束了所有自由度的刚性平板, 这和实验中的支撑约束应该有一定差别, 但由于数值模拟的限制, 不可能做到

图 7 (网络版彩图)钢筋混凝土梁的破坏过程(1.2 m高冲击). (a) 0 ms, 跨中点挠度: 实验0 mm, 数值模拟0 mm; (b) 5 ms, 跨中点挠度: 实验18 mm, 数值模拟18 mm; (c) 10 ms, 跨中点挠度: 实验28 mm, 数值模拟25 mm

Figure 7 (Color online) Failure process of reinforced concrete beams (1.2 m height impact). (a) 0 ms, mid-span displacement: test (0 mm), simulation (0 mm); (b) 5 ms, mid-span displacement: test (18 mm), simulation (18 mm); (c) 10 ms, mid-span displacement: test (28 mm), simulation (25 mm).

与实验中完全一样的约束, 因此在不考虑支座位置附近的裂纹的情况下, 可以认为数值模拟得到的结果是可靠的.

图7给出了1.2 m高度冲击下, 数值模拟与实验观察得到的不同时刻梁的裂纹破坏形貌和跨中点挠度的对比, 时间间隔为5 ms.

(1) 5 ms时刻, 梁试样跨中底部出现弯曲起裂, 数条裂纹开始竖直向上传播, 表现为弯曲破坏模式, 数值模拟得到的跨中点挠度和实验观察保持一致(实验18 mm, 数值模拟18 mm);

(2) 10 ms时刻, 裂纹继续扩展, 实验中裂纹还没有贯通整个试样截面, 而数值模拟中, 裂纹数比较多, 二者的跨中点挠度(实验28 mm, 数值模拟25 mm)相差很小.

从数值模拟结果可以看出, 裂纹一般会在粗骨料边缘产生并沿着基体和ITZ层扩展. 这是因为粗骨料的强度比基体和ITZ层的强度大, 相对不容易破坏, 影响了裂纹的传播路径.

6 结论

本文采用新提出的3D细观力学建模方法, 并结合新近研发的混凝土动态计算本构模型, 研究了钢筋混凝土梁在冲击载荷作用下的响应和破坏, 得到如下结论:

(1) 数值模拟得到冲击力-和跨中点挠度-时间曲线与实验结果吻合得较好;

(2) 不同时刻, 数值模拟得到的试件损伤区域、裂纹位置、形状和长度和实验观察基本吻合;

(3) 数值模拟中, 由于粗骨料的强度比砂浆基体和ITZ层的强度都要大, 裂纹会避开粗骨料而在砂浆基体和ITZ层中产生并扩展;

(4) 新提出的混凝土3D细观力学模型和新近研发的混凝土动态计算本构模型可以用来预测钢筋混凝土结构在冲击载荷作用下的响应、裂纹的产生、扩展和最终破坏形貌.

参考文献

- Forrestal M J, Altman B S, Cargile J D, et al. An empirical equation for penetration depth of ogive-nose projectiles into concrete targets. *Int J Impact Eng*, 1994, 15: 395–405

- 2 Li Q M, Chen X W. Dimensionless formulae for penetration depth of concrete target impacted by a non-deformable projectile. [Int J Impact Eng](#), 2003, 28: 93–116
- 3 Reid S R, Wen H M. Predicting penetration, cone cracking, scabbing and perforation of reinforced concrete targets struck by flat-faced projectiles. Report No. 2. UMIST Report ME/AM/0201/TE/G/018507/Z, 2001
- 4 Li Q M, Reid S R, Wen H M, et al. Local impact effects of hard missiles on concrete targets. [Int J Impact Eng](#), 2005, 32: 224–284
- 5 Wen H M, Xian Y X. A unified approach for concrete impact. [Int J Impact Eng](#), 2015, 77: 84–96
- 6 Wen H M, Yang Y. A note on the deep penetration of projectiles into concrete. [Int J Impact Eng](#), 2014, 66: 1–4
- 7 Forrestal M J, Tzou D Y. A spherical cavity-expansion penetration model for concrete targets. [Int J Solids Struct](#), 1997, 34: 4127–4146
- 8 He T, Wen H M, Guo X J. A spherical cavity expansion model for penetration of ogival-nosed projectiles into concrete targets with shear-dilatancy. [Acta Mech Sin](#), 2011, 27: 1001–1012
- 9 Guo X J, He T, Wen H M. Cylindrical cavity expansion penetration model for concrete targets with shear dilatancy. [J Eng Mech](#), 2013, 139: 1260–1267
- 10 Zhan T, Wang Z, Ning J. Failure behaviors of reinforced concrete beams subjected to high impact loading. [Eng Failure Anal](#), 2015, 56: 233–243
- 11 Travaš V, Ožbolt J, Kožar I. Failure of plain concrete beam at impact load: 3D finite element analysis. [Int J Fract](#), 2009, 160: 31–41
- 12 Adhikary S D, Li B, Fujikake K. Dynamic behavior of reinforced concrete beams under varying rates of concentrated loading. [Int J Impact Eng](#), 2012, 47: 24–38
- 13 Fu Y Q, Dong X L. 3D meso-mechanical modeling of concrete spall tests (in Chinese). [Sci Sin Tech](#), 2016, 46: 400–406 [付应乾, 董新龙. 落锤冲击下钢筋混凝土梁响应及破坏的实验研究. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 400–406]
- 14 Xu P B, Xu H, Wen H M. 3D meso-mechanical modeling of concrete spall tests. [Int J Impact Eng](#), 2016, 97: 46–56
- 15 Xu H, Wen H M. A computational constitutive model for concrete subjected to dynamic loadings. [Int J Impact Eng](#), 2016, 91: 116–125
- 16 Wriggers P, Moftah S O. Mesoscale models for concrete: Homogenisation and damage behaviour. [Finite Elem Anal Des](#), 2006, 42: 623–636
- 17 Erzar B, Forquin P. Experiments and mesoscopic modelling of dynamic testing of concrete. [Mech Mater](#), 2011, 43: 505–527
- 18 Xu H, Wen H M. Semi-empirical equations for the dynamic strength enhancement of concrete-like materials. [Int J Impact Eng](#), 2013, 60: 76–81

3D meso-mechanical modelling of impact response of reinforced concrete beams

CHENG JingSong & WEN HeMing^{*}

*CAS Key Laboratory for Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China,
Hefei 230027, China*

An understanding of the response and failure of reinforced concrete structures subjected to impact loadings is of great importance in safety calculations and assessment in civil as well as defence engineering. In this paper, a numerical study is performed on the impact response of reinforced concrete beams by a newly proposed 3D meso-mechanical model together with a recently developed computational dynamic constitutive model for concrete. In the 3D meso-mechanical model, concrete is considered as a three-phase composite material consisting of mortar matrix, coarse aggregates and interfacial transition zone (ITZ layers). The constitutive model for concrete takes into account pressure dependency, shear damage, tensile softening, Lode effect and strain rate effect, etc. It is shown that the numerical results are in good agreement with the experimental observations in terms of time histories of impact force and displacement as well as crack distribution and propagation and that the newly developed 3D meso-mechanical model together with the previously proposed constitutive model for concrete can be used to predict the response and failure of reinforced concrete structures subjected to impact loading.

reinforced concrete beams, impact response and failure, 3D meso-mechanical model, computational dynamic constitutive model for concrete, numerical simulation

PACS: PACS: 46.70.De, 61.43.Gt, 61.43.Bn, 62.20.mm, 62.20.mt

doi: [10.1360/SSPMA2018-00153](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00153)