



基于细观模型的超高性能钢纤维混凝土SHPB试验数值模拟

仵鹏涛¹, 吴成清², 刘中宪^{3*}, 徐慎春^{4*}

1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072;
2. 悉尼科技大学土木与环境工程学院, 悉尼 100044, 澳大利亚;
3. 天津城建大学天津市土木建筑结构防护与加固重点实验室, 天津 300384;
4. 广州大学土木工程学院, 广州 510006

*通讯作者, 刘中宪, E-mail: zhongxian1212@163.com; 徐慎春, E-mail: xushenchun@163.com

收稿日期: 2019-05-23; 接受日期: 2019-08-12; 网络出版日期: 2019-12-06

国家重点基础研究发展计划(编号: 2015CB058002)、国家自然科学基金(编号: 51578362)和天津市科技支撑重点项目(编号: 17YFZCSF01140)资助项目

摘要 超高性能钢纤维混凝土是一种极具创新性的水泥基复合材料, 具有优异的力学性能, 在结构抵抗极端荷载方面潜力突出. 为研究超高性能钢纤维混凝土动态力学性能, 利用LS_DYNA软件建立了由砂浆和钢纤维组成的细观数值模型. 首先, 通过静态压缩和劈裂试验对细观模型进行了验证. 其次, 对霍普金森压杆(SHPB)试验进行了数值模拟, 并在细观尺度上解释了应力-应变历程, 研究了钢纤维含量对超高性能钢纤维混凝土动态性能的影响. 研究表明, 该模型能够很好地预测超高性能钢纤维混凝土的静态和动态性能; 当钢纤维在合理范围内(0%–2.5%)时, 超高性能钢纤维混凝土动态强度随着钢纤维体积率的增加而显著增大; 然而, 超高性能钢纤维混凝土动态增强因子低于传统混凝土材料. 同时, 定量分析了钢纤维增强效果, 并在试验和数值模拟的基础上推导了超高性能钢纤维混凝土的动态本构关系.

关键词 超高性能纤维混凝土(UHPSFRC), 霍普金森压杆(SHPB), 细观模型, 钢纤维, 应变率, 钢纤维体积率

PACS: 28.41.Qb, 28.52.Fa, 05.10.-a

1 引言

随着经济社会的快速发展, 工程界对混凝土材料性能的要求越来越高, 混凝土的高强化是现代建筑结构的必然要求. 但是, 随着强度的提高, 混凝土的脆性特征也更加显著, 极大限制了其推广应用. 纤维掺入混

凝土中能有效改善混凝土材料的内部缺陷, 有助于提高纤维混凝土的最终强度和延性^[1]. 其中, 钢纤维是一种常用的增强材料. 研究发现, 钢纤维能够有效提升纤维混凝土的力学性能^[2–4]. 随着科技的进一步发展, 超高性能钢纤维混凝土(Ultra-high Performance Steel Fiber-reinforced Concrete, UHPSFRC)得以发明, 其优异

引用格式: 仵鹏涛, 吴成清, 刘中宪, 等. 基于细观模型的超高性能钢纤维混凝土SHPB试验数值模拟. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 024614
Wu P T, Wu C Q, Liu Z X, et al. Numerical simulation of SHPB test of ultra-high performance fiber reinforced concrete with meso-scale model (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 024614, doi: 10.1360/SSPMA-2019-0187

的力学性能已被大量试验研究证明^[5,6]. 尤其是在工程防护领域, UHPSFRC表现出巨大潜力.

混凝土是由内部随机分布的骨料、水泥砂浆以及初始缺陷等组成的非均质复合材料. 由于内部组成的非均质性, 导致了其力学性能的随机性和离散性. 这种随机离散性将显著影响混凝土在极端荷载作用下的破坏机理. 针对上述问题, 一些学者在细观层面研究了混凝土材料的破坏机理. 杜修力等人^[7]总结研究了混凝土宏观力学特性的细观力学分析方法, 提出了一种混凝土宏观力学性能研究的细观单元等效化分析方法. Fang等人^[8]建立了钢纤维混凝土材料在冲击和爆炸荷载作用下的动力响应和破坏模式的三维数值模型. 金浏等人^[9-11]建立了细观尺度数值分析模型, 研究了混凝土材料性能、钢筋混凝土悬臂梁在循环往复荷载作用下的抗剪破坏以及落锤速度对钢筋混凝土梁抗冲击性能的影响规律.

本文在已有试验数据的基础上, 结合前期开展的UHPSFRC抗冲击性能细观数值模拟研究^[12,13], 利用LS-DYNA软件, 建立了考虑砂浆基体和钢纤维的UHPSFRC细观有限元模型, 进行了霍普金森压杆(SHPB)试验数值模拟, 研究了钢纤维的增强机理, 提出了包括钢纤维增强效应和应变率增强效应的UHPSFRC动态损伤本构模型. 结果表明, 该动态本构关系能较好地反映UHPSFRC动态加载过程的主要特性.

2 细观有限元模型

为揭示钢纤维对UHPSFRC材料动态力学性能增强作用及机理, 本文从细观角度出发, 考虑UHPSFRC内部非均质性, 将UHPSFRC看作由砂浆基体和钢纤维的两相复合材料, 对UHPSFRC的动态性能进行数值模拟.

2.1 材料本构模型

在细观数值模型中, 采用LS-DYNA中的实体单元和材料模型CONCRETE_DAMAGE_Re13 (MAT_072R3)对砂浆基体进行建模, 该材料模型采用3个剪切破坏面, 包括损伤和应变率效应, 提供了完全基于混凝土无侧限抗压强度的模型参数生成能力, 用户还可以对自动生成的模型参数进行检查和修改. 钢纤

维采用材料模型SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK (MAT_098)和梁单元进行模拟, 该材料模型对带有梁单元的材料模型进行了简化, 钢纤维的弹性行为由杨氏模量、泊松比和拉伸应力决定. 冲击杆采用实体单元和材料模型PLASTIC_KINEMATIC (MAT_003)进行模拟, 在该材料模型中, 钢材的弹性行为由杨氏模量和泊松比决定, 塑性行为由切线模量决定. 细观数值模型中砂浆基体、钢纤维和压杆的材料性能参数见表1.

2.2 黏结滑移

砂浆基体与钢纤维之间的黏结滑移对UHPSFRC的力学性能至关重要. 本文利用LS-DYNA中的一维滑动接触模型(CONTACT_1D)对钢纤维与砂浆基体间的黏结滑移进行模拟. 一维滑动接触模型通过钢纤维与砂浆基体之间的虚拟弹簧来实现对钢纤维与砂浆基体之间的黏结滑移的模拟. 在加载过程中, 钢纤维的单元从节点被迫沿着砂浆基体单元的主节点滑动, 一旦黏结力超过某个限值, 钢纤维与砂浆基体即会分离^[14]. CONTACT_1D由黏结剪切模量 G_s 、最大弹性滑移 S_{max} 和损伤曲线指数系数 h_{dmg} 等3个参数定义^[15], 此模型中使用的3个参数见文献^[12], 各参数的取值分别为 $G_s=2393$ MPa/mm, $S_{max}=1.25 \times 10^{-3}$ mm, $h_{dmg}=0.2$.

3 模型验证

静态试验采用100 mm×100 mm×100 mm的立方体试件进行压缩试验, 劈裂拉伸试验采用直径为

表1 数值模型中的参数

Table 1 Material properties in LS_DYNA

材料	LA_DYNA中的模型	参数	数值
砂浆基体	MAT_072R3	密度	2450 kg/m ³
		单轴抗压强度	140 MPa
		泊松比	0.19
钢纤维	MAT_098	密度	7830 kg/m ³
		杨氏模量	210 GPa
		泊松比	0.28
压杆	MAT_003	密度	7830 kg/m ³
		杨氏模量	210 GPa
		泊松比	0.28

75 mm、高度为37.5 mm的圆柱体试件. 在动态试验中, SHPB试验采用直径为75 mm、高度为37.5 mm的圆柱体试样.

3.1 数值模型建立

在数值模拟中, 为了保证材料模型参数的稳定性和一致性, 将UHPSFRC砂浆划分为边长为1 mm的六面体网格; 钢纤维的生成需要用到MATLAB和ANSYS/LS-DYNA两个软件. 首先, 根据UHPSFRC配合比的钢纤维体积率、堆积密度以及每根钢纤维的质量估算出需要投放的钢纤维数量; 其次, 通过MATLAB编程, 利用随机数的功能生成三维空间内钢纤维两 endpoint 坐标; 然后, 将所有钢纤维 endpoint 坐标提取到ANSYS/LS-DYNA软件中, 进而生成钢纤维的几何线型, 并且赋予其单元类型; 最终对钢纤维划分为1 mm的网格, 赋予其材料参数.

材料模型MAT72R3中使用压缩损伤参数(b_1)、拉伸损伤参数(b_2)来决定材料的软化, 其中 $b_1=1.43$, $b_2=1.35$; 使用 $\eta(\lambda)$ 来计算损伤的累积, 是一个关于有限塑性应变 λ 的函数, 该损伤函数有13组数据组成, 表2为损伤函数参数.

从试验中的破坏形式发现, 试件主要发生的是剪切破坏, 因此本研究中主要采用最大等效应变失效准则, 即当单元最大等效应变达到规定的数值后, 单元便被删除, 不再参与计算.

3.2 静载模型验证

为了保证材料模型能够准确地应用于UHPSFRC材料的数值模拟中, 进行了静态荷载下的单轴压缩试验和劈裂拉伸数值模拟, 并将其与试验结果进行了对比. 图1为本研究中建立的静态压缩数值模型, 图2为压缩试验和数值模拟的应力-应变曲线对比, 由图可知, 两条曲线吻合较好. 静态劈裂试验的数值模拟结果见参考文献[12], 结果表明, 试验和数值模拟得到的应力-位移曲线与静态劈裂试验结果吻合较好. 因此, 所选择的材料模型可以准确地应用于UHPSFRC材料的数值模拟中.

3.3 动载模型验证

SHPB实验系统的主要仪器如图3所示.

Su等人^[4,16]研究了UHPSFRC材料的动态性能, 并

表2 损伤函数参数

Table 2 The damage function

λ	η	λ	η
0	0	0.00061	0.55
0.00038	0.85	0.001	0.33
0.001	0.95	0.00165	0.17
0.00014	0.98	0.0033	0.032
0.00024	1	0.007	0.005
0.00027	0.97	100	0
0.00039	0.79	-	-

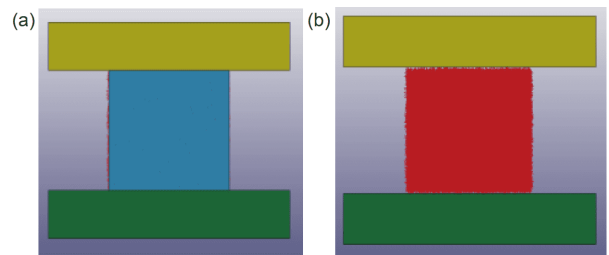


图1 (网络版彩图)静态压缩试验细观数值模型有限元网格. (a) 砂浆基体单元; (b) 钢纤维单元

Figure 1 (Color online) Finite element grid of meso-scale model of static compressive test. (a) Mortar elements; (b) steel fibers elements.

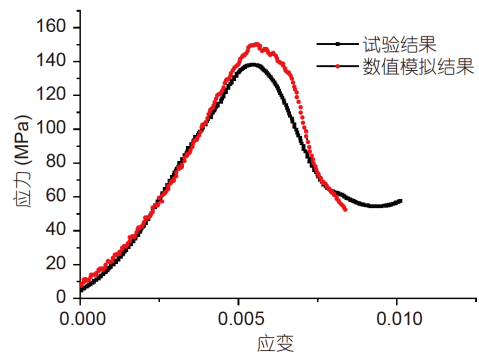


图2 (网络版彩图)静态压缩试验与模拟应力-应变曲线对比

Figure 2 (Color online) Stress-strain curves for the test and simulation of static compression.

对纳米材料和钢纤维的影响进行了讨论. 在本研究中, 细观数值模型由入射杆、UHPSFRC试件和透射杆组成. 利用SHPB试验得到的入射应力曲线, 将入射杆一端作为应力边界, 冲击入射杆端. 在该模型中, UHPSFRC试件与压杆之间的接触采用AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE, 模型如图4所示.

在细观模型中, 将UHPSFRC试件视为由砂浆基体和钢纤维组成的两相复合材料, 如图5所示. 试件尺寸为直径75 mm, 长度37.5 mm的圆柱体.

为验证所建立的细观数值模型的准确性, 对比分析了数值模拟与试验结果. 试验及细观数值模拟所测得的应力时程曲线如图6(a, b)所示. 由图6可知, 细观数

值模拟可以较好地模拟UHPSFRC材料的SHPB试验.

图7为SHPB压缩应力-应变曲线对比, 可以看出, 模拟得到的应力-应变曲线与试验结果吻合较好, 峰值应力和软化阶段均符合较好. 图8为SHPB劈裂应力-时间曲线对比, 可以看出, 细观数值模型的应力时程曲线与试验结果吻合较好. UHPSFRC试样劈裂强度达到第

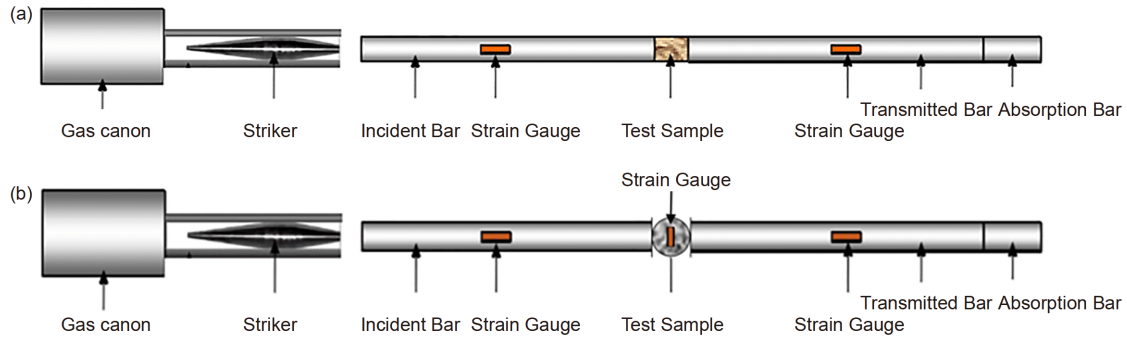


图3 (网络版彩图) SHPB试验装置. (a) SHPB压缩试验装置; (b) SHPB劈裂试验装置

Figure 3 (Color online) SHPB experimental system. (a) SHPB compression experimental system; (b) SHPB split tensile experimental system.

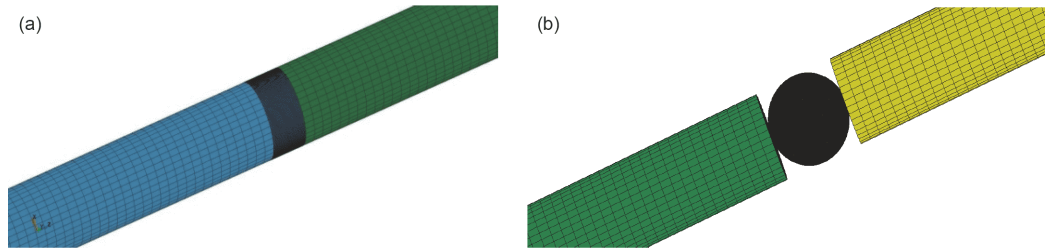


图4 (网络版彩图) SHPB试验的整体仿真模型. (a) 压缩试验; (b) 劈裂试验

Figure 4 (Color online) The whole simulation model of SHPB test. (a) Compression test; (b) split tensile test.

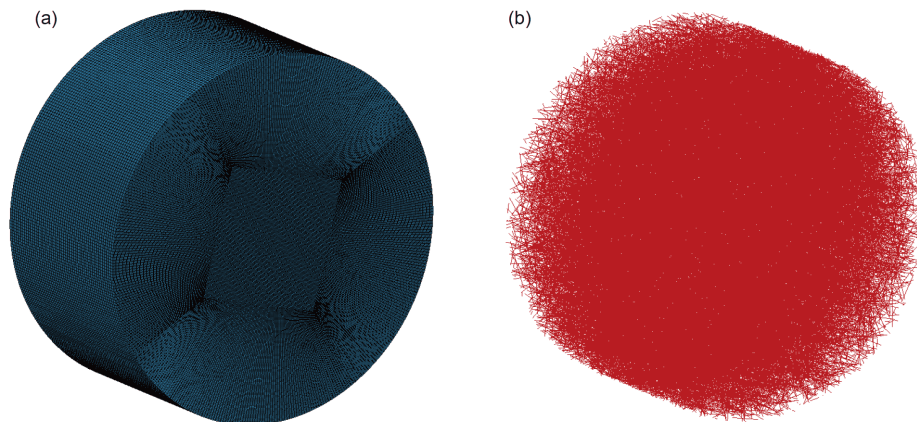


图5 (网络版彩图) SHPB试验细观数值模型有限元网格. (a) 砂浆基体单元; (b) 钢纤维单元

Figure 5 (Color online) Finite element grid of meso-scale model of SHPB test. (a) Mortar elements; (b) steel fibers elements.

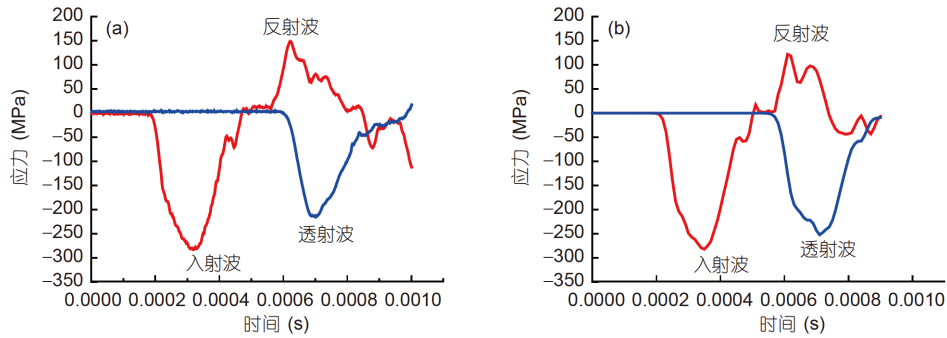


图6 (网络版彩图)试验与模拟应力时程曲线对比. (a) 试验; (b) 数值模拟
Figure 6 (Color online) Comparison of stress histories between test and simulation. (a) Experiment; (b) numerical simulation.

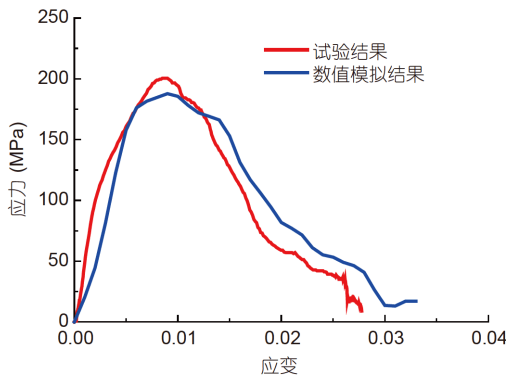


图7 (网络版彩图)试验与细观数值模拟测得应力-应变曲线对比
Figure 7 (Color online) Comparison of strain-stress curves obtained in test and meso-scale model numerical for compression.

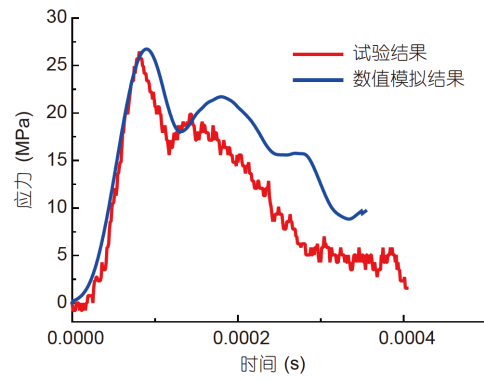


图8 (网络版彩图)试验得到的劈裂应力-时间曲线与细观模型数值比较
Figure 8 (Color online) Comparison of stress-time curves obtained in test and meso-scale model numerical for split tension.

一个峰值, 强度下降到第一个波谷, 然后强度增加到第二个峰值, 以此类推.

SHPB试验与细观数值模拟中试件的破坏模式对比如图9和10所示. 从图中可以明显地看出, 细观数值

模拟中UHPSFRC的裂纹和破坏模式和试验中的拟合良好, 数值模拟可以更好地展现出钢纤维对UHPSFRC的增强效果, 钢纤维是UHPSFRC损伤的桥梁, 能够很好地提高其强度和延性.

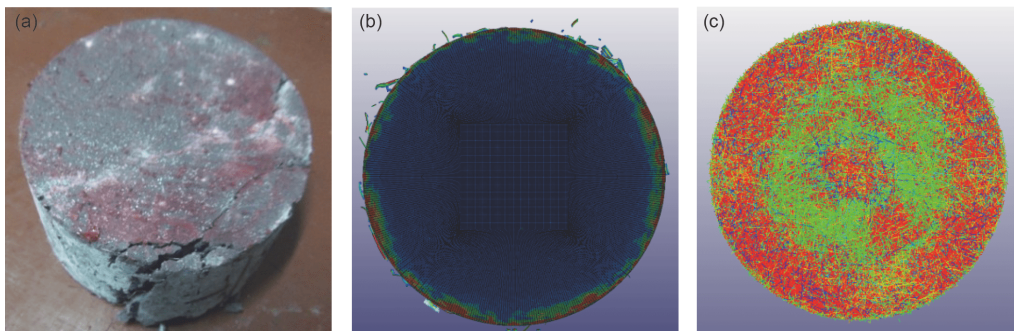


图9 (网络版彩图)压缩试验中试件破坏形态与细观数值模拟结果对比. (a) 试验; (b) 砂浆基体破坏; (c) 钢纤维上的轴力
Figure 9 (Color online) Compare failure pattern in specimen obtained in test and meso-scale numerical simulation for compression test. (a) Test; (b) failure pattern of mortar; (c) axial force on steel fiber.

表3和4分别给出了数值模拟与试验测得的动态抗压强度和动态劈裂强度. 通过对比数值模拟结果与试验结果, 可以发现, 误差最大为8.5%, 表明所建立的细观有限元模型能够很好地预测UHPSFRC的动态压缩强度和动态劈裂强度.

4 参数分析

为了研究不同应变率和钢纤维体积率对UHPSFRC动态力学性能的影响, 开展了参数分析, 共进行了25个动态压缩和35个劈裂拉伸模拟.

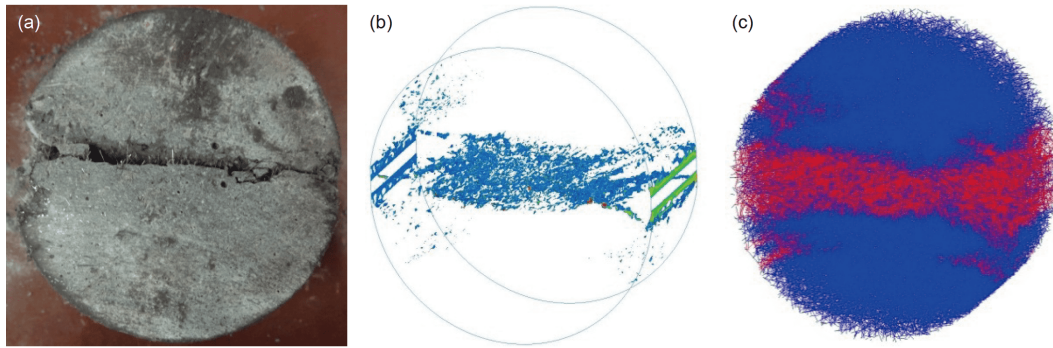


图 10 (网络版彩图)劈裂拉伸试验中试件破坏形态与细观数值模拟结果对比. (a) 试验; (b) 砂浆基体破坏; (c) 钢纤维上的轴力

Figure 10 (Color online) Compare failure pattern in specimen obtained in test and meso-scale numerical simulation for split tension test. (a) Test; (b) failure pattern of mortar; (c) axial force on steel fiber.

表 3 SHPB压缩实验数据验证^{a)}

Table 3 Validation with experimental data of SHPB compression test^{a)}

样品编号	钢纤维类别	钢纤维体积率 (%)	试验压强 (MPa)	模拟压强 (MPa)	误差 (%)
C1505-1	MF15	0.5	166.992	159.377	4.560
C1505-2	MF15	0.5	174.365	176.609	1.287
C1510-1	MF15	1.0	158.417	159.690	0.804
C1510-2	MF15	1.0	188.417	186.231	1.160
C1525-1	MF15	2.5	174.573	176.097	0.873
C1525-2	MF15	2.5	219.640	230.677	5.025

a) 样品编号解释如下: 第一个字母表示压缩(C)模型; 第2和第3个数表示钢纤维的长度; 第4和第5个数字表示钢纤维的体积含量率(0.5%, 1.0%, 2.5%); 最后一个数字表示数值模拟试件的编号.

表 4 SHPB劈裂实验数据验证^{a)}

Table 4 Validation with experimental data of SHPB split tension test^{a)}

样品编号	钢纤维类别	钢纤维体积率 (%)	试验压强 (MPa)	模拟压强 (MPa)	误差 (%)
S1505-1	MF15	0.5	25.729	25.635	0.365
S1505-2	MF15	0.5	20.327	20.367	0.198
S1510-1	MF15	1.0	28.086	27.327	2.705
S1510-2	MF15	1.0	25.153	27.295	8.516
S1525-1	MF15	2.5	28.625	27.741	3.089
S1525-2	MF15	2.5	28.625	27.600	3.582

a) 样品编号解释如下: 第一个字母表示劈裂(S)模型; 第2和第3个数表示钢纤维的长度; 第4和第5个数字表示钢纤维的体积含量率(0.5%, 1.0%, 2.5%); 最后一个数字表示数值模拟试件的编号.

4.1 数值模拟结果

采集的数据按照传统的三波法进行处理. SHPB细观数值模拟的应力-应变曲线和应力时程曲线如图11和12所示. 动态强度模拟结果如表5和6所示.

4.2 动态压缩性能

钢纤维在UHPSFRC的作用得到很好的体现, 即提

高UHPSFRC的强度和延性. 通过对比细观数值模型和试验结果, 钢纤维对UHPSFRC动态性能的影响显著. 在动态冲击加载条件下, 钢纤维对UHPSFRC的最大贡献是提高强度和韧性, UHPSFRC的强度和韧性是重要的性能指标. 混凝土韧性一般定义为混凝土材料或构件在荷载作用下吸收能量直至破坏的特性. 从图11中可以看出, 随着应变速率的增加, 各组UHPSFRC试件

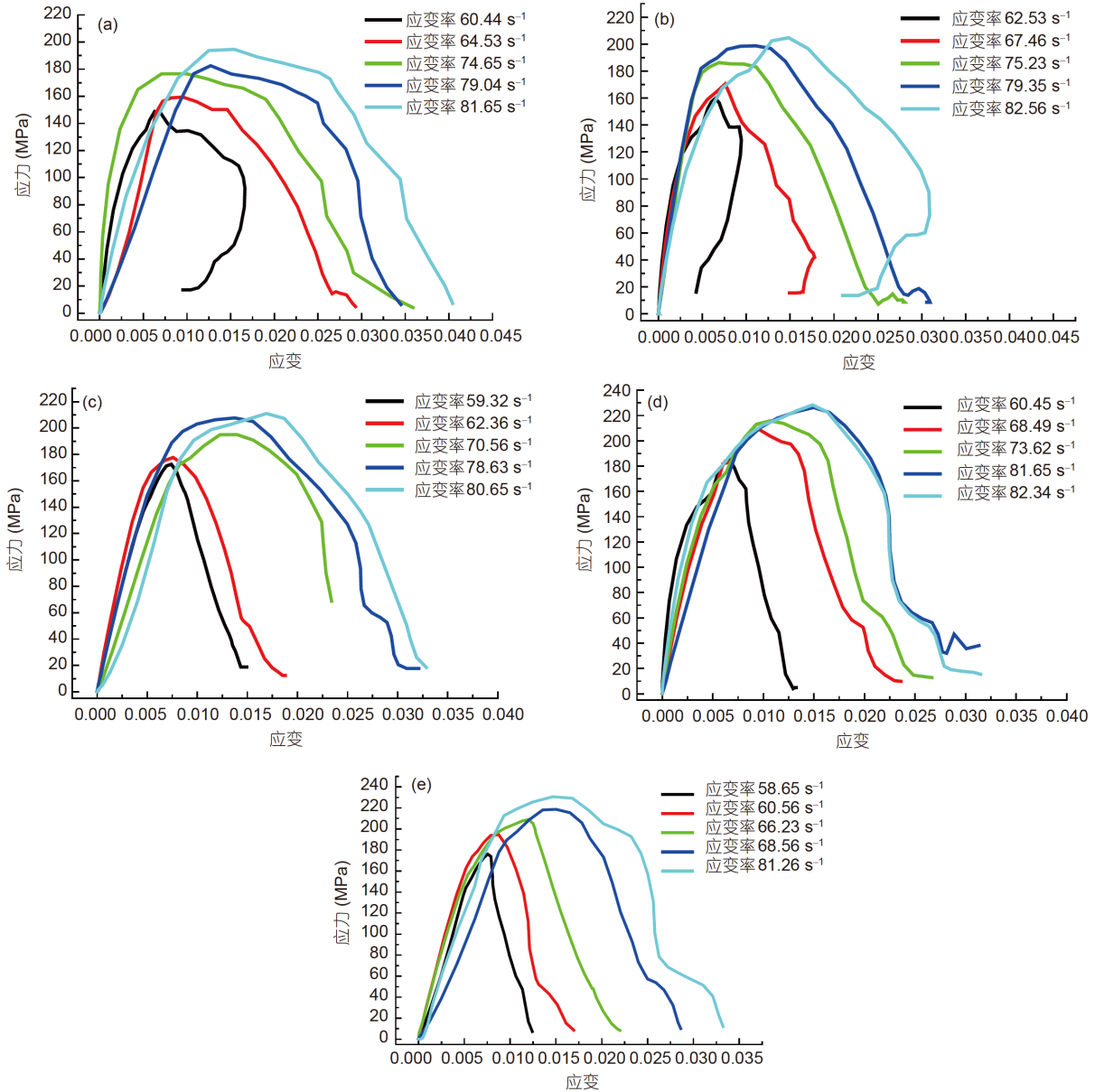


图 11 (网络版彩图) UHPSFRC SHPB压缩细观数值模拟结果. (a) 0.5% MF15; (b) 1.0% MF15; (c) 1.5% MF15; (d) 2.0% MF15; (e) 2.5% MF15

Figure 11 (Color online) The simulation result for SHPB compression of UHPSFRC. (a) 0.5% MF15; (b) 1.0% MF15; (c) 1.5% MF15; (d) 2.0% MF15; (e) 2.5% MF15.

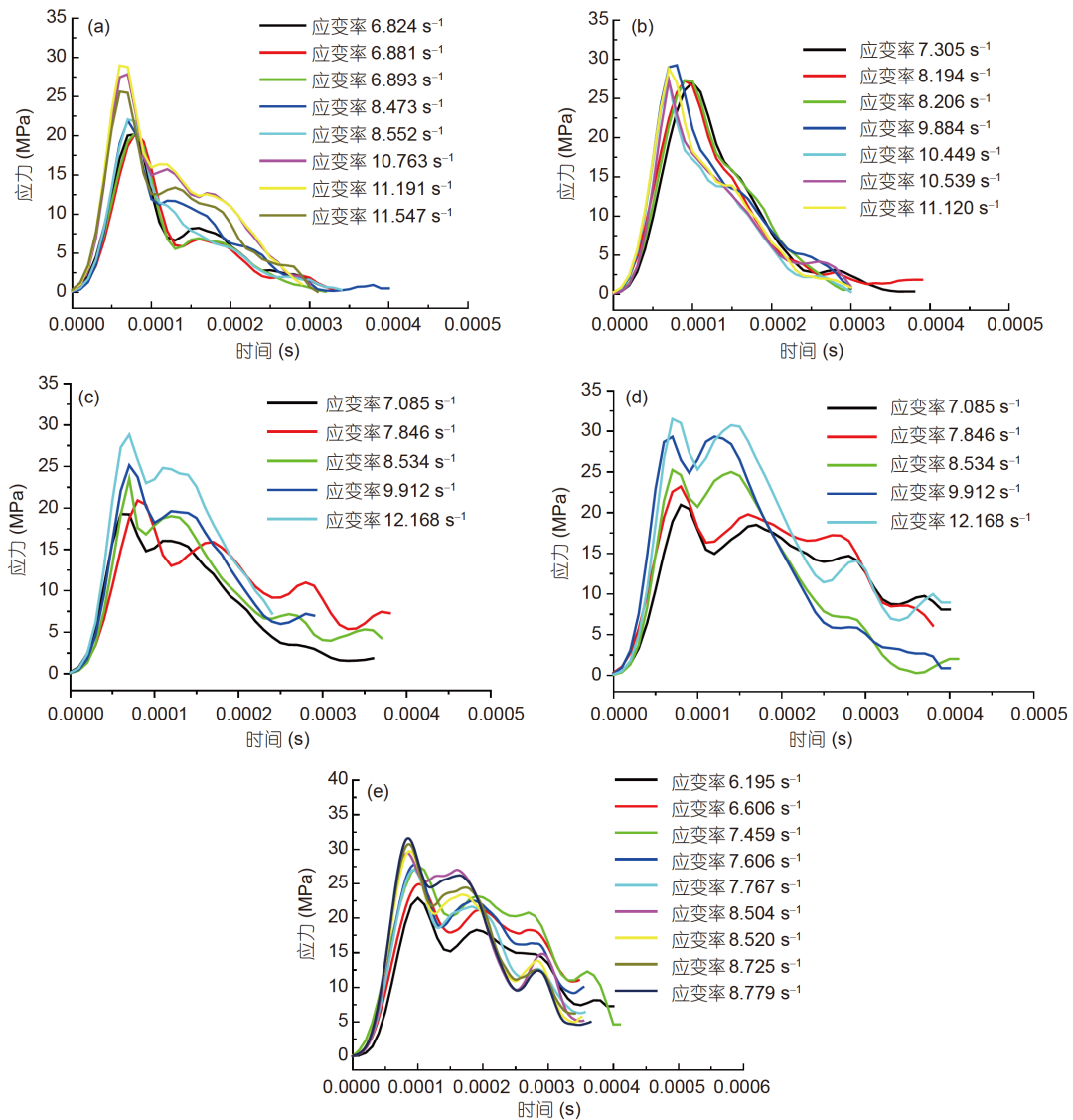


图 12 (网络版彩图) UHPSFRC SHPB劈裂微观数值模拟结果. (a) 0.5% MF15; (b) 1.0% MF15; (c) 1.5% MF15; (d) 2.0% MF15; (e) 2.5% MF15

Figure 12 (Color online) The simulation result for SHPB split tension of UHPSFRC. (a) 0.5% MF15; (b) 1.0% MF15; (c) 1.5% MF15; (d) 2.0% MF15; (e) 2.5% MF15.

的应力应变曲线逐渐变宽变长, 表明UHPSFRC试件在变形过程中吸收的能量不断增加. 图13为UHPSFRC各模型随应变速率的应力应变曲线下面积, 可以清楚地看到, UHPSFRC的韧性随着钢纤维体积比的增大而增大. 在相同的应变率下, 随着钢纤维体积率的增大, 韧性增大. 这是因为随着钢纤维含量的增大, 钢纤维的数量就越多, 在试件裂纹扩展过程中吸收的能量越多, UHPSFRC试样的韧性就会越大.

不同体积率的UHPSFRC动态抗压强度的DIF曲

线如图14所示, 由图可知, 随着应变率的增大, DIF值迅速增大; 在应变率小于 65 s^{-1} 时, 钢纤维体积率对UHPSFRC动态强度影响明显, 而在应变率大于 65 s^{-1} 时, 钢纤维体积率对UHPSFRC动态强度影响较低.

4.3 动态劈裂性能

图12为UHPSFRC的SHPB劈裂数值模拟结果, 给出了不同钢纤维体积率下UHPSFRC试件的应力时程曲线. 从图12可以看出, 随着应变速率的增加, 动态劈

表 5 SHPB压缩数值模拟结果^{a)}

Table 5 The results of SHPB compression simulation^{a)}

样品编号	应变率 (s^{-1})	应力 (MPa)	Peak strain	曲线下面积	DIF
C1505-1	60.44	148.774	0.0063	0.566	1.152
C1505-2	64.53	159.377	0.0096	0.948	1.234
C1505-3	74.65	176.609	0.0100	2.770	1.368
C1505-4	79.04	182.551	0.0128	2.970	1.414
C1505-5	81.65	194.614	0.0155	4.139	1.507
C1510-1	62.53	159.690	0.0065	0.848	1.180
C1510-2	63.46	170.425	0.0076	1.960	1.259
C1510-3	75.23	186.231	0.0103	3.109	1.376
C1510-4	79.35	198.706	0.0142	3.945	1.468
C1510-5	82.56	204.722	0.0157	4.346	1.512
C1515-1	59.32	172.530	0.0084	1.461	1.210
C1515-2	62.36	177.675	0.0086	1.959	1.246
C1515-3	70.56	195.036	0.0110	3.366	1.368
C1515-4	78.63	207.665	0.0137	4.434	1.457
C1515-5	80.65	211.022	0.0169	4.560	1.480
C1520-1	60.45	185.236	0.0067	1.497	1.267
C1520-2	68.49	209.271	0.0095	2.831	1.432
C1520-3	73.62	215.735	0.0107	3.471	1.476
C1520-4	81.65	226.285	0.0143	4.363	1.548
C1520-5	82.34	228.328	0.0133	4.491	1.562
C1525-1	58.65	176.087	0.0076	1.558	1.172
C1525-2	60.56	194.545	0.0088	1.836	1.294
C1525-3	66.23	209.063	0.0120	2.676	1.391
C1525-4	68.56	218.685	0.0118	3.716	1.455
C1525-5	81.26	230.677	0.0146	4.898	1.535

a) 样品编号解释如下: 第一个字母表示压缩(C)模型; 第2和第3个数表示钢纤维的长度; 第4和第5个数字表示钢纤维的体积含量率(0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5%); 最后一个数字表示数值模拟试件的编号.

裂拉伸强度增加,但在一定的应变率下,动态劈裂拉伸强度增长较小;随着钢纤维体积率的增大,阈值减小.

不同体积率的UHPSFRC动态劈裂DIF值如图15所示.由图中可以看出,随着钢纤维体积率的增大,DIF值减小;钢纤维在高应变率加载下对动态强度的敏感性较低,而钢纤维体积率越大的UHPSFRC材料的强度增强效果越小.

5 UHPSFRC的本构关系研究

5.1 UHPSFRC本构关系的建立

通过实验和细观数值模拟,发现UHPSFRC动态抗

压的应力-应变曲线具有以下特点: (1) UHPSFRC强度有明显的纤维增强效果,随着钢纤维含量的增加,UHPSFRC动态强度明显提高; (2) UHPSFRC强度具有明显的应变率强化效应,UHPSFRC动态强度随应变率的增加而增大; (3) UHPSFRC动态抗压应力-应变曲线有明显的损伤软化行为,这种损伤软化行为反映了材料内部微裂纹的出现和扩展,直到破坏过程收敛.

因此,UHPSFRC动态本构关系的建立需要合理地反映这些基本的物理事实.从上面的分析,如果假设钢纤维增强和应变率增强是两个独立的增强因子,它可以使用 K_f , K_s 分别代表钢纤维增强因子和应变率增强因子.

表6 SHPB劈裂数值模拟结果^{a)}

Table 6 The results of SHPB split tension simulation^{a)}

样品编号	应变率 (s ⁻¹)	应力 (MPa)	DIF	样品编号	应变率 (s ⁻¹)	应力 (MPa)	DIF
S1505-1	6.824	20.199	1.507	S1515-3	9.085	23.531	1.253
S1505-2	6.881	20.367	1.520	S1515-4	9.706	25.139	1.339
S1505-3	6.893	20.402	1.523	S1515-5	11.131	28.828	1.535
S1505-4	8.473	21.944	1.638	S1520-1	7.085	20.971	1.117
S1505-5	8.522	22.073	1.647	S1520-2	7.846	23.224	1.237
S1505-6	10.763	27.876	2.080	S1520-3	8.534	25.262	1.345
S1505-7	11.191	28.984	2.163	S1520-4	9.912	29.341	1.562
S1505-8	11.547	25.635	1.913	S1520-5	12.168	31.516	1.678
S1510-1	7.305	27.028	1.551	S1525-1	6.195	22.920	1.033
S1510-2	8.194	27.285	1.565	S1525-2	6.606	24.929	1.124
S1510-3	8.206	27.327	1.568	S1525-3	7.459	27.613	1.244
S1510-4	8.894	26.326	1.510	S1525-4	7.606	27.735	1.251
S1510-5	9.884	29.256	1.678	S1525-5	7.767	27.015	1.218
S1510-6	10.449	27.063	1.553	S1525-6	8.504	29.444	1.327
S1510-7	10.539	27.295	1.566	S1525-7	8.520	29.738	1.341
S1510-8	11.120	28.800	1.652	S1525-8	8.725	30.760	1.387
S1515-1	6.511	19.272	1.026	S1525-9	8.779	31.614	1.245
S1515-2	8.076	20.918	1.114				

a) 样品编号解释如下: 第一个字母表示劈裂(S)模型; 第2和第3个数表示钢纤维的长度; 第4和第5个数字表示钢纤维的体积含量率(0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5%); 最后一个数字表示数值模拟试件的编号.

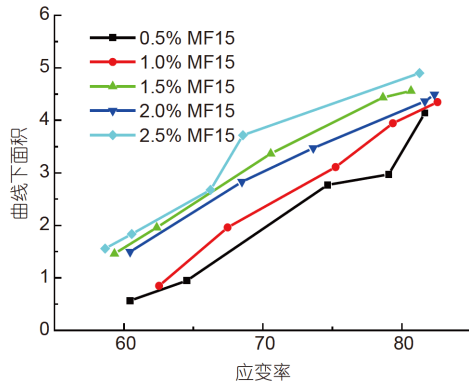


图13 (网络版彩图) UHPSFRC试件应力-应变曲线围合面积

Figure 13 (Color online) Enclosed area by stress-strain curves of UHPSFRC specimens.

UHPSFRC动态抗压应力应变曲线统一表示为

$$\sigma = EK_f K_{\dot{\epsilon}} \epsilon (1 - D), \quad (1)$$

其中, E 表示UHPSFRC的杨氏模量; D 表示损伤量, $0 \leq D \leq 1$; $K_f = \sigma / \sigma_0$, σ_0 表示不参加钢纤维UHPSFRC的

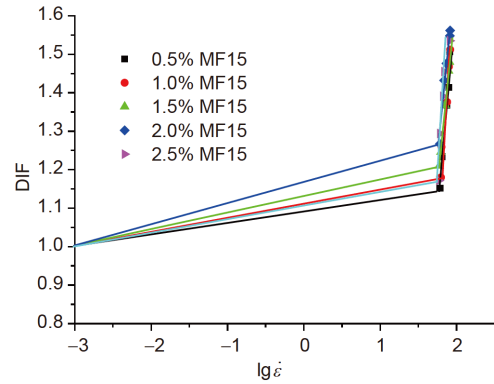


图14 (网络版彩图) SHPB压缩模拟的UHPSFRC动态增长因子曲线

Figure 14 (Color online) Dynamic increase factor curves of UHPSFRC from SHPB compressive simulation.

强度; $K_{\dot{\epsilon}} = \text{DIF} = \sigma / \sigma_s$, σ_s 表示UHPSFRC的静态强度.

显然, 方程(1)表示的UHPSFRC非线性行为应力-应变曲线完全由损伤量 D , 钢纤维增强因子 K_f 和应变率增强因子 $K_{\dot{\epsilon}}$ 确定.

在相同应变率下, 钢纤维增强系数 K_f 与钢纤维体

积比的关系如图16所示. 从图中可以看出, 钢纤维的增强效果随着钢纤维体积比的增大而增大, 并逐渐趋于稳定值, 说明钢纤维的增强效果是有限的. 图14为UHPSFRC动态压缩模拟DIF曲线, 反映了材料强度应变率的增强效果. 通过回归分析, 得到 K_f , K_ε 的方程为

$$K_f = 1.00 + 0.51V_f - 0.02(V_f)^2, \quad (2)$$

$$K_\varepsilon = -18.43 + 19.28\lg\varepsilon - 4.63(\lg\varepsilon)^2. \quad (3)$$

在以往的研究中, 许多学者^[17-21]在对混凝土和纤维增强复合材料的动态本构研究中, 使用损伤的威布尔分布来描述应力-应变曲线中的非线性行为, 并取得了较好的结果. 受此启发, 本研究将损伤量 D 取下式来描述损伤材料的非线性行为:

$$D = 1 - \exp\left[-\frac{(\varepsilon - \varepsilon^*)^m}{a}\right], \quad (4)$$

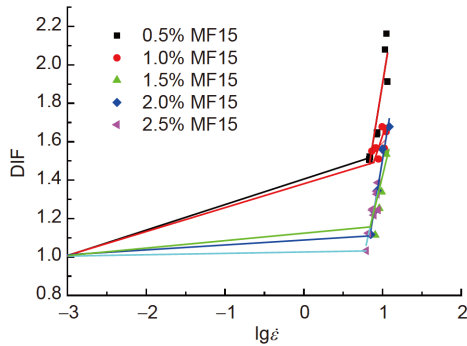


图15 (网络版彩图) SHPB劈裂张力模拟UHPSFRC动态增长因子曲线

Figure 15 (Color online) Dynamic increase factor curves of UHPSFRC from SHPB split tension simulation.

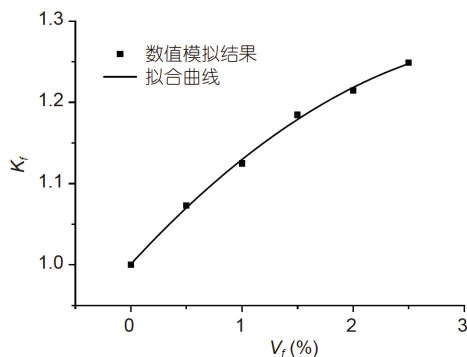


图16 钢纤维对UHPSFRC的增强效应

Figure 16 Reinforcement of the steel fiber.

其中 m , a 是跟纤维含量和应变率有关的材料参数; ε^* 表示材料损伤积累开始的阈值应变, 在曲线拟合中, $\varepsilon^* = 0.55\varepsilon_{pk}$, ε_{pk} 表示峰值应变.

因此, UHPSFRC的动态本构关系可以用方程(1)表示, 其中 K_f , K_ε 和 D 分别由式(2)-(4)计算确定.

5.2 本构模型验证

根据试验和细观数值模拟结果, 对 m , a 的值进行线性回归, 取 $m=2$, $a=0.0002$. 使用上述本构关系拟合UHPSFRC动态应力-应变曲线, 并与试验结果进行对比, 如图17所示, 图线拟合较好.

由图17可知, 所给出的动态本构方程(1)与数值模拟曲线以及试验结果吻合良好, 可以反映UHPSFRC应力-应变曲线的基本特征. 从图中可以看出, 当应变小于损伤阈值应变 ε^* 时, 应力和应变之间为线性关系; 当应变处于阈值应变与峰值应变之间时, 虽然此时损伤已经开始发展, 但由于应变硬化效应占主导地位, 应力仍随应变的增加呈非线性上升关系; 当应变大于峰值应变时, 微裂纹进入发展阶段, 损伤迅速累积, 应力随着应变的增大迅速减小, 直至UHPSFRC材料破坏.

6 结论

本文提出了考虑钢纤维随机分布的细观数值模型, 研究了UHPSFRC材料在动态载荷作用下的性能, 得到以下结论: (1) 本文细观数值方法与试验结果吻合良好, 能够很好地模拟UHPSFRC的静动态力学性

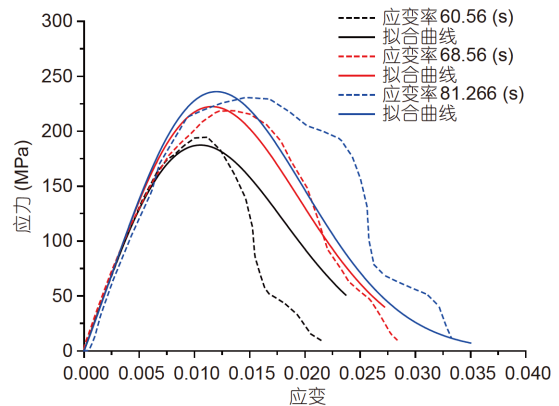


图17 (网络版彩图)动态本构模型拟合曲线($V_f=2.5\%$)

Figure 17 (Color online) Dynamic constitutive fitted curves ($V_f=2.5\%$).

能. (2) 通过数值模拟和实验结果比较, 可以看出细观数值模型能够较好地预测钢纤维对UHPSFRC的影响. (3) 通过该数值模型解释了钢纤维的动态应力-应变曲线, 在细观模型中可以清楚地看到纤维增强效果. (4) 利用该细观数值模型, 可以较好地预测UHPSFRC

在不同加载条件下的动态响应. (5) 针对UHPSFRC应力-应变曲线的基本特征, 提出了包含钢纤维增强效应和应变率增强效应的动态损伤本构模型, 此本构关系能较好地反映冲击荷载下UHPSFRC加载过程的主要特性.

参考文献

- 1 Brandt A M. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. *Comp Struct*, 2008, 86: 3–9
- 2 Song P S, Hwang S. Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. *Construct Building Mater*, 2004, 18: 669–673
- 3 Hao Y, Hao H. Dynamic compressive behaviour of spiral steel fibre reinforced concrete in split Hopkinson pressure bar tests. *Construct Building Mater*, 2013, 48: 521–532
- 4 Su Y, Li J, Wu C, et al. Effects of steel fibres on dynamic strength of UHPC. *Construct Building Mater*, 2016, 114: 708–718
- 5 Li J, Wu C, Hao H. An experimental and numerical study of reinforced ultra-high performance concrete slabs under blast loads. *Mater Des*, 2015, 82: 64–76
- 6 Li J, Wu C, Hao H, et al. Experimental investigation of ultra-high performance concrete slabs under contact explosions. *Int J Impact Eng*, 2016, 93: 62–75
- 7 Du X L, Jin L. A review on meso-mechanical method for studying the static-mechanical properties of concrete (in Chinese). *Adv Mech*, 2011, 41: 411–426 [杜修力, 金浏. 混凝土静态力学性能的细观力学方法述评. *力学进展*, 2011, 41: 411–426]
- 8 Fang Q, Zhang J. Three-dimensional modelling of steel fiber reinforced concrete material under intense dynamic loading. *Construct Building Mater*, 2013, 44: 118–132
- 9 Jin L, Hao H M, Zhang R B, et al. Meso-scale simulations of dynamic splitting tensile behavior of concrete at elevated temperature (in Chinese). *Explosion Shock Waves*, DOI: 10.11883/bzycj-2018-0401 [金浏, 郝慧敏, 张仁波, 等. 混凝土高温动态劈拉行为细观数值分析. *爆炸与冲击*, DOI: 10.11883/bzycj-2018-0401]
- 10 Jin L, Su X, Du X L. Study on shear performances of reinforced concrete cantilever beam using 3D meso-scale simulation method (in Chinese). *Eng Mech*, 2017, 34: 59–66 [金浏, 苏晓, 杜修力. 基于三维细观数值方法的钢筋混凝土悬臂梁抗剪行为研究. *工程力学*, 2017, 34: 59–66]
- 11 Jin L, Xu J D, Zhang R B, et al. A mesoscale numerical simulation method for anti-impact performance of RC beams (in Chinese). *J Vibrat Shock*, 2018, 37: 57–65 [金浏, 徐建东, 张仁波, 等. 钢筋混凝土梁抗冲击性能研究的细观数值模拟方法. *振动与冲击*, 2018, 37: 57–65]
- 12 Su Y, Li J, Wu C, et al. Mesoscale study of steel fibre-reinforced ultra-high performance concrete under static and dynamic loads. *Mater Des*, 2017, 116: 340–351
- 13 Zhao Q S, Xu S C, Liu Z X. Microscopic numerical simulation of the uniaxial compression of steel fiber reinforced ultra-high performance concrete (in Chinese). *Acta Mater Comp Sin*, 2018, 35: 1661–1673 [赵秋山, 徐慎春, 刘中宪. 钢纤维增强超高性能混凝土抗压性能的细观数值模拟. *复合材料学报*, 2018, 35: 1661–1673]
- 14 LS-DYNA. Keyword User's Manual. Livermore: Livermore Software Technology Coporation, 2006
- 15 Shi Y, Li Z X, Hao H. Bond slip modelling and its effect on numerical analysis of blast-induced responses of RC columns. *Struct Eng Mech*, 2009, 32: 251–267
- 16 Su Y, Li J, Wu C, et al. Influences of nano-particles on dynamic strength of ultra-high performance concrete. *Comp Part B-Eng*, 2016, 91: 595–609
- 17 Mei G D. Study on Uniaxial Tensile Properties and Constitutive Relation of Steel-polypropylene Hybrid Fiber Reinforced Concrete (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Wuhan: Wuhan University, 2014 [梅国栋. 钢-聚丙烯混杂纤维混凝土单轴受拉性能与本构关系研究. 博士学位论文. 武汉: 武汉大学, 2014]
- 18 Song H B. Compressive Behavior and Constitutive equation of 3-D Braid Steel Fiber Reinforced Concrete (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011 [宋海滨. 三维编织钢纤维增强混凝土(3D-BSFC)力学性能和本构方程. 硕士学位论文. 南京: 南京航空航天大学, 2011]

- 19 Liu Y S, Wang X J, Jin T, et al. Study on the mechanical properties and constitutive relation of steel fiber reinforced concrete (in Chinese). *J Univ Sci Technol China*, 2007, 7: 717–723 [刘永胜, 王肖钧, 金挺, 等. 钢纤维混凝土力学性能和本构关系研究. *中国科学技术大学学报*, 2007, 7: 717–723]
- 20 Xu S H, Wang X J, Zhang G M, et al. Experimental investigation on the dynamic compression properties of kevlar fiber reinforced composite laminates (in Chinese). *J Exp Mech*, 2001, 1: 26–33 [许沐华, 王肖钧, 张刚明, 等. Kevlar纤维增强复合材料动态压缩力学性能实验研究. *实验力学*, 2001, 1: 26–33]
- 21 Dong Y L, Xie H P, Li S P. Continuum damage mechanics constitutive model of concrete under compression (in Chinese). *Eng Mech*, 1996, 1: 44–53 [董毓利, 谢和平, 李世平. 砼受压损伤力学本构模型的研究. *工程力学*, 1996, 1: 44–53]

Numerical simulation of SHPB test of ultra-high performance fiber reinforced concrete with meso-scale model

WU PengTao¹, WU ChengQing², LIU ZhongXian^{3*} & XU ShenChun^{4*}

¹ School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

² School of Civil and Environmental Engineering, University of Technology Sydney, Sydney 100044, Australia;

³ Tianjin Key Laboratory of Civil Structure Protection and Reinforcement, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;

⁴ School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China

Ultra-high performance steel fiber-reinforced concrete is an innovative cement-based composite material with excellent mechanical properties and outstanding potential in resisting extreme loads. In this study, a meso model of ultra-high performance steel fiber-reinforced concrete specimen, which consists of cement mortar and fibers, is developed to numerically simulate Split Hopkinson pressure bar (SHPB) tests for investigation of behavior of ultra-high performance steel fiber-reinforced concrete material under impact loading. The software LS_DYNA is used to perform the numerical simulation of dynamic tests. A good agreement is observed between the simulated results and experimental results. After the meso model is validated with static compression and split tension tests, SHPB tests are numerically modelled and the stress-strain history is interpreted in the meso-scale level. The influence of fiber on ultra-high performance steel fiber-reinforced concrete in dynamic tests is investigated. Within a reasonable range of steel fiber volume ratio (optimum volume ratio ranges from 0%–2.5% for micro steel fiber), the dynamic strength of ultra-high performance steel fiber-reinforced concrete increases significantly with the increase of steel fiber volume ratio, however, the contributions of fibers to Dynamic Increase Factors (DIF) of ultra-high performance steel fiber-reinforced concrete are constantly lower than those of conventional concrete material. The proposed model qualitatively and quantitatively predicts the material static and dynamic behaviors, and also gives insights on the fiber reinforcement effect in the concrete matrix. In this study, the dynamic constitutive relationships of ultra-high performance fiber-reinforced concrete are derived for predicting the dynamic strength of ultra-high performance fiber-reinforced concrete with different steel fiber volume ratios and strain rates.

ultra-high performance fiber-reinforced concrete (UHPSFRC), Split Hopkinson pressure bar (SHPB), meso-scale model, steel fiber, strain rate, steel fiber volume ratio

PACS: 28.41.Qb, 28.52.Fa, 05.10.-a

doi: [10.1360/SSPMA-2019-0187](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0187)