

钢纤维增强超高性能混凝土抗压性能的 细观数值模拟

赵秋山¹, 徐慎春², 刘中宪^{*1}

(1. 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; 2. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

摘要: 利用 LS-DYNA 软件在细观层次上建立了三维钢纤维增强超高性能混凝土(Steel fiber reinforced ultra-high performance concrete, SF/UHPC)圆柱体试件有限元模型, 对其轴心受压下的力学性能和裂缝发展进行了数值模拟。在验证细观数值模型的有效性和合理性的基础上进行参数分析, 着重研究了钢纤维体积率、钢纤维长径比、形状效应和尺寸效应对超高性能钢纤维混凝土抗压强度、韧性和破坏形态的影响。最终, 根据模拟结果拟合了超高性能钢纤维混凝土抗压强度计算公式。结果表明: 三维超高性能钢纤维混凝土细观模型可以较好地模拟单轴受压应力条件下混凝土的静力性能和损伤破坏机制, 所拟合的公式也能较好地预测超高性能钢纤维混凝土的抗压强度。

关键词: 钢纤维增强超高性能混凝土; 单轴受压; 形状效应; 尺寸效应; 纤维体积率; 数值模拟

中图分类号: TB332 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2018)06-1661-13

Microscopic numerical simulation of the uniaxial compression of steel fiber reinforced ultra-high performance concrete

ZHAO Qiushan¹, XU Shenchun², LIU Zhongxian^{*1}

(1. Tianjin Key Laboratory of Civil Structure Protection and Reinforcement, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The finite-element model of three-dimensional steel fiber reinforced ultra-high performance concrete (SF/UHPC) cylindrical specimen was developed on the mesoscopic level by utilizing LS-DYNA, and the mechanical properties and crack development of which under axial compression were numerically simulated. Based on the verification of the validity and rationality of above-mentioned mesoscopic numerical model, the effects of steel fiber volume fraction, aspect ratio, shape and size on compressive strength, toughness and failure mode of SF/UHPC were studied emphatically. Finally, the formula for predicting the compressive strength of SF/UHPC was fitted according to the simulation results. The results indicate that the developed mesoscopic model in this paper for simulating SF/UHPC can well characterize the static performance and damage mechanism of concrete under uniaxial compression stress, and the fitting formula can also predict the compressive strength of SF/UHPC.

Keywords: steel fiber reinforced ultra-high performance concrete (SF/UHPC); uniaxial compression; shape effect; size effect; fiber volume fraction; numerical simulation

钢纤维增强超高性能混凝土(Steel fiber reinforced concrete ultra-high performance, SF/UHPC)是极具创新性的钢纤维增强水泥基复合材料, 具有超高强度、高耐久性和超高韧性等优异的力学性能^[1-4], 被广泛地应用于大跨径桥梁、抗爆结构和

高层建筑等工程结构中。国内众多学者已对其力学性能进行了研究, 如王文谈等^[5]通过实验研究了钢纤维体积掺量对 SF/UHPC 抗压和抗弯曲性能的影响; 徐慎春等^[6]通过实验研究了钢纤维和纳米材料对超高性能混凝土早期力学性能的影响; 鞠彦忠

收稿日期: 2017-06-02; 录用日期: 2017-08-28; 网络出版时间: 2017-08-31 16:33

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170831.001>

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2015CB058002), 天津市科技支撑计划项目(14ZCZDSF00016)

通讯作者: 刘中宪, 教授, 博士后, 研究生导师, 研究方向为工程波动、地下结构抗震与抗爆领域 E-mail: zhongxian1212@163.com

引用格式: 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[J]. 复合材料学报, 2018, 35(6): 1661-1673.

ZHAO Q S, XU S C, LIU Z X. Microscopic numerical simulation of the uniaxial compression of steel fiber reinforced ultra-high performance concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(6): 1661-1673 (in Chinese).

等^[7]通过实验研究了不同钢纤维体积率对活性粉末混凝土基本力学性能的影响,拟合得到了抗折强度与劈拉强度的关系表达式,建立了掺入不同纤维体积率RPC应力-应变全曲线的数学表达式。但是,实验研究只能在宏观层面观察SF/UHPC性能,而SF/UHPC是多相复合材料,其成分复杂,内部构成材料具有随机性,是典型的非均质材料,其破坏过程和力学性能非常复杂。数值模拟是在细观层面研究非均质材料力学性能和损伤破坏机制的有效手段^[8]。因此,使用数值模拟方法建立SF/UHPC的细观有限元模型,不仅能够更有效地分析SF/UHPC的力学性能,还可以进一步研究SF/UHPC破坏后裂缝的形成和发展,更好地揭示SF/UHPC的损伤破坏机制。

目前国内外已有学者通过混凝土细观模型研究混凝土材料的力学特性。例如,Grassl等^[9]通过二维细观力学格构模型研究了混凝土单轴受拉下试件的破裂过程;Xu等^[10]通过二维钢纤维增强混凝土细观模型,进行了动力冲击荷载下钢纤维增强混凝土力学性能研究;杜修力等^[11]通过建立非均质混凝土三维细观模型,对单轴受压下湿筛混凝土试件的破坏过程及宏观力学性能进行了研究;金浏等^[12]分别从宏观和细观尺度入手,对单轴受压条件下钢筋混凝土柱破坏过程进行研究,得出了细观模型能更真实地揭示混凝土柱的破坏过程与破坏形态的结论。需指出的是,上述研究均针对普通强度混凝土构件,通过三维细观有限元模型研究SF/UHPC力学性能的公开报道很少,值得对其进行深入地细观模型分析和参数讨论。

本文建立了SF/UHPC圆柱形试件的三维细观有限元模型,通过与实验结果的对比分析,验证有限元模型有效性。在此基础上,分析其在单轴受压状态下的力学性能,然后通过参数分析进一步研究钢纤维体积率、钢纤维长径比、形状效应和尺寸效应等主要参数对UHPC抗压强度、韧性和破坏形态的影响。最终,根据模拟结果拟合了SF/UHPC的抗压强度计算公式,为后续更加深入地研究SF/UHPC性能奠定了理论基础。

1 SF/UHPC 细观数值模型

1.1 SF/UHPC 细观数值模型的建立

本文所建立的SF/UHPC三维细观模型如图1所示,主要分为两部分,分别为均质SF/UHPC基

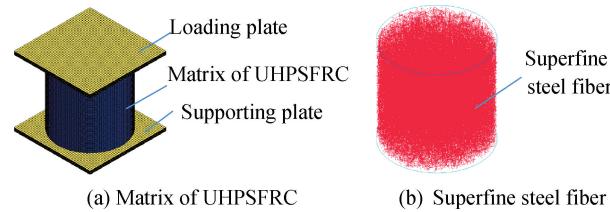


图1 钢纤维增强超高性能混凝土(SF/UHPC)有限元模型

Fig. 1 Finite element model of steel fiber reinforced ultra-high performance concrete (SF/UHPC)

体(图1(a))和钢纤维增强体(图1(b))。与试验条件一致,位移荷载通过上端板施加,下端板主要起支撑作用,试件与端板之间通过自动单面接触算法传递荷载,此算法能够处理各种复杂接触非线性问题,计算消耗也较少。同时,考虑到端板对SF/UHPC试件具有环箍效应,在端板与试件之间设置了静摩擦,摩擦系数取为0.6^[13]。

1.1.1 本构模型

SF/UHPC基体采用K&C模型,其优点是LS-DYNA能够根据混凝土单轴抗压强度自动生成一系列本构参数。虽然,这些参数是基于普通混凝土力学性能得到的,但仍然可以通过适当调整获取适用于SF/UHPC基体的本构参数。值得注意的是Xu等^[14]验证了采用K&C材料模型分析SF/UHPC力学性能的可行性,并系统提出了获取SF/UHPC材料模型参数的方法。本文结合试验数据与Xu等^[10]提出的方法获取了适用于SF/UHPC的K&C材料模型参数,见表1。钢纤维采用JC模型,此模型已被广泛应用于模拟钢纤维的非线性行为^[15];端板采用塑性随动强化模型,此模型被广泛地应用于模拟各类钢材力学性能,并且计算消耗较少。具体材料参数见表1。

1.1.2 单元类型及失效准则

本文UHPC基体和端板采用三维八节点常应力实体单元,其优点是位移求解计算结果较精确、省时,有利于克服材料非线性和单元的大变形所造成的计算困难。但应注意的是单点积分会带来沙漏模式,会进一步造成计算困难,LS-DYNA具有多种算法用于抑制沙漏模式,本文采用基于刚性的沙漏控制,沙漏系数(QM)取为0.02。钢纤维采用Hughes-Liu梁单元,其具有良好的计算效率和鲁棒性,并能处理剪切应变。

此外,LS-DYNA提供了多种单元失效准则,主要有基于应变的失效准则和基于应力的失效准

表 1 钢纤维增强超高性能混凝土(SF/UHPC)材料参数

Table 1 Material parameters of steel fiber reinforced ultra-high performance concrete (SF/UHPC)

Material	Material model	Input parameter	Value
UHPC matrix	K&C model	Density/(kg·m ⁻³)	2 450
		Unconfined compressive strength/MPa	90
		Poisson's ratio	0.19
Steel fiber	JC model	Density/(kg·m ⁻³)	7 830
		Young's modulus/GPa	210
		Poisson's ratio	0.28
Pressure bars	Plastic kinematic hardening model	Density/(kg·m ⁻³)	7 830
		Young's modulus/GPa	210
		Poisson's ratio	0.28

则。尽管单元失效并不代表材料真正的物理特性, 但其能够克服单元畸变所造成的计算困难, 并能够表征混凝土的宏观损伤。实验结果表明 SF/UHPC 破坏时主要为压缩剪切破坏。因此本文采用了最大等效应变准则, 即当单元最大等效应变达到 0.06 时单元便被删除, 不再参与计算。

考虑到计算的精确性与计算量的限制, SF/UHPC 单元尺寸取 1 mm, 钢纤维单元尺寸取 3 mm。整个有限元模型共有 591 740 个单元, 其中梁单元 115 740 个、实体单元 476 000 个。

1.1.3 三维钢纤维模型生成

钢纤维生成步骤如下: (1)根据钢纤维体积率计算出需投放钢纤维根数; (2)使用 MATLAB 伪随机数功能, 生成随机分布的三维钢纤维几何坐标; (3)将上述坐标导入 ANSYS/LSDYNA 并生成三维钢纤维模型; (4)赋予材料属性, 进行网格划分。

值得注意的是, 钢纤维与混凝土之间的相互作用十分复杂, 加之引入相互作用后计算量急剧增大, 因此现有研究大多不考虑两者之间的相互作用, 即假定二者之间的粘结为理想状态, 亦取得了很好的模拟结果^[16-17]。因此, 本文亦采用此假定, 不考虑二者的相互作用。

2 实验验证

为验证所建立的细观有限元模型的有效性, 开展了 SF/UHPC 圆柱体抗压实验, 主要测定了未掺入及掺入 0.5% 钢纤维的 UHPC 圆柱体的抗压性能。然后, 进行模拟结果与实验结果的比较分析, 主要对比了应力-应变曲线及其特征值和试件破坏形态, 进而验证本文细观模型的有效性。

2.1 实验设计

本实验 SF/UHPC 基体设计强度等级为 C90, 增强体材料采用长直型超细钢纤维, 长为 15 mm,

直径为 0.12 mm(图 2), 主要性能见表 2。SF/UHPC 试件具体参数见表 3。细骨料采用石英砂(粒径 0.3~0.6 mm), 水泥为 52.5 级普通硅酸盐水泥。硅灰与聚羧酸型高效减水剂主要参数列于表 4~5。

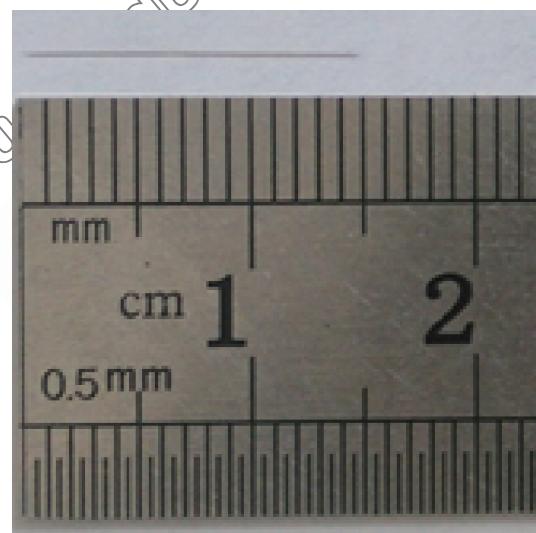


图 2 长直型超细钢纤维

Fig. 2 Superfine steel fiber

表 2 长直型超细钢纤维性质

Table 2 Properties of superfine steel fiber

Type	Diameter/mm	Length/mm	Tensile strength/MPa
Superfine steel fiber	0.1~0.12	15	>4 000

表 3 SF/UHPC 试件参数

Table 3 Parameters of specimens of SF/UHPC

Specimen number	$\rho_f/\%$	H/mm	D/mm	H/D
1	0	100	100	1
2	0.5	100	100	1

Notes: 1—Matrix of UHPC without any fiber; 2—Matrix of UHPC with superfine fiber; ρ_f —Steel fiber volume fraction; H—Height of cylindrical SF/UHPC; D—Diameter of cylindrical SF/UHPC; H/D—Height-to-diameter ratios of cylindrical SF/UHPC



图 3 SF/UHPC 试件
Fig. 3 Specimen of SF/UHPC

表 4 硅灰性质

Table 4 Properties of silica fume

Properties	Description
Component	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , MgO, CaO
Average particle size/ μm	0.1—0.3
Specific surface area/($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	20—28

表 5 减水剂性质

Table 5 Properties of super plasticizer

Properties	Description
Form	Liquid
Color	Yellow brown
pH value	6.0—8.0
Solid content	36%
Water-reducing rate	>30%
Chlorine ion content	<0.1%

2.2 实验过程

实验采用济南东测实验机技术有限公司的 YAW-3000 普通电液伺服压力实验机进行加载, 实

验装置如图 4 所示。根据《纤维混凝土实验方法标准》^[18]相关规定, 采用力-位移混合加载方式, 开始时采用力控制方式加载, 以 2 kN/s 的速率加载至 50 kN, 保持 10 s 后改为位移控制, 加载速率为 0.005 mm/s, 直至实验结束。

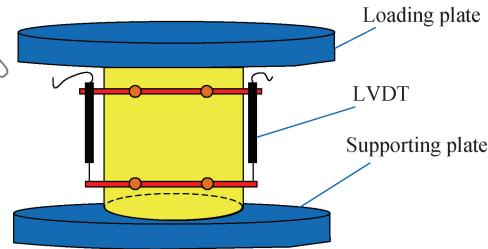


图 4 SF/UHPC 抗压实验装置

Fig. 4 Setup of compression test of SF/UHPC

2.3 模拟结果验证

通过圆柱体抗压试验, 获取了 SF/UHPC 应力-应变全曲线, 如图 5 所示。同时, 图 5 亦给出了通过数值模拟所获取的应力-应变全曲线。其中, 图 5(a) 为 UHPC 基体模拟结果与试验结果的对比, 图 5(b) 为掺入纤维体积分数(ρ_f) 为 0.5% 钢纤维的 SF/UHPC 模拟结果与试验结果的对比。本部分仅验证所建立细观模型的有效性。因此, 仅对比了模拟结果与实验结果的主要特征参数, 下一节会展开分析数值模拟结果。由图 5 可以看出, 模拟应力-应变曲线与实验曲线吻合良好。因此, 进一步地对其特征参数进行了汇总, 列于表 6。可知, 峰值应力模拟值与实验值误差在 0.07%~0.2% 以内, 峰值应变模拟值与实验值误差在 4.4%~10.7% 以内, 弹性模量模拟值与实验值误差在 5.0%~9.6% 以内。上述结果验证了本文所建立细观模型的有效性。

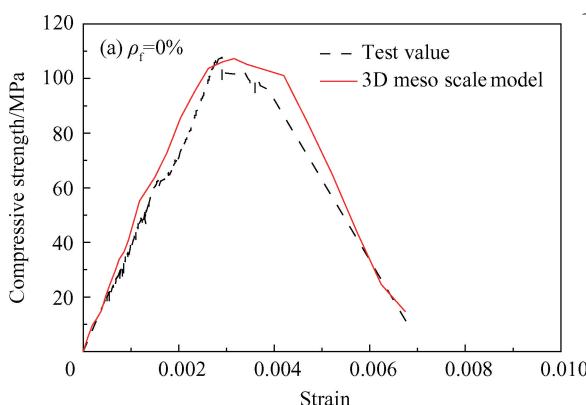


图 5 UHPC 和 SF/UHPC 应力-应变曲线

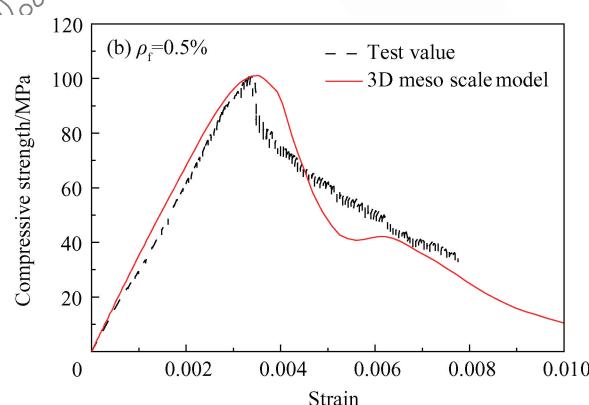


Fig. 5 Stress-strain relationship of UHPC and SF/UHPC

表 6 UHPC 和 SF/UHPC 抗压强度实验与模拟结果

Table 6 Comparison of experimental and simulated results of compressive strength of UHPC and SF/UHPC

Characteristic parameters	$\rho_f = 0\%$			$\rho_f = 0.5\%$		
	Experimental results	Simulation results	Error/%	Experimental results	Simulation results	Error/%
Peak stress/MPa	107.18	107.26	0.07	100.86	101.08	0.2
Peak strain	0.0028	0.0031	10.7	0.00339	0.00354	4.4
Young's modulus/GPa	40	42	5.0	31	34	9.6

为进一步验证所建立细观模型的有效性, 对比分析了试件模拟破坏形态与实验破坏形态。

图 6 为 UHPC 和 SF/UHPC 试件破坏形态。其中, 图 6(a) 为 UHPC 基体试件破坏形态, 图 6(b) 为掺入 0.5% 钢纤维体积分数(ρ_f) SF/UHPC 试件破坏形态。由图 6(a) 可以看出, UHPC 基体为脆性破坏, 实验后仅剩部分芯部。而图 6(b) 则表明, 掺入钢纤维后, SF/UHPC 试件韧性明显改善, 试件破坏时产生多条微小裂缝, 最终呈现出典型 X 型交叉破坏。

图 7 给出了 UHPC 基体模拟受压破坏过程, 图 7(a)、图 7(b) 和图 7(c) 分别为试件达到屈服应力、峰值应力及破坏时的等效塑性应变云图。可知, 在峰值应力前, 随着加载量的增加, 单元损伤愈加严重, 但未出现单元删除, 峰值应力过后, 单元到达失效准则开始大量删除, 其所表征的宏观裂

缝分布杂乱无章, 其破坏形式与图 6 实验结果破坏形态相似。

图 8 给出了掺入 0.5% 钢纤维体积分数(ρ_f) SF/UHPC 试件的模拟破坏过程。为了更好地观察 SF/UHPC 裂缝的发展情况, 本文将模拟后的 SF/UHPC 基体和钢纤维分别呈现出来。由于篇幅限制, 仅将有代表性的几步置于图中。其中, 图 8(a)、图 8(b) 和图 8(c) 分别为试件达到屈服应力、峰值应力及破坏时的等效塑性应变云图, 与之相对应, 图 8(d)、图 8(e) 和图 8(f) 给出了钢纤维轴向应力云图。可知, 当试件开始受压时, 试件处于弹性阶段, 钢纤维的约束作用没有表现出来。继续加载至试件屈服, 乱向分布的钢纤维约束了试件的变形, 使其处于近似三向应力状态, 此时从整体上看, 钢纤维既承受压力又承受拉力。最终, 试件内部较薄弱区域应变不断增大达到其抗压强度的峰值应变, 单元开始产生损伤、破坏。随着损伤区域的不断扩大, 试件表面逐渐出现 2 条明显斜裂纹并不断开展, 试件模型刚度降低, 出现负刚度行为, 并呈现 X 型交叉破坏, 与实验破坏形态类似。此外, 由图 8 钢纤维轴向应力图可知, 随着裂缝的不断开展, 裂缝处钢纤维承受拉力, 起到了阻裂的作用。与宏观尺度分析模型相比, 细观模型更精确的描述了混凝土与钢纤维在受力过程中变形与损伤的变化情况。

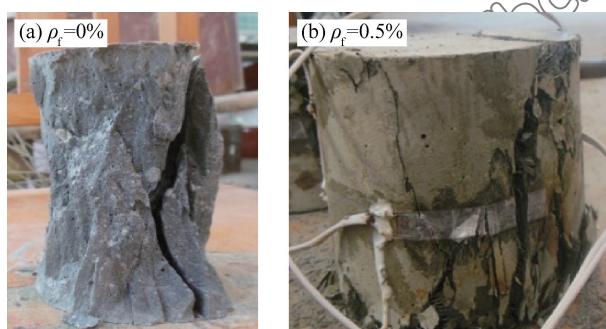


图 6 UHPC 和 SF/UHPC 试件破坏形态

Fig. 6 Failure modes of UHPC and SF/UHPC

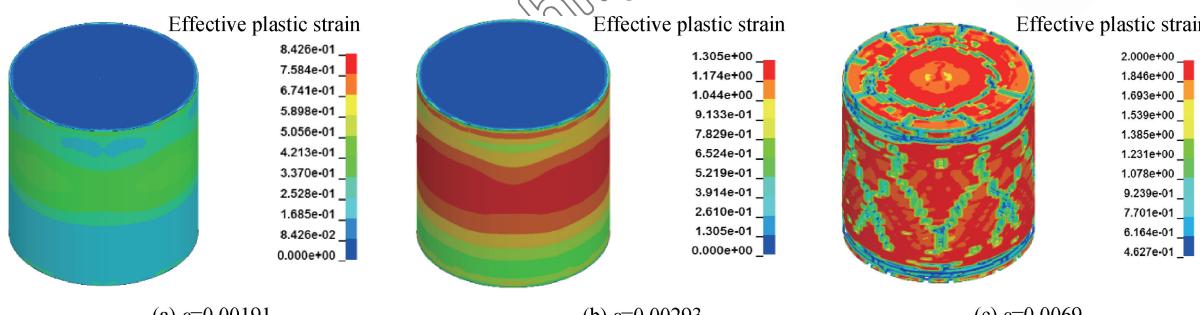


图 7 UHPC 基体受压模拟破坏过程

Fig. 7 Simulated failure process of UHPC matrix

(ε—Strain)

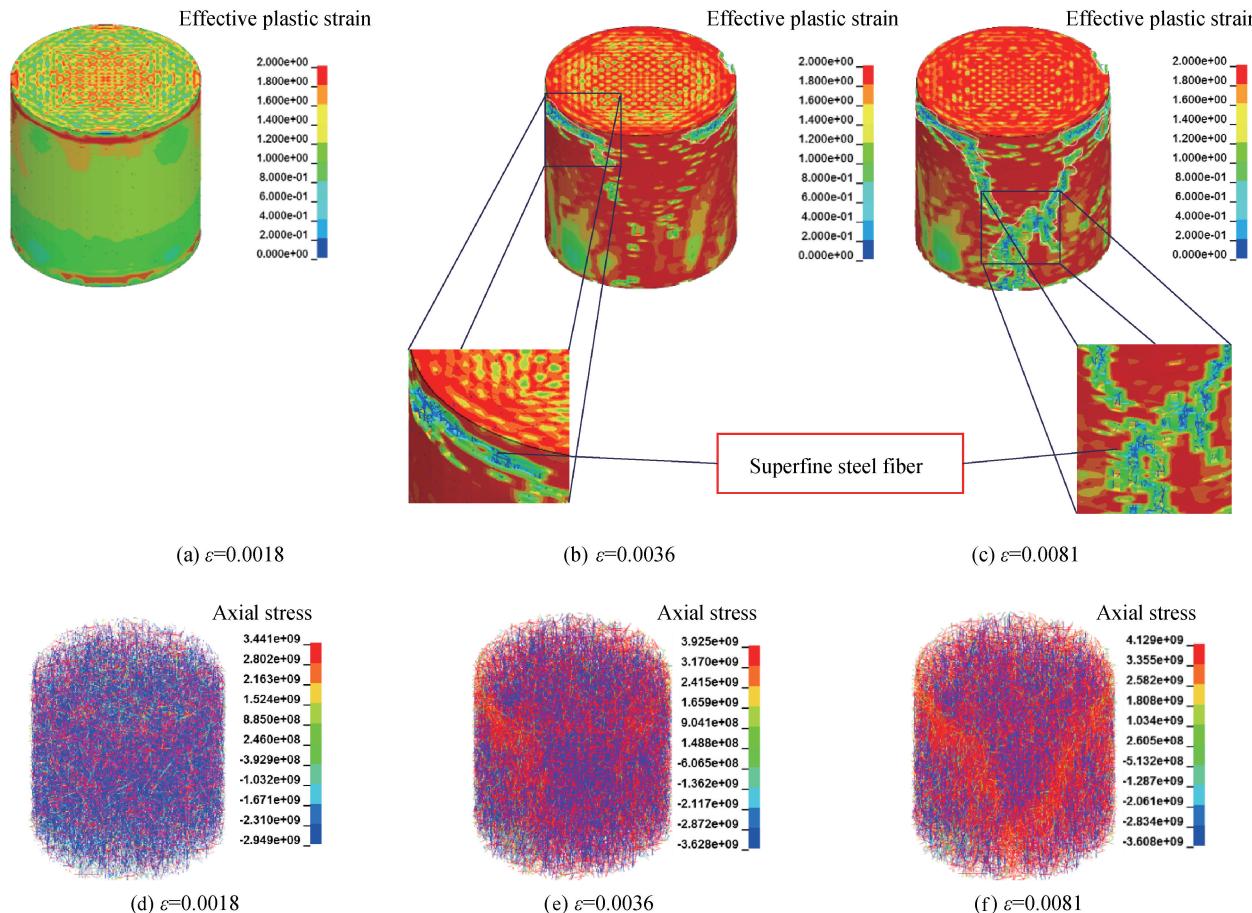


图 8 钢纤维体积率 0.5% 的 SF/UHPC 受压模拟破坏过程

Fig. 8 Simulated failure process of SF/UHPC with steel fiber volume fraction of 0.5%

综上所述, 模拟结果和试验结果吻合较好。由此证明, 本文所建立的三维细观有限元模型能够有效分析 SF/UHPC 抗压性能。

3 参数分析

3.1 钢纤维体积率对 SF/UHPC 抗压性能的影响

图 9 为高径比(H/D)为 1~3 的不同钢纤维体积分数($\rho_f = 0\%、0.5\%、1\%、2\%$)的 SF/UHPC 的应力-应变曲线。可知, 在加载初期, 试件处于弹

性阶段, 各应力-应变曲线相差不大, 说明 ρ_f 对 SF/UHPC 弹性模量影响不大; 随着荷载的增大, 应力-应变曲线开始偏离线性, 下降段随 ρ_f 的增大而趋于平滑, 说明 SF/UHPC 的韧性随着 ρ_f 的增大而增大; 然而, 通过峰值应力可以看出, ρ_f 对 SF/UHPC 的抗压强度提高作用并不显著, 最大仅提高 27.5% ($H/D=1$)。尤其值得注意的是, 当试件 $H/D=1$ 且 $\rho_f=2\%$ 时, 应力-应变曲线出现硬化现象。

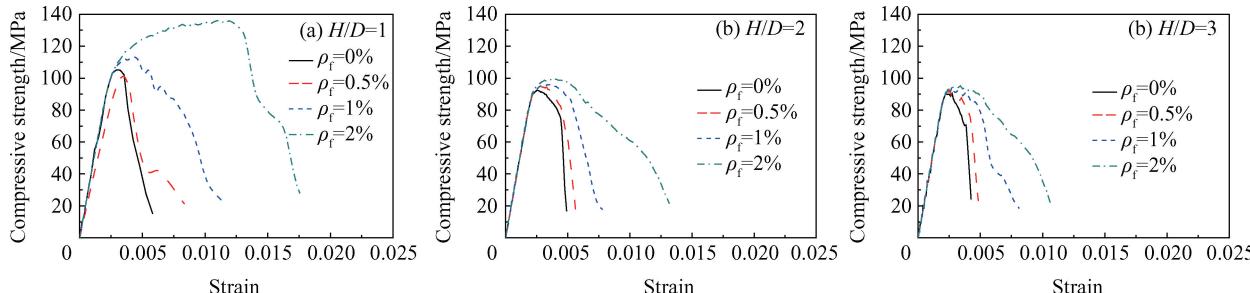
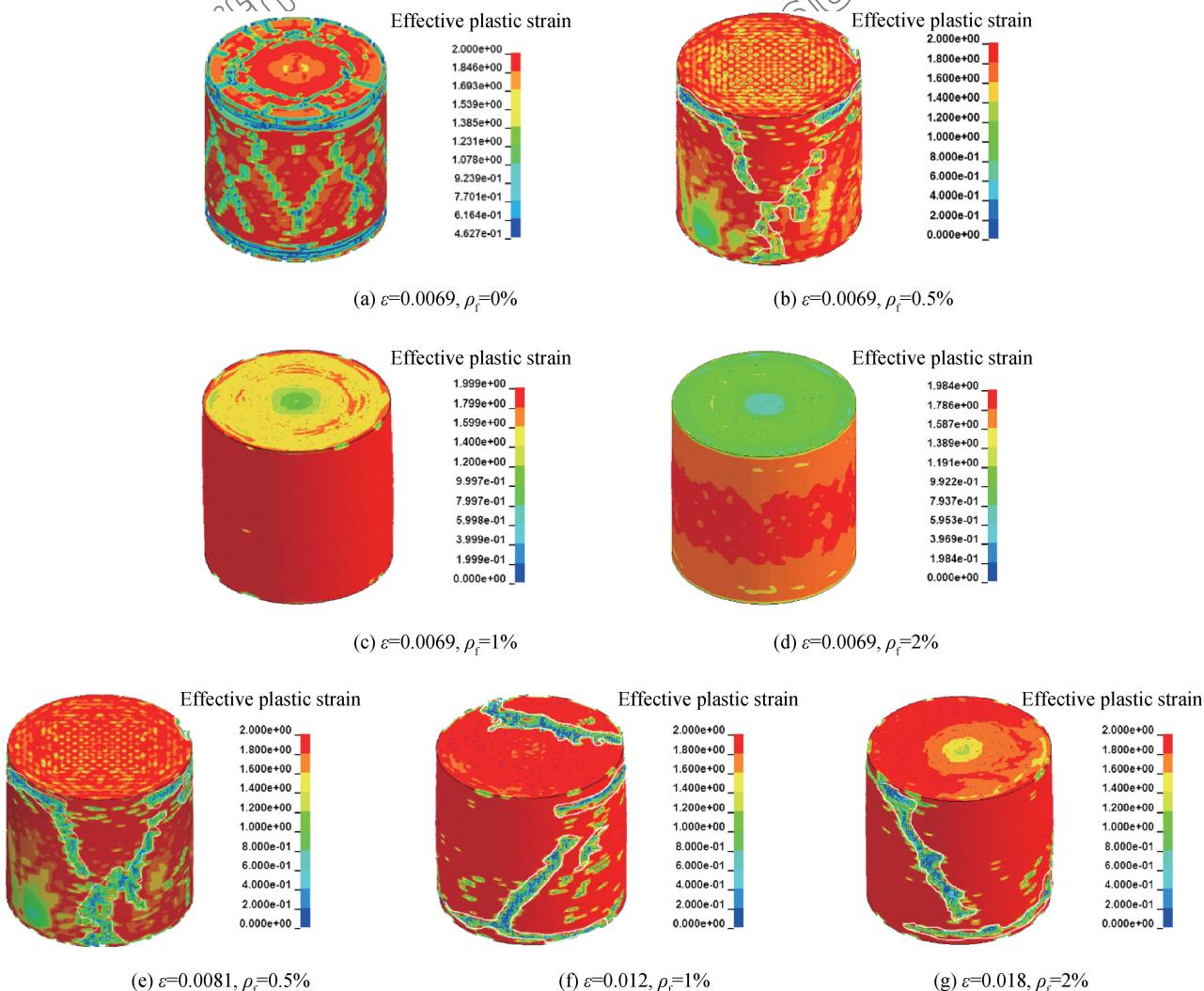


图 9 不同钢纤维体积率的 SF/UHPC 应力-应变曲线

Fig. 9 Stress-strain relationship of SF/UHPC with different steel fiber volume fractions

为进一步分析钢纤维体积率对 SF/UHPC 破坏形态的影响, 图 10 为高径比为 1 时 SF/UHPC 不同工况条件下的等效塑性应变云图。其中, 图 10(a)为 UHPC 基体破坏时的等效塑性应变云图, 与之相对应, 图 10(b)、图 10(c)和图 10(d)给出了不同钢纤维体积分数($\rho_f = 0.5\%、1\%$ 和 2%) SF/UHPC 试件在达到 UHPC 基体破坏应变时的等效塑性应变云图。可知, UHPC 基体在应变达到 0.0069 时发生严重破坏, 而随着 ρ_f 的增加, 在达到相同应变时, 试件破坏程度不断减轻。可以说明, 钢纤维能够大幅提升 SF/UHPC 的破坏应变。图 10(e)、图 10(f)和图 10(g)给出了不同钢纤维体积率 SF/UHPC 试件破坏时等效塑性应变云图。可知, ρ_f 对轴心受压的 SF/UHPC 破坏形态影响显著。当 $\rho_f = 0.5\%$ 时, 试件破坏最终呈现 X 型交叉破坏; 当 $\rho_f = 1\%$ 和 2% 时, 试件破坏最终呈现对角



线的贯通主裂缝破坏。

3.2 钢纤维长径比对 SF/UHPC 抗压性能的影响

本文考虑钢纤维长径比($L_f/D_f = 41.7、83.3$ 和 125)对 SF/UHPC 抗压性能的影响。考虑到计算机硬件条件的限制, 所研究试件尺寸为 $H = 100$ mm、 $D = 50$ mm。

图 11 为不同钢纤维长径比(L_f/D_f)的 SF/UHPC 应力-应变曲线。可知: 当钢纤维体积分数很小(如 $\rho_f = 0.5\%$)时, 钢纤维长径比对 SF/UHPC 应力-应变曲线影响不大; 当钢纤维体积分数增加到一定程度时(如 $\rho_f = 1\%$), 随着钢纤维长径比的增大, SF/UHPC 试件应力-应变曲线峰值应变和峰值应力增大, 下降段变缓, SF/UHPC 韧性增加。

图 12 为不同钢纤维长径比的 SF/UHPC 破坏时的等效塑性应变云图。可以看出, 钢纤维长径

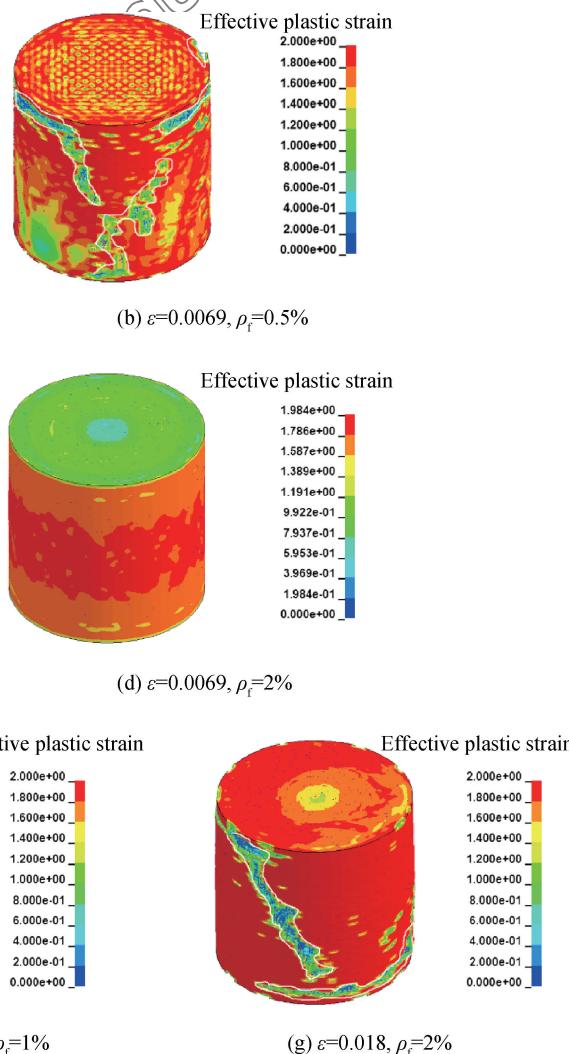


图 10 不同钢纤维体积率的 SF/UHPC 试件破坏形态($H/D=1$)

Fig. 10 Simulated failure modes of SF/UHPC with different steel fiber volume fractions($H/D=1$)

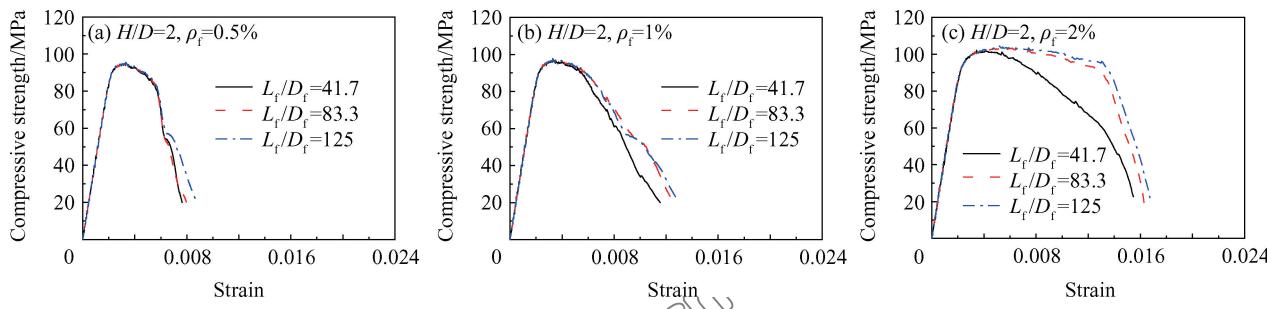


图 11 不同钢纤维长径比的 SF/UHPC 应力-应变曲线

Fig. 11 Stress-strain relationship of specimens with different aspect ratios of steel fiber

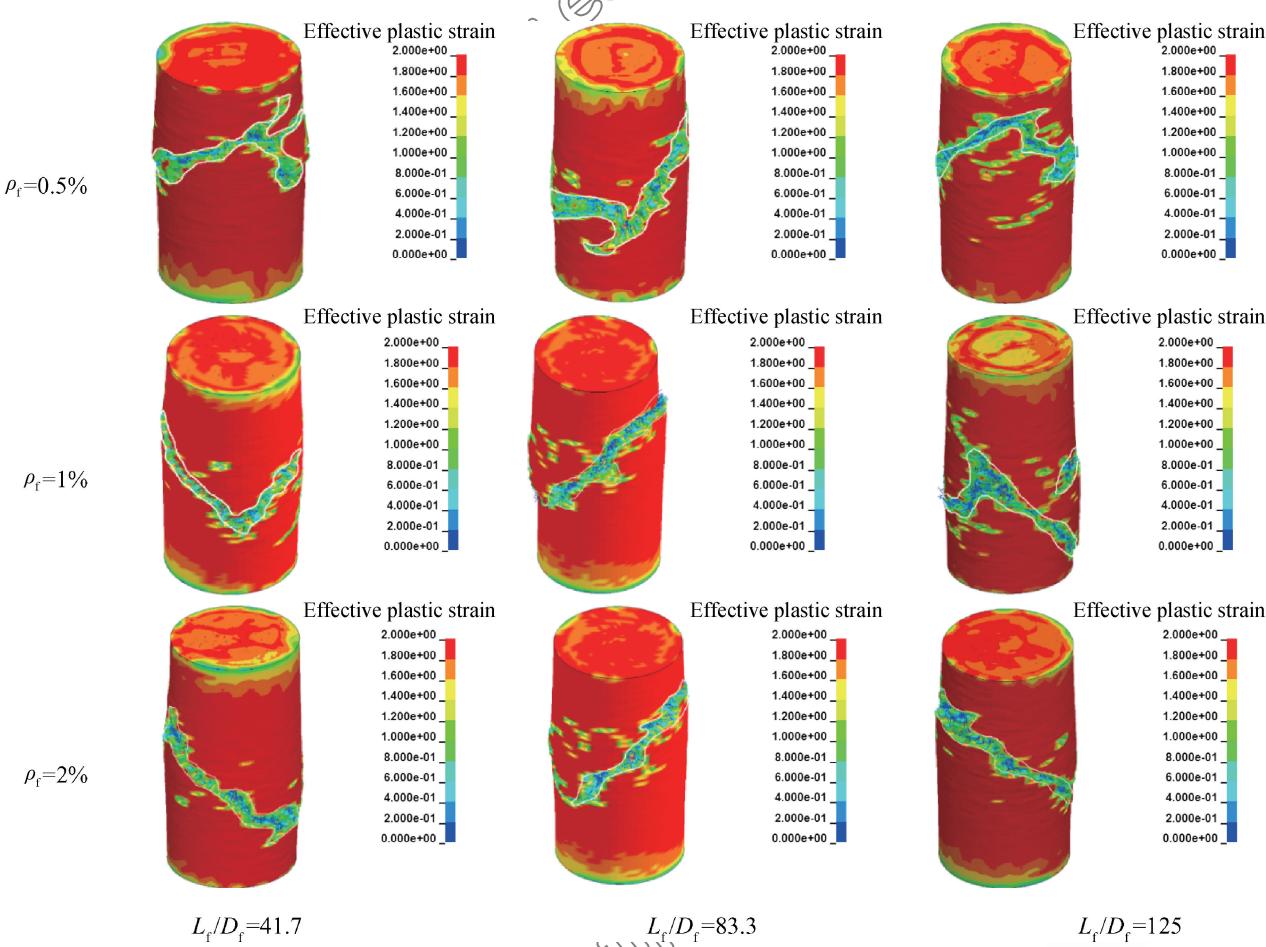


图 12 不同钢纤维体积率的 SF/UHPC 试件破坏形态

Fig. 12 Simulated failure modes of SF/UHPC with different aspect ratios of steel fiber

(L_f/D_f —Length-to-diameter of steel fiber)

比对 SF/UHPC 试件在单轴压缩下的破坏形态影响不大。当钢纤维体积分数较小 ($\rho_f = 0.5\%$) 时, SF/UHPC 试件破坏时呈现 X 形交叉剪切斜裂缝, 当钢纤维体积分数增大到 1% 以上时, $H/D = 2$ 的试件则表现出 45° 方向剪切贯通主裂缝破坏。

3.3 形状效应对 SF/UHPC 抗压性能的影响

图 13 为不同高径比 ($H/D = 1, 2$ 和 3) 的 SF/UHPC 试件在单轴压缩下的破坏形态。

UHPC 应力-应变曲线。可知, 弹性阶段, 应力-应变曲线斜率基本不变, 不随试件高径比的增大而改变, 这同样验证了 SF/UHPC 的弹性模量为不敏感的材料参数。同时, 当钢纤维体积率较小时 (0.5% 以内), 高径比对应力-应变曲线下降段所表现出的韧性影响不大, 而当钢纤维体积率较大时 (0.5% 以上), 减小高径比能够显著提升 SF/UHPC 的抗压性能。

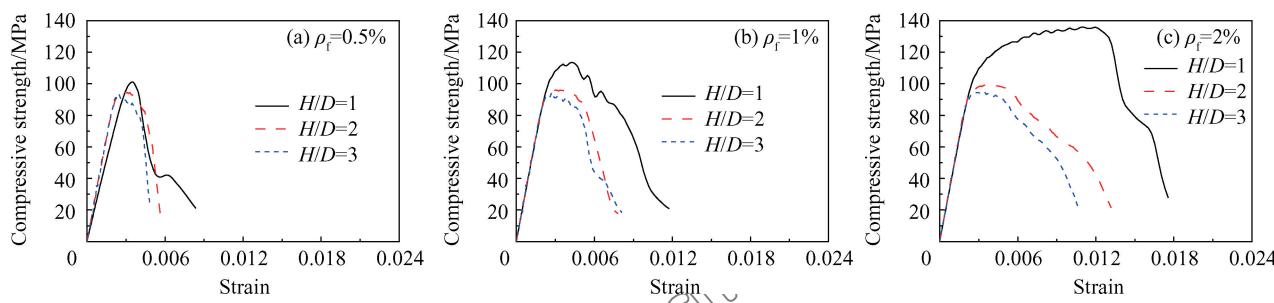


图 13 不同高径比的 SF/UHPC 应力-应变曲线

Fig. 13 Stress-strain relationship of specimens with different height-to-diameter ratios

UHPC 韧性。

此外还可以看出, 当钢纤维体积率相同时, 抗压强度随高径比的增大而减小, 当高径比为 2 或者 3 时, 二者抗压强度相差不大, 这可能是由于根据材料力学 $\sigma_{cr} = \pi^2 E / \lambda^2$ 知, 临界应力与试件的弹性模量和长细比有关; 弹性模量越大, 长细比小, 临界应力越大。本文中 SF/UHPC 的弹性模量基本不变, 因此高径比成为影响试件抗压强度的主要因素。同时, 随着试件高径比的增大, 端板与试件受压面之间的摩擦力对试件横向变形的约束作用相对减小, SF/UHPC 的形状效应变得不明显。

图 14 为不同高径比 SF/UHPC 破坏时等效塑性应变云图。可知, 形状效应对轴心受压的 SF/UHPC 破坏形态影响较大。具体为, 高径比为 3 的试件均为中部压碎破坏, 而当钢纤维体积率较小 ($\rho_f = 0.5\%$) 且 $H/D = 1, 2$ 时, SF/UHPC 试件破坏时呈现 X 形交叉剪切斜裂缝, 当钢纤维体积率增大到 1% 以上时, $H/D = 1, 2$ 的试件则表现出对角线方向剪切贯通主裂缝破坏。

3.4 尺寸效应对 SF/UHPC 抗压性能的影响

图 15 为不同尺寸的 SF/UHPC 的应力-应变曲线。可以看出, 当试件高径比为 1(图 15(a)、图 15(b)和图 15(c))时, 尺寸效应对 SF/UHPC 压缩应力-应变曲线影响显著, 主要表现为抗压强度及韧性均随试件尺寸的减小而显著增大; 当试件高径比为 2(图 15(e)、15(d)和 15(f))时, 形状效应仅对 SF/UHPC 韧性有影响, 具体表现为 SF/UHPC 韧性随着试件尺寸的减小而增大, 而对 SF/UHPC 抗压强度几乎没有影响; 而当试件高径比增大至 3(图 15(g)、15(h)和 15(i))以后, 尺寸效应对 SF/UHPC 抗压性能(强度和韧性)几乎没有影响。

由图 15 还可以看出, 当高径比为 1 时, 直径为 50 mm 的 SF/UHPC 抗压强度均大于对照组直径为 100 mm 的抗压强度, 说明试件尺寸愈小, 其抗压强度愈大, 尺寸效应越明显, 而当高径比为 2 或 3 时, 尺寸效应并不明显, 这是由于随着试件高径比的增大, 试件端面摩擦约束范围相对减小, 导致 SF/UHPC 抗压强度降低。

图 16 给出了不同直径的 SF/UHPC 模拟破坏时的等效塑性应变云图。可知, 尺寸效应对 SF/UHPC 试件在单轴压缩下的破坏形态影响不大。其破坏形态描述与形状效应对轴心受压的 SF/UHPC 破坏形态描述类似, 在此不在赘述。

4 SF/UHPC 抗压强度计算公式

根据 ASTM C39 规范^[9]知, 圆柱形混凝土抗压强度的标准试件为 $H = 200 \text{ mm}$ 、 $D = 100 \text{ mm}$ 。考虑到标准试件钢纤维生成量大, 故研究 $H = 100 \text{ mm}$ 、 $D = 50 \text{ mm}$ 圆柱形 SF/UHPC 抗压强度, 然后乘以尺寸换算系数得到标准试件的抗压强度, 最终推导出 SF/UHPC 标准试件抗压强度计算公式。抗压强度换算系数见表 7, 其中以 $\rho_f = 0.5\%$ 、 $H = 100 \text{ mm}$ 、 $D = 50 \text{ mm}$ 的圆柱体试件抗压强度为基准。

表 7 圆柱形 SF/UHPC 抗压强度尺寸换算系数

Table 7 Size effect conversion factor of compressive strength of cylindrical SF/UHPC

Specimens size/mm	$\rho_f / \%$		
	0.5	1.0	2.0
100 * 200	0.995	1.025	1.056
50 * 100	1	1.033	1.087

Notes: 100 * 200—Cylindrical SF/UHPC with 100 mm diameter and 200 mm height; 50 * 100—Cylindrical SF/UHPC with 50 mm diameter and 100 mm height.

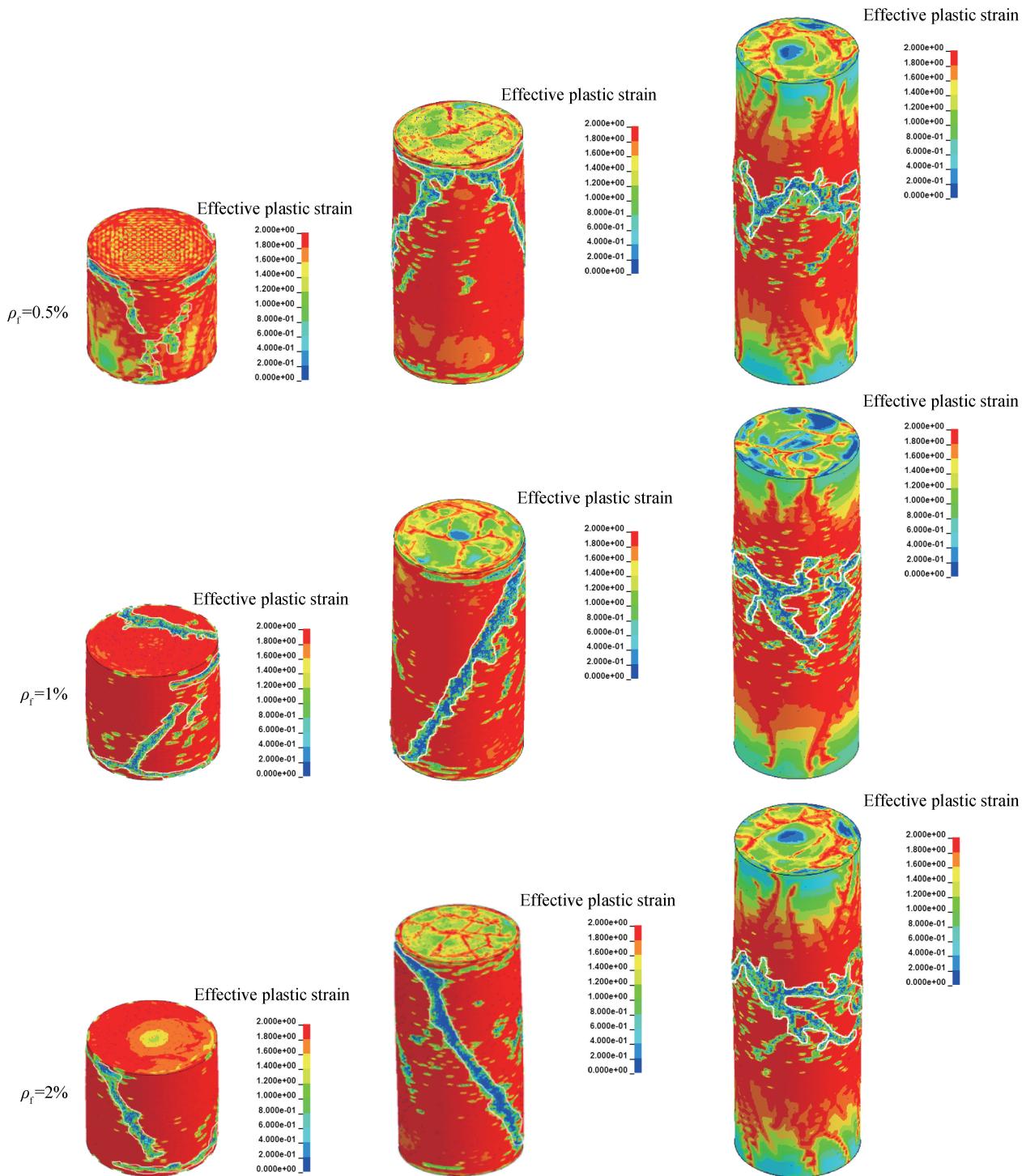


图 14 不同高径比的 SF/UHPC 破坏形态

Fig. 14 Failure modes of SF/UHPC with different height-to-diameter ratios

3.2 节已获得了 $H=100$ mm、 $D=50$ mm 试件掺有不同长径比 ($L_f/D_f = 41.7$ 、 83.3 和 125) 钢纤维时的抗压强度, 在此不再赘述。通过 3.2 节所获取的 $H=100$ mm、 $D=50$ mm 试件抗压强度乘以换算系数所得标准试件抗压强度列于表 8。

为考虑钢纤维对 SF/UHPC 抗压强度的影响, 定义钢纤维增强系数如下^[19-20]:

$$R_v = \rho_f \frac{L_f}{D_f} \quad (1)$$

其中: ρ_f 为钢纤维体积率; L_f/D_f 为纤维长径比。

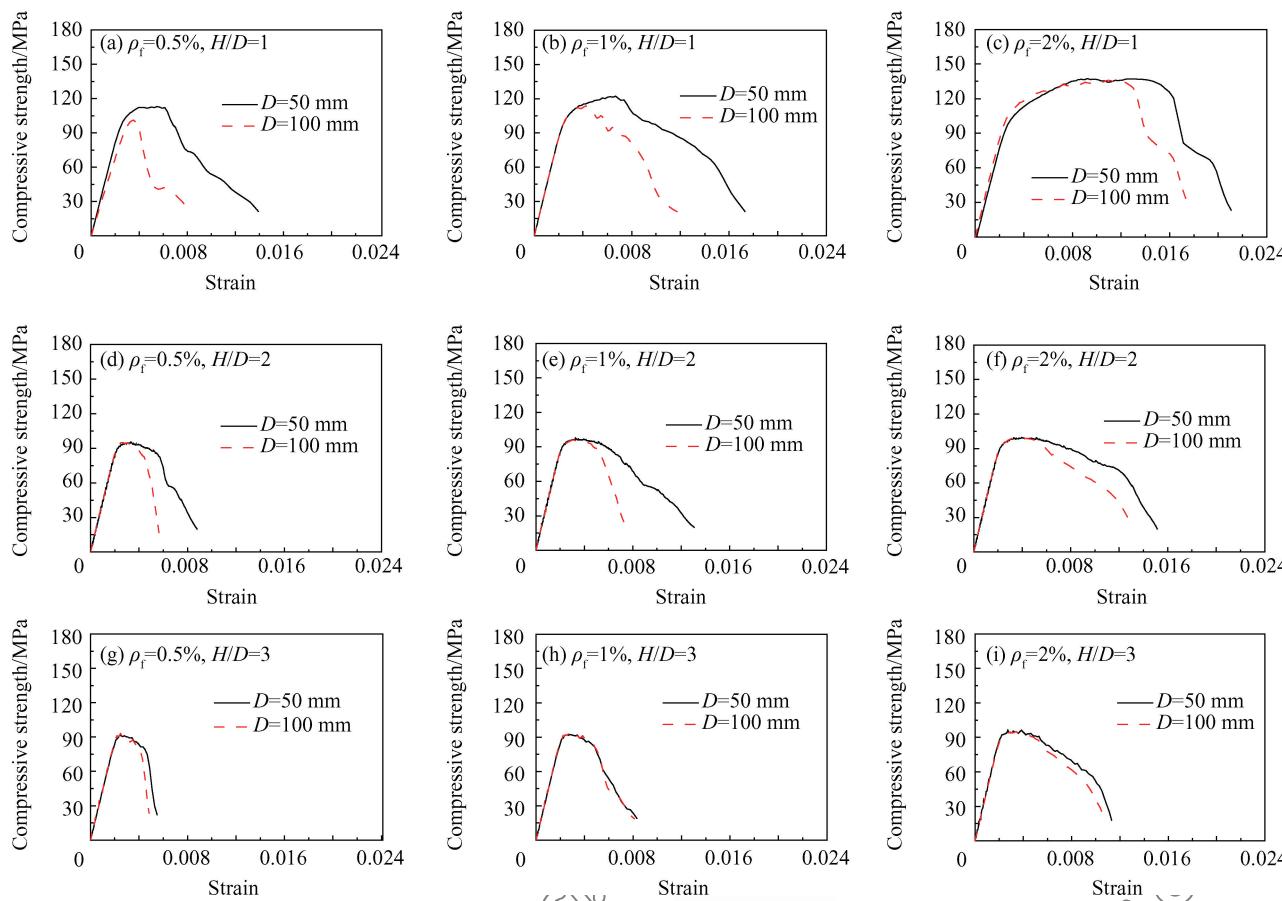


图 15 不同尺寸的 SF/UHPC 应力-应变曲线

Fig. 15 Stress-strain relationship of specimens with different sizes

表 8 圆柱形 SF/UHPC 标准试验试件抗压强度

Table 8 Compressive strength of cylindrical

L_f/D_f	$\rho_f / \%$			MPa
	0.5	1.0	2.0	
41.7	94.76	95.80	98.29	
83.3	94.91	96.14	100.28	
125	94.96	97.81	100.77	

图 17 汇总了不同 RI_v 时 SF/UHPC 抗压强度。可知, 随着钢纤维增强系数增大, SF/UHPC 抗压强度逐渐增大。最终, 拟合了 SF/UHPC 抗压强度计算公式如下:

$$f'_{cf} = 6.4776 R_v - 1.2569(R_v)^2 + f'_c, R^2 = 0.86 \quad (2)$$

其中: f'_c 为 SF/UHPC 基体抗压强度; R_v 为钢纤维增强系数。

5 结论及展望

本文采用细观力学方法, 建立了三维钢纤维增

强高性能混凝土(SF/UHPC)细观力学模型, 研究了单轴受压状态下 SF/UHPC 的力学性能和损伤破坏特点, 得到以下结论:

(1) 采用三维 SF/UHPC 细观模型模拟混凝土单轴受压静力性能时, 模拟结果与试验吻合较好; 通过三维细观模型可以清晰直观地反应出混凝土在外力作用下, UHPC 基体和钢纤维各部分应力变形及裂缝产生、扩展的过程。

(2) 钢纤维能改善 UHPC 基体的脆性, 但对于 SF/UHPC 的抗压强度提高不大。如 $H=100$ mm、 $D=100$ mm、 $\rho_f=2\%$ 与 $H=100$ mm、 $D=100$ mm、 $\rho_f=0\%$ 相比, 抗压强度最多提高 27.5%。

(3) 高径比(H/D)为 1 时, UHPSFC 尺寸效应明显, 随着高径比的增大, 形状效应和尺寸效应不明显。

(4) 根据钢纤维增强系数, 拟合了 SF/UHPC 抗压强度计算公式。

(5) 本文尚未考虑钢纤维与混凝土之间的粘结、滑移等非线性力学行为, 这可能会对出现大范

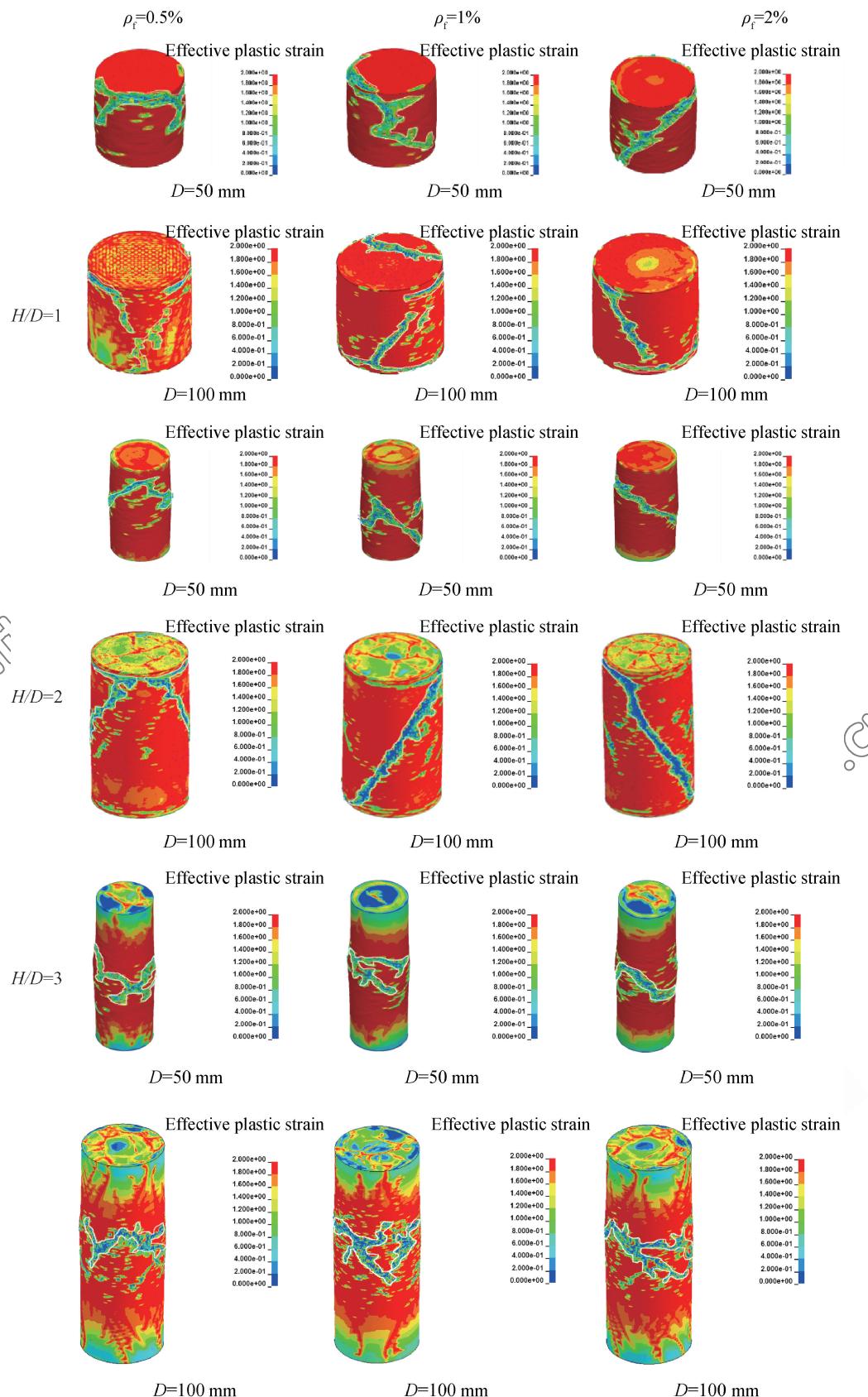


图 16 不同尺寸的 SF/UHPC 破坏形态

Fig. 16 Failure modes of SF/UHPC with different sizes

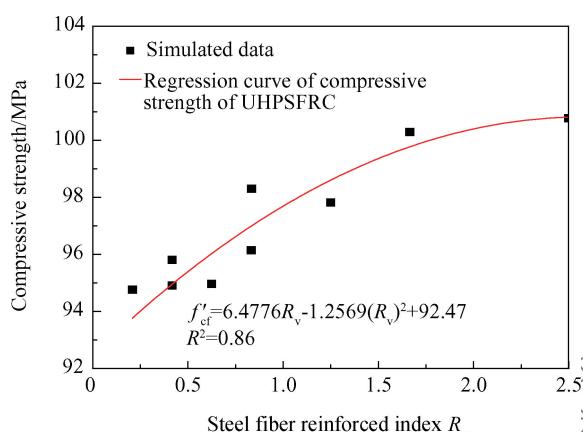


图 17 SF/UHPC 抗压强度回归曲线

Fig. 17 Regression curve of compressive strength of SF/UHPC
(R_v —Steel fiber reinforced index)

围、大距离的纤维滑移情况的研究产生较大误差。因此, 在后续研究中有必要专门研究钢纤维与超高性能混凝土基体之间的粘结滑移特性及两者的非线性界面接触模型。

参考文献:

- [1] 王德辉, 史才军, 吴林妹. 超高性能混凝土在中国的研究和应用[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(1): 141-149.
WANG D H, SHI C J, WU L M. Research and applications of ultra-high performance concrete (UHPC) in China [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(1): 141-149 (in Chinese).
- [2] RAHMAN S, MOLYNEAUX T, PATNAIKUNI I. Ultra-high performance concrete: Recent applications and research [J]. Australian Journal of Civil Engineering, 2005, 2(1): 13-20.
- [3] JIA L J, HUI H B, YU Q H, et al. The application and development of ultra-high-performance concrete in bridge engineering[J]. Advanced Materials Research, 2013, 859(5): 238-242.
- [4] 陈宝春, 季韬, 黄卿维, 等. 超高性能混凝土研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(3): 1-24.
CHEN B C, JI T, HUANG Q W, et al. Review of research on ultra-high performance concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(3): 1-24 (in Chinese).
- [5] 王文谈, 魏耀富, 蒋晗, 等. 超高性能钢纤维增强混凝土力学性能的实验研究[J]. 应用数学和力学, 2014(S1): 295-298.
WANG W T, WEI Y F, JIANG H, et al. Mechanical properties of ultra-high performance steel fiber reinforced concrete: Experimental study [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2014(S1): 295-298 (in Chinese).
- [6] 徐慎春, 吴成清, 刘中宪, 等. 钢纤维及纳米材料对超高性能混凝土早期力学性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(3): 542-546.
XU S C, WU C Q, LIU Z X, et al. Effects of the nano materials and steel fibre on early-age properties of ultra-high performance concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(3): 542-546 (in Chinese).
- [7] 鞠彦忠, 王德弘, 李秋晨, 等. 钢纤维掺量对活性粉末混凝土力学性能的影响[J]. 实验力学, 2011, 26(3): 254-260.
JU Y Z, WANG D H, LI Q C, et al. On the influence of steel fiber volume fraction on mechanical properties of reactive powder concrete[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(3): 254-260 (in Chinese).
- [8] 张楚汉, 唐欣薇, 周元德, 等. 混凝土细观力学研究进展综述[J]. 水力发电学报, 2015, 34(12): 1-18.
ZHANG C H, TANG X W, ZHOU Y D, et al. State-of-the-art literature review on concrete meso-scale mechanics[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(12): 1-18 (in Chinese).
- [9] GRASSL P, JIRÁSEK M. Meso-scale approach to modelling the fracture process zone of concrete subjected to uniaxial tension[J]. International Journal of Solids & Structures, 2009, 47(7-8): 957-968.
- [10] XU Z, HAO H, LI H N. Mesoscale modelling of fiber reinforced concrete material under compressive impact loading [J]. Construction & Building Materials, 2012, 26(1): 274-288.
- [11] 杜修力, 金浏. 非均质混凝土材料破坏的三维细观数值模拟[J]. 工程力学, 2003, 30(2): 82-88.
DU X L, JIN L. Numerical simulation of three-dimensional meso-mechanical model for damage process of heterogeneous concrete[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(2): 82-88 (in Chinese).
- [12] 金浏, 杜修力. 钢筋混凝土构件细观数值模拟分析[J]. 水利学报, 2012, 43(10): 1230-1236.
JIN L, DU X L. Meso-numerical simulation of reinforced concrete members [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(10): 1230-1236 (in Chinese).
- [13] ABDELKARIM O, ELGAWADY M A. Concrete-filled-large deformable FRP tubular columns under axial compressive loading[J]. Fibers, 2015, 3: 432-449.
- [14] XU M, WILLE K. Calibration of K&C concrete model for UHPC in LS-DYNA [J]. Advanced Materials Research, 2014, 1081: 254-259.
- [15] FANG Q, ZHANG J. Three-dimensional modelling of steel fiber reinforced concrete material under intense dynamic loading[J]. Construction & Building Materials, 2013, 44(7): 118-132.
- [16] XU Z, HAO H, LI H N. Mesoscale modelling of fibre reinforced concrete material under compressive impact loading [J]. Construction & Building Materials, 2012, 26(1): 274-288.
- [17] XU Z, HAO H, LI H N. Mesoscale modelling of dynamic tensile behaviour of fibre reinforced concrete with spiral fibres [J]. Materials & Design, 2012, 42(11): 72-88.
- [18] 中国工程建设协会. 纤维混凝土试验方法标准: CECS 13: 2009[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
China Construction Association. Standard test methods for fiber reinforced concrete: CECS 13: 2009[S]. Beijing: China Planning Press, 2010 (in Chinese).
- [19] ASTM. Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens: ASTM C39M—01[S]. Philadelphia: ASTM, 2001.
- [20] OU Y C, TSAI M S, LIU K Y, et al. Compressive behavior of steel-fiber-reinforced concrete with a high reinforcing index [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 24(2): 207-215.