

考虑纤维取向特征的超高性能混凝土三维细观断裂

黄宇劼¹, 张 慧¹, 高 超², 徐世烺³(1. 中北大学环境与安全工程学院, 太原 030051; 2. 浙江省建筑设计研究院, 杭州 310006;
3. 浙江大学建筑工程学院, 杭州 310058)

摘 要: 钢纤维取向对超高性能混凝土(UHPC)力学性能有显著影响, 传统实验方法较难直接控制纤维取向和分布, 且缺乏可同时反映 UHPC 裂缝演化与纤维作用等复杂机理的三维细观模型, 造成了定量分析和模拟验证纤维取向影响的困难。为此, 首先开展了 UHPC 直接拉伸实验, 采用外置磁场实现纤维定向并利用图像分析获得纤维倾角分布密度, 通过数字图像相关技术(DIC)研究了纤维取向对断裂过程、应力-应变曲线的影响。其次建立了可显式考虑纤维取向和分布、不同倾角的纤维拉拔力本构以及基体离散粘性断裂的三维 UHPC 细观数值模型, 并通过开展的直拉实验获得验证。结果表明: 建立的细观模型能有效描述 UHPC 材料复杂的三维断裂过程; UHPC 的应变硬化特性、裂缝发展与最终形态、纤维桥连作用等均受到纤维分布和取向等细观因素的影响。

关键词: 超高性能混凝土; 纤维取向; 数字图像技术; 粘结滑移; 三维细观断裂模拟

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 0454-5648(2024)02-0555-14

网络出版时间: 2023-12-08



近年来, 一种名为超高性能混凝土(UHPC)的新型水泥基复合材料引起了广泛关注^[1]。UHPC 的典型抗压、抗拉和抗弯强度一般为 120~200、8~12 MPa 和 20~40 MPa, 均显著优于普通混凝土^[2-3]; 断裂韧度可达 40 kJ/m², 是普通混凝土的几百倍, 这使其成为抗冲击、爆炸的理想材料^[4-5]。目前, 有研究表明纤维取向对 UHPC 力学性能的影响较大: Barnett 等^[6]发现拌合物的流动方向会影响纤维取向, 进而影响 UHPC 圆形板的抗弯性能; Huang 等^[7]研究了纤维倾角系数与 UHPC 抗弯性能的定量关系; Kang 等^[8]开展了带缺口试件的直接拉伸实验, 发现纤维取向对 UHPC 开裂前行为影响较小而对裂后性能影响较大; 慕儒等^[9]通过磁场调控使钢纤维取向与板在拉伸状态下的主应力方向一致, 研究了取向对钢纤维增强水泥基圆孔板轴拉性能的影响。这些研究均表明, 在特定的纤维掺量下, 纤维取向是影响 UHPC 拉、弯力学性能的主要因素之一。

然而, 目前常用的应力-裂缝张开口位移关系仅可用于表征同等实验条件下(材料、浇筑方向、试件尺寸和边界条件等)UHPC 的力学性能, 若某实验条件发生改变, 导致纤维取向和分布变化明显, 则需要重新进行实验测试与分析验证, 时间和经济成本较大。因此, 建立可显式考虑纤维取向和分布、纤维-基体相互作用的细观数值模型, 预测不同纤维取向的 UHPC 材料及其在不同结构构件中的力学性能, 既能对实验方法进行必要补充, 也为揭示材料复杂微细观机理提供数据支撑, 具有重要的研究意义。

由于纤维-基体界面的厚度通常在微米级别^[10], 并且纤维随机分布、数量较大, 直接模拟纤维-基体界面及其复杂的非线性粘结滑移作用较难实施(特别是三维情况)。因此, 目前大多数三维细观模型采用等效方式模拟纤维-基体相互作用, 如 Bitencourt 等^[11]利用杆单元模拟纤维, 通过连续损伤模型表征基体断裂, 并建立了耦合单元来模拟纤

收稿日期: 2023-07-21。 修订日期: 2023-09-13。

基金项目: 国家自然科学基金(52208296); 山西省自然科学基金(202203021212132; 202203021212142; 202203021221115)。

第一作者: 黄宇劼(1988—), 男, 博士, 副教授。

通信作者: 张 慧(1990—), 女, 博士, 副教授;

高 超(1987—), 男, 硕士, 高级工程师。

Received date: 2023-07-21. Revised date: 2023-09-13.

First author: HUANG Yujie (1988—), male, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: mpcyujie@nuc.edu.cn

Correspondent author: ZHANG Hui (1990—), female, Ph.D., Associate Professor.

GAO Chao (1987—), male, Master, Senior Engineer.

E-mail: zhangh@nuc.edu.cn; george_2012@163.com

维-基体相互作用; Bolander 等^[12]基于格构模型, 利用弹簧单元模拟纤维-基体相互作用, 研究了纤维混凝土的拉伸断裂。Cunha 等^[13]、Yu 等^[14]、卿龙邦等^[15]考虑到纤维-基体相对滑移较小, 假定纤维嵌入至基体单元, 忽略二者相对位移, 利用纤维应力-应变关系间接模拟纤维-基体相互作用, 并在三点弯曲梁跨中缺口延长线上插设粘结单元来预设裂缝, 研究纤维桥连阻裂作用。然而, 上述模型均针对普通纤维混凝土试件, 破坏形式以切口处扩展的单条裂缝为主。尚未见可同时反映 UHPC 三维多裂缝起裂、扩展、相交、融合、闭合及其与纤维相互作用等复杂机理的细观模型。

针对上述问题, 本研究提出了一种可同时考虑纤维取向、基体多缝开裂、纤维-基体相互作用的三维细观数值模型, 并利用电磁场生成纤维定向的 UHPC 试件, 通过分析试件截面图像获得纤维真实的分布特征, 在细观模型中予以考虑。开展直接拉伸实验来验证模型的有效性和可靠性, 同时对 UHPC 复杂断裂过程开展深入的细观机理分析。

1 实验

1.1 材料

表 1 为 UHPC 基体配合比。采用 625 水泥; 所用硅灰的比表面积为 $18\ 200\ \text{m}^2/\text{kg}$ 、含硅量大于 98%; 细砂粒径小于 $0.25\ \text{mm}$; 减水剂为聚羧酸减水剂; 水胶比为 0.17, 水灰比为 0.2。采用 2% 体积掺量的镀铜钢纤维, 其直径为 $0.2\ \text{mm}$, 长度为 $13\ \text{mm}$, 抗拉强度为 $2\ 500\ \text{MPa}$, 弹模为 $200\ \text{GPa}$ 。试件置于温度为 $(20 \pm 2)\ ^\circ\text{C}$ 、湿度为 95% 的养护箱养护。其 $100\ \text{mm}$ 立方体试件 28 d 抗压强度为 $120\ \text{MPa}$; 采用 $50\ \text{mm} \times 50\ \text{mm} \times 200\ \text{mm}$ 棱柱体的四点弯曲强度为 $24\ \text{MPa}$ 。

表 1 UHPC 配合比

Table 1 Mix proportions of UHPC

Material	Proportion/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
Cement	851
Silicate fume	153
Quartz powde	520
Fine sand	740
Superplasticizer	9
Water	170
Steel fibre	156

UHPC is ultra high performance concrete.

1.2 试件制备和纤维定向

利用如图 1 所示的装置实现纤维定向分布^[16]:

该装置主要由直流电源(30 V, 10 A)与 200 m 的铜线圈组成。直流电通过线圈可产生电磁场, 经测算, 本实验电磁场的磁感应强度为 $3.1\ \text{mT}$ 。将试件置于磁场中振捣, 其中钢纤维将受到电磁场作用而发生定向分布, 即沿着磁力线方向分布。采取磁场方向与试件拉伸方向平行、垂直和未置于磁场 3 种方式, 相应获得纤维与磁场同向(AUHPC)、垂直(PUHPC)和未定向(UHPC)的试件, 该命名方式参考文献[15]。

1.3 直接拉伸实验装置

图 2 为采用狗骨试件的直拉实验装置, 用于测试纤维朝向对 UHPC 拉伸力学性能的影响。该实验装置包含伺服测试系统、传感器、螺旋接口、夹具和引伸计测试系统。测试前, 将狗骨试件两端嵌入在夹具中, 保证试件正确嵌入后拧紧螺母。在试件两侧利用橡皮筋固定位移引伸计, 其测试长度为 $80\ \text{mm}$ 。拉伸实验采用位移控制加载, 加载速度为 $0.2\ \text{mm/min}$ 。引伸计和力传感器的数据通过采集系统同步记录。另外, 试件表面均匀喷涂散斑, 加载过程采用高速摄像机全程录制, 获得的数据供基于数字图像相关法(DIC)的断裂过程分析使用。

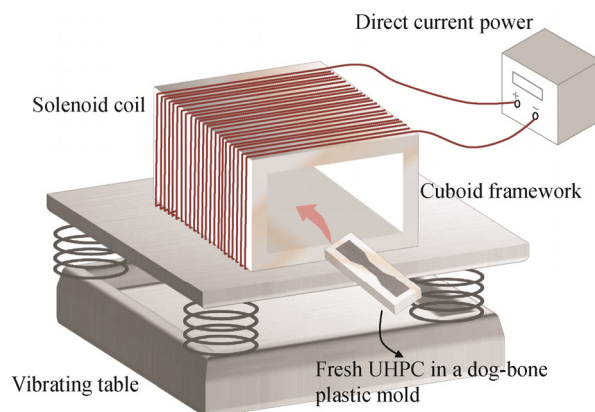


图 1 UHPC 纤维定向电磁场装置示意图

Fig. 1 Electromagnetic device to orient fibers in UHPC

1.4 纤维取向分析

通过分析切面图像进行纤维分布与取向的评估。其基本原理是通过分析试件切面上纤维截面的数量与几何特征等, 来定量分析纤维取向和分布。由图 3 可见, 在试件的不同位置切割 3 次获取切面, 并对其进行打磨与抛光, 再选取合适光源(本实验利用工业相机, 采用 90° LED 光源), 获得高清晰度与对比度的照片。原始图片通常为 RGB 图像(见图 3b), 需将其转化为灰度图, 再通过选取合适的阈值将其转化为二值图。再基于 MATLAB 编程处理图片获得纤维的取向和分布等信息。

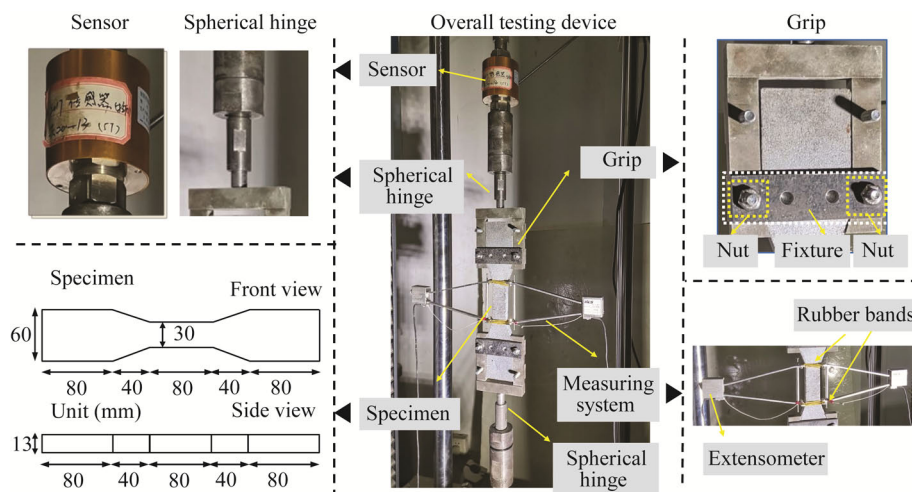
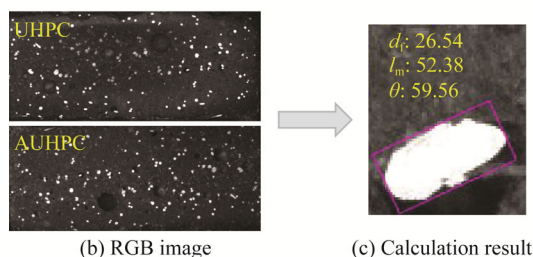
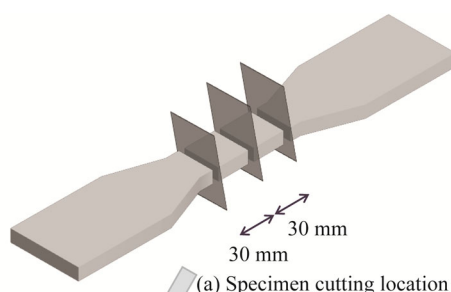


图 2 直接拉伸实验装置示意图
Fig. 2 Test setup for direct tensile test



(b) RGB image
AUHPC is aligned-UHPC.
(c) Calculation result

图 3 试件切面图像处理
Fig. 3 Image processing of specimens' cut-off sections

在对纤维截面的定量分析方面, 大多数纤维的截面呈现椭圆状。根据图 4 所示几何关系, 纤维取向可作如下估算^[8]

$$\cos \theta = \frac{d_f}{l_m} \quad (1)$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{d_f}{l_m}\right) \quad (2)$$

式中: θ 为纤维倾角(数值等于纤维径向与 AA 截面的夹角); d_f 为纤维直径; l_m 为椭圆长轴长度。

2 结果与讨论

2.1 纤维取向测试结果

图 5 为 3 组试件切片图像, 从上至下分别对应

AUHPC、UHPC 和 PUHPC 试件。AUHPC 试件切面上纤维截面更小、更圆, 分布更为密集、均匀, 而 PUHPC 试件切面上纤维截面较大、不规则, 分布更为稀疏、杂乱。通过图像处理和计算, 图 6 为图 5 左栏的纤维倾角频率直方图。AUHPC 试件内的纤维与拉伸方向的夹角更小, 集中于 $10^\circ \sim 40^\circ$, UHPC 中的纤维倾角更为均匀的分布在 $15^\circ \sim 65^\circ$, PUHPC 试件的纤维则集中分布在 $40^\circ \sim 70^\circ$ 。

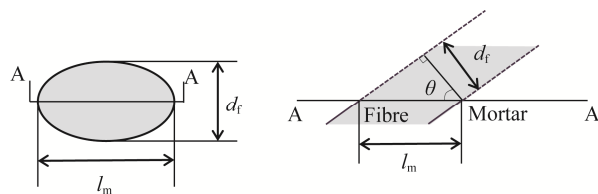
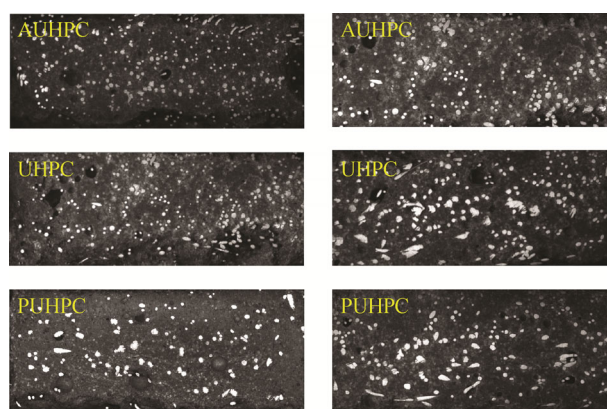


图 4 纤维倾角计算示意图^[8]
Fig. 4 Illustration for calculating the fibre inclination angle^[8]



PUHPC is perpendicular-UHPC.

图 5 试件断面处 RGB 图像: 用于观测纤维取向与分布
Fig. 5 RGB images of cut-off sections to observe fibre orientation and distribution

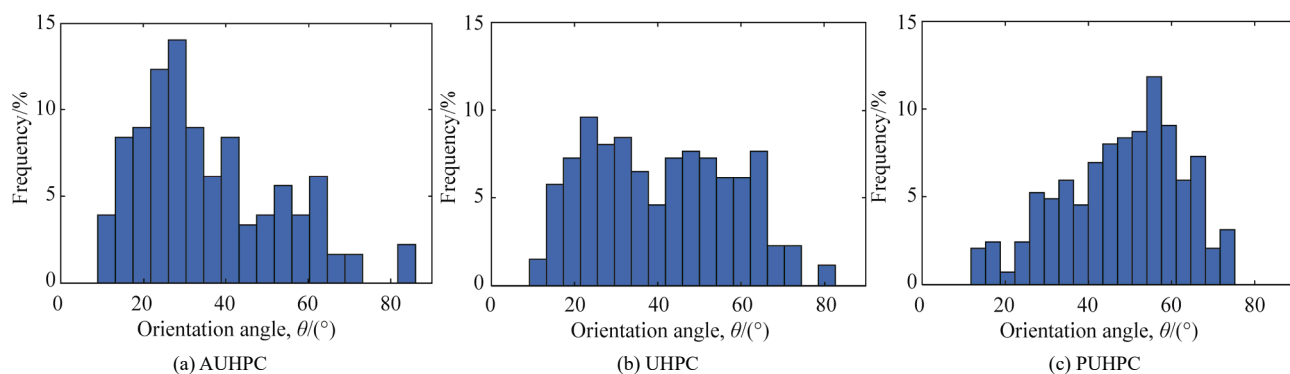


图6 试件中纤维取向的频率直方图

Fig. 6 Frequency histograms of fibre orientation in specimens

2.2 拉伸应力-应变曲线和破坏模式

图7为不同纤维取向试件(每组各3个)的拉伸应力-应变曲线图,以及采用DIC观察的断裂过程和最终的试件破坏图。表2为测试试件的弹模、初裂应力、峰值应力和峰值位移的平均值和标准差。

由图7可见, AUHPC试件具有更明显的应变硬化现象和更高的峰值应力,其峰值应力分别是PUHPC和UHPC试件的2.3倍和1.4倍,其初裂应力也相对较高,弹性模量与峰值位移则没有明显的

变化规律。峰值应力提升的原因如DIC断裂过程所示,纤维取向与拉伸方向一致程度越高,试件中的微裂缝数量越多。这主要因为取向与拉伸方向一致时,纤维对裂缝的桥连更强,即纤维的抗裂能力最强。相比之下,垂直于拉伸方向的纤维约束和桥连裂缝的效果最差。AUHPC和UHPC试件的最终裂缝形态曲折复杂,PUHPC试件裂缝则十分平滑、且基本垂直于拉伸方向。以上不同的断裂模式也进一步解释了应力-应变曲线的差异。

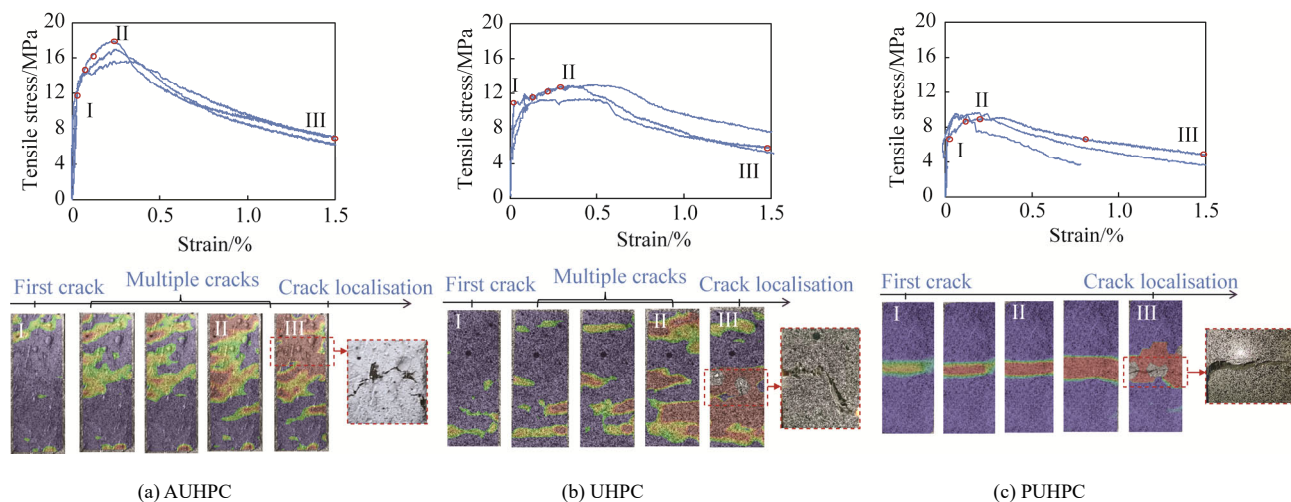


图7 拉伸应力-应变曲线、DIC裂缝观测和最终破坏模式

Fig. 7 Tensile stress-strain curves, cracking process using DIC and final fracture patterns

表2 直接拉伸实验结果的平均值与方差

Table 2 Averaged experimental results of direct tensile tests with corresponding variances

Group	Modulus/GPa	First cracking stress/MPa	Peak stress/MPa	Displacement at peak stress/mm
AUHPC	40±2	12.24±0.52	17.27±2.08	0.18±0.04
UHPC	39±4	9.57±1.34	12.42±1.27	0.34±0.07
PUHPC	41±1	7.63±0.27	9.42±0.49	0.13±0.09

将破坏后的 AUHPC 试件(见图7a)进行切割,取开裂部分(尺寸约为 30 cm×13 cm×20 cm)置于放大倍数为 50 倍的光学显微镜下,调整焦距观察裂缝处纤维表面的微观形态。图8为 AUHPC 试

件中纤维表面微观形貌。由图8可见,相比于实验前的钢纤维,实验后的钢纤维表面出现了明显的拉拔刮擦,并且纤维表面附着有剥落的砂浆基体。同时,由图8d可见,纤维末端并未出现明显

的颈缩现象, 可判断该纤维的破坏模式为拔出而非屈服拉断。此类界面破坏、基体剥落、纤维拔

出等微观机理会消耗大量能量^[17], 从而发挥改善材料延性的作用。

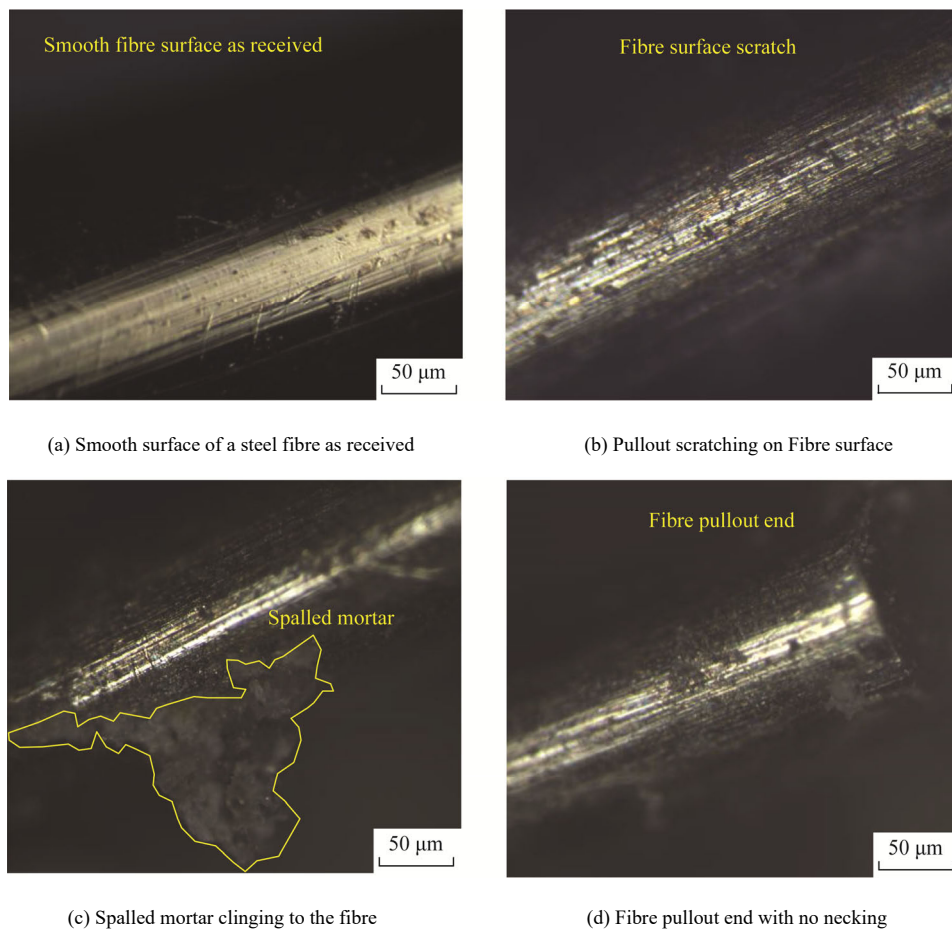


图 8 AUHPC 试件中纤维表面微观形貌

Fig. 8 Micrographs of fibre surface in fractured AUHPC

3 数值模拟

3.1 砂浆基体模拟

粘结单元(CEs)可用于模拟水泥基材料断裂过程区的能量耗散现象^[18-20]、纤维增强复合材料的粘

结滑移^[21]等。由图 9a 可见, 本细观模型通过在有限元实体单元中预先插设粘结单元, 来模拟砂浆基体裂缝张开和闭合的复杂非线性断裂过程, 具体插设算法可见文献[18-19]。

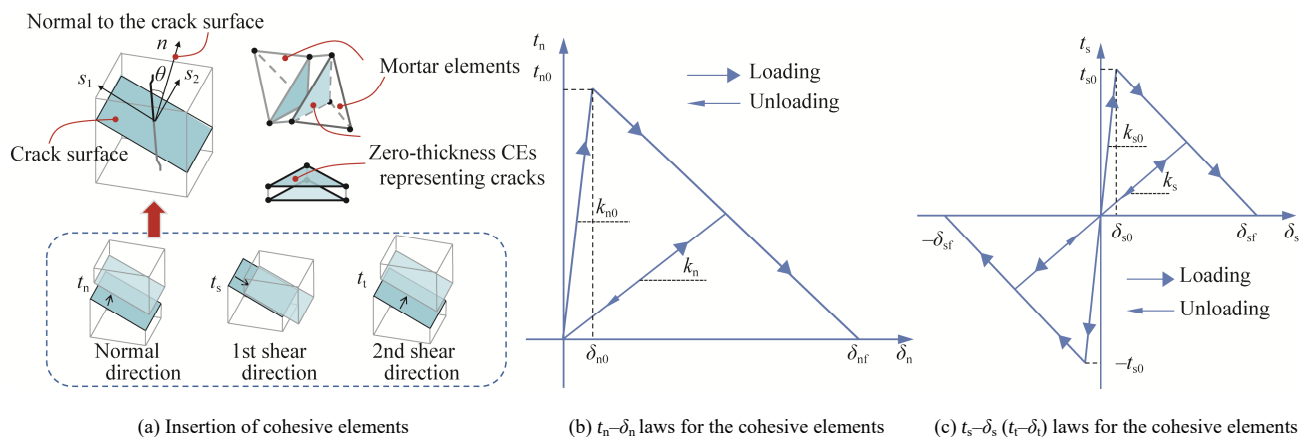


图 9 砂浆基体开裂模拟

Fig. 9 Modelling of mortar fracture

由图 9b~图 9c 可见, 在裂缝开展前, 粘结单元采用的应力-相对位移关系(t - δ)满足线性关系。当粘结单元的应力达到法向、切向强度 t_{n0} 、 t_{s0} 和 t_{t0} 后, 单元出现损伤, 采用损伤系数 D [0, 1] 描述其损伤程度, D 是裂缝单元有效相对位移 δ_m 的函数:

$$\delta_m = \sqrt{\langle \delta_n \rangle^2 + \delta_s^2 + \delta_t^2} \quad (3)$$

式中: δ_n 、 δ_t 、 δ_s 分别为法向、切向的相对位移; $\langle \rangle$ 为 Macaulay 括号, 表示为:

$$\langle \delta_n \rangle = \begin{cases} \delta_n, & \delta_n \geq 0 \text{ (受拉)} \\ 0, & \delta_n < 0 \text{ (受压)} \end{cases} \quad (4)$$

以线性软化准则为例, 损伤系数可以写成:

$$D = \frac{\delta_{mf}(\delta_{m,\max} - \delta_{m0})}{\delta_{m,\max}(\delta_{mf} - \delta_{m0})} \quad (5)$$

式中: $\delta_{m,\max}$ 为加载历史中的最大有效相对位移; δ_{m0} 和 δ_{mf} 分别为裂缝起裂和完全破坏时的有效相对位移。

D 也可反映单元刚度退化现象, 如式(5)~式(8)所示, 法向刚度 k_n 与切向刚度 k_s 、 k_t 分别表示为:

$$k_n = (1 - D)k_{n0} \quad (6)$$

$$k_s = (1 - D)k_{s0} \quad (7)$$

$$k_t = (1 - D)k_{t0} \quad (8)$$

式中: k_{n0} 、 k_{s0} 和 k_{t0} 为初始刚度(统称 k_0), 相应的应力则可以表示为:

$$t_n = \begin{cases} (1 - D)k_{n0}\delta_n, & \delta_n \geq 0 \\ k_{n0}\delta_n, & \delta_n < 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$t_s = (1 - D)k_{s0}\delta_s \quad (10)$$

$$t_t = (1 - D)k_{t0}\delta_t \quad (11)$$

采用名义应力平方准则作为起裂准则:

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_{n0}} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_{s0}} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_t}{t_{t0}} \right\}^2 = 1 \quad (12)$$

式中: t_n 、 t_s 和 t_t 分别为法向、切向的应力。

3.2 基于概率分布的纤维结构生成

本节介绍随机纤维结构的生成算法, 主要基于前述 2.1 节图像分析获得的真实纤维分布特征, 包含以下步骤:

1) 依据所需纤维体积掺量 V_f , 单根纤维体积 v_f , 试件体积 V_s , 计算得到纤维根数 N_f 。

$$N_f = \frac{V_c}{v_f} \times V_f \quad (13)$$

2) 将纤维倾角的频率直方图按照固定区间 $\Delta\theta$ 进行等分, 正态、均匀和 Weibull 分布如图 10 所示。

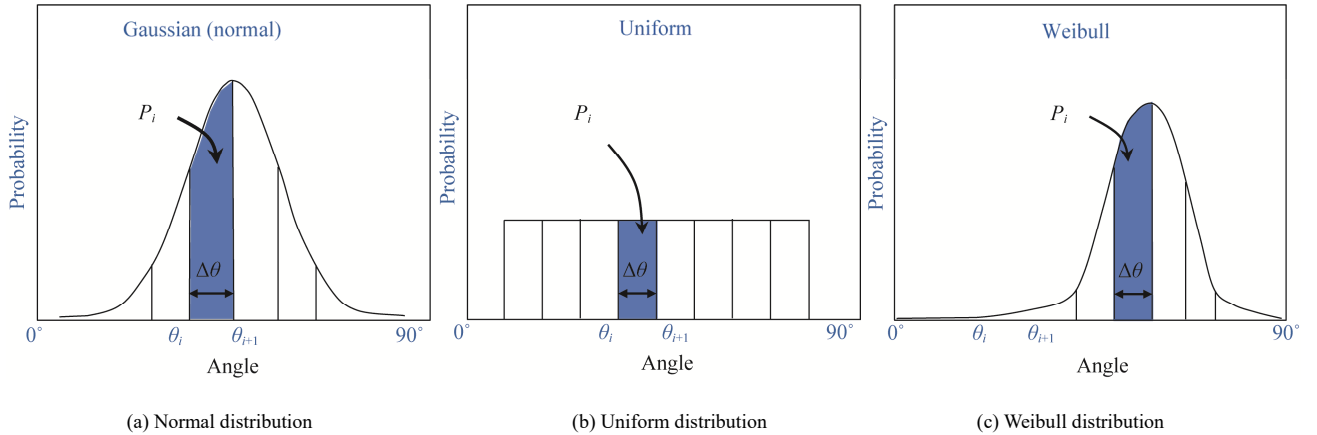


图 10 纤维倾角的概率分布形式

Fig. 10 Probability histograms of fibre orientation

例如, 对于正态(Gauss)分布, 每个区间的概率计算如下:

$$P_i = \int_{\theta_{i-1}}^{\theta_i} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] d\theta \quad (14)$$

从而得到该区间中的纤维根数为 $N_{fi} = N_f \times P_i$;

3) 从 0° 到 90° , 逐个区间生成纤维: 首先生成对应于纤维中心点与倾斜角度 θ ($\theta_{i-1} \leq \theta < \theta_i$) 的 2 个随机数, 再根据纤维长度生成端点坐标;

4) 确定端点坐标与试件目标区域的相对关系,

判断该纤维与边界区域是否相交。若相交, 则依据第 3 步重新生成纤维;

5) 重复 3~4 步骤, 直至满足目标纤维数量 N_f 。

图 11 为采用 20 个区间生成正态分布和均匀分布的纤维倾角频率图。由图 11 可见实际生成的纤维与理论值吻合良好, 验证了上述生成方法对不同纤维分布情况的有效性。

3.3 纤维-基体粘结滑移特性模拟方法

纤维-基体界面的非线性粘结滑移作用决定

了纤维在基体中的桥连作用,因此直接影响 UHPC 材料的承载能力和断裂损伤特性,如作者提出的离散-连续耦合细观模型^[21]包含了纤维、基体及二者之间的界面单元,因此可显式地模拟纤维变形、基体损伤及纤维的粘结滑移等机理。然而,考虑界面的二维模型需要构建纤维单元与基体单元协调一致的网格划分方法,较难直接扩展至含有大量随机纤维的三维模拟。再考虑到 UHPC 使用期间脱粘纤维数量较少且脱粘后纤维滑移量较小,因此本模型未直接模拟纤维-基体界面,而是假设纤维与基体处于紧密粘结状态(忽略纤维滑移),将纤维嵌入基体空间,高效地采用纤维应力-应变关

系间接模拟纤维-基体的非线性粘结滑移和桥连作用,即纤维的作用力对应相同倾角下单纤维的拉拔力。具体方法如图 12 所示,通过拟合单根纤维在不同倾角下的拉拔实验结果曲线^[22]来确定其应力-应变本构关系:

$$\sigma(s, \theta) = \frac{P(s) \cos \theta}{\pi d_f^2 / 4} \quad (15)$$

$$\varepsilon(s, \theta) = \frac{s}{L_f \cos \theta} \quad (16)$$

式中: σ 、 ε 分别为纤维的应力和应变, P 、 s 分别为拉拔力和滑动, d_f 和 L_f 分别为纤维的直径和长度, θ 为纤维与拉伸方向所成倾角。

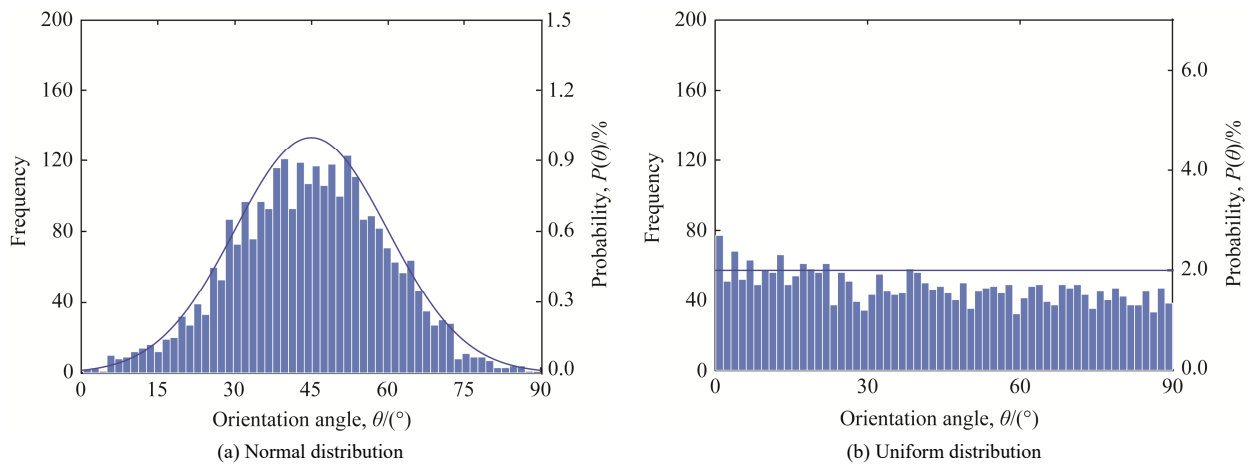


图 11 本工作随机算法生成的纤维倾角分布频率图

Fig. 11 Frequency histograms of fibre orientation using the random algorithms in this study

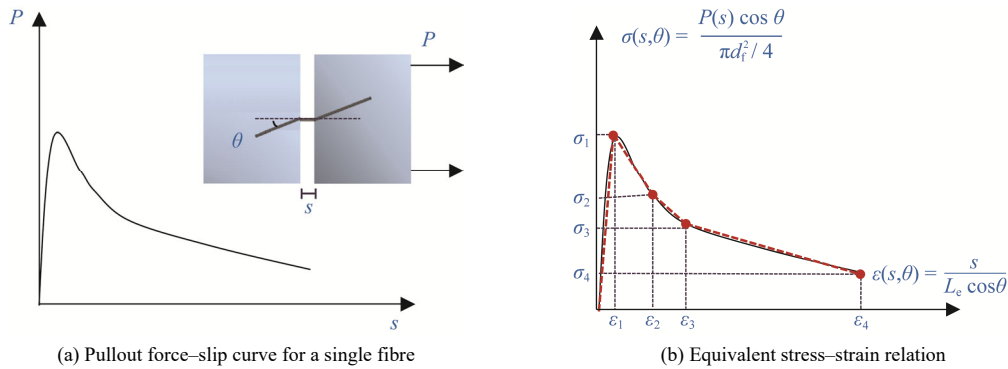


图 12 由单纤维拉拔力-位移曲线计算得纤维应力-应变关系

Fig. 12 Fibres' stress-strain relation based on the experimental pullout force-slip curve to model fibre bond-slip behaviour

对于大量随机分布的纤维,为便于数值计算,按照纤维倾角分为 $0^\circ \sim 7.5^\circ$ 、 $7.5^\circ \sim 22.5^\circ$ 、 $22.5^\circ \sim 37.5^\circ$ 、 $37.5^\circ \sim 52.5^\circ$ 和 $52.5^\circ \sim 67.5^\circ$ 5 组,对应于文献[22]中 0° 、 15° 、 30° 、 45° 和 60° 倾角的纤维拉拔力-位移关系,将四线性等效应力-应变曲线所需参数列于表 3。其中, 0° 倾角钢纤维的拉拔

失效模式通常表现为纤维拔出。倾斜纤维的拉拔端部与基体接触的部位会产生应力集中,增大了拉拔阻力,产生摩阻效应^[23-24]。该效应随着纤维倾角增大而增大,从而引起基体局部破坏并降低相应的拉拔力。上述四线性应力-应变关系能够等效地反映以上机理。

表 3 纤维四线性应力-应变本构相关参数

Table 3 Parameters in the quadri-linear stress-strain relations

θ	0°– 7.5°	7.5°– 22.5°	22.5°– 37.5°	37.5°– 52.5°	52.5°– 67.5°	67.5°– 90.0°
E_f	210	360	75	53	32	200
σ_1	879	1 415	1 624	1 045	1 362	10
σ_2	460	1 124	865	1 624	1 326	10
σ_3	542	778	146	769	510	10
σ_4	26	20	55	24	25	1
ε_1	0.01	0.01	0.03	0.04	0.17	0.01
ε_2	0.25	0.18	0.35	0.09	0.23	0.02
ε_3	0.34	0.39	0.45	0.39	0.44	0.03
ε_4	0.43	0.48	0.47	0.52	0.53	0.50

*The unit of stress σ in the table is MPa and the unit of elastic modulus E_f is GPa.

3.4 模型验证：单纤维拉拔实验(SFPT)

首先，本节通过模拟 5 种倾角(0°,15°,30°,45°及 60°)的单纤维拉拔实验^[22]来验证上节所提方法。如图 11 所示，将纤维嵌入在左右两侧基体中，通过水

平拉伸右侧基体模拟单纤维拉拔。模拟所用材料参数如下：砂浆的弹性模量 E 为 40 GPa，泊松比 ν 为 0.18，密度 ρ 为 2 100 kg/m³；纤维的弹性模量 E_f 见表 3，密度 ρ 为 7 850 kg/m³，纤维直径 d_f 为 0.2 mm，长度 L_f 为 13 mm (与验证实验^[22]和本工作开展的实验所用钢纤维一致)。粘结单元在达到强度之前的初始刚度应该足够高，从而模拟未开裂状态，否则会在达到强度、出现损伤之前就出现较大的裂缝面分离，导致模型整体偏软失真。但刚度过高可能导致算法不稳定。经过若干次尝试，本工作将粘结单元的初始刚度取为 400 GPa，从而保证模型初始弹性行为与未插设粘结单元的模型一致。本工作各算例均通过位移控制的方式加载，采用 Abaqus/Explicit 模块的显式求解器进行准静态分析^[18]。

模拟的单纤维拉拔结果如图 13 所示，可看出与实验结果相比非常接近，证明了本方法的有效性。该图也反映了不同倾角纤维的拉拔力具有明显差异，主要是由纤维弯曲、界面粘结滑移等耦合作用综合导致^[25–26]。

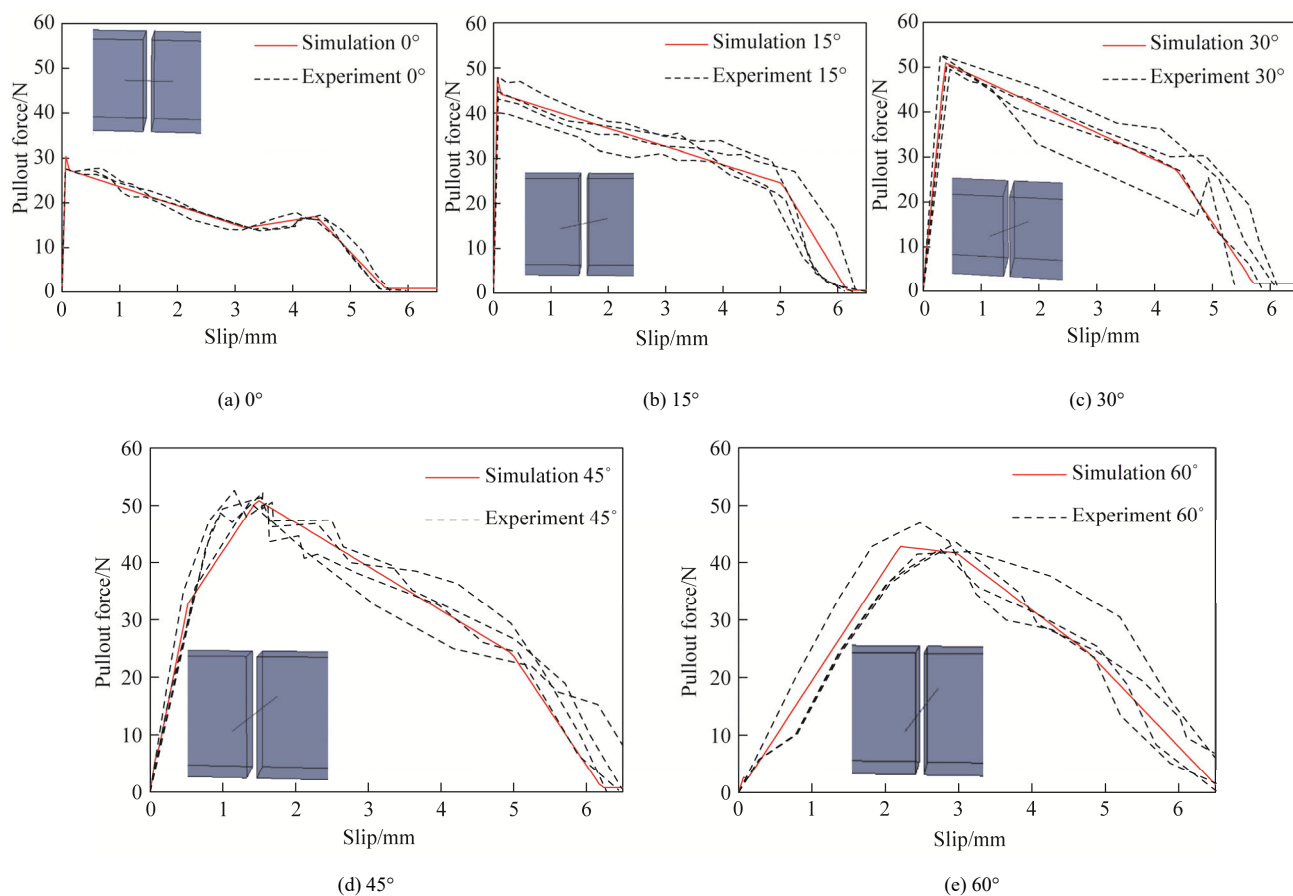


图 13 不同倾角下单纤维拉拔模拟与实验结果对比

Fig. 13 Comparison of pullout force-slip (P - s) relations between experimental data and simulation results

3.5 模型验证: UHPC 直接拉伸实验

进一步, 本节开展了 UHPC 梁的直接拉伸实验。其中, 纤维体积分数为 2%, 共计 1 910 根。边界和加载条件如图 14 所示: 左侧固定而右侧施加均布位移载荷 u^* 。另外, 加载边界两侧设置了 10 mm 的额外长度来避免边界破坏。模拟所用材料参数如下: 砂浆的弹性模量 E 为 40 GPa, 泊松比 ν 为 0.18, 密度 ρ 为 2 100 kg/m³; 黏结单元的初始刚度 k_0 为 400 GPa/mm, 密度 ρ 为 2 200 kg/m³, AUHPC、UHPC 和 PUHPC 抗拉强度 f_t 分别为 8、10 MPa 和 12 MPa, 断裂能 G_f 为 0.3 N/mm; 纤维的弹性模量 E_f 见表 3, 密度 ρ 为 7 850 kg/m³, 纤维直径 d_f 为 0.2 mm, 长度 L_f 为 13 mm。

图 15 为不同单元尺寸模型的破坏模式。由图 15 可见, 采用单元尺寸 L_e 分别为 3.0 mm 和 2.0 mm 进行网格收敛性分析, 即 11 343 和 34 044 个砂浆基体单元、21 540 和 65 560 个裂缝单元。2 个模型均采用相同的纤维结构, 拉伸应变为 1.5% 时的破坏模式如图 15 右侧所示, 其中宏观裂缝由张开的裂缝单元表示(损伤指数 $SDEG \geq 0.9$)。单元尺寸小于 3.0 mm 时, 不同网格的宏观裂缝形态比较接近且出现在相似位置, 细网格模型的裂缝路径更平滑。

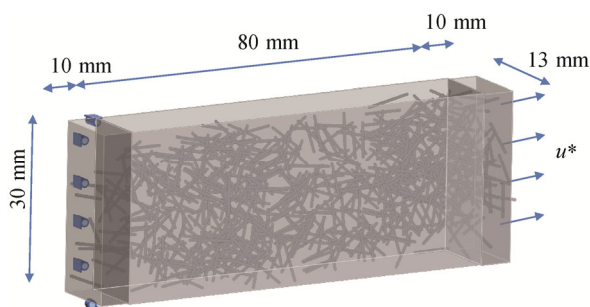


图 14 UHPC 试件直接拉伸实验的几何和边界条件

Fig. 14 Geometry and boundary conditions of the direct tensile tests of UHPC samples

图 16 为 2 种网格的拉伸应力-应变曲线, 其中应力为所有右边界节点的水平反力总和除以模型横截面面积。曲线的峰值应力(13.39 MPa 和 13.29 MPa)基本一致。因此, 在后续模拟中均使用尺寸 $L_e=3$ mm 来平衡计算精度和效率。

图 17 为纤维倾角的频率分布, AUHPC 和 PUHPC 试件中的纤维分布分别通过均值和方差为 (30°, 15°) 和 (55°, 15°) 的正态分布来模拟, UHPC 试件中的纤维采用均匀分布。图 18 为不同倾角组别的纤维空间分布, 可见对应于 AUHPC 试件,

22.5°~37.5° 倾角的纤维数量最多, 而 0°~7.5° 和 67.5°~90° 组的纤维数量最少。

图 19 为纤维未定向试件的典型开裂过程, 同时也给出了纤维应力的演化过程。其中裂缝用 $SDEG > 0.9$ 的粘结单元表示。当处于 $\varepsilon=0.03\%$ 的弹性阶段, 试件无裂缝, 受力纤维与拉伸方向平行且均匀地分布在试件中。当 $\varepsilon=0.14\%$ 时, 试件中出现了较多细小裂缝, 跨过这些细小裂缝的纤维应力增大, 部分可达 800 MPa, 试件同时出现了明显的应变硬化特征, 如图 20 所示。以上多缝开裂和应变硬化行为持续至 $\varepsilon=0.26\%$, 此时一些裂缝继续扩展, 同时纤维应力持续增加至 1 400 MPa。随后, 一条局部裂缝扩展形成两条独立的主裂缝, 而其他小裂缝逐渐闭合。与此对应, 远离主裂缝的纤维应力降低, 而跨过主裂缝的纤维应力继续增加至 2 000 MPa。试件逐步进入软化阶段, 直至试件整体破坏。由此可见, 本研究所提细观模型可较好地反应 UHPC 复杂的多缝开裂、纤维桥连等机理。

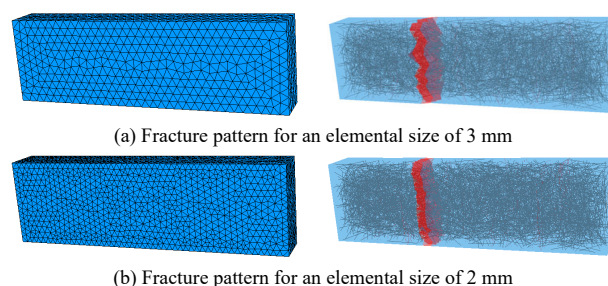


图 15 不同单元尺寸(3 mm 和 2 mm)模型的破坏模式(应变=1.5%)

Fig. 15 Two models with different elemental sizes (3 mm and 2 mm) and the corresponding crack patterns at strain=1.5%

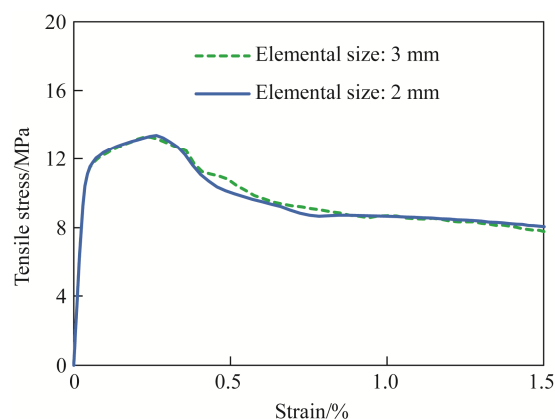


图 16 不同单元尺寸(3 mm 和 2 mm)模型对应的拉伸应力-应变曲线

Fig. 16 Tensile stress-strain curves for different meshes with elemental sizes of 3 mm and 2 mm, respectively

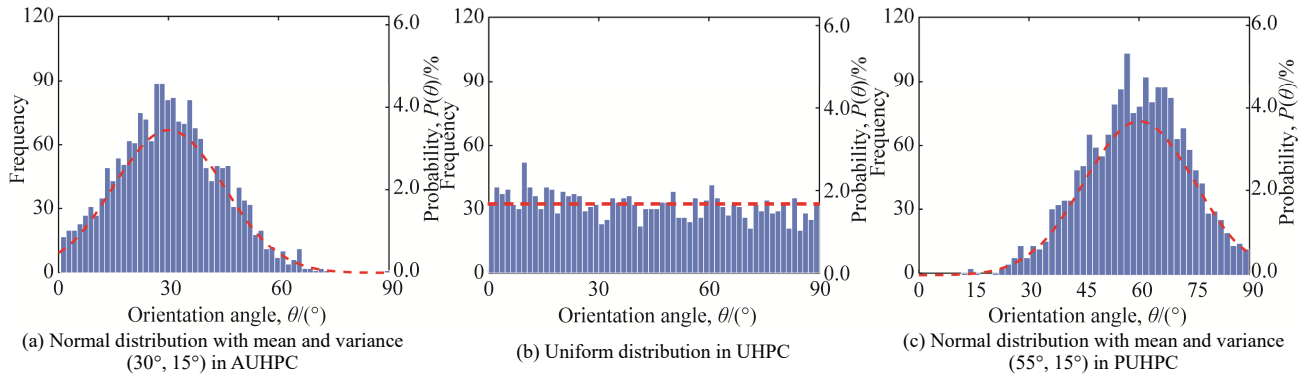


图 17 纤维倾角分布频率图
Fig. 17 Frequency histograms of fibre orientation angles

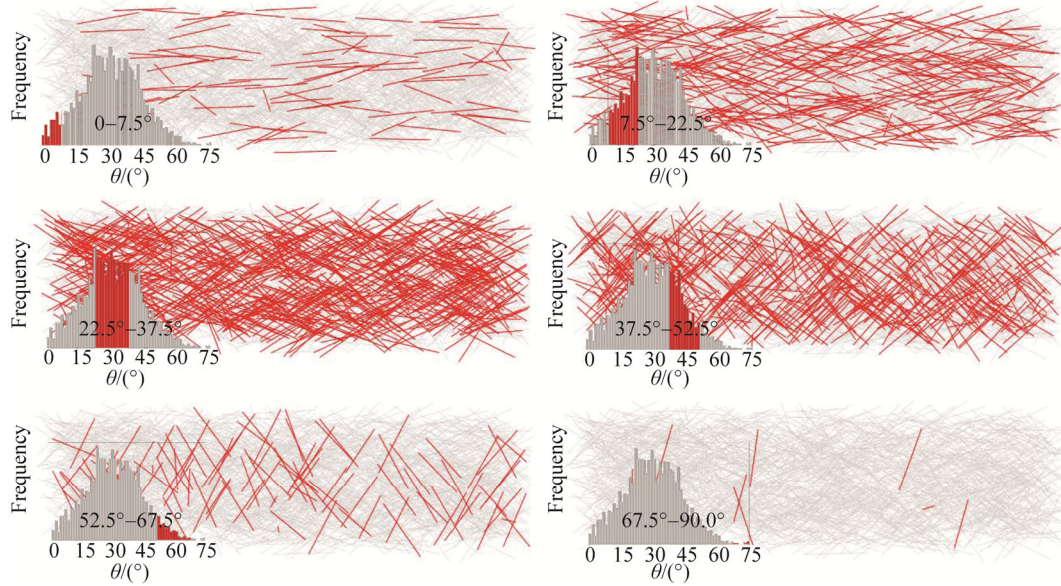


图 18 对应图 17a 中 AUHPC 试件的纤维空间分布图，红色标示特定角度范围内的纤维，其余纤维用灰色表示
Fig. 18 Highlighted fibres in red from different orientation groups with the rest of fibres in grey corresponding to the probability density distribution of AUHPC sample in Fig. 17a

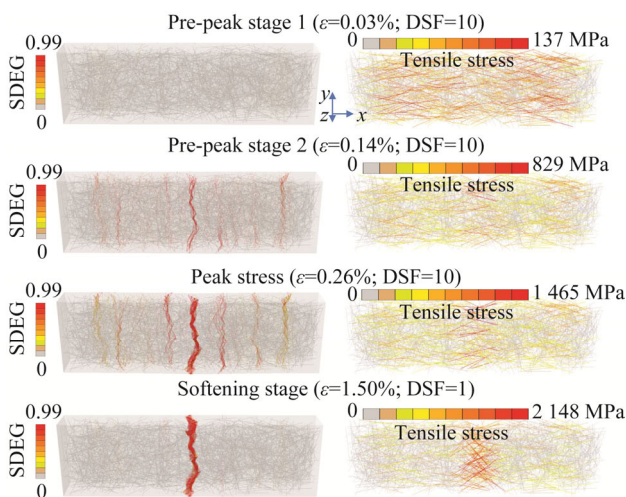


图 19 UHPC 试件开裂和纤维应力演化过程(注意不同阶段变形缩放系数 DSF 不同)
Fig. 19 Cracking process and fibre stress evolution in a UHPFRC specimen (Note that the deformation scaling factor (DSF) varies at different loading stages)

图 20 左栏给出了纤维倾角分布密度和相应试件的破坏模式，可看出 AUHPC 试件出现了 3 条宏观裂缝，而 UHPC 和 PUHPC 试件中均仅有 1 条宏观裂缝。同时，AUHPC 试件中的微裂缝数量明显多于 PUHPC 试件，此发现与本工作实验部分图 7 所示一致。图 20 右栏给出了对应试件中的纤维应力数值(从大到小排列)和空间分布，可看出 AUHPC 试件中纤维应力值更高。这是因为纤维取向与拉伸方向一致时，更有利于将应力传递至基体从而达到基体的开裂应力值，引起再次开裂。上述过程重复进行导致 UHPC 的多缝开裂现象，而多缝开裂又会增加起桥连作用纤维的应力。相反，垂直于拉伸方向的纤维，其应力传递效率最低。因此 PUHPC 试件中纤维的平均应力最低，仅为 94 MPa，而 AUHPC 和 UHPC 试件中纤维平均应力分别达到 328 MPa 和 188 MPa。上述发现表明，纤维的取向对其利用率有非常显著的影响。

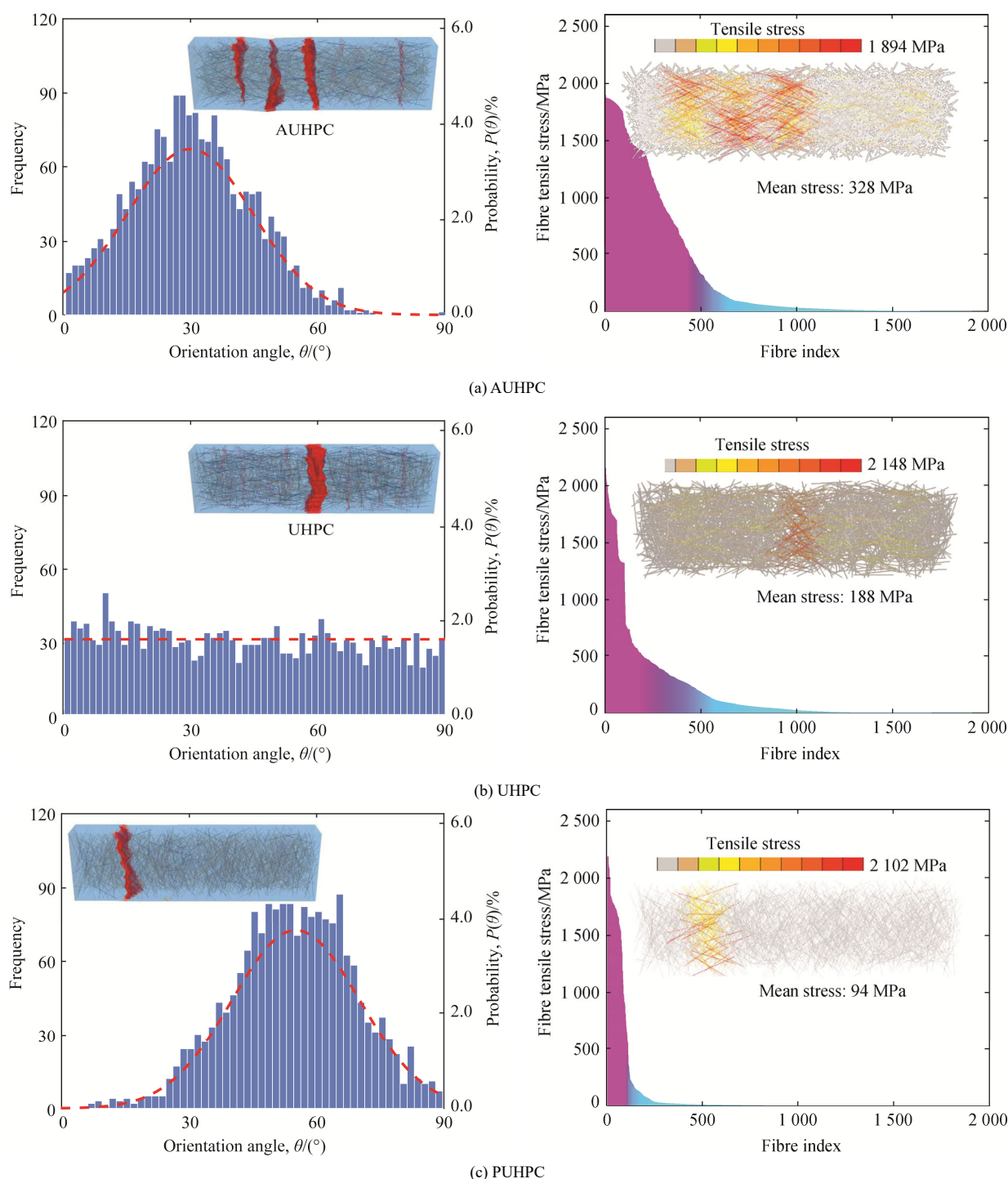


图 20 左栏: 纤维倾角频率分布及试件断裂模式(DSF = 10); 右栏: 不同试件中的纤维应力图

Fig. 20 Left column: frequency histograms of fibre orientation angles and the corresponding fracture pattern (DSF = 10); Right column: fibre stress diagrams in a descending order

上述不同的纤维应力水平也可由试件的宏观应力-应变关系、应变硬化程度和能量耗散程度来整体反映。图 21 为不同纤维取向的直接拉伸 UHPC 模型的应力-应变曲线与实验结果对比。由图 21 可见, AUHPC 试件具有最明显的应变硬化特征和最高的延性, PUHPC 试件则相对较脆, 且硬化特征较不明

显。这一发现与本实验研究一致, 均表明纤维取向在与拉伸方向一致时可获得最佳增强、增韧的效果, 与拉伸方向相反时则无法增强拉伸性能。因此, 调整纤维取向是 UHPC 提升强度、增加延性的有效途径之一, 采用定向流动工艺^[27]的一些实验研究也表明了这一点。

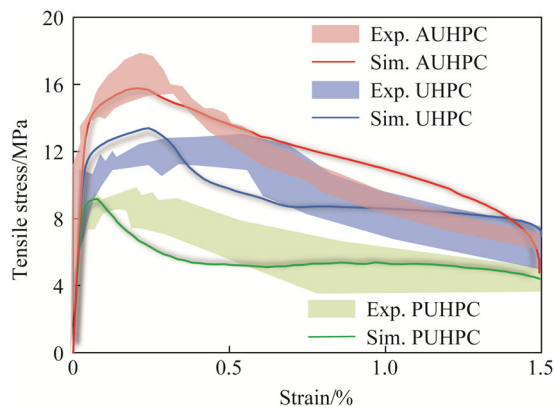


图 21 不同纤维取向 UHPC 模型的平均拉伸应力-应变曲线与实验结果对比

Fig. 21 Simulated tensile stress-strain curves of specimens with different fibre orientation in comparison with the experiments

4 结论

1) 纤维取向与主应力方向一致时, 纤维对裂缝的桥连作用更强, 因此 AUHPC 试件中的微裂缝数量更多、路径更为曲折, 其峰值应力更高、应变硬化现象更明显、耗散能量更多; 而 PUHPC 试件中仅出现单一裂缝, 且路径更平滑;

2) AUHPC 试件中钢纤维应用率较高, 其应力越高时对裂缝的桥连作用越强, 试件呈现出更为明显的应变硬化和多缝开裂特征; 而 PUHPC 试件中钢纤维平均应力较低, 利用率较低, 导致试件的延性不足、脆性显著。因此, 优化纤维取向是提高 UHPC 材料和结构构件强度和延性的一种经济有效的方法;

3) 基于纤维刚性嵌入和提出的纤维等效应力-应变本构关系, 本模型可高效模拟大量随机分布纤维的桥连作用, 因此可进一步用于对材料细观参数如纤维的尺寸、形状、分布和体积分数等的优化设计。

此外, 还有以下几个方面可供后续研究:

1) 本研究中纤维取向通过试件几处切面的纤维倾角频率直方图进行描述, 若想获得试件内全部纤维的分布特征, 需采取更为精细的测量纤维分布的方法, 比如采用 X 射线断层扫描(XCT)方法获得整体试件内部的纤维分布。

2) 若需进一步量化研究钢纤维取向特征和外加磁场之间的关系, 需结合浆体的流变性, 开展电压-磁感应强度-纤维取向特征的实验研究与理论计算工作。

3) 本研究中 UHPC 三维细观模型未考虑基体

中的孔洞和初始缺陷, 后续可通过显式模拟孔洞或者利用随机场理论来反映基体异质性, 定量研究孔洞、初始缺陷等对 UHPC 力学性能的影响。

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 Dehui, SHI Caijun, WU Linmei. Bull Chin Ceram Soc, 2016, 35(1): 141–149.
- [2] 陈聪聪, 吴泽媚, 胡翔, 史才军. 钢纤维形状和养护制度对超高性能混凝土强度及韧性的影响[J]. 材料导报, 2023–07–12.
- [3] KHAN M, LAO J C, DAI J G. Comparative study of advanced computational techniques for estimating the compressive strength of UHPC[J]. J Asian Concr Fed, 2022, 8(1): 51–68.
- [4] MILLARD S G, MOLYNEAUX T C K, BARNETT S J, et al. Dynamic enhancement of blast-resistant ultra high performance fibre-reinforced concrete under flexural and shear loading[J]. Int J Impact Eng, 2010, 37(4): 405–413.
- [5] 吕映庆, 陈南勋, 武海军, 等. 弹体高速侵彻超高性能混凝土靶机理[J]. 兵工学报, 2022, 43(1): 37–47.
LÜ Yingqing, CHEN Nanxun, WU Haijun, et al. Acta Armament, 2022, 43(1): 37–47.
- [6] BARNETT S J, LATASSTE J F, PARRY T, et al. Assessment of fibre orientation in ultra high performance fibre reinforced concrete and its effect on flexural strength[J]. Mater Struct, 2010, 43(7): 1009–1023.
- [7] HUANG H H, GAO X J, LI L S, et al. Improvement effect of steel fiber orientation control on mechanical performance of UHPC[J]. Constr Build Mater, 2018, 188: 709–721.
- [8] KANG S T, KIM J K. The relation between fiber orientation and tensile behavior in an Ultra High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (UHPFRCC)[J]. Cem Concr Res, 2011, 41(10): 1001–1014.
- [9] 慕儒, 吴航鹏, 卿龙邦. 定向分布钢纤维增强水泥基圆孔板单轴拉伸性能试验研究[J]. 混凝土, 2021, 8: 11–13.
MU Ru, WU Hangpeng, QING Longbang. Concrete, 2021, 8: 11–13.
- [10] HUANG H L, PENG C H, LUO J, et al. Micromechanical properties of interfacial transition zone between carbon fibers and UHPC matrix based on nano-scratching tests[J]. Cem Concr Compos, 2023, 139: 105014.
- [11] BITENCOURT L A G, MANZOLI O L, BITTENCOURT T N, et al. Numerical modeling of steel fiber reinforced concrete with a discrete and explicit representation of steel fibers[J]. Int J Solids Struct, 2019, 159: 171–190.
- [12] BOLANDER J E, CHOI S, DUDDUKURI S R. Fracture of fiber-reinforced cement composites: effects of fiber dispersion[J]. Int J Fract, 2008, 154(1): 73–86.
- [13] CUNHA V M C F, BARROS J A O, SENA-CRUZ J M. An integrated approach for modelling the tensile behaviour of steel fibre reinforced self-compacting concrete[J]. Cem Concr Res, 2011, 41(1): 64–76.
- [14] YU R C, CIFUENTES H, RIVERO I, et al. Dynamic fracture behaviour in fibre-reinforced cementitious composites[J]. J Mech Phys Solids, 2016, 93: 135–152.
- [15] 卿龙邦, 杨子美, 慕儒, 等. 定向钢纤维增强水泥基复合材料断裂细观数值模拟[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(2): 111–121.
QING Lognbang, YANG Zimei, MU Ru, et al. J Build Mater, 2023, 26(2): 111–121.

- [16] MU R, LI H, QING L B, et al. Aligning steel fibers in cement mortar using electro-magnetic field[J]. *Constr Build Mater*, 2017, 131: 309–316.
- [17] ZHANG H, HUANG Y J, LIN M, et al. Effects of fibre orientation on tensile properties of ultra high performance fibre reinforced concrete based on meso-scale Monte Carlo simulations[J]. *Compos Struct*, 2022, 287: 115331.
- [18] ZHANG H, HUANG Y J, XU S L, et al. 3D cohesive fracture of heterogeneous CA-UHPC: a mesoscale investigation[J]. *Int J Mech Sci*, 2023, 249: 108270.
- [19] 杨贞军, 黄宇劼, 尧锋, 等. 基于粘结单元的三维随机细观混凝土离散断裂模拟[J]. *工程力学*, 2020, 37(8): 158–166.
- YANG Z J, HUANG Y J, YAO F, et al. *Eng Mech*, 2020, 37(8): 158–166.
- [20] 柳波, 殷德胜, 陈博夫, 等. 基于粘结裂缝模型的混凝土细观力学特性模拟[J]. *水电能源科学*, 2015, 33(5): 101–104.
- LIU Bo, YIN Desheng, CHEN Bofu, et al. *Water Resour Power*, 2015, 33(5): 101–104.
- [21] ZHANG H, HUANG Y J, YANG Z J, et al. A discrete-continuum coupled finite element modelling approach for fibre reinforced concrete[J]. *Cem Concr Res*, 2018, 106: 130–143.
- [22] LEE Y, KANG S T, KIM J K. Pullout behavior of inclined steel fiber in an ultra-high strength cementitious matrix[J]. *Constr Build Mater*, 2010, 24(10): 2030–2041.
- [23] LI V C, WANG Y, BACKER S. Effect of inclining angle, bundling and surface treatment on synthetic fibre pull-out from a cement matrix[J]. *Composites*, 1990, 21(2): 132–140.
- [24] 吴畅, 王欣汝, 许铭纹, 等. 基于梁理论的 ECC 拉伸应变硬化与开裂行为的数值模拟[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(11): 5216–5227.
- WU Chang, WANG Xinru, XU Mingwen, et al. *Acta Mater Compos Sin*, 2022, 39(11): 5216–5227.
- [25] STROEVEN P, HU J. Effectiveness near boundaries of fibre reinforcement in concrete[J]. *Mater Struct*, 2006, 39(10): 1001–1013.
- [26] ZHANG H, YU R N. Inclined fiber pullout from a cementitious matrix: a numerical study[J]. *Materials*, 2016, 9(10): 800.
- [27] QU S Q, ZHANG Y, ZHU Y P, et al. Prediction of tensile response of UHPC with aligned and ZnPh treated steel fibers based on a spatial stochastic process[J]. *Cem Concr Res*, 2020, 136: 106165.

3D Mesoscale Fracture of Ultra-High Performance Concrete with Fibre Orientation Characteristics

HUANG Yujie¹, ZHANG Hui¹, GAO Chao², XU Shilang³

(1. School of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Zhejiang Province Institute of Architectural Design and Research, 310006, China;

3. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, 310058, China)

Extended Abstract

Introduction The orientation of steel fibres has an impact on the mechanical properties of ultra-high performance concrete (UHPC). It is difficult for the conventional experimental methods to maintain the same fibre orientation and distribution characteristics even under identical conditions, and there is a lack of mesoscale model that can simultaneously capture the complex mechanisms of crack evolution and fibre-mortar interaction in UHPC. This impedes the quantitative analysis and simulation validation. This paper thus conducted direct tensile tests of UHPC in an external magnetic field to achieve a certain fibre orientation, and the distribution density of fibre inclination angles was obtained *via* image analysis. The influence of fibre orientation on the fracture processes and stress-strain curves was investigated by a digital image correlation (DIC) technique. Also, a 3D microscale numerical model of UHPC was established to explicitly consider fibre orientation and distribution, single fibre pullout force-slip relations based on inclination angles, and discrete cohesive cracking of mortar. The model was validated by the experiments, the complex 3D fracture process of UHPC was quantified, and the influences of mesoscale factors (*i.e.*, fibre distribution and orientation) on the strain hardening characteristics, crack evolution and final morphology, and fibre bridging effects were investigated.

Methods In the experiments, steel fibre orientation was controlled through an external magnetic field, which was created by direct current in a coil loop. The dog-bone specimens were vibrated in the magnetic field during the sample preparation. As a result, the fibres were subjected to the electromagnetic force and underwent a directional distribution, *i.e.*, along the magnetic field direction. Three fibre orientations were a) parallel to the tensile direction, b) perpendicular to the tensile direction, and c) no magnetic field applied. This resulted in three groups of specimens termed aligned-UHPC (AUHPC), perpendicular-UHPC (PUHPC), and UHPC, respectively. A tensile testing device for dog-bone specimens was used to investigate the fibre orientation-dependent mechanical properties of UHPC for subsequent validation of simulations. The loading process was recorded by a high-speed camera, providing data for the fracture process analysis based on the DIC technique. In addition, the cut-off sections were analyzed on specimens AUHPC, UHPC, and PUHPC to obtain the orientation distribution characteristics of fibres for later simulations.

In the mesoscale simulation, cohesive elements were pre-inserted in the mortar to simulate the energy dissipation in the fracture process zone and the opening/closing of discrete cracks. Different fibre orientation distributions in specimens AUHPC, UHPC, and PUHPC were generated by a random algorithm. The fibre-mortar interaction was equivalently simulated through fibre constitutive laws, which were curve-fitted from the pullout force-slip relations extracted from single fibre pullout tests for various inclination angles. The mesoscale model was validated *via* single fibre pullout tests and direct tensile tests. In addition, the mesoscale influencing

factors on the complex multiple cracking and fibre bridging mechanisms were also quantified.

Results and discussion The experimental results reveal that the specimen AUHPC exhibits the most pronounced strain-hardening behavior and maximum peak stress, which are 2.3 times and 1.4 times greater than those of specimens PUHPC and UHPC, respectively. The first cracking stress of specimen AUHPC is also the maximum, while there is no obvious change in the elastic modulus. The increase in peak stress can be explained by the fracture process using DIC: when fibres are more aligned with the tensile direction, there are more microcracks in the specimen. This is because when the fibre orientation follows the tensile direction, the fibre bridging effect is the more intense, thus having the maximum crack resistance. When the fibre orientation is perpendicular to the tensile direction, the fibre bridging effect is the minimum. The final crack patterns of specimens AUHPC and UHPC are complex and tortuous, while the crack paths in specimen PUHPC are smoother and mostly perpendicular to the tensile direction. The distinct crack patterns also indicate the differences in the stress-strain curves. Moreover, from the cut-off sections of specimen AUHPC determined by optical microscopy, the fibres after the test have obvious pullout scratching on the fibre surfaces with spalled mortar clinging to them. In addition, there is no obvious necking at the fibre ends, indicating that the fibre failure is pullout rather than yield fracture. The mesoscale mechanisms (*i.e.*, interfacial failure, mortar detachment, and fibre pullout) indicate a much energy dissipation, which improves the material ductility.

The mesoscale simulations predict the fracture patterns and stress-strain curves, which are in reasonable agreement with the experimental results. Based on the analysis of fibre stress evolution, this work can quantify the process of microcrack initiation, multiple cracking, strain hardening, localized major cracks or macrocracks, and gradual closure of other microcracks with increasing the displacement. The stresses of fibres far away from the localization zones decrease, while the stresses of fibres crossing the major cracks continue to increase (*i.e.*, 2 000 MPa) due to fibre bridging. Afterwards, the specimen gradually enters the softening stage until complete failure. The specimen AUHPC exhibits three macrocracks, while specimens UHPC and PUHPC have only one macrocrack each. Besides, the quantities of microcracks in specimen AUHPC are much larger than those in specimen PUHPC, and the fibre average stress level in specimen AUHPC is much higher. This is because when the fibre is aligned with the tensile direction, more stresses can be transferred into the mortar, causing re-cracking, which is a repeated process, leading to multiple cracking in specimen AUHPC. As a result, the stresses of bridging fibres consistently increase. On the contrary, the efficiency of stress transfer for the fibres perpendicular to the tensile direction is the lowest, with the minimum fibre average stress of 94 MPa in specimen PUHPC, while AUHPC and UHPC have 328 MPa and 188 MPa, respectively. It is evident that the fibre orientation has an impact on the fibre utilization level. The simulated stress-strain curves demonstrate that specimen AUHPC has the most pronounced strain hardening and the maximum ductility, while specimen PUHPC is relatively brittle and shows no strain-hardening characteristics. This indicates that aligning the fibres with the tensile direction is an effective way to enhance the strength and ductility of specimen UHPC.

Conclusions When the fibre orientation was consistent with the principal stress direction, the fibre had a bridging effect on cracks. Therefore, specimen AUHPC had more microcracks, more tortuous paths, higher peak stress, more pronounced strain hardening, and more energy dissipation. specimen PUHPC had only one single, much smoother crack and showed no strain hardening. In addition, specimen AUHPC had the maximum fibre utilization level with the maximum fibre average stress, thus having the most intense bridging effect. The fibre average stress in specimen PUHPC was the minimum with insufficient ductility and significant brittleness. Therefore, optimizing the fibre orientation could be an effective way to improve the strength and ductility of specimen UHPC. Although the fibre-mortar interfaces were not simulated directly, the proposed mesoscale model with rigid embedment of fibres and equivalent fibre stress-strain constitutive relation could prove computationally efficient in simulating the bridging effects from massive random fibres. Therefore, the model could be used for the optimization of material parameters such as fibre dimensions, shape, distribution and volume fraction.

Keywords ultra-high performance concrete; fibre orientation; digital image correlation techniques; bond-slip; 3D fracture simulation at mesoscale