

文章编号:1001-7372(2015)08-0050-09

## 超高性能混凝土轴拉性能试验

张 哲<sup>1</sup>, 邵旭东<sup>1,2</sup>, 李文光<sup>1</sup>, 朱 平<sup>1,2</sup>, 陈 洪<sup>1,2</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 湖南大学 风工程与桥梁工程湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**为提高超高性能混凝土(UHPC)的初裂应变,在基体中混合掺入平直钢纤维和端钩钢纤维,考虑纤维掺量和形状的影响,对掺混合纤维的 UHPC 进行了轴拉试验。采用控制变量法,将 4 种含不同纤维掺量的 UHPC 材料的轴拉特征参数进行了对比分析。基于实测曲线,提出了包含应力-应变关系和应力-裂缝宽度关系的两阶段拉伸本构模型。研究表明:不同纤维掺量的 UHPC 材料的拉应力-伸长曲线随多元开裂均呈明显的应变硬化特性;当钢纤维掺量由 2% 增至 3.5% 时,可视初裂应变增加 201%,且端钩纤维的增强效率为平直纤维的 3.52 倍;含 3.5% 纤维掺量的 UHPC 材料的可视初裂应变和极限应变分别高达  $1.777 \times 10^{-3}$  和  $1.941 \times 10^{-3}$ ,均与普通钢筋屈服应变( $2 \times 10^{-3}$ )接近,可视初裂前 UHPC 材料能与钢筋协同变形;UHPC 受拉本构关系模型与试验数据均符合较好。

**关键词:**桥梁工程;超高性能混凝土;直接拉伸试验;拉伸性能;应变硬化

中图分类号:U444

文献标志码:A

## Axial Tensile Behavior Test of Ultra High Performance Concrete

ZHANG Zhe<sup>1</sup>, SHAO Xu-dong<sup>1,2</sup>, LI Wen-guang<sup>1</sup>, ZHU Ping<sup>1,2</sup>, CHEN Hong<sup>1,2</sup>

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

2. Hunan Province Key Laboratory of Wind and Bridge Engineering,

Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China)

**Abstract:** To enhance the crack-observed strain of Ultra High Performance Concrete (UHPC), hybrid steel fibers including straight fibers and hooked-end fibers were blended into the matrix of UHPCs. Considering the influence of fiber content and fiber shape, axial tensile test of UHPC with hybrid fibers was investigated. With control variable method, axial tensile characteristic parameters of UHPCs with four different fiber contents were compared. Based on measured tensile stress-elongation curves, a two-stage tensile constitutive model of UHPC comprised of a stress-strain response and a stress-crack opening relationship was proposed. The results show that tensile stress-elongation curves of UHPC with different hybrid fiber contents apparently exhibit strain-hardening behavior with multiple cracking. As the fiber content increases from 2% to 3.5%, the crack-observed strain considerably improves by 201% and the enhancement of hooked-end fibers is 3.52 times greater than that of the straight fibers. With addition of 3.5% hybrid fibers by volume, the strains, corresponding to the observed cracking and stress softening, are  $1.777 \times 10^{-3}$  and  $1.941 \times 10^{-3}$  respectively, which approach the yielding strain of

收稿日期:2014-09-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51178177, 51378194);交通运输部重大科技专项项目(2011318494160)

作者简介:张 哲(1986-),男,湖南常德人,工学博士研究生,E-mail:zhangzhe@hnu.edu.cn。

**Key words:** bridge engineering; ultra high performance concrete; direct tension test; tensile behavior; strain-hardening

本文在应变硬化 UHPC 材料拉伸特性的基础上,以平直钢纤维和变形钢纤维混合掺量为可变参数,设计直接拉伸试验,探索不同纤维掺量和形状对 UHPC 材料可视初裂应变的影响,并基于试验结果提出包括应力-应变关系和应力-裂缝宽度关系的两阶段受拉本构模型。

Figure 1 illustrates the stress-strain relationship for concrete under uniaxial tension, divided into three stages:

- Stage I: Linear elastic segment (线性上升段)
- Stage II: Strain hardening segment (应变硬化段)
- Stage III: Strain softening segment (应力软化段)

The graph shows stress ( $\sigma$ ) on the vertical axis and strain ( $\varepsilon$ ) on the horizontal axis. Key points on the curve are A ( $\sigma_{sc}$ ,  $\varepsilon_{sc}$ ) and B ( $\sigma_{pc}$ ,  $\varepsilon_{pc}$ ). The diagram also indicates the crack width ( $w$ ) on the horizontal axis, which is zero until the peak stress ( $\sigma_{pc}$ ) and then increases linearly with strain.

应变硬化和多元开裂是 UHPC 材料轴拉性能的主要特征,其中应变硬化的条件可从 3 个方面来阐述:①从受力层次上,UHPC 材料应变硬化的条件为  $\sigma_{pc} \geq \sigma_{cc}^{[9]}$ ,见图 1;②能量守恒原理认为,伴随多缝开裂的应变硬化过程中产生新裂缝所需能量小于使现有裂缝贯通所需的能量<sup>[14]</sup>;③从断裂能的角度看,应变硬化时单位面积上纤维增强复合材料的能量释放率小于材料断裂能<sup>[15]</sup>。本文中采用力学

条件  $\sigma_{pc} \geq \sigma_{cc}$  判别应变硬化特性。

因初裂存在 2 种判别准则,故初裂应力  $\sigma_{cc}$  分为线性偏离初裂应力  $\sigma_{cn}$  和可视初裂应力  $\sigma_{cb}$ ;初裂应变  $\epsilon_{cc}$  分为线性偏离初裂应变  $\epsilon_{cn}$  和可视初裂应变  $\epsilon_{cb}$ 。定义峰值应力  $\sigma_{pc}$  对应的应变为极限应变  $\epsilon_{pc}$ ,即超过  $\epsilon_{pc}$  后材料进入应力软化段。本文重点探讨纤维掺量和形状等对可视初裂应变  $\epsilon_{cb}$  和极限应变  $\epsilon_{pc}$  的影响。

## 2 UHPC 直接拉伸试验

### 2.1 混凝土拉伸试验方法

混凝土的拉伸性能常可由 4 种方法测得:劈裂试验、弯曲试验、八字模试验和直接拉伸试验。各拉伸测试方法的对比见表 1。

表 1 混凝土拉伸性能试验方法

Tab. 1 Tension Behavior Test Methods for Concrete

试验方法	劈裂试验	弯曲试验	八字模试验	直接拉伸试验
试验形状	圆柱体	棱柱体	八字形	圆柱体/狗骨头形
试验标准	ASTM C496 <sup>[16]</sup>	ASTM C1609 <sup>[17]</sup>	CRD C260 <sup>[18]</sup>	
加载方式	中心面受剪	四点受弯	单向受拉	单向受拉
结果比较	$f_{st} > f_t$	$f_{ft} > f_t$	$f_{mt} > f_t$	$f_{dt} \approx f_t$
适用范围	NC	NC 或 UHPC	砂浆或 NC	UHPC

注:NC 为普通混凝土。

劈裂试验适用于裂缝出现即破坏的普通混凝土 (NC),但极限状态下材料承受剪、压和拉应力的共同作用可能导致不准确的抗拉强度  $f_{st}^{[6]}$ 。

弯曲试验因试件尺寸效应和截面应力梯度效应,测得的抗拉强度  $f_{ft}$  常大于材料真实的抗拉强度  $f_t^{[19]}$ ,法国 UHPC 设计规程<sup>[20]</sup>考虑了尺寸效应对弯曲抗拉强度的修正系数。

八字模试验因试件尺寸小,钢纤维平行于受拉方向分布的取向性常造成八字模抗拉强度  $f_{mt}$  大于材料真实的抗拉强度<sup>[6]</sup>。

直接拉伸试验需精密的测试仪器和精确的对中与夹头装置,但其可使试件产生较均匀的单向拉应力场,并保证裂缝的开展和失效均发生在此区域,故直接拉伸强度  $f_{dt}$  被认为能较准确反映混凝土真实抗拉强度<sup>[21]</sup>,因此本文中采用直接拉伸试验方法。

### 2.2 UHPC 材料制备

UHPC 材料基体配合比见表 2。为获得稳定的应变硬化特性,UHPC 中混合掺入平直型和端钩型 2 种高强钢纤维,以纤维体积总掺量为变量分为 4 组(每组 3 个试件),详细的纤维特征参数见表 3。

UHPC 材料硬化后在温度 90 ℃ 和相对湿度为 95% 的蒸汽环境下养护 48 h。表 4 为 UHPC 材料

表 2 UHPC 基体配合比

Tab. 2 Composition Ratio of UHPC Matrix

组分	水泥	硅灰	石英砂	石英粉	减水剂	水
质量比	1.000	0.250	1.100	0.300	0.019	0.225

表 3 钢纤维特征参数

Tab. 3 Characteristic Parameters of Steel Fibers

试件组		DTF20	DTF25	DTF30	DTF35
平直形 钢纤维	长度/mm	8	8	8	8
	直径/mm	0.12	0.12	0.12	0.12
	长径比	66.7	66.7	66.7	66.7
	掺量/%	1.0	1.0	1.5	1.5
端钩形 钢纤维	长度/mm	13	13	13	13
	直径/mm	0.2	0.2	0.2	0.2
	长径比	65	65	65	65
	掺量/%	1.0	1.5	1.5	2.0
纤维掺量/%		2.0	2.5	3.0	3.5

注:试件编号中“DT”代表轴拉试验,“F”表示钢纤维掺量;掺量指体积分数。

表 4 UHPC 材料实测的基本力学性能

Tab. 4 Measured Mechanical Properties of UHPC

试件组	抗压强度/ MPa	抗折强度/ MPa	受压弹性 模量/GPa	密度/ (kg · m <sup>-3</sup> )	泊松比
DTF20	146.8	21.2	42.6	2 495	0.19
DTF25	158.4	23.4	42.8	2 518	0.19
DTF30	170.9	26.3	43.0	2 532	0.19
DTF35	176.2	27.4	43.1	2 550	0.19

实测的基本力学性能。

### 2.3 试件尺寸及试验装置

UHPC 材料轴拉特性受试件尺寸、纤维分布及方向等影响显著<sup>[8]</sup>,为保证试件内钢纤维三维随机分布,本试验采用 400 mm × 100 mm × 100 mm 的棱柱体试件。为提高端面平整度并消除试件端部纤维平行于端部分布现象<sup>[6]</sup>,试件两端各切除 20 mm。为减小几何偏心对试验的影响,试件端部与夹头间设有双向球铰调节装置(图 2)。

试验采用 600 kN 的 MTS 电液伺服试验机加载。为精确测量试件的变形,试验设计了钢制变形测试系统,如图 3 所示。试件表面安装 2 个线性可变位移计(LVDT)以测量轴向变形,LVDT 采集的变形信号自动平均后传送至 MTS 微机控制系统。试验以实测的轴向伸长率为控制目标,加载速率设为  $1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ <sup>[6]</sup>。可视初裂后采用裂缝宽度观测仪采集和量测裂缝宽度。

### 2.4 试验结果

试验测得的平均应力-伸长率曲线如图 4 所示。

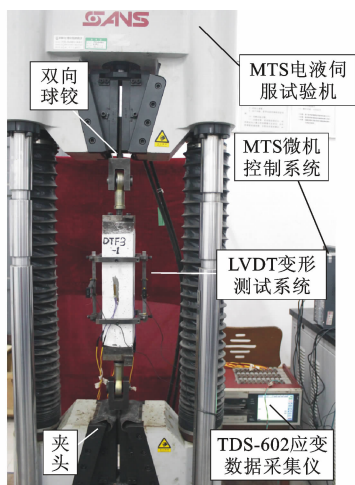


图 2 轴拉试验装置  
Fig. 2 Setup of Axial Tension Test

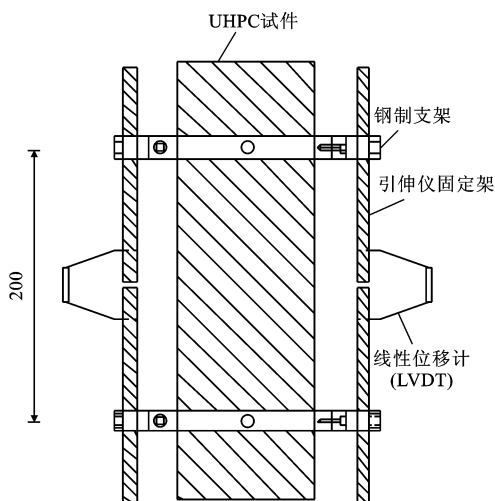


图 3 变形测试系统 (单位:mm)  
Fig. 3 Displacement-measuring Apparatus (Unit:mm)

曲线开始均呈线性陡峭上升,初始微裂纹产生后线性关系发生偏离。曲线的线性阶段末,连接微裂纹的钢纤维开始发挥作用,因变形纤维粘结力较高,不断促使裂缝面上纤维-基体间应力传递与重分布,此时拉应力水平基本不变,而应力传递作用范围外逐渐产生多条微裂缝,曲线进入应变硬化阶段。随变形增加,裂缝密度饱和后,某裂缝面上纤维桥接作用形成的基体-纤维结合面拉应力传递条件不再满足,应变硬化阶段结束。应力软化段时,宏观裂缝出现并迅速扩展,而宏观裂缝外的部分应变回缩、拉应力卸载,其他裂缝宽度变窄,最终试件在宏观裂缝处断裂分开,试件最终破坏形态见图 5。图 4 中部分拉伸曲线应力软化段呈卸载特性,因为实测宏观裂缝随机出现在变形测量标距段外(图 5),而标距段内未开裂的 UHPC 弹性卸载回缩,测得了卸载模量  $E^*$ 。

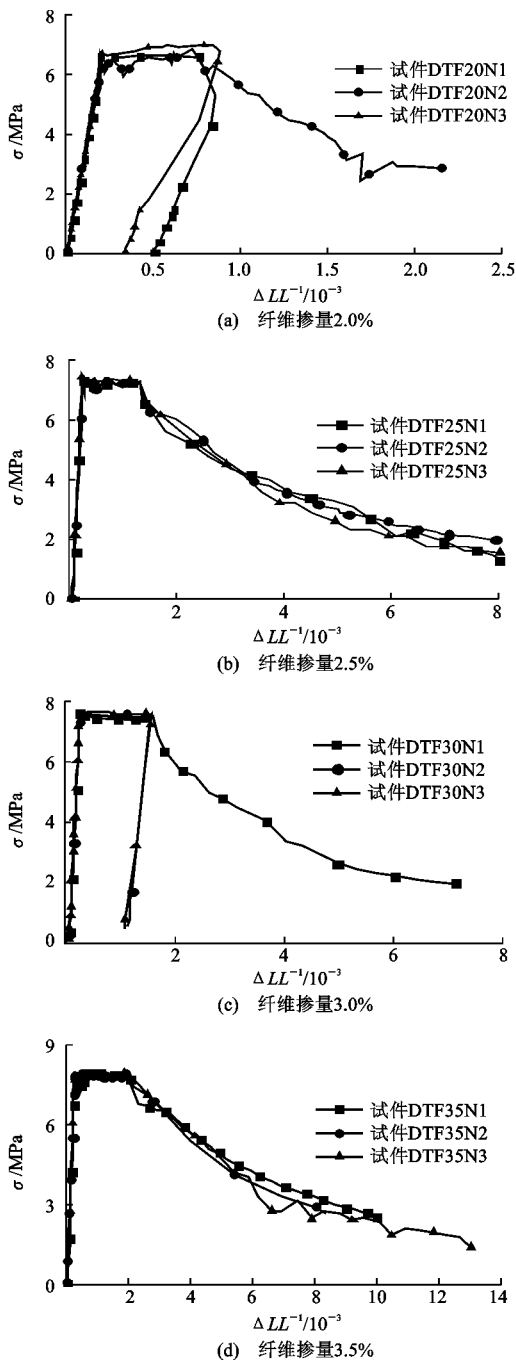


图 4 应力-伸长率曲线  
Fig. 4 Curves of Stress-elongation

### 3 试验分析

应力软化前材料的伸长率可转化为受拉应变,而软化段伸长率由宏观裂缝的发展控制,故 UHPC 材料的拉应力-伸长曲线可由应力软化前的应力-应变关系  $\sigma(\epsilon)$  和应力软化段的应力-裂缝宽度关系  $\sigma(w)$  两部分描述。

#### 3.1 弹性阶段和应变硬化阶段

由图 4 可见,4 种不同混合钢纤维掺量的 UH-

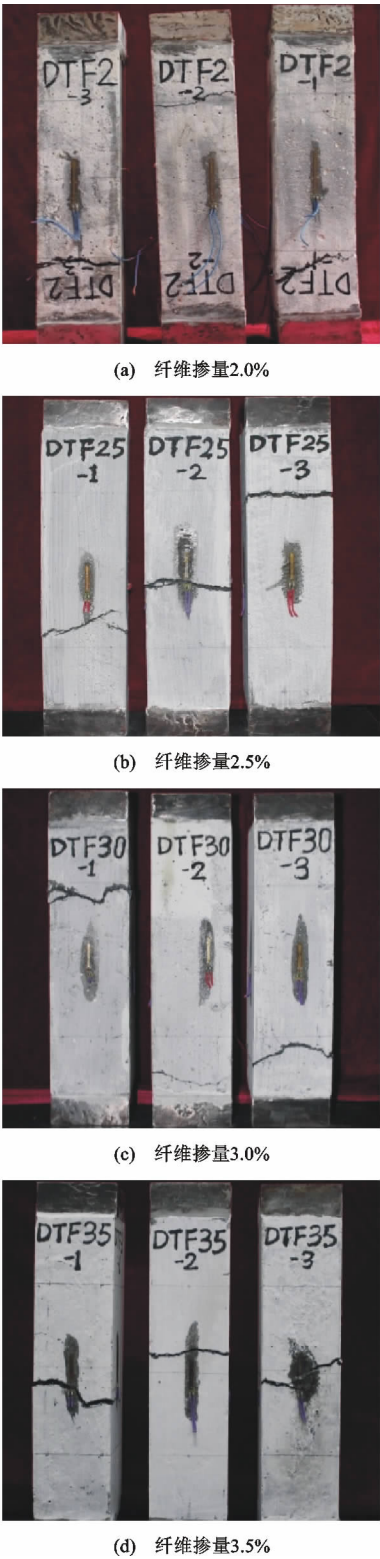


图 5 拉伸试件破坏形态

Fig. 5 Tensile Failure Modes of Specimens

PC 材料应力软化前应力-应变关系  $\sigma(\epsilon)$  均出现较明显的应变硬化平台 ( $\sigma_{ca} \approx \sigma_{cb} \approx \sigma_{pc}$ ,  $\epsilon_{ca} < \epsilon_{cb} < \epsilon_{pc}$ ), 即伪应变硬化阶段。

将图 4 中应力-伸长率曲线获得的轴拉特征参

数汇总于表 5。由表 5 可知, 钢纤维体积掺量由 2% 增至 3.5%, UHPC 材料的线性偏离初裂应力  $\sigma_{ca}$  提高了 19.1%, 而线性偏离初裂应变  $\epsilon_{ca}$  受纤维掺量和形状变化影响很小。

表 5 应力-伸长率曲线特征参数

Tab. 5 Characteristic Parameters of Stress-elongation Curves

试件 编号		$\sigma_{ca} /$ MPa	$\epsilon_{ca} /$ $10^{-6}$	$\sigma_{cb} /$ MPa	$\epsilon_{cb} /$ $10^{-6}$	$\sigma_{pc} /$ MPa	$\epsilon_{pc} /$ $10^{-6}$	$E^* /$ GPa
DTF20	N1	6.65	194	6.67	579	6.62	764	15.1
	N2	6.63	198	6.75	612	6.91	727	
	N3	6.72	201	7.15	575	7.02	803	13.9
	平均值	6.67	198	6.86	589	6.85	765	14.5
DTF25	N1	7.33	197	7.24	1 087	7.25	1 258	
	N2	7.38	189	7.27	1 110	7.25	1 273	
	N3	7.42	190	7.32	1 101	7.23	1 269	
	平均值	7.38	192	7.28	1 099	7.24	1 267	
DTF30	N1	7.65	193	7.52	1 397	7.57	1 559	
	N2	7.75	196	7.65	1 362	7.69	1 520	15.8
	N3	7.72	195	7.62	1 355	7.63	1 510	14.6
	平均值	7.71	195	7.60	1 371	7.63	1 530	15.2
DTF35	N1	7.92	199	7.86	1 752	7.89	1 906	
	N2	7.98	200	7.88	1 780	7.92	1 948	
	N3	7.88	197	7.91	1 798	7.87	1 969	
	平均值	7.93	199	7.88	1 777	7.89	1 941	

以工程常用的可视初裂为判别准则, 随钢纤维体积掺量由 2% 增至 3.5%, UHPC 材料可视初裂应力  $\sigma_{cb}$  提高了 15.0%, 而可视初裂应变  $\epsilon_{cb}$  受钢纤维形状和掺量的影响较为显著 (图 6),  $\epsilon_{cb}$  由  $589 \times 10^{-6}$  增至  $1 777 \times 10^{-6}$  (增幅高达 201%); DTF30 试件相比于 DTF25 试件组, 平直纤维掺量增加了 0.5%,  $\epsilon_{cb}$  增加了 24.6%, 而 DTF25 与 DTF20 试件组相比, 端钩纤维掺量增加了 0.5%,  $\epsilon_{cb}$  提高了 86.6%, 故端钩纤维的增强作用约为平直纤维的 3.52 倍。由此可见, 混合钢纤维方案能大幅提高 UHPC 材料的可视初裂应变, 且端钩钢纤维的增强效率显著优于平直钢纤维。

混凝土初裂应变小 (约  $8.0 \times 10^{-5}$ ), 钢筋混凝土结构初裂时钢筋应力水平低 (不足 20 MPa), 钢筋对结构可视初裂影响很小。含 3.5% 混合纤维的配筋 UHPC 结构因 UHPC 具有较高的可视初裂应变 (与钢筋屈服应变之比约为 0.79), UHPC 材料能使其可与钢筋协同变形, 故可视初裂时 UHPC 结构中的钢筋应力可达 300 MPa 以上, 钢筋可有效限制配筋 UHPC 结构可视初裂的发展。因此, 含 3.5% 混合钢纤维的配筋 UHPC 结构有望适应高性能组合

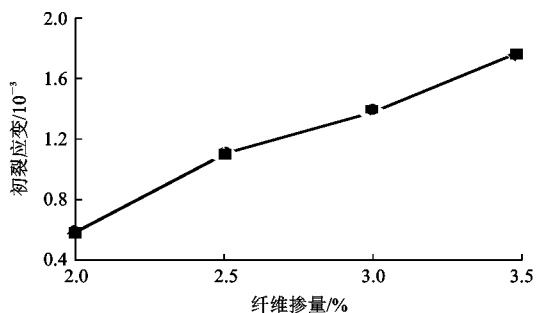


图 6 可视初裂应变与纤维掺量的关系

Fig. 6 Relationship Between Crack-observed Strains and Fiber Contents

桥面系在复杂荷载作用下 UHPC 层较高的应力水平。

同样,随纤维掺量从 2% 增至 3.5%,UHPC 峰值应力  $\sigma_{pc}$  增加了 15.1%,而极限应变  $\epsilon_{pc}$  提高了 153%,且端钩纤维的增强效率也显著优于平直纤维(约为 3.2 倍),纤维掺量和形状对极限应变影响也很明显。另外,含 3.5% 纤维掺量的 UHPC 材料的极限应变高达  $1.941 \times 10^{-3}$ ,非常接近普通钢筋的屈服应变(约为普通钢筋屈服应变的 97%),故钢筋也显著影响可视初裂后 UHPC 结构的多元开裂过程,表明配筋 UHPC 结构将随材料多缝开展而呈现良好的延性和韧性。

### 3.2 应力软化阶段

UHPC 材料应力-伸长率曲线应力软化段如图 4 所示。为与实测的裂缝宽度数据对比,需将图 4 中软化段应力-伸长率曲线转化为应力-裂缝宽度曲线。设试件变形测量段的标距为  $l_m$ ,拉伸至极限应变  $\epsilon_{pc}$  时伸长为  $\Delta l_0$ 。应力软化段试件伸长  $\Delta l$  的增加为宏观裂缝处裂缝宽度  $w$  的增长与未开裂部分伸长减小之和,其为平均应力变化值  $\Delta\sigma$  的函数。假设未开裂部分 UHPC 以模量  $E^*$  为斜率线性卸载,其卸载变形  $(l_m + \Delta l - w) \Delta\sigma / E^*$  近似为  $l_m \Delta\sigma / E^*$ ,则试件的伸长  $\Delta l$  为

$$\Delta l = \Delta l_0 + w + \frac{\Delta\sigma}{E^*} l_m \quad \Delta\sigma < 0 \quad (1)$$

由式(1)得裂缝宽度  $w$  为

$$w = \Delta l - \Delta l_0 - \frac{\Delta\sigma}{E^*} l_m \quad (2)$$

直接拉伸试验实测的应力-裂缝宽度曲线与式(2)得出的曲线对比如图 7 所示,可见两者较为吻合。因图 4 中部分伸长曲线应力软化段卸载回缩,故未能转化为相应的应力-裂缝宽度曲线。

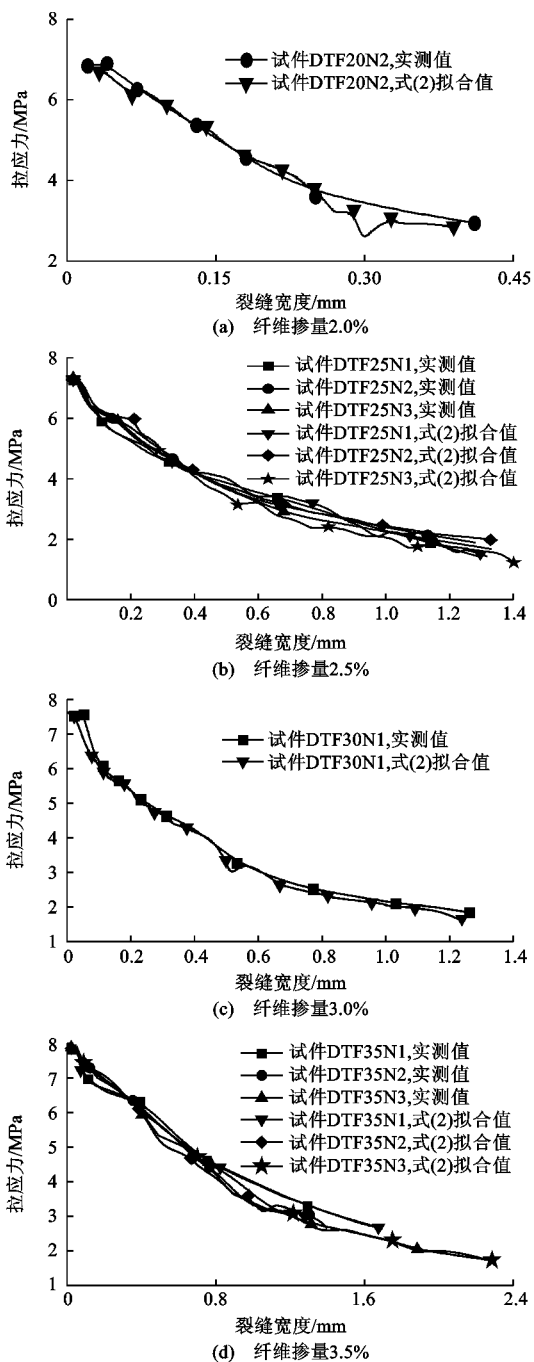


图 7 应力-裂缝宽度曲线

Fig. 7 Stress-crack Opening Curves

## 4 理论分析与试验对比

### 4.1 理论分析模型

鉴于 UHPC 结构设计对材料本构关系的需求,本文基于试验结果提出了包含应变硬化应力-应变关系  $\sigma(\epsilon)$  和应力软化应力-裂缝宽度关系  $\sigma(w)$  两阶段 UHPC 材料拉伸本构模型,如图 8 所示。图 8 中:  $f_{ct}$  为应变硬化阶段平均应力;  $w_{pc}$ ,  $w_2$  分别为峰值应力时和断裂时的裂缝宽度;  $\sigma_{w1}$  和  $w_1$  分别为应

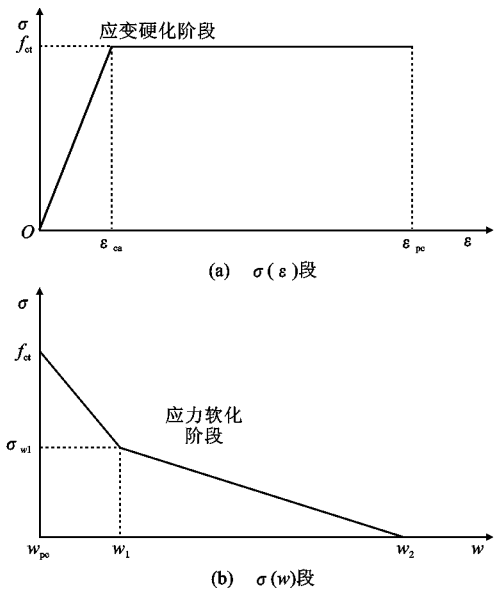


图 8 材料拉伸本构关系模型

Fig. 8 Material Tensile Constitutive Models

力软化段反弯点的应力及裂缝宽度。

4.2 应力-应变关系

如图 8 所示,UHPC 材料在极限应变  $\epsilon_{pc}$  前采用双线性应力-应变关系拟合<sup>[22]</sup>,即

$$\sigma(\epsilon)=\begin{cases} \frac{f_{ct}}{\epsilon_{ca}}\epsilon & 0<\epsilon\leq\epsilon_{ca} \\ f_{ct} & \epsilon_{ca}<\epsilon\leq\epsilon_{pc} \end{cases} \quad (3)$$

基于式(3)的拟合曲线与实测曲线对比如图 9 所示,可见两者符合较好,拟合参数见表 6。

表 6 受拉本构模型试验拟合参数

Tab. 6 Test Fitted Parameters of Tensile Constitutive Model

试件组	$\sigma(\epsilon)$					$\sigma(w)$				
	$\epsilon_{ca}/10^{-6}$	$\epsilon_{pc}/10^{-6}$	$f_{ct}/\text{MPa}$	$w_{cb}/\text{mm}$	$w_{pc}/\text{mm}$	$p$	$w_p/\text{mm}$	$w_1/\text{mm}$	$\sigma_{w1}/\text{MPa}$	
DTF20	198	765	6.76	0.02	0.04	0.95	0.25	0.25	3.60	
DTF25	192	1 267	7.31	0.02	0.05	0.98	0.52	0.51	3.41	
DTF30	195	1 530	7.67	0.02	0.05	1.00	0.70	0.60	3.38	
DTF35	199	1 941	7.91	0.02	0.05	1.08	1.00	1.09	3.21	

4.3 应力-裂缝宽度关系

应力软化段体现材料的断裂特性,基于材料断裂能的考虑,应力-裂缝宽度关系  $\sigma(w)$  应具有简单性和可积分性<sup>[14]</sup>。纤维混凝土材料常用的  $\sigma(w)$  多为指数函数或多段线性函数,如 Stang 等<sup>[23]</sup> 提出的指数型经验公式模型,即

$$\sigma(w)=f_{ct}\frac{1}{1+(w/w_{0.5})^p} \quad (4)$$

式中: $p$  为拟合参数; $w_{0.5}$  为曲线应力降至  $0.5f_{ct}$  时的裂缝宽度。

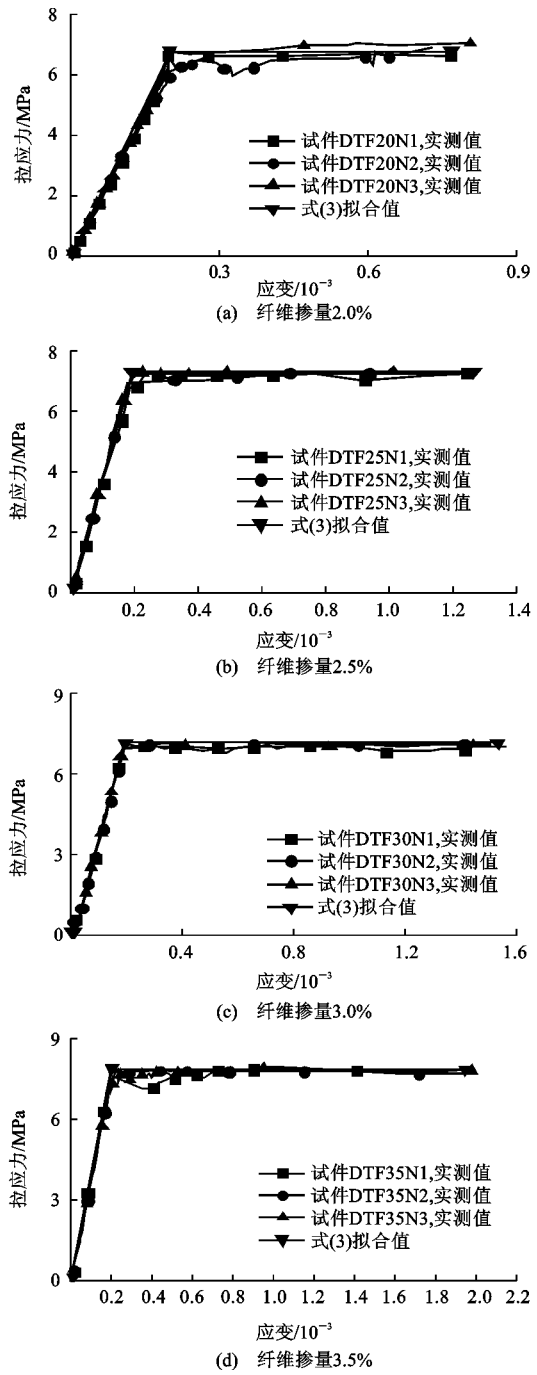


图 9 拟合应力-应变关系与实测曲线对比

Fig. 9 Comparison of Fitted Stress-strain Curves and Measured Curves

基于试验结果本文提出 2 种应力-裂缝宽度关系模型。

指数函数应力-裂缝宽度关系  $\sigma(w)$  可表示为

$$\sigma(w)=f_{ct}\frac{1}{(1+w/w_p)^p} \quad (5)$$

式中: $p$  为试验拟合参数; $w_p$  为应力降至  $2^{-p}f_{ct}$  时的裂缝宽度。

双段线性函数应力-裂缝宽度关系  $\sigma(w)$  可表



示为

$$\sigma(w)=\begin{cases}C_0 & w_{cb}\leqslant w\leqslant w_{pc}\\C_1-C_2w & w_{pc}<w\leqslant w_1\\C_3-C_4w & w_1<w\leqslant w_2\end{cases}\quad(6)$$

式中:  $C_0=f_{ct}$ ;  $C_1=f_{ct}$ ;  $C_2=\frac{f_{ct}-\sigma_{w_1}}{w_1}$ ;  $C_3=\sigma_{w_1}+\frac{\sigma_{w_1}-\sigma_{w_2}}{w_1-w_2}w_1$ ;  $C_4=\frac{\sigma_{w_1}-\sigma_{w_2}}{w_1-w_2}$ ;  $\sigma_{w_2}$  为断裂时的应力。

其中双线性函数特征点  $\{w_i,\sigma(w_i)\}$  可通过试验数据获得。显然,式(5)、(6)与式(4)相比,形式简单、初始斜率确定且可积分性好。2 种  $\sigma(w)$  关系拟合式与实测曲线的比较如图 10 所示,其拟合参数见表 6。

由图 10 可见,式(5)、(6)拟合的  $\sigma(w)$  关系与实测的曲线总体较为吻合,但指数拟合式(5)与式(4)类似,反弯点后的拟合曲线的应力和斜率均与实测曲线有一定偏离。工程中因结构耐久性要求裂缝宽度限值较小,故这种高裂缝宽度区的偏离对结构分析和工程应用误差较小。同理,双线性拟合式(6)也只需取下降段第一部分便已足够。

5 结 语

(1)钢纤维的形状和掺量是影响混合纤维 UHPC 材料可视初裂应变的关键因素,随纤维掺量增加可视初裂应变大幅提高,且端钩纤维的增强效率优于平直纤维。

(2)混合钢纤维 UHPC 材料呈明显的应变硬化和多元开裂拉伸特性。高纤维掺量的 UHPC 可视初裂应变和极限应变均与钢筋屈服应变接近,钢筋可有效限制 UHPC 结构可视初裂的产生。

(3)UHPC 材料本构关系采用应变硬化应力-应变关系和应力软化应力-裂缝宽度关系两阶段模型与试验结果符合较好。

(4)本文研究成果证明了掺入混合钢纤维的 UHPC 材料拉伸性能优良,可较好适应高性能组合桥面较高的拉应变要求。为了彻底根治大跨径钢桥面铺装层易损及钢结构易疲劳开裂两大病害,仍需对配筋 UHPC 结构的弯曲性能、疲劳抗力及钢-UHPC 组合梁展开研究。

参考文献:

References:

[ 1 ] 邵旭东,曹君辉,易笃韬,等.正交异性钢板-薄层 RPC 组合桥面基本性能研究[J].中国公路学报,2012,25

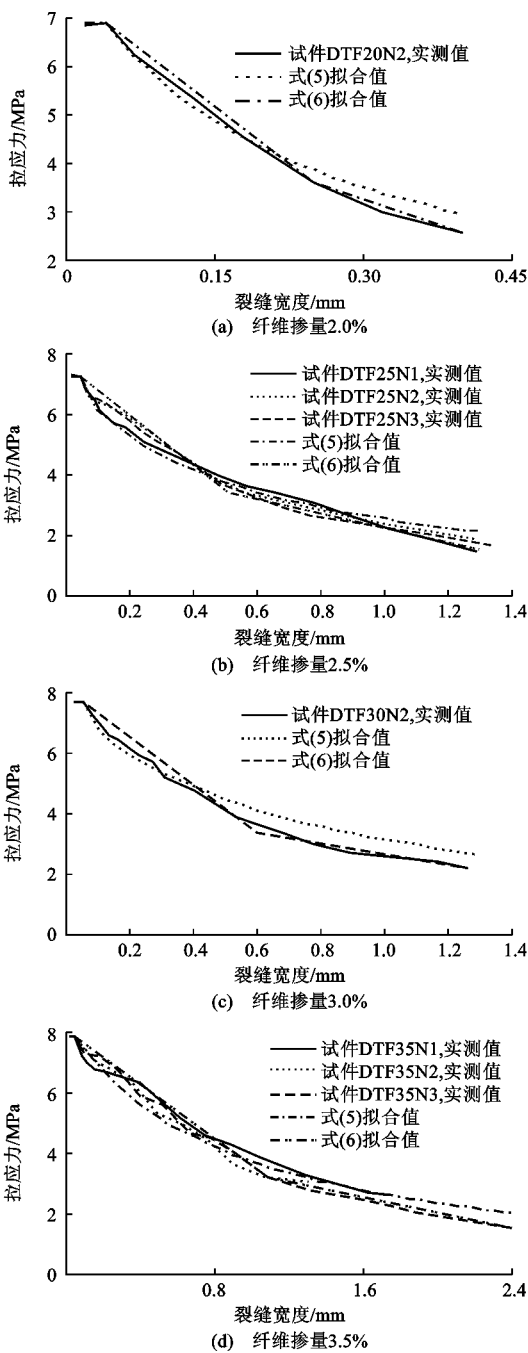


图 10 拟合应力-裂缝宽度曲线与实测曲线对比  
Fig. 10 Comparison of Fitted Curves of Stress-crack Opening and Measured Curves

(2);40-45.  
SHAO Xu-dong, CAO Jun-hui, YI Du-tao, et al. Research on Basic Performance of Composite Bridge Deck System with Orthotropic Steel Deck and Thin RPC Layer[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(2); 40-45.  
[ 2 ] DIENG L, MARCHAND P, GOMES F, et al. Use of UHPFRC Overlay to Reduce Stresses in Orthotropic Steel Decks[J]. Journal of Constructional Steel Re-



- search, 2013, 89: 30-41.
- [ 3 ] CAO Jun-hui, SHAO Xu-dong, ZHANG Zhe, et al. Retrofit of an Orthotropic Steel Deck with Compact Reinforced Reactive Powder Concrete[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2015, 11: 1-19.
  - [ 4 ] SHAO X D, YI D T, HUANG Z Y, et al. Basic Performance of the Composite Deck System Composed of Orthotropic Steel Deck and Ultrathin RPC Layer[J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(5): 417-428.
  - [ 5 ] RICHARD P, CHEYREZY M. Composition of Reactive Powder Concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7): 1501-1511.
  - [ 6 ] GRAYBEAL B A. Material Property Characterization of Ultra-high Performance Concrete[R]. Mclean: Federal Highway Administration, 2006.
  - [ 7 ] RUSSELL H R, GRAYBEAL B A. Ultra-high Performance Concrete: A State-of-the-art Report for the Bridge Community[R]. Mclean: Federal Highway Administration, 2013.
  - [ 8 ] NAAMAN A E, REINHARDT H W. Proposed Classification of HPFRC Composites Based on Their Tensile Response[J]. Materials and Structures, 2006, 39(5): 547-555.
  - [ 9 ] WILLE K, KIM D J, NAAMAN A E. Strain-hardening UHP-FRC with Low Fiber Contents[J]. Materials and Structures, 2011, 44(3): 583-598.
  - [10] PARK S H, KIM D J, RYU G S, et al. Tensile Behavior of Ultra High Performance Hybrid Fiber Reinforced Concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34(2): 172-184.
  - [11] MARKOVIC I. High-performance Hybrid-fibre Concrete—Development and Utilization[D]. Delft: Delft University of Technology, 2006.
  - [12] RAFIEE A. Computer Modeling and Investigation on the Steel Corrosion in Cracked Ultra High Performance Concrete[D]. Kassel: University of Kassel, 2012.
  - [13] MAKIA T, BRÜHWILER E. Tensile Fatigue Behavior of Ultra-high Performance Fibre Reinforced Concrete[J]. Materials and Structures, 2013, 47(3): 475-491.
  - [14] TJIPTOBROTO P, HANSEN W. Tensile Strain Hardening and Multiple Cracking in High-performance Cement-based Composites Containing Discontinuous Fibres[J]. ACI Materials Journal, 1993, 90(1): 16-25.
  - [15] HILLERBORG A, MODEER M, PETERSSON P. Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements[J]. Cement and Concrete Research, 1976, 6(6): 773-782.
  - [16] ASTM C 496/C 496M-04, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens[S].
  - [17] ASTM C 1069/C 1609M-12, Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber Reinforced Concrete(Using Beam with Third-point Loading)[S].
  - [18] CRD-C260-01, Standard Test Method for Tensile Strength of Hydraulic Cement Mortars[S].
  - [19] NGUYEN D L, KIM D J, RYU G S, et al. Size Effect on Flexural Behavior of Ultra-high-performance Hybrid Fiber-reinforced Concrete[J]. Composite: Part B, 2013, 45(1): 1104-1116.
  - [20] AFGC/SETRA 2013, Ultra High Performance Fibre Reinforced Concretes[S].
  - [21] ZHANG W, KWAN A K H, LEE P K K. Direct Tension Test of Concrete[J]. ACI Materials Journal, 2001, 98(1): 63-71.
  - [22] AALETI S, PETERSEN B, SRITHARAN S. Design Guide for Precast UHPC Waffle Deck Panel System Including Connections[R]. Washington DC: Federal Highway Administration, 2013.
  - [23] STANG H, LI V C, KRENCHER H. Design and Structural Application of Stress-crack Width Relations in Fibre Reinforced Concrete[J]. Materials and Structures, 1995, 28(4): 210-219.