

超高性能混凝土轴心受拉力学性能试验研究^{*}

胡翔翔¹, 梁兴文^{1†}, 于婧¹, 史庆轩¹, 李林²

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西建研结构工程股份有限公司, 陕西 西安 710082)

摘要:为了研究钢纤维掺量对超高性能混凝土(UHPC)轴心受拉力学性能的影响,设计、制作了纤维掺量为0%~5%的6组8字型单轴受拉试件,标准养护28d后进行单轴拉伸试验,得到了不同纤维掺量UHPC单轴受拉应力-应变全曲线;分析了钢纤维掺量对UHPC抗拉强度、峰值应变以及受拉韧性的影响.试验结果表明:在不影响UHPC工作性能的前提下,纤维掺量可达到5%,其抗拉强度为8.50 MPa,对应的应变为1 619 $\mu\epsilon$;随着钢纤维掺量的增加,UHPC的抗拉强度、峰值应变、抗压强度以及受拉韧性均逐渐提高.最后依据试验数据建立了UHPC单轴受拉本构方程.试验结果可为UHPC材料的工程应用提供参考.

关键词:单轴拉伸试验;超高性能混凝土;纤维掺量;抗拉强度;本构方程

中图分类号:TU502.6

文献标志码:A

Experimental Study of Uniaxial Tensile Characteristics of Ultra-high Performance Concrete

HU Aoxiang¹, LIANG Xingwen^{1†}, YU Jing¹, SHI Qingxuan¹, LI Lin²

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. Shaanxi Jianyan Structural Engineering Co Ltd, Xi'an 710082, China)

Abstract: In order to investigate the effect of fiber volume content on tensile characteristic of Ultra-High Performance Concrete (UHPC), 6 groups of "8" shape specimen were designed, and uniaxial tensile test was performed after 28 days standard curing, the complete tensile stress-strain curves were gotten, the effect of fiber volume content on tensile strength, peak strain and toughness of UHPC were analyzed. Test results show that the fiber volume content can be as much as 5% without workability problem, its tensile strength and peak strain are 8.50 MPa and 1 619 $\mu\epsilon$ respectively; with the fiber volume content increase the tensile strength, peak strain, compressive strength and toughness increase as well, the uniaxial tensile constitute of UHPC was finally proposed based on the test results. The results of this paper provide a reference for the application of UHPC material.

Key words: uniaxial tensile test; ultra-high performance concrete(UHPC); fiber volume content; tensile strength; uniaxial tensile constitute

^{*} 收稿日期:2017-03-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278402), National Natural Science Foundation of China(51278402);陕西省教育厅专项科研项目资助项目(16JK1449), Special Scientific Research Project of Education Department of Shaanxi Province(16JK1449)

作者简介:胡翔翔(1990-),男,湖北襄阳人,西安建筑科技大学博士研究生

[†] 通讯联系人, E-mail: liangxingwen2000@163.com

超高性能混凝土(UHPC)具有强度高、延性好以及耗能能力强等特点,是目前国内外研究较多的土木工程材料之一。UHPC是在水泥砂浆基体中加入纤维,改善混凝土的抗拉强度、延性和耗能能力。如活性粉末混凝土^[1-8](RPC)、工程化的水泥基复合材料^[9-10](ECC)等,但是这种材料的抗拉强度仍然不高,仅为其抗压强度的 $1/20\sim 1/25$ ^[6]左右。为了进一步提高UHPC的抗拉强度、延性以及耗能能力,学者们提出了不同的解决方案,如采用混杂纤维,充分发挥不同纤维之间的组合作用,提高UHPC的抗拉强度和延性。混杂纤维包括两种方式:一种是钢纤维和有机纤维组合^[11],这种方式可以提高UHPC抗拉强度和延性,但是抗压强度较低;另一种是采用不同尺度钢纤维组合^[12],这种方式同样可以提高UHPC的抗拉强度、延性以及耗能能力,但是大尺度钢纤维搅拌时容易结团,影响UHPC的工作性能,所以纤维掺量一般较低,提高作用有限。另外一种方案是采用大掺量短细钢纤维,这种方法不仅可以提高UHPC抗拉强度、延性以及耗能能力,同时不影响UHPC的工作性能。相关研究^[13]表明:纤维掺量较大时可以提高钢筋与混凝土之间的黏结性能。关于这种大掺量短细钢纤维UHPC,国外已有相关的研究和应用。1988年Bache^[13]发明了密实增强复合材料(CRC),它是由水泥砂浆基体加上短细钢纤维组成,钢纤维的体积掺量通常在6%左右,长度不超过6 mm,直径 ≤ 0.2 mm。CRC材料的开裂强度高,短纤维在混凝土受拉过程中可以有效地限制微观裂缝的产生和开展,延迟混凝土开裂;CRC强度高(高温养护条件下强度超过150 MPa)、硅灰和纤维掺量大的特性,极大地提高了CRC材料的黏结强度^[14],故将CRC材料运用于结构中时,可以减小保护层厚度和钢筋间距,保护层厚度通常取 $10\sim 15$ mm^[14-15];CRC材料构件能够配置大量的钢筋以改善结构的延性。CRC可应用于桥梁结构构件、装配式构件之间的连接材料,可制作预制楼梯、预制阳台,以及抗冲击、抗爆等结构^[14,16]。但是国内外关于CRC材料的受拉力学性能鲜有报道。

关于混凝土轴心受拉试验,国内外并没有统一的标准试件,轴心受拉试件形状主要有8字型、薄板型、切口或不切口的棱柱体或圆柱体试件等,Wille等^[17]详细列出了国内外轴心受拉试验采用的试件形状及其试件尺寸,并且根据混凝土轴心受拉性能的不同,文中给出了建议的试件形状。本文依据

Wille等的建议将试件形状定为8字型。国内对UHPC的单轴受拉力学性能研究相对较少,杨志慧^[5]和原海燕^[6]自行设计8字型试件,采用加大试件端头两端提拉的方法研究了钢纤维体积掺量从0增加至2%时,对RPC的单轴受拉力学性能的影响,试验测得RPC受拉应力-应变全曲线并建立了RPC单轴受拉本构方程。李莉^[4]采用在RPC中插入钢筋的方法研究了一组钢纤维掺量为2%的RPC单轴受拉力学性能等。罗百福^[7]通过单轴拉伸试验研究了RPC在不同温度下的单轴受拉力学性能,建立了RPC抗拉强度与温度的关系。

本文拟研究单掺短细钢纤维UHPC的轴心受拉力学性能。通过单轴拉伸试验,研究钢纤维掺量对UHPC抗拉强度、峰值应变和受拉韧性的影响,建立UHPC抗拉强度与立方体抗压强度之间的关系,并根据试验结果建立UHPC单轴受拉本构方程。

1 试验概况

1.1 试件设计

由于UHPC材料的单轴拉伸试验没有相关规范,试件尺寸也没有统一的标准,本文在参考国内相关文献后,自行设计“8”字型试件及夹具,采用加大端头两端提拉的方法,对不同纤维掺量UHPC材料的轴拉力学性能进行试验,试件正面尺寸如图1所示,试件厚度为130 mm。关于试件尺寸对试验结果的影响,Nguyen等^[18]研究了量测长度、截面面积、试件体积和厚度对UHPC轴心受拉力学性能试验结果的影响,试验结果表明:峰值应变、耗能等对尺寸效应比较敏感,但是尺寸效应对抗拉强度影响不大,本文所用UHPC与Nguyen等类似,尺寸效应的影响是相似的。

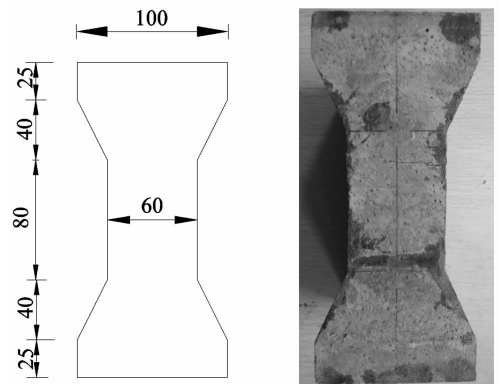


图1 试块尺寸

Fig. 1 Measurement of the specimen

1.2 配合比及试件制作

根据前期 UHPC 材料性能试验结果,综合考虑其抗压强度和工作性能两项指标,确定的配合比(质量比)为:水泥:水:硅灰:石英砂:减水剂=1.00:0.23:0.26:1.26:0.03,钢纤维体积掺量为0%~5%,对应的编号为1~6,共6组试验.试验所用钢纤维长度为7 mm,等效长径比为39,表面镀黄铜的圆柱形直钢纤维,纤维抗拉强度为2 850 MPa.每组制作3个8字型受拉试件,并预留3个100 mm×100 mm×100 mm立方体受压试块.UHPC搅拌完成之后先进行坍落度试验,检验UHPC的工作性能;随后装进预先刷好脱模剂的试模中,并在振动台上振捣2 min,振动频率为50 Hz.试件成型时为水平浇筑,为模拟实际结构中钢纤维的随机取向状态,浇筑时完全按照实际施工流程进行,未对纤维取向进行专门研究.试块制作完成之后用湿布覆盖UHPC表面,室温养护36 h之后脱模.随后放进标准养护室(温度 $20\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度 $\geq 95\%$)养护至28 d龄期取出,放置室内自然养护直至试验.

1.3 试验加载装置及加载过程

试验在100 kN微机控制电子万能试验机(CMT 5105)上进行.本文根据试件形状自主设计了夹具,夹具应保证几何对中,防止偏心.夹具上、下端采用销钉与试验机相连,夹头与连接杆之间采用铰接方式连接.试验时先将上、下夹具安装就位,然后将试件放进夹具夹头之间,保证试件处于中心位置,防止加载过程中试件产生偏心;同时在试件前、后面各安装一个电子引伸计测量试件的竖向变形,取两个引伸计的平均值计算试件的竖向变形以减小可能产生的偏心影响.试验全程采用位移控制加载,加载速率为0.05 mm/min.加载装置如图2所示.



图2 单轴拉伸试验加载装置

Fig. 2 Apparatus for the uniaxial tensile test

为了反映试验过程中偏心的影响,分别用试件前后两个电子引伸计读数作应力-应变曲线,峰值荷载前试件的应力-应变曲线如图3所示.从图3中可知:试件刚开始加载阶段两个引伸计读数几乎一样,说明试件偏心很小;在试件开裂之后两者读数差值变大,但仍较小,说明这种试验方法可以使试件基本处于轴心受拉状态.

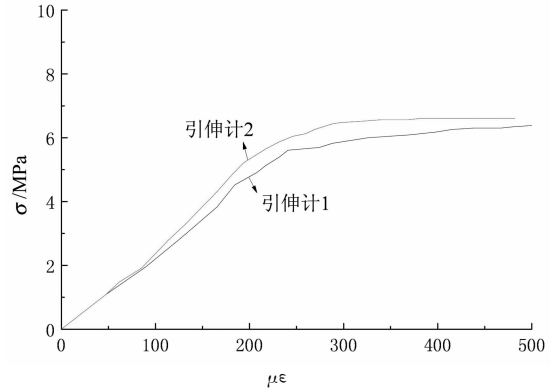


图3 峰值前两个引伸计应力-应变曲线

Fig. 3 Pre-peak stress-strain curves for two extensions

1.4 试验破坏过程

根据纤维掺量的不同,试件破坏过程分为3种情况:不掺纤维、纤维掺量为1%以及纤维掺量大于1%.下面分别就这3种情况说明试验破坏过程.

纤维掺量为0%时,试件开始受力后,应力-应变曲线近似呈线性增长;达到峰值荷载时,承载力突然下降到零,并伴随“砰”的一声巨响,试件从变截面处断裂成上、下两截,加载过程结束.试验机仅记录到应力-应变曲线的上升段,试件呈现明显的脆性破坏特性.

纤维掺量为1%时,在峰值荷载之前和不掺纤维的UHPC现象类似,应力-应变曲线近似呈线性增长;超过峰值荷载后,承载力突然下降至峰值荷载的40%~50%,并保持这个承载力不变,同时试件表面开始出现一条宏观裂缝,裂缝宽度约1 mm;随着加载过程的继续,纤维不断被拔出,并发出“哧哧”的声音,试件裂缝两侧在钢纤维的桥接作用下,荷载稳定在峰值承载力的40%~50%,一直到裂缝即将贯穿整个截面;最后由于试件变形过大,停止加载.试件在刚过峰值荷载时呈现脆性破坏趋势,但是随着加载的继续,纤维逐渐发挥作用,试件承载能力保持稳定,峰值荷载过后试件呈明显的韧性破坏特征.

纤维掺量为2%~5%的试件受力和变形破坏过程较为相似,均呈现明显的韧性破坏特征,这里仅

以纤维掺量为 2% 的试件为例进行说明. 纤维掺量为 2% 时, 在峰值荷载之前, 应力-应变曲线近似呈线性增长, 试件变形较小; 峰值荷载之后, 试件表面开始出现宏观裂缝, 由于裂缝截面处纤维的桥接作用使试件承载力没有迅速下降; 随着钢纤维逐渐被拔出, 并发出“哧哧”的声音, 试件承载力缓慢下降, 但是试件变形增长较快, 直至试件承载力下降至峰值荷载的 30% 左右或者裂缝即将贯穿整个截面时停止加载, 试件呈明显的韧性破坏特征.

各组试件最后的破坏状态如图 4 所示. 从图 4 中裂缝的形状来看, 不掺纤维以及纤维掺量较小时, 试件破坏时, 裂缝截面基本呈一条平整的直线; 随着纤维掺量的增加裂缝逐渐变成折线状, 这也从侧面反映出纤维掺量的增加极大地改善了 UHPC 的受拉韧性.

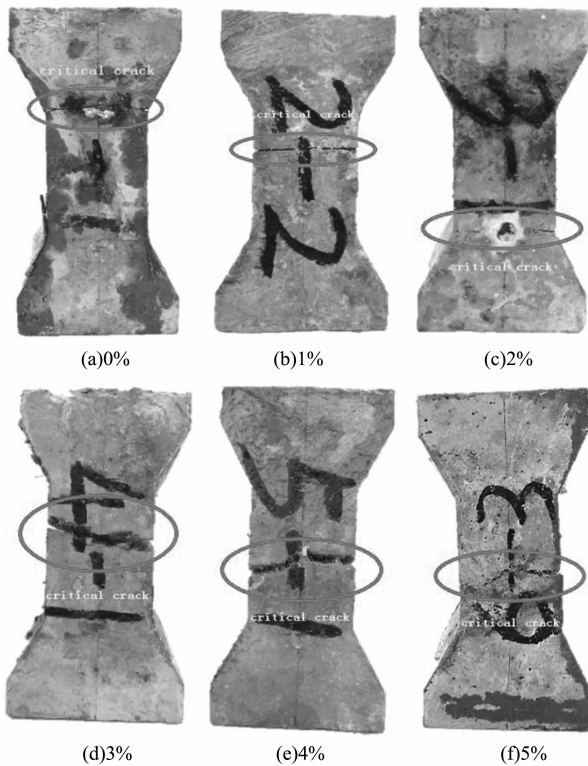


图 4 试件最后破坏形态

Fig. 4 Failure mode of the uniaxial tensile test

1.5 试验结果

表 1 列出了各组试验实测的坍落度值、抗拉强度平均值、峰值拉应变平均值以及抗压强度平均值.

从表 1 中可以看出: 1) 随着纤维掺量的增加, 抗拉强度和峰值应变都明显提高. 即纤维掺量从 0% 增加到 5% 时, 抗拉强度和峰值应变分别增加 79%

和 1 090%, 纤维对抗拉强度、延性的增强效果显著. 2) 随着纤维掺量的增加, UHPC 坍落度值逐渐降低. 即纤维掺量从 0% 增加到 5%, 坍落度值仅降低 18%, 表明这种 UHPC 可以在不影响工作性能的前提下实现纤维大掺量. 3) 随着纤维掺量的增加, UHPC 抗压强度逐渐提高, 纤维掺量从 0% 增加到 5%, 抗压强度提高了 31%.

表 1 单轴拉伸试验试验结果
Tab. 1 Results of the uniaxial tensile test

编号	纤维掺量 /%	坍落度 /mm	抗拉强度 /MPa		峰值应变 / $\mu\epsilon$	抗压强度 /MPa
1	0	275	4.48	4.76	136	100.18
			4.86	4.95		
			5.28	5.25		
2	1	270	5.25	5.37	188	113.62
			5.59	5.87		
			5.73	5.60		
3	2	263	5.73	5.60	235	115.51
			5.21	6.28		
			6.51	6.37		
4	3	255	6.51	6.37	356	122.49
			6.30	7.63		
			7.45	7.54		
5	4	247	—	7.54	500	127.33
			7.45	—		
			8.44	8.50		
6	5	225	8.44	8.50	1 619	131.27
			8.57	—		

2 试验结果分析

2.1 纤维掺量对抗拉强度影响分析

根据上述试验结果, 在纤维掺量-抗拉强度坐标系中绘制数据点, 如图 5(a) 所示. 由图 5 可见, UHPC 的抗拉强度与纤维掺量之间近似呈线性关系, 故采用线性关系模拟二者之间的关系. 根据本文以及国内外文献[5-7]、[11]中的 35 组数据(文献[5-7]、[11]中钢纤维的长径比分别为: 55、65、59 和 60) 进行统计回归分析, 可得抗拉强度与纤维掺量之间的关系式为:

$$f_{tu} = f_{t0} (1 + 4.746 \times 10^{-3} V_f \frac{l_f}{d_f}) \quad (1)$$

式中: f_{tu} 为 UHPC 抗拉强度(MPa); f_{t0} 为不掺纤维 UHPC 抗拉强度(MPa); l_f 、 d_f 分别为钢纤维长度和直径; V_f 为钢纤维体积掺量. 拟合曲线如图 5(a) 所示, 式(1)的计算值与试验值对比如图 5(b) 所示, 计算值与试验值之比平均值为 0.90, 变异系数为 0.22.

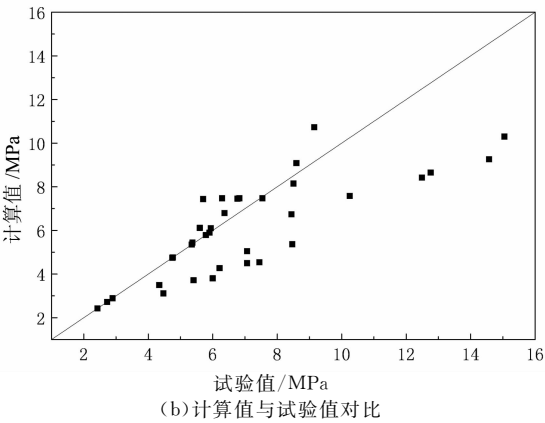
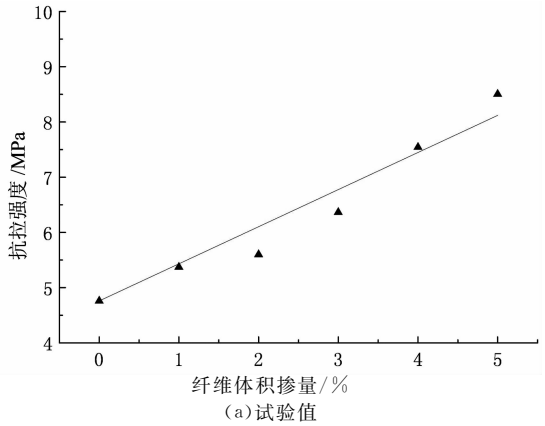


图5 抗拉强度与纤维掺量之间的关系
Fig. 5 Relationship of the uniaxial tensile strength versus fiber content

采用式(1)对本文6组试验分别计算抗拉强度,并与试验值进行对比,见表2.计算值与试验值之比的平均值为1.02,变异系数为0.05.由表2可见按照式(1)的计算结果与本文试验结果较为接近.

表2 抗拉强度计算值与试验值比较

Tab. 2 Comparison of calculation results and test results

编号	试验值/MPa	计算值/MPa	计算值/试验值
1	4.76	4.76	1.00
2	5.37	5.44	1.01
3	5.60	6.12	1.09
4	6.37	6.80	1.07
5	7.54	7.47	0.99
6	8.50	8.15	0.96

2.2 峰值应变与抗拉强度的关系

根据上述试验结果,在抗拉强度-峰值应变坐标系中绘制数据点,如图6(a)所示.由图6可见,UHPC的峰值应变与抗拉强度之间近似呈幂函数关系,故采用幂函数关系模拟二者之间的关系.根据本文试验数据进行统计回归分析,可得峰值应变与抗拉强度的关系式如下:

$$\epsilon_{ip} = (3.01 \times 10^{-6}) f_{tu}^{2.57} \quad (2)$$

式中: ϵ_{ip} 表示峰值应变; f_{tu} 表示抗拉强度(MPa).拟合曲线如图6(a)所示,式(2)计算值与试验值对比如图6(b)所示.峰值应变计算值与试验值之比的平均值为1.00,变异系数为0.28.

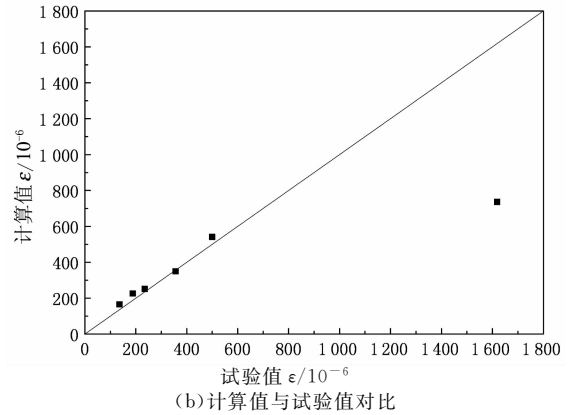
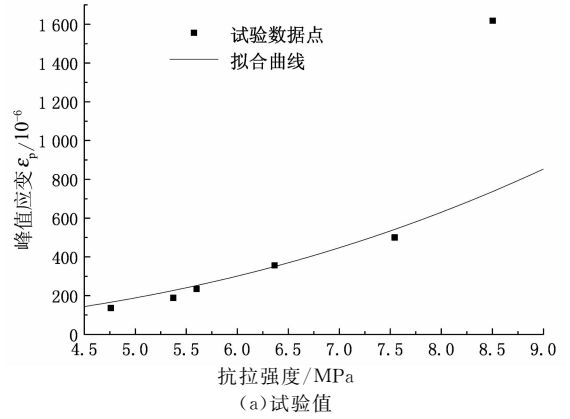


图6 峰值应变与抗拉强度之间的关系
Fig. 6 Relationship between the peak tensile strain and tensile strength

2.3 各组试件的受拉韧性

图7所示为各组试验的平均应力-应变曲线(应变值固定,取每组3个试件应力平均值得到).从曲线中可以看出:随着纤维掺量的增加,UHPC抗拉强度逐渐增加,应力-应变曲线下包围的面积逐渐增大,表明UHPC抗拉韧性增大,试件由脆性破坏转化为韧性破坏.

高丹盈等^[19]建议韧性的大小可以从应力-应变曲线达到最大荷载以前的面积反映,或者从达到某一规定的挠度值以前的面积求得,这个挠度值取决于使用中允许的开裂程度.《混凝土结构设计规范》^[20]中规定,在正常使用极限状态下,一般受弯构件的裂缝宽度限值为0.2 mm.本次试验量测标距为80 mm,对应应变为 0.25×10^{-2} ,本文以此为依据计算各组试件平均应力-应变曲线下包围的面积,

分析纤维掺量对 UHPC 受拉韧性的影响,计算结果如图 8 所示.

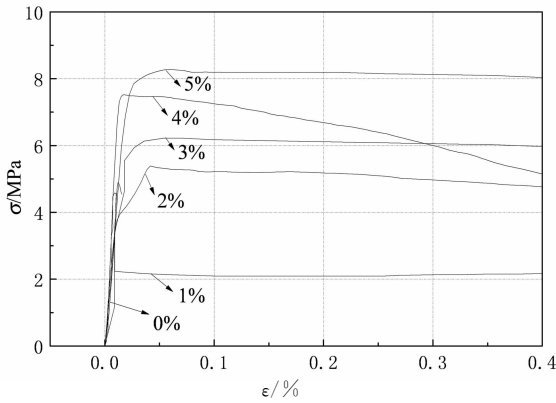


图 7 各组试验平均应力-应变曲线

Fig. 7 Average curves of the uniaxial tensile test

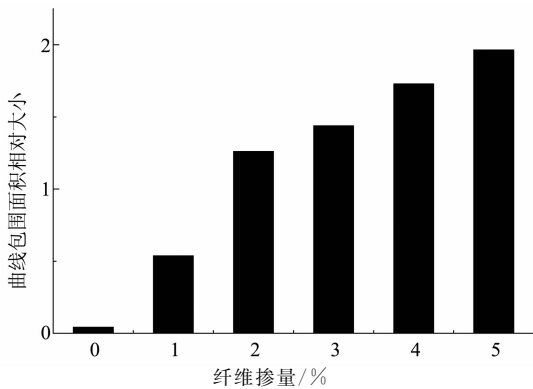


图 8 各组试验韧性分析

Fig. 8 Toughness analysis of the uniaxial tensile test

从图 8 中可以看出:随着纤维掺量的增加,应力-应变曲线下包围的面积逐渐增大,即试件的受拉韧性逐渐增大.其中纤维掺量为 0% 时试验没有得到曲线下降段,所以计算面积与实际面积相比较小;纤维掺量从 1% 逐渐增加到 5%,曲线包围面积的增长率分别为 134%、14%、20% 和 14%.

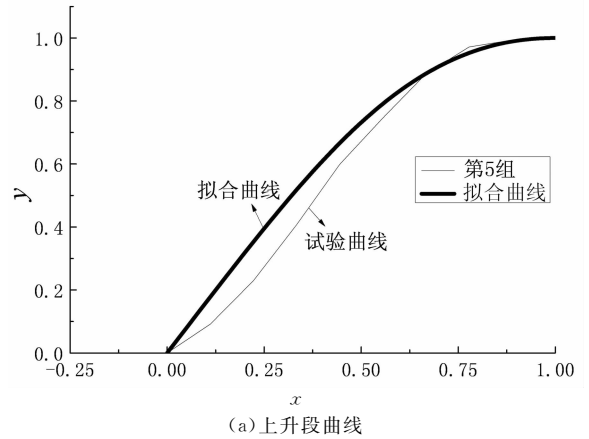
3 单轴受拉本构模型

本文采用在峰值点连续的两个方程分别描述受拉应力-应变曲线的上升段和下降段,以第 5 组试验为例分析试件上升段和下降段曲线形状.图 9 为第 5 组试件归一化的平均应力-应变全曲线.试验上升段曲线向下凸,是因为试件和仪器之间的空隙,理论上试验曲线应是向上凸,所以本文采用如图所示的曲线形式进行模拟,图中粗实线为拟合曲线,细实线为试验曲线,在分析和比较之后,采用下列方程分别表示上升段和下降段:

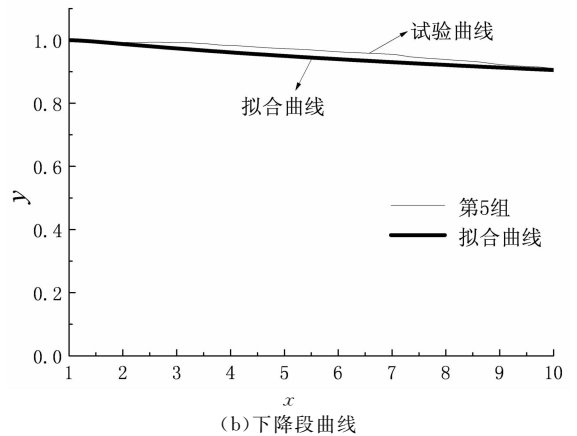
$$x \leq 1 \quad y = \frac{Ax}{Bx^c + 1} \tag{3}$$

$$x \geq 1 \quad y = \frac{x}{\alpha(x-1)^\beta + x}$$

式中: $x = \frac{\epsilon}{\epsilon_{tp}}$, $y = \frac{\sigma}{f_{tu}}$; ϵ_{tp} 表示峰值应变; f_{tu} 表示抗拉强度.



(a) 上升段曲线



(b) 下降段曲线

图 9 第 5 组归一化平均应力-应变曲线

Fig. 9 Normalized average stress-strain curve of the 5th group

3.1 升段方程系数的确定

由式(3)的第 1 式,求得:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{(AB - ABC)x^c + A}{(Bx^c + 1)^2} \tag{4}$$

上升段满足下列边界条件:

- 1) 曲线通过原点,即 $x=0$ 时, $y=0$;
- 2) 曲线在原点的斜率等于初始弹性模量,即

$$\left. \frac{dy}{dx} \right|_{(0,0)} = \frac{d(\sigma/f_{tu})}{d(\epsilon/\epsilon_{tp})} = \frac{\epsilon_{tp}}{f_{tu}} \frac{d\sigma}{d\epsilon} = \frac{E_c}{E_0};$$

- 3) 曲线通过峰值点且有极大值,即 $x=1$ 时, $y=1$,

$$\text{同时满足 } \left. \frac{dy}{dx} \right|_{(1,1)} = 0.$$

由上述4个边界条件求得:

$$A = \frac{E_c}{E_0}, B = A - 1, C = \frac{A}{A - 1}$$

式中: E_c 、 E_0 分别表示初始弹性模量和峰值点割线模量,根据试验数据得:

$$A = \frac{E_c}{E_0} = 1.604$$

所以上升段表达式为:

$$y = \frac{1.604x}{0.604x^{2.656} + 1} \quad (5)$$

3.2 降段方程系数的确定

由式(3)的第2式,求导得:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\alpha(x-1)^\beta + x - x[\alpha\beta(x-1)^{\beta-1} + 1]}{[\alpha(x-1)^\beta + x]^2} = \frac{\alpha(x-1)^{\beta-1}[x(1-\beta) - 1]}{[\alpha(x-1)^\beta + x]^2} \quad (6)$$

下降段方程自然满足如下边界条件:

$$x = 1 \text{ 时, } y = 1, \frac{dy}{dx} = 0$$

$$x \rightarrow \infty \text{ 时, } y \rightarrow 0, \frac{dy}{dx} \rightarrow 0$$

考虑到与普通混凝土拉伸应力-应变曲线方程的协调问题,对于钢纤维混凝土,参数 β 参考过镇海^[21] 研究结果取 1.7. 参数 α 是与 UHPC 基体性能和钢纤维掺量相关的参数,由于没有 UHPC 材料相关的经验值可供参考,本文通过不同 α 取值下的曲线与试验平均应力-应变曲线对比确定.

图 10 为 $\alpha = 0.025$ 时拟合曲线与试验第 1~6 组归一化平均应力-应变曲线对比图,粗实线为拟合曲线,细实线为试验归一化的平均应力-应变曲线. 第 1 组为素混凝土组,由于试验机刚度不足,未能测得应力-应变曲线的下降段;第 2 组纤维掺量为 1%,由于试验机刚度不足以及试验加载速率较大,峰值过后荷载突然下降,没有测得下降段初始阶段;纤维掺量超过 1% 后可以测得完整的应力-应变曲线. 从图中对比曲线可见, $\alpha = 0.025$ 时拟合曲线与试验曲线吻合程度较高.

3.3 本构方程

综上所述,UHPC 单轴受拉本构关系如下:

$$\begin{cases} y = \frac{1.604x}{0.604x^{2.656} + 1} & x \leq 1 \\ y = \frac{x}{0.025(x-1)^{1.7} + x} & x \geq 1 \end{cases} \quad (7)$$

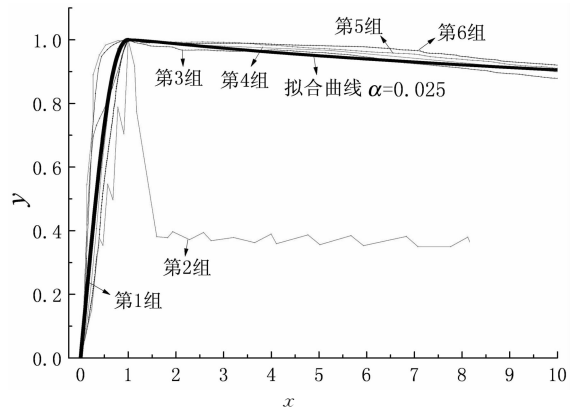


图 10 各组本构曲线拟合
Fig. 10 Fitting curves of the constitutive curves

4 结论

1) 单轴拉伸试验结果表明:在保证工作性能的前提下,UHPC 纤维掺量可以达到 5%,坍落度值为 225 mm,随着钢纤维掺量的增加,UHPC 的抗拉强度、峰值应变以及韧性都得到提高.

2) 依据相关试验数据建立了 UHPC 抗拉强度与纤维掺量、峰值应变与抗拉强度之间的关系,并分析了纤维掺量对受拉韧性的影响.

3) 根据试验结果采用分段函数的形式建立了 UHPC 单轴受拉本构关系.

参考文献

[1] 何峰,黄政宇. 200~300 MPa 活性粉末混凝土(RPC)的配制技术研究[J]. 混凝土与水泥制品,2000(4):3-7.
HE F, HUANG Z Y. The preparation of reactive powder concrete of 200~300 MPa [J]. China Concrete and Cement Products, 2000(4):3-7. (In Chinese)

[2] 何峰,黄政宇. 原材料对 RPC 强度的影响初探[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2001,28(2):89-94.
HE F, HUANG Z Y. Study on the effect of materials on RPC strength [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2001,28(2):89-94. (In Chinese)

[3] 陈柏生,肖岩,黄政宇,等. 钢纤维活性粉末混凝土动态层裂强度试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2009,36(7):12-16.
CHEN B S, XIAO Y, HUANG Z Y, et al. Experimental study on the spalling strength of fiber reactive powder concrete [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2009,36(7):12-16. (In Chinese)

[4] 李莉. 活性粉末混凝土梁受力性能及设计方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学土木工程学院,2010:44-54.

- LI L. Mechanical behavior and design method for reactive powder concrete beams [D]. Harbin: School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 2010;44—54. (In Chinese)
- [5] 杨志慧. 不同钢纤维掺量活性粉末混凝土的抗拉力学特性研究 [D]. 北京:北京交通大学土木建筑工程学院, 2006;37—54.
YANG Z H. Study on tension mechanical performance of reactive powder concrete in different steel fiber volume fractions [D]. Beijing: School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, 2006;37—54. (In Chinese)
- [6] 原海燕. 配筋活性粉末混凝土受拉性能试验研究及理论分析 [D]. 北京:北京交通大学土木建筑工程学院, 2009;27—48.
YUAN H Y. Theoretical analysis and experimental research on tensile performance of reinforced reactive powder concrete [D]. Beijing: School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, 2009;27—48. (In Chinese)
- [7] 罗百福. 高温下活性粉末混凝土爆裂规律及力学性能研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学土木工程学院, 2014;44—92.
LUO B F. Study on explosive spalling rules and mechanical properties of reactive powder concrete at elevated temperatures [D]. Harbin: School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 2014;44—92. (In Chinese)
- [8] 郑文忠, 李莉. 活性粉末混凝土配制及其配合比计算方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2009, 36(2):13—17.
ZHENG W Z, LI L. Preparation and mix proportion calculation of reactive powder concrete[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2009, 36(2):13—17. (In Chinese)
- [9] 李艳. 高性能纤维增强水泥基复合材料的力学性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学土木工程学院, 2011;63—83.
LI Y. Study on mechanical performance of high performance fiber reinforced cement composite[D]. Xi'an: School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, 2011;63—83. (In Chinese)
- [10] LI V C. From micromechanics to structural engineering—The design of cementitious composites for civil engineering applications[J]. Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, 1993, 10(2):37—48.
- [11] GUPTA N B R. Hybrid fiber reinforced concrete (HYFRC): fiber synergy in high strength matrices [J]. Materials and Structures, 2004, 37:707—716.
- [12] MARKOVIĆ I. High-performance hybrid-fiber concrete-development and utilization[D]. Delft: Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Department of Concrete Structures and Microlab, Technology University Delft, 2006;14—18.
- [13] BACHE Hans Henrik. The new strong cements: their use in structures[J]. Physics in Technology, 1988, 19(2):43—50.
- [14] AARUP B, JENSEN L. Compact reinforced concrete CRC: Applications of fiber-reinforced high-performance concrete [J]. Concrete Plant and Precast Technology, 2008, 74(10):18—26.
- [15] AARUP B. CRC—a special fiber reinforced high performance concrete[C]// International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering, Center for Advanced Cement Based Materials and Rilem. Northwestern, Evanston, Illinois: RILEM Publications, 2004:21—24.
- [16] KAPTIJN N, BLOM J. A new CRC (Compact Reinforced Composite) bridge deck [C]//The 18th BIBM International Congress. Amsterdam, Netherlands, 2005:1—7.
- [17] WILLE K, EL-TAWIL S, NAAMAN A E. Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading[J]. Cement and Concrete Composites, 2014, 48:53—66.
- [18] NGUYEN D L, RYU G S, KOH K T, *et al.* Size and geometry dependent tensile behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete [J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 58:279—292.
- [19] 高丹盈, 刘建秀. 钢纤维混凝土基本理论[M]. 北京:科学技术出版社, 1994:294—303.
GAO D Y, LIU J X. Basic theory of steel fiber reinforced concrete [M]. Beijing: Science and Technology Press, 1994:294—303. (In Chinese)
- [20] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011:12.
GB 50010—2010 Code for design of concrete structures[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011:12. (In Chinese)
- [21] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 北京:清华大学出版社, 2013:29.
GUO Z H. Principle of reinforced concrete[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013:29. (In Chinese)