

DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201705148

UHPC 的轴拉性能与裂缝宽度控制能力研究

王俊颜¹, 耿莉萍¹, 郭君渊², 刘超², 刘国平³

(1. 先进土木工程材料教育部重点实验室(同济大学), 上海 201804;

2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 3. 上海罗洋新材料科技有限公司, 上海 200092)

摘要: 为研究 3 种类型超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, 简称 UHPC)的轴拉应力-应变曲线及其裂缝宽度控制能力, 包括高应变强化 UHPC、低应变强化 UHPC 和应变软化 UHPC。采用轴拉试验方法测试狗骨头形试件, 得到 UHPC 的轴拉应力-应变曲线和缝宽-应变曲线。试验结果表明: 高应变强化 UHPC 和低应变强化 UHPC 的轴拉应力-应变曲线均包括弹性段、应变强化段和应变软化段, 应变软化 UHPC 只有弹性段和应变软化段; UHPC 应变强化段和应变软化段的转折点是裂缝缓慢扩展和迅速扩展的临界点; 提高 UHPC 的极限拉伸应变, 即延长其应变强化段, 有助于提高其裂缝宽度控制能力; 高应变强化 UHPC 拉伸应变在 0.42% 之前, 其裂缝宽度均小于 0.05 mm。对比 C50 混凝土(极限应变、极限强度分别为 0.012%、2.3 MPa), 高应变强化 UHPC 优异的裂缝宽度控制能力避免了结构设计中受正常使用状态裂缝宽度验算限制的影响, 同时可在钢筋屈服前与其全程协同工作, 这使得钢筋增强高应变强化 UHPC 在某些需要对裂缝宽度进行严格控制的结构类型中具有很高的应用价值。

关键词: 超高性能混凝土; 轴拉应力-应变曲线; 应变强化; 应变软化; 裂缝宽度控制

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2017)12-0165-05

Experimental study on crack width control ability of ultra-high performance concrete

WANG Junyan¹, GENG Liping¹, GUO Junyuan², LIU Chao², LIU Guoping³

(1. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials (Tongji University), Ministry of Education, Shanghai 201804, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Shanghai Royang Innovative Material Technologies Co., Ltd., Shanghai 200092)

Abstract: The axial tensile stress-strain curves and crack width control ability of three types of ultra-high performance concrete (UHPC) were investigated, including high strain-hardening UHPC, low strain-hardening UHPC and strain-softening UHPC, respectively. The tensile stress-strain curves and crack width-strain curves of the UHPC were attained from tests on dog-bone shape specimens. The results show that the tensile stress-strain curves of high strain-hardening UHPC and low strain-hardening UHPC include three stages (elastic, strain hardening, strain softening), while the strain softening UHPC has only elastic stage and softening stage. The turning point of strain hardening stage and strain-softening stage is the critical point of slow propagation and rapid expansion of the cracks. The ultimate tensile strain improvement of UHPC can improve the crack width control ability. When the tensile strain of high strain-hardening UHPC is below 0.42%, the crack width is less than 0.05 mm. In comparison with C50 concrete (ultimate strain and ultimate tensile strength are 0.012% and 2.3 MPa, respectively), the impact of the crack width checking in serviceability limit state on high strain-hardening UHPC can be avoided by its excellent crack width control ability, and the high strain-hardening UHPC can work together with steel under tensile loading before steel yield. It is meaningful to use reinforced high strain-hardening UHPC in those structures with high demand of crack width control.

Keywords: ultra-high performance concrete; tensile stress-strain curve; strain-hardening; strain-softening; crack width control

超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, 简称 UHPC)是一种具备高强度、高韧性、低孔隙率、高耐久性的纤维增强水泥基材料, 被公认为未来极具发展前景和应用价值的一种新型结构材料^[1]。UHPC 20 世纪 70 年代起源于丹麦, 八九十年代在欧洲进行了比较系统深入的研究, 并开始在小

型和制品上应用^[2]。最初丹麦 Aalborg Portland 公司将其 UHPC 配方产品注册为 Densit 商标, 之后法国众多公司研发出了自己的 UHPC 产品, 如 Ductal、BSI、Ceracem、CEMTEC 等, 并涌现出了众多应用案例。UHPC 结构凭借其轻巧美观、高耐久、低碳排放等特性, 越来越受到各国的重视。

UHPC 基体中大量均布的钢纤维(图 1)使 UHPC 在基体受拉开裂后仍具备高抗拉强度, 甚至超过基体强度而实现类似金属的拉伸应变强化特性, 这是 UHPC 区别于高性能混凝土或者普通纤维

收稿日期: 2017-05-25

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51609172); 上海市浦江人才计划(16PJ1409900); 上海市科委项目(17DZ1204200)

作者简介: 王俊颜(1982—), 男, 特聘研究员, 博士生导师

通信作者: 王俊颜, 14529@tongji.edu.cn

混凝土的最大特征.作为新型结构材料,UHPC 在结构上应用的基础是相应的设计规范或指南.2002 年法国土木工程协会 (AFGC) 与土木结构设计管理局 (SETRA) 率先颁布法英双语版本的 UHPC 设计指南^[3],成为最早的 UHPC 结构设计的依据,2013 年发布该指南修订版^[4].2016 年瑞士洛桑联邦理工大学的 MCS-EPFL 机构颁布了最新的 UHPC 设计指南.这些设计指南中无一例外都把 UHPC 材料的轴拉力学性能作为其结构设计中最重要的一项指标,例如法国规范 2013 版把 UHPC 分为高应变强化 UHPC、低应变强化 UHPC 和应变软化 UHPC 3 个等级,而瑞士 2016 规范同样规定了 UO(应变软化)/UA(强化极限应变大于 1 500 微应变)/UB(强化极限应变大于 2 000 微应变)3 种等级.

目前国内对 UHPC 的轴拉应力-应变曲线的试验研究相对较少,对于不同轴拉应力-应变曲线的 UHPC 的裂缝宽度控制能力的认识和探索还不充分,这制约了 UHPC 在国内的结构应用.本文根据法国规范研究了 UHPC 的 3 种轴拉应力-应变曲线及其裂缝宽度控制能力,目标是为在我国制定 UHPC 设计规范提供基础.

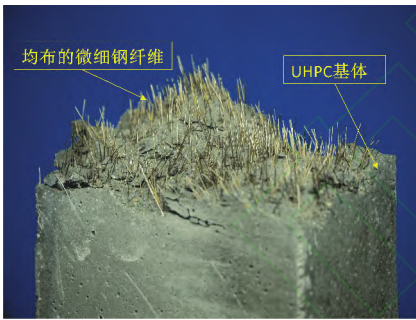


图 1 UHPC 轴拉试件断面图

Fig.1 The cross-section of UHPC

1 试验概况

1.1 UHPC 原材料

UHPC 主要包括超高强水泥基体材料以及纤维,相同的基体通过不同的纤维增强方案(纤维长度、直径、种类、表面构造、异型化、掺量)可以实现拉伸高应变强化、低应变强化或者软化,而相同纤维增强方案在不同基体中也可能呈现拉伸应变强化或应变软化.

本文重点在于研究不同轴拉应力-应变曲线特性的 UHPC 的裂缝宽度控制能力,因此直接采用了上海罗洋新材料科技有限公司提供的常温养护型超高性能混凝土预混粉料产品(商品名为 TENACAL[®],泰耐克),然后通过不同的纤维掺量制备出 3 种典型 UHPC,即高应变强化 UHPC、低应变

强化 UHPC、应变软化 UHPC,其中 UHPC 基体配合比见表 1,钢纤维的体积掺量分别为 2.5%、2.0%、1.5%,参数见表 2.

表 1 UHPC 基体配合比

Tab.1 The mix ratio of UHPC matrix

水泥	硅灰	细活性填料	石英砂	水	高效减水剂
1	0.3	0.3	1.34	0.2	0.005

表 2 钢纤维特征参数

Tab.2 The characteristic parameters of steel fiber

纤维种类	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	长度/mm	直径/ μm	长径比	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
钢纤维	2 500	200	13	200	65	7 850

1.2 轴拉试件制备

UHPC 的搅拌程序为:启动搅拌机→投入粉料→加水 and 减水剂→搅拌 3~5 min(物料达到流化状态→投入纤维、继续搅拌 2 min 以上)→出料.搅拌完成后,将搅拌物浇筑在骨头形钢模中,试样尺寸如图 2 所示.骨头型试件中间段截面尺寸为 50 mm×100 mm,均大于纤维长度的三倍值,有助于纤维在试件中的三维均匀分布,降低纤维取向分布的影响.试验每组 UHPC 类型成型 9 根试件,室温下静置 24 h 后拆模,采用标准养护至 28 d 龄期后进行直接拉伸试验.同时根据 GB/T 31387—2015《活性粉末混凝土》^[5]测试了 3 种类型 UHPC 材料的 28 d 抗压强度(100 mm 立方体抗压试件)和弹性模量(100 mm×100 mm×300 mm 棱柱体试件),测试结果如表 3 所示.

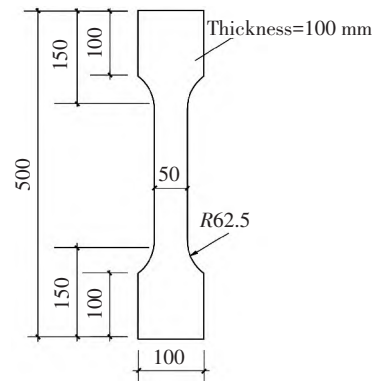


图 2 UHPC 轴拉试件尺寸

Fig.2 Specimen dimension

表 3 3 种类型 UHPC 的 28 d 抗压强度和弹性模量

Tab.3 Three types of UHPC 28 days compressive strength and elastic modulus

3 种类型 UHPC	28 d 抗压强度/MPa	弹性模量/GPa
高应变强化 UHPC	155.4	48.9
低应变强化 UHPC	137.6	48.5
应变软化 UHPC	125.7	47.4

1.3 轴拉应力-应变曲线、缝宽-应变曲线测试方法

在 30 t 电子伺服万能试验机上进行 UHPC 的直接拉伸试验.为避免轴拉加载偏心,本文研究人员设计了一套特殊夹具,如图 3 所示.骨头形试件由上下两个特制夹具固定住,中间纯拉段固定有两个矩形金属架,两者之间距离即为试件的测试标距 L ,本文定为 150 mm.两个金属架用来安装精度为 0.000 1 mm 的 4 个线性可变位移计(LVDT),以便测量轴向拉伸变形,并转化为试件的应变值 ε ($\varepsilon = \frac{l_1+l_2+l_3+l_4}{4L} \times 100\%$, l_1, l_2, l_3, l_4 为 4 个位移计变形值),最终与电脑采集的轴拉应力值形成轴拉应力-应变曲线.试验加载速度设置为 0.05 mm/min,直至试件拉应力小于峰值应力的 20% 结束试验,整个实验过程 1 h 左右.本文为了更大程度显示 UHPC 应力-应变曲线的弹性段和强化段,只给出应变范围为 0~0.55% 的曲线段.采用裂缝测宽仪(精度为 0.01 mm)测量轴拉试验过程中试件的裂缝宽度,记录下裂缝宽度和对应变形值,从而做出缝宽-应变曲线.

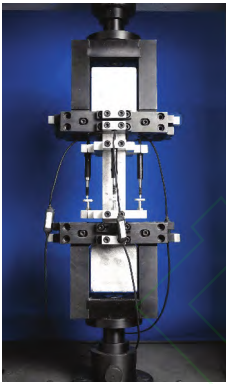


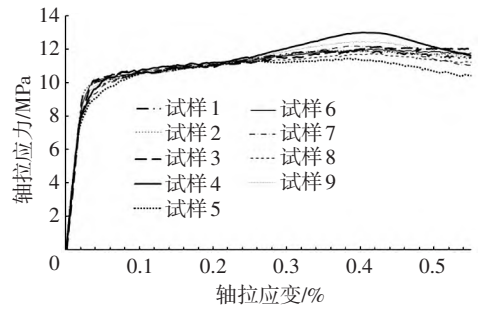
图 3 UHPC 轴拉试验装置

Fig.3 Test apparatus

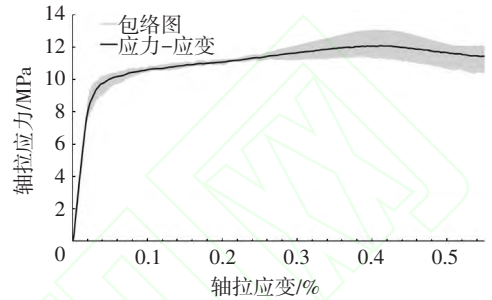
2 试验结果分析

2.1 轴拉应力-应变曲线的离散性

本文采用的轴拉试验装置有效避免了轴拉试验过程中的偏心失稳问题,以高应变强化 UHPC 的试件为例,每根试件的原始试验数据采用插值法筛选出 3 000 个点,应变的取值范围为 0~1%,然后绘制 9 根高应变强化 UHPC 的轴拉应力-应变曲线,如图 4(a) 所示.采用绘图软件 Origin9.0 对 9 根应力-应变曲线进行平均和离散性处理,如图 4(b) 所示.结合图 4(a)、(b) 可知,9 根高应变强化 UHPC 轴拉应力-应变曲线在 0%~0.25% 的轴拉应变范围内离散性很小,超过 0.25% 应变之后离散性变大,原因是由于接近峰值应力时,多点分布微裂纹中开始出现局部开展的单条裂纹而进入应变软化段,其不稳定性导致曲线出现了一定的离散.



(a) 9 根试件的应力-应变曲线



(b) 平均应力-应变曲线及其离散性

图 4 高应变强化 UHPC 曲线

Fig.4 Curves of high strain-hardening UHPC

2.2 3 种类型 UHPC 的轴拉应力-应变曲线及其裂缝宽度-应变曲线

图 6 为典型的高应变强化 UHPC、低应变强化 UHPC、应变软化 UHPC 的应力-应变曲线和缝宽-应变曲线.

1) 3 种类型 UHPC 轴拉试验现象

由图 6 知,高应变强化 UHPC 应力-应变曲线的弹性阶段近似于直线.随着应力的增加,应力-应变曲线达到弹性段极限后曲线斜率发生明显偏移而形成双折线,这时说明 UHPC 基体发生初裂,初裂拉伸应变在 0.025% (250 微应变) 左右.随后曲线进入应变强化平台段,这是由于纤维对微裂纹进行桥接,因此维持了 UHPC 拉伸应力的持续增长.应变强化期间有多条微裂纹产生,然而这些裂纹均为肉眼不可见状态,裂缝宽度均小于 0.05 mm (见图 5) 且增速缓慢 (UHPC 结构中裂缝宽度 W 小于 0.05 mm 的裂缝对结构耐久性的影响很小^[6-7]).应变强化段延续到 0.42% 时,这时某个微裂纹开始扩展成为主裂缝,且缝宽随试件变形的增大而迅速增大.低应变强化 UHPC 轴拉之后随即进入应变软化段,伴随嗞嗞的纤维被拉出的撕裂过程类似于高应变强化 UHPC,初裂拉伸应变和极限拉伸应变分别为 0.02%、0.11%.应变软化 UHPC,应力达到峰值时基体发生初裂,初裂应变即为极限应变,曲线随即进入应变软化阶段,试件只有一条裂缝而不像应变强化型抗拉试件有多条微裂纹,因此试件拉伸变形的增长可能大部分转化为裂缝宽度的增长.

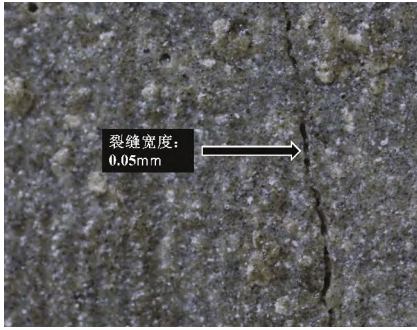


图 5 0.05 mm 裂缝宽度示意

Fig.5 The diagram of crack width for 0.05 mm

由图 6 的缝宽-应变曲线知,高应变强化 UHPC 裂纹宽度扩展显著低于低应变强化 UHPC 以及应变软化 UHPC.

2)3 种类型 UHPC 的轴拉力学性能参数及其裂缝宽度控制能力

表 4 为由图 6 计算的典型 3 种类型 UHPC 轴拉曲线的特征参数(根据文献[8],将线弹性段和应变强化段的曲线分别拟合成直线,所得交点的横坐标即为弹性极限应变,对应的应力为弹性极限强度,将峰值应力定义为极限强度,所对应的应变为极限应变).由表知,高应变强化 UHPC、低应变强化 UHPC、应变软化 UHPC 的弹性极限强度分别为 10.3、9.1、8.0 MPa;弹性极限应变分别是 0.025%、0.020%、0.018% (250 微应变、200 微应变、180 微应变);极限强度分别为 12.2、9.8、8.0MPa;极限应变分

别为 0.42%、0.11%和 0.018%.

本文在 3 种类型 UHPC 的缝宽-应变曲线上取 A 点和 B 点进行对比.其中 A 点表示裂缝宽度 W 为 0.05 mm,B 点表示应变为 0.2%(钢筋屈服应变),并将其对应的参数值列于表 4 中.

当裂缝宽度为 0.05 mm 时,高应变强化 UHPC 和低应变强化 UHPC 的应变值(分别为 0.4%和 0.1%)十分接近极限应变值(分别为 0.42%和 0.11%),这说明应变强化和应变软化的转折点是裂缝缓慢扩展和迅速扩展的临界点.由此可见,提高 UHPC 的极限拉伸应变,即延长其应变强化段,有助于提高其裂缝宽度控制能力.与两种应变强化型 UHPC 相比,应变软化 UHPC 的极限拉伸应变即为其弹性极限应变(0.018%),其裂缝宽度扩展到 0.05 mm 时的应变仅为 0.04%,并且其裂缝宽度-应变曲线近似于线性,说明其拉伸试件的变形增长大部分转化为裂缝宽度的增长.

另一方面,当轴拉应变达到 0.2%(钢筋屈服应变)时,高应变强化 UHPC、低应变强化 UHPC 和应变软化 UHPC 的裂缝宽度分别为 0.02、0.1 和 0.5 mm,这从另一个侧面反映出 UHPC 的裂缝宽度控制能力取决于其极限拉伸应变值的大小,实现应变强化乃至高应变强化有助于提高 UHPC 的裂缝宽度控制能力,这对于 UHPC 在负荷大变形条件下的耐久性及其重要.

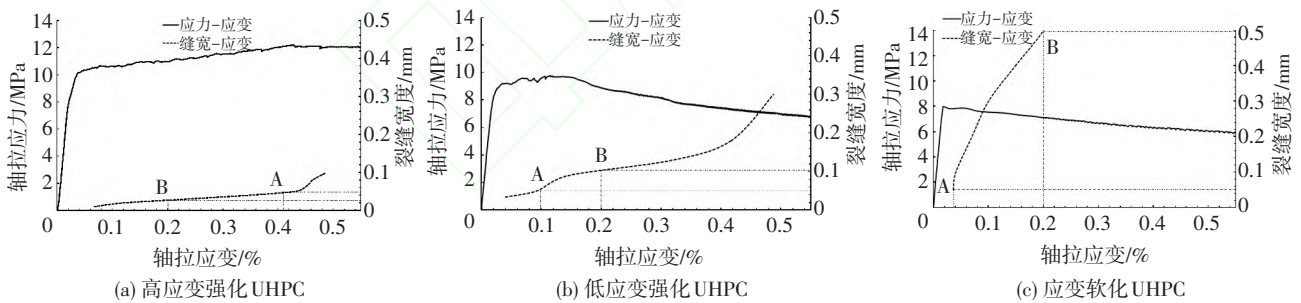


图 6 3 种类型 UHPC 应力-应变曲线,缝宽-应变曲线

Fig.6 The stress-strain curve and crack width-strain curves of three types of UHPC

表 4 3 种类型 UHPC 轴拉特征参数

Tab.4 Characteristic parameters for three types of UHPC

UHPC 类型	$f_{ct,el}/MPa$	$\epsilon_{ct,el}/\%$	f_{pc}/MPa	$\epsilon_{pc}/\%$	A (W=0.05 mm)		B ($\epsilon=0.2\%$)	
					σ/MPa	$\epsilon/\%$	σ/MPa	W/mm
高应变强化 UHPC	10.3	0.025	12.2	0.42	12.2	0.4	11.0	0.02
低应变强化 UHPC	9.1	0.020	9.8	0.11	9.6	0.1	8.9	0.1
应变软化 UHPC	8.0	0.018	8.0	0.018	7.8	0.04	7.1	0.5

注: $\epsilon_{ct,el}$ -线弹性极限应变; $f_{ct,el}$ -弹性极限强度; ϵ_{pc} -极限应变; f_{pc} -极限强度;W-裂缝宽.

3 高应变强化 UHPC 与 C50 混凝土对比

为研究高应变强化 UHPC 与普通 C50 混凝土轴拉应力-应变关系的差异,本文成型 3 根 C50 混凝土轴拉试件,采用相同的试验方法测定了其轴拉应力-应变曲

线,与高应变强化 UHPC 的结果对比见图 7 和表 5.

由图 7 和表 5 可知,高应变强化 UHPC 的极限强度和极限应变分别为 C50 的 5.3 倍、35.5 倍,该“类金属”的变形性能确保 UHPC 结构中高应变强化 UHPC 在钢材屈服前能与之协同工作(钢筋屈服应

变 0.2%),即在结构抗弯极限承载力计算时,可考虑受拉区 UHPC 的抗拉贡献,这与普通混凝土在 0.012% (120 微应变)后开裂即完全退出工作的受力性能产生巨大差异,传统的钢筋混凝土结构设计理论将不再适用钢筋增强 UHPC 结构。

结合图 6 应力-应变、缝宽-应变曲线说明,高强应变强化 UHPC 在达到极限拉伸应变前,有着更优异的裂缝宽度控制能力。根据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》^[9]、JTG D62—2004《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》^[10]中正常使用极限状态下对构件最大裂缝宽度限值的规定,对允许出现裂缝的构件,其最大裂缝宽度限值的最小值均为 0.1 mm (分别是二 a 环境下三级裂缝控制等级的预应力混凝土和 I 类和 II 类环境下采用钢丝或钢绞线的预应力混凝土构件),而高强应变强化 UHPC 在钢筋达到屈服应变 0.2% 时,裂缝宽度仅 0.02 mm,在整个应变强化段内裂缝宽度则始终小于 0.05 mm。因此高强应变强化 UHPC 与钢筋配合使用可避免正常使用状态裂缝宽度验算限制所带来的影响,也使得钢筋增强高强应变强化 UHPC 结构在某些需要对裂缝宽度进行严格控制的结构类型中具有很高的应用价值。

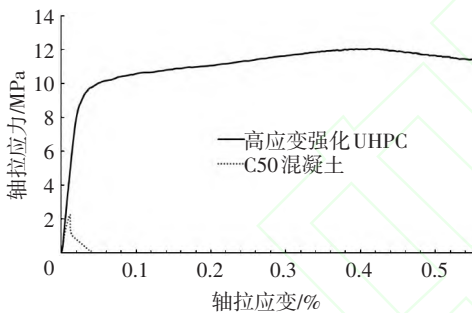


图 7 高强应变强化 UHPC、C50 混凝土应力-应变曲线

Fig.7 The stress-strain curve of high strain-hardening UHPC and C50 concrete

表 5 高强应变强化 UHPC 与 C50 性能差异

Tab.5 The performance difference of high strain-hardening UHPC and C50

材料特性	高强应变强化 UHPC	C50	比值
极限应变/%	0.42	0.012	35.5
极限强度/MPa	12.2	2.3	5.3

4 结 论

1) 本文采用的试验方法可以很好测试 UHPC 的轴拉应力-应变曲线,其曲线离散性较低。

2) 高强应变强化 UHPC 和低应变强化 UHPC 的轴拉应力-应变曲线均包括弹性段、应变强化段和应变软化段,在应变强化段之前的裂缝宽度均小于 0.05 mm,进入软化段之后裂缝宽度迅速扩展。应变软化 UHPC 只有弹性段和软化段,并且拉伸过程中

至始至终只有一条裂缝。

3) 本文研究采用的高应变强化 UHPC、低应变强化 UHPC、应变软化 UHPC 的弹性极限强度分别为 10.3、9.1、8.0 MPa;弹性极限应变分别是 0.025%、0.020%、0.018%;极限强度分别为 12.2、9.8、8.0 MPa;极限应变分别为 0.42%、0.11%和 0.018%。

4) 应变强化和应变软化的转折点是裂缝缓慢扩展和迅速扩展的临界点,提高 UHPC 的极限拉伸应变,即延长其应变强化段,有助于提高其裂缝宽度控制能力。

5) 对比 C50 混凝土 (极限应变、极限强度分别为 0.012%、2.3 MPa),高强应变强化 UHPC 优异的裂缝宽度控制能力避免了结构设计中受正常使用状态裂缝宽度验算限制的影响,同时可在钢筋屈服前与其全程协同工作,这使得钢筋增强高强应变强化 UHPC 结构在某些需要对裂缝宽度进行严格控制的结构类型中具有很高的应用价值。

参 考 文 献

- [1] 阎培渝.超高性能混凝土(UHPC)的发展与现状[J].混凝土世界,2010(9):36-41.
YAN Peiyu. Research and development in UHPC [J]. China Concrete 2010(9):36-41. DOI: 10.3969/j.issn.1674-7011.2010.09.009.
- [2] 赵筠,廉慧珍,金建昌.钢-混凝土复合的新模式—超高性能混凝土(UHPC/UHPFRC)之一:钢-混凝土复合模式的现状、问题及对策与 UHPC 发展历程[J].混凝土世界,2013(10):56-69.
ZHAO Jun, LIANHuizhen, JIN Jianchang. A new model of steel-concrete composite structure-ultra-high performance concrete (UHPC/UHPFRC); the status quo, problems and countermeasures and the development process of UHPC [J]. China Concrete, 2013 (10): 56-69.
- [3] Ultra high performance fibre-reinforced concretes; AFGC/SETRA2002 [S].France: AFGC/SETRA, 2002.
- [4] Ultra high performance fibre-reinforced concretes; AFGC/SETRA 2013 [S].France: AFGC/SETRA, 2013.
- [5] 全国混凝土标准化技术委员会.活性粉末混凝土;GB/T 31387 [S].北京:中国标准出版社,2015.
National standardization technical committee for concrete. reactive powder concrete; GB/T 31387—2015 [S]. Beijing: China Standard Press, 2015.
- [6] RAFIEE A. Computer modeling and investigation on the steel corrosion in cracked ultra high performance concrete [D]. Kassel: University of Kassel, 2012.
- [7] MAKITA T, BRÜHWILER E. Tensile fatigue behaviour of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC) [J]. Materials and Structures, 2014, 47(3):475-491.
- [8] PARK S H, DONG J K, 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.
- [9] 混凝土结构设计规范;GB 50010—2010 [S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
Code for design of concrete structures; GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [10] 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范;JTG D62—2004 [M].北京:人民交通出版社,2004.
Code for design of reinforced concrete and prestressed concrete highway bridges and culverts; JTG D62—2004 [M].Beijing: China Communications Press, 2014.

(编辑 赵丽莹)