

高应变强化超高性能混凝土的裂缝控制机理和研究

王俊颜¹ 郭君渊¹ 肖汝诚² 马 焱³ 刘国平⁴

(1. 同济大学先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092;
3. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092; 4. 上海罗洋新材料科技有限公司, 上海 200092)

摘要: 利用声发射无损探伤技术实时监测三种类型超高性能混凝土(Ultra High Performance Concrete, 简称 UHPC)轴拉试验过程中内部损伤点的形成和演化过程, 同时通过裂缝观测仪量测 UHPC 拉应变到达 2000 $\mu\epsilon$ 时的缝宽。与低应变强化 UHPC 和应变软化 UHPC 相比, 高应变强化 UHPC 具有高抗拉强度和“类金属”拉伸应变强化性能, 在强化段区间内通过多点微裂纹均布开展的形式来平衡等量变形, 表现出优异的裂缝宽度控制能力。气体渗透测试证明高应变强化 UHPC 抗气渗性能优异, 且拉应变达到 2000 $\mu\epsilon$ 后即刻卸载状态下的抗气渗性能仍要优于未受荷 C50 混凝土。基于高应变强化 UHPC 这些特性, 将其应用于桥梁结构的高应力区或其他需要高抗裂性能的部位将是预应力混凝土之外的新方案, 例如钢-UHPC 轻型组合结构、斜拉桥的桥塔锚固区。

关键词: 超高性能混凝土; 高应变强化; 轴拉力学性能; 声发射; 裂缝控制能力

中图分类号: TU528 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2017)11-0010-08

Study on crack control mechanism of strain-hardening ultra-high performance concrete

Wang Junyan¹ Guo Junyuan¹ Xiao Rucheng² Ma Biao³ Liu Guoping⁴

(1. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
3. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China;
4. Shanghai Royang Innovative Material Technologies Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: In this work, the formation and evolution of internal damage points in three types of ultra-high performance concretes (UHPC) during the direct tension testing process were monitored by acoustic emission (AE) analysis system. At the same time, the crack-width of UHPC was measured by the crack observer. Comparing with the strain-softening UHPC and low strain-hardening UHPC, the high strain-hardening UHPC has the performances of high tensile strength and ‘metal-like’ tensile strain-hardening. In the strain-hardening state of high strain-hardening UHPC, the equivalent deformation was equilibrated by the uniform propagation of multiple micro-cracks, exhibiting excellent control capability of crack width. The gas permeation test shows that the strain-hardening UHPC has excellent impermeability. In the unloading state after tensile strain reached 2000 $\mu\epsilon$, its impermeability was still better than that of C50 concrete without loading. In view of these characteristics, it is meaningful to use strain-hardening UHPC in the bridge construction with high risk of cracking, for example, in steel-UHPC composite bridge and cable-tower anchorage zone of cable-stayed bridge.

Keywords: ultra-high performance concrete; strain-hardening; tensile properties; acoustic emission; cracking control

E-mail: wangjunyan@ tongji. edu. cn

引 言

超高性能混凝土(Ultra High Performance Concrete, 简称 UHPC)是根据颗粒最紧密堆积、水灰比小于 0.25

和纤维增强等原则进行设计, 从而具备超高强度、超高韧性(类金属拉伸应变强化特性)、超高耐久性及良好的施工性能等优异性能的新品种水泥基结构材料^[1-3]。有别于传统高强混凝土或纤维混凝土, UHPC 最大的优势在于其高抗拉性能和延性, 因此各国设计指南均根据 UHPC 材料的轴拉力学性能(初裂强度、极限抗拉强度及强化极限应变)来划分其等级。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 暂行设计

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

作者简介: 王俊颜, 博士, 研究员

收稿日期: 2017-04-27

指南《Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete-Interim Recommendations》^[1],成为最早的UHPC结构设计的依据。2013年发布该指南的修订版,其根据极限抗拉强度是否大于初裂强度(弹性极限抗拉强度)把UHPC分为高应变强化UHPC、低应变强化UHPC和应变软化UHPC三种类型。2016年瑞士洛桑联邦理工大学颁布了最新的UHPC设计指南《Ultra-High Performance Fibre Reinforced Cement-based Composites (UHPFRC): Construction material, dimensioning und application》^[4](瑞士标准SIA 2052的英文版本),根据初裂强度、极限抗拉强度与初裂强度的比值以及强化极限应变三个指标把UHPC划分为UO(应变软化)/UA(强化极限应变大于1500 $\mu\epsilon$)/UB(强化极限应变大于2000 $\mu\epsilon$)三种等级。上述设计指南中无一例外都把UHPC材料的轴拉力学性能作为结构设计中最重要的一项指标。

我国在2015年颁布了《活性粉末混凝土》(GB/T 31387—2015)国家标准^[5],其中活性粉末混凝土的抗拉性能是由不同等级的抗弯拉强度进行间接表征,并未规定其直接测试的轴拉力学性能。广东省交通运输厅2015年发布的《超高性能轻型组合桥面结构技术规程》(GDJTG/T A01—2015)^[6]把所使用的UHPC材料按抗折强度标准值划分为22MPa、25MPa、28MPa三个等级,轴拉强度仅给出设计值(分别为7MPa、8MPa、9MPa),没有规定测试方法,也不作为材料的验收指标。轴拉力学性能作为划分UHPC最关键的评价指标没有出现在国内的规范中,也侧面反映了国内对UHPC轴拉力学性能缺乏系统的研究。

预应力混凝土技术是目前最为有效的混凝土抗裂措施,通过储备混凝土压缩应变的方式来提高混凝土抗裂能力,其极限抗拉应变可视为混凝土预压应变与混凝土极限抗拉应变之和,以C50混凝土为例,大约为800微应变(0.8‰)左右。瑞士指南中^[4]提到受拉的UA和UB型UHPC(均为应变强化型),只要其在使用状态的变形小于1‰,则不会开裂且密不透水。配筋的高应变强化型UHPC结构在预应力混凝土技术之外为解决桥梁工程中混凝土结构的开裂问题提出一种新的思路。

本文首先研究了应变软化、低应变强化、高应变强化三种类型UHPC的轴拉应力应变曲线,同时利用声发射无损探伤技术实时监测了轴拉试验过程中三种类型UHPC内部损伤点的形成和演化过程,并测量了UHPC拉应变达到2000 $\mu\epsilon$ 时的缝宽。在此基础上,利用气体渗透测试方法评价高应变强化UHPC拉应变达到2000 $\mu\epsilon$ 并卸载后的抗渗性能,并与未受荷

C50混凝土进行对比。利用声发射损伤定位技术和气体渗透测试技术,阐述高应变强化UHPC的裂缝控制原理。

1 试验概况

1.1 UHPC原材料及试件成型

本文试验所用UHPC材料由上海罗洋新材料科技有限公司提供,商品全名为TENACAL[®](泰耐克)常温养护型超高性能混凝土,分为三种类型:高应变强化UHPC、低应变强化UHPC、应变软化UHPC,均为预混粉料包装,基体配合比见表1,纤维采用平直形钢纤维,体积掺量分别均为2.5%、2.0%、1.5%,参数见表2。每个配比成型9根轴拉试件。

表1 UHPC基体配合比

Table 1 Mix proportion of UHPC matrix

水泥	硅灰	细活性填料	石灰砂	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

Table 2 Characteristic parameters of steel fiber

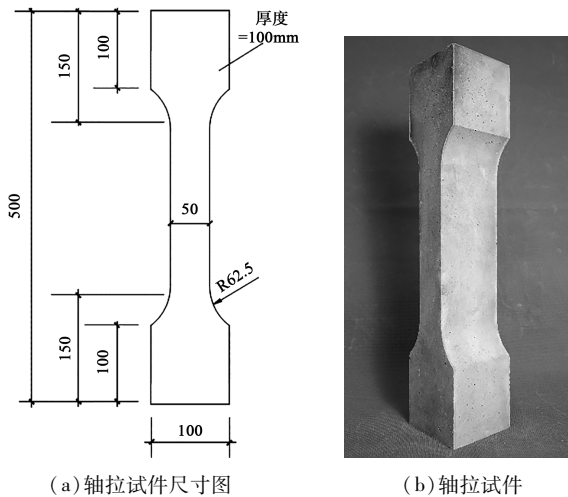
纤维种类	抗拉强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)	长度 (mm)	直径 (μm)	长径比	密度 (kg/m^3)
钢纤维	2500	200	13	200	65	7850

试件尺寸如图1(a)所示,试件中间段为50mm×100mm×200mm的棱柱体,各方向尺寸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。

TENACAL[®]包括三种组分,分别为UHPC预混粉料、纤维和水。搅拌程序为:启动搅拌机→投入粉料→加水 and 减水剂→搅拌3~5min(物料达到流化状态)→投入纤维,继续搅拌2min以上)→浇筑。浇筑时用振捣棒轻微振捣,抹平,并用塑料薄膜覆盖。室温下静置24h后拆模,采用标准养护至28d后进行直接拉伸试验。养护后试件如图1(b)所示。

1.2 UHPC轴拉应力应变曲线及裂缝宽度测试方法

轴拉试验加载装置采用30t微机控制电子伺服万能试验机。试验加载速度为0.1mm/min,当试件拉应力小于峰值应力的30%结束试验。试验变形测量装置如图2所示,由上下两个金属固定支架配以四根精度为0.0001mm的光栅位移传感器组成,可全方位量测支架段内试件变形。当拉应变达到2000 $\mu\epsilon$ 时,采用裂缝测宽仪(精度0.01mm)测量此时试件的最大裂缝宽度。



(a) 轴拉试件尺寸图 (b) 轴拉试件

图 1 轴拉试件

Fig. 1 Specimen for direct tensile test

声发射源定位的原理是利用时差定位。当多个传感器进行声发射检测时,各传感器接收到来自声发射源的时间是不一样的。将其中一个传感器设定成基准点,测量其与其他传感器接受到信号的时间差,最后根据传播速度计算出声源的相对空间坐标。

1.3.2 试验方法

声发射试验由两部分构成,分别是断铅人工激发源试验和 UHPC 轴拉损伤定位试验。ASTM 规范^[8]建议采用铅笔芯折断法,使用硬度为 HB 或 2B 直径 0.5mm 的铅芯作为人工模拟源^[9]。试验过程中,铅芯设置铅芯的伸长量约为 2.5mm,与混凝土试件表面夹角约为 30°,铅芯在距离传感器 30mm 内折断。该试验主要有两个作用:一是测定试件的波速,二是测定试验环境的噪音值,以便在轴拉损伤定位试验时设置相应阈值和放大增益以排除噪音干扰。

UHPC 轴拉声发射无损探伤定位试验装置如图 2 所示,试件传感器的布置如图 4 所示,正反面共 8 个,利用耦合剂(凡士林)通过胶枪将其固定于试件表面。根据断铅试验、加载设备噪声水平及本次试验目的,试验参数选用如下:前置放大器增益为 40dB,门限值为 35dB,采样频率为 3MHz,滤波器带通取 20 ~ 200kHz。当负荷超过 0.5kN 时进入正式试验,声发射采集系统开始工作。轴拉试验结束,声发射采集系统同步停止工作。

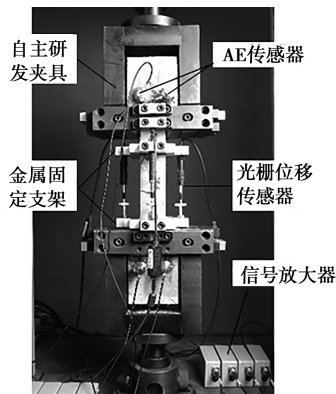


图 2 UHPC 轴拉测试系统(配置特制夹具、声发射探伤系统)

Fig. 2 Setup of direct tensile test

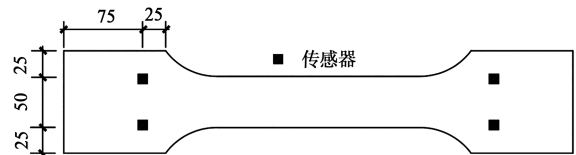


图 4 AE 传感器布置图

Fig. 4 Layout of AE sensors

1.3 UHPC 轴拉声发射无损探伤定位试验方法

1.3.1 声发射无损探伤定位原理

声发射(acoustic emission,简称 AE)是指材料或结构受外力或内力作用产生变形或断裂,以弹性波形式释放出应变能的现象^[7]。如图 3 所示,声发射无损探伤定位系统就是借助 AE 传感器采集材料开裂或变形过程产生的声发射信号,经计算机处理,从而得到表征缺陷特征参数,以此来分析和判断材料损伤的位置及发展趋势。

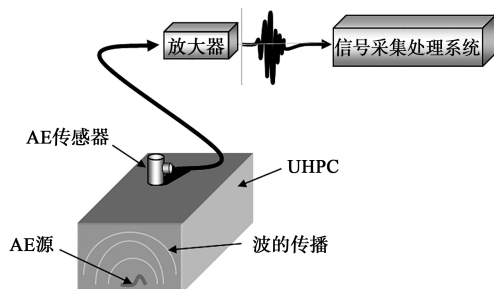


图 3 声发射波的传播、转换路径

Fig. 3 Propagation of acoustic emission waves

2 试验结果及分析

2.1 三种 UHPC 的力学性能

2.1.1 基本力学性能

为检验同批材料的均匀程度,本文按照 GB/T 31387—2015《活性粉末混凝土》^[5]中对材料力学性能的测试要求,同时成型并测试了三种类型 UHPC 材料的 28d 抗压强度(100mm 立方体抗压试件)、28d 抗折强度(100mm × 100mm × 400mm 棱柱体抗折试件)和弹性模量(100mm × 100mm × 300mm 棱柱体弹性模量试件),每种试件 3 个。测试结果如表 3 所示。

2.1.2 轴拉应力应变曲线及裂缝宽度控制能力

图 5 为三种 UHPC 轴拉的应力-应变曲线。由图知,应变软化 UHPC 基体一旦受拉开裂,受荷能力便开

表 3 三种 UHPC 实测基本力学性能

Table 3 Basic mechanical properties of three types of UHPC

试件种类	抗压强度 (MPa)	抗折强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)
	(C · V)	(C · V)	(C · V)
高应变强化 UHPC	155.4 (0.042)	32.33(0.073)	48.9(0.021)
低应变强化 UHPC	137.6 (0.051)	24.78(0.129)	48.5(0.037)
应变软化 UHPC	125.7 (0.031)	21.37(0.080)	47.4(0.026)

始下降;低应变强化 UHPC 和高应变强化 UHPC 的应力-应变曲线相较于应变软化 UHPC 多了应变强化段,应变强化段的出现使得材料在基体开裂后,其受荷能力仍继续增长,使其明显具有延性材料的特征,其中高应变强化 UHPC 的应变强化段比低应变强化 UHPC 更长,强化幅度更高。表4为三种类型 UHPC 轴拉曲

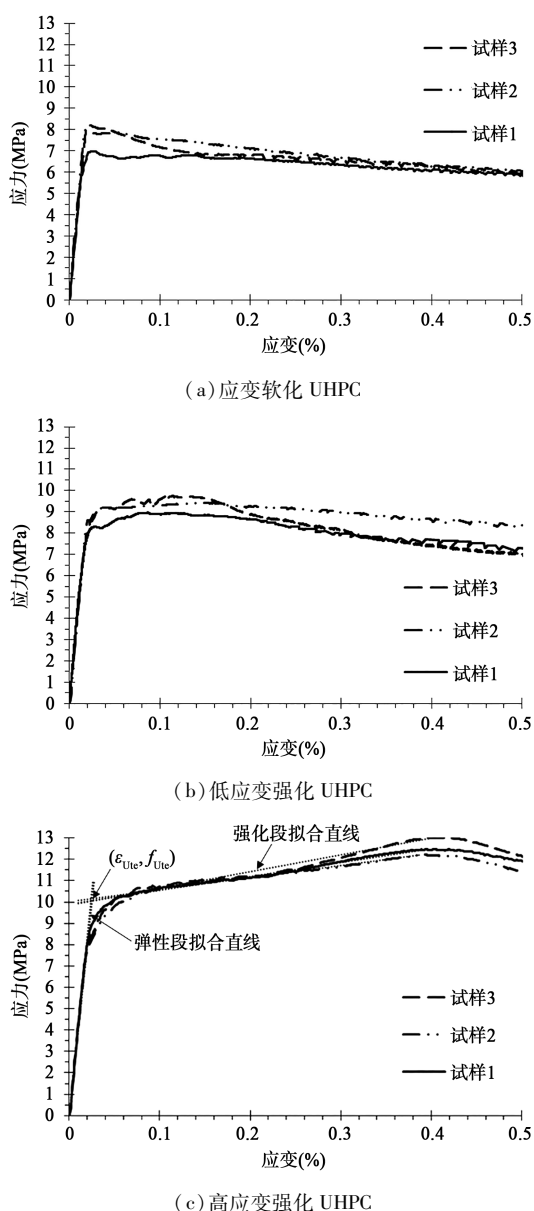


图 5 三种类型 UHPC 轴拉应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of three types of UHPC

线的特征参数,由表知,高应变强化 UHPC 平均极限抗拉强度 f_{Um} 为 12.56MPa,是低应变强化 UHPC 的 1.34 倍,应变软化 UHPC 的 1.63 倍;平均强化极限应变 ϵ_{Um} 达到了 3950 $\mu\epsilon$,是低应变强化 UHPC 3.41 倍,软化 UHPC 弹性极限应变的 18.81 倍。当轴拉应变达到 2000 $\mu\epsilon$ 时,裂缝测宽仪量测的缝宽显示,高应变强化 UHPC 裂缝宽度是 0.02mm,仅为低应变强化 UHPC、应变软化 UHPC 的 1/5 和 1/25。上述数据表明,高应变强化 UHPC 区别于低应变强化 UHPC、应变软化 UHPC 的最大优势不仅在于其高抗拉强度和高“类金属”拉伸应变强化性能,还在于其优异的裂缝宽度控制能力。

2.2 基于声发射的 UHPC 轴拉试验损伤点定位、演化及分布表征

2.2.1 UHPC 轴拉试验损伤点定位、演化表征

UHPC 轴拉声发射无损探伤定位试验典型轴拉应力应变曲线及损伤点分布图如图 6 ~ 图 8 所示,图中 A、B、C、D、E 五个点分别对应五个特征拉伸应变: 100 $\mu\epsilon$ 、200 $\mu\epsilon$ 、1000 $\mu\epsilon$ 、2000 $\mu\epsilon$ 和 4000 $\mu\epsilon$ 。

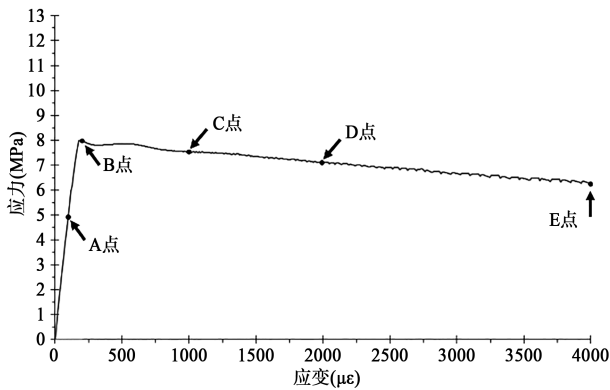
由图 6 ~ 图 7 知,对于应变软化 UHPC 和低应变强化 UHPC, A 点处于弹性上升段内,对应的内部损伤点分布图中没有出现损伤点,说明基体此时并没有出现新的不可逆损伤。对于应变软化 UHPC, B、C、D、E 四点均处于软化段,如图 6 (b) 所示,应变软化 UHPC 至 B 点时,试件中下部已开始出现损伤点,随着应变的增加,新损伤点集中出现在此区域内,到 E 点时,损伤点整体呈现“条”状,此时试件表面有一条宏观可视裂缝,裂缝近似直线,位置对应损伤点集中区域。对于低应变强化 UHPC, B 点处于应变强化段,试件下半部分开始出现成块损伤点,随着应变的增加,大量新损伤点围绕此区域向四周蔓延,到 E 点时,损伤点整体呈现“块”状,试件表面有一条宏观可视裂缝,裂缝呈一条曲线,位置处于损伤点区域内。

由图 8 知, A、B 两特征拉应变点均处于高应变强化 UHPC 的弹性上升段内,对应的内部损伤点分布图中同样没有出现损伤点。 C、D、E 三点处于曲线的应变强化段,如图 8 (b) 所示,高应变强化 UHPC 在 C 点时,试件上部和下部均已出现损伤点,随着应变的增加,新损伤点向试件中部蔓延,到 E 点时,损伤点遍布整根试件,观察此时试件表面,并无宏观可视裂缝。对比三种 UHPC 试件的内部损伤点分布图可发现,软化 UHPC 试件损伤点分布范围最小,低应变强化 UHPC 试件次之,高应变强化 UHPC 试件损伤点分布范围最广,说明高应变强化 UHPC 内部微裂纹的开展的范围大于低应变强化 UHPC 和软化 UHPC。

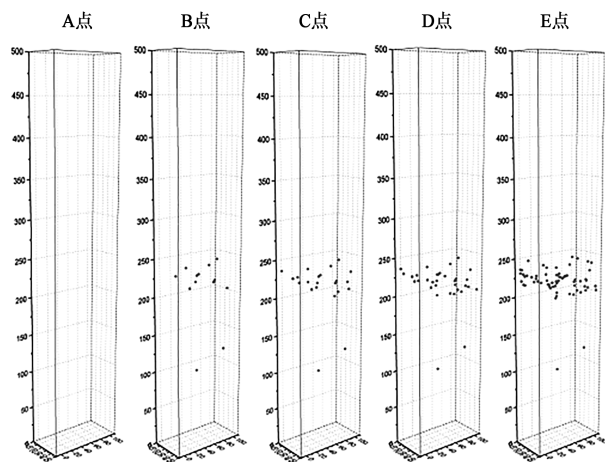
表4 三种类型UHPC的轴拉力学性能
Table 4 Tensile properties of three types of UHPC

UHPC 类型	序号	f_{Ute} (MPa)	平均值 (MPa)	ε_{Ute} (%)	平均值 (%)	f_{Utu} (MPa)	平均值 (MPa)	ε_{Utu} (%)	平均值 (%)
应变软化	1	6.97		0.025		—		—	
	2	7.98	7.72	0.018	0.021	—	—	—	—
	3	8.22		0.021		—		—	
低应变强化	1	8.30		0.028		8.96		0.087	
	2	8.60	8.37	0.021	0.023	9.44	9.39	0.147	0.116
	3	8.21		0.020		9.77		0.114	
高应变强化	1	10.07		0.025		12.46		0.394	
	2	10.15	10.08	0.025	0.025	12.21	12.56	0.388	0.395
	3	10.03		0.024		13.01		0.404	

注:1 根据文献[10],将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 ε_{Ute} ,对应的应力为弹性极限抗拉强度 f_{Ute} ,将峰值应力定义为极限抗拉强度 f_{Utu} ,所对应的应变为强化极限应变 ε_{Utu} 。

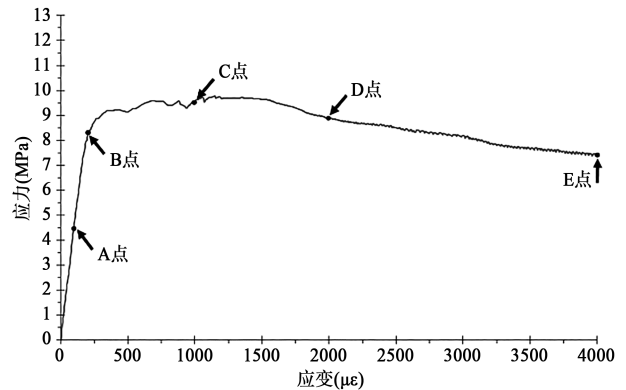


(a) 轴拉应力-应变曲线

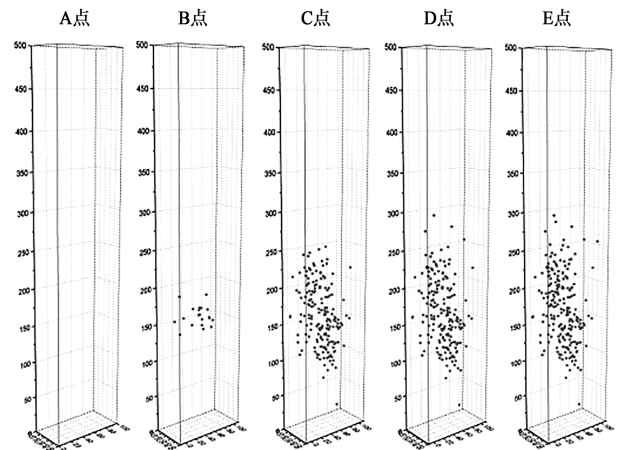


(b) 声发射损伤点分布图

图6 应变软化UHPC在不同应变处的内部损伤点分布
Fig.6 Distribution of internal damage points at different strains of strain-softening UHPC

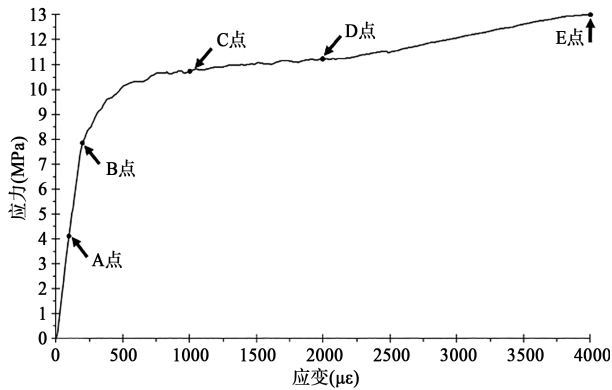


(a) 轴拉应力-应变曲线

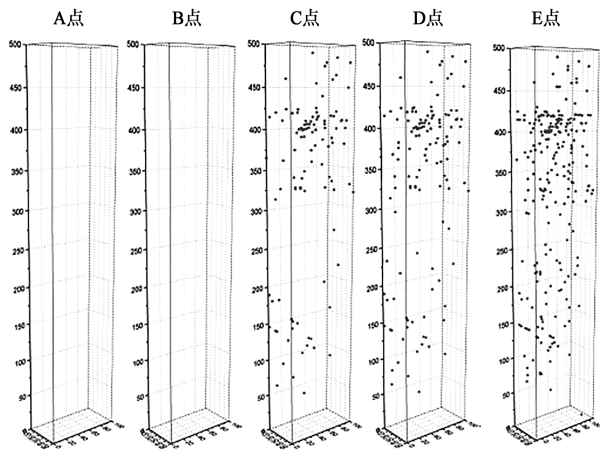


(b) 声发射损伤点分布图

图7 低应变强化UHPC在不同应变处的内部损伤点分布
Fig.7 Distribution of internal damage points at different strains of low strain-hardening UHPC



(a) 轴拉应力-应变曲线



(b) 声发射损伤点分布图

图8 高应变强化 UHPC 在不同应变处的内部损伤点分布
Fig.8 Distribution of internal damage points at different strains of strain-hardening UHPC

表5为试验测得三种UHPC声发射活动特征。由表知,高应变强化UHPC开始出现连续损伤点时的应变为 $240\mu\epsilon$,而低应变强化UHPC和软化UHPC出现连续损伤点时应变分别为 $195\mu\epsilon$ 和 $174\mu\epsilon$,在拉至相同的应变时($4000\mu\epsilon$),高应变强化UHPC试件的损伤点累计数最多,达到了246个,低应变强化UHPC的损伤点累计数220个次之,应变软化UHPC的损伤点累计数最少,77个损伤点数仅为高应变强化UHPC的31.3%。声发射与材料内部损伤具有直接的一致对应关系^[11],声发射累计损伤点数对应于材料不同的损伤状态。高应变强化UHPC的损伤点出现的最晚,在截止相同的应变时,损伤点数量反而最多,说明其一旦开始出现新的不可逆损伤后,试件内部的声发射活动性更高,损伤发展也更活跃。同时意味着,高应变强化UHPC内部的微裂缝的开展比低应变强化UHPC和软化UHPC更均匀,在总变形一致的情况下,可形成更细的微裂纹。

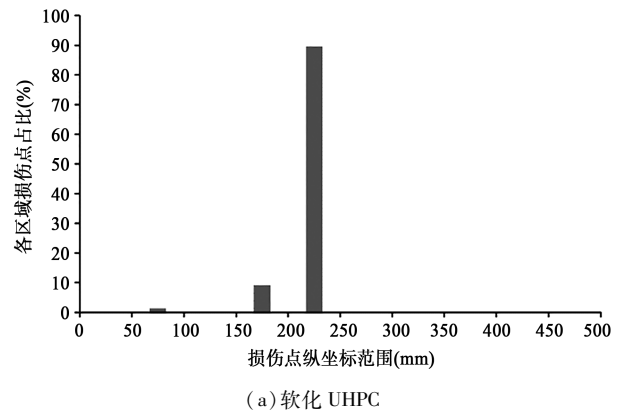
2.2.2 UHPC轴拉试验损伤点分布表征

将试件沿高度划成10等分,计算出各等分损伤点

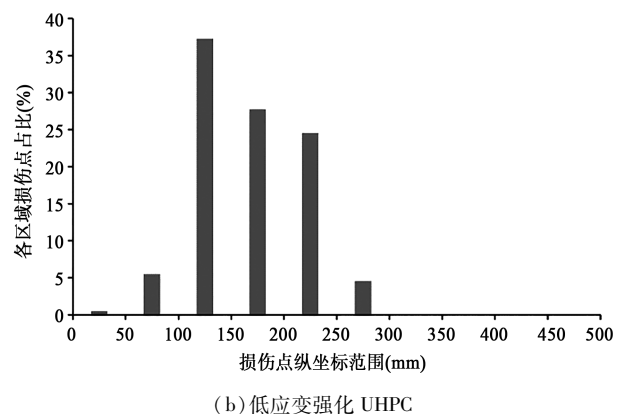
表5 声发射活动特征
Table 5 Activity characteristics of AE

UHPC 种类	累计损伤点数 (截止 4000 $\mu\epsilon$)	损伤点开始持续出现时	
		应力 (MPa)	应变 ($\mu\epsilon$)
应变软化	77	7.78	174
低应变强化	220	8.20	195
高应变强化	246	8.37	240

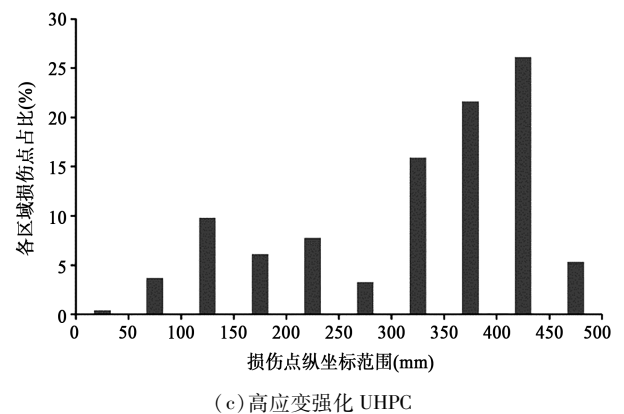
的占比并绘成柱状图,结果如图9所示。应变软化UHPC试件中,损伤点仅出现在3个等分区域内,其中98.7%的损伤点均集中分布在试件高150~250mm的高度内,且这98.7%的损伤点均在190~240mm的高



(a) 软化 UHPC



(b) 低应变强化 UHPC



(c) 高应变强化 UHPC

图9 三种类型 UHPC 声发射损伤点柱状分布图
Fig.9 Columnar distribution of AE damage points of three types of UHPC

度内。在低应变强化 UHPC 试件中,损伤点出现在 6 个等分区域内,损伤点数量最多的区域是 100 ~ 150mm 的高度等分内,占比达 37.27%。在高应变强化 UHPC 试件中,损伤点遍布 10 个等分区域内,其中损伤点数量最多的区域是 400 ~ 450mm 的高度等分内,占比仅 26.12%。从分散度来看,高应变强化 UHPC 损伤点所占区间高度最大,是低应变强化 UHPC 的 1.67 倍,软化 UHPC 的 3.33 倍。从密集度来看,高应变强化 UHPC 最密集处区域密度(50mm 等分区间内损伤点占比数)最小,为低应变强化 UHPC 的 70.1%,软化 UHPC 的 26.5%。

基于声发射的 UHPC 轴拉试验数据显示,高应变强化 UHPC 在拉伸荷载下内部损伤点更多,分布范围更广,区域内损伤点的密度更小,从而将等量变形转化成多点微裂纹均布开展的形式,故每条微裂纹的宽度均控制在较低的水平,且有效地遏制了微裂纹贯通和发展形成裂缝。这些多点分布细小裂纹的产生使高应变强化 UHPC 表现出特有的高延性和高裂缝控制能力,是其负荷服役状态下具备优异力学性能和耐久性能的机理。

2.3 高应变强化 UHPC 微裂纹状态下的抗渗性能

高应变强化 UHPC 的强化极限应变超过了 2000 $\mu\epsilon$,超过了普通钢筋的屈服应变,因此可与之协同受拉,在结构设计中需要考虑 UHPC 的抗拉贡献。另一方面,高应变强化 UHPC 处于应变强化段时已带有分布微裂纹。虽然瑞士指南^[4]中提及强化极限应变超过 1500 $\mu\epsilon$ 的 UHPC 可被认为在 1000 $\mu\epsilon$ 之前都是不开裂和不渗水的,但只是定性的说法。本文采用气体渗透性的测试方法来评价高应变强化 UHPC 在拉应变达到 2000 $\mu\epsilon$ 时即刻卸载后的抗渗性能,为该论点提供进一步的数据。

气体渗透试验采用了英国的 Autoclam 气渗仪,如图 10 所示。Autoclam 气渗仪采用时间变量-压力差的测试原理,即具有相同初始压力的密闭容器中的压缩气体通过管道对测试空间中的试件(本文中的 C50 混凝土和高应变强化 UHPC)进行渗透,然后监测密闭容器的压力衰减曲线并提取相关参数以表征试件的气体渗透性。相同时间内压力衰减越慢,说明测试体的渗透性越差,抗气渗能力越高。本文采用的密闭容器的初始压力为 500mbar(1mbar = 100Pa = 0.001 个大气压),试验时间 15min,气体渗透系数 API 根据下式计算:

$$API = (\ln \text{初始压力} - \ln \text{试验结束压力}) / \text{试验时间} \quad (1)$$



(a) C50 混凝土



(b) 高应变强化 UHPC

图 10 气体渗透测试试验
Fig. 10 Gas permeation test

气体渗透试验结果显示,高应变强化 UHPC 试件在未受荷状态下,15min 的试验中压力仅下降了 7.4mbar,拉应变达到 2000 $\mu\epsilon$ 后即刻卸载的状态下,压力下降了 100mbar。而 C50 混凝土在未受荷状态下,15min 的试验中压力就下降了 205mbar。根据式 1 计算各试件的抗气渗参数,结果如表 6 所示。由表 6 可知,高应变强化 UHPC 在未受荷载和拉应变达到 2000 $\mu\epsilon$ 后即刻卸载状态时的抗气渗能力分别是未受荷 C50 混凝土的 35.25 倍和 2.34 倍。试验结果表明:①高应变强化 UHPC 的抗渗性能优异,且在对应于钢筋屈服的应变时的抗气渗性能仍要优于普通混凝土;②高应变强化 UHPC 在与钢筋协同工作过程中虽然处于多点分布微裂纹状态,但其仍可有效抵抗有害介质的侵蚀,可保证 UHPC 结构的高耐久性。

表 6 高应变强化 UHPC 的抗气渗参数
Table 6 Gas permeability coefficient of strain-hardening UHPC

应变状态	C50		高应变强化 UHPC	
	(未受荷)	(未受荷)	(未受荷)	(2000 $\mu\epsilon$ 后即刻卸载)
气体渗透系数 (Ln(压力)/min)	0.03384	0.00096	0.01447	
抗气渗能力指数 (以未受荷 C50 为基准)	1	35.25	2.34	

上述试验结果表明,高应变强化 UHPC 具有三个重要特性:一是在单轴拉伸作用下开裂后表现出应变强化特性,并且强化极限应变超过 $2000\mu\epsilon$;二是其裂缝控制能力,在应变强化段,始终将裂缝宽度控制在较低的水平;三是抗气渗性能优异,拉应变至 $2000\mu\epsilon$ 后即刻卸载状态的抗气渗性能仍要优于普通混凝土。基于高应变强化 UHPC 这些特性,将其应用于桥梁结构的高应力区或其他需要高抗裂性能的部位将是预应力混凝土之外的新方案。

4 结论

本文首先研究了应变软化、低应变强化、高应变强化三种类型 UHPC 的轴拉应力应变曲线,同时利用声发射无损探伤技术监测了三种类型 UHPC 的内部损伤演化过程和机制,对比拉应变为 $2000\mu\epsilon$ 时试件的最大缝宽,研究了高应变强化 UHPC 的裂缝控制机理,最后采用气体渗透测试方法研究了高应变强化 UHPC 在微裂纹状态下的抗气渗性能,得到了以下结论:

(1)高应变强化 UHPC 在单轴拉伸作用下开裂后表现出应变强化特性,并且强化极限应变超过普通钢筋屈服应变 $2000\mu\epsilon$ 。

(2)当轴拉应变达到 $2000\mu\epsilon$ 时,高应变强化 UHPC 裂缝宽度仅 0.02mm ,仅是低应变强化 UHPC、应变软化 UHPC 的 $1/5$ 和 $1/25$,显示出了很好的裂缝宽度控制能力。

(3)声发射试验结果显示,高应变强化 UHPC 在拉伸荷载下内部损伤点更多,分布范围更广,区域密度更小,从而将等量变形演变成多点均布微细裂纹,有效的遏制了微裂纹贯通和发展形成裂缝。

(4)高应变强化 UHPC 的抗气渗性能优异,在未受荷载和拉应变达到 $2000\mu\epsilon$ 后即刻卸载状态时的抗气渗能力分别是未受荷 C50 混凝土的 35.25 倍和 2.34 倍。

(5)基于高应变强化 UHPC 这些特性,将其应用于桥梁结构的高应力区或其他需要高抗裂性能的部位将是预应力混凝土之外的新方案。

参 考 文 献

- [1] Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concretes Interim Recommendations[S]. France: AFGC, 2002
- [2] FHWA-HRT-11-038 Ultra-High Performance Concrete Tech Note[S]. America: FHWA Publication, 2011
- [3] 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/UHPFR)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, Lian Huizhen, Jin Jianchang. A new model of steel-concrete composite structure-ultra-high performance concrete (UHPC/UHPFR): the status, problems and countermeasures and the development process of UHPC[J]. Concrete World, 2013(10):56-69(in Chinese))
- [4] MCS-EPFL. Ultra-High Performance Fibre Reinforced Cement-based composites (UHPFR): Construction material, dimensioning und application [S]. Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology, 2016
- [5] GB/T 31387—2015 活性粉末混凝土[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015 (GB/T 31387—2015 Reactive powder concrete [S]. Beijing: China Standard Press, 2015 (in Chinese))
- [6] GDJTG/T A01—2015 超高性能轻型组合桥面结构技术规范[S]. 广东, 2015 (GDJTG/T A01—2015 Technical Specification for Ultra-High Performance Light-Weighted Composite Deck Structure [S]. Guangdong, 2015 (in Chinese))
- [7] 袁振民. 声发射检测[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981
- [8] ASTM E976-99 Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response[S].
- [9] 吴胜兴,王岩,李佳,等. 混凝土静态轴拉声发射试验相关参数研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(5): 196-204 (Wu Shengxing, Wang Yan, Li Jia, et al. Parameters of acoustic emission test of concrete under static uniaxial tension[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(5): 196-204 (in Chinese))
- [10] Park S H, Dong J K, Ryu G S, et al. Tensile behavior of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete[J]. Cement & Concrete Composites, 2012, 34(2): 172-184
- [11] 吴胜兴,王岩,沈德建. 混凝土及其组成材料轴拉损伤过程声发射特性试验研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(7): 21-27 (Wu Shengxing, Wang Yan, Shen Dejian. Experimental study on acoustic emission characteristics of damage process of concrete and its components under uniaxial tension [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(7): 21-27 (in Chinese))

王俊颜(1982-),男,博士,研究员。主要从事超高性能水泥基结构材料(UHPC, ULCC 等)的研究。

郭君渊(1990-),男,博士研究生。主要从事超高性能混凝土材料力学性能等方面的研究。

肖汝诚(1962-),男,博士,教授。主要从事桥梁设计理论等方面的研究工作。

马 磊(1961-),男,学士,教授级高级工程师。主要从事桥梁设计与研究

刘国平(1967-),男,学士,高级工程师。主要从事纤维混凝土和 UHPC 的研究