

# 常温养护型超高性能混凝土的弯曲性能表征方法

王俊颜<sup>1</sup>, 李 钢<sup>1</sup>, 郭君渊<sup>2</sup>, 刘 超<sup>2</sup>, 刘国平<sup>3</sup>

(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. 上海罗洋新材料科技有限公司, 上海 200092)

**摘要:** 采用 4 点弯曲试验方法对常温养护超高性能混凝土的弯曲性能进行了试验研究,并在试验结果的基础上讨论了适于超高性能混凝土 UHPC 弯曲性能的评价方法. 试验结果表明, UHPC 没有明显的初裂点,但有明显的“挠度硬化”行为. 结合不同钢纤维掺量下 UHPC 荷载-挠度关系曲线,分析总结了三种国外常用的弯曲性能评价方法(ASTM C1018 法、JSCE SF4 法和 ASTM C1609 法)的优点和不足. 通过比较分析, ASTM C1609 规定的不同挠度及其对应的弯曲强度给予了 UHPC 结构设计更为准确的指标,能满足 UHPC 结构设计的多种需求.

**关键词:** 超高性能混凝土; 钢纤维; 4 点弯曲; 弯曲性能; ASTM C1609

**中图分类号:** TU5

**文献标志码:** A

## Characterization of Flexural Performance of Ultra-high Performance Concrete Without Thermal Curing

WANG Junyan<sup>1</sup>, LI Gang<sup>1</sup>, GUO Junyuan<sup>2</sup>, LIU Chao<sup>2</sup>, LIU Guoping<sup>3</sup>

(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 201804, China; 3. Shanghai Luoyang New Material Technology Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

**Abstract:** An experimental study on the flexural performance of ultra-high performance concrete (UHPC) without thermal curing was carried out via four-point bending tests. Based on the test results, discussions on how to effectively evaluate the flexural performance of UHPC were presented. The four-point bending test results indicated that first cracking point of UHPC was hard to be determined, while significant “deflection hardening” behavior was noticed. Combined with the load-deflection curves of UHPC with different steel fiber

dosage, both advantages and disadvantages of three evaluation methods of ASTM C1018, JSCE SF4 and ASTM C1609 commonly used were discussed. The results show that the flexural strength related to different mid-span deflections given by ASTM C1609 can be regarded as more meaningful parameters for UHPC structure design, which can meet the various needs of the UHPC structural design.

**Key words:** ultra-high performance concrete; steel fiber; four-point bending tests; flexural performance; ASTM C1609

超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, 简称 UHPC) 不同于传统的高强混凝土和钢纤维混凝土,也不是传统意义“高性能混凝土”的高强化,而是性能指标明确的新品种水泥基结构工程材料<sup>[1]</sup>. UHPC 的真正价值体现在能够充分发挥与利用均布于 UHPC 内部的钢纤维的抗拉强度,从而实现高抗拉强度、高韧性和应变硬化行为. 同时由于 UHPC 自身的高致密度、大变形状态下的多点微裂纹<sup>[2]</sup>以及裂纹自修复性能<sup>[3]</sup>,可保证 UHPC 具有优异的抗渗性能和耐久性能. UHPC 最初被广泛传播的名称为活性粉末混凝土 (reactive powder concrete, 简称 RPC),是由法国学者 RICHARD<sup>[4]</sup>首先于 1994 年成功研发并取得专利. 同年,法国学者 De LARRARD 和 SEDRAN 发表的论文<sup>[5]</sup>,将这种新型混凝土称作 UHPC. 相较于“RPC”,“UHPC”的名称能更好地表达这种水泥基材料或混凝土在全面性能上的跨越式进步,故逐步被广泛接受和采用. 过去二十年间, UHPC 在国外已经被广泛应用于人行桥、公路桥梁、海工结构、隧道衬砌、防爆结构等领域,可实现结构的轻巧美观和高使用寿命,被证实是节能、节材、低碳的“21 世纪工程材料”.

国内关于 UHPC 起步相对较早. 1999 年,覃维

收稿日期: 2016-10-10

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51609172); 上海浦江人才计划(16PJ1409900)

第一作者: 王俊颜(1982—),男,特聘研究员,博士生导师,工学博士,主要研究方向为超高性能水泥基材料与结构研究.

E-mail: 14529@tongji.edu.cn.

祖教授最早介绍了UHPC<sup>[6]</sup>。随后清华大学、北京交通大学、东南大学等等先后开展了UHPC材料与性能的研究及工程应用<sup>[7]</sup>。东南大学孙伟院士曾研究不同养护制度下超高性能混凝土力学性能的发展规律,认为相同配合比,常温养护获得的强度低<sup>[8]</sup>,所以目前国内研究的UHPC材料主要还是采用高温蒸养(温度大于70°的恒温、相对湿度大于95%的恒湿条件环境中养护72 h)<sup>[9]</sup>来实现其超高性能,这使得大部分UHPC工程应用局限在了预制构件领域。湖南大学邵旭东教授把现浇RPC材料用于钢桥面形成轻型桥面组合结构,大幅提高了钢桥面的疲劳寿命<sup>[10]</sup>,但其采用的蒸汽高温养护将是一道关键的工序,需要专门的蒸汽养护设备。

同济大学与上海罗洋新材料科技有限公司合作研发了常温养护UHPC产品,商品名为TENACAL<sup>®</sup>,在常温常压条件下实现了200 MPa以上的抗压强度(40 mm×40 mm×160 mm试件),并兼备700 mm以上的坍落扩展度,具备在薄层空腔的压力灌注性能。2015—2016年已将TENACAL<sup>®</sup>应用于上海数座桥梁的加固工程,包括G1501同济路高架EN匝道钢桥面加固(采用钢-UHPC轻型组合桥面结构技术)、外环线北翟路立交桥火灾后加固(采用5 cm厚UHPC层外包加固技术)、G15高速龚家河桥铰缝维修等,沪嘉高速(S5)蕴藻浜桥及新槎浦桥的加固工程(5 cm厚UHPC层外包加固技术,UHPC总用量超过1 000 m<sup>3</sup>)。在厚度仅为3~8 cm的条件下,常温养护UHPC加固层实现了桥梁自重增加和承载力提升之间的完美平衡,自身的高致密性可以大幅提升原结构耐久性,并且仅需支模灌注,适用于各种复杂外形结构,因此常温养护UHPC薄层加固法在桥梁加固工程领域具有广阔的应用前景。

2015年,我国颁布了GB/T 31387—2015《活性粉末混凝土》国家标准<sup>[9]</sup>,其中RPC的弯曲性能仅有抗折强度这一项指标进行表征。由于UHPC在初裂后有明显的“挠度硬化”行为(或称为类金属变形性能)这一特点,当UHPC材料达到极限抗折强度时,其对应的最大裂缝宽度相对于初裂时已明显增大,有可能无法满足某些结构的正常使用极限状态的设计要求;另一方面,不同等级的UHPC材料在达到极限抗折强度时的最大裂缝宽度也不尽相同,故仅抗折强度这一项指标并不能对UHPC的弯曲性能进行完整的表征。本文借鉴美国ASTM

C1018<sup>[11]</sup>和C1609标准<sup>[12]</sup>,日本的JSCE SF4标准<sup>[13]</sup>中对材料弯曲性能的评价指标,选择适用于常温养护UHPC弯曲性能指标的评价方法,以进一步拓展UHPC材料的施工方式和应用领域。

## 1 试验概况

### 1.1 试验材料

UHPC配合比见表1,其中水泥为52.5普通硅酸盐水泥,硅灰采用埃肯公司生产的微硅粉,比表面积为22 000 m<sup>2</sup>·kg<sup>-1</sup>,SiO<sub>2</sub>质量分数为94.48%,填料为400目磨细石英粉,密度为2.65 g·cm<sup>-3</sup>,细骨料为0.2~0.6 mm石英砂,外加剂为聚羧酸盐类高效减水剂,拌和水为饮用自来水,使用的纤维为钢纤维(有关性能参数见表2),所采用的纤维体积掺量为2.0%,2.5%,3.0%和3.5%。

表1 试验配合比

Tab.1 Mix proportions of UHPC matrix

组分	胶凝材料		水胶比	填料	细骨料	减水剂
	水泥	硅灰				
比例	1	0.25	0.2	0.3	1.1	0.019~0.022

表2 钢纤维性能指标

Tab.2 Properties of steel fiber

纤维类型	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	长度/mm	直径/ $\mu$ m	长径比	密度/kg·m <sup>-3</sup>
钢	2 500	200	13	200	65	7.85

### 1.2 试件成型和养护

首先将胶凝材料和细骨料投入搅拌机中,干拌3 min,而后加水搅拌3 min,加入减水剂再搅拌4 min,等基体搅拌均匀后加入钢纤维继续搅拌3 min,用手触摸搅拌好的UHPC材料,未发现纤维结团现象,此时按照GB2419—2005《水泥胶砂流动度测定方法》<sup>[14]</sup>测得当纤维体积掺量为2.0%,2.5%,3.0%和3.5%时,UHPC的流动度分别为27.9,26.8,24.8和22.4 cm,证明具有良好的流动性。所有试件浇注完成经抹面后加盖塑料膜,以防止水分的快速散失,试验所用模具全部为钢模。24 h后拆模,放入养护室中的水池中进行常温养护,温度恒定为20℃,28 d龄期时取出,进行试验。

### 1.3 试验前的准备和试验加载程序

采用100 mm×100 mm×400 mm的棱柱体试件用于4点弯曲试验,每组4个试件。当试件养护至28 d时,使用砂轮配合游标卡尺对试件浇筑面进行打磨抛光,提高平整度,试件不同位置上的厚度偏差

控制在 $\pm 0.02$  mm 以内。

4 点弯曲加载试验在电伺服压力机上进行, 跨度设置为 300 mm, 采用等位移加载控制(装置如图 1 所示)。在载荷小于 0.5 kN 时, 设置预加载阶段, 速度为  $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , 当载荷到达 0.5 kN 时, 进入正常试验加载阶段, 速度为  $0.3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。试验使用布置在试件跨中两侧对称位置的两个 LVDT 测量跨中点的挠度值, 荷载值的变化可用试验机自带的荷载传感器测量并记录, 在试验中观察 UHPC 试件在弯曲荷载作用下的裂缝开展情况。

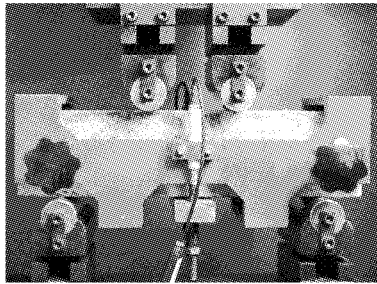
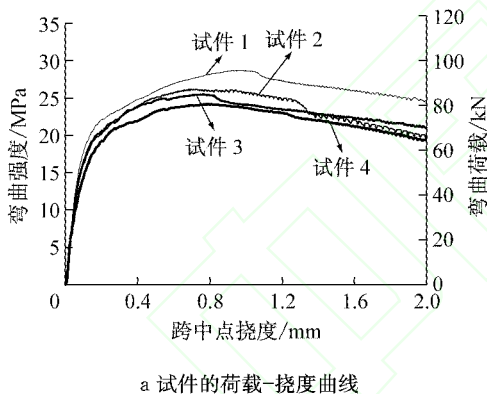


图 1 4 点弯曲试验加载图

Fig.1 Setup of four-point bending test



a 试件的荷载-挠度曲线

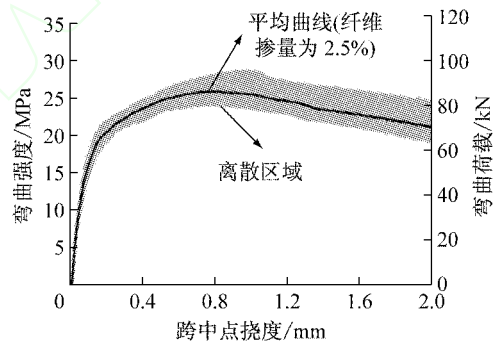
## 2 试验结果与分析

在弯曲性能试验的同时, 根据《活性粉末混凝土》国家标准<sup>[9]</sup>进行了 4 种纤维掺量下 UHPC 的 100 mm 立方体试件的 28d 龄期抗压强度试验, 试验测得当纤维体积掺量为 2.0%, 2.5%, 3.0% 和 3.5% 时, UHPC 的 28 d 抗压强度分别为 140.2, 149.1, 160 和 173.5 MPa。

### 2.1 四点弯曲试验结果

#### 2.1.1 曲线离散性及处理方法

为了确保本试验弯曲应力-跨中位移曲线的可靠性, 通过 Origin9.0 软件的 AMC 功能对每组试件的 4 根曲线进行处理, 如图 2 所示(以纤维体积掺量 2.5% 为例)。图 2a 是当纤维体积掺量为 2.5% 时, 该配比 4 个试件的荷载挠度曲线; 图 2b 是使用 Origin9.0 软件对图 2a 平均和离散性处理, 图中的阴影部分代表曲线的离散性。后续分析仅采用平均曲线。



b 平均曲线及其离散性

图 2 曲线的离散性证明由 Origin 9.0 软件处理获得

Fig.2 Demonstration of four curves concatenated by software Origin 9.0

#### 2.1.2 荷载-挠度曲线

将测得的每组 4 个试件的试验数据经平均处理后, 绘制出不同掺量钢纤维 UHPC 的荷载-挠度关系曲线如图 3。从图 3 可以看出, 不同掺量钢纤维 UHPC 曲线走势基本相同, 可以分为 3 个阶段: 第 1 阶段称为弹性阶段, 对应于曲线上初裂点之前。此阶段钢纤维与基体共同承担荷载, 荷载-挠度关系曲线表现为线性; 第 2 阶段是裂缝开展阶段, 对应于曲线上初裂点与峰值点之间。随着荷载的增大, 弯曲变形达到 UHPC 初裂应变, 材料基体出现裂缝, 跨越裂缝的纤维开始起到桥联作用, 通过与基体接触的界面传递应力, 在应力传递作用范围外逐渐产生多条

微裂缝, 在荷载-挠度关系曲线上表现为明显的挠度硬化阶段, 这也是 UHPC 高韧性的主要原因; 第 3 阶段称为裂后阶段, 对应于曲线上峰值点之后。随变形增加, 裂缝密度饱和后, 试件某裂缝面上纤维桥联作用形成的基体-纤维粘结面拉应力传递条件不再满足, 试件上的某一条裂缝(可以是第一条、最后一条或者是两者之间的任一条裂缝)开始局部化扩展, 并形成主裂缝, 曲线开始缓慢下降。

不同纤维掺量的影响表现在, 从 2% 增加到 3% 时, UHPC 的弯曲性能有显著的提高。然而从 3% 增加到 3.5%, UHPC 的弯曲性能大幅下降, 原因在于 3.5% 的钢纤维不能有效分散, 导致弯曲性能下降。

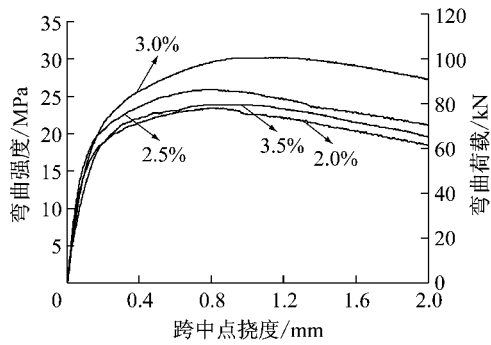


图 3 不同掺量钢纤维 UHPC 的荷载-挠度关系曲线  
Fig.3 Load-deflection curves of UHPC of the four mixtures

2.2 弯曲性能评价方法

2.2.1 ASTM C1018 法

美国材料与试验协会利用理想弹塑性材料的韧性评价方法作为参考,制定了混凝土弯曲韧性的测试和评价方法:ASTM C1018,如图 4 和式(1)所示<sup>[11]</sup>.该方法是利用初裂点对应挠度  $\delta$  的 3.0、5.5 和 10.5 倍时,荷载-挠度曲线下的面积  $T_3$ 、 $T_{5.5}$  和  $T_{10.5}$  与初裂点所对应的荷载-挠度曲线下的面积  $T_1$  的比值:  $I_5$ 、 $I_{10}$  和  $I_{20}$  作为韧性指数,来衡量混凝土的弯曲性能.

$$I_5 = \frac{T_3}{T_1}; I_{10} = \frac{T_{5.5}}{T_1}; I_{20} = \frac{T_{10.5}}{T_1} \quad (1)$$

式中:  $T_1$ 、 $T_3$ 、 $T_{5.5}$  和  $T_{10.5}$  分别为图 4 中区域 OAB、OACD、OAEF 和 OAGH 的面积( $\text{kN} \cdot \text{mm}$ );  $I_5$ 、 $I_{10}$  和  $I_{20}$  为荷载-挠度曲线不同阶段的韧性指数.

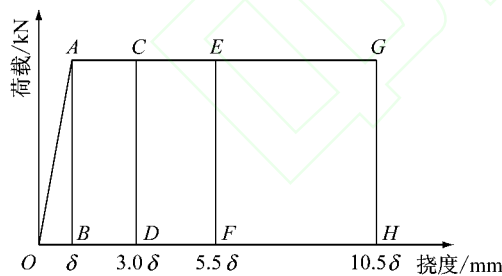


图 4 ASTM C1018 弯曲性能评价方法示意图  
Fig.4 Definition of flexural toughness indexes

初裂点的高低是反映钢纤维对混凝土受力后阻裂能力的重要标志,按照我国 CECS13:89 钢纤维混凝土实验方法<sup>[15]</sup>中的规定确定初裂点 A,即:将直尺与实测的弯曲荷载-挠度关系曲线的线性部分重叠放置来确定.由图 3 可见,UHPC 在初裂后并无明显的初裂点,因此利用 Origin 软件对弯曲荷载-挠度关系曲线的直线段作切线,找出曲线与切线发生偏离的点为初裂点,图 5 为以纤维掺量 2.5% 的 UHPC 试件为例确定初裂点.根据该方法得出的各试件组的韧性指标结果见表 3.

根据韧度指数的定义,理想弹塑性材料的荷载-挠度关系曲线的韧度指数分别为  $I_5=5$ 、 $I_{10}=10$  和  $I_{20}=20$ .表 3 的计算数据表明:UHPC 材料按照式(1)计算得到的  $I_5$ 、 $I_{10}$  和  $I_{20}$  均十分接近于理想弹塑性材料的相应值,但这些数据并不能直接反应出 UHPC 达到不同挠度时抗弯性能(例如残余抗弯强度),特别是从 3.5% 和 2.5% 两组数据的对比可以看出,虽然 2.5% 的整条曲线均高于 3.5%,然而根据 ASTM C1018 计算的韧性指数却正好相反.这个原因在于 ASTM C1018 方法得出的结果是弯曲性能的相对值,不是绝对值,并不适用于结构承载力的计算.

另一方面 ASTM C1018 要求确定初裂点对应的荷载和跨中挠度值,然而由于 UHPC 的荷载-挠度关系曲线的上升段不是严格的线性,这两个参数通

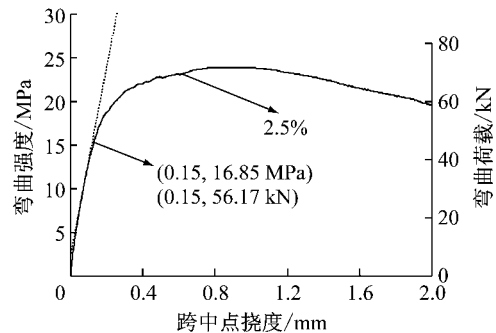


图 5 UHPC 初裂点的确定(以纤维掺量 2.5% 为例)  
Fig.5 Determination of first crack points of UHPC

表 3 ASTM C1018 法计算的韧性指标计算结果

Tab.3 Flexural parameters (according to ASTM C1018)

试件组	$\delta_{ffc}$			$\delta_{3ffc}$			$\delta_{5.5ffc}$			$\delta_{10.5ffc}$		
	$\delta_{ffc}/\text{mm}$	$T_{ffc}/\text{J}$	$P_{ffc}/\text{kN}$	$I_5$	$T_{3ffc}/\text{J}$	$P_{3ffc}/\text{kN}$	$I_{10}$	$T_{5.5ffc}/\text{J}$	$P_{5.5ffc}/\text{kN}$	$I_{20}$	$T_{10.5ffc}/\text{J}$	$P_{10.5ffc}/\text{kN}$
2.0%	0.150	6.07	55.83	4.22	25.63	72.80	8.93	54.23	78.03	18.01	109.37	68.27
2.5%	0.151	6.10	56.17	4.63	28.23	80.50	9.83	59.93	86.27	19.88	121.27	76.27
3.0%	0.163	6.40	65.13	5.12	32.77	89.43	11.26	72.07	100.13	23.96	153.33	95.23
3.5%	0.160	5.43	57.47	5.10	27.70	75.93	10.84	58.87	79.60	22.10	120.01	70.50

注:ffc 代表初裂点

常很难准确测量,说明现行的 ASTM C1018 韧性评价方法的初裂点选取对于 UHPC 并不适用,而初裂点的位置又决定了面积  $T_1$  和后续的韧性指数  $I_5$  等的计算结果,这影响了该种方法的准确性。

### 2.2.2 JSCE SF4 方法

JSCE-SF4 方法是日本土木工程协会制定的混凝土弯曲性能评价方法<sup>[13]</sup>。该方法规定试件挠度变形至  $\delta$ (规定为跨距的 1/150 倍)时,由荷载-挠度关系曲线下的面积、试件尺寸等参数通过式(2)计算出的平均强度值定义为弯曲韧性因子  $\sigma$ ,其值的大小可以衡量混凝土的弯曲性能。

$$\sigma = TL/(bh^2\delta) \quad (2)$$

式中: $T$  是挠度为  $L/150$  时对应荷载挠度-曲线下的面积(J); $\delta$  为给定的计算挠度  $L/150$ (mm); $b$  为试件宽(mm); $h$  为试件高(mm)。

表 4 为采用该方法计算所得到的各试件组的韧性指标及弯曲韧性因子。从表 4 可以看出,UHPC 的弯曲韧性因子  $\sigma_{150}$  在纤维掺量不大于 3% 时随着纤维掺量的增加而不断增大,变化趋势与表 3 基本一致。此外弯曲韧性因子  $\sigma_{150}$  具有强度的量纲,因此可用于结构承载力设计。与 ASTM C1018 方法相比,该方法的优点是计算过程简单,避开了初裂点对计算结果的影响,结果更为稳定。

表 4 JSCE SF4 法计算的韧性指标计算结果

试件组	2.0%	2.5%	3.0%	3.5%
$T_{150}^{100}/J$	137.03	152.40	179.13	141.77
$\sigma_{150}/MPa$	20.55	22.86	26.87	21.27

然而,该方法也有不足之处:① 跨中计算挠度取  $L/150$  没有充分理论依据,多数工程应用中,正常使用状态的容许挠度均小于  $L/150$ ,无法满足实际

工程需要;② 用平均的方法求强度不能较好地反映试件在不同挠度处的抗弯性能,例如两个荷载-挠度关系曲线有很大差异的试件,可能求得弯曲韧性因子相同。

### 2.2.3 ASTM C1609 法

考虑到 ASTM C1018 和 JSCE SF4 方法的不足,美国材料与试验协会在 2005 年提出了 ASTM C1609 弯曲性能评价方法<sup>[12]</sup>。该评价方法既克服了 ASTM C1018 方法初裂点准确确定的困难,也改善了 JSCE SF4 方法弯曲性能指标单一的问题(在标准的基础上补充计算了跨中计算挠度为  $L/600$  和峰值强度时的参数)。与 JSCE SF4 方法相近,ASTM C1609 也是计算弯曲强度等性能的绝对值。

表 5 为采用该方法计算所得的本次试验各试件组的参数。从表 5 可以看出,峰值荷载  $P_P$ 、峰值强度  $f_P$ 、挠度是  $L/600$  时的强度  $f_{600}^{100}$ 、挠度是  $L/150$  时的强度  $f_{150}^{100}$  在纤维掺量不大于 3% 时均随着纤维掺量的增加而不断增大,结果与表 3、表 4 一致。

不同于 ASTM C1018 和 JSCE SF4,ASTM C1609 提供了 3 个挠度处对应的残余弯曲强度,分别为  $L/600$  时的残余强度  $f_{600}^{100}$ 、 $L/150$  时的残余强度  $f_{150}^{100}$  以及峰值强度  $f_P$ 。这三种不同挠度处的弯曲性能具有不同的特定意义: $L/600$  时的残余强度  $f_{600}^{100}$  代表了 UHPC 材料在小弯曲变形状态下的弯曲强度,某些情况下 UHPC 甚至还未达到峰值强度,此时的裂缝宽度一般也较小; $L/150$  时的残余强度  $f_{150}^{100}$  代表了 UHPC 材料在大弯曲变形状态下的弯曲强度,此时的裂缝宽度一般较大,很可能已超过正常使用极限状态(即峰值对应的挠度小于 2 mm);峰值强度  $f_P$  代表了 UHPC 材料的极限抗弯强度,其对应的峰值挠度  $\delta_P$  代表了 UHPC 的峰值变形能力。

表 5 ASTM C1609 法计算的韧性指标计算结果

试件组	$P_1/kN$	$P_P/kN$	$\delta_1/mm$	$\delta_P/mm$	$f_1/MPa$	$f_P/MPa$	$P_{600}^{100}/kN$	$f_{600}^{100}/MPa$	$P_{150}^{100}/kN$	$f_{150}^{100}/MPa$	$T_{150}^{100}/J$
2.0%	—	78.34	—	0.80	—	23.50	74.18	22.26	61.60	18.48	137.03
2.5%	—	86.42	—	0.85	—	25.93	82.28	24.68	70.40	21.12	152.40
3.0%	—	100.76	—	1.05	—	30.23	89.77	26.93	91.17	27.35	179.13
3.5%	—	79.79	—	0.91	—	23.94	76.03	23.54	65.40	19.62	141.77

表中: $P_1$  为初裂荷载; $P_P$  为峰值荷载; $\delta_1$  为初裂挠度; $\delta_P$  为峰值挠度; $f_1$  为初裂强度; $f_P$  为峰值强度; $P_{600}^{100}$  为挠度是  $L/600$  时的荷载; $f_{600}^{100}$  为挠度是  $L/600$  时的强度; $P_{150}^{100}$  为挠度是  $L/150$  时的荷载; $f_{150}^{100}$  为挠度是  $L/150$  时的强度。

为了更好地描述 UHPC 在不同弯曲变形时的性能,本文在图 6 和图 7 中分别绘制了  $f_{600}^{100}$  和  $f_{150}^{100}$  随

纤维掺量变化的曲线图和峰值挠度随纤维掺量变化的曲线图。每个空心点代表 1 个试件的实验结果,每种纤维掺量下重复实验 4 个试件,实心点表示同种钢纤维掺量下所有试件结果的平均值,阴影区域表示所有试件结果的范围。分析结果如下:UHPC 弯曲性能具有一定的离散性,例如图 6a 中,2% 钢纤维掺量的 UHPC 的  $f_{600}^{100}$  的标准偏差达到了 2.62 MPa,原

因是受纤维分散情况的影响;不同挠度处对应的弯曲强度给予了结构设计更为准确的指标,例如不同纤维掺量在不同挠度时的残余弯曲强度;图 7 中给出的峰值挠度值代表了 UHPC 挠度强化的范围,可作为 UHPC 弯曲延性的指标;3% 钢纤维掺量时,

UHPC 不仅在不同挠度处均具有较高的残余抗弯强度,并且具有最大的峰值挠度平均值 1.05 mm,说明其全面的抗弯性能均为最佳。

综上所述,ASTM C1609 法能够较全面的描述 UHPC 的弯曲性能,满足结构设计地多种需求。

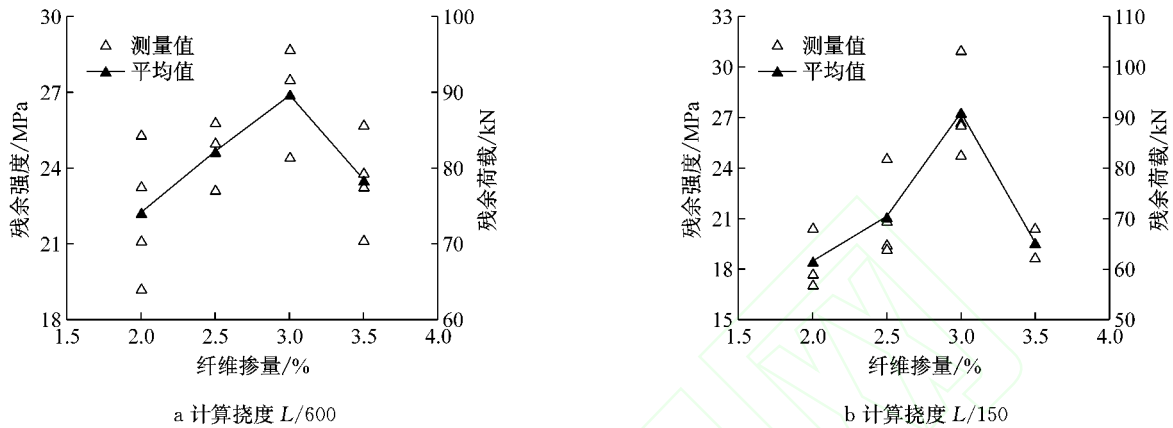


图 6  $f_{600}^{100}$  和  $f_{150}^{100}$  随纤维掺量变化的曲线

Fig. 6  $f_{600}^{100}$  and  $f_{150}^{100}$  with the fiber content curves

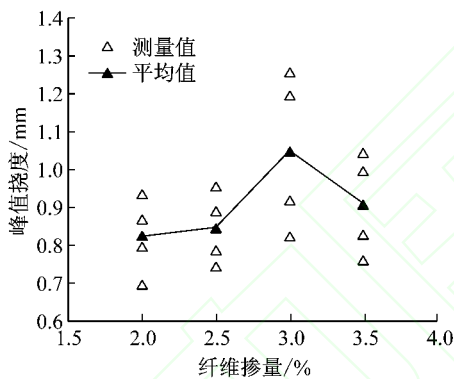


图 7 弯曲变形时峰值挠度随纤维掺量变化的曲线

Fig. 7 Net deflection at peak load with fiber content curves

### 3 结论

通过上述分析得到以下主要结论:

(1) 研究中的常温养护 UHPC 在开裂后有明显的挠度硬化行为,表现为优异的抗弯性能。

(2) ASTM C1018 评价方法用于评价 UHPC 弯曲性能有明显的不足之处. 初裂点判定的准确与否对韧性指数的计算结果会产生较大影响. 由于 UHPC 的荷载-挠度关系曲线的上升段不是严格的线性,导致现行的 ASTM C1018 评价方法的初裂点选取对于 UHPC 并不适用,影响了该方法的准确性。

(3) JSCE SF4 评价方法虽然较 ASTM C1018

标准计算更简单、且不受初裂点位置影响,可以直观地反映材料弯曲性能. 但是,该方法在跨中计算挠度只取  $L/150$  过于单一,不能真实反映特定挠度下的 UHPC 弯曲性能水平. 因此,该方法也不是 UHPC 弯曲性能表征的理想选择。

(4) ASTM C1609 评价方法弥补了 ASTM C1018 和 JSCE SF4 方法的缺点,分别提供了在  $L/600$  时的残余强度  $f_{600}^{100}$  和  $L/150$  时的残余强度  $f_{150}^{100}$  以及峰值强度  $f_p$  3 个参数,不同挠度处的弯曲性能表征方法有利于满足 UHPC 在结构设计的多种需求。

### 参考文献:

[1] 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]. 建筑材料装饰世界, 2013(10): 56.  
ZHAO Jun, LIAN Huizhen, JIN Jianchang. The new model of steel and concrete composite—one of ultra-high performance concrete (UHPC/UHPFRC): the current situation, problems, countermeasures and development of the patterns of steel and concrete composite [J]. China Concrete, 2013(10): 56.

[2] CHARRON J P. Transport properties of water and glycol in an ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) under high tensile deformation [J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38: 689.

[3] PIMIENTA P. Durability of UHPFRC specimens kept in various aggressive environments[C/CD]//Proceedings of the tenth International Conference on Durability of Building

- Materials and Components. Lyon: [s. n.], 2005.
- [4] RICHARD P, CHEYREZY M. Composition of reactive powder concretes [J]. *Cement and Concrete Research*, 1995, 25(7): 1501.
- [5] de LARRARD F, SEDRAN T. Optimization of ultra-high performance concrete by the use of a packing model [J]. *Cement and Concrete Research*, 1994, 24(6): 997.
- [6] 覃维祖, 曹峰. 一种超高性能混凝土—活性粉末混凝土[J]. *工业建筑*, 1999, 29(4): 16.  
QIN Weizu, CAO Feng. A new ultra-high performance concrete—reactive powder concrete [J]. *Industrial Construction*, 1999, 29(4): 16.
- [7] 阎培渝. 超高性能混凝土(UHPC)的发展与现状[J]. *建筑装饰材料世界*, 2010(9): 36.  
YAN Peiyu. Development and current situation of ultra-high performance concrete (UHPC) [J]. *China Concrete*, 2010(9): 36.
- [8] 刘斯凤, 孙伟, 张云升, 等. 新型超高性能混凝土的力学性能研究及工程应用[J]. *工业建筑*, 2002, 6(1): 1.  
LIU Sifeng, SUN Wei, ZHANG Yunsheng, *et al.* Mechanical properties and engineering application of new ultra-high performance concrete [J]. *Industrial Building*, 2002, 6(1): 1.
- [9] 全国混凝土标准化技术委员会.《活性粉末混凝土》国家标准: GB/T 31387-2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.  
The National Standardization Technical Committee of Concrete. Reactive powder concrete national standard: GB/T 31387-2015 [S]. Beijing: China Standard Press, 2015.
- [10] 邵旭东, 王文前, 辜杰凯, 等. 装配式纤维混凝土组合桥面体系试验[J]. *公路交通科技*, 2013, 30(6): 60.  
SHAO Xudong, WANG Wenqian, GU Jiekai, *et al.* Experiment on assembled composite bridge deck system composed of fiber concrete [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2013, 30(6): 60.
- [11] American Society of Testing & Materials. Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber reinforced concrete (using beam with third-point loading): C1018-97 [S]. [S. l.]: American Society of Testing & Materials, 1997.
- [12] American Society of Testing and Materials. Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading): C1609/C1609M-07 [S]. [S. l.]: American Society of Testing and Materials, 2007.
- [13] Japan Society of Civil Engineering. Method of test for flexural strength and flexural toughness of fiber reinforced concrete: Standard SF4 [S]. [S. l.]: Japan Society of Civil Engineering, 1984.
- [14] 中国建筑材料工业协会. 水泥胶砂流动度测定方法: GB/T2419-2005 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.  
China Building Materials Industry Association. The test method of the cement paste fluidity: GB/T2419-2005 [S]. Beijing: China Standard Press, 2005.
- [15] 中国工程建设标准化协会. 纤维混凝土试验方法标准 CECS13-2009 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.  
China Engineering Construction Standardization Association. Fiber concrete test method standard: CECS13-2009 [S]. Beijing: China Planning Press, 2010.