

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220331001

# 配置 630 MPa 高强钢筋 UHPC 梁裂缝宽度试验研究\*

戎 贤<sup>1</sup>, 杨 松<sup>1</sup>, 李艳艳<sup>1</sup>, 王凤亮<sup>2</sup>, 谭 冰<sup>2</sup>

(1. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401; 2. 中建八局第二建设有限公司, 山东 济南 250022)

**摘要:** 为研究配置 630 MPa 高强钢筋 UHPC 梁正常使用阶段裂缝宽度的计算方法, 对 6 根配置 630 MPa 高强钢筋 UHPC 梁进行受弯性能试验, 分析试验梁裂缝宽度、挠度及钢筋应力变化规律, 建立高强钢筋 UHPC 梁裂缝宽度计算公式。研究表明: (1) 受拉钢筋屈服前, 裂缝宽度的扩展呈线性规律, 裂缝数量不断增加; 当裂缝宽度为 0.34 mm 时, 受拉钢筋屈服, 裂缝数量和间距趋于稳定, 表现出较好的延性; (2) 破坏时受拉钢筋均已屈服, 混凝土达到极限压应变, 高强钢筋与 UHPC 的配合使用可充分发挥两者优良的力学性能; (3) 随着 UHPC 梁的配筋率增大, 试件承载力显著提高, 正常使用阶段最大裂缝宽度减小, 但延性降低, 开裂荷载基本不变; (4) 基于 40 组试验数据, 对 JGJ/T465—2019 规范的裂缝宽度计算公式中钢纤维对钢筋纤维混凝土构件裂缝宽度影响系数进行修正, 建立适用于 UHPC 梁的裂缝宽度计算公式, 修正公式计算值与试验值吻合良好。

**关键词:** 高强钢筋; 超高性能混凝土; 受弯性能; 裂缝宽度

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)05-1084-08

## Experimental Study on Crack Width of UHPC Beam with 630 MPa High-strength Steel Bars

RONG Xian<sup>1</sup>, YANG Song<sup>1</sup>, LI Yanyan<sup>1</sup>, WANG Fengliang<sup>2</sup>, TAN Bing<sup>2</sup>

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;  
2. The Second Construction Limited Company of China Construction Eighth Engineering Division, Jinan 250022, China)

**Abstract:** In order to study the calculation method of crack width of 630 MPa high-strength reinforced UHPC (Ultra-High Performance Concrete) beams in normal use, six such beams were subjected to bending test. The variation laws of crack width, deflection and reinforcement stress of the test beams were analyzed. Meanwhile, a calculation formula for crack width in high-strength reinforced UHPC beams was established. The results showed that: (1) The expansion of crack width was linear before the yield of tensile reinforcement, however, when the maximum crack width was 0.34 mm, the tensile reinforcement yielded, in addition, the number and spacing of cracks tended to be stable, the UHPC beams showed good ductility. (2) Upon damage, the tensile reinforcement had already yielded, and the concrete had reached its ultimate compressive strain. So, the combination of high-strength reinforcement and UHPC can give full play to their excellent mechanical properties. (3) With the in-

\* 收稿日期:2022-03-31;修回日期:2022-05-17

基金项目:河北省自然科学基金项目(E2019202064)、河北省重点研发计划项目(22374501D)、河北省建设科技研究项目(2022—2130)资助

作者简介:戎贤(1965—),男,教授,博导,博士。主要从事结构抗震及结构工程研究。E-mail:xrong@hebut.edu.cn

通讯作者:李艳艳(1979—),女,教授,硕导,博士。主要从事结构工程研究。E-mail:nicole\_820@163.com

crease of the reinforcement ratio of the UHPC beam, the bearing capacity of the specimen increased significantly. The maximum crack width decreased in the normal use stage, but the ductility decreased as well, while the crack load was basically unchanged. (4) Based on 40 sets of test data, the influence coefficient of steel fiber on the crack width of reinforced steel fiber reinforced concrete members in the crack width calculation formula of (JGJ/T465—2019) specification was modified, and the calculation formula of crack width suitable for UHPC beams was established. The calculated values of the formula agreed well with the test values.

**Keywords:** high-strength steel bar; ultra high performance concrete; flexural behavior; crack width

## 0 引言

超高性能混凝土(简称UHPC)因其十分优异的力学性能和耐久性,近些年来引起建筑领域的广泛关注。UHPC不但具有高强度,高耐久性,高延性等优点,而且可以大幅度提高结构的承载力和抗裂性,减轻结构自重,在建设结构方面有很大的应用前景<sup>[1-2]</sup>。630 MPa 高强钢筋强度高,若是用高强钢筋替代现在工程中的普通钢筋,在相同的受力要求下,可以降低用钢,实现节能减排,但是与普通混凝土相结合,由于存在裂缝宽度限值要求,导致难以发挥其高强的优势。UHPC具有较好的抗裂性,将两者配合使用,可以发挥各自优势,形成性能优越的高性能结构。

由于裂缝是影响梁耐久性能的一个重要因素,且在结构设计中,裂缝宽度的验算十分重要,因此,为研究UHPC梁裂缝宽度的计算方法,国内外学者展开了一些研究。F. Zheng等<sup>[3]</sup>对9根具有不同配筋率和纤维体积分数的UHPC梁进行受弯性能试验,建立了预测UHPC梁平均裂缝间距的高精度方程。I. H. Yang等<sup>[4]</sup>通过UHPC梁受弯性能试验,发现UHPC具有较好的裂缝控制能力,且具有较好的延性。郑文忠等<sup>[5]</sup>对6根配置HRB400的RPC梁进行抗弯性能试验,考虑截面受拉区拉应力贡献,建立了裂缝宽度计算方法。徐海滨等<sup>[6]</sup>通过8根超高性能混凝土T形简支梁(其中6根梁中非预应力纵筋为HRB500级钢筋)的受弯性能试验,给出适合UHPC梁裂缝宽度的计算公式。邓宗才等<sup>[7]</sup>通过6根配置HRB500级钢筋UHPC梁正截面弯曲性能试验,研究UHPC梁裂缝宽度计算方法。邱明红等<sup>[8]</sup>通过6根配置HRB400级钢筋UHPC梁受弯性能试验,给出了UHPC梁裂缝宽度建议计算公式。

I. Kwahk等<sup>[9]</sup>通过CFRP预应力梁和UHPC简支梁的受弯性能试验,建立了UHPC梁裂缝宽度计算公式。

目前国内外学者对UHPC梁裂缝宽度的研究主要集中于HRB400级钢筋,对于配置630 MPa 高强钢筋的UHPC梁裂缝宽度的试验研究尚属空白,需进一步研究。因此,本文以钢筋直径和配筋率为主要参数,通过6根配置630 MPa 高强钢筋的超高性能混凝土梁受弯性能试验,研究其裂缝的发展规律,并建立适用于高强钢筋UHPC梁的裂缝宽度计算公式,为UHPC的应用提供理论支撑。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

试验共设计6根UHPC简支梁,纵向受拉钢筋均采用630 MPa 高强钢筋,钢筋参数见表1。UHPC梁尺寸 $b \times h \times L$ 为150 mm $\times$ 250 mm $\times$ 2100 mm,计算跨径为1800 mm,两边支座留有150 mm,保护层厚度为20 mm,配筋率为1.05%~2.40%。试件设有600 mm纯弯段,在纯弯段内不配置箍筋。

表1 试件参数

Table 1 Details of specimens

试件编号	纵筋	架立筋	箍筋	配筋率/%
L1	3E12			1.05
L2	4E12			1.40
L3	2E18	2C10	C8@100	1.59
L4	3E16			1.88
L5	2E20			1.98
L6	2E22			2.40

注:E符号代表630 MPa 高强钢筋,C符号代表HRB400级钢筋

## 1.2 加载方案及量测内容

试验梁两端简支,采用三分点集中加载的方式,设备采用50 T电液伺服压力试验机。量测的内容有:跨中挠度、受拉钢筋应变、跨中混凝土应变、裂缝间距以及裂缝宽度。试验采用DH3816静态数据采集仪采集电阻应变片和位移计数据,采用裂缝观测仪量测试验梁纯弯段裂缝宽度。

## 1.3 材料力学性能

制备UHPC所使用的材料及配合比见表2。根据国内外学者的研究<sup>[10-12]</sup>,钢纤维掺量2%时,既能提高试件的强度和韧性,同时又具有优异的和易性,故本次试验钢纤维掺量为2%。

表2 UHPC配合比

Table 2 Mixture proportion of UHPC

单位:kg/m<sup>3</sup>

P.O42.5 水泥	硅灰	石英砂	石英粉	减水剂	水
1.00	0.45	0.60	0.60	0.06	0.29

目前国内并没有UHPC设计规范,故依据参考文献[13],测其立方体抗压强度为115.2 MPa,轴心抗拉强度为6.7 MPa,630 MPa高强钢筋材料性能见表3。

表3 钢筋基本力学性能

Table 3 Basic mechanical properties of HTRB630

直径/mm	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	最大力 总延伸率/%
12	684.2	870.0	10.0
16	686.5	878.3	10.2
18	660.5	870.0	11.0
20	669.7	870.0	11.5
22	667.3	863.0	11.8

## 2 试验现象分析

### 2.1 破坏形态

试验梁的破坏有着显著裂缝与挠度变化发展的过程,破坏有明显的前兆。试验加载前期,挠度与裂缝的宽度发展稳定,呈线性规律。当加载至受拉钢筋屈服时,主裂缝明显变宽且向受压区延伸,

挠度增加迅速,受压区高度降低,受压区出现较多水平裂缝,伴随着受拉区钢纤维不断拔出或拉断的声音,承载力迅速下降,最终受压区UHPC压碎,UHPC梁发生适筋破坏。由于钢纤维掺入,试验梁表现出较好的整体性和延性,部分试验UHPC梁纯弯段最终破坏形态以及裂缝分布情况如图1所示。

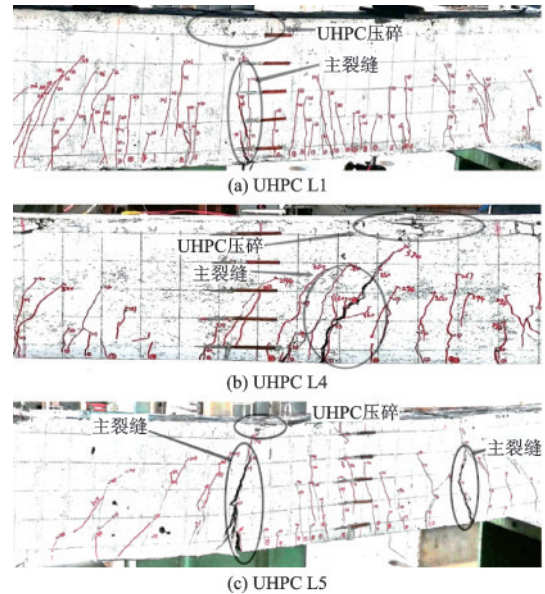


图1 梁纯弯段破坏形态

Fig.1 Failure modes of pure bending section of beams

### 2.2 裂缝分析

图2给出了L1~L6试验梁荷载与表面最大裂缝宽度曲线图。

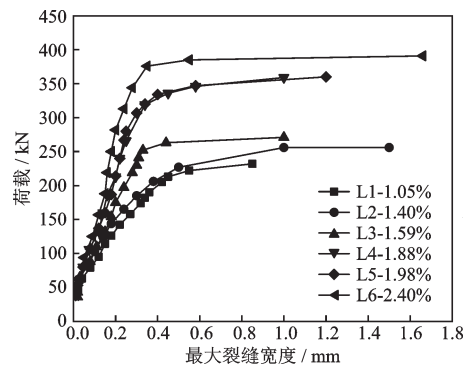


图2 UHPC梁表面最大裂缝宽度曲线

Fig.2 Load-maximum surface crack width curves of reinforced UHPC beams

由图2可知,提高梁的配筋率,能减小最大裂缝宽度。当荷载加至开裂荷载时,裂缝首先会出现在纯弯段,宽度约为0.01 mm。之后进入裂缝发展阶

段,裂缝的数量不断增多,裂缝宽度的扩展呈线性规律,但大部分裂缝宽度较小,肉眼难以观测,可见UHPC梁有良好的抗裂性。当荷载加至屈服荷载时,受拉钢筋屈服,纯弯段内裂缝趋于稳定,最大裂缝宽度为0.34 mm左右,裂缝数量较多,分布较密,在试验梁的跨中或者加载点处会形成1~2条较宽的主裂缝。当荷载加至试验梁的极限荷载时,试验梁进入破坏阶段,此时荷载保持不变,主裂缝迅速扩展的同时不断向受压区延伸。

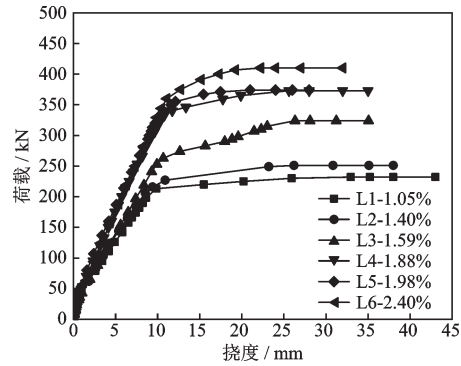


图3 荷载-跨中挠度曲线

Fig.3 Relation curves of load-deflection at mid-spans

### 3 试验结果分析

#### 3.1 荷载-跨中挠度曲线

基于试验数据分析,将L1~L6试验梁荷载-跨中挠度曲线绘于图3。

从图3可以看出UHPC试验梁的变形可分为四个阶段:弹性阶段、裂缝发展阶段、屈服强化阶段、持荷破坏阶段。各个阶段对应的分界点分别是开裂荷载、屈服荷载和极限荷载。第一个阶段是荷载达到开裂荷载之前,荷载与变形较小,试验梁的变形与荷载呈线性规律。第二个阶段为试验梁开裂之后,此时由于钢纤维的桥联作用,裂缝处的UHPC并不会立刻退出工作,而是与受拉钢筋一起承受拉力,故第一个拐点并不是很明显。第三阶段为纵向受拉钢筋屈服之后,由于超高性能混凝土高强度

的特性,此时受压区并未完全压碎,加上钢筋的强化作用,荷载还能有所增加,但由于钢筋已经屈服,试验梁变形的速度远大于荷载增加的速度。当加载至极限荷载并保持不变时为第四个阶段,此时试验梁挠度迅速增大,承载力急剧下降,梁宣告破坏。

L1~L2试件特征荷载及相应跨中挠度见表4。由表4可知,UHPC试验梁的开裂荷载为40 kN左右,当配筋率由1.05%提高到2.40%时,屈服荷载提高106%,承载能力提高77%,延性下降58%,可见随着配筋率增大,UHPC试验梁的承载力增大,但延性降低,变形能力更差,同时配筋率对UHPC梁的开裂荷载影响甚微,因此合理配置钢筋数量,才能充分发挥构件的力学性能,增加其耐久性和安全性。

表4 梁的特征荷载及相应跨中挠度

Table 4 Characteristic loads and the corresponding mid-span displacements

梁编号	配筋率/%	开裂荷载及相应位移		屈服荷载及相应位移		极限荷载及相应位移		位移延性系数
		$P_{cr}/kN$	$\Delta_{cr}/mm$	$P_y/kN$	$\Delta_y/mm$	$P_u/kN$	$\Delta_u/mm$	
L1	1.05	40	0.80	182	7.82	232	32.95	4.21
L2	1.40	41	0.76	195	7.95	251	26.20	3.30
L3	1.59	36	0.74	219	9.31	324	26.33	2.83
L4	1.88	44	0.75	319	10.13	373	25.60	2.52
L5	1.98	38	0.64	320	9.70	374	20.99	2.16
L6	2.40	38	0.55	375	12.72	410	22.26	1.75

#### 3.2 平截面假定验证

为测UHPC应变,验证平截面假定,在试件表面粘贴混凝土应变片,测定结果如图4所示。可见UHPC试验梁的跨中截面混凝土应变近似呈线性规律,符合平截面假定。

#### 3.3 跨中纵向受拉钢筋应变

图5给出L1~L6试验梁荷载-跨中受拉钢筋应变变化规律曲线。试验所用的钢筋屈服强度平均值为674 MPa,屈服应变应为 $3.370 \times 10^{-6}$ 。由图5可知,受拉钢筋的应变在开裂荷载和屈服荷载处有

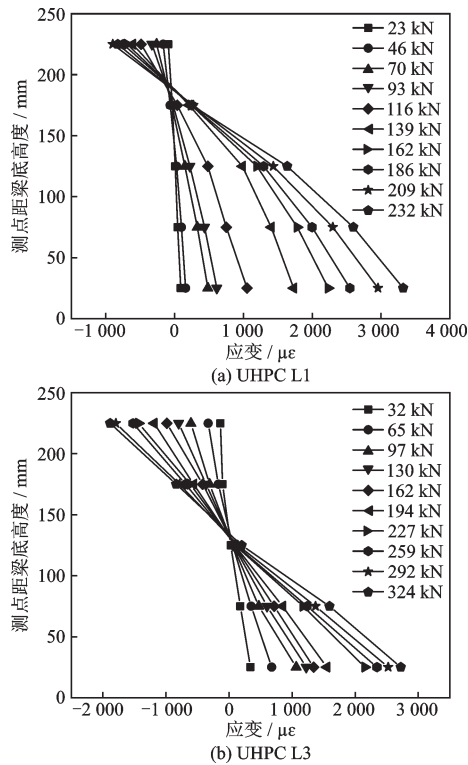


图4 试验梁跨中应变沿跨中截面高度的分布

Fig.4 Strain distributions along the height direction in the mid span of test beams

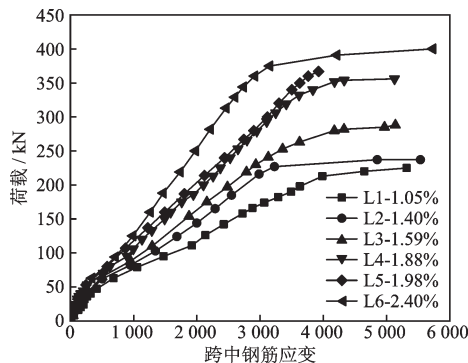


图5 跨中纵向受拉钢筋应变

Fig.5 Strain of longitudinal tensile reinforcement in mid span

明显的转折,且试验梁破坏前,钢筋应变均超过了  $3.370 \times 10^{-6}$ ,钢筋强度得到了充分发挥,与UHPC配合充分发挥了其优良的力学性能。

## 4 裂缝宽度计算

### 4.1 平均裂缝间距计算

《混凝土结构设计规范》<sup>[14]</sup>(以下简称(GB 50010—2010))中受弯构件平均裂缝间距计算公式:

$$l_{cr} = 1.9c_s + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \quad (1)$$

式中,各符号含义及计算方式参考(GB 50010—2010)规范。

将试验值与式(1)计算理论值列于表5中。由表5可知,式(1)计算值与试验值相差较大,约为50%。这是因为式(1)并未考虑钢纤维的作用,只适用于普通混凝土。UHPC材料中不含粗骨料,内部结构更为密实,与钢筋之间的黏结力更强<sup>[15]</sup>,且由于钢纤维的存在,实际上相当于增大了纵向钢筋的配筋率,根据黏结-滑移理论,配筋率越大裂缝间距越小,因此由(1)式计算的平均裂缝间距均大于试验值。

表5 平均裂缝间距

Table 5 Average spacing of cracks

试件 编号	有效裂缝 数量	平均裂缝间距 $l_{cr}$		$l_{cr}^c / l_{cr}^t$
		试验值 $l_{cr}^t$	式(1)计算值 $l_{cr}^c$	
L1	9	65	106	1.63
L2	12	54	93	1.72
L3	13	47	106	2.26
L4	14	41	93	2.27
L5	14	65	101	1.55
L6	16	45	97	2.15
平均值				1.93
变异系数				0.17

### 4.2 钢筋应力计算

(GB 50010—2010)规范中受弯构件的钢筋应力计算公式为:

$$\sigma_{ss} = \frac{M_s}{0.87A_s h_0} \quad (2)$$

式中,各符号含义参考(GB 50010—2010)规范。

由表6可知,将UHPC试验梁的钢筋应力试验值与式(2)计算理论值进行比较,发现式(2)的钢筋应力计算值与试验值相比明显偏大,因为当试验梁开裂后,裂缝处的UHPC并不会像普通混凝土一样立刻退出工作,而是和受拉钢筋一并承受拉力,而式(2)并未考虑裂缝处UHPC的拉应力,因此式(2)的计算值比试验值要偏大。

### 4.3 钢筋应变不均匀系数计算

(GB 50010—2010)规范中受弯构件的钢筋应变不均匀系数计算公式为:

表6 钢筋应力  
Table 6 Stress of reinforcement

试件编号	钢筋应力 $\sigma_s$		$\sigma_s^c / \sigma_s^t$
	试验值 $\sigma_s^t$	式(2)计算值 $\sigma_s^c$	
L1	340	457	1.34
L2	337	449	1.33
L3	318	430	1.35
L4	300	440	1.47
L5	298	428	1.44
L6	294	417	1.42
		平均值	1.39
		变异系数	0.04

$$\psi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{ik}}{\rho_{te} \sigma_s} \quad (3)$$

根据表7试验数据分析,式(3)的计算值要大于试验值。原因在于在构建破坏前,由于裂缝处钢筋的桥联作用,其可分担一部分不可忽略的拉应力,因此,裂缝处钢筋承受的拉应力会明显减小,故式(3)不可直接采用。

表7 钢筋应变不均匀系数

Table 7 Nonuniform coefficients of reinforcement strain

试件编号	钢筋应力 $\psi$		$\psi^c / \psi^t$
	试验值 $\psi^t$	式(3)计算值 $\psi^c$	
L1	0.42	0.7	1.67
L2	0.43	0.8	1.86
L3	0.32	0.8	2.50
L4	0.35	0.9	2.57
L5	0.30	0.9	3.00
L6	0.36	0.9	2.50
		平均值	2.35
		变异系数	0.21

#### 4.4 构件受力特征系数计算

根据文献[6]、[8]对受弯构件受力特征系数研究,认为其仍可按照(GB 50010—2010)规范中的公式计算。因此短期荷载作用下,受弯构件  $\alpha_{cr}=1.28$ 。综上所述,钢纤维对受拉区拉应力的贡献不可忽略,若直接采用(GB 50010—2010)规范中裂缝宽度计算公式,计算误差较大,在计算时考虑钢纤维的影响,才能较为准确的计算正常使用阶段UHPC梁最大裂缝宽度。

#### 4.5 裂缝宽度计算公式修正

根据文献[16]对纤维活性粉末混凝土抗弯拉强度影响因素研究,认为钢纤维掺量、纤维的应力、纤维间距、纤维长度、纤维分布方向和纤维均匀分布对裂缝处UHPC的残余应力都有影响,计算较为复杂,不便推广应用。为使修正公式的应用具有简便性和普及性,参考《钢纤维混凝土结构设计标准》<sup>[17]</sup>中裂缝宽度计算的公式,通过引入钢纤维对钢筋钢纤维混凝土构件裂缝宽度影响系数  $\beta_{cw}$  和钢纤维含量特征值  $\lambda_f$ ,来综合考虑钢纤维对受拉区拉应力的贡献,修正公式为:

$$\omega_{max} = 1.28 \psi \frac{\sigma_s}{E_s} l_{cr} (1 - \beta_{cw} \lambda_f) \quad (4)$$

式中,  $\lambda_f = \rho_f l_f / d_f$ , 其中  $\rho_f$ 、 $l_f$ 、 $d_f$  分别为钢纤维掺量、长度、直径。当荷载加至0.3倍极限荷载时裂缝基本出齐,按照荷载的准永久组合,本次试验取0.6倍的极限荷载作为正常使用极限荷载,因此取  $0.3 M_u \sim 0.6 M_u$  作为正常使用阶段。为使  $\beta_{cw}$  更具有适用性,根据本文及文献[18]共40组试验数据,将正常使用阶段各级裂缝宽度进行回归分析,分析结果见表6。试验数据的选择应满足以下几点要求:①试验数据应在正常使用极限范围内;②UHPC有钢纤维掺入;③裂缝宽度试验值要小于(GB 50010—2010)规范计算值。

由表8可知,回归分析所得  $\beta_{cw}$  介于0.10~0.25,平均值为0.185,标准差为0.04。取  $\beta_{cw}=0.185$  时,修正公式计算得到的正常使用阶段最大裂缝宽度的预测值与实际最大裂缝宽度对比可知,修正公式(4)的预测值与试验值吻合较好,预测值与试验值的比值平均数为1.01,变异系数为0.07,可见修正公式(4)的预测值与试验值偏差较小,离散性小,可以用来预测高强钢筋UHPC梁正常使用阶段最大裂缝宽度,为以后工程实用与理论分析提供参考。

## 5 结 论

(1)高强钢筋UHPC梁破坏前有一个明显裂缝和挠度变化的过程。受拉钢筋屈服前,裂缝宽度的发展呈线性规律,裂缝数量不断增多;受拉钢筋屈服时,最大裂缝宽度为0.34 mm;受拉钢筋屈服后,纯弯段会出现1~2条主裂缝,其余裂缝保持稳定,裂缝宽度基本不再变化,裂缝间距趋于稳定,裂缝

表8 裂缝宽度影响系数

Table 8 Influence coefficients of crack width

试件 编号	弯矩 $M_q/$ (kN·m)	最大裂缝 宽度试验值 $w_{max}^i/mm$	最大裂缝 宽度计算值 $w_{max}^c/mm$	$\beta_{cw}$	数据 来源	
L1	20.88	0.060	0.08	0.16	本文	
	27.84	0.120	0.16	0.19		
	34.80	0.180	0.24	0.20		
	41.76	0.230	0.32	0.23		
L2	22.59	0.045	0.06	0.23		
	30.12	0.090	0.12	0.21		
	37.65	0.140	0.18	0.17		
	45.18	0.180	0.24	0.19		
L3	29.16	0.090	0.12	0.19		
	38.88	0.150	0.19	0.19		
	48.60	0.190	0.27	0.24		
	58.32	0.240	0.35	0.25		
L4	33.57	0.085	0.11	0.20		
	44.76	0.135	0.18	0.19		
	55.95	0.180	0.24	0.21		
	67.14	0.215	0.31	0.24		
L5	33.66	0.090	0.12	0.20		
	44.88	0.135	0.19	0.23		
	55.95	0.180	0.26	0.24		
	67.14	0.230	0.33	0.24		
L6	36.90	0.080	0.11	0.23		
	49.20	0.130	0.17	0.20		
	61.50	0.190	0.23	0.15		
	73.80	0.230	0.29	0.17		
L2	16.42	0.056	0.07	0.13		文献 [18]
	19.10	0.085	0.12	0.23		
	21.68	0.115	0.17	0.25		
	24.22	0.157	0.21	0.22		
L3	25.16	0.067	0.08	0.10		
	29.25	0.086	0.10	0.13		
	33.15	0.104	0.13	0.15		
	37.05	0.123	0.15	0.16		
L4	25.16	0.062	0.07	0.13		
	29.25	0.082	0.10	0.14		
	33.15	0.098	0.12	0.17		
	37.05	0.115	0.15	0.17		
L5	36.77	0.098	0.11	0.12		
	42.75	0.118	0.14	0.13		
	48.45	0.139	0.17	0.13		
	54.15	0.160	0.19	0.13		

分布细且密,裂而无脱落,表现出较好的延性。

(2)630 MPa 高强钢筋与 UHPC 配合使用,可以充分发挥两者优良的力学性能。提高梁的配筋率,不但能提高承载力,还能减小正常使用阶段最大裂缝宽度,限制裂缝的发展,但延性显著降低,对开裂荷载影响不大,因此,要合理地配置纵向受拉钢筋,才能充分发挥 UHPC 梁的力学性能。

(3)采用(GB 50010—2010)规范中裂缝计算公式计算超高性能混凝土梁正常使用阶段最大裂缝宽度误差较大,本文参考(JGJ/T465—2019)规范,通过引入钢纤维对钢筋钢纤维混凝土构件裂缝宽度影响系数 $\beta_{cw}$ 和钢纤维含量特征值 $\lambda_f$ ,来综合考虑钢纤维对 UHPC 梁受弯性能的影响。通过试验数据回归分析,取 $\beta_{cw}$ 为0.185,修正公式计算值与试验值较吻合。

#### 参考文献:

- [1] 中国混凝土与水泥制品协会超高性能水泥基材料与工程技术(UHPC)分会.2020年中国超高性能混凝土(UHPC)技术与应用发展报告[J].混凝土世界,2021(4):20-29.  
China Concrete and Cement-based Products Association Ultra-High Performance cement-based Materials and Engineering Technology (UHPC) branch.China ultra high performance concrete (UHPC) technology and application development report 2020 [J]. Concrete World, 2021(4): 20-29. (in Chinese)
- [2] 邵旭东,曹君辉.面向未来的高性能桥梁结构研发与应用[J].建筑科学与工程学报,2017,34(5):41-58.  
Shao X D, Cao J H. Research and application of high performance bridge structures toward future[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(5): 41-58. (in Chinese)
- [3] Feng Z, Li C X, Yoo D Y, et al. Flexural and cracking behaviors of reinforced UHPC beams with various reinforcement ratios and fiber contents [J]. Engineering Structures, 2021,248: 1-15.
- [4] I H Y, Chang B J, Byung S K. Structural behavior of ultra high performance concrete beams subjected to bending [J]. Engineering Structures, 2011, 32(11): 3478-3487.
- [5] 郑文忠,李莉,卢珊珊.钢筋活性粉末混凝土简支梁正截面受力性能试验研究[J].建筑结构学报,2011,32(6):125-134.  
Zheng W Z, Li L, Lu S S. Experimental research on

- mechanical performance of normal section of reinforced reactive powder concrete beam [J]. *Journal of Building Structures*, 2011, 32(6): 124-134. (in Chinese)
- [6] 徐海滨, 邓宗才. UHPC 梁开裂弯矩和裂缝试验[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2014, 46(4): 87-92.  
Xu H B, Deng Z C. Cracking moment and crack width of ultra-high performance concrete beams[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2014, 46(4): 87-92. (in Chinese)
- [7] 邓宗才, 肖锐, 徐海滨, 等. 高强钢筋超高性能混凝土梁的使用性能研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2015, 36(10): 1335-1340.  
Deng Z C, Xiao R, Xu H B, et al. Serviceability research of ultra-high performance concrete beams reinforced with high strength steel bars[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2015, 36(10): 1335-1340. (in Chinese)
- [8] 邱明红, 邵旭东, 胡伟业, 等. 钢筋UHPC受弯构件裂缝宽度计算方法研究[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(10): 89-98, 119.  
Qiu M H, Shao X D, Hu W Y, et al. Calculation method for crack width of reinforced UHPC flexural components [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53(10): 89-98, 119. (in Chinese)
- [9] Kwahk I, Lee J, Kim J, et al. Evaluation of the crack width of the ultra high performance concrete (K-UHPC) structures [J]. *Journal of the Korean Society of Safety*, 2012, 27(6): 99-108.
- [10] Wu Z M, Shi C J, He W, et al. Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 103: 8-14.
- [11] 傅元方. UHPC 梁受弯性能研究[D]. 福州: 福州大学, 2016.
- Fu Y F. Research on flexural behaviors of UHPC beams [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2016. (in Chinese)
- [12] 马熙伦, 陈宝春, 黄卿维, 等. 钢纤维掺量对R-UHPC梁受弯性能影响的研究[J]. *宁夏大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(2): 130-136.  
Ma X L, Chen B C, Huang Q W, et al. Study of steel fiber content influence on flexural behavior of R-UHPC beam [J]. *Journal of Ningxia University (Natural Science Edition)*, 2019, 40(2): 130-136. (in Chinese)
- [13] 活性粉末混凝土: GB/T 31387—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [14] 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.
- [15] 梁芮, 黄远. 高强钢筋与超高性能混凝土黏结性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(9): 294-302.  
Liang R, Huang Y. Experimental study on the bond performance between high strength steel rebar and ultra-high performance concrete [J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(9): 294-302. (in Chinese)
- [16] 项周. 纤维活性粉末混凝土抗弯拉强度影响因素研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.  
Xiang Z. The research on some factors influencing the flexural strength of reactive powder concrete [D]. Changsha: Hunan University, 2011. (in Chinese)
- [17] 钢纤维混凝土结构设计标准: JGJ/T465—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [18] 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, 2010.  
Li L. Mechanical behavior and design method for reactive powder concrete beams [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)

(本文编辑: 赵霞)