

引用本文:朱 琦,叶力豪,蔡 玮,等. UHPC-T 梁抗弯性能试验研究与理论计算[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(1): 65-74.

ZHU Qi, YE Lihao, CAI Wei, et al. Experimental study and theoretical calculation on flexural performance of UHPC-T beams[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(1): 65-74.

DOI:10.19815/j.jace.2021.08086

# UHPC-T 梁抗弯性能试验研究与理论计算

朱 琦, 叶力豪, 蔡 玮, 谢 文

(宁波大学 土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211)

**摘要:**为研究配筋率和预应力对超高性能混凝土 T 梁(UHPC-T 梁)抗弯性能的影响,设计并制作了 4 根 UHPC-T 梁与 1 根普通混凝土 T 梁,采用三等分点抗弯试验研究了 T 梁加载破坏的全过程特征,并采用理论公式计算了 T 梁的开裂弯矩和极限弯矩等关键性能参数。结果表明:配筋率对 UHPC-T 梁开裂荷载的影响不大;相同配筋率下,预应力 UHPC-T 梁的极限承载力约为 UHPC-T 梁的 1.4 倍,UHPC-T 梁的极限承载力约为普通混凝土 T 梁的 2 倍,表明预应力和 UHPC 均可明显提升 T 梁的极限承载能力;与普通混凝土 T 梁相比,UHPC-T 梁裂缝细而密,加载初期最大裂缝宽度发展较慢,裂缝宽度及其数量明显减少;与 UHPC-T 梁相比,预应力 UHPC-T 梁能有效抑制裂缝的生成与发展,表明预应力和 UHPC 能改善 T 梁的抗裂性能;各试验梁跨中正截面混凝土应变与荷载基本呈正比例关系,表明平截面假定同样适用于预应力 UHPC-T 梁与 UHPC-T 梁;T 梁的理论开裂弯矩和极限弯矩均与相应的试验结果吻合较好,且两者之间的相对误差小于 20%,满足工程设计要求。

**关键词:**UHPC-T 梁;抗弯性能;开裂弯矩;极限弯矩;后张预应力

中图分类号:TU375.1

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2023)01-0065-10

## Experimental study and theoretical calculation on flexural performance of UHPC-T beams

ZHU Qi, YE Lihao, CAI Wei, XIE Wen

(School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University,  
Ningbo 315211, Zhejiang, China)

**Abstract:** In order to study the influence of reinforcement ratio and prestress on the flexural performance of ultra-high performance concrete T-beam (UHPC-T beam), four UHPC-T beams and one ordinary concrete T-beam were designed and manufactured. The whole process characteristics of T-beam loading failure were studied by three-point bending test, and the key performance parameters such as cracking moment and ultimate bending moment of T-beam were calculated by theoretical formula. The results show that the reinforcement ratio has little effect on the cracking load of UHPC-T beam. Under the same reinforcement ratio, the ultimate bearing capacity of prestressed UHPC-T beam is about 1.4 times that of UHPC-T beam, and the ultimate bearing capacity of UHPC-T beam is about 2 times that of ordinary concrete T beam, indicating

收稿日期:2021-08-21

基金项目:国家自然科学基金项目(52278189);宁波市自然科学基金项目(202003N4138)

作者简介:朱 琦(1994-),男,工学硕士研究生,E-mail:1451317027@qq.com。

通信作者:谢 文(1981-),男,工学博士,副教授,E-mail:xiewen@nbu.edu.cn。

that both prestress and UHPC can significantly improve the ultimate bearing capacity of T beam. Compared with the ordinary concrete T beam, the cracks of UHPC-T beam are fine and dense, the maximum crack width develops slowly at the initial stage of loading, and the crack width and its number are significantly reduced. Compared with UHPC-T beam, prestressed UHPC-T beam can effectively inhibit the generation and development of cracks, indicating that prestress and UHPC can improve the crack resistance of T beam. The strain of normal section concrete in the mid-span of each test beam is basically proportional to the load, indicating that the plane section assumption is also applicable to prestressed UHPC-T beams and UHPC-T beams. The theoretical cracking moment and ultimate bending moment of T beam are in good agreement with the corresponding test results, and the relative error between them is less than 20%, which meets the engineering design requirements.

**Key words:** UHPC-T beam; flexural performance; cracking moment; ultimate bending moment; post-tensioned prestress

## 0 引言

超高性能混凝土(Ultra-high Performance Concrete, UHPC)是一种具有超高抗压、抗拉强度和高韧性、高耐久性的新型水泥基复合材料,将其应用于桥梁结构中,可减轻结构自重,提高承载力和耐久性,具有广阔的应用前景<sup>[1-6]</sup>。尽管目前中国尚未制定 UHPC 桥梁设计规范,但不少学者已进行了较深入的研究。邓宗才等<sup>[7]</sup>研究表明:截面形式对 UHPC 梁的开裂荷载与延性影响甚大。傅元方<sup>[8]</sup>试验研究表明:UHPC 梁的屈服和极限荷载受纵向配筋率的影响较大。孙小凯等<sup>[9]</sup>通过四点弯曲试验研究发现:纵筋配筋率不影响 UHPC 梁的开裂弯矩,但对其极限承载力的影响显著。Yang 等<sup>[10]</sup>研究了配筋率和钢纤维体积掺量对梁受力性能的影响,结果表明:当钢纤维体积掺量不变时,纵向配筋率对 UHPC 梁的开裂性能无影响,对 UHPC 梁的极限承载力以及延性均有显著影响。Turker 等<sup>[11]</sup>研究发现:当钢纤维体积掺量一定时,配筋率越大, UHPC 梁的极限承载力越大,延性也更强,但超过一定配筋率时,对延性性能的改善作用减弱。梁兴文等<sup>[12]</sup>研究发现:纵向配筋率对 UHPC 梁的开裂荷载影响不大,但纵向配筋率可大幅提升 UHPC 梁的屈服荷载和极限荷载。彭飞等<sup>[13]</sup>考虑了钢纤维对 UHPC 受拉区的抗弯贡献,结果表明:钢纤维长度也是影响受拉区 UHPC 抗弯贡献的主要参数。曹霞等<sup>[14]</sup>开展了 6 根高强钢筋 UHPC 梁抗弯试验,研究了不同配筋率、纵筋等级、纵筋直径和受压钢筋直径对 UHPC 受力性能的影响规律。林明畅<sup>[15]</sup>设计制作了 6 组 18 根不同配筋率 UHPC 试

验梁,探索了 UHPC 梁的适筋、超筋和少筋的破坏形态以及裂缝发展状态,推导了 UHPC 梁的开裂弯矩、极限弯矩和抗弯刚度计算公式。徐海滨等<sup>[16]</sup>在现行规范公式的基础上引入抗裂影响系数和裂缝修正系数,给出了 UHPC 梁的开裂弯矩和最大裂缝宽度计算公式。刘超等<sup>[17]</sup>在平截面假定基础上推导了配筋高应变强化的 UHPC-T 梁抗弯承载力计算公式,并与国外提出的计算方法进行对比,结果表明,所提出方法的计算值与试验值吻合度较高。李立峰等<sup>[18]</sup>进行了大比例预应力 UHPC-T 梁抗弯试验,改进了开裂荷载和极限荷载计算方法。徐海滨等<sup>[19]</sup>试验研究了 6 根预应力 UHPC-T 梁的抗弯性能,引入纤维长度修正系数和抗裂影响系数,对截面抵抗矩塑性影响系数进行修正,得到了预应力 UHPC-T 梁的开裂弯矩计算公式。

综上所述,目前的研究主要以矩形截面为主探讨 UHPC 梁的力学性能,而以预应力为主要影响因素研究其对 T 形截面抗弯性能的影响相对较少。本文以桥梁工程中的 T 梁为研究对象,制作 4 根 UHPC-T 梁(包括 1 根预应力 UHPC-T 梁)和 1 根普通混凝土 T 梁(对照梁),研究配筋率和预应力对 UHPC-T 梁抗弯性能的影响;最后采用理论公式计算 UHPC-T 梁的开裂弯矩和极限弯矩等关键性能参数。

## 1 试验概况

### 1.1 模型制作及加载测点布置

由于受经费和试验场地等条件限制,足尺模型试验难以实现,因此采用缩尺模型开展相关研究工作。结合自身试验条件和研究目的,缩尺模型参照

并改造了文献[20]中的试验模型,即调整了模型截面翼缘和腹板尺寸,但试验模型梁的抗弯和抗剪等性能均满足设计规范要求。UHPC-T 梁的设计长度为 2 400 mm,为防止两端发生锚固破坏,加载时两边预留了 150 mm,计算跨度为 2 100 mm,如图 1(a)所示;T 形截面的腹板尺寸为 120 mm×150 mm,翼缘尺寸为 280 mm×100 mm,如图 1(b)所示。预应力 UHPC-T 梁的预应力采用后张法施加,在距梁底下缘 56 mm 处布置 1 根直径 15.2 mm 的预应力钢绞线,如图 1(c)所示;其中锚垫板采用 10 mm 厚钢板以防止锚固区局部压碎,张拉预应力为 110 kN。试验 T 梁的具体分组见表 1,试验主要考

虑配筋率和预应力等影响,其中普通混凝土 T 梁为对照梁。

UHPC-T 梁的制作采用常规的施工工艺,即先支模、绑扎钢筋、后浇筑 UHPC 和自然条件养护,现场作业如图 2 所示;试验采用的 UHPC 中水泥、硅粉、石英砂、水胶比的配合比为 1∶0.5∶1.5∶0.18,且添加了 2%的减水剂和体积掺量为 2%的钢纤维。

自然条件下养护 28 d 达到龄期后,采用三等分点进行抗弯加载试验(图 3),通过分配梁将荷载对称分配到梁的两个三分点处,中间为纯弯段。试验加载仪器为结构疲劳试验系统 PWS-250,试验开始前先预加载,如无异常,则卸载到 0 kN 再开始正

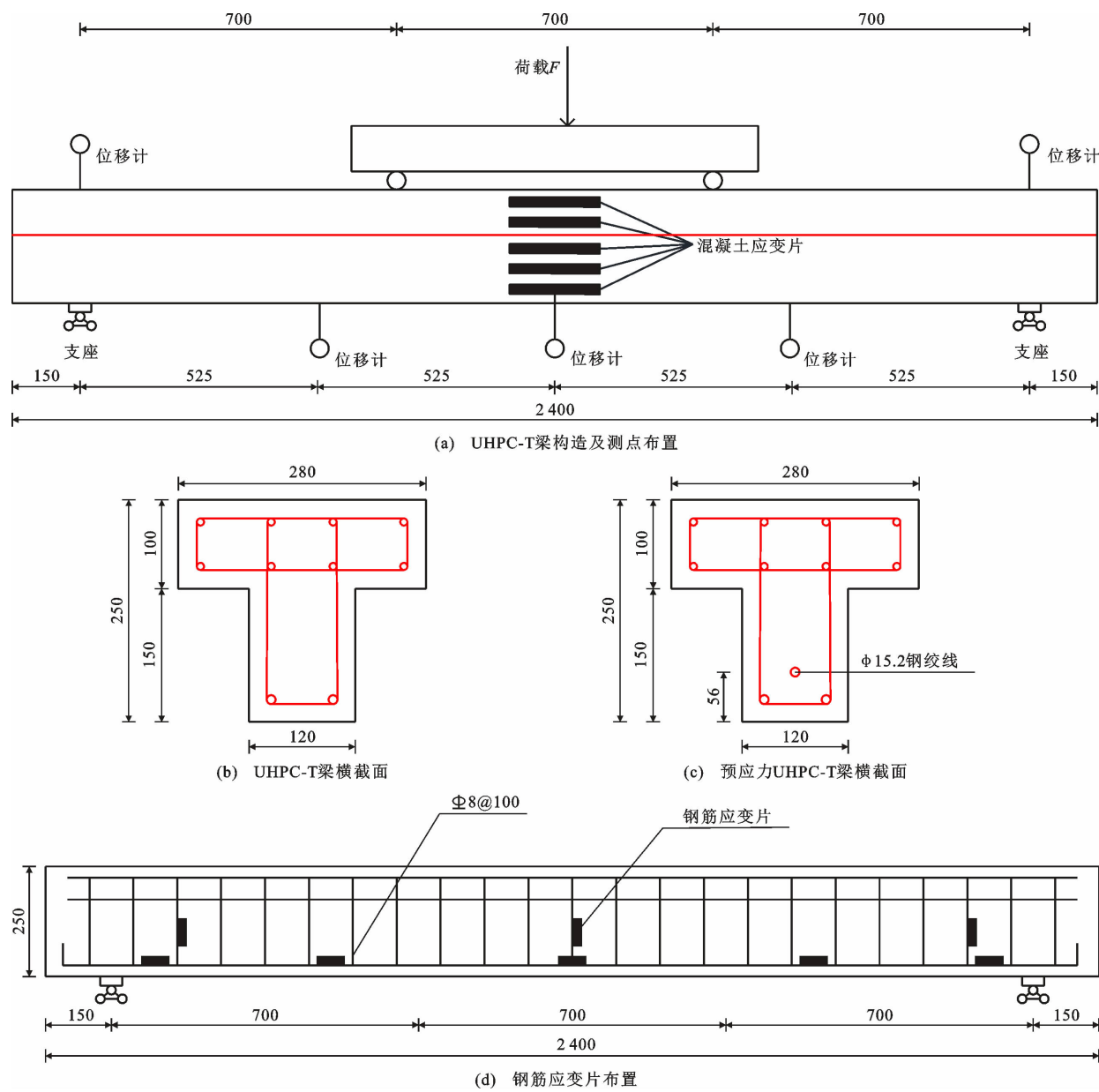


图 1 UHPC-T 梁(单位:mm)  
Fig. 1 UHPC-T beam (unit:mm)

表 1 T 梁试验分组

Table 1 T-beam test group

T 梁编号	模型梁	纵筋直径	配筋率/%	纤维体积掺量/%	架立钢筋	箍筋
SM1	UHPC-T 梁	2 $\phi$ 6	0.209	2	$\phi$ 8	$\phi$ 6
SM2	UHPC-T 梁	2 $\phi$ 8	0.372	2	$\phi$ 8	$\phi$ 6
SM3	UHPC-T 梁	4 $\phi$ 8	0.744	2	$\phi$ 8	$\phi$ 6
SM4	普通混凝土 T 梁	2 $\phi$ 8	0.372	2	$\phi$ 8	$\phi$ 6
SM5	预应力 UHPC-T 梁	2 $\phi$ 8	0.372	2	$\phi$ 8	$\phi$ 6

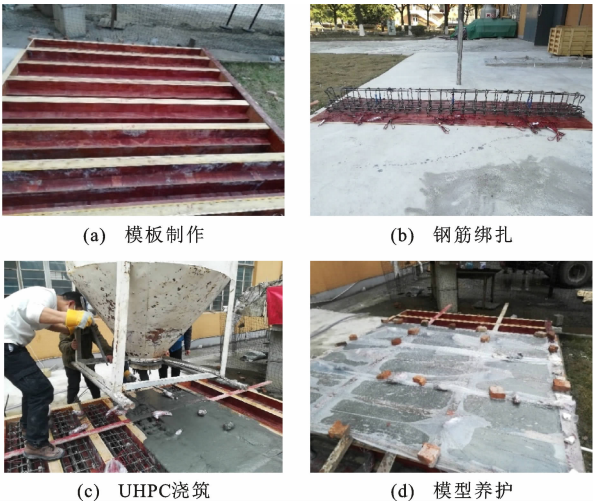


图 2 模型梁制作现场

Fig. 2 Model beam construction site

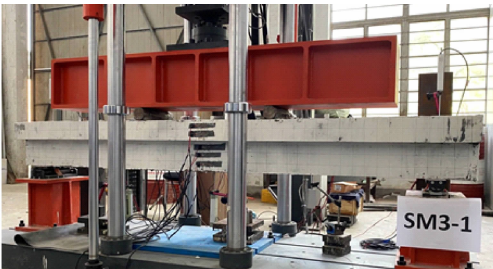


图 3 抗弯加载试验

Fig. 3 Bending loading test

式加载。试验加载采用分级加载,在达到使用状态试验荷载值  $F_s$  之前,每级加载值不超过  $0.10F_s$ ,接近开裂荷载时,每级加载值不超过  $0.05F_s$ 。开裂后每级加载控制为  $10\text{ kN}$ ,UHPC-T 梁到  $80\text{ kN}$  后改用位移  $1\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  控制加载直至梁破坏;普通混凝土梁到  $20\text{ kN}$  后改用位移  $1\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  加载直至梁破坏。

测试内容包括:竖向位移、混凝土应变、钢筋应变、裂缝等。①位移测试:沿梁安装 5 个竖向位移计(含两端支座处位移计),如图 1(a)所示。②应变测试:布置钢筋应变片用于测试箍筋和纵筋应变,如图 1(d)所示;在梁跨中沿梁高布置 5 个混凝土应变片

测试混凝土应变沿梁高的分布规律,如图 1(a)所示。③裂缝测试:利用裂缝观测仪测量每个荷载步下最大裂缝宽度,并利用记号笔标记裂缝发展情况。

1.2 材料力学性能

1.2.1 UHPC 力学性能

浇筑 UHPC 试验简支梁时,同时制作了 3 个边长为  $100\text{ mm}$  的立方体试件以测试其抗压强度,制备了 3 个  $100\text{ mm}\times100\text{ mm}\times300\text{ mm}$  长方体试件用于测试其弹性模量。浇筑了 3 个  $100\text{ mm}\times100\text{ mm}\times400\text{ mm}$  长方体试件以测试其抗弯折强度,加载装置见图 4(a);加工了 3 个  $180\text{ mm}\times25\text{ mm}\times25\text{ mm}$  狗骨形试件用于测试轴心抗拉强度,测试装置见图 4(b)。所有试件与 UHPC 试验简支梁的养护条件相同,测得的力学性能如表 2 所示。

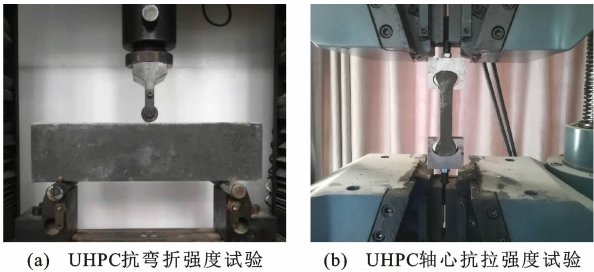


图 4 UHPC 和混凝土材料性能试验

Fig. 4 UHPC and concrete material performance tests

表 2 UHPC 与 C40 混凝土力学性能

Table 2 Mechanical properties of UHPC and C40 concrete

材料类型	材料参数	参数值
UHPC	立方体抗压强度/MPa	125.3
	抗折强度/MPa	14.9
	轴心抗拉强度/MPa	9.3
	弹性模量/MPa	$4.61\times10^4$
C40 混凝土	立方体抗压强度/MPa	32.7
	弹性模量/MPa	$3.26\times10^4$

1.2.2 钢筋力学性能

按照《金属材料 室温拉伸试验方法》<sup>[21]</sup> 规定进行钢筋拉伸试验。所得的钢筋物理力学性能指标如屈服强度、极限强度等见表 3。

表 3 钢筋力学性能			
Table 3 Mechanical properties of reinforced rebars			
钢筋规格	φ6	φ6	φ8
屈服强度/MPa	431.5	424.6	427.9
极限强度/MPa	466.5	468.7	530.9
弹性模量/MPa	$2.26\times10^5$	$2.32\times10^5$	$1.91\times10^5$

## 2 配筋率对 UHPC-T 梁抗弯性能的影响

### 2.1 裂缝分布与抗裂性能

各模型梁的裂缝分布如图 5 所示,其中裂缝中数字为裂缝发展位置对应的荷载,单位为 kN。由

图 5 可以看出,各试验梁裂缝分布有如下特点:①相比 SM4 梁,SM1、SM2、SM3 梁的裂缝出现较晚,且发展速度较慢;②SM1、SM2、SM3 梁翼缘上裂缝较少,主要集中在加载点附近,而 SM4 梁翼缘上有较多裂缝且穿过翼缘向上发展;③SM1、SM2、SM3 梁裂缝数量远小于 SM4 梁,表明钢纤维可阻碍裂缝发展,使裂缝分布更加均匀。从图 5 还可看出,SM1、SM2、SM3 梁的裂缝发展特征为:随着荷载的增加,裂缝宽度逐渐变大,裂缝不断向上扩展;当荷载持续增加时,梁的裂缝数量和宽度逐渐增大,并能听到受拉区混凝土内钢纤维被拔出的声音,但直到试验由于破坏而停止,其受压区混凝土未被压碎。

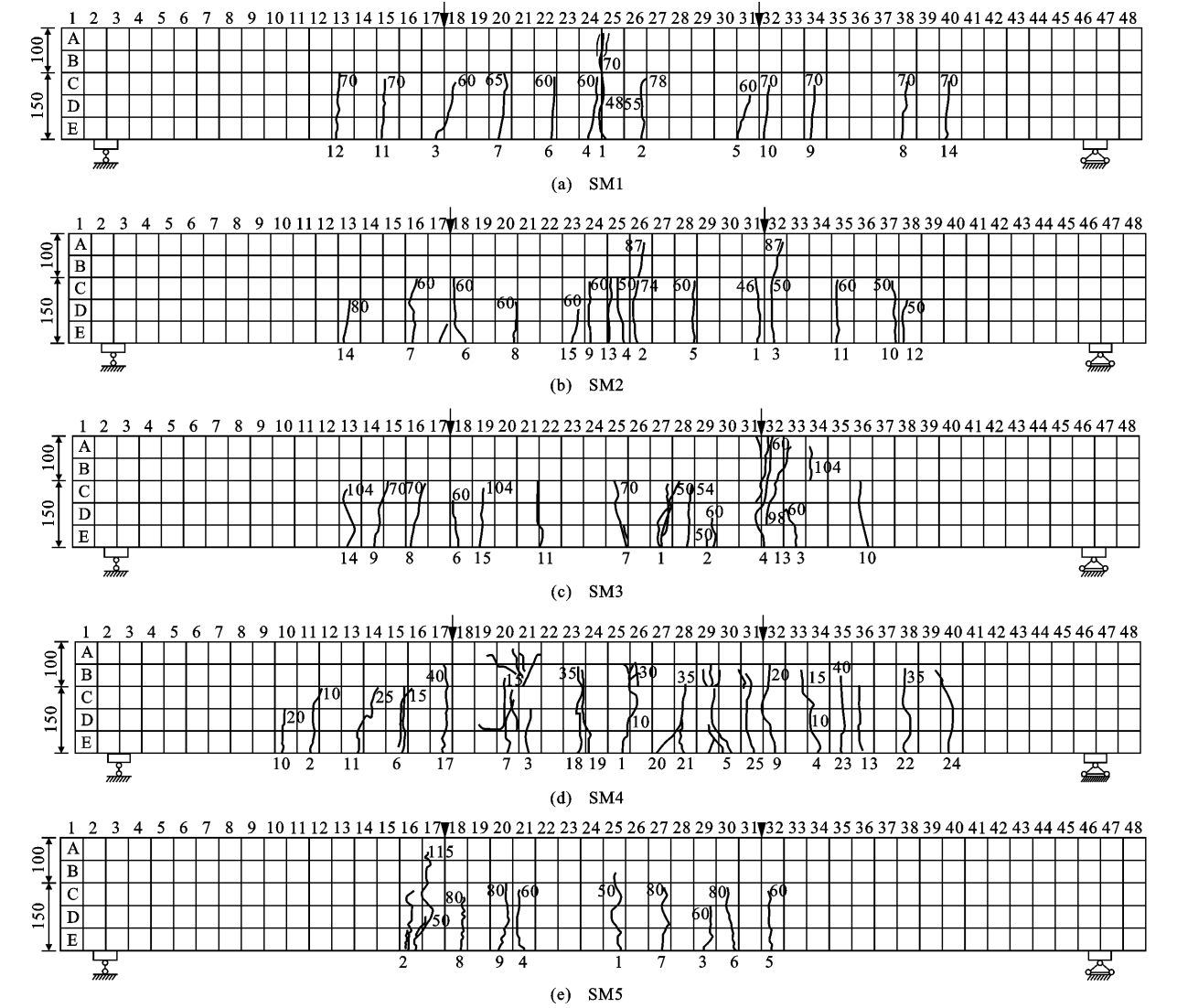


图 5 各模型梁裂缝分布(单位:mm)

Fig. 5 Crack distribution of model beams (unit:mm)

裂缝对结构的刚度和耐久性产生显著影响,图 6 给出了各模型梁的荷载与最大裂缝宽度关系。与 SM3 梁相比,SM1、SM2 梁由于其配筋率较低,初裂过后它对裂缝宽度的限制作用有限,导致开裂过后裂缝发展迅速,比如 SM1、SM2、SM3 梁的开裂荷载对应的最大裂缝宽度均为 0.01 mm,而加载至 80

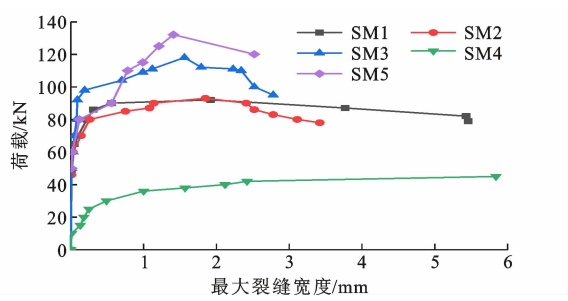


图 6 各模型梁最大裂缝宽度与荷载关系

Fig. 6 Relationship between maximum crack widths and loads of model beams

kN 时对应的最大裂缝宽度分别为 0.22、0.26、0.08 mm,表明提高配筋率可阻止 UHPC-T 梁裂缝的发展。当配筋率从 0.209% 提高至 0.744%, SM1 梁和 SM3 梁极限荷载对应的最大裂缝宽度从 1.92 mm 降至 1.56 mm,表明提高配筋率可以增大梁的抗裂性能和安全性能。SM2 梁和 SM4 梁最大裂缝宽度均为 0.01 mm 时,对应的开裂荷载分别为 46 kN 和 10 kN,当 SM4 梁加载至 20 kN 时,其最大裂缝宽度已扩大至 0.18 mm,表明 UHPC 可阻止 T 梁裂缝的发展和提升梁的抗裂性能和承载能力。

2.2 混凝土应变

图 7 为不同荷载下各模型梁混凝土应变沿梁高的分布规律。由图 7 可以看出:UHPC-T 梁或普通混凝土 T 梁在开裂前处于弹性阶段,中性轴位置基本保持不变,表明 T 形截面满足平截面假定;UHPC-T 梁或普通混凝土 T 梁开裂后,其中性轴位置出现逐渐上升。此外,部分测点出现突变,主要是由于该位置出现了裂缝所致。

2.3 荷载-跨中位移曲线

图 8 给出了各模型梁荷载-跨中位移曲线。与 SM4 梁类似, SM1、SM2、SM3 梁经历了弹性阶段、裂缝开展阶段和破坏阶段 3 个不同受力阶段。SM1、SM2、SM3 梁的开裂荷载分别为 48、46、50 kN,表明配筋率对 UHPC-T 梁的开裂弯矩影响不大,两者最大相差约 8.7%,这是因为 UHPC-T 梁的开裂弯矩取决于 UHPC 水泥基体的抗拉能力。当配筋率从 0.209% 增加至 0.744%,相应的极限荷载由 92 kN 提高至 118 kN,增大了 28.3%,表明配筋率的增加明显提高了 UHPC-T 梁的极限承载力。此外,比较 SM1 梁和 SM2 梁可知,两者的极限荷载非常接近,分别为 92 kN 和 93 kN,表明 UHPC-T 梁为少筋梁时,提高配筋率不会提高其极限承载力,

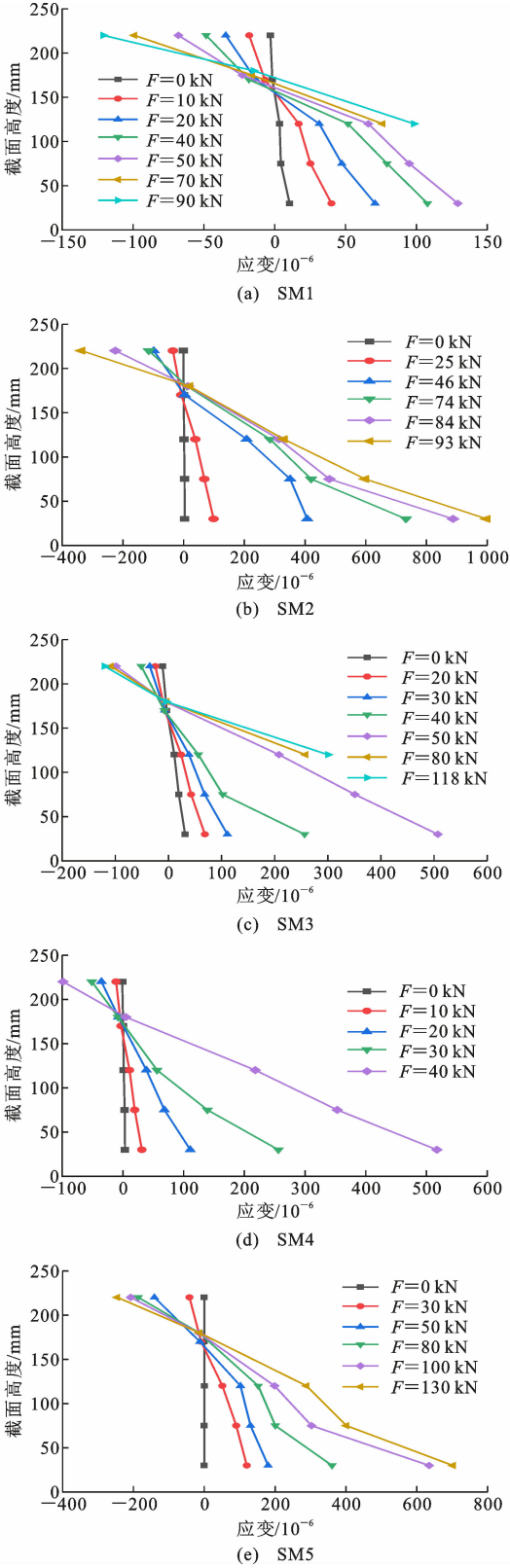


图 7 各模型梁跨中截面混凝土应变

Fig. 7 Concrete strains in mid-span section of model beams

主要是因为少筋梁的极限承载力由受压区混凝土控制。



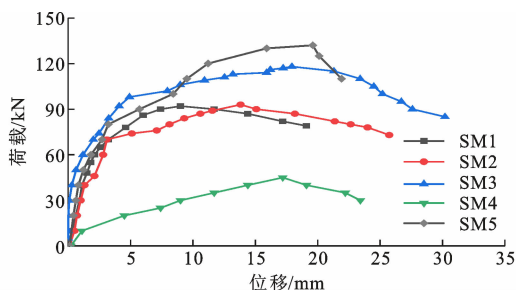


图 8 各模型梁荷载-跨中位移曲线

Fig. 8 Load-mid-span displacement curves of model beams

### 3 预应力对 UHPC-T 梁抗弯性能的影响

#### 3.1 裂缝分布与抗裂性能

从图 5 中 SM2、SM5 梁的裂缝分布可以看出, SM5 梁(预应力 UHPC-T 梁)与 SM2 梁(UHPC-T 梁)相比,裂缝分布有如下特点:①试验梁首先在跨中部位出现第一条裂缝,随着荷载继续增加到 80 kN,裂缝主要集中在加载点附近,非纯弯曲段裂缝相对较少;②随着荷载继续增加到 115 kN,除加载点外并未产生新的裂缝;③与 SM2 梁相比,SM5 梁裂缝数量和主裂缝宽度都明显减小,表明施加预应力可以有效减少裂缝宽度和数量。从图 5(b)、(e)可以看出,SM5 梁的裂缝发展特征为:随着荷载的增加,裂缝宽度逐渐变大,裂缝不断向上扩展,但是少有裂缝发展到翼缘部分;当荷载持续增加时,梁的裂缝数量和宽度逐渐增多,裂缝中不断有 UHPC 粉末掉下来,并伴随有钢纤维断裂的声音,但直到试验由于破坏而停止,其受压区混凝土未被压碎。

从图 6 给出的 SM2 梁和 SM5 梁的荷载与最大裂缝宽度关系可以看出,与 SM2 梁相比,SM5 梁由于施加了预应力,初裂过后其对裂缝宽度有限制作用,使得开裂过后裂缝发展缓慢,比如 SM2 和 SM5 梁的开裂荷载对应的最大裂缝宽度均为 0.01 mm,而加载至 80 kN 时对应的最大裂缝宽度分别为 0.26 mm 和 0.12 mm,表明施加预应力可以阻止 UHPC-T 梁裂缝的发展。此外,SM2 和 SM5 梁极限荷载对应的最大裂缝宽度从 1.85 mm 降至 1.41 mm,表明施加预应力可以增大梁的抗裂性能和安全性能。

#### 3.2 混凝土应变

从图 7(b)、(e)给出的不同荷载下 SM2 梁和 SM5 梁混凝土应变沿梁高的分布规律可以看出:

UHPC-T 梁和预应力 UHPC-T 梁在开裂前处于弹性阶段,其中性轴位置基本保持不变,表明 T 形截面满足平截面假定;UHPC-T 梁和预应力 UHPC-T 梁开裂后,其中性轴位置出现逐渐上升。此外,部分测点出现突变,主要是由于该位置出现了裂缝所致。

#### 3.3 荷载-跨中位移曲线

从图 8 中的 SM2、SM5 梁荷载-跨中位移曲线可以看出,SM5 梁与 SM2 梁类似,经历了弹性阶段、裂缝开展阶段和破坏阶段 3 个不同受力阶段。SM2、SM5 梁的开裂荷载分别为 46 kN 和 50 kN,两者相差约 8.7%,表明施加预应力对 UHPC-T 梁的开裂弯矩影响不大,这是因为 UHPC-T 梁的开裂弯矩取决于 UHPC 水泥基体的抗拉能力。由于 SM5 梁施加了预应力,相应的极限荷载由 93 kN 提高至 132 kN,增大了 42%,表明施加预应力可以明显提高 UHPC-T 梁的极限承载力。

### 4 理论计算

根据截面应力分析法,分别计算普通混凝土和 UHPC-T 梁的开裂弯矩  $M_{cr}$  和极限弯矩  $M_u$  [16-17]。

开裂弯矩:

$$M_{cr} = (\sigma_p + \gamma f_t) W_0 \quad (1)$$

$$\gamma = (1 + \beta_f \lambda_f) \frac{2S_0}{W_0} \quad (2)$$

$$\lambda_f = \rho_f l_f / d_f \quad (3)$$

式中:  $\gamma$  为截面塑性抵抗系数;  $\beta_f$  为抗裂影响系数;  $\lambda_f$  为钢纤维含量特征值;  $\rho_f$  为钢纤维体积率;  $l_f$  为钢纤维长度;  $d_f$  为直径;  $f_t$  为 UHPC 轴心抗拉强度;  $W_0$  为换算截面对截面受拉边缘的弹性抵抗矩;  $S_0$  为换算截面计算纤维以上或以下部分面积对截面重心轴的面积矩;  $\sigma_p$  为预应力在构件抗裂边缘产生的预压应力。

根据公式(1)~(3)得到各 T 梁的理论开裂弯矩,列于表 4 中。

极限弯矩:

(1)若 T 形截面特性符合公式(4),中性轴在翼缘内,考虑腹板受拉区 UHPC 的抗拉作用,按公式(5)进行正截面抗弯承载力  $M_u$  计算。

$$f_y A_s + \beta f_{td} b(h - h_f) + f_{py} A_p \leq \frac{1}{2} f_{ck} b h_f \quad (4)$$

$$M_u = \frac{1}{3} f_{cd} b x^2 + \frac{1}{2} \beta f_{td} b(h - x)^2 + f_y A_s (h_0 - x) + \frac{1}{2} \beta f_{td} (b_f - b)(h_f - x)^2 + f_{py} A_p (h_0 - a_p - x) \quad (5)$$

UHPC 受压区高度应按式(6)计算。

表 4 各模型梁开裂弯矩理论值与试验值对比

Table 4 Comparisons between computational and experimental values of cracking-resistance moment of model beams

T 梁编号	$M_{cr}/(\text{kN} \cdot \text{m})$	$M_{cr1}/(\text{kN} \cdot \text{m})$	$M_u/(\text{kN} \cdot \text{m})$	$M_{u1}/(\text{kN} \cdot \text{m})$	$M_{cr}/M_{cr1}$	$M_u/M_{u1}$
SM1	16.80	19.76	32.20	30.54	0.850	1.054
SM2	16.10	19.76	32.55	35.90	0.814	0.907
SM3	17.50	19.76	41.30	46.89	0.886	0.881
SM4	3.50	3.95	16.45	14.45	0.886	1.138
SM5	17.50	19.76	46.20	46.17	0.886	1.000

注： $M_{cr1}$ 为开裂弯矩理论值； $M_{u1}$ 为极限弯矩理论值。

$$\frac{1}{2}f_{cd}b_fx=f_yA_s+\beta f_{td}b(h-x)+\beta f_{td}(b_f-b) \cdot (h_f-x)+f_{py}A_p \tag{6}$$

(2)当不符合公式(4)时,中性轴在腹板内,应考虑截面中腹板的受压作用,其正截面抗弯承载力应按式(7)计算。

$$M_u=f_yA_s(h_0-x)+\frac{1}{2}\beta f_{td}b(h-x)^2+\frac{1}{3}f_{cd}b_fx^2-\frac{1}{3}(1-\frac{h_f}{x})f_{cd}(b_f-b) \cdot (x-h_f)^2+f_{py}A_p(h_0-a_p-x) \tag{7}$$

UHPC 受压区高度按式(8)计算。

$$\frac{1}{2}f_{cd}b_fx-\frac{1}{2}f_{cd}(1-\frac{h_f}{x})(b_f-b)(x-h_f)=f_yA_s+\beta f_{td}b(h-x)+f_{py}A_p \tag{8}$$

式中： $\beta$ 为受拉区 UHPC 等效矩形应力系数； $f_{cd}$ 为 UHPC 轴心抗压强度设计值； $f_{ck}$ 为 UHPC 轴心抗压强度标准值； $f_{td}$ 为 UHPC 轴心抗拉强度； $A_s$ 为受拉钢筋总面积； $f_y$ 为钢筋屈服强度； $f_{py}$ 为预应力筋抗拉强度设计值； $A_p$ 受拉区纵向预应力筋的截面面积； $a_p$ 为受拉区纵向预应力筋合力点至截面受拉区边缘的距离； $h_f$ 为翼缘高度； $h$ 为截面高度； $h_0$ 为截面有效高度； $b_f$ 为翼缘宽度； $b$ 为腹板宽度； $x$ 为受压区高度。

通过计算,试验梁受压区高度  $x$  在翼缘  $h_f$  内,适用于公式(4),根据公式(5)得到相应的计算结果(表 4)。由表 4 可知:UHPC-T 梁的开裂弯矩试验值与理论值的比值在 0.81~0.89 之间,相应的比值均小于 1,最大相对误差为 18.6%;其主要原因是本文计算公式采用的抗裂影响系数  $\beta_f$  主要与钢纤维掺量及种类有关,且与钢纤维掺量成正比,同时它是根据钢纤维质量分数为 3% 的试验数据回归得到<sup>[16]</sup>,导致公式(1)针对本文钢纤维质量分数为 2% 的试验模型的计算结果偏大。UHPC-T 梁(SM1~SM3)的极限弯矩试验值与理论值的比值从 1.054 降至 0.811,最大相对误差为 11.9%,其原因是本文

公式计算采用的受拉区 UHPC 等效矩形应力系数  $\beta$  取 0.90,它主要与配筋率有关,且随着配筋率增大而逐渐减小,导致采用公式(5)计算的理论极限弯矩随配筋率的增大而增大,即配筋率从 0.209% (SM1)增大至 0.744% (SM3),相应的试验值与理论值的比值从 1.054 降至 0.811。因此,SM2 和 SM3 的极限弯矩理论值大于相应的试验值。

5 结 语

(1)在相同配筋率下,预应力 UHPC-T 梁裂缝宽度和数量比 UHPC-T 梁少,表明施加预应力能提高构件的抗裂性,可抑制裂缝生成与发展。与 UHPC-T 梁相比,普通混凝土 T 梁裂缝数量相对较多且宽度更大,表明 UHPC-T 梁具有更优越的抗弯和抗裂性能。

(2)配筋率对 UHPC-T 梁开裂荷载的影响不大;相同配筋率下,预应力 UHPC-T 梁的极限承载力约为 UHPC-T 梁的 1.4 倍,UHPC-T 梁的极限承载力约为普通混凝土 T 梁的 2 倍,表明预应力和 UHPC 均可明显提升 T 梁的承载能力。

(3)各试验梁跨中正截面混凝土应变与荷载基本呈正比例关系,表明平截面假定同样适用于预应力 UHPC-T 梁与 UHPC-T 梁。

(4)UHPC-T 梁的理论开裂弯矩和极限弯矩与相应的试验结果吻合较好,试验值与相应理论值之间的相对误差不超过 20%,满足工程设计要求,表明该理论计算公式可用于预测或设计 UHPC-T 梁的关键性能参数。

参考文献:

References:

[1] 李传习,聂洁,潘仁胜,等.水胶比对超高性能混凝土施工与力学性能的影响[J].土木与环境工程学报(中英文),2020,42(4):164-174.  
LI Chuanxi, NIE Jie, PAN Rensheng, et al. Effect of water-to-binder ratio on construction and mechanical



- properties of ultra-high performance concrete[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(4):164-174.
- [2] 聂洁,李传习,钱国平,等. 钢纤维形状与掺量对 UHPC 施工及力学特性的影响[J]. 材料导报, 2021, 35(4):04042-04052.
- NIE Jie, LI Chuanxi, QIAN Guoping, et al. Effect of shape and content of steel fiber on workability and mechanical properties of ultra-high performance concrete[J]. Materials Reports, 2021, 35(4): 04042-04052.
- [3] 邵旭东,樊伟,黄政宇. 超高性能混凝土在结构中的应用[J]. 土木工程学报, 2021, 54(1):1-13.
- SHAO Xudong, FAN Wei, HUANG Zhengyu. Application of ultra-high-performance concrete in engineering structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(1):1-13.
- [4] 章烽锋. 超高性能混凝土(UHPC)在桥梁改建工程中的应用[J]. 广东公路交通, 2019, 45(5):31-34.
- ZHANG Fengfeng. Application of ultra high performance concrete (UHPC) in existing bridge reforming[J]. Guangdong Highway Communications, 2019, 45(5):31-34.
- [5] 叶庆阳,薛聪聪,余敏,等. 超高性能混凝土配合比设计与抗压强度试验研究[J]. 工业建筑, 2020, 50(3):124-130, 141.
- YE Qingyang, XUE Congcong, YU Min, et al. Mix proportion design and compressive strength test of ultra-high performance concrete[J]. Industrial Construction, 2020, 50(3):124-130, 141.
- [6] 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 Xudong, CAO Junhui. Research and application of high performance bridge structures toward future[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(5):41-58.
- [7] 邓宗才,王义超,肖锐,等. 高强钢筋 UHPC 梁抗弯性能试验研究与理论分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(1):68-78.
- DENG Zongcai, WANG Yichao, XIAO Rui, et al. Flexural test and theoretical analysis of UHPC beams with high strength rebars[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015, 23(1):68-78.
- [8] 傅元方. UHPC 梁受弯性能研究[D]. 福州:福州大学, 2016.
- FU Yuanfang. Research on flexural behaviors of UHPC beams[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2016.
- [9] 孙小凯,刁波,叶英华. 钢筋超高性能纤维混凝土梁抗弯性能研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(11):16-21.
- SUN Xiaokai, DIAO Bo, YE Yinghua. Flexural behavior experiments of ultra-high performance concrete beams reinforced with steel bar and hybrid-fiber[J]. Industrial Construction, 2012, 42(11):16-21.
- [10] YANG I H, JOH C, KIM B S. Structural behavior of ultra high performance concrete beams subjected to bending[J]. Engineering Structures, 2010, 32(11): 3478-3487.
- [11] TURKER K, HASGUL U, BIROL T, et al. Hybrid fiber use on flexural behavior of ultra high performance fiber reinforced concrete beams[J]. Composite Structures, 2019, 229:111400.
- [12] 梁兴文,汪萍,徐明雪,等. 配筋超高性能混凝土梁受弯性能及承载力研究[J]. 工程力学, 2019, 36(5): 110-119.
- LIANG Xingwen, WANG Ping, XU Ming-xue, et al. Investigation on flexural capacity of reinforced ultra high performance concrete beams[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(5):110-119.
- [13] 彭飞,方志. 钢筋 UHPC 梁正截面抗弯承载力计算方法[J]. 土木工程学报, 2021, 54(3):86-97.
- PENG Fei, FANG Zhi. Calculation approach for flexural capacity of reinforced UHPC beams[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(3):86-97.
- [14] 曹霞,常婧,王艳俊. 高强钢筋 RPC 梁受弯构件正截面承载力试验研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2015, 34(1):109-115, 123.
- CAO Xia, CHANG Jing, WANG Yanjun. Experimental study on flexural capacity of normal section of high strength reinforced reactive powder concrete beam[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2015, 34(1):109-115, 123.
- [15] 林明畅. UHPC 梁的抗弯性能研究[D]. 广州:华南理工大学, 2020.
- LIN Mingchang. Study on the anti-bend performance of UHPC beams[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [16] 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 Haibin, DENG Zongcai. Cracking moment and crack width of ultra-high performance concrete beams[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(4):87-92.
- [17] 刘超,黄钰豪,马汝杰,等. 高应变强化超高性能混凝土 T 形梁抗弯承载力[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(6):744-750.
- LIU Chao, HUANG Yuhao, MA Rujie, et al. Calcula-

tion method for flexural capacity of high strain-hardening UHPC T-beams[J]. Journal of Tongji University (Natural Science),2018,46(6):744-750.

[18] 李立峰,范 昕,石雄伟,等. 大比例预应力 UHPC-T 形梁抗弯性能试验研究[J]. 土木工程学报,2018,51(5):84-94,102.

LI Lifeng,FAN Xin,SHI Xiongwei,et al. Experimental study on flexural behavior of large-scale prestressed UHPC T-shaped beam[J]. China Civil Engineering Journal,2018,51(5):84-94,102.

[19] 徐海宾,邓宗才. 预应力超高性能钢纤维混凝土梁受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2014,35(12):58-64.

XU Haibin,DENG Zongcai. Experimental research on flexural behavior of prestressed ultra-high performance steel fiber concrete beams[J]. Journal of Building Structures,2014,35(12):58-64.

[20] 许 浩. 预应力高性能混凝土梁疲劳性能试验研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2015.

XU Hao. Research on fatigue property of prestressed high performance concrete beam by fatigue test[D]. Shijiazhuang:Shijiazhuang Tiedao University,2015.

[21] 金属材料 室温拉伸试验方法:GB/T 228—2002[S]. 北京:中国标准出版社,2002.

Metallic materials — tensile testing at ambient temperature: GB/T 228—2002 [S]. Beijing: Standards Press of China,2002.