

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202011002



部分充填砼钢箱连续组合梁 抗裂性能分析

莫时旭^{1,2}, 邹泽群^{1,2}, 郑艳^{1,2}

(1. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004;

2. 桂林理工大学 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 针对部分充填砼钢箱连续组合梁裂缝控制问题,开展超高性能混凝土(UHPC)翼板-部分充填砼钢箱连续组合梁抗裂性能研究,探讨该组合梁裂缝控制的新途径.通过 3 根部分充填砼钢箱连续组合梁试验,得到挠度、滑移和裂缝的开展特征.基于 ABAQUS 软件建立部分充填砼钢箱连续组合梁有限元分析模型,分析 UHPC 翼板部分充填砼钢箱连续组合梁关键参数对受力性能的影响.结果表明:负弯矩区采用 UHPC 翼板能显著提高组合梁抗裂性能;当负弯矩区 UHPC 翼板长为 0.3 倍跨径、厚度为 1/3 翼板总厚时,能满足裂缝控制要求且经济合理;与普通混凝土相比,高应变强化 UHPC 初裂荷载提升 2.3 倍,可视开裂荷载提升 7.6 倍.

关键词: 钢-混组合梁;超高性能混凝土;有限元模拟;负弯矩区;高应变强化

中图分类号: TU 398.9 文献标志码: A 文章编号: 1000-5013(2022)03-0314-09

Analysis of Crack Resistance of Partially Filled Concrete Steel Box Continuous Composite Beams

MO Shixu^{1,2}, ZOU Zequn^{1,2}, ZHENG Yan^{1,2}

(1. College of Civil and Architectural Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Rock-Soil Mechanic and Engineering,
Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Aiming at the crack control problem of partially filled concrete steel box continuous composite beams, the research on the crack resistance of ultra-high performance concrete (UHPC) flange-partially filled concrete steel box continuous composite beams is carried out, and a new way of this composite beam crack control is discussed. Through the test of three partially filled concrete steel box continuous composite beams, the deflection, slippage and crack characteristics are obtained. Based on ABAQUS software, a finite element analysis model of partially filled concrete steel box continuous composite beam is established. The influence of key parameters of the UHPC flange-partially filled concrete steel box continuous composite beam on the mechanical performance is analyzed. The results show that the use of UHPC flange in the negative bending moment zone can significantly improve the crack resistance of the composite beam; when the length of UHPC flange in the negative bending moment zone is 0.3 the span and the thickness is 1/3 of the total thickness of the flange, the requirements of crack control is satisfied, and it is economical and reasonable; by comparison with normal concrete, high strain strengthened UHPC initial cracked load increases by 2.3 times, and the crack-observed load increases by 7.6 times.

收稿日期: 2020-11-01

通信作者: 郑艳(1973-),女,副教授,主要从事钢混组合结构的研究. E-mail:253651988@qq.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52068012);广西自然科学基金资助项目(2020GXNSFAA159003)

Keywords: steel-concrete composite beam; ultra-high performance concrete; finite element simulation; negative bending moment zone; high strain strengthened

钢-混凝土组合梁具备质量轻、承载能力高、施工便利等优点,在桥梁工程中应用广泛.但钢-混连续组合梁存在负弯矩区桥面板开裂和钢梁受压失稳等问题.在负弯矩区截面下缘布置混凝土板形成双重组合梁是改善连续组合梁中支座区受力性能的有效措施之一^[1].该措施能显著提高组合梁的整体刚度和承载能力,但对负弯矩区桥面板裂缝控制能力的提高作用有限^[2-3].

高强度、高性能材料的应用是桥梁结构发展的趋势之一^[4].超高性能混凝土(UHPC)具有超高强度、超高塑性及韧性、高裂纹自修复性和良好的施工性. UHPC 材料在结构高拉应力区的使用为桥梁裂缝控制提供了一条新的可行途径.目前,许多学者开展了 UHPC 抗裂性能的研究. Charron 等^[5]对受拉 UHPC 棱柱体试件透水性进行研究,表明当拉应变小于 0.15% 时,试件出现分布裂缝,但不影响试件的耐久性; Hu 等^[6]开展钢-UHPC、钢-混组合梁的抗弯试验,发现试件的最大裂缝宽度减少 59%,开裂荷载和极限承载力分别提高了 3.4 倍和 26%;刘新华等^[7]研究 3 种不同负弯矩区接口形式的钢-UHPC 组合梁的受力性能;邵旭东等^[8]研究构件参数对钢-UHPC 轻型组合桥梁的影响,发现 UHPC 厚度和栓钉间距对开裂应力影响不大.

综合考虑材料的发挥程度和经济性等因素,本文采用 UHPC 部分或全部替代连续梁中支座区翼板中的普通混凝土(NC),形成 UHPC 翼板-部分充填砼钢箱连续组合梁.利用 ABAQUS 软件对 UHPC 翼板-部分充填砼钢箱连续组合梁的受力全过程进行有限元模拟,分析 UHPC 的本构关系、翼板分布长度、UHPC 填充厚度、配筋率等关键参数对该组合梁受力性能的影响.

1 NC 翼板-部分充填砼钢箱连续组合梁试验

1.1 试验方案

开展 3 根两跨 NC 翼板-部分充填砼钢箱连续组合梁(简称 NC 翼板连续组合梁)静载试验,试件编号为 PFSCB1~PFSCB3.试验梁长 6 400 mm,翼板宽 1 000 mm,厚 120 mm,钢箱高 300 mm;栓钉直径 13 mm,高 100 mm;纵筋直径 12 mm,分布筋直径 8 mm. 3 根 NC 翼板连续组合梁试件的参数,如表 1 所示.表 1 中: ρ 为翼板配筋率; η 为抗剪连接度; n,s 分别为负弯矩区栓钉的数量和间距. NC 翼板连续组合梁的构造图,如图 1 所示.

表 1 3 根 NC 翼板连续组合梁试件的参数
Tab. 1 Parameters of 3 NC flange continuous composite beam specimens

试件编号	$\rho/\%$	钢筋布置形式	η	负弯矩区栓钉	
				n	s/mm
PFSCB1	1.0	$1\times 11\Phi 12@96$	1.0	34	91.0
PFSCB2	1.5	$1\times 11\Phi 12@96+1\times 6\Phi 12@192$	1.0	37	83.3
PFSCB3	2.0	$2\times 11\Phi 12@96$	1.0	41	75.0

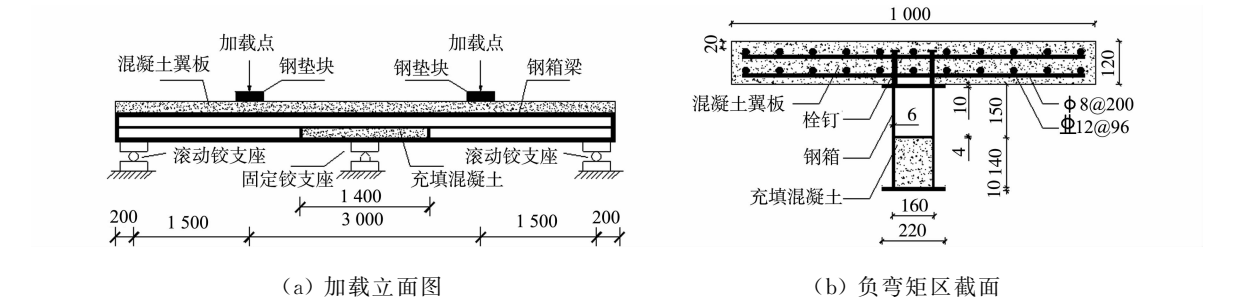


图 1 NC 翼板连续组合梁的构造图(单位:mm)
Fig. 1 Structure of NC flange continuous composite beam (unit: mm)

混凝土和钢材的材料特性,如表 2,3 所示.表 2,3 中: $f_{c,F}$, $f_{c,F}$ 分别为翼板混凝土、钢箱内填混凝土的抗压强度; D 为钢筋直径; h 为钢板厚度; E_s 为弹性模量; f_y 为屈服强度; f_u 为抗拉强度.

表 2 混凝土的材料特性
Tab. 2 Mechanical properties of concrete

试件编号	$f_{c,Fi}/\text{MPa}$		$f_{c,Fi}/\text{MPa}$	
	28 d	试验时	28 d	试验时
PFSCB1	43.67	51.29	44.38	41.59
PFSCB2	43.35	52.27	47.50	41.69
PFSCB3	43.56	52.09	47.39	43.54

表 3 钢材的材料特性
Tab. 3 Mechanical properties of steel

种类	型号	D/mm	h/mm	E_s/GPa	f_y/MPa	f_u/MPa
纵向钢筋	HRB400	12	—	200	435	607
横向钢筋	HPB300	8	—	200	315	471
钢板	Q235	—	4	206	270	346
	Q235	—	6	206	270	400
	Q235	—	10	206	282	405

1.2 试验结果与分析

1.2.1 荷载-跨中挠度曲线 NC 翼板连续组合梁的荷载(P)-跨中挠度(w)曲线,如图 2 所示.由图 2 可知:在加载初期,组合梁处于整体弹性阶段,荷载-跨中挠度呈线性关系,斜率较大;荷载继续增大,中支座负弯矩区翼板出现横向裂缝,试验梁进入开裂后弹性工作阶段;随着荷载的增大,跨中钢箱底板开始屈服,组合截面中性轴逐渐上移,混凝土翼板底面开始受拉开裂;最后,试验梁进入承载力极限状态,破坏时的承载力则取决于混凝土顶板极限压应力和钢箱底板极限抗拉强度.

1.2.2 荷载-最大裂缝宽度曲线 NC 翼板连续组合梁的荷载-最大裂缝宽度(W_{\max})曲线,如图 3 所示.由图 3 可知:翼板配筋率对开裂荷载影响不大,对最大裂缝宽度影响较大;当荷载达到 300 kN 以后,试件 PFSCB1 的最大裂缝宽度迅速增大,并超过 0.20 mm;试件 PFSCB2 的最大裂缝宽度与试件 PFSCB1 相比明显减小,但略大于 PFSCB3,当荷载达到 450 kN 后,试件 PFSCB2 的最大裂缝宽度超过 0.20 mm;当荷载达到 650 kN 后,试件 PFSCB3 的最大裂缝宽度逐渐超过 0.20 mm.

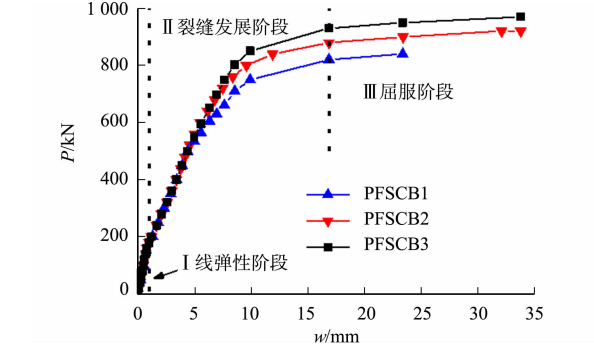


图 2 NC 翼板连续组合梁的 P - w 曲线
Fig. 2 P - w curves of NC flange continuous composite beams

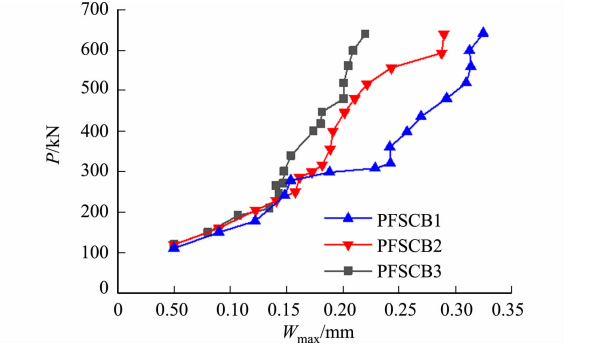


图 3 NC 翼板连续组合梁的 P - W_{\max} 曲线
Fig. 3 P - W_{\max} curves of NC flange continuous composite beams

2 UHPC 翼板-部分充填砼钢箱连续组合梁

虽然提高 NC 翼板配筋率对控制最大裂缝宽度的发展有一定的作用,但翼板配筋率为 2.0% 的试件 PCSCB3 在弹性工作阶段的裂缝宽度仍超过 0.20 mm,不能满足结构耐久性要求.目前,连续组合梁裂缝控制的常用措施有两种:一是通过张拉预应力筋施加预应力,但受钢梁的约束,预应力效率较低;二是通过施工措施形成预压应力,如支座顶升法、跨中配重法等,但该方法形成的预应力有限.

UHPC 与普通混凝土间存在良好的粘结力,可以在弯拉下协调变形,使两者交界面较难发生相对滑移^[9-10].因此,将 UHPC 应用于连续组合梁翼板是预应力技术之外的裂缝控制途径.基于此,提出在

NC 翼板-部分充填砼钢箱连续组合梁中支座区的翼板中部分采用 UHPC 材料,跨中翼板采用 NC 材料. 基于 UHPC 材料性能已有的研究成果,通过有限元分析方法初步分析 UHPC 翼板-部分充填砼钢箱连续组合梁的受力性能.

3 部分充填砼钢箱连续组合梁有限元分析

3.1 单元选取

钢板、混凝土、栓钉、加劲肋均使用线性 3 维 8 节点实体单元 C3D8R. 混凝土、钢梁的网格尺寸均为 20 mm×20 mm×20 mm,栓钉的网格尺寸为 6.5 mm×6.5 mm×6.5 mm. 钢筋采用 2 节点 3 维桁架单元 T3D2,网格尺寸为 20 mm×20 mm×20 mm. 组合梁的 1/4 有限元模型,如图 4 所示.

3.2 材料参数

3.2.1 混凝土 C40 混凝土的弹性模量 $E_c=32.5\text{ GPa}$,泊松比 $\mu=0.2$,选择 ABAQUS 损伤塑性 (CDP)模型进行模拟. 相关参数均按推荐取值^[11-12]:剪切角为 30° ,偏心率为 0.1,屈服应力比为 1.16,屈服常数为 0.666 7,黏性系数为 0.000 5. 混凝土本构采用 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》^[13]的应力-应变曲线.

根据抗拉强度是否大于弹性抗拉强度,将 UHPC 分为应变软化、低应变强化、高应变强化 3 种类型^[14]. 3 种类型 UHPC 的抗压强度上升段基本一致,下降段有一定区别,但区别不大^[15]. 文中主要使用 UHPC 抵抗开裂,因此,将其简化为受压本构模型. 3 种类型 UHPC 对应的弹性模量 E_c 分别为 36.8, 36.4,40.6 GPa^[16],泊松比 $\mu=0.2$,选择 ABAQUS 损伤塑性模型,相关参数与普通混凝土一致.

参照瑞士 UHPC 的设计规范^[17],受拉应力(σ_t)-应变(ϵ)关系表达式为

$$\sigma_t = \begin{cases} \frac{f_{ct}}{\epsilon_{ca}} \epsilon, & 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_{ca}, & \text{(UHPC 线弹性阶段)} \\ f_{ct} \left(1 - \frac{0.3(\epsilon - \epsilon_{ca})}{\epsilon_{pc} - \epsilon_{ca}} \right), & \epsilon_{ca} < \epsilon \leq \epsilon_{pc}, & \text{(应变软化下降段)} \\ f_{ct}, & \epsilon_{ca} < \epsilon \leq \epsilon_{pc}, & \text{(低应变强化段)} \\ f_{ct} \left(1 + \frac{0.2(\epsilon - \epsilon_{ca})}{\epsilon_{pc} - \epsilon_{ca}} \right), & \epsilon_{ca} < \epsilon \leq \epsilon_{pc}. & \text{(高应变强化段)} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: f_{ct} 为弹性极限抗拉强度,3 种类型 UHPC 对应的 f_{ct} 分别为 7.7,8.4,10.0 MPa^[16]; ϵ_{pc} 为极限应变; ϵ_{ca} 为弹性阶段峰值应变,3 种类型 UHPC 对应的 ϵ_{ca} 分别为 2.0×10^{-4} , 2.3×10^{-4} , 2.5×10^{-4} ^[16].

受压本构关系采用文献[18]提出的 UHPC 受压应力-应变曲线,无量纲后得

$$y = \begin{cases} \frac{Ax}{1 + (A-1)x^{\frac{A}{A-1}}}, & 0 \leq x \leq 1, \\ \frac{x}{B(x-1)^2 + x}, & x > 1. \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: $A=E_c\epsilon_0/f_c$, $\epsilon_0=3.36 \times 10^{-3}$, $f_c=133.3\text{ MPa}$ ^[18], $A=1.07$; $B=2.41$.

由式(1),(2)可得 UHPC 本构关系曲线,如图 5 所示.

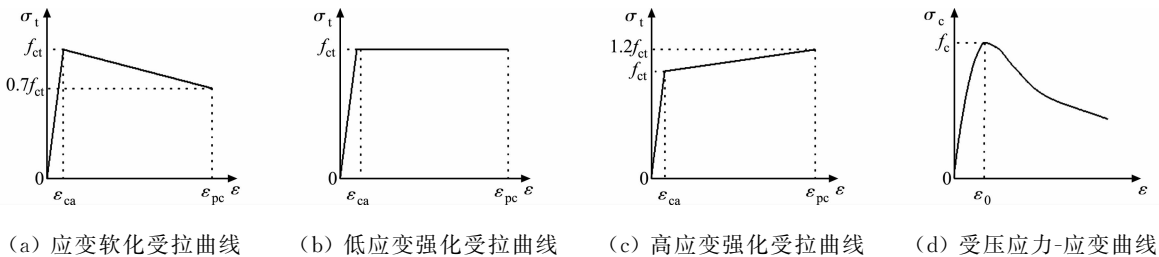


图 5 UHPC 本构关系曲线

Fig. 5 UHPC constitutive relationship curves

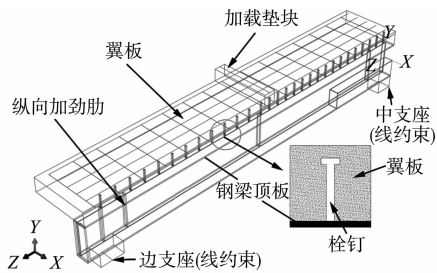


图 4 组合梁的 1/4 有限元模型

Fig. 4 1/4 finite element model of composite beam

3.2.2 钢材和栓钉 钢材的应力-应变采用双折线强化塑性模型,即

$$\sigma_s=\begin{cases} E_s\epsilon, & \epsilon\leqslant\epsilon_y, \\ f_y, & \epsilon_y<\epsilon\leqslant\epsilon_t, \\ f_y+0.01E_s(\epsilon-\epsilon_t), & \epsilon_t<\epsilon\leqslant\epsilon_u. \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: $\epsilon_y, \epsilon_t, \epsilon_u$ 分别为钢材的屈服应变、强化应变、极限应变。

栓钉的应力-应变采用三折线模型^[19],即

$$\sigma_s=\begin{cases} E_{ss}\epsilon, & \epsilon\leqslant\epsilon_{sy}, \\ f_{sy}+0.01E_{ss}(\epsilon-\epsilon_{sy}), & \epsilon_{sy}<\epsilon\leqslant\epsilon_{su}, \\ 1.2f_{sy}, & \epsilon>\epsilon_{su}. \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: E_{ss}, f_{sy} 分别为栓钉的弹性模量、屈服应力; ϵ_{sy} 为栓钉的屈服应变, $\epsilon_{sy}=1.82\times10^{-3}$; ϵ_{su} 为栓钉的极限应变, $\epsilon_{su}=21\epsilon_{sy}$ ^[19]。

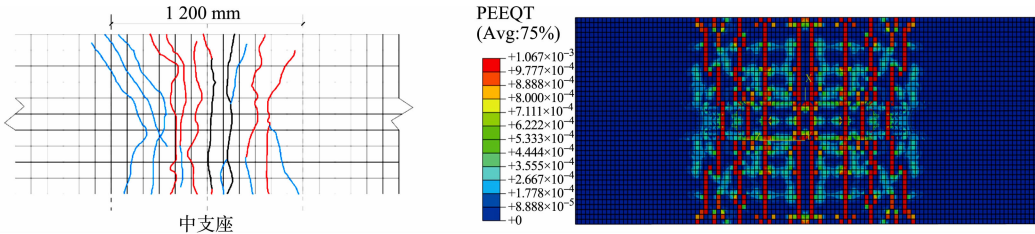
3.3 有限元模型的建立

将钢梁-翼板、填充混凝土-钢梁箱室的法向接触面定义为“hard”接触,切向接触面定义为罚函数接触,对应的摩擦系数分别为 0.4^[20],0.6^[21]。栓钉底端与钢梁使用“Tie”固结约束,并以“Embedded”命令嵌入翼板内。

考虑到结构及加载的对称性,沿桥纵、横向建立 1/2 模型,从而建立 1/4 有限元分析模型以提高计算效率,对称边界约束转动和法向位移。支座设置刚性垫块,在垫块支承线上按实际支承情况进行相应位移约束,集中荷载通过弹性模量较大的刚性垫块施加到梁体上。

3.4 有限元模型的验证

3.4.1 裂缝特征 试件 PFSCB2 的负弯矩区翼板裂缝发展,如图 6 所示。由图 6(a)可知:裂缝首先出现在翼板中支座附近,随着荷载的增加,裂缝逐渐向跨中发展,在跨中附近呈现 C 字型分布。由于 ABAQUS 塑性损伤模型无法模拟裂缝,故通过应变云图(图 6(b))观察裂缝分布规律,可知其与实测裂缝发展分布规律相似。



(a) 裂缝分布(裂缝出现顺序为黑、红、蓝) (b) 抗拉塑性应变云图

图 6 试件 PFSCB2 的负弯矩区翼板裂缝发展

Fig. 6 Crack development of flange in negative bending moment zone of specimen PFSCB2

3.4.2 试验值与模拟值的对比 对 NC 翼板连续组合梁进行数值模拟,并与相应的试验结果对比,如图 7 所示。图 7 中: Δ 为滑移; d 为距中支座的距离。

主要参数的试验值与模拟值的对比,如表 4 所示。表 4 中: P_{cr} 为开裂荷载; P_u 为极限荷载; Δ_{max} 为最大纵向滑移; Δ_{min} 为最小纵向滑移; $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ 分别为开裂荷载、极限荷载、最大纵向滑移、最小纵向滑移的试验值与模拟值的相对误差。

表 4 主要参数的试验值与模拟值的对比

Tab. 4 Comparison of experimental values and simulation values of main parameters

试件编号	P_{cr}/kN		$\delta_1/\%$	P_u/kN		$\delta_2/\%$	Δ_{max}/mm		$\delta_3/\%$	Δ_{min}/mm		$\delta_4/\%$
	试验值	模拟值		试验值	模拟值		试验值	模拟值		试验值	模拟值	
PFSCB1	120.4	117.2	2.7	820.0	789.2	3.9	1.15	1.21	5.2	-0.99	-1.00	1.0
PFSCB2	124.8	122.5	1.9	880.0	851.5	3.3	1.03	1.08	4.7	-0.96	-1.01	5.4
PFSCB3	130.1	125.9	3.2	930.0	894.0	4.0	1.35	1.43	5.9	-0.86	-0.91	5.8
平均误差	—	—	2.6	—	—	3.7	—	—	5.3	—	—	4.1

综上可知,试验梁的裂缝特征、荷载-跨中挠度曲线、纵向滑移曲线与有限元模拟结果均吻合良好,

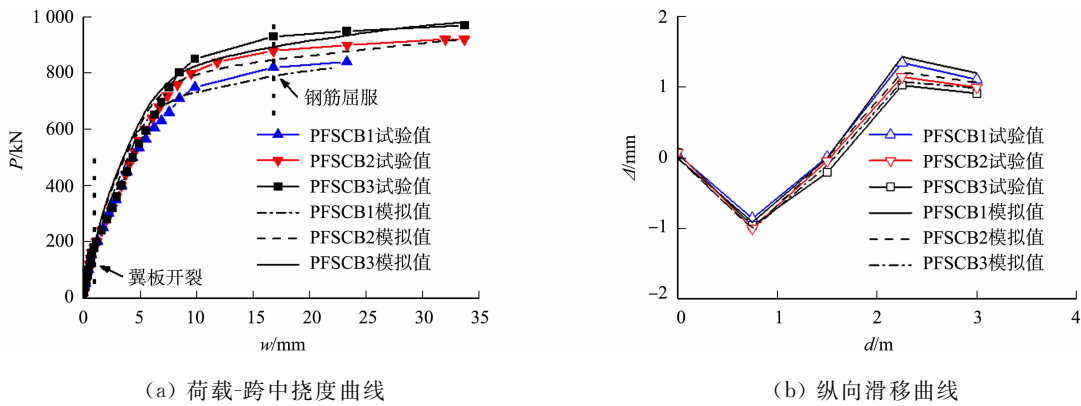


图 7 试验梁试验值与模拟值的对比

Fig. 7 Comparison of experimental value and simulation value of test beams

验证了有限元模型的适用性。由于 UHPC 翼板-部分充填砼钢箱连续组合梁的建模方法、尺寸与 NC 翼板-部分充填砼钢箱连续组合梁相同，因而也适用该有限元模型。

4 UHPC 翼板连续组合梁结构参数分析

以开裂荷载、极限荷载最大为优化目标，探究 UHPC 本构关系、负弯矩区 UHPC 替换长度、填充厚度、配筋率等关键设计参数对组合梁受力性能的影响。

UHPC 的开裂荷载可分为初裂荷载和可视开裂荷载。初裂荷载是翼板拉应变达到材料弹性极限应变时的荷载，UHPC 翼板的初裂应变为 2×10^{-4} [16]，NC 翼板的初裂应变为 8×10^{-5} 。可视开裂荷载定义为最大裂缝宽度达到 0.05 mm [22] 时的荷载。通过直接拉伸试验得到应变软化、低应变强化、高应变强化 UHPC 对应的可视开裂应变分别为 6.0×10^{-4} ， 1.1×10^{-3} ， 2.0×10^{-3} [16,23]。NC 翼板的可视开裂荷载约等于初裂荷载。有限元分析的标准梁参数如下：中支座区 UHPC 翼板长 3 600 mm，厚 120 mm，配筋率为 1.5%；UHPC 本构为高应变强化型。

4.1 UHPC 本构关系

UHPC 本构分为应变软化(UO)、低应变强化(UA)、高应变强化(UB)3 种类型。不同本构关系对比结果，如图 8 所示。

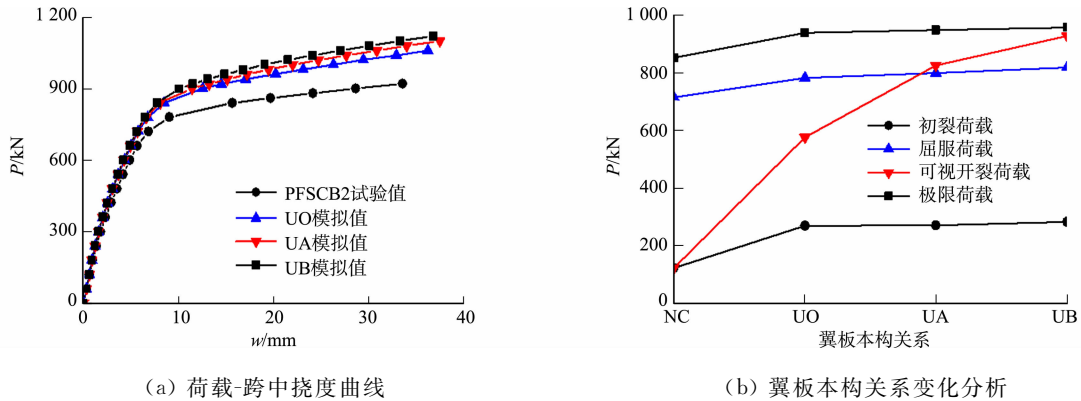


图 8 不同本构关系对比结果

Fig. 8 Comparison results of different constitutives relationship

由图 8 可知：UO,UA,UB 三者的荷载-跨中挠度曲线区别不大，而可视开裂荷载增长显著；当 $P = 0.5P_u$ 时，在相同配筋率下，UB 翼板组合梁的割线刚度为 $150.7 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ ，比 NC 翼板组合梁(割线刚度为 $137.1 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$)提高了 10%，初裂荷载提高了约 2.3 倍，极限荷载提高了约 12.3%；若考虑 UB 优异的裂缝宽度控制能力，则其可视开裂荷载较普通混凝土的初裂荷载提升 7.6 倍。

4.2 UHPC 替换长度

由于 UHPC 造价较高，应在满足结构受力的条件下，尽量减少 UHPC 的用量。但是仅在部分负弯

矩区铺设 UHPC 会导致界面普通混凝土先于 UHPC 拉裂. 因此, 需要筛选出负弯矩区 UHPC 达到初裂荷载甚至可视开裂荷载时, 界面普通混凝土尚未开裂的 UHPC 替换长度. UHPC 的几何尺寸, 如图 9 所示. 图 9 中: l 为计算跨径, $l=3\ 000\text{ mm}$; $2al$ 为两跨连续梁的 UHPC 替换长度, a 为长度系数.

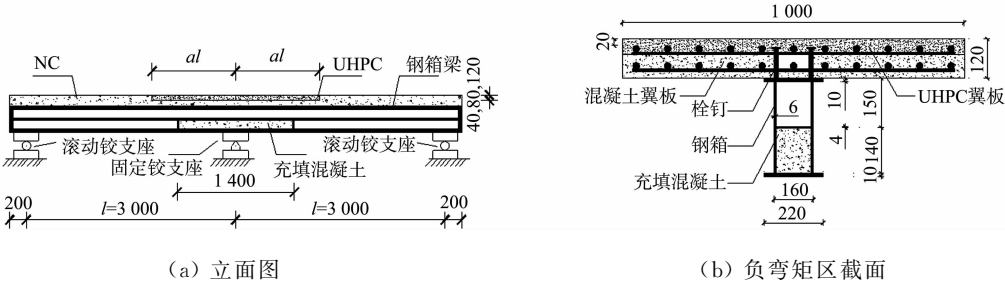


图 9 UHPC 的几何尺寸(单位: mm)
Fig. 9 Dimensions of UHPC (unit: mm)

不同 UHPC 替换长度下的 $P-\omega$ 曲线, 如图 10 所示. UHPC 替换长度变化分析, 如图 11 所示.

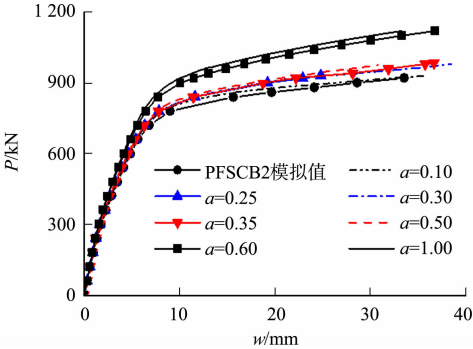


图 10 不同 UHPC 替换长度下的 $P-\omega$ 曲线
Fig. 10 $P-\omega$ curves with different UHPC replacement lengths

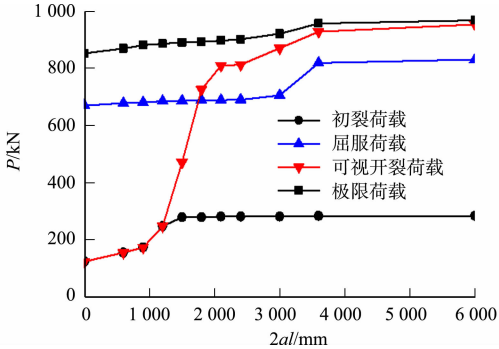


图 11 UHPC 替换长度变化分析
Fig. 11 Analysis of UHPC replacement length variation

由图 11 可知: 当长度系数 a 从 0.10 增加到 1.00 时, UHPC 翼板连续组合梁的刚度、极限承载力均有显著提高; 当 $a < 0.25$ 时, 界面普通混凝土会先于负弯矩区 UHPC 开裂, 翼板的可视开裂荷载约等于初裂荷载; 当 a 增加到 0.30 时, 翼板的可视开裂荷载大于屈服荷载; 当 a 继续增加到 0.60 时, 翼板的屈服荷载、极限荷载均有较大提升. 综合考虑经济因素和受力性能, 选择 $a=0.30$, 即 UHPC 替换长度 $2al=1\ 800\text{ mm}$ (0.3 倍计算跨径) 较为合适.

4.3 UHPC 填充厚度

当负弯矩区 UHPC 翼板长度为 1 800 mm 时, 模拟分析不同 UHPC 填充厚度 (H) 下的 $P-\omega$ 曲线, 如图 12 所示. UHPC 填充厚度变化分析, 如图 13 所示.

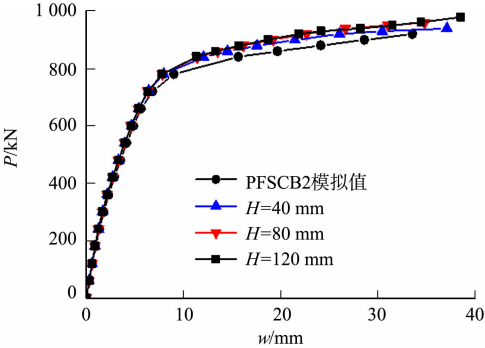


图 12 不同 UHPC 填充厚度下的 $P-\omega$ 曲线
Fig. 12 $P-\omega$ curves with different UHPC filling thicknesses

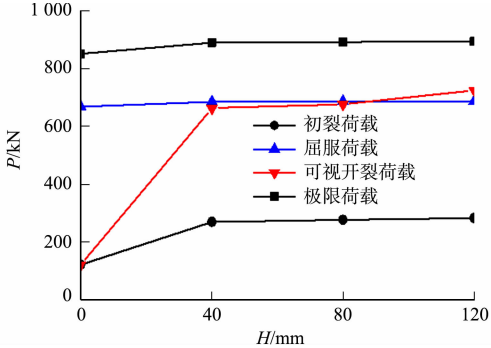


图 13 UHPC 填充厚度变化分析
Fig. 13 Analysis of UHPC filling thickness variation

由图 13 可知: 当 UHPC 填充厚度从 40 mm 增加到 120 mm 时, 翼板的初裂荷载、极限荷载分别增

加了 4.9%，0.4%，增长幅度较低。虽然 UHPC 填充厚度为 40 mm 时的可视开裂荷载小于屈服荷载，但是仅减少 3.2%，能满足负弯矩区翼板裂缝控制的功能。因此，从经济角度考虑，选择 UHPC 填充厚度为 40 mm(1/3 翼板厚度)更加合理。

4.4 翼板配筋率

在连续组合梁中，受拉纵筋能有效抑制裂缝的产生和发展，显著提高组合梁的极限承载力和延性。当 UHPC 翼板长度为 1 800 mm，填充厚度为 40 mm 时，不同翼板配筋率下的 $P-w$ 曲线，如图 14 所示。翼板配筋率变化分析，如图 15 所示

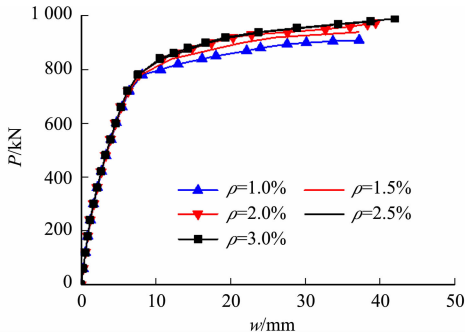


图 14 不同翼板配筋率下的 $P-w$ 曲线
Fig. 14 $P-w$ curves with different flange reinforcement ratios

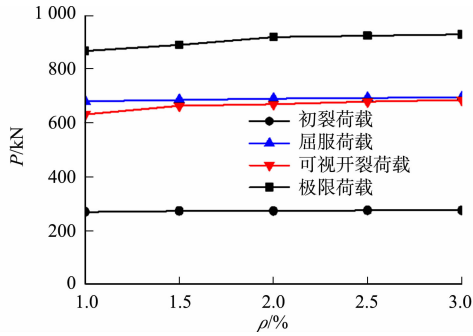


图 15 翼板配筋率变化分析
Fig. 15 Analysis of flange reinforcement ratios variation

由图 15 可知：当翼板配筋率从 1.0% 增加到 1.5% 时，翼板的初裂荷载、屈服荷载、可视开裂荷载、极限荷载分别提高了 1.1%，0.6%，5.3%，2.3%，此后，增长幅度逐渐降低；当配筋率从 1.5% 增加到 2.0% 时，翼板的初裂荷载、屈服荷载、可视开裂荷载、极限荷载分别提高了 0.1%，0.7%，0.9%，3.2%，前 3 项的增长幅度几乎趋近于零。虽然配筋率为 1.5%~2.0% 时翼板的可视开裂荷载小于屈服荷载，但都只降低 3.0% 左右，能够满足抗裂要求。综合考虑，选取翼板配筋率为 1.5%~2.0% 较经济合适。

5 结论

1) 负弯矩区钢箱部分充填混凝土可以有效提高中支座区的承载能力，但在弹性工作阶段中支座区的 NC 翼板裂缝宽度超过 0.2 mm，需要采取措施进一步控制裂缝开展。

2) 试验实测的裂缝特征、荷载-跨中挠度曲线、滑移曲线与 ABAQUS 有限元模拟结果整体一致，开裂荷载、极限荷载的误差均在 4% 以下，纵向滑移误差均在 5% 左右，表明有限元模型的有效性。

3) 部分充填砼钢箱连续组合梁负弯矩区采用 UHPC 翼板替代 NC 翼板，可使组合梁刚度提高 10%，翼板的初裂荷载提高约 2.3 倍，极限荷载提高约 12.3%，其可视开裂荷载较普通混凝土初裂荷载提升 7.6 倍。由此可见，中支座区采用 UHPC 翼板可有效解决翼板开裂的问题。

4) 结构参数分析结果表明，采用高应变强化 UHPC 的初裂荷载、极限承载力均有较大提升，负弯矩区翼板 UHPC 替换长度取 1 800 mm(0.3 倍计算跨径)，填充厚度为 40 mm(1/3 翼板总厚度)较为经济合适；翼板的合理配筋率为 1.5%~2.0%。

参考文献：

[1] KIM H, SHIM S. Experimental investigation of double composite twin-girder railway bridges[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(6): 1355-1365. DOI: 10.1016/j.jcsr. 2009. 02. 004.

[2] 羊海林, 郑艳, 莫时旭. 负弯矩区部分充填混凝土对窄幅钢箱-混凝土组合梁受力性能影响试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(11): 131-139. DOI: 10.14006/j. jzjgxb. 2018. 0004.

[3] 羊海林, 莫时旭, 郑艳, 等. 部分充填混凝土窄幅钢箱组合梁抗裂性能研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2014, 39(6): 1441-1447. DOI: 10.13624/j. cnki. issn. 1001-7445. 2014. 06. 018.

[4] 项海帆. 世界大桥的未来趋势：2011 年伦敦国际桥协会议的启示[C]// 第二届全国桥梁学术会议论文集(上册). 武汉：人民交通出版社, 2012: 18-25.

- [5] CHARRON J P, DENARIE E, BRUHWILER E. Permeability of ultra-high performance fiber reinforced concretes (UHPRC) under high stresses [J]. *Materials and Structures*, 2006, 40(3): 269-277. DOI: 10.1617/s11527-006-9105-0.
- [6] HU Yuqing, MELONI M, CHENG Zhao, *et al.* Flexural performance of steel-UHPC composite beams with shear pockets[J]. *Structures*, 2020, 27: 570-582. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.05.039.
- [7] 刘新华, 周聪, 张建仁, 等. 钢-UHPC 组合梁负弯矩区受力性能试验[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(5): 110-121. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.05.010.
- [8] 邵旭东, 罗军, 曹君辉, 等. 钢-UHPC 轻型组合桥面结构试验及裂缝宽度计算研究[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(3): 61-75. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2019.03.007.
- [9] AL-OSTA M A, ISA M N, BALUCH M H, *et al.* Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 134: 279-296. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.094.
- [10] 张阳, 党祺, 穆程. UHPC 加固箱梁顶板受弯性能试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(3): 8-18. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbkb.2017.03.002.
- [11] 廖子南, 邵旭东, 乔秋衡, 等. 钢-超高性能混凝土组合板横向受弯静力试验及有限元模拟[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2018, 52(10): 1954-1963. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2018.10.015.
- [12] 张劲, 王庆扬, 胡守营, 等. ABAQUS 混凝土损伤塑性模型参数验证[J]. *建筑结构*, 2008(8): 127-130. DOI: 10.19701/j.jzjg.2008.08.036.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [14] ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. National addition to Eurocode 2: Design of concrete structures: Specific rules for Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete (UHPRC)[S]. Paris: Association Française de Normalisation, 2016.
- [15] 雒敏, 蔺鹏臻, 杨子江. UHPC 单轴受压力学性能及本构关系研究[J]. *桥梁建设*, 2020, 50(5): 62-67.
- [16] 王俊颜, 郭君渊, 肖汝诚, 等. 高应变强化超高性能混凝土的裂缝控制机理和研究[J]. *土木工程学报*, 2017, 50(11): 10-17. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2017.11.002.
- [17] MCS-EPFL. Ultra-high performance fibre reinforced cement-based composites (UHPRC)[S]. Lausanne: Swiss Federal Institute of Technology, 2016.
- [18] 郭晓宇, 亢景付. 超高性能混凝土单轴受压本构关系[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2017, 47(2): 369-376. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2017.02.028.
- [19] 丁发兴, 倪鸣, 龚永智, 等. 栓钉剪力连接件滑移性能试验研究及受剪承载力计算[J]. *建筑结构学报*, 2014, 35(9): 98-106. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2014.09.013.
- [20] LUO Yunbiao, HOKI K, HAYASHI K, *et al.* Behavior and strength of headed stud-SFRCC shear connection. II: Strength evaluation[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2015, 142(2): 04015113(1-10). DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001372.
- [21] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究[D]. 福州: 福州大学, 2005.
- [22] LUO Jun, SHAO Xudong, CAO Junhui, *et al.* Transverse bending behavior of the steel-UHPC lightweight composite deck: Orthogonal test and analysis[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 162: 105708(1-19). DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.105708.
- [23] 张哲. 钢-配筋 UHPC 组合桥面结构弯曲受拉性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 方德平)