

引文格式:郑艳,刘晓贝,羊海林,等.窄幅钢箱-UHPC组合梁负弯矩下抗弯性能试验研究[J].建筑科学与工程学报,2024,41(4):42-50.
ZHENG Yan, LIU Xiaobei, YANG Hailin, et al. Experimental study on bending behavior of narrow steel box-UHPC composite beam under negative bending moment[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(4): 42-50.

DOI:10.19815/j.jace.2022.09086

窄幅钢箱-UHPC组合梁负弯矩下抗弯性能试验研究

郑艳^{1,2}, 刘晓贝¹, 羊海林^{1,2}, 莫时旭^{1,2}, 黄荆¹

(1. 桂林理工大学 土木工程学院, 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:为改善钢-混凝土组合梁负弯矩下的受力性能,提出一种新型窄幅钢箱-超高性能混凝土(UHPC)组合梁。通过6根试验梁的反向静力加载试验,得到试验梁受力全过程跨中荷载-挠度、荷载-应变、荷载-最大裂缝宽度关系曲线、裂缝发生发展及破坏形态等,基于简化塑性理论推导出了组合梁极限抗弯承载力计算公式。结果表明:窄幅钢箱-UHPC组合梁在负弯矩下具有良好的受力性能;提高配筋率、钢纤维掺量和UHPC相对板厚都可在一定程度上改善组合梁延性,提高其极限抗弯承载力;翼板配筋率对承载力影响较大,配筋率由1%增加至2%时,其极限抗弯承载力提高了15%;钢纤维掺量和UHPC相对板厚对初始开裂荷载影响较大,钢纤维掺量从1%增加到2%时,初始开裂荷载提高32%,UHPC相对板厚由0增加到0.5时,初始开裂荷载提高56%;增加钢纤维掺量和UHPC相对板厚可有效控制裂缝宽度,减少结构主裂缝数量,改善组合梁耐久性;组合梁极限抗弯承载力计算公式计算值与试验值吻合较好,表明塑性理论适用于窄幅钢箱-UHPC组合梁的承载力计算。

关键词:窄幅钢箱-UHPC组合梁;抗弯性能;负弯矩区;静载试验;极限抗弯承载力

中图分类号:TU375

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2024)04-0042-09

Experimental study on bending behavior of narrow steel box-UHPC composite beam under negative bending moment

ZHENG Yan^{1,2}, LIU Xiaobei¹, YANG Hailin^{1,2}, MO Shixu^{1,2}, HUANG Jing¹

(1. School of Civil Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China)

Abstract: In order to improve the mechanical behavior of steel-concrete composite beams under negative bending moment, a new narrow steel box-ultra-high performance concrete (UHPC) composite beam was proposed. The reversed static load tests of 6 specimens were completed to obtain the load-deflection curves, load-strain curves, load-maximum crack width curves of midspan, and the crack development and failure pattern of specimens in the whole test process. Based on the simplified plasticity theory, the calculation formula of ultimate flexural capacity of composite beams was derived. The results show that the narrow steel box-UHPC composite beam

收稿日期:2023-09-12

投稿网址: <http://jace.chd.edu.cn>

基金项目:国家自然科学基金项目(52068012);广西自然科学基金项目(2021GXNSFAA220101)

作者简介:郑艳(1973-),女,教授,E-mail:253651988@qq.com.

通信作者:羊海林(1986-),男,助理研究员,E-mail:825513039@qq.com.

has good mechanical performance under negative bending moment. Increasing the reinforcement ratio, steel fiber content and UHPC relative plate thickness can improve the ductility and increase the ultimate flexural capacity of composite beams to a certain extent. The reinforcement ratio of flange has great influence on bearing capacity. When the reinforcement ratio increases from 1% to 2%, the ultimate flexural capacity increases by 15%. The initial cracking load is greatly influenced by the steel fiber content and UHPC relative plate thickness. When the steel fiber content increases from 1% to 2%, the initial cracking load increases by 32%. When the UHPC relative plate thickness increases from 0 to 0.5, the initial cracking load is improved by 56%. The increases of steel fiber content and UHPC relative plate thickness can effectively control the crack width, reduce the number of main cracks, and improve the durability of composite beams. The calculated value of the ultimate flexural capacity calculation formula of composite beam is in good agreement with the test data, indicating that the plasticity theory is suitable for the calculation of the bearing capacity of the narrow steel box-UHPC composite beam.

Key words: narrow steel box-UHPC composite beam; bending behavior; negative bending moment region; static load test; ultimate bending capacity

Author resumes: ZHENG Yan (1973-), female, professor, E-mail: 253651988@qq.com; YANG Hailin (1986-), male, assistant research fellow, E-mail: 825513039@qq.com.

0 引言

钢-混凝土组合梁是由钢梁和混凝土板通过剪力连接键组合成整体共同承担荷载的新型结构,具有自重轻、承载能力高、施工便利等优点,在工程界得到广泛应用。20世纪80年代起,钢-混凝土组合梁桥在欧美及日本一些国家被广泛应用^[1]。随着中国桥梁建设的发展以及桥梁轻型化和装配化的需求,钢-混组合桥梁在中国桥梁建设中彰显出越来越强的竞争力。

连续组合梁桥相对简支组合梁桥具有受力合理、舒适性好、便于养护、适用范围广等优点,但连续组合梁桥中支座区混凝土翼板受拉易开裂,导致结构退化,存在耐久性和承载能力不足的问题。因此,连续组合梁桥中支座区桥面板裂缝控制和截面抗弯及抗剪承载力的增强是工程界关注的热点。连续组合梁中支座区混凝土翼板裂缝控制的主要措施是在翼板中引入预压应力,常采用的方法有预应力筋法、顶升回落梁法、施加配重法和改变浇筑顺序等^[2]。超高性能混凝土(UHPC)具有超高强度、超高韧性、密实性好和应变强化特性^[3-4],为改善连续组合梁负弯矩区的受力性能提供了一条新的途径。周安等^[5]通过采用正位两点加载试验和相关理论分析推导出开口钢箱组合结构的负弯矩区开裂弯矩公式。余志武等^[6]在塑性理论的基础上,采用截面转换法推导出钢-混连续组合梁的负弯矩区极限抗弯承载力计

算公式。刘新华等^[7]通过开展静力加载试验研究了钢-UHPC组合梁负弯矩区受力情况,并提出了简易的UHPC裂缝宽度计算公式;樊健生等^[8]通过静力加载试验研究了体外预应力对钢-混凝土组合梁抗裂性能的影响,结果表明体外预应力可有效改善组合梁的受力性能,并可有效控制裂缝宽度和裂缝间距;张彦玲等^[9]通过理论分析得出钢-活性粉末混凝土组合梁与其他同条件的组合梁相比,其负弯矩区不会大幅度开裂且抗裂性、刚度和承载力都有很大的提高。然而上述研究主要针对宽幅钢箱梁和工字型钢梁,对窄幅钢箱-UHPC组合梁负弯矩区的混凝土开裂等问题有待深入研究。

本文在充填混凝土钢箱连续组合梁研究^[10-15]基础上,为进一步改善中支座区受力性能,采用UHPC翼板提高翼板裂缝控制能力,改善组合梁耐久性;窄幅钢箱中部分充填UHPC,提高钢箱腹板局部稳定性及截面承载能力。为研究部分充填式窄幅钢箱-UHPC组合梁负弯矩下的受力性能,以翼板配筋率、UHPC相对板厚、UHPC钢纤维掺量为参数,制作了6根试验梁,通过跨中反向加载方式对试验梁进行静载试验,研究窄幅钢箱-UHPC组合梁从开始加载到最终破坏的全过程受力性能及破坏形态。利用试验成果,建立窄幅钢箱-UHPC组合梁负弯矩下抗弯承载力计算模型,推导其受弯承载力计算公式,为窄幅钢箱-UHPC组合梁的应用及设计提供参考。

1 试验概况

1.1 试验梁设计

6 根试验梁的编号为 PSCB1~PSCB6,主要设计参数为 UHPC 钢纤维体积掺量、翼板配筋率(钢筋面积)、UHPC 相对板厚(UHPC 层厚度与翼板总厚度之比),试验梁参数见表 1。

表 1 试验梁主要参数

Table 1 Main parameters of test beam			
试验梁编号	钢纤维掺量/%	配筋率/%	UHPC 相对板厚
PSCB1	2	2	0.5
PSCB2	0	2	0.5
PSCB3	1	2	0.5
PSCB4	3	2	0.5
PSCB5	2	1	0.5
PSCB6	2	2	0.0

试验梁总长 3 000 mm、高 410 mm,其中钢箱高 310 mm、宽 160 mm,钢箱腹板和横隔板厚 6 mm;翼板厚 100 mm、宽 600 mm、长 2 600 mm;翼板两端比钢梁短 200 mm,以便于安装钢梁上支座,解除支座对梁端翼板滑移的约束。试验梁几何尺寸与构造见图 1。

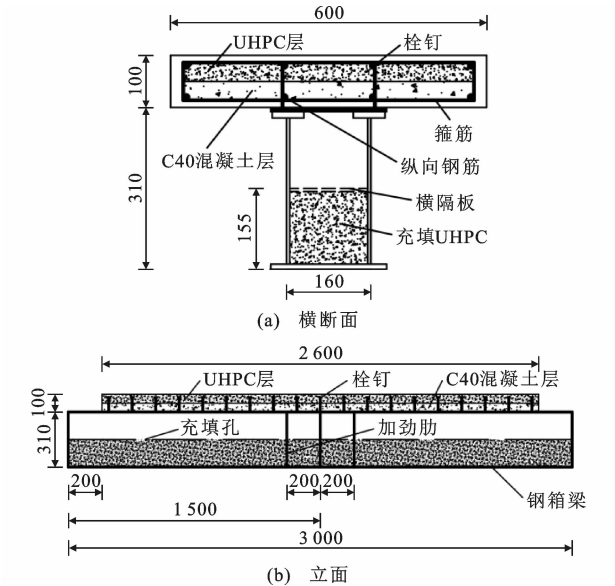


图 1 试验梁几何尺寸及构造(单位:mm)

Fig. 1 Geometric dimension and construction of test beam (unit:mm)

钢箱梁采用 Q235 级钢板焊接成槽型截面梁,由横隔板分为上下两室,横隔板布置直径 100 mm、间距 420 mm 的圆孔,通过隔板圆从上往下充填自密实 UHPC,并用振捣棒适当振捣。试验梁均为完全剪力连接,栓钉分两列布置,横向间距为 140

mm,单个栓钉承载力为 90 kN。翼板纵向钢筋直径为 14 mm,双层布置,横向分布筋直径为 6 mm,间距为 260 mm。试验梁配筋设计见表 2,钢筋布置见图 2,钢材的力学性能指标见表 3。

表 2 试验梁配筋设计

Table 2 Reinforcement design of test beam				
试验梁编号	配筋率/%	A_s/mm^2	钢筋型号	分布筋型号
PSCB1	2	1 232	8 ϕ 14	ϕ 6@260
PSCB5	1	600	8 ϕ 12	ϕ 6@260

注: A_s 为钢筋截面面积。

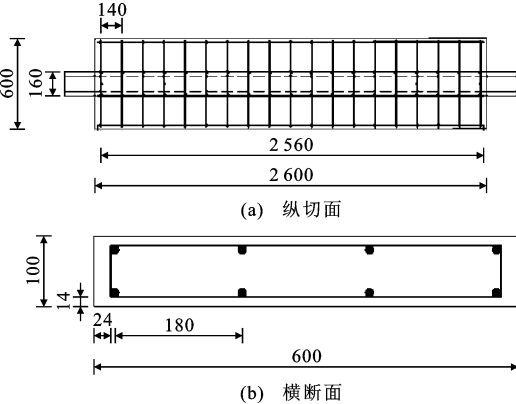


图 2 钢筋布置(单位:mm)

Fig. 2 Reinforcement arrangement (unit:mm)

表 3 钢材力学性能指标

Table 3 Mechanical property index of steel			
钢材	f_y/MPa	f_u/MPa	$E_s/10^5 \text{ MPa}$
6 mm 厚钢板	270	402	2
ϕ 14 钢筋	435	500	2
ϕ 12 钢筋	440	515	2

注: f_y 为屈服强度; f_u 为极限抗拉强度; E_s 为弹性模量。

充填钢箱和浇筑翼板上层所用的 UHPC 由 P. O42.5 水泥、石英砂、硅灰、钢纤维和减水剂组成,不同钢纤维掺量的 UHPC 力学性能见表 4,其中钢箱内充填混凝土为不加钢纤维的 UHPC;翼板下层所用的 C40 混凝土由 P. O42.5 水泥、砂子、碎石、水和减水剂组成,其轴心抗压强度为 43 MPa,抗拉强度为 2.5 MPa。试验梁浇筑顺序为先充填箱内 UHPC,待箱内 UHPC 达到一定强度后,再支模浇筑翼板下层 C40 混凝土、上层 UHPC。

1.2 试验加载装置与测点布置

试验采用正位单点反向加载方式,试验梁两端钢梁段布置支承支座,支承于反力架横梁上,跨中钢箱梁底面布置加载支座,利用千斤顶向上加载,加载装置见图 3。试验加载全程采用位移控制,由连接在千斤顶上部的压力传感器记录每次荷载值。翼板

表 4 不同钢纤维掺量的 UHPC 力学性能

Table 4 Mechanical properties of UHPC with different steel fiber contents

钢纤维掺量/%	0	1	2	3
$f_{cu,t}/\text{MPa}$	8.61	12.36	16.01	20.46
f_{cu}/MPa	113.03	124.44	134.50	145.22
E_s/GPa	39.23	41.67	42.93	44.02

注： $f_{cu,t}$ 为抗拉强度； f_{cu} 为轴心抗压强度。

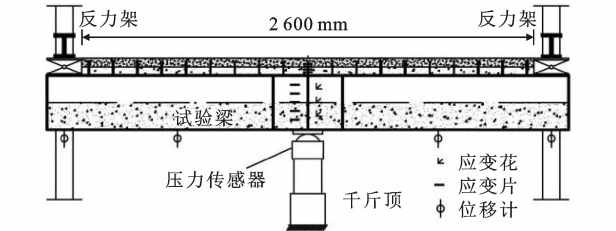


图 3 加载装置

Fig. 3 Loading device

开裂前,按每级位移增加 0.5 mm 稳定 2 min 后读数;开裂后,每级位移增加 1 mm 读数,当试件挠度急剧增大时,停止加载。

测点布置如图 3 所示,其中用于测量挠度的位移计分别布置在两端支座、1/4 跨、跨中、3/4 跨处;应变片测点布置在试验梁关键截面的翼板上表面、侧面、下翼缘以及纵向钢筋、钢腹板、钢箱上、下顶板处;一排布置 3 个应变花来测试钢腹板剪力。

2 试验结果与分析

2.1 试验现象及其破坏形态

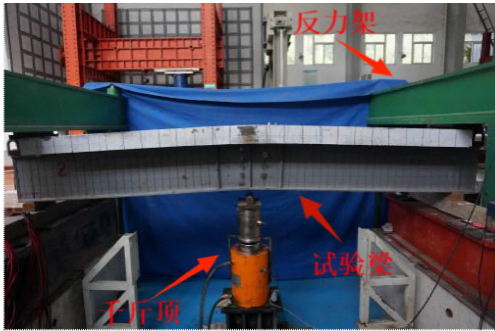
以 UHPC 钢纤维掺量、翼板配筋率、UHPC 相对板厚为研究变量的 6 根梁的试验现象大致相似,窄幅钢箱-UHPC 组合梁的受力全过程大致分为 3 个阶段:

(1)第 1 阶段是弹性阶段,荷载-挠度曲线近似呈直线,翼板未出现裂缝,试验梁处于整体工作阶段。

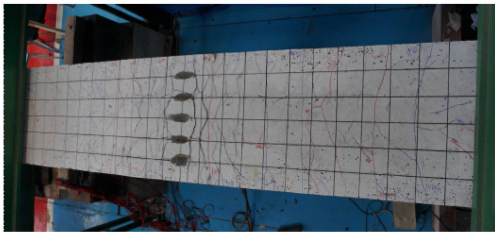
(2)第 2 阶段是裂缝发展阶段,当荷载达到 $8.2\%P_u\sim12.6\%P_u$ (P_u 为极限荷载)时,跨中附近出现第一条裂缝,并迅速贯穿翼板全宽;随着荷载的增加,裂缝呈对称趋势由跨中向两端增加,裂缝间距不断缩小,裂缝宽度逐渐增大,荷载达到 $36.8\%P_u\sim59.6\%P_u$ 时裂缝宽度达到 0.2 mm,试验梁处于开裂后弹性工作阶段。

(3)第 3 阶段是屈服阶段,随着荷载的增加,钢箱率先受拉屈服,试验梁进入屈服阶段,而后钢筋开始屈服,试验梁达到最大承载力。此后试验梁挠度迅速增大,承载力基本保持不变,主裂缝上的钢纤维

逐渐从 UHPC 中拔出,其宽度迅速增大。挠度增大到 30~35 mm,达到试验梁跨径的 1.15%~1.35% 时,跨中钢箱底板、腹板出现明显局部屈曲,加载结束。以 PSCB2 试验梁为例,其破坏形态和翼板裂缝分布如图 4 所示。



(a) PSCB2 破坏形态



(b) PSCB2 翼板裂缝分布

图 4 PSCB2 破坏形态及裂缝分布

Fig. 4 Failure pattern and fracture distribution of PSCB2

2.2 荷载-挠度曲线

以 UHPC 钢纤维掺量、翼板配筋率、UHPC 相对板厚为研究变量,得到不同试验梁荷载-挠度 ($P-\Delta$) 曲线,如图 5 所示。图 5 中以钢纤维掺量 2%、翼板配筋率 2%、UHPC 相对板厚为 0.5 的荷载-挠度曲线为特征线,并标注其 3 个发展阶段。

不同钢纤维掺量的试验梁荷载-挠度曲线如图 5(a)所示。可以看出:钢纤维掺量对刚度影响不大;随着钢纤维掺量的增加,其极限承载能力提高,但提高幅度不大,且提高速率呈递减趋势,钢纤维掺量从 0%增加至 1%、1%增加至 2%、2%增加至 3%时,试验梁极限承载能力分别提高了 2.9%、1.7%、0.8%。不同钢纤维掺量的试验梁在荷载为 $0.7P_u$ 时开始进入屈服阶段,此时试验梁的跨中挠度分别为 9.48、8.42、8.14、8.03 mm,分别减少了 12.6%、3.4%、1.4%。不同配筋率下试验梁的荷载-挠度曲线见图 5(b),在荷载为 $0.7P_u$ 时,配筋率由 1%增加至 2%,其跨中挠度减少了 30.5%。不同 UHPC 相对板厚试验梁的荷载-挠度曲线见图 5(c)。可以看出,UHPC 相对板厚为 0.5 的 PSCB1 比相对板厚为 0 的 PSCB6 刚度大,极限承载力提高了 2.7%,达到屈服荷载时,跨中挠度减少了 22.6%。

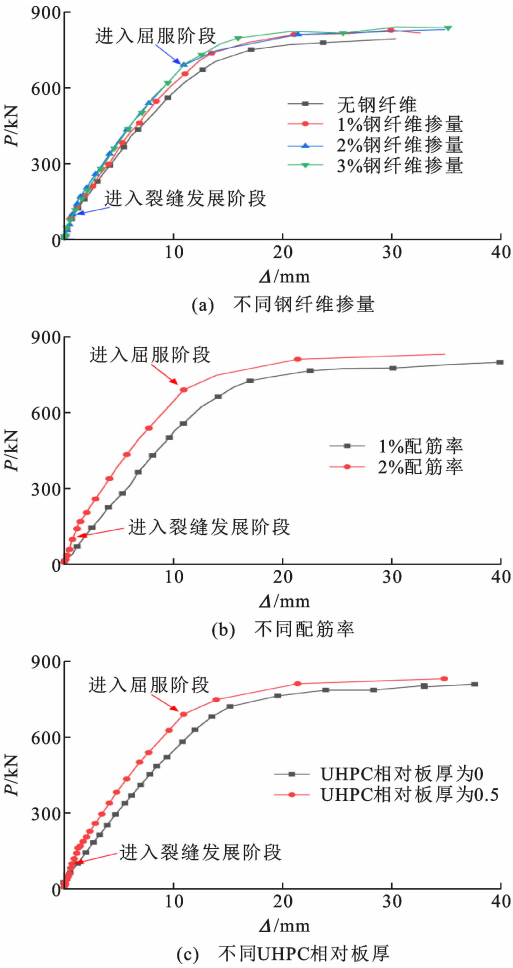


图 5 试验梁荷载-挠度曲线

Fig. 5 Load-deflection curves of test beams

因此,适当地提高钢纤维掺量、翼板配筋率和 UHPC 相对板厚都可以在一定程度上改善试验梁延性,提高试验梁的承载能力。

2.3 跨中应变分布

以钢箱变形较大的 PSCB3 试验梁为例,根据所测得的钢箱顶板、腹板、底板应变得出跨中截面应变 ϵ 沿梁高 h 的分布情况,如图 6 所示,其中钢-混凝土组合箱梁屈服应变分界线取 $\pm 1\,200 \times 10^{-6}$ 。由图 6 可知,钢箱梁在屈服之前,应变沿梁高基本呈线性分布,符合平截面假定。

试验梁 PSCB3 跨中纵向钢筋和箱底的荷载-平均应变关系曲线如图 7 所示。可以看出:在开始加载时,荷载-纵向钢筋应变曲线近似直线,即钢筋和混凝土共同受力;曲线出现首次转折表明混凝土开裂并逐渐退出工作;曲线峰值对应试验梁极限承载力,此时钢筋应变为 $2\,396 \times 10^{-6}$,已经达到屈服。荷载-箱底应变曲线在 $0.58P_u$ 处首次转折,此时应变为 $1\,926 \times 10^{-6}$,超过其屈服应变;随后进入塑性

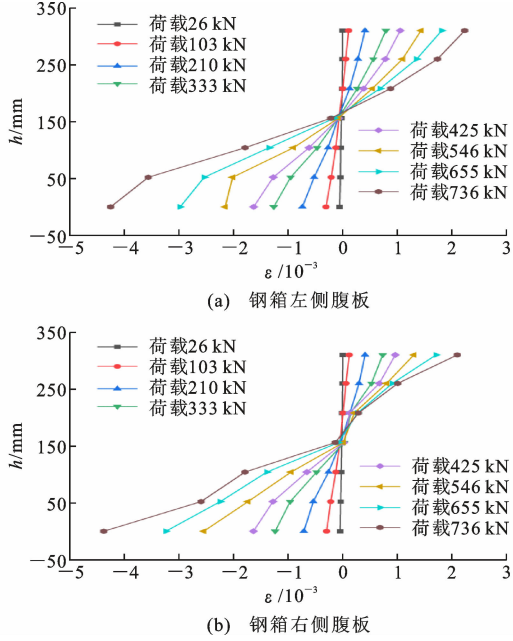


图 6 PSCB3 跨中截面应变沿梁高分布

Fig. 6 Strain distribution along height in mid-span section of PSCB3

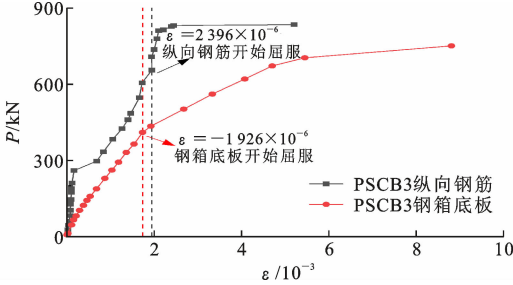


图 7 PSCB3 纵向钢筋、箱底荷载-平均应变曲线

Fig. 7 Load-mean strain curves of longitudinal reinforcement and box bottom of PSCB3

阶段,由于箱内充填 UHPC 的约束作用,试验梁的承载力并不会急剧下降。

3 试验梁参数影响分析

3.1 配筋率对裂缝的影响

对于负弯矩区承受荷载的组合梁而言,控制裂缝发展对结构的受力性能非常重要,《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》^[16] 规定一般在一类、二类环境下耐久性裂缝不超过 0.2 mm。试验梁 PSCB1 和 PSCB5 初始开裂荷载分别为 $11.9\%P_u$ 和 $14.4\%P_u$,初始裂缝都出现在跨中附近,并迅速贯穿整个翼板,宽度为 0.02 mm。荷载加载到 $52.2\%P_u$ 和 $58.8\%P_u$ 时,裂缝宽度达到 0.2 mm。荷载加载至约 535 kN 时不再出现新的裂缝,荷载分别达到 $86\%P_u$ 和 $88\%P_u$ 时,翼板纵筋屈服,此

时 PSCB1 和 PSCB5 主裂缝宽度达到 0.48、1.16 mm,此后随荷载增加裂缝宽度迅速增大。配筋率 ρ 对裂缝宽度的影响如图 8 所示。配筋率较高的 PSCB1($\rho=2\%$)裂缝间距约为 4.8 mm,配筋率低的 PSCB5($\rho=1\%$)裂缝间距约为 6 mm,裂缝密度随配筋率增大而增大,PSCB5 的裂缝宽度扩展速率要明显高于 PSCB1。

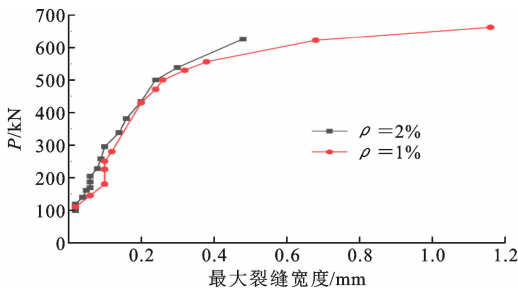


图 8 配筋率对裂缝宽度的影响

Fig. 8 Effect of reinforcement ratio on crack width

3.2 UHPC 钢纤维掺量对裂缝的影响

不同钢纤维掺量的试验梁,其翼板裂缝发展也有区别。试验梁的初始开裂荷载分别为 65(无钢纤维)、74.4(1%钢纤维)、98.4(2%钢纤维)、106 kN(3%钢纤维),初始开裂荷载随钢纤维掺量增加而增大,其主要原因是 UHPC 内部结构密实性好、孔隙率低,内部分布的钢纤维可以承担部分拉力,从而延缓甚至抑制裂缝的产生和发展。4 根试验梁的荷载增加到 $36.8\%P_u$ 、 $46.2\%P_u$ 、 $52.2\%P_u$ 、 $59.6\%P_u$ 时,裂缝宽度 ω 达到 0.2 mm。钢纤维掺量对裂缝宽度的影响见图 9。可以看出:钢纤维掺量对裂缝宽度扩展速率影响不大,但钢纤维掺量的增加可有效控制翼板裂缝宽度;随着钢纤维掺量的增加,试验梁主裂缝($\omega\geq 0.2$ mm)数量减少。不同钢纤维掺量所对应的试验梁裂缝宽度及数量见表 5。

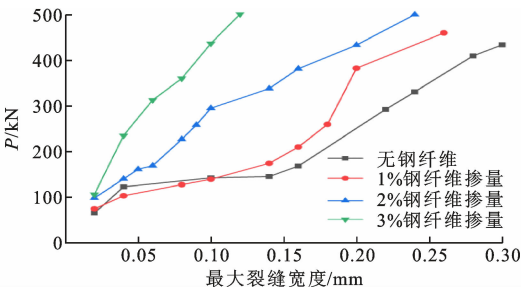


图 9 钢纤维掺量对裂缝宽度的影响

Fig. 9 Effect of steel fiber content on crack width

3.3 UHPC 相对板厚对裂缝的影响

UHPC 相对板厚对裂缝发展也有一定影响。UHPC 相对板厚为 0 和 0.5 时,试验梁初始开裂荷

载分别为 63、98.4 kN,初始开裂荷载提高了 56%;荷载加载到 $52.2\%P_u$ 和 $57.6\%P_u$ 时,裂缝宽度达

表 5 裂缝宽度及数量

Table 5 Crack width and number

试验梁 编号	不同裂缝宽度下的裂缝数量		
	$\omega\geq 0.2$ mm	$0.1\text{ mm}<\omega<0.2$ mm	$0<\omega\leq 0.1$ mm
PSCB1	5	2	12
PSCB2	16	3	0
PSCB3	10	7	3
PSCB4	5	3	3
PSCB5	3	5	8
PSCB6	13	3	0

到 0.2 mm,故 UHPC 材料对混凝土抗裂有明显作用。UHPC 相对板厚对裂缝宽度的影响如图 10 所示,可以看出:UHPC 相对板厚对裂缝扩展速率影响不大;随着 UHPC 相对板厚增加,试验梁主裂缝数量大大减少;随着荷载的增加,主裂缝宽度发展迅速,对应试验梁的裂缝宽度见表 5。

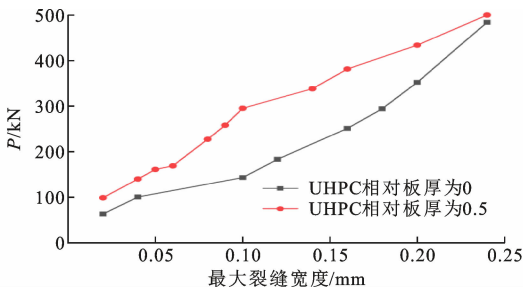


图 10 UHPC 相对板厚对裂缝宽度的影响

Fig. 10 Effect of UHPC relative plate thickness on crack width

通过上述分析可知:提高配筋率可控制试验梁裂缝发展速率及裂缝间距,提高钢纤维掺量和 UHPC 相对板厚都可提高翼板初始开裂荷载;钢纤维掺量从 1% 增加到 2% 时,初始开裂荷载提高 32%;UHPC 相对板厚由 0 增加到 0.5 时,初始开裂荷载提高 56%;增加钢纤维掺量和 UHPC 相对板厚也可有效控制裂缝宽度,减少试验梁主裂缝数量,提高试件耐久性。

4 极限抗弯承载力计算

目前各国学者开展了钢-UHPC 组合梁的抗弯承载力试验研究。褚少辉^[17]通过理论分析和有限元分析相结合的方法研究了钢-混凝土简支组合梁的性能,为了简化分析,对于部分充填混凝土钢箱-UHPC 组合梁采用塑性理论计算抗弯承载力。由于 UHPC 的力学性能与普通混凝土有显著区别,且

UHPC 中钢纤维的桥联作用使混凝土开裂后不会立即退出工作^[18],受拉区的 UHPC 塑性较普通混凝土发展更充分,故 UHPC 面板代替普通混凝土面板时应该考虑 UHPC 开裂后的性能。文献[19]研究表明,计算 UHPC 梁的抗弯承载力应该考虑 UHPC 开裂后的性能。

负弯矩区组合梁组合截面塑性计算模型如图 11 所示。在负弯矩作用下,可将试验梁组合截面弯矩分解为钢箱弯矩和钢箱、UHPC 弯矩的叠加,其中钢箱弯矩为钢梁绕其中和轴产生的塑性弯矩 M_s ,钢箱、UHPC 弯矩为翼板 UHPC 受拉、钢筋受拉和箱内充填 UHPC 产生的弯矩。

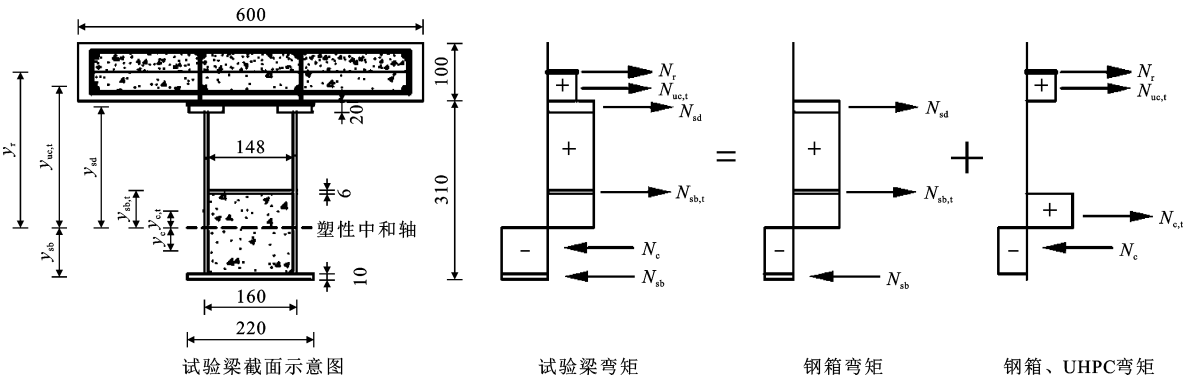


图 11 负弯矩区受弯承载力计算模型(单位:mm)

Fig. 11 Calculation model of flexural capacity in negative moment zone (unit:mm)

由力学平衡得

$$f_r A_r + f_{uc,t} A_{uc,t} + 2f_s (A_{sd} + A_{sb,t}) + f_{c,t} A_{c,t} = f_c A_c + f_s A_{sb} \quad (1)$$

式中: f_r 为钢筋屈服强度; A_r 为钢筋截面面积; $f_{uc,t}$ 为翼板 UHPC 抗拉强度; $A_{uc,t}$ 为翼板 UHPC 截面面积; f_s 为钢材强度设计值; A_{sd} 、 $A_{sb,t}$ 、 A_{sb} 分别为钢箱上部托板截面面积、钢箱腹板截面面积、钢箱底板截面面积; $f_{c,t}$ 为充填 UHPC 抗拉强度; $A_{c,t}$ 为箱内 UHPC 受拉区面积; f_c 为箱内充填 UHPC 抗压强度; A_c 为箱内 UHPC 受压区面积。

由公式(1)得出塑性中和轴位置在钢箱高度的 $1/4 \sim 1/3$ 范围内,由此得到组合截面弯矩 M_u 为

$$M_u = M_s + f_r A_r y_r + f_{uc,t} A_{uc,t} y_{uc,t} + f_{c,t} A_{c,t} y_{c,t} + f_c A_c y_c \quad (2)$$

式中: M_s 为钢梁截面塑性抗弯承载力, $M_s = 2f_s A_{sd} \cdot y_{sd} + 2f_s A_{sb,t} \cdot y_{sb,t} + f_s A_{sb} \cdot y_{sb}$, y_{sd} 、 $y_{sb,t}$ 、 y_{sb} 分别为钢箱上翼缘、钢箱腹板、钢箱底板形心到塑性中和轴的距离; y_r 为钢筋形心到塑性中和轴的距离; $y_{uc,t}$ 为翼板 UHPC 形心到塑性中和轴的距离; $y_{c,t}$ 、 y_c 分别为箱内受拉区 UHPC 和箱内受压区 UHPC 形心到塑性中和轴的距离。

根据公式(1)、(2)得到各试验梁极限抗弯承载力计算值,并与试验值进行对比,结果如表 6 所示,其中 M_u 、 $M_{u,s}$ 分别为试验梁极限抗弯承载力计算值和试验值。从表 6 可以看出,各试验梁极限抗弯承载力计算值与试验值比值最大为 1.05,最小为 0.89,

表 6 试验梁极限抗弯承载力试验值与计算值对比

Table 6 Comparison of ultimate flexural capacity of test beam between test value and calculated value

试验梁编号	M_u /kN	$M_{u,s}$ /kN	$M_u/M_{u,s}$
PSCB1	533.27	520.00	1.03
PSCB2	480.42	500.50	0.96
PSCB3	507.40	537.68	0.94
PSCB4	564.23	534.95	1.05
PSCB5	464.24	497.25	0.93
PSCB6	417.47	468.02	0.89

都接近 1,说明计算值和试验值吻合较好,塑性简化理论适用于窄幅钢箱-UHPC 组合梁的承载力计算。试验梁 PSCB1 和 PSCB4 计算值比试验值偏大,其原因是试验梁发生破坏时钢箱出现不同程度的外凸屈曲,而试验梁还未达到全界面塑性^[20]。对比试验梁 PSCB1 和 PSCB5,翼板配筋率由 1%增加至 2%,其抗弯承载力增加了 15%,即增加翼板配筋率可以提高窄幅钢箱-UHPC 组合梁的抗弯承载力。

5 结 语

(1)本文考虑翼板配筋率、翼板 UHPC 相对厚度、翼板 UHPC 钢纤维掺量等参数,完成了 6 根窄幅钢箱-UHPC 组合梁反向静力加载试验,研究表明窄幅钢箱-UHPC 组合梁受力过程大致分为 3 个阶段:弹性阶段、裂缝发展阶段、屈服阶段。在达到极限承载力后,试验梁随变形增大,承载力下降不明显,表现出良好的塑性变形能力。

(2)提高钢纤维掺量、配筋率和 UHPC 相对板厚都可以在一定程度上改善组合梁延性,提高其承载力,其中配筋率对试件承载力影响最大,配筋率由 1%增加至 2%时,其抗弯承载力提高 15%。

(3)钢纤维掺量和 UHPC 相对板厚对翼板裂缝的开裂荷载和宽度有较明显的影响。提高钢纤维掺量和 UHPC 相对板厚都可提高翼板初始开裂荷载,钢纤维掺量从 1%增加到 2%时,初始开裂荷载提高 32%,UHPC 相对板厚由 0 增加到 0.5 时,初始开裂荷载提高 56%。增加钢纤维掺量和 UHPC 相对板厚也可有效控制裂缝宽度,从而减少结构主裂缝数量。提高配筋率可控制试件裂缝发展速率及裂缝间距。

(4)采用简化塑性理论推导出窄幅钢箱-UHPC 组合梁承载力公式,其计算值与试验值吻合良好,表明塑性理论适用于窄幅钢箱-UHPC 组合梁的承载力计算。

参考文献:

References:

- [1] LEBET J P, HIRT M A. Steel bridges; conceptual and structural design of steel and steel-concrete composite bridges[M]. New York: EPFL Press, 2014.
- [2] 张洪祥. 钢-混组合连续梁桥负弯矩区的 UHPC 应用研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
ZHANG Hongxiang. UHPC application research on negative moment area of steel-composite composite continuous beam bridge [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.
- [3] WILLE K, EL-TAWIL S, NAAMAN A E. Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading[J]. Cement and Concrete Composites, 2014, 48: 53-66.
- [4] PARK S H, KIM D J, RYU G S, et al. Tensile behavior of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34(2): 172-184.
- [5] 周 安, 戴 航, 刘其伟. 钢箱-预应力混凝土组合梁负弯矩区结构性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(12): 69-75.
ZHOU An, DAI Hang, LIU Qiwei. Experimental study of the structural behavior of the negative bending zone of steel box-prestressed concrete composite beams [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(12): 69-75.
- [6] 余志武, 张大付, 焦 姣. 钢-混凝土连续组合箱梁负

弯矩区极限抗弯承载力研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11(2): 1-6.

YU Zhiwu, ZHANG Dafu, JIAO Jiao. Research on ultimate flexural bearing capacity of negative moment area for steel-concrete composite continuous box girder[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2014, 11(2): 1-6.

- [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.

LIU Xinhua, ZHOU Cong, ZHANG Jianren, et al. Experiment on negative bending behavior of steel-UHPC composite beams[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(5): 110-121.

- [8] 樊健生, 聂建国, 张彦玲. 钢-混凝土组合梁抗裂性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(2): 1-7.

FAN Jiansheng, NIE Jianguo, ZHANG Yanling. Experimental study of crack resistance of steel-concrete composite beams[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(2): 1-7.

- [9] 张彦玲, 阎贵平, 安明喆, 等. 钢-活性粉末混凝土组合梁的极限承载力[J]. 北京交通大学学报, 2009, 33(1): 81-85.

ZHANG Yanling, YAN Guiping, AN Mingzhe, et al. Ultimate bearing capacity of steel-reactive powder concrete composite beams[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2009, 33(1): 81-85.

- [10] 王 彬, 刘来君, 季建东. 临猗黄河大桥组合梁负弯矩区力学性能优化措施研究[J]. 桥梁建设, 2021, 51(6): 85-91.

WANG Bin, LIU Laijun, JI Jiandong. Study of mechanical property optimization measures for composite girder negative moment zone of Linyi Huanghe River bridge[J]. Bridge Construction, 2021, 51(6): 85-91.

- [11] 周逸松. 考虑滑移效应的钢-混连续组合梁负弯矩区抗裂特性研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.

ZHOU Yisong. Study on anti-cracking characteristics of negative moment regions of steel-concrete continuous composite girder considering slip effect[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.

- [12] 苏庆田, 杨国涛, 吴 冲. 斜腹板钢箱组合梁负弯矩区非线性受力性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(11): 1589-1595.

SU Qingtian, YANG Guotao, WU Chong. Non-linear behavior of hogging moment zone of inclined web steel-box composite girder[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(11): 1589-1595.

- [13] 曹洪亮, 陈 亮, 姜竹昌, 等. 钢-混组合连续箱梁施工

- 预拱度设置影响因素研究[J]. 世界桥梁, 2020, 48(3):53-57.
- CAO Hongliang, CHEN Liang, JIANG Zhuchang, et al. Study of influential factors on pre-camber setting for steel-concrete composite continuous box girder during construction [J]. World Bridges, 2020, 48(3):53-57.
- [14] 莫时旭,林飞扬,胥海宁. 充填式钢箱-砼组合梁抗弯性能试验研究[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2017,39(2):107-112,132.
- MO Shixu, LIN Feiyang, XU Haining. Experimental study on the flexural performance of concrete-filled steel-box composite beams [J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2017, 39(2):107-112,132.
- [15] 陈国红,徐 召. 大跨径钢-混组合梁斜拉桥主梁力学特性研究[J]. 桥梁建设,2019,49(5):39-44.
- CHEN Guohong, XU Zhao. Study of mechanical property of main girder for long-span steel-concrete composite girder cable-stayed bridge[J]. Bridge Construction,2019,49(5):39-44.
- [16] 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范:JTG 3362—2018[S]. 北京:人民交通出版社,2018.
- Specifications for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts; JTG 3362—2018[S]. Beijing:China Communications Press,2018.
- [17] 褚少辉. 钢-混凝土简支组合梁的性能研究与数值分析[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2013.
- CHU Shaohui. Performance study and numerical analysis of steel-concrete simply supported composite beams[D]. Shijiazhuang:Shijiazhuang Tiedao University,2013.
- [18] 王皓磊,孙 韬,刘晓阳,等. 钢-UHPC 连续组合梁抗弯性能试验[J]. 中国公路学报, 2021, 34(8):218-233.
- WANG Haolei, SUN Tao, LIU Xiaoyang, et al. Experimental investigation on flexural capacity of steel-UHPC continuous composite girder[J]. China Journal of Highway and Transport,2021,34(8):218-233.
- [19] GRAYBEAL B A. Characterization of the behavior of ultra-high performance concrete [D]. College Park: University of Maryland,2005.
- [20] 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.
- YANG Hailin, ZHENG Yan, MO Shixu. Experimental investigation effect of partially-filled concrete on mechanical behavior of narrow-width steel box concrete composite beam in negative moment region[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(11):131-139.