

配筋率对钢箱-UHPC 组合梁裂缝特征的影响

莫时旭^{1,2}, 房洋洋^{1,2}, 郑艳^{1,2}, 农双秀^{1,2}

(1. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004;

2. 广西绿色建材与建筑工业化重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要:为研究钢箱-超高性能混凝土(UHPC)组合梁负弯矩区裂缝特征,设计制作了3根配筋率分别为1%、2%和3%的UHPC翼板部分充填窄幅钢箱组合梁,通过对不同配筋率的试验梁进行反向加载试验研究组合梁的裂缝发展特征,并对最大裂缝宽度、裂缝间距及开裂荷载进行对比分析。研究表明:试验梁在不同配筋率条件下,UHPC面层裂缝发展明显不同,配筋率越高最大裂缝宽度越小,裂缝越密集,开裂荷载越大;与配筋率为1%的试验梁相比,配筋率为2%和3%的试验梁的开裂弯矩分别提高了30.3%和65.2%;可根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ 3362—2018)中的裂缝宽度计算公式乘以0.78的修正系数,来计算窄幅钢箱-UHPC组合梁负弯矩区的裂缝宽度。

关键词:窄幅钢箱组合梁;配筋率;裂缝发展特征;负弯矩区

中图分类号:U441

文献标志码:A

Effect of reinforcement ratio on crack characteristics of steel box-UHPC composite beam

MO Shixu^{1,2}, FANG Yangyang^{1,2}, ZHENG Yan^{1,2}, NONG Shuangxiu^{1,2}

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

2. Guangxi Key Laboratory of Green Building Materials and Construction Industrialization, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to study the crack characteristics of steel box-ultra-high performance concrete (UHPC) composite beam in negative bending moment zone, three partially-filled narrow steel box-UHPC flange composite beams with reinforcement ratios of 1%, 2% and 3% were designed and manufactured. The crack development characteristics of the composite beams with different reinforcement ratios were observed by reverse loading test, and the maximum crack width, crack spacing and crack load were compared and analyzed. The research results show that the crack development of UHPC surface layer is obviously different with different reinforcement ratios. The higher the reinforcement ratio is, the smaller the maximum crack width, the denser the crack spacing and the greater the crack load become. Compared with the specimens with reinforcement ratio of 1%, the cracking bending moment of the specimens with reinforcement ratio of 2% and 3% increased by 30.3% and 65.2% respectively. The crack width of narrow steel box-UHPC composite beams in negative moment zone can be calculated with the crack width calculation formula in the *Specifications for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridges and Culverts* (JTJ 3362—2018) by multiplying a correction factor of 0.78.

Key words: narrow steel box composite beam; reinforcement ratio; crack development characteristics; negative bending moment zone

收稿日期:2023-10-21

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);广西绿色建材与建筑工业化重点实验室项目(桂科能22-J-21-1)

作者简介:莫时旭(1964—),男,广西桂林人,教授,博士,主要从事钢混组合结构桥梁设计理论研究。

郑艳(1973—),女,山东临沂人,正高级实验师,主要从事钢混组合结构研究,本文通信作者。

E-mail:2008064@glut.edu.cn

超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)因力学性能良好受到广泛关注。王晖等^[1-2]研究发现超高性能混凝土具有韧性好、强度高和材质轻等性能,在建筑结构、桥梁结构等领域被广泛应用。孙世国等^[3]研究发现,加入钢纤维的UHPC开裂后呈现应力硬化行为,表明加入钢纤维可以提高UHPC的抗拉性能。近年来,已有学者对连续组合梁负弯矩区翼板开裂问题进行了试验研究和理论分析。UHPC梁板的受弯试验^[4-8]表明,将UHPC替代普通混凝土(normal concrete, NC)浇筑梁板,可以有效提高负弯矩区的抗弯曲性能和抗裂性能,提高翼板配筋率可以在一定程度上抑制裂缝的发展,增强抗弯承载力。俞弘志等^[9]运用MIDAS FEA建立空间精细化模型,对普通混凝土梁负弯矩区翼板开裂问题进行了研究,发现影响裂缝宽度的因素还包括抗剪连接件强度。严永红等^[10]通过对高强螺栓在钢-混组合梁的应用试验研究表明,高强螺栓可以满足工程的需要。在实际桥梁工程中^[11-12],桥面板开裂还受到自重、温度和湿度的影响,但配筋率是影响开裂的重要原因。文献^[13-16]通过钢-UHPC轻型组合桥面系的受弯性能试验研究,总结了配筋率对钢-UHPC组合桥面裂缝发展及开裂影响规律,表明在负弯矩作用下,UHPC层开裂荷载受翼板配筋率的影响较大,适当提高配筋率可大幅提高开裂应力。徐海滨等^[17]通过超高性能混凝土T形简支梁的受弯性能试验,探讨了纵筋配筋率对裂缝宽度和裂缝间距的影响,结果表明加大纵筋配筋率会增强对裂缝发展的限制,纵筋配筋率越高,最大裂缝宽度和裂缝间距越小。可见,配筋率对构件的裂缝发展影响较大。目前国内外对于考虑UHPC材料特性的窄幅钢箱组合梁抗裂性能的试验研究样本较少,缺乏定量分析配筋率对钢箱-UHPC组合梁裂缝特征的影响和裂缝宽度的计算方法。

为研究UHPC翼板部分充填窄幅钢箱组合梁中支座区受力特征,通过对3根简支组合试验梁进行反向加载试验,分析配筋率对负弯矩区的翼板抗裂能力、裂缝发展过程、裂缝间距、最大裂缝宽度等特征的影响,并给出最大裂缝宽度计算方法,为实际工程提供参考。

1 试验概况

1.1 试验梁设计

本研究采用简支梁三点反向加载试验模拟窄幅钢箱-UHPC翼板连续组合梁中支座区受力特点。设计制作了3根不同配筋率的简支组合梁试件,编号为SUCB-1、SUCB-2、SUCB-3,配筋率分别为1%、2%和3%。试验梁由窄幅钢箱与混凝土翼板通过栓钉连接件结合而成,钢箱内部分为上下两个箱室且均为半充填,混凝土翼板由UHPC层和C40普通混凝土层组成,厚度均为50 mm,其中UHPC钢纤维掺量均为2%。

试验梁长3 000 mm,翼板长2 600 mm,高100 mm,支座距离梁端200 mm,试验梁截面高410 mm。钢箱为窄幅槽形截面,由底板、腹板、托板和水平隔板构成,厚度分别为10、6、20和6 mm;钢箱采用Q235级钢板焊接而成,钢箱隔板留有直径100 mm的圆孔,以浇筑和振捣混凝土;栓钉规格为M16×80。根据极限平衡法,以3%配筋率试验梁所需栓钉为标准统一进行栓钉布置。钢箱立面及栓钉布置如图1所示。

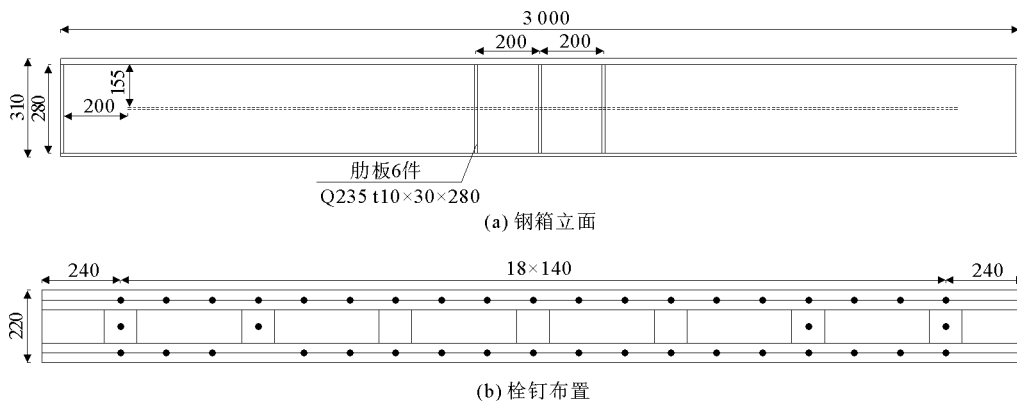


图1 钢箱梁尺寸图

Fig. 1 Dimensions of steel box girder

钢板厚度为 6、10 和 20 mm 的实测屈服强度分别为 296.53、258.63 和 243.87 MPa,实测抗拉强度分别为 419.87、372.10 和 292.67 MPa。HRB400 级钢筋直径为 12、14 和 16 mm,测得其屈服强度分别为 411.72、416.34 和 432.32 MPa,实测抗拉强度分别为 566.42、571.31 和 639.63 MPa。HPB300 级钢筋直径为 6 mm,测得其屈服强度为 325.63 MPa,抗拉强度为 433.28 MPa。钢材的弹性模量均为 2.06×10^5 MPa。试验梁横截面如图 2 所示。

混凝土浇筑过程:首先浇筑钢箱 UHPC;经过养护待钢箱充填 UHPC 达到一定强度后,再浇筑翼板下层 C40 混凝土,养护 28 d;最后浇筑翼板上层含 2% 钢纤维掺量的 UHPC 层。每浇筑 1 片梁,均预留 3 组 UHPC 试块和 NC 试块来测其抗压强度,试块大小分别为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 和 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 。为测得钢纤维掺量 2% 的 UHPC 的抗折强度和轴心抗拉强度,制作了 3 组棱柱体试块和狗骨头试块,其大小分别为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 和 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$,并与试验梁在同等条件下养护 28 d,测得标准立方体试块抗压强度平均值 \bar{f}_{cu} 为 40.76 MPa,已满足设计强度标准。混凝土的材料性能如表 1 所示。

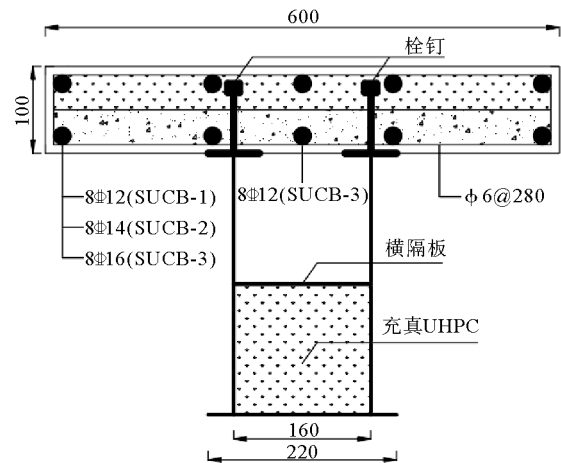


图 2 试验梁横截面图

Fig. 2 Cross section of test beams

表 1 混凝土材料性能

Table 1 Material properties of concrete

材料	抗压强度/MPa	抗折强度/MPa	轴心抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
NC	40.76	5.43	2.41	34.50
UHPC	117.16	16.26	7.35	37.25

1.2 测点布置及加载过程

采用电阻应变片测量跨中截面应变,测点位于跨中截面的翼板顶面、侧面和钢箱两侧肋板之间及钢箱上、下缘处。应变花测点位于钢箱两侧肋板之间,用于测量钢箱腹板应变。

采用百分表测量挠度,用于测量支座处挠度的位移计为 N1~N4;位移计 N5、N6 分别测量 1/4 跨和 3/4 跨处挠度,通过 2 个钢角架,由磁性基座固定在钢箱底板处;位移计 N7、N8 分别测量跨中处两侧挠度。采用千分表测量梁端翼板与钢箱间相对滑移,滑移计 H1~H4 分别测量翼板相对钢箱的滑移,通过 4 个钢角架和磁性基座,将滑移计分别固定在翼板两端进行测量。钢箱应变片位置及测点布置如图 3 所示,翼板应变片布置如图 4 所示。

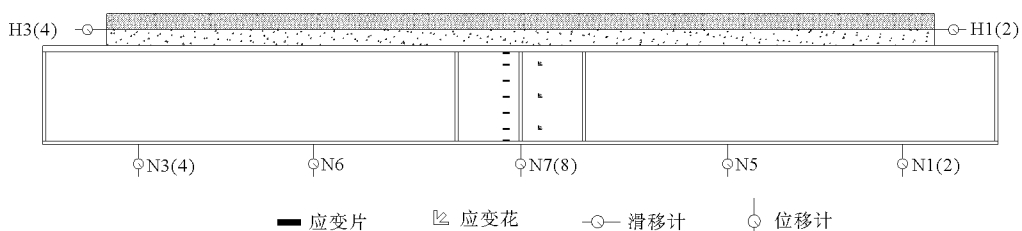


图 3 试验梁测点布置图

Fig. 3 Layout of measurement points of test beams

2.2 钢筋应变

钢筋的应变曲线如图 7 所示,试验梁 SUCB-1、SUCB-2 和 SUCB-3 在加载初期钢筋应变与荷载呈线性相关,翼板在开裂之前和开裂早期,混凝土也承担部分拉应力;随着荷载的增大,钢筋的应力和应变均会增加;而当翼板开始出现裂缝以后,翼板拉应力主要由纵向钢筋承担。由图 7 可知,试验梁 SUCB-1、SUCB-2 和 SUCB-3 分别在 100、110 和 220 kN 出现第 1 个转折点,这是因为 3 根试验梁混凝土翼板在当前荷载下出现了第 1 条贯穿裂缝,钢筋应力突变。在首个转折点后,由于试验梁的中和轴趋于稳定,使钢筋应变随着荷载的增加线性增加,但钢筋的刚度变小,当应变达到 1300×10^{-6} 时,钢筋完全屈服。试验结果表明,在同一荷载下,配筋率越高的试验梁,钢筋应变值越小。

2.3 混凝土应变

混凝土应变随荷载变化关系是通过翼板顶面应变片测得的。如图 8 所示,在加载初期,应变值线性增加,直到图中虚线 1 所示位置,可认为在此之前为直线,处在线弹性阶段。在非线弹性阶段,即虚线 1 与虚线 2 之间,应变的增长速率要比线弹性阶段快,荷载-应变关系逐渐呈现出上凸型曲线,在试验梁达到极限承载力状态后,主裂缝宽度迅速增大,应变值也急剧增加。

整体而言,在加载初期,3 根试验梁的混凝土翼板应变相对稳定。随着加载的进行,首先在跨中出现微裂缝,当翼板开裂以后会发生应力重分布,应变开始变得不稳定,应变值发生显著变化。另外,在后期加载中混凝土应变不均匀,这是因为钢箱附近混凝土翼板存在剪力滞效应,埋设在混凝土中的栓钉也存在应力集中和局部缺陷。

2.4 裂缝特征

各试验梁的翼板顶面裂缝分布如图 9 所示, SUCB-1、SUCB-2 和 SUCB-3 的开裂荷载分别为 89、98 和 136 kN。达到开裂荷载时,3 根试验梁翼板跨中边缘都出现微裂缝,随着荷载的增加翼板上细小裂缝增多并且逐渐变宽变长。3 根试验梁出现第 1 条贯穿裂缝的荷载分别为 100、110 和 220 kN,裂缝宽度均为 0.02 mm。由图 10 可知,裂缝宽度为 0.05 mm 时的荷载分别为 119、180 和 244 kN,裂缝宽度为 0.20 mm 时的荷载分别为 453、596 和 672 kN。

荷载增至 400 kN 以后,试验梁 SUCB-1 随着加载的进行,几乎没有新裂缝的产生,而是在原有裂缝上滋生次裂缝;试验梁 SUCB-2 和试验梁 SUCB-3 分别在荷载增至 500 和 600 kN 以后,同样不再出现新裂缝,但主裂缝变宽幅度相对于试验梁 SUCB-1 有所减小。当 3 根试验梁达到极限承载力状态时,主裂缝宽度分别为 0.56、0.40 和 0.30 mm。由图 9 可看出,配筋率越低的试验梁裂缝分布越稀疏,贯穿裂缝分布越均匀。试验表明,配筋率越高的试验梁裂缝扩展速率越慢。

3 根试验梁的裂缝间距差异较大,试验梁的裂缝间距值如表 2 所示,可见试验梁 SUCB-1、SUCB-2 和 SUCB-3 的平均裂缝间距为 76.94、62.47 和 41.90 mm。试验梁 SUCB-1 的裂缝间距较大,主要集中在 60~100 mm;试验梁 SUCB-2 的裂缝间距主要分布在 20~60 mm;而试验梁 SUCB-3 的裂缝间距主要分布在 20~40 mm。试验梁达到极限承载力后的贯穿裂缝数与裂缝宽度分布如图 11 所示,3 根试验梁裂缝宽度小于 0.05 mm 的裂缝数占比分别为 6.66%、28.57% 和 41.66%,裂缝宽度大于 0.20 mm 的裂缝数占比分别为 26.67%、21.43% 和 16.67%。分析可知,配筋率高的试验梁衍生次裂缝占比较高,裂缝相对密集,裂缝宽度要比配筋率低的试验梁更窄。

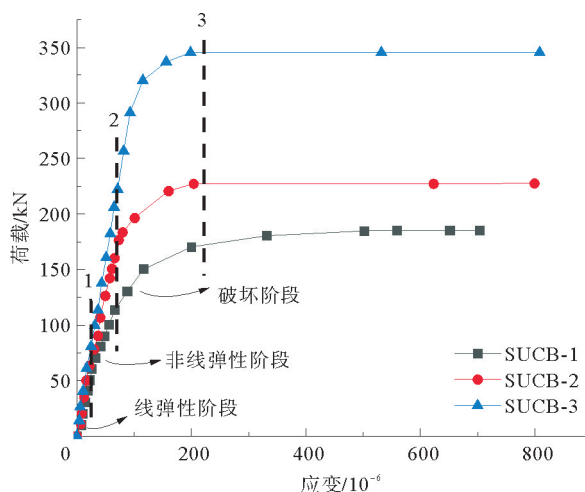
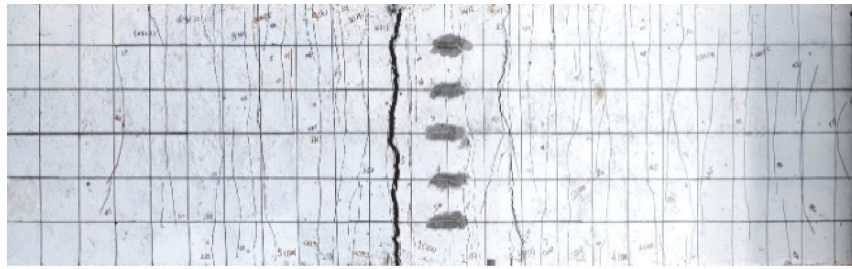
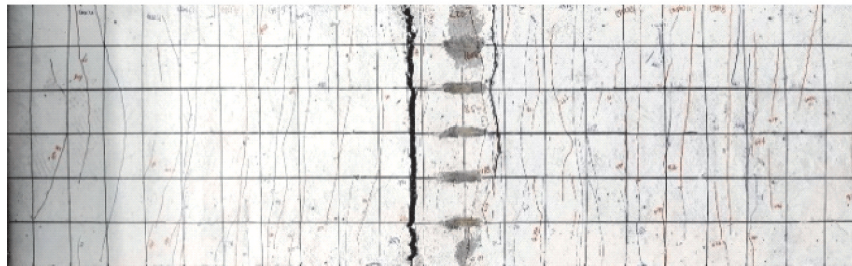


图 8 混凝土应变曲线

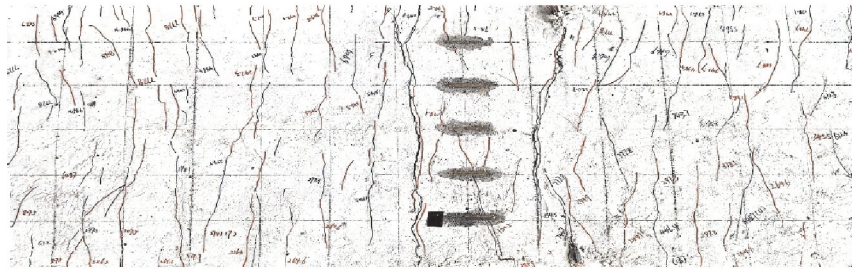
Fig. 8 Strain curve of concrete



(a) SUCB-1



(b) SUCB-2



(c) SUCB-3

图9 试验梁翼板顶面裂缝图

Fig. 9 Cracks on the top surface of flange of test beams

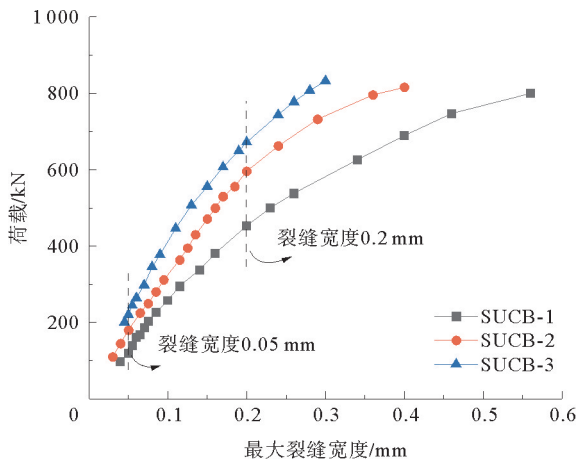


图10 荷载-最大裂缝宽度曲线图

Fig. 10 Load-maximum crack width curve

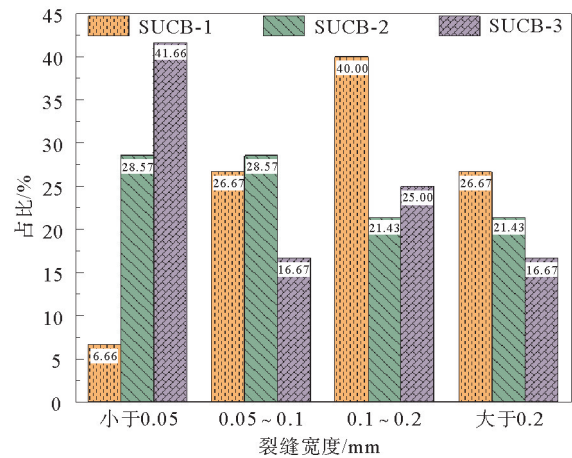


图11 贯穿裂缝数量与裂缝宽度分布图

Fig. 11 Distribution of the number and width of penetrating cracks

3 理论计算结果与试验结果对比

3.1 开裂弯矩计算

试验梁混凝土翼板在开裂前使用弹性理论计算方法,将部分充填砼窄幅钢箱组合梁截面换算为混凝土截面,仍能满足平截面假定,即通过截面换算法求出开裂弯矩。由于截面中和轴在钢箱截面内,因此混凝土翼板均受拉,在受拉翼板开裂前,无需考虑滑移的影响。公式如下:

$$M_{cr} = \frac{\sigma_c I_{sh}}{y_c} \quad (1)$$

式中: M_{cr} 为开裂弯矩; I_{sh} 为换算后截面惯性矩; σ_c 为 UHPC 的开裂应力; y_c 为翼板混凝土顶面到换算组合截面中和轴的距离。

将试验结果与上述方法求出的开裂弯矩进行对比,结果如表 3 所示。从表中数据可以看出,试验值与计算值差距均小于 5%,试验梁 SUCB-2 与试验梁 SUCB-3 相对试验梁 SUCB-1 来说,开裂弯矩分别提高了 30.3% 和 65.2%。尽管试验值与计算值存在差异,但二者数值基本接近,所以在实际使用过程中,可用截面换算法计算钢箱-UHPC 组合梁的开裂弯矩。

3.2 裂缝宽度计算

根据国内相关规范^[18],裂缝宽度 W_{cr} 计算采用如下公式:

$$W_{cr} = C_1 C_2 C_3 \frac{\sigma_{ss}}{E_s} \left(\frac{c+d}{0.30+1.4\rho_{te}} \right), \quad (2)$$

$$\rho_{te} = \frac{A_s}{A_{te}}, \quad (3)$$

$$\sigma_{ss} = \frac{M y_s}{I_{cr}} \quad (4)$$

式中: C_1 为钢筋表面形状系数; C_2 为长期效应影响系数; C_3 为构件受力性质相关系数; σ_{ss} 为钢筋应力; c 为钢筋保护层厚度, mm; d 为纵向钢筋直径, mm; E_s 为钢筋弹性模量; ρ_{te} 为纵向受拉钢筋配筋率, A_s 为纵向钢筋截面面积, A_{te} 为受拉混凝土截面面积; y_s 为中性轴至纵向受拉钢筋的距离; I_{cr} 为开裂后截面惯性矩。

根据公式(2)计算 0.4、0.6 和 0.8 倍极限荷载 (P_y) 时的裂缝宽度值,并将其与试验值对比,如表 4 所示。

表 4 裂缝宽度计算值与试验值对比

Table 4 Comparison of crack width between theoretical and experimental results mm

荷载	SUCB-1		SUCB-2		SUCB-3	
	计算值	试验值	计算值	试验值	计算值	试验值
0.4 P_y	0.10	0.08	0.15	0.12	0.29	0.22
0.6 P_y	0.16	0.12	0.21	0.16	0.35	0.28
0.8 P_y	0.18	0.14	0.28	0.22	0.46	0.36

由表 4 可知,试验梁 SUCB-1、SUCB-2 和 SUCB-3 裂缝宽度计算值与试验值之比为 1.25~1.33,平均为 1.28,误差较大,这是由于 3 根试验梁翼板中均含有 2% 的钢纤维,而钢纤维能够传递和分配混凝土结构内

的应力,对裂缝起到桥接作用,对翼板开裂有很好的限制作用,因此,裂缝宽度计算值相较于试验值会偏大。

按照规范(JTG 3362—2018)^[18]计算所得裂缝宽度值与计算值差距较大,因此提出UHPC材料系数对规范公式进行修正,修正公式如下:

$$W_{cr} = C_1 C_2 C_3 C_4 \frac{\sigma_{ss}}{E_s} \left(\frac{c+d}{0.30+1.4\rho_{te}} \right) \quad (5)$$

式中, C_4 为UHPC材料修正系数。

根据裂缝宽度试验值与公式(5)对裂缝宽度修正系数 C_4 进行回归分析,结果见表5,修正后裂缝宽度计算值与试验值对比如表6所示。

表5 UHPC材料修正系数

Table 5 Correction factor of UHPC

荷载	SUCB-1	SUCB-2	SUCB-3	平均值
0.4 P_y	0.780	0.760	0.790	0.777
0.6 P_y	0.790	0.780	0.810	0.793
0.8 P_y	0.780	0.790	0.750	0.773
平均值	0.783	0.777	0.783	0.781

表6 裂缝宽度计算修正值与试验值对比

Table 6 Comparison of crack width between the corrected and experimental results

mm

荷载	SUCB-1		SUCB-2		SUCB-3	
	计算修正值	试验值	计算修正值	试验值	计算修正值	试验值
0.4 P_y	0.078	0.080	0.117	0.120	0.226	0.220
0.6 P_y	0.125	0.120	0.164	0.160	0.273	0.280
0.8 P_y	0.140	0.140	0.218	0.220	0.359	0.360

由表5可知,各梁回归分析所得平均UHPC材料修正系数 C_4 约为0.78。由表6可知,将裂缝宽度计算值乘以0.78的修正系数后,计算修正值与试验值之比为0.975~1.027,吻合程度接近100%。因此,将规范中裂缝宽度计算公式乘以0.78来计算窄幅钢箱-UHPC组合梁负弯矩区裂缝宽度较好。

4 结论

通过考虑配筋率对UHPC翼板部分充填砼窄幅钢箱组合梁负弯矩区裂缝特征的问题,设计制作3根试验梁并开展试验,研究其裂缝发展特征及裂缝宽度计算方法,得到以下结论:

1) 翼板配筋率对翼板开裂有较大影响,试验表明,配筋率高的试验梁,翼板次裂缝多,裂缝间距小,裂缝比较密集且最大裂缝宽度较小,裂缝发展速率更缓慢。配筋率为3%和2%的试验梁相较于配筋率1%的试验梁的开裂弯矩分别提高了65.2%和30.3%。

2) 试验梁受力全过程可分为弹性阶段、弹塑性阶段和塑性阶段。当达到试验梁所能承受的极限荷载时,试验梁并没有发生脆性破坏,说明部分充填砼窄幅钢箱组合梁具有良好的持荷能力和结构延性。

3) 经UHPC材料修正系数回归分析,得到修正系数为0.78,根据规范(JTG3362—2018)中裂缝宽度计算公式乘以修正系数,裂缝宽度理论值与试验值吻合度接近100%,可以用来计算窄幅钢箱-UHPC组合梁负弯矩区的裂缝宽度。

参考文献:

[1] 王晖. 超高性能混凝土(UHPC)研究综述[J]. 混凝土与水泥制品, 2022, 4(4): 25-28.
WANG Hui. Review of research on ultra-high performance concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2022(4): 25-28.

[2] 钟蕴为, 吴永魁, 文许高媛, 等. 超高性能混凝土(UHPC)基本性能研究综述[J]. 混凝土与水泥制品, 2021, 9(9): 1-4.
ZHONG Yunwei, WU Yongkui, WEN Xugaoyuan, et al. Summary of research on basic performance of ultra-high performance coagulation[J]. China Concrete and Cement Products, 2021, 9(9): 1-4.

[3] 孙世国, 鲁艳朋. 超高性能混凝土国内外研究进展[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(20): 184-199.
SUN Shiguo, LU Yanpeng. Research progress of ultra-high performance concrete at home and abroad[J]. Science Technology

- and Engineering, 2018, 18(20):184-199.
- [4] 王青, 邓金岚, 高舒畅, 等. UHPC 梁开裂弯矩适用计算方法研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2023, 45(6):70-76.
WANG Qing, DENG Jinlan, GAO Shuchang, et al. Study on the applicable calculation method of the cracking moment of UHPC beam[J]. Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences), 2023, 45(6):70-76.
- [5] ZHAO Q, XIAO F, NIE Y, et al. Behavior and design of steel-UHPC composite beams subjected to negative moment[J/OL]. Structures, 2023, 57. DOI:10.1016/j.istruc.2023.105183.
- [6] 罗兵, 马冰. 钢-UHPC-NC 组合梁负弯矩区受力性能试验研究[J]. 桥梁建设, 2021, 51(1):58-65.
LUO Bing, MA Bing. Experimental study of fatigue performance of steel-UHPC-NC composite beam in negative moment zone[J]. Bridge Construction, 2021, 51(1):58-65.
- [7] LU W L, PENG W Q, ZHU L et al. Study on mechanical behavior of steel-UHPC-NC composite beams under negative bending moment[J/OL]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17. DOI:10.1016/j.cscm.2022.e01593.
- [8] 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/OL]. Engineering Structures, 2021, 248. DOI:10.1016/j.engstruct.2021.113266.
- [9] 愈弘志, 宁文伟. 钢-混组合连续梁桥负弯矩区混凝土开裂研究[J]. 公路, 2018, 63(3):131-134.
YU Hongzhi, NING Wenwei. Research on concrete cracking in the negative moment zone of steel concrete composite continuous beam bridges[J]. Highway, 2018, 63(3):131-134.
- [10] 严永红, 邓芃, 侯和涛, 等. 钢-混凝土组合梁螺栓连接件抗剪性能的试验研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2021, 40(2):51-59.
YAN Yonghong, DENG Peng, HOU Hetao, et al. Experimental study on shear resistance of bolt connector in steel-concrete composite beam[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2021, 40(2):51-59.
- [11] 张宪堂, 余辉, 秦文彬, 等. 钢箱梁斜拉桥结构参数敏感性分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2020, 39(5):41-47.
ZHANG Xiantang, YU Hui, QIN Wenbin, et al. Sensitivity analysis of structural parameters of steel box girder cable-stayed bridge[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2020, 39(5):41-47.
- [12] 张宪堂, 黄锦梅, 邹鹏, 等. 基于 ANSYS 的扁平箱梁桥粘贴钢板加固方案优化研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2014, 33(4):58-64.
ZHANG Xiantang, HUANG Jinmei, ZOU Peng, et al. Scheme optimization of reinforcement of flat box girder bridge with bonding steel plate based on ANSYS[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2014, 33(4):58-64.
- [13] 李文光, 邵旭东, 方恒, 等. 钢-UHPC 组合板受弯性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(11):93-102.
LI Wenguang, SHAO Xudong, FANG Heng, et al. Experimental study on flexural behavior of steel-UHPC composite slabs[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(11):93-102.
- [14] 邵旭东, 罗军, 曹军辉, 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.
SHAO Xudong, LUO Jun, CAO Junhui, et al. Experimental study and crack width calculation of steel-UHPC lightweight composite deck structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(3):61-75.
- [15] WANG Y, CAO J H, SHAO X D, et al. Flexural behavior and crack width prediction of UHPC-steel strip composite decks under sagging moments[J]. Engineering Structures, 2023, 293:1-14.
- [16] 罗军. 钢-UHPC 轻型组合桥面结构力学性能及裂缝宽度计算理论研究[D]. 长沙:湖南大学, 2021:61-75.
LUO Jun. Research on mechanical performance and crack width calculation theory of steel-UHPC lightweight composite deck structures[D]. Changsha: Hunan University, 2021:61-75.
- [17] 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.
- [18] 中华人民共和国交通运输部. 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.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts: JTG 3362—2018[S]. Beijing: China Communications Press, 2018.