

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.087



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



预应力 RC-UHPC 组合箱梁正截面抗裂性能

林上顺¹, 暨邦冲¹, 夏樟华², 杨阳², 林建凡³, 赵锦冰⁴

(1. 福建理工大学 福建省土木工程新技术与信息化重点实验室, 福州 350118; 2. 福州大学 土木工程学院, 福州 350108; 3. 福建省交通科研院有限公司, 福州 350004; 4. 皓耀时代(福建)集团有限公司, 福州 350108)

摘要: 提出以抗拉强度高、耐腐蚀的超高性能混凝土(UHPC)为腹板和底板, 以钢筋混凝土(RC)为顶板的预应力 RC-UHPC 组合箱梁, 并制作 1 根试件开展抗弯试验。分析试件的裂缝开展规律与破坏模式; 采用有限元软件对试验进行模拟, 通过对比有限元计算结果与试验数据验证有限元方法的计算精度, 在此基础上建立 19 个有限元分析模型, 分析不同参数对开裂弯矩的影响; 采用相关规范及既有文献资料对预应力 RC-UHPC 组合箱梁的开裂弯矩与裂缝宽度进行计算。结果表明: 试件加载至约 33.3% 极限荷载时出现第 1 条裂缝, 之后荷载-挠度曲线逐渐趋于平缓; 开裂弯矩受预应力筋张拉系数、预应力筋配筋率、UHPC 抗拉强度影响较大。采用基于换算截面的开裂弯矩计算方法与 DBJ 43/T 325—2017 中的裂缝宽度计算方法, 分别计算预应力 RC-UHPC 组合箱梁的开裂弯矩及裂缝宽度, 计算值与试验值、有限元计算值吻合较好。

关键词: 桥梁工程; 组合梁; 超高性能混凝土; 开裂弯矩; 裂缝宽度

中图分类号: U443.35 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2025)04-0058-08

Crack resistance of prestressed RC-UHPC composite box girder

LIN Shangshun¹, JI Bangchong¹, XIA Zhanghua², YANG Yang², LIN Jianfan³,
ZHAO Jinbing⁴

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Civil Engineering New Technology and Information Technology, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, P. R. China; 3. Fujian Provincial Transportation Research Institute Co., Ltd, Fuzhou 350004, P. R. China;
4. Haoyao Times (Fujian) Group Co., Ltd, Fuzhou 350002, P. R. China)

Abstract: The prestressed RC-UHPC composite box girder with high tensile strength and corrosion-resistant ultra-high performance concrete (UHPC) as the web and bottom plate and reinforced concrete (RC) as the top plate was proposed, and a specimen was fabricated. The flexural test was carried out to analyse the crack development pattern and damage mode of the specimen; the finite element software was used to simulate the

收稿日期: 2023-04-05

基金项目: 福建省自然科学基金(2019J01779); 福建省交通科技计划(202024)

作者简介: 林上顺(1972-), 男, 博士, 教授, 主要从事组合结构桥梁研究, E-mail: linshangshun@fjut.edu.cn。

夏樟华(通信作者), 男, 副研究员, E-mail: xiataian@fzu.edu.cn。

Received: 2023-04-05

Foundation items: Natural Science Foundation of Fujian Province (No. 2019J01779); Transportation Science and Technology Plan Project of Fujian Province (No. 202024)

Author brief: LIN Shangshun (1972-), PhD, professor, main research interest: composite structure bridge, E-mail: linshangshun@fjut.edu.cn.

XIA Zhanghua (corresponding author), associate professor, E-mail: xiataian@fzu.edu.cn.

test, and the calculation accuracy was verified by comparing the finite element calculation results with the testing data, on the basis of which 19 finite element analysis models were established to analyse the influence of various parameters on the cracking moment; relevant codes and existing literature were used to investigate the cracking moment of the prestressed RC-UHPC composite box girder. The results show that: the first crack appeared when the specimen was loaded to about 33.3% of ultimate load; the cracking moment was influenced by the prestressing bar tension factor, the prestressing bar reinforcement ratio and the tensile strength of UHPC; the cracking moment calculation method based on the conversion section and the crack width calculation formulas in DBJ 43/T 325—2017 were used to calculate the cracking moment and crack width of the prestressed RC-UHPC composite box girder, respectively, and the calculated values agreed well with the testing and FE results.

Keywords: bridge engineering; composite beam; ultra-high performance concrete; cracking moment; crack width

箱梁是桥梁常用的主梁形式,钢箱梁具有自重轻、施工快等优点,但容易出现涂装劣化、钢材腐蚀、桥面板易损坏等病害^[1],涂装与养护费用较高;钢-混凝土组合梁力学性能优秀、自重轻,但存在钢材疲劳、剪力键易失效、不容易养护及养护费用高的问题^[2-3];混凝土梁自重大,吊装难度大,限制了其在城市桥梁中的应用,PC箱梁也普遍存在腹板开裂、跨中下挠等病害^[4]。近年来,超高性能混凝土(简称UHPC)已在桥梁工程中得到广泛应用^[5-7],其具有较好的耐久性与较高的抗拉强度^[8-10]。有学者提出将UHPC用于受拉区,普通混凝土(简称RC)用于受压区的新型RC-UHPC组合梁结构,将其与预应力技术结合,有望改善梁的抗裂性能与耐久性。

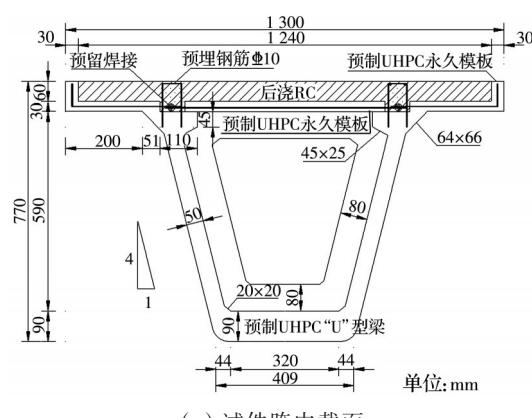
目前,已有学者对RC-UHPC梁的力学性能开展研究。Wu等^[11]研究了U形UHPC模板对矩形截面RC-UHPC梁抗弯性能的影响;Zhang等^[12]开展矩形截面RC-UHPC梁抗弯试验发现,UHPC与RC间具有较高的黏结强度;Yang等^[13]开展了受拉区和受压区采用UHPC、中间采用RC的矩形截面RC-UHPC梁抗弯试验,发现其具有较好的承载力与刚度;Zhang等^[14]及鞠彦忠等^[15]分别采用有限元方法及试验方法分析不同参数对矩形截面RC-UHPC梁抗弯性能的影响。在正截面抗裂性能方面,万见明等^[16]提出了矩形与T型截面UHPC梁的开裂弯矩计算公式,徐海滨等^[17]、朱琦等^[18]、刘明^[19]、李莉^[20]、王文雷^[21]均提出了类似公式,但对于公式中系数的具体取值不尽相同。另一方面,目前针对箱型截面RC-UHPC梁正截面抗裂性能的研究还较为缺乏,因此,有必要对其展开研究。

笔者开展预应力RC-UHPC组合箱梁的抗弯试验,并结合有限元及理论分析,探讨预应力RC-UHPC组合箱梁的裂缝开展规律及不同参数对其开裂弯矩的影响,并探究其开裂弯矩及裂缝宽度的计算方法。

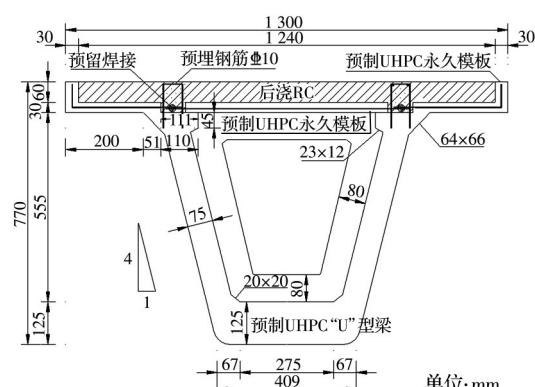
1 试验概况与结果分析

1.1 试验构件设计

根据文献[19-20]的结论,设计并制作一根预应力RC-UHPC组合箱梁^[22],长度为5 m,计算跨径为4.76 m,截面高度为0.77 m,跨高比为6.18,试件横截面布置图如图1所示。跨中截面腹板厚50 mm,底板厚90 mm,RC板厚60 mm;试件支点截面处腹板厚75 mm,底板厚125 mm;试件内设400 mm厚



(a) 试件跨中截面



(b) 试件支点截面

图1 试件跨中和支点截面图
Fig. 1 Midspan and fulcrum cross section of tested specimens

的横隔板。为便于制作,将试件分为预制 UHPC “U”型梁、预制 UHPC 永久模板与 RC 顶板,然后进行拼装,RC 与 UHPC 界面间采用预埋钢筋的方式连接。UHPC 永久模板与 UHPC“U”型梁均采用同一批次 UHPC 浇筑制作。

试件横截面配筋图如图 2 所示。试件内的纵筋与箍筋均采用 HRB400 级钢筋;试件底板设有 5 根直径 16 mm 的纵向钢筋以及 6φ15.2 mm 的预应力

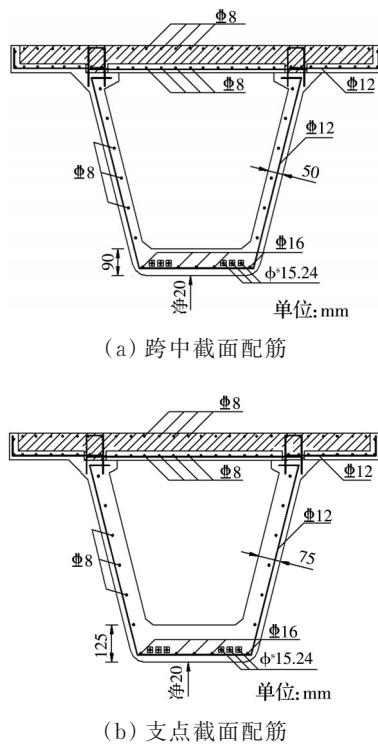


图 2 横截面配筋图

Fig. 2 Cross section details of reinforcement

筋,预应力筋配筋率为 0.66%;参照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)中相关规定,预应力筋张拉系数为 75%;腹板纵筋直径为 8 mm,间距为 100 mm;腹板箍筋的直径为 12 mm,非加密区、加密区内纵向间距分别为 200、100 mm;顶板纵筋直径为 8 mm,箍筋直径为 12 mm,箍筋间距为 100 mm。

1.2 材料特性

制作标准立方体、标准长方体各 3 个,分别取 3 个试件测试结果的平均值,作为混凝土的抗压强度和弹性模量,分别为 63.3 MPa、32.5 GPa。制作 50 mm×100 mm 标准狗骨形试件、100 mm×100 mm×100 mm 立方体、100 mm×100 mm×150 mm 标准长方体各 6 个,并各取 6 个数据的平均值,测得 UHPC 的抗拉强度、抗压强度、弹性模量分别为 7.6、133.3、43.3 MPa。

构件采用的钢筋直径分别为 8、10、12、16 mm,每种直径选取 3 根进行试验,测得屈服强度分别为 441、439、450、438 MPa。

1.3 加载方案

试验加载设备为 200 t 的千斤顶,置于试件中点的正上方,通过一根分配梁对试件的跨中两点进行加载。加载前先预加载至 20 kN。正式加载采用分级加载方式,25 kN 为一级,每级加载完成后持荷 5 min;截面开裂后以每级 50 kN 加载,当顶板普通混凝土被压碎时,认为其达到极限荷载。

如图 3 所示,在跨中顶板、底板处各布置两个位移传感器,两侧剪跨区底板及梁端支座各布置一个位移计。

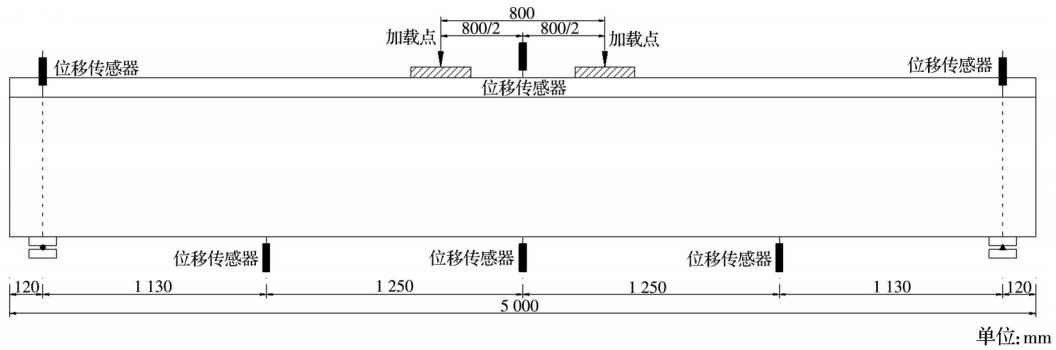


图 3 试件位移传感器立面布置图

Fig. 3 Elevation layout of specimen displacement sensor

1.4 试验现象与荷载-挠度曲线

试件的荷载-挠度曲线如图 4 所示。试件破坏模式为适筋受弯破坏,即受拉纵筋屈服及部分预应力筋断裂后,纯弯段 RC 顶板被压碎。裂缝前,荷载与跨中位移呈线性变化;加载至 600 kN(约 33.3% 极限荷载)时,截面出现第 1 条裂缝,宽度为 0.04 mm,此

时试件跨中位移为 3.6 mm,之后不断有裂缝出现并发展,对截面刚度产生影响,荷载-挠度曲线逐渐趋于平缓,说明 UHPC 的力学性能得到充分发挥;最后裂缝发展至顶板,部分预应力筋被拉断,跨中 RC 顶板被压碎(如图 5 所示),构件破坏,此时最大裂缝宽度为 18 mm,试件最终的立面裂缝图如图 6 所示。

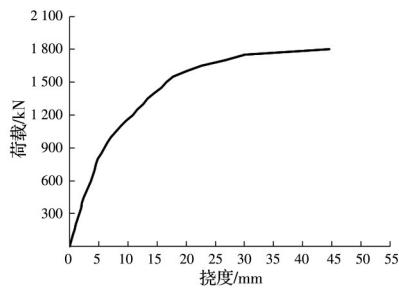


图4 试件的荷载-挠度曲线

Fig. 4 Load-deflection curve of specimen



图5 顶板被压溃

Fig. 5 The top plate was crushed

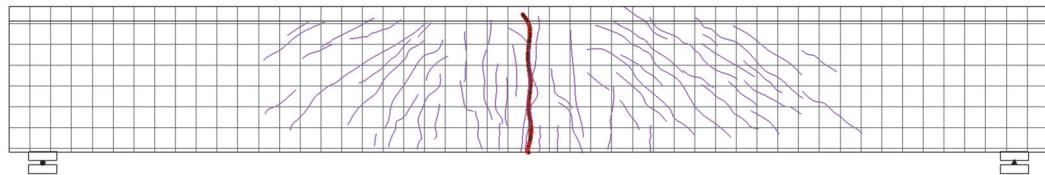


图6 试件立面裂缝图

Fig. 6 Elevation crack diagram of specimen

表1 有限元模型参数

Table 1 Finite element model parameters

模型 编号	预应力 筋配筋率/%	预应力筋张拉 系数/%	钢筋 直径/mm	钢筋屈服 强度/MPa	UHPC抗拉 强度/MPa	UHPC抗压 强度/MPa	顶板RC抗压 强度/MPa
A0	0.66	75	16	438	7.6	133.3	63.3
P2	0.22	75	16	438	7.6	133.3	63.3
P4	0.44	75	16	438	7.6	133.3	63.3
P8	0.88	75	16	438	7.6	133.3	63.3
P10	1.10	75	16	438	7.6	133.3	63.3
X25	0.66	25	16	438	7.6	133.3	63.3
X50	0.66	50	16	438	7.6	133.3	63.3
D14	0.66	75	14	438	7.6	133.3	63.3
D18	0.66	75	18	438	7.6	133.3	63.3
D20	0.66	75	20	438	7.6	133.3	63.3
Q400	0.66	75	16	400	7.6	133.3	63.3
Q500	0.66	75	16	500	7.6	133.3	63.3
L6	0.66	75	16	438	6.0	133.3	63.3
L9	0.66	75	16	438	9.0	133.3	63.3
Y120	0.66	75	16	438	7.6	120.0	63.3
Y140	0.66	75	16	438	7.6	140.0	63.3
Y150	0.66	75	16	438	7.6	150.0	63.3
C40	0.66	75	16	438	7.6	133.3	40.0
C50	0.66	75	16	438	7.6	133.3	50.0

2 有限元模型参数分析

2.1 有限元模型的建立

为获得更多数据,采用有限元软件ABAQUS建立19个有限元模型,各有限元模型的具体参数如表1所示。其中模型A0参照试验试件建立,并与试验结果进行比较,以验证有限元方法的计算精度;其余18个有限元模型用于进一步分析,考虑不同参数的变化,其中:预应力筋配筋率分别取0.22%、0.44%、0.88%、1.10%;预应力筋张拉系数分别取25%、50%;钢筋直径分别取14、18、22 mm;钢筋屈服强度分别取400、500 MPa;UHPC抗拉强度分别取6、9 MPa;UHPC抗压强度分别取120、140、150 MPa;顶板RC抗压强度分别取40、50 MPa;除上述变化的参数外,模型中其余参数与试验试件相同。

有限元模型中,UHPC的底板、腹板、RC桥面板、锚垫板、加载板单元采用八节点六面体线性减缩积分单元C3D8R,普通钢筋和预应力筋单元采用两节点线性三维桁架单元T3D2。

普通混凝土的本构模型采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中的本构模型。钢材的本构模型均采用理想弹塑性本构模型,见式(1)。

$$\sigma_s = \begin{cases} \varepsilon_s E_s, & 0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \\ f_y, & \varepsilon_s > \varepsilon_y \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_s 为钢材应力; E_s 为钢材弹性模量; f_y 为钢材屈服强度; ε_s 为屈服强度对应的应变峰值。

UHPC的本构模型采用文献[23]中的本构模型,受压、受拉本构分别见式(2)、式(3)。

$$\frac{\sigma}{f_c} = \begin{cases} 1.55 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} - 1.20 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^4 + 0.65 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^5, & 0 \leq \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} < 1 \\ \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}, & \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \geq 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{\sigma_t}{f_t} = \begin{cases} 1.17 \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{t0}} - 0.65 \left(\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{t0}} \right)^2 - 0.83 \left(\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{t0}} \right)^3, & 0 \leq \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{t0}} < 1 \\ \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{t0}}, & \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{t0}} \geq 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: σ 为棱柱体压应力; ε 为棱柱体压应变; ε_0 为棱柱体峰值压应力对应的应变; σ_t 为棱柱体拉应力; ε_t 为棱柱体拉应变; ε_{t0} 为棱柱体峰值拉应力对应的拉应变。

有限元模型中,钢筋和主梁之间采用嵌入约束,不同材料之间采用通用接触设置方式,并将连接键切成RC、UHPC嵌入的两个部分,进行分别嵌入。图7为有限元模型A0的荷载-挠度曲线与实测

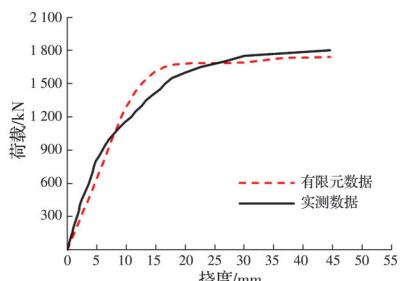


图7 有限元数据与实测数据的比较

Fig. 7 Comparison of finite element data with measured data

的荷载-挠度曲线的比较,曲线走势基本吻合;有限元方法计算得到的开裂荷载、极限荷载、极限荷载对应的位移与试验实测值的比值分别为1.054、0.967、0.988,误差均较小。可见,有限元模型精度较高,可用于参数分析。

2.2 有限元参数分析

2.2.1 开裂荷载分析

各有限元模型的开裂荷载值以及不同有限元模型的开裂荷载与模型A0开裂荷载的比值见表2。表2中, $M_{cr,A0}$ 为有限元模型A0的开裂荷载有限元计算值, $M_{cr,f}$ 为其余18个有限元模型的开裂荷载有限元计算值。由表2可见:UHPC抗拉强度对开裂荷载影响较大,当UHPC抗拉强度由7.6 MPa提高至9.0 MPa时,开裂荷载提高12.5%,说明随着UHPC抗拉强度的提高,开裂荷载也随之大幅度提高;预应力筋配筋率由0.66%提升至1.10%时,开裂荷载提高21.0%,当预应力筋张拉系数由75%降低至25%时,开裂荷载降低42.0%,说明预应力筋配筋率及预应力筋配筋率也对开裂荷载影响较大。此外,配筋率、钢筋屈服强度、UHPC抗压强度、顶板RC抗压强度则对开裂荷载影响相对较小。

表2 有限元方法计算结果
Table 2 Finite element method calculation results

模型编号	有限元模型参数	参数取值	开裂荷载 $M_{cr,f}/kN$	$M_{cr,f}/M_{cr,A0}$
A0			632.48	
P2		0.22%	361.12	0.571
P4	预应力筋配筋率	0.44%	466.15	0.737
P8		0.88%	724.96	1.146
P10		1.1%	765.34	1.210
X25	预应力筋张拉系数	25%	366.84	0.580
X50		50%	518.63	0.820
D14		14 mm	606.11	0.958
D18	钢筋直径	18 mm	655.02	1.036
D22		22 mm	707.56	1.119
Q400	钢筋屈服强度	400 MPa	627.64	0.992
Q500		500 MPa	643.13	1.017
L6	UHPC抗拉强度	6.0 MPa	610.54	0.965
L9		9.0 MPa	711.48	1.125
Y120		120.0 MPa	581.88	0.920
Y140	UHPC抗压强度	140.0 MPa	664.10	1.050
Y150		150.0 MPa	674.22	1.066
C40	顶板RC抗压强度	40.0 MPa	594.53	0.940
C50		50.0 MPa	619.83	0.980

2.2.2 极限承载力分析

分析有限元计算结果后发现:当UHPC抗拉强度由6.0 MPa增加至9.0 MPa时,极限承载力提高约30.0%;当UHPC抗压强度由120.0 MPa增加至

150 MPa时,极限承载力提升1.3%;当RC顶板抗压强度由40 MPa增加至50 MPa时,极限承载力提升4.3%;预应力筋配筋率增加0.44%,极限承载力则增加28.5%;当预应力筋的张拉系数由75%降低至25%时,极限承载力降低17.8%;当受拉纵筋直径由14 mm增加至22 mm时,极限承载力提升11.0%;当纵向受拉钢筋屈服强度由400 MPa提升至500 MPa时,极限承载力提高8.7%。

由以上分析可知:UHPC抗拉强度、预应力筋配筋率与张拉系数、纵向受拉钢筋配筋率与屈服强度对极限承载力的影响较大,而UHPC与RC顶板抗压强度对极限承载力的影响较小。

3 开裂弯矩与裂缝宽度的计算与分析

3.1 开裂弯矩计算

基于以上分析及文献[19-20]、《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)、《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)中基于换算截面的计算方法,采用式(4)计算预应力RC-UHPC组合箱梁的开裂弯矩。

$$M_{cr} = (\sigma_{pc} + \gamma_m f_t) W_0 \quad (4)$$

式中: σ_{pc} 为扣除预应力损失和普通钢筋合力在梁底产生的预压应力,按照JTG 3362—2018中提出的方法进行计算; f_t 为UHPC抗拉强度; W_0 为将钢筋换算成UHPC后的换算截面抗裂边缘弹性抵抗矩,可按照JTG 3362—2018中提出的方法进行计算,即 $W_0 = I_0 / (h - x)$,其中 I_0 为换算截面, h 为截面高度, x 为受压区高度; γ_m 为受拉塑性系数,按照文献[20]中的方法取值,即取 $\gamma_m = W_s / W_0$,其中 W_s 为考虑受拉区塑性变形影响的梁截面弹塑性抵抗矩。

采用式(4)计算试验构件及有限元模型的开裂弯矩,并与试验值、有限元计算值对比,结果见图8(各数据点横坐标值为开裂弯矩公式计算值,纵坐标值为对比值的试验值、有限元计算值)。试验构件的计算值与实测值之比为1.088,有限元模型的

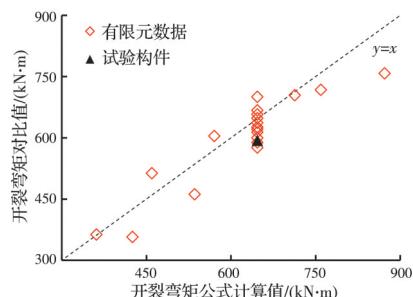


图8 试件开裂弯矩公式计算值与对比值

Fig. 8 Calculated values and contrast values of cracking moment formula for specimens

公式计算值与有限元计算值的比值均值为0.969,方差为0.005。公式计算精度较高,可供规范修订时参考。

3.2 裂缝宽度计算

采用《活性粉末混凝土结构技术规程》(DBJ 43/T 325—2017)及《纤维混凝土结构技术规程》(CECS 38:2004)中的相关规定,采用式(5)计算预应力RC-UHPC组合箱梁的最大裂缝宽度 ω_{max} 。

$$\omega_{max} = \omega_{max} (1 - \beta_{cw} \lambda_f) \quad (5)$$

式中: ω_{max} 为根据钢纤维混凝土的强度等级,不考虑钢纤维影响,按现行规范计算的钢筋混凝土构件的最大裂缝宽度,可按GB 50010—2010中相关规定计算; β_{cw} 为构件中钢纤维对构件裂缝宽度的影响系数,CECS 38:2004规定,当无试验资料参考且钢纤维混凝土强度等级高于CF45时,采用异形钢纤维抗拉强度大于或等于1 000 MPa的钢纤维混凝土受弯构件, β_{cw} 取0.5; λ_f 为钢纤维含量特征值,按式(6)计算确定。

$$\lambda_f = \rho_f l_f / d_f \quad (6)$$

式中: ρ_f 为钢纤维体积率; l_f 为钢纤维长度; d_f 为钢纤维直径或其等效直径;试验中 λ_f 取1.18。

图9为按上述方法得到的计算值与试验实测值在加载过程中裂缝宽度随荷载的变化。由图9可见,公式计算值与试验值吻合较好,采用此方法计算预应力RC-UHPC组合箱梁的最大裂缝宽度精度较高。

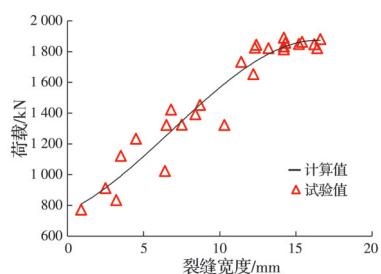


图9 试验梁裂缝宽度随荷载变化图

Fig. 9 Crack width of test beam changing with load

4 结论

1)加载过程中无裂缝出现时,荷载与跨中位移呈线性变化;加载至约33.3%极限荷载时,出现第1条裂缝,之后荷载-挠度曲线逐渐趋于平缓,最后裂缝发展至顶板,部分预应力筋被拉断,跨中RC顶板被压碎,构件破坏。

2)开裂荷载受预应力筋张拉系数、预应力筋配筋率、UHPC抗拉强度的影响较大,建议实际工程中选用抗拉强度较高的UHPC材料,并适当提高预应力筋配筋率,以提高抗开裂能力。

3)采用基于换算截面的计算方法计算预应力 RC-UHPC 组合箱梁的开裂弯矩,公式计算值与试验实测值、有限元计算值的比值分别为 1.088、0.969,公式计算值与试验实测值、有限元计算值吻合较好;采用 DBJ 43/T 325-2017 及 CECS 38:2004 中的裂缝宽度计算方法计算预应力 RC-UHPC 组合箱梁的裂缝宽度,计算精度较高。

参考文献

- [1] 姜竹生,瞿涛,吕磊,等.钢箱梁典型病害分析及其检测与维护技术研究[J].防灾减灾工程学报,2011,31(5):572-577.
- JIANG Z S, QU T, LV L, et al. Research on typical defects analysis of steel box girder and its testing and maintenance technology [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, 31(5): 572-577. (in Chinese)
- [2] RAMEY G E, WOLFF A R, WRIGHT R L. Structural design actions to mitigate bridge deck cracking [J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 1997, 2(3): 118-124.
- [3] SAADEGHVAZIRI M A, HADIDI R. Transverse cracking of concrete bridge decks: Effects of design factors [J]. Journal of Bridge Engineering, 2005, 10(5): 511-519.
- [4] 刘超,徐栋.大跨径混凝土箱梁桥剪切开裂及下挠原因[J].同济大学学报(自然科学版),2009,37(1):1-5.
LIU C, XU D. Cause analysis for shear crack and deflection of long span concrete box-girder bridge [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009, 37(1): 1-5. (in Chinese)
- [5] 庄一舟,宋琨生,宋永青,等.预应力 UHPC/RC 阶梯桩-土相互作用的拟静力试验研究及数值分析[J].土木与环境工程学报(中英文),2023,45(5):37-48.
ZHUANG Y Z, SONG K S, SONG Y Q, et al. Pseudo-static test and numerical analysis of prestressed UHPC/RC segmental pile-soil interaction [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(5): 37-48. (in Chinese)
- [6] 林上顺,张建帅,夏樟华,等.装配式 RC 桥墩研究现状及展望[J].土木与环境工程学报(中英文),2024,46(6):135-147.
LIN S S, ZHANG J S, XIA Z H, et al. The development status and research prospect of assembled RC piers [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(6): 135-147. (in Chinese)
- [7] 夏嵩,陈柳,杨旭.超高性能混凝土(UHPC)在桥面板体系中的应用 2020 年度研究进展[J].土木与环境工程学报(中英文),2021,43(增刊1):175-184.
XIA S, CHEN L, YANG X. State-of-the-art review of advances in the implementation of UHPC-OSD system in 2020 [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(Sup 1): 175-184. (in Chinese)
- [8] WILLE K, NAAMAN A E, PARRA-MONTESINOS G J. Ultra-high performance concrete with compressive strength exceeding 150 MPa (22 ksi): A simpler way [J]. ACI Materials Journal, 2011, 108(1): 46-54.
- [9] CWIRZEN A, PENTTALA V, VORNANEN C. Reactive powder based concretes: Mechanical properties, durability and hybrid use with OPC [J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(10): 1217-1226.
- [10] 陈宝春,季韬,黄卿维,等.超高性能混凝土研究综述[J].建筑科学与工程学报,2014,31(3):1-24.
CHEN B C, JI T, HUANG Q W, et al. Review of research on ultra-high performance concrete [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(3): 1-24. (in Chinese)
- [11] WU X G, LIN Y. Flexural behavior of UHPC-RC composite beam [J]. Steel and Composite Structures, 2016, 22(2): 387-398.
- [12] ZHANG Y, HUANG S L, LIU Y F, et al. Flexural behavior of damaged RC beams strengthened with prestressed UHPC layer [J]. Engineering Structures, 2023, 283: 115806.
- [13] YANG Y, XU C, YANG J, et al. Experimental study on flexural behavior of precast hybrid UHPC-NSC beams [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 70: 106354.
- [14] ZHANG Y J, YANG Z C, XIE T Y, et al. Flexural behaviour and cost effectiveness of layered UHPC-NC composite beams [J]. Engineering Structures, 2022, 273: 115060.
- [15] 鞠彦忠,孙启健,王德弘,等.RPC-NC 组合梁弯曲承载力的影响因素[J].实验力学,2017,32(6):871-879.
JU Y Z, SUN Q J, WANG D H, et al. Factors influencing bearing capacity of RPC-NC composite beam [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(6): 871-879. (in Chinese)
- [16] 万见明,高日.活性粉末混凝土梁正截面抗裂计算方法[J].建筑结构,2007,37(12):93-96.
WAN J M, GAO R. Calculating method of crack-resistant capacity of reactive powder concrete beams [J]. Building Structure, 2007, 37(12): 93-96. (in Chinese)
- [17] 徐海宾,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)
- [18] 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 Q, YE L H, CAI W, et al. Experimental and theoretical studies on flexural performance of UHPC-T beams [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(1): 65-74. (in Chinese)
- [19] 刘明. 预应力RPC箱梁受弯性能试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- LIU M. Experimental study on flexural behavior of prestressed RPC box girder [D]. Changsha: Hunan University, 2015. (in Chinese)
- [20] 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. Study on mechanical performance and design method of reactive powder concrete beam [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [21] 王文雷. RPC预应力梁相关设计参数研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2006.
- WANG W L. Study on design parameters of RPC prestressed beam [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2006. (in Chinese)
- [22] 杨阳. 预应力RC-UHPC组合箱梁受弯性能试验研究[D]. 福州: 福州大学, 2021.
- YANG Y. Experimental study on flexural performance of prestressed RC-UHPC composite box girder [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2021.
- [23] LI L, ZHENG W Z, LU S S. Experimental study on mechanical properties of reactive powder concrete [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 17(6): 795-800.

(编辑 胡英奎)