

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.095



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



预应力 RC-UHPC 组合箱梁的受弯性能

夏樟华¹, 暨邦冲², 杨阳¹, 林上顺², 林建凡³, 赵锦冰⁴

(1. 福州大学土木工程学院, 福州 350108; 2. 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; 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 350002)

摘要:为探索吊装重量轻、施工便捷、耐久性强的新型组合箱梁,设计制作了以超高性能混凝土(UHPC)为腹板和底板、以普通混凝土(RC)为顶板的新型预应力 RC-UHPC 组合箱梁。开展受弯试验,探究试件的损伤机理和破坏模式;采用有限元软件对试验进行模拟,通过将有限元计算结果与试验数据进行对比,验证有限元方法的计算精度;在此基础上建立 16 个有限元分析模型,分析不同参数对抗弯承载力的影响。结果表明:试件破坏模式为适筋破坏,表现为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;UHPC 抗拉强度、预应力筋配筋率对抗弯承载力影响较大;试件腹板纵向应变在高度方向上基本符合平截面假定。结合理论分析,提出抗弯承载力计算公式,利用提出的公式对试验构件及有限元分析模型的抗弯承载力进行计算,公式计算值与试验值、有限元计算值之比分别为 1.014、0.960,具有较高的计算精度。

关键词:桥梁工程;组合箱梁;抗弯承载力;试验研究;超高性能混凝土

中图分类号:U443.35 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2025)06-0168-09

Flexural performance of prestressed RC-UHPC composite box girder

XIA Zhanghua¹, JI Bangchong², YANG Yang¹, LIN Shangshun², LIN Jianfan³, ZHAO Jinbing⁴

(1. School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, P. R. China; 2. Fujian Provincial Key Laboratory of Civil Engineering New Technology and Information Technology, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, 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: In order to explore a new type of composite box girder with light hosting weight, convenient construction and high durability, a new prestressed RC-UHPC composite box girder with ultra-high performance concrete (UHPC) as web and bottom plate and reinforced concrete (RC) as top plate was designed

收稿日期:2023-05-22

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:夏樟华(1980-),男,博士,研究员,主要从事预制拼装桥梁研究,E-mail: xiatian@fzu.edu.cn。

林上顺(通信作者),男,博士,教授,E-mail: linshangshun@fjut.edu.cn。

Received: 2023-05-22

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

Author brief: XIA Zhanghua (1980-), PhD, research fellow, main research interest: prefabricated bridges, E-mail: xiatian@fzu.edu.cn.

LIN Shangshun (corresponding author), PhD, professor, E-mail: linshangshun@fjut.edu.cn.

and fabricated. A flexural test was carried out to investigate the failure mechanism and failure mode of the specimens; the finite element software was utilized to simulate the test, and the calculation accuracy of the finite element method was verified by comparing the finite element calculation results with the test data, on the basis of which 16 finite element analysis models were established to analyse the influence of various parameters on the flexural strength. The results show that the failure mode of the specimen is adequate reinforcement failure, which shows that the RC top slab in the pure bending section is crushed after the yielding of the longitudinal tensile reinforcement and the fracture of some prestressing reinforcement; the tensile strength of UHPC and the reinforcement ratio of prestressing tendons exert a greater influence on the flexural strength; the longitudinal strain of the specimen's is basically consistent with the plane section assumption in the height direction. Combined with the theoretical analysis, the formulas for calculating the flexural strength were proposed. The ratios of the calculated value to the test value and the finite element calculated value are 1.014 and 0.960, respectively, which indicates a high calculation accuracy.

Keywords: bridge engineering; composite box girder; flexural strength; experimental study; ultra-high performance concrete

箱梁是桥梁上部结构常用的结构形式,但各类箱梁在建造和实际使用过程中存在一些不足:混凝土箱梁的截面尺寸与自重较大,吊装难度较高,限制了其在城市桥梁中的应用,同时,在运营中存在挠度大和裂缝多等问题^[1];由于钢梁和混凝土板在环境变化时的温度梯度不同,且混凝土板与钢梁的刚度差别过大,钢-混凝土组合箱梁桥面板更易开裂,剪力连接件还存在疲劳问题^[2-3];钢箱梁造价相对较高,存在疲劳损伤、抗腐蚀性能弱等缺点。

近年来,超高性能混凝土(简称UHPC)材料已在桥梁中得到较多推广应用^[4-7],其拥有较高的强度及良好的耐久性^[8-11],一些学者提出将UHPC作为受拉区、普通混凝土(简称RC)作为受压区的新型RC-UHPC组合结构,并开展了一系列研究。鞠彦忠等^[12]针对RC-UHPC矩形截面组合梁的承载力开展了试验研究,结果表明,组合梁比相同截面尺寸的RC梁承载力约高74.3%~157.8%,并提出了抗弯承载力计算公式;张劭明等^[13]、薛晓博^[14]、曹道武^[15]分别研究了RC-UHPC组合T梁的界面滑移、疲劳性能及动力性能。以上研究均针对矩形梁或T梁,结论是否适用于箱梁,还有待讨论;此外,由于以上研究结构均未设置预应力钢束,当桥梁跨径较大时,结构难免出现裂缝,影响结构的耐久性。因此,有必要针对以上结构进行优化,并进一步开展试验研究。

在既有研究的基础上,将已有研究结构的截面形式改良为箱形截面,并在梁中设置一定的预应力钢绞线,进一步提高梁的耐久性。开展预应力RC-UHPC组合箱梁的抗弯试验,并结合有限元分析研究预应力RC-UHPC组合箱梁损伤机理和抗弯极限承载力计算方法。

1 试验概况

1.1 试验构件设计

为保证试件破坏模式为适筋受弯破坏,根据文献^[11,16]的结论,经有限元分析初步计算,设计并制作一根预应力RC-UHPC组合箱梁,横截面图如图1所示,梁长度为5 m,计算跨径为4.76 m。为便于制作,将RC顶板预制3 cm厚UHPC模板,然后进行拼装,RC与UHPC界面间采用预埋钢筋的组合界面连接方式。跨中截面腹板厚50 mm,底板厚90 mm,普通混凝土板厚60 mm,支点截面处腹板厚75 mm,底板厚125 mm。该设计的优点包括:1)将UHPC用在组合箱梁的下部,可充分发挥UHPC较高的抗拉性能,提高梁的耐久性及抗裂性能,普通混凝土也能够充分发挥其抗压性能;2)将UHPC材料应用在箱梁的“U”型梁部分,能够大幅度减轻结构自重,同时提高抗弯性能;3)“U”型梁可采用预制工艺,大幅度缩减现场作业时间,从而缩短工期。

如图1所示,试件底部布置5根直径16 mm的普通钢筋和6根直径15.2 mm的预应力钢绞线,单侧腹板布置竖向间距为100 mm的6根直径8 mm的纵筋,腹板箍筋采用直径12 mm的普通钢筋,在纵向上间距为200 mm,加密区箍筋的间距为100 mm。在UHPC模板部分,纵筋采用与腹板相同规格的钢筋,横向采用直径12 mm的普通钢筋,纵向间距与腹板箍筋相同,普通钢筋布置与UHPC模板的布置相同。在RC模板部分布置20根8 mm的纵筋,箍筋采用12 mm的普通钢筋,在跨中处间距为200 mm,加密区箍筋的间距为100 mm。

1.2 材料特性

根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)的相关要求,抗压强度测定采

5 min,以便观察裂缝的开展和分布。在初裂荷载之后每级50 kN加载,当出现顶板普通混凝土被压碎认为其达到极限荷载,随后开始卸载。

试验测量的数据包括外加荷载、试件挠度及应变。其中,外加荷载通过力传感器获得,挠度及应变则分别通过采集试验过程中位移计与应变片的数据获得。测点布置如下:1)如图6所示,箱梁底板布置3排应变片,共9个测点;2)如图7所示,RC顶板顶布置3排应变片,共36个测点;3)如图8所示,南、北两侧UHPC腹板沿高度方向各布置5个应变片,图8中,NF1~NF5、BF1~BF5分别为南侧腹板、北侧腹板测点;4)在试件跨中处设有位移计,以采集跨中挠度数据。

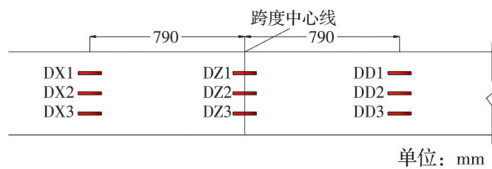


图6 底板纵向应变测点布置

Fig. 6 Arrangement of longitudinal strain measuring points on the bottom slab

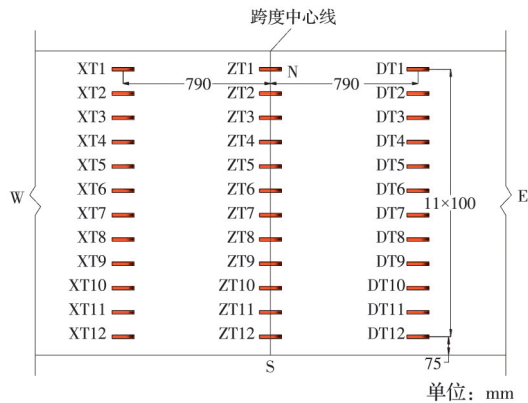


图7 RC顶板纵向应变测点布置图

Fig. 7 Arrangement of longitudinal strain measuring points on the RC top slab

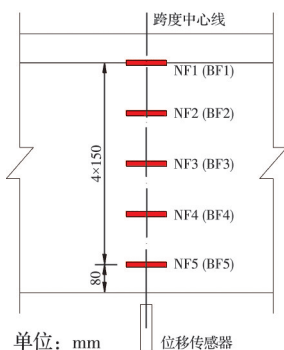


图8 腹板纵向应变测点布置及编号

Fig. 8 Arrangement and numbering of longitudinal strain measuring points on the web

2 试验结果分析

2.1 破坏过程及模式

试件加载时的荷载-位移曲线如图9所示,可分为3个阶段。

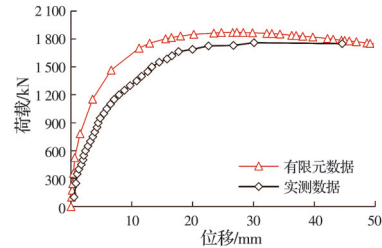


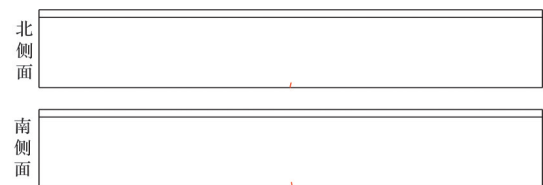
图9 荷载-位移曲线(有限元方法)与试验数据

Fig. 9 Load-displacement curves (finite element method) and test data

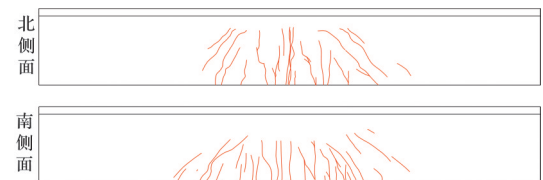
1)第1阶段:荷载为0~600 kN,试件未开裂,位移-荷载曲线总体上呈线性增加;施加荷载为582 kN时,梁底出现第1条裂缝,宽度为0.04 mm,沿截面横向方向贯穿整个跨中位置的梁底截面。此阶段裂缝开展如图10(a)所示。

2)第2阶段:荷载为600~1 400 kN时,腹板跨中截面附近出现第1条竖向裂缝,之后该裂缝成为主裂缝并不断向顶板发展;加载至900 kN时,腹板剪跨区出现斜向裂缝,1 000 kN时听到明显的钢纤维被拔出的声音,之后大量的斜向裂缝产生,此阶段的裂缝开展如图10(b)所示。

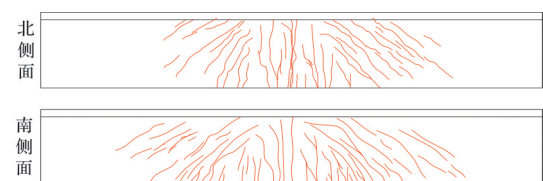
3)第3阶段:荷载为1 400 kN~1 850 kN时,主



(a) 第1阶段(0~600 kN)



(b) 第2阶段(600~1 400 kN)



(c) 第3阶段(1 400~1 850 kN)

图10 试件破坏的3个阶段

Fig.10 Three stages of specimen failure

裂缝向上发展至顶板;1 400 kN 时主裂缝宽度为 0.22 mm;1 800 kN 时梁发出巨大响声,受拉纵筋屈服,部分预应力筋断裂,随后纯弯段顶板混凝土被压碎(如图 11 所示),试件破坏,此时主裂缝宽度为 18 mm,挠度为 44.8 mm。卸载过程中梁体有明显的回弹。此阶段裂缝开展如图 10(c)所示。直至构件破坏,UHPC 和 RC 组合界面处的相对位移始终为 0,两者未发生相对位移。



图 11 RC 顶板破坏形态图

Fig. 11 Failure pattern of the RC slab

2.2 应变分析

2.2.1 UHPC 应变

UHPC 腹板的荷载-应变曲线见图 12 和图 13。BF1、BF2、NF1、NF2 四个测点在开始加载时处于受压状态;当荷载达到 600 kN 时,部分 UHPC 达到初裂应力^[17],截面出现裂缝,使截面刚度降低。此后,随着施加荷载的增加,中性轴上移,4 个测点的应变由受压状态逐渐过渡到受拉。加载至 1 200 kN 时,所有腹板测点均处于受拉状态。

UHPC 底板的荷载-应变曲线见图 14。在加载至 1 100 kN 时出现大量斜裂缝,两侧剪跨区 UHPC

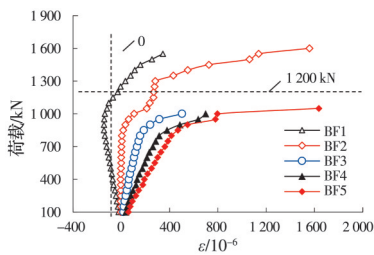


图 12 北腹板 UHPC 荷载-应变曲线

Fig. 12 Load-strain curves of UHPC on the north web

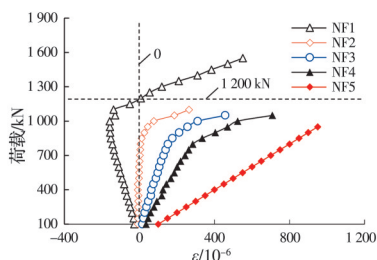
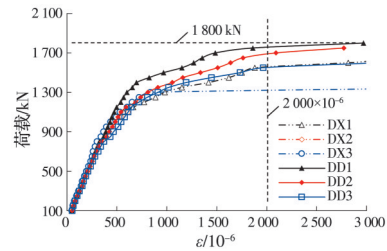


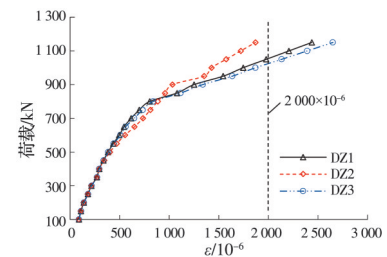
图 13 南腹板 UHPC 荷载-应变曲线图

Fig. 13 Load-strain curves of UHPC on the south web

底板应变基本相同;在钢筋屈服后,UHPC 的拉应变未达到 $2\,000 \times 10^{-6}$,仍能提供一定承载力;在试件达到破坏荷载 1 800 kN 前,除测点 DZ2 应变片因试验中提前损坏而未达到 $2\,000 \times 10^{-6}$ 外,其余各测点拉应变均大于 $2\,000 \times 10^{-6}$,可见,梁底 UHPC 的受拉性能得到了充分的发挥^[17]。底板跨中纵向应变测点的荷载-应变曲线在 600 kN 以前基本重合,随着裂缝出现而有所区别,测试所得的最大应变为 $2\,500 \times 10^{-6}$ 。



(a) 两侧间跨区测点



(b) 跨中测点

图 14 底板 UHPC 荷载-应变曲线

Fig. 14 Load-strain curves of UHPC on the bottom slab

跨中腹板截面沿高度变化的纵向应变分布如图 15 所示。由图 15 可见,应变沿截面高度近似呈线性分布,基本符合平截面假定。

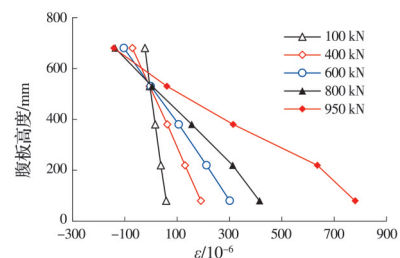


图 15 跨中腹板沿高度方向的应变分布

Fig. 15 Strain distribution of the midspan web along the height direction

2.2.2 受拉钢筋应变

由材性试验及钢筋本构模型可算出钢筋的屈服应变(约为 $2\,190 \times 10^{-6}$)。试件受拉纵筋的荷载-应变曲线如图 16 所示。由图 16 可见,在试件开裂之前(600 kN 以内),随着荷载的增加,应变基本呈线性增长,开裂之后钢筋逐渐进入屈服状态,此时荷载约为 1 250 kN,之后钢筋应变增加幅度较大。

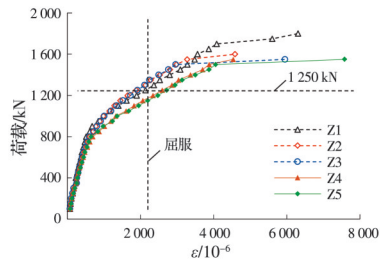


图16 跨中截面受拉纵筋荷载-应变曲线

Fig. 16 Load-strain curves of tensile longitudinal bars in the midspan section

2.2.3 普通混凝土应变

顶板跨中测点的荷载-应变图如图17所示。在荷载达到600 kN前,荷载和顶板的应变变化规律基本呈线性变化;在荷载超过600 kN后,曲线的斜率发生了变化,这是因为此时受拉侧UHPC逐渐退出工作,UHPC能够承受的拉应力很小,故钢筋需要承受较多拉应力;在钢筋屈服后,其能够承受的应力很小(见图16),使RC顶板普通混凝土的应变发展速度与应变数值快速增长,当加载至极限荷载时,顶板RC应变接近 $3\,000 \times 10^{-6}$,RC顶板被压碎。

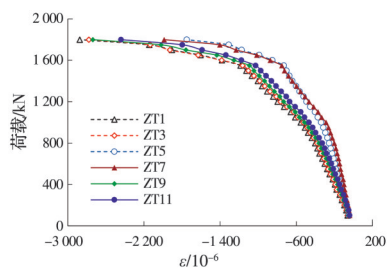


图17 顶板跨中测点荷载-应变曲线

Fig. 17 Load-strain curves at the midspan of the top slab

2.3 有限元模型参数分析

2.3.1 有限元模型的建立

为获取更多试验数据,进一步验证上述计算方法的精度,采用有限元软件ABAQUS建立了16个有限元分析模型,其中模型A0为按照试验试件建立,以便于与试验结果进行比较。模型A0的UHPC抗拉强度为7.6 MPa,UHPC抗压强度为133.3 MPa,RC顶板混凝土抗压强度为63.3 MPa,受拉纵筋配筋率为0.4%,受拉纵筋屈服强度为438 MPa,预应力筋配筋率为0.66%。除A0外,其余15个模型则用于进一步分析,考虑不同参数的变化,其中UHPC抗拉强度分别取6.0、9.0 MPa;UHPC抗压强度分别取120、140、150 MPa;RC顶板混凝土抗压强度分别取40、50 MPa、受拉纵筋配筋率分别取0.30%、0.56%、0.80%;受拉纵筋屈服强度分别取400、500 MPa;预应力筋配筋率分别取

0.22%、0.44%、0.88%;除上述变化的参数外,模型中其余参数与已开展试验的试件相同。

有限元模型中,UHPC的底板、腹板、RC桥面板、锚垫板、加载板的单元采用八节点六面体线形减缩积分单元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;UHPC的本构模型采用李莉^[11]提出的本构模型;钢筋与预应力的本构模型采用理想弹塑性模型;加载板与主梁之间、锚垫板与梁端之间、支座垫板与梁底截面,所有钢筋与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。UHPC、型钢与钢筋网格大小最大划分为60 mm。图18为A0的有限元模型,共计18 782个单元。

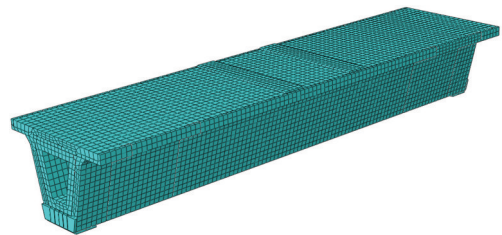


图18 有限元模型

Fig. 18 Finite element model

试件实测的荷载-位移曲线与有限元计算分析得到的曲线的对比见图9。由图9可见,极限荷载和变化趋势均较吻合,有限元模型精度较高,可用于进一步分析。

2.3.2 参数影响分析

UHPC抗拉强度由6.0 MPa增加至9.0 MPa,极限承载力提高约30.0%;UHPC抗压强度每提升10 MPa,极限承载力仅提高约1%;RC顶板混凝土抗压强度由40 MPa提升至50 MPa时,极限承载力提高4.0%;当受拉纵筋配筋率由0.30%提升至0.80%时,极限承载力提升8.6%;当受拉纵筋屈服强度由400 MPa提升至500 MPa时,极限抗弯承载力提升6.2%;预应力筋配筋率增加0.44%,极限承载力增加28.5%。

由以上分析知:UHPC抗拉强度、预应力筋配筋率对极限承载力影响较大;相对而言,UHPC抗压强度、RC顶板混凝土抗压强度、受拉纵筋配筋率及受拉纵筋屈服强度对极限承载力影响较小。

3 抗弯极限承载力计算方法

3.1 基本假定

根据分析结果,做出以下计算假定:1)截面应变保持平面;2)在承载时,UHPC与RC之间未发生相对滑移,因此在计算时不考虑滑移效应;3)在承载过程中,梁内的预应力筋及普通钢筋与UHPC及RC之间具有良好的黏结性能,不发生黏结破坏;4)预应力钢筋本构关系简化成折线进行计算;5)应根据中性轴所在截面相对位置,将截面分为3种情况;6)将受拉区UHPC应力分布等效为矩形。

3.2 计算公式

如图19所示,为便于计算,将箱型截面等效为T型截面。图中 t'_R 、 t'_U 分别为顶板RC、UHPC层厚度; b'_f 、 b_f 分别为顶板、底板宽度; h 为截面高度; h_w 、 b_w 分别为腹板高度、厚度; t_U 为底板厚度; A_s 、 A_p 分别为受拉纵筋、预应力筋截面面积。

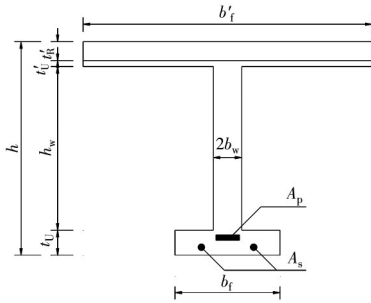


图 19 等效 T 型截面

Fig. 19 Equivalent T-section

3.2.1 中性轴穿过顶板 RC 层

中性轴穿过顶板 RC 层的计算示意图图 20 所示。图中 x 、 x_i 分别为受压区高度、受拉区高度; α_U 为受压区混凝土压应力影响系数,可按《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中的规定取值; f_{cR} 为普通混凝土轴心抗压强度; f_y 、 f_p 分别为受拉纵筋、预应力筋抗拉强度。

由于顶板 UHPC 层较为接近中性轴,对抗弯承载力的贡献较小,因此,为便于计算,可偏安全地忽略顶板 UHPC 层的抗弯贡献,并假设腹板 UHPC 均

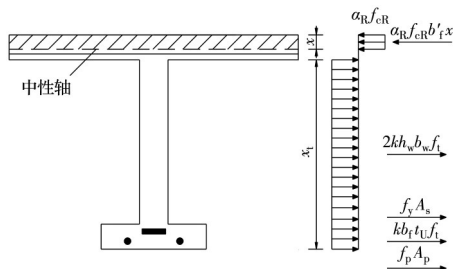


图 20 中性轴穿过顶板 RC 层

Fig. 20 Neutral axis passing through the RC layer of the top slab

为受拉。则由平衡条件可得 x 的计算式

$$\alpha_R f_{cR} b'_f x = f_y A_s + f_p A_p + 2kh_w b_w f_i + kt_U b_f f_i \quad (1)$$

式中: k 为受拉区等效系数,按文献[11]取为0.25; f_i 为UHPC轴心抗拉强度。

由弯矩平衡条件,梁的抗弯极限承载力按式(2)计算。

$$M = -0.5\alpha_R f_{cR} b'_f x^2 + f_y A_s (h - a_s) + f_p A_p (h - a_p) + kt_U b_f f_i (h - 0.5t_U) + 2kh_w b_w f_i (0.5h_w + t'_R + t'_U) \quad (2)$$

式中: M 为梁的抗弯极限承载力; a_s 、 a_p 分别为受拉纵筋、预应力筋至截面边缘的距离。

3.2.2 中性轴穿过顶板 UHPC 层

中性轴穿过顶板 UHPC 层的计算示意图如图 21 所示。由于顶板 UHPC 层受拉侧较为接近中性轴,对抗弯承载力的贡献较小,因此,为便于计算,在计算时可偏安全地忽略顶板 UHPC 层受拉侧的抗弯贡献,并假设腹板 UHPC 均为受拉。则由平衡条件可得 x 的计算式

$$\alpha_R f_{cR} b'_f t'_R + \alpha_U f_{cU} b'_f (x - t'_R) = f_y A_s + f_p A_p + 2kh_w b_w f_i + kt_U b_f f_i \quad (3)$$

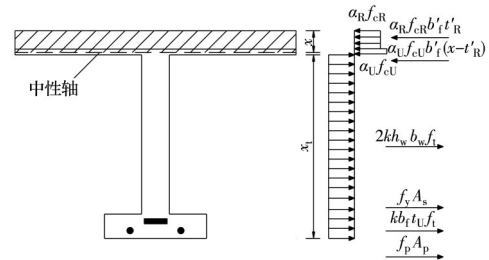


图 21 中性轴穿过顶板 UHPC 层

Fig. 21 Neutral axis passing through the UHPC layer of the top slab

基于弯矩平衡条件,梁的抗弯极限承载力 M 按式(4)计算。

$$M = -0.5\alpha_R f_{cR} b'_f t'^2_R - 0.5\alpha_U f_{cU} b'_f (x^2 - t'^2_R) + 2kh_w b_w f_i (0.5h_w + t'_R + t'_U) + f_p A_p (h - a_p) + f_y A_s (h - a_s) + kt_U b_f f_i (h - 0.5t_U) \quad (4)$$

3.2.3 中性轴穿过腹板

中性轴穿过腹板的计算示意图如图 22 所示。此时,取受拉区高度 $x_i = h - x/\beta$,其中 β 为受压区等

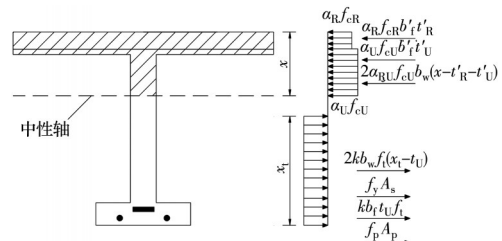


图 22 中性轴穿过腹板

Fig. 22 Neutral axis passing through the web

效矩形应力图形系数,可按《活性粉末混凝土结构技术规程》(DBJ 43/T 325—2017)的规定取值。

由平衡条件可得, x 按式(5)计算。

$$\alpha_R f_{cR} b'_i t'_R + \alpha_U f_{cU} [b'_i t'_U + 2b_w (x - t'_R - t'_U)] = f_y A_s + f_p A_p + 2kb_w f_i (x - t_u) + k t_U b_i f_i \quad (5)$$

由弯矩平衡条件,抗弯极限承载力按式(6)计算。

$$M = k t_U b_i f_i (h - 0.5 t_U) + f_y A_s (h - a_s) + f_p A_p (h - a_p) + k b_w f_i (x - t_U) [(x - t_U) + 2x] - 0.5 \alpha_R f_{cR} b'_i t'^2_R - 0.5 \alpha_U f_{cU} b'_i t'_R (t'_R + t'_U) - \alpha_U f_{cU} b_w (x - t'_R - t'_U) (x + t'_R + t'_U) \quad (6)$$

3.3 计算精度验证

采用提出的方法计算试验构件以及有限元模型的抗弯极限承载力。以计算值为横坐标,构件实测抗弯极限承载力或有限元模型计算值为纵坐标,绘制两者的比较结果如图23所示,其中:计算值与试验值之比为1.014,计算值与有限元计算值的比值均值为0.960,方差为0.009。可见计算值与试验值、有限元计算值吻合较好,该计算方法具有较高的计算精度。

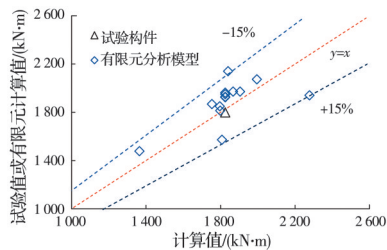


图23 抗弯极限承载力比较图

Fig. 23 Comparison of flexural ultimate strength

4 结论

1) 试件呈受弯破坏,破坏过程总体上分为3个阶段:第1阶段,荷载与跨中位移、各项应变呈线性变化;第2阶段,裂缝出现并不断发展,截面刚度减小;第3阶段,裂缝发展至顶板,受拉纵筋屈服,部分预应力筋断裂,随后纯弯段RC顶板被压碎。腹板应变基本符合平截面假定。

2) 有限元分析表明,增加UHPC抗拉强度能大幅提高预应力RC-UHPC组合箱梁的抗弯承载力;在预应力筋配筋率为0.22%~0.88%范围内,预应力RC-UHPC组合箱梁的抗弯承载力随预应力筋配筋率的增加而显著提高。

3) 基于平截面假定及截面的轴力、弯矩平衡条件提出抗弯极限承载力计算公式,并对1根试验构件及15个有限元分析模型的抗弯极限承载力进行

计算,公式计算值与试验值、有限元计算值之比分别为1.014、0.960,表明提出的公式计算精度较高。

参考文献

- [1] BAZANT Z P, HUBLER M H, YU Q. Pervasiveness of excessive segmental bridge deflections: Wake-up call for creep [J]. ACI Structural Journal, 2011, 108(6): 766.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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)
- [5] 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. Research status and prospect of assembled RC piers [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(6): 135-147. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] FAN Z T, HUANG W, NEGOTTA A. Repairing steel girder end corrosion using ultra-high performance concrete [J]. Journal of Bridge Engineering, 2022, 27(1): 05021015.
- [8] MCMULLEN K F, ZAGHI A E. An Accelerated repair method for steel girders with severe end corrosion damage [J]. Engineering Structures, 2022, 251: 113493.
- [9] 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)
- [10] 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.
- [11] 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)
- [12] 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)
- [13] 张劭明, 过民龙. RPC-NC 叠合面剪切滑移试验研究[J]. *铁道标准设计*, 2014, 58(9): 70-74.
- ZHANG S M, GUO M L. Experimental study on shear slip of RPC-NC composition plane [J]. *Railway Standard Design*, 2014, 58(9): 70-74. (in Chinese)
- [14] 薛晓博. RPC-NC 叠合梁疲劳性能分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- XUE X B. Fatigue performance analysis of RPC-NC composite beam [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [15] 曹道武. RPC-NC 叠合梁动力性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- CAO D W. Study on dynamic performance of RPC-NC composite beam [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] 陈宝春, 杨简, 吴香国, 等. UHPC 力学性能的多指标分级[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(8): 23-34.
- CHEN B C, YANG J, WU X G, et al. Multi-indicators classification of UHPC mechanical properties [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(8): 23-34. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)