

超高性能混凝土-混凝土组合简支梁弯曲性能试验

刘超¹, 孙启鑫¹, 邹宇罡²

(1. 同济大学土木工程学院, 上海200092; 2. 上海市市政工程研究总院(集团)有限公司, 上海200092)

摘要: 进行了3根超高性能混凝土(UHPC)位于受拉区的超高性能混凝土-混凝土组合梁(UHPC-NC组合梁)和1根普通钢筋混凝土梁的弯曲性能试验。对UHPC-NC组合梁的受力过程、跨中截面应变分布、裂缝开展模式和破坏形态等进行了研究分析。试验结果表明, UHPC-NC组合梁在加载过程中基本符合平截面假定, 并且在UHPC层中配置适量的纵向钢筋, 能大幅度提高组合梁的抗弯承载力。同时, 将钢筋和UHPC对试验梁极限承载力的贡献分为4个阶段(初始状态、阶段状态、极限状态和破坏状态)进行计算。最后, 对组合梁受拉区UHPC层等效矩形应力系数 k 进行推导。结果表明, UHPC层对组合梁抗弯承载力的贡献效率随着配筋率的不同而不同。

关键词: 超高性能混凝土-混凝土组合梁; 超高性能混凝土抗弯贡献度; 模型试验; 极限抗弯承载力

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

Experimental Study on Bending Performance of Ultra-high Performance Concrete-Normal Concrete Composite Simply Supported Beam

LIU Chao¹, SUN Qixin¹, ZOU Yugang²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute(GROUP)Co., Ltd, Shanghai 200092, China)

Abstract: The flexural tests of three ultra-high performance concrete-normal concrete (UHPC-NC) composite beams that ultra-high performance concrete (UHPC) was located in the tensile zone and one ordinary reinforced concrete beam were carried out. The stress process, the strain distribution in the mid-section, the crack development mode and the failure mode of the UHPC-NC composite beam were studied and analyzed. The test results show that the UHPC-NC composite beam

basically conforms to the sectional assumption during the loading process, and the proper amount of longitudinal steel bars in the UHPC layer can greatly improve the flexural resistance of the composite beam. At the same time, the contribution of reinforcement and UHPC to the ultimate bearing capacity of test beam was calculated in four stages (initial state, stage state, ultimate state and failure state). Finally, the equivalent rectangular stress coefficient k of the UHPC layer in the tensile zone of the composite beam was derived. The results show that the contribution efficiency of the UHPC layer to the flexural resistance of the composite beam varies with the ratio of reinforcement.

Key words: ultra-high performance concrete-normal concrete composite beam; ultra-high performance concrete bending contribution; model test; ultimate bending capacity

超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC), 是由 Richard 和 Cheyrezy 等^[1]首先开发的活性粉末混凝土 (reactive powder concrete, RPC) 和钢纤维组成的混合物, 能够充分发挥钢纤维抗拉强度而实现混凝土高抗拉强度、高韧性和应变强化行为^[2], 与传统混凝土 (normal concrete, NC) 和高强混凝土 (high strength concrete, HSC) 相比, UHPC 能够实现高强、高延性和高致密性, 是混凝土材料具有重大意义的突破^[3]。由于 UHPC 材料优越的力学性能, 它是生产薄壁组合构件以及加固现有混凝土结构的理想选择。Bruhwiler 和 Denarie^[4]提出采用配筋 UHPC 对混凝土结构进行恢复加固的概念, 可以有效改善原结构的受力性能, 提高结构的耐久性。

Prem 等^[5]通过对加固后混凝土梁进行抗弯承

收稿日期: 2019-06-22

第一作者: 刘超(1977—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为超高性能混凝土。

E-mail: lctj@tongji.edu.cn

通信作者: 孙启鑫(1988—), 男, 博士生, 主要研究方向为超高性能混凝土。E-mail: qixins@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

承载力分析,对不同UHPC层厚度对组合梁抗弯极限承载力的影响进行了研究。结果表明,UHPC层能提高组合梁结构的承载力,当UHPC层厚度为20 mm时(原梁高为200 mm,宽为100 mm),组合梁的抗弯承载力提高了接近30%,试验过程中UHPC和NC交界面未出现滑移破坏。此外,Safdar等^[6]、Bruhwiler等^[7]、Paschalis等^[8]也研究了UHPC加固钢筋混凝土梁的抗弯性能,并与有限元分析结果进行了比较。试验和有限元分析结果表明,采用UHPC加固的钢筋混凝土梁,其极限抗弯承载力都有提高。Lampropoulos等^[9]通过数值模拟和试验分析,研究了分别用UHPC层加固钢筋混凝土受压区和受拉区对抗弯承载力的影响,Al-Osta等^[10]在此基础上又针对钢筋混凝土梁用树脂胶粘接UHPC预制板和凿毛浇筑UHPC层两种情况进行了对比,研究了UHPC层不同的施工方式对加固钢筋混凝土梁抗弯承载力的影响。Tanarslan^[11]研究了在UHPC层和混凝土层之间采用不同的锚固方式,对构件承载力的影响,研究发现在UHPC层和混凝土层之间增加机械锚固措施能有效提高构件的延性和承载力。Yang等^[12]通过考虑UHPC材料从端部和中间位置不同的浇筑方式和不同配筋率等参数进行试验梁抗弯试验。结果表明,UHPC具有良好的裂缝控制能力,而且不同的UHPC浇筑方式也会影响梁的弯曲性能。

目前,国内超高性能混凝土-混凝土(UHPC-NC)组合梁的抗弯性能研究还不完善,组合梁中受拉区钢筋和UHPC层分别对结构的抗弯贡献度、钢筋与UHPC层协同工作特性对组合梁破坏机理的影响以及受拉区UHPC层的等效矩形应力系数等方面的研究还存在不足。本文通过UHPC-NC组合梁的弯曲性能试验,验证了组合梁截面应变分布基本符合平截面假定。其次,对组合梁进行破坏机理、裂缝开展形式以及UHPC层和钢筋分别对结构抗弯贡献度的研究。最后,在基于平截面假定的基础上,对UHPC-NC组合梁受拉区UHPC等效矩形应力系数 k 进行计算分析。

1 试验过程

1.1 材性试验

试验所用的UHPC材料的配比参数和钢纤维的材料特性见表1和表2。UHPC材料的轴拉试验采用骨头形试件,其骨头型试件中间段截面尺寸为50

mm×100 mm,大于纤维长度的三倍值,有助于纤维在试件中的三维均匀分布,降低纤维取向分布的影响。骨头形试件的尺寸和试验照片如图1a和图1b所示,试验结果见表3。通过对该材料的抗拉性能试验研究,得到其平均轴向应力-应变曲线如图2所示,从图中可以看出UHPC具有明显的应变强化段。

表1 UHPC材料配比参数

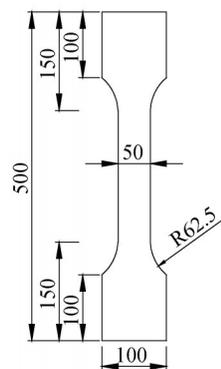
Tab. 1 UHPC material proportioning parameters

水泥	硅灰	细填充料	细集料	水	减水剂
1	0.3	0.3	1.34	0.2	0.013

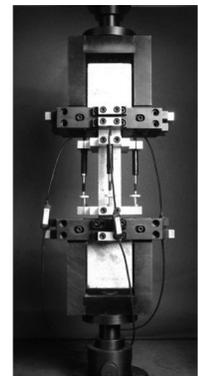
表2 钢纤维特性参数

Tab. 2 Characteristic parameters of steel fiber

纤维形状	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	长度/mm	直径/ μm	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
顺直光滑	2 500	200	16	200	7 850



a 骨头形试件尺寸



b 试验照片

图1 骨头形试件尺寸及试验照片(单位:mm)

Fig.1 Size and test photo of bone-shaped specimen (unit:mm)

表3 UHPC材料试验结果

Tab. 3 Experimental results from the testing of UHPC

初裂抗拉强度 f_{te}/MPa	极限抗拉强度 f_{tu}/MPa	弹性模量 $E_c/$ GPa	极限拉应变 $\epsilon_{tu}/10^{-6}$
8.78	12	47	3 700

在试验梁浇筑成型的同时,浇筑一组(6个)150 mm×150 mm×150 mm的C30试块。根据规定^[13],在标准养护条件下(温度为 $(20\pm 2)^\circ\text{C}$,湿度大于95%)养护28 d后进行试验,试验如图3a所示。试块的抗压强度平均值和标准差分别为39.4和1.1 MPa。根据文献^[14]的规定,本文取用C30混凝土圆柱体轴心抗压强度平均值38 MPa。

试验采用三种直径分别为14、16、18 mm的钢

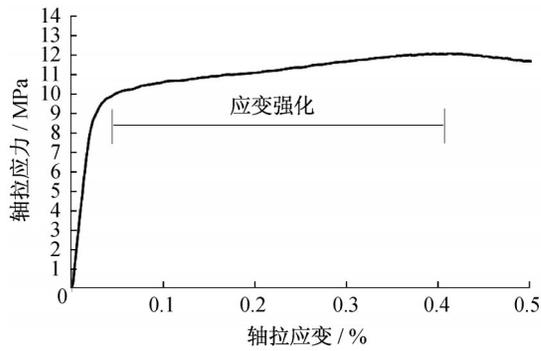


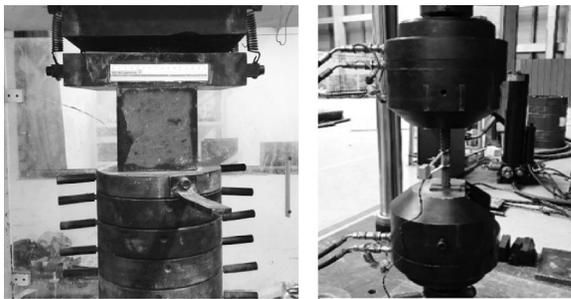
图2 UHPC轴拉应力-应变曲线

Fig.2 Tensile stress-strain curve of UHPC axis

筋。根据文献 [15] 的规定, 每种型号的钢筋分别预留三根 450 mm 长的试件做拉伸试验。试验如图 3b 所示, 试验结果见表 4。

1.2 试验方案

试验共规划了 1 根 C30 混凝土梁和 3 根 UHPC-NC 组合梁。试验梁的长度为 3 000 mm, 为防止梁



a C30抗压试验 b 钢筋拉伸试验

图3 材料性能试验

Fig.3 Material performance test

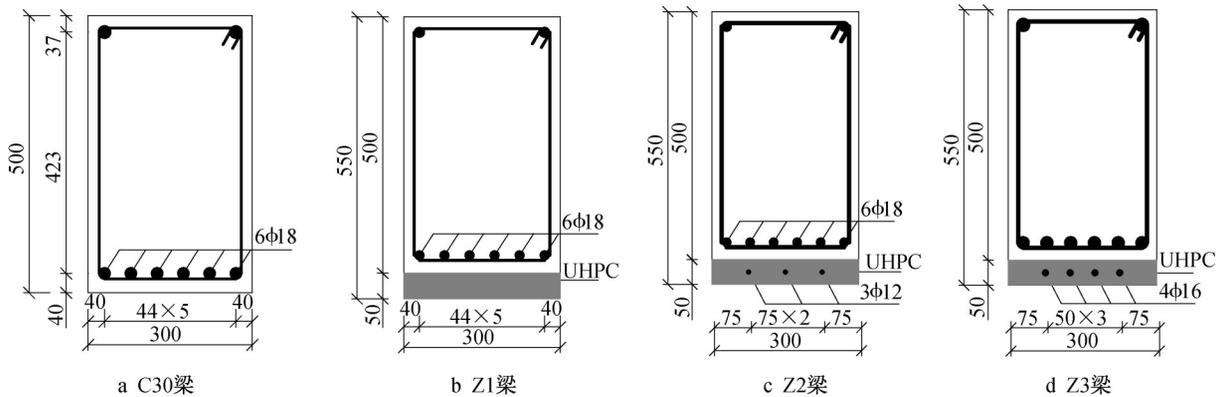


图4 UHPC-NC组合梁截面形式(单位:mm)

Fig.4 UHPC-NC composite beam cross-section(unit:mm)

试验中为了测量 4 根梁主要截面的挠度, 在试验梁跨中下缘布置 1 个位移计, 在两端支座上方各设置 1 个位移计, 用于观测跨中的位移以及两侧支点的沉降。

表4 钢筋性能

Tab. 4 Steel reinforcement properties

直径/mm	屈服强度 f_{ye} / MPa	弹性模量 E_s / GPa	极限强度 f_{yu} /MPa
12	595.15	240.60	697.71
16	577.88	243.30	692.08
18	620.31	270.10	727.16

两端的锚固破坏, 加载时两边各预留 150 mm, 计算跨径为 2 700 mm。UHPC-NC 组合梁的制作过程如下: 将 C30 和 UHPC 材料分别使用混凝土搅拌机搅拌 15 min, 为了方便后期 UHPC 层的浇筑, 上下反向安装 C30 钢筋骨架及模板, 先把 C30 拌合物装入试模, 此时 C30 梁是反向的。待 C30 混凝土基本成型后 (7 d 后), 对 C30 混凝土表面进行凿毛, 并在其上层铺设钢筋骨架, 然后将 UHPC 拌合物装入试模中, 浇筑方式为从中间开始浇筑, 不振捣。用湿布覆盖在表面以防止水分蒸发, 48 h 后拆模, 拆模后进行保湿养护直至 28 d。

4 根试验梁编号分别为 C30 梁、Z1 梁、Z2 梁、Z3 梁。C30 梁尺寸为 300 mm×500 mm×3 000 mm, 底部配置 6Φ18 HRB400 级受拉钢筋; 其余 3 根 UHPC-NC 组合梁在 C30 梁底部增加了 50 mm 的 UHPC 层 (变化参数为 UHPC 层配筋率), 尺寸为 300 mm×550 mm×3 000 mm, 试验梁横断面见图 4。试验加载按照三分点弯曲加载模式, 将集中荷载通过分配梁的方式均分到试验梁三分点处, 保证跨中段为纯弯段, 试验梁加载如图 5~图 6 所示。

在试验梁的侧面, 底面以及底部纵向钢筋粘贴应变片, 组合梁在跨中截面处竖直从上往下依次布置 7 个应变片, 其作用主要为验证截面应变是否满足平截面假定。C30 梁除去底部 UHPC 层的应变片

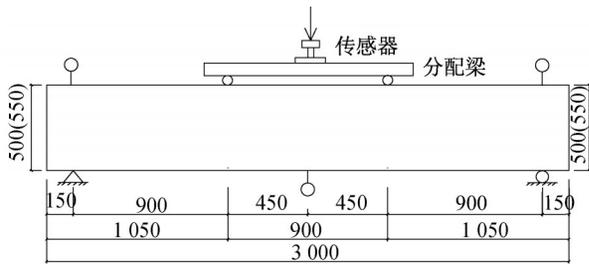


图5 四点加载示意图(单位:mm)

Fig.5 Four-point loading diagram (unit: mm)

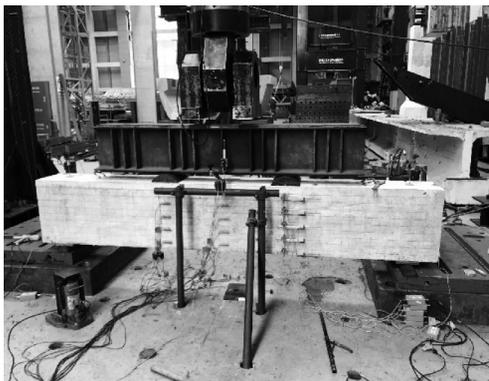


图6 现场加载图

Fig.6 Field loading diagram

外,布置方式与组合梁保持一致。试验梁表面应变片的布置见图7,钢筋应变片布置如图8所示。

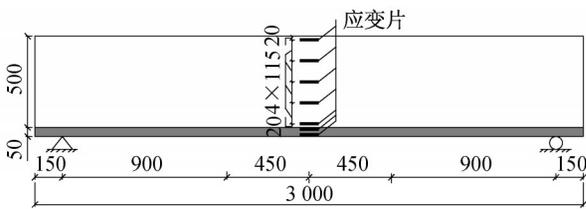


图7 UHPC-NC组合梁表面应变片布置图

Fig.7 Layout of surface strain gauge of UHPC-NC composite beam

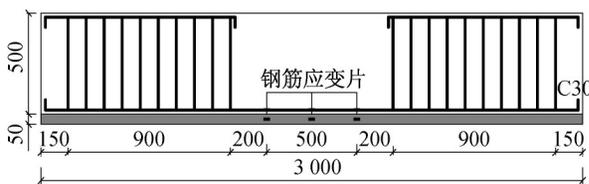


图8 UHPC-NC组合梁钢筋应变片布置图

Fig.8 Layout of steel strain gauge of UHPC-NC composite beam

2 试验结果

2.1 试验梁破坏模式

试验时每个加载等级为40 kN,随着加载的进行

Z1、Z2、Z3 试验梁首先都是在普通混凝土梁体出现裂缝,然后随着荷载的增大UHPC层再出现裂缝,直至试验梁破坏。具体试验现象如下:当C30梁加载到220 kN时,梁体底面出现大量微小裂缝,以缝簇的方式呈现。当荷载分别加载到240、280、330 kN时,Z1、Z2、Z3 试验梁分别在跨中UHPC表层出现大量微小裂缝,此时裂缝宽度约在0.02 mm。随着荷载的不断增大,当荷载分别达到300、460、480、510 kN时,C30梁、Z1~Z3 试验梁跨中底部缝宽约0.03 mm,底层受拉钢筋的应变达到 1100×10^{-6} ,随后4根试验梁的加载方式转为位移控制。当C30试验梁位移加载到8 mm时,C30梁梁底裂缝贯穿底面,并沿侧面向上发展。随着加载的继续进行,C30梁裂缝扩展至梁顶,顶部受压区混凝土出现压碎现象。最终,C30混凝土梁的极限荷载为931 kN。当Z1~Z3梁位移加载到10 mm时,梁底裂缝向上延伸至顶部,此时主裂缝宽度发展较慢,顶缘受压区混凝土出现压碎现象。最终,Z1梁(UHPC层无钢筋)的极限荷载为1 015 kN,Z2梁(UHPC层3Φ12)的极限荷载为1 222 kN,Z3梁(UHPC层4Φ16)极限荷载为1 460 kN。4根试验梁加载破坏裂缝图如图9~图12。



图9 C30简支梁破坏裂缝图

Fig.9 Crack diagram of of C30 simply supported beam

从裂缝开展模式可以看出,随着荷载的增加C30梁首先开裂,然后普通混凝土退出工作,裂缝宽度迅速增大,直至C30梁破坏。对于Z1~Z3试验梁,由于UHPC抗拉强度较大,故普通混凝土比UHPC层先开裂,随着荷载的增加,UHPC与钢筋的协同工作特性和材料中的钢纤维都对裂缝的开展起到了重要的约束作用,特别是配筋的UHPC层对构件裂缝的约束尤为明显,较大程度提高了结构的可靠性。同时在试验梁破坏时,UHPC层与普通混凝土界面未发现由滑移导致的裂缝,说明通过凿毛处理后的界面具有良好的粘结性能,能够满足实际工

程要求。



图10 Z1试验梁破坏裂缝图

Fig.10 Crack diagram of Z1 test beam



图11 Z2试验梁破坏裂缝图

Fig.11 Crack diagram of Z2 test beam



图12 Z3试验梁破坏裂缝图

Fig.12 Crack diagram of Z3 test beam

2.2 荷载-挠度曲线分析

通过实验测得跨中和支座位移计的数据变化,处理分析得到4根梁的荷载-跨中挠度曲线,结果如图13所示。

由图13可以得出,UHPC-NC组合梁的受力过程可分为三个阶段:弹性阶段、裂缝发生和开展阶段、持荷至破坏阶段。

2.3 跨中截面应变分布

UHPC层两应变片取其平均值作为UHPC层的应变值,试验梁应变片位置如图7所示。通过对跨

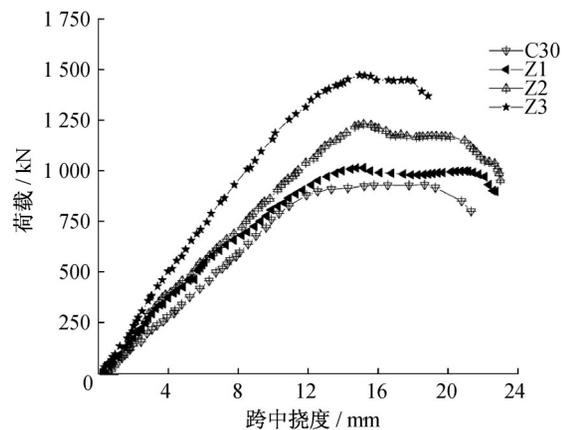


图13 4根试验梁荷载-跨中挠度曲线

Fig.13 Load-midspan deflection curve of four test beams

中截面纵向应变的研究,判断其是否符合平截面假定,结果如图14所示。

由图14可知:在试验梁受弯过程中,C30梁、Z1~Z3组合梁跨中截面平均应变基本满足平截面假定,跨中截面平均应变沿梁高方向基本成线性变化,同时可以看出中性轴(应变为0的位置)随着荷载的增大而不断上升。通过对试验梁平截面假定的研究也可看出,在试验中UHPC层与混凝土层之间没有出现相对滑移,两者粘结可靠。

3 钢筋与UHPC的抗弯贡献度

为进一步分析UHPC-钢筋协同工作性能对组合梁抗弯承载力的影响,根据组合梁受弯过程中钢筋和UHPC应变的变化规律,分析研究组合梁受拉区钢筋和UHPC层分别对组合结构抗弯承载力的作用,分阶段考虑钢筋与UHPC抗拉性能对截面抗弯承载力的贡献度。结合1.1节UHPC和钢筋材性试验结果,同时参照法国超高性能纤维混凝土规范^[16],对UHPC受拉本构的建议,将UHPC和钢筋材料的本构关系简化为折线模型,如图15所示,图中 ϵ 为应变, σ 为应力, f_{te} 为UHPC弹性阶段末端应力, f_{tu} 为UHPC强化阶段末端应力, ϵ_{te} 为UHPC弹性阶段末端应变, ϵ_{tu} 为UHPC强化阶段末端应变, E_s 为钢筋弹性模量, ϵ_y 为钢筋屈服应变, f_y 为钢筋屈服应力。

根据组合梁的试验结果,将整个加载过程分解为 $0 \sim 250 \times 10^6$, $250 \times 10^6 \sim 2000 \times 10^6$, $2000 \times 10^6 \sim 3500 \times 10^6$, 3500×10^6 以后4个阶段(初始状态、阶段状态、极限状态和破坏状态)相应的截面中

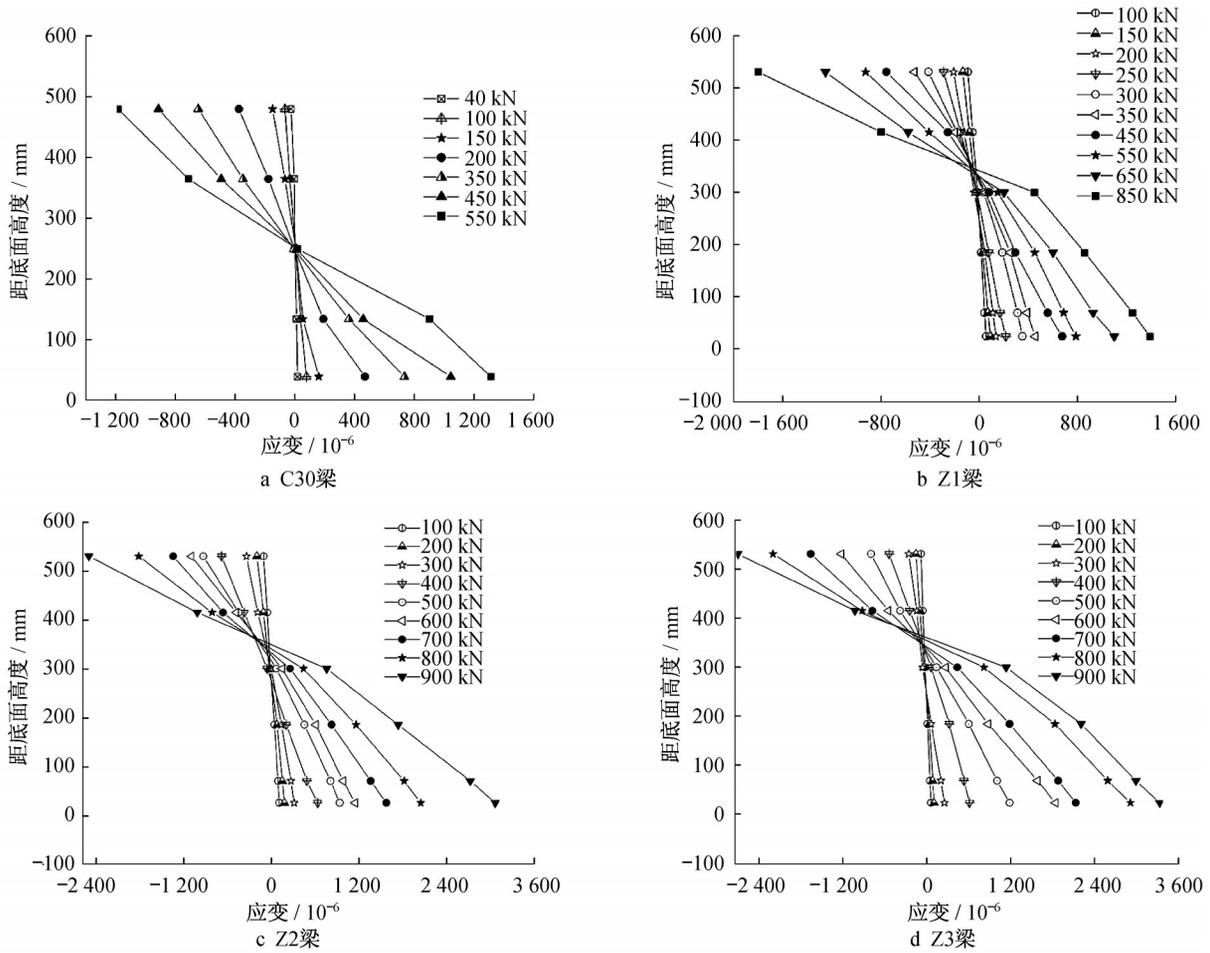


图14 试验梁的截面应变分布

Fig.14 Strain distribution of the cross-sections of test beams

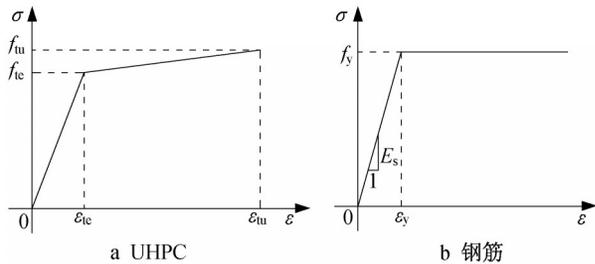


图15 UHPC和钢筋轴拉应力-应变

Fig.15 Tensile stress-strain of UHPC and steel reinforcement axis

性轴距受拉区边缘距离为 ξh 。依据试验结果(图14),对三根组合梁中性轴高度取平均值。4个阶段中 $\xi_1 \sim \xi_4$ 分别约为0.5、0.6、0.7、0.75。每个阶段中钢筋和UHPC对截面抗力贡献研究如下。

0~250×10⁻⁶阶段:UHPC和钢筋均处于弹性阶段,两者协同工作。将UHPC和钢筋对受压区混凝土作用点取矩,提供的截面抗力可按照公式(1)计算,计算图示见图16a。式中和图中: h 为截面总高

度; h_u 为UHPC层厚度; M_{UHPC} 为UHPC层抗弯贡献; M_s 为钢筋抗弯贡献; h_1 为中性轴距底边距离; h_c 为受压区混凝土作用点距底边距离; b 为截面宽度; E_{ct} 为UHPC弹性模量; ϵ_{ct} 为UHPC层底缘的应变; σ_{ct} 为UHPC层底缘的应力; A_s 为普通混凝土层中受拉钢筋面积; E_s 为钢筋弹性模量; ϵ_s 为普通混凝土层中受拉钢筋的应变; a_0 为普通混凝土层中受拉钢筋距底边距离; A_{su} 为UHPC层中受拉钢筋面积; E_s 为钢筋弹性模量; ϵ_{su} 为UHPC层中受拉钢筋的应变; a_u 为UHPC层中受拉钢筋距底边距离。

$$M_{UHPC} =$$

$$bE_{ct}\epsilon_{ct}h_u \frac{h_1^2 + h_u^2 - 2h_1h_u + 2h_1h - hh_u}{3h_1} \quad (1a)$$

$$M_s = A_s E_s \epsilon_s \left(\frac{2h + h_1}{3} - a_0 \right) +$$

$$A_{su} E_s \epsilon_{su} \left(\frac{2h + h_1}{3} - a_u \right) \quad (1b)$$

250×10⁻⁶~2000×10⁻⁶阶段:在此阶段钢筋处于弹性上升段,而UHPC处于平台段,此时UHPC应

力值基本保持不变。设此时受拉区高度为 h_2 , 受拉区 UHPC 和钢筋对受压区混凝土作用点取矩, 提供的截面抗力可按照公式(2)计算, 计算图示见图 16b。

$$M_{UHPC} = h_u b f_{tu} (h_c - 0.5h_u) \quad (2a)$$

$$M_s = A_s E_s \varepsilon_s (h_c - a_0) + A_{su} E_s \varepsilon_{su} (h_c - a_u) \quad (2b)$$

$2\ 000 \times 10^{-6} \sim 3\ 500 \times 10^{-6}$ 阶段: 在此阶段钢筋和 UHPC 均处于平台段。设此时受拉区高度为 h_3 , 受拉区 UHPC 和钢筋对受压区混凝土作用点取矩, 提供的截面抗力可按照公式(3)计算, 计算图示见图

16c。

$$M_{UHPC} = h_u b f_{tu} (h_c - 0.5h_u) \quad (3a)$$

$$M_s = A_s f_y (h_c - a_0) + A_{su} f_{yu} (h_c - a_u) \quad (3b)$$

$3\ 500 \times 10^{-6}$ 之后阶段: 在此阶段钢筋处于平台段, UHPC 处于下降段, 此时 UHPC 退出工作。设此时受拉区高度为 h_4 , 钢筋对受压区混凝土作用点取矩, 提供的截面抗力可近似按照公式(4)计算:

$$M_s = A_s f_y (h_c - a_0) + A_{su} f_{yu} (h_c - a_u) \quad (4)$$

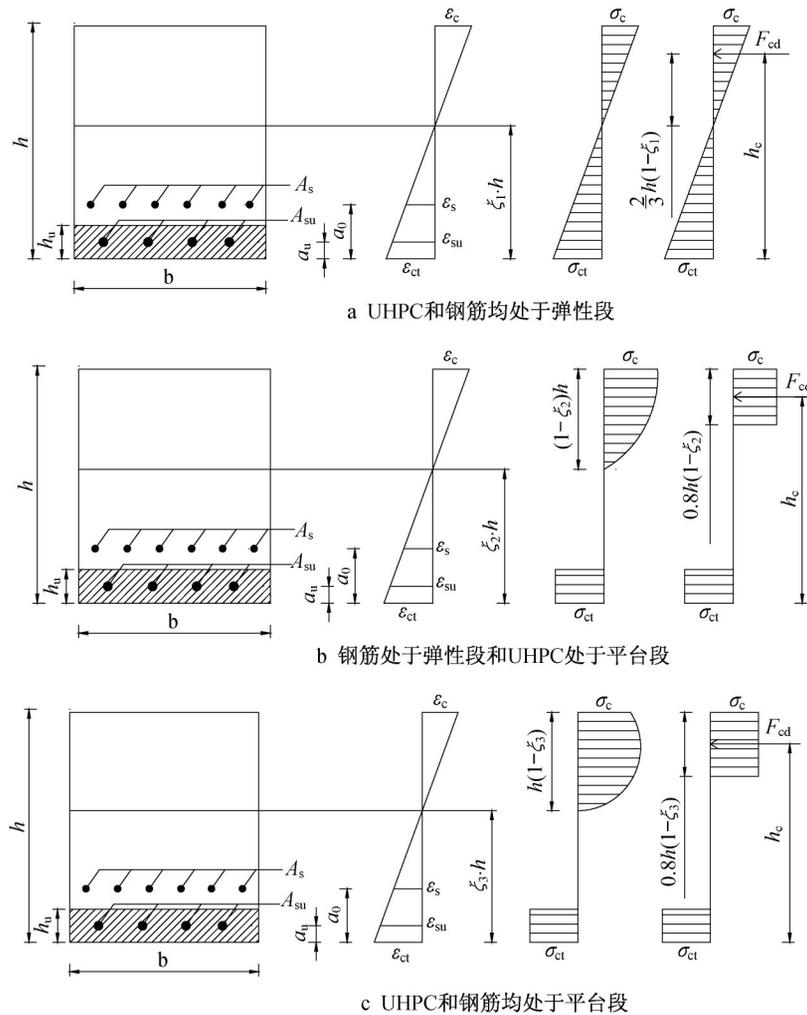


图 16 UHPC 和钢筋各阶段计算图

Fig.16 UHPC and rebar calculation diagram for each stage

根据公式(1)~(4)对试验梁进行计算分析, 受拉区钢筋和 UHPC 层分别对 Z1、Z2 和 Z3 组合梁截面的抗弯贡献结果见表 5, 表中 $M_{总}$ 为 UHPC 层和钢筋的抗弯贡献之和。

由表 5 可知: Z1 试验梁在第一阶段中, UHPC 层的抗拉贡献是钢筋的 2.72 倍, 在第二阶段和第三阶段分别是钢筋的 0.35 和 0.22 倍, 最终 UHPC 的抗拉

贡献占截面总抗力的 18%; Z2 试验梁在第一阶段中, UHPC 的抗拉贡献是钢筋的 2.07 倍, 在第二阶段和第三阶段分别是钢筋的 0.27 和 0.18 倍, 最终 UHPC 的抗拉贡献占截面总抗力的 15%。Z3 试验梁在第一阶段中, UHPC 的抗拉贡献是钢筋的 1.55 倍, 在第二阶段和第三阶段分别是钢筋的 0.20 和 0.15 倍, 最终 UHPC 的抗拉贡献占截面总抗力的

表5 Z1~Z3试验梁各阶段钢筋和UHPC抗拉贡献度对比表

Tab. 5 Bending contribution from steel rebars and UHPC in Z1~Z3 beams at each stage

		第一阶段	第二阶段	第三阶段	第四阶段
Z1	试验梁	$M_{UHPC}/(kN\cdot m)$	69.57	77.02	82.62
		$M_s/(kN\cdot m)$	25.54	223.02	372.96
		M_{UHPC}/M_s	2.72	0.35	0.22
		$M_{UHPC}/M_{总}$	0.73	0.26	0.18
Z2	试验梁	$M_{UHPC}/(kN\cdot m)$	69.57	77.02	82.62
		$M_s/(kN\cdot m)$	33.57	288.90	465.56
		M_{UHPC}/M_s	2.07	0.27	0.18
		$M_{UHPC}/M_{总}$	0.67	0.21	0.15
Z3	试验梁	$M_{UHPC}/(kN\cdot m)$	69.57	77.02	82.62
		$M_s/(kN\cdot m)$	44.80	381.03	556.15
		M_{UHPC}/M_s	1.55	0.20	0.15
		$M_{UHPC}/M_{总}$	0.61	0.17	0.13

13%。Z1~Z3梁在第四阶段,由于此时UHPC层的拉应变已经很大,UHPC层逐渐失效。计算模型中,此时不考虑UHPC的抗弯作用,抗弯承载力仅由钢筋提供,试验梁荷载值呈现下降阶段。截面极限抗弯承载力的计算以第三阶段结束时为准。

由以上本节分析可知:UHPC-NC组合梁受弯抗力主要由钢筋提供,通过对UHPC层提供的抗力与钢筋提供的抗力进行对比,以及对UHPC抗拉贡献在截面总抗弯承载力占比分析中得出,在无配筋组合梁中UHPC层抗力可以占到截面总抗力的18%,对于高配筋率的组合梁可占到13%。因此在极限抗弯承载力计算时,应充分考虑UHPC层的贡献。

4 UHPC-NC组合梁的抗弯承载力

通过第3节分析,可知UHPC对组合梁的抗弯承载力有提高作用,特别是对于配筋的UHPC层,抗弯承载力提升显著。根据第2节试验结果,对组合梁中UHPC层的等效矩形应力系数 k 进行研究。

4.1 基本假定

(1) 变形协调几何关系——平截面假设

从试验结果可以看出,试验梁正截面破坏表现为受压区C30混凝土压碎,而压碎是发生在一定长度范围内的,实测的平均应变值,基本与平截面变形相符。

(2) UHPC受拉应力-应变关系

结合材性试验结果,本节UHPC材料的应力-应变关系同样采用折线模型进行计算,如图15a所示。

(3) 钢筋应力-应变关系

为简化计算,受力钢筋采用简化的理想弹塑性应力-应变关系,如图15b所示。

(4)根据试验结果可知,钢筋与混凝土之间粘结良好、无滑移,变形协调。

4.2 UHPC层等效矩形应力系数

在进行UHPC-NC组合梁正截面抗弯承载力计算时,UHPC实际应力分布为曲线形,为了简化计算,并考虑塑性发展的影响,将曲线拉应力图等效为矩形拉应力图,如图17所示。式中, f_t 为实际拉应力, kf_t 为等效拉应力, f_c 为压区应力, f_y 为普通混凝土层中钢筋拉应力, f_{yu} 为UHPC层中钢筋拉应力, M_u 为截面抗弯承载力, x 为受压区高度。

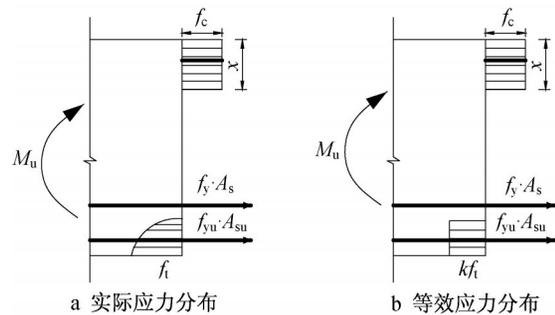


图17 适筋梁在极限荷载下截面应力分布

Fig.17 Section stress distribution of the beam with appropriate reinforcement under the ultimate load

UHPC层的等效矩形应力 kf_t 可以通过截面平衡条件和试验结果反推得到。在UHPC-NC组合梁受弯试验中,参数 f_c 、 f_y 、 f_t 、 b 、 A_s 、 h 、 h_u 均为已知量,结合文献[17]的规定及图17,根据平衡条件得到式(5)和(6),式中 N 为轴力, $M_{t,u}$ 为截面抗弯承载力。

$$\sum N = 0, \text{ 即:}$$

$$f_y A_s + f_{yu} A_{su} + kf_t b h_u = f_c b x \quad (5)$$

$$\sum M = M_{t,u}, \text{ 即:}$$

$$M_{t,u} = k f_t b h_u \left(h - \frac{h_u}{2} - \frac{x}{2} \right) + f_y A_s \left(h - a_u - \frac{x}{2} \right) + f_{yu} A_{su} \left(h - a_u - \frac{x}{2} \right) \quad (6)$$

联立公式(5)和(6),可得到等效受压区高度表达式为

$$x = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (7)$$

其中:

$$A = -\frac{1}{2} b f_c$$

$$B = \left(h - \frac{h_u}{2} \right) b f_c$$

$$C = f_y A_s \left(\frac{h_u}{2} - a_u \right) + f_{yu} A_{su} \left(\frac{h_u}{2} - a_u \right) - M_{t,u}$$

由Z1梁(UHPC层无钢筋)、Z2梁(UHPC层3Φ12)、Z3梁(UHPC层4Φ16)实测的试验梁极限弯矩 $M_{t,u}$,联立式(5)~(7),可计算Z1、Z2、Z3组合梁的 k 值分别为0.78、0.89和0.94。

通过 k 值的计算可知,UHPC层对截面承载力的贡献效率随着配筋率的不同而不同,配筋率越高,受拉区UHPC层对截面承载力的贡献效率越高。为了验证 k 值规律的普适性,结合国内外试验研究成果,对文献[18]中的UHPC-NC组合梁进行 k 值计算分析。计算发现,受拉区UHPC层对截面承载力的贡献效率随着结构纵向配筋的增大而增大,与本文结论一致。所以在实际工程应用中,在组合梁满足构造要求的情况下,可以通过增大组合梁的纵向配筋率,提高UHPC材料的利用率。

5 结论

根据本文的研究成果,可以得出以下结论:

(1)UHPC-NC组合梁的抗弯破坏形态分为三个阶段——弹性阶段、塑性强化阶段和破坏阶段。加载过程中,试验梁横截面应变分布满足平截面假定。

(2)UHPC-NC组合梁钢筋在达到屈服应变之前,与UHPC粘结可靠,保持应变一致性而共同受力,在钢筋屈服后,UHPC的应变继续发展,UHPC与钢筋分离,裂缝迅速向上发展,受压区高度减小,混凝土压碎,试验梁宣告破坏。试验过程中,UHPC层与普通混凝土之间粘结良好,没有出现相对滑移,说明通过凿毛处理后的界面具有良好的粘结性能,能够满足实际工程要求。结合UHPC与钢筋的协同工作特性和试验结果,对UHPC和钢筋的抗弯贡献度进行了研究。

(3)通过试验分析,三根UHPC-NC组合梁Z1、Z2、Z3的极限承载力相对于C30梁分别提高9.02%、31.26%、56.82%。结果表明,UHPC层对于结构的抗弯承载能力有提升作用。在UHPC层配置钢筋,能大幅度提高原结构的抗弯承载力。

(4)针对UHPC-NC组合梁受弯极限承载力,考虑受拉区UHPC开裂后对承载力的贡献,基于平截面假定建立了拉、压应力简化为矩形分布的计算模型。通过对 k 值的推导发现,受拉区UHPC对截面承载力的贡献效率随着配筋率的增大而提高。建议系数 k 取0.80,但还需大量试验进行验证。

参考文献:

- [1] RICHARD P, CHEYREZY M. Composition of reactive powder concretes [J]. *Cement & Concrete Research*, 1995, 25(7): 1501.
- [2] HARRIS D K, SARKAR J, AHLBORN T M. Characterization of interface bond of ultra-high-performance concrete bridge deck overlays [J]. *Transportation Research Record*, 2011, 2240(1): 40.
- [3] GRAYBEAL B. Ultra-high performance concrete [J]. *Technote*, 2011, 19(10): 848.
- [4] BRUHWILER E, DENARIE E. Rehabilitation of concrete structures using ultra-high performance fibre reinforced concrete [R]. Kassel: University of Kassel, 2008.
- [5] PREM P R, MURTHY A R. Acoustic emission and flexural behaviour of RC beams strengthened with UHPC overlay [J]. *Construction & Building Materials*, 2016, 123: 481.
- [6] SAFDAR M, MATSUMOTO T, KAKUMA K. Flexural behavior of reinforced concrete beams repaired with ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC) [J]. *Composite Structures*, 2016, 157: 448.
- [7] BRUHWILER E, DEANRIE E. Rehabilitation and strengthening of concrete structures using ultra-high performance fibre reinforced concrete [J]. *Structural Engineering International*, 2013, 23(4): 450.
- [8] PASCHALIS S A, LAMPROPOULOS A P, TSILOULOU O. Experimental and numerical study of the performance of ultra high performance fiber reinforced concrete for the flexural strengthening of full scale reinforced concrete members [J]. *Construction & Building Materials*, 2018, 186: 351.
- [9] LAMPROPOULOS A P, PASCHALIS S A, TSILOULOU O T, *et al.* Strengthening of reinforced concrete beams using ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC) [J]. *Engineering Structures*, 2016, 106: 370.
- [10] 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.

(下转第701页)