

预制UHPC-RAC组合梁受弯性能试验与理论计算

秦朝刚 吴涛 刘伯权 王博 李寓

Experimental and theoretical study on flexural behavior of precast UHPC-RAC composite beams

QIN Chaogang, WU Tao, LIU Boquan, WANG Bo, LI Yu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230704.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

BFRP钢筋纤维高强混凝土梁受弯承载力试验与理论

Experimental and theoretical study on the flexural capacity of high-strength concrete beams reinforced with BFRP bars and steel fiber

复合材料学报. 2018, 35(12): 3313–3323 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180319.004>

混合配筋钢纤维增强混凝土梁受弯承载力试验及理论计算

Experimental and theoretical calculation on the flexural capacity of steel fiber reinforced concrete beams with hybrid reinforcing bars

复合材料学报. 2020, 37(9): 2348–2357 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200212.003>

纤维增强树脂复合材料约束超高性能混凝土轴压性能的细观数值模拟

Meso-scale numerical simulation of axial compression performance of fiber reinforced polymer composite-confined ultra-high performance concrete

复合材料学报. 2020, 37(7): 1629–1638 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190827.001>

钢纤维对超高性能混凝土抗弯力学性能的影响

Effect of steel fibers on the flexural response of ultra-high performance concrete

复合材料学报. 2018, 35(3): 722–731 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170612.005>

钢纤维-聚丙烯纤维混杂对再生混凝土抗冲击性能的影响

Effect of steel fiber-polypropylene fiber hybrid addition on impact resistance of recycled aggregate concrete

复合材料学报. 2020, 37(7): 1763–1773 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191106.001>

直剪作用下再生混凝土力学性能及强度指标换算

Mechanical properties and strength index conversion of recycled aggregate concrete under direct shear

复合材料学报. 2021, 38(11): 3962–3970 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210122.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

预制 UHPC-RAC 组合梁受弯性能试验与理论计算



分享本文

秦朝刚*, 吴涛, 刘伯权, 王博, 李寓

(长安大学 建筑工程学院, 西安 710061)

摘要: 超高性能混凝土 (Ultra-high performance concrete, UHPC) 和再生混凝土 (Recycled aggregate concrete, RAC), 碳足迹低, 属于“低碳混凝土”。将再生混凝土梁受拉侧或侧壁的部分 RAC 用 UHPC 替换, 形成“绿色低碳”UHPC-RAC 组合截面, 以提高力学性能。采用工厂预制工艺, 制作了预制 UHPC-RAC 组合梁。通过四分点抗弯性能试验, 分析了受拉 UHPC 厚度、UHPC-RAC 结合面粗糙度和侧壁 UHPC 高度, 对预制 UHPC-RAC 组合梁破坏机制、承载力、变形和初始刚度的影响规律, 提出了承载力计算公式。研究表明: 与 RAC 梁相比, 预制 UHPC-RAC 组合梁随受拉 UHPC 厚度的增加, 形成的 UHPC-RAC 穿筋结合面, 限制了开裂后 UHPC 剥离脱落; 增加界面粗糙度, 阻滞了水平裂缝的延展, 初始刚度可提高 16.6%; 随受拉 UHPC 钢纤维拔出, 荷载-位移曲线下降明显, 待再生混凝土压溃后, 仍有较高的残余强度。预制 UHPC-RAC 组合梁的开裂荷载和极限荷载, 分别增加 63.1% 和 22.9%, 截面抗弯刚度、初始刚度均得到明显改善。组合截面内钢筋、UHPC 和 RAC 协同受力, 应变沿截面高度线性变化, 符合平截面假定; 将截面应力等效分布后, 推导了预制 UHPC-RAC 组合梁的受弯承载力计算公式, 计算结果与试验值吻合较好。

关键词: 预制 UHPC-RAC 组合梁; 超高性能混凝土; 再生混凝土; 静力试验; 破坏机制; 受弯承载力

中图分类号: TU375.1; TB333

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2024)03-1420-16

Experimental and theoretical study on flexural behavior of precast UHPC-RAC composite beams

QIN Chaogang*, WU Tao, LIU Boquan, WANG Bo, LI Yu

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: Ultra-high performance concrete (UHPC) and recycled aggregate concrete (RAC), with a low carbon footprint, belong to the "Low Carbon Concrete". A portion of RAC on the tensile side or side wall of the RAC beam was replaced with UHPC to form a "green and low carbon" UHPC-RAC composite section to improve mechanical properties. The precast UHPC-RAC composite beam was fabricated by precast technology. The influences of tensile UHPC thickness, roughness of UHPC-RAC joint surface and UHPC height of side wall on failure mechanism, bearing capacity, deformation and initial stiffness of precast UHPC-RAC composite beams were analyzed by four-point flexural tests, then the calculation formula of bearing capacity were proposed. The results show that, comparing precast UHPC-RAC composite beams with RAC beams, the UHPC-RAC bonding surface traversed by the stirrups with the increase of UHPC thickness on the tensile side limits the peeling off of UHPC after cracking. The increasing roughness of the interface further retards the extension of horizontal cracks and improves the initial stiffness about 16.6%. With the failure of steel fiber pulling out in the UHPC on the tensile side, the load-displacement curves de-

收稿日期: 2023-05-08; 修回日期: 2023-06-15; 录用日期: 2023-06-23; 网络首发时间: 2023-07-05 10:13:35

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230704.001>

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目 (2021T140587; 2019M660051XB); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2023-JC-YB-326); 长安大学中央高校基本科研业务费高新技术项目 (300102282208)

China Postdoctoral Science Foundation (2021T140587; 2019M660051XB); Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2023-JC-YB-326); Fundamental Research Funds for the Central Universities, CHD (300102282208)

通信作者: 秦朝刚, 博士研究生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为新型装配式混凝土结构 E-mail: qinchaogang@chd.edu.cn

引用格式: 秦朝刚, 吴涛, 刘伯权, 等. 预制 UHPC-RAC 组合梁受弯性能试验与理论计算 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(3): 1420-1435.

QIN Chaogang, WU Tao, LIU Boquan, et al. Experimental and theoretical study on flexural behavior of precast UHPC-RAC composite beams[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(3): 1420-1435(in Chinese).

crease obviously. The precast composite beams still have a high residual strength when the compression concrete is crushed. Compared with RAC beams, the cracking load and ultimate load of precast UHPC-RAC composite beams are increased by 63.1% and 22.9%, respectively, and the section flexural stiffness and initial stiffness are significantly improved. In the composite section, reinforcement, UHPC and RAC work collaboratively, and the strain changes linearly along the section height, conforming to the assumption of plain section. After equivalent section stress distribution, the calculation formula of the bending capacity of the precast UHPC-RAC composite beams is deduced, and the calculated results are in good agreement with the experimental values.

Keywords: precast UHPC-RAC composite beam; ultra-high performance concrete; recycled aggregate concrete; static test; failure mechanism; flexural capacity

超高性能混凝土 (Ultra-high performance concrete, UHPC) 作为一种性能优异的新型复合材料, 具有较高的拉、压强度, 且易于施工, 与钢筋混凝土 (Reinforced concrete, RC) 复合后, 在预制构件连接、既有结构加固和新型结构体系等方面应用, 以提升力学性能^[1]; 此外, 较低的氯离子渗透系数, 可提高结构的耐久性, 延长寿命, 降低全生命周期碳排放的潜力巨大^[2]。

Habel 等^[3]在 RC 梁拉侧设计了配筋 UHPC, 可以显著提高强度、刚度和抗裂性能。Spyridon 等^[4-5]在混凝土 (Normal concrete, NC) 与 UHPC 界面布置栓钉或附加钢筋, 增加界面粗糙度, 改善 RC 梁的抗弯性能, 减小塑性阶段界面的相对滑移量, 提高整体性。Al-Osta 等^[6]用现场浇注 UHPC 和环氧树脂粘贴预制 UHPC 薄板工艺加固 RC 梁, 改善了力学性能, 但粘贴的预制 UHPC 薄板与 NC 粘结性能较差, 降低了延性。梁兴文等^[7]将预制 UHPC 薄板组装, 设计了免拆模 RC 梁, 开裂荷载提高 50%, 屈服荷载和极限荷载分别增加 10%, 但极限荷载后 UHPC 与混凝土结合面开裂, 造成预制 UHPC 薄板部分脱落。

对于附加配筋 UHPC 加固 RC 梁, 峰值荷载前的 UHPC 与 NC 粘结较好, 未产生相对滑移, 协同受力。基于此, 李雪峰等^[8]考虑 UHPC 内钢纤维对 RC 梁抗拉强度的贡献, 由大量试验数据回归得出单筋矩形截面受压高度系数为 0.85, 建立了组合截面抗弯承载力计算公式。采用 UHPC 受拉应变硬化折线模型, 刘超等^[9]考虑 UHPC 塑性发展, 将拉应力分布曲线等效为矩形, 等效系数取 0.8, 计算了 UHPC-NC 组合梁的极限抗弯承载力。梁兴文等^[7]基于平截面假定与界面内材料的本构模型, 推导了免拆 UHPC 模板 RC 梁的受弯承载力计算公式。由此可见, 后浇 UHPC 或预制 UHPC 模板工艺用于提升 RC 梁的力学性能, 改善效果与组合截面构造设计, 材料结合面粗糙度及

粘结性能, UHPC 性能发挥程度等因素相关。

拆除建筑物产生的再生粗骨料, 表面粘附旧水泥浆, 具有多孔隙、多裂纹特点, 使配比的再生混凝土 (Recycled aggregate concrete, RAC) 内粗骨料界面过渡区结构复杂, 导致力学性能离散, 限制了工程应用^[10]。为了提高 RAC 的资源利用率和构件性能^[11], 研究不同强化技术, 改善骨料界面区微观结构, 提高 RAC 的力学性能^[12-13], 其中利用 CO₂ 强化的产物充填界面区裂隙, 增强界面性能, 同时具有固碳的特点, 而优化强化方式可提高固碳效果^[14]。肖建庄等^[15-16]设计了半预制再生混凝土叠合梁, 证明其力学性能与现浇 RC 梁相似, 并提出了组合再生混凝土的概念。

从延长建筑寿命, 提高结构性能, 降低天然建材需求, 再生骨料固碳等方面分析, UHPC 和 RAC 均属于低碳混凝土, 碳耗用量少, 可降低碳足迹。采用预制工艺, 将性能相似、优势互补的 UHPC 与 RAC 组合设计, 形成“低碳”UHPC-RAC 组合截面, 优化构件建造方式, 降低结构的碳排放, 实现工程固碳。本文提出了预制 UHPC-RAC 组合梁, 以受拉 UHPC 厚度、UHPC 与 RAC 结合面粗糙度和侧壁 UHPC 高度为变量, 通过四分点受弯性能试验, 研究了预制 UHPC-RAC 组合梁的破坏机制和受弯性能变化规律, 建立了预制 UHPC-RAC 组合梁受弯承载力计算公式。

1 实验方案

1.1 材料性能

工程应用中再生粗骨料的取代率越高, 资源利用率就越高。然而, 再生粗骨料表面粘附的旧水泥浆, 使 RAC 的力学性能随粗骨料取代率的增加而降低^[17]。预制组合梁中再生粗骨料取代率为 50%, 为陕西建新绿环实业股份有限公司拆除结构破碎筛分而来, 主要性能指标满足《混凝土用再生粗骨料》(GB/T 25177—2010)^[18]中 II 类骨料的要求, 水泥为海螺牌 P·O 42.5, 按照表 1 的配合

比，配制了强度等级为 C35 的再生混凝土。UHPC 由中德新亚生产，内含混杂钢纤维，长度为 12~14 mm，直径为 0.18~0.23 mm，体积掺量为 2vol%。再生混凝土和 UHPC 棱柱体 (100 mm×100 mm×

300 mm) 抗压强度的试验平均值如表 2 所示。钢筋等级为 HRB400，箍筋直径为 8 mm，受拉钢筋直径为 14 mm，屈服强度和极限抗拉强度如表 2 所示。

表 1 再生混凝土 (RAC) 的配合比
Table 1 Mixture ratio of recycled aggregate concrete (RAC)

Recycled coarse aggregate replacement ratio	Water cement ratio	Cement	Coarse aggregate		Sand	Water
			Natural	Regeneration		
50%	0.42	488.1	570.99	570.99	614.92	227.84

表 2 RAC、超高性能混凝土 (UHPC) 和受拉钢筋力学性能
Table 2 Mechanical properties of RAC, ultra-high performance concrete (UHPC) and tensile reinforcements

Material categories	Compressive strength	Tensile strength	Material categories	Yield strength	Ultimate strength
RAC	37.9	—	Tensile reinforcement	473.4	603.4
UHPC	113	9.70			

1.2 试件设计

按照混凝土结构设计规范 GB 50010—2010[S]^[19] 设计了 1 根 RAC 梁和 7 根预制 UHPC-RAC 组合梁，长度为 2 300 mm，截面尺寸为 200 mm×300 mm，受拉钢筋为 3C14，配筋率为 0.85%，箍筋为 C8@100，受压区的架立钢筋为 2C10，设计参数如表 3 和图 1 所示。与 RC 梁外围二次附加配筋 UHPC 不同，采用预制工艺，将 UHPC 与 RAC 在同一配筋截面组合，无需形成双层受拉钢筋，以提高承载力、延性与韧性。因此，保持 RAC 梁的截面尺寸不变，用 UHPC 替换截面中受拉侧或侧壁的部分 RAC，形成预制 UHPC-RAC 组合截面，改变受拉 UHPC 厚度、UHPC 与 RAC 结合面粗糙

度和侧壁 UHPC 高度，探究不同设计截面预制组合梁的受弯性能。

在相同的配箍截面内，UHPC 与 RAC 结合面分别位于箍筋外边界、箍筋内边界和受拉钢筋内边界，因此形成了箍筋未穿筋界面和穿筋界面，对应的组合截面中受拉 UHPC 厚度分别为 13 mm、21 mm 和 35 mm。为改善预制组合梁中结合面开裂带来的不利影响，在受拉 UHPC 厚度为 35 mm 的结合面，设计了矩形键槽，宽度 20 mm，深度 10 mm 和 20 mm，经计算不同结合面对应的粗糙度分别为 2.0 mm 和 4.0 mm。组合截面侧壁 UHPC 高度的增加，可以提高 RAC 梁的受压塑性性能，在受拉 UHPC 厚度为 35 mm 试件侧壁上，设计 UHPC

表 3 预制组合梁的设计参数
Table 3 Design parameters of the precast composite beams

Specimen number	UHPC		Longitudinal bar	Stirrup	Roughness/mm
	Tensile thickness/mm	Side wall height/mm			
RAC-B1	—	—	3C14		—
UHPC13-RAC/S/T-B2	13	—	3C14		—
UHPC21/S-RAC/T-B3	21	—	3C14		—
UHPC35/S/T-RAC-B4	35	—	3C14	C8@100	—
UHPC35/S/T-I2-RAC-B5	35	—	3C14		2.0
UHPC35/S/T-I4-RAC-B6	35	—	3C14		4.0
UHPC35/S/T-RAC-B7	35	160	3C14		—
UHPC35/S/T-RAC-B8	35	300	3C14		—

Notes: S—Stirrups; T—Tensile reinforcements; / —S or T locates in RAC or UHPC; I—UHPC-RAC interface.

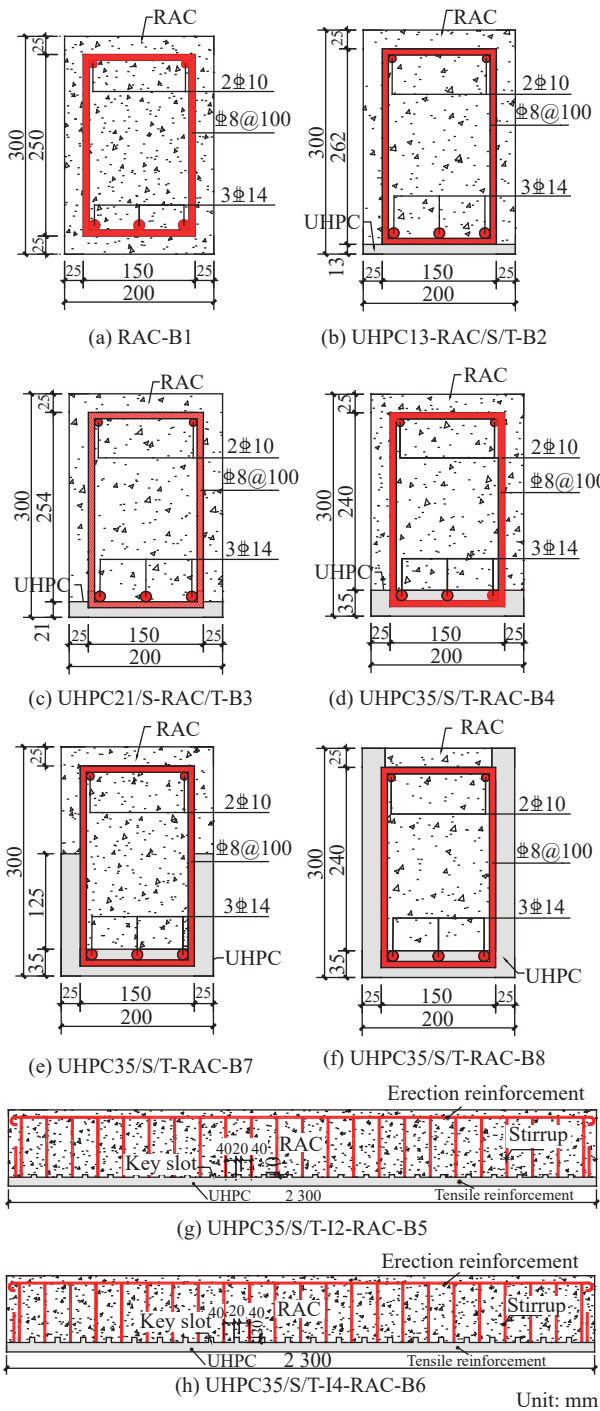


图1 预制组合梁的设计图

Fig. 1 Design drawing of the precast composite beams

的高度分别为 160 mm 和 300 mm，厚度为 30 mm。

1.3 试件制作

要形成 UHPC 与 RAC 配筋组合截面，一种是半预制工艺，将预制 UHPC 薄壳拼装成模板，放置钢筋骨架后浇筑混凝土，形成免拆模构件。此类构件中 UHPC 仅作为模板，预制 UHPC 与 NC 粘结较差，且荷载下结合面开裂后 UHPC 易剥离，

不能充分发挥 UHPC 的力学性能^[20]。另一种是全预制工艺，在预制 RAC 芯体外围浇筑 UHPC，发挥 UHPC 收缩增强材料结合面的粘结效果，消除预制 UHPC 模板内混凝土收缩带来的不足^[21]，形成预制构件。本试验采用全预制工艺，即“两阶段一次成型”，如图 2 所示。第一阶段先成型组合截面中预制 RAC 芯体，因受拉 UHPC 厚度不同，将 RAC 浇筑至截面中材料结合面的设计高度后，保留 RAC 天然浇筑的界面形式，养护 28 天后，进入第二阶段，清理钢筋表面锈迹和松动的粗骨料，利用 UHPC 的自密实和凝固收缩特性，在预制 RAC 芯体外围浇筑 UHPC，形成不同的受拉 UHPC 厚度、UHPC-RAC 结合面粗糙度和侧壁 UHPC 高度的预制 UHPC-RAC 组合梁。

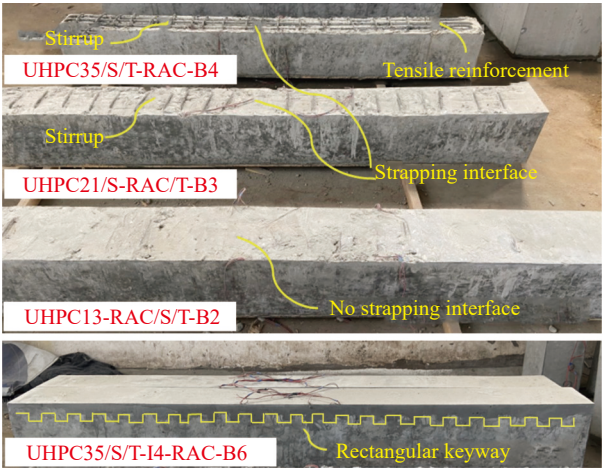


图2 UHPC 与 RAC 结合面设计

Fig. 2 Surface design between UHPC and RAC

1.4 试件加载与测试

采用陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室 200T 微机控制电液伺服压力试验机，在预制组合梁四等分点施加对称的集中荷载，保证跨中 1 000 mm 内仅受弯矩作用。采用位移控制的加载制度，目标位移在 6 mm 前，级差是 0.2 mm，位移为 6~20 mm，级差为 2 mm，位移为 20 mm 至破坏，位移级差为 5 mm，且每级加载后稳压 5~10 min，记录预制组合梁弯曲裂缝的形态和宽度，如图 3 所示。

试件一侧绘制了 50 mm×50 mm 方格，定位并描绘每级位移下的裂缝形态，用裂缝宽度仪测量了钢筋重心位置的裂缝宽度；通过应变片，量测钢筋和沿截面高度 UHPC 或 RAC 应变的变化规律；在跨中、纯弯区边界和梁端布置了位移计，量测竖向变形。在预制组合梁另一侧布置了 1 400 mm

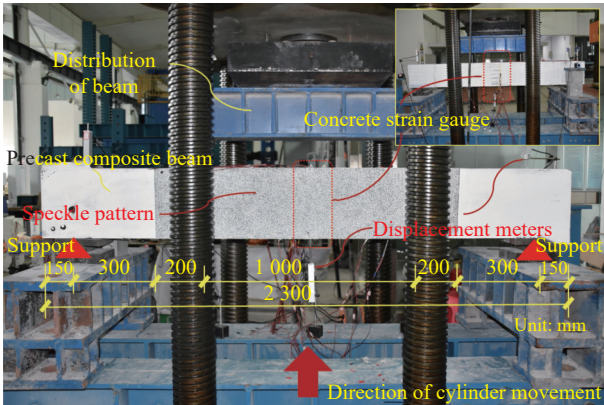


图3 预制组合梁的加载设计

Fig. 3 Loading design of the precast composite beams

散斑图，用高清相机拍摄了纯弯段形变的高清照片，用数字图像相关法 (Digital image correlation method, DIC) 分析试件表面的真实应变场。

2 结果与分析

2.1 预制组合梁的破坏形态

预制组合梁从开始受荷至混凝土压溃，全过程可分为未开裂的弹性阶段，带裂缝的正常工作阶段，超过极限荷载的破坏阶段，各阶段弯曲裂缝的发展过程及特点如下所述，最终裂缝形态如图4所示。

开裂前组合梁处于弹性状态，随位移增加，预制组合梁纯弯区受拉侧首先出现弯曲微裂缝。位移继续增加，弯曲裂缝逐步向受压区延伸，延伸长度逐渐减小，宽度缓慢增加，其承载力与竖向位移线性增加。待受拉钢筋屈服后，承载力增量减小，位移增加明显，临近受压区，裂缝产生分叉，斜向延伸至受压再生混凝土，随后，UHPC内钢纤维发出“嘶嘶”拔出声音，期间UHPC与RAC结合面形成水平裂缝，预制组合梁处于带裂缝正常工作阶段。超过极限荷载后，承载力缓慢减小，弯曲裂缝宽度由均匀变化转变为个别裂缝的持续增大，即UHPC断面内随机分布较少的钢纤维拔出失效，导致裂缝宽度增加明显，最终演变为最宽裂缝，与压溃RAC贯通。同时，UHPC与RAC结合面的水平裂缝宽度增加明显。

最终受压混凝土压溃破坏时，采用DIC技术分析了各试件纯弯区RAC表面的真实应变，如图5所示，与另一侧记录的裂缝发生位置及形态一致，可见DIC技术可以清晰捕捉试件表面的弯曲裂缝，并量化分析了纯弯区的竖向变形。

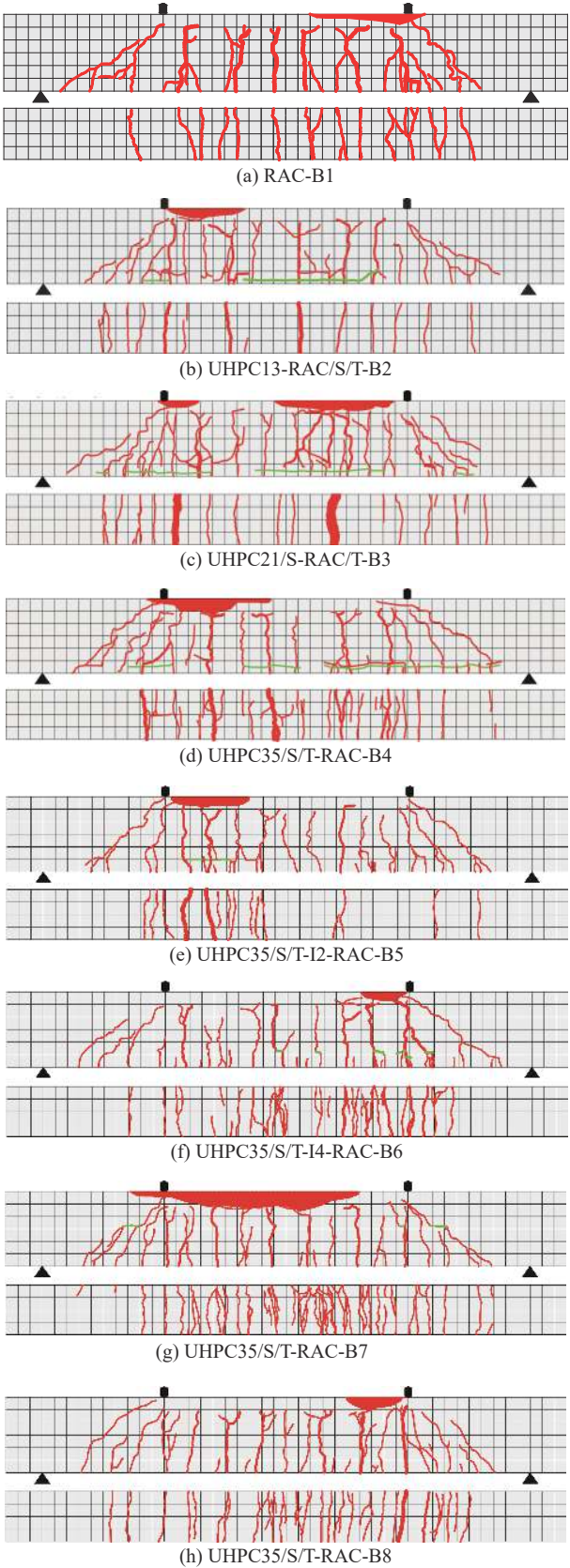


图4 预制组合梁侧面和底面裂缝形态

Fig. 4 Crack morphologies on the side and bottom of the precast composite beams

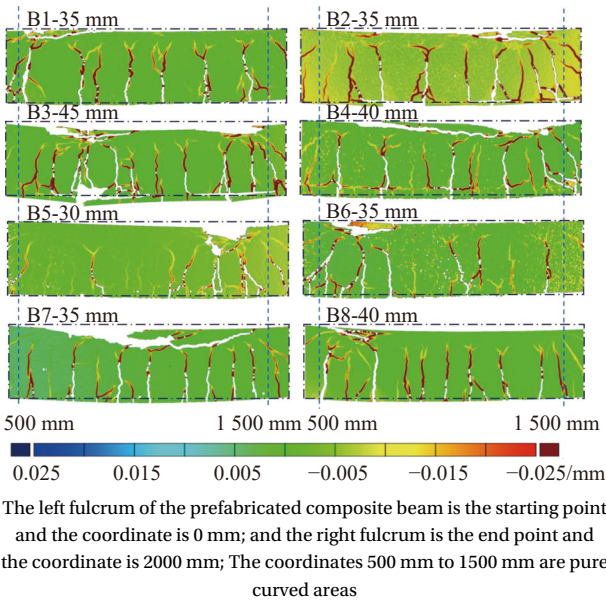


图5 预制组合梁的表面应变云图

Fig. 5 Surface strain cloud map of the precast composite beams

预制组合梁的典型裂缝形态如图 6 所示。预制组合梁受拉侧未设计矩形键槽的 UHPC 与 RAC 结合面形成明显水平裂缝，如预制组合梁 B2，箍筋外侧结合面的水平裂缝宽度最大，有剥离趋势；B3 中形成箍筋穿筋结合面，水平裂缝宽度减小，待 UHPC 内钢纤维失效后，从水平裂缝开始，RAC 受拉开裂后产生多条弯曲裂缝，与压溃混凝土

土连通；而 B4 中 UHPC 包裹箍筋和纵向钢筋，亦形成箍筋穿筋结合面，组合效果更好，整体性强，形成的水平裂缝并未演变为弯曲裂缝向上延伸的起点，且各裂缝的发展基本独立。结合面粗糙度为 2.0 mm 和 4.0 mm 的预制组合梁 B5 和 B6，形成的水平裂缝细而短，即 UHPC 凸肋阻滞了水平裂缝的延伸，限制了裂缝宽度的增加，裂缝形态与 RAC 梁 B1 相似。因此，随 UHPC 厚度的增加，组合截面内形成的穿筋 UHPC-RAC 结合面，保证了二者的粘结效果，加之增加粗糙度的矩形键槽，进一步增强了截面的组合效果。

2.2 预制组合梁的荷载-位移曲线

预制组合梁的荷载-位移曲线如图 7 所示，加载过程中经历了弹性阶段，带裂缝工作阶段和破坏阶段，各阶段特征点荷载及位移详如表 4 所示，其中开裂点由试件表面出现首条(首批)弯曲裂缝对应的荷载及位移确定，屈服点为荷载-位移曲线出现拐点或刚度减小时的荷载点，极限点为荷载-位移曲线的峰值点。

预制组合梁的荷载-位移曲线反映其受荷特点，即屈服前的承载力和位移线性增长，屈服后变形增量明显大于承载力，超过极限荷载进入破坏阶段，承载力下降明显。然而，各组合梁曲线存在差异，其中预制组合梁 B2 的承载力提升幅度最小，

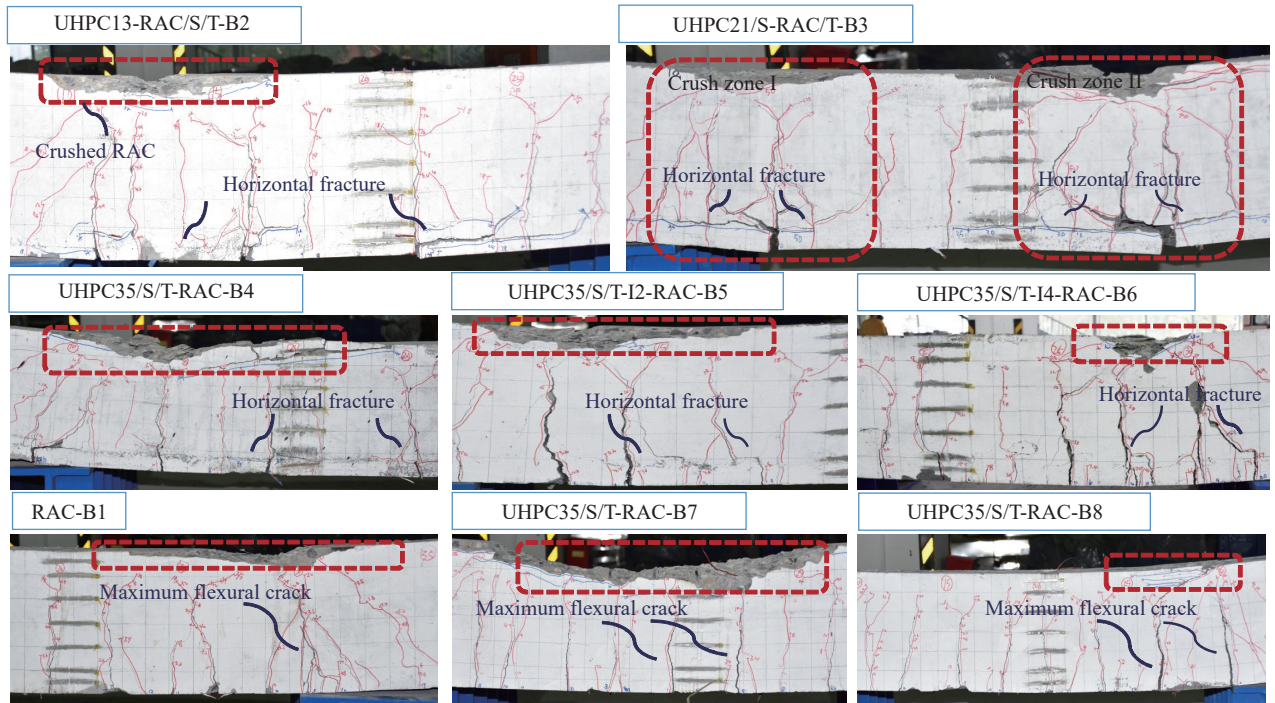


图6 预制组合梁纯弯区的典型破坏形态

Fig. 6 Typical failure patterns in the pure bending zone of the precast composite beams

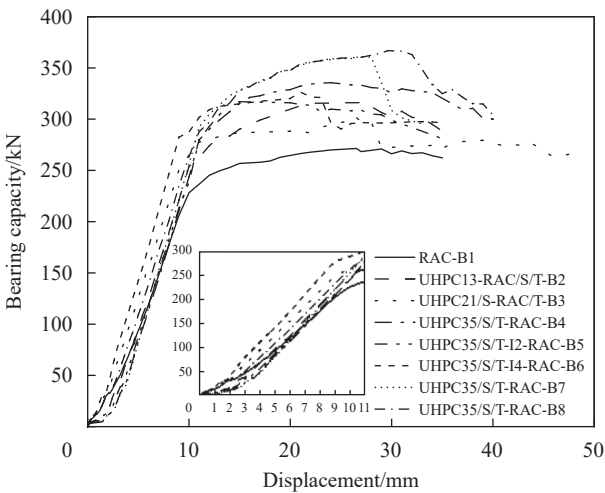


图7 预制组合梁的荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves of the precast composite beams

曲线则下降平缓，与 RAC 梁 B1 相似。随受拉 UHPC 厚度的增加，承载力的增幅逐渐增大，超过极限荷载后，因钢纤维拔出失效，UHPC 退出工作，预制组合梁的荷载-位移曲线下降明显；对于预制组合梁 B7 和 B8，侧壁 UHPC 高度明显增加了承载力，其降低幅度更为显著。此外，待 RAC 压溃后，继续加载预制组合梁 B3，待出现第二个压溃区，承载力降为极限强度的 84%，停止加载，位移约 50 mm，期间承载力缓慢降低，未突然失效，即超过极限荷载后，预制组合梁仍具有较高的承载力和变形性能。

对比 RAC 梁，UHPC 与 RAC 的不同组合截面设计，改善了预制组合梁的特征点荷载和变形，分别将 7 种 UHPC-RAC 组合梁的开裂荷载与极限荷载取平均值，与 RAC 梁对比分析可知其分别增加 63.1% 和 22.9%。其中受拉 UHPC 厚度和侧壁 UHPC 高度影响显著，而结合面粗糙度影响较小。随受拉 UHPC 厚度增加，屈服荷载逐渐增大，且与受拉钢筋组合后，屈服强度增加明显，平均约 24.8%。随侧壁 UHPC 高度增加，屈服荷载分别增加 26.3% 和 25.4%，屈服位移有约 10% 增幅，即 UHPC 钢纤维和钢筋共同提高了屈服点的特征值。UHPC 与 RAC 组合后，亦提升了极限荷载，受拉 UHPC 提高极限承载力约 20.8%；随侧壁 UHPC 高度增加，二者共同受压，保证了 RAC 受压塑性发展，极限荷载增幅分别为 33.6% 和 35.7%，变形性能增加 14.2% 和 20.5%。

2.3 预制组合梁的初始刚度

预制组合梁屈服前，荷载-位移曲线线性变化，

将斜率定义为初始刚度，反映了带裂缝正常工作阶段抵抗变形的能力，不同组合截面梁的初始刚度变化如图 8 所示。

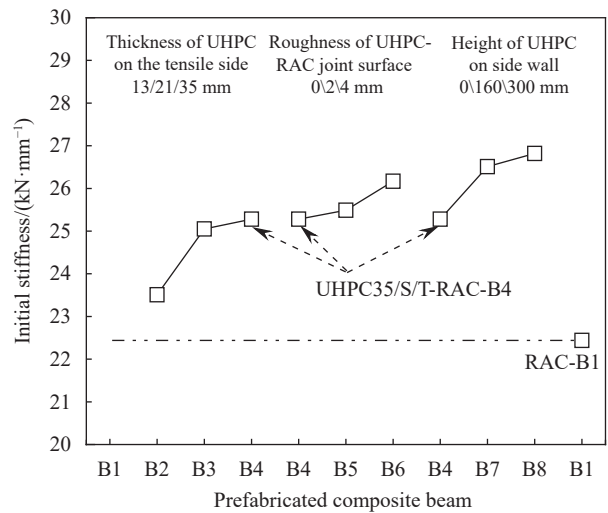


图8 不同因素影响下预制组合梁的初始刚度

Fig. 8 Initial stiffness of the precast composite beam effecting by different factors

以 RAC 梁为参照，受拉 UHPC 厚度、结合面粗糙度和侧壁 UHPC 高度均可提高初始刚度，最大增幅分别为 12.7%、16.6% 和 19.5%，其中侧壁 UHPC 刚度提升效果明显。当 UHPC-RAC 结合面位于箍筋外侧，即 UHPC 厚度为 13 mm 时，初始刚度提高 4.8%，待 UHPC 厚度为 23 mm 和 35 mm 时，初始刚度提升约 11.6% 和 12.7%。纵向钢筋内侧结合面设计的矩形键槽，保证了 UHPC 与 RAC 结合面的粘结性能，初始刚度比未设置矩形键槽的组合梁 B4，分别提升约 0.8% 和 3.5%，而对于侧壁 UHPC 高度的变化，与预制组合梁 B4 比较，不同的侧壁高度可以提高初始刚度约 4.9% 和 6.1%。

2.4 纯弯区的竖向形变

通过 DIC 技术，分析了不同目标位移下预制组合梁跨中纯弯区各测点的竖向挠度。以目标位移 12 mm 和 30 mm 为例分析，不同因素影响下纯弯区的真实变形如图 9 所示^[22]。

加载位移为 12 mm，预制组合梁的荷载-位移曲线刚过屈服点，主要以弹性变形为主，裂缝宽度较小，各测点竖向变形量值差异不明显，但受弯承载力不同，说明带裂缝正常工作阶段，不同截面构造的预制组合梁抗弯刚度不同，而 RAC 梁竖向变形稍大。加载位移为 30 mm，承载力刚过极限点，进入塑性破坏阶段，变形持续增加，承

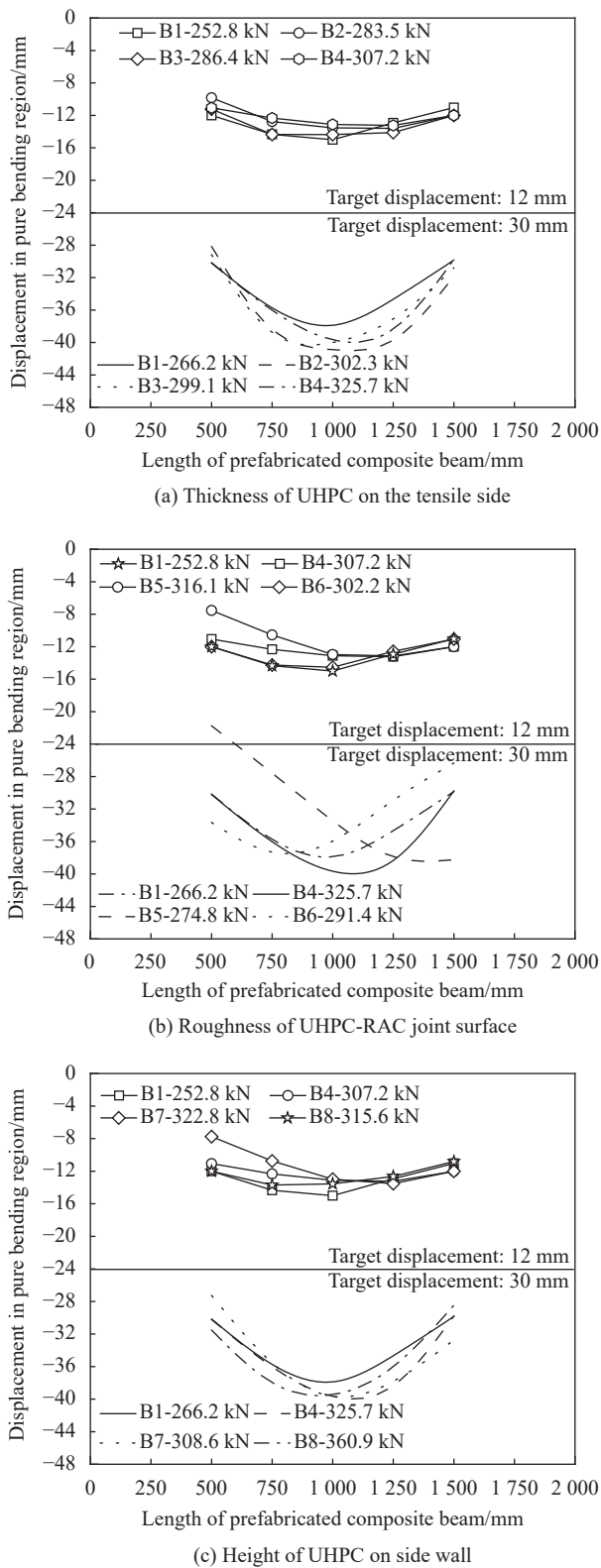


图 9 不同因素影响下预制组合梁跨中纯弯区的竖向变形

Fig. 9 Vertical deformation of the pure bending zone in the span of precast composite beam effected by different factors

承载力逐步减小, 纯弯区各测点的竖向变形差异较大, 因 UHPC 钢纤维随机分布, 使得各截面损伤

程度不同, 而各测点变形量值变化规律与混凝土开裂损伤状态一致。最大变形量值的差异较小, 而承载力较明显, 与带裂缝正常工作阶段类似, 不同组合截面构造使得残余刚度不同。临近 RAC 压溃时, RAC 梁的竖向位移稍小, 即超过极限状态后, 变形能力减弱。

因此, 假定承载力相同, 分析相同目标位移下的变形能力, 发现随受拉 UHPC 厚度和侧壁 UHPC 高度增加, 预制组合梁的变形能力得到明显改善。结合面粗糙度可增强试件的整体性, 提高组合截面的刚度, 但矩形键槽形成 UHPC 凸肋和凹槽, 造成截面刚度沿跨度方向变化, 反而促使了组合截面中凹槽部位 RAC 的损伤。

2.5 RAC/UHPC 的应变

再生混凝土的应变沿预制组合梁截面高度的分布规律如图 10 所示。对于未形成穿筋结合面, 受拉 UHPC 厚度最小的预制组合梁 B2, 结合面未明显开裂时, UHPC 拉应变远大于 RAC, 随着水平裂缝的形成, 再生混凝土的应变逐渐增大。当 UHPC 与 RAC 结合面位于箍筋或受拉钢筋内侧, 或结合面设置矩形键槽, 即形成穿筋结合面时, 增强了 UHPC 与 RAC 结合面的粘结效果, 使再生混凝土的应变连续变化, 未有突增现象, 组合截面整体性较好。随侧壁 UHPC 高度增加的预制组合梁 B7 和 B8, 表面应变的变化具有相似规律。

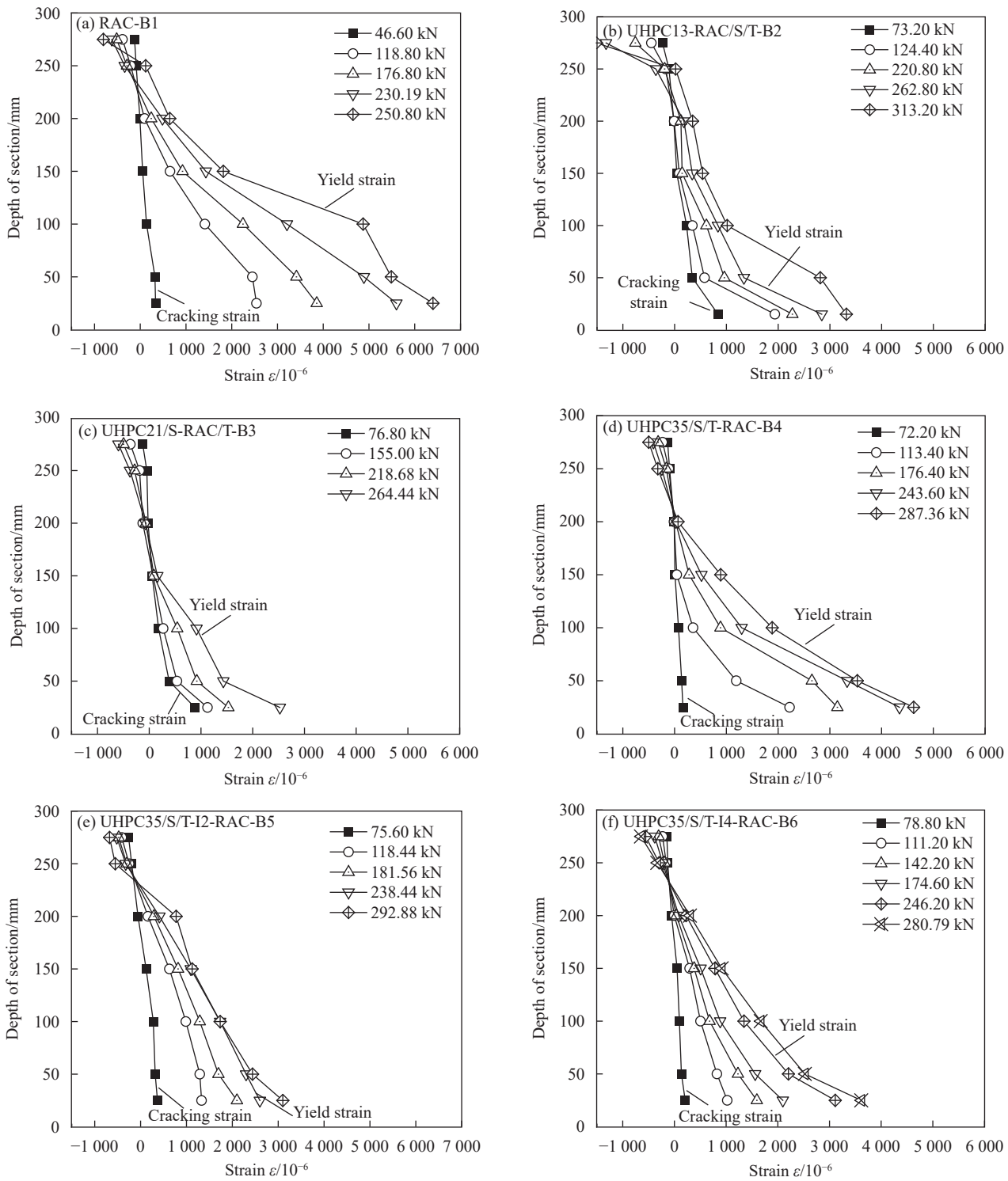
将预制组合梁开裂点和屈服点对应的再生混凝土应变, 定义为开裂应变和屈服应变, 沿截面高度 RAC 应变的对比分析如图 11 所示。从开裂到屈服, 随着截面塑性变形发展, 中和轴逐步上移, RAC 的受压高度逐渐减小。UHPC 内钢纤维具有较强的控裂能力, 使得预制组合梁的开裂应变增大, 开裂前再生混凝土的应变沿高度线性分布, 符合平截面假定。开裂后至屈服阶段, 组合截面受拉 UHPC 内钢纤维与钢筋共同承担拉应力, 截面受压再生混凝土呈现一定塑性变形, 但一段区域内的再生混凝土应变仍符合平截面假定。

2.6 受拉钢筋的应变

预制组合梁进入屈服状态前, 随荷载的增加, 跨中两侧受拉钢筋应变的平均值变化规律如图 12 所示。开裂前为弹性阶段, 荷载为 25 kN 左右, RAC 梁的钢筋拉应变开始增幅较大; 受拉 UHPC 厚度最小的预制组合梁 B2, 因 UHPC 提供的拉力较小, 且结合面粘结较差, 荷载超过 50 kN 后, 与 RAC 梁相似, 钢筋拉应变增幅较大。然而, 其

他预制组合梁 UHPC 与受拉钢筋粘结可靠，具有良好的组合效果，内部钢纤维承担了部分拉应力，与钢筋协同受荷，显著降低了开裂前受拉钢筋的应变。随着荷载增加，待 UHPC 受拉开裂后，因 UHPC 内钢纤维提供的拉力有限，钢筋将承担较大的拉应力，应变增加明显。当位移超过 6 mm

后，加载梯度为 2 mm，钢筋应变大幅度增加，直至预制组合梁钢筋应变片测试失效，最终钢筋拉应变的有效量值约 $2\,000\times10^{-6}$ 。承载力相同时，随受拉 UHPC 厚度、UHPC-RAC 结合面粗糙度和侧壁 UHPC 高度的增加，截面组合效果越好，钢筋拉应变的响应减小，拉力发挥程度小。



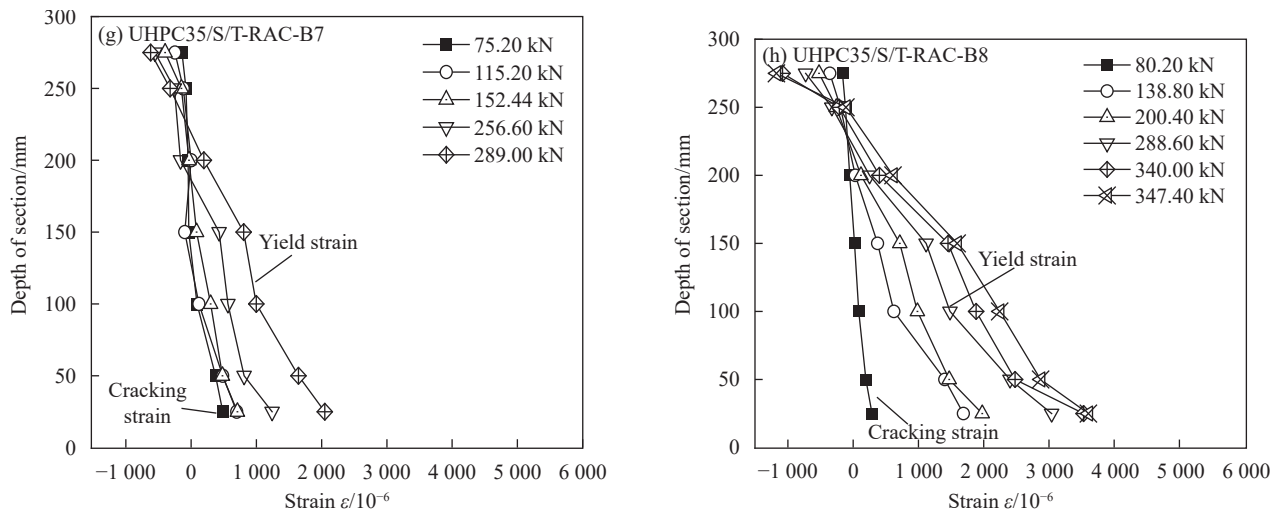


图 10 预制组合梁表面 RAC/UHPC 的应变

Fig. 10 Strain of RAC/UHPC on the precast composite beam surface

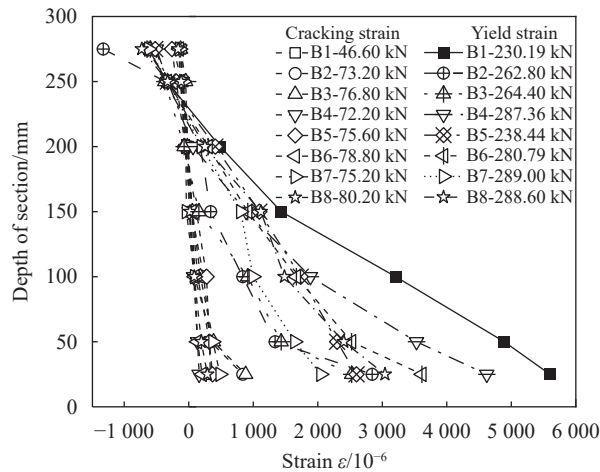


图 11 沿截面高度 RAC/UHPC 的应变对比

Fig. 11 Comparison of RAC/UHPC strain along section height

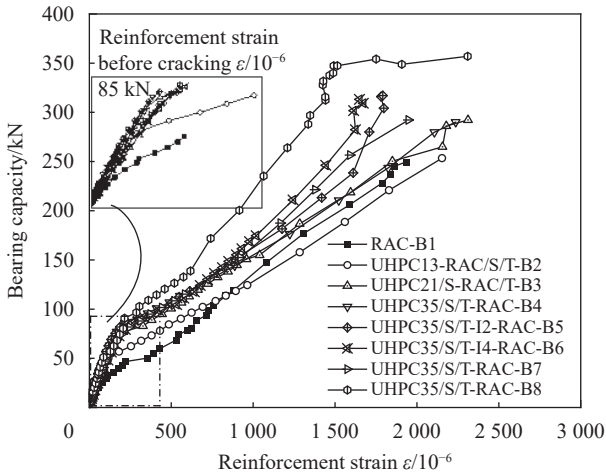


图 12 预制组合梁的受拉钢筋应变

Fig. 12 Tensile reinforcement strain of the precast composite beams

2.7 预制组合梁的延性系数

由极限位移和屈服位移的比值，定义了预制组合梁的延性系数，计算结果见、如表 4 所示，其中屈服位移由试件的荷载-位移曲线出现拐点时确定，极限位移为极限荷载对应的位移。预制组合梁的延性系数的变化规律如图 13 所示。

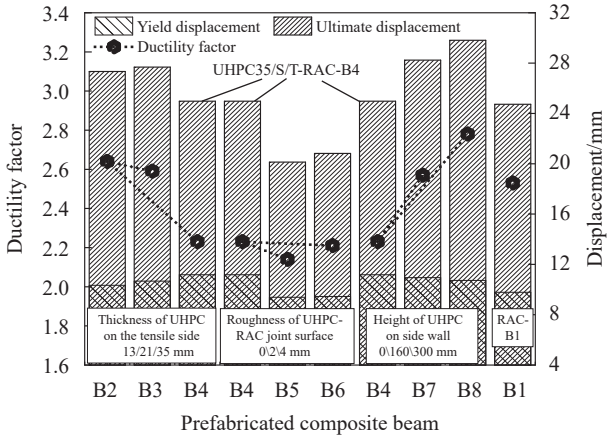


图 13 预制组合梁的延性系数

Fig. 13 Ductility factor of the precast composite beams

随受拉 UHPC 厚度的增加，预制组合梁的延性系数逐渐减小，当 UHPC 厚度为 35 mm 时，该组合梁的延性系数小于再生混凝土梁，原因在于组合截面中 UHPC 与 RAC 的组合效果增大了屈服位移；在极限状态时，UHPC 增强了预制组合梁受拉侧的力学性能，根据组合截面的内力平衡条件，亦提高了再生混凝土的抗压性能需求，极限受弯承载力增加的同时，对应的极限位移有所减小，使延性系数降低。UHPC-RAC 结合面粗糙度

对延性系数影响较小。随侧壁 UHPC 高度的增加, 延性系数增加较为明显, 侧壁 UHPC 同时增加了组合截面内受拉和受压的力学性能, 同时提高了极限承载力和极限位移, 如 U 型预制组合梁 B8 延性系数最高, 为 2.78。

3 预制 UHPC-RAC 组合梁的承载力

UHPC 与 RAC 形成的预制组合梁, 从开始受荷直至破坏, 变形规律和破坏特点与再生混凝土梁相似, 最终受拉钢筋屈服时受压再生混凝土压溃, 而 UHPC 内钢纤维的“桥接”作用, 提高了试件的开裂荷载, 且开裂后仍具有良好的承载力, 与钢筋共同承担拉力, 直至极限荷载后拔出失效。因 UHPC 抗压强度、弹性模量等力学性能参数优于 RAC, 组合后明显改善了 RAC 梁的截面特性, 提高了受弯承载力。因此, 在计算预制组合梁的受弯承载力时, 需考虑 UHPC 的贡献。

3.1 基本假定

(1) 预制组合梁全截面混凝土应变分布符合平截面假定, 即正截面应变线性分布, 其中 UHPC 与 RAC 具有相同的压应变, 受拉时 UHPC 与 RAC 结合面产生水平裂缝, 不考虑再生混凝土拉应力, 仅计算受拉 UHPC 和钢筋的贡献。

(2) 再生混凝土受压的应力分布曲线参考普通混凝土, 等效为矩形分布的应力图形; 文献 [23] 中, 再生混凝土的峰值压应变 ε_{c0} 为

$$\varepsilon_{c0} = 0.425 \sqrt{f_{cc}} - 0.345 \quad (1)$$

其中, f_{cc} 为再生混凝土的轴心抗压强度。再生混凝土的极限压应变 ε_{cu} 为峰值压应变 ε_{c0} 的 1.7 倍。

(3) 预制组合梁截面内 UHPC 的压应力分布曲线亦可等效为矩形分布的应力图形, 其中 UHPC 受压本构曲线采用 Singh 等 [24] 提出的, 可计算不同强度等级的 UHPC 受压本构模型为

$$\begin{cases} \sigma = f_{uc} \left[\frac{(E_{uc}/E_{sc})(\varepsilon/\varepsilon_0) - (\varepsilon/\varepsilon_{u0})^2}{1 - (E_{uc}/E_{sc} - 2)(\varepsilon/\varepsilon_{u0})} \right], & \varepsilon_u \leq \varepsilon_{u0} \\ \sigma = \frac{f_{uc}}{1 + 0.25[(\varepsilon/\varepsilon_{u0} - 1)/(\varepsilon_{uu}/\varepsilon_{u0} - 1)]^{1.5}}, & \varepsilon_u \geq \varepsilon_{u0} \end{cases} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{uu} = \varepsilon_{u0} \left[\left(\frac{1.25}{10} \frac{E_{uc}}{E_{sc}} + \frac{4}{5} \right) + \sqrt{\left(\frac{1.25}{10} \frac{E_{uc}}{E_{sc}} + \frac{4}{5} \right)^2 - \frac{4}{5}} \right] \quad (3)$$

$$E_{sc} = \frac{f_{uc}}{\varepsilon_{u0}} \quad (4)$$

其中: ε_{u0} 为 UHPC 峰值压应变, 取值 $2\,500 \times 10^{-6}$ [25];

ε_0 为峰值应力对应的应变; ε_{uu} 为 UHPC 极限压应变, 取值为 $1.5\varepsilon_{u0}$ [26]; E_{sc} 为 UHPC 峰值割线模量; E_{uc} 为 UHPC 弹性模量; f_{uc} 为 UHPC 轴心抗压强度。

将 UHPC 受拉应力-应变曲线简化为直线, 包括上升段和水平段, 表达式为

$$\begin{cases} \sigma_{ut} = \varepsilon_{ut} E_{ut}, & \varepsilon_{ut} \leq \varepsilon_{ut,0} \\ \sigma_{ut} = f_{ut}, & \varepsilon_{ut,0} < \varepsilon_{ut} \leq \varepsilon_{ut,p} \end{cases} \quad (5)$$

其中: σ_{ut} 为 UHPC 拉应力; E_{ut} 为 UHPC 弹性模量; f_{ut} 为 UHPC 极限抗拉强度; ε_{ut} 为 UHPC 拉应变; $\varepsilon_{ut,0}$ 为 UHPC 峰值拉应变; $\varepsilon_{ut,p}$ 为 UHPC 极限拉应变。

试件开裂后, UHPC 内钢纤维继续提供拉力, 因随机分布的特点, 文献 [27] 在复合材料力学基础上, 提出开裂后 UHPC 拉应力 f_{ut} 计算公式为

$$f_{ut} = \alpha \tau_f V_f \left(\frac{l_f}{d_f} \right) \quad (6)$$

$$\tau_f = 0.6 \sqrt{f_{uc}} \quad (7)$$

其中: α 为钢纤维有效方向系数, 取值 0.5; l_f/d_f 为钢纤维长径比; τ_f 为钢纤维与基体间的平均粘结应力; 钢纤维体积掺量为 2vol%, 即 V_f 取值 0.02。

(4) 受拉钢筋与 RAC 和 UHPC 无粘结滑移, 共同受力; 钢筋本构采用的理想弹塑性模型为

$$\begin{cases} \sigma_s = \varepsilon_s E_s, & \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \\ \sigma_s = f_y, & \varepsilon_y < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{su} \end{cases} \quad (8)$$

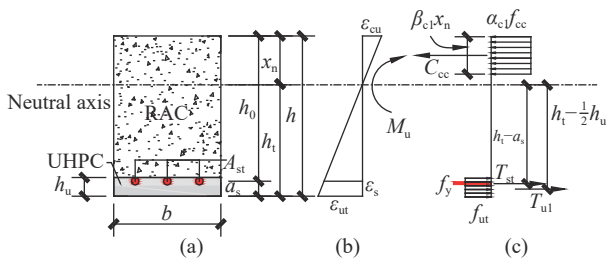
其中: f_y 为钢筋抗拉屈服强度; σ_s 为钢筋应力; ε_s 对应的钢筋应变; E_s 为钢筋的弹性模量; ε_y 为钢筋屈服应变; ε_{su} 为钢筋极限拉应变, 取值 $10\,000 \times 10^{-6}$ 。

3.2 受弯承载力计算

预制组合梁中 UHPC 与 RAC 不同的截面构造设计, 使计算受弯承载力时各部分材料的拉/压合力组成不同, 各材料的应力水平、受压区高度等计算参数存在差异, 其中再生混凝土梁 B1 参考普通混凝土梁计算。

3.2.1 不同受拉 UHPC 厚度与结合面粗糙度

预制组合梁中受拉 UHPC 与钢筋粘结可靠, 共同受荷, 截面参数、应变及应力如图 14 所示。因 RAC 受压塑性变形, 截面应力呈曲线分布, 为简化计算, 按合力相等及作用点相同的原理, 将曲线分布的 RAC 压应力等效为矩形分布图形, 当再生粗骨料取代率为 50% 时, 等效矩形应力图形参数 α_{cl} 与 β_{cl} 的取值为 0.87 和 0.81 [28]。



h—Cross section height; b—Cross section width; h_t—Height of tensile zone; h₀—Section effective height; h_u—Thickness of UHPC on tensile side; x_n—Actual height of compression zone; a_s—Distance from resultant force point of tensile reinforcement to edge of tensile zone; A_{st}—Section area of tensile reinforcement; ε_{cu}—Ultimate compressive strain of RAC; ε_{ut}—Tensile strain of UHPC; ε_s—Tensile strain of tensile reinforcement; α_{c1} and β_{c1}—Characteristic parameters of equivalent rectangular stress pattern about RAC; f_{cc}—Axial compressive strength of RAC; f_y—Yield strength of the reinforcement; f_{ut}—Tensile strength of UHPC; C_{cc}—Pressure of RAC; T_{st}—Tensile force of the reinforcement; T_{ul}—Tensile force of the UHPC on the tensile side; M_u—Ultimate bending moment of the combined section

图 14 不同受拉 UHPC 厚度预制组合梁的应力-应变分布: (a) 截面; (b) 截面应变; (c) 截面应力

Fig. 14 Stress-strain distribution of prefabricated composite beams with different tensile UHPC thicknesses: (a) Section; (b) Strain distribution of section; (c) Stress distribution of section

组合截面内各部分材料内力为

$$C_{cc} = \alpha_{c1}\beta_{c1}f_{cc}bx_n \tag{9}$$

$$T_{ul} = f_{ut}bh_u \tag{10}$$

$$T_s = f_yA_{st} \tag{11}$$

其中: α_{c1} 和 β_{c1} 为再生混凝土的等效矩形应力图形的特征参数; b 为再生混凝土的截面宽度; C_{cc} 为再生混凝土的压力; x_n 为 RAC 受压区高度; h_u 为受拉区 UHPC 的厚度; T_s 为钢筋的拉力; A_{st} 为受拉钢筋的截面面积; T_{ul} 为受拉 UHPC 的拉力。

根据截面平衡条件, 可得

$$\sum X = 0, C_{cc} = T_{ul} + T_s \tag{12}$$

$$\sum M = 0, M_u = C_{cc}\left(h - a_s - \frac{\beta_{c1}x_n}{2}\right) + T_{ul}\left(a_s - \frac{1}{2}h_u\right) \tag{13}$$

将公式 (9)~(11) 代入公式 (12) 和 (13) 得:

$$\alpha_{c1}\beta_{c1}f_{cc}bx_n = f_{ut}bh_u + f_yA_{st} \tag{14}$$

$$M_u = \alpha_{c1}\beta_{c1}f_{cc}bx_n\left(h - a_s - \frac{\beta_{c1}x_n}{2}\right) + f_{ut}bh_u\left(a_s - \frac{1}{2}h_u\right) \tag{15}$$

其中: M_u 为预制 UHPC-RAC 组合梁的极限弯矩; h 为再生混凝土的截面高度; a_s 为纵筋的保护层厚度; 式中除 x_n 外, 其余参数均已知, 由公式 (14) 计算受压区高度为

$$x_n = \frac{f_{ut}bh_u + f_yA_{st}}{\alpha_{c1}\beta_{c1}f_{cc}b} \tag{16}$$

将公式 (16) 代入公式 (15) 计算受拉 UHPC 厚度和结合面粗糙度不同时受弯承载力, 粗糙度用于提高结合面的粘结强度, 保证组合效果; 依据破坏现象和测试结果, 承载力计算时, 不考虑 UHPC 凸肋的贡献, 按照受拉 UHPC 断面最小部位计算, 即 UHPC 厚度为 35 mm, 计算结果如表 4 所示。

3.2.2 不同侧壁 UHPC 高度

与不同受拉 UHPC 厚度的预制组合梁对比, 侧壁 UHPC 高度不同, 截面中和轴下部 UHPC 受拉, 上部 UHPC 与 RAC 共同受压, 具有相同的应变, 组合截面应力-应变分布如图 15 所示。

同样, UHPC 受压塑性变形, 截面应力分布为曲线形式, 按照合力相等和作用点相同的原则将其简化, 即 UHPC 压应力曲线等效为矩形应力图形, 当 UHPC 轴心受压强度为 110 MPa 时, 等效矩形应力图形参数 α_{u1} 与 β_{u1} 分别取值为 0.878 和 0.740^[29]。

表 4 预制组合梁的受弯性能参数

Table 4 Flexural performance parameters of the precast composite beams

Specimen number	F _{cr} /kN	δ _{cr} /mm	F _y /kN	δ _y /mm	F _u /kN	δ _u /mm	K/(kN·mm ⁻¹)	μ	F _u ^c /kN	F _u /F _u ^c
RAC-B1	46.6	3.2	230.19	9.78	270.4	24.73	22.44	2.53	273.91	0.99
UHPC13-RAC/S/T-B2	73.2	4.2	262.22	10.34	316.2	27.33	23.51	2.64	296.62	1.07
UHPC21/S-RAC/T-B3	76.8	3.6	264.44	10.67	300.2	27.68	25.05	2.59	311.07	0.97
UHPC35/S/T-RAC-B4	72.2	4.8	287.36	11.18	335.8	24.97	25.28	2.23	330.89	1.01
UHPC35/S/T-I2-RAC-B5	75.6	4.4	238.44	9.39	318.4	20.13	25.49	2.14	330.89	0.96
UHPC35/S/T-I4-RAC-B6	78.8	3.0	280.79	9.45	326.8	20.82	26.17	2.21	330.89	0.99
UHPC35/S/T-RAC-B7	75.2	4.8	290.62	10.95	361.2	28.24	26.51	2.57	353.84	1.02
UHPC35/S/T-RAC-B8	80.2	4.0	288.62	10.73	366.8	29.81	26.82	2.78	394.58	0.93

Notes: F_{cr}—Cracking load; F_y—Yielding load; F_u—Ultimate load; δ_{cr}—Cracking displacement; δ_y—Yielding displacement; δ_u—Ultimate displacement; K—Initial stiffness; μ—Ductility factor; F_u^c—Calculated value.

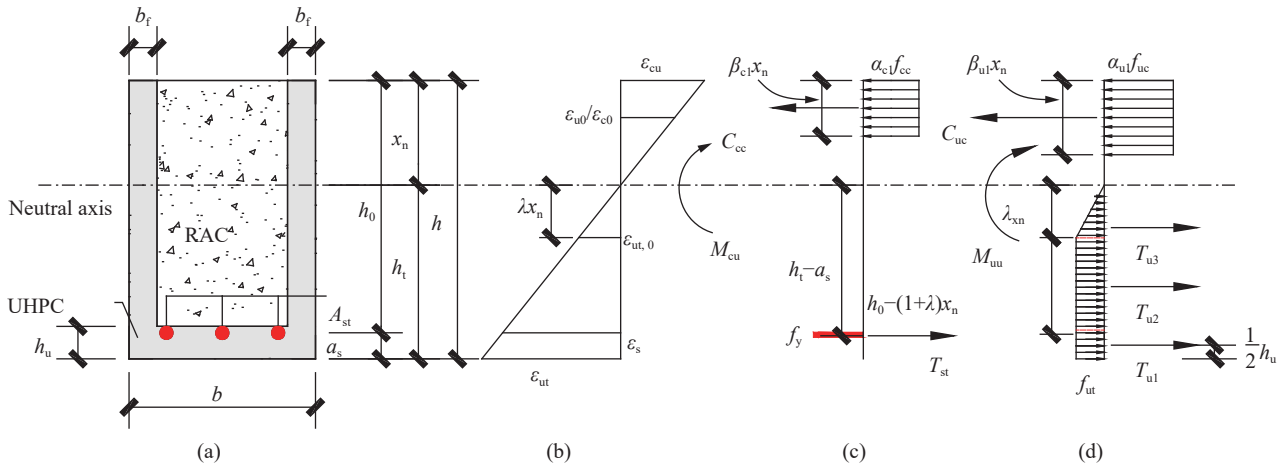


图 15 U 型预制组合梁的应力-应变分布: (a) 截面; (b) 截面应变; (c) RAC 截面应力; (d) UHPC 截面应力

b_f —Width of side wall UHPC; $\varepsilon_{ut,0}$ —Peak tensile strain of UHPC; ε_{cu} —Peak compressive strain of UHPC; ε_{c0} —Peak compressive strain of RAC; $\varepsilon_{ut,p}$ —Ultimate tensile strain of UHPC; $\sigma_{ut,p}$ —Ultimate Stress of UHPC; λ —Ratio of $\varepsilon_{ut,p}$ to ε_{cu} ; f_{uc} —Axial compressive strength of UHPC; C_{cc} —Pressure of UHPC; T_{u2} —Tensile force of the side wall UHPC as plastic state; T_{u3} —Tensile force of the side wall UHPC as elastic state; M_{cu} —Ultimate bending moment obtaining from RAC and reinforcements; M_{uu} —Ultimate bending moment obtaining from tensile UHPC and compressive UHPC; λ_{xn} —Height of the elastic phase of concrete; ε_{cu} —Ultimate compressive strain of RAC; α_{u1} —Ratio of the stress value of the UHPC rectangular stress diagram in the compression zone to the design value of the UHPC axial compressive strength; β_{u1} —Influence coefficient of UHPC strength.

图 15 U 型预制组合梁的应力-应变分布: (a) 截面; (b) 截面应变; (c) RAC 截面应力; (d) UHPC 截面应力

Fig. 15 Stress-strain distribution of U-shaped precast composite beams: (a) Section; (b) Strain distribution of section; (c) Stress distribution of section of RAC; (d) Stress distribution of section of UHPC

截面各部分材料合力计算公式为

$$C_{cc} = \alpha_{c1}\beta_{c1}f_{cc}(b - 2b_f)x_n \quad (17)$$

$$C_{uc} = 2\alpha_{u1}\beta_{u1}f_{uc}b_fx_n \quad (18)$$

$$T_s = f_yA_{st} \quad (19)$$

$$T_{u1} = f_{ut}bh_u \quad (20)$$

$$T_{u2} = 2f_{ut}b_f[h - h_u - (1 + \lambda)x_n] \quad (21)$$

$$T_{u3} = f_{ut}\lambda x_nb_f \quad (22)$$

其中: C_{uc} 为侧壁 UHPC 压力; α_{u1} 为受压区混凝土矩形应力图的应力值与混凝土轴心抗压强度设计值的比值; β_{u1} 为混凝土强度影响系数; T_{u1} 为受拉侧 UHPC 拉力; T_{u2} 为侧壁塑性状态 UHPC 拉力; T_{u3} 为侧壁弹性状态 UHPC 拉力。

根据截面平衡条件, 可得

$$\sum X = 0, C_{cc} + C_{uc} = T_{u1} + T_{u2} + T_{u3} + T_s \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \sum M = 0, M_u = & C_{cc}\left(h - a_s - \frac{\beta_{c1}x_n}{2}\right) + \\ & C_{uc}\left(h - a_s - \frac{\beta_{u1}x_n}{2}\right) + T_{u1}\left(a_s - \frac{1}{2}h_u\right) - \\ & T_{u2}\left[\frac{1}{2}(h - h_u - \lambda x_n) + h_u - a_s\right] - \\ & T_{u3}\left[h_0 - (1 + \frac{2}{3}\lambda)x_n\right] \end{aligned} \quad (24)$$

将公式 (17)~(22) 代入公式 (23) 和 (24) 可得

$$x_n = \frac{f_yA_{st} + f_{ut}bh_u + 2f_{ut}b_fh_c}{\alpha_{c1}\beta_{c1}f_{cc}(b - 2b_f) + 2\alpha_{u1}\beta_{u1}f_{uc}b_f + 2f_{ut}b_f(1 + \lambda) - f_{ut}\lambda x_nb_f} \quad (25)$$

其中: $\lambda = \varepsilon_{ut,p}/\varepsilon_{cu}$, $\varepsilon_{ut,p}$ 为 UHPC 极限拉应变, 取值 0.001^[25]; ε_{cu} 为 RAC 极限压应变; h_0 为再生混凝土截面的有效高度; 其余参数已知。

将公式 (25) 代入公式 (24) 可得 U 型预制组合梁的极限弯矩计算值, 如表 4 所示。

对于浅 U 型预制组合梁, 截面受力如图 16 所示, 侧壁 UHPC 均已进入受拉塑性状态, 塑性状态下侧壁 UHPC 的高度 h_{u1} 取值为 125 mm, 侧壁 UHPC 受拉合力 T_{u2} 为

$$T_{u2} = 2 \times 125 f_{ut} b_f \quad (26)$$

参照 U 型预制组合梁公式, 弯矩计算值见表 4。

对于四分点对称加载的简支梁, 极限荷载为

$$F_u^c = \frac{8M_u}{l_0} \quad (27)$$

其中, l_0 为计算长度, 取值 2 000 mm。

3.3 理论计算值与试验结果比较

50% 取代率的再生混凝土梁极限荷载计算结果与试验值基本相同; 预制 UHPC-RAC 组合梁受弯的极限荷载试验值与理论计算结果比值的平均

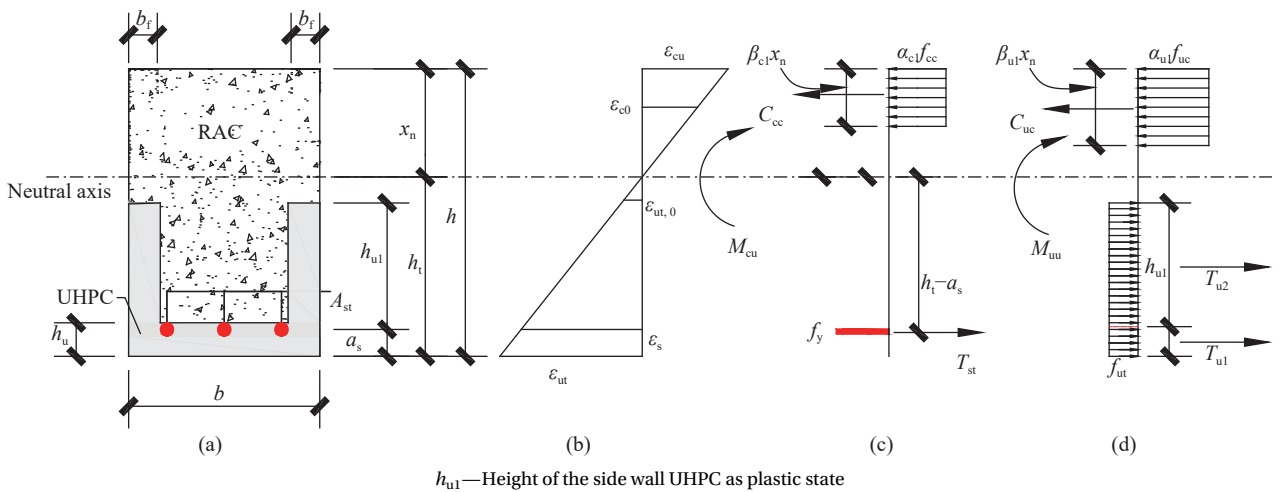


图 16 浅 U 型预制组合梁的应力-应变分布: (a) 截面; (b) 截面应变; (c) RAC 截面应力; (d) UHPC 截面应力

Fig. 16 Stress-strain distribution of shallow U-shaped prefabricated composite beams: (a) Section; (b) Strain distribution of section; (c) Stress distribution of section about RAC; (d) Stress distribution of section about UHPC

值为 0.99，标准差为 0.04，变异系数为 0.04。因此，对于受拉 UHPC 厚度，UHPC-RAC 结合面粗糙度和侧壁 UHPC 高度，不同构造设计的预制组合梁，计算值与试验结果吻合较好，可以预测预制 UHPC-RAC 组合梁的极限受弯承载力。

4 结论

- (1) 预制组合梁除弯曲裂缝外，结合面水平裂缝是一种典型破坏形态，随受拉超高性能混凝土 (Ultra-high performance concrete, UHPC) 厚度的增加，箍筋穿越 UHPC-再生混凝土 (Recycled aggregate concrete, RAC) 结合面，限制了开裂后 UHPC 剥离；矩形键槽增加钢筋结合面的粗糙度，阻滞了水平裂缝的延展，提高了截面刚度，增幅为 16.6%，而结合面粗糙度对承载力、延性系数影响较小，反而增加了构件预制的难度。
- (2) 预制组合梁的变形规律和破坏特点与 RAC 梁基本相似，经历了未开裂弹性阶段，带裂缝正常工作阶段和受压混凝土的塑性破坏阶段，而开裂荷载和极限荷载分别增加约 63.1% 和 22.9%。极限荷载后，因钢纤维拔出失效，受弯承载力下降，组合效果越好降低幅度越大，而残余强度较高。
- (3) UHPC 与 RAC 设计成型的不同组合截面，可改善预制组合梁的受弯性能，使承载力、位移、初始刚度、截面抗弯刚度等高于相同粗骨料取代率的再生混凝土梁。
- (4) 沿高度方向组合截面内 UHPC 与 RAC 应变近似线性分布，符合平截面假定，受拉钢筋与 UHPC 粘结可靠，与内部钢纤维共同承担拉应力，

结合材料的本构模型，简化组合截面内材料应力分布形式，建立了不同类型组合截面预制 UHPC-RAC 组合梁的受弯承载力计算公式，计算结果与试验值吻合较好。

参考文献：

[1] HUNG C C, EL-TAWIL S, CHAO S H. A review of developments and challenges for UHPC in structural engineering: Behavior, analysis, and design[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2021, 147(9): 03121001.

[2] 丁超, 贾子杰, 王振华, 等. 基于生命周期评价的 UHPC 碳排放控制潜力评估[J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42(4): 1242-1251.

DING Chao, JIA Zijie, WANG Zhenhua, et al. UHPC carbon emission control potential based on life cycle assessment[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 42(4): 1242-1251(in Chinese).

[3] HABEL K, DENARIE E, BRUHWILER E. Experimental investigation of composite ultra-high-performance fiber-reinforced concrete and conventional concrete members[J]. *ACI Structural Journal*, 2007, 104: 93-101.

[4] SPYRIDON A P, ANDREAS P L, OURANIA T. 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 and Building Materials*, 2018, 186: 351-366.

[5] SPYRIDON A P, ANDREAS P L. Developments in the use of ultra-high performance fiber reinforced concrete as strengthening material[J]. *Engineering Structures*, 2021, 233: 1-15.

[6] AL-OSTA M A, ISA M N, BALUCH M H, et al. Flexural beha-

- vior of reinforced concrete beams strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 134(3): 279-296.
- [7] 梁兴文, 汪萍, 徐明雪, 等. 免拆UHPC模板RC梁受弯性能试验及承载力分析[J]. *工程力学*, 2019, 36(9): 95-107.
LIANG Xingwen, WANG Ping, XU Mingxue, et al. Flexural behavior and capacity analysis of RC beams with permanent UHPC formwork[J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(9): 95-107(in Chinese).
- [8] 李雪峰, 孟帅, 杜晓庆. UHPC加固混凝土梁的抗弯承载力计算[J]. *工程抗震与加固改造*, 2022, 44(2): 151-157, 171.
LI Xuefeng, MENG Shuai, DU Xiaoqing. Calculation of flexural capacity of reinforced concrete beams with UHPC[J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2022, 44(2): 151-157, 171(in Chinese).
- [9] 刘超, 孙启鑫, 邹宇罡. 超高性能混凝土-混凝土组合简支梁弯曲性能试验[J]. *同济大学学报 (自然科学版)*, 2020, 48(5): 664-672.
LIU Chao, SUN Qixin, ZOU Yugang. Experimental study on bending performance of ultra-high performance concrete-normal concrete composite simply supported beam[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2020, 48(5): 664-672(in Chinese).
- [10] 白国良, 秦朝刚, 张玉, 等. 再生混凝土梁长期受荷时随变形计算方法研究[J]. *土木工程学报*, 2016, 49(12): 1-8.
BAI Guoliang, QIN Chaogang, ZHANG Yu, et al. Time-dependent calculation method for the long-term deformation of recycled aggregate concrete beams[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(12): 1-8(in Chinese).
- [11] 曹万林, 肖建庄, 叶涛萍, 等. 钢筋再生混凝土结构研究进展及其工程应用[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(12): 1-16.
CAO Wanlin, XIAO Jianzhuang, YE Taoping, et al. Research progress and engineering application of reinforced recycled aggregate concrete structure[J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(12): 1-16(in Chinese).
- [12] 王雅思, 郑建岚, 游帆. 再生骨料强化方法研究进展[J]. *材料导报*, 2021, 35(5): 5053-5061.
WANG Yasi, ZHENG Jianlan, YOU Fan. Review on enhancement methods of recycled aggregate[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(5): 5053-5061(in Chinese).
- [13] 马昆林, 刘建, 申景涛, 等. 骨料强化方法对再生混凝土多界面过渡区微观结构的影响[J]. *铁道科学与工程学报*, 2023, 20(10): 3809-3819.
MA Kunlin, LIU Jian, SHEN Jingtao, et al. Influence of aggregate enhancement methods on the microstructure of multiple ITZs in recycled concrete[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2023, 20(10): 3809-3819(in Chinese).
- [14] 王佃超, 肖建庄, 夏冰, 等. 再生骨料碳化改性及其减碳贡献分析[J]. *同济大学学报 (自然科学版)*, 2022, 50(11): 1610-1619.
WANG Dianchao, XIAO Jianzhuang, XIA Bing, et al. Carbonation modification of recycled aggregate and carbon dioxide sequestration analysis[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2022, 50(11): 1610-1619(in Chinese).
- [15] 肖建庄, 姜兴汉, 黄一杰, 等. 半预制再生混凝土构件受力性能试验[J]. *土木工程学报*, 2013, 46(5): 99-104.
XIAO Jianzhuang, JIANG Xinghan, HUANG Yijie, et al. Test on the mechanical behavior of semi-precast recycled concrete elements[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(5): 99-104(in Chinese).
- [16] 肖建庄, 蓝启彬, 张青天, 等. 组合再生混凝土及其衍生结构的应用及展望[J]. *建筑科学与工程学报*, 2023, 40(1): 1-13.
XIAO Jianzhuang, LAN Qibin, ZHANG Qingtian, et al. Application and prospect of composite recycled concrete and its derived structures[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2023, 40(1): 1-13(in Chinese).
- [17] 王俊辉, 黄悦, 杨国涛, 等. 再生混凝土抗压性能研究进展[J]. *材料导报*, 2022, 36(S1): 278-286.
WANG Junhui, HUANG Yue, YANG Guotao, et al. Research progress on compressive properties of recycled aggregate concrete[J]. *Materials Reports*, 2022, 36(S1): 278-286(in Chinese).
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土用再生粗骨料: GB/T 25177—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Recycled coarse aggregate for concrete: GB/T 25177—2010[S]. Beijing: China Standards Press, 2010(in Chinese).
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Industry Press, 2010(in Chinese).
- [20] ZHANG P, SHANG J Q, LIU Y, et al. Flexural behavior of GFRP bar-reinforced concrete beams with U-shaped UHPC stay-in-place formworks[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 45: 103403.
- [21] 何肖云峰. UHPC-NSC圆形截面组合短柱轴压力学性能试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
HE Xiaoyunfeng. Experimental study on axial compressive performance of UHPC-NSC circular section composite short column[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021(in Chinese).
- [22] 熊二刚, 巩忠文, 罗佳明, 等. 基于数字图像相关技术的钢筋混凝土梁裂缝试验[J]. *吉林大学学报 (工学版)*, 2023, 53(4):

1094-1104.

XIONG Ergang, GONG Zhongwen, LUO Jiaming, et al. Experiment on cracks in reinforced concrete beams based on digital correlation technology[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2023, 53(4): 1094-1104(in Chinese).

[23] 景明龙. 基于遗传优化BP网络的再生混凝土正截面计算模式研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

JING Minglong. The study of normal section calculation models of recycled concrete based on GA optimizing BP neural network[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011(in Chinese).

[24] SINGH M, SHEIKH A H, ALI M, et al. Experimental and numerical study of the flexural behaviour of ultra-high performance fibre reinforced concrete beams[J]. *Construction & Building Materials*, 2017, 138(5): 12-25.

[25] 赵继之, 辛公锋, 陶慕轩, 等. 超高性能混凝土单轴拉、压循环作用下力学性能及其本构模型研究[J/OL]. *工程力学*: 1-13[2023-06-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.o3.20221024.1437.108.html>.

ZHAO Jizhi, XIN Gongfeng, TAO Muxuan, et al. Mechanical properties and constitutive model of ultra-high performance concrete material under uniaxial tension and compression cycles [J/OL]. *Engineering Mechanics*, 1-13. [2023-06-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.o3.20221024.1437.108.html>(in Chinese).

[26] KHALIL W, AL-HASSANI H, DANHA L S. Prediction of the nominal bending moment capacity for plain and singly reinforced rectangular RPC beam sections[J]. *Engineering & Technology Journal, Part (A)*, 2015, 33(5): 1113-1130.

[27] ABRISHAMBAF A, PIMENTEL M, NUNES S. Influence of fibre orientation on the tensile behaviour of ultra-high performance fibre reinforced cementitious composites[J]. *Cement and Concrete Research*, 2017, 97: 28-40.

[28] 胡琼, 严佳川, 邹超英. 再生混凝土梁正截面受弯承载力计算模式研究[J]. *四川大学学报 (工程科学版)*, 2009, 41(3): 195-201.

HU Qiong, YAN Jiachuan, ZOU Chaoying. Calculation model of flexural capacity of normal section of the recycled concrete beams[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science edition)*, 2009, 41(3): 195-201(in Chinese).

[29] 徐明雪, 梁兴文, 汪萍, 等. 超高性能混凝土梁正截面受弯承载力理论研究[J]. *工程力学*, 2019, 36(8): 70-78.

XU Mingxue, LIANG Xingwen, WANG Ping, et al. Theoretical investigation on normal section flexural capacity of UHPC beams[J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(8): 70-78(in Chinese).