

筋材类型和混凝土强度协同效应对梁构件受弯性能影响研究

冯俊¹, 张子健¹, 李迎昊^{2,3}, 郝聪龙^{2,3}

(1. 湖北交投智能检测股份有限公司, 湖北 武汉 430050; 2. 桥梁智能与绿色建造全国重点实验室, 湖北 武汉 430034;

3. 中铁大桥科学研究院有限公司, 湖北 武汉 430034)

摘要: 为研究筋材类型(GFRP筋/钢筋)和混凝土强度(UHPC/C50)对梁受弯性能的影响,设计、制作了4根试验梁(GU、GC、SU和SC)进行试验,分析不同材料组合下梁的破坏模式、荷载-挠度曲线、裂缝发展规律和延性。结果表明:钢筋试件呈钢筋屈服、受压区混凝土压溃的延性破坏,荷载-挠度曲线存在明显屈服平台,而GFRP筋试件表现为GFRP筋未拉断、受压区混凝土压溃的脆性破坏,荷载-挠度曲线呈双线型,裂缝发展更快,分布更密集,延性相对较差;不同材料组合下,GFRP筋与UHPC组合的试件GU能够有效发挥材料的高抗拉和高抗压性能,其极限承载力较SU试件提升46%,较GC试件提升55%,较SC试件提升52%;此外,UHPC试件的初裂名义应力可达7.5~8.0 MPa,远高于C50试件的1.5~2.0 MPa,能显著提升试件初裂荷载并延缓裂缝扩展。

关键词: 受弯性能;纤维增强聚合物(GFRP)筋;超高性能混凝土(UHPC);承载力;裂缝扩展

中图分类号: U444; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)11-0283-05

Study on Synergistic Effect of Reinforcement Type and Concrete Strength on Flexural Performance of Beam Components

FENG Jun¹, ZHANG Zijian¹, LI Yinghao^{2,3}, HAO Conglong^{2,3}

(1. Hubei Jiaotou Intelligent Testing Co., Ltd., Wuhan 430050, China; 2. National Key Laboratory of Bridge Intelligent and Green

Construction, Wuhan 430034, China; 3. China Railway Bridge Science Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430034, China)

Abstract: To study the effects of reinforcement type (GFRP bar/steel bar) and concrete strength (UHPC/C50) on the flexural performance of beams, four test beams (GU, GC, SU and SC) are designed and fabricated for the experiments. The failure mode, load - deflection curve, crack development law and ductility of beams under different material combinations are analyzed. The result shows that the steel bar specimens exhibit the ductile failure of concrete collapse in the yield and compression zones of the steel bars. There is a clear yield plateau in the load deflection curve. And the GFRP bar specimens show brittle failure where the GFRP bar is not broken and the concrete in the compression zone is crushed. The load - deflection curve is in a bilinear shape. And the cracks develop more rapidly and are distributed more densely with the poor ductility. Under different material combinations, the specimens GU composed of GFRP bars and UHPC can effectively exert the high tensile and compressive strength of the materials. The ultimate bearing capacity of GU has increased by 46% compared to SU, 55% compared to GC, and 52% compared to SC. In addition, the initial crack nominal stress of UHPC specimens can reach 7.5 to 8.0 MPa, which is much higher than 1.5 to 2.0 MPa of C50 specimens, which can significantly increase the initial crack load of the specimens and delay crack propagation.

Keywords: flexural behavior; glass fiber reinforced polymer (GFRP) bar; ultrahigh performance concrete (UHPC); bearing capacity; crack propagation

0 引言

自《交通强国建设纲要》实施以来,我国交通基础设施建设取得了显著进展。截至2024年,全国铁路营业里程突破16万km,公路新增通车里程约5万km^[1]。2025年为面向“十四五”规划的收官之年,交通领域在追求降本增效与深化市场化改革的过程中,正面

收稿日期: 2025-04-02

作者简介: 冯俊(1982—),男,硕士,高级工程师,从事高性能材料试验检测工作。

通信作者: 李迎昊(1998—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。电子邮箱: 13971095202@163.com

面临着新的挑战。在这一背景下,超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)的应用为结构创新提供了关键支撑^[2]。

UHPC作为一种具有100~180 MPa立方体抗压强度(为普通混凝土2~4倍)和7~9 MPa轴心抗拉强度(为普通混凝土3~5倍)的新型材料^[3],其基体开裂后仍可依托纤维桥接作用维持部分拉力,与常规混凝土区别显著。尽管国内《活性粉末混凝土结构技术规程》(DBJ 43/T 325—2017)已参考普通混凝土规范提出了钢筋UHPC梁的设计方法,但对于高强钢筋与UHPC适配性以及新型配筋形式与UHPC的协同作用机制仍缺乏深入研究。

现有研究成果表明^[4-5],为了充分发挥UHPC超高的抗压强度,并确保梁体截面设计与配筋方案的合理性,采用高强钢筋成为配筋UHPC梁的关键策略。然而,即便HRB500级钢筋已具备较高的强度,但与UHPC的卓越性能相比,其强度仍显不足。因此,探索与UHPC梁力学性能相匹配的超高强受力筋显得尤为重要。

纤维增强聚合物(fiber reinforced polymer, FRP)筋作为一种新型高性能材料,因其优异的耐腐蚀性和轻质高强的特点,在提升混凝土结构力学性能和耐久性能方面展现出显著优势^[6]。已有学者^[7-8]针对GFRP筋UHPC梁的受弯性能进行了试验研究,并建立了不同破坏模式下梁截面受弯承载力的理论计算公式。然而,目前针对不同筋材类型与混凝土强度协同效应对梁构件受弯性能影响的研究相对匮乏,且尚未明确GFRP筋与UHPC相较于传统钢筋和普通混凝土在材料性能方面的优势。鉴于此,本文基于相同的配筋率,设计并制作了4根不同筋材类型(GFRP筋/钢筋)和混凝土强度(UHPC/C50)的试验梁,对比分析不同材料组合下梁的受弯性能。

1 试验方案

1.1 试验设计

本次试验共设计4根不同筋材类型和混凝土强度的试验梁,编号分别为GU、GC、SU和SC,其相关参数见表1。试验梁长3 200 mm,净跨3 000 mm,截面尺寸150 mm×200 mm,高跨比1/15。根据《纤维增强复合材料工程应用技术标准》(GB 50608—2020)和材性数据,确定GFRP筋UHPC梁的界限配筋率约1.5%。因此,分别选用6根10 mm的GFRP筋和4根12 mm的钢筋作为受力筋,同时混凝土类型选用

UHPC和C50。详细设计尺寸和配筋如图1所示。

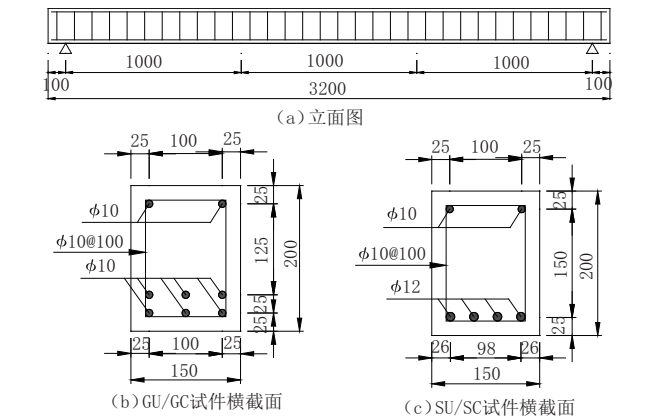


图1 试验梁详细尺寸和配筋(单位:mm)

表1 试验梁相关参数

试件 编号	混凝土 类型	受力筋			
		类型	数量/根	直径/mm	配筋率/%
GU	UHPC	GFRP	6	10	1.57
GC	C50	GFRP	6	10	1.57
SU	UHPC	钢筋	4	12	1.51
SC	C50	钢筋	4	12	1.51

UHPC配合比为水泥:核心料:砂:水=800:376:1 000:187,采用体积分数为1%的聚乙烯醇纤维。所有试件一次性浇筑成型后,随即用塑料薄膜覆盖保护,并于24 h后开始浇水养护。

试验加载前测试材料力学性能,其中UHPC立方体抗压强度为122.2 MPa,棱柱体抗压强度为95.8 MPa,弹性模量为46.2 GPa;C50立方体抗压强度为52.0 MPa,棱柱体抗压强度为34.8 MPa,弹性模量为35.8 GPa;钢筋屈服强度为418.0 MPa,弹性模量为200.0 GPa;GFRP筋抗拉强度为712.0 MPa,弹性模量为40.0 GPa。

1.2 试验方法

采用MTS1000kN万能作动器结合分配梁开展三分点对称加载。在铰支座顶部及梁的四等分点处布置位移计,并利用应变片监测混凝土和受力筋的表面应变,相关试验加载装置和测点位置见图2。试验前,通过预加载(不超过预估承载力的3%,且低于开裂荷载)检验设备与仪表的可靠性。确认无误后,按分级加载原则进行正式试验:梁开裂前,每级加载不超过2 kN;开裂后,每级加载增至不超过5 kN;当加载至预估承载力的80%时,转为位移控制加载,缓慢增加直至梁破坏,此阶段每级加载不超过10 kN。每级加载后持荷2~5 min,详细记录应变、位移数据和裂缝发展情况。

2 试验结果

GU和GC试件破坏模式均表现为GFRP筋未拉

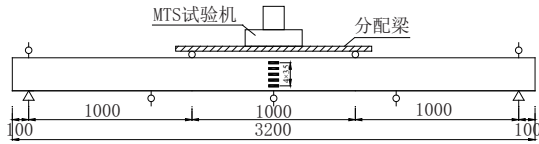


图2 试验加载装置和测点位置(单位:mm)

断而受压区混凝土压溃的脆性破坏(见图3、图4)。加载过程中,随着荷载增加,试验梁底部受拉区混凝土达到极限抗拉强度后,跨中底部出现微裂缝并逐渐扩展。接近极限承载力时,跨中顶部受压区混凝土出现细微横向裂缝,随后混凝土压溃,此时GFRP筋未达到抗拉强度设计值。卸载完成后,由于GFRP筋未拉断且其弹性模量与混凝土接近,试件展现出良好的恢复变形能力,挠度近乎归零。

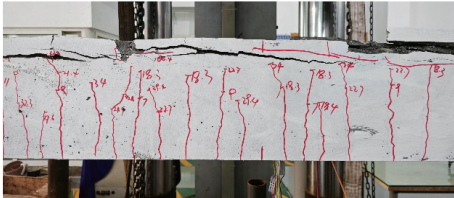


图3 GC试件破坏模式

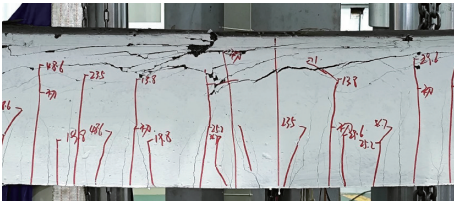


图4 GU试件破坏模式

相比之下,SU和SC试件破坏模式均为钢筋屈服、受压区混凝土压溃的延性破坏(见图5、图6)。加载过程中,随着荷载增加,跨中底面出现多条细微裂缝;之后裂缝不断扩展,纯弯段裂缝数目和宽度逐渐增加;当荷载接近极限承载力时,受拉钢筋屈服,裂缝不断向上延伸,此时,试件的荷载增幅明显减小,变形逐渐增大,最终受压区混凝土压溃。

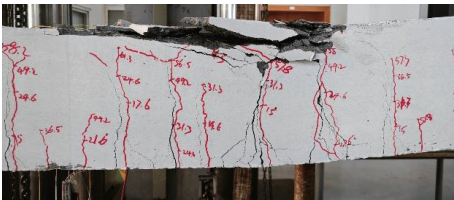


图5 SC试件破坏模式

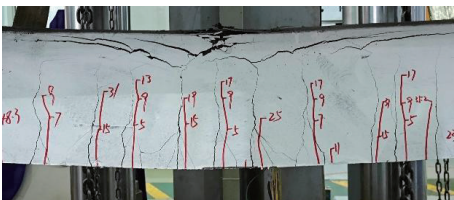


图6 SU试件破坏模式

2.1 荷载-挠度曲线

各试件荷载-挠度曲线见图7。

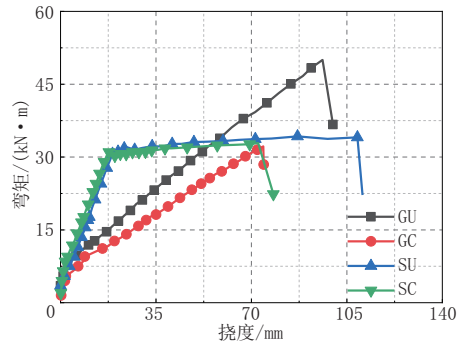


图7 各试件荷载-挠度曲线

由图7可知,GFRP筋试件与钢筋试件的荷载-挠度曲线存在显著差异。钢筋试件呈现典型的三阶段特性:未开裂阶段、裂缝扩展阶段和钢筋屈服阶段。而GFRP筋试件由于材料的线弹性特点,其荷载-挠度曲线呈双线型,仅包括未开裂阶段和裂缝扩展阶段,加载过程中未出现屈服平台。当截面开裂后,由于GFRP筋的弹性模量较低,试验梁的抗弯刚度较小,同种荷载条件下,GFRP筋试件的挠度大于钢筋试件。但钢筋屈服后试件荷载增幅较小,挠度迅速增长。

在GFRP筋试件中,GU试件的刚度和承载力高于GC试件。原因在于2组试件的破坏模式均为GFRP筋未拉断、受压区混凝土压溃,其峰值荷载主要由混凝土抗压强度控制,而UHPC的抗压强度和弹性模量均高于C50。此外,钢筋试件的屈服荷载和峰值荷载基本相同。这是因为SU和SC试件的破坏模式均为受拉区钢筋先屈服,然后受压区混凝土压溃,其屈服荷载由受拉区钢筋控制,此时UHPC的高抗压强度未能充分发挥。

另一方面,GU试件的峰值荷载($50.0 \text{ kN}\cdot\text{m}$)较SU试件($34.3 \text{ kN}\cdot\text{m}$)提升46%,较GC试件($32.2 \text{ kN}\cdot\text{m}$)提升55%,较SC试件($32.9 \text{ kN}\cdot\text{m}$)提升52%。这一显著提升得益于GFRP筋与UHPC的组合相较于钢筋与C50混凝土的组合具备更强的力学特性,二者协同能够高效发挥材料的高抗拉、高抗压性能,从而在承载能力上展现出明显优势。

2.2 裂缝扩展

各试件的荷载-最大裂缝宽度曲线见图8。

由图8可知,钢筋试件与GFRP筋试件呈现出不同的裂缝扩展模式。钢筋试件在屈服前裂缝扩展缓慢,裂缝宽度与荷载保持线性关系;当裂缝扩展至 $0.15\sim 0.2 \text{ mm}$ 区间时,钢筋屈服,裂缝宽度迅速增长,

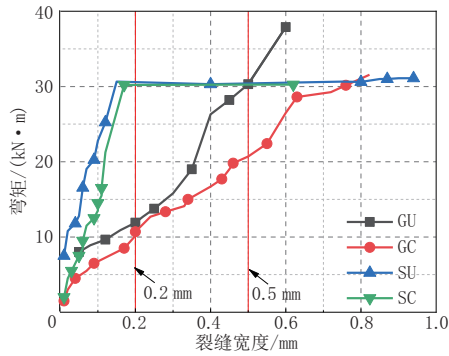


图 8 各试件荷载-最大裂缝宽度曲线

裂缝分布多集中于纯弯段区域。GFRP 筋试件则全程表现为裂缝宽度随着荷载的增加而呈线性增长,且裂缝发展速度更快,间距更密集,剪跨区域亦可见裂缝分布。原因在于 GFRP 筋较低的弹性模量导致试验梁整体刚度较小,在同等荷载条件下会产生更大挠度。

此外,依据《纤维增强复合材料工程应用技术标准》要求,GFRP 筋试件在长期作用下最大裂缝宽度限值为 0.5 mm,此时 GU 试件对应弯矩 30.3 kN·m,GC 试件对应弯矩 20.7 kN·m,均达到峰值荷载的 60% 水平。考虑到荷载长期效应和裂缝发展的不确定性,实际工程中需对设计荷载引入安全系数进行折减。

另一方面,UHPC 试件的初裂名义应力达到 7.5~8.0 MPa,而 C50 试件仅为 1.5~2.0 MPa,显示 UHPC 相较 C50 能有效提高试件的初裂荷载。此外,相同荷载条件下,UHPC 试件的裂缝宽度小于 C50 试件,表明 UHPC 可有效延缓裂缝扩展。

2.3 延性分析

传统延性以屈服点与极限状态的比值为依据,通过位移延性系数 $\Delta u/\Delta_y$ 或曲率延性系数 φ_u/φ_y 进行分析。但 FRP 筋无屈服特性,难以直接沿用传统方法。根据 ISO 10406-1^[9] 规范,结构极限挠度需控制在跨度 1/100 以内,此时 GU 和 GC 试件裂缝宽度恰为 0.5 mm,符合 ISO 10406-1 标准长期作用裂缝限值要求。针对 FRP 筋特性,有学者^[10] 提出以极限荷载

70%~80% 对应位移作为名义屈服点,但由于材料线弹性特性,该取值会导致位移延性系数普遍接近 75%,不能真实地反映试件变形性能的差异。

因此,本文参照 ACI 440.1R-15^[11],采用能量等效法来计算名义延性系数 μ ,其表达式为:

$$u = \frac{1}{2} \left(\frac{E_{\text{total}}}{E_{\text{elastic}}} + 1 \right) \quad (1)$$

式中: E_{total} 为总能量; E_{elastic} 为弹性储能。

等效法计算名义延性系数 μ 的核心原理如图 9 所示。该方法通过荷载-挠度曲线的能量特征来确定等效参数。对于 GFRP 筋试件,其荷载-挠度曲线呈现双线性特征,特征点 P_1 、 P_2 分别取开裂荷载和峰值荷载;钢筋试件因存在屈服阶段,特征点 P_1 、 P_2 均取为屈服荷载。

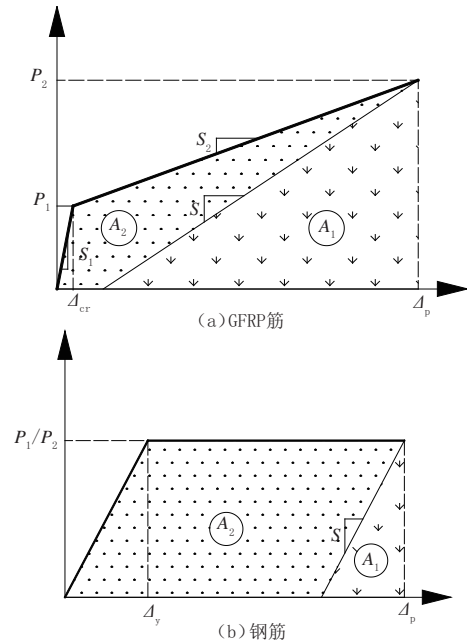


图 9 基于能量等效法计算的荷载-挠度曲线示意

弹性储能换算斜率 S 的表达式为:

$$S = \frac{P_1 S_1 + (P_2 - P_1) S_2}{P_2} \quad (2)$$

图 9 中:总能量 E_{total} 对应峰值荷载前的曲线积分面积 $A_1 + A_2$;弹性储能 E_{elastic} 对应初始线性段的积分面积 A_1 。

各试件的延性系数见表 2。

表 2 各试件的延性系数

试件编号	$P_1 / (\text{kN} \cdot \text{m})$	$P_2 / (\text{kN} \cdot \text{m})$	$\Delta_{\text{cr}} / \text{mm}$	Δ_y / mm	Δ_p / mm	$E_{\text{total}} / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$	$E_{\text{elastic}} / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$	μ
GU	8.00	50.00	2.59		96.07	1.37	1.43	0.98
GC	1.50	32.20	0.24		74.36	0.62	0.76	0.91
SU	30.65	30.65		19.07	108.86	3.04	0.29	5.71
SC	30.20	30.20		16.85	72.49	1.93	0.25	4.30

注: Δ_{cr} 、 Δ_y 和 Δ_p 分别为开裂挠度、屈服挠度和峰值挠度。

由表2可知,GFRP试件的延性系数显著低于钢筋试件,与各试件的破坏特征相符。由于钢筋具有明显的屈服特性,钢筋试件表现出更好的延性。对比SU和SC试件可见,两者的屈服荷载相近,但SU试件因UHPC更高的抗压强度而具有更长的屈服段,延性更优。而对于GU和GC试件,因GFRP筋的总能量 E_{total} 与弹性储能 E_{elastic} 数值基本相同,其延性较差。

3 结 语

(1)试验现象表明,钢筋试件发生钢筋屈服、受压区混凝土压溃的延性破坏,荷载-挠度曲线存在明显屈服平台;GFRP筋试件荷载-挠度曲线呈双线型,表现为GFRP筋未拉断、受压区混凝土压溃的脆性破坏。此外,由于GFRP筋弹性模量与混凝土相近,试件具备出色的变形恢复能力,卸载后挠度近乎归零。

(2)GFRP筋试件与钢筋试件在力学性能上表现出显著差异。钢筋试件在达到屈服点之前,裂缝发展相对缓慢,裂缝分布多集中于纯弯段区域,且整体表现出良好的延性;GFRP筋试件则全程表现为裂缝宽度随着荷载的增加呈线性增长,且裂缝发展速度更快,间距更密集,剪跨区域亦可见裂缝分布,延性相对较差。

(3)GFRP筋与UHPC协同作用能有效发挥材料的高抗拉、高抗压性能,极限承载力较钢筋试件提升

46%,较C50试件提升55%,较SC试件提升52%;但考虑到GFRP筋试件在长期使用下的裂缝宽度控制要求,实际工程设计中需对荷载取值引入安全系数进行折减。此外,UHPC试件的初裂名义应力达7.5~8.0 MPa,远高于C50试件的1.5~2.0 MPa,能显著提升试件初裂荷载并延缓裂缝扩展。

参考文献:

- [1] 2019年交通运输行业发展统计公报[J]. 交通财会,2020(6):86-91.
- [2] 《中国公路学报》编辑部.中国桥梁工程学术研究综述·2024[J]. 中国公路学报,2024,37(12):1-160.
- [3] 成鑫磊,穆锐,刘晓英.超高性能混凝土的制备及力学性能研究进展[J]. 硅酸盐通报,2024,43(12):4295-4312.
- [4] 王敏,高立强,王康宁,等.高强钢筋UHPC梁抗弯性能及承载力试验研究[J]. 桥梁建设,2022,52(6):87-94.
- [5] 胡利,李志远,杨家琦,等.基于有限条带法的高强钢筋-超高性能混凝土构件受弯性能分析[J]. 工业建筑,2023,53(3):115-121.
- [6] 尹世平,华云涛,徐世煌.FRP配筋混凝土结构研究进展及其应用[J]. 建筑结构学报,2021,42(1):134-150.
- [7] 薛文远,胡翔,薛伟辰.FRP筋UHPC梁受弯承载力计算方法[J]. 复合材料学报,2022,39(11):5109-5121.
- [8] 应秉哲.FRP增强超高性能混凝土构件受弯性能研究[D]. 温州:温州大学,2022.
- [9] ISO 10406-1:2015, Fiber-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete - Test methods - Part 1: FRP bars and grids[S].
- [10] BAKIS C E, BANK L C, BROWN V L, et al. Fiber-reinforced polymer composites for construction—State-of-the-art review[J]. Journal of Composites for Construction, 2002,6(2): 73-87.
- [11] ACI 440.1R-15, Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars[S].