

CFRP筋增强ECC梁弯曲性能试验研究

周甲佳 温金鑫 景川 赵军

Experimental study on flexural performance of ECC beams reinforced with CFRP bars

ZHOU Jiajia, WEN Jinxin, JING Chuan, ZHAO Jun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220324.003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

全玻璃纤维增强树脂筋混凝土电缆排管的抗弯试验

Experimental study on flexural performance of concrete cable duct reinforced with glass fiber reinforced polymer bars

复合材料学报. 2018, 35(1): 70–80 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170322.001>

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>

纤维对混凝土裂缝宽度、曲折度及渗透性的影响

Effect of fiber on the crack width, tortuosity and permeability of concrete

复合材料学报. 2019, 36(2): 491–497 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180413.004>

聚丙烯-钢纤维/混凝土柱大偏心受压承载力计算

Calculation of bearing capacity of polypropylene-steel fiber reinforced concrete column under large eccentric loading

复合材料学报. 2020, 37(9): 2336–2347 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200201.001>

氯盐环境下锈蚀预应力混凝土梁抗弯性能试验

Flexural behavior test of corroded prestressed concrete beams under chloride environment

复合材料学报. 2020, 37(3): 707–715 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190624.003>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220324.003

CFRP 筋增强 ECC 梁弯曲性能试验研究



分享本文

周甲佳¹, 温金鑫¹, 景川², 赵军^{*3}

(1. 郑州大学 力学与安全工程学院, 郑州 450001; 2. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 郑州 450052;

3. 郑州大学 水利与土木工程学院, 郑州 450001)

摘要: 为研究碳纤维增强树脂复合材料 (Carbon fiber reinforced polymer, CFRP) 筋/超高韧性纤维增强水泥基复合材料 (Engineered cementitious composite, ECC) 梁的抗弯性能, 对 3 根 CFRP 筋/ECC 梁、1 根玻璃纤维增强树脂复合材料 (Glass fiber reinforced polymer, GFRP) 筋/梁和 1 根 CFRP 筋混凝土梁进行了四点弯曲试验, 分析了配筋率、纤维增强树脂复合材料 (Fiber reinforced polymer, FRP) 筋类型和基体类型对梁抗弯性能的影响。试验结果表明: CFRP 筋/ECC 梁与 GFRP 筋/ECC 梁和 CFRP 筋混凝土梁类似, 均经历了弹性阶段、带裂缝工作阶段和破坏阶段; 配筋率对 CFRP 筋/ECC 梁的受弯性能影响较大。随着配筋率的增加, CFRP 筋/ECC 梁的承载能力不断提高, 延性性能逐渐减弱; ECC 材料优异的应变硬化能力和受压延性, 使得 CFRP 筋/ECC 梁的极限承载能力和变形能力均优于 CFRP 筋混凝土梁; 由于 ECC 材料多裂缝开裂能力, CFRP 筋/ECC 梁开裂后, 纵筋表面应变分布比 CFRP 筋混凝土梁更均匀; 由于聚乙烯醇 (Polyvinyl alcohol, PVA) 纤维的桥联作用, CFRP 筋/ECC 梁破坏时, 其表面出现了大量的细密裂缝, 且能保持较好的完整性和自复位能力; 正常使用阶段, CFRP 筋/ECC 梁的最大弯曲裂缝宽度均小于 CFRP 筋混凝土梁。最后, 根据试验结果, 建立了基于等效应力图的 CFRP 筋/ECC 梁弯曲承载力简化计算模型, 确定模型中的相关系数。由简化模型计算的极限承载力与试验结果具有较好的相关性。

关键词: CFRP 筋; ECC 梁; 抗弯性能; 极限承载力; 裂缝宽度

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2023)02-0978-12

Experimental study on flexural performance of ECC beams reinforced with CFRP bars

ZHOU Jiajia¹, WEN Jinxin¹, JING Chuan², ZHAO Jun^{*3}

(1. School of Mechanics and Safety Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. State Grid Henan Economic Research Institute, Zhengzhou 450052, China; 3. School of Water Resources and Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To study the flexural performance of engineered cementitious composite (ECC) beams reinforced with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) bars, four-point flexural experimental investigates were carried out on three ECC beams reinforced with CFRP bars, one ECC beam reinforced with glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars and one concrete beam reinforced with CFRP bars. The main parameters were the reinforcement ratios, the reinforcement type and the matrix type. The experimental results show that the load-deflection curves of ECC beam reinforced with CFRP bars are similar with the ECC beam reinforced with GFRP bars and concrete beam reinforced with CFRP bars, which have an elastic stage, a working stage with cracks and a failure stage. The reinforcement ratio has a great influence on the flexural performance of ECC beams reinforced with CFRP bars. With the increase of reinforcement ratio, the ultimate bearing capacity of ECC beams is improved, and the ductility performance is

收稿日期: 2022-01-17; 修回日期: 2022-02-19; 录用日期: 2022-03-02; 网络首发时间: 2022-03-25 15:47:02

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220324.003>

基金项目: 国家自然科学基金 (51708510); 中原千人计划-中原科技创新领军人才项目 (ZYQR201912029); 教育部长江学者和创新团队发展计划项目 (IRT_16R67); 河南省高校科技创新团队支持计划 (20IRTSTHN009)

National Natural Science Foundation of China (51708510); One Thousand Person Project of Henan Province (ZYQR201912029); Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University of Minister of Education of China (IRT_16R67); Program for Innovative Research Team (in Science and Technology) in University of Henan Province of China (20IRTSTHN009)

通信作者: 赵军, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为工程材料和结构的力学行为及应用 E-mail: zhaoj@zzu.edu.cn

引用格式: 周甲佳, 温金鑫, 景川, 等. CFRP 筋增强 ECC 梁弯曲性能试验研究 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(2): 978-989.

ZHOU Jiajia, WEN Jinxin, JING Chuan, et al. Experimental study on flexural performance of ECC beams reinforced with CFRP bars[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(2): 978-989(in Chinese).

gradually weakened. The excellent strain-hardening ability and ductility of ECC materials make the ultimate bearing capacity and deformation of ECC beams with CFRP bars superior to the concrete beam reinforced with CFRP bars. Based on the multi-cracking ability of ECC, the strain distribution on the surface of longitudinal bars is more uniform than that of concrete beams with CFRP bars after cracking. Due to the bridging effect of polyvinyl alcohol (PVA) fiber, a large number of fine cracks appear on the surface of ECC beams reinforced with CFRP bars. When ECC beams reinforced with CFRP bars fail, it could maintain good integrity and self-recovering ability. In service stage, the maximum crack width of reinforced ECC beams presents smaller than that of concrete beams. Finally, a simplified calculation model for ultimate bearing capacity of ECC beams reinforced with fiber reinforced polymer (FRP) rebars is proposed, predicting good agreement with the experimental results.

Keywords: CFRP bars; ECC beam; flexural performance; ultimate bearing capacity; crack width

近海地区, 钢筋锈蚀是影响工程结构服役寿命和耐久性能的重要因素^[1-2]。采用纤维增强树脂复合材料 (Fiber reinforced polymer, FRP) 筋代替钢筋是目前提高工程结构耐久性的有效途径之一。与钢筋相比, FRP 筋具有高强、耐腐蚀、耐疲劳等优点^[3-5]。然而, FRP 筋弹性模量低、抗剪切性能差、弹脆性等缺点, 会使工程结构构件更容易出现脆性破坏、变形过大及裂缝过宽等问题^[6-8]。这在一定程度上制约了 FRP 筋在实际工程中的应用。

解决上述问题的有效措施之一是利用超高延性纤维增强水泥基复合材料 (Engineered cementitious composite, ECC) 部分或者全部替代混凝土, 形成 FRP 筋/ECC 梁及 FRP 筋/ECC 混凝土组合梁。ECC 材料是 Li 等^[9-12] 基于微细观力学研发的一种具有应变硬化性能和微裂纹控制能力的超高延性水泥基复合材料。近年来, 国内外学者对 FRP 筋/ECC 梁及 FRP 筋/ECC 混凝土复合梁的抗弯性能^[13-22]、抗剪性能^[23-24]、抗扭性能^[25] 及抗震性能^[26-27] 进行了研究。如 Li 等^[13] 研究了玻璃纤维增强树脂复合材料 (Glass fiber reinforced polymer, GFRP) 筋/ECC 梁的弯曲性能, 结果表明, GFRP 筋/ECC 梁在延性、承载能力、抗剪性能、损伤容量等方面均高于 GFRP 筋高强混凝土梁或复合梁。Yuan 等^[14] 的分析结果表明, 与 FRP 筋混凝土梁相比, 玄武岩纤维增强树脂复合材料 (Basalt fiber reinforced polymer, BFRP) 筋/ECC 梁及 BFRP 筋/ECC 复合梁可以提高构件的弯曲承载能力、变形能力、延性性能和抗剪承载力。Ge 等^[17-18] 的研究结果表明, FRP 筋/ECC 复合梁可以提高构件的弯曲承载能力、刚度, 减少裂缝宽度。Cai 等^[20] 通过数值计算发现, 与 FRP 筋混凝土梁相比, BFRP 筋/ECC 梁中 BFRP 筋材的强度利用率更高, 而且控制裂缝宽度的能力更强。何佶轩^[23] 对 BFRP 筋增强 ECC 梁及 ECC/混凝土组合梁的抗剪性能进行

了研究, 结果表明 BFRP 筋/ECC 组合梁的受剪性能远优于混凝土梁, 使用 ECC 代替混凝土可在一定程度减少箍筋的使用。Zhou 等^[25] 研究了 GFRP 筋/ECC 梁的抗扭性能, 结果发现, 在允许裂缝宽度 0.7 mm 下, GFRP 筋/ECC 梁的抗扭强度比 GFRP 筋混凝土梁高 40%, 且梁的韧性性能有大幅提升。Fischer 等^[26] 研究了 FRP 筋/ECC 梁的抗震性能, 结果表明 FRP 筋/ECC 梁表现出优异的抗震性能, 且具有良好的裂缝控制能力, 使用 ECC 代替混凝土是提升 FRP 筋结构抗震性能的一种有效手段。然而, 这些研究主要集中在 GFRP 筋和 BFRP 筋/ECC 梁及 ECC/混凝土组合梁的力学性能研究, 并未涉及高弹模的碳纤维增强树脂复合材料 (Carbon fiber reinforced polymer, CFRP) 筋与 ECC 组合构件的力学响应。

为此, 本文对不同配筋率的 CFRP 筋/ECC 梁进行了抗弯试验, 并与 CFRP 筋混凝土梁和 GFRP 筋/ECC 梁进行了对比, 分析了裂缝、挠度、极限承载力和破坏模式等。在试验的基础上, 对 CFRP 筋/ECC 梁的受压区高度和极限承载力进行了理论研究, 推导了弯矩承载力简化公式, 确定了等效矩形应力图中等效系数, 这为 CFRP 筋/ECC 梁的工程应用和设计提供了理论参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验共设计 5 根单筋矩形截面超筋梁, 包括 3 根 CFRP 筋/ECC 梁、1 根 GFRP 筋/ECC 梁和 1 根 FRP 筋混凝土梁。试件几何尺寸和构造如图 1 所示, 保护层厚度为 15 mm。梁试件主要的变化参数为 CFRP 筋配筋率、FRP 筋类型和基体材料类型, 具体参数见表 1。

1.2 试验材料

本试验采用的 FRP 筋包括 CFRP 筋和 GFRP 筋两种, 其中 CFRP 筋直径为 6 mm、10 mm 和 13 mm,

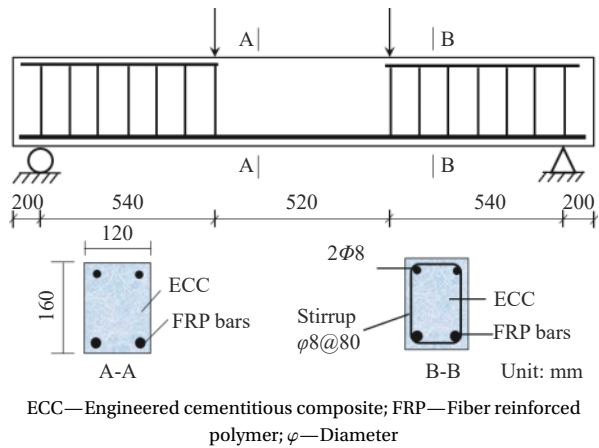


图1 梁试件几何尺寸和构造

Fig. 1 Geometry and structural details of specimen

GFRP 筋直径为 10 mm，筋材的表面处理方式均为喷砂处理。试验中架立筋和箍筋采用 HPB300 级钢筋，直径为 8 mm。根据 ASTM 标准 (D7205/D7205M-06)^[28] 对 FRP 筋进行单轴拉伸性能测试，FRP 筋力学性能参数见表 2。可知，CFRP 筋的弹

性模量随筋材直径的增大而减小。

本试验 ECC 材料是由 425 普通硅酸盐水泥、精制石英砂、I 级粉煤灰、聚羧酸高效减水剂、水和聚乙烯醇 (Polyvinyl alcohol, PVA) 纤维组成。ECC 材料配合比见表 3，PVA 纤维的基本材料参数如表 4 所示。本试验采用 3 个狗骨试件测试 ECC 材料的单轴拉伸性能，其单轴拉伸应力-应变曲线如图 2 所示。可知，试验采用 ECC 材料的开裂强度 $f_{cr}=3\text{ MPa}$ ，开裂应变 $\varepsilon_{cr}=0.08\%$ ，极限抗拉强度 $f_{tu}=4.5\text{ MPa}$ ，极限拉伸应变 $\varepsilon_{tu}=2.5\%$ 。本试验采用 3 个圆柱形试件 (直径为 100 mm，高度为 200 mm) 测试 ECC 材料的受压性能，其圆柱体抗压强度 $f_{cu}=49.09\text{ MPa}$ ，峰值荷载对应的应变 $\varepsilon_{cp}=0.4435\%$ ，弹性模量 $E_c=16.5\text{ GPa}$ 。为进行对比试验，本文采用与 ECC 相同强度等级的 C40 混凝土制作 FRP 筋混凝土梁。其中，普通混凝土各材料的质量比为水泥：粗骨料：细骨料：水 = 1.0：2.5：1.4：0.48。普通混凝土的圆柱体抗压强度为 46 MPa。

表 1 梁试件主要参数

Table 1 Detailed parameters of tested beams

Sample	Dimension of the beam/mm ³	FRP rebar	Matrix type	Longitudinal bar	Reinforcement ratio/%	Stirrup	Supplementary reinforcement
3CFRP(6)/ECC	120×160×2 000	CFRP	ECC	3Φ6	0.54	Φ8@80	2Φ8
2CFRP(10)/ECC	120×160×2 000	CFRP	ECC	2Φ10	1.01	Φ8@80	2Φ8
3CFRP(13)/ECC	120×160×2 000	CFRP	ECC	3Φ13	2.55	Φ8@80	2Φ8
3GFRP(10)/ECC	120×160×2 000	GFRP	ECC	3Φ10	1.51	Φ8@80	2Φ8
3CFRP(10)/PC	120×160×2 000	CFRP	Concrete	3Φ10	1.51	Φ8@80	2Φ8

Notes: yCFRP(x)—Number of FRP rebars designed in the beam is y, x means the diameter of used FRP rebars; PC—Plain concrete; CFRP—Carbon fiber reinforced polymer; GFRP—Glass fiber reinforced polymer.

表 2 筋材基本力学参数

Table 2 Mechanical parameters of FRP rebars

FRP	D/mm	f_{tu} /MPa	E_f /GPa	$\varepsilon_{tu}/\%$
CFRP	6	2 700.0	163.6	1.65
	10	2 436.0	143.3	1.70
	13	2 001.1	132.5	2.00
GFRP	10	1 080.0	50.0	2.00

Notes: D—Diameter of FRP rebar; f_{tu} —Tensile strength of FRP rebar; E_f —Elastic modulus of FRP rebar; ε_{tu} —Ultimate tensile strain of FRP rebar.

表 3 ECC 配合比

Table 3 Mix proportion of ECC

Cement+Fly ash	Silica sand	Water	Fiber	Super-plasticizer
1	0.2	0.28	0.009	0.006

表 4 聚乙烯醇 (PVA) 纤维的材料性能

Table 4 Material properties of polyvinyl alcohol (PVA) fiber

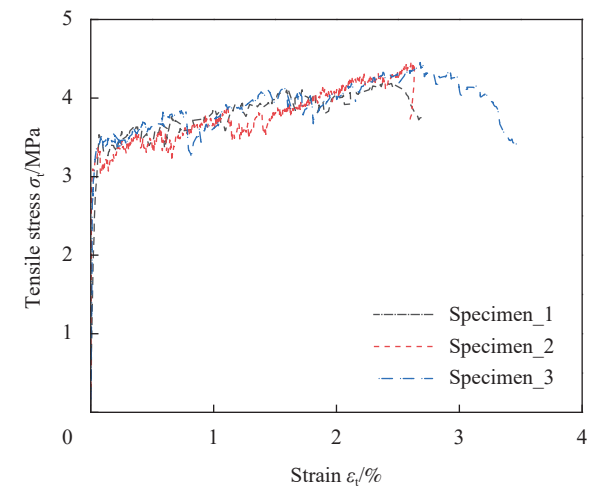
L/mm	$d_f/\mu\text{m}$	$f_{\text{fiber}}/\text{MPa}$	$\delta_f/\%$	$E_{\text{fiber}}/\text{GPa}$	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
12	39	1 620	7	42.8	1.6

Notes: d_f —Diameter of PVA fiber; L—Length of PVA fiber; ρ —Density; f_{fiber} —Tensile strength of fiber; E_{fiber} —Elastic modulus of fiber; δ_f —Elongation of PVA fiber.

1.3 加载方案及量测系统

本试验采用山东美特斯生产的 600 kN 电液式万能试验机进行加载，试验装置如图 3 所示。加载过程分为预加载和正式加载。预加载阶段，以 1 kN/min 的速率从 0 kN 增加至 3 kN，再以同样速率降至 1 kN，循环 3 次后开始正式加载。正式加载时，先采用荷载加载，加载速率为 3 kN/min，加载至计算极限承载力的 80% 左右改为位移加载，

此时加载速率为 0.6 mm/min。当荷载下降到极限承载力 80% 或梁脆性破坏造成承载力突然降低, 视为梁破坏, 停止加载并进行卸载。



Specimen_1,2,3—Three tensile test samples

图 2 ECC 材料单轴拉伸应力-应变曲线

Fig. 2 Tensile stress-strain curves of ECC samples

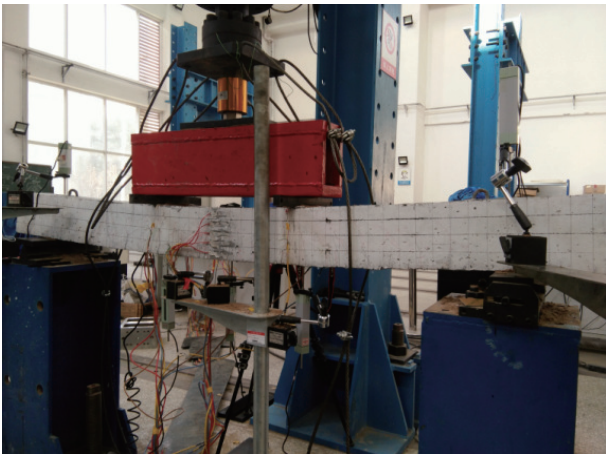


图 3 试验装置

Fig. 3 Test setup

试验过程中, 在梁底中部、加载点及支座处布置 5 个位移计 (LVDT) 测量梁的挠曲变形。在试件侧面跨中位置等间距布置 5 个应变片测量梁截面不同高度处的平均应变, 同时在梁跨中及加载点位置的纵筋表面粘贴应变片测量纵筋应变。应变片和位移计的数据由东华静态数据采集仪进行采集。试验过程中, 每隔 5 kN 采用智博联裂缝观测仪测试最大裂缝宽度, 记录裂缝数量, 描绘裂缝的发展形态。

2 试验结果与分析

2.1 FRP 筋增强 ECC 梁荷载-挠度曲线

图 4 为试验梁的弯矩-跨中挠度曲线。由图 4(a)

可知, 不同配筋率 CFRP 筋/ECC 梁的荷载-挠度曲线均是由 3 部分组成: 受拉区 ECC 开裂之前的弹性阶段、带裂缝工作阶段和破坏阶段。线弹性阶段, 各梁的荷载挠度曲线基本重合, 受配筋率的影响较小。开裂后, 梁的曲线斜率和梁的承载能力均发生了明显的变化。配筋率越高, 梁的承载力和荷载挠度曲线的斜率越大。这说明增加 CFRP 筋的配筋率可以明显提高梁的刚度和承载能力。当受压区 ECC 压应变达到极限压应变后, 梁达到最大承载力。

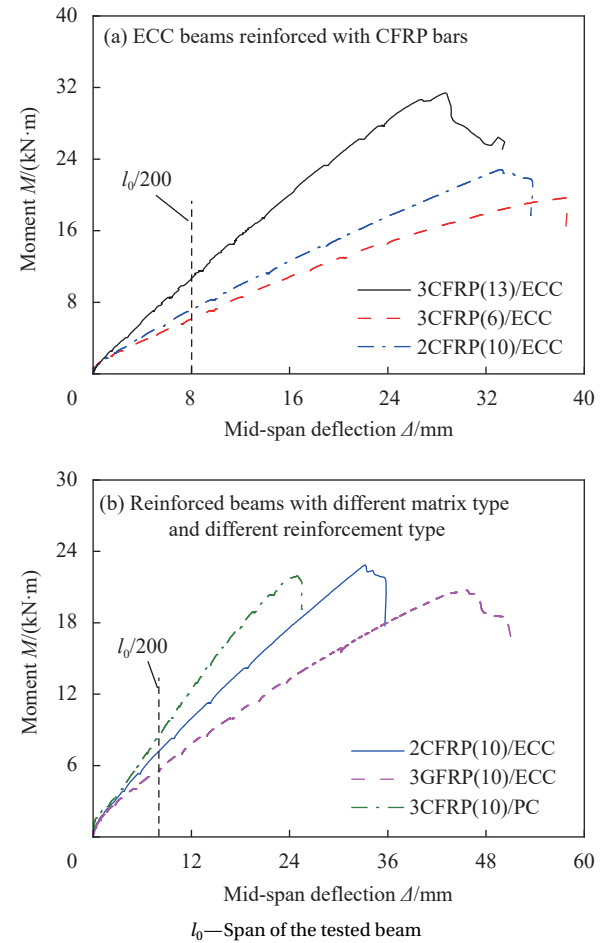


图 4 FRP 筋增强 ECC 梁及 FRP 筋/混凝土梁弯矩-挠度曲线

Fig. 4 Moment-deflection curves of ECC beams reinforced with FRP bars and concrete beam reinforced with FRP bars

图 4(b) 为不同基体、不同 FRP 筋/梁的荷载挠度曲线。观察曲线可以发现, FRP 筋/ECC 梁与 FRP 筋混凝土梁的曲线形状类似。在线弹性阶段, 各梁的荷载挠度曲线基本重合, 这说明在线弹性阶段基体材料、筋材类型及配筋率对弯矩-挠度曲线的影响较小。随着荷载的增大, 弯矩-挠度曲线进入了非线性增长阶段。此时, 由于配筋率的影响, 梁 3CFRP(10)/PC 的弯矩-挠度曲线斜率略高

于梁 2CFRP(10)/ECC。当配筋率相同时，梁 3CFRP(10)/PC 的弯矩-挠度曲线斜率(刚度)高于梁 3GFRP(10)/ECC，这主要是由于 GFRP 筋的弹性模量远低于 CFRP 筋造成的。

根据曲线得到的试验梁的特征荷载和特征位移见表 5，其中 M_{cr} 和 M_u 分别表示开裂弯矩和极限弯矩， Δ_{cr} 和 Δ_u 分别代表跨中位置的开裂挠度和极限挠度。可知，随着配筋率的增加，CFRP 筋/ECC 梁的承载力逐渐增大，延性降低。当配筋

率为 2.55%(梁 3CFRP(13)/ECC)时，其承载力是梁 3CFRP(6)/ECC(配筋率为 0.54%)的 1.60 倍，而极限挠度则是梁 3CFRP(6)/ECC 的 74.8%。当配筋率相同时，GFRP 筋/ECC 梁承载力与 CFRP 筋混凝土梁基本相同，但其极限挠度则是 CFRP 筋混凝土梁的 1.82 倍。鉴于 ECC 较高的受压延性，配筋率较低的梁 2CFRP(10)/ECC 比梁 3CFRP(10)/PC 的极限承载力高 4.16%。可见，ECC 的使用可提高 CFRP 筋梁的变形能力和极限承载力。

表 5 FRP 筋增强 ECC 梁和 FRP 筋/混凝土梁试验结果

Table 5 Test results of ECC beam reinforced with FRP bars and concrete beam reinforced with FRP bars

Sample	$M_{cr}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_u/(\text{kN}\cdot\text{m})$	Δ_{cr}/mm	Δ_u/mm	Failure mode
3CFRP(6)/ECC	1.09	19.67	0.29	38.40	ECC crushed
2CFRP(10)/ECC	1.13	22.83	0.36	33.28	ECC crushed
3CFRP(13)/ECC	1.14	31.41	0.37	28.73	ECC crushed
3GFRP(10)/ECC	1.11	20.76	0.44	45.31	ECC crushed
3CFRP(10)/PC	1.42	21.92	0.23	24.98	Concrete crushed

Notes: M_{cr} —Crack moment; M_u —Ultimate moment; Δ_{cr} —Crack deflection at mid-span; Δ_u —Ultimate deflection at mid span.

根据《纤维增强复合材料工程应用技术标准》(GB/T 50608—2020)^[29]规定可知，在 $1/200l_0(l_0$ 为梁的跨度)的允许最大挠度限值条件下，CFRP 筋/ECC 梁和 CFRP 筋混凝土梁一样，其弯矩是极限弯矩的 30%~40%。因此，CFRP 筋/ECC 梁的截面配筋也应由正常使用极限状态控制，而非承载力极限状态。

2.2 FRP 筋增强 ECC 梁基体材料表面应变

试验梁在不同荷载作用下基体材料表面平均应变沿梁高分布如图 5 所示。可知，试验梁在不同荷载作用下，中性轴位置随荷载的增加而不断上升。由图 5(a)~5(c)可知，相同荷载下，CFRP 筋/ECC 梁受压区高度随配筋率的增大而逐步缓慢下移。由图 5(b)和图 5(d)可知，相同荷载下，GFRP 筋/ECC 梁虽然配筋率高，但其受压区高度仍相对较小。这主要是由于相同荷载下，GFRP 筋梁变形较大，裂缝宽度较大，裂缝发展高度较高，从而引起受压区高度相对较小。由图 5(d)和图 5(e)可知，相同荷载下，配筋率相同的混凝土梁受压区高度小于 ECC 梁。这主要是由于混凝土材料延性性能较差，一旦梁底混凝土开裂，受拉区拉力仅由 FRP 筋承担，裂缝快速向上发展，中性轴位置较高，受压区高度较小。而对于 ECC 梁来说，由于 ECC 材料较强的应变硬化能力和较高的受压延性，当初始裂缝出现后，受拉区的拉力由 FRP 筋和 ECC 共同承担，裂缝向上发展缓慢，此时相同荷载下受压区高度较大。

由此可见，FRP 筋梁中性轴的位置不仅与 FRP 筋类型、FRP 筋配筋率有关，还与基体材料类型有关。试验过程中，在某一特定荷载下梁纯弯段截面上 ECC 应变与该点 ECC 纤维至中和轴的距离基本呈正比，满足平截面假定。

2.3 FRP 筋增强 ECC 梁荷载-纵筋应变分析

图 6 为弯矩-纵筋应变曲线。可知，所有试验梁的基体材料开裂后，FRP 筋应变快速增长。对于 CFRP 筋/ECC 梁和 GFRP 筋/ECC 梁来说，由于 ECC 基体的多裂缝开裂行为，加载点之间的 FRP 筋表面应变分布较均匀。而对于 CFRP 筋混凝土梁来说，当混凝土梁开裂时，纵筋应变突然增大，而且随着荷载的增大加载点之间的 FRP 筋表面应变分布越来越不均匀。在规范允许挠度取值 $l_0/200$ 时，各梁跨中位置 CFRP 筋的应变如表 6 所示。可知，CFRP 筋混凝土梁跨中位置 CFRP 筋的应变约为 $3\,200\times10^{-6}$ 。而对于 CFRP 筋/ECC 梁和 GFRP 筋/ECC 梁，当挠度取值为 $l_0/200$ 时，FRP 筋的应变均小于 $3\,200\times10^{-6}$ ，这主要是由于 FRP 筋/ECC 梁中受拉区 PVA 纤维的桥联作用，分担了 FRP 筋应承担的一部分拉应力。同时，由基体材料 ECC 多裂缝开裂行为引起的纯弯段 FRP 筋表面应变分布的均匀性也是导致跨中位置筋材应变较小的原因之一。

2.4 FRP 筋增强 ECC 梁裂缝及破坏形态

图 7 为试验梁纯弯段裂缝情况。可知，与混

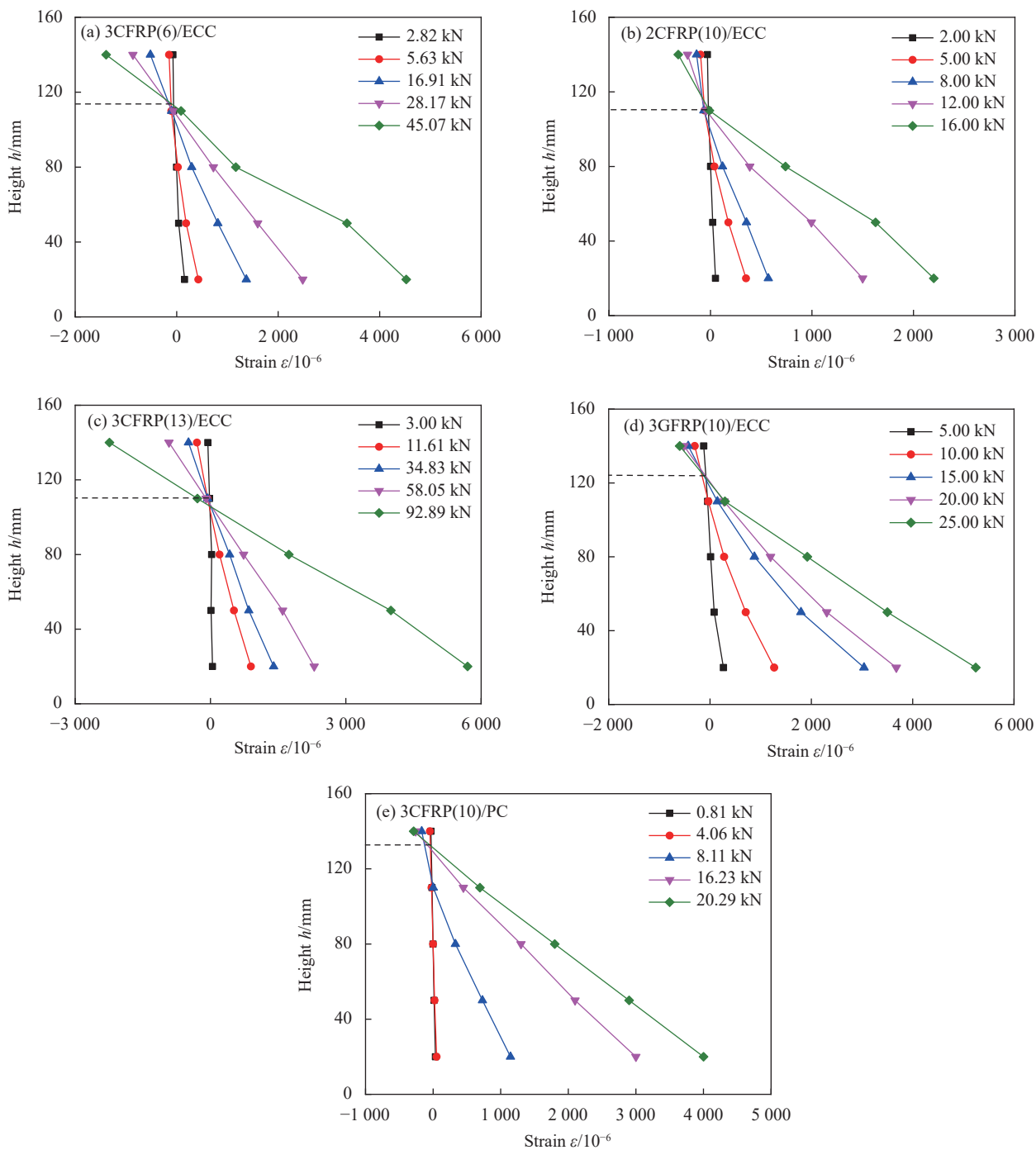


图5 不同荷载下 FRP 筋增强 ECC 梁和 FRP 筋/混凝土梁表面应变分布

Fig. 5 Surface strain distributions of ECC beam reinforced with FRP bars and concrete beam reinforced with FRP bars under different loads

混凝土梁相比，CFRP 筋/ECC 梁和 GFRP 筋/ECC 梁表面裂缝的间距较小，裂缝数量多且分布密集。这主要是由于受拉区 ECC 中 PVA 纤维的桥联作用引起的。对于 FRP 筋混凝土梁，其破坏时，受压区混凝土被压碎，整个梁破坏后有较大的变形。而对于 FRP 筋/ECC 梁来说，由于受压区 ECC 中 PVA 纤维的桥联作用，使其破坏时受压区仍能保

持较好的完整性，卸载后变形可部分恢复。由此可知，当采用 FRP 筋/ECC 梁作为受弯构件时，可有效减小梁的裂缝宽度，减少梁破坏时的损伤程度，提高梁的整体性。

《纤维增强复合材料工程应用技术标准》(GB/T 50608—2020)^[29] 规定，处于短期荷载作用并考虑其准永久效应时，FRP 筋梁最大裂缝宽度

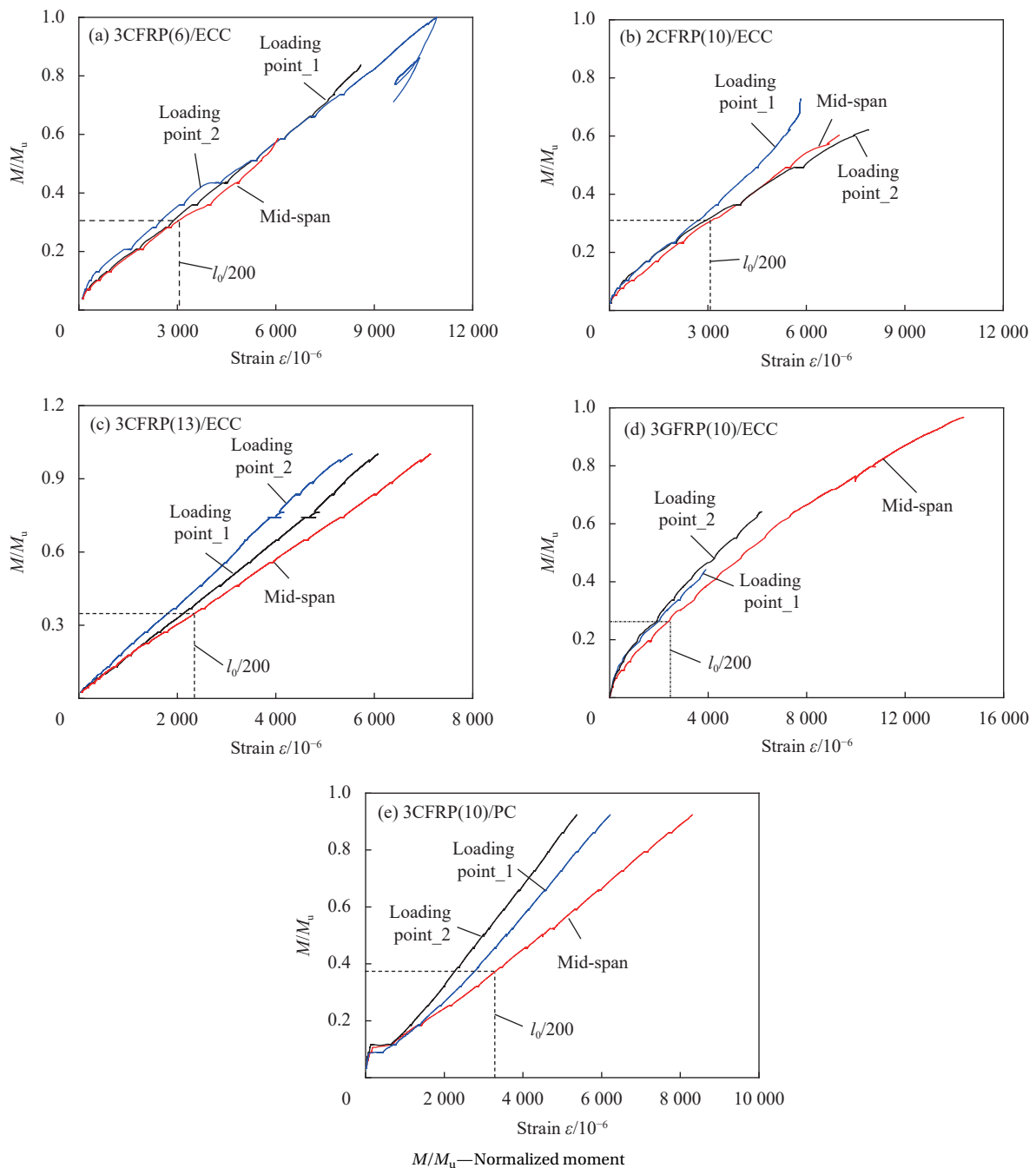


图 6 FRP 筋增强 ECC 梁和 FRP 筋/混凝土梁弯矩-纵筋应变曲线

Fig. 6 Moment-strain curves of ECC beam reinforced with FRP bars and concrete beam reinforced with FRP bars

为 0.5 mm。基于正常使用阶段的考虑，图 8 显示了所有试验梁 0.7 mm 以下的最大裂缝宽度情况。可知，不同荷载下 FRP 筋/ECC 梁的最大裂缝宽度随着荷载的增加呈非线性增长趋势。相同荷载作用下，CFRP 筋/ECC 梁的最大裂缝宽度随着配筋率的增大而减小。与 FRP 筋混凝土梁相比，FRP 筋/ECC 梁开裂后，裂缝开展速度较慢。达到

30% M_u 时，3GFRP(10)/ECC 梁的裂缝宽度比相同配筋率的 CFRP 筋混凝土梁减小了 30%，可见，ECC 基体可以有效地抑制 FRP 筋梁的裂缝开展。

3 FRP 筋增强 ECC 梁承载力计算

3.1 计算基本假设

(1) 不考虑 FRP 筋/ECC 梁受力过程中筋材与 ECC 间的粘结滑移。

表 6 挠度为 $l_0/200$ 时各梁跨中位置 CFRP 筋应变
Table 6 Strain of CFRP rebar at mid-span of the tested beam with deflection $l_0/200$

Sample	Strain of CFRP rebar at mid-span/ 10^{-6}
3CFRP(6)/ECC	3 065
2CFRP(10)/ECC	3 066
3CFRP(13)/ECC	2 349
3GFRP(10)/ECC	2 660
3CFRP(10)/PC	3 200

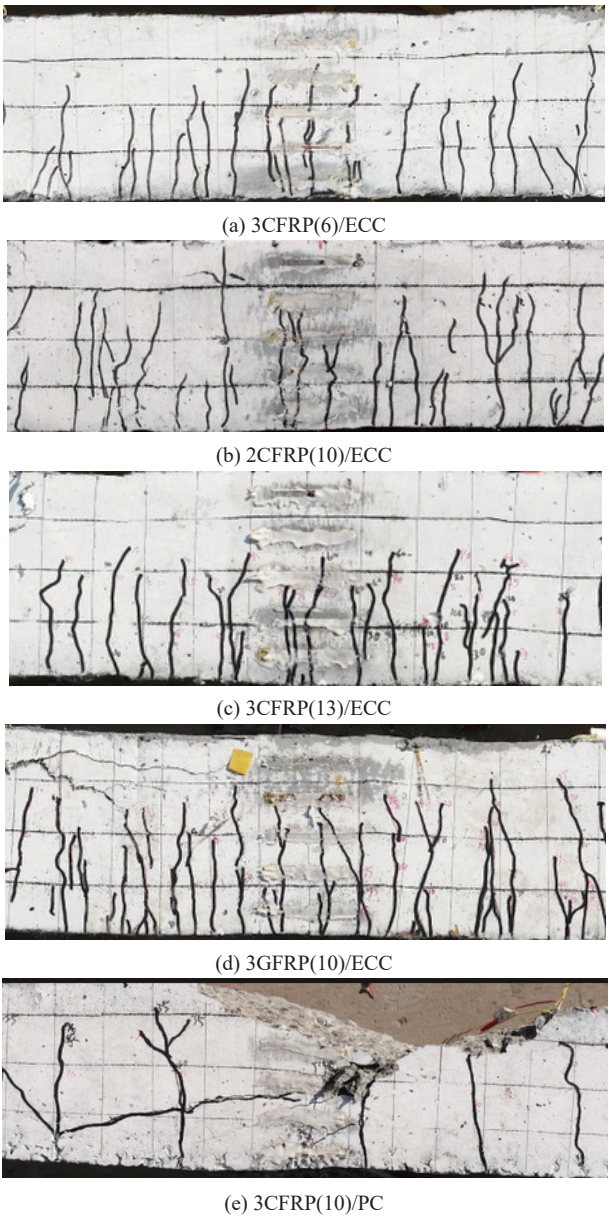


图 7 FRP 筋增强 ECC 梁和 FRP 筋/混凝土梁破坏模式
Fig. 7 Typical failure modes of ECC beams reinforced with FRP bars and concrete beam reinforced with FRP bars

(2) FRP 筋/ECC 梁在受力全过程满足平截面假定,跨中截面的转角 φ 和挠度 f 始终呈正比例关系。

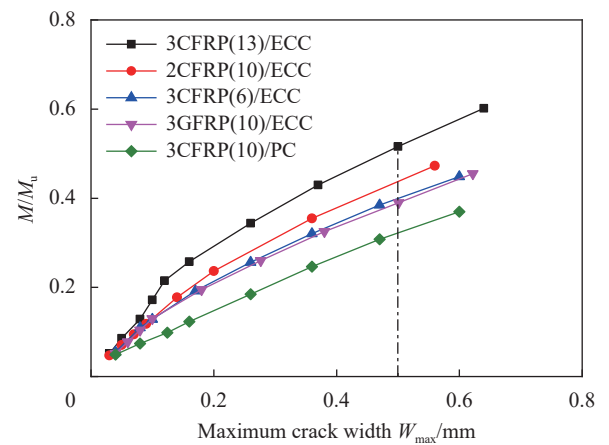


图 8 FRP 筋增强 ECC 梁和 FRP 筋/混凝土梁荷载-裂缝宽度曲线
Fig. 8 Load-crack width curves of ECC beams reinforced with FRP bars and concrete beam reinforced with FRP bars

(3) 考虑受拉区 ECC 材料的贡献, ECC 材料单轴拉伸和单轴压缩应力-应变关系曲线如图 9 所示。本文采用的 ECC 单轴拉伸本构模型为分段函数,其数学表达式为

$$\sigma_t = \begin{cases} E_t \varepsilon_t, & \varepsilon_t \leq \varepsilon_{cr} \\ f_{cr} + m(\varepsilon_t - \varepsilon_{cr}), & \varepsilon_{cr} \leq \varepsilon_t \leq \varepsilon_{tu} \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_t 为拉应力; ε_t 为拉应变; $E_t = \frac{f_{cr}}{\varepsilon_{cr}}$; $m = \frac{f_{tu} - f_{cr}}{\varepsilon_{tu} - \varepsilon_{cr}}$ 。式中相关参数可通过试验获得,具体取值见 1.2 节。

为反映 ECC 材料的真实受力状态,本文采用非线性模型来表述 ECC 单轴压缩本构关系,其数学表达式为^[30]

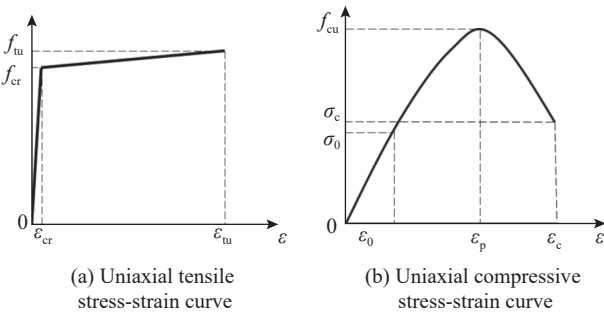
$$\sigma_c = \begin{cases} E_0 \varepsilon_c, & 0 \leq \varepsilon_c < \varepsilon_0 \\ E_0 \varepsilon_c \left(b_0 - \frac{a_0 E_0}{\sigma_{cu}} \varepsilon_c \right), & \varepsilon_0 \leq \varepsilon_c < \varepsilon_{cp} \\ \sigma_{cu} - \frac{\sigma_{cu}}{\varepsilon_{cp}} (\varepsilon_c - \varepsilon_{cp}), & \varepsilon_{cp} \leq \varepsilon_c < 1.5 \varepsilon_{cp} \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ_c 为压应力; ε_c 为压应变; E_0 为弹性模量,其值可根据试验结果确定,本文取 16.50 GPa; ε_0 为弹性极限应变,为 40% 极限荷载对应的应变,本文取值为 $\varepsilon_0 = \frac{0.4 f_{cu}}{E_0}$; σ_{cu} 为峰值应力; ε_{cp} 为峰值应力对应的应变,本文取 0.004435; a_0 和 b_0 为材料参数,参照文献^[30]分别选取为 1.124 和 0.308。

FRP 筋单轴拉伸的本构关系表达式为

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_f, \quad 0 \leq \varepsilon_f \leq \varepsilon_{fu} \quad (3)$$

式中: σ_f 是 FRP 的拉应力; ε_f 是 FRP 的拉应变; E_f 是 FRP 的弹性模量; ε_{fu} 是 FRP 的极限拉应变。



f_{cr} —Cracking strength; f_{tu} —Tensile strength; ε_{cr} —Cracking strain; ε_{tu} —Ultimate tensile strain; σ_0 —Elastic compressive strength; ε_0 —Elastic compressive strain; ε_p —Strain corresponding to compressive strength; ε_c —Ultimate compressive strain; σ_c —Residual compressive strength; f_{cu} —Uniaxial compressive strength

图9 ECC材料单轴应力-应变曲线

Fig. 9 Uniaxial stress-strain curves of ECC

3.2 FRP 筋增强 ECC 梁实际受压高度计算

FRP 筋/ECC 梁破坏时，截面上应变和应力分布如图 10 所示， c 表示实际受压区高度； σ_0 代表 ECC 材料受压时的弹性极限强度； f_{cp} 代表 ECC 材料的单轴压强度； σ_{cs} 代表 ECC 材料达到极限压应变时对应的残余受压强度； h_0 为梁截面有效高度； a_f 代表受力 FRP 筋的合力点至梁受拉区边缘的距离； $k_1 \sim k_5$ 为相关材料系数，由 ECC 材料单轴拉伸和单轴压缩曲线决定。

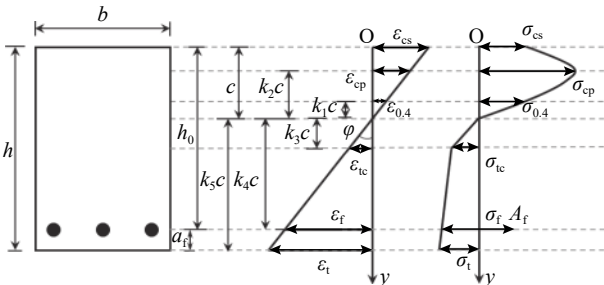


图 10 破坏阶段梁截面上应力和应变分布

Fig. 10 Stress and strain distribution of the tested beams at failure stage

根据平截面假设可知，截面上距离 O 点 y 处的应变计算式为

受压区： $\varepsilon(y) = \frac{y}{c} \varepsilon_{cu}$ (4)

受拉区： $\varepsilon(y) = \frac{h-y}{c} \varepsilon_{cu}$ (5)

FRP 筋应变： $\varepsilon_f = \frac{h-a_f-c}{c} \varepsilon_{cu}$ (6)

式中， ε_{cu} 为 ECC 的极限压应变，取值为 $1.5\varepsilon_{cu}$ 。

此时，截面上力的平衡方程为

$\int_0^c \sigma_c(y) dy b = \int_c^h \sigma_t(y) dy b + \sigma_f A_f$ (7)

式中： A_f 为 FRP 筋的横截面面积； b 为截面尺寸。

将式 (1)~式 (6) 代入式 (7) 中可求得极限状态 ECC 实际受压区高度的表达式：

$c = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$ (8)

其中， A 、 B 、 C 为相关参数，表达式如下：

$B = 2f_{cr}h - m\varepsilon_{cr}h - E_f A_f \varepsilon_{cu}h + E_f A_f \varepsilon_{cu}a_f$

$C = -m\varepsilon_{cu}h^2$

$A = \frac{1}{2}E_0\varepsilon_{cu}k_1^2 + \frac{1}{2}E_0\varepsilon_{cu}b_0(k_2^2 - k_1^2) - E_0\varepsilon_{cu} \frac{a_0\varepsilon_{cu}}{f_{cu}} \frac{k_2^3 - k_1^3}{3} + 2f_{cu}(1 - k_2) + \frac{1}{2} \frac{f_{cu}}{\varepsilon_{cp}} \varepsilon_{cu}(1 - k_2^2) - \frac{1}{2} E_t \varepsilon_{cu} k_3^2 + 2f_{cr} - m\varepsilon_{cr} + E_f A_f$

FRP 筋/ECC 梁界限破坏时，FRP 筋达到极限拉应变，同时受压区边缘 ECC 达到极限压应变。此时，界限破坏的实际受压区高度 c_b 的表达式为

$c_b = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_f} (h - a_f)$ (9)

将 1.1 节和 1.2 节获得的材料参数代入式 (9) 中，可计算出本试验 FRP 筋/ECC 梁的实际受压区高度和界限破坏时实际受压区高度，如表 7 所示。通过理论计算发现，FRP 筋/ECC 梁的实际受压区高度均大于界限实际受压区高度，梁均发生受压破坏，这与试验结果是一致的。同时，随着配筋

表 7 FRP 筋/ECC 梁受压区高度计算结果

Table 7 Calculation results of the actual compression zone height of ECC beams reinforced with FRP bars

Sample	Reinforce-ment ratio/%	c /mm	c_b /mm	Failure mode
3CFRP(6)/ECC	0.54	45.85	37.36	ECC crushed
2CFRP(10)/ECC	1.01	53.70	36.57	ECC crushed
3CFRP(13)/ECC	2.55	70.05	32.45	ECC crushed
3GFRP(10)/ECC	1.51	44.50	32.45	ECC crushed

Note: c_b —Actual compression zone height at boundary failure.

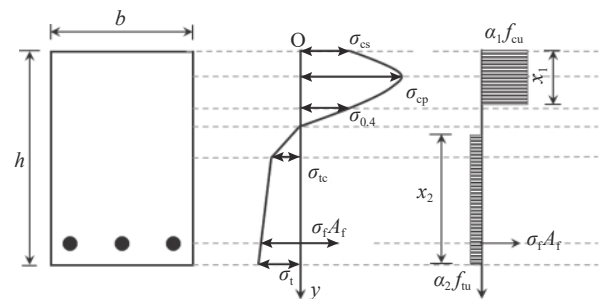
率的增大, CFRP 筋/ECC 梁的实际受压区高度随之增加。对于梁 3GFRP(10)/ECC 和梁 2CFRP(10)/ECC 来说, 虽然梁 3GFRP(10)/ECC 的配筋率高于梁 2CFRP(10)/ECC, 但其受压区高度仍小于梁 2CFRP(10)/ECC, 这说明 FRP 筋/ECC 梁破坏时的受压区高度不仅与梁的配筋率有关, 还与 FRP 筋的类型 (或者说 FRP 筋的弹性模量) 有关。

3.3 FRP 筋增强 ECC 梁等效矩形应力图

在 FRP 筋/ECC 梁的实际受压区高度获得之后, 其极限弯矩计算式为

$$M_u = \int_0^h \sigma(y)b(y-c)dy + \sigma_f A_f (h - a_f - c) \tag{10}$$

式 (10) 的表达形式较复杂, 为简化极限弯矩的计算, 可参考《混凝土结构设计规范》(GB/T 50010—2010)^[31] 将受压区和受拉区 ECC 的应力分布用等效矩形应力图代替, 如图 11 所示。 x_1 为 ECC 受压区高度, x_2 为受拉区高度, α_1 和 α_2 为等效矩形应力图系数。



x_1 —Compression zone height of ECC; x_2 —Tension zone height of ECC;
 α_1 and α_2 —Coefficients of equivalent rectangular stress block for ECC

图 11 梁正截面抗弯承载力计算简图

Fig. 11 Calculation diagram of flexural bearing capacity of beams

等效矩形应力图的等效原则为受压区 ECC 的压应力合力的大小和作用点位置不变, 受拉区的 ECC 拉应力合力的大小和作用点位置不变。即

受压区 $\begin{cases} \int_0^c \sigma(y)b dy = \alpha_1 f_c b y_1 \\ \int_0^c \sigma(y)y b dy = \alpha_1 f_c b \frac{y_1^2}{2} \end{cases} \tag{11}$

受拉区 $\begin{cases} \int_c^h \sigma(y)b dy = \alpha_2 f_t b y_2 \\ \int_c^h \sigma(y)(y-c)b dy = \alpha_2 f_t b \frac{y_2^2}{2} \end{cases} \tag{12}$

等效后, 截面的平衡方程为

$$\alpha_1 f_c b y_1 = \alpha_2 f_t b y_2 + \sigma_f A_f \tag{13}$$

$$M_u = \alpha_1 f_c b y_1 \left(c - \frac{y_1}{2} \right) + \sigma_f A_f (h - c - a_f) + \alpha_2 f_t b y_2 \left(h - c - \frac{y_2}{2} \right) \tag{14}$$

$$y_1 = \beta_1 c, \quad y_2 = \beta_2 (h - c) \tag{15}$$

式中: β_1 为 ECC 受压区高度 y_1 与中和轴高度 c 的比值; β_2 为 ECC 受拉区高度 y_2 与实际受拉区高度 $(h-c)$ 的比值。

将式 (8) 求得的实际受压区高度值代入式 (11)、式 (12) 和式 (15) 中, 可获得本试验中各 FRP 筋/ECC 梁的等效矩形应力图系数值, 如表 8 所示。可知, 由于 FRP 筋/ECC 梁最终发生的是受压区 ECC 破坏, 故本文中所有梁的受压等效矩形应力图系数 α_1 、 β_1 是相同的, 其仅与 ECC 材料的受压应力-应变曲线有关。而对于受拉等效矩形应力图系数 α_2 、 β_2 来说, 则呈现出与配筋率和筋材类型均有关的特性。

表 8 FRP 筋/ECC 梁等效矩形应力图系数

Table 8 Equivalent rectangular stress coefficients of FRP rebar reinforced ECC beams

Sample	Reinforcement ratio/%	α_1	β_1	α_2	β_2
3GFRP(10)/ECC	1.51	0.768	0.853	0.828	0.925
3CFRP(6)/ECC	0.54	0.768	0.853	0.820	0.927
2CFRP(10)/ECC	1.01	0.768	0.853	0.784	0.938
3CFRP(13)/ECC	2.55	0.768	0.853	0.735	0.954

Notes: β_1 —Ratio of compression zone height to neutral axis height of ECC; β_2 —Ratio of calculation height to actual height of tension zone of ECC.

3.4 FRP 筋增强 ECC 梁计算极限弯矩与试验结果对比

采用上述简化计算公式获得本文 FRP 筋/ECC 梁计算极限弯矩与试验结果对比如表 9 所示。可

知, 极限弯矩试验值与计算值的误差范围为 -8%~2%, 可见, 本文提出的 FRP 筋/ECC 梁极限承载力简化计算模型可用来预测 FRP 筋/ECC 梁的极限承载力。

表 9 FRP 筋/ECC 梁极限承载力试验值与计算值对比

Table 9 Comparison of experimental and calculated ultimate bearing capacity of FRP bars reinforced ECC beams

Sample	$M_{u,exp}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_{u,cal}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_{u,cal}/M_{u,exp}$
3CFRP(6)/ECC	19.67	19.88	1.011
2CFRP(10)/ECC	22.83	21.47	0.940
3CFRP(13)/ECC	31.41	28.30	0.919
3GFRP(10)/ECC	20.76	20.06	0.966

Notes: $M_{u,exp}$ —Test value of ultimate bending moment; $M_{u,cal}$ —Calculated value of ultimate bending moment.

4 结 论

(1) 纤维增强树脂复合材料 (FRP) 筋/超高延性纤维增强水泥基复合材料 (ECC) 梁和 FRP 筋混凝土梁的荷载-挠度曲线均是由线弹性阶段、带裂缝工作阶段和破坏阶段三部分组成的, 受力过程中 ECC 表面应变符合平截面假设。

(2) 开裂后 FRP 筋梁的抗弯刚度和极限承载力与纵筋类型、配筋率和基体材料的类型相关。随着配筋率的增大, 碳纤维增强树脂复合材料 (CFRP) 筋/ECC 梁的极限承载力增加, 挠度降低。由于筋材弹性模量影响, 相同配筋率的玻璃纤维增强树脂复合材料 (GFRP) 筋/ECC 梁延性优于 CFRP 筋/混凝土梁, 但承载力低于 CFRP 筋/混凝土梁。与配筋率为 4.39% 的 CFRP 筋/混凝土梁相比, 配筋率为 2.93% 的 CFRP 筋/ECC 梁, 承载能力和变形能力更优越。

(3) 试验梁的基体材料开裂后, FRP 筋的应变快速增长。与 CFRP 筋/混凝土梁相比, CFRP 筋/ECC 梁和 GFRP 筋/ECC 梁开裂后, 加载点之间的 FRP 筋表面应变分布更均匀, 没有应变突变现象发生。

(4) 与 CFRP 筋/混凝土梁相比, 采用 CFRP 筋/ECC 梁可以有效减小纯弯曲内的裂缝宽度, 减少梁的破坏损伤程度, 提高梁的整体性。

(5) 正常使用阶段, CFRP 筋/ECC 梁的最大裂缝宽度随着荷载的增加呈非线性增长趋势。相同荷载作用下, CFRP 筋/ECC 梁的最大裂缝宽度随着配筋率的增大而减小。与混凝土相比, ECC 基体可以有效地抑制 FRP 筋梁的裂缝开展。

(6) 在截面应力分析基础上提出了 FRP 筋/ECC 梁的受压区高度计算公式和极限承载力简化计算公式, 确定了相应的等效应力图系数。采用本文提出的简化计算模型, 对本文 FRP 筋/ECC 梁进行了极限承载力计算, 计算值与试验值吻合程度较高。

参考文献:

[1] YUAN F, WU Y F. Analytical method for derivation of stress

block parameters for flexural design of FRP reinforced concrete members[J]. [Composite Structures](#), 2019, 229: 111459.

[2] 刘晋宏, 罗小勇, 肖焱. 钢筋非均匀锈蚀及剩余截面分布模型[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(11): 83-88.

LIU Jinhong, LUO Xiaoyong, XIAO Ye. Non-uniform corrosion and distribution models of residual cross-sectional areas of rebars[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(11): 83-88(in Chinese).

[3] 王洋, 董恒磊, 王震宇. GFRP筋混凝土梁受弯性能试验[J]. [哈尔滨工业大学学报](#), 2018, 50(12): 23-30.

WANG Yang, DONG Henglei, WANG Zhenyu. Flexural experiment of concrete beams reinforced with GFRP bars[J]. [Journal of Harbin Institute of Technology](#), 2018, 50(12): 23-30(in Chinese).

[4] DONG Z Q, WU G, ZHAO X L, et al. Durability test on the flexural performance of seawater sea-sand concrete beams completely reinforced with FRP bars[J]. Construction and Building Materials, 2018, 192: 671-682.

[5] 朱海堂, 程晟钊, 高丹盈, 等. BFRP筋钢纤维高强混凝土梁受弯承载力试验与理论[J]. 复合材料学报, 2018, 35(12): 3313-3323.

ZHU Haitang, CHENG Shengzhao, GAO Danying, et al. Experimental and theoretical study on the flexural capacity of high-strength concrete beams reinforced with BFRP bars and steel fiber[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(12): 3313-3323(in Chinese).

[6] EL-NEMR A, AHMED E A, EL-SAFY A, et al. Evaluation of the flexural strength and serviceability of concrete beams reinforced with different types of GFRP bars[J]. [Engineering Structures](#), 2018, 173: 606-619.

[7] JU M, PARK Y, PARK C. Cracking control comparison in the specifications of serviceability in cracking for FRP reinforced concrete beams[J]. [Composite Structures](#), 2017, 182: 674-684.

[8] XIAO S H, LIN J X, LI L J, et al. Experimental study on flexural behavior of concrete beam reinforced with GFRP and steel-fiber composite bars[J]. [Journal of Building Engineering](#), 2021, 43: 103087.

[9] LI V C, LEUNG C K Y. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites[J]. [Journal of Engineering](#)

- Mechanics*, 1992, 118(11): 2246-2264.
- [10] XU L Y, HUANG B T, LI V C, et al. High-strength high-ductility engineered/strain-hardening cementitious composites (ECC/SHCC) incorporating geopolymer fine aggregates[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2022, 125: 104296.
 - [11] XU S L, XU H L, HUANG B T, et al. Development of ultrahigh-strength ultrahigh-toughness cementitious composites (UHS-UHTCC) using polyethylene and steel fibers[J]. *Composites Communications*, 2021(100992): 1-6.
 - [12] WU C, LEUNG C K Y, LI V C. Derivation of crack bridging stresses in engineered cementitious composites under combined opening and shear displacements[J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 107: 253-263.
 - [13] LI V C, WANG S. Flexural behaviors of glass fiber-reinforced polymer (GFRP) reinforced engineered cementitious composite beams[J]. *Materials Journal*, 2002, 99(1): 11-21.
 - [14] YUAN F, PAN J L, LEUNG C K Y. Flexural behaviors of ECC and concrete/ECC composite beams reinforced with basalt fiber-reinforced polymer[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2013, 17(5): 591-602.
 - [15] 周甲佳, 姚少科, 景川, 等. FRP筋-ECC梁受弯性能[J]. *建筑科学与工程学报*, 2020, 37(6): 46-54.
ZHOU Jiajia, YAO Shaoke, JING Chuan, et al. Flexural behavior of FRP-reinforced ECC beam[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2020, 37(6): 46-54(in Chinese).
 - [16] 蒋祖发. FRP筋ECC梁受弯性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
JIANG Zufa. Study on flexural behavior of FRP rebar reinforced ECC beams[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020(in Chinese).
 - [17] GE W J, ASHOUR A F, CAO D F, et al. Experimental study on flexural behavior of ECC-concrete composite beams reinforced with FRP bars[J]. *Composite Structures*, 2019, 208: 454-465.
 - [18] GE W J, ASHOUR A F, YU J M, et al. Flexural behavior of ECC-concrete hybrid composite beams reinforced with FRP and steel bars[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2019, 23(1): 1-14.
 - [19] YUAN F, HU R. Flexural behaviour of ECC and ECC-concrete composite beams reinforced with hybrid FRP and steel bars[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2021, 24(15): 3171-3183.
 - [20] CAI J M, PAN J L, ZHOU X M. Flexural behavior of basalt FRP reinforced ECC and concrete beams[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 142: 423-430.
 - [21] HOU W, LI Z Q, GAO W Y, et al. Flexural behavior of RC beams strengthened with BFRP bars-reinforced ECC matrix[J]. *Composite Structures*, 2020, 241: 112092.
 - [22] ZHANG L, ZHENG Y, YU Y, et al. Structural performance evaluation of ECC link slabs reinforced with FRP bars for jointless bridge decks[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 304: 124462.
 - [23] 何佑轩. FRP增强ECC梁及ECC/混凝土组合梁抗剪性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
HE Jixuan. Study on shear behaviors of FRP reinforced ECC beams and ECC/concrete composite beam[D]. Nanjing: Southeast University, 2016(in Chinese).
 - [24] 廖桥, 苏元瑞, 余江滔, 等. 海水海砂ECC梁的抗剪性能试验及有限元模拟[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(8): 3929-3939.
LIAO Qiao, SU Yuanrui, YU Jiangtao, et al. Experimental study and finite element analysis of seawater sea-sand engineered cementitious composites beams[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2022, 39(8): 3929-3939(in Chinese).
 - [25] ZHOU J, SHEN W, WANG S. Experimental study on torsional behavior of FRC and ECC beams reinforced with GFRP bars[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 152: 74-81.
 - [26] FISCHER G, LI V C. Deformation behavior of fiber-reinforced polymer reinforced engineered cementitious composite (ECC) flexural members under reversed cyclic loading conditions[J]. *ACI Structural Journal*, 2003, 100(1): 25-35.
 - [27] YUAN F, PAN J L, DONG L T, et al. Mechanical behaviors of steel reinforced ECC or ECC/concrete composite beams under reversed cyclic loading[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014, 26(8): 04014047.
 - [28] American Society for Testing Materials. Standard test method for tensile properties of fiber reinforced polymer matrix composite bars: ASTM D7205/D7205M-06[S]. West Conshohocken: American Society for Testing Materials, 2006.
 - [29] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 纤维增强复合材料工程应用技术标准: GB/T 50608—2020[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for fiber reinforced polymer (FRP) in construction: GB/T 50608—2020[S]. Beijing: China Planning Press, 2020(in Chinese).
 - [30] ZHOU J J, PAN J L, LEUNG C K Y. Mechanical behavior of fiber-reinforced engineered cementitious composites in uniaxial compression[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2015, 27(1): 04014111.
 - [31] 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/T 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design code for concrete structures: GB/T 50010—2010[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2015(in Chinese).