

# 基于非接触式观测技术的 FRP/ECC 复合材料 反复受拉本构关系模型

朱忠锋<sup>1</sup> 王文炜<sup>1</sup> 郑宇宙<sup>2</sup> 田俊<sup>3</sup> 谈笑<sup>1</sup>

(1. 东南大学, 江苏南京 211189; 2. 陆军工程大学, 江苏南京 210007; 3. 东莞理工学院, 广东东莞 523808)

**摘要:** 考虑不同种类的纤维复合材料 (FRP) 格栅、格栅层数及加卸载循环方式, 采用非接触式观测技术 (DIC) 和传统应变片测量方法, 对 FRP 格栅与 ECC 复合材料试件进行了单轴反复拉伸试验, 研究复合材料的轴向抗拉力学性能, 验证 DIC 非接触式观测技术的有效性。在试验结果的基础上, 提出了 FRP/ECC 复合材料反复受拉本构关系模型。试验结果表明, 玄武岩 (BFRP) 格栅/ECC 能充分地发挥纤维格栅的材料性能和 ECC 基体的高延伸性和多点开裂特性, 显著提高 ECC 基体的极限抗拉强度。不同循环加载方式对 FRP/ECC 复合材料试件的加卸载路径有显著影响, 但对其极限应力/应变的影响较小。BFRP/ECC 复合材料的变形恢复能力要优于 CFRP/ECC 复合材料的变形恢复能力。DIC 非接触式观测技术能有效地捕捉到试件的开裂, 观测裂缝的萌生、发展过程, 获得破坏形态, 获得应力-应变全曲线。计算结果表明, 建议的应力-应变关系模型与试验结果吻合较好, 可以有效地预测 FRP/ECC 复合材料的反复受拉本构关系。

**关键词:** FRP 格栅; ECC; DIC 非接触式观测技术; 应力-应变关系模型; 循环荷载

**中图分类号:** TU528.572 TU599 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2019)10-0036-11

## The constitutive model of FRP/ECC composite materials under uniaxial cyclic tensile loading based on the digital image correlation technique

Zhu Zhongfeng<sup>1</sup> Wang Wenwei<sup>1</sup> Zheng Yuzhou<sup>2</sup> Tian Jun<sup>3</sup> Tan Xiao<sup>1</sup>

(1. Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. Army Engineering University, Nanjing 210007, China;  
3. Dongguan University of Technology, Guangdong 523808, China)

**Abstract:** Considering different types of fiber reinforced polymer (FRP) grid, reinforcement layer and cyclic loading method, the digital image correlation (DIC) measurement technique and traditional strain gauge measurement method were used to investigate the uniaxial tensile mechanical behavior of FRP grid-engineered cementitious composites (FRP/ECC) material and the availability of DIC measurement technique. Based on the experimental results, a cyclic tensile constitutive model of FRP/ECC composites was proposed. The test results indicate that the characteristic of FRP grid and the high ductility and multi-cracking properties of ECC were fully utilized in the basalt grid reinforced ECC (BFRP/ECC) composite system. The ultimate tensile strength of FRP/ECC was improved greatly with the reinforcement of FRP grid. The loading schemes may greatly affect the behavior of loading/unloading behavior, but they have no significant effect on the ultimate stress/strain of FRP/ECC material. The deformation recovery ability of BFRP/ECC is better than that of CFRP/ECC. By making use of the DIC measurement, the generation and propagation of cracks can be effectively captured, the failure mode can be observed and the whole stress-strain curves of specimens can be obtained. The calculation results show that the proposed stress-strain relationship agrees well with the experimental results and can effectively

基金项目: 国家自然科学基金 (51578135, 51878156)、东南大学优秀博士学位论文培育基金 (YBPY1929) 和东莞理工学院引进人才科研启动专项基金 (GC300502-29, GC300502-32)

作者简介: 朱忠锋, 博士研究生

通讯作者: 王文炜, 博士, 教授

收稿日期: 2018-08-01

predict the cyclic tensile constitutive relationship of FRP/ECC composites.

**Keywords:** FRP grid; ECC; DIC measurement; stress-strain relationship; cyclic loading

**E-mail:** wangwenwei@seu.edu.cn

## 引 言

近年来, 织物/编织网增强非有机复合材料 (Fabric/Textile Reinforced Cementitious Matrix, FRCM/TRM), 纤维复合材料 (Fiber Reinforced Polymer, FRP) 格栅增强工程用水泥基复合材料 (Engineered Cementitious Composite, ECC), 由于其良好的力学性能, 已经在结构构件的维修加固中得到研究与应用<sup>[1-10]</sup>。将 FRP 格栅与 ECC 结合, 形成 FRP/ECC 复合材料, 充分发挥材料的优良性能, 可以有效地提高构件的极限承载力, 改善使用性能<sup>[4-6]</sup>。此外, 将 ECC 作为 FRP 与混凝土间的黏结层, 避免了使用环氧树脂造成 FRP 过早剥离的缺陷, FRP 的材料利用率可以提高 79%<sup>[11]</sup>。

研究结果表明, ECC 基体的极限拉应变为 1%~10%, 且裂缝数量一般大于 20 条 (测量范围 60mm)<sup>[12]</sup>。外贴应变片的测量范围一般在 1%~2%, 远远小于 ECC 材料本身的极限拉应变。因此, 如何测量 ECC 基体的超高拉伸变形, 观测多点开裂现象是目前应着重解决的问题。非接触式数字成像测试系统 (Digital Image Correlation, DIC) 是一种新型的观测系统, 可以实时呈现试件的位移场、应变场、应变-时间曲线以及位移-时间曲线等关键图形和数据, 对材料性能进行全方位的分析<sup>[12-14]</sup>。本文采用

碳纤维 (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP) 和玄武岩纤维 (Basalt Fiber Reinforced Polymer, BFRP) 两种格栅与 ECC 复合(下文简称 CFRP/ECC, BFRP/ECC), 形成薄板试件, 使用 DIC 观测系统对试件的受力全过程进行了观测, 获得了破坏模式与极限抗拉强度, 建立了反复受拉应力-应变本构关系模型。

## 1 试验研究

### 1.1 试件设计

试验设计了 2 组 CFRP/ECC 复合材料试件和 2 组 BFRP/ECC 复合材料试件, 每组 2 个相同的试样, 如表 1 所示。试件几何尺寸为 450mm(长)×100mm(宽)×10mm(厚), 如图 1 所示。纤维格栅均匀配置在试件中部。文献[8, 10]的试验结果表明: 多次完全加卸载及部分加载/卸载对材料的应力-应变关系影响较大, 因此本次试验确定了完全加卸载和部分加卸载两种荷载方式, 并考虑了加载次数的影响 (图 2)。表 1 中试件编号说明如下: A、B 为加卸载循环方式, C2、C3 为 CFRP 格栅层数, B1 为 BFRP 格栅层数, 1~2 为各组试件编号。格栅配置率为试件横截面中的纤维格栅总面积与试件横截面面积的比值。

试件浇筑过程为: ①首先制作与试件尺寸相符

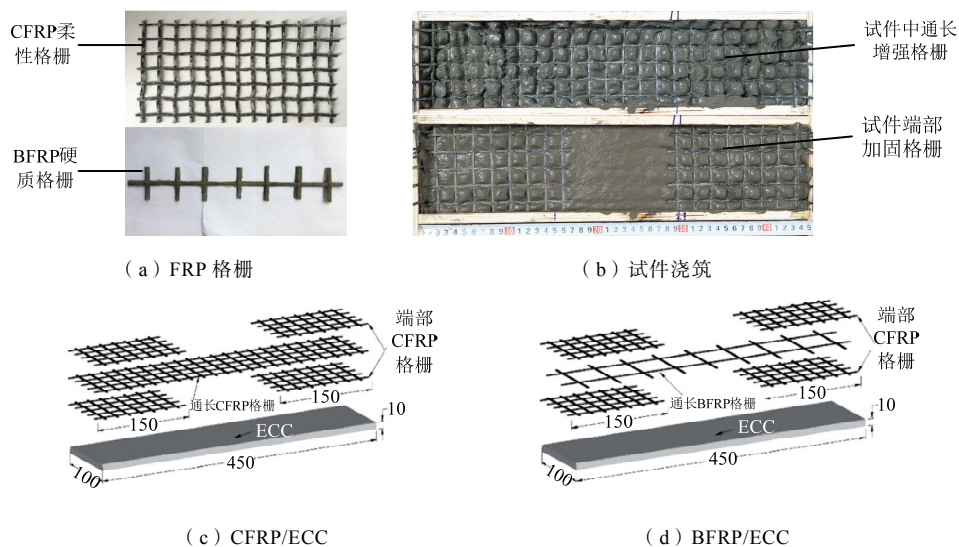


图 1 纤维格栅增强 ECC 试件示意图

Fig.1 Sketch of fiber grid reinforced ECC specimens

表 1 试件设计及试验结果表

Table 1 Designed specimens and test results

加载方式	试件编号	格栅 层数	格栅配置 率(%)	极限应变/应力							
				试验				模型		预测/试验	
				$\epsilon_{tu}(\%)$	$\sigma_{tu}(\text{MPa})$	平均		$\epsilon_{tu}(\%)$	$\sigma_{tu}(\text{MPa})$	应变	应力
$\epsilon_{tu}(\%)$	$\sigma_{tu}(\text{MPa})$										
B	BC2-1	2	0.88	0.76	9.6	0.80	9.55	0.77	10.24	0.97	1.07
	BC2-2			0.83	9.5						
B	BC3-1	3	1.32	0.70	12.6	0.76	13.30	0.77	14.07	1.02	1.06
	BC3-2			0.81	14.0						
A	AB1-1	1	2.82	1.71	10.1	1.71	10.10	1.76	11.44	1.03	1.13
	AB1-2			—	—						
B	BB1-1	1	2.82	1.98	10	2.03	10.60	1.76	11.44	0.87	1.08
	BB1-2			2.07	11.2						
平均值										0.97	1.09
标准差										0.07	0.03
变异系数										7.6%	3%

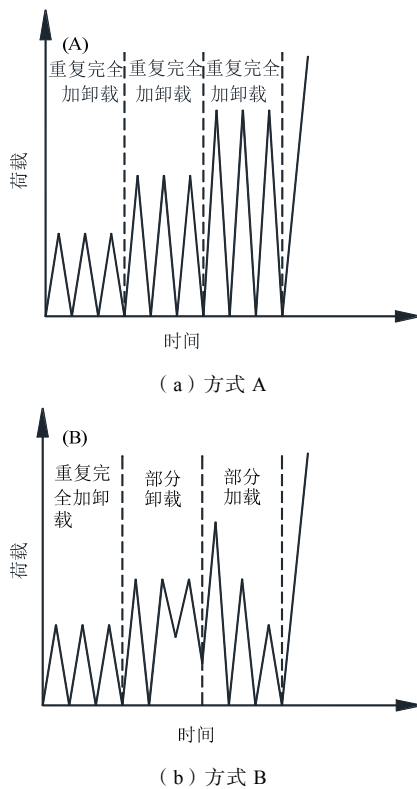


图 2 加载方式

Fig.2 Loading schemes

合的木质模板，并在模板表面涂脱模剂；②在模板底部浇筑一层 ECC 底层，ECC 底层的厚度与内部格栅层数有关（例如 1 层格栅浇筑一半试件高度的 ECC）；③将通长的格栅平铺到 ECC；④浇筑表面 ECC，抹平后进行养护。这里需要说明的是，对于柔性 CFRP 格栅需要预先将网格拉伸平直；对于硬

质 BFRP 格栅，可直接将格栅沿试件长度方向放置在 ECC 基体中。

### 1.2 材料性能

ECC 的组成材料为 P.O. 42.5 级普通硅酸盐水泥、一级粉煤灰、石英砂（最大粒径 $\leq 0.6\text{mm}$ ）、硅灰、减水剂及聚乙烯醇（PVA 纤维）。水泥和粉煤灰的掺量比为 1 : 2.53；水泥和石英砂的掺量比为 1 : 0.8；水胶比为 0.3；PVA 纤维体积掺量为 2%。试验测得 28d 龄期的 70.7mm 立方体 ECC 试件抗压强度为 42.16MPa，极限抗拉强度为 4.56MPa，极限拉应变为 1.41%。

BFRP 格栅中筋束双向排列，纵横向间隔为 50mm $\times$ 50mm，筋束截面面积为 14.1mm<sup>2</sup>，如图 1（a）所示。参照《定向纤维增强塑料拉伸性能试验方法》（GB/T 3354—1999）<sup>[15]</sup>，采用上海新三思 1000kN 万能试验机对 BFRP 格栅进行单轴拉伸试验，测得纤维格栅的力学性能见表 2。CFRP 格栅是一种柔性格栅，纵横丝束间隔为 20mm $\times$ 20mm，单束截面尺寸面积为 0.88mm<sup>2</sup>，由数根单丝组成，由于无法通过应变片采集应变，因此本文中 CFRP 材料属性采用天津卡本复合材料有限公司提供数据。

表 2 FRP 格栅材料性能

Table 2 Material Properties of FRP Grid

名称	极限强度 $f_f$ (MPa)	弹性模量 $E_f$ (GPa)	极限应变 $\epsilon_{fu}$ (%)
BFRP 格栅	449.65	37.4	2.2
CFRP 格栅 (厂家提供)	3400	228	1.5

### 1.3 试验装置

为防止试件两端被试验机夹头局部夹坏,在试件端部黏贴 CFRP 布加固。待试件端部加固完毕后,对试件中部测试区域进行表面处理,去除浮灰并使表面平整。

在试件表面均匀喷洒白色底漆,等底漆晾干后随机喷洒黑色散斑点。在试件另一侧中部位置表面布置长度为 100mm 的应变片以便与 DIC 观测数据进行对比和校对。轴向拉伸试验采用 Instron 8802-250kN 液压伺服控制系统进行。首先利用试验机顶部夹头夹紧试件顶端,利用水平尺测定试件是否垂直。如若不垂直,重新固定直到试件垂直为止;然后调整下部夹头位置,利用试件机底部夹头固定试件底部。加载采用位移控制,速率为 0.25mm/min,卸载采用荷载控制,速率为 1kN/min,直到卸荷为零然后重复加载。所有应变数据均采用江苏泰斯特 TST3827E 动静态信号测试分析系统自动采集,苏州西博三维科技有限公司的三维数字散斑应变测量分析系统处理 DIC 观测数据。试验中采用两个 200 万像素工程镜头进行图像采集,图像后处理采用设备配套软件 VER 8.3.0 进行分析,试验装置如图 3 所示。

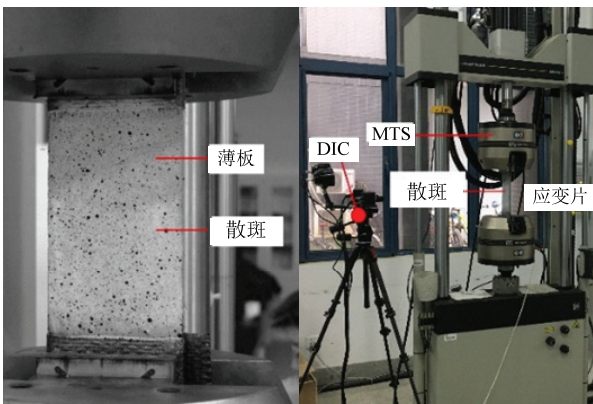


图 3 轴向拉伸试验  
Fig.3 Test setup

DIC 设备配套软件处理数据得到试件位移和应变的步骤如下:①在试件初始状态下划定所需数据区域,并根据数据精确度要求提高或降低区域网格密度;②在区域网格中设置初始参考点若干;③采用软件自带算法对采集的实验图片进行处理,得到网格区域内的位移和应变数据。

## 2 试验结果分析

### 2.1 破坏形态

DIC 观测下 FRP 格栅增强试件的破坏形态如图 4

所示。与传统观测方法下棒骨试件<sup>[8]</sup>和薄板试件<sup>[9-11]</sup>的破坏形态类似:当 FRP/ECC 复合材料达到开裂后,ECC 基体表面出现裂缝,随着荷载的增加,裂缝的长度、宽度和数量均相应发展。当试件卸载时,既有裂缝的宽度随着荷载的降低而减小。当试件重新加载时,原有裂缝的宽度逐渐增大并伴有新裂缝产生。当达到极限荷载时,主裂缝生成,FRP 格栅和 ECC 基体相继被拉断,试件断裂破坏。

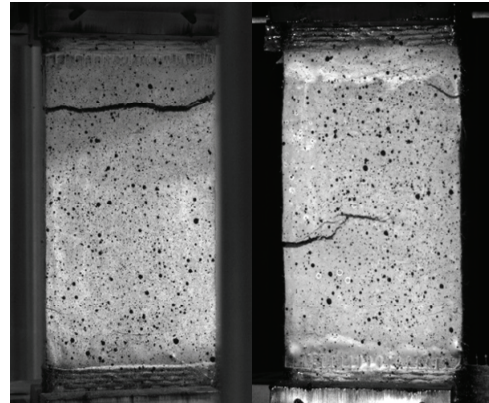


图 4 破坏形态  
Fig.4 Failure mode

### 2.2 位移和应变云图

图 5 列出了 FRP/ECC 复合材料试件在加卸载作用下的 DIC 轴向位移/应变发展云图。从图中可以看出,随着荷载的增加,两种试件的轴向变形沿着轴向力作用的方向均匀变化。当试件卸载时,DIC 设备清楚地记录了试件的残余变形,且残余变形随着卸载应力的增加而增大。

对比 CFRP/ECC 复合材料和 BFRP/ECC 复合材料试件的位移云图可知,两类试件的主要区别在于极限变形能力和残余变形方面。如图 5 所示,100% 极限拉应力  $\sigma_{tu}$  时,CFRP/ECC 复合材料和 BFRP/ECC 复合材料试件的轴向极限变形分别为 2.07mm 和 3.52mm,BFRP/ECC 复合材料试件的变形是 CFRP/ECC 复合材料试件的 1.7 倍,变形性能明显好于 CFRP/ECC 复合材料。CFRP/ECC 复合材料试件从 30%  $\sigma_{tu}$ 、50%  $\sigma_{tu}$  和 70%  $\sigma_{tu}$  卸载至零时的残余变形分别为卸载点对应变形的 54%、58% 和 54%,而 BFRP/ECC 复合材料试件从 30%  $\sigma_{tu}$ 、50%  $\sigma_{tu}$  和 70%  $\sigma_{tu}$  卸载至零时的残余变形分别为卸载点对应变形的 41%、38% 和 38%。随着拉伸应力的增加,两类复合材料残余变形与卸载点对应变形的比值均比较稳定,且前者的比值相对后者略大。由此可知,BFRP/ECC 复合材料的变形恢复能力要优于



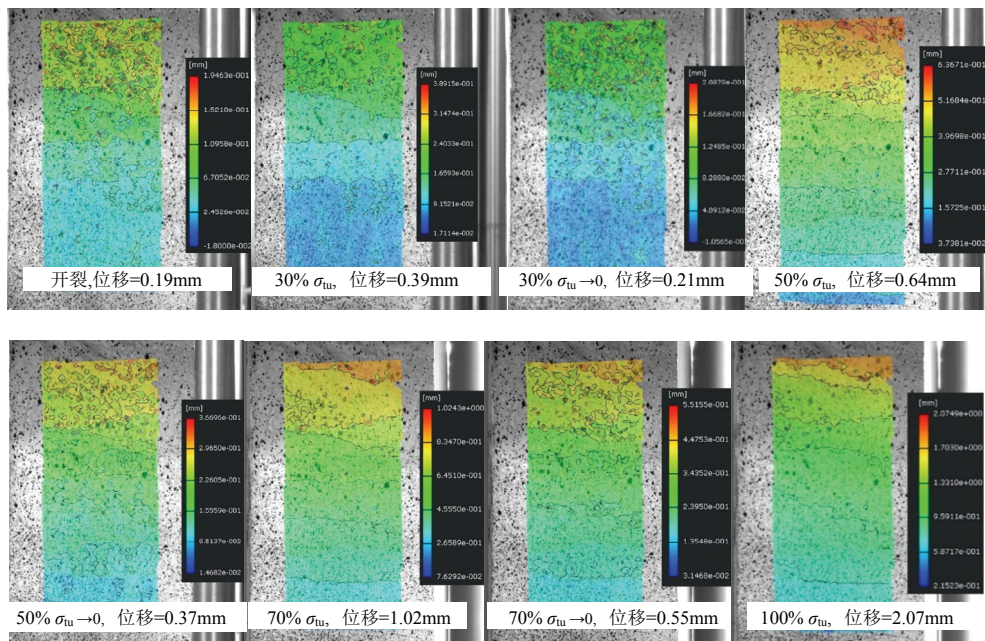
CFRP/ECC 复合材料的变形恢复能力。

图 5 (b) 和图 5 (d) 记录了试件的应变云图, 从图中可以看出试件在加载过程中的初始裂缝、裂缝位置以及在后继加卸载过程中的裂缝开展、闭合情况。需要指出的是, 由于 ECC 具有多点开裂特性, 应变云图记录的裂缝位置处实际有多条微裂缝产生, 因此若想记录每条微裂缝的萌生与发展, 需要使用性能更好的图片录制技术。

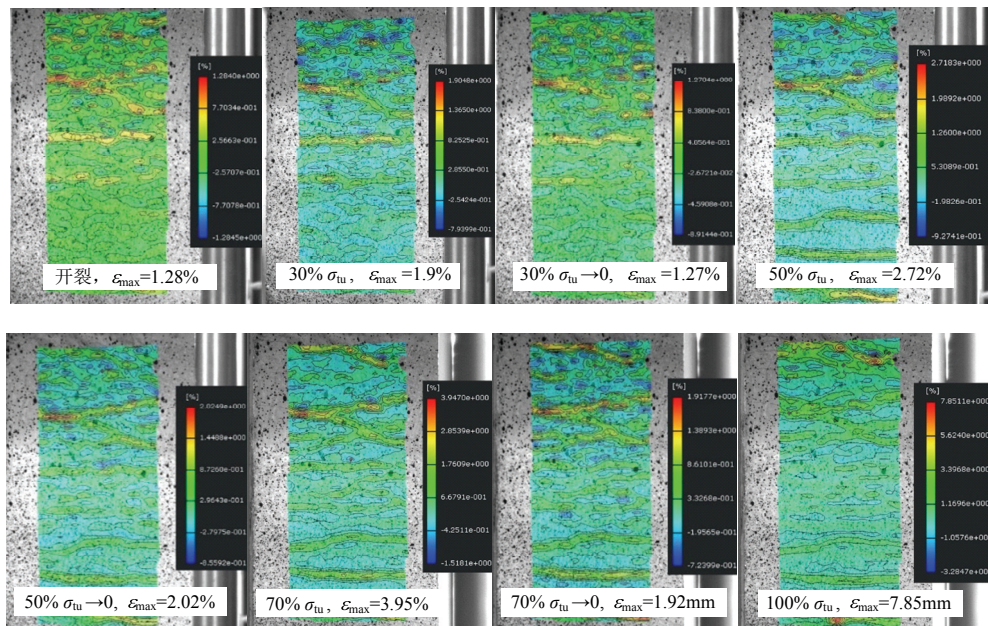
对比 CFRP/ECC 与 BFRP/ECC 两类试件可知, CFRP/ECC 试件的主裂缝宽度要小于 BFRP/ECC 试件, 且前者的裂缝分布相对后者较为均匀, 此外 BFRP/ECC 试件的主裂缝位置在加载过程中位于两

纵向格栅之间。原因之一在于 CFRP 格栅间距相对 BFRP 格栅较小, 在试件中分布比较均匀, 而 BFRP 格栅的间距由于较大, 造成试件局部裂缝宽度相对较大。

对于柔性 CFRP 格栅, 其高弹模限制了 ECC 基材的多裂缝开展, 从而弱化了 PVA 纤维的滑移强化特性。CFRP 格栅单根丝束截面面积小, 未进行充分初张拉, 当主裂缝开展到一定程度, 超过了单根丝束的抗拉强度后发生断裂, 从而导致复合材料的极限拉应变小于基材 ECC 的极限拉应变。对于硬质 BFRP 格栅, 弹性模量与基材 ECC 的弹性模量接近, 不会显著影响 ECC 的多裂缝开展现象。此外, 从图

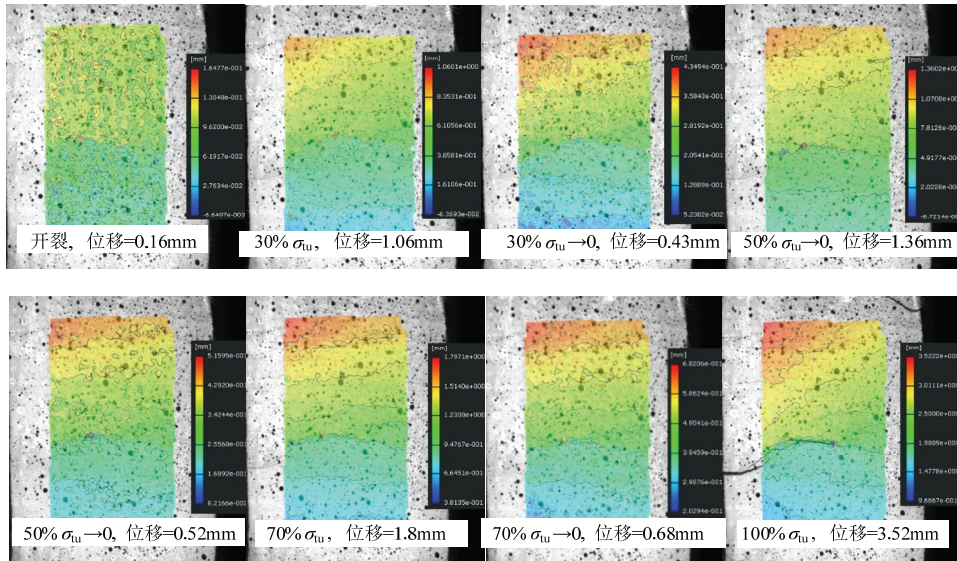


(a) CFRP/ECC 试件轴向位移发展云图

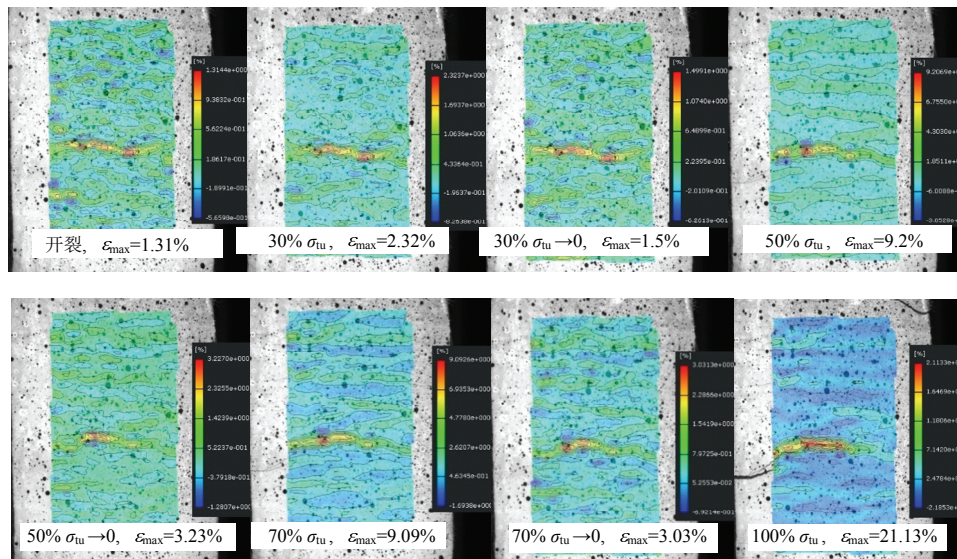


(b) CFRP/ECC 试件轴向应变变化云图





(c) BFRP/ECC 试件轴向位移变化云图



(d) BFRP/ECC 试件轴向应变变化云图

图 5 DIC 观测云图

Fig.5 Contours measured by DIC

5 (b) 和图 5 (d) 的应变云图变化可知, BFRP/ECC 试件在  $50\% \sigma_{tu}$  应力条件下的主裂缝宽度要大于 CFRP/ECC 试件在  $100\% \sigma_{tu}$  应力条件下的主裂缝宽度, 表明 BFRP 格栅仍然能为试件提供有效的桥连作用, 进而保证主裂缝不继续开展的情况下, 其余裂缝继续开展或产生新的裂缝, 从而试件整体拉伸应变能够持续提升直至格栅断裂。

### 2.3 应力-应变曲线

图 6 列出了不同反复荷载下 CFRP/ECC 和 BFRP/ECC 复合材料部分试件的轴向应力-应变曲线以及应变片与 DIC 观测的数据对比 (由于应变片测量应变为应变片长度范围内的平均应变, 因此

DIC 观测数据也采用相应长度范围内的平均应变)。对于 CFRP/ECC 复合材料试件, 随着 CFRP 网格层数的增加, 轴向拉应力显著增大, 应力和应变表现出更加明显的强化效应, 随之极限应力也得到大幅度提升。BC2 和 BC3 组试件的极限拉应力分别相对于基材 ECC 提高了 108% 和 166%。然而 DIC 应变观测数据显示, CFRP/ECC 复合材料试件的极限拉应变均小于 ECC 基材本身的极限拉应变。由图 6 可知, 两种反复荷载作用下的 BFRP/ECC 复合材料试件的极限拉伸应变基本相同, 均大于 2%, 且大于 ECC 基材的极限拉伸应变, 接近 BFRP 格栅材料的极限拉应变。在两种反复荷载作用下, BFRP/ECC

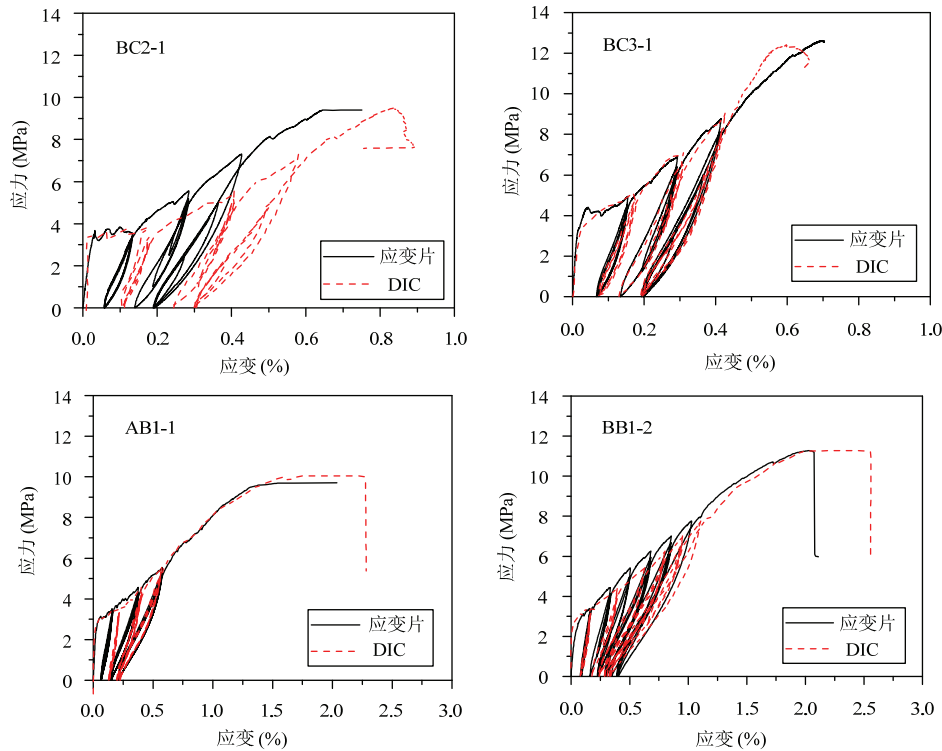


图 6 FRP/CC 复合材料应力-应变关系图  
Fig.6 Stress-strain curves of FRP/CC composite

复合材料试件的极限拉应力均有所提高，如 AB 组和 BB 组试件的极限应力相对基体 ECC 分别提高了 120%和 132%。

对比 DIC 数据与应变片实测数据可知，两者有基本相同的包络曲线且有相似的加卸载路径曲线，主要区别在于卸载点的应变以及残余应变值有所不同，DIC 的观测数据要略大于应变片的实测数据，稳定性要比应变片采集有一定的差距，与镜头的精度以及散斑质量有很大的关系。已有试验结果<sup>[7-8,10]</sup>表明应变片数据的外包络曲线在单调和反复荷载下一致，因此在建立本构关系模型时，当应变片与 DIC 的外包络线数据差距较大时，统一采用应变片数据。对于加卸载模型，由图 5，图 6 以及 2.2 节的分析可知，虽然 DIC 与应变片数据在卸载应变存在差距，但卸载应变与残余应变的关系均较稳定，因此在建立加卸载关系时，DIC 数据与应变片数据均作为参考。

## 2.4 应力-应变模型

### 2.4.1 外包络线

文献[7]和文献[8]提出了 BFRP/ECC 复合材料以及 CFRP/ECC 复合材料在轴向受拉状态下的本构关系模型。两种复合材料外包络线的应力-应变关系均包括弹性阶段 I、刚度软化阶段 II 和应变强化阶

段 III，相应的计算公式式 (1)、式 (2) 所示，计算公式中的参数详见表 4。两者的主要区别在于刚度软化阶段与应变强化阶段是否有平滑过渡阶段。CFRP 柔性格栅由于未进行充分初张拉，当 ECC 基体开裂后，相应界面处仅有部分丝束立刻发挥作用，剩余丝束需要裂缝开展到一定阶段后才能发挥作用，由此导致刚度软化阶段的曲线斜率要小于应变强化阶段的曲线斜率。相对而言，BFRP 格栅与 ECC 共同工作性能良好，应力-应变曲线由弹性阶段到应变强化阶段过渡平滑，如图 7 所示。

$$\sigma_t = \frac{(E_1 - E_3)\epsilon_t}{\left[1 + \left(\frac{(E_1 - E_3)\epsilon_t}{f_0}\right)^n\right]^{\frac{1}{n}}} + E_3\epsilon_t \quad (1)$$

$$\sigma_t = \begin{cases} \frac{(E_1 - E_2)\epsilon_t}{\left[1 + \left(\frac{(E_1 - E_2)\epsilon_t}{f_0}\right)^{n_c}\right]^{\frac{1}{n_c}}} + E_2\epsilon_t & 0 < \epsilon_t \leq \epsilon_{ss} \\ \sigma_{ss} + E_3(\epsilon_t - \epsilon_{ss}) & \epsilon_{ss} < \epsilon_t \leq \epsilon_{tu} \end{cases} \quad (2)$$

式(1)对应 BFRP/ECC, 式(2)对应 CFRP/ECC。式中， $\sigma_t$  和  $\epsilon_t$  分别为轴向拉应力和应变； $\epsilon_{ss}$  和  $\epsilon_{tu}$  分别为刚度软化阶段结束点应变和极限拉应变； $f_0$  是相应阶段曲线斜率与 y 轴的交点 (图 7)； $E_1$ 、 $E_2$



和  $E_3$  分别对应弹性阶段、刚度软化阶段和应变强化阶段的割线模量； $n$  为刚度软化阶段的形状参数， $n=3$ 。弹性和刚度软化阶段结束点应变分别为  $\varepsilon_e=150\mu\varepsilon$ <sup>[7-8,10]</sup>和  $\varepsilon_{ss}=1000\mu\varepsilon$ <sup>[8]</sup>。两中格栅增强的 ECC 复合材料受拉本构关系模型包络曲线主要区别在于应变强化阶段割线模量  $E_3$  以及极限拉应变  $\varepsilon_{tu}$  不同。由表 3 可知，割线模量  $E_3$  与格栅的弹性模量和配置率有关，由相关系数  $\alpha$  确定。对于极限拉伸应变  $\varepsilon_{tu}$ ，仅与 FRP 格栅材料的极限拉应变有关，按照表 3 的取值确定。

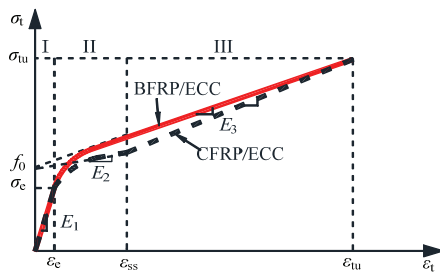


图 7 轴向受拉 FRP/ECC 复合材料应力-应变模型

Fig.7 Uniaxial tensile stress-strain model of FRP/ECC composite

表 3 模型计算参数

Table 3 Calculation parameters of the existing model

参数	BFRP/ECC <sup>[7]</sup>	CFRP/ECC <sup>[8]</sup>
$E_1$	$E_1=E_f \rho_f + E_m \rho_m$	
$E_2$	$E_2=E_3=1.30E_f \rho_f$	$E_2=0.25E_f \rho_f$
$E_3$	$E_3=\alpha E_f \rho_f = 1.30E_f \rho_f$	$E_3=0.50E_f \rho_f$
$f_0$	$f_0=3.64-0.0022(E_f \rho_f)/(E_1 \varepsilon_e)$	$f_0=1.35E_1 \varepsilon_e$
$\varepsilon_{tu}$	$\varepsilon_{tu}=0.8\varepsilon_{tu}$	$\varepsilon_{tu}=0.52\varepsilon_{tu}$

注： $E_f$ 、 $E_m$  和  $\rho_f$ 、 $\rho_m$  分别为复合材料中 FRP 格栅以及 ECC 基材的弹性模量和配置率； $\varepsilon_{tu}$  为格栅极限拉应变。

### 2.4.2 加卸载法则

Yassin 在 1994 年提出反复荷载作用下的混凝土本构关系模型<sup>[16]</sup>，采用如图 8 所示的  $R$  点作为加卸载法则的关键点，从而可以很方便地确定加卸载曲线斜率。2016 年 Wu 将此模型与 ECC 反复本构模型结合，分别给出了 ECC 反复拉、压本构关系模型<sup>[17]</sup>。本文结合已有试验结果，引入  $R$  点对文献[8, 10]的 FRP/ECC 复合材料反复受拉本构模型进行修正，提出适用于两种复合材料的反复受拉本构关系模型。

图 8 为 FRP/ECC 复合材料反复受拉本构关系模型示意图。 $OAB$  为包络线， $AD'D$  段为完全卸载阶段，卸载点  $A$  是包络线  $OAB$  上一点， $D$  点为残余应

变点； $DA'E$  段为完全再加载阶段； $EF$  段为完全再加载曲线与外包络线的衔接段<sup>[8,10]</sup>； $C$  点为从峰值点  $B$  点卸载时的残余应变点； $\sigma_{un}$ 、 $\varepsilon_{un}$  分别为点  $A$  的应力和应变； $\varepsilon_{pl}$ 、 $\varepsilon_{pl,tu}$  分别为点  $D$  和点  $C$  的残余应变； $E_{un}$  为直线段  $AD$  的斜率； $E_{un,pl}$  为卸载曲线  $AD'D$  卸载至应力为零时过  $D$  点的斜率（图 8）； $E'_1$  和  $E_{re}$  分别再加载曲线  $DA'E$  过  $D$  点和  $E$  点的斜率（图 8）； $f'_0$  为再加载曲线  $DA'E$  过  $E$  点的切线与  $\sigma'_t$  轴的交点； $R$  点为虚拟线段  $AD$ 、 $BC$  的延长线与包络线弹性阶段反向延长线的交点； $\sigma_{tr}$  和  $\varepsilon_{tr}$  分别为  $R$  点的应力和应变。

需要指出的是，本文认为完全再加载阶段  $DA'E$  的曲线形式与外包络线形式一致，均采用式（1）计算。 $E$  点的应变与卸载点  $A$  的应变相同， $E$  点的应力相对  $A$  点的应力有所降低，用衰减系数  $\phi$  表示<sup>[8,10]</sup>。

#### （1）完全卸载曲线

图 9 列出了文献[8, 10]及本文所有试件的残余应变  $\varepsilon_{pl}$  与卸载点应变  $\varepsilon_{un}$  的关系。图中 C1 和 B1 分别表示一层 CFRP 格栅、BFRP 格栅与 ECC 复合的试件，其他标志以此类推。从图中可以看出，残余应变与卸载点应变具有线性相关性，即：

$$\varepsilon_{pl} = \beta \cdot \varepsilon_{un} \quad (3)$$

式中： $\beta$  为材料系数。

文献[8, 10]对不同层数的 CFRP 格栅和 BFRP 格栅与 ECC 复合的试件进行了试验，提出了系数  $\beta$  与内部格栅配置率的关系，即  $\beta=a \cdot E_f \rho_f + b$ 。将本次试验结果与其进行对比可知：当采用相同配置率的同种 CFRP 格栅时，本次试验所得相关系数  $\beta$  与文献[8]相同（图 9（a））；然而当采用不同弹性模量、不同配置率的 BFRP 格栅（本文弹性模量为 37.4GPa，单筋截面积为 14.1mm<sup>2</sup>；文献[10]弹性模量为 24.4GPa，单筋截面积为 4.9mm<sup>2</sup>）时，BFRP/ECC 复合材料试件的残余应变与卸载点应变的相关系数  $\beta$  不变，均为 0.38，与格栅配置率无关（图 9（b））。

因此，本文建议残余应变均用图 9 中公式进行计算，不再以格栅配置率为参量。

由图 8 可知，卸载曲线  $AD'D$  为一条非线性曲线。卸载曲线上过  $D$  点的斜率  $E_{pl}^{un}$  控制着卸载曲线应力-应变关系。对试验结果进行分析，本文认为  $E_{pl}^{un}$  与  $E_{un}$  具有线性相关性（图 10），即：

$$E_{pl}^{un} = \gamma E_{un} = \begin{cases} 0.45E_{un} & \text{CFRP/ECC} \\ 0.65E_{un} & \text{BFRP/ECC} \end{cases} \quad (4)$$

$$E_{un} = \sigma_{un} / (\varepsilon_{un} - \varepsilon_{pl}) \quad (5)$$



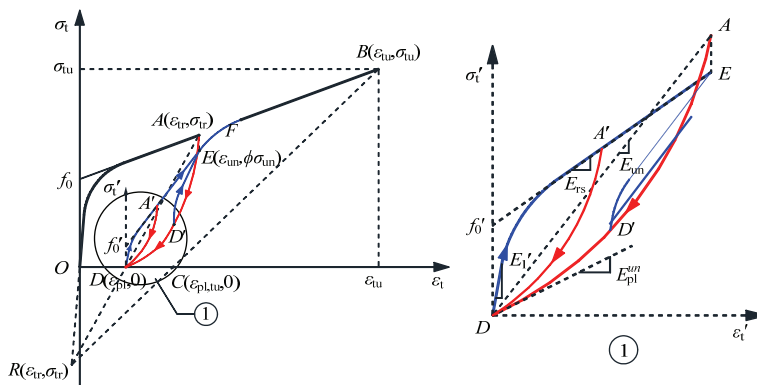
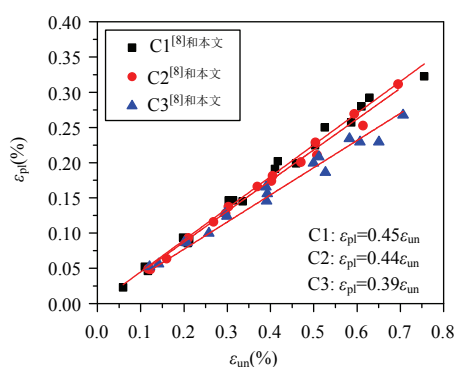
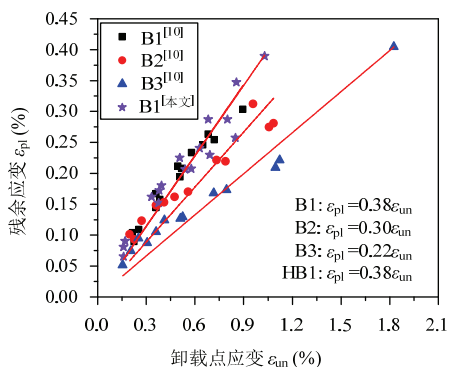


图 8 FRP/ECC 反复荷载本构关系模型

Fig.8 Cyclic constitutive model of FRP/ECC



(a) CFRP/EC



(b) BFRP/ECC

图 9 残余应变与卸载点应变的关系

Fig.9 Relationship between residual plastic strain and unloading strain

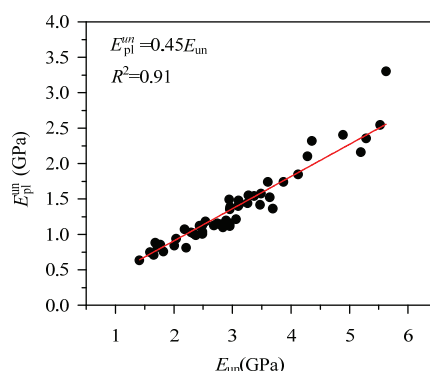
(2) 完全再加载曲线

本文采用包络线表达式计算上升段曲线 (图 8 中 DA'E 段), 假定再加载阶段的初始斜率与包络线初始斜率相同, 即  $E'_1 = E_1$ ; 其他参数按照下式计算:

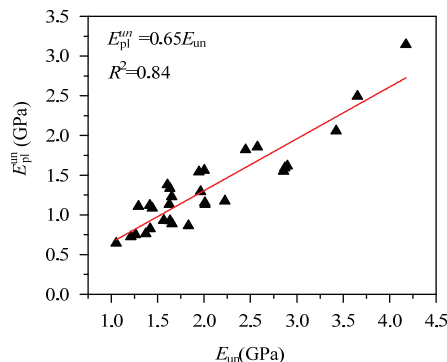
$$f'_0 = \phi_n \sigma_{un} - E_{re} (\epsilon_{un} - \epsilon_{pl}) \quad (6)$$

$$E_{re} = 0.85 E_{un} = 0.85 \sigma_{un} / (\epsilon_{un} - \epsilon_{pl}) \quad (7)$$

完全加载至 E 点后, 曲线以抛物线的形式与外包络线相交。相应计算公式详见文献[8, 10]。



(a) CFRP/ECC



(b) BFRP/ECC

图 10  $E_{pl}^{um}$  与  $E_{un}$  的关系曲线

Fig.10 Relationship between  $E_{pl}^{um}$  and  $E_{un}$

(3) 部分加卸载曲线

如图 8 所示, 加卸载包含部分加载 (加载至 A' 点便卸载) 及部分卸载 (卸载至 D' 点再次加载) 的情况。部分加载时, 认为残余应变不变, 过 D 点的曲线斜率按照下式计算:

$$E_{pl}^{um} = \gamma E_{un} = \gamma [\sigma'_{un} / (\epsilon'_{un} - \epsilon_{pl})] \quad (8)$$

式中:  $\sigma'_{un}$  和  $\epsilon'_{un}$  分别为点 A' 的应力和应变。

部分卸载时, 相应参数按照下式计算:

$$f'_0 = \phi_n \sigma_{un} - \sigma'_{pl} - E_{re}(\varepsilon_{un} - \varepsilon'_{pl}) \quad (9)$$

$$E_{re} = 0.85E_{un} = 0.85(\sigma_{un} - \sigma'_{pl}) / (\varepsilon_{un} - \varepsilon'_{pl}) \quad (10)$$

式中： $\sigma'_{pl}$  和  $\varepsilon'_{pl}$  分别为点  $D'$  的应力和应变。

#### 2.4.3 模型-试验对比

图 11 给出了本文建议的应力-应变关系模型与试验结果的比较,限于篇幅,本文仅给出了采用 DIC 设备观测的试件。表 1 中给出了预测的极限应力和

应变值与试验结果的比较。从中可以看出,建议的应力-应变关系模型与试验结果吻合较好,极限应力的预测值/试验值的平均值、均方差和变异系数分别是 1.08、0.05 和 5%,极限应变的预测值/试验值的平均值、均方差和变异系数分别是 0.97、0.09 和 9%,表明本文建议的应力-应变关系模型可以有效地预测 FRP/ECC 复合材料的反复受拉本构关系。

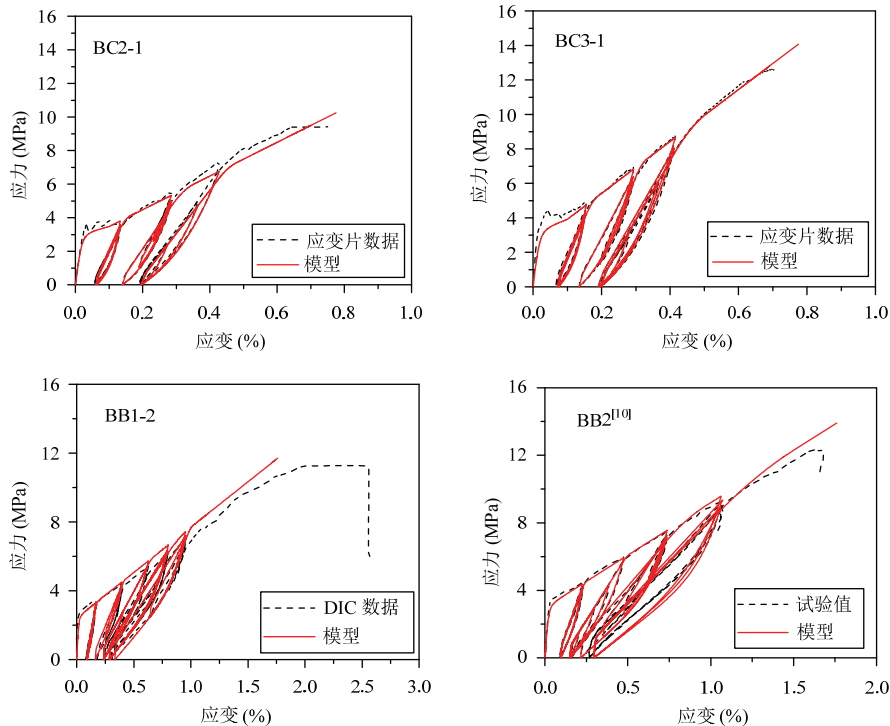


图 11 FRP/ECC 复合材料轴向受拉模型-试验对比图

Fig.11 Comparison of the predicted results from axially tensile model of FRP/ECC composite material and test results

### 3 结论

(1) 采用 FRP 格栅与 ECC 复合,两者共同工作性好,能有效利用 ECC 基体的高延伸性和多点开裂及 FRP 格栅的高强特性,可以获得延性好、强度高的复合材料,提高复合材料的极限抗拉强度。

(2) FRP/ECC 复合材料试件的破坏模式为 FRP 格栅和 ECC 基体断裂。不同循环加载方式对 FRP/ECC 复合材料试件的加卸载路径有显著影响,但其极限应力/应变的影响较小。BFRP/ECC 复合材料的变形恢复能力要优于 CFRP/ECC 复合材料的变形恢复能力。

(3) 使用 DIC 观测设备,可以有效地观测到试件的开裂状况及破坏形态,全程记录裂缝的萌生、发展过程,获得应力-应变关系全曲线,测试结果稳定性良好。

(4) 建议的 FRP/ECC 复合材料反复受拉本构关系模型与试验结果吻合较好,可以有效地预测预测 FRP/ECC 复合材料反复受拉本构关系。

#### 参考文献

- [1] D'Antino T, Papanicolaou C. Mechanical characterization of textile reinforced inorganic-matrix composites [J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 127: 78-91
- [2] El-Maaddawy T, El Refai A. Innovative repair of severely corroded T-Beams using fabric-reinforced cementitious matrix [J]. Journal of Composites for Construction, 2016, 20(3): 04015073
- [3] Ding Z, Dai J, Muner S. Study on an improved phosphate cement binder for the development of fiber-reinforced inorganic polymer composites [J]. Polymers, 2014, 6(11): 2819-2831
- [4] 徐世焯, 尹世平, 蔡新华. 纤维编织网增强混凝土加固钢筋混凝土梁受弯性能研究[J]. 土木工程学报, (下转第 55 页)

(下转第 55 页)