

CFRP 布/树脂胶复合条带的抗拉力学性能^{*}

郑康, 陈力, 方秦, 高飞

(解放军理工大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏南京 210007)

摘要: 碳纤维聚合物(CFRP)编织布和环氧树脂胶已被广泛应用于工程结构的外贴抗爆加固。为了了解 CFRP 布/树脂胶复合成型材料的基本力学性能, 系统开展了标准复合条带试件的准静态拉伸力学试验, 得到了拉伸应力-应变全过程曲线, 并基于试验结果标定了有限元模型的关键材料参数。研究表明: CFRP 布/树脂胶复合成型材料呈现明显的弹脆性特点, 抗拉强度能够达到 4 100 MPa, 外贴树脂胶能够显著降低 CFRP 布力学性能指标的离散性, 保证 CFRP 布材料特性的充分发挥; 初始树脂粘贴缺陷对条带试件的破坏形态和抗拉性能有显著影响, 外贴树脂胶的施工均匀度对加固工程结构的抗爆性能至关重要。

关键词: 碳纤维聚合物; 树脂胶; 应力-应变全曲线; 拉伸试验

中图分类号: O347; TB332

文献标志码: A

doi: 10.11858/gywlxb.2017.06.015

1 引言

碳纤维聚合物(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)是一种轻质高强的新型复合材料, 广泛应用于汽车、航天、船舶等制造领域。由于 CFRP 编织布的基本力学性能优异, 可加工性强, 目前其应用已逐渐延伸至结构加固领域, 用于增强已有工程结构抵抗地震、爆炸和冲击等强动载作用的能力。作为结构的外贴加固层, 外贴 CFRP 布可以显著改善梁的抗弯能力^[1-3], 提高板的整体性^[4-5], 增强钢筋混凝土约束柱的轴向承载力^[6-8], 同时可以减少建筑物在爆炸冲击荷载作用下的碎片飞散^[9-10]。

通常情况下, CFRP 编织布需要通过环氧树脂胶粘贴于结构构件上进行加固, 加固结构受荷变形时, CFRP 布与树脂胶协同作用。因此, 对于加固结构, CFRP 布/树脂胶可以看作一种新的复合结构材料, 其力学特性对构件的加固性能有显著影响。Zhang 等^[11]通过实验发现, CFRP 薄板在应变率小于 50 s^{-1} 的情况下, 其力学性能与准静态情况下差别不大, 只有在应变率大于 50 s^{-1} 情况下其各方面力学性能才是应变率相关的。Ou 等^[12]研究了中等应变率和不同温度情况下 CFRP 材料的力学性能和破坏特点, 发现温度对 CFRP 材料的力学性能均有重要影响, 但是应变率对 CFRP 的破坏模式影响不大。Hou 等^[13]对 CFRP 条带进行拉伸、压缩、剪切试验发现: 当纤维与荷载方向呈 0° 或者 90° 时, CFRP 条带表现出线弹性性质; 而当纤维与荷载方向呈 45° 时, 拉伸试验得到的应力-应变关系呈非线性。由于爆炸或冲击荷载的局部作用特性, 结构构件的平均材料应变率一般不会超过 $50 \sim 100 \text{ s}^{-1}$, 因此, 准确测量 CFRP 布/树脂胶复合条带在准静态拉伸情况下的应力-应变全过程曲线, 对于研究 CFRP 布加固结构的抗爆性能具有十分重要的意义。

目前, 虽然已有一些针对 CFRP 材料力学性能的研究, 但这些文献表明, CFRP 材料的基本力学特

^{*} 收稿日期: 2017-01-11; 修回日期: 2017-04-03

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年基金(51622812); 国家重点基础研究发展计划课题(2015CB058003)

作者简介: 郑康(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事工程结构抗爆研究. E-mail: zhengkang1991@qq.com

通讯作者: 陈力(1982—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事工程结构抗爆研究. E-mail: chenli1360@qq.com

性与组成成分、编织方式、加工工艺、加载方式甚至环境温度及湿度都有关系,其基本力学性能十分离散^[14]。而且,现有研究成果也主要针对 CFRP 材料,而忽略了粘贴树脂与 CFRP 的协同作用特点。因此,亟待对 CFRP 布/树脂胶复合结构材料的力学特性开展系统研究。

本工作根据现有研究的不足,制备 CFRP 布/树脂胶复合条带试件,系统地开展准静态拉伸全过程试验。基于试验结果,讨论粘贴树脂初始缺陷对 CFRP 布力学性能和破坏模式的影响,并对有限元材料模型中适用于 CFRP 布/树脂胶复合材料的关键参数进行标定。

2 CFRP 布/树脂胶复合条带拉伸试验

2.1 试件制备

试验选用日本东丽公司生产的 UT70-30 型 CFRP 编织布和上海三悠化学有限公司生产的 L-500AS 型粘贴用环氧树脂胶。开始制备试件前,将环氧树脂胶均匀涂刷于 CFRP 编织布上,在实验室环境静置 7 d,等待树脂胶充分浸渍固化成型,如图 1(a)所示。将树脂胶固化成型的 CFRP 布裁剪为长 230 mm、宽 15 mm 的 CFRP 布/树脂胶复合条带试件,如图 1(b)所示。共制作 8 条试件,试件平均厚度为 0.5 mm,而 CFRP 编制布的厚度为 0.167 mm。

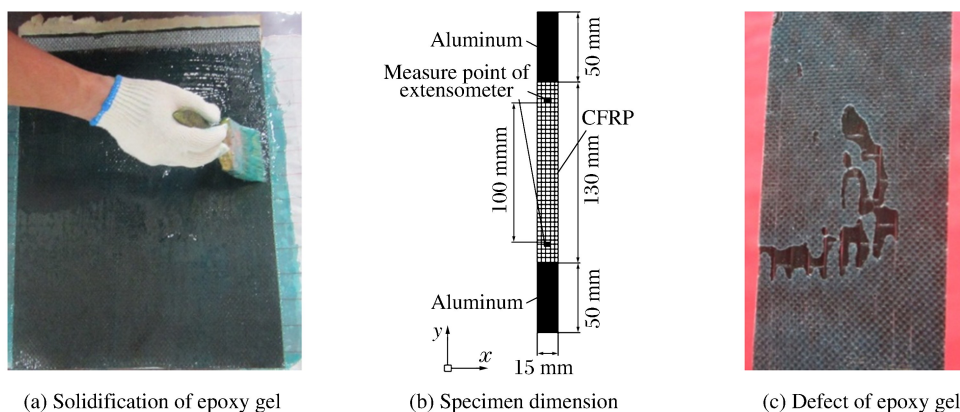


图 1 试件的制备过程

Fig. 1 Preparation of specimen

在树脂胶的固化成型过程中,由于树脂胶不均匀收缩等原因,在试件表面会出现部分胶体缺陷,如图 1(c)所示。在 8 条制作成型的试件中,有 1 个因胶体残缺较大予以剔除,其余试件依次编号为 C-I ~ C-VII,其中 C-I、C-V、C-VI 和 C-VII 试件仍存在小面积的胶体残缺现象,试件编号如图 2 所示。

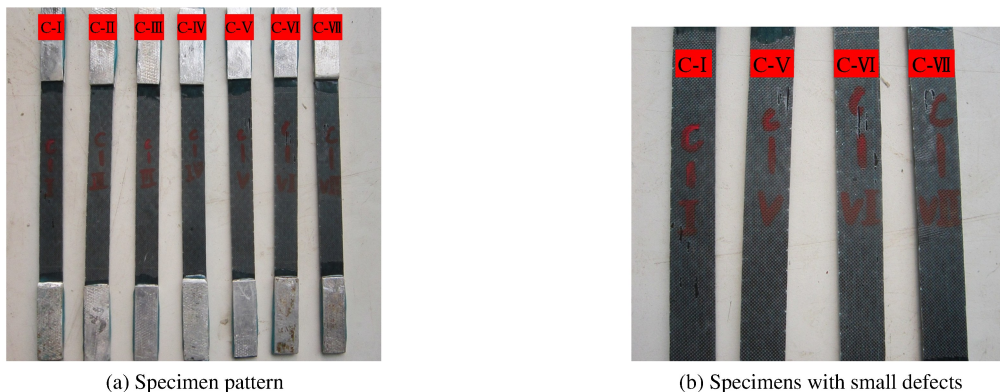


图 2 试件及编号

Fig. 2 Numbered specimens

为方便试验机拉伸时进行夹持,试件端部采用尺寸为 50 mm×15 mm 的铝片夹住并经树脂胶固化。为了防止试件端部在试验过程中出现应力集中,影响试验结果,对铝片的边缘进行了光滑打磨,如图 3 所示。其中,C-I 试件的铝片没有进行打磨,作为参照试件。



(a) Fixed end with aluminum

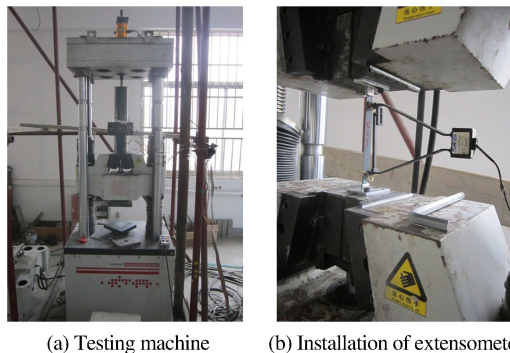
(b) Grinding of aluminum edge

图 3 试件端部铝片夹具(蓝色部分为树脂胶)

Fig. 3 Aluminum clamp on the specimen end (The blue part is epoxy gel)

2.2 加载装置和方法

为了能够准确得到拉伸应力-应变全过程曲线,拉伸试验选择在美国 MTS 公司生产的 SHT4106 型微型电液伺服试验机上进行,如图 4(a)所示。试验机的最大加载力为 1 000 kN,示值误差为 1%~5%,力加载速率范围为 0.2~20.0 kN/s。使用电阻应变片式引伸计测量试件的拉伸变形,引伸计的标距为 100 mm,量程为 10 mm,示值精度为 0.5%,引伸计安装如图 4(b)所示。为了保持试件的应变率恒定,加载方式采用位移控制,加载速率为 2 mm/min,数据采集时间间隔 1 s。当试件拉断后,试验机自动卸载,试验结束计算机停止采集并保存数据。



(a) Testing machine

(b) Installation of extensometer

图 4 试验装置

Fig. 4 Testing device

3 试验结果

3.1 破坏形态

试验初期,试件无明显变化,计算机记录的数据基本呈线性增大;试验末期,能够听到明显的断裂声,部分纤维束达到极限状态开始破坏,计算机记录的数据缓慢增大并逐渐趋于稳定;试件破坏时有巨大而短促的断裂声,试验机随之卸载,试验停止。若试件制作工艺良好,受力均匀,当到达极限状态时,同一截面处的纤维束应该同时断裂。而本试验中的试件破坏形态不尽相同,如图 5(a)~图 5(d)所示,主要包括 4 种:端部拉断、靠近中部拉断、中部拉断和“炸裂”破坏。由图 5(e)可见:C-I 试件从上端部与铝片连接处拉断;C-II、C-V 和 C-VII 试件在偏离中部接近位移计安装点处发生破坏;C-IV 试件的破坏形态最理想,在中部截面拉断;C-III 和 C-VI 试件呈“炸裂”的破坏形态。

3.2 应力-应变全曲线

通过试验记录得到加载时间 t 、荷载 P 、位移 s 等数据。CFRP 布/树脂胶复合材料的抗拉强度 f_t 、名义应变 ϵ 和弹性模量 E 通过(1)式~(3)式计算

$$f_t = P_u / A \quad (1)$$

$$\epsilon = s / l_0 \quad (2)$$

$$E = f_t / \epsilon \quad (3)$$

式中: P_u 为试验测得的峰值荷载; A 为 CFRP 的计算截面面积, $A = 15 \text{ mm} \times 0.167 \text{ mm} = 2.505 \text{ mm}^2$; l_0 为计算长度即标距, $l_0 = 100 \text{ mm}$ 。

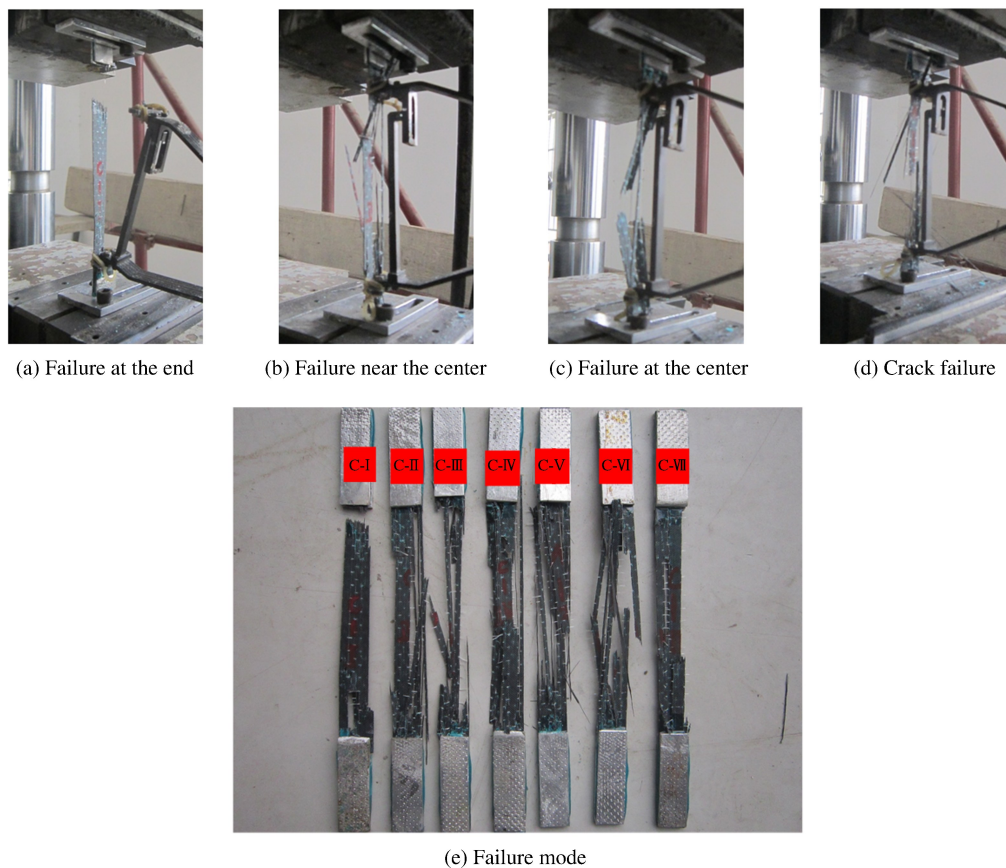


图 5 试验后试件的不同破坏形态

Fig. 5 Failure modes of specimens after test

图 6 为试验所得各试件的应力-应变全曲线,表 1 列出了计算出的抗拉强度(f_t)、弹性模量(E)、临界应变(ϵ_c)和临界延伸率(η_c)。通过去掉每组数据中的最大值和最小值,得到修正的均值及各数据与均值的误差。

从图 6 中可以看出,试验结果的离散度较低;CFRP 布/树脂胶复合材料基本呈现线弹脆性特点,当应变超过极限强度对应的临界应变后,试件发生局部断裂,应力迅速下降,继而完全断裂;当应变超过临界应变的 50%后,弹性模量略有增大趋势。C-IV 试件作为本试验中破坏形态最理想的试件,其抗拉强度、对应的临界应变和临界延伸率均接近均值 4 100.10 MPa、0.017 446 52 和 1.74%。CFRP 布/树脂胶复合材料的平均弹性模量高达 212.12 GPa,与普通钢筋相近,而抗拉强度则是普通钢筋的 20 倍。

从表 1 中可以看出:存在初始缺陷的 C-I、C-V、C-VI 和 C-VII 试件的抗拉强度均低于平均值,其中 C-VI 试件的抗拉强度只有均值的 91.34%;C-I、C-VI 和 C-VII 试件的临界应变也低于均值。对于破坏形态不理想的 C-III、C-VI 试件,其抗拉强度与均值误差最大,分别比均值大 9.63% 和小 8.66%。对于未打磨端部铝片的 C-I 试件,其临界应变最小,仅为均值的 91.85%。

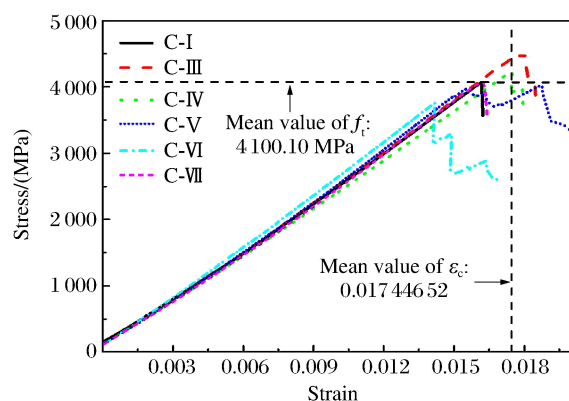


图 6 各试件的应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain relationship of specimens

表 1 拉伸试验结果
Table 1 Results of tensile test

Test No.	f_t /(MPa)	E /(GPa)	ϵ_c	η_c /(%)
C-I	4 070.57 (−0.96%)	202.26	0.016 233 83 (−8.15%)	1.62
C-II	—	—	—	—
C-III	4 506.13 (9.63%)	210.04	0.018 479 13 (4.55%)	1.84
C-IV	4 236.29 (3.07%)	205.77	0.017 956 60 (1.60%)	1.79
C-V	4 021.92 (−2.15%)	211.07	0.020 028 14 (13.32%)	2.00
C-VI	3 754.01 (−8.66%)	227.65	0.016 929 41 (−4.22%)	1.69
C-VII	4 071.60 (−0.94%)	215.95	0.016 420 93 (−7.09%)	1.64
Mean value	4 100.10	212.12	0.017 446 52	1.74

Note: (1) Data in the brackets are the relative error to the mean value;
(2) Test results for specimen C-II are not recorded due to technical error.

图 7 为各试件抗拉强度与均值强度的对比。从图 7 中可以看出:C-III 和 C-VI 试件与均值的误差较大,说明不理想的破坏形态对抗拉强度测量值有很大影响;C-I、C-V、C-VI 和 C-VII 试件的抗拉强度均低于平均值,除 C-VI 试件误差较大外,其余 3 个试件误差较小,说明试件上小面积的初始树脂胶缺陷对抗拉强度测量值影响不大。

图 8 为各试件抗拉强度对应的临界应变与均值临界应变的对比,其中,C-I、C-V 试件与均值的误差较大。C-I 试件由于没有对端部铝片进行打磨,导致应力集中现象明显,过早地断裂于引伸计测量范围之外,致使 CFRP 中部纤维束的应变没有达到极限,测量到的数据偏小。C-III 和 C-VI 试件虽然呈炸裂破坏,但对临界应变影响不大。

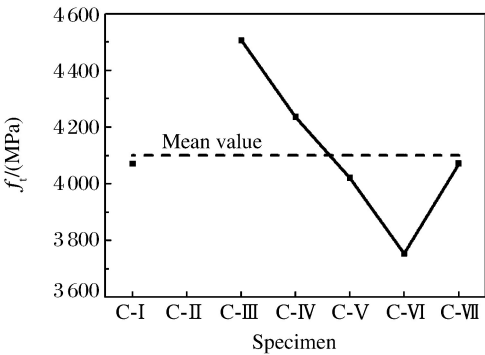


图 7 试件抗拉强度及其均值
Fig. 7 Tensile strength and its mean value

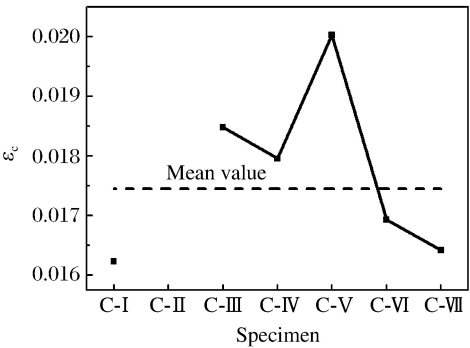


图 8 试件临界应变及其均值
Fig. 8 Critical strain and its mean value

表 2 列出了已有的针对 UT70-30 型 CFRP 材料的研究结果。结合表 1、表 2 可以看出,粘贴树脂胶与 CFRP 协同作用的复合条带比单纯 CFRP 材料的抗拉强度高。

表 2 CFRP 材料的力学参数
Table 2 Mechanical parameters of CFRP

Reference	CFRP type	f_t /(MPa)	E /(GPa)	ϵ_c
Ref. [15]	UT70-30	3 400	230.0	0.015
Ref. [16]	UT70-30	3 788	217.6	
Ref. [17]	UT70-30	3 550	235.0	
Ref. [18]	UT70-30	3 788	218.0	0.017

4 分析与讨论

4.1 力学指标的离散度

加固材料力学性能指标的离散程度关系到加固结构的安全可靠性。力学指标越离散,则加固结构的安全可靠性越低。本研究选择变差系数表征 CFRP 布/树脂胶复合材料力学性能的离散度。变差系数 V 是标准差相对于平均数大小的相对量,可以表达为

$$V = \sigma / \bar{X} \quad (4)$$

式中: σ 是标准差, $\bar{X}$ 是平均值。这个指标消除了不同水平的变量数列平均水平高低的影响,真正反映出不同水平的变量数列的相对离散程度。

通过计算得出,试验得到的 CFRP 布/树脂胶复合条带试件的抗拉强度变差系数为 5.53%,弹性模量变差系数为 3.84%,临界应变变差系数为 7.47%,延伸率变差系数为 7.46%。可以看出,采用树脂胶固化成型的 CFRP 布条带试件的抗拉强度、弹性模量、临界应变和延伸率等力学性能指标的变差系数均在 10% 以内,表明树脂胶能够优化 CFRP 布的受力分布特性,显著改善 CFRP 布抗拉性能的离散度,保证了 CFRP 布的力学特性在结构变形过程中充分发挥。

4.2 破坏位置

树脂胶初始缺陷对试件的破坏位置和破坏形态有重要影响。如图 9 所示,对于存在初始缺陷的 C-I、C-V、C-VI 和 C-VII 试件,其破坏位置与初始缺陷位置均基本一致。而根据表 1 得知,小范围的树脂胶初始缺陷对抗拉强度、临界应变等参数影响很小,基本可以忽略。若初始缺陷过大,则会对试件的性能产生较大影响。以上研究说明,外贴树脂胶的施工均匀度对提高加固工程结构的抗爆性能至关重要。



图 9 带缺陷试件在试验前、后的对比

Fig. 9 Comparison of specimens with defects before and after test

4.3 铝片打磨的影响

试验时,铝片夹具的边缘容易在试件上产生应力集中,使试件在端部提早发生破坏。如图 5(a)所示,C-I 试件的铝片端部边缘没有进行打磨,断裂面发生在端部,且测量结果也明显小于平均值。部分试件破坏后,端部铝片也因为应力集中而受力张开,如图 10 所示。试验结果表明,试件端部铝片的应力集中会影响试验测量结果,对铝片边缘棱角进行打磨有助于减小应力集中现象。

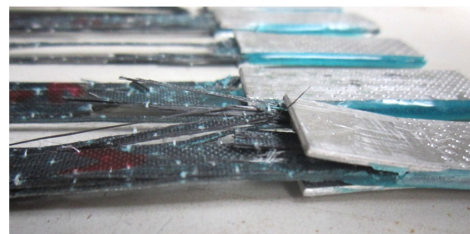


图 10 C-V 试件端部铝片的破坏

Fig. 10 Damage of aluminum clamp on the end (C-V)

5 树脂成型 CFRP 条带的有限元分析

为了能够准确预测 CFRP 布/树脂胶复合条带的力学性能,基于 LS-DYNA 平台建立了精细化的 1/2 有限元模型,其几何尺寸与试件一致,有限元模型如图 11 所示。

端部铝片采用 SOLID164 单元离散,尺寸为 0.5 mm,共划分 6 000 个单元,材料模型选用 MAT_PLASTIC_KINEMATIC。CFRP 布/树脂胶复合条带采用 SHELL163 单元,尺寸为 0.5 mm,共划分 3 450 个单元,材料模型为 MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE。该模型基于 Chang-Chang 失效准则评估材料的失效,考虑了材料的剪切应力-应变行为和应力损伤后的退化,并包含 4 种失效模式。使用该模型可以考虑 CFRP 布/树脂胶复合条带材料各向异性的特点,即 CFRP 布在沿纤维方向的抗拉强度远大于垂直纤维方向的强度。基于试验结果,抗拉强度、弹性模量和延伸率等参数标定为 $f_t=4\,100.1\text{ MPa}$, $E=212.12\text{ GPa}$, $\eta_c=1.74\%$;其余参数基于文献[19]。

计算得出的应力-应变全过程曲线如图 12 所示。从图 12 中可以看出,模拟计算的应力-应变全过程曲线与试验结果吻合较好,说明标定的关键参数可以较好地模拟 CFRP 布/树脂胶复合成型条带的性能。图 13 为数值模拟与试验破坏形态的对比,二者吻合较好,说明建立的精细化数值模型可以较好地反映试件的实际破坏形态。本研究标定的参数可以用于 CFRP 布/树脂胶复合成型条带以及 CFRP 加固钢筋混凝土结构进一步的变形和响应分析,适用于理论和数值分析方法。

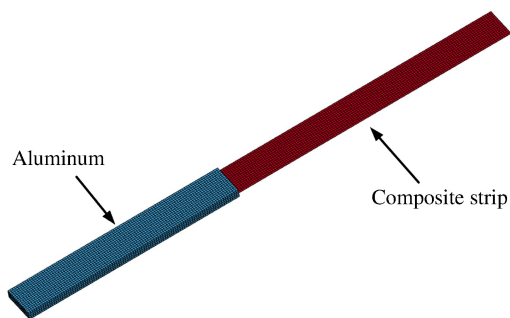


图 11 试件有限元模型
Fig. 11 Finite element model of specimen

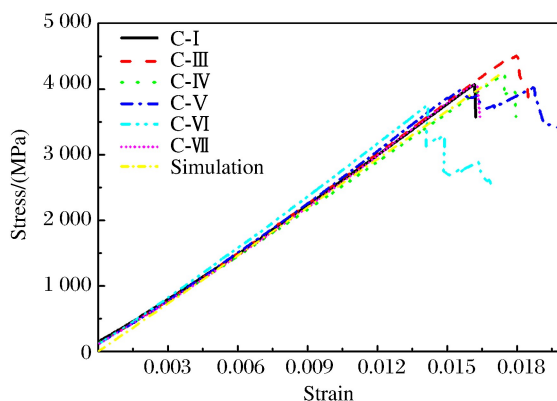


图 12 数值计算的应力-应变全曲线
Fig. 12 Stress-strain relationship in simulation

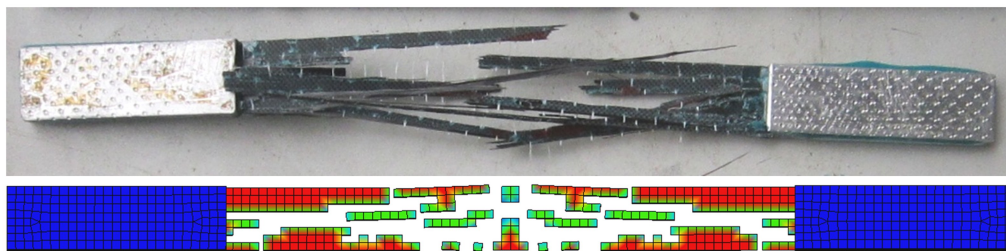


图 13 拉伸试验与数值模拟的破坏形态对比
Fig. 13 Comparison of failure mode in tensile test and simulation

6 结 论

现有 CFRP 外贴抗爆加固研究只单纯关注 CFRP 的材料性能,而忽略了协同作用的外贴树脂胶材料。针对相关研究的不足,系统开展了 CFRP 布/树脂胶复合成型条带试件的准静态拉伸力学试验,得到了拉伸应力-应变全过程曲线,并基于试验结果标定了有限元模型的关键材料参数,得到以下结论。

(1) 拉伸试验中 CFRP 布与树脂胶协同作用,CFRP 布/树脂胶复合成型材料呈现明显的弹脆性特点,抗拉强度能够达到 4 100.10 MPa,其对应的临界应变和临界延伸率分别为 0.017 446 52 和 1.74%,弹性模量高达 212.12 GPa。

(2) 树脂胶能够优化 CFRP 布的受力分布特性,显著改善 CFRP 布的抗拉力学性能指标的离散度。其抗拉强度、弹性模量、临界应变和延伸率等关键力学性能指标的变差系数均可控制在 10%以内,从而保证了 CFRP 布的力学特性在结构变形过程中充分发挥。

(3) 初始树脂粘贴缺陷对条带试件的破坏形态和抗拉性能有显著影响,试验过程中试件的破坏位置与初始缺陷位置基本一致,外贴树脂胶的施工均匀度对提高加固工程结构的抗爆性能至关重要。

(4) 端部的铝片夹具会导致试件端部的应力集中,严重影响试验测试结果,对铝片进行充分打磨有助于减小应力集中现象,保证试验精度。

References:

- [1] GAO P, GU X L, MOSALLAM A S. Flexural behavior of preloaded reinforced concrete beams strengthened by prestressed CFRP laminates [J]. *Compos Struct*, 2016, 157: 33-50.
- [2] KHELIFA M, CELZARD A, OUDJENE M, et al. Experimental and numerical analysis of CFRP-strengthened finger-jointed timber beams [J]. *Int J Adhes Adhes*, 2016, 68: 283-297.
- [3] AL CHAMI G, THÉRIAULT M, NEALE K W. Creep behavior of CFRP-strengthened reinforced concrete beams [J]. *Constr Build Mater*, 2009, 23(4): 1640-1652.
- [4] 徐 明, 姜岩宁, 陈忠范. 碳纤维加固钢筋混凝土板耐火性能试验研究 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2013, 33(3): 323-328.
XU M, JIANG Y N, CHEN Z F. Experimental study on reinforced concrete slabs strengthened with CFRP in fire [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2013, 33(3): 323-328.
- [5] FATHELBAB F A, RAMADAN M S, AL-TANTAWY A. Strengthening of RC bridge slabs using CFRP sheets [J]. *Alex Eng J*, 2014, 53(4): 843-854.
- [6] 徐玉野, 林燕卿, 杨清文, 等. CFRP 加固火灾后混凝土短柱抗震性能的试验研究 [J]. *工程力学*, 2014, 31(8): 92-100.
XU Y Y, LIN Y Q, YANG Q W, et al. Experimental study on seismic performance of concrete short columns after fire and strengthened with CFRP [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(8): 92-100.
- [7] 龚永智, 张继文. CFRP 筋增强混凝土偏心受压柱受力性能的试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2009, 42(10): 46-52.
GONG Y Z, ZHANG J W. Experimental study of reinforced concrete eccentric compression column with CFRP tendons [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 42(10): 46-52.
- [8] LI X, LIANG Y S, ZHAO Z H, et al. Low-cycle fatigue behavior of corroded and CFRP-wrapped reinforced concrete columns [J]. *Constr Build Mater*, 2015, 101: 902-917.
- [9] CHEN L, FANG Q, FAN J Y, et al. Responses of masonry infill walls retrofitted with CFRP, steel mesh and steel bars to blast loadings [J]. *Adv Struct Eng*, 2014, 17(6): 817-836.
- [10] CHEN L, FANG Q, JIANG C, et al. Response and damage level of confined masonry walls to blast [J]. *Disa Adv*, 2013, 6(S4): 380-394.
- [11] ZHANG X H, HAO H, SHI Y C, et al. Static and dynamic material properties of CFRP/epoxy laminates [J]. *Constr Build Mater*, 2016, 114: 638-649.
- [12] OU Y F, ZHU D J, ZHANG H A, et al. Mechanical properties and failure characteristics of CFRP under intermediate strain rates and varying temperatures [J]. *Compos B: Eng*, 2016, 95: 123-136.
- [13] HOU J P, RUIZ C. Measurement of the properties of woven CFRP T300/914 at different strain rates [J]. *Compos Sci Technol*, 2000, 60(15): 2829-2834.
- [14] PENG H, HAO H X, ZHANG J R, et al. Experimental investigation of the bond behavior of the interface between

- near-surface-mounted CFRP strips and concrete [J]. Constr Build Mater, 2015, 96: 11-19.
- [15] 祝明桥, 蒋伟中, 池绍进. 预应力混凝土箱梁 CFRP 应力增量全过程试验研究 [J]. 湘潭大学自然科学学报, 2011, 33(4): 38-44.
- ZHU M Q, JIANG W Z, CHI S J. Experimental study of full process of CFRP stress increment of prestressed concrete box girder [J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2011, 33(4): 38-44.
- [16] 曹 靖, 王建国, 完海鹰. CFRP 加固钢结构吊车梁疲劳有限元分析及应用 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2010, 33(1): 85-88.
- CAO J, WANG J G, WAN H Y. Finite element analysis of fatigue of steel crane beam structures reinforced with CFRP and its application [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2010, 33(1): 85-88.
- [17] 刘汉楚, 黄振华. 碳纤维布在加固设计中的应用 [J]. 科技资讯, 2007, 12: 43-44.
- LIU H C, HUANG Z H. Application of CFRP in strengthening design [J]. Science and Technology Information, 2007, 12: 43-44.
- [18] 刘 婷, 贾 彬, 卢 毅. CFRP 加固体积型缺陷钢板承载力的影响因素试验研究 [C]//第九届全国建设工程 FRP 应用学术交流会. 重庆, 2015: 89-92.
- LIU T, JIA B, LU Y. Experimental research of the influence factors on the bearing capacity of CFRP strengthening on the steel plate with non-planar flaw [C]//The 9th National Construction Engineering Application of FRP Academic Communication. Chongqing, 2015: 89-92.
- [19] MUTALIB A A, HAO H. Development of p - I diagrams for FRP strengthened RC columns [J]. Int J Impact Eng, 2011, 38: 290-304.

Tensile Properties of CFRP/Epoxy Gel Composite Strip

ZHENG Kang, CHEN Li, FANG Qin, GAO Fei

(State Key Laboratory of Disaster Prevention & Mitigation of Explosion & Impact,
PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) laminates and epoxy gels have been extensively applied to externally strengthen engineering structures to resist blast loading. In order to understand the mechanical properties of CFRP/epoxy gel composites, we carried out a series of quasi-static tensile tests and obtained the entire tensile stress-strain curve. Based on the test results, we calibrated the material parameters of the finite element model developed in LS-DYNA software. It is found that CFRP/epoxy gel composites exhibit an obvious elastic-brittle characteristic, and the mean value of the tensile strength obtained in the test is up to 4 100 MPa. Being externally attached with resin gel, the disadvantage of discrete characteristics of CFRP laminates was significantly improved, which makes the externally bonded CFRP fully effective. The initial defects of the pasted epoxy gels significantly affect the failure modes and tensile properties of the tested specimen, and the uniformity of the sprayed layer of epoxy gels is of great importance to improving the blast resistance of the retrofitted engineering structures.

Key words: carbon fiber reinforced polymer; resin gel; stress-strain entire curve; tensile test