

BFRP片材受拉力学性能测试及设计讨论

□ 许迪鑫 郑宏宇 秦 鹏 黄 琦

[摘 要] 通过测试四种不同层数BFRP片材的受拉性能, 分别对BFRP材料在混凝土构件加固中的利用率、承载力设计时BFRP材料强度的取值展开了讨论。试验结果表明, BFRP片材的抗拉强度在1533.5MPa~2090.0MPa之间, 且随着层数的增加而提高; 应力—应变曲线无明显的屈服点, 破坏模式属于脆性破坏。建议在BFRP增强混凝土构件承载力设计时考虑BFRP抗拉强度的折减。

[关键词] BFRP片材; 抗拉强度; 弹性模量; 断裂伸长率

1 引言

玄武岩纤维增强复合材料(Basalt Fiber Reinforced Polymer, BFRP)是以玄武岩作为原材料, 在高温(1500℃)下熔化, 通过拉拔制成的一种较新兴的纤维复合材料, 具有耐酸碱腐蚀性能优良、轻质高强、耐高温等特点^[1], 通常被用作结构加固补强的材料之一, 已在道路、桥梁、建筑和特种结构中应用较为广泛。近年来, 已有研究者对BFRP材料进行的受拉性能试验表明^[2], BFRP材料的受拉应力—应变关系呈直线, 没有屈服平台, 达到极限拉应变后发生断裂, 是一种典型的脆性材料。然而, 对于BFRP增强混凝土结构设计中BFRP材料的强度取值和利用率仍未有统一结论, 尚需更多试验数据积累。

为了全面了解BFRP材料的性能, 笔者对BFRP片材的受拉性能进行测试, 获取破坏形态、抗拉强度、弹性模量、断裂伸长率, 分别对BFRP材料在混凝土构件加固中的利用率、承载力设计时BFRP材料强度的取值展开讨论并给出建议, 为实际工程结构的设计和应用提供参考。

2 试验概况

本次测试所用的BFRP布由南京开博锐工程技术有限公司生产, 面密度为300g/m², 名义厚度为0.114mm。测试用的浸渍胶为KBR-Y01碳纤维复合材料浸渍粘贴胶, 由南京开博锐工程技术有限公司提供, 是一种A、B两组分改性环氧树脂类黏胶剂, 配比为助剂:

固化剂=2:1, 符合《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》(GB 50728—2011)中A级胶的技术指标要求。

2.1 BFRP片材拉伸试件设计和制作

BFRP片材试件的设计和制作参考规范^[3]进行, 以片材层数为变量, 试件的宽度为25mm, 测试段长度为150mm, 共制作4组试件, 每组5个。为了防止BFRP片材在拉伸测试时被夹具夹坏, 在试件两端粘贴2mm厚的铝片作为加强片, 为保证黏结效果, 铝片长度随层数的增加而相应增长。试件参数详见表1, 试件尺寸如图1所示。

表1 BFRP片材受拉测试试件参数

组号	层数 n	厚度 t /mm	宽度 b /mm	铝片长度 L /mm	数量 /个
T1	1	0.114	25	50	5
T2	2	0.228	25	100	5
T3	3	0.342	25	150	5
T4	4	0.456	25	150	5

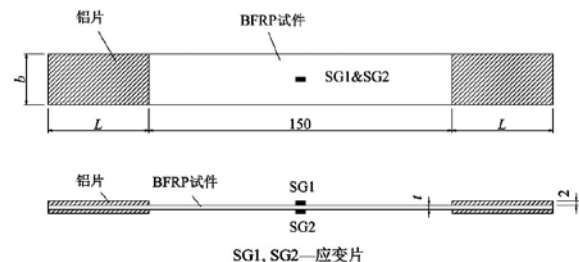


图1 BFRP片材受拉测试试件尺寸示意图

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51968004)。

[作者简介] 许迪鑫, 广西大学土木建筑工程学院, 硕士研究生。

郑宏宇(通讯作者), 广西大学土木建筑工程学院, 副教授, 博士。

秦 鹏, 广西大学土木建筑工程学院, 硕士研究生。

黄 琦, 广西大学土木建筑工程学院, 硕士研究生。

试件制作方法如下：先裁剪BFRP布，将浸渍树脂按照主剂：固化剂=2：1的比例混合，均匀涂刷在BFRP布两面上，待其充分浸润后，用塑料薄膜覆盖在BFRP布的两面，并用玻璃板压紧，静置2d。待浸渍树脂固化后，撤除玻璃板，得到光滑的BFRP板，再按所需尺寸裁剪成BFRP片材。最后将铝片通过浸渍树脂粘贴在片材两端，并使用502胶水在试件正面和背面中部各粘贴1个应变片。

2.2 测试设备及测试方法

本次测试采用单调静力加载，加载设备采用WAW-600型微机控制电液伺服万能试验机。测试开始前，将应变片与数据采集仪连接，然后将试件两端的铝片放入试验机夹头中，使被夹持试件的纵轴与拉伸方向对齐，确保试件竖直无扭曲，并拧紧夹头，完成试件的安装。正式加载采用位移控制的方法，加载速率为2mm/min，直至试件破坏后停止加载。试件的荷载—应变曲线、极限荷载等数据均由试验机配套的电脑采集系统自动采集。

3 测试结果及分析

3.1 测试现象及破坏形态

加载初期，试件表面无明显变化，部分试件会发出清脆的响声，这是由于环氧树脂开裂所致。当荷载接近极限荷载时，部分纤维丝先后被拉断，并发出比较大的响声，这是因为制作试件时胶水涂抹不均匀，应力集中在部分纤维丝上，造成这部分纤维丝先被拉断。当试件达到极限拉应变时，其余纤维丝几乎同时被拉断，试件破坏。

试件最终破坏形态如图2所示。由图可知，破坏时所有纤维丝均被拉断，由于应力集中现象的存在，断裂的位置各不相同，但均属于全截面拉断破坏，破坏呈脆性。

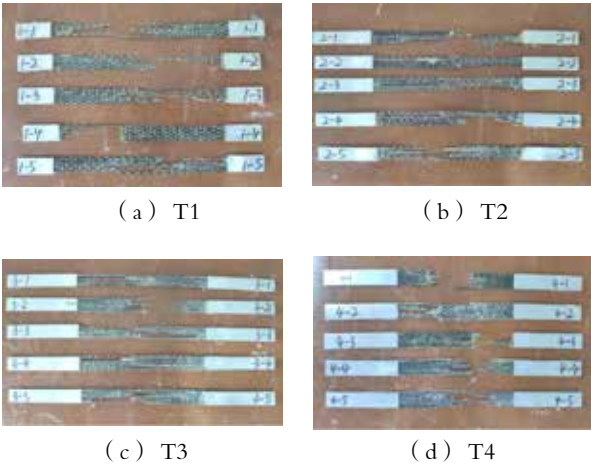


图2 BFRP片材受拉试件破坏形态

3.2 测试结果

测试获得的抗拉强度、受拉弹性模量和断裂伸长率见表2。

表2 BFRP片材受拉性能测试结果						
试件编号	层数 n	抗拉强度 f_s /MPa	抗拉强度平均值 $f_{s,m}$ /MPa	受拉弹性模量 E_s /GPa	受拉弹性模量平均值 $E_{s,m}$ /GPa	断裂伸长率 ϵ_{su} /%
T1-1	1	1642.5	1669.4 (86.973) [17.395]	81.4	88.3 (12.694) [2.539]	2.02
T1-2		1750.3		111.1		1.58
T1-3		1776.4		92.8		1.91
T1-4		1533.5		76.3		2.01
T1-5		1644.2		79.7		2.06
T2-1	2	1629.5	1713.8 (86.904) [17.381]	79.4	78.1 (5.769) [1.154]	2.05
T2-2		1635.4		70.1		2.33
T2-3		1849.9		81.1		2.28
T2-4		1780.2		86.5		2.06
T2-5		1674.1		73.5		2.28
T3-1	3	1568.7	1749.7 (134.641) [26.928]	67.0	74.8 (5.141) [1.028]	2.34
T3-2		1914.5		79.1		2.42
T3-3		1623.9		72.2		2.25
T3-4		1869.8		78.7		2.38
T3-5		1771.4		76.9		2.30
T4-1	4	1945.9	1835.6 (156.756) [31.351]	79.2	85.4 (7.285) [1.457]	2.46
T4-2		1691.5		86.8		1.95
T4-3		1746.9		84.1		2.08
T4-4		2090.0		98.6		2.12
T4-5		1703.9		78.4		2.17

注：1.表中“()”内的数值为标准差，“[]”内的数值为变异系数，数值取小数点后三位。
2.抗拉强度平均值按实验结果，数值取小数点后一位。
3.断裂伸长率平均值按实验结果，数值取小数点后二位。

3.3 抗拉强度

BFRP片材的抗拉强度平均值 $f_{s,m}$ 随层数 n 的变化情况如图3所示。

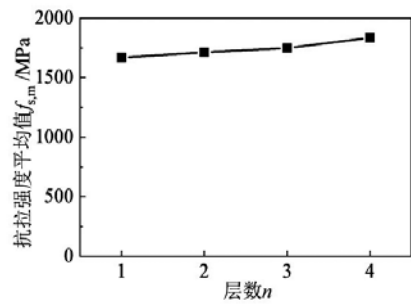


图3 四种不同BFRP片材层数的抗拉强度

由图3可以看出，BFRP片材的抗拉强度平均值随着层数的增加出现近似线性上升的趋势，2层、3层、4层的BFRP片材抗拉强度与1层相比分别提高2.66%、4.81%、9.96%，说明层数的增加对片材的抗拉强度有一定的提高作用，但提高度较小。

3.4 受拉应力—应变曲线

各试件的受拉应力—应变曲线如图4所示。

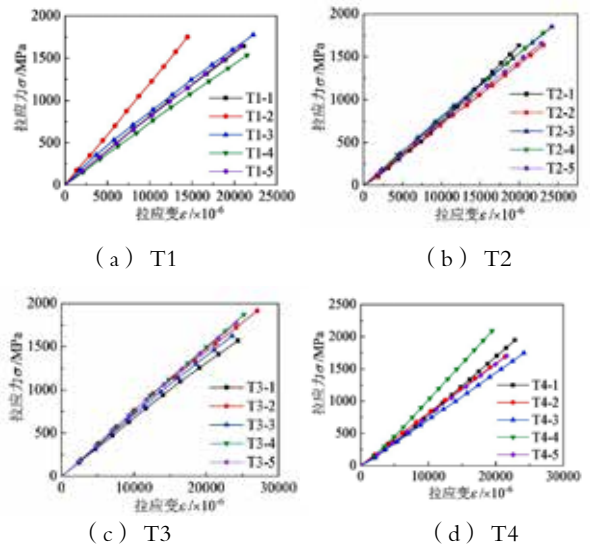


图4 BFRP片材受拉应力—应变曲线

由图4可知，BFRP片材的受拉应力—应变曲线均为线弹性，无屈服点，应力达到极限后试件瞬间失效，破坏表现为脆性。

3.5 受拉弹性模量

不同层数BFRP片材的受拉弹性模量平均值 $E_{s,m}$ 对比情况如图5所示。由图可以看出，BFRP片材的受拉弹性模量平均值随层数的增加出现先减小后增大的趋势，不同层数BFRP片材的拉伸弹性模量差异在18%以内，且与片材层数的关系无明显规律可循。

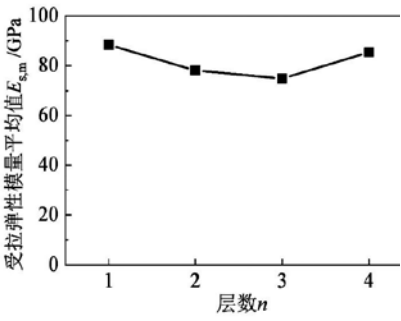


图5 四种不同 BFRP片材层数的弹性模量

3.6 断裂伸长率

BFRP片材达到抗拉强度时的应变称为断裂伸长率。不同层数BFRP片材的断裂伸长率平均值 $\epsilon_{su,m}$ 对比情况如图6所示。由图可知，BFRP片材的断裂伸长率平均值整体偏低，一方面是因为BFRP片材本身是脆性材料，另一方面是因为制作试件时涂刷的浸渍树脂固化后成脆性，两种材料组合起来使得整体的延性降低。

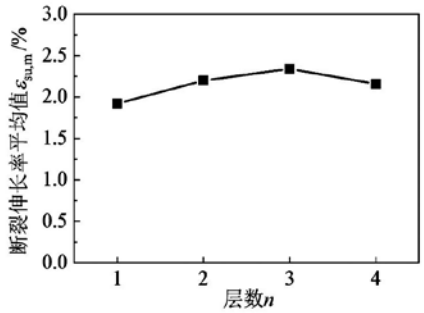


图6 四种不同 BFRP片材层数的断裂伸长率

4 讨论

4.1 BFRP加固混凝土构件的原理

目前BFRP加固的混凝土构件以柱子为主，通常采用全包^[4]或条带式间隔约束^[5]的方式进行加固。其原理为柱子在受压的同时会发生横向膨胀，使BFRP处于受拉状态，对柱子产生侧向约束力，在一定程度上限制其横向泊松变形，柱子由于处于三向受压的状态使得抗压承载力又能进一步提升。

4.2 BFRP在混凝土构件加固中的利用率

当BFRP用于混凝土构件加固时，由于混凝土表面存在缺陷和构件在受力的过程中会产生不均匀变形，易使BFRP局部出现应力集中而断裂较早，故构件破坏时，某些位置BFRP的应变可能未达到其极限应变^[6]，故存在BFRP的有效拉应变系数，即构件破坏时BFRP的应变与在材性实验时BFRP的断裂应变的比值，笔者称之为BFRP利用率。已有研究表明，不同构件中FRP利用率波动的幅度很大，在0.13~1.0之间^[7]。故BFRP在用于实际加固时，应采取有效措施减小其应力集中的可能性，提高BFRP的利用率。

4.3 承载力设计时对BFRP强度的取值

由于BFRP为线弹性本构材料，不存在屈服阶段，破坏时无预兆，若承载力设计时取BFRP的极限强度作为设计强度，将使构件偏于不安全，故应对BFRP的设计强度进行折减，以保证足够的可靠性。

5 结论和建议

(1) BFRP片材的破坏形态为全截面拉断破坏,受拉应力—应变曲线呈线性关系,无屈服点,达到峰值荷载后立即破坏失效,属于脆性破坏。

(2) BFRP片材的抗拉强度随层数的增加而增大,2层、3层、4层的抗拉强度与1层相比分别提高2.66%、4.81%、9.96%;受拉弹性模量和断裂伸长率与层数的关系不明显。

(3) 建议BFRP在用于实际加固时,应采取有效措施减小其应力集中的可能性,提高BFRP的利用率。在BFRP增强混凝土构件的承载力设计时应按BFRP的设计强度进行折减,以保证足够的可靠性。

[参考文献]

[1]安玉普.玄武岩纤维布(BFRP)加固钢筋混凝土圆形截面柱相关问题的研究[D].长春:吉林建筑大学,2014.

[2]武龙飞.BFRP约束损伤钢筋混凝土轴压力学性能研究[D].长沙:湖南大学,2018.

[3]ASTM D 3039/D 3039M-08,15.03.Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials[S].West Conshohocken,Pa,USA:2008b.

[4]马高,陈晓煌.BFRP约束损伤混凝土轴压试验与应力—应变关系[J].湖南大学学报(自然科学版),2020,47(1):36-44.

[5]任莉莉,王学志,张浩峰,等.包裹方式及条带间距对BFRP-PVC管自密实再生混凝土短柱力学性能的影响研究[J].玻璃钢/复合材料,2016(7):53-58.

[6]殷强.加固率和加固方式对碳纤维布条带约束型钢混凝土柱轴压性能的影响[D].合肥:合肥工业大学,2016.

[7]李玉鹏.碳纤维布约束混凝土柱受压性能试验研究及理论分析[D].上海:同济大学,2006.

(上接第57页)

4 结语

目前BIM技术正在国内外建筑行业中飞速发展,国内许多大型建筑项目开始应用BIM技术。BIM与CAD相比较,BIM更注重在施工设计中对图纸的整合和模拟施工过程,从而优化整个建筑项目,保障项目工期的进度^[4]。但是,国内的BIM技术还未普及,许多建筑项目面临着项目分散、人员工作移动性强、现场环境复杂等问题,严重制约了BIM信息化的推广应用;建筑工程项目如果要全程采用BIM技术,那么将要求使用者能够熟练操作使用设计、施工和运营等阶段的十多款相关软件^[5]。另外,BIM系统中还需要具备能够存储海量项目信息数据的能力。因此,BIM技术受国内软硬件环境的影响,现还停留在建筑设计的初步阶段。随着通信信息技术的快速发展,

BIM技术逐步完善,并最终将取代CAD技术,引领建筑行业进入智能建筑的时代。

[参考文献]

[1]张贇.从建筑信息模型(BIM)的角度思考建筑全生命周期的能耗管理[C]//中国科学技术协会,中国城市科学研究会.城市发展研究:国际绿色建筑与建筑节能大会论文集——S02:绿色智能化与数字技术.北京:中国城市科学研究会,2013:8.

[2]李勇,管昌生.基于BIM技术的工程项目信息管理模式与策略[J].工程管理学报,2012,26(4):17-21.

[3]许炳,朱海龙.我国建筑业BIM应用管理现状及影响机理研究[J].建筑经济,2015,36(3):10-14.

[4]程建华,王辉.项目管理中BIM技术的应用与推广[J].施工技术,2012,41(16):18-21+60.

[5]贺灵童.BIM在全球的应用现状[J].工程质量,2013,31(3):12-19.