

# BFRP筋受压力学性能试验及其对混凝土柱承载力贡献率分析

□ 江怀雁

**[摘要]** 为详细考察BFRP筋的受压力学性能，设计制作了3种直径共12个轴心的受压试件，测试BFRP筋单轴受压下的破坏模式、抗压强度、弹性模量、荷载—位移曲线，本文主要研究BFRP筋的受压性能和名义直径、破坏模式对其影响规律。试验结果表明，小长细比的BFRP筋受压破坏模式以斜向剪切错断为主，破坏模式对抗压强度、压缩弹性模量无明显影响规律；BFRP筋的拉、压力学性能差异大，抗压强度约为抗拉强度的（1/4~1/3），压缩弹性模量约为拉伸弹性模量的（1/2~4/5）；BFRP筋轴压破坏时的压缩变形率在1.32%以内，受压变形能力小；随名义直径增大，抗压强度、压缩弹性模量先略降后增大，压缩变形率总体呈降低趋势；纵向BFRP筋对轴心受压混凝土构件承载力的贡献率约为同条件纵向钢筋的1.1/3。

**[关键词]** BFRP筋；受压；抗压强度；弹性模量；变形率；贡献率

## 1 研究背景

玄武岩纤维增强复合筋（Basalt Fiber Reinforced Polymer Bar，简记为“BFRP筋”），是由玄武岩纤维和树脂基体通过拉挤工艺及表面处理制成的一种非金属复合筋材<sup>[1]</sup>。BFRP筋与CFRP、GFRP、AFRP等其他复合筋相似，也具有轻质高强、耐腐蚀、抗疲劳性能好等优点<sup>[2-4]</sup>，而其市场价格明显低于碳纤维复合筋（CFRP）。广西地处我国南部，广西北部湾沿海及其岛礁地区是我国与东盟各国经贸往来的重要通道，对我国南方地区经济发展和国防建设有重要意义。因沿海及海洋地区淡水和河砂资源普遍相对不足，对当地基础设施建设和经济发展构成制约，就地取材成为解决之道，在此背景下，采用海水拌养的原生海洋集料混凝土建造构筑物具有现实意义。但海水、海砂中富含氯离子、硫酸根离子，在海洋大气环境下对传统钢筋和钢材有强烈腐蚀作用，将大大缩短钢筋混凝土结构和钢结构的使用寿命，增加维护、加固或拆建成本。如将BFRP筋作为这类混凝土结构的增强筋，利用BFRP筋良好的耐碱、盐的材性优点，可从根本上克服钢筋锈蚀问题，保证海洋集料、海水拌养混凝土结构的耐久性。因节省了淡水提取、河砂运输等费用，还可带来明显的经济效益。

混凝土构件的增强筋首先应配置于截面的受拉区，让混凝土主要用于承压，但在截面受压区通常也应配置

增强筋，除可协助混凝土承压、提高承载力外，更可提高构件的延性，考虑到荷载作用具有随机性，梁或柱均可遇到弯矩变号和双向受弯的情形，因此截面周边一般均匀、对称配置增强筋，尤其是柱子等承压构件，其重要性高于梁、板，对结构承载能力、抗震性能起决定性作用。对于配置BFRP筋增强海水海砂混凝土柱，在轴心受压、小偏心受压和弯矩变号时，BFRP筋受压在所难免，因此研究BFRP筋的受压性能有重要学术和工程应用价值。

国内外学者对BFRP筋基本力学性能进行的测试结果表明<sup>[5-8]</sup>，BFRP筋单轴受拉和受压的应力—应变关系基本呈线弹性特征，无屈服平台，破坏呈脆性，但受筋材组分、生产工艺、测试方法等多方面因素的影响，不同学者给出的数据差异较大，在BFRP筋增强混凝土结构设计中，BFRP筋材的强度取值，特别是抗压强度及其对构件承载力的贡献率，仍不统一。部分学者认为FRP筋的抗压强度有限，弹性模量普遍偏小，建议不考虑受压FRP筋对构件承载力的贡献，但部分学者则提出了相反的建议。因此尚需更多试验数据的积累，以便确定BFRP筋增强海洋集料混凝土构件的设计方法和设计强度取值。

本文对一种国产BFRP筋的轴心受压性能进行测试，获取破坏模式、抗压强度、弹性模量、应力—应变曲线、压缩变形率，数据可为BFRP筋增强混凝土结构

的设计提供参考依据。

## 2 试验概况

### 2.1 筋材成分和外观尺寸

测试的BFRP筋采用由南京开博锐工程技术有限公司生产的绿博纤维复合筋系列，筋材名义直径分为8mm、10mm、12mm3种，玄武岩纤维体积分数均为70%，质量分数为85%，不同直径筋材分数在5%以内浮动，基体树脂类型为环氧树脂类。筋材表面做喷砂处理，通过挤压工艺形成螺旋弧形凹肋，凹肋间距均为10mm，直径8mm、10mm、12mm筋材的凹肋深度分别为0.5mm、0.6mm、0.8mm。

### 2.2 BFRP筋受压试件的设计和制作

BFRP筋作为混凝土结构增强筋时，被混凝土包裹，箍筋之间的混凝土可看作是BFRP筋的连续弹性侧向约束体，但混凝土保护层厚度较薄，易开裂，在接近混凝土抗压强度时，会发生脆性剥落，因此混凝土的侧向约束作用有限且不稳定，因此本测试不考虑这一有利作用。试件以筋材直径作为主要影响参数，3种直径筋材试件的长细比统一取为较小值8，长细比 $\lambda=l/i=4l/d$ ，每种直径的筋材按美国ACI标准制作4个试件<sup>[9]</sup>，共计12个试件。BFRP筋轴心受压试件的构造如图1所示，两端锚固和找平用的环氧树脂砂浆按文献10提供的比例配制。为了在试件中部粘贴电阻应变计准确测取压应变，筋材中部凹肋处先填充1mm厚环氧树脂，待其充分硬化后，再以锉刀将打磨填充树脂打磨出一小块光滑平整面用以粘贴BX120-3AA型电阻应变计，并保证BFRP筋无损伤。

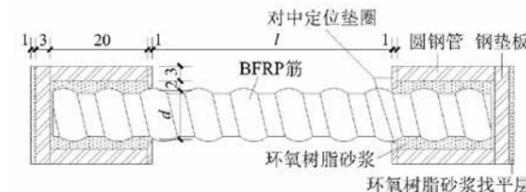


图1 试件构造详图

### 2.3 测试方法

加载设备采用上海华龙测试仪器股份有限公司生产的WAW-600型600kN加载级微机控制电液伺服万能试验机，以单调静力加载方式进行测试。正式加载前，先进行预加载，预加载控制为估算抗压承载力的20%，消除对中误差，正式加载的加载速率为0.2kN/s。由试验机配套的电脑采集系统自动采集荷载—位移曲线、弹性模量和极限荷载等数据，应变计测取的应变数据通过东华DH3816N数据采集系统自动同频率采集，用于校核。

## 3 测试结果统计分析

测试获得的抗压强度、压缩弹性模量和破坏模式及相应的数据标准差、变异系数详见表1。

### 3.1 破坏模式

BFRP筋受压的基本破坏模式可分为以下3类。

(1) 剪切破坏：试件中部沿凹肋出现约45°倾斜滑动面的错动破坏，属于材料破坏，如图2（a）所示。

(2) 胀裂破坏：试件中部因横向泊松变形增大，出现多条纵向裂缝并不断延伸、变宽，形成多根分离的纤维—树脂基体单元，失稳后向外鼓曲，呈灯笼状，如图2

表1 BFRP筋受压性能测试结果

试件编号	名义直径 (d/mm)	破坏荷载 (N <sub>u</sub> /kN)	抗压强度 (f' <sub>c</sub> /MPa)	抗压强度平均值 (f' <sub>c,m</sub> /MPa)	压缩弹性模量 (E' <sub>c</sub> /GPa)	压缩弹性模量平均值 (E' <sub>c,m</sub> /GPa)	破坏模式
C8A	8	10.5	209.8	264.5 (48.4/0.18)	24.9	25.5 (3.0/0.12)	剪切
C8B		16.3	323.6		25.1		剪切
C8C		15.1	300.2		30.1		剪切
C8D		11.3	224.5		21.8		剪切
C10A	10	15.4	196.1	264.1 (39.7/0.15)	25.4	24.7 (2.2/0.09)	胀裂
C10B		21.8	277.6		21.1		剪切
C10C		23.1	294.3		25.1		剪切
C10D		22.6	288.3		27.2		剪切
C12A	12	37.5	331.8	326.3 (8.2/0.03)	59.5	45.9 (9.3/0.20)	胀裂
C12B		36.9	327.3		48.6		剪切
C12C		37.7	333.6		34.5		屈曲
C12D		35.4	312.6		40.9		剪切

注：括号中的两个数值分别为标准差/变异系数。

**[基金项目]** 2020年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目“BFRP筋+BFRP条带约束北部湾海洋混凝土短柱轴压性能研究”（编号：2020KY35020）研究成果。

**[作者简介]** 江怀雁，广西建设职业技术学院土木工程系，教授、高级工程师，硕士。

(b) 所示。

(3) 屈曲破坏: 随着荷载的增大, 试件应力达到弹性失稳极限后发生全截面纤维和基体的整体失稳破坏, 未发生纤维—树脂基层间撕裂现象, 如图2 (c) 所示。



图2 BFRP筋受压试件的破坏模式

根据表1可知, 当长细比较小时, 3种直径的筋材发生剪切破坏的概率最大, 当名义直径增大后, 还可发生胀裂破坏和屈曲破坏, 但出现概率相对较小。

### 3.2 抗压强度

与同批次BFRP筋的拉伸性能测试结果相比, BFRP筋的抗压强度远低于其抗拉强度 (平均可达947.9MPa), 拉、压强度比约为 (2.82~3.73) :1, 说明BFRP筋的抗拉与抗压强度并不相同, 数值相差较大, 与钢筋完全不同, 这一特性是由BFRP筋单向纤维分布的各向异性结构构造决定的。

BFRP筋的抗压强度实测值随筋材直径的变化情况如图3所示。

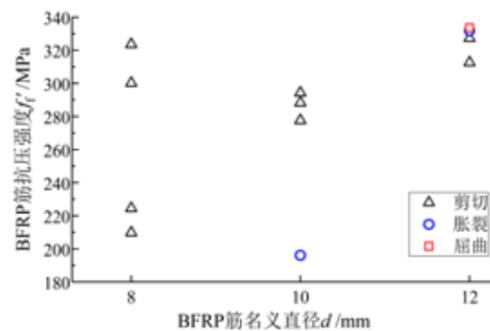


图3 BFRP筋的抗压强度—名义直径关系散点图

由图3可知, 名义直径为10mm的BFRP筋的抗压强度整体较低, 而12mm直径的BFRP筋的抗压强度总体高于其余两种直径筋材, 而且数据离散性也更小。破坏

模式对抗压强度的影响无明显规律。

### 3.3 受压应力—应变曲线

根据各试件的荷载、位移数据换算得到的受压应力—平均应变曲线如图4所示。

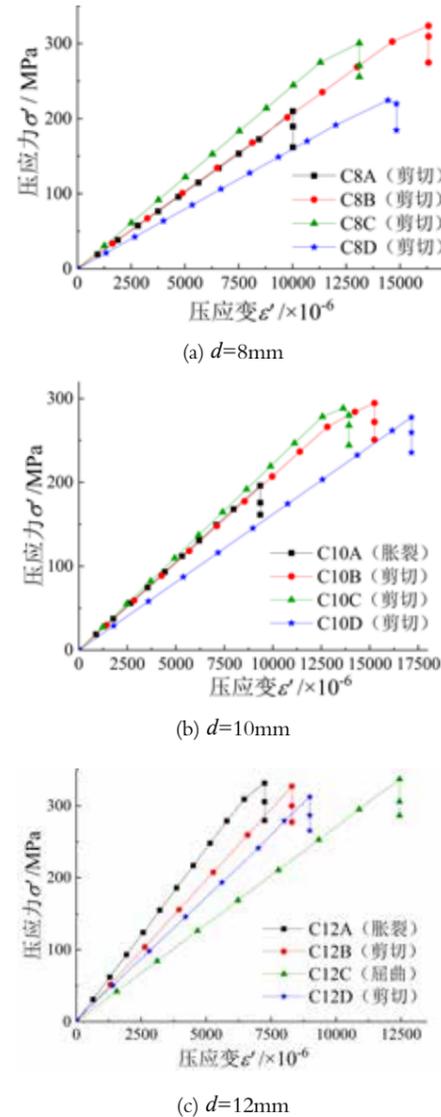


图4 不同直径BFRP筋受压应力—应变曲线

由图4可以看出, 不同直径BFRP筋的受压破坏前的应力—应变曲线几乎为直线, 超过峰值应力后, 下降段为垂线, 表明破坏呈脆性。还可看出, 曲线斜率所代表的压缩弹性模量、峰值压应变、峰值压应力所代表的抗压强度的离散性均比同批次生产的同直径BFRP筋拉伸弹性模量大, 破坏模式对于抗压强度、极限压应变和压

缩弹性模量的影响也无明显规律。

### 3.4 压缩弹性模量

将表1的压缩弹性模量实测值与同批次生产的BFRP筋实测拉伸弹性模量相比, BFRP筋的压缩弹性模量也低于其拉伸弹性模量 (平均为53.4GPa), 拉、压弹性模量比约为 (1.21~2.12) :1, 这也与钢筋拉、压弹性模量相近的特性完全不同。

BFRP筋压缩弹性模量平均值随名义直径的变化曲线如图5所示。

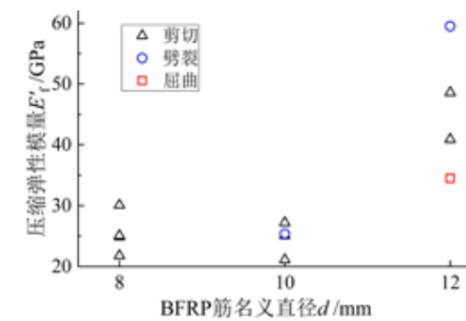


图5 BFRP筋压缩弹性模量—名义直径关系散点图

由图5可知, 长细比为8的BFRP筋压缩弹性模量平均值随直径的增大呈先略为减小而后增大的趋势。总体而言, 当长细比较小且恒定时, 直径较大的BFRP筋, 其压缩弹性模量较高, 但数值离散性随之增大; 破坏模式对压缩弹性模量的影响无明确规律。

### 3.5 受压破坏时的压缩变形率

与受拉破坏时的伸长率相对应, BFRP筋受压破坏时的压缩变形率由如下公式计算:

$$\delta'_u = \frac{N'_u}{E'_c \cdot A_f} \quad (1)$$

式 (1) 中,  $\delta'_u$  为受压破坏的极限压应变;  $N'_u$  为破坏时的轴压力峰值;  $E'_c$  为压缩弹性模量;  $A_f$  为BFRP筋的名义截面面积。不同直径BFRP筋的受压破坏极限压应变对比情况如图6所示。

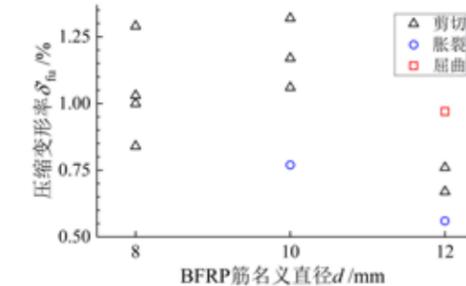


图6 BFRP筋压缩变形率—名义直径关系散点图

由图6可知, 3种直径BFRP筋的破坏压缩变形率总体都不高, 最大值仅为1.32%, 数值离散程度都较大; 筋材名义直径为8mm、10mm的压缩变形率相近, 但12mm直径筋材的压缩率均在1%以内, 总体低于另两种直径筋材。其中, 胀裂型破坏模式的破坏压缩变形率较低。

## 4 纵向BFRP筋对混凝土承压构件承载力贡献率的讨论

本课题组前期完成的BFRP纵筋增强混凝土偏心受压柱静力加载测试后, 凿开混凝土保护层发现, 试件偏心方向一侧混凝土被压碎之时, 受压区BFRP纵筋均未发生破坏, 且BFRP受压纵筋与混凝土之间无黏结破坏和滑移迹象, 其原因在于BFRP的极限压应变 (由表1抗压强度与压缩弹性模量之比可得) 远高于混凝土的极限压应变  $\epsilon_{cu}$  (约为0.0033), 使得混凝土压碎时, 纵向BFRP受压筋受力尚不大, 无明显胀裂、弯折等表现突变, 因此可以假定BFRP纵筋增强混凝土承压构件失效前, BFRP筋与混凝土黏结力保持完好, 两者共同变形。

以压应变达到混凝土极限压应变  $\epsilon_{cu}=0.0033$  作为混凝土压碎的条件, 取本文测得的BFRP筋压缩弹性模量平均值  $E'_{c,m}=35588.6\text{MPa}$ , 则混凝土压碎时BFRP筋的平均压应力  $\sigma'_f=35588.6 \times 0.0033=177.44\text{MPa}$ , 为本文实测的BFRP筋抗压强度平均值  $f'_{f,m}$  ( $=289.96\text{MPa}$ ) 的61.2%, 同时也小于BFRP筋抗压强度最小值196.1MPa, 说明混凝土压碎时BFRP受压纵筋基本不会破坏, 且抗压强度有较多富余。由于BFRP筋市场单价仍然高于钢筋, 因此混凝土承压构件的BFRP筋配筋率预计低于3%, 因此轴心受压柱的抗压承载力  $N_u$  可由下式估算:

$$N_u = 0.9\varphi(f_c + E'_c \epsilon_{cu} \rho'_f) A \quad (2)$$

式 (2) 中,  $\varphi$  为稳定系数,  $f_c$  为混凝土的轴心抗压强度,  $A$  为构件毛截面面积,  $\rho'_f$  为BFRP受压纵筋配筋率, 其余符号含义同前。根据上式, 可以得到BFRP受压纵筋对此轴心受压柱抗压承载力的贡献率  $r_{a,f}$  为:

$$r_{a,f} = \frac{1}{1 + f_c / (E'_c \epsilon_{cu} \rho'_f)} \quad (3)$$

当混凝土强度等级为C25, BFRP受压纵筋配筋率  $\rho'_f$  为1%~2%时, 取混凝土强度标准值代入式 (3) 可得, BFRP受压纵筋对此轴压柱抗压承载力的贡献率为6.6%~12.3%, 相同条件下, 如换为HRB400纵向钢筋, 钢筋抗压强度取标准值400MPa, 则受压钢筋的贡献率为19.3%~32.4%, 可见BFRP纵筋对轴心受压混凝土短柱抗压承载力的贡献率为HRB400钢筋的34.0%~38.1%, 约为1.1/3。由式 (3) 还可以推得, 随

混凝土强度等级的提高,纵向受压BFRP筋、钢筋对混凝土轴心受压构件抗压承载力的贡献率均呈下降趋势,但BFRP筋与钢筋对轴压混凝土短柱抗压承载力的贡献率之比仍接近于1.1/3。

对于偏心受压混凝土短柱,截面受压区压应力非均匀分布,根据平截面假定和截面力的平衡,柱的抗压承载力 $N_u$ 为:

$$N_u = \alpha_1 f_c b x + E_f' \varepsilon_f' \rho_f' b h - E_f \varepsilon_f \rho_f b h \quad (4)$$

因为无论大偏压还是小偏压,柱的失效均是近轴力一侧混凝土压碎为标志,此时若 $\varepsilon_f'$ 近似取为 $\varepsilon_{cu}$ ,比较(2)、(4)两式可以推知,近偏心轴力一侧的受压BFRP筋对偏压柱承载力 $N_u$ 的贡献将大于轴压柱,但由(3)式可知,BFRP筋与钢筋对柱承载力贡献率的差异主要取决于两者的压缩弹性模量,因此两种筋材贡献率之比仍与轴压差不多。上述BFRP纵筋对柱子承载力的贡献率,反映了不考虑受压BFRP纵筋可能带来的计算误差。

## 5 结论

(1) BFRP筋受压破坏模式分为剪切破坏、胀裂破坏、屈曲破坏3种;长细比为8时,斜向剪切错断破坏发生率最大。破坏模式对BFRP筋的抗压强度、应力—应变曲线形态、压缩弹性模量的影响无明确规律。

(2) BFRP筋受压应力—应变曲线近似呈线性,无屈服点,破坏呈脆性,抗压强度、压缩弹性模量、峰值压应变的离散性大于同条件的BFRP筋受拉力学性能指标。

(3) BFRP筋的拉、压力学性能差异较大,抗压强度约为抗拉强度的(1/4~1/3),数值介于HPB235和HRB335钢筋之间;压缩弹性模量约为拉伸弹性模量的(1/2~4/5),数值范围与常规等级普通混凝土的弹性模量相近。

(4) BFRP筋受压破坏时的压缩变形率不超过

1.32%,总体不高。

(5) 随BFRP筋名义直径的增大,抗压强度和压缩弹性模量呈先略降后增大的趋势,受压破坏的压缩变形率呈降低趋势。

(6) 采用纵向受压BFRP筋增强混凝土承压构件时,按(1~2)%的配筋率估算,BFRP纵筋对承压构件抗压承载力的贡献率约为同条件HRB400钢筋的1.1/3。

## [参考文献]

- [1]叶鼎铨.用于混凝土的复合材料筋材[J].建材发展导向,2007(3):41-42.
- [2]朱虹,钱洋.工程结构用FRP筋的力学性能[J].建筑科学与工程学报,2006(3):26-31.
- [3]CZIGANY T, POLOSKEI K, KARGER-KOCSIS J. Fracture and failure behavior of basalt fiber mat reinforced vinyl ester/epoxy hybrid resins as a function of resin composition and fiber surface treatment[J]. Journal of Material Science, 2005, 40(21): 5609.
- [4]Wen Chen, Jianzhong Hao, Ming Tang. Improved estimate and accurate measurement of thermal stresses in FRP tendon[J]. Construction and Building Materials, 2018, 164: 620-624.
- [5]顾兴宇,沈新,陆家颖.玄武岩纤维筋拉伸力学性能试验研究[J].西南交通大学学报,2010,45(6):914-919.
- [6]李筠.玄武岩纤维筋材力学性能试验研究[J].交通科技,2016(1):140-142.
- [7]吕增奎,李峰,余殷鹏.BFRP筋轴心受压性能研究及破坏模式分析[J].山西建筑,2017,43(21):33-35.
- [8]ABED F, MEHAINI Z, OUCIF C, et al. Quasi-static and Dynamic Response of GFRP and BFRP Bars under Compression[J]. Composites Part C: Open Access, 2020: 1-10.
- [9]SAMI H RIZKALLA, JOHN P BUSEL. ACI 440.3R-04 Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures[S]. American Concrete Insitute, 2004.
- [10]孙翠兰.高强度环氧树脂砂浆的制备与性能研究[J].中国胶粘剂,2017,26(3):40-43+50.