

关纪文,陈红梅,韦丽兰,等.结构用GFRP筋受压力学性能试验[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2023,38(4):37-43.
doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.04.005

GUAN J W, CHEN H M, WEI L L, et al. Experimental Research on the Compression Behaviors of Structural GFRP Reinforcement[J].
Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 38(4): 37-43. doi: 10.13582/j.cnki.
1672-9102.2023.04.005

结构用GFRP筋受压力学性能试验

关纪文^{1,4*}, 陈红梅², 韦丽兰³, 梁淑嘉⁴

(1. 南宁学院 土木与建筑工程学院, 广西 南宁 530200; 2. 桂林理工大学南宁分校 土木与测绘工程学院, 广西 崇左 532100;
3. 广西科技大学 土木建筑工程学院, 广西 柳州 545006; 4. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要:对3种不同直径的结构用玻璃纤维增强复合材料(GFRP)筋开展受压力学性能试验,研究筋材的长细比、直径对其抗压强度、峰值应变及压缩弹性模量的影响.结果表明:GFRP筋是典型的脆性材料,其破坏形态主要有压碎破坏、劈裂破坏和屈曲破坏;随着长细比的增大,GFRP筋的抗压强度、峰值应变及压缩弹性模量均明显降低,其中,由于试件G8-11发生屈曲破坏,直径8 mm试件各参数的减幅最为明显,约为直径10,12 mm试件减幅的3倍;随着直径的增大,GFRP筋的抗压强度、峰值应变显著下降,但直径变化对筋材压缩弹性模量的影响较小.最后,将试验结果与现有文献结果进行对比,二者吻合较好,表明文章的试验方法具有一定的合理性和参考价值.

关键词:GFRP筋;长细比;抗压强度;压缩弹性模量

中图分类号:TU377.9 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2023)04-0037-07

Experimental Research on the Compression Behaviors of Structural GFRP Reinforcement

GUAN Jiwen^{1,4}, CHEN Hongmei², WEI Lilan³, LIANG Shujia⁴

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Nanning University, Nanning 530200, China;
2. College of Civil and Surveying-mapping Engineering, Guilin University of Technology at Nanning, Chongzuo 532100, China;
3. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China;
4. College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: The compression mechanical properties tests on the structural GFRP bars of three diameters are carried out. The effects of diameters and slenderness ratios on the compressive strength, ultimate strain and elastic modulus are analyzed. The test results indicate that GFRP bars are brittle materials whose failure patterns are crushing failure, splitting failure and buckling failure. The compressive strength, ultimate strain and elastic modulus are decreased with the increase of slenderness ratios evidently. Due to the buckling failure of the specimen G8-11, each parameter of the specimen with 8 mm diameter is reduced most obviously, whose reduction is about 3 times of that of the specimen with 10 and 12 mm diameters. Meanwhile, the increase of diameters evidently decreases the compressive strength and peak strain, but makes no effect on the compressive elastic modulus. Finally, the tested results are compared with the existing literature ones, and both results are agreed well with each other.

Keywords: GFRP bars; slenderness ratio; compressive strength; compressive elastic modulus

收稿日期:2021-03-22

修改日期:2023-05-23

基金项目:广西高校中青年教师科研基础能力提升项目资助(2023KY1857);南宁学院科研项目资助(2022XJ05);南宁学院教改项目资助(2023XJG45);南宁学院课程思政示范专业——工程造价项目资助(2022SZSFZY02)

*通信作者,E-mail:gjw_dd@163.com

纤维增强复合材料(FRP)筋具有轻量质、抗拉强度高和耐腐蚀性强等优良特性^[1-2].FRP筋完全不需要考虑因钢筋锈蚀引起的耐久性问题,因此,与钢筋相比,FRP筋更适合作为侵蚀性环境下服役结构的增强筋^[3].目前,对FRP筋的应用主要集中在发挥其抗拉性能方面,却忽略了其抗压性能^[4].在实际工程应用中,结构往往处于复杂的应力状态,而FRP筋作为结构构件的增强筋,不可避免地会受到压应力,因此,对FRP筋抗压性能的研究尤为重要^[5].张新越等^[6]通过试验表明,玻璃纤维筋(GFRP)在受压状态下,其纤维与树脂会分别发生严重变形而致破坏;龚永智等^[7]发现不同种类的FRP筋,其抗压强度有明显差异,且筋材端部一旦提前破坏,将会使所测的抗压强度偏低;周继凯等^[8]对不同受压长度的GFRP筋进行受压试验,指出长细比越大,GFRP筋的受压弯曲越大,越容易发生失稳破坏;IMJAI等^[9-10]采用直接加载的方式,对不同种类的FRP筋进行抗压测试;ZHOU等^[11]的研究表明,所有种类FRP筋的实测抗压强度均小于其对应的抗拉强度,同时,若FRP筋在未加约束或约束作用不佳时,所测结果与真实值的偏差较大.

综上,目前关于GFRP筋受压性能的研究相对片面,试验手段及相关理论均未成熟.本文在现有研究的基础上,对8, 10, 12 mm这3种直径的GFRP筋进行受压性能试验,分析长细比、直径对筋材的抗压力学行为的影响,并结合已有的FRP筋抗压强度理论,为GFRP筋的研究与工程应用提供参考.

1 试验方案

1.1 FRP筋基本力学性能对比

FRP筋以纤维、基体为原料,其外表面通常先缠绕螺旋状的纤维束,然后进行喷砂处理,以增大筋材表面的摩擦力和咬合力.工程中常用的FRP筋有碳纤维筋(CFRP)和GFRP,将其基本物理力学性能与钢材进行对比,结果如表1所示^[12-13].

表1 常用FRP筋与钢材的基本物理力学性能

筋材种类	相对密度	抗拉强度/GPa	模量/GPa	延伸率/%	比强度/GPa	比模量/GPa
CFRP筋	1.75	3.0~4.5	240	1.9	2.57	137
GFRP筋	2.89	2.8~3.5	110	3.2	1.21	38
HRB400钢筋	7.80	0.42	200	18.0	0.05	26

由表1可知:FRP筋的相对密度较小,约为HRB400钢筋密度的22%~37%,但其平均比强度(拉伸强度/比重)为钢材的20~50倍.其中,CFRP筋的抗拉强度最高,可达3.0~4.5 GPa,远远高于HRB400钢筋;GFRP筋的延伸率最大,可达3.2%,约为HRB400钢筋延伸率的17.78%.

1.2 受压试件设计与制作

本试验选用直径为8, 10, 12 mm的GFRP筋进行研究,每种直径设计3种受压长度即6, 9, 11 cm,分析筋材的长细比对其压缩性能的影响.为了减小试验误差,保证试验数据可靠,以同种直径、同种计算长度的试件为一组,每组3个,共计27个试件,各试件的参数设计见表2.

表2 试件参数设计

试件编号	直径 d /mm	受压长度 l /cm	长细比 λ	数量/个
G8-6	8	6	30	3
G8-9		9	45	
G8-11		11	55	
G10-6	10	6	24	3
G10-9		9	36	
G10-11		11	44	
G12-6	12	6	20	3
G12-9		9	30	
G12-11		11	36	

注: $\lambda = \frac{l}{\sqrt{I/A}} = \frac{4l}{d}$ (I 为圆截面惯性矩, $I = \frac{\pi d^4}{64}$; A 为筋材截面积, $A = \frac{\pi d^2}{4}$)

为保证试件的整体稳定性,避免因端部被局部压碎而达不到试验效果,因此,选用抗压强度高、刚度大的碳钢套帽进行约束,在碳钢套帽与 GFRP 筋之间灌入环氧树脂以保证作用力的传递均衡^[14]。碳钢套帽的实物图及定制规格尺寸如图 1 和图 2 所示。



图 1 定制碳钢套帽

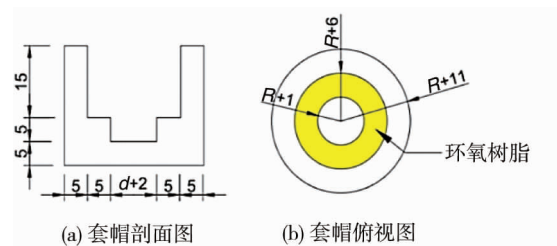


图 2 定制碳钢套帽尺寸(单位:mm)

1.3 加载装置与加载方案

本试验采用 500 t 微机控制电液伺服万能试验机进行加载,加载数据由试验机数据采集系统自动采集,试件的压应变由 DH3816N 静态应变测试分析系统采集.加载采用正位单调静力加载,全过程按位移控制,加载速率为 2 mm/min,从零开始加载到试件完全破坏,施加荷载要求连续、平稳。

2 试验现象及破坏形态

2.1 试验现象

在加载初期,试件会发出微小的碎裂声.原因在于,当加压板与碳钢套帽完全接触后,会对筋材进行垂直对中调整,试件两端的部分环氧树脂发生碎裂.当接近极限荷载时,试件会不断发出碎裂的声响,最后伴随着一声脆响,试件达到极限承载力发生破坏。

2.2 GFRP 筋的破坏形态

本试验中,GFRP 筋的破坏没有任何征兆,纤维突然断裂,无屈服阶段,破坏形式为脆性破坏.其主要破坏类型有压碎破坏、劈裂破坏和屈曲破坏,各破坏类型分别如图 3~图 5 所示。

1) 压碎破坏:发生于试件 G8-6 和 G8-9.其中,G8-6 为整体压碎破坏,G8-9 为局部压碎破坏.其破坏程度均十分彻底,筋材纤维直接被压成碎屑甚至粉末,且完全观察不到裂缝沿轴向延伸的痕迹,如图 3 所示.此破坏形态测出的极限承载力较高,筋材的抗压性能得到充分利用。

2) 劈裂破坏:发生于直径 10,12 mm 的试件.由于泊松效应,GFRP 筋发生侧向开裂,裂痕主要分布于试件端部以及沿纵轴方向,如图 4 所示.此破坏形态的 GFRP 筋通常未完全被压坏,筋材的抗压性能没得到充分发挥。

3) 屈曲破坏:只发生于试件 G8-11.由于长细比较大,仅用肉眼便可以观察到其破坏一侧的纤维发生严重的弯折变形,荷载作用线偏移,如图 5 所示.此破坏形态测得的 GFRP 筋的极限承载力极低,筋材的抗压性能损耗严重。



图 3 压碎破坏



图 4 劈裂破坏

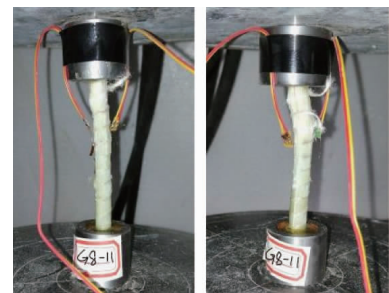


图 5 屈曲破坏

3 试验结果与分析

3.1 应力-应变曲线

不同受压长度下,各试件的应力-应变曲线如图6所示.由图6可知:GFRP筋在加载过程中的应力-应变始终保持线弹性增长,其曲线为一条平滑直线.

对于受压长度为6,9 cm的试件,其峰值应变随着直径的增大而减小.直径8 mm试件的峰值应变最大,可达4 800 $\mu\epsilon$.而对于受压长度为11 cm的试件,其峰值应变随着直径的增大而增大.最大峰值应变出现在直径12 mm的试件,约4 500 $\mu\epsilon$.原因在于,试件G8-11发生屈曲破坏,所测峰值应变极低,而试件G10-11, G12-11均发生劈裂破坏,其峰值应变较高.

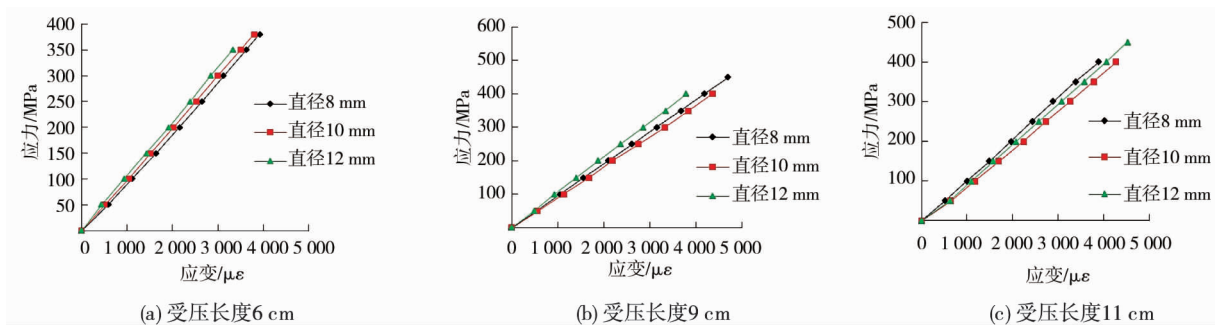


图6 不同受压长度下各试件应力-应变曲线

3.2 长细比的影响

3.2.1 对抗压强度的影响

抗压强度的变化如图7所示.由图7可知:相同直径的GFRP筋,其抗压强度值随着长细比的增大而减小.直径8 mm的试件,当长细比为30时发生整体压碎破坏,所测的抗压强度较高,达到465.10 MPa;当长细比增加到45时,试件端部发生劈裂破坏,导致胶体与纤维开裂分离,抗压强度立即减少21.17%;当长细比继续增加到55,试件发生屈曲失稳,且由于试件两端套帽的约束作用逐渐减弱^[5,14],其抗压强度在前的基础上减少24.46%,且减幅有所增加.

直径为10,12 mm的试件发生劈裂破坏,其抗压强度均随着长细比的增加而显著减小.其中,直径10 mm试件的第2次减幅比第1次增加7.99%,而直径12 mm试件的第2次减幅比第1次增加4.75%.由此可见,当接近极限荷载时,尽管直径12 mm试件筋材内部的应力发生重分布,但由于发生局部劈裂受损,其抗压强度明显降低.

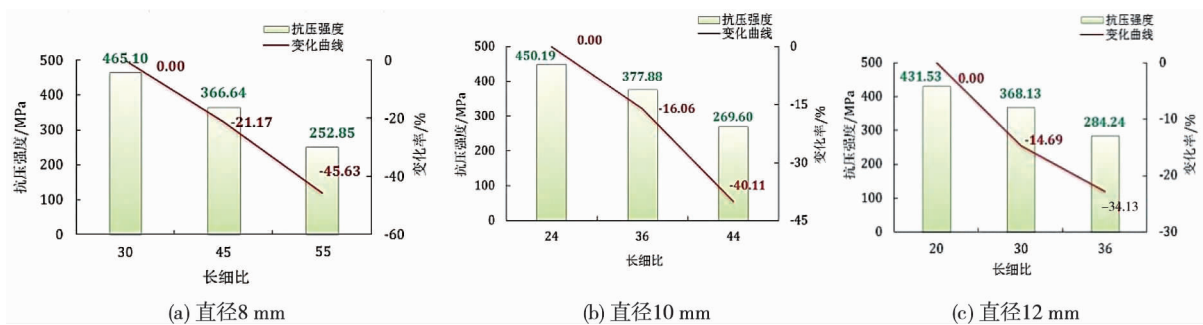


图7 抗压强度的变化

3.2.2 对峰值应变的影响

峰值应变的变化如图8所示.由图8可知:当试件的直径相同时,GFRP筋的峰值应变随着长细比的增加逐渐减小.直径8 mm的试件,当长细比增加到45时,其极限压应变减少15.06%;当长细比继续增加到55,其极限压应变比长细比为45时仅减少5.03%.而直径10,12 mm的试件,随着长细比的增加,其两次减

幅相差不大.可见,相同直径的 GFRP,其峰值应变随着长细比的增加逐渐减小,筋材的直径越大,减幅会相对稳定.

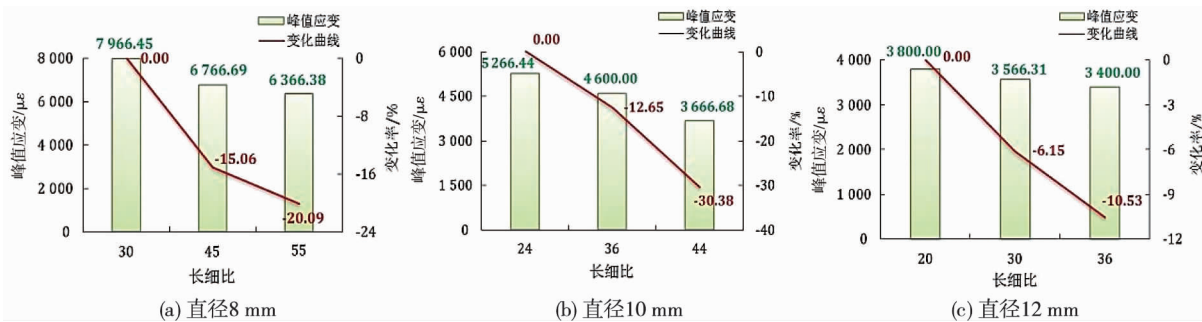


图 8 峰值应变的变化

3.2.3 对压缩弹性模量的影响

压缩弹性模量的变化如图 9 所示.由图 9 可知:当试件的直径相同时,其压缩弹性模量随着长细比的增加逐渐减小.直径 8 mm 的试件,当长细比增加到 45 和 55 时,其压缩弹性模量在原来的基础上分别减少 32.71%和 19.36%;直径 10 mm 的试件,当长细比增加到 36 和 44 时,其压缩弹性模量在原来的基础上分别减少 8.12% 和 7.63%;直径 12 mm 的 GFRP 筋试件,当长细比增加到 30 和 36 时,其极限压应变分别在原来的基础上减少 26.4%和 2.71%.

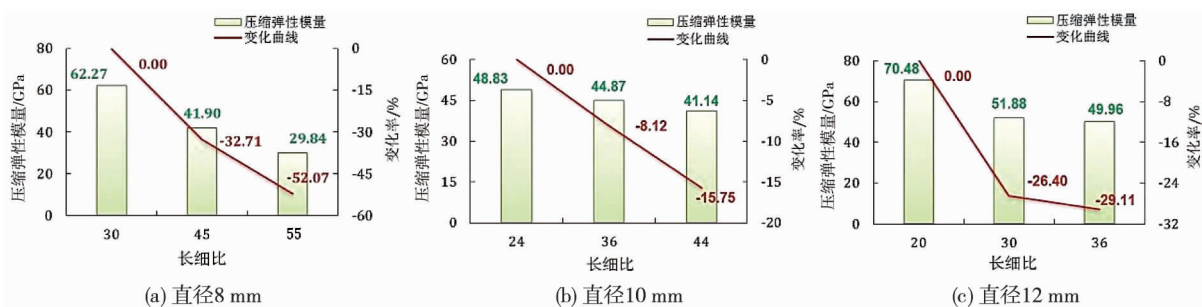


图 9 压缩弹性模量的变化

3.3 直径的影响

本试验中,试件 G8-6 与 G12-9 的长细比均为 30,试件 G10-9 与 G12-11 的长细比均为 36,因此,对这 2 种不同长细比的试件进行分析,所得结果如表 3 所示.

表 3 直径对 GFRP 筋力学参数的影响

长细比	直径/mm	变化情况					
		抗压强度/MPa	变化率/%	峰值应变/ $\mu\epsilon$	变化率/%	压缩弹性模量/GPa	变化率/%
30	8	465.10	0	7 966.45	0	62.27	0
	12	368.13	-20.85	3 566.31	-55.23	51.88	-16.69
36	10	377.88	0	4 600.00	0	44.87	0
	12	284.24	-24.78	3 400.00	-26.09	49.96	11.34

由表 3 可知:当试件的长细比为 30,试件直径从 8 mm 增加到 12 mm 时,其抗压强度降低 20.85%;当长细比为 36 时,试件直径从 10 mm 增加到 12 mm,其抗压强度降低 24.78%.可见,GFRP 筋的抗压强度随着直径的增大而降低,且长细比越大,其抗压强度对直径的变化更敏感^[15].原因在于,筋材的直径越大,其外部缠绕的约束纤维丝对内部的约束作用越小,从而导致抗压效果减弱^[14, 16-17].

长细比相同的 GFRP 筋,其峰值应变随直径的增加而显著减小.当试件直径从 8 mm 增加到 12 mm 时,GFRP 筋的峰值应变减小 55.23%;当试件直径从 10 mm 增加到 12 mm 时,GFRP 筋的峰值应变仅减小

26.09%。由此可见,GFRP 筋峰值应变的变化率与筋材直径的变化幅度基本呈正相关。

当试件的长细比为 30,直径从 8 mm 增加到 12 mm 时,其压缩弹性模量减少 16.69%;然而,当长细比为 36,试件直径从 10 mm 增加到 12 mm 时,GFRP 筋的受压弹性模量反而增加 11.34%。由此可见,GFRP 筋的压缩弹性模量随着直径的变化并没有表现出明显的规律性.这应该与筋材本身的制作质量、两端钢套帽的约束效果以及截面形心与施力作用点是否重合有关^[14, 16-17]。

4 结果对比

根据文献[8-14]中的筋材直径为 8, 10, 12 mm FRP 筋的单轴受压试验结果,经线性内插、汇总分析,换算得到对应本文各长细比下的力学参数,并与本文实测结果进行比较,结果如表 4 所示.由表 4 可知:本文实测结果与相关文献值吻合较好,二者比值的平均值接近于 1.0.由此可见,本文的试验方法与实测结果具有一定的合理性和参考价值。

表 4 本文实测结果与文献结果对比

试件 编号	长细比 λ	抗压强度 σ_c/MPa			峰值应变/ $\mu\epsilon$			压缩弹性模量 E_c/GPa		
		本文 实测	文献值 ^[8,14]	二者比值 平均值	本文 实测	文献值 ^[9,10]	二者比值 平均值	本文 实测	文献值 ^[6,18]	二者比值 平均值
G8-6	30	465.10	448.36		7 966.45	7 255.63		62.27	59.42	
G8-9	45	366.64	323.57	1.09	6 766.69	6 093.06	1.12	41.90	45.16	1.06
G8-11	55	252.85	231.42		6 366.38	5 571.39		29.84	25.05	
G10-6	24	450.19	470.81		5 266.44	5 816.47		48.83	44.56	
G10-9	36	377.88	409.64	0.93	4 600.00	4 166.23	1.07	44.87	36.71	1.14
G10-11	44	269.60	291.53		3 666.68	3 029.15		41.14	37.08	
G12-6	20	431.53	459.33		3 800.00	3 374.25		70.48	63.54	
G12-9	30	368.13	384.65	0.92	3 566.31	3 026.54	1.08	51.88	49.85	1.12
G12-11	36	284.24	332.74		3 400.00	3 674.22		48.96	40.68	

注:二者比值平均值 = $[\sum(\text{本文实测值} / \text{文献值})] \div 3$

5 结论

1)对 GFRP 筋两端加以约束,在试验中,GFRP 筋的破坏形态共有压碎破坏、劈裂破坏和屈曲破坏 3 种。

2)GFRP 筋的应力-应变曲线在加载过程中始终保持线弹性增长,试验过程不发生筋材屈服,属于典型的脆性破坏.当受压长度为 6,9 cm 时,试件的峰值应变随着直径的增大而减小;当受压长度为 11 cm 时,试件的峰值应变随着直径的增大而增大。

3)GFRP 筋的抗压强度随着长细比的增大而降低,其降低幅度往往取决于筋材的破坏形态.一般来说,筋材的直径越大,减小的幅度相对稳定.同样,长细比对峰值应变、压缩弹性模量的影响规律相似。

4)GFRP 筋的抗压强度、峰值应变均随筋材直径的增大而降低;同时,GFRP 筋峰值应变的变化率与筋材直径的变化基本呈正相关;筋材直径的变化,对受压弹性模量并没有表现出明显的规律性。

5)经线性内插、汇总分析,将本文实测结果与现有文献试验结果进行对比,二者吻合较好.可见,本文 GFRP 筋受压试验方法与实测结果具有一定的合理性和参考价值。

参考文献:

[1] 胡成超,高奎,涂建维,等.GFRP 筋与箍筋约束混凝土之间粘结性能的试验研究[J].复合材料科学与工程,2020(10): 13-20.

- [2] LI J W, GRAVINA R J, SMITH S T, et al. Bond strength and bond stress-slip analysis of FRP bar to concrete incorporating environmental durability[J]. *Construction and Building Materials*, 2020,261:119860.
- [3] 陈爽,吕海波,王磊.CFRP 筋—珊瑚混凝土粘结应力分布试验研究[J].*广西大学学报(自然科学版)*,2020,45(4):741-747.
- [4] 肖红菊,孙玉永.预应力碳纤维布加固损伤混凝土梁有限元分析[J].*河南科技大学学报(自然科学版)*,2011,32(6):51-54.
- [5] 张智,谷倩.喷射 GFRP 加固砌体柱抗压承载力分析[J].*湖南科技大学学报(自然科学版)*,2013,28(2):44-49.
- [6] 张新越,欧进萍.FRP 加筋混凝土短柱受压性能试验研究[J].*西安建筑科技大学学报(自然科学版)*,2006,38(4):467-472.
- [7] 龚永智,张继文,蒋丽忠,等.CFRP 筋增强混凝土轴心受压柱的试验研究[J].*工业建筑*,2010,40(7):67-70.
- [8] 周继凯,杜钦庆,袁明亮,等.GFRP 筋抗压力学性能试验研究[J].*淮海大学学报(自然科学版)*,2008,36(4):542-545.
- [9] IMJAI T, GARCIA R, GUADAGNINI M, et al. Strength degradation in curved fiber-reinforced polymer (FRP) bars used as concrete reinforcements[J]. *Polymers*, 2020,12(8):1653.
- [10] IRSHIDAT M R. Improved bond behavior between FRP reinforcing bars and concrete with carbon nanotubes[J]. *Construction and Building Materials*, 2020,257:119562.
- [11] ZHOU Y W, GAO H, HU Z H, et al. Ductile, durable, and reliable alternative to FRP bars for reinforcing seawater sea-sand recycled concrete beams: steel/FRP composite bars[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 269: 121264.
- [12] 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*,2006,23(3):26-31.
- [13] 卢亦焱,黄银燊,张号军,等.FRP 加固技术研究新进展[J].*中国铁道科学*,2006,27(3):34-42.
- [14] 董震.BFRP 筋增强混凝土偏心受压短柱力学性能研究[D].郑州:郑州大学,2017.
- [15] 禹见达.GFRP/CFRP 混杂约束混凝土柱极限承载力试验[J].*湖南科技大学学报(自然科学版)*,2007,22(2):62-64.
- [16] 范兴朗,黄俊超,吴熙,等.考虑拉伸刚化效应的 FRP 筋/混凝土轴拉构件变形计算方法[J].*复合材料学报*,2021,38(3):932-943.
- [17] 于洋,杨勇,张云峰,等.玻璃纤维增强塑料布约束混凝土圆柱尺寸效应[J].*河南科技大学学报(自然科学版)*,2017,38(3):54-59.
- [18] 米向乾.GFRP 筋及 GFRP 筋混凝土柱受压性能研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2012.