

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202009020



约束条件下 CFRP 筋单轴抗压性能试验

陈爽^{1,2}, 关纪文^{1,2}, 梁淑嘉^{1,2}, 陈红梅^{1,2}

(1. 桂林理工大学 广西建筑新能源与节能重点实验室, 广西 桂林 541004;
2. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 对约束条件下 3 种直径的碳纤维增强复合材料(CFRP)筋进行单轴抗压性能试验,分析筋材长细比、直径对抗压强度、极限应变及抗压弹性模量的影响。结果表明:CFRP 筋为典型的脆性材料,其破坏形态主要有剪切破坏、劈裂破坏、压碎破坏、屈曲破坏;直径相同的 CFRP 筋的抗压强度、极限应变及抗压弹性模量均随长细比的增大而降低;当长细比一定时,CFRP 筋的极限应变随直径的增大而降低,但直径的变化对抗压强度和抗压弹性模量的影响甚微。

关键词: 碳纤维增强复合材料筋; 约束条件; 长细比; 抗压弹性模量

中图分类号: TU 377.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2021)06-0758-06

Experiment on Uniaxial Compression Behaviors of CFRP Bars in Constraint Condition

CHEN Shuang^{1,2}, GUAN Jiwen^{1,2},
LIANG Shujia^{1,2}, CHEN Hongmei^{1,2}

(1. Guangxi Key Laboratory of New Energy and Building Energy Saving,
Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;
2. Civil Engineering College, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: The uniaxial compression behaviors experiment on carbon fiber reinforced plastic (CFRP) bars of three diameters were carried out in constraint condition. The effects of slenderness ratio and diameter on the compressive strength, ultimate strain and compressive elastic modulus were analyzed. The results indicate that CFRP bar is typical brittle material, the failure patterns involve in shear failure, splitting failure, crushing failure and buckling failure. The compressive strength, ultimate strain and compressive elastic modulus of CFRP bars with the same diameter decrease with the increase of slenderness ratios. For the same slenderness ratio, the ultimate strain of CFRP bars decrease with the increase of diameter, but the variation of diameter effects little on the compressive strength and compressive elastic modulus.

Keywords: carbon fiber reinforced plastic bars; constraint condition; slenderness ratio; compressive elastic modulus

纤维增强复合材料(FRP)筋具有密度小、抗拉强度高、耐腐蚀性强等优良性能^[1-7]。研究表明,FRP 筋不需要考虑因钢筋锈蚀引起的耐久性问题,故相较于钢筋,FRP 筋更适合作为侵蚀性环境(酸雨地

收稿日期: 2020-09-08

通信作者: 陈爽(1981-),男,副教授,博士,主要从事新型建筑材料、混凝土结构耐久性及力学性能的研究. E-mail: gjw_dd@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51568013); 广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划(2017 年); 广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2021KY0338); 广西建筑新能源与节能重点实验室开放基金资助项目(桂科能 19-J-21-3)

区、沿海和海岛等)下服役结构的增强筋^[1-3]. 目前,对 FRP 筋的应用主要集中在发挥抗拉性能方面,往往忽略其抗压性能^[4-6]. 在实际工程应用中,结构构件常处于复杂应力状态,不可避免地承受压应力,且碳纤维增强复合材料(CFRP)抗压性能的优劣会直接影响受压构件的承载力水平^[7-8].

一些学者对 CFRP 筋的抗压性能进行研究. 龚永智等^[9]发现长细比较大的 CFRP 筋试件的受压弯曲程度越明显,且容易发生失稳破坏. 张新越等^[10]发现 CFRP 筋的破坏一般是横向变形过大而无法继续承受荷载所致,且当约束条件较弱时,试件端部会提前破坏,测得的抗压强度偏低. 文献[11-13]研究表明 CFRP 筋在未加约束或约束作用不明显的情况下,往往导致筋材发生整体失稳或端部压碎,实测值与真实值偏差较大,试验效果不佳. 为了保证筋材试件的稳定性,本文对约束条件下的 CFRP 筋进行单轴抗压性能试验,分析筋材长细比、直径对抗压性能的影响.

1 试验方案

1.1 试件的设计与制作

采用直径为 8,10,12 mm 的 CFRP 筋(浙江省海宁市安捷复合材料有限责任公司),每种直径均设计 30,45,60 等 3 种长细比,并根据长细比设置不同的受压长度. 为了减小试验误差,保证试验数据的可靠性,以相同直径和受压长度的试件为一组,分为 1~9 组,每组有 3 个完全相同的试件(相关参数取平均值).

试件的参数,如表 1 所示. 表 1 中:试件编号规则为 C(碳纤维筋)-筋材直径-受压长度; d 为筋材直径; l 为受压长度; λ 为长细比, $\lambda=l/\sqrt{I/A}=4l/d$, I 为圆截面惯性矩, $I=\pi d^4/64$, A 为圆截面面积, $A=\pi d^2/4$.

试件两端采用抗压强度高、刚度大的碳钢套帽加以约束,并在碳钢套帽与 CFRP 筋之间的空余部分灌入环氧树脂进行固定^[14]. 定制碳钢套帽的尺寸图,如图 1 所示. 图 1 中: R 为 CFRP 筋半径. CFRP 筋压缩试件,如图 2 所示. 两端碳钢套帽固定好后,在筋材中部两侧对称粘贴规格为 3 mm×2 mm(长×宽)的电阻应变片,试件的应变值取两侧的平均值.

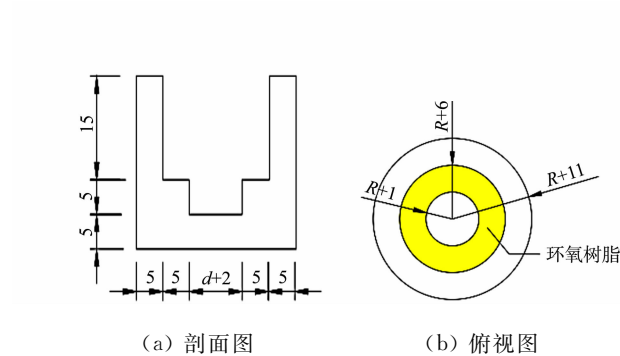


图 1 定制碳钢套帽的尺寸图(单位:mm)



图 2 CFRP 筋压缩试件

Fig. 1 Sizes of customized carbon steel cap (unit: mm) Fig. 2 CFRP bar compression specimens

1.2 试验加载装置与加载方案

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,试件的应变由 DH3816N 型静态应变分析系统采集. 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⁻¹,从零开始加载,直至试件完全破坏,荷载的施加需连续、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,这是因为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^[15].当接近极限荷载时,试件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.整个过程中,CFRP 筋始终不发生屈服,属于典型的脆性破坏.

2.2 破坏形态分析

试验中,CFRP 筋出现剪切破坏、劈裂破坏、压碎破坏、屈曲破坏等 4 种破坏形态,如图 3~6 所示.

1) 剪切破坏.剪切破坏主要发生在直径为 10 mm 的试件中,其破坏面与试件纵轴线大致呈 45°,通常会完全断裂且伴随明显的相对滑动,筋材上的白色螺旋缠绕纤维线发生崩断^[15].剪切破坏测得的极限承载力适中,试件部分抗压性能得到发挥.

2) 劈裂破坏.在轴向压力作用下,试件由于泊松效应发生侧向开裂,当横向拉应变超过自身的极限拉应变时,会发生劈裂破坏,又称横向开裂破坏.劈裂破坏主要发生在直径为 12 mm 的试件中,主要出现在试件端部及沿纵轴方向.筋材往往未完全被压坏就已经达到极限承载力,因此,其抗压性能未得到充分发挥.

3) 压碎破坏.压碎破坏发生在直径为 8 mm 的试件中,压碎破坏的程度十分彻底,筋材纤维往往直接被压成碎屑,甚至粉末,且完全观察不到裂缝沿轴向延伸的痕迹^[15].压碎破坏测得的极限承载力较高,筋材抗压性能得到充分利用.

4) 屈曲破坏.受压长度大的试件容易发生屈曲破坏,用肉眼便可以观察到破坏一侧的纤维发生弯折变形,致使荷载作用线发生偏移.屈曲破坏测得的筋材极限承载力极低,对其抗压性能利用率也极低.

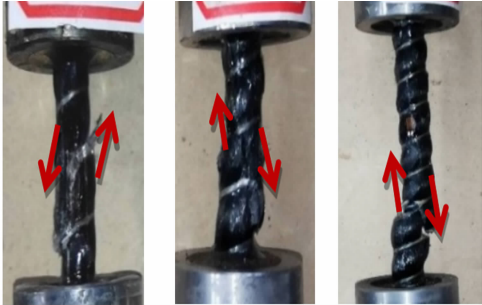


图 3 剪切破坏形态图

Fig. 3 Shear failure patterns

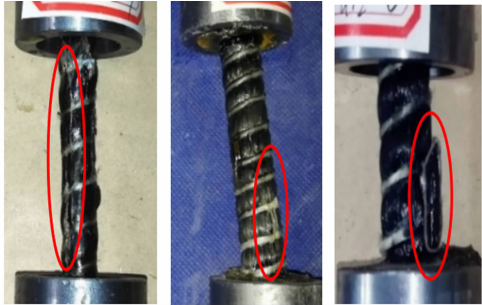


图 4 劈裂破坏形态图

Fig. 4 Splitting failure patterns

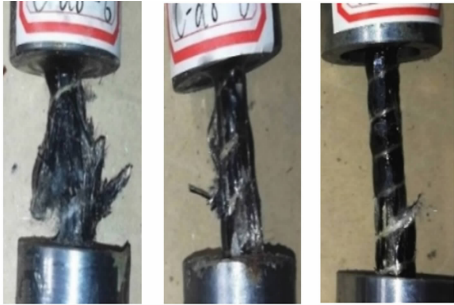


图 5 压碎破坏形态图

Fig. 5 Crushing failure patterns

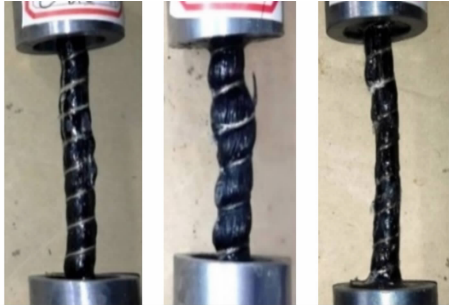


图 6 屈曲破坏形态图

Fig. 6 Buckling failure patterns

3 试验结果与分析

3.1 试验结果

CFRP 筋抗压性能试验结果,如表 2 所示.表 2 中: P_u 为极限荷载; σ_c 为抗压强度, $\sigma_c = \frac{P_u}{A} = \frac{4P_u}{\pi d^2}$; E_c 为抗压弹性模量, $E_c = \frac{\sigma'' - \sigma'}{\epsilon'' - \epsilon'}$,其中, σ'' 表示应变 ϵ'' 为 0.002 5 时的应力值, σ' 表示应变 ϵ' 为 0.000 5 时的应力值; ϵ_u 为极限应变.

表 2 CFRP 筋抗压性能试验结果

Tab. 2 Test results of CFRP bar compression behaviors

试件编号	l/cm	λ	P_u/kN	σ_c/MPa	E_c/GPa	$\epsilon_u/\times 10^{-6}$	破坏形态
C8-6.00	6.00	30	23.37	465.10	62.27	7 966.45	压碎破坏
C8-9.00	9.00	45	18.98	377.88	41.90	6 766.69	压碎破坏
C8-12.00	12.00	60	14.28	252.85	29.84	6 366.38	屈曲破坏
C10-7.50	7.50	30	35.34	450.19	48.83	5 266.44	剪切破坏
C10-11.25	11.25	45	28.90	368.13	44.87	4 600.00	剪切破坏
C10-15.00	15.00	60	21.16	269.60	41.14	3 666.68	剪切破坏
C12-9.00	9.00	30	48.78	431.53	70.48	3 800.00	劈裂破坏
C12-13.50	13.50	45	41.44	366.64	51.88	3 566.31	劈裂破坏
C12-18.00	18.00	60	28.58	284.24	49.96	3 400.00	劈裂破坏

3.2 应力-应变曲线

受压应力-应变($\sigma\epsilon$)曲线,如图 7 所示.由图 7 可知:CFRP 筋为典型的脆性材料,其应力-应变曲线始终保持线弹性增长;直径为 8,10 mm 试件的极限应变随着长细比的增大而减小;直径为 8 mm 的试件长细比为 30,45 时,发生完全压碎破坏,所测的极限应变高达 $4\,300\times 10^{-6}$,当长细比增加至 60 时,试件曲线的斜率最大,加载过程中应变始终小于前两种长细比的应变,且由于发生屈曲失稳,未达到极限强度就提前发生破坏,故极限应变偏小;直径为 10 mm 的试件主要发生剪切破坏,尽管长细比为 30 时的曲线斜率偏大,但最终测得的极限应变均较为接近;直径为 12 mm 的试件主要发生劈裂破坏,3 种长细比下曲线的斜率相近,极限应变相差甚微.

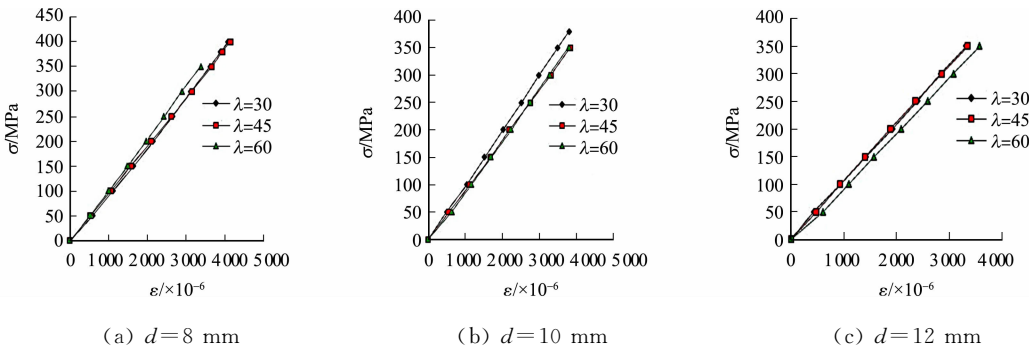


图 7 受压应力-应变曲线

Fig. 7 Compressive stress-strain curves

3.3 长细比的影响

3.3.1 抗压强度 抗压强度的变化情况,如图 8 所示.由图 8 可得以下 3 个结论.

- 1) 各试件的抗压强度均随着长细比的增大而减小;当长细比为 30,45 时,直径为 8 mm 的试件发生压碎破坏,抗压强度较高,最大抗压强度可达 465.10 MPa;当长细比继续增大到 60,直径为 8 mm 的试件发生屈曲失稳,且两端碳钢套帽对筋材的约束作用逐渐减弱,故其第 2 段曲线下降斜率增加明显,减幅较第 1 段增加了 8.13%,直径为 8 mm 的试件最终的抗压强度低于直径为 10,12 mm 的试件.
- 2) 直径为 10 mm 的试件曲线下降斜率明显,累计减幅达 40.12%,主要原因是试件发生剪切破坏,且剪切面与试件纵轴线往往保持呈 45°发生破坏,而长细比的增加使试件由原来的整体剪切破坏转变为端部剪切破坏,导致试件中部筋材的抗压性能未得到充分发挥.
- 3) 直径为 12 mm 的试件两段曲线下降斜率大致相同,累计减幅仅为 22.79%,减幅最小.试件主要发生劈裂破坏,尽管长细比的增大使外部胶体容易发生劈裂受损,但由于直径较大,当接近破坏时,筋材内部纤维发生应力重分布,仍可以承担一定的压应力^[16].因此,当长细比增加到 60 时,直径为 12 mm 的试件的抗压强度最大.

3.3.2 极限应变 极限应变的变化情况,如图 9 所示.由图 9 可知:各试件的极限应变均随长细比的增加逐渐减小;直径为 12 mm 的试件曲线下降斜率最平缓,极限应变累计减幅仅为 10.53%;而直径为 8,10 mm 的试件累计减幅分别达到 20.09%,30.38%,其中,直径为 8 mm 的试件第 2 次减幅较第 1 次减

小了 10.03%,直径为 10 mm 的试件第 2 次减幅较第 1 次增加了 5.08%.

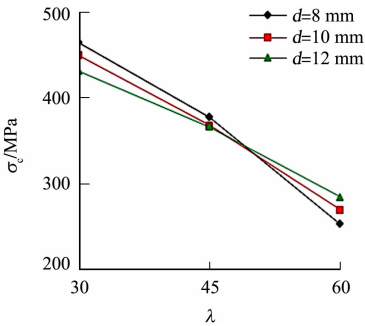


图 8 抗压强度的变化情况

Fig. 8 Variation of compressive strength

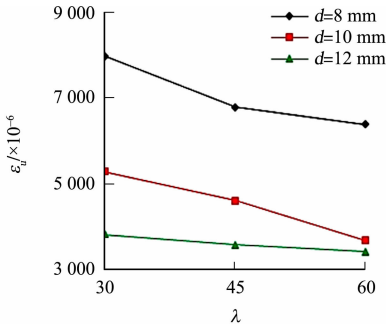


图 9 极限应变的变化情况

Fig. 9 Variation of peak compressive strain

3.3.3 抗压弹性模量 抗压弹性模量的变化情况,如图 10 所示.由图 10 可知:各试件的抗压弹性模量均随着长细比的增加逐渐减小;当长细比为 30 时,直径为 12 mm 的试件的抗压弹性模量最大,可达 70.48 GPa,当长细比分别增加到 45,60 时,直径为 12 mm 的试件抗压弹性模量分别累计降低 26.40%,29.11%,但其抗压弹性模量始终大于直径为 8,10 mm 的试件;直径为 8 mm 的试件由于直径小、稳定性不佳,故曲线下降斜率明显,总减幅最大已达 52.07%;直径为 10 mm 的试件曲线斜率平缓,两次减幅大致相同,均保持在 8.00%左右,总减幅仅为 15.75%.

3.4 直径的影响

直径变化的影响,如图 11 所示.由图 11(a)可知:当长细比分别为 30,45 时,试件的抗压强度随直径的增大而降低;当长细比为 60 时,试件的抗压强度反而随着直径的增大而增大.因此,筋材的抗压强度随着直径变化未表现出明显的规律性,这种现象往往取决于筋材的破坏形态.

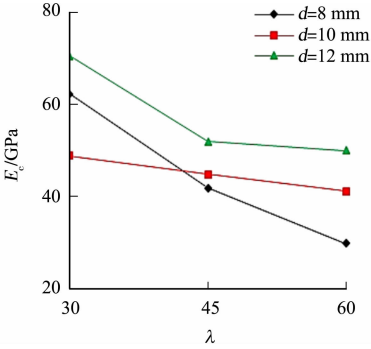
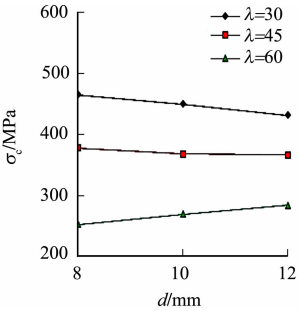
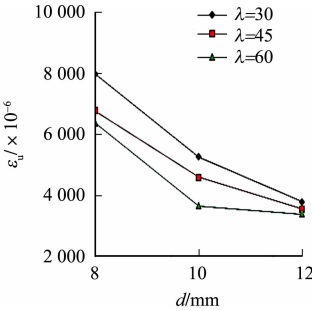


图 10 抗压弹性模量的变化情况

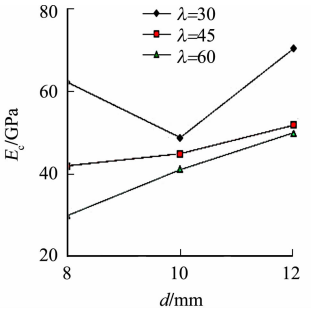
Fig. 10 Variation of compressive elastic modulus



(a) 抗压强度



(b) 极限应变



(c) 抗压弹性模量

图 11 直径变化的影响

Fig. 11 Effects of diameter variation

由图 11(b)可知:极限应变随着直径的增大而显著减小,这是因为随着直径的增大,外部缠绕的约束纤维丝对内部纤维的约束作用越小,且内部纤维分布的不均匀性增加,导致极限应变明显降低^[16].

由图 11(c)可知:试件的抗压弹性模量随着直径的变化未表现出明显的规律性;当长细比为 30 时,抗压弹性模量先下降后上升;当长细比分别为 45,60 时,抗压弹性模量始终保持上升趋势,且斜率增大.这与筋材本身的制作质量、两端碳钢套帽的约束效果及几何中心是否对中有关系^[16].

4 结论

1) 碳钢套帽的约束能够有效避免 CFRP 筋端部发生局部破坏,可较准确地反映筋材单轴受压时的破坏形态,即剪切破坏、劈裂破坏、压碎破坏和屈曲破坏.当发生压碎破坏时,CFRP 筋的抗压性能得以充分发挥,测得的抗压强度较高.

2) CFRP 筋为典型的脆性材料,加载过程未出现屈服平台,筋材应力-应变曲线保持线弹性增长。

3) CFRP 简单轴抗压强度随长细比的增大而减小,其减幅取决于筋材的破坏形态。其中,直径为 12 mm 的试件在接近破坏时发生内力重分布,其抗压强度的减幅最小。同样,对极限应变、抗压弹性模量的影响规律相似。

4) CFRP 筋的极限应变随着直径的增大而显著减小,而直径的增大对试件抗压强度、抗压弹性模量影响甚微。

参考文献:

- [1] 陈爽,吕海波,王磊.纤维增强塑料筋与珊瑚混凝土粘结滑移本构模型[J].桂林理工大学学报,2019,39(1):107-113. DOI:10.3969/j.issn.1674-9057.2019.01.012
- [2] AHMED A, GUO Shuaicheng, ZHANG Zuhua, *et al.* A review on durability of fiber reinforced polymer (FRP) bars reinforced seawater sea sand concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 256: 119484. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.119484.
- [3] 董志强,吴刚. FRP 筋增强混凝土结构耐久性能研究进展[J]. 土木工程学报, 2019, 52(10): 1-19, 29. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2019.10.001.
- [4] 徐扬,魏洋,程勋煜,等.碳纤维-箍筋约束倒角矩形混凝土柱的轴压性能[J].玻璃钢/复合材料,2019(6):5-11. DOI:10.3969/j.issn.1003-0999.2019.06.001.
- [5] XU Jie, WANG Weixin, HAN Qinghua. Mechanical properties of pultruded high-temperature-resistant carbon-fiber-reinforced polymer tendons at elevated temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2020, 258: 119526. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.119526.
- [6] 张世江,郭子雄,叶勇. CFRP 筋增强板加固石梁受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(6): 189-194, 204. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2018.0349.
- [7] 李彪,杨勇新,赵进阶,等. 结构工程用碳纤维复材筋力学性能影响因素试验研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(2): 72-75. DOI:10.19701/j.jzjg.2020.02.013.
- [8] 彭小丽,徐玉野,王卫华. 不同规范的 RC 梁抗剪加固式中 CFRP 抗剪贡献的计算方法比较[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2012, 33(6): 676-683. DOI:10.11830/issn.1000-5013.2012.06.0676.
- [9] 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. DOI:10.3321/j.issn:1000-131X.2009.10.007.
- [10] 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, 485. DOI:10.3969/j.issn.1006-7930.2006.04.005.
- [11] SIDDQUI N, ABBAS H, ALMUSALLAM T, *et al.* Compression behavior of FRP-strengthened RC square columns of varying slenderness ratios under eccentric loading[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 32(11): 101512. DOI:10.1016/j.job.2020.101512.
- [12] YORESTA F S, MARUTA R, MIEDA G, *et al.* Unbonded CFRP strengthening method for buckling control of steel members[J]. Construction and Building Materials, 2020, 241: 118050. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.118050.
- [13] CAMPIONE G, CANNELLA F, FERROTTO M F, *et al.* Compressive behavior of FRP externally wrapped R. C. column with buckling effects of longitudinal bars[J]. Engineering Structures, 2018, 168: 809-818. DOI:10.1016/j.engstruct.2018.05.027.
- [14] 朱春阳,王可心,孙天娇,等. 考虑粘结滑移的 FRP 筋混凝土柱偏压性能[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(2): 220-228. DOI:10.11717/j.issn:2095-1922.2020.02.04.
- [15] 郭容宽,唐迎春,饶晓文. FRP 筋材加固矩形截面混凝土柱的极限强度分析[J]. 结构工程师, 2018, 34(5): 142-148. DOI:10.3969/j.issn.1005-0159.2018.05.020.
- [16] 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. DOI:10.13204/j.gyjz201007018.

(责任编辑:钱筠 英文审校:方德平)