

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.004



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



CFRP 不同约束方式下拉挤型 GFRP 管混凝土组合柱的承载性能

杨文伟¹, 周海洋¹, 王痛快^{1,2}, 陈志伟¹

(1. 宁夏大学 土木与水利工程学院; 宁夏土木工程防震减灾工程技术研究中心, 银川 750021;

2. 贺州学院 建筑与电气工程学院, 广西 贺州 542899)

摘要:为提升拉挤型玻璃纤维复合材料(GFRP)管混凝土组合柱的承载能力,采用碳纤维增强复合材料(CFRP)布,以不同约束方式制作5根试件,并进行轴压试验,得到约束组合柱的破坏模式;通过对CFRP的约束效应及柱的承载性能分析,建立承载力计算模型。研究表明:试件破坏时拉挤型GFRP管及混凝土被压坏,部分试件伴有CFRP条带状撕裂。随着横向约束效应的增加,破坏形态由典型的劈裂破坏向脆性压碎破坏及剪切破坏发展。试件承载力随CFRP间距的减小逐渐增大,CFRP间距 <100 mm时试件承载力大幅提高,最大可达1.5倍以上,CFRP间距 ≥ 100 mm时,承载力提升并不明显。CFRP间距变化、布置方式对试件变形性能影响显著,可明显改善构件的延性。基于约束混凝土理论,考虑不同CFRP间距及GFRP承载作用效应,建立的试件承载力计算模型计算结果精度较高。

关键词:CFRP布;拉挤型GFRP管;混凝土短柱;组合柱;承载力计算模型

中图分类号:TU312; TU398 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2025)02-0141-10

Bearing capability of concrete-filled pultruded GFRP combination columns tube with different restraints of CFRP

YANG Wenwei¹, ZHOU Haiyang¹, WANG Tongkuai^{1,2}, CHEN Zhiwei¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering; Ningxia Center for Research on Earthquake Protection and Disaster Mitigation in Civil Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, P. R. China; 2. School of Architecture and Electrical Engineering, Hezhou University, Hezhou 542899, Guangxi, P. R. China)

Abstract: In order to improve the carrying capacity of the pultruded glass fiber reinforced plastics (GFRP) tube, five specimens were produced with carbon fiber reinforced plastics (CFRP) cloth with different restraint methods and axial compression tests were conducted. The damage mode of this restrained combined column was obtained. Through the analysis of the CFRP restraint effect and the load-bearing performance of this column,

收稿日期:2022-09-27

基金项目:国家自然科学基金(52168025);宁夏自然科学基金(2021AAC03116);广西贺州市科技开发计划项目(贺科攻1908006);广西重点研发计划(桂科AB22036002)

作者简介:杨文伟(1967-),男,教授,博士生导师,主要从事新结构抗震及减隔震控制研究, E-mail: nxyangww@163.com。

Received: 2022-09-27

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52168025); Natural Science Foundation of Ningxia (No. 2021AAC03116); Science and Technology Program of Hezhou, Guangxi (No. 1908006); Key Research and Development Program of Guangxi (No. AB22036002)

Author brief: YANG Wenwei (1967-), professor, doctoral supervisor, main research interests: seismic and vibration isolation control of new structures, E-mail: nxyangww@163.com.

the load-bearing capacity calculation model was established. The results show that the squeezed GFRP and the concrete are crushed when the test piece is damaged, some specimens were accompanied by a band tear of CFRP. Disruption morphology increases with the effect of lateral constraint, development from typical cracking fracture to brittle crushing destruction and shear destruction. The bearing capacity of test parts gradually increases with the decrease of CFRP distance, test piece bearing capacity can be greatly improved at a CFRP distance of <100 mm, Maximum increase of 1.5 times, when the CFRP spacing is ≥ 100 mm, the improvement of the carrying capacity is not obvious. The change of CFRP spacing and layout mode improved the deformation performance of the test parts significantly, the ductility of the components can be significantly improved. Based on the theory of restrained concrete, the calculation model of specimen bearing capacity established by considering different CFRP spacing and the effect of GFRP bearing action has a high accuracy of calculation results.

Keywords: CFRP cloth; pultruded GFRP tube; short concrete columns; combination columns; carrying capacity calculation model

纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)能适应现代工程结构向大跨、高耸、重载、高强和轻质发展以及承受恶劣条件的需要,符合现代施工技术的工业化要求^[1]。FRP主要包括玻璃纤维增强复合材料(GFRP)、碳纤维增强复合材料(CFRP)、芳纶增强复合材料(AFRP)等。CFRP材料因具有良好的抗拉性、耐久性及高耐腐蚀性等优点,在工程加固中发挥了重要作用,并被广泛应用^[2]。近年来,围绕缠绕型GFRP管约束混凝土组合柱受力性能的研究取得了较多成果^[3]。但对于拉挤型GFRP管混凝土组合柱受力性能的研究还处在起步阶段^[4-5]。

Puente等^[6]对矩形拉挤型GFRP管短柱开展试验研究,并建立了承载力理论计算模型。马森等^[7]探讨了提高拉挤型FRP管轴向压缩强度的途径,发现拉挤型FRP外包管轴向压缩承载力主要受端部控制,增加端部约束可显著提高其承载力,并且在FRP管端部约束下增加包裹厚度对提高承载力也较为有利。Bai等^[8]开展了轴压作用下拉挤型GFRP短柱火灾性能系列试验。Cardoso等^[9]建立了考虑初始缺陷矩形拉挤型GFRP柱承载力计算模型,基于试验结果,验证了公式的准确性。基于Hashin准则,周毛毛^[10]运用有限元ABAQUS分析软件研究了拉挤型GFRP管在常见边界条件下的破坏特征及临界长细比,发现边界条件、壁厚对拉挤型GFRP管破坏形态转变的临界长细比影响不大,主要与GFRP管径厚比有关。Chen等^[11-12]、Zhang等^[13]对拉挤型GFRP构件腹板屈曲性能进行了一系列试验研究与数值模拟,建立了腹板屈曲极限承载力计算公式。Lokuge等^[14]研究了圆形、正方形及矩形的拉挤型GFRP管地聚物混凝土柱轴压性能,得到了不同截面形式下该新型组合柱的破坏特征。近年来,

杨霞等^[15]考虑CFRP布不同加固层数对缠绕型GFRP管组合柱的影响,设计了CFRP不同布置方式下缠绕型GFRP管混凝土柱试验,将CFRP用于缠绕型GFRP管混凝土柱的加强,发现CFRP两端及中部约束和整体约束可显著提高试件延性。而缠绕型与拉挤型GFRP管成型工艺不同,受力性能存在较大差异,而CFRP约束拉挤型GFRP组合柱的破坏形态及受力机理仍有待探讨。胡鹏兵等^[16]将CFRP布用于加固方形拉挤型GFRP管混凝土短柱,形成组合构件,对其力学性能进行了试验研究,发现CFRP布可显著提高试件承载力,试件破坏模式与CFRP布的加固层数有很大关系,随着CFRP加固层数的增加,试件延性得到提高。但未考虑CFRP布的布置方式及布置间距对组合试件的影响。

综上,对于拉挤型GFRP管的研究主要集中于材料及内部混凝土柱的力学性能,针对CFRP环向约束拉挤型GFRP管混凝土短柱的布置间距及布置方式的研究还鲜有报道。由于拉挤型GFRP管的成型工艺,其轴向抗拉、抗压强度较高,环向强度很低。利用抗拉强度高的CFRP环向约束拉挤型GFRP管,有利于充分发挥各自的材料性能。基于此,笔者以不同的CFRP间距及布置方式为研究参数,制作5个试件,开展轴压试验,研究CFRP约束拉挤型GFRP管混凝土组合短柱的受力性能。对比不同约束形式下组合柱的破坏形式,揭示CFRP不同加固方式对组合短柱变形性能的影响。此外,结合CFRP约束效应及组合柱承载性能分析,建立CFRP约束拉挤型GFRP管混凝土短柱的承载力计算模型,为拉挤型GFRP管混凝土柱的加固改造提供理论依据。

1 试验概况

1.1 试件设计

以不同 CFRP 约束间距及布置方式为研究参数,制作了 5 根试件,其中 1 根为没有约束的拉挤型 GFRP 管混凝土组合柱,编号为 A1,其余 4 根试件为 CFRP 约束拉挤型 GFRP 管混凝土组合柱,编号分别为 A2~A5。图 1 为试件设计大样,CFRP 约束试件沿高度方向粘贴示意及浇筑成型如图 2、图 3 所示。试件 A2CFRP 宽度为 100 mm,间距为 100 mm;试件 A3CFRP 宽度为 200 mm,粘贴在试件中间位置;试件 A4CFRP 宽度两端均为 50 mm,中间为 100 mm,粘贴间距为 50 mm。所有试件高度为 300 mm,外径均为 121

mm,内径为 113 mm,GFRP 管壁厚为 4 mm。表 1 为试验试件主要参数。

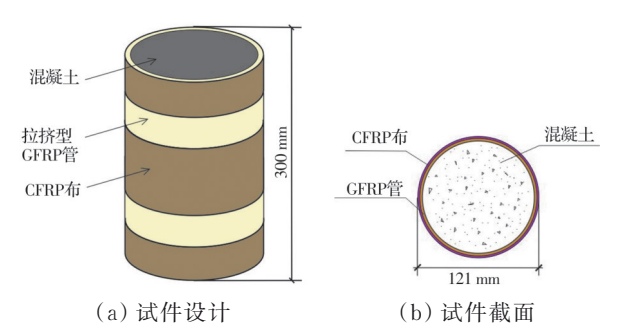


图 1 试件设计及截面形式
Fig. 1 Design and section

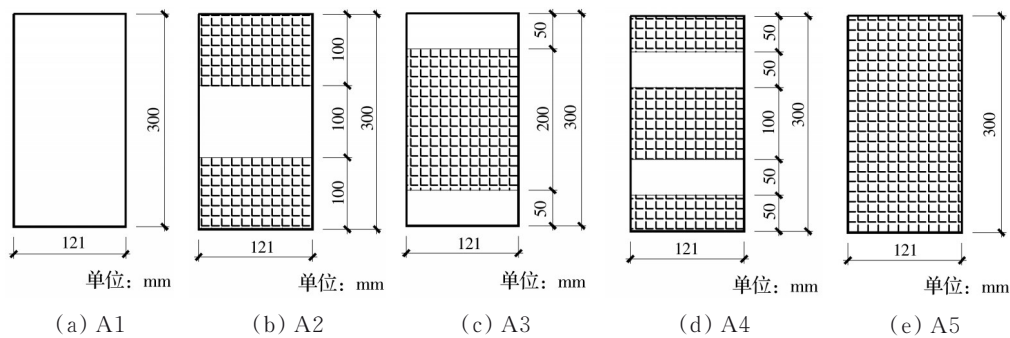


图 2 不同试件 CFRP 布置方式
Fig. 2 CFRP arrangement of different specimens

表 1 试件主要参数

Table 1 Main parameters of test parts

试件编号	砼强度	GFRP 管 内径/mm	GFRP 管 壁厚/mm	CFRP 布 间距/mm	CFRP 布 布置方式	CFRP 布 粘贴层数	CFRP 布 厚度/mm
A1	C30	113	4		未约束	1	0.17
A2	C30	113	4	100	两端约束	1	0.17
A3	C30	113	4		中间约束	1	0.17
A4	C30	113	4	50	两端+中间	1	0.17
A5	C30	113	4	0	全约束	1	0.17

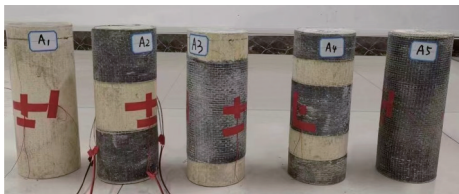


图 3 浇筑制作完成试件
Fig. 3 Completed test parts

1.2 试验材料

试件浇筑制作混凝土强度为 C30,实测同条件养护标准试块平均抗压强度为 29.9 MPa。GFRP 管为河北某公司生产的拉挤型 GFRP 管,其泊松比为 0.3,弹性模量、屈服强度及抗拉强度参数见表 2。CFRP 布来自某公司生产的碳纤维布,其性能参数见表 3。

表 2 拉挤型 GFRP 管性能指标

Table 2 Performance index of pull-squeeze GFRP tube

工艺成型方向	弹性模量/MPa	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
纵向	47	345	635
横向	8.5	140	45

表 3 CFRP 性能指标

Table 3 CFRP performance indicators

厚度/mm	弹性模量/MPa	抗拉强度/MPa	极限应变/%
0.17	2.4×10^5	3 521	1.68

1.3 测试方案及加载

轴压试验在宁夏大学基础力学实验室 3 000 kN 电液伺服压力机上完成,试件加载按照《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)^[17]规范要求,首先对试件进行预加载,预加力值为 15% 极限

承载力,测试仪器仪表状态及试件对中情况;正式加载采用力控加载,加载速率按 3 kN/s 进行连续加载,当试验荷载下降至极限承载力的 80% 时,停止加载。试件测点应变值及竖向位移计数据通过 DH3816 静态应变采集仪采集,试验力值由压力机控制及采集,试验加载示意及实物如图 4 所示。测点布置示意如图 5 所示,图中 Z、H 分别代表轴向与环向应变测点。

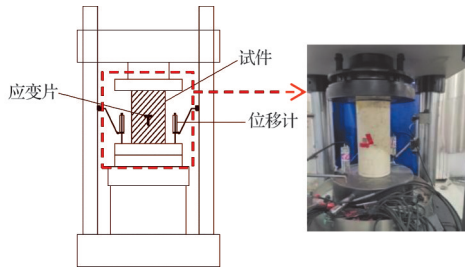


图 4 试件加载示意及实物图

Fig. 4 Test piece loading diagram and physical drawing

2 试验结果与分析

2.1 破坏特征

加载初期,试件基本处于弹性状态,荷载与应

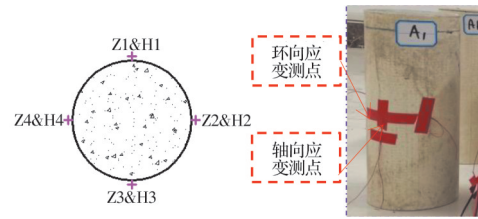


图 5 测点布置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the test point layout

变基本呈线性变化,拉挤型 GFRP 管、混凝土及 CFRP 布能够相互协调,共同工作;随着荷载的增大,试件出现轻微响声,主要由混凝土和 GFRP 挤压产生。当加载至接近试件极限荷载时,试件均出现不同程度挤压响声,且持续时间增加;随着荷载继续增加,试件达到破坏,出现巨大“嘭”的响声,试件承载力迅速下降。试件破坏时,可以明显看到拉挤型 GFRP 管沿环向拉裂、轴向断裂及混凝土被压碎,部分试件伴有 CFRP 条带状炸裂及压碎混凝土溅出现象。

图 6 为不同试件的典型破坏形态。可以看出,不同 CFRP 间距及布置方式对约束拉挤型 GFRP 组合柱破坏形态影响较大。

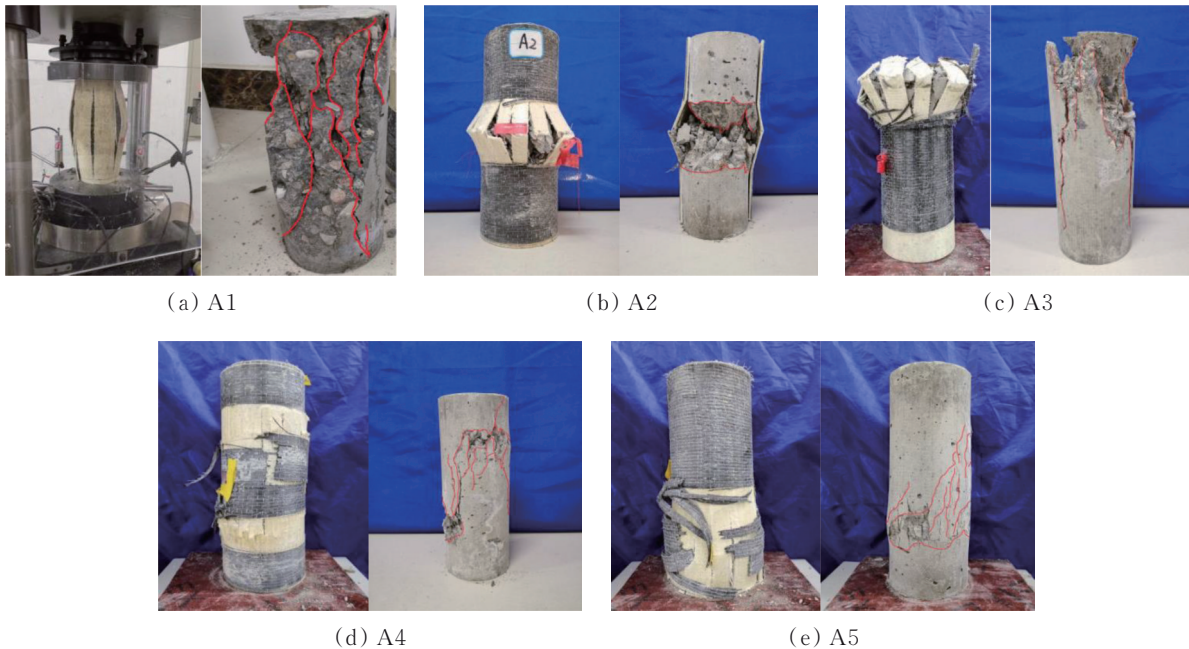


图 6 不同试件破坏形态

Fig. 6 Different specimen destruction morphology

由于无 CFRP 侧向约束,试件 A1 破坏时,轴向应力使混凝土横向变形较大,导致拉挤型 GFRP 环向应力大于环向极限承载力,GFRP 出现开裂,沿轴向出现多条竖向贯通裂缝。内部混凝土由于 GFRP 约束作用较小,产生竖向裂缝,破坏面上存在多条平行于试件轴向的主裂缝,属于典型的劈裂破坏^[18];

考虑 CFRP 在上下端能够有效提供侧向约束,限制端部混凝土竖向裂缝发展,试件 A2 CFRP 约束区并没有出现破坏现象。破坏区出现在试件中部,破坏时 CFRP 未见明显撕裂拉断,在轴力和混凝土侧向压力作用下,拉挤型 GFRP 管沿轴向出现多条竖向主裂缝及压断现象。内部混凝土出现典型的倒锥

形压碎现象,类似于圆柱体混凝土轴压破坏形态;试件A3中部布有CFRP约束,限制混凝土的横向变形,使得混凝土裂缝难以向中部发展,试件破坏区出现在加载端,伴有外部CFRP拉裂现象,拉挤型GFRP管破坏延伸至CFRP约束区内,GFRP管与内部混凝土均被压坏;试件A4间隔布置的CFRP布较大地提高了试件的侧向约束力,破坏时中部CFRP出现撕裂现象,拉挤型CFRP管明显被压断。试件内部混凝土出现明显的斜向裂缝,在CFRP侧向约束作用下,有效抑制了混凝土竖向裂缝发展,裂缝由竖向转变为斜向发展,混凝土发生典型的剪切破坏。由于局部变形过大,试件A5CFRP出现撕裂并与拉挤型GFRP管发生脱离,拉挤型GFRP管迅速被压坏。CFRP破坏只出现在局部范围内,其他部分CFRP与拉挤型GFRP黏结较好,部分CFRP出现压褶,较试件A4,在较强侧向约束作用下,内部混凝土斜向裂缝角度随侧压力的增大而减小。随着侧向约束的提高,试件内部混凝土呈现从斜向剪切破坏向横向剪切破坏发展的趋势。

不同CFRP间距及布置方式下试件的破坏特征。随着横向约束效应的不断增加,试件由典型的劈裂破坏向脆性压碎破坏及剪切破坏发展,部分试件伴有CFRP撕裂破坏,发展为脆性断裂破坏。说明CFRP沿轴向布置越均匀,侧向约束越好,可有效抑制混凝土竖向裂缝的发展,提高试件的力学性能。

2.2 荷载-应变曲线

图7为不同试件荷载-应变曲线。在加载初期,不同试件荷载-应变曲线斜率基本相同,试件处于弹性状态。随着荷载的增大,荷载-应变曲线斜率逐渐减小,呈非线性变化,试件由弹性状态逐渐向塑性状态过渡。由图7可以看出,较未布置CFRP试件,不同CFRP间距及布置方式下约束拉挤型GFRP管组合柱极限承载力及轴向变形均有较大提高,荷载-横向应变曲线斜率均降低,说明在侧向约束作用下,试件破坏速率降低^[19]。以CFRP布置间距为研究参数,对比图7中试件A1、A2、A4、A5曲线根据可知,随着CFRP沿轴向布置间距不断减小,荷载-轴向应变曲线斜率逐渐减小,试件的极限承载力及峰值应变逐渐增大。主要原因是随着CFRP间距变小,CFRP提供侧向约束作用范围不断增大,集中在沿轴向非CFRP约束区的横向变形减少,在非CFRP约束区内部,混凝土形成的薄弱面减少。间距在一定范围内时,试件内部混凝土沿轴向基本处于三向应力状态下,抗压强度及变形提高,同时,CFRP为外层拉挤型GFRP提供侧向约束支撑,在

轴力及混凝土侧向压应力作用下,抑制了GFRP出现屈曲破坏,充分发挥了拉挤型GFRP管的抗压强度。以CFRP布置方式为研究参数,由图7中试件A1、A2、A3、A5的曲线对比可知,试件A2、A3及A5相较试件A1承载力及峰值应变均增加,中部布置有CFRP约束的试件极限承载力显著提高,表明中间布置CFRP对提高试件极限承载力效果明显优于端部约束。中部布置有CFRP的试件可有效防止内部混凝土竖向裂缝发展,较两端CFRP约束试件,更有利于提高试件的承载力。中部布置而端部没有布置CFRP约束的试件,压力机加载板及GFRP管较CFRP对试件端部约束效果较差,容易在试件端部产生应力集中,试件破坏出现端部约束薄弱区。

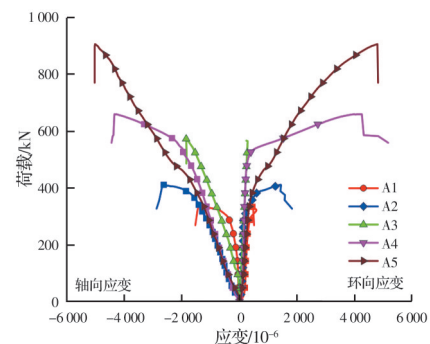


图7 不同试件荷载-应变曲线

Fig. 7 Load-strain curves for different specimens

2.3 荷载-位移曲线

图8为不同试件荷载-位移曲线。由图8可知,试件荷载-位移曲线变化趋势基本保持一致,不同CFRP布置方式对试件的极限承载力和变形能力影响明显。由试件荷载-位移曲线可以看出,曲线主要分为3段,第1段,曲线斜率较小且相对稳定,布置有CFRP约束的试件与试件A1基本保持一致,说明CFRP对试件未产生约束作用;第2段,试件内部混凝土横向变形加大,混凝土、拉挤型GFRP管及CFRP产生相互约束作用,CFRP对拉挤型GFRP混凝土组合柱产生较大的约束力,试件内部混凝土处于三向应力状态,由弹性状态逐渐进入塑性状

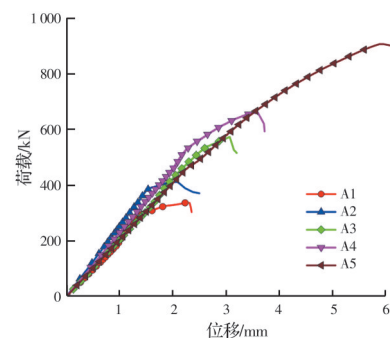


图8 不同试件荷载-位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curves for different specimens

态。第 3 段为破坏阶段,试件内部混凝土横向变形过大,拉挤型 GFRP 管破坏及部分 CFRP 被撕裂,混凝土被压碎,发生脆性破坏。

2.4 承载力及变形指标影响分析

2.4.1 承载力及变形指标计算

试件极限承载力以及变形指标反映了试件的主要参数。为了进一步量化评价不同 CFRP 约束方式对拉挤型 GFRP 混凝土组合柱的加固效果,根据荷载-位移曲线计算试件的极限承载力、初始刚度

K_0 及变形系数 ζ 等参数,作为试件变形主要指标,承载力及变形指标参数计算结果见表 4。其中,轴压试验极限荷载为试件的极限承载力;荷载-位移曲线的斜率反映了试件的刚度指标,初始刚度 K_0 取荷载-位移曲线 50% 极限荷载对应的割线斜率;荷载-位移曲线的位移比值作为试件的变形系数 ζ ,变形系数 ζ 取荷载-位移曲线中极限荷载下降至 90% 时对应的位移 Δy 与屈服位移 Δs 的比值。

表 4 承载力及变形指标计算结果

Table 4 Calculation results of bearing capacity and deformation indicators

试件编号	极限承载力/kN	$K_0/(\text{kN/m})$	峰值点位移/mm	$\Delta s/\text{mm}$	$\Delta y/\text{mm}$	ζ	承载力提高系数
A1	336.92	193 523	2.292	1.824	2.352	1.29	1.0
A2	411.67	252 753	2.076	1.536	2.5	1.63	1.22
A3	572.97	203 976	3.07	2.05	3.2	1.56	1.70
A4	659.55	230 020	3.536	2.24	3.726	1.66	1.96
A5	906.07	203 466	5.962	2.335	6.2	2.66	2.69

2.4.2 不同参数对试件性能的影响

CFRP 间距对试件性能的影响,只讨论两端都有约束的同一条件,即在试件 A2、A4、A5 与对比柱 A1 之间进行对比分析。图 9~图 11 分别展示了不同 CFRP 间距和布置方式对试件承载力、初始刚度 K_0 、变形系数 ζ 的影响。

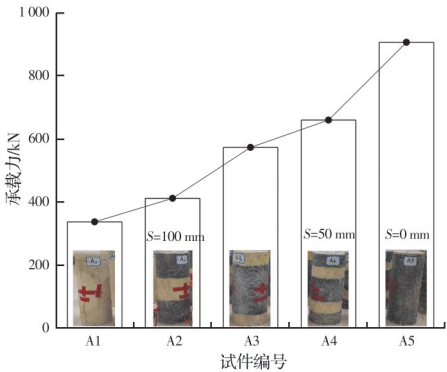


图 9 CFRP 间距和布置方式变化对承载力的影响

Fig. 9 Effect of CFRP spacing and layout on bearing capacity

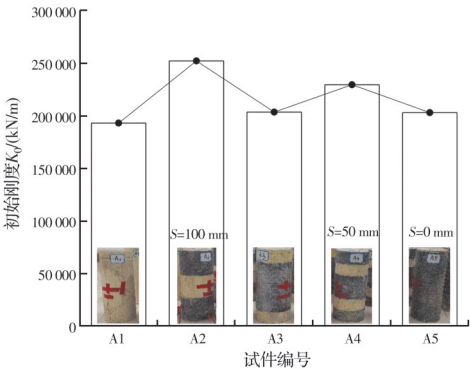


图 10 CFRP 间距和布置方式变化对初始刚度的影响

Fig. 10 Effect of CFRP spacing and layout on initial stiffness

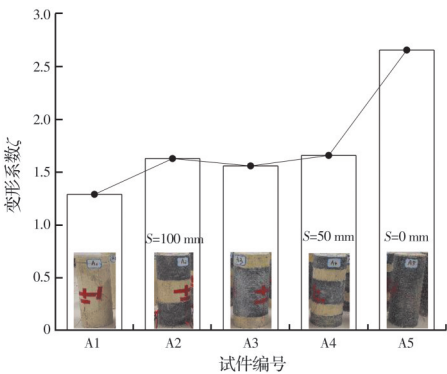


图 11 CFRP 间距和布置方式变化对变形系数的影响

Fig. 11 Effect of CFRP spacing and layout on deformation coefficient

图 9 所示为 CFRP 间距变化和布置方式对承载力的影响。由图 9 可知,较未约束试件,不同 CFRP 间距及布置方式下约束试件承载力均增加,试件 A2、A4、A5 较 A1 承载力分别提高了 22%、96%、169%,CFRP 间距变化对承载力影响较为显著,试件承载力随 CFRP 间距减小逐渐增大,当 CFRP 间距低于 50 mm,试件承载力大幅提高。CFRP 布置方式对承载力的影响也较为明显,较试件 A2,试件 A3、A5 承载力分别提高 39%、120%,CFRP 中间布置及全部布置超过两端布置试件承载力。

图 10 所示为 CFRP 间距和布置方式变化对初始刚度 K_0 的影响。由图 10 可知,初始刚度 K_0 随 CFRP 间距减小而降低;对比 CFRP 布置方式可知,试件两端 CFRP 约束长度对不同 CFRP 约束试件初始刚度的影响较为明显,随着端部 CFRP 约束长度的增加,初始刚度增大,试件加载时能够较好地防止端部裂缝的发展,损伤主要产生在试件中部。而

全部约束试件整体受力均匀,在弹性阶段基本与未约束试件保持一致。

图11所示为CFRP间距和布置方式变化对变形系数 ζ 的影响。由图11可知,相比于无CFRP约束试件不同CFRP间距试件变形系数均增大,CFRP间距 $S=100\text{ mm}$ 及 $S=50\text{ mm}$ 的试件变形系数分别为1.63、1.66,基本保持相一致。但 $S=0$ 时,较试件A2、A4,对比柱提高了63%、60%,试件变形系数显著提高。考虑CFRP布置方式对变形系数的影响,CFRP两端及中间布置约束试件变形系数基本保持一致,CFRP全部布置约束试件变形系数明显提高。综上,CFRP约束加固组合柱有利于提高试件变形性能,使用CFRP全部包裹组合柱试件变形性能最优,具有CFRP间距且不同布置方式试件变形性能基本保持一致,原因主要是CFRP间存在间距时,试件沿轴向存在约束薄弱区,造成试件提前失效,较CFRP全包裹的试件A5,变形性能均降低。

3 承载力计算

3.1 CFRP约束拉挤型GFRP管混凝土组合柱受力机理分析

CFRP约束拉挤型GFRP管混凝土组合柱实质上为CFRP约束混凝土构件,在轴压荷载作用下,试件会产生横向变形,由于材料泊松比存在差异,横向变形不同,相互产生约束作用。拉挤型GFRP管受到轴向压力和侧向混凝土挤压作用,分别产生沿轴向的压应力及沿环向的拉应力。CFRP主要承受环向拉应力,与拉挤型GFRP管共同起到约束混凝土作用。在CFRP及GFRP侧向约束作用下,混凝土处于三向受压状态,抗压强度及变形性能提高,根据约束混凝土基本理论,侧向约束作用越强,对试件承载力越有利。对于CFRP存在间距的试件,由于CFRP布之间的间距影响,试件存在CFRP强约束区和弱约束区,强约束区混凝土强度提高最多。弱约束区因侧向约束力减小,混凝土强度提高较少,容易形成试件截面薄弱区,产生截面破坏。

3.2 CFRP约束效应分析

对试验结果及试件受力机理分析表明,其作用效应与钢筋混凝土柱箍筋对混凝土约束效果类似,CFRP粘贴区域试件约束作用较强,而CFRP间隔区域内约束作用较弱。考虑CFRP对组合柱约束存在不均匀性,引入试件混凝土有效约束系数 k_e ,分析CFRP间距和布置方式对试件承载力的影响。采用统一强度理论对核心混凝土及拉挤型GFRP管进行受力计算分析,基于经典叠加理论推导CFRP约束拉

挤型GFRP混凝土组合柱承载力理论计算公式。

CFRP约束试件弱约束区应力可分为拉挤型GFRP管环向约束力及CFRP沿 45° 方向弱约束区传递的约束应力。弱约束区CFRP产生的应力分布近似呈拱形抛物线,其中,最薄弱截面为抛物线顶点处截面,且作为控制截面。约束应力分布控制截面面积 A_{ce} 及弱约束区混凝土有效约束系数 k_e 按文献[19]方法计算,约束应力分布控制截面面积 A_{ce} 为

$$A_{ce} = \frac{\pi d^2}{4} \left(1 - \frac{S_c}{2d}\right)^2 \quad (1)$$

式中: d 为GFRP管外径; S_c 为CFRP粘贴间距。

CFRP约束试件弱约束区混凝土有效约束系数 k_e 计算式为

$$k_e = \frac{A_{ce}}{A_c} = \frac{A_{ce}}{\pi d^2/4} = \left(1 - \frac{S_c}{2d}\right)^2 \quad (2)$$

3.3 承载力计算假定

目前,对CFRP约束拉挤型GFRP管组合柱的承载力计算公式的研究较少。基于试件试验结果及理论分析,笔者同时考虑CFRP及拉挤型GFRP管对混凝土的双重约束效应,改进计算混凝土约束强度 f_{ce} ,以GFRP管受力计算模型和混凝土统一双剪理论为破坏准则,利用经典叠加理论方法,推导承载力理论计算公式。

承载力计算假定如下:

- 1)试件满足平截面假定。
- 2)假定CFRP、拉挤型GFRP管及混凝土之间粘结可靠,无相对滑移,变形协调一致。
- 3)假定CFRP为理想弹性材料,不考虑CFRP轴向刚度,只考虑CFRP环向抗拉作用,CFRP达到极限应变发生断裂,应力-应变满足线性变化。
- 4)考虑拉挤型GFRP管厚度较小,忽略径向应力的作用。
- 5)小变形假定,可忽略尺寸变化对承载力的影响。

3.4 公式推导

3.4.1 CFRP及拉挤型GFRP管受力计算

CFRP约束试件中只考虑CFRP环向受拉作用,组合柱的侧向约束力为 f_{11} ,力学计算简图见图12(a),根据受力平衡条件计算可得

$$f_{11} = \frac{E_{CFRP} \epsilon_{CFRP} 2t_f S}{d(S + S_c)} \quad (3)$$

式中: E_{CFRP} 、 ϵ_{CFRP} 分别为CFRP弹性模量及极限应变; t_f 为CFRP厚度; d 为拉挤型GFRP管外径; S 为CFRP宽度; S_c 为CFRP间距。

在轴压荷载作用下,拉挤型GFRP管对混凝土约束力为 f_{12} ,受力简图与图12(a)相同,根据受力平衡计算可得

$$f_{l2} = \frac{\sigma_{Gf} 2t_{Gf}}{d_0} \quad (4)$$

式中: σ_{Gf} 为拉挤型 GFRP 管应力; t_{Gf} 为 GFRP 厚度; d_0 为拉挤型 GFRP 管内径。

GFRP 管受力模型见图 12(b), 试件达到极限状态时, GFRP 管应力-应变关系^[20]为

$$\epsilon_r = \frac{\sigma_r}{E_r} - \nu_{r\theta} \frac{\sigma_\theta}{E_\theta} \quad (5)$$

$$\epsilon_\theta = \frac{\sigma_\theta}{E_\theta} - \nu_{\theta r} \frac{\sigma_r}{E_r} \quad (6)$$

式中: ϵ_r 、 ϵ_θ 分别为 GFRP 管轴向、环向应变; σ_r 、 σ_θ 分别为 GFRP 管轴向、环向应力; $\nu_{r\theta}$ 、 $\nu_{\theta r}$ 分别为 GFRP 管环向、轴向泊松比; E_r 、 E_θ 分别为 GFRP 管轴向、环向弹性模量。

联立式(5)、式(6)计算可得拉挤型 GFRP 管轴向应力为

$$\sigma_r = \left(\frac{\sigma_\theta \nu_{r\theta}}{E_\theta} + \epsilon_r \right) E_r \quad (7)$$

GFRP 管是否破坏是否将环向应力 σ_θ 与断裂应力 $\sigma_{\theta,u}$ 进行比较判别。

$$\sigma_\theta \leq \sigma_{\theta,u} = f_u \quad (8)$$

将式(8)带入式(7), 计算可得极限抗压强度 f_i

$$f_i = \left(\frac{f_u \nu_{r\theta}}{E_\theta} + \epsilon_r \right) E_r \quad (9)$$

3.4.2 约束混凝土受力计算

在轴压作用下, CFRP 约束试件内部混凝土受到 CFRP 横向约束, 由单向受力状态转为三向受力状态, 受力模型见图 12(c)。根据混凝土所受应力大小关系 $0 > \sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$, 满足统一双剪理论^[21]条件。

$$F' = \frac{1}{1+b} (\sigma_1 + b\sigma_2) - \alpha\sigma_3 = \sigma_1, \quad \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \quad (10)$$

式中: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为材料 3 个主应力; $\alpha = \frac{\sigma_1}{\sigma_c}$, 为材料抗拉与抗压强度比; b 为反映不同强度理论参数及中间主应力效应的材料参数。

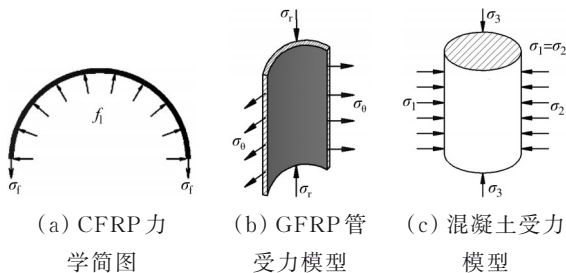


图 12 CFRP 约束拉挤型 GFRP 管混凝土组合柱各部分受力模型

Fig. 12 Force model for each part of CFRP restrained pultruded GFRP tube concrete composite column

将 $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ 带入式(10)得

$$\sigma_1 - \alpha\sigma_3 = f_i \quad (11)$$

式中: f_i 为混凝土抗拉强度, $f_i = \frac{2c \cos \varphi}{1 + \sin \varphi}$, c 、 φ 分别为混凝土粘聚力及内摩擦角。 f_c 为混凝土抗压强度, $f_c = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$ 。

混凝土圆柱体抗压强度 f_c 与立方体抗压强度 $f_{cu,k}$ 的换算按文献[22]计算。令 $k = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = \frac{f_c}{f_i} = \frac{1}{\alpha}$, 带入式(11)可得

$$\sigma_3 = f_c + k\sigma_1 \quad (12)$$

式中: σ_3 为混凝土纵向压应力; σ_1 取为混凝土横向约束力 f_i 。

对于 CFRP 约束拉挤型混凝土组合柱试件内部混凝土抗压强度 f_{cc} , 考虑 CFRP 的约束效应, 将式(2)~式(4)带入式(12)可得

$$f_{cc} = f_c + k(k_e f_{i1} + f_{i2}) \quad (13)$$

式中: k 为混凝土约束系数, 对于 CFRP 约束试件, 取 4.1^[23]。

3.5 承载力计算公式

基于约束混凝土构件基本理论, 构建 CFRP 约束拉挤型 GFRP 混凝土组合柱承载力计算公式^[24], 试件承载力 N 主要包括两个部分: 混凝土提供的承载力 N_c 和拉挤型 GFRP 管提供的承载力 N_i 。由静力平衡条件建立承载力方程

$$N_u = N_c + N_i = f_{cc} A_c + f_i A_i \quad (14)$$

式中: f_{cc} 为混凝土抗压强度; A_c 为混凝土面积, $A_c = \frac{\pi d_0^2}{4}$; f_i 为拉挤型 GFRP 管轴向抗压强度; A_i 为 GFRP 管面积, $A_i = \frac{\pi - (d^2 - d_0^2)}{4}$, 其中, d 为 GFRP 管外径, d_0 为 GFRP 管内径。

承载力试验结果及试件破坏形态表明, 对于试件 A1、A2, 由于拉挤型 GFRP 侧向约束支撑间距较大, 试件破坏时 GFRP 管开裂后发生弯折, 提供承载力较小。鉴于此, 引入拉挤型 GFRP 管作用效应系数 λ , 考虑 GFRP 管的承载作用。由试验结果考虑 λ 取值

$$\lambda = \begin{cases} 0, & S_c \geq 100 \\ 1, & S_c \leq 100 \end{cases} \quad (15)$$

将式(2)~式(13)及式(15)中的参数带入式(14), 得到试件承载力理论计算公式为

$$N_u = \left(f_c + k \left(\left(1 - \frac{S_c}{2d} \right)^2 \frac{E_{CFRP} \epsilon_{CFRP} 2t_f S}{d(S + S_c)} + \frac{f_u 2t_{Gf}}{d_0} \right) \right) A_c + \lambda \left(\frac{f_u \nu_{r\theta}}{E_\theta} + \epsilon_r \right) E_r A_i \quad (16)$$

根据式(16)对试件承载力进行计算,试件承载力试验结果 N_{exp} 与计算结果 N_u 的对比见表5,试验值与计算值散点图见图13。通过对比分析试件承载力试验值与计算值可知,计算值与理论值最大误差低于10%,说明承载力试验值与计算值吻合度较高,该承载力理论计算公式具有较高精度,验证了理论计算公式的正确性。

表5 试件承载力试验结果与计算结果对比

Table 5 Comparison of test piece bearing capacity test results and calculation results

试件编号	试验结果 N_{exp}/kN	计算结果 N_u/kN	N_u/N_{exp}
A1	336.92	370.876	1.10
A2	411.67	441.041	1.07
A3	572.97	632.445	1.10
A4	659.55	632.553	0.96
A5	906.07	813.537	0.90

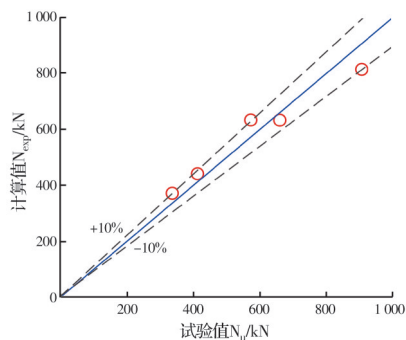


图13 试件承载力计算值与试验值散点图

Fig. 13 Scatter plot of calculated value of test piece bearing value and test value

4 结论

1)不同CFRP间距及布置方式下试件破坏特征。随着横向约束效应的增加,试件由典型的劈裂破坏向脆性压碎破坏及剪切破坏转变,并伴有CFRP撕裂,试件发展为脆性断裂破坏。

2)试件承载力随CFRP间距减小而逐渐增大,CFRP间距减小,横向约束应力增加,承载力显著提高,CFRP间距 $<100\text{ mm}$ 时,试件承载力大幅提高,最大提高了1.5倍;CFRP间距 $\geq 100\text{ mm}$ 时,承载力提高并不明显。而CFRP布置方式对承载力的影响也较为显著,CFRP中间布置及全部布置较CFRP两端布置试件承载力分别提高了39%、120%。

3)CFRP间距变化、布置方式对初始刚度 K_0 的影响。随着CFRP间距的减小,初始刚度先增加后减小,CFRP两端布置试件相对较好,总体而言,参数变化对初始刚度 K_0 影响不大。而CFRP约束有利于提高试件变形系数,较对比试件,最大提高了106%,明显改善了构件的延性。

4)基于约束混凝土理论,考虑不同CFRP间距及GFRP承载作用效应,建立试件承载力计算模型,根据试验结果,验证了承载力计算模型的正确性,且计算结果精度较高。

参考文献

- [1] 叶华文,唐诗晴,段智超,等.纤维增强复合材料桥梁结构2019年度研究进展[J].土木与环境工程学报(中英文),2020,42(5):192-200.
YE H W, TANG S Q, DUAN Z C, et al. State-of-the-art review of the application of fiber reinforced polymer in bridge structures in 2019 [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(5): 192-200. (in Chinese)
- [2] 岳清瑞.我国碳纤维(CFRP)加固修复技术研究应用现状与展望[J].工业建筑,2000,30(10):23-26.
YUE Q R. Present status of research and application of strengthening and repairing technology with carbon fibre reinforced plastics (CFRP) and its outlook in China [J]. Industrial Construction, 2000, 30(10): 23-26. (in Chinese)
- [3] 史庆轩,戎翀,陈云泉.FRP-钢-混凝土组合柱的研究现状[J].建筑材料学报,2019,22(3):431-439.
SHI Q X, RONG C, CHEN Y X. Research status of FRP-steel-concrete composite columns [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(3): 431-439. (in Chinese)
- [4] 郭展,易程程,何康,等.带初始缺陷的拉挤型GFRP管轴压性能试验研究[J].广西大学学报(自然科学版),2019,44(2):477-485.
GUO Z, YI C C, HE K, et al. Experimental research of pultrusion GFRP tubes with initial defect under axial compression [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2019, 44(2): 477-485. (in Chinese)
- [5] 李峰,李达,朱锐杰.基于套管屈曲约束的拉挤型GFRP管轴压性能[J].复合材料学报,2021,38(10):3255-3269.
LI F, LI D, ZHU R J. Axial compression performance of pultruded GFRP tube based on casing buckling restraint [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(10): 3255-3269. (in Chinese)
- [6] PUENTE I, INSAUSTI A, AZKUNE M. Buckling of GFRP columns: An empirical approach to design [J]. Journal of Composites for Construction, 2006, 10(6): 529-537.
- [7] 马森,黄亚新,赵启林,等.拉挤型FRP管轴向压缩承载性能研究[J].工程塑料应用,2013,41(5):66-69.
MA S, HUANG Y X, ZHAO Q L, et al. Axial compression performance of FRP pipe made by pultrusion [J]. Engineering Plastics Application, 2013, 41(5): 66-69. (in Chinese)

- [8] BAI Y, HUGIE E, LUDWIG C, et al. Fire performance of water-cooled GFRP columns. I: Fire endurance investigation [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2011, 15(3): 404-412.
- [9] CARDOSO D C T, HARRIES K A, DE M BATISTA E. Compressive strength equation for GFRP square tube columns [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2014, 59: 1-11.
- [10] 周毛毛. 拉挤型玻璃纤维管受压屈曲分析[J]. 低温建筑技术, 2016, 38(12): 32-34.
ZHOU M M. Buckling analysis of pultruded glass fiber composite tube [J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 2016, 38(12): 32-34. (in Chinese)
- [11] CHEN Y, WANG C Y. Web crippling behavior of pultruded GFRP rectangular hollow sections [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 77: 112-121.
- [12] CHEN Y, WANG C Y. Test on pultruded GFRP I-section under web crippling [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 77: 27-37.
- [13] ZHANG W X, CHEN Y. Tests on GFRP pultruded profiles with channel section subjected to web crippling [J]. *Applied Composite Materials*, 2017, 24(4): 849-862.
- [14] LOKUGE W, ABOUSNINA R, HERATH N. Behaviour of geopolymer concrete-filled pultruded GFRP short columns [J]. *Journal of Composite Materials*, 2019, 53(18): 2555-2567.
- [15] 杨霞, 杨文伟, 李顺涛. 采用CFRP增强地GFRP管混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(4): 124-132.
YANG X, YANG W W, LI S T. Experimental study on axial compression behavior of concrete-filled GFRP tube short columns strengthened with CFRP [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2022, 44(4): 124-132. (in Chinese)
- [16] 胡鹏兵, 陈誉, 张晓勇, 等. 碳纤维复材布加固拉挤型玻璃纤维复材方管混凝土短柱试验研究[J]. 工业建筑, 2020, 50(6): 183-188.
HU P B, CHEN Y, ZHANG X Y, et al. Experimental study of concrete-filled pultruded GFRP short columns strengthened with CFRP sheets [J]. *Industrial Construction*, 2020, 50(6): 183-188. (in Chinese)
- [17] 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Standard for test method of concrete structures: GB/T 50152—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [18] 陈宇良, 吉云鹏, 陈宗平, 等. 三轴应力下卵石混凝土力学性能与本构关系[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(1): 31-36.
CHEN Y L, JI Y P, CHEN Z P, et al. Mechanical properties and constitutive relation of pebble concrete under tri-axial stress [J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(1): 31-36. (in Chinese)
- [19] 相泽辉, 周杰, 牛建刚, 等. 混凝土帆布与CFRP条带联合加固方形截面混凝土短柱轴心受压力学性能[J]. 复合材料学报, 2022, 39(10): 4824-4838.
XIANG Z H, ZHOU J, NIU J G, et al. Mechanical properties of square concrete short columns strengthened by concrete canvas and CFRP strips under axial compression [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(10): 4824-4838. (in Chinese)
- [20] 吴东辉, 杨松, 唐桂云, 等. FRP管增强混凝土结构的轴压极限强度[J]. 纤维复合材料, 2006, 23(1): 15-17.
WU D H, YANG S, TANG G Y, et al. Axial ultimate compressive strength of FRP-tube reinforced concrete structure [J]. *Fiber Composites*, 2006, 23(1): 15-17. (in Chinese)
- [21] 俞茂宏. 混凝土强度理论及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
YU M H. Concrete strength theory and its application [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. (in Chinese)
- [22] PARK R, PAULAY T. Reinforced Concrete Structures [M]. Wiley, 1975.
- [23] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [24] 代岩, 赵均海, 张常光. CFRP和角钢复合加固钢管混凝土叠合柱轴心受压承载力分析[J]. 建筑结构, 2018, 48(17): 96-103.
DAI Y, ZHAO J H, ZHANG C G. Analysis of axial compression bearing capacity of CFRP and angle steel composite reinforced concrete-filled steel tubular columns [J]. *Building Structure*, 2018, 48(17): 96-103. (in Chinese)

(编辑 胡玲)