

引用本文:程东辉,姚宇航,王 丽. CFRP 布对不同截面混凝土柱加固性能分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(3): 40-49.

CHENG Donghui, YAO Yuhang, WANG Li. Analysis of reinforcement performance of CFRP strips on concrete columns with different cross-sections[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(3): 40-49.

DOI:10.19815/j.jace.2021.12004

CFRP 布对不同截面混凝土柱加固性能分析

程东辉, 姚宇航, 王 丽

(东北林业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:为了探究碳纤维增强复合材料(CFRP)布对不同截面混凝土柱的加固性能,以条带用量、条带净间距、条带净宽等参数为控制变量,设计并制作了3组钢筋混凝土柱,第1组试件为方形截面柱,第2组试件为T形截面柱,第3组试件是在第2组试件的基础上,在翼缘与腹板转角处利用角钢对CFRP布进行锚固。通过对3组钢筋混凝土试件进行轴心受压试验,得到了试件极限荷载、轴向变形以及破坏形态等试验数据。采用有限元软件ABAQUS建立了一批CFRP布约束状态下的混凝土短柱,并对其力学性能进行了分析。根据试验数据及有限元分析结果,提出了CFRP条带约束状态下方形截面钢筋混凝土柱和角钢锚固CFRP条带约束状态下T形截面钢筋混凝土柱极限承载力的计算公式。结果表明:随着CFRP条带用量的增加,加固混凝土柱的承载力增大;当CFRP条带的用量相同时,极限承载力随条带净间距的减小而增大;使用角钢在T形截面柱的翼缘与腹板转角位置对CFRP条带锚固,可以更好地发挥出CFRP条带的抗拉强度,使混凝土柱的极限承载力有所提升。

关键词:钢筋混凝土柱;CFRP条带;轴心受压;力学性能

中图分类号:TU398

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2023)03-0040-10

Analysis of reinforcement performance of CFRP strips on concrete columns with different cross-sections

CHENG Donghui, YAO Yuhang, WANG Li

(School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: In order to explore the reinforcement performance of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) strip on concrete columns with different cross-sections, three groups of reinforced concrete columns were designed and fabricated with parameters such as strip amount, net spacing and net width of strips as control variables. The first group of specimens was a square section, the second group of specimens was a T-shaped section, the third group of specimens was based on the second group of specimens, and angle steel was used to anchor CFRP sheets at the corner of flange and web. Axial compression tests were carried out on three groups of reinforced concrete specimens, and the ultimate load, axial deformation and failure mode of the specimens were obtained. Based on the experimental data, a number of concrete short columns confined by CFRP

收稿日期:2021-12-03

基金项目:哈尔滨市科技创新人才研究专项基金项目(2012RFXXS111);黑龙江省教育厅基本科研业务项目(135309358);

中央高校基本科研业务费创新团队与重大项目培育资金项目(2572016EBC1)

作者简介:程东辉(1971-),男,工学博士,教授,博士生导师,E-mail:chengdonghui2000@126.com。

strip were established by finite element software ABAQUS, and their mechanical properties were analyzed. According to the experimental data and finite element analysis results, the calculation formulas of ultimate bearing capacity of square section reinforced concrete columns and T-shaped section reinforced concrete columns confined by CFRP strips and angle steel anchored CFRP strips were proposed. The results show that the bearing capacity of reinforced concrete columns increases with the increase of CFRP strip usage. When the amount of CFRP strips is the same, the ultimate bearing capacity increases with the decrease of the net spacing of the strips. The use of angle steel to anchor CFRP strips at the flange and web corners of T-shaped columns can better exert the tensile strength of CFRP strips and improve the ultimate bearing capacity of concrete columns.

Key words: reinforced concrete column; CFRP strip; axial compression; mechanical performance

0 引言

近年来,中国建筑行业蓬勃发展,出现了大量不同种类的建筑物。然而,随着时间的推移,一些建筑物已无法满足新的承载力要求,在长时间使用过程中建筑材料也发生老化等现象,导致建筑物的承载力降低,亟需进行加固修复。采用碳纤维增强复合材料(CFRP)布对建筑物构件进行包裹,可以提高钢筋混凝土柱的极限承载力^[1-4]。

在结构的纵横墙交接位置采用T形、L形等异形截面柱可以减少结构自重,使结构空间显得整洁,增加了空间的灵活性^[5-7],不仅满足了人民群众日常需要,而且节约了资源、保护了环境。

高丹盈等^[8]对16根碳纤维增强复合材料加固钢筋混凝土方形截面柱和圆形截面柱进行了轴心受压的试验,结果表明,粘贴CFRP布可以提高柱的极限承载力,减缓了柱的破坏过程。方形截面混凝土柱的承载力随CFRP布层数增加而增大的幅度低于圆形截面柱。薛鹏娜^[9]研究了钢筋混凝土轴心受压构件在CFRP条带和角钢共同作用下的力学性能,获得了试验柱的极限承载力和破坏形态等。当角钢和CFRP条带同时使用时,柱子的承载力有明显的提高,其受力性能也有所改善。卢亦焱等^[10]开展了22根混凝土方形截面短柱在CFRP布和角钢作用下的轴心受压试验,试验柱充分发挥了CFRP布和角钢各自的优势,共同作用,试件的受力性能得到明显改善。混凝土柱常用的加固方式有外包角钢加固和CFRP条带加固,CFRP布还有强度高、施工方便和不影响构件截面尺寸等诸多优点,被广泛应用于实际工程中。

尽管众多学者已开展了CFRP布加固混凝土柱力学性能的研究,但从研究成果来看,在以下几个

方面研究开展的并不充分:①对于T形、工字形等异形截面柱,利用CFRP加固后的力学性能研究不够深入;②考虑到加固成果,利用CFRP条带加固后的混凝土受压构件的力学性能研究尚不充分。为了探究CFRP布对不同截面混凝土柱的加固性能,在已有研究^[11-18]基础上,本文开展了CFRP条带加固方形截面柱和T形截面柱的力学性能研究。为了防止异形截面柱转角处的CFRP条带出现脱落现象,在柱子的转角处进行打磨,使转角处有一定弧度过度,充分刷胶,放置一段时间,使浸渍胶起作用,并且方形柱与T形截面柱同一批制作。为了使翼缘与腹板转角处粘贴牢固,使用内置螺栓和角钢对CFRP布进行锚固,保证CFRP布充分黏结和角钢充分锚固。在试验的基础上,对不同截面CFRP布包裹混凝土柱的性能进行模拟分析,并提出了不同截面钢筋混凝土短柱的承载力计算公式。

1 试验简介

采用文献[19]和文献[20]中的试件参数设计并制作了3组钢筋混凝土柱,第1组为截面尺寸250 mm×250 mm的方形截面柱,配置4根直径12 mm的纵向受力钢筋;第2组为翼缘宽度300 mm、腹板宽度200 mm、翼缘与腹板厚度均为100 mm的T形截面柱,配置10根直径10 mm纵向受力钢筋;第3组是在第2组基础上,在翼缘与腹板转角处用角钢对CFRP布进行锚固。第1组试件中,JGZ-A1是未约束混凝土柱,JGZ-A2~JGZ-A4是采用用量相同但幅宽不同的CFRP布进行加固的试件,JGZ-A5是用CFRP布全包裹的试件。第2、3组采用和第1组同样的包裹形式。3组试件均配置有直径6 mm、间距100 mm的箍筋,试件高度为1 000 mm,混凝土强度等级C35,钢筋强度等级为HRB400,箍

筋强度等级为 HPB300。试件的详细参数见表 1,方形和 T 形截面柱配筋如图 1 所示,CFRP 条带加固示意如图 2 所示。

表 1 试件参数及 CFRP 布用量

Table 1 Specimen parameters and CFRP strip usage				
组号	试件编号	CFRP 布间距/ mm	CFRP 布幅宽/ mm	CFRP 布约束面 积/ 10^5 mm^2
第 1 组	JGZ-A1			0.0
	JGZ-A2	275.0	150	5.4
	JGZ-A3	137.5	90	5.4
	JGZ-A4	90.8	65	5.4
	JGZ-A5		1 000	12.0
第 2 组	JGZ-B1			0.0
	JGZ-B2	275.0	150	6.3
	JGZ-B3	137.5	90	6.3
	JGZ-B4	91.7	65	6.3
	JGZ-B5		1 000	14.0
第 3 组	JGZ-C1	275.0	150	6.3
	JGZ-C2	137.5	90	6.3
	JGZ-C3	91.7	65	6.3
	JGZ-C4		1 000	14.0



图 3 试验加载装置

Fig. 3 Test loading device

2 破坏现象及分析

将试验柱进行轴心受压试验,利用 5 000 kN 的试验机对试件进行分级加载,当达到计算极限荷载的 90%时,加载改为轴向位移控制,当承载力下降到极限荷载的 60%时,停止加载。部分试件破坏现象如图 4 所示,破坏形态见表 2。

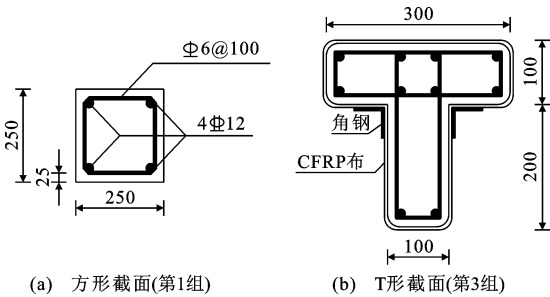


图 1 混凝土截面配筋示意图(单位:mm)

Fig. 1 Schematic diagram of concrete section reinforcement (unit:mm)

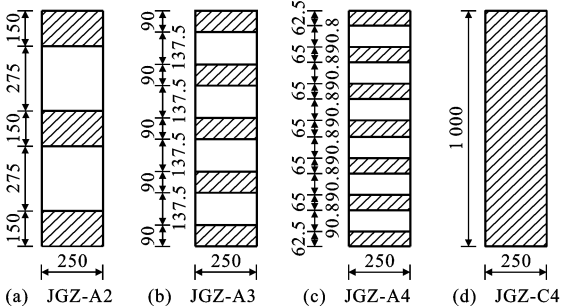
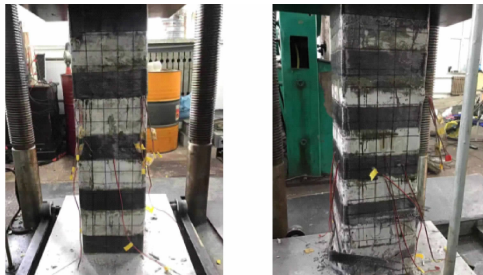


图 2 CFRP 条带加固示意图(单位:mm)

Fig. 2 Schematic diagram of CFRP strip reinforcement (unit:mm)

在实验室使用 YAW-5000F 微控电液伺服压力试验机对试件进行加载,加载装置如图 3 所示。



(a) JGZ-A3

(b) JGZ-A4



(c) JGZ-C1

(d) JGZ-C3

图 4 部分试件破坏现象

Fig. 4 Failure phenomenon of some specimens

在极限状态下,各试验柱实测的轴向位移和极限承载力见表 3。图 5 为钢筋混凝土柱的实测荷载-位移曲线,其中,试件 JGZ-A2 因试件制作质量不佳,导致承载力异常,分析时将该试件舍去。

从表 3 和图 5 的实测结果可以看出:①CFRP

表 2 试件的破坏形态
Table 2 Failure forms of specimens

试件编号	破坏形态
JGZ-A1	表面混凝土剥落,纵向受力筋被压屈并外鼓
JGZ-A2	破坏出现在 CFRP 条带的间隔处,CFRP 条带被拉断
JGZ-A3	部分碳纤维丝断裂,CFRP 条带与混凝土有大面积剥离现象
JGZ-A4	试件中下部 CFRP 条带拉断
JGZ-A5	试件下端部 CFRP 条带被拉断,混凝土被压碎
JGZ-B1	试件纵向裂缝不断增多,腹板底面混凝土被压碎
JGZ-B2	试件腹板底面混凝土被压碎,CFRP 布没有与混凝土剥离
JGZ-B3	下翼缘与腹板处混凝土外鼓,CFRP 布与混凝土剥离
JGZ-B4	破坏现象与 JGZ-B3 柱大致相同
JGZ-B5	腹板两侧混凝土横向变形明显,CFRP 条带被拉断
JGZ-C1	翼缘处裂缝快速发展,腹板的中部和下部区域外鼓,混凝土被压碎
JGZ-C2	裂缝出现在试件的中部和下部区域,角钢出现弯曲现象,CFRP 布未被拉断
JGZ-C3	破坏的形态与 JGZ-C2 柱大致相同
JGZ-C4	角钢明显弯曲,达到极限荷载时,试件上方未被角钢固定的 CFRP 布出现剥离现象,试验柱被压碎

表 3 试件极限承载力和位移

Table 3 Ultimate bearing capacity and displacement of specimens

试件编号	极限承载力/kN	屈服位移/mm	极限位移/mm
JGZ-A1	1 523	2.87	3.96
JGZ-A2	1 378	3.08	4.58
JGZ-A3	2 006	3.71	6.21
JGZ-A4	1 736	3.47	6.62
JGZ-A5	2 132	3.72	9.06
JGZ-B1	1 402	3.44	4.41
JGZ-B2	1 530	4.33	5.63
JGZ-B3	1 651	3.90	5.32
JGZ-B4	1 772	3.94	5.42
JGZ-B5	1 861	4.34	6.11
JGZ-C1	1 725	3.81	5.20
JGZ-C2	1 881	3.49	4.95
JGZ-C3	1 960	4.15	5.95
JGZ-C4	2 071	4.14	6.06

条带对混凝土的约束作用明显,可有效提高混凝土的极限压应变,进而提高柱的承载力;②柱的承载力随 CFRP 布用量的增加而增大;③在 CFRP 布用量相同时,随着 CFRP 条带宽度的减小,条带间距也相应减小,根据混凝土约束作用机理,约束作用越强,极限承载力越大;④对于 T 形截面柱,在翼缘和

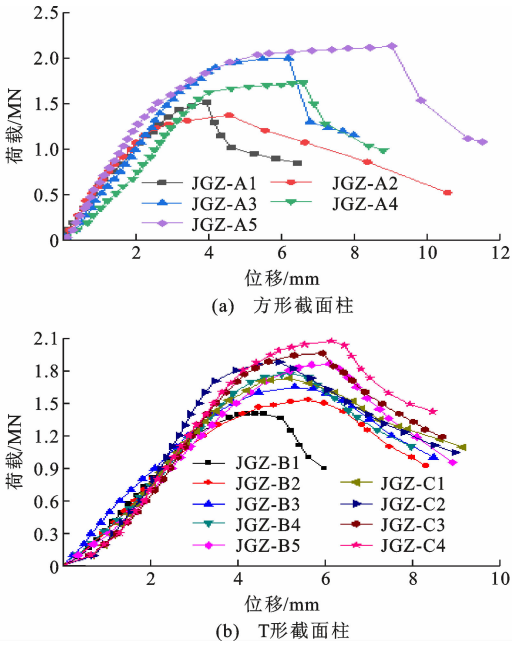


图 5 试件实测荷载-位移曲线

Fig. 5 Measured load-displacement curves of specimens

腹板的转角位置,使用角钢对 CFRP 条带进行锚固能够充分发挥 CFRP 布的性能,因此在同等条件下,这些试件的实测承载力较高。

3 CFRP 布加固混凝土柱有限元分析

3.1 材料的本构关系

3.1.1 混凝土本构关系

混凝土单轴受压的本构关系可参照《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[21]给出的曲线,除试验值外,其他参数均取自规范给出的参数,荷载作用下混凝土单轴受压应力-应变($\sigma-\epsilon$)曲线如图 6 所示,其中 f_c 为混凝土受压应力实测值, ϵ_c 为混凝土受压应变实测值, ϵ_{cu} 为混凝土极限压应变实测值。

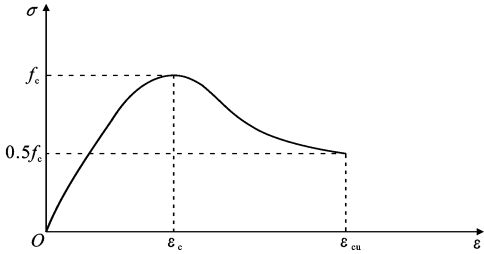


图 6 混凝土单轴受压应力-应变曲线

Fig. 6 Uniaxial compressive stress-strain curve of concrete

3.1.2 钢筋本构关系

钢材力学性能与混凝土相比表现较为平稳,通过抗拉试验可以获得其应力-应变关系,同时也具备较为完善的本构关系。本次建模过程中钢筋模型采用弹塑性理想模型,其应力-应变曲线如图 7 所示,

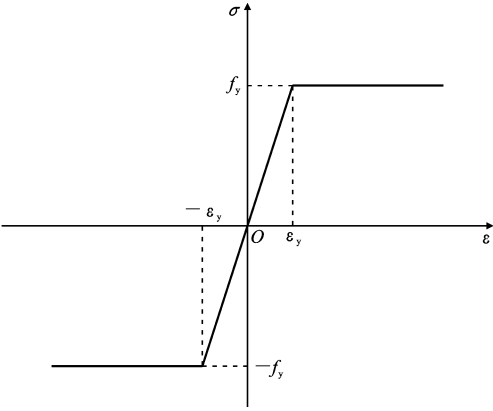


图 7 钢筋应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curve of rebar

其中 f_y 为屈服应力, ϵ_y 为屈服应变。

3.1.3 CFRP 布本构关系

CFRP 布的力学性能表现为各向正交异性, 在分析中, 只需考虑其在纤维方向的拉应力, 故其材料表现为线弹性。碳纤维材料达到极限拉应变 ϵ_f 时, 视其已破坏, 其应力-应变曲线如图 8 所示, 其中 σ_f 为 CFRP 布极限拉应力。

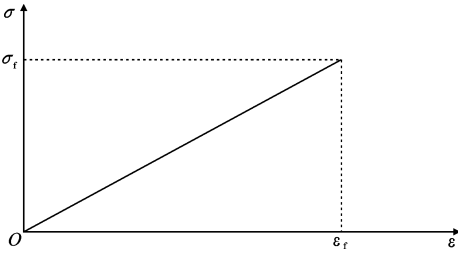


图 8 CFRP 布应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curve of CFRP strip

3.2 边界条件及荷载

基于有限元软件 ABAQUS, 对 5 根短柱试件进行有限元力学性能分析。分析模型中混凝土采用 8 节点六面体减缩积分实体单元 C3D8R, CFRP 布采用三维膜单元 M3D4R, 纵向受力钢筋和箍筋采用三维 2 节点桁架单元 T3D2。钢筋骨架与混凝土采用嵌入方式连接, 实现钢筋与混凝土之间的协同变形。CFRP 布与混凝土柱进行绑定约束, 如图 9 所示。

3.3 边界条件及荷载

在建立模型并定义不同部件间的相互作用后, 需要对模拟 T 形截面柱的边界条件进行定义。为了与实际的试验加载条件相接近, 模拟柱底部采用全固定方式, 上端部固定 X、Y、Z 三个方向的转角以及 X、Y 两个方向的位移。

3.4 加固柱有限元拓展研究

利用 ABAQUS 有限元软件对各试件进行有限

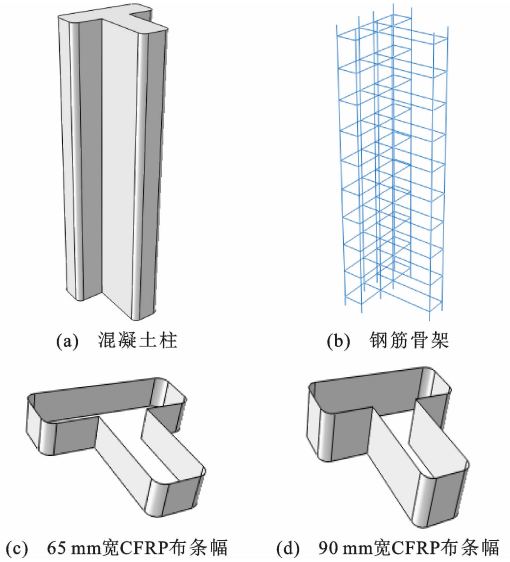


图 9 模拟部件

Fig. 9 Simulation components

元模拟分析, 并以 JGZ-C3 和 JGZ-C4 为例绘制应力云图, 如图 10 所示。

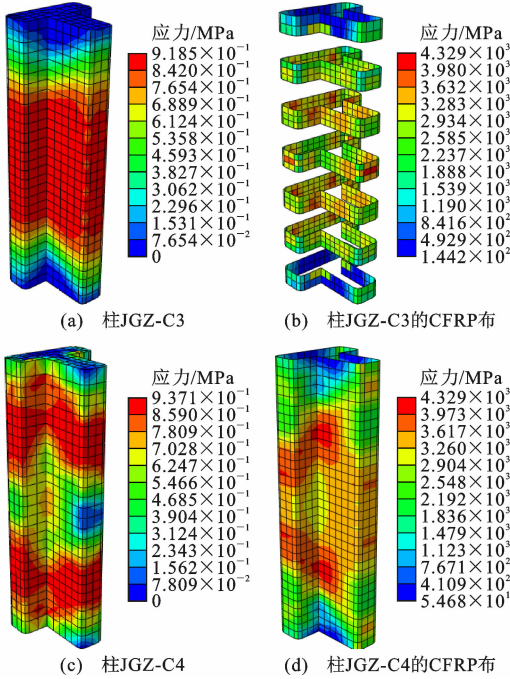


图 10 承载力极限状态下的代表性试件应力云图

Fig. 10 Representative specimen stress cloud diagrams in ultimate state of bearing capacity

图 11 为部分试验柱的荷载-位移曲线试验值与模拟值对比。通过对比可以发现: 试验柱的位移均要大于模拟柱的位移。主要原因是: 在加载过程中, 试验柱端部与压力机板不能完全贴合, 使得试验柱在加载前存在一定的虚位移, 导致位于柱端两侧的位移计在加载过程中测得的位移偏大, 其次在模拟

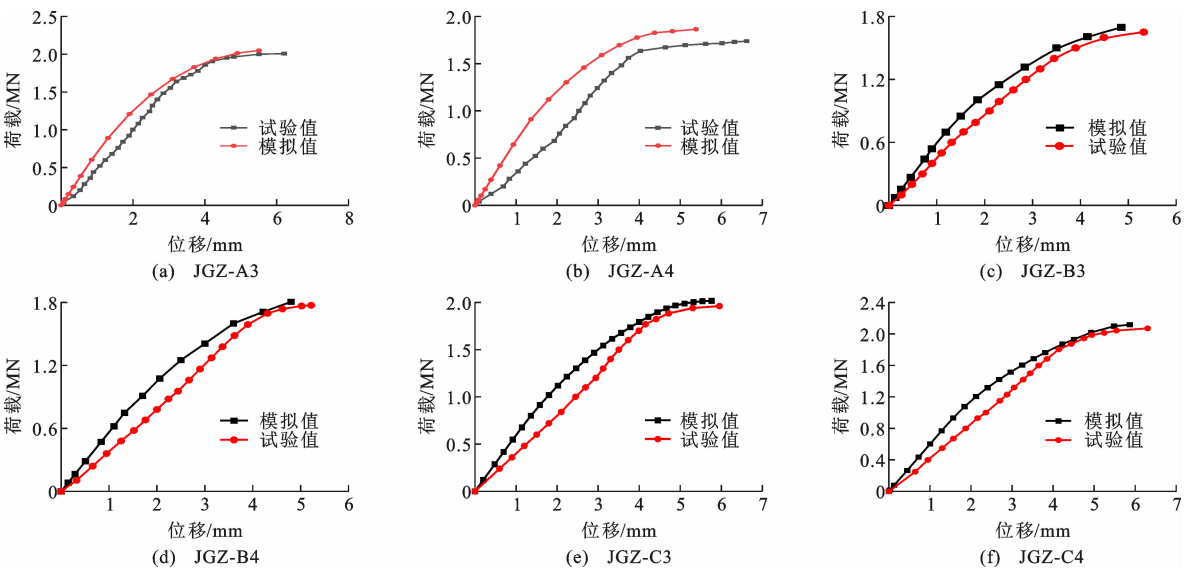


图 11 荷载-位移曲线试验值与模拟值对比

Fig. 11 Comparison of load-displacement curves between test values and simulated values

过程中钢筋混凝土之间的接触采用的是内置方式,没有考虑二者之间因摩擦损失、黏结滑移带来的误差影响。

在试验研究的基础上,以 CFRP 条带宽度、混凝土强度、纵向受力钢筋直径为研究参数,设计了一批有限元分析模型柱。模型柱的截面尺寸、CFRP 布材料和柱高等参数均采用与试验柱相同的形式,T 形截面柱均采用角钢对 CFRP 布进行锚固。通过相同的加载方式与单元连接对 CFRP 布加固混凝土柱进行轴心受压有限元模拟分析,得到了不同参数情况下的方形截面柱和 T 形截面柱的承载力。方形截面柱的有限元分析结果见表 4,T 形截面柱有限元分析结果见表 5。

3.5 CFRP 加固效果因素分析

3.5.1 CFRP 条带用量的影响

以 CFRP 布的用量作为参数,模拟试件的荷载-位移曲线如图 12 所示。结合表 4、5 和图 12 可知:随着 CFRP 条带用量的增加,其对混凝土横向变形的影响也增大。CFRP 条带用量增加能够提高混凝土极限压应变,进而提高试件的极限承载力。随着 CFRP 条带用量的增多,试件的极限承载力提升幅度不是很大,所以应采用适量的 CFRP 条带对混凝土柱进行加固。

3.5.2 CFRP 条带宽度(间距)的影响

以 CFRP 布的条带宽度作为参数,模拟试件的荷载-位移曲线见图 13。可以看出:当混凝土进入塑性变形阶段时,CFRP 条带对混凝土试件有了约束作用,逐渐产生拉应力,各模拟试件的荷载-位移

表 4 方形截面柱有限元分析结果

Table 4 Finite element analysis results of square section column

试件编号	CFRP 布 用量比例	CFRP 布 宽/mm	混凝土 强度	纵筋直径/ mm	承载力/ kN
JZG-D1	0.45	150.0	C35	12	1 641
JGZ-D2	0.45	90.0	C35	12	2 048
JGZ-D3	0.45	65.0	C35	12	1 840
JGZ-D4	0.45	112.5	C35	12	2 014
JGZ-D5	0.45	75.0	C35	12	1 967
JGZ-E1	0.45	90.0	C30	12	1 834
JGZ-E2	0.45	90.0	C40	12	2 281
JGZ-E3	0.45	90.0	C45	12	2 465
JGZ-E4	0.45	90.0	C50	12	2 642
JGZ-F1	0.45	90.0	C35	8	1 955
JGZ-F2	0.45	90.0	C35	10	1 995
JGZ-F3	0.45	90.0	C35	14	2 098
JGZ-F4	0.45	90.0	C35	16	2 159
JGZ-G1	0.60	200.0	C35	12	1 703
JGZ-G2	0.60	150.0	C35	12	1 964
JGZ-G3	0.60	120.0	C35	12	2 151
JGZ-G4	0.60	100.0	C35	12	2 194
JGZ-G5	0.60	85.7	C35	12	2 089
JGZ-H1	0.75	250.0	C35	12	1 877
JGZ-H2	0.75	187.5	C35	12	2 097
JGZ-H3	0.75	150.0	C35	12	2 132
JGZ-H4	0.75	125.0	C35	12	2 281
JGZ-H5	0.75	107.0	C35	12	2 297
JGZ-H6	0.75	93.8	C35	12	2 293

表 5 T 形截面柱有限元分析结果

Table 5 Finite element analysis results of T-shaped section column

试件编号	CFRP 布 用量比例	CFRP 布 宽/mm	混凝土 强度	纵筋直径/ mm	承载力/ kN
JGZ-I1	0.45	150.0	C35	10	1 800
JGZ-I2	0.45	112.5	C35	10	1 866
JGZ-I3	0.45	90.0	C35	10	1 929
JGZ-I4	0.45	75.0	C35	10	1 961
JGZ-I5	0.45	65.0	C35	10	2 015
JGZ-I6	0.45	56.0	C35	10	2 035
JGZ-I7	0.45	50.0	C35	10	1 902
JGZ-I8	0.45	45.0	C35	10	1 845
JGZ-J1	0.45	90.0	C30	10	1 815
JGZ-J2	0.45	90.0	C40	10	2 240
JGZ-J3	0.45	90.0	C45	10	2 482
JGZ-J4	0.45	90.0	C50	10	2 730
JGZ-K1	0.45	90.0	C35	8	1 968
JGZ-K2	0.45	90.0	C35	12	2 064
JGZ-K3	0.45	90.0	C35	14	2 117
JGZ-K4	0.45	90.0	C35	16	2 164
JGZ-L1	0.60	200.0	C35	10	1 864
JGZ-L2	0.60	150.0	C35	10	1 909
JGZ-L3	0.60	120.0	C35	10	1 959
JGZ-L4	0.60	100.0	C35	10	2 025
JGZ-L5	0.60	85.7	C35	10	2 080
JGZ-M1	0.75	250.0	C35	10	1 880
JGZ-M2	0.75	187.5	C35	10	1 939
JGZ-M3	0.75	150.0	C35	10	1 998
JGZ-M4	0.75	125.0	C35	10	2 075
JGZ-M5	0.75	107.0	C35	10	2 125

曲线的曲率也出现了差别。以 T 形截面柱为例,当 CFRP 布条宽度由 150 mm 依次减为 112.5、90、75、65、56、50、45 mm 时,极限承载力分别提高 3.72%、7.16%、8.94%、11.19%、13.05%、5.67%、2.5%。

同时,承载力也会随 CFRP 布宽的变化而变化。对于 CFRP 布比例为 0.45 的模拟柱,当条带宽度与条带间混凝土高度的比值超过 0.68 时,柱的极限承载力随 CFRP 条带宽度的减小而增大;当条带宽度与条带间混凝土高度的比值低于 0.68 时,柱的极限承载力随 CFRP 条带宽度的减小呈递减趋势。对于 CFRP 布比例为 0.6 和 0.75 的模拟柱,条带宽度与条带间混凝土高度的比值分别超过 1.27 和 2.8 时,柱的极限承载力随 CFRP 条带宽度的减小而增大,反之呈递减趋势。

3.5.3 混凝土强度的影响

以混凝土强度为参数,模拟试件的荷载-位移曲

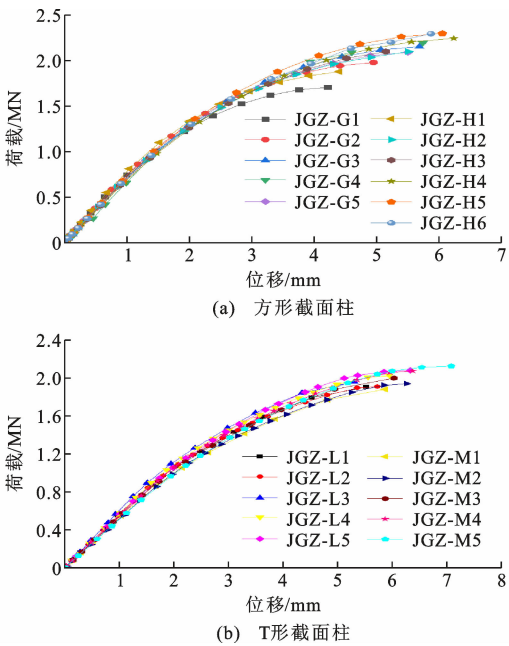


图 12 不同 CFRP 布用量下的荷载-位移曲线
Fig. 12 Load-displacement curves under different CFRP strip usage

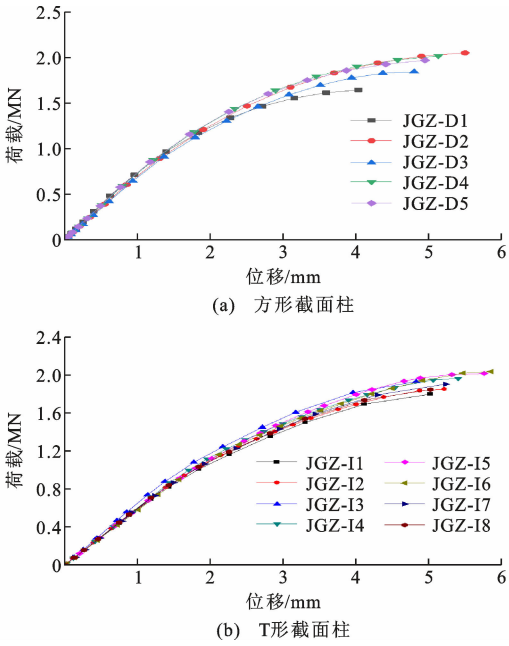


图 13 不同 CFRP 布条宽度下的荷载-位移曲线
Fig. 13 Load-displacement curves under different CFRP strip widths

线如图 14 所示。可以看出:模拟试件的极限承载力随混凝土等级提高而增大。混凝土的等级从 C30 升高为 C35、C40、C45、C50 时,方形截面柱极限承载力分别提高 11.67%、24.37%、34.1%、44.06%,T 形截面柱极限承载力分别提高 11.01%、23.21%、36.65%和 50.21%。

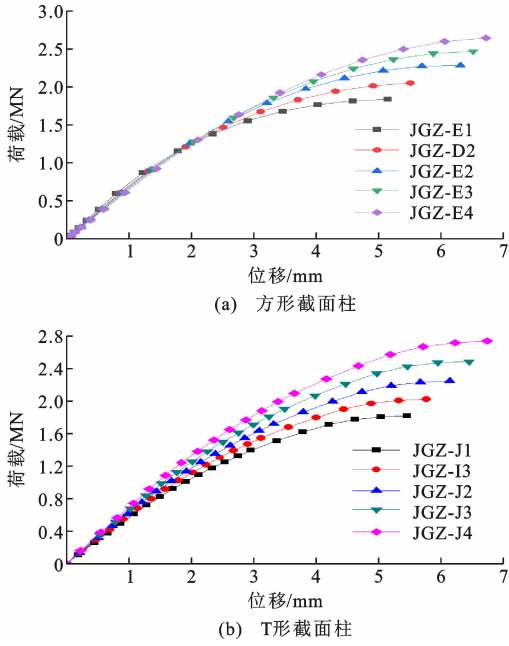


图14 不同混凝土强度下的荷载-位移曲线

Fig. 14 Load-displacement curves under different concrete strengths

3.5.4 配筋的影响

以纵向受力钢筋的直径作为参数,模拟试件的荷载-位移曲线如图15所示。结合表3、4和图15可知:纵向受力钢筋直径由8 mm提高至10、12、14、16 mm时,方形截面柱的极限承载力分别提高2.05%、4.76%、7.31%、10.43%,T形截面柱的极限承载力分别提高2.38%、4.87%、7.57%、9.96%。随着纵筋直径增大,极限承载力提高;在柱的塑性变形阶段,随着纵筋直径增大,极限位移明显增加。

4 CFRP条带加固混凝土方形截面短柱承载力计算公式

在混凝土轴心受压构件承载力计算公式的基础上,提出CFRP条带约束下混凝土轴心受压构件承载力计算公式,如式(1)所示。

$$N_u = \varphi(f_{cc}A + f_y' A_s') \quad (1)$$

式中: N_u 为CFRP条带约束下的混凝土轴心受压强度; φ 为承载力折减系数,取值为0.9; f_{cc} 为CFRP布包裹下的混凝土轴心抗压强度设计值; A 为柱截面面积; f_y' 、 A_s' 分别为纵向受力钢筋的屈服强度和截面面积。

引入纤维包裹特征值 λ_{cf} 表示CFRP布含量及布置形式,其表达式如式(2)所示。

$$\lambda_{cf} = \mu_{cf} \frac{f_{cf}}{f_c} \quad (2)$$

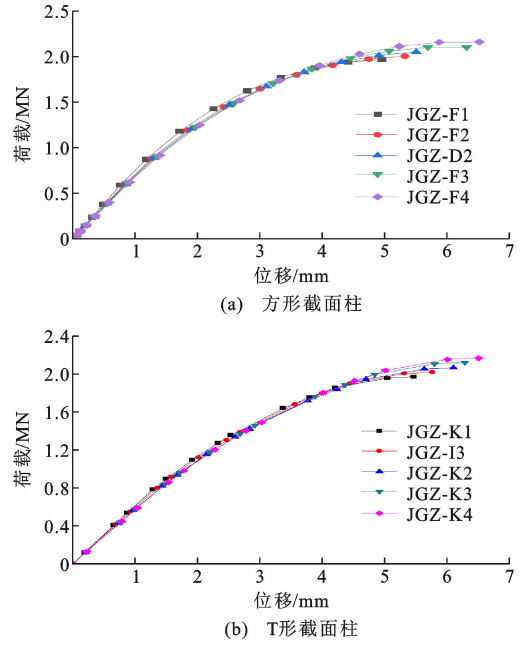


图15 不同纵筋直径下的荷载-位移曲线

Fig. 15 Load-displacement curves under different longitudinal reinforcement diameters

$$\mu_{cf} = \frac{\alpha n t b_{cf}}{\beta b (b_{cf} + s_{cf})} \quad (3)$$

式中: μ_{cf} 为CFRP布的布置率; f_{cf} 为CFRP布的折减抗拉强度,取CFRP布极限抗拉强度的3/4; n 、 t 分别为CFRP布的层数和厚度; b_{cf} 、 s_{cf} 分别为CFRP条带的宽度和间距; α 、 β 为截面参数,对于方形截面, $\alpha=4$ 、 $\beta=1$,对于T形截面, $\alpha=3.6$ 、 $\beta=5$ 。

由此可得 f_{cc} 的计算公式为

$$f_{cc} = (a\eta + b\lambda_{cf} + 1)f_c \quad (4)$$

设CFRP条带约束混凝土的强度为计算公式(4),将公式(4)代入到公式(1)中并将承载力系数进行修正可得到计算公式(5)。

$$N_u = 0.85[f_y' A_s' + f_c A_c (a\eta + b\lambda_{cf} + 1)] \quad (5)$$

式中: η 为CFRP条带对试件柱的约束强度系数,即约束区面积与试件截面面积之比; a 、 b 为计算参数。

对试验及有限元分析结果进行线性回归分析,对于参数 a ,方形截面可取1.14,T形截面可取2.29;对于参数 b ,方形截面可取2.98,T形截面可取0.93。

利用公式(5)对CFRP条带加固方形截面柱及角钢锚固下T形截面柱的承载力进行验证分析,结果如表6所示。个别试件的试验值略小于计算值,是由于计算公式中没有考虑裁剪纤维布而产生折减,总体来说计算结果与实测结果较为接近,对实际工程具有一定指导作用。

表 6 试件承载力试验值与计算值对比

Table 6 Comparison of bearing capacity test values and calculated values of specimens

试件编号	极限承载力试验值/kN	极限承载力计算值/kN
JGZ-A2	1 378	
JGZ-A3	2 006	1 777
JGZ-A4	1 736	1 797
JGZ-A5	2 132	2 047
JGZ-C1	1 725	1 694
JGZ-C2	1 881	1 798
JGZ-C3	1 960	1 811
JGZ-C4	2 071	2 011

5 结 语

(1)采用 CFRP 布对混凝土柱进行加固可以明显提高方形截面柱和 T 形截面柱的极限承载力。同时,CFRP 布对混凝土和纵向受力钢筋具有很强的约束,可以有效限制混凝土的横向变形。

(2)在 T 形截面柱翼缘与腹板转角位置采取适当的角钢锚固措施可以充分发挥 CFRP 布的抗拉强度,提高了构件的极限承载力,角钢锚固 CFRP 布的 T 形截面柱相对于未加角钢锚固 CFRP 布的 T 形截面柱,极限承载力的提升幅度为 10.6%~13.9%。

(3)随着混凝土强度等级的增加,模拟柱的极限承载力及变形增大;随着 CFRP 条带用量增加,柱的极限承载力增大;当 CFRP 布用量相同时,承载力会随 CFRP 条带的宽度变化而变化。对于方形截面柱和 T 形截面柱,当 CFRP 条带宽度与柱高的比值分别在 10%和 6%以内,柱的承载力随着条带宽度的增加而增大;超出该范围时,柱的承载力随 CFRP 条带宽度的增大而降低。

(4)根据试验和有限元分析结果提出的 CFRP 条带加固混凝土柱以及角钢锚固 CFRP 布加固混凝土柱的承载力公式计算结果和分析结果较为接近。

参考文献:

References:

[1] CHEN Z P,XU J J,CHEN Y L,et al. Axial compression ratio limit values for steel reinforced concrete (SRC) special shaped columns[J]. Steel and Composite Structures,2016,20(2):295-316.

[2] WU H P,QIAO Q Y,CAO W L,et al. Axial compressive behavior of special-shaped concrete filled tube mega column coupled with multiple cavities[J]. Steel and Composite Structures,2017,23(6):633-

646.

[3] YANG Y,ZHANG L,XUE Y C,et al. Experimental research on the fire performance of a special cross-shaped composite column with a high-strength concrete-filled steel tubular core[J]. Advances in Structural Engineering,2018,21(11):1608-1619.

[4] 王晓林. 钢筋混凝土异形柱结构及其构件受力性能分析[D]. 太原:太原理工大学,2011.

WANG Xiaolin. The mechanical behavior analysis of R. C structure with specially shaped conlumn and related components[D]. Taiyuan:Taiyuan University of Technology,2011.

[5] 薛建阳,刘祖强,赵鸿铁,等. 型钢混凝土异形柱结构受力性能研究的发展现状[J]. 工业建筑,2014,44(3):134-146.

XUE Jianyang,LIU Zuqiang,ZHAO Hongtie,et al. State-of-the-art research on mechanical performance of steel reinforced concrete irregular section column structures[J]. Industrial Construction,2014,44(3):134-146.

[6] 崔熙光,万广宇,田虹. CFRP 加固钢筋混凝土腹板受拉 L 形柱的试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2008,24(3):402-406.

CUI Xiguang,WAN Guangyu,TIAN Hong. Experimental study on reinforced concrete web plate tensioned L-shaped columns strengthened with CFRP [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science),2008,24(3):402-406.

[7] YOUSSEF M N,FENG M Q,MOSALLAM A S. Stress-strain model for concrete confined by FRP composites [J]. Composites Part B: Engineering,2007,38(5/6):614-628.

[8] 高丹盈,王廷彦,何亚军. 碳纤维布加固钢筋混凝土短梁受弯试验及承载力计算[J]. 建筑结构学报,2017,38(11):122-131.

GAO Danying,WANG Tingyan,HE Yajun. Flexural test and calculation on capacity of reinforced concrete short beam strengthened by CFRP sheets[J]. Journal of Building Structures,2017,38(11):122-131.

[9] 薛鹏娜. 钢筋混凝土轴心受压构件复合加固的试验研究[D]. 武汉:华中科技大学,2006.

XUE Pengna. Experimental research on uniaxial compressing structure member with composite [D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2006.

[10] 卢亦焱,史健勇,赵国藩. 碳纤维布和角钢复合加固轴心受压混凝土柱的试验研究[J]. 建筑结构学报,2003,24(5):18-23.

- LU Yiyan,SHI Jianyong,ZHAO Guofan. Experimental research on concrete columns strengthened with the combination of CFRP and angle steel[J]. Journal of Building Structures,2003,24(5):18-23.
- [11] WANG K,CHEN Y,WAN J,et al. Compressive behavior of post-heated circular CFST short columns externally strengthened with CFRP sheets[J]. Journal of Adhesion Science and Technology,2018,32(8):833-853.
- [12] HEGDE S,SHENOY B S,CHETHAN K N. Review on carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and their mechanical performance [J]. Materials Today: Proceedings,2019,19:658-662.
- [13] DURAN B,TUNABOYU O,KAPLAN O,et al. Effectiveness of seismic repairing stages with CFRPs on the seismic performance of damaged RC frames[J]. Structural Engineering and Mechanics,2018,67(3):233-244.
- [14] 来文汇,潘景龙,金熙男. 三种不同截面形状 FRP 约束混凝土应力-应变关系的试验研究[J]. 工业建筑,2004,34(10):81-84.
- LAI Wenhui,PAN Jinglong,JIN Xinan. Compressive stress-strain behavior of concrete confined by fiber reinforced polymer [J]. Industrial Construction,2004,34(10):81-84.
- [15] 谢志红,李健章,郭永昌. 碳纤维增强复合材料条带约束圆弧形方柱轴压性能试验研究[J]. 工业建筑,2016,46(3):9-13.
- XIE Zhihong,LI Jianzhang,GUO Yongchang. Experimental study of axial compressive properties of circularized square columns confined by CFRP strips[J]. Industrial Construction,2016,46(3):9-13.
- [16] 彭亚萍,刘增夕,马 明. 条带式 FRP 约束混凝土方柱的轴压承载力分析[J]. 武汉理工大学学报,2010,32(3):24-28.
- PENG Yaping,LIU Zengxi,MA Ming. Analysis of axial compressive bearing capacity of square concrete columns confined with striped FRP [J]. Journal of Wuhan University of Technology,2010,32(3):24-28.
- [17] 贾明英,程 华,陈小兵,等. 不同 FRP 约束混凝土圆柱轴心受压性能试验研究 [J]. 工业建筑,2002,32(5):65-67,56.
- JIA Mingying,CHENG Hua,CHEN Xiaobing,et al. Experimental research of properties of circular-columns in different FRP shells under axial compression [J]. Industrial Construction,2002,32(5):65-67,56.
- [18] 程东辉,杨燕红. 预应力 CFRP 布加固负弯矩混凝土柱轴心受压性能研究[J]. 建筑科学与工程学报,2017,34(4):34-40.
- CHENG Donghui,YANG Yanhong. Research on axial compressive properties of preloaded concrete columns strengthened with prestressed CFRP sheets[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2017,34(4):34-40.
- [19] 程东辉,王孝婷,范永萱,等. CFRP 条带加固方形截面混凝土柱力学性能研究 [J]. 建筑科学,2021,37(11):105-112.
- CHENG Donghui,WANG Xiaoting,FAN Yongxuan,et al. Research on mechanical properties of concrete columns with square section strengthened with CFRP strips[J]. Building Science,2021,37(11):105-112.
- [20] 程东辉,高佩罡,曹佳丽. CFRP 布带加固 T 形截面混凝土柱轴心受压试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2021,37(2):235-242.
- CHENG Donghui,GAO Peigang,CAO Jiali. Axial compression of T-section concrete columns strengthened with CFRP strip [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science),2021,37(2):235-242.
- [21] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- Code for design of concrete structures:GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2010.