

CFRP-钢管再生混凝土加固 RC 短柱轴压性能 试验及有限元模拟

陈 华^{1,2}, 张春裕¹, 余海涛¹, 陈耀嘉³, 李 甜²

(1. 广西大学土木建筑工程学院, 广西 南宁 530000; 2. 南宁学院土木与建筑工程学院, 广西 南宁 530000; 3. 广西科技大学土木建筑工程学院, 广西 柳州 545000)

摘 要 目的 研究碳纤维复合材料-钢管再生混凝土加固钢筋混凝土短柱的轴压性能。方法 对7根复合加固短柱以及1根未加固短柱进行轴压试验;利用有限元软件 ABAQUS 构建合理的模型,基于试验结果对数值模型进行验证;通过改变相应参数研究钢管厚度、钢管屈服强度和再生混凝土强度等级对复合加固短柱的影响程度,选出并修正适用于该构件的承载力计算方法。结果 复合加固作用下短柱的承载力约为原短柱的4倍,其易损部位主要发生在柱中及柱两端,增加钢管厚度,提高钢管屈服强度,提升再生混凝土强度等级均可提高短柱的极限承载力。结论 该加固方式能显著提高柱子承载力,试验值和有限元模拟值比较吻合,修正的承载力公式可以为此类构件的设计提供理论依据。

关键词 CFRP;短柱;再生混凝土;轴压;复合加固

中图分类号 TU398

文献标志码 A

Experiment and Finite Element Simulation for Axial Compression Performance of RC Short Columns Reinforced with CFRP-Recycled Concrete-Steel Tube

CHEN Hua^{1,2}, ZHANG Chunyu¹, SHE Haitao¹, CHEN Yaojia³, LI Tian²

(1. School of Civil Engineering, Guangxi University, Nanning, China, 530000; 2. School of Civil Engineering, Nanning University, Nanning, China, 530000; 3. School of Civil Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou, China, 545000)

Abstract: In order to study the axial compression performance of short reinforced concrete columns reinforced with carbon fibre composite-steel pipe recycled concrete. Axial pressure tests were conducted on seven composite reinforced short columns and one unreinforced short column. A reasonable model was constructed using the finite element software ABAQUS, and the numerical

收稿日期:2022-07-29

基金项目:国家自然科学基金重点国际(地区)合作研究项目(52220105005);广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2021KY1810)

作者简介:陈华(1978—),女,教授,主要从事新型复合材料的应用等方面研究。

model was validated based on the test results. In addition, the influence of steel tube thickness, steel tube yield strength and recycled concrete strength grade on the member was studied by changing the corresponding parameters. Finally, the load carrying capacity calculation method applicable to this member is selected and modified. The results show that the bearing capacity of the short column under the action of composite reinforcement is about 4 times that of the original square column, and its vulnerable parts mainly occur in the middle and both ends of the column; increasing the thickness of steel tube, the yield strength of steel tube and the strength grade of recycled concrete can improve the ultimate bearing capacity of the short column; it is concluded that this reinforcement method can significantly improve the bearing capacity of the column, the test value and the finite element simulation value are in good agreement, and the modified bearing capacity formula can provide the modified bearing capacity formula can provide some theoretical basis for the design of such members.

Key words: CFRP; short column; recycled concrete; axial compression; composite reinforced

钢筋混凝土 (RC) 柱是现代建筑结构中重要的构件,但由于其长时间服役及偶然冲击荷载等因素,部分 RC 柱存在安全隐患,亟需加固。RC 柱的传统加固方法有增大截面法、外粘碳纤维复合材料 (CFRP) 法、外包钢加固法^[1-3]等。但试验结果和实际应用表明,传统加固方法存在占用空间大、材料利用率低等缺点。而当混凝土处于三向受压状态时,混凝土侧向压力会约束自身的横向变形,从而抑制内部竖向裂缝的产生和发展,其强度和变形能力都会得到明显提高^[4]。钢管再生混凝土 (RAC) 加固和 CFRP-再生混凝土加固等复合加固方法能让核心混凝土达到三向受压状态^[5],有效提高 RC 柱的承载力。同时,由于再生混凝土的应用,在减少造价的同时有利于建筑业可持续发展。为此,笔者提出了一种以 CFRP 和钢管为外围约束材料、再生混凝土为填充材料的加固 RC 短柱的方法。

钢管-再生混凝土加固 RC 柱可以使柱子的承载力、延性和刚度同时获得显著提高^[6]。秦鹏^[7]对钢套管加固的 RC 柱进行水平低周往复试验,研究表明加固后的 RC 柱延性和耗能能力得到了大幅度提高,加固柱的抗震性能明显优于未加固柱。此外,众多研究表明^[8-9],该加固方法适用于有抗倒塌设计需求的结构。由于 CFRP 具有高强度、

高质量比、适应现场结构灵活等优点,在结构加固中广泛应用^[10]。与单一再生混凝土增大截面法相比,CFRP-再生混凝土加固法可以有效提高原 RC 柱的承载力^[11]。虽然再生混凝土的离子渗透率要高于普通混凝土,但 CFRP 可以抵抗酸、碱等物质的腐蚀作用^[12],可以防止该类物质直接接触混凝土,而且 CFRP 拥有良好的疲劳性能^[13]。这两种特性保证了 CFRP-再生混凝土加固 RC 柱的耐久性。

目前,已有国内外学者对于 RC 柱的双重复合加固方法进行了研究,但对于 CFRP 与钢管再生混凝土三重加固下 RC 柱的轴压性能研究较少。基于此,笔者以 CFRP-钢管再生混凝土作为外围约束材料,通过试验研究了三重加固下 RC 柱轴压承载力的提升效果;基于有限元软件 ABAQUS,对构件破坏形态进行分析,并对构件进行参数拓展,提出了适用于 CFRP-钢管再生混凝土加固 RC 短柱的轴压承载力修正公式。研究表明,三重加固下 RC 柱的延性有所提高,承载力提升效果显著。

1 试 验

1.1 试件制作

笔者设计了 7 个复合加固试件进行轴压试验。试件参数见表 1。

表 1 试件设计参数

Table 1 Characteristics of specimens		
试件编号	CFRP 层数/层	再生骨料取代率/%
未加固短柱	—	—
CF1-T2-C30-0	1	0
CF1-T2-C30-30	1	30
CF1-T2-C30-50	1	50
CF1-T2-C30-70	1	70
CF1-T2-C30-100	1	100
CF0-T2-C30-50	0	50
CF2-T2-C30-50	2	50

以 CF1-T2-C30-50 为例,CF1 代表 CFRP 层数为 1,T2 代表钢管厚度为 2 mm,C30 代表再生混凝土强度为 C30,50 代表再生混凝土的再生粗骨料取代率为 50%。构件尺寸如图 1 所示。试件加固流程为首先在原短柱表面涂刷粘结剂,之后将钢管除锈并套入原短柱,定位完成后浇筑再生混凝土,最后在钢管表面粘贴CFRP布和应变片,置于阴凉处

养护 28 d,具体过程如图 2 所示。材料实测性能见表 2、表 3、表 4。

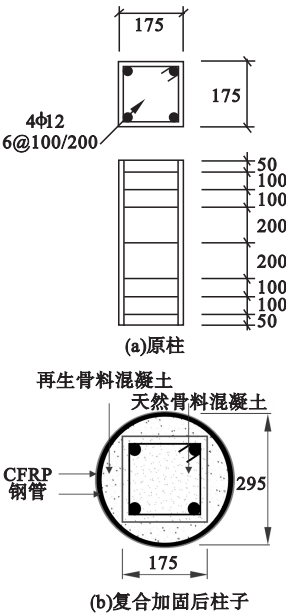


图 1 试件参数

Fig. 1 Design parameters of the specimen



图 2 试件的加固及养护

Fig. 2 Strengthening process of the specimen

表 2 混凝土力学性能指标

Table 2 Mechanical properties of concrete					
材料	强度等级	$r/\%$	f_{ck}/MPa	f_c/MPa	$E/10^5 \text{ MPa}$
普通混凝土	25	0	26.50	20.14	2.09
	30	0	37.35	28.39	3.00
	30	30	36.83	27.99	3.02
再生混凝土	30	50	36.44	27.69	2.98
	30	70	39.85	30.29	3.12
	30	100	39.02	29.66	3.09

注: r 为再生粗骨料取代率; f_{ck} 为实测标准立方体抗压强度; f_c 为混凝土轴心抗压强度; E 为混凝土弹性模量。

表 3 钢材物理力学性能

Table 3 Mechanical properties of steel				
钢材类型	直径或厚度/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	$E/10^5 \text{ MPa}$
HPB235	6	368	538	2.00
HRB335	12	405	575	2.00
薄壁钢管	2	282	378	1.98

1.2 试验设备及加载方案

试验采用的电液伺服试验压力机最大量程为 10 000 kN,正式加载前以 2 kN/s 的加

表 4 CFRP 材料性能

Table 4 Mechanical properties of CFRP materials

材料	厚度/ mm	抗拉强度/ MPa	受拉弹性 模量/MPa	伸长率/ %
CFRP	0.167	3 047	203 000	1.59

载速率加至 $0.2 N_u$ (N_u 为计算极限承载力),以压实试件和端板之间的间隙,保证各部件同时受力。随后将控制电脑的荷载归零开始正式加载,当施加荷载小于 $0.8 N_u$ 时,

以 2 kN/s 的加载速率加载;当施加荷载达到 $0.8 N_u$ 时,以 1 kN/s 的加载速率继续加载;当试件承载力下降至 $0.75 N_u$ 或变形过大时,试验结束。试件轴向位移的测量装置如图 3(a)所示,将位移传感器固定在 L 型钢筋上,利用试件底部角钢作为位移传感器的触片测量 4 个方向的轴向位移,应变片布置见图 3(b),加载现场见图 3(c)。

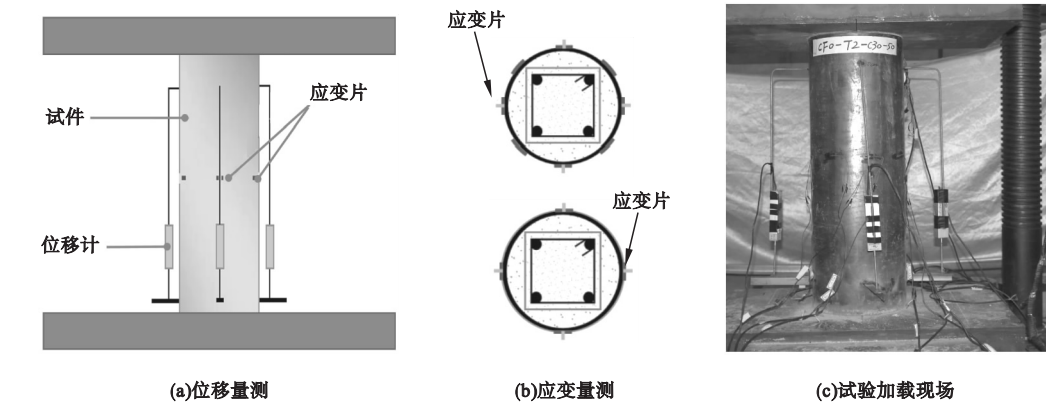


图 3 加载设备

Fig. 3 Load devices

2 有限元模拟

2.1 材料模型

杨有福^[14]在普通钢管混凝土中核心混凝土的基础上,将核心混凝土的峰值应变进行了调整,并考虑再生骨料取代率的影响,提出核心再生混凝土的应力-应变关系模型。该本构模型与 CFRP-钢管再生混凝土加固 RC 短柱的实际受力情况较为接近,因此文中核心混凝土采取该本构模型进行有限元模拟。钢材采用的本构模型为理想弹塑性模型。

由于 CFRP 的厚度相对于试件而言很薄,因此模型只考虑 CFRP 在短柱受压时承受环向拉力,认为 CFRP 为线弹性材料,即环向应变达到极限拉应变时 CFRP 破裂。

2.2 单元选取、接触设置及网格划分

建模时,圆钢管与混凝土采用缩减积分

实体单元 C3D8R 模拟,CFRP 采用 4 节点的膜单元 M3D4 模拟,该模单元只有面内刚度。试验完成后,将外部钢管割开,加固层再生混凝土敲掉,露出原短柱混凝土,经观察可发现,原短柱混凝土与加固再生混凝土粘结紧密。因此,在有限元建模中,认为两种混凝土是共同工作的整体,不考虑二者接触界面的相对滑移,接触关系采用绑定连接;垂直于钢管与混凝土接触面,外钢管对混凝土的约束力可以在两个面之间完全传递(硬接触);将 CFRP 与钢管绑定在一起,假定在钢管与再生混凝土之间无滑移,当 CFRP 达到抗拉强度后失去对钢管的约束作用。为了更好地模拟复合加固柱的真实受力情况,采用结构化网格对短柱进行单元划分,CFRP、钢管、钢筋骨架网格尺寸均为 20 mm ;原短柱混凝土、再生混凝土网格尺寸均为 15 mm 、上下端加载板网格尺寸为 25 mm 。

3 结果与分析

3.1 变形与应力云图对比分析

典型轴压短柱 CF1-T2-C30-100 试验变形和有限元模拟变形结果如图 4 所示。

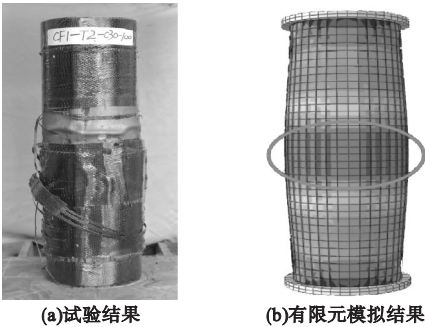


图 4 变形形态
Fig. 4 Deformation of specimen

从图中可以看出,试验结果与有限元模拟结果具有较高的相似性,都是在试件中部外鼓然后发生破坏,整体呈现出上下对称外鼓的破坏形态。

3.2 荷载-位移曲线对比

荷载-轴向位移曲线对比结果如图 5 所示。从图中可以看出,试验曲线与有限元模拟曲线在试件加载的各个阶段吻合较好,说明采用的本构模型和模拟方法合理,可为后续参数拓展研究提供理论依据。由试验结果可知,除试件 CF0-T2-C30-50 外,其余试件的极限承载力试验值与模拟值的误差均在 10% 以内,且试件 CF0-T2-C30-50 的误差未超过 12%,可见有限元模拟结果与试验结果吻合较好。

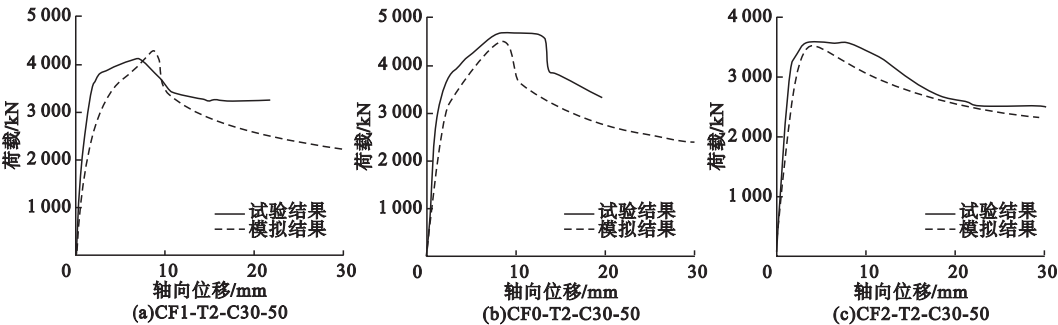


图 5 试验结果与有限元模拟结果对比
Fig. 5 Comparison of test results and FE results

4 参数分析

4.1 钢管厚度

不同钢管厚度下,复合加固柱的荷载-轴向位移曲线如图 6 所示。从图中可以看出,在加载初期,不同钢管厚度的复合加固柱的曲线斜率随钢管厚度增加而增大;荷载增加至 $75\% N_u$ 左右时,曲线斜率开始降低,此时钢管中部开始屈服。钢管厚度为 2 mm 短柱的曲线斜率降低最快,钢管厚度为 2.5 mm 和 3 mm 短柱的曲线降低速率基本相同。随着钢管厚度增加,短柱的极限承载力有明显提高,此时钢管对加固柱的极限承载力提升主要来源于自身的强度及其对核心混凝土的约束。荷载达到峰值后,短柱承载力出现骤

降,随后荷载-位移曲线平缓下降。荷载降至 $75\% N_u$ 时试验结束,此时钢管厚度越大,短柱的变形越大,说明增加钢管厚度,能有效提高复合加固柱的延性。

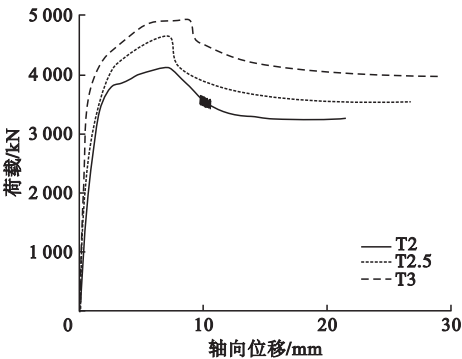


图 6 钢管厚度对荷载-位移曲线的影响
Fig. 6 Effect of steel tube thickness on load-displacement curves

钢管对试件的约束作用显著,钢管厚度从 2 mm 增加 3 mm 时,约束提升效果明显。但随着钢管厚度的增加,短柱极限承载力的提高幅度有所降低。钢管厚度从 2 mm 增加到 2.5 mm 时,极限承载力提升了 9.3%;钢管厚度从 2.5 mm 增加到 3 mm 时,极限承载力提升了 6.8%。

4.2 钢材屈服强度

不同钢管屈服强度下,复合加固柱的荷载-轴向位移曲线如图 7 所示。从图中可以看出,加载初期,曲线斜率随钢管屈服强度的提高而增加;荷载继续增加至 75% N_u 左右时,曲线斜率开始降低,此时四个构件的斜率基本相同;荷载达到峰值后,构件的极限承载力出现骤降,然后平缓降低。

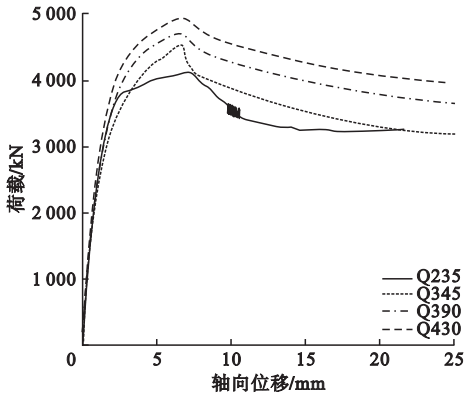


图 7 钢管屈服强度对荷载-位移曲线的影响
Fig. 7 Effect of steel tube yield strength on load-displacement curves

从图中可以看出,钢管屈服强度为 Q345 的短柱极限承载力比钢管屈服强度为 Q235 的短柱提高了 9.8%,随着钢管屈服强度的继续提高,承载力有所提高,但提高幅度仅为 3.5% 与 5.9%。

4.3 再生混凝土强度等级

不同再生混凝土强度等级下,复合加固柱的荷载-轴向位移曲线如图 8 所示。从图中可以看出,不同强度再生混凝土加固短柱的荷载位移曲线变化趋势无明显变化;荷载继续增加至 75% N_u 左右时,曲线斜率均开始降低,再生混凝土强度越低,曲线斜率变化越

快;随着再生混凝土强度等级的提高,短柱极限承载力增加明显;达到峰值荷载后,下降段曲线出现骤降,然后趋于平缓。

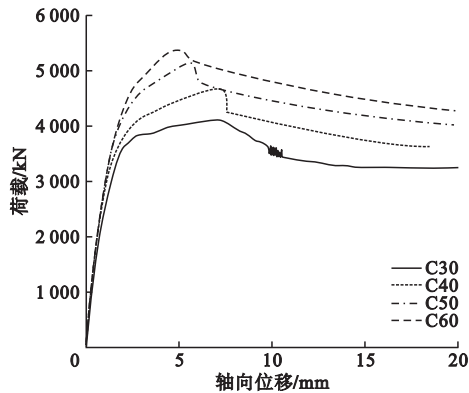


图 8 再生混凝土强度等级对荷载-位移曲线的影响

Fig. 8 Effect of strength grade of RAC on load-displacement curves

从图中可以看出,短柱极限承载力增加显著,但随着再生混凝土强度等级的提高,试件极限承载力的提高幅度有所降低。

5 现有极限承载力公式修正

文献[15]考虑到钢管及 CFRP 双重约束效应的影响,提出以下 CFRP-钢管混凝土短柱极限轴压承载力公式:

$$N_u = f_c A_{sc} (0.95 + 1.3 \xi_s) + \xi_f f_c A_c. \quad (1)$$

文献[16]基于极限平衡理论对钢管约束指标 ξ_s 的界限进行了优化工作,提出以下 CFRP-钢管混凝土短柱极限轴压承载力公式:

$$\begin{cases} N_u = f_{ck} A_c (1 + \xi_s + 2\xi_f), & 0 \leq \xi_s < 1.235; \\ N_u = f_{ck} A_c (1 + \sqrt{\xi_s} + \xi_s + 2\xi_f), & \xi_s \geq 1.235. \end{cases} \quad (2)$$

文献[17]对极限承载力公式进行化简,化简后的复合加固柱承载力计算式为

$$N_u = A_{cfsc} [1.14 + 1.02(\xi_s + 3\xi_f)] f_{ck}. \quad (3)$$

文献[18]引入材料利用率 α 来表征复合加固柱各材料的贡献,修正后的复合加固柱承载力计算式为

$$N_u = \alpha [(f_{ck1} A_{c1} + f_{ck2} A_{c2}) (1 + 2\xi) + f_{y0} A_{s0}] \tag{4}$$

式中: N_u 为柱的计算极限承载力; f_c 为圆柱体轴心抗压强度; A_{sc} 为钢管横截面积; ξ_s 为钢管约束效应系数; ξ_f 为 CFRP 约束效应系数; A_c 为混凝土横截面积; f_{ck} 为标准立方体轴心抗压强度; A_{cfsc} 为 CFRP 横截面积; f_{ck1} 、 f_{ck2} 分别为为原柱、填充混凝土标准立方体轴心抗压强度; A_{c1} 、 A_{c2} 分别为原柱、填充混凝土截面面积; ξ 为钢管与 CFRP 叠加而成的外部约束效应系数; f_{y0} 为原 RC 柱纵筋抗压强度; A_{s0} 为原柱纵筋截面面积。核心混凝土考虑为原柱混凝土和再生混凝土的叠加,故 $A_c f_c = A_{c1} f_{c1} + A_{c2} f_{c2}$ 。

将试验数据带入式中进行对比分析,采用试验值与理论计算值之比的平均值 A 、标准差 S 和平均绝对误差 E 作为评价指标对各个公式进行评价,旨在从中选出与文中构件最契合的承载力公式。 A 、 S 、 E 计算方法见

式(5)~式(7):
$$A = \sum \left(\frac{N_{u,theo}}{N_{u,exp}} \right) / n \tag{5}$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{N_{u,theo}}{N_{u,exp}} - A \right)^2} \tag{6}$$

$$E = \sum \frac{|N_{u,exp} - N_{u,theo}|}{|N_{u,theo}|} / n \tag{7}$$

式中: $N_{u,theo}$ 为极限承载力试验值; $N_{u,theo}$ 为极限承载力计算值。

图 9 为试件极限应力的理论计算值与试验值结果对比。其中,横坐标为极限应力试验值 $f_{cu,e}$ 与混凝土圆柱体柱抗压强度 f_c 的比值,纵坐标为极限应力计算值 $f_{cu,c}$ 与混凝土圆柱体柱抗压强度 f_c 的比值。从图 9 可知,文献[16]和文献[18]的预测结果较精准,平均预测精度都为 0.95,且平均绝对误差在 10% 以内。这两个模型不仅考虑了 CFRP 应变效率系数的影响,还分别考虑了钢管内外壁 CFRP 的有效约束系数,与文中

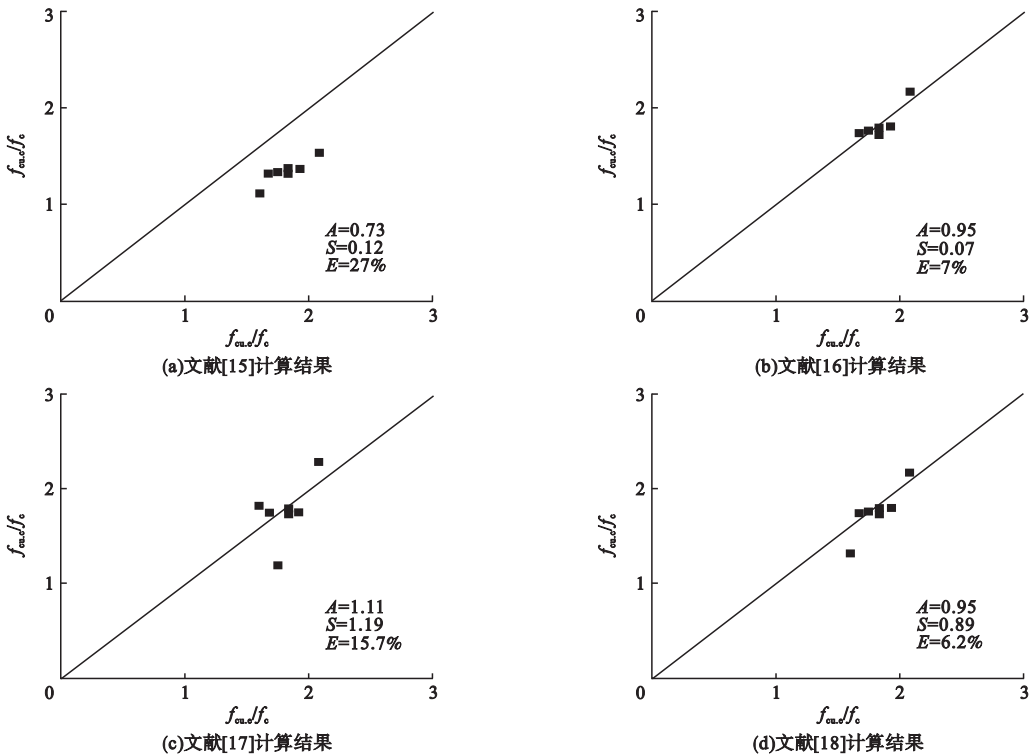


图 9 各计算公式准确度对比

Fig. 9 Comparison of the accuracy of each calculation formula

的结构较为符合,适用于文中结构承载力计算。文献[18]模型求得的极限承载力与试验结果的平均绝对误差值为 6.2%,优于文献[16]模型的 7%,所以选取该计算模型进行文中试件承载力的计算与修正。

考虑到再生混凝土材料缺陷,参照《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2013)^[19],引入材料利用率 α 来表征复合加固柱中各材料的贡献,利用试验数据算出 CFRP-钢管再生混凝土加固 RC 短柱的材料

的利用率 α :

$$\alpha = 0.93 - 0.1\xi, 0.474 \leq \xi \leq 1.492. \quad (8)$$

将 α 代入文献[18]极限承载力计算式中,得到修正后的承载力计算式为

$$N_u = (0.93 - 0.1\xi) [f_{ck1} A_{c1} + f_{ck2} A_{c2}] (1 + 2\xi) + f_{y0} A. \quad (9)$$

计算结果与试验结果对比见表 5。从表中可以看出,承载力计算结果与试验结果吻合较好。

表 5 极限承载力结果对比

Table 5 Comparison of ultimate bearing capacity results

试件编号	$N_{u,exp}/kN$	$N_{u,FE}/kN$	$N_{u,exp}/N_{u,FE}$	$N_{u,theo}/kN$	$N_{u,exp}/N_{u,theo}$
未加固短柱	1 006	—	—	—	—
CF1-T2-C30-0	3 903	3 943	0.99	4 045	1.04
CF1-T2-C30-30	3 800	3 924	1.10	4 025	1.06
CF1-T2-C30-50	4 113	3 909	1.06	4 010	0.97
CF1-T2-C30-70	4 311	4 037	1.06	4 141	0.96
CF1-T2-C30-100	4 109	4 006	1.12	4 109	1.00
CF0-T2-C30-50	3 588	3 155	0.98	3 236	0.91

注: $N_{u,exp}$ 为极限承载力试验结果; $N_{u,FE}$ 为极限承载力有限元模拟结果; $N_{u,theo}$ 为式(9)计算结果。

6 结 论

- (1)通过 ABAQUS 建立的 CFRP-钢管再生混凝土复合加固短柱模型,与短柱的实际受力情况较为接近,且试验结果与模拟结果吻合良好,可为构件分析提供参考。
- (2)CFRP-钢管再生混凝土三重加固作用下,短柱的承载力约为未加固短柱的 4 倍,证明该加固方式能显著提高柱子承载力;轴压荷载作用下短柱中各部件共同作用效果较好,易受损部位为柱中及柱两端。
- (3)钢管厚度、再生混凝土强度的增加能显著提高加固柱的承载力,但随着厚度、再生混凝土强度的增加,试件力学性能的提高幅度有所降低。
- (4)笔者修正的承载力公式可以应用于此类构件的设计中。

参考文献

[1] TENG J G, YU T, FERNANDO D. Strengthening of steel structures with fiber-reinforced polymer composites [J]. Journal of constructional steel research, 2012, 78: 131 – 143.

[2] SMITH S T, KIM S J. Behavior and effectiveness of frp wrap in the confinement of large concrete cylinders [J]. Journal of composites for construction, 2010, 14: 573 – 582.

[3] SHIRMOHAMMADI F, ESMAEILY A, KIAEIPOUR Z. Stress-strain model for circular concrete columns confined by FRP and conventional lateral steel [J]. Engineering structures, 2015, 84: 395 – 405.

[4] PAN Yi, GUO Rui, TANG Hongyuan, et al. Analysis-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete with preload [J]. Composite structures, 2017, 166: 57 – 67.

[5] FENG Peng, CHENG Shi, BAI Yu, et al. Mechanical behavior of concrete-filled square steel tube with FRP-confined concrete core subjected to axial compression [J]. Composite structures, 2015, 123: 312 – 324.

[6] 陈全有,李吉人,赵阳,等.方套方复合钢管混

- 凝土短柱压扭性能及延性分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(12): 5038-5045.
(CHEN Quanyou, LI Jiren, ZHAO Yang, et al. Compression-torsion performance and ductility analysis of composite concrete filled steel tubular short columns with square set square section [J]. Science technology and engineering, 2021, 21(12): 5038-5045.)
- [7] 秦鹏, 肖岩, 周云, 等. 约束钢管混凝土圆柱的低周反复荷载试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(5): 190-196.
(QIN Peng, XIAO Yan, ZHOU Yun, et al. Research on CFRP confined circular concrete-filled steel tubular columns subjected to cyclic lateral forces [J]. Journal of earthquake engineering and engineering vibration, 2013, 33(5): 190-196.)
- [8] PARK J W, HONG Y K, HONG G S, et al. Design formulas of concrete filled circular steel tubes reinforced by carbon fiber reinforced plastic sheets [J]. Procedia engineering, 2011, 14: 2916-2922.
- [9] 霍静思, 任晓虎, 肖岩. 标准火灾作用下钢管混凝土短柱落锤动态冲击试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(4): 9-20.
(HUO Jingsi, REN Xiaohu, XIAO Yan. Impact behavior of concrete-filled steel tubular stub columns under ISO-834 standard fire [J]. China civil engineering journal, 2012, 45(4): 9-20.)
- [10] LIU Jiepeng, XU Tianxiang, WANG Yuhang, et al. Axial behaviour of circular steel tubed concrete stub columns confined by CFRP materials-ScienceDirect [J]. Construction and building materials, 2018, 168: 221-231.
- [11] 向星赞, 赵人达, 贾毅. 方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的力学行为[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2017, 33(3): 420-428.
(XIANG Xingyun, ZHAO Renda, JIA Yi. Mechanical behavior of the eccentric loaded square self-compacting recycled aggregate concrete filled steel tube stub columns [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2017, 33(3): 420-428.)
- [12] 王磊, 吴翔, 夏海龙, 等. 碳纤维布加固不同锈蚀率钢筋混凝土梁抗弯性能研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(17): 257-261.
(WANG Lei, WU Xiang, XIA Hailong, et al. Study on the flexural performance of carbon fibre fabric reinforced concrete beams with different rust rates [J]. Science technology and engineering, 2016, 16(17): 257-261.)
- [13] 龚爽, 彭晖, 栗森, 等. 梯度锚固预应力 NSM CFRP 加固 RC 梁静力及疲劳性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(1): 113-123.
(GONG Shuang, PENG Hui, SU Miao, et al. Study on monotonic and fatigue behavior of RC beams strengthened with gradually anchored prestressed NSM CFRP [J]. Journal of Hu'nan university(natural sciences), 2022, 49(1): 113-123.)
- [14] 杨有福. 钢管再生混凝土构件荷载-变形关系的理论分析[J]. 工业建筑, 2007(12): 1-6.
(YANG Youfu. Theoretical research on load-deformation relations of recycled aggregate concrete-filled steel tubular members [J]. Industrial construction, 2007(12): 1-6.)
- [15] 陶忠, 庄金平, 于清. FRP 约束钢管混凝土轴压构件力学性能研究[J]. 工业建筑, 2005(9): 20-23.
(TAO Zhong, ZHUANG Jinping, YU Qing. Mechanical behavior of stub columns of FRP-confined concrete-filled steel tubes [J]. Industrial construction, 2005(9): 20-23.)
- [16] 顾威, 赵颖华, 尚东伟. CFRP-钢管混凝土轴压短柱承载力分析[J]. 工程力学, 2006, 23(1): 149-153.
(GU Wei, ZHAO Yinghua, SHANG Weidong. Load carrying capacity of concrete filled cfrp-steel tubes under axial compression [J]. Engineering mechanics, 2006, 23(1): 149-153.)
- [17] CHE Y, WANG Q L, SHAO Y B. Compressive performances of the concrete filled circular cfrp-steel tube(C-CFRP-CFST) [J]. Advanced steel construction, 2012, 8(4): 331-358.
- [18] 卢亦焱, 沈炫, 何楂, 等. CFRP-圆钢管自密实混凝土复合加固 RC 方形短柱轴压性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2015(11): 1-8.
(LU Yiyao, SHEN Xuan, HE Zha, et al. Experimental study on the behavior of RC square short columns strengthened with self-compacting concrete filled CFRP-steel tube under axial compression [J]. China civil engineering journal, 2015(11): 1-8.)
- [19] 四川省建筑科学研究院. 混凝土结构加固设计规范: GB50367—2013 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
(Sichuan Academy of Building Science. Design code for strengthening concrete structure: GB50367—2013 [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.)
- (责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)