

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240624002

外套方钢管夹层混凝土加固方CFST柱 压弯承载力计算方法*

卢亦焱, 柳永达, 刘真真, 马文涛, 祝涛

(武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 为研究外套方钢管夹层混凝土加固方钢管混凝土(CFST)柱的压弯承载力,进行3个原CFST柱和7个外套方钢管夹层混凝土加固方CFST柱(组合加固柱)试件的偏压试验,分析了试件的破坏形态和荷载—跨中挠度曲线。在试验基础上,通过纤维模型法对258个组合加固柱进行参数分析,分析了夹层混凝土强度、外套钢管厚度和屈服强度对组合加固柱 $N/N_u-M/M_u$ 曲线的影响。研究表明:原CFST柱和组合加固柱的破坏形态基本一致,均为典型的弯曲型破坏,组合加固柱加固部分与原CFST柱变形协调良好;夹层混凝土强度的提高、外套钢管厚度和屈服强度的降低使试件 $N/N_u-M/M_u$ 曲线呈现外凸趋势;在这些因素当中,夹层混凝土强度对平衡点位置影响效果最显著,钢管厚度和屈服强度对平衡点位置影响不大。基于试验和数值模拟结果,提出了组合加固柱压弯承载力计算方法。通过公式得到的压弯承载力计算值与试验值、纤维模型法模拟值的误差均在10%以内,表明计算方法可准确预测外套方钢管夹层混凝土加固方CFST柱压弯承载力,为工程应用提供参考。

关键词: 外套钢管; 夹层混凝土; 钢管混凝土柱; 纤维模型法; $N/N_u-M/M_u$ 曲线

中图分类号: TU375.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)01-0047-12

Calculation Method for the Compression-bending Capacity of Square Concrete-filled Steel Tube (CFST) columns with Square Steel Jacket and Sandwich Concrete Reinforcement

LU Yiyang, LIU Yongda, LIU Zhenzhen, MA Wentao, ZHU Tao

(School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: To investigate the compression-bending capacities of square concrete-filled steel tube (CFST) column reinforced with square steel jacket and sandwich concrete (composite reinforced columns), a series of eccentric compression tests were conducted on three original CFST columns and seven composite reinforced columns. The failure modes and load-midspan deflection curves of the specimens were analyzed. Based on the experiments, a parameter analysis was conducted on 258 composite reinforced columns using the fiber model method. The influence of the strength of the sandwich concrete, the thickness of the steel jacket, and the yield strength on the $N/N_u-M/M_u$ curves of the composite reinforced columns was investigated. The research results indicated that the failure modes

* 收稿日期:2024-06-24;修回日期:2024-09-13

基金项目:国家自然科学基金重点项目(52238006)资助

作者简介:卢亦焱(1965—),男,教授,博导,博士。主要从事高性能土木工程材料与结构安全研究。

E-mail: yylyu901@163.com

of the original CFST columns and composite reinforced columns were essentially consistent, both exhibiting typical bending-type failure. The deformation of the reinforced part of the composite columns coordinated well with the original CFST column. The increase in the strength of the sandwich concrete, and the decrease in the thickness of the steel jacket and yield strength caused the N/N_u - M/M_u curves to exhibit a convex trend. Among these factors, the strength of the sandwich concrete had the most significant effect on the equilibrium point position, while the thickness of the steel jacket and the yield strength had little impact on the equilibrium point position. Based on the experimental and numerical simulation results, a calculation method for the compression-bending capacities of the composite reinforced columns was proposed. The calculation results obtained from the formula showed an error within 10% when compared to the experimental and fiber model simulation results, indicating that the calculation method can accurately predict the compression-bending capacity of square steel jacket and sandwich concrete-reinforced square CFST columns, providing a reference for engineering applications.

Keywords: steel jacket; sandwich concrete; concrete-filled steel tube column; fiber model method; N/N_u - M/M_u curve

0 引言

钢管混凝土(CFST)结构是一种新型的钢-混凝土组合结构^[1-3],因其承载力高延性好、充分发挥材料特性、施工便捷等优点,在桥梁工程、高层建筑、重载结构等领域得到广泛的应用^[4-6]。随着服役时间的增长,CFST结构无可避免地受到火灾、地震、锈蚀、撞击等外部因素的损伤而不能满足使用要求,从而引发系列安全性问题及经济损失^[7-8]。因此,需利用合理有效的加固措施提高钢管混凝土的结构性能,延长其服役寿命。

常用的CFST结构加固方法包括:外粘纤维复材(FRP)加固法^[9-11]、扩大截面加固法^[12]、粘钢加固法等^[13-14]。扩大截面加固法在工程加固中较为广泛,该技术力学原理简单,设计体系和施工技术成熟,但是增大截面加固法存在加固截面尺寸改变大、结构自重增加大,湿作业多、工期较长等问题。FRP加固法和粘钢加固法对加固柱截面尺寸和自重影响较小,能有效提高CFST柱的承载力,但均存在粘胶耐久性的问题^[15-17]。外套钢管夹层混凝土加固法是一种新型的加固方法,将两个[型钢置于原CFST柱外侧,焊接成外套钢管,在外套钢管和原柱的空隙浇筑高流动性混凝土形成新型的组合加固柱^[18-20]。外套钢管侧向约束核心混凝土,显著提高其强度和变形能力;核心混凝土支撑、延缓钢管局部屈曲,该加固方法充分发挥加固材料的力学

特性,可快速大幅度提升CFST柱的受力性能。夹层混凝土可保证外套钢管和原CFST柱共同工作,规避了常规加固方法中新旧材料之间的界面粘结问题。此外,常规加固方法中,原CFST柱的损伤塑性变形可能在加固层结构中产生应力集中,影响加固的有效性,外套钢管夹层混凝土加固法效果则不受原结构损伤变形的影响。这些优点使外套钢管夹层混凝土加固法在快速修复、大幅度提升受损CFST柱受力性能等方面具有广阔的应用前景。李伟捷^[21]、Y.Huang等^[22-23]针对不同截面的CFST柱,采用外套管夹层混凝土加固法进行加固修复,研究表明:通过加固,原CFST圆形截面柱的轴压承载力提高幅度约114%~199%,原CFST方形截面柱的轴压承载力提高幅度达179%~255%。Y.Huang等^[24]通过界面推出试验研究了外套钢管夹层混凝土加固CFST柱的界面粘结性能,包括后浇混凝土与原钢管界面、后浇混凝土与加固钢管界面。结果表明,新旧钢管界面均与后浇混凝土具有良好的粘结性能,可保证组合加固柱各部分共同工作。L.H.Han等^[25]采用外套钢管夹层混凝土加固法对火灾受损的CFST柱进行加固,加固截面采用与原CFST柱相同的截面形式,并对加固后组合柱的抗震性能进行研究,结果表明,加固后CFST柱的承载力和刚度可以恢复到受损前水平。

然而,目前国内外学者多集中于外套钢管夹层混凝土加固CFST柱的轴压性能研究,对压弯承载力及计算方法相关研究较少,并且在实际工程中,

CFST柱往往处于压弯状态下,截面纵向应力分布不均匀,加固后外套钢管的环向约束也呈不均匀分布,其受力机理更为复杂。为进一步研究外套方钢管夹层混凝土加固方CFST柱压弯承载力计算方法,本文采用试验和数值模拟的方法对外套方钢管夹层混凝土加固方CFST柱的压弯性能进行研究,分析夹层混凝土强度、外套钢管厚度和屈服强度对组合加固柱 N/N_0 - M/M_0 曲线的影响,揭示工作机理,提出适用外套方钢管夹层混凝土加固方CFST柱的压弯承载力计算方法,为工程应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试件尺寸设计

试验共设计10个试件,其中包括3个原CFST柱和7个外套方钢管夹层混凝土加固方CFST柱(组合加固柱)。研究参数包括:偏心距、外套钢管厚度、夹层混凝土强度。试件截面尺寸如图1所示,原CFST柱的截面尺寸为 120×120 mm,组合加固柱截面尺寸为 200×200 mm,该尺寸可使内外钢管之间存在至少35 mm的间隙,试验中的夹层混凝土粗骨料最大粒径为15 mm以下,因此该间隙能够保

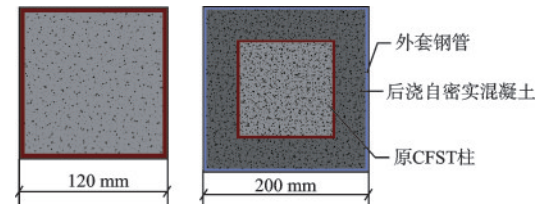


图1 加固方案

Fig.1 Reinforcement scheme

证夹层混凝土在内外钢管之间浇筑时的密实性。柱高均为600 mm,加固前后试件长宽比为5和3,以防止试件出现端部效应或弯曲变形。试验偏心率为0.12、0.24、0.36。

原CFST柱的核心混凝土设计强度为C40,其28天龄期的实测立方体抗压强度为42.19 MPa,夹层混凝土采用自密实混凝土,设计强度为C50、C60、C70三个等级,其28天龄期的实测立方体抗压强度分别为54.80、62.7、72.0 MPa。试件参数设计见表1。

已有研究表明对CFST柱施加长期荷载对原CFST柱的极限承载力和延性的影响是有限的^[26-27],并且进行预损再加固后的钢管混凝土短柱的压缩性能可以非常接近未预损的加固柱^[28],因此本文中原CFST柱并不施加初始荷载。

表1 试件设计参数

Table 1 Design parameters of specimens

组别	试件编号	$B_2 \times t_2 \times L_2$ /mm	$B_1 \times t_1 \times L_1$ /mm	f_{cu2} /MPa	f_{cu1} /MPa	e /mm	f_{sy1} /MPa	f_{sy2} /MPa	N_{uc} /kN
原柱	CFST-e12		-	42.19	-	12	-	339	1073
	CFST-e24	$120 \times 4.35 \times 600$	-	42.19	-	24	-	339	960
	CFST-e36		-	42.19	-	36	-	339	842
组合加固柱	C50-t3.4-e24		$200 \times 3.40 \times 600$	42.19	54.80	24	350	339	2 423
	C50-t4.4-e12		$200 \times 4.40 \times 600$	42.19	54.80	12	337	339	3 186
	C50-t4.4-e24		$200 \times 4.40 \times 600$	42.19	54.80	24	337	339	2 677
	C50-t4.4-e36	$120 \times 4.35 \times 600$	$200 \times 4.40 \times 600$	42.19	54.80	36	337	339	2 401
	C60-t4.4-e24		$200 \times 4.40 \times 600$	42.19	62.70	24	337	339	3 672
	C70-t4.4-e24		$200 \times 4.40 \times 600$	42.19	72.00	24	337	339	4 000
	C50-t5.5-e24		$200 \times 5.50 \times 600$	42.19	54.80	24	324	339	3 572

注:字母“C”后面的数字代表夹层混凝土强度等级,字母“t”后面的数字代表外套钢管壁厚,字母“e”后面的数字代表偏心距。 B_2 、 t_2 、 L_2 分别代表内部CFST未加固短柱钢管的外边长、壁厚、长度; B_1 、 t_1 、 L_1 分别代表外套钢管的外边长、壁厚、长度; f_{cu1} 和 f_{cu2} 分别代表夹层混凝土与原柱混凝土立方体抗压强度, e 代表偏心距, f_{sy1} 和 f_{sy2} 分别代表外套钢管与原柱钢管的屈服强度, N_{uc} 代表试件偏压承载力实测值

原CFST柱的钢管壁厚为4.35 mm,屈服强度为339 MPa,外套方钢管壁厚分别选用3.40、4.40、5.50 mm,屈服强度分别为350、337、324 MPa。钢管的材料性能见表2。

在原柱和加固柱中截面每隔90°分别沿纵向和

横向粘贴一对应变片测量纵向和横向应变。在试件1/4柱高、1/2柱高、3/4柱高位置分别布置水平位移计测量试件的侧向挠度,试件下端设置5 000 kN力传感器以适时准确测量施加的荷载值。试验在500 t试验机上进行,试验加载依据《混凝土

表2 钢材材料性能具体

Table 2 Detailed material properties of steel

钢管外边长×壁厚(B×t)/mm	屈服强度 f_s /MPa	极限强度 f_u /MPa	伸长率 δ /%	泊松比 μ
120×4.35	339	440	22.92	0.27
200×3.40	350	452	26.67	0.25
200×4.40	337	434	27.92	0.28
200×5.50	324	416	26.25	0.26

结构试验方法标准》^[29](GB/T50152—2012)进行,装置如图2所示。

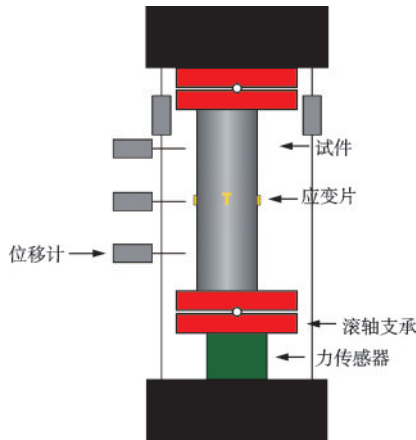


图2 加载装置

Fig.2 Loading device

1.2 破坏形态

试件的破坏形态如图3所示,原CFST柱和组合加固柱的破坏形态基本一致,均为典型的弯曲型破坏。试件展现明显的侧向挠度变形,弯曲内侧钢管出现局部鼓曲。相较于原CFST柱,组合加固柱的侧向变形和钢管的局部鼓曲更加明显。

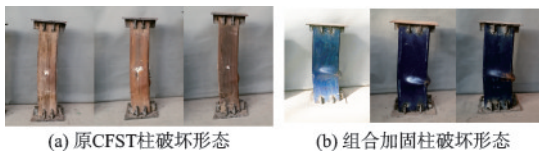


图3 试件破坏形态

Fig.3 Failure modes of specimen

组合加固柱内部破坏情况如图4所示,夹层混凝土有明显的弯曲变形,弯曲内侧的混凝土已被压碎,弯曲外侧混凝土出现数条水平裂缝。原CFST柱同样出现弯曲变形,钢管出现局部鼓曲现象。将原CFST柱的钢管剖开,内部核心混凝土同样有明显的弯曲变形,在弯曲内侧原CFST柱钢管鼓曲处

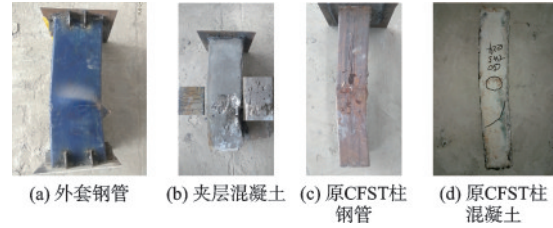


图4 组合加固柱各部分破坏形态

Fig.4 Failure modes of various parts of composite reinforced columns

被压碎,在弯曲外侧形成了数条水平裂缝。原柱部分与加固部分破坏形态、位置一致,说明加固部分与原CFST柱变形协调良好,二者共同工作。

1.3 荷载—跨中挠度关系曲线

试件的典型荷载—跨中挠度关系曲线如图5所示,将曲线的最大荷载定义为试件的极限承载力,组合加固柱的极限承载力为原CFST柱极限承载力的3.07倍。达到极限承载力后,原CFST柱和组合加固柱的侧向挠度继续发展,组合加固柱的下降段较为平缓,这是由于外套钢管、原CFST柱钢管的约束作用,限制了夹层混凝土、原CFST柱混凝土的环向变形,提高了整个试件的延性。

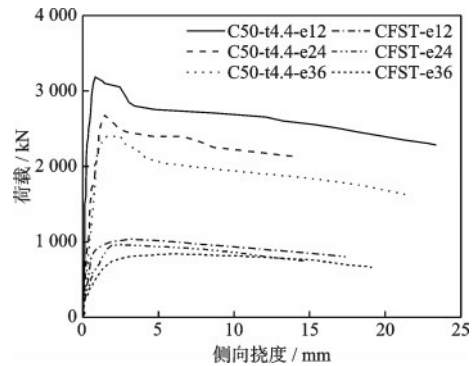


图5 典型荷载—跨中挠度关系曲线

Fig.5 Typical load-midspan deflection relationship curve

2 纤维模型法模型建立及验证

2.1 基本假设

为建立压弯状态下外套方钢管夹层混凝土加固方CFST柱的数值模型,作出以下假设:(1)试件两端铰接,加载过程中试件侧向弯曲变形为正弦半波曲线;(2)试件符合平截面假定;(3)钢管与混凝土界面粘结良好,包括外套钢管与夹层混凝土、夹层混

土与原柱钢管、原柱钢管与原柱混凝土之间的界面，无相对滑移。(4)变形过程中，混凝土抗拉强度为0。

2.2 本构关系

钢材的本构关系模型采用双线性模型，弹性阶段的模量为 E_s ，强化段的模量为 $0.01E_s$ ，表达式如下：

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_s & \varepsilon_s \leq \varepsilon_e \\ f_s + 0.01E_s(\varepsilon_s - \varepsilon_e) & \varepsilon_s > \varepsilon_e \end{cases} \quad (1)$$

式中， σ_s 为钢管的应力； ε_s 为钢管的应变； ε_e 为钢管达到屈服强度时的应变； f_s 为钢管的屈服强度； E_s 取 206 GPa。

混凝土在外套钢管约束作用下处于三向受压状态，其塑性变形能力增强，且这种塑形性能的增加与约束效应系数 (ξ) 有关^[30]，本文采用韩林海^[1]提出的约束混凝土塑性损伤模型，其本构关系表达式如下：

$$y = \begin{cases} 2x - x^2 & (x \leq 1) \\ \frac{x}{\beta_0 \cdot (x-1)^\eta + x} & (x > 1) \end{cases} \quad (2)$$

式中，参数含义按式(3)到式(9)进行计算：

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (3)$$

$$y = \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad (4)$$

$$\eta = 1.6 + 1.5/x \quad (5)$$

$$\sigma_0 = [1 + (-0.0135 \cdot \xi^2 + 0.1 \cdot \xi) \cdot \left(\frac{24}{f_c'}\right)^{0.45}] \cdot f_c' \quad (6)$$

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_c + \left[1300 + 760 \cdot \left(\frac{f_c'}{24} - 1\right)\right] \cdot \xi^{0.2} \cdot 10^{-6} \quad (7)$$

$$\varepsilon_c = (1300 + 12.5 \cdot f_c') \cdot 10^{-6} \quad (8)$$

$$\beta_0 = \frac{(f_c')^{0.1}}{1.35 \sqrt{1 + \xi}} \quad (9)$$

式中， f_c' 为混凝土圆柱体抗压强度。

由于组合加固柱含有两层钢管，需分别考虑外套钢管和原CFST柱钢管的约束作用。夹层混凝土仅受到外套钢管的约束作用，原CFST柱混凝土受到外套钢管和原CFST柱钢管的双重约束作用。因此，夹层混凝土和原CFST柱混凝土的约束效应系数 ξ_1 和 ξ_2 分别按下式计算：

$$\xi_1 = \alpha_1 (f_{s1}/f_{c1}) \quad (10)$$

$$\xi_2 = \alpha_1 (f_{s1}/f_{c1}) + \alpha_2 (f_{s2}/f_{c2}) \quad (11)$$

式中， $\alpha_1 = A_{s1}/A_{c1}$ ， A_{s1} 为外套钢管截面面积， A_{c1} 为外套钢管内部面积； $\alpha_2 = A_{s2}/A_{c2}$ ， A_{s2} 和 A_{c2} 分别为原CFST柱的钢管和混凝土截面面积； f_{s1} 和 f_{s2} 分别是外套钢管和原CFST柱钢管的屈服强度； f_{c1} 和 f_{c2} 分别是夹层混凝土和原CFST柱混凝土的抗压强度。

2.3 单元划分

组合加固柱横截面的单元划分如图6所示，包括了外套钢管、夹层混凝土、原CFST柱钢管和混凝土。将横截面沿长度方向划分成若干个条带，条带高度为 B_1/n 。外套钢管、夹层混凝土、原CFST柱钢管、原CFST柱混凝土对应的面积为 dA_{s1} 、 dA_{s2} 、 dA_{s3} 、 dA_{s4} 。当条带位于外套钢管时，仅需计算 dA_{s1} ，当条带位于夹层混凝土时，仅需计算 dA_{s1} 、 dA_{s2} ，当条带位于原CFST柱钢管时，计算 dA_{s1} 、 dA_{s2} 、 dA_{s3} ，当条带包含着原CFST柱混凝土面积时，需计算 dA_{s1} 、 dA_{s2} 、 dA_{s3} 、 dA_{s4} 。

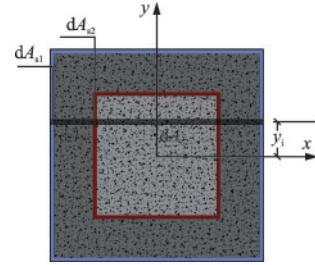


图6 组合加固柱截面单元划分

Fig.6 Division of section elements for composite reinforced columns

2.4 计算迭代步骤

纤维模型法计算流程如图7所示。设中截面形心处应变为 ε_0 ，给定构件中截面的初始挠度为 u_m ，由于试件变形符合正弦半波曲线，其跨中截面的曲率为：

$$\phi = \frac{\pi^2}{l^2} u_m \quad (12)$$

根据平截面假定，可以确定跨中截面任意条带中心点的应变 ε_i ，其计算式为：

$$\varepsilon_i = \varepsilon_0 + \phi y_i \quad (13)$$

式中， ε_0 为截面形心处应变； y_i 为条带单元中心至形心处的距离。

根据材料的本构关系，通过各个单元形心的应变值求解出对应的应力值 σ_{s1i} 、 σ_{c1i} 、 σ_{s2i} 、 σ_{c2i} 。利用各

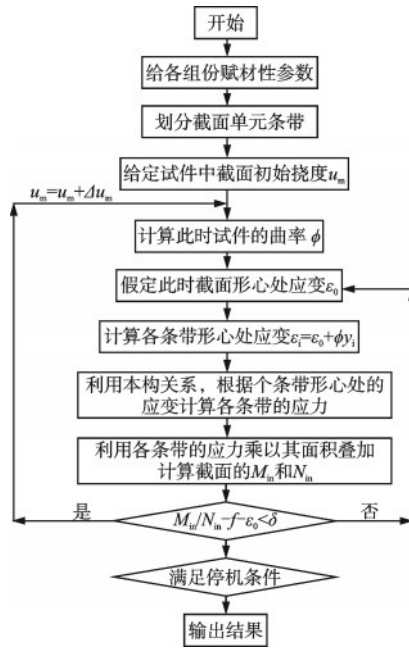


图7 纤维模型法计算框图

Fig.7 Flowchart of fiber model calculation method

个单元的应力值乘以对应的面积, 叠加得到整个截面的弯矩 M_{in} 和轴向荷载 N_{in} 。其计算式为:

$$M_{in} = \sum_{i=1}^n (\sigma_{s1i} dA_{s1i} + \sigma_{c1i} dA_{c1i} + \sigma_{s2i} dA_{s2i} + \sigma_{c2i} dA_{c2i}) y_i \quad (14)$$

$$N_{in} = \sum_{i=1}^n (\sigma_{s1i} dA_{s1i} + \sigma_{c1i} dA_{c1i} + \sigma_{s2i} dA_{s2i} + \sigma_{c2i} dA_{c2i}) \quad (15)$$

2.5 纤维模型法验证

为验证该纤维模型法的准确性, 将其模拟结果与试验结果进行对比, 如图8所示。纤维模型法模拟结果与试验结果总体上吻合较好, 但模拟曲线弹性阶段的斜率略大于试验曲线, 因为试验过程中机械位移的影响无法完全消除, 或端部约束条件与理想铰接略有出入, 导致了纤维模型法的模拟曲线与试验曲线之间的误差。

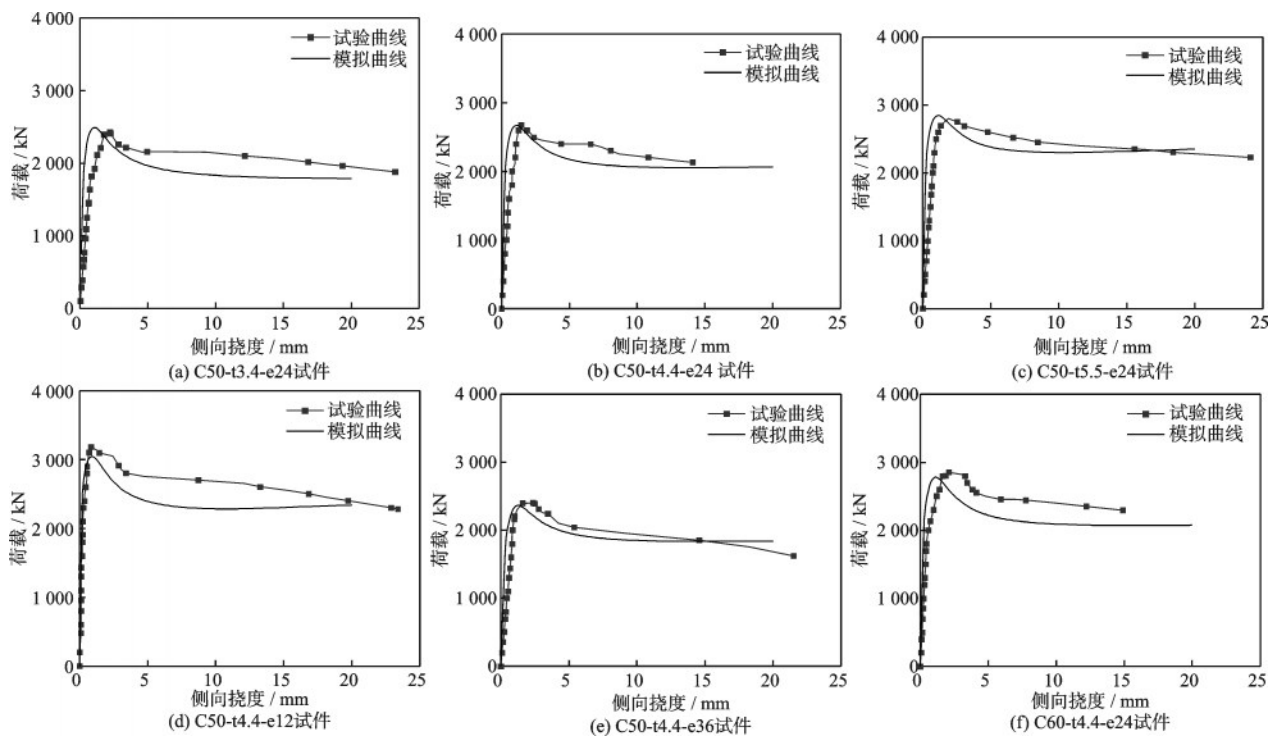


图8 试验所得荷载-挠度曲线与纤维模型法模拟曲线对比

Fig.8 Comparison of load-deflection curves from experiment and fiber model method simulation

为进一步验证纤维模型法模拟结果的准确性, 将各构件的试验承载力 N_{uc} 和纤维模型法模拟承载力 N_p 进行对比, 如图9所示。由图可知, 纤维模型法的模拟结果与试验结果吻合较好, 其中模拟值与试验值之比的均值为 0.991, 变异系数为 0.028。这说明, 纤维模型法可以较为精确地模拟组合加固柱

的压弯承载力。

3 $N/N_u - M/M_u$ 曲线影响参数拓展分析

利用编制的程序对外套方钢管夹层混凝土加固方 CFST 压弯构件的 $N/N_u - M/M_u$ 曲线进行参数

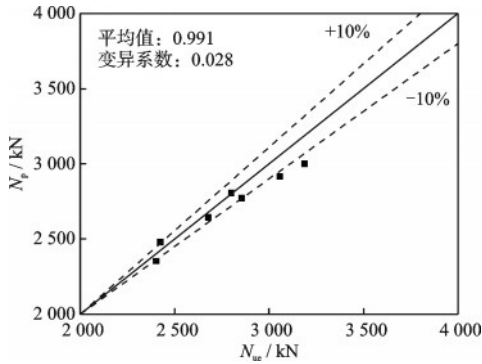


图9 压弯承载力试验值与纤维模型法模拟值对比
Fig.9 Comparison of experimental compression-bending capacity and fiber model method simulation results

拓展分析,共设计了258个试件,设计参数包括夹层混凝土强度、外套钢管的屈服强度和壁厚。不同因素对组合加固柱 N/N_u - M/M_u 相关曲线的影响如图10(a)~(f)所示。计算模型的基本参数为 $f_{cu1}=55$ MPa, $f_{sy1}=335$ MPa, $t_1=4.4$ mm, 偏心率取值为0.1~2等差递增,差值为0.1,具体参数值见表3。

为说明各参数对 N - M 以及 N/N_u - M/M_u 相关曲线的影响,做出以下定义: N_u 表示试件轴心受压达到极限承载力,此时截面无弯矩;当试件处于大小偏心受压临界点的平衡破坏状态时,试件受压承载力 N_0 ,受弯承载力为 M_0 ; M_u 表示试件在纯弯荷载下达到极限纯弯承载力,此时截面无轴向荷载。

图10(a)、(d)分别为外套钢管屈服强度 f_{sy1} 对于

表3 参数取值

Table 3 Parameter values

夹层混凝土强度	外套钢管屈服强度	外套钢管厚度
f_{cu1} /MPa	f_{sy1} /MPa	t_1 /mm
40	335	1.5
55	460	2.5
70	550	3.5
85	690	4.4
100	880	6.5

组合加固柱 N - M 和 N/N_u - M/M_u 相关曲线的影响。如图10(a)所示,随着 f_{sy1} 的增大,试件的 N - M 包络线外扩明显,说明增大钢管屈服强度可以提高试件的承载能力。 f_{sy1} 的提高使得试件在大小偏心受压临界点平衡破坏时的轴向承载力 N_0 逐渐增大。

由图10(d)可知,随着 f_{sy1} 的增加, N/N_u - M/M_u 曲线呈内收趋势,临界平衡破坏点的 M/M_u 减小。因为忽略混凝土的抗拉强度,组合加固柱截面拉应力主要由钢管承担,增大 f_{sy1} 使得纯弯状态时钢管承担抗弯承载力 M_u 的比例大于偏压时承担抗弯承载力 M 的比例,因此使得大小偏心临界破坏的抗弯承载力与纯弯承载力之间差值减小,使得临界平衡破坏点横坐标减小。宏观来看,当外套钢管屈服强度增加时,相当于增大钢材所占比重,构件的力学性能更接近于钢结构压弯承载能力,因此 N/N_u - M/M_u 曲线呈内收趋势。

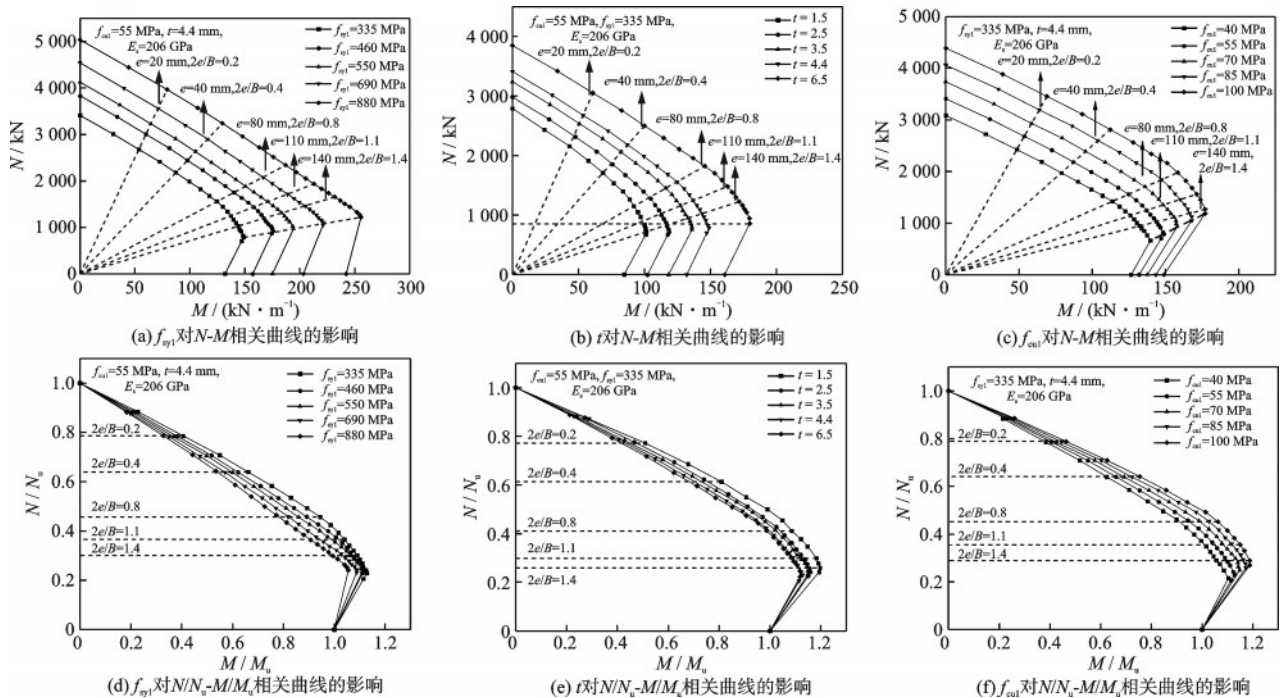


图10 各参数对 N/N_u - M/M_u 曲线的影响

Fig.10 Influence of various parameters on the N/N_u - M/M_u curve

图 10(b)、(e)分别展示了外套钢管壁厚对试件 N - M 和 N/N_u - M/M_u 相关曲线的影响。与提高钢管屈服强度类似,增加钢管壁厚亦可以显著增强试件的承载能力,如图 10(b)所示。 t 对 N_0 和 N/N_u - M/M_u 曲线的影响趋势及原理均与 f_{sy1} 相同。

图 10(c)、(f)分别为夹层混凝土强度对组合加固柱 N - M 和 N/N_u - M/M_u 相关曲线的影响。如图 10(c)所示,随着 f_{cu1} 的增加,试件的 N - M 包络线外扩,说明增大夹层混凝土强度可以提高试件的承载能力。 f_{cu1} 的提高同时使得试件在大小偏心受压临界点平衡破坏时的轴向承载力 N_0 增大。

由图 10(f)可知,随着 f_{cu1} 的增加, N/N_u - M/M_u 曲线呈外扩趋势,平衡破坏点所逐渐外凸, N/N_u 和 M/M_u 均增大。这是因为 f_{cu1} 的增加使得混凝土承担荷载的比例增大,相应钢材承担的荷载比例减小。宏观来看, f_{cu1} 的提高,相当于增大混凝土所占比重,构件力学性能更接近钢筋混凝土压弯构件,因此平衡点逐渐外凸。

4 压弯承载力计算方法

基于以上分析,外套方钢管夹层混凝土加固方 CFST 柱的典型 N/N_u - M/M_u 曲线如图 11 所示。曲线由直线段 AB 和抛物线 BCD 组成,曲线形状由平衡点 C 决定^[31]。

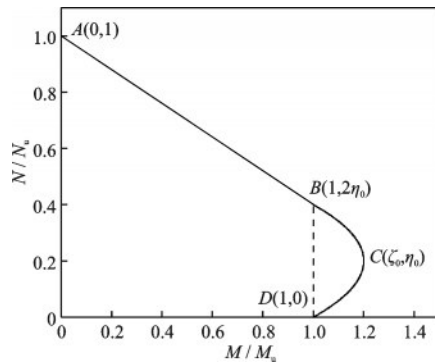


图 11 组合加固柱 N/N_u - M/M_u 曲线示意

Fig.11 N/N_u - M/M_u curve for composite reinforced columns

4.1 平衡点 C 计算公式

根据图 10(d)~(f),从 13 条不同截面参数的 N/N_u - M/M_u 曲线中得到平衡点 C 的坐标值 ζ_0 和 η_0 ,同时计算各试件的约束效应系数 ξ_1 和 ξ_2 ,将各计算值列于表 4。

对表中数据进行非线性曲线拟合,得到 ζ_0 和 η_0 的计算公式为:

表 4 组合加固柱约束效应系数及平衡点 C 坐标值

Table 4 Constraint effect coefficient and equilibrium point C coordinate values of composite reinforced columns

编号	ξ_1	ξ_2	ζ_0	η_0
1	0.986	2.760	1.103	0.216
2	0.717	2.438	1.128	0.230
3	0.563	2.284	1.148	0.249
4	0.464	2.185	1.173	0.259
5	0.394	2.115	1.188	0.288
6	0.984	2.705	1.117	0.241
7	1.177	2.898	1.149	0.247
8	1.477	3.198	1.128	0.230
9	1.883	3.604	1.118	0.222
10	0.234	1.955	1.196	0.259
11	0.395	2.116	1.160	0.241
12	0.562	2.283	1.149	0.247
13	1.095	2.816	1.118	0.222

$$\zeta_0 = 0.035\xi_1^{-0.694} + 0.212\xi_2^{-0.048} + 0.898 \quad (16)$$

$$\eta_0 = 0.181\xi_1^{-0.071} + 0.083\xi_2^{-1} + 0.0232 \quad (17)$$

将式(16)和式(17)的计算值与纤维模型法的模拟值进行对比,如图 12 所示。由图可知:计算值和模拟值吻合良好, ζ_0 计算值与模拟值之比的均值为 0.997,变异系数为 0.012, η_0 计算值与模拟值之比的均值为 0.990,变异系数为 0.071。

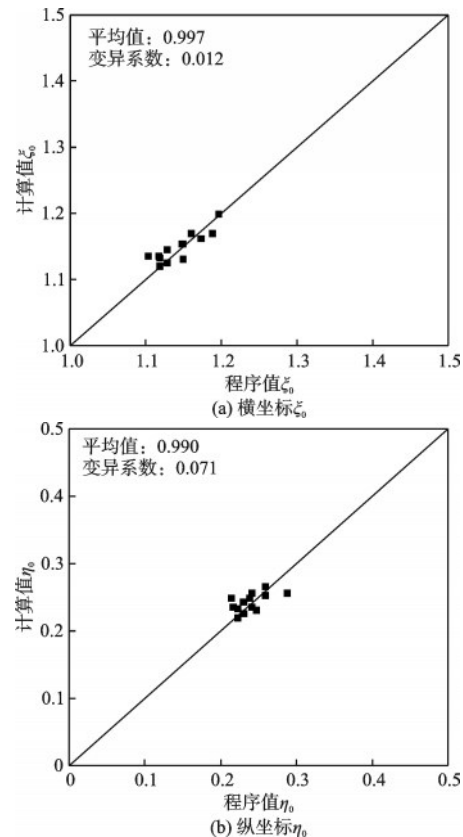


图 12 平衡点 C 坐标对比

Fig.12 Comparison of equilibrium point C coordinates

4.2 N/N_u - M/M_u 曲线计算公式

基于本文 N/N_u - M/M_u 曲线形式以及参考韩林海^[1]提出的钢管混凝土 N/N_u - M/M_u 强度关系式,建立组合加固柱的压弯承载力计算模型:

$$\begin{cases} \frac{N}{N_u} + \frac{a}{d} \left(\frac{\beta_m M}{M_u} \right) = 1 & (N/N_u \geq 2\eta_0) \\ -b \left(\frac{N}{N_u} \right)^2 - c \frac{N}{N_u} + \frac{1}{d} \left(\frac{M}{M_u} \right) = 1 & (N/N_u < 2\eta_0) \end{cases} \quad (18)$$

式中, $a = 1 - 2\eta_0$; $b = \frac{1 - \zeta_0}{\eta_0^2}$; $c = \frac{2(\zeta_0 - 1)}{\eta_0}$;

$d = 1 - 0.4 \left(\frac{N}{N_E} \right)$; N_u 是试件轴压承载力; M_u 是试件抗弯承载力; β_m 是等效弯矩系数,按《钢结构设计标准》^[32](GB 50017—2017)取值; N_E 为系数,按照下式计算:

$$N_E = \frac{\pi^2 E_{sc} A_{sc}}{\lambda^2} = \frac{\pi^2 (E_{s1} A_{s1} + E_{c1} A_{c1} + E_{s2} A_{s2} + E_{c2} A_{c2})}{\lambda^2} \quad (19)$$

式中, E_{s1} 、 E_{c1} 、 E_{s2} 、 E_{c2} 分别为外套钢管、夹层混凝土、原 CFST 柱钢管、原 CFST 柱混凝土的弹模; A_{s1} 、 A_{c1} 、 A_{s2} 、 A_{c2} 分别为外套钢管、夹层混凝土、原 CFST 柱钢管、原 CFST 柱混凝土的截面面积; λ 为试件的长细比。其中 N_u 和 M_u 分成两部分计算,第一部分为外套钢管和夹层混凝土形成的中空 CFST 柱,第二部分为原 CFST 柱。整个截面的抗弯承载力按下式计算:

$$N_u = f_{sci} \cdot (A_{c2} + A_{s2}) + f_{sco} \cdot (A_{c1} + A_{s1}) \quad (20)$$

$$M_u = \gamma_{m1} W_{sco} f_{sco} + \gamma_{m2} W_{sci} f_{sci} \quad (21)$$

式中, f_{sci} 为基于统一理论计算的原 CFST 柱抗压强度; f_{sco} 为外套钢管与夹层混凝土的复合强度; W_{sc} 为受弯试件的截面模量; γ_{m1} 和 γ_{m2} 为塑性发展系数。

f_{sci} 和 f_{sco} 按下式计算:

$$f_{sc} = (1.212 + B\xi + C\xi^2) f_c \quad (22)$$

式中, B 、 C 为套箍效应影响系数,按《钢管混凝土结构技术规范》^[33](GB 50936—2014)取值。

W_{sco} 和 W_{sci} 按下式计算:

$$W_{sco} = (B_1^3 - B_3^3) / 6 \quad (23)$$

$$W_{sci} = B_3^3 / 6 \quad (24)$$

γ_{m1} 和 γ_{m2} 按下式计算:

$$\gamma_{m1} = (1 - 0.5\psi)(-0.483\xi_1 + 1.926\sqrt{\xi_1}) \quad (25)$$

$$\gamma_{m2} = -0.483\xi_2 + 1.926\sqrt{\xi_2} \quad (26)$$

式中, ψ 为空心率; ξ_1 和 ξ_2 分别为夹层混凝土和原 CFST 柱混凝土的约束效应系数。联立式(18)~(26)即可计算出组合加固短柱的 N/N_u - M/M_u 曲线。

公式法计算的压弯构件承载力 N_c 与试验实测值 N_{ue} 、纤维模型法模拟值 N_p 对比结果如图 13 所示。 N_c 与 N_{ue} 、 N_p 的误差均在 10% 以内,与试验实测结果相比偏安全,具有较高的可靠性。

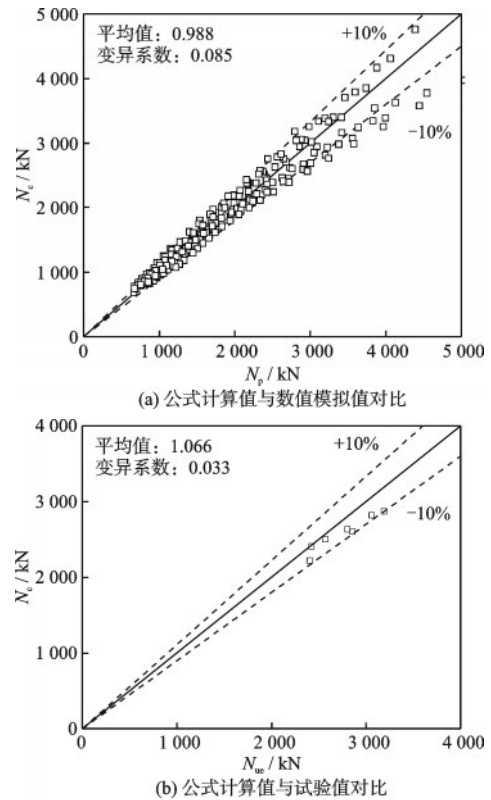


图 13 公式计算值与数值模拟值、试验值的比较

Fig.13 Comparison of formula calculation values with numerical simulation and experimental results

采用公式法计算得到的加固组合柱的 N/N_u - M/M_u 相关曲线与纤维模型法模拟结果比较如图 14 所示。可以看出:计算结果与模拟结果吻合良好。表明可以利用上述公式计算组合加固柱在压弯状态下的承载力,为工程设计提供参考。

为进一步验证公式的准确性,将计算公式所计算的承载力与 J.C.Ci 等^[34]的试验值进行比较,如图 15 所示。公式计算值与现有文献试验值之比的均值为 0.907,变异系数为 0.037,表明本文所得到的外套钢管压弯构件承载力的计算方法的准确性。

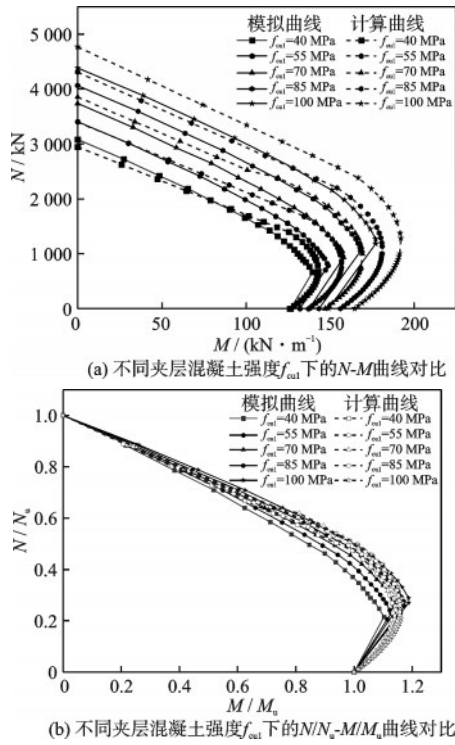


图 14 公式计算与纤维模型法模拟的 $N-M$ 曲线和 $N/N_u-M/M_u$ 曲线对比

Fig.14 Comparison of $N-M$ and $N/N_u-M/M_u$ curves from formula calculation and fiber model simulation

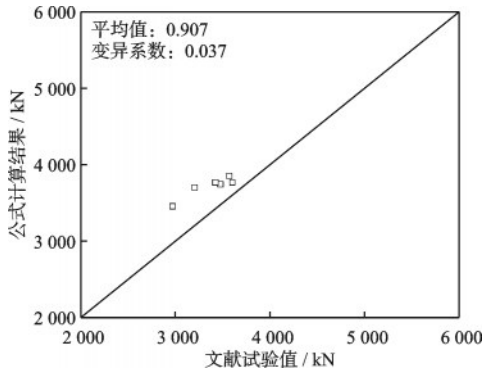


图 15 公式计算值与现有文献的试验值对比

Fig.15 Comparison of formula calculation with experimental values from existing literature

5 结 论

本文通过对 3 个原方 CFST 柱和 7 个外套方钢管夹层混凝土加固方 CFST 柱(组合加固柱)进行了压弯试验,并采用自编纤维模型法程序对组合加固柱的压弯性能进行了研究,对 258 个试件进行参数分析,得到以下主要结论:

(1)通过外套方钢管夹层混凝土加固法,原

CFST 柱与加固部分有着良好的变形协调能力,组合加固柱的承载能力提高了 3.07 倍,同时由于钢管的约束作用提高了试件的延性。

(2)采用纤维模型法分析组合加固柱的压弯性能。结果表明,模拟的承载力和荷载-侧向挠度曲线均与试验结果符合良好。组合加固柱压弯承载力的模拟值与试验值之比均值为 0.991,变异系数为 0.028。

(3)参数分析结果表明,随着夹层混凝土强度提高、外套钢管厚度和屈服强度的降低, $N/N_u-M/M_u$ 曲线逐渐外扩,平衡点 C 逐渐外移;对平衡点位置影响效果最为显著的因素是夹层混凝土强度,钢管厚度对平衡点位置影响不大。

(4)基于模拟结果,提出了组合加固柱的压弯承载力计算公式,公式计算值与试验值、模拟值的误差均在 10% 以内, $N/N_u-M/M_u$ 计算曲线与纤维模型法模拟的曲线吻合良好。提出的压弯承载力计算公式可为组合加固柱的工程应用提供参考。

(5)钢管混凝土结构已广泛应用于各种桥梁结构体系中,本文提出的压弯承载力计算方法主要适用于外套方钢管夹层混凝土加固方 CFST 柱且长细比在短柱范围内的组合加固柱,并且混凝土材料为普通混凝土和自密实混凝土,钢管是普通碳素钢材的组合加固柱,对于其他形式或使用其他材料的组合加固柱并不适用。对采用不同截面形式,使用不同材料的组合加固柱的压弯承载力计算方法,设计人员可针对具体情况,在本文建议方法的基础上,进一步探索适用于特殊工况下组合加固柱的压弯承载力计算方法。

参考文献:

- [1] 韩林海. 钢管混凝土结构:理论与实践(第四版)[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
Han L H. Concrete filled steel tubular structures: theory and practice. 4th ed [M]. Beijing: Science Press, 2022. (in Chinese)
- [2] Ouyang Y, Kwan A K H. Finite element analysis of square concrete-filled steel tube (CFST) columns under axial compressive load[J]. Engineering Structures, 2018, 156: 443-459.
- [3] 韩林海, 牟廷敏, 王法承, 等. 钢管混凝土混合结构设计原理及其在桥梁工程中的应用[J]. 土木工程学报, 2020, 53(5): 1-24.
Han L H, Mu T M, Wang F C, et al. Design theory of CFST (concrete-filled steel tubular) mixed structures

- and its applications in bridge engineering[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53(5): 1-24. (in Chinese)
- [4] 范光明, 王卫华, 徐哲人, 等. 复式钢管混凝土柱装配式连接锚固性能试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2023, 43(6): 1331-1345.
Fan G M, Wang W H, Xu Z R, et al. Experimental study on anchorage performance of fabricated connection of composite-sectioned concrete-filled steel tubular column[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2023, 43(6): 1331-1345. (in Chinese)
- [5] 黄志, 熊陆增, 蒋丽忠, 等. 四肢钢管混凝土格构柱试验研究及参数分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2024, 44(3): 616-622.
Huang Z, Xiong L Z, Jiang L Z, et al. Experimental study and parameter analysis of four-tube concrete-filled steel tube lattice columns[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2024, 44(3): 616-622. (in Chinese)
- [6] 陈保健, 杜轲, 王飞. 钢管混凝土输电塔地震易损性研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2024, 44(2): 381-388.
Chen B J, Du K, Wang F. Study on seismic vulnerability of concrete-filled steel tube transmission towers[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2024, 44(2): 381-388. (in Chinese)
- [7] 王玉镯, 邱昊, 徐天贵, 等. 火灾中钢筋混凝土两端固结梁破坏模式变化规律[J]. *防灾减灾工程学报*, 2024, 44(1): 192-201.
Wang Y Z, Qiu H, Xu T G, et al. Change law of failure modes of reinforced concrete beams with fixed ends in fire[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2024, 44(1): 192-201. (in Chinese)
- [8] 惠存, 李永刚, 李克, 等. 多灾耦合作用下钢管混凝土柱承载性能研究进展[J]. *防灾减灾工程学报*, 2022, 42(2): 259-268.
Hui C, Li Y G, Li K, et al. Investigation on the load bearing capacity of concrete filled steel tube columns under the couple of multiple disasters[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2022, 42(2): 259-268. (in Chinese)
- [9] Wang Y L, Chen G P, Wan B L, et al. Axial compressive behavior and confinement mechanism of circular FRP-steel tubed concrete stub columns[J]. *Composite Structures*, 2021, 256: 113082.
- [10] Yan Y H, Lu Y Y, Li S, et al. Square concrete-filled steel tube strengthened with carbon fiber-reinforced polymer grid-reinforced engineered cementitious composite under axial loading[J]. *Engineering Structures*, 2024, 299: 117108.
- [11] Yan Y H, Liang H J, Lu Y Y, et al. Behaviour of concrete-filled steel-tube columns strengthened with high-strength CFRP textile grid-reinforced high-ductility engineered cementitious composites[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 269: 121283.
- [12] Kunio F, Yasuo H, Yasuyoshi M. Studies on repair and strengthening methods of damaged reinforced concrete columns[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2000, 22(1): 81-88.
- [13] 徐铨彪, 干钢, 陈刚. 外包钢加固钢筋混凝土框架梁受力性能分析[J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(12): 136-143.
Xu Q B, Gan G, Chen G. Analysis on mechanical behavior of RC frame beams encased with steel plate[J]. *Journal of Building Structures*, 2016, 37(12): 136-143. (in Chinese)
- [14] 李俊华, 唐跃锋, 刘明哲, 等. 外包钢加固火灾后钢筋混凝土柱的试验研究[J]. *工程力学*, 2012, 29(5): 166-173.
Li J H, Tang Y F, Liu M Z, et al. Experimental study on reinforced concrete columns strengthened with external steel clad after exposure to fire[J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(5): 166-173. (in Chinese)
- [15] He A, Cai J, Chen Q J, et al. Behaviour of steel-jacket retrofitted RC columns with preload effects [J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, 109: 25-39.
- [16] Li S, Chan T M, Young B. Compressive behavior and analysis-oriented model of FRP-confined engineered cementitious composite columns [J]. *Engineering Structures*, 2022, 270: 114869.
- [17] Hussein M E, Abbas H, Almusallam T H, et al. Organic versus inorganic matrix composites for bond-critical strengthening applications of RC structures-State-of-the-art review[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 174: 106947.
- [18] Zhao X B, Lu Y Y, Liang H J, et al. Optimal design of reinforced concrete columns strengthened with square steel tubes and sandwiched concrete [J]. *Engineering Structures*, 2021, 244: 112723.
- [19] Li W J, Liang H J, Lu Y Y, et al. Axial behavior of slender RC square columns strengthened with circular steel tube and sandwiched concrete jackets [J]. *Engineering Structures*, 2019, 179: 423-437.
- [20] Lu Y Y, Liang H J, Li S, et al. Numerical and experimental investigation on eccentric loading behavior of RC columns strengthened with SCC filled square steel tubes[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2015, 18

- (2):295-309.
- [21] 李伟捷. 外套圆钢管夹层混凝土加固CFST柱受压性能研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
- Li W J. Research on compressive behavior of CFST columns strengthened with circular steel tube and sandwiched concrete jackets[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019. (in Chinese)
- [22] Huang Y, Li W J, Lu Y Y, et al. Behaviour of CFST slender columns strengthened with steel tube and sandwiched concrete jackets under axial loading[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 45: 103613.
- [23] Huang Y, Liang H J, Lu Y Y, et al. Axial behaviour of square stub CFST columns strengthened with square steel tube and HPC jacket[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 186: 106896.
- [24] Huang Y, Zhao P T, Lu Y Y, et al. Push-out tests of CFST columns strengthened with self-compacting and self-stressing concrete filled square steel tube[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 193: 107263.
- [25] Han L H, Lin X K, Wang Y C. Cyclic performance of repaired concrete-filled steel tubular columns after exposure to fire [J]. Thin-Walled Structures, 2006, 44 (10): 1063-1076.
- [26] Hou C, Han L H, Zhao X L. Full-range analysis on square CFST stub columns and beams under loading and chloride corrosion [J]. Thin-Walled Structures, 2013, 68: 50-64.
- [27] 李艳华. 长期荷载作用下钢管约束的钢管混凝土轴压短柱力学性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- Li Y H. Mechanical behavior of steel-tube confined concrete-filled steel tube stubs under sustained axial compression[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021. (in Chinese)
- [28] Ekmekyapar T, AL-Eliwi B J M. Concrete filled double circular steel tube (CFDCST) stub columns[J]. Engineering Structures, 2017, 135:68-80.
- [29] 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.
- [30] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究[D]. 福州: 福州大学, 2005.
- Liu W. Research on mechanism of concrete-filled steel tubes subjected to local compression[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2005. (in Chinese)
- [31] Han L H, Xu C Y, Zhong T. Performance of concrete filled stainless steel tubular (CFSSST) columns and joints: summary of recent research[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 152: 117-131.
- [32] 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [33] 钢管混凝土结构技术规范: GB 50936—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [34] Ci J C, Ahmed M, Jia H, et al. Experimental and numerical investigations of square concrete-filled double steel tubular stub columns. [J] Advances in Structural Engineering, 2021, 24(11): 2441-2456.

(本文编辑:张 艺)