

文章编号:1672-3961(2024)03-0103-12

DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2023.178

异形钢管混凝土轴压短柱力学性能

罗靓^{1,2}, 晏宇翔^{1,2}, 吕辉^{1,2*}, 张成明^{1,2}

(1.南昌航空大学土木建筑学院, 江西 南昌 330063; 2.江西省装配式建筑与智能建造重点实验室, 江西 南昌 330063)

摘要:基于已有混凝土三轴塑性-损伤本构模型和钢材弹塑性本构模型,建立L形、T形、十字形3种异形钢管混凝土轴压短柱的三维实体精细有限元模型。在已有试验验证的基础上开展参数分析,对比钢管强度、混凝土强度、腹板高厚比和钢管壁厚对荷载-位移曲线的影响。结果表明:当钢管屈服强度或钢管壁厚增大时,柱的极限承载力明显增大,延性更好;当混凝土强度等级或腹板高厚比增大时,柱的极限承载力增大,但延性变差。确定了3种短柱达到极限承载力时的约束区与非约束区面积及其对应的混凝土 Mises 平均应力,提出考虑约束系数的承载力实用计算公式,此约束系数主要与腹板高厚比有关。将此公式计算得到极限承载力与试验值、有限元值对比,证明了公式的精确性和有效性,可用于3种异形钢管混凝土轴压短柱的承载力计算。

关键词:异形钢管混凝土柱;力学性能;有限元分析;极限承载力;约束系数

中图分类号:TU398

文献标志码:A

引用格式:罗靓,晏宇翔,吕辉,等.异形钢管混凝土轴压短柱力学性能[J].山东大学学报(工学版),2024,54(3):103-114.

LUO Liang, YAN Yuxiang, LÜ Hui, et al. Mechanical behavior of special-shaped CFT stub column under axial compression[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(3):103-114.

Mechanical behavior of special-shaped CFT stub column under axial compression

LUO Liang^{1,2}, YAN Yuxiang^{1,2}, LÜ Hui^{1,2*}, ZHANG Chengming^{1,2}

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China; 2. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Prefabricated Building and Intelligent Construction, Nanchang 330063, Jiangxi, China)

Abstract: Based on the existing triaxial plastic damage constitutive model of concrete and the elastic-plastic constitutive model of steel, a three-dimensional solid fine finite element model of L-shaped, T-shaped and cross shaped CFT stub columns was established. On the basis of existing experimental verification, parameter analysis was conducted to compare the effects of steel tube strength, concrete strength, height to thickness ratio of web and wall thickness of steel tube on the load-displacement curves. The results showed that when the yield strength or wall thickness of the steel tube increased, the ultimate bearing capacity of the column significantly increased, and the ductility was better. When the strength grade of concrete or the height to thickness ratio of the web increased, the ultimate bearing capacity of the column increased, but the ductility decreased. The confined areas and unconfined areas and the corresponding mean values of concrete Mises stress were determined when 3 kinds of stub columns reached the ultimate bearing capacity, and the practical calculation formula of ultimate bearing capacity considering the confinement coefficient was proposed. This constraint coefficient was mainly related to the height to thickness ratio of the web. The comparison of the ultimate bearing capacity calculated by this formula with the experimental values and FE values, proved the accuracy and effectiveness of the formula, which could be used for the bearing capacity calculation of 3 types of special-shaped CFT stub columns under axial compression.

Keywords: special-shaped concrete-filled steel tube column; mechanical behavior; finite element analysis; ultimate bearing capacity; confinement coefficient

收稿日期:2023-07-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52268031);江西省住建厅2023年科技项目(钢管混凝土组合结构设计方法及工程应用);南昌航空大学博士启动基金资助项目(EA201911291)

第一作者简介:罗靓(1984—),男,江西吉安人,讲师,硕士生导师,博士,主要研究方向为钢-混凝土组合结构。E-mail:luoliang@nchu.edu.cn

* 通信作者简介:吕辉(1982—),男,江西上饶人,副教授,硕士生导师,博士,主要研究方向为装配式建筑。E-mail:lvhui@nchu.edu.cn

0 引言

异形钢管混凝土柱是一种新型的结构形式,不同于普通的方形、矩形和圆形柱,它专指 L、T、十字、Z、X 形截面柱等,其中 L、T、十字形截面柱尤为常见,适用于角柱、边柱和中柱。与异形钢筋混凝土柱相比,异形钢管混凝土柱不需绑扎钢筋骨架和支护模板,因此施工方便,且具有承载力高、刚度大、延性好和造价便宜等优点,未来有望大量取代异形钢筋混凝土柱框架结构体系在高层甚至超高层建筑中应用。现如今,由异形钢管混凝土柱及其组成的节点、框架结构体系在中国上海、广州、天津、武汉等城市的多、高层商务楼、住宅楼中已有广泛应用,并取得良好的经济效益和社会效益。

柱作为框架结构体系中的承重构件,主要承受轴向压力。一旦柱破坏,与柱连接的梁、板随之垮塌,甚至导致整个框架结构体系倒塌破坏,因此研究柱的轴压力学性能显得尤为重要,目前国内外学者主要采用试验方法进行研究。文献[1]、文献[2]、文献[3]分别对 8 根、7 根、6 根 L 形钢管混凝土短柱进行轴压试验,分析了柱的破坏形式、钢管屈曲形态和位置以及荷载-位移关系曲线,探讨了钢板厚度、宽厚比、加强措施等对极限承载力、延性和刚度的影响;文献[4]进行了 6 个 T 形钢管混凝土轴压短柱的试验研究,试验的主要参数为管壁宽厚比、截面高宽比;文献[5]根据 2 个有无 T 形钢管混凝土轴压短柱的试验结果,对比了试验现象、破坏模式及荷载-位移曲线;文献[6]对 7 个 T 形钢管混凝土轴压短柱进行了试验研究,对比了轴压承载力和轴压刚度等力学指标;此外,文献[7]、文献[8]、文献[9]、文献[10]分别对 16 个、6 个、7 个、12 个 T 形钢管混凝土短柱进行轴压试验,分析承载力、延性、应变等力学性能指标;文献[11]对 16 个十字形钢管混凝土柱进行了轴压试验,探讨了钢板厚度与屈服强度、截面尺寸以及约束拉杆措施对破坏形态、承载力、延性的影响。

相比于方形、矩形和圆形柱,L、T、十字形钢管混凝土柱存在翼缘、腹板等局部尺寸,使得承载力计算更加复杂繁琐。目前国内外学者和规范提出的承载力计算公式未能充分考虑翼缘、腹板的局部尺寸和截面的不规则约束区域以及腹板高厚比的影响。为此,本研究在前期对矩形钢管混凝土轴压

短柱力学性能研究的基础上^[12],进一步开展如下工作:(1)基于已有参数确定性与本构关系唯一性的混凝土三轴塑性-损伤本构模型和考虑 Von-Mises 屈服准则、Prandtl-Reuss 流动准则和各向同性应变硬化的钢材弹塑性本构模型,采用 ABAQUS 有限元软件建立轴压荷载作用下 L、T、十字形 3 种异形钢管混凝土轴压短柱的三维实体精细有限元模型,结合轴压短柱试验的破坏形态和荷载-位移曲线,验证了有限元模型的合理性;(2)建立 216 个异形钢管混凝土柱足尺有限元模型,探讨了钢管屈服强度、混凝土强度等级、腹板高厚比和钢管壁厚 4 个参数对轴压短柱极限承载力、延性的影响;(3)在试验验证和有限元参数分析的基础上,确定了 3 种异形钢管混凝土轴压短柱达到极限承载力时的约束区与非约束区面积及其对应的混凝土 Mises 平均应力,提出了考虑约束系数的承载力实用计算公式,利用此公式计算得到极限承载力与试验值、有限元值接近,并与国内外学者提出和规范建议的公式计算结果进行对比。

1 有限元分析

1.1 有限元建模方法

1.1.1 本构关系

核心混凝土采用文献[13]提出的约束混凝土真三轴塑性-损伤模型,基本参数按表 1 设置,拉、压应力 σ -应变 ε 关系表达式为:

$$y = \begin{cases} \frac{A_n x + (B_n - 1)x^2}{1 + (A_n - 2)x + B_n x^2}, & x \leq 1 \\ \frac{x}{\alpha_n(x-1)^2 + x}, & x > 1 \end{cases}, \quad (1)$$

式中:当混凝土受压时, $n=1$, $y=\sigma/f_c$, σ 为应力, f_c 为轴心抗压强度, $f_c=0.4f_{cu}^{7/6}$, f_{cu} 为实测混凝土立方体抗压强度; $x=\varepsilon/\varepsilon_c$, ε 为应变, ε_c 为受压峰值应变, $\varepsilon_c=383f_{cu}^{7/18} \times 10^{-6}$; A_1 和 B_1 为上升段参数, $A_1=9.1f_{cu}^{4/9}$, $B_1=1.6(A_1-1)^2$; α_1 为下降段参数,考虑到钢管对核心混凝土的约束作用, $\alpha_1=0.15$ 。当混凝土受拉时, $n=2$, $y=\sigma/f_t$, f_t 为轴心抗拉强度, $f_t=0.24f_{cu}^{2/3}$, $x=\varepsilon/\varepsilon_t$; ε_t 为受拉峰值应变, $\varepsilon_t=33f_{cu}^{1/3} \times 10^{-6}$; A_2 和 B_2 为上升段参数, $A_2=1.306$, $B_2=5(A_2-1)^2/3=0.15$; α_2 为下降段参数, $\alpha_2=0.8$ 。上述混凝土塑性-损伤本构模型已成功应用于各种截面钢管混凝土轴压短柱受力分析^[14-15]。C40、C60、C80 和 C100(有限元参数分析)的受压和受拉应力-应变曲线如图 1 所示。

表1 ABAQUS有限元软件中混凝土的基本参数取值
Table 1 Basic parameters for concrete in ABAQUS

弹性模量/MPa	泊松比	膨胀角/(°)	流动偏角/(°)	双轴等压混凝土强度与单轴强度的比值	拉、压子午线上第二应力不变量的比值	黏性系数
$9500f_{cu}^{1/3}$	0.2	40	0.1	1.225	2/3	0.0005

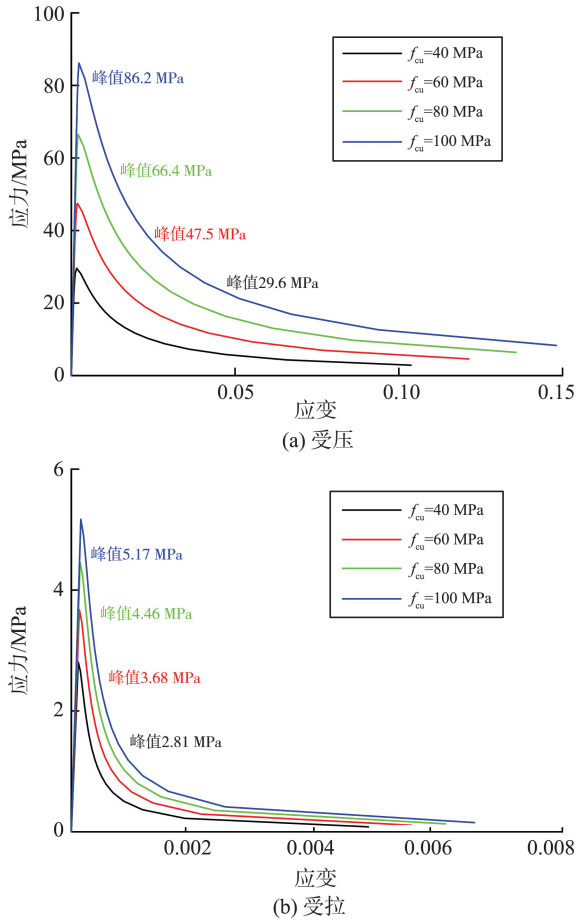


图1 不同强度混凝土的应力-应变曲线
Fig.1 Stress-strain curves of different concrete grades

钢管采用考虑 Von-Mises 屈服准则、Prandtl-Reuss 流动准则和各向同性应变硬化的弹塑性本构模型^[13],其应力-应变关系为:

$$\sigma_i = \begin{cases} E_s \varepsilon_i, & \varepsilon_i \leq \varepsilon_y \\ f_s, & \varepsilon_y < \varepsilon_i \leq \varepsilon_{st} \\ f_s + \zeta E_s (\varepsilon_i - \varepsilon_{st}), & \varepsilon_{st} < \varepsilon_i \leq \varepsilon_u \\ f_u, & \varepsilon_i > \varepsilon_u \end{cases}, \quad (2)$$

式中: σ_i 为等效应力; E_s 为弹性模量,取 2.06×10^5 MPa; ε_i 为等效应变; ε_y 为钢材屈服时对应的应变; ε_{st} 为钢材强化时对应的应变,取 $\varepsilon_{st} = 12\varepsilon_y$; ε_u 为钢材达到极限强度时对应的应变,取 $\varepsilon_u = 120\varepsilon_y$; ζ 为钢材强化段的斜率,取 $\zeta = 1/216$; f_s 为屈服强度, f_u 为极限强度,取 $f_u = 1.5f_s$ 。加载板按刚性板考虑,弹性模量取 1×10^{10} MPa,泊松比取 1×10^{-10} ,即横向变形可忽略不计。以上参数得到了文献[14-15]的验证。Q235、Q355 和 Q420(有限元参数分析)的应力-应变曲线如图2所示。

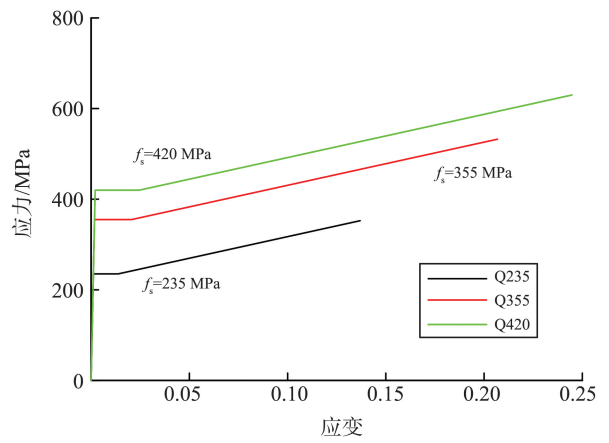


图2 不同强度钢材的应力-应变曲线
Fig.2 Stress-strain curves of different steel grades

1.1.2 网格、界面与加载

异形钢管混凝土轴压短柱模型包括异形钢管、核心混凝土和加载板3部分,三者都采用8节点减缩积分格式的三维实体单元(C3D8R),网格划分采用结构化网格划分技术,如图3~5所示。当网格尺寸变化时,3种柱的破坏形态、承载力和延性没有明显变化。

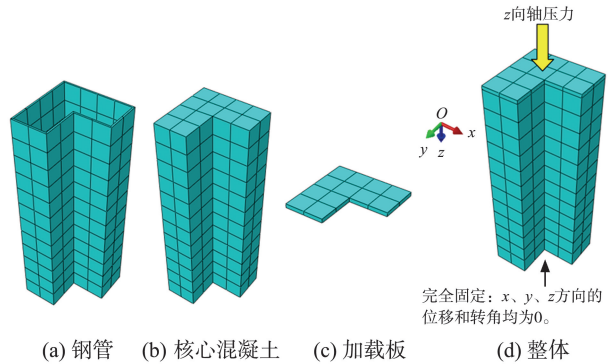


图3 L形钢管混凝土柱的有限元模型
Fig.3 Finite element model of L-shaped CFT column

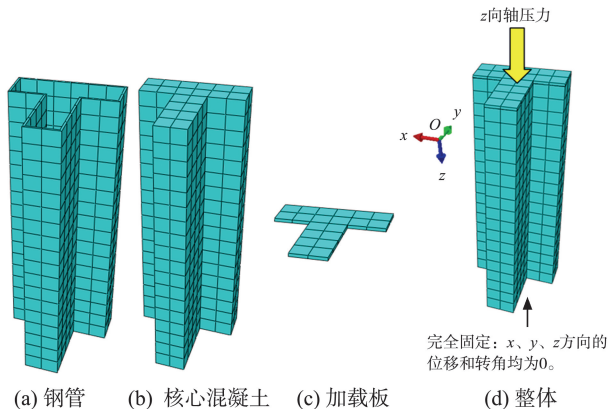


图4 T形钢管混凝土柱的有限元模型
Fig.4 Finite element model of T-shaped CFT column

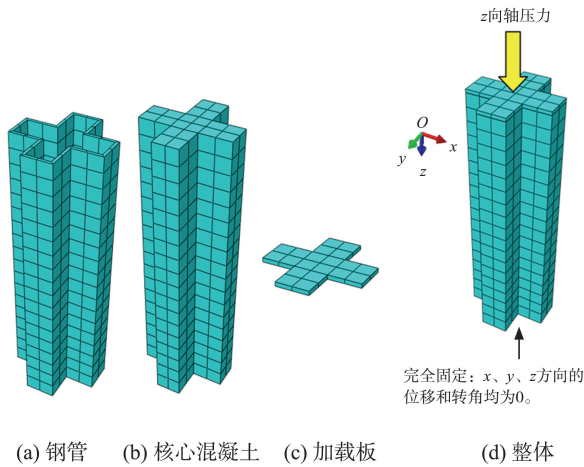


图5 十字形钢管混凝土柱的有限元模型
Fig.5 Finite element model of Cross-shaped CFT column

异形钢管与核心混凝土之间设置库伦摩擦型接触,由切线方向的黏结滑移和法线方向的硬接触构成。切线方向的接触列式为罚函数,摩擦系数取0.5^[12-15],并采用有限滑移满足计算速度,接触单元为面-面接触,其中刚度较大的钢管为主面,刚度较小的核心混凝土为从面。法向接触压力能够完全在界面之间传递,当接触压力为负或0时,接触面之间无相互作用。加载板与柱顶部采用绑定的约束方式,主表

面为加载板底面,从表面为柱顶面。

有限元模型采用与轴压试验^[1-11]一致的边界条件,故建模时对柱底采用完全固定约束, x 、 y 、 z 3个方向的位移和转角均设置为0。采用与轴压试验一致的加载方式,设置1个分析步,分析步类型为静力通用,对加载板顶部朝柱底方向施加轴向位移,并采用增量迭代法求解非线性方程组。

1.2 模型验证

选取文献[1-9,11]中19个典型L形、T形、十字形钢管混凝土轴压短柱进行验证,截面示意图见图6,尺寸参数见表2。

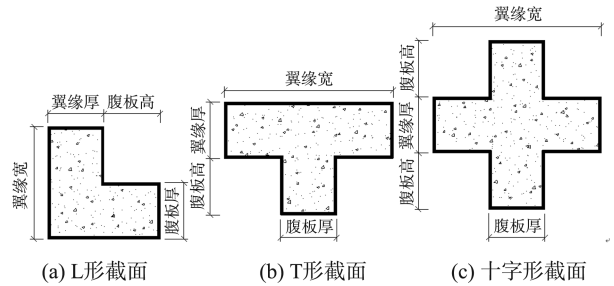


图6 3种异形钢管混凝土柱试件的截面示意图
Fig.6 Sectional schematic diagram of 3 types of special-shaped CFT columns

表2 3种异形钢管混凝土柱试件的尺寸参数
Table 2 Dimensional parameters of 3 types of special-shaped CFT columns

序号	形状	文献	试件编号	翼缘		腹板			厚/mm	柱长/mm
				宽/mm	厚/mm	高/mm	厚/mm	腹板高厚比		
1	L形柱 (4个)	文献[1]	L-NR-2	200	100	100	100	1.00	4.30	600
2		文献[2]	C1	400	150	250	150	1.67	6.00	800
3		文献[3]	L2	200	100	100	100	1.00	4.00	800
4		文献[3]	L3	300	100	200	100	2.00	5.00	1 200
5	T形柱 (11个)	文献[4]	T300-6B	300	100	200	100	2.00	6.00	900
6		文献[4]	T300-8	300	100	200	100	2.00	8.00	900
7		文献[5]	TG-1	300	100	200	100	2.00	2.00	500
8		文献[6]	T-2	240	80	100	80	1.25	4.30	540
9		文献[7]	C-1	234	78	78	78	1.00	3.75	720
10		文献[7]	C-3	234	78	78	78	1.00	5.73	720
11		文献[7]	C-8	234	78	78	78	1.00	7.80	720
12		文献[7]	C-10	234	78	78	78	1.00	3.77	720
13		文献[8]	NT-2	180	60	90	60	1.50	2.50	500
14		文献[8]	NT-3	240	60	90	60	1.50	2.50	500
15		文献[9]	TA2	330	110	160	110	1.45	3.49	900
16	十字形柱 (4个)	文献[11]	C1	240	80	80	80	1.00	3.64	720
17		文献[11]	C8	240	80	80	80	1.00	7.74	720
18		文献[11]	C10	240	80	80	80	1.00	3.72	720
19		文献[11]	C13	440	80	180	80	2.25	5.60	720

将3种异形钢管混凝土柱的有限元 Mises 应力云图、有限元轴向荷载-轴向位移曲线与试验结果对比,见图7~9。图10对比了这19个异形钢管混

凝土柱有限元计算与文献[1-9,11]试验的极限承载力值,可知:(1)有限元计算得到异形柱的破坏形态主要为钢管鼓曲及腹板相交的阴角区(向内凹)混

凝土压碎,而阳角区(向外凸)破坏不明显,这与试验现象接近,有限元计算得到的荷载-位移关系曲线与试验曲线也吻合良好,尤其是弹性阶段时两类曲线基本一致;

(2) 有限元计算与试验的极限承载力差异在10%以内,二者比值的均值为1.029,离散系数为0.065,表明建立的有限元模型具有较高的精度,可准确模拟异形钢管混凝土柱的轴压性能。

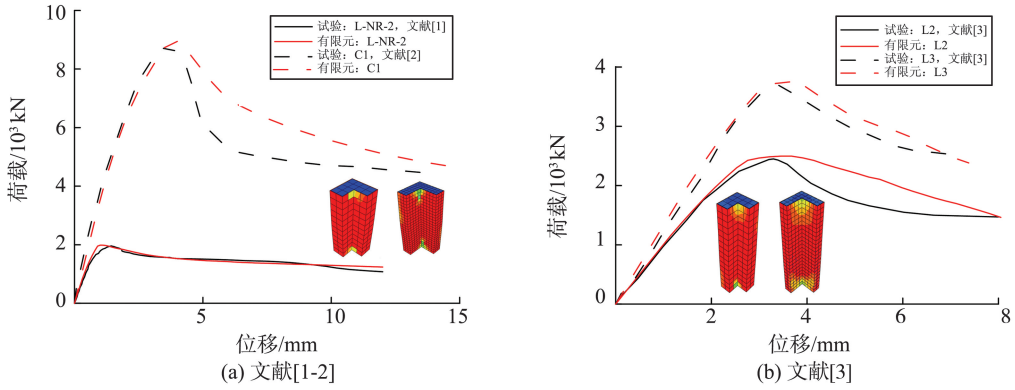


图7 L形钢管混凝土柱的有限元与试验荷载-位移曲线对比

Fig.7 Comparisons of FE versus experimental load-displacement curves of L-shaped CFT column

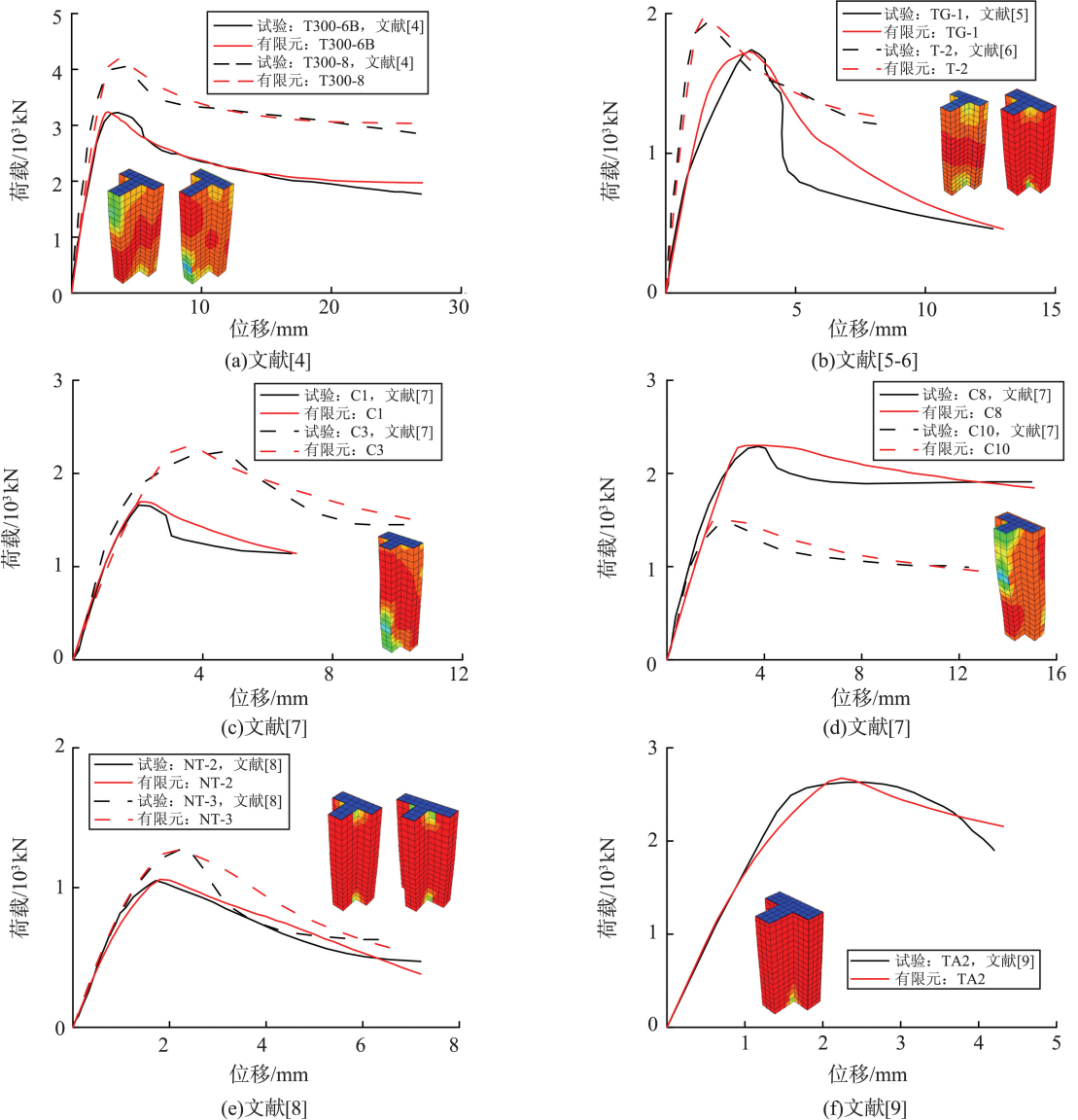


图8 T形钢管混凝土柱的有限元与试验荷载-位移曲线对比

Fig.8 Comparisons of FE versus experimental load-displacement curves of T-shaped CFT column

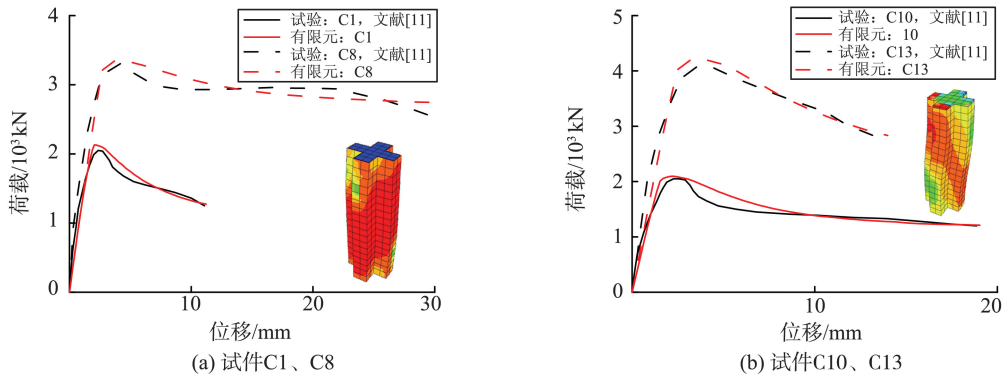


图9 十字形钢管混凝土柱的有限元与文献[11]试验荷载-位移曲线对比

Fig.9 Comparisons of FE versus experimental load-displacement curves of Cross-shaped CFT column in reference [11]

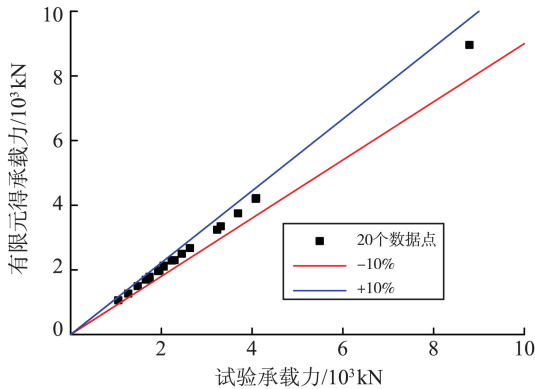


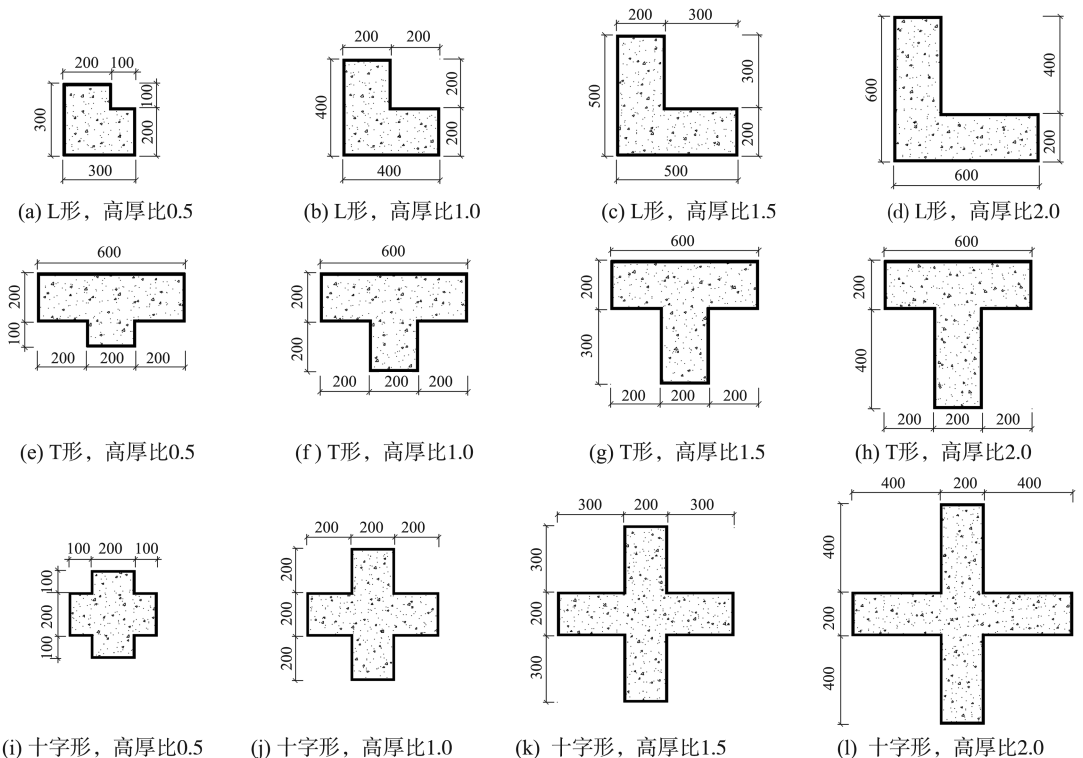
图10 有限元计算与试验极限承载力对比

Fig.10 Comparisons of FE versus experimental ultimate bearing capacity

1.3 参数分析

文献[12]利用 ABAQUS 有限元软件对矩形钢

管混凝土轴压短柱进行了承载力参数分析,相同的方法可以应用在本研究中。有别于试验缩尺模型,在足尺有限元模型中,取 L、T、十字形钢管的腹板厚 $D=200\text{ mm}$,腹板高 B 与腹板厚 D 的比值 B/D 取 0.5、1.0、1.5、2.0,即腹板高 $B=100、200、300、400\text{ mm}$,截面如图 11 所示。算例高度 L 取 1 200 mm,钢管壁厚 t 取 5、10、15 mm。钢管采用 Q235、Q355 和 Q420,混凝土采用 C40、C60、C80 和 C100。为减少计算工作量,分析中取 6 种匹配: Q235-C40、Q235-C60、Q355-C60、Q355-C80、Q420-C80、Q420-C100。综上 3 种截面形状、4 种腹板高厚比、3 种壁厚及 6 种材料强度匹配,共 216 个足尺模型算例。



单位: mm

图 11 3 种异形钢管混凝土柱的足尺模型截面

Fig.11 Full scale model cross-section of 3 types of special-shaped CFT columns

为了探讨钢管屈服强度、混凝土强度等级、腹板高厚比和钢管壁厚 4 个参数对异形钢管轴压短柱承载力的影响,将 L、T、十字形柱的荷载-位移曲线分别列于图 12~14。由图 12~14 可知:(1)当钢管屈服强度增大或钢管壁厚增大时,柱的极限承载力

明显增大,由于钢管是延性材料,使得柱的延性更好,荷载-位移曲线达到极限承载力后下降更平缓;(2)当混凝土强度等级增大或腹板高厚比增大时,柱的极限承载力明显增大,但延性变差,荷载-位移曲线的下降段更陡。

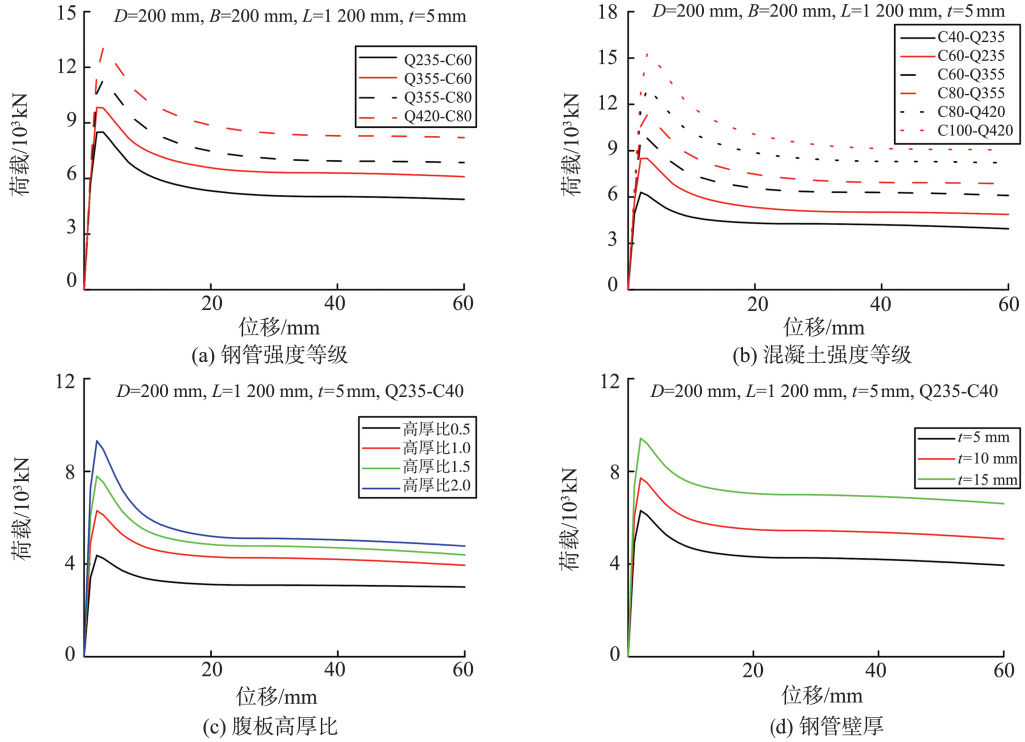


图 12 多种参数对 L 形柱荷载-位移曲线的影响

Fig.12 Influence of various parameters on the load-displacement curve of L-shaped columns

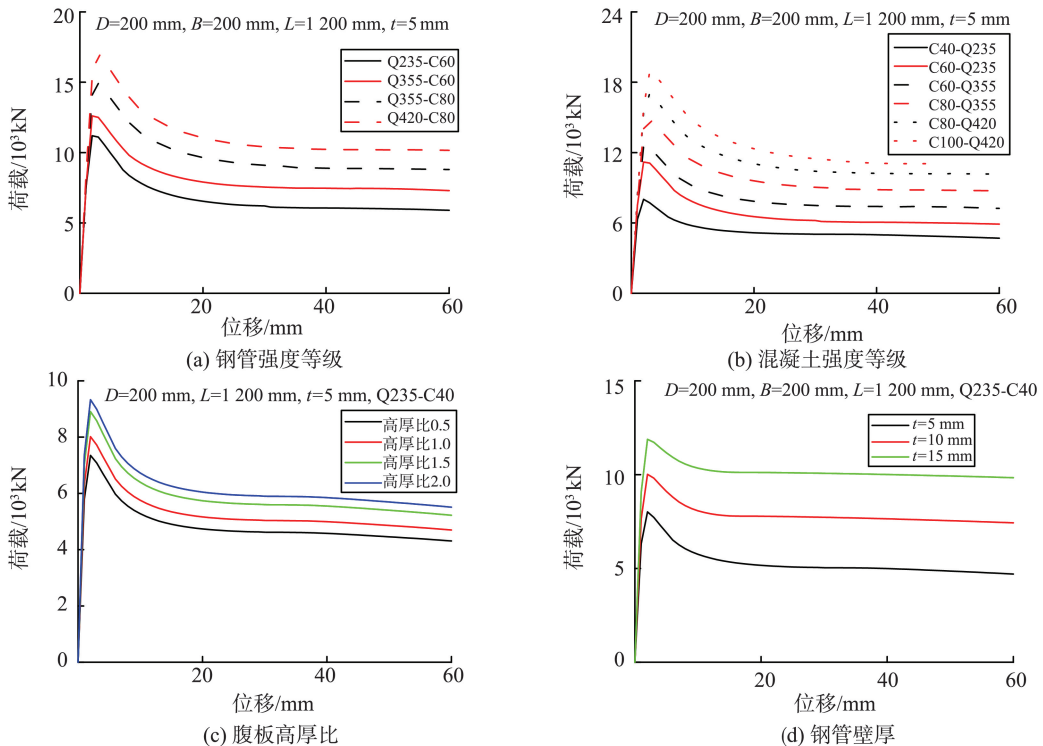


图 13 多种参数对 T 形柱荷载-位移曲线的影响

Fig.13 Influence of various parameters on the load-displacement curve of T-shaped columns

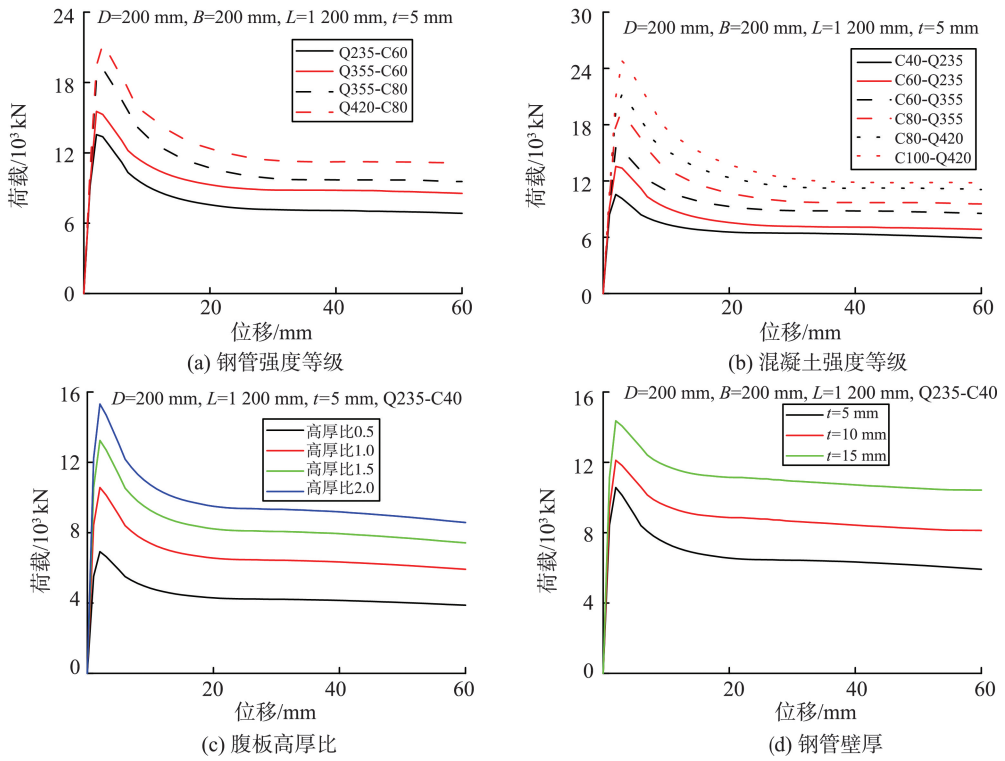


图 14 多种参数对十字形柱荷载-位移曲线的影响

Fig.14 Influence of various parameters on the load-displacement curve of Cross-shaped columns

2 极限承载力实用计算公式

2.1 核心混凝土的约束区域

文献[12]通过试验研究和有限元分析发现,矩形钢管混凝土轴压短柱中的钢管对混凝土部分区域有约束作用,这主要与截面长宽比相关,该结论同样可应用于异形钢管混凝土轴压短柱。以核心混凝土的轴心抗压强度 f_c 为分界线,提取 L 形柱、T

形柱和十字形柱达到极限承载力时的核心混凝土 Mises 应力云图。列出腹板高厚比为 0.5、1.0、1.5 和 2.0 的应力云图,如图 15~17 所示,其中:黑色区域 A_{c1} 的应力小于 f_c ,为非约束区,此处钢管对混凝土没有约束作用;彩色区域 A_{c2} 的应力大于 f_c ,为约束区,此处钢管对此混凝土有约束作用,由图 15~17 可知:云图都为对称趋势,钢管主要对端部(翼缘两端、腹板底部)的核心混凝土起约束作用,而对翼缘中部、腹板中部的核心混凝土的约束作用较小。

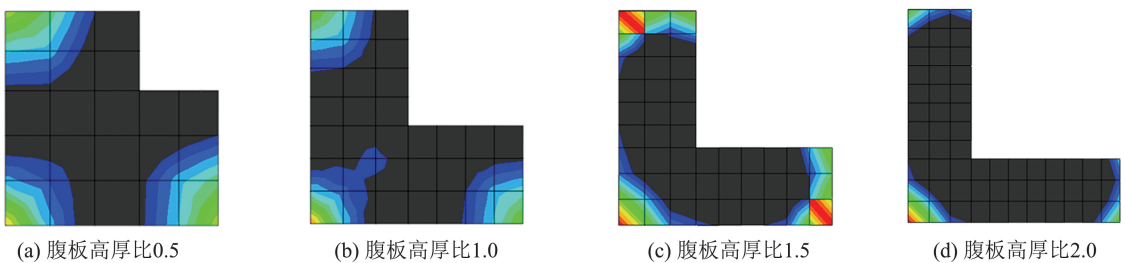


图 15 L 形柱的核心混凝土 Mises 应力云图

Fig.15 Mises stress nephogram of core concrete of L-shaped columns

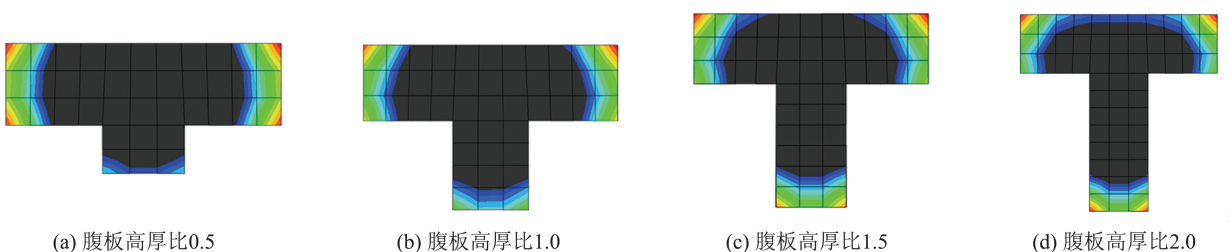


图 16 T 形柱的核心混凝土 Mises 应力云图

Fig.16 Mises stress nephogram of core concrete of T-shaped columns

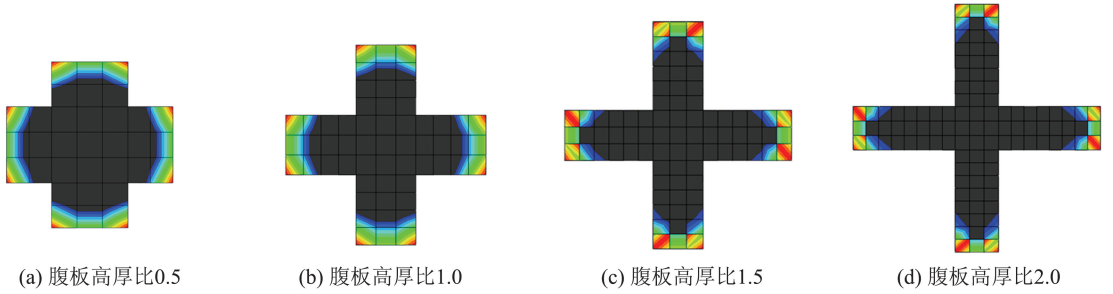


图 17 十字形柱的核心混凝土 Mises 应力云图

Fig.17 Mises stress nephogram of core concrete of Cross-shaped columns

将 3 种异形柱达到极限承载力时核心混凝土的非约束区面积 A_{c1} 与约束区面积 A_{c2} 汇总于表 3。对于 3 种异形柱各 72 个足尺模型算例,当轴压力达到极限承载力时,提取彩色约束区域的核心混凝土平均 Mises 应力与轴心抗压强度的比值 $\alpha > 1.0$,如图 18 所示。可知:在相同截面形式、壁厚、钢管强度和

混凝土强度的条件下,当腹板高厚比为 0.5 时,钢管对核心混凝土的约束效应最强,此时核心混凝土受到的侧向压应力最大,由此得到的 Mises 应力和 α 最大;随着腹板高厚比逐渐增大至 2.0,钢管对核心混凝土的约束效应减弱,核心混凝土受到的侧向压应力减小,Mises 应力和 α 也相应减小。

表 3 极限承载力时核心混凝土的约束区与非约束区面积

Table 3 Confined and unconfined area of core concrete at ultimate bearing capacity

柱截面形状	区域	腹板高厚比			
		0.5	1.0	1.5	2.0
L 形	非约束区域 A_{c1}	13 A_c /21	22 A_c /33	33 A_c /45	50 A_c /57
	约束区域 A_{c2}	8 A_c /21	11 A_c /33	12 A_c /45	7 A_c /57
T 形	非约束区域 A_{c1}	28 A_c /39	31.5 A_c /45	34.5 A_c /51	38 A_c /57
	约束区域 A_{c2}	11 A_c /39	13.5 A_c /45	16.5 A_c /51	19 A_c /57
十字形	非约束区域 A_{c1}	22 A_c /33	39 A_c /57	58 A_c /81	81 A_c /105
	约束区域 A_{c2}	11 A_c /33	18 A_c /57	23 A_c /81	24 A_c /105

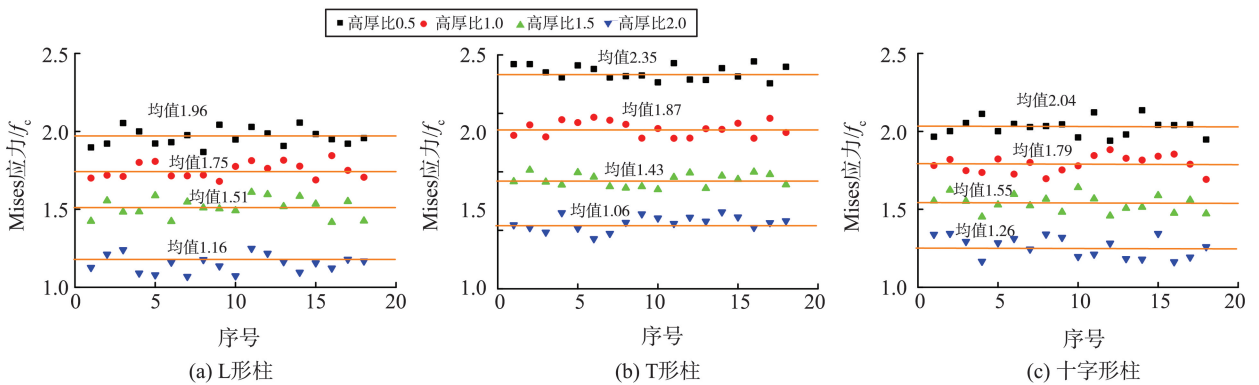


图 18 核心混凝土的 Mises 应力 (σ_{Mises}) 与轴心抗压强度 f_c 的比值

Fig.18 The ratio of Mises stress to axial compressive strength f_c of core concrete

2.2 公式建立

异形钢管混凝土轴压短柱的极限承载力 N_u 由 3 部分组成:非约束区域混凝土的承载力、约束区域混凝土的承载力和钢管的承载力,计算公式为:

$$N_u = f_c A_{c1} + \alpha f_c A_{c2} + f_s A_s, \quad (3)$$

式中, f_c 为非约束区域混凝土 A_{c1} 的压应力, αf_c 为约束区域混凝土 A_{c2} 的压应力, f_s 、 A_s 为钢管的屈服强度、截面面积。将表 3 的核心混凝土面积和图 18 的约束区域混凝土 Mises 应力代入式(3),可得

$$N_u = k f_c A_c + f_s A_s, \quad (4)$$

式中, k 为约束系数, k 汇总于表 4。由表 4 可知:当腹板高厚比相同时, L 形、T 形和十字形柱的 k 接近。

表 4 不同高厚比对应的 k

Table 4 k corresponding to different height-thickness ratios

柱截面形状	k			
	腹板高厚比 0.5	腹板高厚比 1.0	腹板高厚比 1.5	腹板高厚比 2.0
L 形	1.365	1.250	1.135	1.020
T 形	1.380	1.260	1.140	1.020
十字形	1.345	1.250	1.155	1.060

结合表4,考虑到公式的通用性,3种异形柱的约束系数 k 都按 $k=-0.22B/D+1.47$ 计算,其中 B 为腹板高度, D 为腹板厚度。

2.3 公式对比

目前国内外学者提出和规范建议的钢管混凝土轴压短柱承载力计算公式较多,与本研究提出的公式(4),汇总列于表5。

表5中, ξ 为柱截面的套箍系数; f_{sc} 、 f_c 、 f'_c 、 f_{cu} 分别为柱截面抗压强度、混凝土棱柱体抗压强度(即轴心抗压强度)、混凝土圆柱体抗压强度和混凝土立方体抗压强度, f'_c 与 f_{cu} 的换算关系为:

$$f'_c = \begin{cases} 0.8f_{cu}, & f_{cu} \leq 50 \text{ MPa}; \\ f_{cu} - 10 \text{ MPa}, & f_{cu} > 50 \text{ MPa}。 \end{cases} \quad (10)$$

表5 钢管混凝土轴压短柱承载力的计算公式

Table 5 Calculation formula for ultimate bearing capacity of CFT stub columns under axial compression

序号	文献	建议公式
1	本研究	$N_u = kf_c A_c + f_s A_s, k = -0.22B/D + 1.47$ (4)
2	文献[16]	$N_u = f_{sc} A_{sc}, f_{sc} = (1.18 + 0.85\xi)f_c, \xi = f_s A_s / (f_c A_c), f_c = 0.67f_{cu}$ (5)
3	文献[17]	$N_u = f_s A_s + f'_c A_c$ (6)
4	文献[18-19]	$N_u = f_s A_s + 0.85f'_c A_c$ (7)
5	文献[20]	$N_u = f_s A_s + 0.675f_{cu} A_c$ (8)
6	文献[21]	$N_u = f_s A_s + f'_c A_c$ (9)

表6对比了30个异形钢管混凝土短柱按公式(4)~(9)计算得到的极限承载力与文献[1-11]试验结果。 $N_{u,exp}$ 、 $N_{u,c}$ 分别为试验所得承载力和公式计算承载力。可以看出:(1)综合考虑平均值与离散系数,本研究提出的公式(4)精度最高;(2)文献

[16]提出的公式(5)和文献[17]建议的公式(6),相较于公式(7)(8)(9),与试验结果更接近;(3)公式(7)(8)的计算结果偏小,公式(9)的计算结果偏大,且3者的离散系数较大。

表6 极限承载力的公式计算值与试验值对比

Table 6 Comparisons of formula calculation result versus experimental result of ultimate bearing capacity

序号	形状	文献	试件编号	腹板高厚比	约束系数 k	$N_{u,exp}/\text{kN}$	$N_{u,c}/N_{u,exp}$				
							本研究公式(4)	式(5)	式(6)	式(7)	式(8)
1		文献[1]	L-NR-2	1.00	1.25	1 962	1.012	0.954	0.944	0.916	0.913
2	L形柱 (4个)	文献[2]	C1	1.67	1.10	8 810	0.898	0.830	0.961	0.823	0.820
3		文献[3]	L2	1.00	1.25	2 460	1.045	0.897	0.915	0.879	0.838
4		文献[3]	L3	2.00	1.03	3 708	1.052	1.024	1.135	0.996	0.952
5		文献[4]	T300-6A	2.00	1.03	3 244	0.954	0.981	0.942	0.915	0.912
6		文献[4]	T300-6B	2.00	1.03	3 170	0.976	1.004	0.964	0.936	0.934
7		文献[4]	T300-8	2.00	1.03	4 077	0.980	1.031	0.972	0.951	0.949
8		文献[4]	T300-5	2.00	1.03	3 139	0.978	0.985	0.967	0.937	0.935
9		文献[4]	T250-6	1.50	1.14	2 804	0.938	0.929	0.890	0.865	0.862
10		文献[4]	T250-8	1.50	1.14	3 539	0.952	0.977	0.917	0.898	0.896
11		文献[5]	TG-1	2.00	1.03	1 740	1.039	1.234	1.190	1.091	1.085
12		文献[6]	T-1	1.25	1.20	1 956	1.088	1.012	1.207	0.966	0.963
13		文献[6]	T-2	1.25	1.20	1 942	1.096	1.020	1.114	0.973	0.970
14	T形柱 (21个)	文献[7]	C-1	1.00	1.25	1 654	1.114	1.088	1.101	1.055	1.052
15		文献[7]	C-3	1.00	1.25	2 225	1.068	1.017	0.990	0.958	0.956
16		文献[7]	C-8	1.00	1.25	2 294	1.077	1.104	1.007	0.978	0.976
17		文献[7]	C-10	1.00	1.25	1 505	1.075	1.061	1.050	1.000	0.997
18		文献[7]	C-13	2.25	0.90	3 216	1.158	1.294	1.272	1.228	1.225
19		文献[8]	NT-1	1.00	1.25	935	1.087	0.985	0.989	0.959	0.956
20		文献[8]	NT-2	1.50	1.14	1 037	1.048	0.987	0.991	0.961	0.958
21		文献[8]	NT-3	1.50	1.14	1 253	1.043	0.981	0.986	0.955	0.952
22		文献[9]	TA2	1.45	1.15	2 672	1.082	1.056	1.062	0.990	0.985
23		文献[10]	TN-1	2.00	1.03	2 589	0.878	0.856	0.862	0.803	0.799
24		文献[10]	TN-2	2.00	1.03	3 192	0.866	0.845	0.950	0.792	0.789
25		文献[10]	TN-3	2.00	1.03	3 235	0.985	0.939	0.920	0.899	0.896

表6(续)

序号	形状	文献	试件编号	腹板高厚比	约束系数 k	$N_{u,exp}/kN$	$N_{u,c}/N_{u,exp}$				
							本研究公式(4)	式(5)	式(6)	式(7)	式(8)
26	十字形柱 (5个)	文献[11]	C1	1.00	1.25	2 064	1.099	1.133	1.155	1.116	1.080
27		文献[11]	C3	1.00	1.25	2 754	1.064	1.071	1.064	1.036	1.011
28		文献[11]	C8	1.00	1.25	3 326	0.952	0.941	0.974	0.853	0.834
29		文献[11]	C10	1.00	1.25	2 155	1.077	0.950	0.940	0.902	0.868
30		文献[11]	C13	2.25	0.98	4 096	1.059	1.372	1.373	1.335	1.301
平均值							1.025	1.019	1.027	0.965	0.955
离散系数							0.071	0.117	0.115	0.118	0.116

L形柱、T形柱和十字形柱各72个足尺模型算例的极限承载力的公式(4)计算结果与有限元计算结果比较如图19所示,可见:计算结果与有限元计

算结果的差异在10%以内,两者比值的均值分别为0.988、1.025、0.969,离散系数分别为0.067、0.065、0.070,可见公式(4)的计算精度较高。

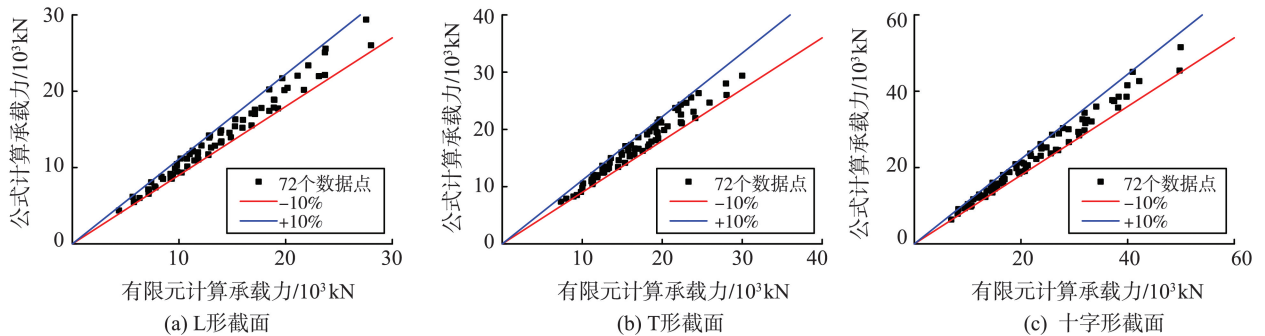


图19 足尺模型极限承载力的公式(4)计算值与有限元值对比

Fig.19 Comparison of Eq.(4) result versus FE result of ultimate bearing capacity for full-scale models

3 结论

L形、T形和十字形3种异形钢管混凝土柱适用于钢-混凝土组合框架结构体系的角柱、边柱和中柱。基于混凝土三轴塑性-损伤本构模型和钢材弹塑性本构模型,采用ABAQUS有限元软件建立考虑钢管和核心混凝土约束作用的3种异形钢管混凝土轴压短柱三维实体精细化有限元模型,破坏形态、荷载-位移曲线、极限承载力等有限元计算结果与试验结果吻合较好,表明了有限元建模方法的合理性和有效性,通过足尺模型参数分析,进一步得到以下结论。

(1)3种异形钢管混凝土柱的荷载-位移曲线变化趋势接近,当钢管屈服强度或钢管壁厚增大时,柱的极限承载力明显增大,延性更好,荷载-位移曲线的下降段更平缓。当混凝土强度等级或腹板高厚比增大时,柱的极限承载力增大,但延性变差,荷载-位移曲线下下降更陡。

(2)足尺模型的核心混凝土Mises云图表明,钢管主要对端部的核心混凝土起约束作用,而对翼缘中部、腹板中部的核心混凝土的约束作用较小。当

腹板高厚比为0.5时,钢管对核心混凝土的约束效应最强,随着腹板高厚比增大至2.0,钢管对核心混凝土的约束效应逐渐减弱;

(3)根据混凝土约束区、非约束区的面积以及核心混凝土平均Mises应力与轴心抗压强度的比值,提出了考虑腹板高厚比和约束系数的异形钢管轴压短柱承载力计算公式。综合考虑均值和离散系数,本研究建立的公式计算精度最高,优于其他国内外学者提出和规范建议的公式,且公式简洁易懂,方便实用。

参考文献:

[1] 朱彦奇,黄宏,陈梦成,等. L形加肋钢管混凝土短柱轴压力学性能研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(4): 107-114.
 ZHU Yanqi, HUANG Hong, CHEN Mengcheng, et al. Behavior of concrete filled L-shaped stiffened steel tubular stub columns under axial compression[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(4): 107-114.

[2] 蔡健,孙刚. 轴压下带约束拉杆L形钢管混凝土短柱的试验研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(9): 14-20.
 CAI Jian, SUN Gang. Experimental investigation on L-shaped concrete-filled steel tube stub columns with

- binding bars under axial load[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2008, 41(9): 14-20.
- [3] 林震宇, 沈祖炎, 罗金辉, 等. L形钢管混凝土轴压短柱力学性能研究[J]. *建筑钢结构进展*, 2009, 11(6): 14-19.
LIN Zhenyu, SHEN Zuyan, LUO Jinhui, et al. Study on behavior of l-shaped concrete-filled steel tube stubs subjected to axial-compression[J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2009, 11(6): 14-19.
- [4] 陈雨, 沈祖炎, 雷敏, 等. T形钢管混凝土短柱轴压试验[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(6): 822-829.
CHEN Yu, SHEN Zuyan, LEI Min, et al. Experimental investigation on concrete-filled T-shaped steel tube stubs subjected to axial compression[J]. *Journal of the Tongji University (Natural Science)*, 2016, 44(6): 822-829.
- [5] 赵毅, 静行. T形钢管混凝土短柱轴压性能研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2011, 33(9): 87-90.
ZHAO Yi, JING Hang. Experimental study of T-shaped concrete-filled steel tube columns under axial compression loading[J]. *Journal of the Wuhan University of Technology*, 2011, 33(9): 87-90.
- [6] 黄宏, 查宝军, 杨超, 等. 加肋T形钢管混凝土短柱力学性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(5): 132-137.
HUANG Hong, ZHA Baojun, YANG Chao, et al. Mechanical behavior of T-shaped concrete-filled steel ribbed tubular short columns[J]. *Journal of the Building Structures*, 2018, 39(5): 132-137.
- [7] 左志亮, 蔡健, 钱泉, 等. 带约束拉杆T形钢管混凝土短柱轴压性能的试验研究[J]. *土木工程学报*, 2011, 44(11): 43-51.
ZUO Zhiliang, CAI Jian, QIAN Quan, et al. Experimental study on T-shaped CFT stub columns with binding bars subjected to axial compression[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44(11): 43-51.
- [8] 刘林林, 屠永清. 两种钢管混凝土T形柱的轴压性能[J]. *混凝土*, 2011(9): 25-28.
LIU Linlin, TU Yongqing. Properties of two kinds of T-shaped concrete-filled steel tubular columns under axial load[J]. *Concrete*, 2011(9): 25-28.
- [9] YANG Yuanlong, WANG Yuyin, FU Feng, et al. Static behavior of T-shaped concrete-filled steel tubular columns subjected to concentric and eccentric compressive loads [J]. *Thin-Walled Structures*, 2015, 95: 374-388.
- [10] LIU Xianggang, XU Chuangze, LIU Jiepeng, et al. Research on special-shaped concrete-filled steel tubular columns under axial compression [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018, 147: 203-223.
- [11] 赵小芹, 左志亮, 蔡健. 带约束拉杆十字形钢管混凝土短柱轴压试验研究[J]. *建筑钢结构进展*, 2022, 24(7): 38-48.
ZHAO Xiaoqin, ZUO Zhiliang, CAI Jian. Experimental study on the cross-shaped CFST stub column with binding bars subjected to axial compression[J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2022, 24(7): 38-48.
- [12] DING Faxing, LUO Liang, ZHU Jiang, et al. Mechanical behavior of stirrup-confined rectangular CFT stub columns under axial compression [J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 124(3): 136-150.
- [13] DING Faxing, YING Xiaoyong, ZHOU Linchao, et al. Unified calculation method and its application in determining the uniaxial mechanical properties of concrete[J]. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, 2011, 5(3): 381-393.
- [14] DING Faxing, LU Deren, BAI Yu, et al. Comparative study of square stirrup-confined concrete-filled steel tubular stub columns under axial loading [J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, 98(1): 443-453.
- [15] DING Faxing, FU Lei, LIU Xuemei, et al. Mechanical performance of track-shaped rebar stiffened concrete-filled steel tubular (SCFRT) stub columns under axial loading [J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, 99(2): 168-181.
- [16] HAN Linhai, YAO Guohan, ZHAO Xiaolin. Tests and calculations for hollow structural steel (HSS) stub columns filled with self-consolidating concrete (SCC) [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2005, 61(9): 1241-1269.
- [17] 中国工程建设标准化协会. 矩形钢管混凝土结构技术规程: CECS159—2004 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2004.
- [18] ACI Committee 318. Building code requirements for reinforced concrete and commentary: ACI 318-14 [S]. Detroit: American Concrete Institute, 2014.
- [19] Japan Steel Construction Committee. Recommendations for design and construction of concrete filled steel tubular structures: AIJ-CFT [S]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2008.
- [20] Technical Committee B/525, Building and civil engineering structures. Steel, concrete and composite bridges-part 5: code of practice for design of composite bridges: BS 5400-5 [S]. London: British Standards Institution, 2005.
- [21] Technical Committee B/525, Building and Civil Engineering Structures. Eurocode 4: design of composite steel and concrete structures-part 1-1: general rules and rules for buildings: BS EN 1994-1-1 [S]. London: British Standards Institution, 2004.