

# T形钢管混凝土压弯构件强度承载性能

雷敏<sup>1,2</sup>, 沈祖炎<sup>2,3</sup>, 李元齐<sup>2,3</sup>, 罗金辉<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;  
3. 同济大学 土木工程国家防灾减灾重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 采用普通 T 形钢管混凝土柱的核心混凝土等效单轴本构关系, 利用纤维模型程序分析了不同参数对 T 形钢管混凝土单向压弯、双向压弯柱截面强度的影响, 参数包括钢材屈服强度、混凝土抗压强度、管壁宽厚比、截面肢宽厚比、加载角度和轴压比等。研究表明: 混凝土工作承担系数和加载角度对归一化的轴力与弯矩相关曲线的形状有重要影响; 截面肢宽厚比和轴压比对归一化的双弯矩相关曲线的形状有重要影响。基于截面全塑性假设和大量数值结果回归分析, 提出了 T 形钢管混凝土柱纯弯、单向压弯和双向压弯截面强度承载力的简化计算方法, 简化方法计算结果与纤维模型分析结果吻合良好, 简化方法可为工程设计提供参考。

**关键词:** T 形钢管混凝土短柱; 单向偏压; 双向偏压; 截面强度; 相关方程

**中图分类号:** TU318.1, TU398.9

**文献标志码:** A

## Sectional Strength of Concrete-filled T-shaped Steel Tube Column Subjected to Axial Compression and Bending Moment

LEI Min<sup>1,2</sup>, SHEN Zuyan<sup>2,3</sup>, LI Yuanqi<sup>2,3</sup>, LUO Jinhui<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Sichuan Chengdu 610031, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In this paper, based on the equivalent uniaxial stress-strain relationship for concrete-filled T-shaped steel tube (CFTST) column without stiffening measures, a fiber element model computing program was adopted to investigate the effects of different parameters on the sectional strength of CFTST column under uniaxial eccentric load or biaxial eccentric load. The parameters in the analysis included the yield strength of steel, the compressive strength of concrete, the depth to thickness ratio of steel plate, the depth to width

ratio of the sectional limb, the angle of the load and the axial load ratio. The results of theoretical analysis indicated that, the normalized strength interaction curve of axial load versus bending moment was obviously influenced by the load ratio carried by core concrete and the load angle; The normalized strength interaction curve of biaxial bending moments was distinctly influenced by the depth to width ratio of the sectional limb and the axial load ratio. On the assumption of full plastic stress distribution and the parametric regression analyses of a good many of numerical results, the simplified calculation methods were put forward to predict the sectional strength under uniaxial eccentric load or biaxial eccentric load. Good agreements between the values calculated by the simplified calculation methods and the values predicted by the fiber element model computing program were achieved, and the simplified calculation methods can be referred for practical engineering design.

**Key words:** concrete-filled T-shaped steel tube stub columns; uniaxial eccentric load; biaxial eccentric load; sectional strength; the interaction equation

异形钢管混凝土柱结合了钢管混凝土柱和钢筋混凝土异形柱的许多优点: 承载能力高、抗震性能优越、施工方便、截面形状能够配合建筑房间的墙体布置, 避免了柱子凸棱, 符合建筑室内空间美学要求, 并提高了面积使用率。在未来的小高层建筑中有着广阔的应用前景。近年来国内研究者对异形钢管混凝土柱力学性能的研究予以了广泛的关注, 主要侧重于轴压短柱、偏压短柱的静力性能研究<sup>[1-2]</sup>、构件的抗震性能研究<sup>[3-4]</sup>, 以及采用不同的加劲措施来改善异形钢管混凝土柱的延性和承载力<sup>[5-8]</sup>。考虑到随着钢结构构件生产加工工艺的不断提高与完善, 异形钢管有望通过生产流水线的改进一次加工成型,

收稿日期: 2015-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(51208375), 中央高校基金科技创新项目(2682015C\_X081)

第一作者: 雷敏(1977—), 男, 工学博士, 讲师, 主要研究方向为组合结构。E-mail: leimin77@163.com

通讯作者: 李元齐(1977—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为大跨结构抗风及冷弯型钢结构。

E-mail: liyq@tongji.edu.cn

减小异形钢管因为焊接和弯折加工的生产成本. 因此本文在课题<sup>[9]</sup>对普通构造 T 形钢管混凝土 (concrete-filled T-shaped steel tube, CFTST) 柱(其截面如图 1 所示)轴压试验、偏压试验、轴压截面强度分析及轴压稳定承载力分析研究的基础上,进一步采用纤维模型程序对 T 形钢管混凝土柱截面的单向压弯、双向压弯强度承载性能进行了分析,讨论了钢材屈服强度、混凝土抗压强度、管壁宽厚比、截面肢宽厚比、加载角度以及轴压比等参数对截面强度的影响;并基于截面全塑性假设和大量数值结果回归分析提出了 T 形钢管混凝土柱截面纯弯、单向压弯强度和双向压弯强度承载力的简化计算方法. 简化方法计算结果与纤维模型分析结果吻合良好,简

化计算方法可为工程设计提供参考.

### 1 纤维模型

本文采用纤维模型程序对 T 形钢管混凝土柱截面单向压弯、双向压弯强度承载性能进行分析,纤维模型的基本假定和建立过程、材料本构等见参考文献<sup>[9]</sup>,构件加载方向、单元划分如图 1 所示. 图中, $P$  为轴力, $\phi_x, \phi_y$  分别为  $x$  向,  $y$  向曲率, $\epsilon_0$  为形心应变, $x_i, y_i$  为任一单元形心至截面形心的距离, $\epsilon_{xi}, \epsilon_{yi}$  分别为曲率  $\phi_y, \phi_x$  对应的单元应变.  $B, H$  分别为截面肢宽、肢高; $h_f, b_w$  为截面肢厚( $b_w = h_f$ ); $b_1, b_2$  为翼缘外伸宽度( $b_1 = b_2$ ).

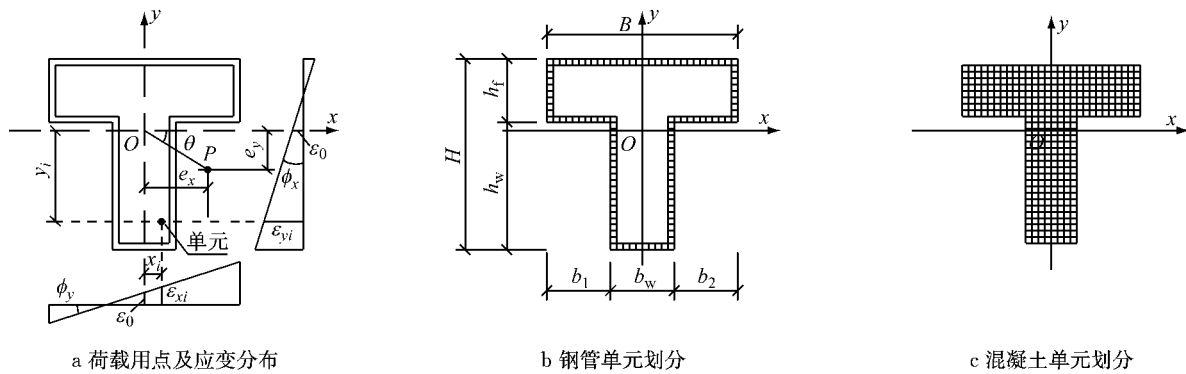


图 1 荷载作用位置及截面单元划分

Fig.1 Location of the load and the fiber elements of the section

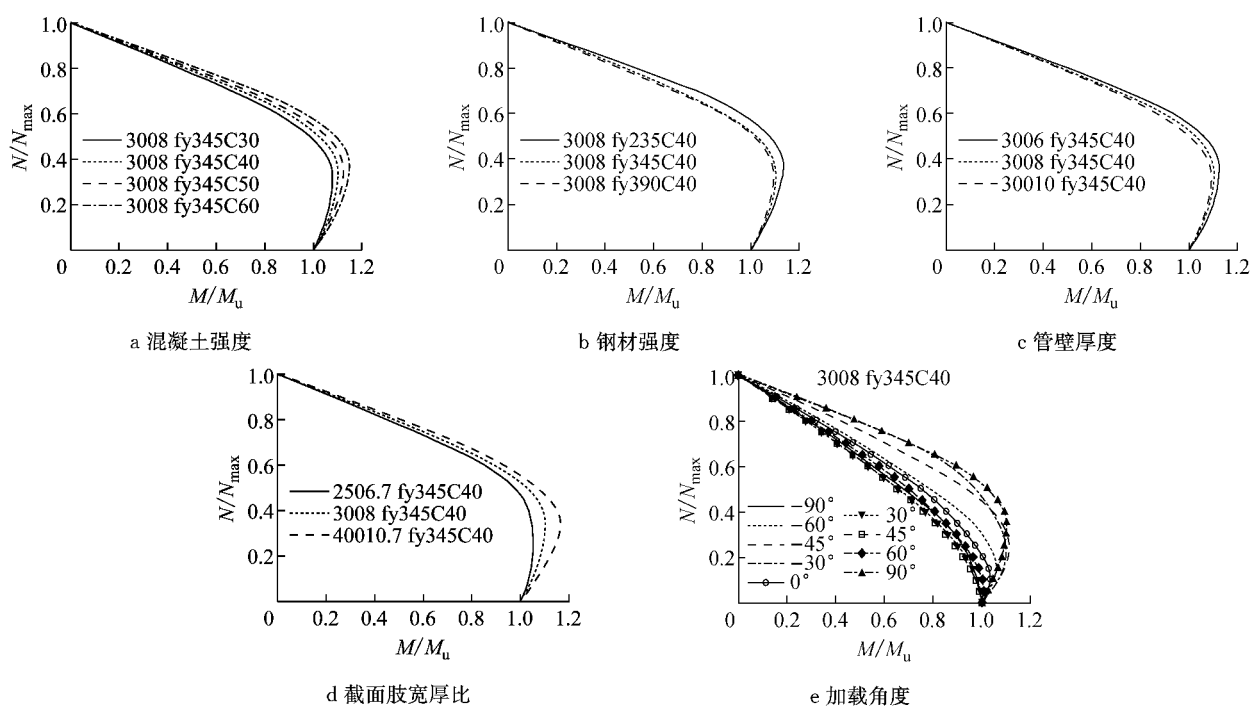
### 2 参数分析

影响 T 形钢管混凝土柱截面偏压性能的主要参数有:混凝土抗压强度、钢材屈服强度、钢管管壁厚度、加载角度,截面肢宽厚比. 本文对截面肢宽  $B$  和肢高  $H$  为 250、300、400 mm,肢厚  $h_f$  和  $b_w$  均为 100 mm 的 T 形钢管混凝土柱进行了参数分析,参数包括:混凝土强度:C30~C60;钢材屈服强度  $f_y$ :235~390 MPa;管壁厚度  $t$ :6~10 mm;截面肢宽厚比  $B/h_f$ :2.5~4;加载角度  $\theta$ :-90°~90°;轴压比  $n$  为 0~0.9;柱子长细比  $\lambda$  为 0. 构件的基本参数为: $B=H=300$  mm, $h_f=b_w=100$  mm, $t=8$  mm,混凝土强度为 C40,钢材屈服强度  $f_y$  为 345 MPa,加载角度为 +90°. 不同参数对柱子截面偏压强度  $N/N_{max}-M/M_u$  相关曲线的影响见图 2,其中  $N$  和  $M$  为构件所能承受的轴力和弯矩, $N_{max}$  和  $M_u$  分别为柱子的轴压强度和纯弯强度. 图中试件名称 3008fy345C40 表示 T 形钢管混凝土柱截面肢宽、肢高为 300 mm,肢厚 100 mm(所有参数分析试件肢厚均为 100 mm,省略

注写),管壁厚 8 mm,钢材屈服强度 345 MPa,混凝土强度 C40. 其他截面形式注写类似.

#### 2.1 不同参数对 $N/N_{max}-M/M_u$ 曲线的影响

(1) 对加载角度为 90°,随着混凝土强度的提高(C30~C60),混凝土承担荷载的比例(混凝土工作承担系数  $\alpha_c = f_c A_c / (f_c A_c + f_y A_s)$ ,  $f_c$  为混凝土棱柱体抗压强度,  $A_c$  为混凝土的截面面积,  $A_s$  为钢管的截面面积)增大,截面轴压强度  $N_{max}$  及截面纯弯强度  $M_u$  均增大,但  $M_u$  增加很小. 由于忽略混凝土的抗拉强度,截面上的拉力分量由钢管承担,混凝土对抗弯承载力  $M$  的贡献相对小于对轴向承载力  $N$  的贡献. 因此混凝土工作承担系数  $\alpha_c$  的增加,对压弯状态下抗弯承载力的提高幅度大于对截面纯弯强度的提高幅度,使界限抗弯承载力(相关曲线外凸点对应的抗弯承载力)与截面纯弯强度的比值增加,即  $N/N_{max}-M/M_u$  曲线反弯点的横坐标增大. 同时,与矩形钢管混凝土柱  $N/N_{max}-M/M_u$  相关曲线<sup>[10]</sup>相似, T 形钢管混凝土  $N/N_{max}-M/M_u$  反弯点的纵标值,也随混凝土工作承担系数  $\alpha_c$  的增加而增加. 所以混凝土强度越高, T 形钢管混凝土  $N/N_{max}-M/M_u$  相

图 2 不同参数对  $N/N_{max}-M/M_u$  相关曲线的影响Fig.2 Effects of different parameters on  $N/N_{max}-M/M_u$  interaction curves

关曲线逐渐外凸,越来越趋向于有拐点,与钢筋混凝土柱的相关曲线相似。

(2) 对加载角度为  $90^\circ$ ,随着钢材屈服强度(235~390 MPa)的提高,混凝土工作承担系数  $\alpha_c$  降低,钢管承担的荷载比例增大,截面轴压强度  $N_{max}$  及截面纯弯强度  $M_u$  均增大.由于忽略混凝土的抗拉强度,拉力分量由钢管抵抗,钢管对抗弯承载力的贡献大于对轴向承力的贡献,所以钢管承担荷载的比例  $(1-\alpha_c)$  增大,对压弯状态下抗弯承载力  $M$  的提高幅度小于纯弯承载力  $M_u$  的提高幅度,使界限抗弯承载力与截面纯弯强度的比值减小,即  $N/N_{max}-M/M_u$  曲线反弯点的横坐标减小.同时反弯点的纵坐标也因混凝土工作承担系数的减小而减小,所以钢材屈服强度越高,T形钢管混凝土  $N/N_{max}-M/M_u$  相关曲线逐渐向内靠拢,越来越趋向于无拐点,与钢柱的相关曲线相似。

(3) 对加载角度为  $90^\circ$ ,随着管壁厚度(6~10 mm,反映管壁宽厚比)的增加,混凝土工作承担系数降低,其对  $N/N_{max}-M/M_u$  曲线形状的影响与钢材屈服强度的增加类似,曲线逐渐向内靠拢,越来越趋向于无拐点。

(4) 对加载角度为  $90^\circ$ ,截面肢厚为 100 mm,当截面肢宽厚比由图中的 2.5 上升到 4.0 时,混凝土工作承担系数(分别为 0.313,0.277,0.221)依次减小,但相关曲线越来越向外突出,这主要是因为对于

不同肢宽厚比的 T 形钢管混凝土截面,尽管混凝土工作承担系数变小了,但实际受压区的混凝土面积率却增大,混凝土参与实际工作的比例增加。

(5) 从图 2e 和图 3 可以看出,随着加载角度从  $-90^\circ$  向  $-45^\circ$  变化,截面的纯弯强度  $M_u$  逐渐减小,界限轴向承载力  $N$  增大,界限抗弯承载力  $M$  减小,但界限抗弯承载力与纯弯强度的比值增大;因此  $N/N_{max}-M/M_u$  曲线反弯点的横坐标、纵坐标均增大,相关曲线的形状更向外凸,反弯点越来越明显.加载角度从  $-45^\circ$  向  $45^\circ$  变化时,截面的纯弯强度  $M_u$  及界限抗弯承载力  $M$  变化不大;界限轴向承载力  $N$  减小,但界限抗弯承载力与纯弯强度的比值减小;因此  $N/N_{max}-M/M_u$  曲线反弯点的横坐标、纵坐标均减小,相关曲线的形状更向内收,反弯点越来越不明显.加载角度从  $45^\circ$  向  $90^\circ$  变化时,截面的纯弯强度  $M_u$  变化不大,界限轴向承载力  $N$  增大,界限抗弯承载力  $M$  增大,界限抗弯承载力与纯弯强度的比值增大;因此  $N/N_{max}-M/M_u$  曲线反弯点的横坐标、纵坐标均增大,相关曲线的形状更向外凸,反弯点越来越明显.所以在不同的荷载角度下,T形钢管混凝土偏压柱截面的  $N/N_{max}-M/M_u$  相关曲线均差异较大,曲线有无拐点及拐点位置高低均不同,这与 T 形钢管混凝土的截面特性及力学性能有关,即与混凝土工作承担系数有关,并且也与由于忽略混凝土的抗拉强度,混凝土受压参与截面承载贡献的比重有关。

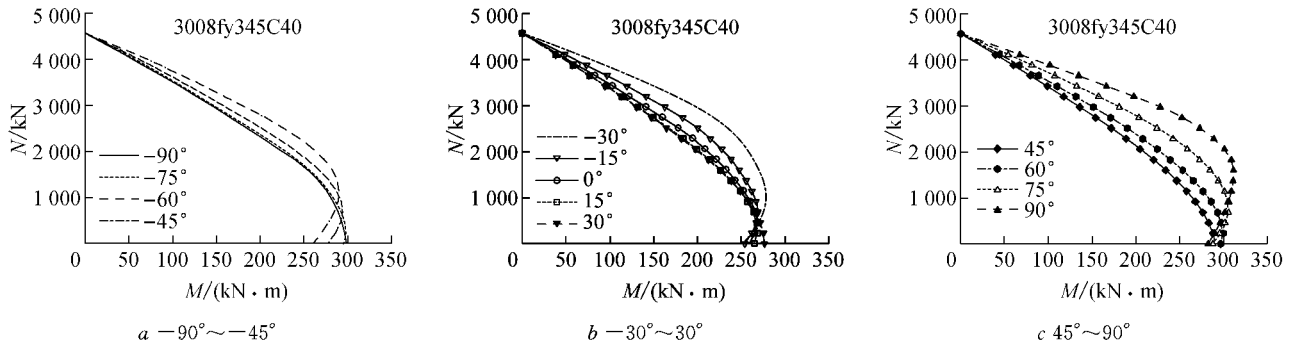


图 3 加载角度对  $N-M$  相关曲线的影响

Fig. 3 Effects of load angle on  $N-M$  interaction curves

2.2 各参数对  $M_x/M_{ucx}-M_y/M_{ucy}$  曲线的影响

图 4 给出了不同参数对 T 形钢管混凝土柱在某一轴压比  $n(n=N/N_{max})$  下双向压弯相关曲线  $M_x/M_{ucx}-M_y/M_{ucy}$  的影响, 其中  $M_x, M_y$  为轴压比为  $n$  时柱子截面在两个主轴方向所能承担的弯矩,  $M_{ucx},$

$M_{ucy}$  分别为  $x$  和  $y$  向截面在相同轴压比  $n$  下, 单向压弯时的抗弯承载能力. 可以看出: 混凝土强度、钢材强度和管壁厚度对一定轴压比  $n$  下的  $M_x/M_{ucx}-M_y/M_{ucy}$  相关曲线的影响较小. 然而轴压比  $n$  对  $M_x/M_{ucx}-M_y/M_{ucy}$  相关曲线的形状影响却十分显著, 随

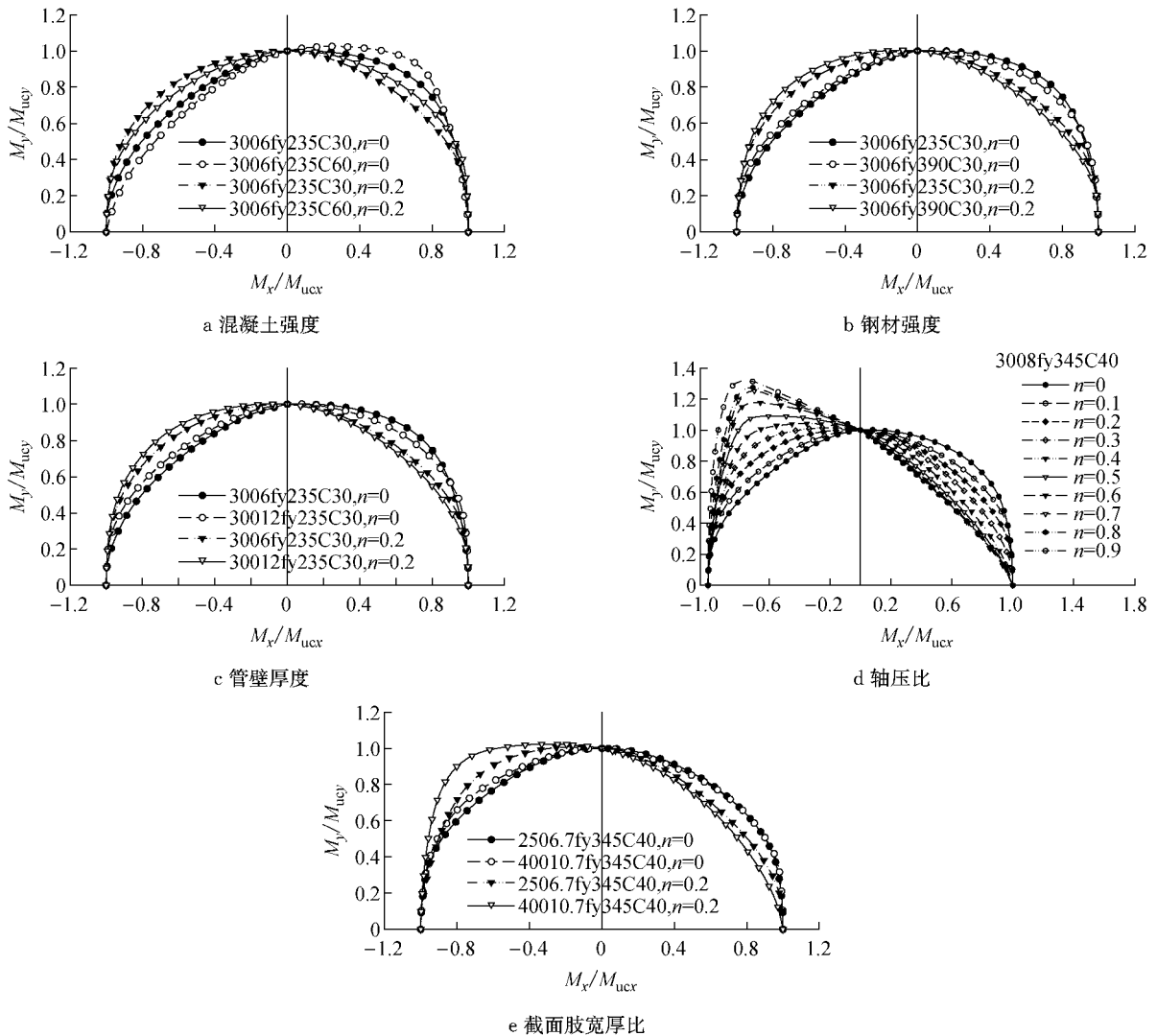


图 4 不同参数对  $M_x/M_{ucx}-M_y/M_{ucy}$  相关曲线的影响

Fig. 4 Effects of different parameters on  $M_x/M_{ucx}-M_y/M_{ucy}$  interaction curves

着轴压比的增大,  $M_x/M_{ucx}-M_y/M_{ucy}$  相关曲线由向  $+M_x$  一侧凸向的类圆形过渡到圆形, 再变化为向  $-M_x$  一侧凸向的近似三角形. 截面肢宽厚比对  $M_x/M_{ucx}-M_y/M_{ucy}$  相关曲线的形状也有一定影响.

### 3 偏压承载力简化计算公式

#### 3.1 单向压弯构件截面强度简化计算公式

基本假定: ①截面变形后符合平截面假定, 即截面上任一点的应变大小与该点到中性轴的距离成正比(图 5 中  $\epsilon_c, \epsilon_t$  为分别为截面上最外侧受压和最外侧受拉应变,  $x$  为混凝土受压区高度,  $f_{cl}$  为约束混凝土强度); ②当荷载达到截面强度时, 钢管受拉区及受压区应力均达到其屈服强度; 受拉区混凝土退出工作, 受压区混凝土应力达到约束混凝土强度  $f_{cl}$ . 截面轴力  $N$  和截面弯矩  $M$  如式(1)~(2):

$$N = f_y (\sum A_{sci} - \sum A_{sti}) + f_{cl} \sum A_{cci} \quad (1)$$

$$M = f_y (\sum A_{sci} h_{sci} - \sum A_{sti} h_{sti}) + f_{cl} \sum A_{cci} h_{cci} \quad (2)$$

式(1)~(2)中:  $A_{sci}, A_{sti}, A_{cci}$  分别为各受压区、受拉区的钢管和混凝土单元的截面面积;  $h_{sci}, h_{sti}, h_{cci}$  分别为各受压区、受拉区的钢管和混凝土单元面积中心在截面形心为原点的坐标系中的坐标值. 按式(1)~(2)当  $N=0$  时,  $M$  即为截面的纯弯强度.

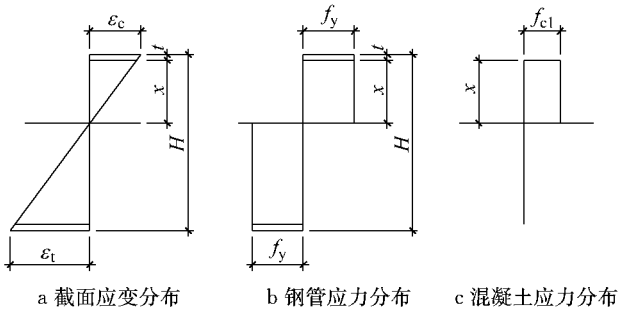


图 5 T形钢管混凝土柱截面应力、应变分布

Fig.5 Divisions of strain and stress of cross section for CFTST columns

与矩形钢管混凝土柱的偏压承载力  $N-M$  相关曲线相类似, 本文采用三折线  $ABCD$  来简化表示 T 形钢管混凝土柱截面单向压弯强度相关曲线<sup>[10-11]</sup>, 如图 6 所示(图中  $\zeta_i = M_i/M_u, \eta_i = N_i/N_{max}$ ). 由第 2.1 节分析知  $-90^\circ, 90^\circ$  加载及沿  $x$  轴偏心 ( $0^\circ$  加载, 弯矩只有  $M_y, M_x=0$ ) 三种情况下截面强度承载力归一化曲线  $N/N_{max}-M/M_u$  的特征点  $B, C$  所对应的坐标值均不相同. 在对第 2 节所述参数范围内的 270

根 T 形截面钢管混凝土短柱的偏压承载力  $N/N_{max}-M/M_u$  相关曲线研究基础上, 对沿三个方向加载时的特征点  $B, C$  的纵坐标  $\eta_i (\eta_i = N_i/N_{max})$  确定见表 1.

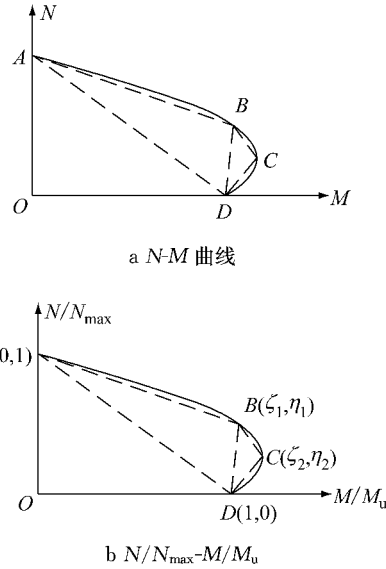


图 6 简化的相关曲线

Fig.6 Simplified interaction curves for CFTST columns

表 1 截面沿不同方向弯曲时特征点纵坐标值

Tab.1 Value of  $\eta_i$  for the characteristic points of the interaction curve

	沿 $y$ 轴正向弯曲 ( $-90^\circ$ 加载)	沿 $x$ 轴偏心 ( $0^\circ$ 加载)	沿 $y$ 轴负向弯曲 ( $90^\circ$ 加载)
B 点 $\eta_1$	0.30	0.50	0.55
C 点 $\eta_2$	0.15	0.20	0.25

轴力  $N$  作用在  $y$  轴正向或负向时,  $B$  点、 $C$  点的横坐标  $\zeta_i = M_i/M_u, M_i, M_u$  由式(1)~(2)确定. 对于只有轴力  $N$  和单向弯矩  $M_y$  时  $B$  点、 $C$  点的横坐标  $\zeta_i = M_i/M_u$ , 由式(3)~(4)确定:

$$\zeta_1 = M_1/M_{uy} = b_1(\alpha_c)^2 + b_2\alpha_c + b_3(q)^2 + b_4q + b_5 \quad (3)$$

$$\zeta_2 = M_2/M_{uy} = c_1(\alpha_c)^2 + c_2\alpha_c + c_3(q)^2 + c_4q + c_5 \quad (4)$$

式中:  $M_{uy}$  为只产生  $y$  向弯矩时的纯弯强度, 经分析只产生  $y$  向弯矩时的纯弯弯矩  $M_{uy1}$  以及绕  $y$  轴弯曲时纤维模型计算的  $y$  向弯矩分量  $M_{uy1}$  以及绕  $y$  轴弯曲按式(1)~(2)确定的纯弯承载力  $M_{uy2}$  三者十分接近. 因此  $M_{uy}$  可按公式(1)~(2)近似确定. 混凝土工作承担系数  $\alpha_c$ , 截面肢厚宽比  $q = h_f/B$ . 系数  $b_i, c_i$  取值见表 2.

采用三折线表达 T 形钢管混凝土柱  $N/N_{max}-M/M_u$  相关曲线如下:

直线  $AB$  段 ( $\eta_1 < \eta \leq 1$ ):

表 2 参数  $b_i, c_i$  取值  
Tab.2 The value of  $b_i, c_i$

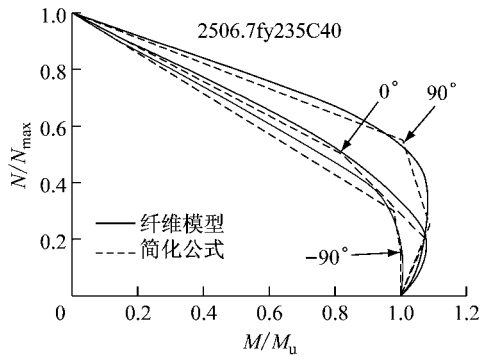
参数	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$
取值	1.1330	-0.150	0.980 1	-0.767 3	0.851 5
参数	$c_1$	$c_3$	$c_3$	$c_4$	$c_5$
取值	0.654 3	0.065 3	-0.076 1	0.171 7	0.888 5

$$\frac{N}{N_{\max}} - \frac{\eta_1 - 1}{\zeta_1} \cdot \frac{M}{M_u} = 1 \quad (5)$$

直线 BC 段 ( $\eta_2 \leq \eta < \eta_1$ ):

$$\frac{N}{N_{\max}} - \frac{\eta_2 - \eta_1}{\zeta_2 - \zeta_1} \cdot \frac{M}{M_u} = \eta_1 - \frac{\eta_2 - \eta_1}{\zeta_2 - \zeta_1} \zeta_1 \quad (6)$$

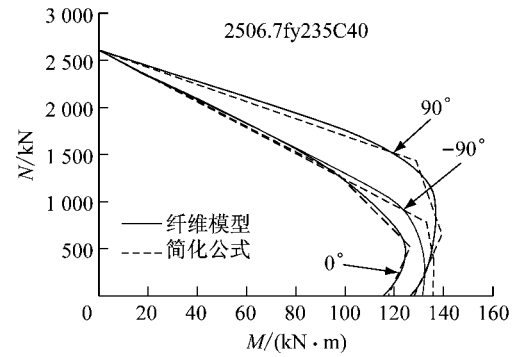
直线 CD 段 ( $0 < \eta < \eta_2$ ):



a  $N/N_{\max}-M/M_u$

$$\frac{N}{N_{\max}} - \frac{\eta_2}{\zeta_2 - 1} \cdot \frac{M}{M_u} = -\frac{\eta_2}{\zeta_2 - 1} \quad (7)$$

式(5)–(7)中  $\zeta=M/M_u$ ,  $\eta=N/N_{\max}$ . 大量计算结果表明:在工程常用的参数范围内,式(5)–(7)的计算结果  $\zeta+\eta$  与纤维模型分析结果  $\zeta+\eta$  的比值的平均值和标准差如下:  $-90^\circ$  加载:平均值:0.990 1;标准差 0.017 38;  $0^\circ$  加载:平均值:0.984 1,标准差 0.010 54;  $+90^\circ$  加载:平均值:0.974 3,标准差 0.019 16. 图 7 给出了  $N/N_{\max}-M/M_u$  和  $N-M$  相关曲线简化公式计算结果与纤维模型数值计算结果的对比. 可见,简化公式可以较好预测数值计算结果.



b  $N-M$

图 7 相关曲线数值计算结果与简化计算结果的比较

Fig.7 Comparisons of interaction curves between the numerical results and the simplified formula results

### 3.2 双向压弯构件截面强度简化计算公式

基于 2.2 节的参数分析,提出 T 形钢管混凝土双向偏压柱截面强度承载力的简化计算公式如下:

I 象限:

$$\left(\frac{M_x}{M_{ucx}}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{M_{ucy}}\right)^2 + C\left(\frac{M_x}{M_{ucx}}\right)\left(\frac{M_y}{M_{ucy}}\right) - C\left(\frac{M_x}{M_{ucx}}\right) - C\left(\frac{M_y}{M_{ucy}}\right) + C - 1 = 0 \quad (8)$$

II 象限:

$$\left(\frac{M_x}{M_{ucx}}\right)^2 + B\left(\frac{M_y}{M_{ucy}}\right)^2 + C\left(\frac{M_x}{M_{ucx}}\right)\left(\frac{M_y}{M_{ucy}}\right) + (1 - B - C)\left(\frac{M_x}{M_{ucx}}\right) + C\left(\frac{M_y}{M_{ucy}}\right) - B - C = 0 \quad (9)$$

式(8)–(9)中  $M_{ucx}, M_{ucy}$  分别为 T 形钢管混凝土柱在轴力  $N$  作用下,单向压弯时沿  $x$  和  $y$  向的抗弯承载能力,按式(5)–(7)计算.  $B=B_1n^2+B_2n+B_3(q)^2+B_4q+B_5$ ;  $C=C_1n^2+C_2n+C_3(q)^2+C_4q+C_5$ ;  $n$  为轴压比 ( $n=N/N_{\max}$ );  $q$  为截面肢厚宽比 ( $q=h_f/B$ ). 参数  $B_i, C_i$  取值见表 3.

图 8 给出了  $M_x-M_y$  相关曲线简化公式计算结果与纤维模型数值计算结果的对比. 可见,简化公式

计算结果与数值计算结果吻合良好.

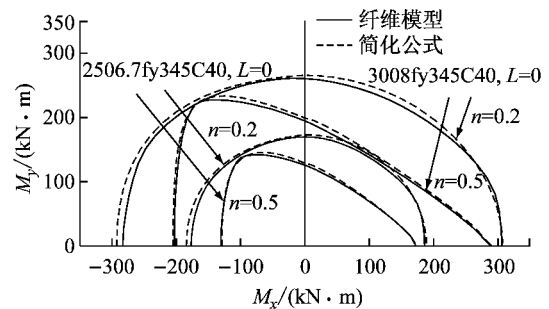


图 8  $M_x - M_y$  相关曲线数值计算结果与简化计算结果的比较  
Fig.8 Comparisons of  $M_x - M_y$  interaction curves between the numerical results and the simplified results

## 4 结论

根据本文的研究可以得到以下结论:

(1) 对 T 形钢管混凝土柱截面强度  $N/N_{\max}-M/M_u$  相关曲线参数分析表明:混凝土强度越高,相关曲线越向外凸出,反弯点越来越明显,与钢筋混凝土

表3  $B_i, C_i$  取值Tab.3 The value of  $B_i, C_i$ 

	I 象限			II 象限		
	$0 \leq n \leq 0.4$	$0.4 < n \leq 0.7$	$0.7 < n < 1$	$0 \leq n \leq 0.4$	$0.4 < n \leq 0.7$	$0.7 < n < 1$
$B_1$				28.115 0	3.346 4	0.517 3
$B_2$				-22.430 4	-3.903 8	-0.960 6
$B_3$				7.651 3	3.363 9	-0.805 2
$B_4$				-2.943 5	-1.242 8	0.873 4
$B_5$				4.821 4	1.257 2	0.336 4
$C_1$	-26.772 3	-2.280 1	-1.452 9	22.326 9	-0.771 5	13.554 8
$C_2$	23.793 6	2.893 6	2.210 8	-12.506 0	-4.481 0	-20.887 7
$C_3$	-3.961 0	-2.931 2	-2.583 7	132.888 8	-7.591 2	22.150 4
$C_4$	1.144 5	1.670 0	1.362 9	-115.372 3	-0.783 9	-15.025 4
$C_5$	-3.359 5	0.850 4	0.981 9	28.009 5	5.552 1	11.401 4

柱的相关曲线越来越相似;钢材强度越高以及管壁厚度越厚,相关曲线越向内收拢,反弯点越来越不明显,曲线与钢柱的相关曲线更相似;加载角度是影响相关曲线形状的重要参数,在不同的荷载角度下,曲线有无拐点及拐点位置高低均不同,与混凝土受压参与截面承载贡献的比重有关。

(2) 对 T 形钢管混凝土柱截面强度  $M_x/M_{ux}$ - $M_y/M_{uy}$  相关曲线参数分析表明:混凝土抗压强度、钢材屈服强度、管壁厚度和长细比对相关曲线的影响不大;而轴压比  $n$  对相关曲线的形状有重要影响;截面肢宽厚比对相关曲线形状的影响也不能忽略。

(3) 基于全塑性假定和大量参数分析,提出了 T 形钢管混凝土单向偏压柱的截面强度承载力简化计算方法;考虑轴压比和截面宽厚比的影响提出了双向压弯柱截面强度承载力的简化计算方法.简化计算方法的计算结果与理论分析结果吻合良好,可为工程设计提供参考。

### 参考文献:

[1] Chen Z Y, Shen Z Y. Behavior of L-shaped concrete-filled steel stub columns under axial loading: experiment[J]. *Advanced Steel Construction*, 2010, 6(2): 688.

[2] 左志亮, 蔡健, 刘明峰, 等. 带约束拉杆 T 形钢管混凝土短柱偏压试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2011, 32(8): 79. ZUO Zhiliang, CAI Jian, LIU Mingfeng, *et al.* Experimental study of T-shaped CFT stub columns with binding bars subjected to eccentric load[J]. *Journal of Building Structures*, 2011, 32(8): 79.

[3] 王丹, 吕西林. T 形、L 形钢管混凝土柱抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2005, 26(4): 39. WANG Dan, LV Xilin. Experimental study on seismic behavior

of concrete-filled steel T-section, L-section columns [J]. *Journal of Building Structures*, 2005, 26(4): 39.

[4] Shen Z Y, Lei M, Li Y Q, *et al.* Experimental study on the seismic behavior of concrete-filled L-shaped steel tube columns [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2013, 16(7): 1235.

[5] Zuo Z L, Cai J, Yang C. Axial load behavior of L-shaped CFT stub columns with bind bars [J]. *Engineering Structures*, 2012, 37(5): 88.

[6] Yang Y L, Yang H, Zhang S M. compressive behavior of T-shaped concrete filled steel tubular columns [J]. *International Journal of Steel Structures*, 2010, 10(4): 419.

[7] 徐礼华, 杜国锋, 温芳, 等. 组合 T 形截面钢管混凝土柱正截面受压承载力试验研究[J]. *土木工程学报*, 2009, 42(6): 14. XU Lihua, DU Guofeng, WEN Fang, *et al.* Experimental study on normal section compression bearing capacity of composite T-shaped concrete-filled steel tubular columns [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 42(6): 14.

[8] 屠永清, 刘林林, 叶英华. 多室式钢管混凝土 T 形中长柱轴压性能研究[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(9): 27. TU Yongqing, LIU Linlin, YE Yinghua. Study on the properties of multi-cell T-shaped concrete-filled steel tubular intermediate long columns under axial load [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(9): 27.

[9] 雷敏. T 形钢管混凝土构件力学性能若干关键问题研究[D]. 上海: 同济大学, 2014. LEI Min. Study on some key problems on behavior of T-shaped concrete-filled steel tubular columns [D]. Shanghai: Tongji University, 2014.

[10] 韩林海. 钢管混凝土结构—理论与实践[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2007. HAN Linhai. *Theory & practice of concrete-filled steel tubular structure* [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2007.

[11] 沈祖炎, 黄奎生. 矩形钢管混凝土柱偏心受力构件的设计方法[J]. *建筑结构*, 2005, 35(1): 5. SHEN Zuyan, HUANG Kuisheng. Design method of eccentrically loaded members of concrete-filled rectangular steel tube [J]. *Building Structure*, 2005, 35(1): 5.