

# 异形钢管混凝土柱偏压承载力统一算法研究\*

颜燕祥<sup>1,2</sup>, 徐礼华<sup>1†</sup>, 余敏<sup>1</sup>, 李彪<sup>1</sup>, 查晓雄<sup>3</sup>

(1. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 湖北工程学院 土木工程学院, 湖北 孝感 432000; 3. 哈尔滨工业大学 深圳研究生院, 广东 深圳 518055)

**摘要:**为方便T形、L形和十字形钢管混凝土柱的工程设计,结合国内外相关规程计算方法,采用自编程序对异形钢管混凝土柱压弯相关方程曲线进行了计算分析,提出异形钢管混凝土柱偏压承载力统一算法,最后对不同截面形式及构造的异形钢管混凝土柱偏压承载力进行了算法验证.结果表明:统一算法力学意义明确,操作简单易行,具备一定的安全储备;承载力试验值与计算值比值的均值为1.1~1.4,其计算精度与荷载作用截面的工程轴有关.统一算法的提出补充完善了异形钢管混凝土柱计算理论,利于异形钢管混凝土结构的推广应用.

**关键词:**异形钢管混凝土柱;偏心受压;承载力;统一算法;算法验证

**中图分类号:** TU398.9

**文献标志码:** A

## Study of Unified Calculation Method for Eccentric-loaded Capacity of Special-shaped Concrete Filled Steel Tubular Columns

YAN Yanxiang<sup>1,2</sup>, XU Lihua<sup>1†</sup>, YU Min<sup>1</sup>, LI Biao<sup>1</sup>, ZHA Xiaoxiong<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. School of Civil Engineering, Hubei Engineering University, Xiaogan 432000, China;

3. Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** For the convenience of engineering design on T-shaped, L-shaped, and cross-shaped concrete filled steel tubular (CFST) columns, a unified algorithm for eccentric-loaded capacity of special-shaped CFST columns was developed through an analysis of calculation methods in the typical specifications. The N-M relationship curves of columns were calculated and analyzed by using a self-compiled numerical analysis method. The validity of the algorithm was then verified by experimental results in other literatures for various cross-section forms of special-shaped CFST columns. The results show that the uniform algorithm has clear mechanical meaning and it is easy to operate. The mean ratio of the test result to prediction of load bearing capacity is 1.1~1.4, with a certain safety reservation, but the prediction accuracy depends on the engineering axis direction of loading cross-section. The proposed unified algorithm improves the computational theories for special-shaped CFST columns, which can promote its developments and applications in the practical engineering.

\* 收稿日期:2016-12-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51508425), National Natural Science Foundation of China(51508425)

作者简介:颜燕祥(1985-),男,湖北大悟人,武汉大学博士研究生,湖北工程学院讲师

† 通讯联系人, E-mail: xulihuad@163.com

**Key words:** special-shaped concrete filled steel tubular columns; eccentric compression; bearing capacity; unified calculation method; algorithm verification

异形钢管混凝土柱集成了钢筋混凝土异形柱和钢管混凝土柱的许多优点,能够提高房屋适用性,增加建筑使用面积,利于室内装修和家具布置,是一种极具潜力的组合柱结构.异形钢管混凝土柱在广东、天津等城市的高层中已有应用,获得了良好的经济效应和社会效应.同钢筋混凝土异形柱相比,钢管混凝土异形柱利于应用高强混凝土、节约模板、方便施工,具有承载力高、塑性性能好、抗震性能优越等优点.与常规截面的组合柱相比,其截面形式及构造多样<sup>[1-2]</sup>,异形钢管混凝土柱偏压极限承载力对工程轴的方向性灵敏,具有一定的共性和独特性.

目前,国内外一些学者对异形钢管混凝土柱抗震性能及静力力学性能进行了试验研究和有限元分析.同济大学的王丹等<sup>[3-5]</sup>通过试验研究了 T 形、L 形组合柱的抗震性能和影响因素.并借助纤维模型得出了构件的弯矩-轴力-曲率关系和荷载-位移关系<sup>[4]</sup>.黄俊<sup>[6]</sup>通过正交试验的方法,得到了影响异形组合柱抗震性能的因素顺序. Tu 等<sup>[7]</sup>借助构造措施设置多室,改善了普通 T 形组合柱的抗震强度和延性,并指出因截面形式不对称,其抗震性能随荷载方向不同而异.文献<sup>[8]</sup>通过试验和回归分析,借助经验系数法和压弯相关方程的简化式,提出了组合 T 形截面钢管混凝土柱偏心受压承载力计算公式.文献<sup>[9]</sup>通过试验与数值模拟相结合的方法,提出了二次曲线形式的带约束拉杆 L 形双向偏压短柱承载力的简化计算公式.文献<sup>[10]</sup>通过有限元模拟,提出了分弯矩作用方向的多室式钢管混凝土 T 形偏压短柱压弯相关方程的直线和折线形式的简化计算公式.文献<sup>[11]</sup>采用纤维模型法,对 T 形、L 形和十字形偏压短柱进行了力学性能分析,提出了指数形式的单向偏压和二次曲线形式的双向偏压承载力计算公式.文献<sup>[12]</sup>通过纤维模型法,提出了 T 形截面钢管混凝土短柱三折线形式的单向偏压和二次曲线形式的双向偏压承载力简化计算公式.但这些公式的提出均基于各自提出的截面形式、构造及试验结果,忽略了异形钢管混凝土柱的共性,且部分公式过于复杂,不利于工程设计应用,具有一定的局限性.异形钢管混凝土柱偏压承载力是其力学性能的一个重要组成部分,但由于截面形式及构造的多样性和实际结构中部分荷载的随机性,异形钢管混凝土柱受力分析复杂,国内外目前尚未形成一套完善统一的计算方法.一方面,异形钢管混凝土柱构件本身截

面形状不规则和构造多样使得截面几何参数计算及钢板与核心混凝土相互作用机理复杂<sup>[8-10]</sup>;另一方面,部分异形柱构件试验数量有限,甚至部分力学试验数据和分析内容空白.因此,研究异形钢管混凝土柱偏压承载力计算方法,建立异形钢管混凝土柱偏压承载力统一计算理论,可为异形钢管混凝土结构技术规程的制订以及异形钢管混凝土柱的工程应用提供参考,具有重要的理论和现实意义.本文在分析国内外钢管混凝土柱偏压承载力相关规程的基础上,提出偏于安全的异形钢管混凝土柱偏压承载力统一算法,并通过相关文献中试验数据的统计计算分析,验证统一算法的有效性和合理性.

## 1 国内外典型规程计算方法

目前,关于异形钢管混凝土结构的设计指导性文件和规范国内外尚未见诸报道,异形钢管混凝土柱构件偏压承载力仍没有统一的计算公式.本文在保留异形钢管混凝土柱自身压弯曲线特征基础上,参照中国规程 CECS 159-2004<sup>[13]</sup>和规范 GB 50396-2014<sup>[14]</sup>、美国 AISC-LRFD(2005)规范<sup>[15]</sup>和欧洲 Eurocode 4(2004)规范<sup>[16]</sup>等已有钢管混凝土构件偏压承载力的计算理论,寻求与现有规范或规程相衔接的统一计算方法.典型规范、规程计算方法如表 1 所示.

表 1 钢管混凝土柱偏压承载力的规程计算方法  
Tab. 1 Calculation methods for load carrying capacity of CFST columns under eccentric compression

规范或规程	压弯承载力计算公式
Eurocode 4	$\frac{N_{Ed}}{\chi N_{plRd}} + \frac{M_{Ed}}{\mu_d \alpha_m M_{plRd}} \leq 1$
AISC-LRFD	$\frac{p_u}{\varphi_c p_n} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_u}{\varphi_b M_n} \right) \leq 1, \frac{p_u}{\varphi_c p_n} \geq 0.2$ $\frac{1}{2} \left( \frac{p_u}{\varphi_c p_n} \right) + \frac{M_u}{\varphi_b M_n} \leq 1, \frac{p_u}{\varphi_c p_n} < 0.2$
CECS 159-2004	$\frac{N}{N_{un}} + (1 - \alpha_c) \frac{M}{M_{un}} \leq \frac{1}{\gamma}, \frac{N}{N_{un}} \geq \alpha_c$ $\frac{M}{M_{un}} \leq \frac{1}{\gamma}, \frac{N}{N_{un}} < \alpha_c$
GB 50396-2014	$\frac{N}{N_u} + \frac{\beta_m M}{1.5 M_u (1 - 0.4 N/N_{EX})} \leq 1, \frac{N}{N_u} \geq 0.255$ $- \frac{N}{2.17 N_u} + \frac{\beta_m M}{M_u (1 - 0.4 N/N_{EX})} \leq 1, \frac{N}{N_u} < 0.255$

分析可知,现有规范和规程中对组合柱构件单

向偏压承载力的处理方法大致相同,即将压弯相关方程的曲线形式简化成直线或折线,其表达式可统一为:

$$\frac{N}{N_u} + k \frac{M}{M_u} \leq 1 \quad (1)$$

式中: Eurocode 4 规范中,  $N_u = \chi N_{plRd}$ ;  $k = 1/\mu_d \alpha_m$ ;  $M_u = M_{plRd}$ . AISC-LRFD 规范中, 当  $p_u/\varphi_c P_n \geq 0.2$  时,  $N_u = \varphi_c P_n$ ;  $k = 8/9\varphi_b$ ;  $M_u = M_n$ ; 当  $p_u/\varphi_c P_n < 0.2$  时,  $N_u = 2\varphi_c P_n$ ;  $k = 1/\varphi_b$ ;  $M_u = M_n$ . CECS 159-2004 规程中, 当  $N/N_{un} \geq \alpha_c$  时,  $N_u = N_{un}$ ;  $k = 1 - \alpha_c$ ;  $M_u = M_{un}$ , 而当轴力较小 ( $N/N_{un} < \alpha_c$ ) 弯矩较大情形下, 按纯弯构件进行承载力验算. GB 50396-2014 规范中, 当  $N/N_u \geq 0.255$  时,  $N_u = N_u$ ;  $k = \beta_m/1.5(1 - 0.4N/N'_{Ex})$ ;  $M_u = M_u$ ; 当  $N/N_u < 0.255$  时,  $N_u = -2.7N_u$ ;  $k = \beta_m/(1 - 0.4N/N'_{Ex})$ ;  $M_u = M_u$ .

由上可知, Eurocode 4 规范将  $N-M$  的相关曲线简化为直线表达式; AISC-LRFD 规范、CECS 159-2004 规程及 GB 50396-2014 规范将  $N-M$  的相关曲线简化为双折线表达式, 区别在于折线的分界点. CECS 159-2004 规程给出的是单向偏压的短柱(截面)承载力计算公式, 对于中长柱偏压承载力可以通过短柱偏压承载力公式考虑稳定和二阶效应扩展得出类似规范 Eurocode 4、AISC-LRFD、GB 50396-2014 的形式. 而双向偏压构件承载力, 是单向偏压构件承载力的一种扩展和延伸, 可以借助单向压弯的相关方程给出. 4 种规范或规程关于钢管混凝土柱偏心受压承载力公式的形式及参数虽有一定差异, 但各规范、规程关于偏压构件承载力简化计算方法的处理方式和本质规律是相同的, 具有高度的一致性和统一性.

## 2 异形钢管混凝土柱偏压承载力统一算法

组合异形柱的力学性能因截面形式不同而异, 其截面形式和构造对承载力和延性均有影响<sup>[1-2]</sup>. 本文提出的组合异形柱偏压承载力统一算法公式适用于文献[1-2]中论述的组合异形柱(格构式异形柱(图 1(c))除外), 其截面形式如图 1 所示.

### 2.1 异形钢管混凝土柱轴压承载力

研究表明, 采取某些构造措施可以不同程度地提高钢管混凝土柱的承载力和延性等<sup>[17-18]</sup>, 但异形钢管对核心混凝土的约束作用较弱, 核心混凝土的极限抗压强度提高有限<sup>[19-20]</sup>. 因此计算轴压短柱承

载力时, 可忽略钢管对核心混凝土的约束作用, 按叠加原理近似处理<sup>[13]</sup>, 其计算公式见式(2). 对轴压中长柱构件, 其稳定承载力可借鉴 CECS 159-2004 方法计算, 所有异形中长柱构件稳定性系数按钢结构设计规范中的 b 类截面计算. 其承载力计算分别见式(3)、(4)、(5)和式(6). 公式(2)、(3)、(6)的适用范围为:  $10 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 41.58 \text{ MPa}$ ,  $166 \text{ MPa} < f_y \leq 465 \text{ MPa}$ ,  $0.05 < \alpha_s \leq 0.3$ .

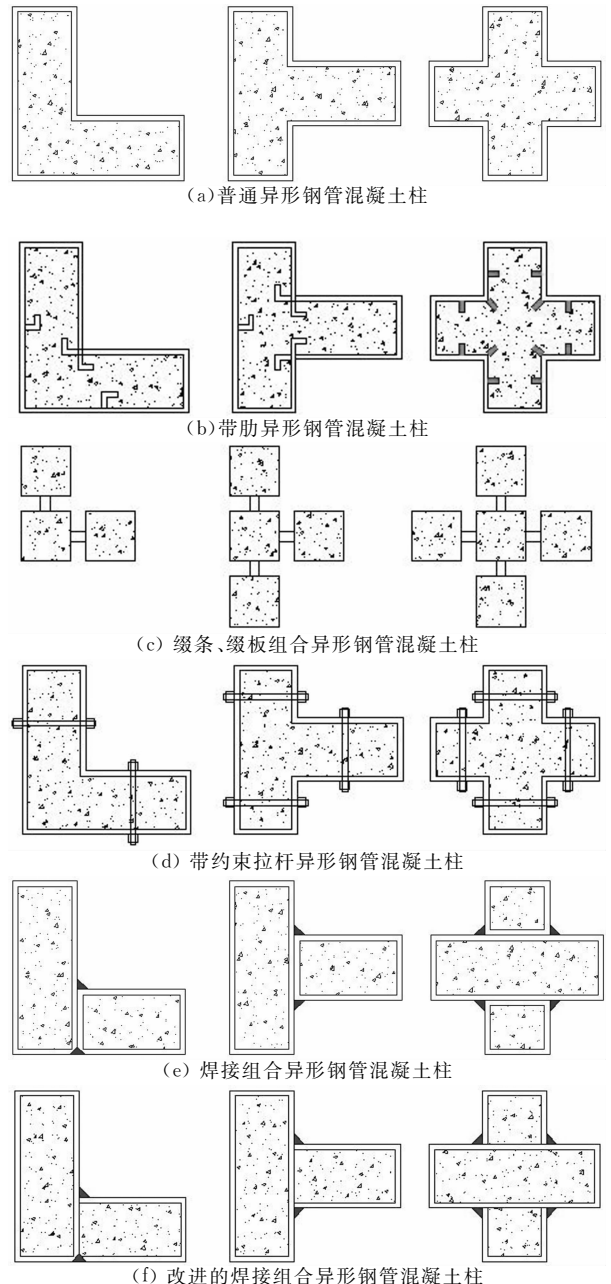


图 1 异形钢管混凝土柱截面

Fig. 1 Section forms of special-shaped concrete-filled steel tubular columns

$$N_{u,s} = N_0 = A_c f_{ck} + A_s f_y \quad (2)$$

$$N_{u,L} = \varphi N_0 = \varphi (A_c f_{ck} + A_s f_y) \quad (3)$$

$$\varphi =$$

$$\begin{cases} 1 - 0.65\lambda_0, \lambda_0 \leq 0.215 \\ \frac{1}{2\lambda_0} [0.965 + 0.3\lambda_0 + \lambda_0^2] - \\ \sqrt{(0.965 + 0.3\lambda_0 + \lambda_0^2)^2 - 4\lambda_0^2}, \lambda_0 > 0.215 \end{cases} \quad (4)$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{N_{u,s}}{N_{cr}}} \quad (5)$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 (E_s I_s + E_c I_c)}{l_0^2} \quad (6)$$

式中:  $A_c$  和  $A_s$  分别为异形柱混凝土和钢材截面面积;  $f_{ck}$  和  $f_y$  分别为异形柱截面混凝土棱柱体轴心抗压强度标准值和钢材屈服强度;  $\varphi$  为中长柱稳定性系数;  $\lambda_0$  为柱的相对长细比;  $N_{cr}$  为柱的欧拉临界力;  $N_{u,s}$  和  $N_{u,L}$  分别为短柱和中长柱的轴压承载力。

## 2.2 异形钢管混凝土柱偏压承载力

异形钢管混凝土柱截面抗弯承载力计算过于繁琐,不规则截面形式是截面几何参数和抗弯承载力计算的直接障碍,构造形式及截面外形导致钢管与核心混凝土之间相互作用机理复杂,尤为独特的是其抗弯承载力对工程轴的方向极为敏感。因此,宜采用机算求解钢管混凝土异形柱截面抗弯和偏压承载力。为求解合理方便,本文参照 CECS 159—2004 条文说明 6.2.1,作如下假定:1)钢管壁没有发生局部屈曲;2)钢管发生全截面屈服(即:拉区受拉屈服,压区受压屈服),其屈服强度为  $f_y$  (或  $f'_y$ );3)受压区混凝土强度为棱柱体轴心抗压强度标准值  $f_{ck}$ ;4)忽略混凝土抗拉作用。受力分析采用极限平衡理论,以 L 形柱截面压弯状态为例,其截面应力分布如图 2 所示。在上述假定条件下,采用条分法在 MATLAB 中求解异形组合柱截面偏压承载力的计算分别见式(7)和式(8)。

$$N_{in} = \sum_{i=1}^{n_c} A_{ci} f_{ck} + \sum_{j=1}^{n'_s} A'_{sj} f'_{yj} - \sum_{k=1}^{n_s} A_{sk} f_{yk} \quad (7)$$

$$M_{in} = \sum_{i=1}^{n_c} A_{ci} f_{ck} (r_{ci} - r_0) + \sum_{j=1}^{n'_s} A'_{sj} f'_{yj} (r'_{sj} - r_0) - \sum_{k=1}^{n_s} A_{sk} f_{yk} (r_{sk} - r_0) \quad (8)$$

式中:  $f_{ck}$  和  $A_{ci}$  分别为第  $i$  个混凝土单元的应力和面积;  $f'_{yj}$  和  $A'_{sj}$  分别为第  $j$  个受压钢板单元的应力和面积;  $f_{yk}$  和  $A_{sk}$  分别为第  $k$  个受拉钢板单元的应力和面积;  $r_0$  为截面形心的某一坐标;  $r_{ci}$  为第  $i$  个混凝土单

元的形心对应坐标;  $r'_{sj}$  为第  $j$  个受压钢板单元的形心对应坐标;  $r_{sk}$  为第  $k$  个受拉钢板单元的形心对应坐标;  $N_{in}$  和  $M_{in}$  分别为异形柱截面的轴力和弯矩。

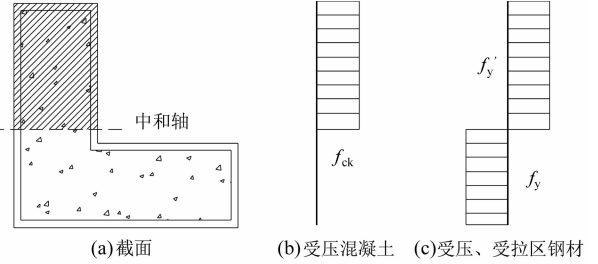


图2 L形柱压弯极限状态下截面应力分布  
Fig. 2 Stress distribution of L-section column in compression-bending limit state

如前所述,因截面几何外形和材料分布不对称,异形钢管混凝土柱偏压承载力因工程轴和方向变化而变化,即:对某一特定工程轴,其正负方向抗弯承载力不一定相同,压弯曲线因工程轴或方向的不同有较大差异(如图 3 所示)。而实际工程中,由于部分荷载(地震作用等)方向的随机性,异形钢管混凝土柱可能处于多向压弯状态,因此,异形钢管混凝土柱偏压承载力统一算法要兼顾考虑  $N$ - $M$  相关曲线与对称截面的相似性和独特性。

本文采用自编程序(条分法)在 MATLAB 中实现了所收集文献中各异形钢管混凝土柱过形心主轴方向的偏压承载力曲线求解。以文献[21]中试件 MC-T-3 为例,其压弯曲线如图 3 所示。由程序计算结果和  $N$ - $M$  相关曲线变化规律可知:1)对于过截面形心的工程轴,其压弯曲线形状为外凸型曲线;2)抗弯承载力因工程轴方向不同而异;3)  $N$ - $M$  相关曲线上的特征点(定义见图 4)为  $(0, N_u)$ 、 $(M_u, 0)$ 、 $(M_{max}, N)$ ;4)与 CECS 159—2004 附录图 E6.2.1-2 不同之处在于  $N$ - $M$  的相关曲线上不一定有坐标为  $(M_u, N_c)$  的点,其中横坐标  $M_u$  代表截面的抗弯承载力,纵坐标  $N_c = A_c f_c$  代表截面核心混凝土的轴心抗压承载力。因此,异形钢管混凝土柱偏压承载力统一简化计算公式不宜直接采用 CECS 159—2004 中折线简化式的分界点,应根据异形柱截面几何特征和弯矩作用方向的工程轴而区别对待。

本文提出的异形钢管混凝土柱偏压承载力统一算法,建议采用分工程轴、弯矩作用方向及大小偏心为区分界的分段表达式。当  $M < M_u$  即小偏心时,其单向偏压构件和双向偏压构件的承载力计算见式(9)和式(10);当  $M_u \leq M \leq M_{max}$  即大偏心时,其单向和双向偏压承载力计算分别见式(11)和式(12)。

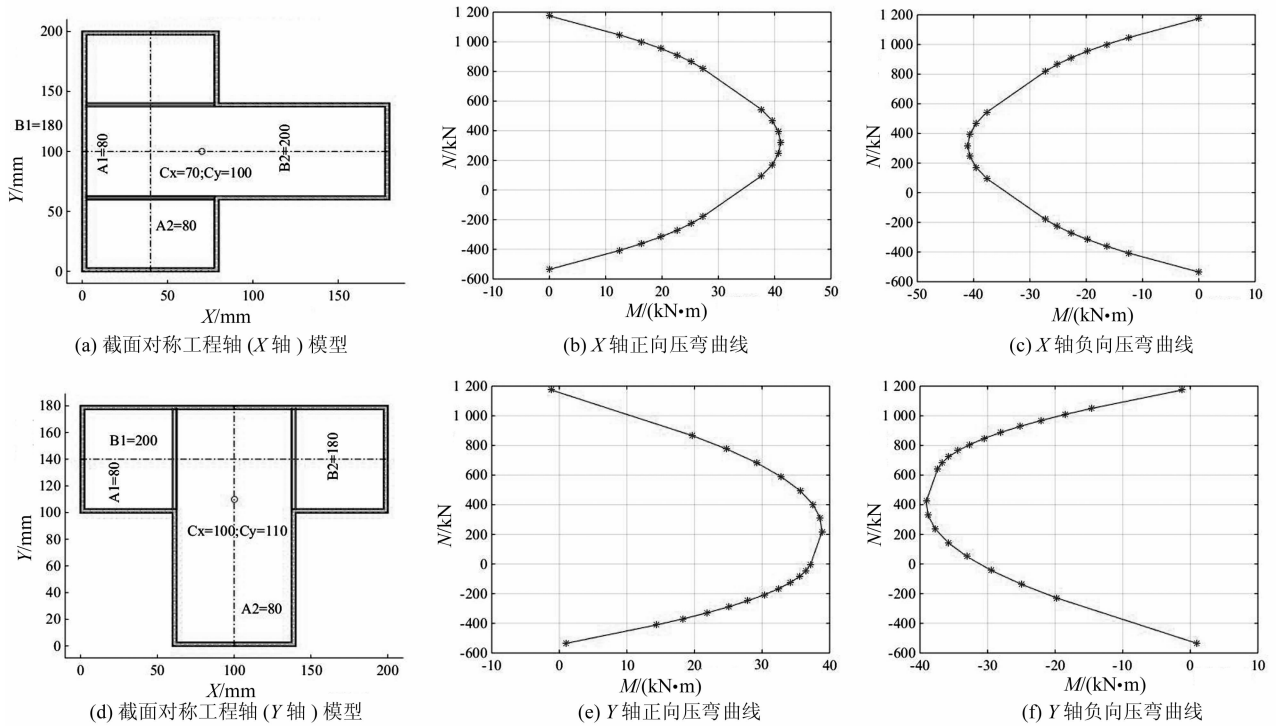


图3 MATLAB编程计算的  $N-M$  的相关曲线

Fig. 3 Calculation of  $N-M$  curves of special-shaped-CFST by MATLAB

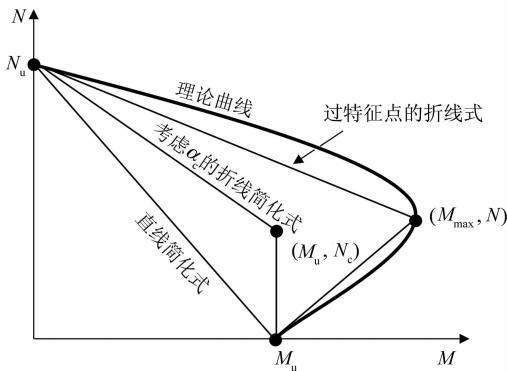


图4  $N-M$  相关曲线的简化算法

Fig. 4 Simplified methods of  $N-M$  curve for special shaped-CFST column

$$\frac{N}{N_u} + (1 - \alpha) \frac{M}{M_u} \leq 1 \quad (9)$$

$$\frac{N}{N_u} + (1 - \alpha_x) \frac{M_x}{M_{ux}} + (1 - \alpha_y) \frac{M_y}{M_{uy}} \leq 1 \quad (10)$$

$$\frac{M}{M_u} \leq 1 \quad (11)$$

$$\frac{M_x}{M_{ux}} + \frac{M_y}{M_{uy}} \leq 1 \quad (12)$$

式中:  $N$  为轴心压力设计值;  $M$  为弯矩设计值;  $N_u$  为组合异形柱轴心受压承载力设计值, 按式(2)、式(3)计算;  $M_u$  为异形柱构件截面抗弯承载力设计值, 按

照 Eurocode 4 规范或 CECS 159—2004 规程中求钢混组合结构截面的抗弯承载力方法通过现有程序或自编程序求解;  $\alpha$  为弯矩作用方向的调整系数, 当弯矩作用于过截面形心的对称工程轴时, 其压弯曲线有类矩形(对称截面)钢管混凝土柱压弯曲线特性, 故取  $\alpha = \alpha_c = A_c f_{ck} / (A_c f_{ck} + A_s f_y)$ , 当弯矩作用于截面形心的非对称工程轴时, 其压弯曲线有类钢结构压弯曲线特性, 故取  $\alpha = 0$ 。式(9)、(10)、(11)和式(12)的适用范围为:  $26.32 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 48.84 \text{ MPa}$ ;  $262.49 \text{ MPa} < f_y \leq 465 \text{ MPa}$ ;  $0.084 < \alpha_s = A_s / A_c \leq 0.198$ 。

单向偏压构件的  $N-M$  理论相关方程曲线及其简化计算方法如图 4 所示。为验证所提算法的有效性和合理性, 采用直线或折线 4 种简化处理  $N-M$  相关方程的算法, 对所收集的异形钢管混凝土柱试件偏压承载力统一算法进行验证。4 种简化算法分别为: 类钢结构的直线验算式,  $N/N_u + M/M_u \leq 1$ ; 过特征点  $(0, N_u)$ 、 $(M_{max}, N)$  和  $(M_u, 0)$  的折线式; 对所有工程轴均考虑  $\alpha_c$  的折线式,  $\frac{N}{N_u} + (1 - \alpha_c) \frac{M_x}{M_{ux}} + (1 - \alpha_c) \frac{M_y}{M_{uy}} \leq 1$ ; 分工程轴考虑  $\alpha_c$  的折线式, 见式(9)、(10)和式(11)、(12)。

综上所述,本文统一算法的步骤方法为:1)建立异形钢管混凝土柱截面极限承载力的通用数值模型,利用极限平衡理论求解  $N-M$  相关曲线及其特征点. 2)根据构件几何及受力特征,确定简化计算方法及分界点,建立简化计算公式. 其特点为该算法适用于不同截面及构造形式的异形组合柱偏压承载力的快速简化计算.

### 3 算法验证

#### 3.1 异形钢管混凝土短柱轴压承载力算法验证

限于篇幅,本文所收集构件详细几何参数均未予列出,具体详见相关文献,其试验材料参数范围统计列于表 2.

表 2 异形钢管混凝土柱试件材料参数范围  
Tab. 2 Material parameters of special-shaped concrete filled steel tubular columns

构件类型	截面类型	$f_{ck}/$ ( $N \cdot mm^{-2}$ )	$f_y/$ ( $N \cdot mm^{-2}$ )	$\alpha_s$
轴压短柱	T 形	12.8~33.87	166~374	0.05~0.15
	十字形	41.58	239~348	0.11~0.30
	L 形	24.01~38.59	295~465	0.07~0.21
轴压中长柱	T 形	28.56~32.37	270.2~376.5	0.11~0.19
	T 形	26.32~37.5	262.49~374	0.08~0.20
小偏压短柱	十字形	41.58	348	0.12~0.18
	L 形	48.84	465	0.11
纯弯构件	T 形	28.88~32.37	236.5~315.25	0.10~0.17

注: $\alpha_s$ 为截面含钢率.

1)收集文献[11-12,22-28]中 90 组 T 形钢管混凝土轴压短柱承载力试验数据结果,其试验值与建议公式计算值之比的均值为 1.08,标准差为 0.127,承载力试验值与计算值比值的散点图如图 5(a)所示.

2)收集文献[11]中 16 组十字形钢管混凝土轴压短柱承载力试验数据,其试验值与建议公式计算值之比的均值为 0.99,标准差为 0.134,承载力试验值与计算值比值的散点图如图 5(b)所示.

3)收集文献[29-31]中 31 组 L 形钢管混凝土轴压短柱承载力试验数据,其试验值与建议公式计算值之比的均值为 1.11,标准差为 0.107,承载力试验值与计算值比值的散点图如图 5(c)所示.

需要注意的是,本文提出的异形钢管混凝土轴压短柱承载力计算公式为考虑钢管和混凝土两者同时受力的情形. 对于约束(荷载只作用于核心混凝土)异形钢管混凝土柱,依据文献[26]中试件 TA-6 和 TA-7 试验结果,轴压承载力试验值比按式(2)计算值小很多.

由图 5 可知,本文提出的异形钢管混凝土轴压短柱试件承载力计算公式偏于安全且较合理.

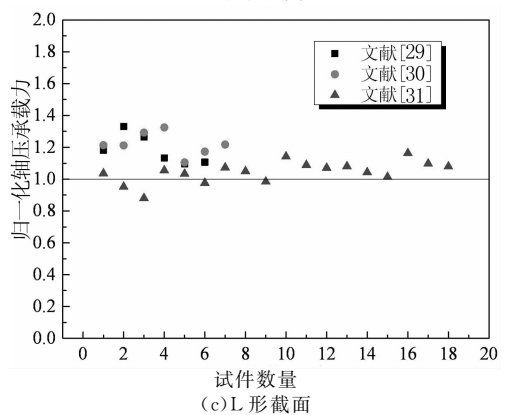
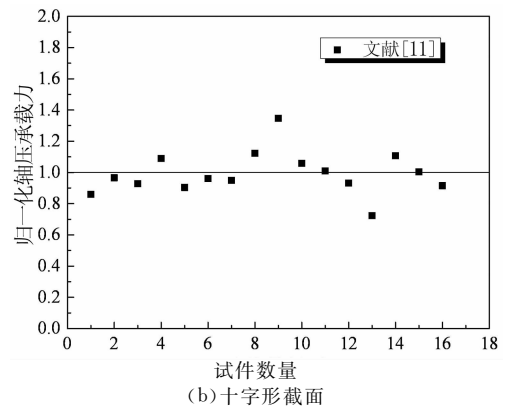
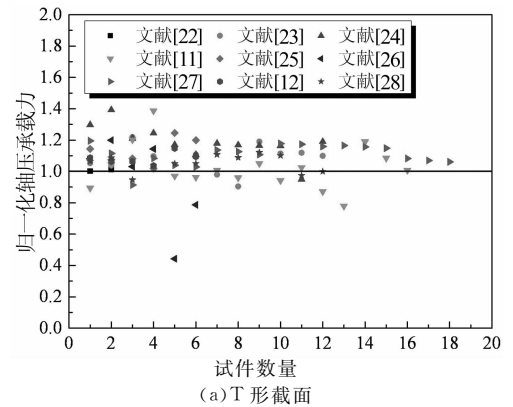
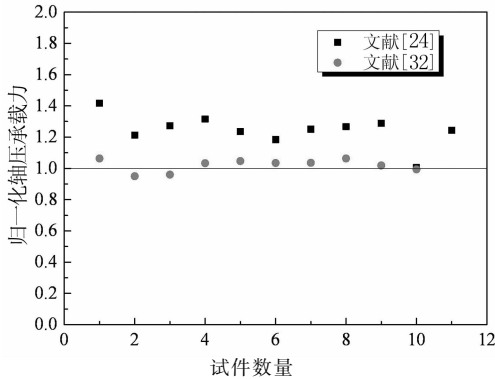


图 5 轴压短柱承载力的算法验证  
Fig. 5 Algorithm verification of axial compressive capacity of short columns

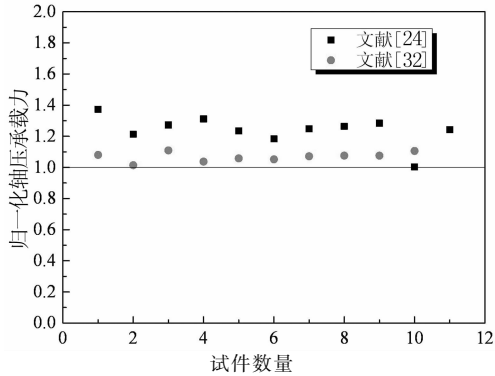
#### 3.2 异形钢管混凝土中长柱轴压承载力算法验证

收集文献[24,32]中 21 组 T 形钢管混凝土中长柱试件,对形心轴  $x$  轴的稳定承载力试验值与公式计算值之比的均值为 1.14,标准差为 0.135;对形心轴  $y$  轴的稳定承载力试验值与公式计算值之比的均值为 1.16,标准差为 0.109;其稳定承载力试验值与计算值比值的散点图见图 6. 由图 6 可知,本文提出的异形钢管混凝土中长柱轴压构件承载力计算公式对 T 形截面来说是偏于安全和合理的. 由于现

阶段十字形、L形钢管混凝土中长柱试件试验数量缺乏,对这两种异形中长柱轴压承载力的计算有待科研和工程实践作进一步的验证。



(a) x轴的稳定承载力(T形)



(b) y轴的稳定承载力(T形)

图6 轴压中长柱承载力的算法验证

Fig. 6 Algorithm verification of axial compressive capacity of middle long columns

### 3.3 异形钢管混凝土柱偏压承载力算法验证

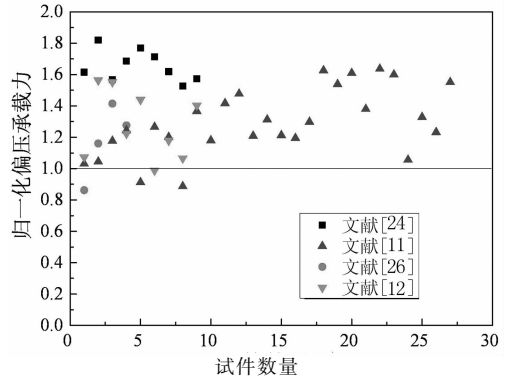
1)收集文献[11-12,24,26]中不同截面参数或构造的共49组T形截面偏压(短柱)构件试验数据,偏压承载力4种简化计算方法统计结果列于表3,其承载力试验值与公式计算值之比的散点图如图7所示。

2)收集文献[11]中不同截面参数或构造的13组十字形截面偏压构件试验数据.偏压承载力4种简化计算方法统计结果见表3,其承载力试验值与公式计算值之比的散点图见图8。

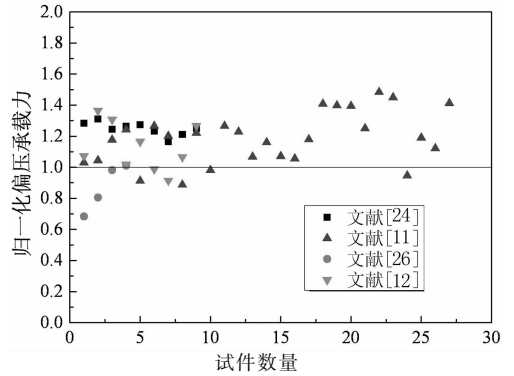
3)收集文献[11]中不同截面参数或构造的9组L形截面偏压构件试验数据.偏压承载力四种简化计算方法统计结果见表3,其承载力试验值与公式计算值之比的散点图见图9。

4)对于大偏心偏压构件,暂未收集到直接试验数据,但收集到文献[21,24]中不同截面参数或构造的14组T形受弯构件试验数据,抗弯承载力4种简化计算方法统计结果见表3.其承载力试验值与公式计算值之比的散点图见图10。

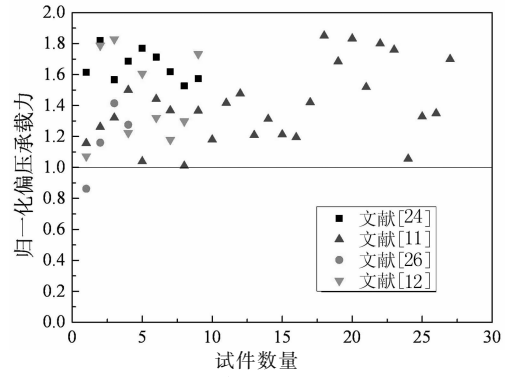
由图7、图8、图9和图10可知,本文提出的异形钢管混凝土柱偏压承载力计算公式对各类异形组合柱均偏于安全。



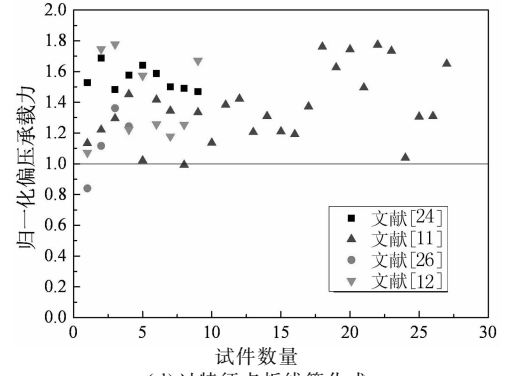
(a)仅对称轴考虑 $\alpha_c$ 折线简化



(b)均考虑 $\alpha_c$ 的折线简化



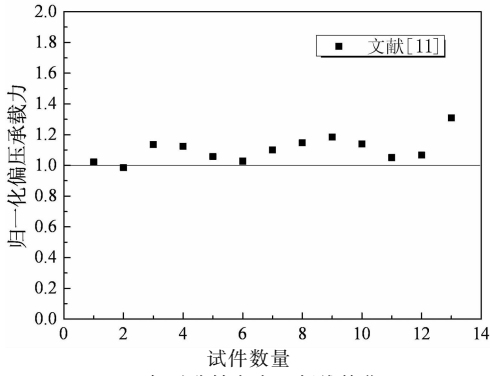
(c)直线简化式



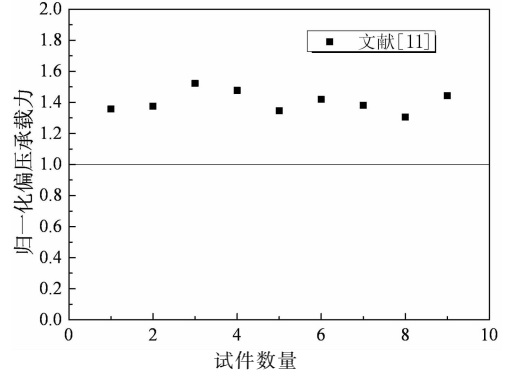
(d)过特征点折线简化式

图7 T形偏压构件算法验证

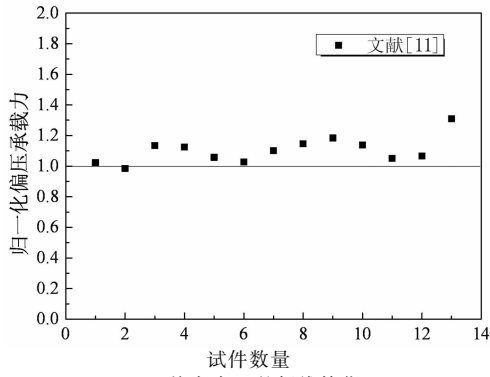
Fig. 7 Algorithm verification of T-shaped CFST columns under eccentric compression



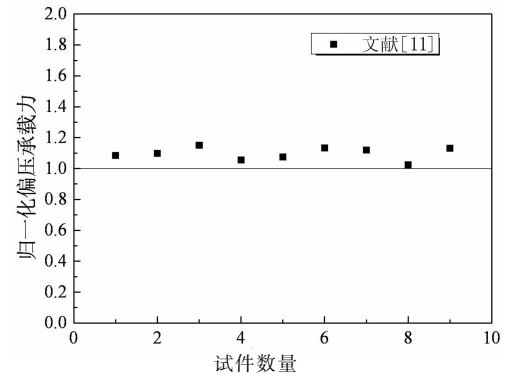
(a) 仅对称轴考虑  $\alpha_c$  折线简化



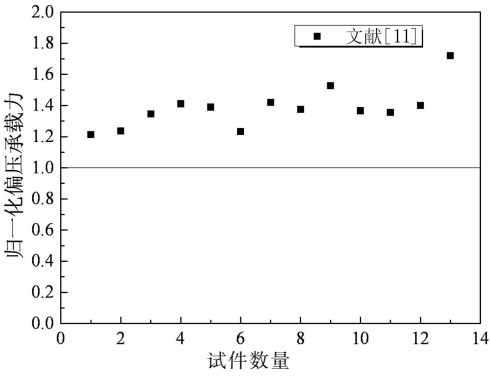
(a) 仅对称轴考虑  $\alpha_c$  折线简化



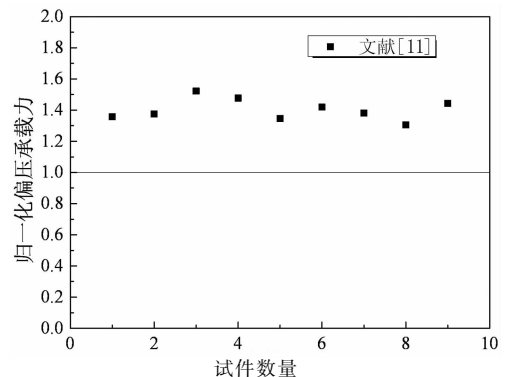
(b) 均考虑  $\alpha_c$  的折线简化



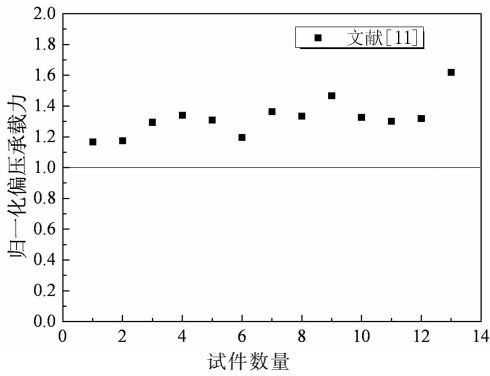
(b) 均考虑  $\alpha_c$  的折线简化



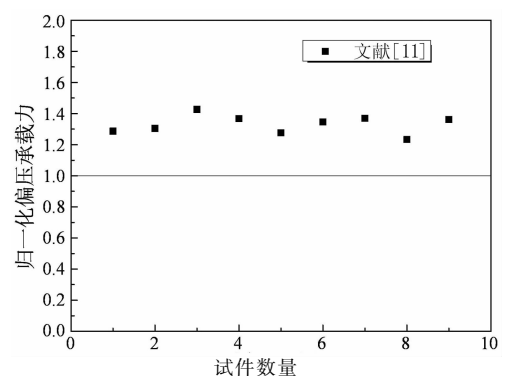
(c) 直线简化式



(c) 直线简化式



(d) 过特征点折线简化式



(d) 过特征点折线简化式

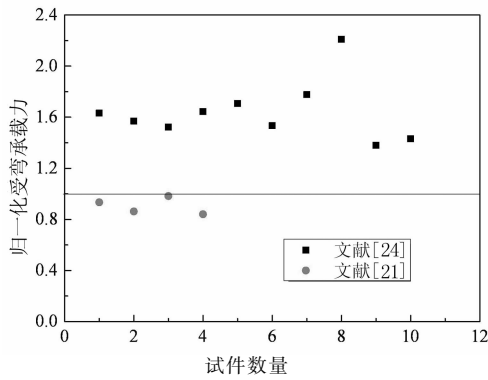
图 8 十字形偏压构件算法验证

Fig. 8 Algorithm verification of  $\pm$ -shaped CFST columns under eccentric compression

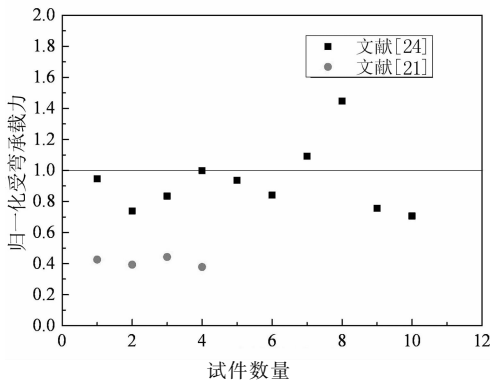
图 9 L 形偏压构件算法验证

Fig. 9 Algorithm verification of L-shaped CFST columns under eccentric compression

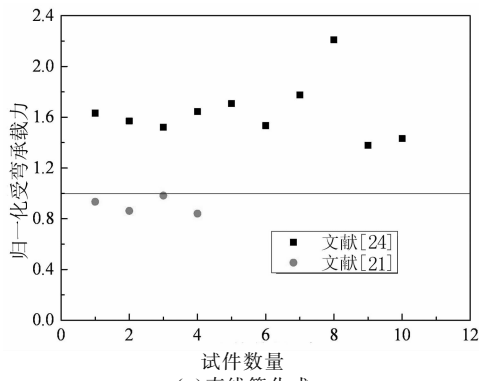




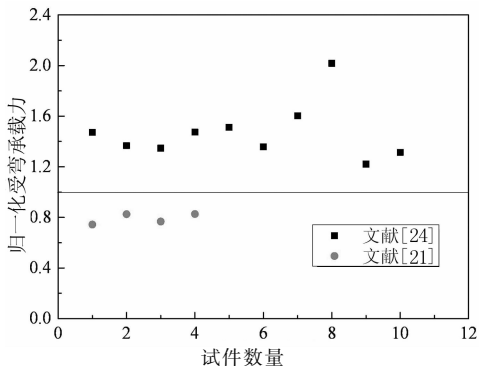
(a) 仅对称轴考虑  $\alpha_c$  折线简化



(b) 均考虑  $\alpha_c$  的折线简化



(c) 直线简化式



(d) 过特征点折线简化式

图 10 T 形受弯构件算法验证

Fig. 10 Algorithm verification of T-shaped CFST columns under bending

表 3 异形组合柱偏压承载力简化计算统计结果  
Tab. 3 Statistical results of simplified calculation of special shaped CFST columns under eccentric compression

截面形式	仅对称轴考虑 $\alpha_c$		均考虑 $\alpha_c$		类钢结构 (不考虑 $\alpha_c$ )		过 $M_{max}$ 点的折线	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
T 形偏压	1.35	0.245	1.16	0.173	1.44	0.258	1.39	0.236
十字形偏压	1.10	0.085	1.10	0.085	1.38	0.133	1.32	0.121
L 形偏压	1.40	0.069	1.10	0.042	1.40	0.069	1.33	0.060
T 形受弯	1.43	0.397	0.78	0.305	1.43	0.397	1.27	0.368

基于统计分析和计算结果可知,4 种偏压承载力简化算法中,类钢结构直线简化计算方法得出的结果太过保守,不够经济;过形心工程轴均考虑混凝土工作承担系数  $\alpha_c$  的折线简化计算方法,由于弯矩作用于非对称工程轴时,压弯曲线上无坐标为  $(M_c, N_c)$  的点,理论上没有确切含义,实际计算结果也是偏于不安全的(见表 3 中 T 形受弯构件计算结果);采用过特征点的折线简化式,计算结果比较合理、经济,但需要确定的特征点数稍多,计算工作量稍大;采用分工程轴和弯矩作用方向考虑混凝土工作承担系数的折线简化计算方法,计算结果偏于安全且计算量稍小。为与现有规范规程衔接,最终取式(9)、(10)、(11)和式(12)作为异形钢管混凝土柱偏压承载力的计算公式。

### 4 结论

1)收集并分析了国内外典型钢管混凝土组合结构规程中钢管混凝土柱偏压承载力计算方法,分析表明,现有规范、规程中对组合柱偏压承载力的简化计算本质相同,均将压弯相关方程曲线简化成直线或折线,并且可以统一表达为式(1),具有一致性和统一性。

2)基于各规范、规程计算方法归纳分析和数值计算结果,提出了适合不同构造及截面形式的异形钢管混凝土柱的轴压和偏压承载力统一算法。轴压短柱承载力忽略钢管对核心混凝土的约束作用,按叠加原理近似处理;轴压中长柱承载力按 b 类曲线考虑稳定性系数计算;偏压承载力采用分工程轴和弯矩作用方向以大小偏心为区分界的分段表达式。各类异形组合柱偏压承载力的简化算法相同、其表达形式可进行统一。

3)采用直线或折线 4 种  $N-M$  相关方程曲线的简化算法分别对 T 形、十字形、L 形等 3 类异形钢管混凝土柱偏压承载力进行了算法验证。算法验证

结果表明:本文建议的偏压承载力计算公式计算值与试验值吻合良好,验证了本文提出的异形钢管混凝土柱偏压承载力统一算法的可靠性和合理性,可为异形钢管混凝土柱的工程应用及相关规范的编制提供参考。

## 参考文献

- [1] 雷敏,沈祖炎,李元齐,等.异形钢管混凝土柱研究现状[J].结构工程师,2013,29(3):155-163.  
LEI M, SHEN Z Y, LI Y Q, *et al.* State-of-the-art of concrete-filled specially shaped steel tubes[J]. Structural Engineers, 2013, 29(3): 155-163. (In Chinese)
- [2] 许成祥,祁香文.异形截面钢管混凝土结构研究现状与分析[J].长江大学学报(自然科学版),2010,7(3):126-130.  
XU C X, QI X W. Research status and analysis on the concrete-filled steel tubular structures with specially shaped section[J]. Journal of Yangtze University(Natural Science Edition), 2010, 7(3): 126-130. (In Chinese)
- [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):39-44.  
WANG D, LV X L. Experimental study on seismic behavior of concrete-filled steel T-section and L-section columns[J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(4): 39-44. (In Chinese)
- [4] 林震宇,沈祖炎,罗金辉.反复荷载作用下L形钢管混凝土柱滞回性能研究[J].建筑钢结构进展,2009,11(2):12-17.  
LIN Z Y, SHEN Z Y, LUO J H. Hysteretic behavior of concrete-filled L-section steel tubular columns under cyclic loading[J]. Progress in Steel Building Structures, 2009, 11(2): 12-17. (In Chinese)
- [5] 张继承,沈祖炎,林震宇,等.L形钢管混凝土框架结构抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2010,31(8):1-7.  
ZHANG J C, SHEN Z Y, LIN Z Y, *et al.* Experimental research on seismic behavior of concrete-filled-section steel tubular frames[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(8): 1-7. (In Chinese)
- [6] 黄俊.异形钢管混凝土组合柱抗震性能研究[D].武汉:武汉大学土木建筑工程学院,2009:119-121.  
HUANG J. Study on the earthquake resistance behaviors of special-shaped concrete-filled rectangular composite steel tubular columns[D]. Wuhan: School of Civil Engineering, Wuhan University, 2009: 119-121. (In Chinese)
- [7] TU Y Q, SHEN Y F, ZENG Y G, *et al.* Hysteretic behavior of multi-cell T-shaped concrete-filled steel tubular columns[J]. Thin-Walled Structures, 2014, 85: 106-116.
- [8] 杜国锋,徐礼华,徐浩然,等.组合T形截面钢管混凝土柱偏心受压试验研究[J].建筑结构学报,2010,31(7):72-77.  
DU G F, XU L H, XU H R, *et al.* Study on composite T-shaped concrete filled steel tubular columns under eccentric compression[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(7): 72-77. (In Chinese)
- [9] 左志亮,蔡健,朱昌宏.带约束拉杆L形钢管混凝土短柱的偏压承载力[J].工程力学,2010,27(7):161-167.  
ZUO Z L, CAI J, ZHU C H. Bearing capacity of L-shape CFT stub columns with binding bars subjected to eccentric compression load[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(7): 161-167. (In Chinese)
- [10] 李雪琛,屠永清.多室式钢管混凝土T形偏压短柱性能分析[J].四川建筑科学,2012,38(3):18-24.  
LI X S, TU Y Q. Performance analysis on multi-cell T-shaped concrete filled steel tubular short column under eccentric compression[J]. Sichuan Building Science, 2012, 38(3): 18-24. (In Chinese)
- [11] 左志亮.带约束拉杆异形截面钢管混凝土短柱的受压力学性能研究[D].广州:华南理工大学土木与交通学院,2010:27-199.  
ZUO Z L. Research on compressive behavior of special-shaped concrete-filled steel tubular stub columns with binding bars[D]. Guangzhou: College of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, 2010: 27-199. (In Chinese)
- [12] 雷敏.T形钢管混凝土柱力学性能若干关键问题研究[D].上海:同济大学土木工程学院,2014:28-206.  
LEI M. Study on some key problem on behavior of T-shaped concrete-filled steel tubular columns[D]. Shanghai: School of Civil Engineering, Tongji University, 2014: 28-206. (In Chinese)
- [13] CECS 159-2004 矩形钢管混凝土结构技术规程[S].北京:中国计划出版社,2004:20-26.  
CECS 159-2004 Technical specification for structures with concrete filled rectangular steel tube members[S]. Beijing: China Planning Press, 2004: 20-26. (In Chinese)
- [14] GB 50396-2014 钢管混凝土结构技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2014:30-33.  
GB 50396-2014 Technical code for concrete filled steel tubular structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014: 30-33. (In Chinese)
- [15] AISC-LRFD Load and resistance factor design specification for structural steel buildings[S]. Chicago, USA: American Institute of Steel Construction (AISC), 2005: 81-96.
- [16] Eurocode 4, ENV 1994-1-1:2004(E) Design of composite steel and concrete structures, Part 1.1: General rules and rules for building[S]. Charlottenlund, Dansk: Commission of European Communities, 2004: 67-73.
- [17] 黄远,朱正庚,杨扬,等.端部设肋方钢管混凝土框架柱抗震性能分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2016,43(1):89-96.  
HUANG Y, ZHU Z G, YANG Y, *et al.* Seismic analysis of the square concrete-filled steel tube frame columns with end ribs[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2016, 43(1): 89-96. (In Chinese)
- [18] 刘付钧,蔡健,潘琴存,等.新型钢管混凝土柱板节点偏压性能研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2008,35(5):6-10.  
LIU F J, CAI J, PAN Q C, *et al.* Investigation on the eccentrically compressive property of the new type column-slab joint

- [J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2008, 35(5): 6—10. (In Chinese)
- [19] YANG Y, WANG Y, FU F, *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.
- [20] ZUO Z L, CAI J, YANG C, *et al.* Eccentric load behavior of L-shaped CFT stub columns with binding bars[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 72(5): 105—118.
- [21] 屠永清, 严敏杰, 刘林林. 多室式钢管混凝土 T 形构件纯弯力学性能研究[J]. 工程力学, 2012, 29(9): 185—192.  
TU Y Q, YAN M J, LIU L L. Study on mechanical properties of multi-cell T-shaped concrete filled steel tubes subjected to pure bending[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(9): 185—192. (In Chinese)
- [22] 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 Y, JING X. Experimental study of T-shaped concrete-filled steel tube columns under axial compression loading[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(9): 87—90. (In Chinese)
- [23] 金爱花. T 形钢管再生块体混合短柱轴压性能研究[D]. 延吉: 延边大学工学院, 2013: 11—35.  
JIN A H. Axial behavior of T-shaped steel stub columns filled with recycled demolished concrete lump[D]. Yanji: Institute of Technology, Yanbian University, 2013: 11—35. (In Chinese)
- [24] 杜国锋. 钢管混凝土组合 T 形柱力学性能研究[D]. 武汉: 武汉大学土木建筑工程学院, 2008: 25—124.  
DU G F. Study on mechanics behavior of concrete-filled steel tubular composite T-section columns[D]. Wuhan: School of Civil Engineering, Wuhan University, 2008: 25—124. (In Chinese)
- [25] 杜国锋, 徐礼华, 徐浩然, 等. 钢管混凝土 T 形短柱轴压力学性能试验研究[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2008, 25(3): 188—190.  
DU G F, XU L H, XU H R, *et al.* Test study on behavior of T-shaped concrete filled steel tubular short columns under axial compression[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Urban Science Edition), 2008, 25(3): 188—190. (In Chinese)
- [26] 杨远龙. T 形组合柱力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学土木工程学院, 2011: 58—142.  
YANG Y L. Mechanical behavior of T-shaped composite columns[D]. Harbin: School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 2011: 58—142. (In Chinese)
- [27] 曹兵, 戴绍斌, 黄俊. 改进组合式 T 形钢管混凝土柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(11): 36—43.  
CAO B, DAI S B, HUANG J. Experimental study on axial compressive behavior of improved composite T-shaped concrete-filled steel tubular columns[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(11): 36—43. (In Chinese)
- [28] 刘林林, 屠永清, 叶英华. 多室式钢管混凝土 T 形短柱轴压性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(10): 9—16.  
LIN L L, TU Y Q, YE Y H. Experimental study of the properties of axially loaded multi-cell T-shaped concrete-filled steel tubular stub columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(10): 9—16. (In Chinese)
- [29] 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 Z Y, SHEN Z Y, LUO J H, *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. (In Chinese)
- [30] 龙跃凌, 蔡健. 带约束拉杆 L 形钢管混凝土短柱轴压性能的试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2006, 34(11): 87—92.  
LONG Y L, CAI J. Experimental investigation into axial compressive behavior of L-shaped concrete-filled steel tubular stub columns with binding bars[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2006, 34(11): 87—92. (In Chinese)
- [31] 戴绍斌, 曹兵, 黄俊. 改进的组合式 L 形钢管混凝土柱力学性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(3): 122—128.  
DAI S B, CAO B, HUANG J. Tests on mechanical properties of improved composite L-shaped concrete-filled steel tubular columns[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(3): 122—128. (In Chinese)
- [32] 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—35.  
TU Y Q, LIU L L, YE Y H. 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—35. (In Chinese)