

格构式型钢混凝土偏心受压柱正截面承载力计算

杨 顺, 田 水*, 谷 倩, 刘玖赢
(武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430070)

摘要: 格构式型钢混凝土柱具有良好的力学性能,然而由于尚未有其正截面承载力计算公式而限制了它的应用。本文引入等效约束系数来考虑偏压荷载作用下截面应变梯度对钢构架约束效应的影响,采用考虑应变梯度影响的钢构架约束混凝土本构模型,将受压区混凝土应力图和角钢应力图等效为矩形应力图,计算约束区混凝土及钢构架的合力系数及合力矩系数;基于叠加理论和极限平衡理论,建立了格构式型钢混凝土偏心受压柱正截面承载力计算公式。采用格构式型钢混凝土偏心受压柱的试验数据对本文提出的正截面承载力计算公式进行了验证,公式计算结果与试验结果比值的平均值和变异系数分别为0.962、0.054,表明本文公式能够准确地计算格构式型钢混凝土偏心受压柱正截面承载力。

关键词: 偏心受压; 格构式型钢混凝土柱; 叠加理论; 极限平衡理论; 约束混凝土; 等效约束系数; 计算公式

中图分类号: TU398+.9

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)08-0074-07

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240315002

Calculation of Normal Section Bearing Capacity of Lattice Steel Reinforced Concrete Columns under Eccentric Compression

YANG Shun, TIAN Shui*, GU Qian, LIU Jiuying

(School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

*Corresponding author: tshui@whut.edu.cn

Abstract: Lattice steel reinforced concrete columns have good mechanical properties, however, their application is limited by the fact that there is not yet a formula for calculating its normal section bearing capacity. In this paper, the is introduced to consider the influence of cross-section strain gradient on the constraint effect of steel frame under eccentric compression. A constitutive model of steel frame confined concrete considering the influence of strain gradient is adopted. The stress diagram of concrete in the compression zone and the stress diagram of angle steel are equated to the rectangular stress diagram, and the combined force coefficient and the combined moment coefficient of the confined concrete and steel frame are calculated. Based on superposition theory and limit equilibrium theory, a calculation formula for normal section bearing capacity of lattice steel reinforced concrete eccentric compression columns is established. The test data of lattice steel reinforced concrete eccentric compression columns are used to verify the proposed formula. The average value and coefficient of variation of the ratio of the formula calculation results to the test results are 0.962 and 0.054, respectively, indicating that the formula in this paper can accurately calculate the normal section bearing capacity of lattice steel reinforced concrete eccentric compression columns.

Keywords: eccentric compression; lattice steel reinforced concrete column; superposition theory; limit equilibrium theory; confined concrete; equivalent constraint coefficient; calculation formula

收稿日期: 2024-03-15

作者简介:

杨 顺(2000—),男,硕士研究生,主要从事组合结构方面的研究。E-mail: 2572441852@qq.com。

通信作者:

田 水(1968—),男,博士,副教授,主要从事组合结构和装配式结构方面的研究。E-mail: tshui@whut.edu.cn。

格构式型钢混凝土结构是将格构式钢构架埋入钢筋混凝土中的组合结构,它充分利用了混凝土的抗压性能和钢材的抗拉压性能,具有良好的静力学性能及抗震性能,已被大量研究及应用^[1]。格构式型钢混凝土柱内部的钢构架通常由角钢和横向缀板焊接而成。与在中心布置相同截面面积型钢的型钢混凝土柱相比,格构式型钢混凝土柱内部的钢构架可在工厂预制,可提高施工效率^[2],同时钢构架的格构式构造便于节点的设计与施工^[3]。

格构式型钢混凝土柱的偏压试验研究表明:格构式型钢混凝土柱比配置相同截面面积H型钢的混凝土柱具有更高的承载力^[4-5]。内部钢构架螺栓连接的格构式型钢混凝土柱的轴压和偏压试验表明:由于钢构架的约束效应,构件的承载力得到了提高^[6-7]。HADI等^[8]采用等边角钢代替纵筋,进行了高强混凝土组合构件的轴压、偏压和弯曲试验,试验结果表明:缀板间距对构件的承载力有明显影响。邹昀等^[9]对格构式型钢混凝土柱进行了轴压试验和有限元分析,提出了格构式型钢混凝土柱轴压承载力计算公式。EMARA等^[10]对格构式型钢混凝土柱进行了有限元参数分析,探讨了纵筋配筋率、拉杆间距、混凝土抗压强度和角钢屈服强度等参数对构件轴压性能的影响。AHMED等^[11-12]引入纤维模型分析了格构式型钢混凝土柱的轴压和偏压极限承载力。陈俊岭等^[13]通过非线性数值分析和缩尺静力偏压试验研究了格构式型钢混凝土柱的二次受力性能,发现钢构架初应力对格构式型钢混凝土柱轴压承载力的影响较小。陈玉良等^[14]通过研究格构式型钢混凝土柱在压弯扭剪受力状态下的抗震性能,发现格构式型钢混凝土柱的抗弯耗能能力优于抗扭耗能能力,其在复合受扭状态下容易发生扭转破坏。

目前,学者们已对格构式型钢混凝土柱受力性能进行了一系列试验和有限元模拟,但仍未提出格构式型钢混凝土偏心受压柱正截面承载力计算公式。我国现行规范《组合结构设计规范》(JGJ 138—2016)^[15]也未给出格构式型钢混凝土偏心受压柱正截面承载力计算公式。本文在考虑钢构架对混凝土约束效应的基础上,运用叠加理论和极限平衡理论提出格构式型钢混凝土偏心受压柱正截面承载力计算公式。

1 正截面承载力公式推导

建立格构式型钢混凝土偏心受压柱正截面承载力计算公式时为了简化,做出以下假定:

- (1) 截面应变符合平截面假定;
- (2) 不考虑混凝土抗拉强度;
- (3) 不考虑箍筋对混凝土的约束效应,考虑钢构架对混凝土的约束效应;

(4) 当截面受压区边缘混凝土的应变达到混凝土的极限压应变 ϵ_{cu} 时,格构式型钢混凝土柱达到其承载能力极限状态;

(5) 角钢和纵筋的本构模型采用理想弹塑性模型。

在轴向压力作用下,钢构架对位于钢构架内部的混凝土产生约束作用,这部分混凝土抗压强度和变形能力都得到提高,称为约束区混凝土。由于不考虑箍筋对混凝土的约束效应,故钢构架外部混凝土称为非约束区混凝土,格构式型钢混凝土柱中混凝土区域划分如图1所示。图中, B 为截面边长, D 为两个缀板形心之间的距离。

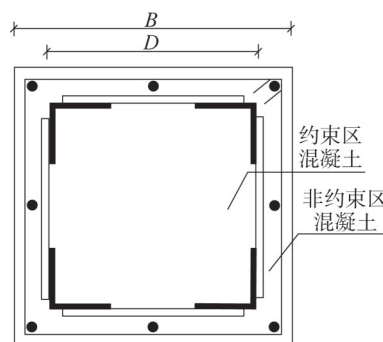


图1 格构式型钢混凝土柱中混凝土区域划分
Fig. 1 Concrete area zoning in lattice steel reinforced column

格构式型钢混凝土偏心受压柱的正截面承载能力可视为由非约束区钢筋混凝土、约束区混凝土和钢构架这三部分组成:

$$N_u = N_{rc} + N_{cc} + N_a \quad (1)$$

$$M_u = M_{rc} + M_{cc} + M_a \quad (2)$$

式中: N_{rc} 、 M_{rc} 分别为非约束区混凝土和纵筋承担的轴力和弯矩; N_{cc} 、 M_{cc} 分别为约束区混凝土承担的轴力和弯矩; N_a 、 M_a 分别为钢构架承担的轴力和弯矩。

1.1 非约束区混凝土

非约束区混凝土截面为箱形截面(图2a)),为方便计算,将非约束区混凝土截面等效为工字型截面,如图2b)所示。破坏时非约束区混凝土的压应力为曲线分布,为了简化计算将非约束区混凝土应力图等效为矩形应力图,等效矩形应力图的压应力和受压区高度 x_1 可按照《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[16]分别取为 $\alpha_1 f_c$ 和 $\beta_1 x_c$, x_c 为按平截面假定确定的受压区高度,等效后计算简图如图3所示。图中, e_0 为轴力 N 至截面形心的距离; σ'_s 和 A'_s 分别为受压钢筋的应力和面积; σ_s 和 A_s 分别为受拉钢筋的应力和面积; a'_s 和 a_s 分别为受压、受拉钢筋重心至截面受压区、受拉区边缘的距离。

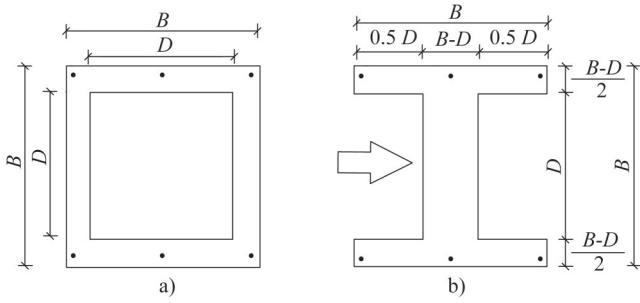


图2 非约束区混凝土截面等效

Fig. 2 Equivalent of concrete section in unconfined area

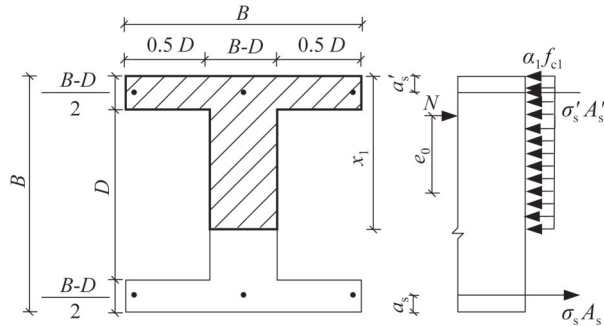


图3 非约束区混凝土计算简图

Fig. 3 Calculation sketch of concrete in unconfined area

根据 x_1 的不同分为以下三种情况:

(1) 当 $x_1 \leq (B-D)/2$ 时:

$$N_{rc} = \alpha_1 f_c B x_1 + \sigma_s' A_s' - \sigma_s A_s \quad (3)$$

$$M_{rc} = \alpha_1 f_c B x_1 (B/2 - x_1/2) + \sigma_s' A_s' (B/2 - a_s') + \sigma_s A_s (B/2 - a_s) \quad (4)$$

(2) 当 $(B-D)/2 \leq x_1 \leq (B+D)/2$ 时:

$$N_{rc} = \alpha_1 f_c [(B-D)x_1 + D(B-D)/2] + \sigma_s' A_s' - \sigma_s A_s \quad (5)$$

$$M_{rc} = \sigma_s' A_s' (B/2 - a_s') + \sigma_s A_s (B/2 - a_s) + \alpha_1 f_c [(B-D)(B/2 - x_1/2)x_1 + D \cdot (B-D)(B+D)/8] \quad (6)$$

(3) 当 $x_1 > (B+D)/2$ 时:

$$N_{rc} = \alpha_1 f_c [(B-D)x_1 + D(B-D)/2 + D(x_1 - (B+D)/2)] + \sigma_s' A_s' - \sigma_s A_s \quad (7)$$

$$M_{rc} = \alpha_1 f_c [(B-D)x_1(B/2 - x_1/2) + D \cdot (B-D)(B+D)/8 - D(x_1 - (B+D)/2) \cdot (B/2 - (B-D)/2 + (x_1 - (B+D)/2)/2)] + \sigma_s' A_s' (B/2 - a_s') + \sigma_s A_s (B/2 - a_s) \quad (8)$$

1.2 约束区混凝土

钢构架约束区混凝土的本构模型为^[9]:

$$\sigma = \frac{f_{cc}(\epsilon/\epsilon_{cc})^r}{r-1 + (\epsilon/\epsilon_{cc})^r} \quad (9)$$

$$f_{cc} = f_{c0} \left[0.9921 + 5.094 \left(\frac{f_1}{f_{c0}} \right) \right] \quad (10)$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{c0} \left[1 + 22.63 \left(\frac{f_1}{f_{c0}} \right) \right] \quad (11)$$

式中: f_{cc} 、 ϵ_{cc} 分别为钢构架约束区混凝土的峰值应力和峰值应力对应的应变; $r = E_c / (E_c - E_{sec})$; E_c 为非约束区混凝土弹性模量; E_{sec} 为钢构架约束区混凝土峰值应力点处割线模量, $E_{sec} = f_{cc} / \epsilon_{cc}$; f_{c0} 、 ϵ_{c0} 分别为非约束区混凝土的峰值应力和峰值应力对应的应变; f_1 为有效约束力, 按下式计算^[17]:

$$f_1 = k_e f_r \quad (12)$$

$$k_e = \frac{\left[1 - 0.67 \left(1 - \frac{2w}{D} \right) \right] \left(1 - \frac{s-d}{2D} \right)^2}{1 - \rho_{cc}} \quad (13)$$

式中: k_e 为有效约束系数; f_r 为平均约束力; w 为角钢肢长; s 为缀板间距; d 为缀板宽度; ρ_{cc} 为角钢横截面面积与约束区混凝土截面面积的比值。

轴压荷载作用下, 假设钢构架对混凝土的约束力均匀分布^[18], 约束力的平衡简图如图4所示。在缀板间距 s 范围内, 由约束力的合力与缀板拉力平衡得:

$$f_r s D = 2 \sigma_{sc} A_{sb} \quad (14)$$

式中: σ_{sc} 为约束区混凝土达到峰值应力时对应的缀板应力; A_{sb} 为单个缀板的横截面面积。

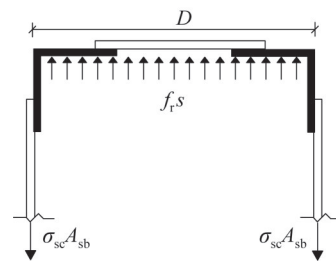


图4 约束力的平衡简图

Fig. 4 Equilibrium sketch of confining force

根据文献^[18]的试验结果可知, 当钢构架约束区混凝土达到峰值应力时, 缀板达到屈服状态, 此时平均约束力为:

$$f_r = \frac{2 f_{yb} A_{sb}}{s D} \quad (15)$$

式中: f_{yb} 为缀板的屈服强度。

偏压荷载作用下, 压应变在截面上的梯度分布导致钢构架对混凝土的约束力沿偏心方向改变, 使得钢构架对混凝土产生的约束效应较轴压状态小^[19]。为了考虑应变梯度对钢构架约束混凝土效果的影响, 本文引入

FENG 等^[20]提出的等效约束系数 γ_s :

$$\gamma_s = \begin{cases} \frac{1}{1 + 6e_0/D} & e_0 \leq \frac{D}{6} \\ \frac{1}{4 + \frac{1}{1 + 24e_0/D}} & e_0 > \frac{D}{6} \end{cases} \quad (16)$$

考虑应变梯度影响后钢构架对混凝土的有效约束力 f'_1 为:

$$f'_1 = \gamma_s f_1 \quad (17)$$

将 f'_1 代入到式(9)~(11),可以得到考虑应变梯度影响的钢构架约束混凝土本构模型。

对约束区混凝土的应力积分可得到约束区混凝土承担的轴力 N_{cc} :

$$N_{cc} = \int \sigma_{core}(x) D(x) dx \quad (18)$$

$$\sigma_{core}(x) = \frac{f_{cc}(\epsilon_x/\epsilon_{cu})^r}{r - 1 + (\epsilon_x)^r} \quad (19)$$

$$\epsilon_x = \epsilon_{cu} \frac{x_c - x}{x} \quad (20)$$

$$D(x) = \begin{cases} 0 & 0 < x/B \leq \delta_1 \\ D & \delta_1 < x/B \leq \delta_2 \\ 0 & \delta_2 < x/B \leq 1 \end{cases} \quad (21)$$

式中: $\sigma_{core}(x)$ 为约束区混凝土应力; δ_1, δ_2 为约束区混凝土的相对位置, $\delta_1 = (B - D)/(2B), \delta_2 = (B + D)/(2B)$ 。

由于上述积分方法得到的公式过于复杂,为了简化计算,也采用等效的方法将约束区混凝土应力图等效为矩形应力图。等效的原则是:等效前后压应力合力的大小相等且合力作用的位置相同^[21]。等效后压应力为 $\alpha_2 f_{cc}$, α_2 为约束区混凝土合力系数;等效后的受压区高度等于 x_c 减去 $\delta_1 B$ (当 $x_c > \delta_2 B$ 时,取 D)乘以约束区混凝土合力矩系数 β_2 ,如图5所示。

根据混凝土压应力合力的作用位置不变的条件有:

$$(\xi - \delta_1)B - y_c = \begin{cases} (\beta_2(\xi - \delta_1)B)/2 & \delta_1 < \xi \leq \delta_2 \\ (\beta_2 D)/2 & \delta_2 < \xi \leq 1 \end{cases} \quad (22)$$

$$y_c = \int \sigma_{core}(x) D(x) (\xi B - x) dx / N_{cc} \quad (23)$$

$$\beta_2 = \begin{cases} 0 & 0 < \xi \leq \delta_1 \\ 2[1 - y_c / ((\xi - \delta_1)B)] & \delta_1 < \xi \leq \delta_2 \\ 2[(\xi - \delta_1)B - y_c] / D & \delta_2 < \xi \leq 1 \end{cases} \quad (24)$$

式中: ξ 为相对受压区高度, $\xi = x_c/B$; y_c 为 N_{cc} 到中和轴的距离。

根据混凝土压应力合力不变有:

$$N_{cc} = \begin{cases} 0 & 0 < \xi \leq \delta_1 \\ \alpha_2 f_{cc} D \beta_2 (\xi - \delta_1) B & \delta_1 < \xi \leq \delta_2 \\ \alpha_2 f_{cc} D^2 \beta_2 & \delta_2 < \xi \leq 1 \end{cases} \quad (25)$$

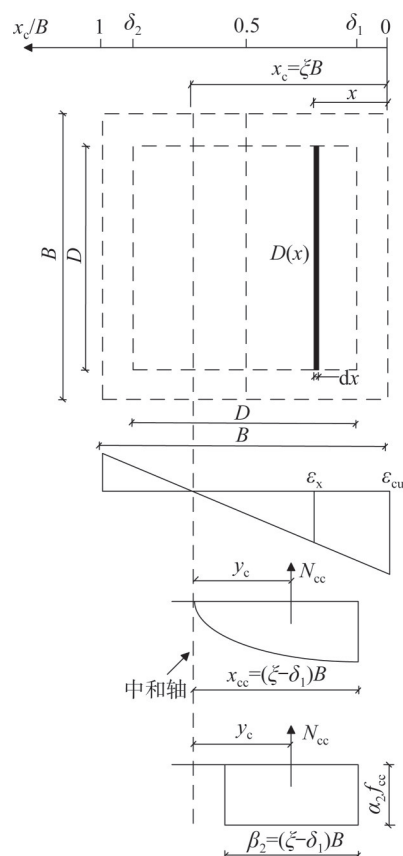


图5 约束区混凝土应力等效

Fig. 5 Equivalent stress of concrete in confined area

$$\alpha_2 = \begin{cases} 0 & 0 < \xi \leq \delta_1 \\ N_{cc} / (f_{cc} D \beta_2 (\xi - \delta_1) B) & \delta_1 < \xi \leq \delta_2 \\ N_{cc} / (f_{cc} D^2 \beta_2) & \delta_2 < \xi \leq 1 \end{cases} \quad (26)$$

影响 β_2 和 α_2 的因素很多,包括:相对受压区高度 ξ 、约束区混凝土面积与柱总面积比值 φ ($\varphi = D/B$)和约束区混凝土强度 f_{cc} ,它们的变化范围通常为: $\xi = 0 \sim 1, \varphi = 0.4 \sim 0.8$ 和 $f_{cc} = 30 \sim 80$ MPa。通过式(24)和式(26)计算 β_2 和 α_2 ,发现 β_2 和 α_2 主要由 ξ 和 φ 确定, ξ, φ 对 β_2, α_2 的影响如图6和图7所示。

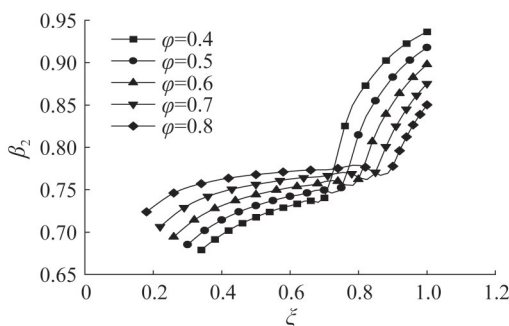


图6 ξ, φ 对 β_2 的影响

Fig. 6 Effects of ξ and φ on β_2

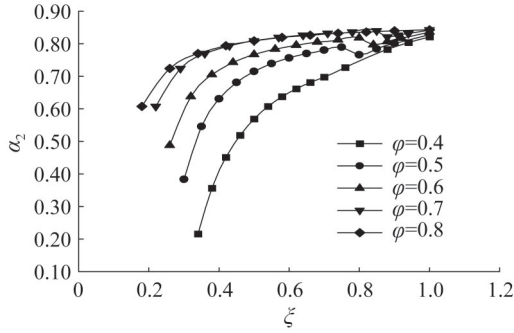


图7 ξ 、 φ 对 α_2 的影响

Fig. 7 Effects of ξ and φ on α_2

由于直接用式(24)和式(26)计算 β_2 和 α_2 时需要积分计算 y_c 和 N_{cc} ,为了避免进行积分计算,对图6和图7中曲线进行拟合,得到 β_2 和 α_2 的近似表达式:式(27)和式(28),拟合公式的 R^2 分别为0.92和0.88。

$$\beta_2 = \begin{cases} 0 & 0 < \xi \leq \delta_1 \\ 0.098\xi + 0.11\varphi + 0.62 & \delta_1 < \xi \leq \delta_2 \\ 0.514\xi - 0.27\varphi + 0.55 & \delta_2 < \xi \leq 1 \end{cases} \quad (27)$$

$$\alpha_2 = \begin{cases} 0 & 0 < \xi \leq \delta_1 \\ 1.32\xi + 1.36\varphi - 1.43\xi\varphi - 0.4 & \delta_1 < \xi \leq 1 \end{cases} \quad (28)$$

1.3 钢构架

在轴向压力作用下,钢构架中角钢承担竖向荷载作用,缀板不承担竖向荷载作用,钢构架中角钢的应力分布和应变分布如图8所示。由力平衡和力矩平衡得角钢承担的轴力 N_a 和弯矩 M_a 为:

$$N_a = \int \sigma_{steel}(x) t(x) dx \quad (29)$$

$$M_a = \int \sigma_{steel}(x) t(x) (B/2 - x) dx \quad (30)$$

$$\sigma_{steel}(x) = \begin{cases} E_a \epsilon_x & 0 < \epsilon_x \leq f_{ya}/E_a \\ f_{ya} & \epsilon_x > f_{ya}/E_a \end{cases} \quad (31)$$

$$t(x) = \begin{cases} 0 & 0 < x \leq \delta_1 B \\ 2\tau w & \delta_1 B < x \leq (\delta_1 B + t) \\ 2t & (\delta_1 B + t) < x \leq (\delta_1 B + w) \\ 0 & (\delta_1 B + w) < x \leq (\delta_2 B - w) \\ 2t & (\delta_2 B - w) < x \leq (\delta_2 B - t) \\ 2\tau w & (\delta_2 B - t) < x \leq \delta_2 B \\ 0 & \delta_2 B < x \leq B \end{cases} \quad (32)$$

式中: $\sigma_{steel}(x)$ 为角钢应力; f_{ya} 和 E_a 分别为角钢屈服强度和弹性模量; t 为角钢的厚度。

由于上述积分方法得到的公式同样很复杂,为了简化计算,也采用等效的方法计算钢构架承担的轴力 N_a 和弯矩 M_a :

$$N_a = \alpha_a f_{ya} A_a \quad (33)$$

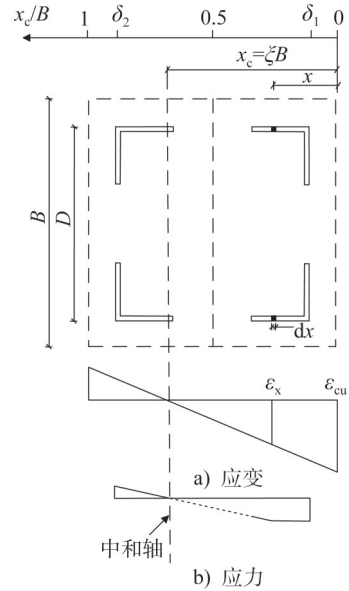


图8 角钢应变分布和应力分布

Fig. 8 Strain and stress distribution of angle steel

$$M_a = \beta_a f_{ya} A_a D \quad (34)$$

式中: α_a 、 β_a 分别为钢构架合力系数和合力矩系数; f_{ya} 为角钢屈服强度; A_a 为角钢横截面积。

与约束区混凝土相同,影响 α_a 和 β_a 的参数也包括: ξ 、 φ 和 f_{ya} ,它们的变化范围如下: $\xi = 0 \sim 1$ 、 $\varphi = 0.4 \sim 0.8$ 和 $f_{ya} = 235 \sim 500$ MPa。通过式(33)和式(34)计算 α_a 和 β_a ,发现 α_a 和 β_a 主要由 ξ 和 φ 确定,参数 ξ 和 φ 对 α_a 和 β_a 的影响最显著, ξ 、 φ 对 α_a 、 β_a 的影响如图9和图10所示。

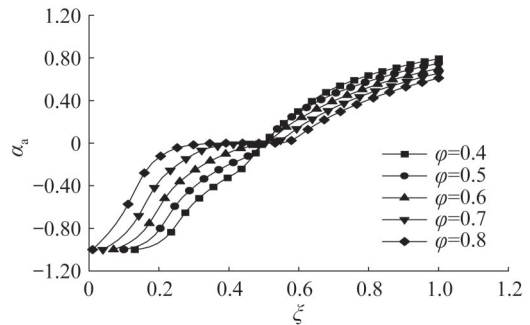


图9 ξ 、 φ 对 α_a 的影响

Fig. 9 Effects of ξ and φ on α_a

当 $0 < \xi \leq \delta_1 \epsilon_{cu} / (\epsilon_{cu} + \epsilon_y)$ 时,由平截面假定可知,角钢截面处于全截面受拉屈服,角钢合力为 $f_{ya} A_a$,此时 α_a 取为-1(以受压为正),角钢合力对截面形心力矩为0,故 $\beta_a = 0$;当 $\delta_1 \epsilon_{cu} / (\epsilon_{cu} + \epsilon_y) < \xi \leq 1$ 且 φ 保持不变时, α_a 随着 ξ 的增加而增加, β_a 随着 ξ 的增加先上升后下降。

由于直接用式(33)和式(34)计算 α_a 和 β_a 时需要积分计算 N_a 和 M_a ,为了避免进行积分计算,对图9和图10中曲线进行拟合,得到 α_a 和 β_a 的近似表达式:式(35)和

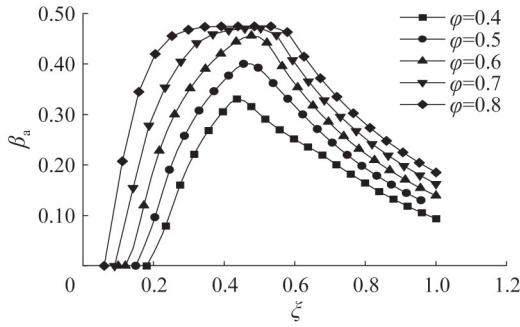


图 10 ξ, φ 对 β_a 的影响

Fig. 10 Effects of ξ and φ on β_a

式(36),拟合公式的 R^2 分别为 0.91 和 0.93。

$$\alpha_a = \begin{cases} -1 & 0 < \xi \leq \delta_1 \epsilon_{cu} / (\epsilon_{cu} + \epsilon_y) \\ 1.57\xi + 0.09\varphi - 0.82 \delta_1 \epsilon_{cu} / (\epsilon_{cu} + \epsilon_y) & \delta_1 \epsilon_{cu} / (\epsilon_{cu} + \epsilon_y) < \xi \leq 1 \end{cases} \quad (35)$$

$$\beta_a = \begin{cases} 0 & 0 < \xi \leq \delta_1 \epsilon_{cu} / (\epsilon_{cu} + \epsilon_y) \\ 0.86\xi + 0.58\varphi - 0.29 \delta_1 \epsilon_{cu} / (\epsilon_{cu} + \epsilon_y) & \delta_1 \epsilon_{cu} / (\epsilon_{cu} + \epsilon_y) < \xi \leq 0.5 \\ 0.57\xi + 0.34\varphi + 0.48 & 0.5 < \xi \leq 1 \end{cases} \quad (36)$$

1.4 格构式型钢混凝土偏心受压柱正截面承载力计算公式

在荷载作用下格构式型钢混凝土偏心受压柱也存在二阶效应,其二阶效应与钢筋混凝土柱相同。因此本文采用普通钢筋混凝土柱截面偏心距增大系数 η_s 的方法考虑格构式型钢混凝土偏心受压柱的二阶效应:

$$e = \eta_s e_i \quad (37)$$

$$e_i = e_0 + e_a \quad (38)$$

$$\eta_s = 1 + \frac{1}{1300(e_i/h_0)} \left(\frac{l_0}{h} \right)^2 \zeta_c \quad (39)$$

式中: e_i 为初始偏心距; e_a 为附加偏心距,取 20 mm 和 $B/30$ 中的较大值; ζ_c 为截面曲率修正系数,本文取为 1。

运用叠加理论,格构式型钢混凝土偏心受压柱正截面承载力计算公式如下:

$$N = N_{rc} + N_{cc} + N_a \quad (40)$$

$$M = Ne = M_{rc} + N_{cc} \cdot 0.5(D - \beta_2(\xi - \delta_1)B) + \beta_a f_{ya} A_a D \quad (41)$$

2 公式验证

采用本文提出的正截面承载力计算公式分别计算文献[7]、文献[8]和文献[13]的格构式型钢混凝土偏心受压柱正截面承载力,计算结果与试验结果的对比如图 11 所示。 N_{uc}/N_{uc} 的平均值、标准差和变异系数分别为 0.962、0.052 和 0.054,表明上述计算方法能够准确地计算格构式型钢混凝土偏压柱正截面承载力。

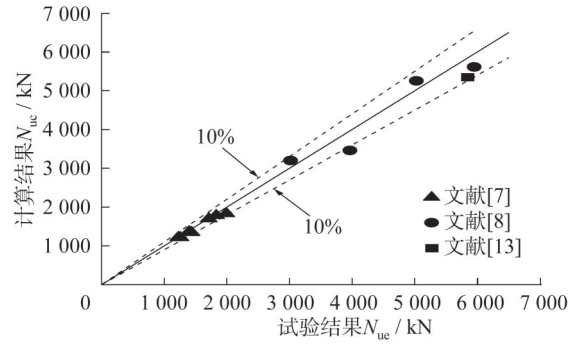


图 11 计算结果与试验结果对比

Fig. 11 Comparison between test and calculated results

3 结论

本文基于叠加理论和极限平衡理论,通过对受压区应力进行等效,推导了格构式型钢混凝土偏心受压柱正截面承载力计算公式,得到以下结论:

(1) 通过分析发现截面尺寸和相对受压区高度对约束区混凝土合力系数和合力矩系数、钢构架合力系数和合力矩系数影响最为显著。

(2) 基于叠加理论和极限平衡理论,推导出格构式型钢混凝土偏心受压柱正截面承载力计算公式,公式计算值与试验值吻合较好。

参考文献:

- [1] CHEN Y L, ZHANG S S, CHEN Z P. Experimental study on seismic behavior of steel angle truss reinforced concrete columns under compression-bending-shear-torsion combined action[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 73: 106626. DOI:10.1016/j.jobee.2023.106626.
- [2] CHEN Y L, HE Q, CHEN Z P, et al. Bending restoring force model of angle-steel reinforced concrete columns under combined torsion[J]. Structures, 2023, 55: 2186-2198. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.07.008.
- [3] LIM J J, KIM Y H, EOM T S. Compressive strength of high strength concrete-encased composite columns with noncompact and slender steel angles[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 51: 104341. DOI: 10.1016/j.jobee.2022.104341.
- [4] KIM C S, PARK H G, CHUNG K S, et al. Eccentric axial load capacity of high-strength steel-concrete composite columns of various sectional shapes[J]. Journal of Structural Engineering, 2014, 140 (4) : 04013091. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000879.
- [5] KIM C S, PARK H G, LEE H J, et al. Eccentric axial load test for high-strength composite columns of various sectional configurations[J]. Journal of Structural Engineering, 2017, 143 (8) : 04017075. DOI: 10.1061/(ASCE) ST. 1943-541X.0001803.

- [6] KIM H J, HWANG H J, PARK H G, et al. Concentric axial load test for composite columns using bolt-connected steel angles[J]. *Engineering Structures*, 2020, 214: 110650. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110650.
- [7] KIM H J, HWANG H J, PARK H G. Eccentric-axial-load test for composite columns using bolt-connected steel angles[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2020, 146(9):04020178. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002699.
- [8] HADIM N S, IBRAHIM A A, SHEIKH M N. Behavior of high-strength concrete columns reinforced with galvanized steel equal-angle sections under different loading conditions[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2018, 144(7):04018070. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002071.
- [9] 邹响, 丁杰, 王城泉, 等. 新型格构式钢管混凝土柱的轴压性能研究[J]. *实验力学*, 2021, 36(1):91-104.
ZOU Yun, DING Jie, WANG Chengquan, et al. Axial compression behavior of a novel lattice steel reinforced concrete column [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2021, 36(1):91-104. (in Chinese)
- [10] EMARA M, AHMED M, SHEIKH M N, et al. Finite element modeling of square high-strength concrete short columns longitudinally reinforced with steel equal-angles under axial loading [J]. *Structures*, 2023, 50: 1653-1669. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.02.126.
- [11] AHMED M, LIANG Q Q, SHEIKH M N, et al. Nonlinear inelastic analysis of eccentrically loaded square high-strength concrete short columns incorporating steel equal-angles [J]. *Engineering Structures*, 2023, 283: 115882. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.115882.
- [12] AHMED M, SHEIKH M N, HADI M N S, et al. Numerical simulation of axially loaded square high-strength concrete short columns with steel equal-angles as longitudinal reinforcement [J]. *Engineering Structures*, 2023, 276: 115391. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115391.
- [13] 陈俊岭, 吕曦阳, 龙莉波, 等. 荷载条件下格构式型钢混凝土柱受力性能研究[J]. *建筑结构*, 2022, 52(增刊1): 1341-1347. DOI: 10.19701/j.jzjg.22S1535.
CHEN Junling, LYU Xiyang, LONG Libo, et al. Study on mechanical behavior of latticed steel reinforced concrete columns under initial load [J]. *Building Structure*, 2022, 52(Suppl.1): 1341-1347. DOI: 10.19701/j.jzjg.22S1535. (in Chinese)
- [14] 陈宇良, 吉云鹏, 陈宗平. 压-弯-剪-扭复合受力下空腹式角钢骨架混凝土柱抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2023, 44(7): 70-79. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.0086.
CHEN Yuliang, JI Yunpeng, CHEN Zongping. Experimental study on seismic behavior of open-web trussed steel reinforced concrete columns under compression-flexure-shear-torsion combined actions [J]. *Journal of Building Structures*, 2023, 44(7): 70-79. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.0086. (in Chinese)
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 组合结构设计规范: JGJ 138—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Design of Composite Structures: JGJ 138—2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Design of Concrete Structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [17] 陈宗平, 周春恒, 李志彬. 角钢螺旋筋复合约束混凝土组合柱轴压性能及承载力计算 [J]. *土木工程学报*, 2019, 52(1): 8-19. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2019.01.002.
CHEN Zongping, ZHOU Chunheng, LI Zhibin. Axial compressive behavior and load-bearing capacity of concrete column confined with steel angle and circular spiral [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(1): 8-19. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2019.01.002. (in Chinese)
- [18] 陈云泉. 空间钢桁架约束混凝土轴心受压力学性能研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.
CHEN Yunxiao. Research on the behavior of spatial steel truss confined concrete under axial compression [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020. (in Chinese)
- [19] 周春恒. 螺旋筋约束增强空腹式型钢混凝土柱受力机理及抗震性能研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2018.
ZHOU Chunheng. Study on mechanism and seismic behavior of spiral-confined lattice steel reinforced concrete column [D]. Nanning: Guangxi University, 2018. (in Chinese)
- [20] FENG D C, DING Z D. A new confined concrete model considering the strain gradient effect for RC columns under eccentric loading [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2018, 70(23): 1189-1204. DOI: 10.1680/jmacr.18.00040.
- [21] 江见鲸, 李杰, 金伟良. 高等混凝土结构理论 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
JIANG Jianjing, LI Jie, JIN Weiliang. Advanced theory of concrete structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007. (in Chinese)