

非对称截面钢筋混凝土柱正截面承载力简化计算*

曲 哲¹, 王 鹏¹, 叶列平², 崔鸿超³

(1 中国地震局工程力学研究所, 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 哈尔滨 150080;
2 清华大学土木工程系, 北京 100084; 3 上海中巍结构设计事务所有限公司, 上海 200135)

[摘要] 在《钢筋混凝土结构设计规程》(YB 9082—97)中,对于配置不对称钢筋的钢筋混凝土柱,其正截面承载力计算采用了偏于安全地置换为对称钢筋截面的方法。这种方法可能过分偏于保守,不适合于截面不对称性较大的钢筋混凝土柱的设计。基于一般叠加方法,给出了计算配置不对称钢筋的钢筋混凝土柱正截面压弯承载力的改进的简单叠加方法,计算结果与理论结果基本吻合。本方法已被新版《钢筋混凝土结构技术规程》(YB 9082—2006)所采纳。

[关键词] 钢筋混凝土柱; 正截面承载力; 叠加方法

中图分类号: TU375.3 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2014)07-0099-06

Simplified calculation on normal section bearing capacity of steel-reinforced concrete columns with eccentric sections

Qu Zhe¹, Wang Peng¹, Ye Lieping², Cui Hongchao³

(1 Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080, China; 2 Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
3 China Majesty Structure Design Office, Co., Ltd., Shanghai 200135, China)

Abstract: The provisions in the *Technical Specification of Steel-Reinforced Concrete Structures* (YB 9082—97) suggest any eccentric steel reinforcement in the steel-reinforced concrete (SRC) cross section should be replaced by equivalent symmetric ones in security when calculating its normal section bearing capacity. Such replacement method can be over-conservative estimates and not be suitable for design of SRC columns with larger eccentric sections. An improved simplified calculation method for the axial and flexural strength of eccentric steel reinforced concrete column was proposed based on the sectional superposition method. The validity of the method was demonstrated by comparing the results with those given by rigorous sectional analysis. The method was adopted by the new revised *Technical Specification of Steel-Reinforced Concrete Structures* (YB 9082—2006).

Keywords: steel-reinforced concrete column; normal section bearing capacity; superposition method

0 概述

钢筋混凝土(SRC)结构是将钢筋构件埋置于钢筋混凝土构件中形成的一种组合结构形式。与纯钢结构相比,它具有刚度大、屈曲稳定问题不显著、无需使用防火涂料等优点;与钢筋混凝土结构相比,它具有更加优越的塑性变形与耗能能力,且可减小混凝土构件截面尺寸。此外,钢筋混凝土构件中的钢筋本身即可承担较大轴力,施工时可采用后浇混凝土的做法以加快施工进度。在我国,钢筋混凝土结构于20世纪80年代开始较多地应用于民用建筑结构。为适应工程应用的需求,我国于1994年开始编制相关设计规程,并于1997年颁布了行业标准《钢筋混凝土结构设计规程》(YB 9082—97)(简称《钢筋规程》)。2001年我国颁布了《建筑结构抗震规范》(GB 50011—2001),为适应该版抗震规范的要求,2004年开始对《钢筋规程》进行修订并于2006年完成修订。针对实际工程中配置非对称钢筋的

SRC柱(简称非对称SRC柱)应用较多的情况,在此次修订中改进了非对称SRC柱的压弯承载力计算与设计方法。

图1为四种实腹式非对称SRC柱截面的典型形式。前三种为单轴非对称;第四种为双轴非对称。本文主要讨论单轴非对称的情况。《钢筋规程》建议将非对称性不大的SRC柱截面(图1(a)和(b))偏于安全地置换为对称SRC柱截面进行计算。实际工程中,边柱和角柱中配置的钢筋往往具有较大的非对称性,不宜置换为对称SRC柱截面进行计算(如图1(c)和(d))。《钢筋规程》采用简单叠加法计算对称SRC柱的正截面压弯承载力。本文基于对非对称SRC柱压弯承载力的理论分析,针对其轴力-弯矩($N-M$)相关曲线的特点,建立计算非对称

* 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项(2013B13),国家自然科学基金青年科学基金项目(51308514)。
作者简介:曲哲,博士,副研究员,Email: quz@iem.ac.cn.

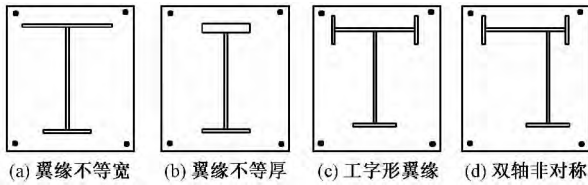


图1 实腹式非对称 SRC 柱钢筋配置的典型形式

SRC 柱正截面承载力的改进的简单叠加方法。

1 理论计算方法

研究表明,对于满足构造配筋要求的 SRC 柱,其正截面压弯承载力的计算可采用以下基本假定^[1-3]: 1) 截面应变分布符合平截面假定; 2) 混凝土受压应力-应变关系按式 (1) 确定; 3) 钢材和钢筋的应力-应变关系为理想弹塑性; 4) 忽略混凝土抗拉强度; 5) 钢骨不会发生局部屈曲; 6) 钢骨与混凝土粘接可靠。

$$\sigma_c = \begin{cases} f_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] & (\varepsilon_c \leq \varepsilon_0) \\ f_c & (\varepsilon_0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_c 、 ε_c 分别为混凝土应力和应变; f_c 为混凝土峰值抗压强度; ε_0 为混凝土峰值压应变; ε_{cu} 为混凝土极限压应变。

基于以上假定,将钢骨混凝土截面划分为许多纤维,根据截面的力平衡条件,可以求出给定轴力下任意截面的受弯承载力。具体步骤如下:

(1) 达到正截面压弯承载力时,截面一侧边缘混凝土纤维达到极限压应变 ε_{cu} ,另一侧边缘混凝土纤维假定为任一应变值 ε_1 ($\varepsilon_1 \leq \varepsilon_{cu}$),则可根据平截面假定确定截面上各个纤维的应变。

(2) 根据不同材料的应力-应变关系,可求出各个纤维的应力,并分别求出具有不同材料的纤维的合力及其作用位置。

(3) 各合力相加得到当前应变分布下截面承受的轴力 N ,各合力对截面几何形心求矩,得到截面承受的弯矩 M ,从而得到一组压弯承载力 (N, M)。

(4) 重复以上 (1) ~ (3) 步,可求出一系列压弯承载力 (N, M),从而得到 $N-M$ 相关关系曲线。

以上计算中,弯矩均为对截面几何形心轴(简称形心轴)取矩求得。

2 非对称 SRC 柱的 $N-M$ 相关关系曲线的特点

图 2 (a) 为一个典型的单轴非对称 SRC 柱截面。钢筋对称配置, O 轴为该截面的形心轴, O_{ss} 为钢骨截面的刚度中心轴,简称刚心轴(钢骨截面材质均一,故其刚心轴与形心轴重合),两者之间的距离为 e_{sso} , O_m 为全截面的刚心轴。当轴压力作用在

O_m 轴左侧时,非对称 SRC 柱截面以左侧边缘混凝土达到极限压应变为破坏标志(图 2 (b)); 当轴压力作用在 O_m 轴上时,截面破坏时全截面同时达到极限压应变(图 2 (c)); 当轴压力作用在 O_m 轴右侧时,非对称 SRC 柱截面以右侧边缘混凝土达到极限压应变为破坏标志(图 2 (d))。

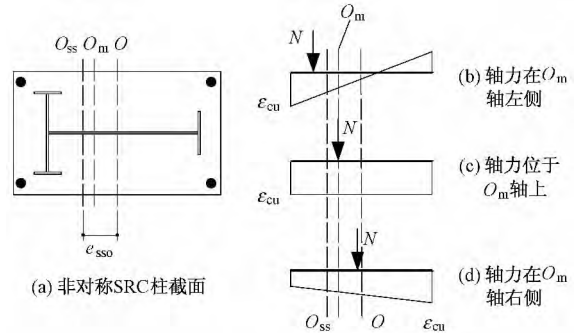


图2 典型单轴非对称 SRC 柱截面

图 3 给出了通过第 1 节介绍的理论分析方法得到的该非对称 SRC 柱截面的 $N-M$ 相关关系曲线。图中同时给出了钢骨截面和钢筋混凝土截面各自的 $N-M$ 相关关系曲线, A, B, C 三点之间的曲线表达了非对称 SRC 柱截面从全截面均匀受压到均匀受拉的全过程中受弯承载力的变化。A, B, C 三个特征点的受力状态如图 4 所示。

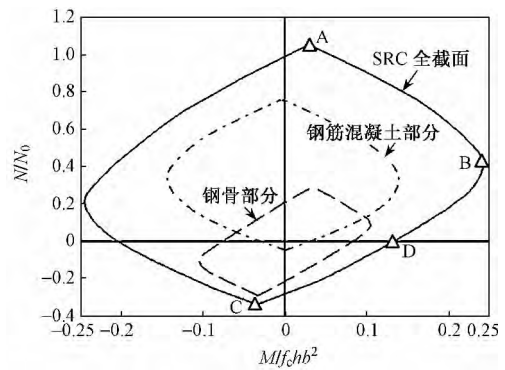


图3 典型非对称 SRC 柱截面的 $N-M$ 相关关系曲线

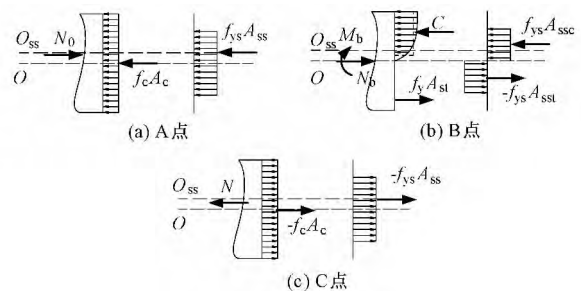


图4 特征点的受力状态

由图 4 可知, A 点: 全截面达到混凝土极限压应变, 非对称 SRC 柱截面达到最大轴向受压承载力

N_A 。由于非对称 SRC 柱截面的刚心轴 O_m 轴与形心轴 O 轴不重合, 作用在 O_m 轴上的压力 N_A 对形心轴 O 轴存在弯矩 M_A , 这是与对称截面的不同之处。将此时的截面应力分为钢筋混凝土与钢骨两部分, 如图 4(a) 所示(图中为清晰起见, 未标出钢筋的应力), 可见钢筋混凝土部分截面上应力合力 $f_c A_c$ 作用在形心轴 O 上, 而钢骨截面应力合力 $f_{ys} A_{ss}$ 则对形心轴 O 产生大小为 $f_{ys} A_{ss} e_{sso}$ 的弯矩。故 A 点处截面的承载力可按式计算:

$$\begin{cases} N_A = N_0 = f_c A_c + f_{ys} A_{ss} + f_y A_s \\ M_A = f_{ys} A_{ss} e_{sso} \end{cases} \quad (2)$$

式中: N_A, M_A 分别为 A 点对应的截面轴向和受弯承载力; f_c, f_{ys}, f_y 分别为混凝土轴心抗压强度、钢骨的屈服强度和钢筋的屈服强度; A_c, A_{ss}, A_s 分别为混凝土、钢骨、钢筋的截面面积; N_0 为非对称 SRC 柱截面最大轴向受压承载力。

B 点: 截面达到最大受弯承载力。对于对称的钢骨截面, 当其达到最大受弯承载力时, 中和轴通过钢骨截面形心。受此影响, 对称配骨的 SRC 柱截面达到最大受弯承载力时的中和轴也接近截面形心; 对于非对称 SRC 柱截面, 达到最大受弯承载力时的中和轴将略有偏离。但分析研究表明, 这一偏移对非对称 SRC 柱截面的 $N-M$ 相关关系影响不大, 故仍假设此时中和轴位于截面形心轴, 如图 4(b) 所示, 图中合压力 C 为作用在钢筋混凝土截面上的合力。设钢筋对称配置, 则此时钢筋混凝土截面部分的压力 $C = N_b^{RC}$, 采用等效矩形应力图, 压力 C 可表达为 $C = abf_c bh/2$, 其中 a, b 为混凝土的等效矩形应力图系数。于是 B 点处截面的承载力可按式计算:

$$\begin{cases} N_B = N_b = N_b^{RC} + f_{ys}(A_{ssc} - A_{sst}) \\ M_B = M_b^{RC} + M_b^{SS} \end{cases} \quad (3)$$

式中: N_B, M_B 分别为 B 点对应的截面轴向和受弯承载力; N_b^{RC}, M_b^{RC} 分别为钢筋混凝土截面界限破坏时的轴力和相应的受弯承载力; M_b^{SS} 为界限破坏时钢骨截面的受弯承载力; A_{ssc}, A_{sst} 分别为非对称 SRC 柱截面形心轴以上钢骨截面(压区)和以下钢骨截面(拉区)的面积。

C 点: 此时全截面均匀受拉, 受力状态与 A 点的情况基本相同, 只是不考虑混凝土截面的贡献。作用在全截面刚心轴 O_m 处的拉力 N 对截面形心轴 O 有负弯矩。C 点处承载力如下式所示:

$$\begin{cases} N_C = -f_{ys} A_{ss} - f_y A_s \\ M_C = -f_{ys} A_{ss} e_{sso} \end{cases} \quad (4)$$

式中 N_C, M_C 分别为 C 点对应的截面轴向和受弯承

载力。

从以上针对 A, B, C 三个特征点的分析可以看出, 非对称 SRC 柱截面的 $N-M$ 相关关系与对称 SRC 柱截面最主要的区别在于, 非对称截面刚心轴与形心轴不重合, 使截面达到最大受压、受拉承载力时对形心轴仍有弯矩。

3 简化计算方法

简化计算方法的基本思路是, 通过轴力在钢筋混凝土部分与钢骨部分之间分配的近似关系, 首先将全截面承受的轴力 N 分解为钢筋混凝土部分承担的轴力 N^{RC} 与钢骨部分承担的轴力 N^{SS} 两部分, 再分别计算钢筋混凝土部分与钢骨部分在各自分配的轴力作用下的受弯承载力 M^{RC} 和 M^{SS} , 将二者相加作为给定轴力下全截面的受弯承载力 M 。

3.1 叠加原理

根据以上计算思路, 非对称 SRC 柱正截面压弯承载力计算的平衡方程为:

$$\begin{cases} N = N^{RC} + N^{SS} \\ M = M^{RC} + M^{SS} \end{cases} \quad (5)$$

该简单叠加方法以塑性理论的下限定理为基础。根据下限定理, 非对称 SRC 柱截面所承受的轴力不论以何种比例分配给钢骨部分和钢筋混凝土部分, 根据平衡条件得到的截面受弯承载力不会大于实际的受弯承载力, 即总是偏于安全的。

3.2 钢骨截面 $N^{SS}-M^{SS}$ 相关关系

理论分析得到的钢骨截面的 $N^{SS}-M^{SS}$ 相关关系如图 5 所示。

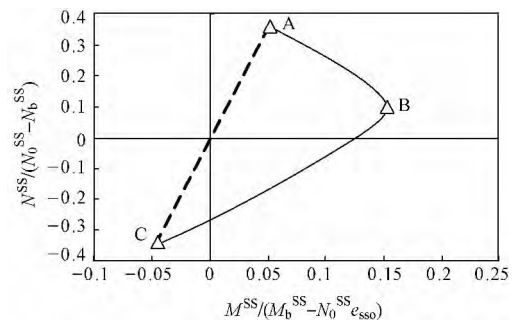


图 5 钢骨截面 $N^{SS}-M^{SS}$ 相关关系曲线

现考察均匀受压(对应于图 5 中的 A 点)、界限破坏(对应于图 5 中的 B 点)、均匀受拉(对应于图 5 中的 C 点)等三个特征点处钢骨截面的 $N^{SS}-M^{SS}$ 相关关系。

A 点处, 钢骨截面达到最大轴向受压承载力, 由图 6(a) 所示的截面平衡可得下式:

$$\begin{cases} N_A^{SS} = N_0^{SS} = f_{ys} A_{ss} \\ M_A^{SS} = N_0^{SS} e_{sso} = f_{ys} A_{ss} e_{sso} \end{cases} \quad (6)$$

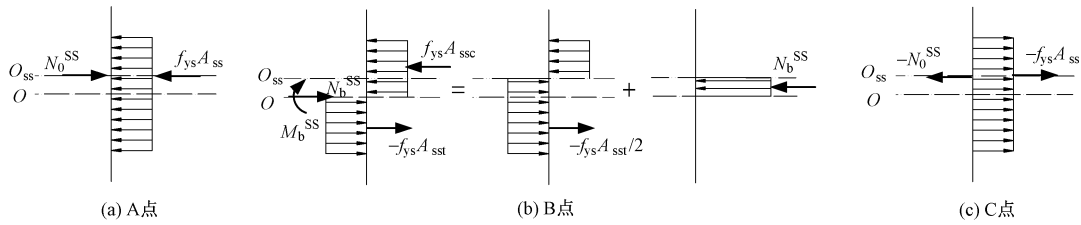


图6 各特征点处的截面受力示意图

式中: N_A^{SS} 、 M_A^{SS} 分别为 A 点对应的钢骨截面分配轴力和相应的受弯承载力; N_0^{SS} 为钢骨截面的最大轴向承载力。

B 点对应于 SRC 截面界限破坏。与第 2 节一样,假设此时中和轴位于 SRC 截面的形心轴,可近似按照完全塑性状态确定此时钢骨截面承载力,由图 6(b) 可得下式:

$$\begin{cases} N_B^{SS} = N_b^{SS} = f_{ys} (A_{ssc} - A_{sst}) \\ M_B^{SS} = M_b^{SS} = M_0^{SS} + N_b^{SS} e_{ssp}/2 \end{cases} \quad (7)$$

式中: N_B^{SS} 、 M_B^{SS} 分别为 B 点对应的钢骨截面分配轴力和相应的受弯承载力; N_b^{SS} 为钢骨截面界限破坏时的轴力; M_b^{SS} 为钢骨截面界限破坏时的受弯承载力,亦即钢骨截面的最大受弯承载力; e_{ssp} 是钢骨截面的塑性中和轴(即面积平分轴)到 SRC 截面形心轴 O 轴的距离; $M_0^{SS} = \gamma_s f_{ys} W_{ss}$ 为钢骨截面的纯弯承载力,其中 W_{ss} 为钢骨截面对自身形心轴的弹性抵抗矩; γ_s 为钢骨截面的塑性发展系数。

塑性发展系数 γ_s 的含义是钢骨截面最大受弯承载力与其弹性受弯承载力的比值,根据大量数值计算结果并综合考虑与钢结构设计有关规范的协调,建议可偏于安全地按表 1 取用。

C 点处,截面达到最大轴向受拉承载力,与 A 点类似可得下式:

$$\begin{cases} N_C^{SS} = -N_0^{SS} = -f_{ys} A_{ss} \\ M_C^{SS} = -N_0^{SS} e_{sso} = -f_{ys} A_{ss} e_{sso} \end{cases} \quad (8)$$

式中 N_C^{SS} 、 M_C^{SS} 分别为 C 点对应的钢骨截面分配轴向和相应的受弯承载力。

表 1 钢骨塑性发展系数 γ_s

钢骨形式	钢材种类	
	Q235	Q345
绕强轴弯曲对称工字形钢骨	1.02	1.02
绕弱轴弯曲对称工字形钢骨	1.25	1.00
十字形钢骨箱形钢骨	1.10	1.05
单轴非对称边柱钢骨	1.20	1.15

在 A、B 点和 B、C 点之间线性插值,可得到钢骨截面的 $N^{SS}-M^{SS}$ 相关关系如下式所示:

$$\frac{N^{SS} - N_b^{SS}}{\pm N_0^{SS} - N_b^{SS}} + \frac{M^{SS} - (\pm N_b^{SS} e_{sso})}{M_b^{SS} - (\pm N_b^{SS} e_{sso})} = 1 \quad (9)$$

式中: \pm 号当 $N^{SS} \geq N_b^{SS}$ 时取正号, $N^{SS} < N_b^{SS}$ 时取负号。式(9)关系如图 7 所示。

实际非对称 SRC 柱截面的 $N^{SS}-M^{SS}$ 相关关系并非上述线性关系。为此,采用形状系数 k 对式(9)进行修正,如下式所示:

$$\left(\frac{N^{SS} - N_b^{SS}}{\pm N_0^{SS} - N_b^{SS}} \right)^k + \frac{M^{SS} - (\pm N_b^{SS} e_{sso})}{M_b^{SS} - (\pm N_b^{SS} e_{sso})} = 1 \quad (10)$$

形状系数 k 建议按表 2 取值。图 8 为式(10)与理论分析结果的对比,由图可知二者吻合较好。

表 2 $N^{SS}-M^{SS}$ 相关曲线形状系数 k

钢骨形式	轴力状态	
	$N \geq N_b$	$N < N_b$
绕强轴弯曲对称工字形钢骨	1.0	1.3
绕弱轴弯曲对称工字形钢骨	1.5	3.0
十字形钢骨箱形钢骨	1.3	2.6
单轴非对称边柱钢骨	1.0	1.5

3.3 轴力分配关系

令 $\alpha_s = \frac{N^{SS} - N_b^{SS}}{N_0^{SS} - N_b^{SS}}$, 假设非对称 SRC 柱截面的轴

力分配满足下式所示的近似关系:

$$\alpha_s = \frac{N^{SS} - N_b^{SS}}{N_0^{SS} - N_b^{SS}} = \frac{N - N_b}{N_0 - N_b} \quad (11)$$

式中: N_b 为非对称 SRC 柱截面界限破坏时的轴向承载力, $N_b = \alpha \beta f_c b h / 2 + f_{ys} (A_{ssc} - A_{sst})$, 其中 α 、 β 为混凝土等效矩形应力图系数。

当 SRC 截面达到最大受弯承载力时,可认为其轴力 $N = N_b$, 此时由式(11)可算得钢骨截面的轴力 $N^{SS} = N_b^{SS}$, 即相应钢骨截面也达到最大受弯承载力。当非对称 SRC 柱截面轴力达到最大,即 $N = N_0$ 时, $N^{SS} = N_0^{SS}$, 即相应钢骨截面也达到最大轴向承载力。

用理论方法计算得到 $\frac{N^{SS} - N_b^{SS}}{N_0^{SS} - N_b^{SS}}$ 和 $\frac{N - N_b}{N_0 - N_b}$ 关系曲

线与式(11)的对比如图 9 所示。另外,根据下限定理可知,任意轴力分配下的计算结果均偏于安全。

4 误差分析

从钢材等级、配骨率、偏心率和轴压力系数四个方面比较第 3 节介绍的简化计算方法与第 1 节介绍的理论计算方法之间的相对误差。其中,偏心率定

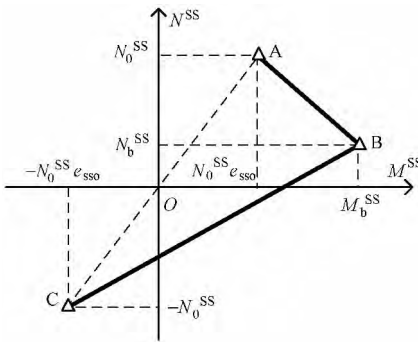


图 7 $N^{SS}-M^{SS}$ 线性相关关系

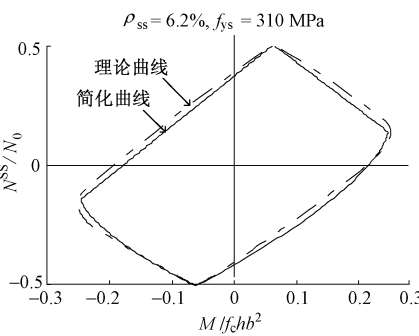


图 8 理论计算与简化计算 $N^{SS}-M^{SS}$ 的比较

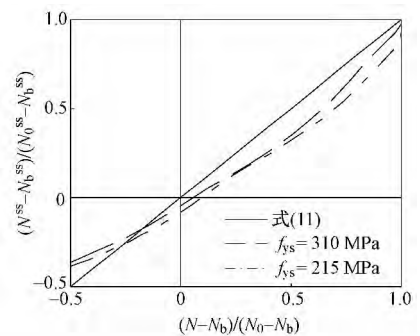


图 9 理论计算的轴力分配关系

义为钢骨截面刚心轴到全截面形心轴的距离 e_{sso} 与截面总高度 h 的比值; 轴压力系数为设计轴力 N 与非对称 SRC 柱截面最大轴向受压承载力 N_0 的比值, 它与普通混凝土截面的轴压比具有相同的概念, 但考虑了钢骨和钢筋部分所承担的轴力。

分析采用的非对称 SRC 边柱截面如图 10 所示。其中, 非对称 SRC 柱截面尺寸为 $1\ 000\text{mm} \times 1\ 000\text{mm}$, 采用单轴非对称工字形钢骨, 纵筋采用 HRB335 级钢筋, 沿柱截面一周均匀配置 20 根直径 22mm 的钢筋, 全部纵筋配筋率为 0.76%, 单侧受拉钢筋配筋率为 0.24%。

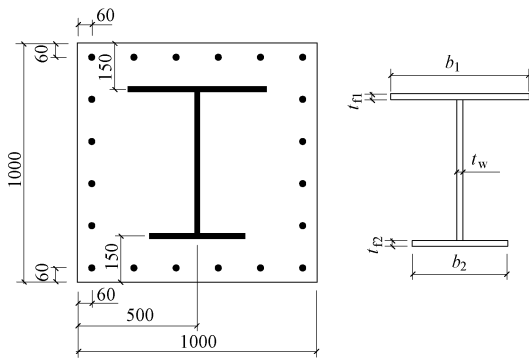


图 10 单轴非对称 SRC 柱截面示意图

(1) 配骨率

对轴压力系数为 0.4、偏心率为 0.1、钢骨截面 $b_1 = 700\text{mm}$ $b_2 = 500\text{mm}$ 的非对称 SRC 柱截面, 通过改变钢骨翼缘厚度 t_{11} t_{12} 及腹板厚度 t_w 来调整配骨率。分析中始终保持 $t_{11} = t_{12} = t_w$, 其值从 16mm 递增至 85mm(可以保持偏心率始终为 0.1)。简化计算与理论计算结果的相对误差随配骨率的变化趋势如图 11 所示。对于不同的钢材, 相对误差的绝对值随配骨率增大而逐渐增大的趋势基本相同, 但使用 Q235 级钢材时的相对误差绝对值略大于 Q345 级钢材的情况。对于本例的参数组合, 不同配骨率对应的相对误差均小于零, 即简化计算方法与理论计算方法相比低估了非对称 SRC 柱截面的承载力, 这对

于工程设计是偏于安全的。

(2) 偏心率

对轴压比为 0.4、配骨率为 7.28%、 $t_{11} = t_{12} = t_w = 40\text{mm}$ 的非对称 SRC 柱, 通过改变上翼缘长度 b_1 及下翼缘长度 b_2 来调整其偏心率, 并保持配骨率不变。分析中选用的上翼缘宽度 $b_1 = 450 \sim 700\text{mm}$, 下翼缘宽度 $b_2 = 200 \sim 450\text{mm}$ 。不同偏心率下的相对误差如图 12 所示。可见, 相对误差随偏心率的增大而逐渐增大, 且从小于零逐渐发展为大于零, 亦即简化方法有可能在偏心率较大的情况下高估非对称 SRC 柱截面的承载力。但总地来讲, 相对误差的绝对值均小于 10%。

(3) 轴压力系数

对配骨率为 7.28%、钢骨截面 $b_1 = 700\text{mm}$ $b_2 = 500\text{mm}$ 、偏心率为 0.1 的非对称 SRC 柱截面, 计算不同轴压力系数下的压弯承载力。轴压力系数取值范围为 0.2 ~ 0.7, 得到的相对误差见图 13。可见, 当轴压力较小时, 简化计算方法的相对误差绝对值较小。当轴压力增大时, 相对误差会突然增大, 且为正数。这意味着对于承受较大轴力的小偏心受压 SRC 构件, 简化方法有可能高估截面的压弯承载力。

从以上计算结果可见, 对于常见的参数组合, 本文介绍的简化计算方法与理论计算方法相比的相对误差均不超过 10%, 且在大多数情况下不超过 5%, 能够满足工程设计的需求。

5 简化计算方法示例

作为算例的非对称 SRC 柱截面尺寸为 $1\ 000 \times 1\ 000$, 钢骨尺寸和配筋如图 14 所示。采用 Q345 钢材, 屈服强度设计值 $f_{ys} = 295\text{MPa}$ 。纵筋采用 HRB335 级钢筋, 屈服强度设计值 $f_y = 300\text{MPa}$, 全部纵筋为 12 根直径 28mm 的钢筋。混凝土强度等级为 C40, 轴心抗压强度设计值 $f_c = 19.1\text{MPa}$ 。设计轴力 $N = 20\ 000\text{kN}$, 设计弯矩 $M = 4\ 000\text{kN}$ 。根据本文建议的简化计算方法, 其正截面承载力

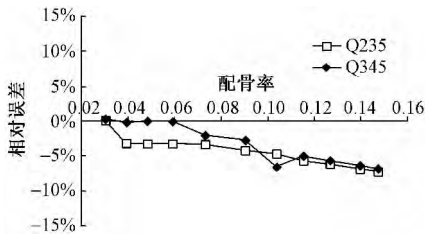


图 11 相对误差随配骨率的变化

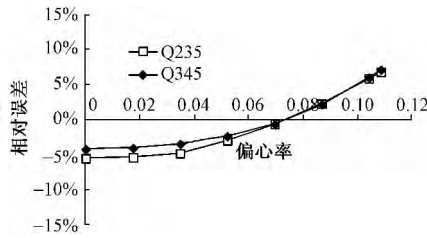


图 12 不同偏心率下的相对误差

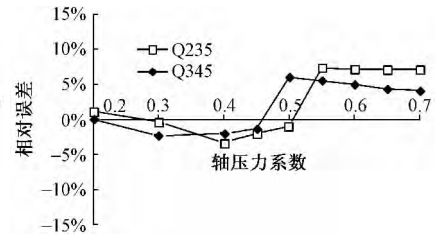


图 13 不同轴压力系数下的相对误差

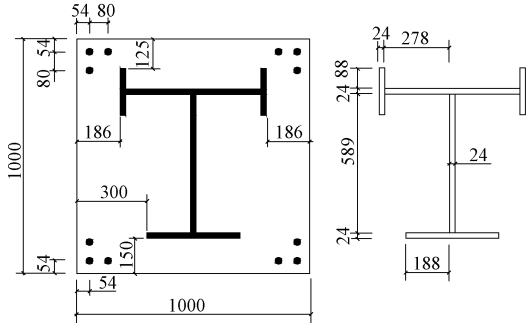


图 14 例题截面

验算过程如下。

(1) 首先确定计算中需要用到的一些基本量

钢骨截面形心到非对称 SRC 柱截面上边缘的距离 $y = 441.2\text{mm}$ ，到非对称 SRC 柱截面形心的距离 $e_{\text{SSO}} = 58.8\text{mm}$ 。钢骨塑性中和轴（即面积平分轴）距非对称 SRC 柱形心轴的距离 $e_{\text{SSP}} = 203\text{mm}$ 。计算过程从略。另外：

$$N_0 = f_c A_c + f_{ys} A_{ss} + f_y A_s = 34\,214\text{kN}$$

$$N_b = \alpha \beta f_c b h / 2 + f_{ys} (A_{\text{SSC}} - A_{\text{SST}}) = 11\,300\text{kN}$$

$$N_0^{\text{SS}} = f_{ys} A_{\text{SS}} = 13\,941\text{kN}$$

$$M_0^{\text{SS}} = \gamma_s f_{ys} W_{\text{SS}} = 2\,793\text{kN} \cdot \text{m}$$

$$N_b^{\text{SS}} = f_{ys} (A_{\text{SSC}} - A_{\text{SST}}) = 3\,660\text{kN}$$

$$M_b^{\text{SS}} = M_0^{\text{SS}} + N_b^{\text{SS}} e_{\text{SSP}} / 2 = 3\,165\text{kN} \cdot \text{m}$$

(2) 分配轴力

根据式(10) 确定钢骨部分和钢筋混凝土部分各自分配的轴力：

$$\alpha_s = \frac{N - N_b}{N_0 - N_b} = 0.38$$

$$N^{\text{SS}} = \alpha_s (N_0^{\text{SS}} - N_b^{\text{SS}}) + N_b^{\text{SS}} = 7\,567\text{kN}$$

$$N^{\text{RC}} = N - N^{\text{SS}} = 12\,433\text{kN}$$

(3) 计算各自的受弯承载力

根据钢骨部分的轴力 N^{SS} 和钢筋混凝土轴力 N^{RC} 计算相应的受弯承载力 M^{SS} ：

$N > N_b$ ，由表 2 得 $k = 1$ 则：

$$M^{\text{SS}} = \left[1 - \left(\frac{N^{\text{SS}} - N_b^{\text{SS}}}{N_0^{\text{SS}} - N_b^{\text{SS}}} \right)^k \right] (M_b^{\text{SS}} - N_0^{\text{SS}} e_{\text{SSO}}) + N_0^{\text{SS}} e_{\text{SSO}}$$

$$= 2\,274\text{kN} \cdot \text{m}$$

根据钢筋混凝土部分的轴力 N^{RC} ，按我国混凝土规范^[4] 计算相应的受弯承载力 M^{RC} ：

$$M^{\text{RC}} = 2\,612\text{kN} \cdot \text{m}$$

(4) 最后根据叠加原理得到在给定设计轴力 N 的条件下 SRC 截面的受弯承载力 M 为：

$$M = M^{\text{SS}} + M^{\text{RC}} = 4\,886\text{kN} \cdot \text{m} > 4\,000\text{kN} \cdot \text{m}$$

满足承载力要求。

采用第 2 节的理论分析方法得到的承载力结果为：当 $N = 20\,000\text{kN}$ 时， $M = 4\,800\text{kN} \cdot \text{m}$ ，可见上述简化算法计算结果与理论计算结果非常接近。

6 结语

本文在分析钢骨混凝土正截面受力状态的基础上，提出简化的钢骨部分与钢筋混凝土部分的轴力分配关系以及钢骨部分的弯矩-轴力相关关系，并根据截面叠加原理建议了一种适用于非对称截面钢骨混凝土柱压弯承载力计算的简化计算方法。误差分析表明，与理论计算方法相比，该方法所产生的误差在工程应用可接受的范围之内。

需要指出的是，修订后的《钢骨混凝土结构技术规程》(YB 9082—2006) 以及上述简化计算方法仅适用于一般的非对称 SRC 柱截面。对于目前超高层建筑中大量使用的巨型截面，其钢骨形状各异，就其结构整体计算模型的设定及截面计算均不宜采用规程给出的简化计算方法，而建议利用有限元方法进行正截面承载力计算并建立结构计算模型，以取得更为符合实际状况和更为准确的结果。

参 考 文 献

[1] 叶列平, 赵树红, 方鄂华. 钢骨混凝土构件正截面承载力计算[J]. 工程力学, 1999, 16(2): 29-36.

[2] 叶列平, 刘凤阁. 钢骨钢筋高强混凝土构件的正截面承载力计算[C]//第二届高强混凝土及其应用技术讨论会论文集. 1995: 163-168.

[3] 叶列平. 钢骨混凝土柱的设计方法[J]. 建筑结构, 1997, 27(5): 8-12.

[4] GB 50010—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.