

文章编号: 1000-4750(2012)06-0169-07

对钢筋混凝土偏压构件承载力计算公式的修正建议

黄 靓, 鲁懿虬, 徐紫鹏

(湖南大学土木工程学院, 湖南, 长沙 410082)

摘 要: GB50010-2002《混凝土结构设计规范》(以下简称《规范》)计算偏心受压构件正截面承载力时需要判断大小偏心, 计算步骤较繁琐, 计算公式存在缺陷。针对《规范》的不合理性提出了一个统一纯弯-偏压-轴压三种受力状态的计算公式, 统一公式具有明确的物理意义, 并且与试验数据拟合较好。利用统一公式计算对称配筋偏压构件时可取消大小偏心判断, 计算所得的钢筋面积能返回统一公式验算。规范公式的偏压构件承载力 M_u-N_u 相关曲线在大小偏心交界处会出现尖点, 小偏心段不能很好地与轴压点衔接; 统一公式的 M_u-N_u 曲线是一条连续光滑的曲线, 曲线连接了纯弯、偏压、轴压三个受力状态, 具有明确的物理意义。统一曲线与规范曲线可以较好地吻合。比较统一公式与规范公式计算所得的钢筋面积, 结果表明规范公式的小偏心受压和轴压的配筋存在突变, 而在接近轴压点时小偏心计算较轴压公式偏不安全, 而统一公式的配筋计算具有较好的过渡性, 并且计算精度满足工程的要求, 可靠指标满足 GB50068-2001《建筑结构可靠度设计统一标准》的要求。

关键词: 钢筋混凝土; 偏压构件; 相关性; 承载力计算; 统一算法

中图分类号: TU375 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2010.07.0503

CORRECTIONAL RECOMMENDATION OF BEARING CAPACITY FORMULA OF RC ECCENTRIC COMPRESSION MEMBERS

HUANG Liang, LU Yi-qiu, XU Zi-peng

(Department of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: The calculation steps of eccentric compression members in the current GB50010-2002 are tedious. A unified calculation method is derived to connect axial compression, eccentric compression and pure bending. The unified formula has a definite physical meaning and fit the experimental data well. The step of judging the type of eccentricity can be canceled and the calculated reinforcement area can be returned to the unified formula for checking. In the code M_u-N_u curve, a sharp point appeared at the junction of the large eccentric compression curve and the small one, and the small eccentric compression curve could not be connected with the axial point. Whereas the unified M_u-N_u correlation curve is a continuous smooth curve connecting the three force states. The unified M_u-N_u curve is in a good agreement with the Code curve. The results show that there is a reinforcement mutation between the small eccentricity formula and axial compression formula of the code. The small eccentric formula near the axial compression point is not safe. The reinforcement calculation of the unified formula has a good transition and can meet the demand of GB 50068-2001.

Key words: reinforced concrete; eccentric compression member; correlation; bearing capacity calculation; unified calculation method

收稿日期: 2010-07-15; 修改日期: 2010-09-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(50808074, 51078132); 教育部创新团队项目(2009)

通讯作者: 黄 靓(1974—), 男, 湖南株洲人, 副教授, 博士, 从事混凝土基本理论、抗震研究(E-mail: huangliangstudy@126.com).

作者简介: 鲁懿虬(1986—), 男, 浙江绍兴人, 硕士, 从事混凝土基本理论、抗震研究(E-mail: lyqqsg@126.com);

徐紫鹏(1988—), 男, 江西南昌人, 硕士, 从事混凝土基本理论、抗震研究(E-mail: xuzipengkaoyan@163.com).

钢筋混凝土偏心受压构件是工程中一种量大面广的基本构件，其承载力计算方法是工程设计中的一项重要内容^[1-3]。试验研究表明，当一个给定截面、配筋及材料强度的偏心受压构件到达承载能力极限状态时，截面承受的内力设计值 N 、 M 是相关的，轴力与弯矩对于构件的作用效应存在着叠加和制约的关系。当偏心距较小受拉钢筋未屈服时，正截面受弯承载力随着轴力的增大而减小；在偏心距较大受拉钢筋屈服时，正截面受弯承载力随着轴力的增大而增大。现行 GB50010-2002《混凝土结构设计规范》^[4](以下简称《规范》)根据受拉钢筋屈服与否把偏压构件分成小偏心受压构件和大偏心受压构件，两种情况分别对应两种不同的承载力计算公式。本文针对《规范》在计算偏压构件正截面承载力时存在的缺陷，提出一种统一大小偏心的计算方法，并给出对称配筋偏压构件正截面承载力计算公式。

1 规范公式的不合理性

《规范》对于偏心受压构件极限承载力的算法比较繁琐，首先要判定大偏心、小偏心的性质，再根据不同的公式进行计算，其间还要判断钢筋的压屈情况，这种先判别再计算的设计方法给工程应用带来了诸多不便。而且，《规范》基于平截面假定的等效矩形算法在计算小偏心受压构件时显得比较繁琐。

另外，《规范》计算不同受力状态时的公式不具有连续性，各种公式之间存在矛盾。例如，《规范》在计算对称配筋小偏心受压构件的计算公式如下：

$$N \gg \alpha_1 f_c b x + f'_y A'_s - \sigma_s A_s \tag{1}$$

$$Ne \gg \alpha_1 f_c b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) \tag{2}$$

$$\sigma_s = f_y \frac{\xi - \beta_1}{\xi_b - \beta_1} \tag{3}$$

而轴心受压公式为：

$$N \gg 0.9\varphi(f'_y A'_s + f_c A) \tag{4}$$

用规范公式画得的偏压构件承载力 M_u-N_u 相关曲线示意如图 1 所示。

从图 1 可看出：1) 轴心受压公式和小偏心公式在 M_u-N_u 相关曲线上不能正常衔接，由小偏心终止点 B 向轴压点 A 过渡时突然缩进一段，原因是《规范》设计时在轴压公式中乘以 0.9 的系数，其目的是保持与偏心受压构件具有相近的可靠性^[5-6]。但从图 1 中可以看到，这样人为地在轴压公式中乘以系数反

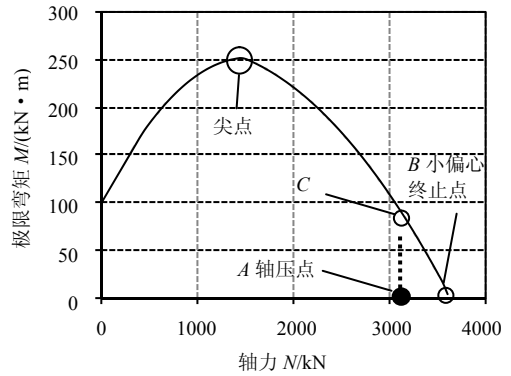


图 1 规范偏心受压公式的 M_u-N_u 曲线示意

Fig.1 The bearing capacity M_u-N_u correlation curve of the Code formula

而使两种连续受力状态下的公式出现不连续性，导致接近轴压点的小偏心 BC 段与轴压点 A 出现可靠度突变，当 $M=0$ 轴心受压时，用小偏心公式与轴心受压公式计算的配筋结果不同；2) 《规范》认为在式(4)轴心受压公式下构件已处于受压极限状态，即图中 A 点，但图中接近轴压点的小偏心 BC 段较 A 点外扩，表示在轴力到达极限时，构件还能承受弯矩，这是不安全的，下文配筋计算比较也证明了这一点；3) 大偏心受压和小偏心受压公式在 M_u-N_u 曲线上虽有较好的连续性，但两曲线在大小偏心界限处的导数值不相等，出现一个尖点，曲线不光滑。而实际上受弯、偏压和轴压是一个连续过渡的受力状态，对应的公式应该具有连续可导性，其 M_u-N_u 曲线应该是一条形如图 2 所示的连续并且光滑的曲线。

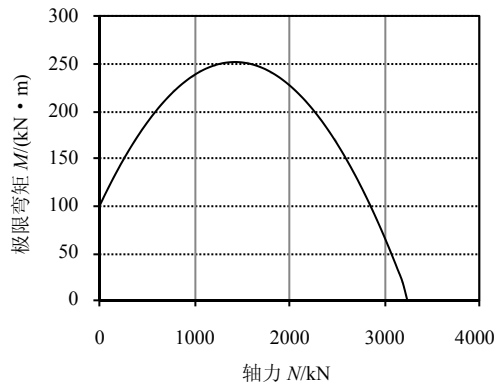


图 2 偏心受压构件的 M_u-N_u 统一曲线示意

Fig.2 The bearing capacity M_u-N_u correlation curve of the unified formula

2 统一公式的提出

2.1 统一公式的推导

由偏心受压构件强度专题研究组^[7]做的钢筋混

凝土矩形截面偏心受压试验数据可知, M_u-N_u 曲线接近于二次抛物线, 曲线最高点在界限破坏处^[8];

《规范》公式所画得的 M_u-N_u 曲线也很接近于二次抛物线, 并且也在大偏心、小偏心的破坏界限处达到最高点, 如图 1。根据上述 M_u-N_u 曲线的性质, 对于给定截面、配筋及材料强度的偏心受压构件, 可假定其 M_u-N_u 曲线为二次抛物线, 形式如下:

$$M = aN^2 + bN + c \quad (5)$$

偏压构件的 M_u-N_u 曲线应使受弯、偏压和轴压三种承载力计算公式统一起来, 具有明确的物理意义。由此可知偏压构件 M_u-N_u 曲线必定经过 2 个点, 即纯弯点和纯压点:

$$M = \begin{cases} M_0, & N = 0 \\ 0, & N = N_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, M_0 表示构件受纯弯时正截面受弯极限承载力, 对于对称配筋构件, 因受压区高度 $x \leq 2a'_s$, 按《规范》公式取值如下:

$$M_0 = A_s f_y (h_0 - a'_s) \quad (7)$$

N_0 表示构件受纯压时轴心受压极限承载力, 按式(4)取用。

很明显, 对于给定截面、配筋及材料强度的偏心受压构件, 必有一组 M 、 N 在构件破坏时正好使受拉钢筋屈服。可知偏压构件 M_u-N_u 曲线必定经过平衡点, 即平衡破坏时轴力和弯矩的相关点:

$$M = M_b, \quad N = N_b \quad (8)$$

式中: N_b 、 M_b 分别表示偏压构件平衡破坏时的轴心受压极限承载力和受弯极限承载力, 对于对称配筋构件, 按《规范》公式取值如下:

$$N_b = \alpha_1 f_c b h_0 \xi_b \quad (9)$$

$$M_b = \alpha_1 f_c b h_0^2 \left(\xi_b - \frac{\xi_b^2}{2} \right) + f_y A'_s (h_0 - a'_s) + \left(-\frac{h}{2} + a_s \right) N_b \quad (10)$$

至此, M_u-N_u 曲线上 3 个特征点已确定, 分别是纯弯点、纯压点以及平衡点, 则可根据式(6)和式(8)求得式(5)中二次抛物线的 3 个系数, 求得系数 a 、 b 、 c 分别为:

$$a = \frac{M_0}{N_0^2} \cdot \frac{n+m-1}{n^2-n}, \quad b = -N_0 \left(\frac{M_0}{N_0^2} + a \right), \quad c = M_0 \quad (11)$$

将式(5)化成如下形式:

$$\frac{M}{M_0} = a' \left(\frac{N}{N_0} \right)^2 + b' \frac{N}{N_0} + c' \quad (12)$$

求得 a' 、 b' 、 c' 分别为:

$$a' = \frac{n+m-1}{n^2-n}, \quad b' = -1-a', \quad c' = 1 \quad (13)$$

式中: n 为偏压比, 即构件受偏压作用平衡破坏时与构件受纯压时的轴心受压极限承载力之比; m 为偏弯比, 即构件受偏压作用平衡破坏时与构件受纯弯时的受弯极限承载力之比。

用公式表示如下:

$$n = \frac{N_b}{N_0}, \quad m = \frac{M_b}{M_0} \quad (14)$$

令 $y = \frac{M}{M_0}$, $x = \frac{N}{N_0}$, 则式(12)可化为:

$$y = \frac{n+m-1}{n^2-n} x^2 + \left(-1 - \frac{n+m-1}{n^2-n} \right) x + 1 \quad (15)$$

梁兴文^[9]在《混凝土结构非线性分析》中指出, 由刚塑性材料组成的构件, 当构件达到塑性状态时, 截面承受拉力 N 和弯矩 M 可表示为:

$$\frac{M}{M_0} + \left(\frac{N}{N_0} \right)^2 = 1 \quad (16)$$

于是, 在采用二次抛物线相关模型的情况下, 混凝土偏压承载力相关关系可写为:

$$A \left(\frac{M}{M_0} - B \right) + C \left(\frac{N}{N_0} - D \right)^2 = 1 \quad (17)$$

故将式(15)写成:

$$\begin{cases} p \left(\frac{M}{M_0} \right) + q \left(\frac{N}{N_0} - h \right)^2 = 1 \\ p = -\frac{4k}{(k-1)^2}, \quad q = \frac{4k^2}{(k-1)^2}, \quad h = \frac{k+1}{2k} \\ k = \frac{n+m-1}{n^2-n} \\ n = \frac{N_b}{N_0}, \quad m = \frac{M_b}{M_0} \end{cases} \quad (18)$$

式中: M 为考虑二阶效应的弯矩设计值; N 为轴心压力设计值; M_0 为构件纯弯时正截面受弯极限承载力, 对称配筋构件按式(7)计算; N_0 为构件纯压时轴心受压极限承载力, 对称配筋构件按式(4)计算; M_b 为偏压构件平衡破坏时受弯极限承载力, 对称配筋构件按式(10)计算; N_b 为偏压构件平衡破坏时轴心受压极限承载力, 对称配筋构件按式(9)计算。

2.2 统一公式的性质

2.2.1 公式的物理意义及适用性

统一公式(18)是以二次抛物线模型为简化的压弯相关关系模型, 建立了一个纯弯-偏压-轴压的统

一计算模式,使受弯、偏压和轴压三种承载力计算公式统一起来,具有明确的物理意义。在计算对称配筋偏压构件时可取消判断大小偏心类别这一步骤,只要把给定的轴力设计值 N 和考虑二阶效应后的弯矩设计值 M 直接代入式(18),同时把 A_s 和 A'_s 代入式(4)、式(7)、式(9)和式(10),则式(18)变成一个关于 A_s 的一元方程,可计算出 A_s 和 A'_s 。而且, A_s 和 A'_s 能返回式(18)验算,当式(18)左边 < 1 时,则该组 $M-N$ 内力设计值在 M_u-N_u 曲线内侧,是安全的,反之则表明承载力不足。

理论上,统一公式可计算所有普通形状截面的对称配筋偏压构件,只是对不同形状截面 M_0 、 N_0 、 M_b 和 N_b 的计算方法不同。实际上,偏压构件截面形状一般为矩形、工字形和 T 形,因此,对这三种截面,如采用对称配筋,均可用统一公式计算配筋。

2.2.2 公式与试验数据拟合分析

为了得出统一式(18)与试验数据的拟合程度,本文收集了偏心受压构件强度专题研究组^[7]做的钢筋混凝土矩形截面偏心受压试验数据,对其进行了计算模式的统计分析,统计分析结果见表 1。

表 1 统一公式计算模式统计参数^[7]

Table 1 Statistics parameters of computing model of the unified formula

样本量	均值	均方差	变异系数	标准偏度系数	标准峰度系数
296	1.100	0.213	0.194	0.552	-0.201

由表 1 统计的结果可知,试验数据与式(18)拟合较好,变异系数较小;标准偏度系数较小,与正态分布拟合尚可;标准峰度系数较小,顶峰的凸度非常小。从表 1 可知,式(18)的计算模式不确定性系数 $\mu_{KP}=1.10$, $\delta_{KP}=0.194$ 。

根据表 1 统计的计算模式不确定性,考虑新规范的荷载标准值的系数调整,用现有的可靠度分析方法^[10]对统一公式进行可靠度分析发现:当构件为受拉破坏时,可靠指标 $\beta=3.68 > [\beta]=3.2$;当构件为受压破坏时,可靠指标 $\beta=4.05 > [\beta]=3.7$,满足 GB 50068-2001《建筑结构可靠度设计统一标准》^[11]的要求。

3 统一公式与规范公式 M_u-N_u 相关曲线对比

3.1 M_u-N_u 曲线的画法

对于一个给定截面、对称配筋及材料强度的偏心受压构件,并且给定轴向力设计值 N ,弯矩设计

值 M ,规范公式可按下列步骤计算:

1) 利用式(9)计算平衡点轴力 N_b 。

2) 比较 N 与 N_b ,如 $N \leq N_b$,则为大偏心受压构件,混凝土受压区高度系数 ξ 易得:

$$\xi = \frac{N}{\alpha_1 f_c b h_0} \quad (19)$$

如 $N > N_b$,则为小偏心受压构件,根据式(1)、式(3)计算 ξ 可得:

$$\xi = \frac{N - f_y' A_s' - \frac{\beta_1 f_y A_s}{\xi_b - \beta_1}}{\alpha_1 f_c b h_0 - \frac{f_y A_s}{\xi_b - \beta_1}} \quad (20)$$

如 $\xi \geq \frac{2a_s'}{h_0}$,则取 $\xi = \frac{2a_s'}{h_0}$;如 $\xi \leq \frac{h}{h_0}$,则取 $\xi = \frac{h}{h_0}$ 。

3) 利用《规范》偏心受压公式计算 M ,如下式:

$$M = \alpha_1 f_c b h_0^2 \left(\xi - \frac{\xi^2}{2} \right) + f_y' A_s' (h_0 - a_s') + \left(-\frac{h}{2} + a_s \right) N \quad (21)$$

统一公式计算 M 较规范公式简单,可取消判断大小偏心类别这一步骤, M 直接按下式取:

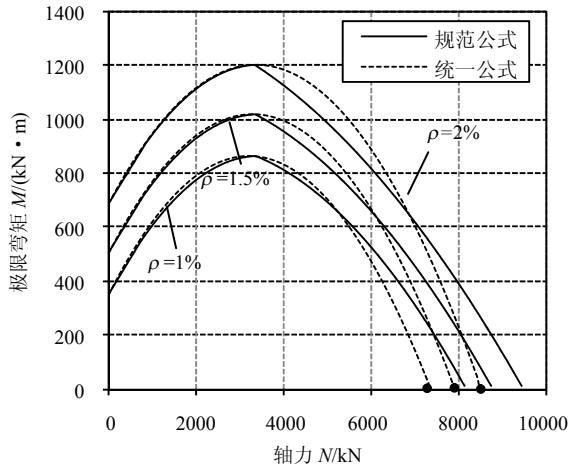
$$M = M_0 \left[\frac{n+m-1}{m^2-m} \left(\frac{N}{N_0} \right)^2 + \left(-1 - \frac{n+m-1}{m^2-m} \right) \frac{N}{N_0} + 1 \right] \quad (22)$$

如此重复上述步骤,使轴向力设计值初值为 $N=0$,选取合适的步距使 N 逐步增大,即可得到多组 $M-N$ 相关点,利用程序绘制在坐标系上即可得某一构件规范公式以及统一公式的 M_u-N_u 曲线。

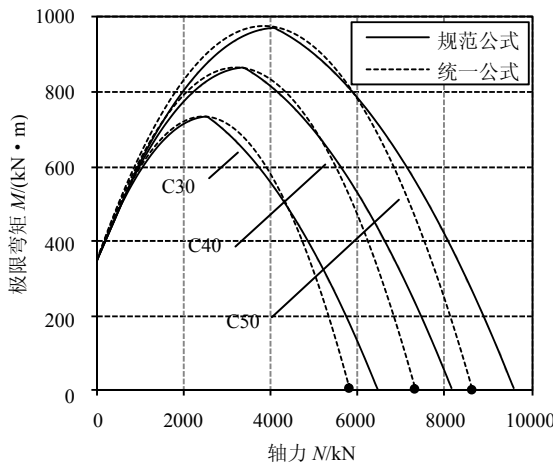
3.2 M_u-N_u 曲线的对比

为了全面比较规范公式和统一公式的 M_u-N_u 曲线,本文考虑了截面配筋率、混凝土强度等级以及构件截面尺寸的变化,根据 3.1 节步骤分别得出相应的 M_u-N_u 曲线并进行比较。

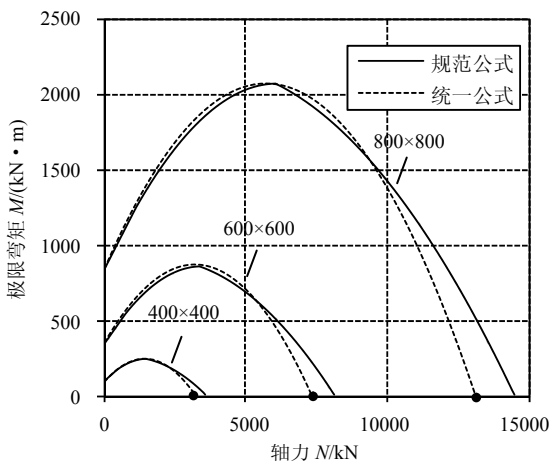
图 3 列出了对称配筋偏压构件各种条件下的规范公式与统一公式 M_u-N_u 曲线,可以看出,规范曲线大偏心和小偏心为两段不同性质的曲线,大偏心 M_u-N_u 曲线较圆润,而小偏心 M_u-N_u 曲线接近于直线,在配筋率较大时尤为明显,如图 3(a)中大小偏心两段曲线在界限处导数不一致,出现较明显的尖点,不具有很好的物理意义。而且,从图 3 中容易发现规范的小偏心曲线不能很好地过渡至轴心受压点,出现突变,小偏心曲线终点停留在轴压点右方,不能衔接。



(a) 随配筋率 ρ 的变化(600×600 C40 HRB400)



(b) 随混凝土强度的变化(600×600 HRB400 单侧 $\rho=1\%$)



(c) 随截面尺寸的变化(C40 HRB400 单侧 $\rho=1\%$)

图 3 各种构件规范公式与统一公式 M_u-N_u 曲线对比

Fig.3 The M_u-N_u correlation curves of the code formula and the unified formula with different members

统一公式是根据试验数据以及受力连续过渡的物理意义而得到的, 该公式具有明确的物理意义, 取消了大小偏心的判别, 并且建立一个统一的

纯弯-偏压-轴压的计算模式。从图中可以看出, 其 M_u-N_u 曲线是一条连续光滑的曲线, 曲线连接了纯弯、偏压、轴压三个受力状态, 并在平衡点处于最高, 具有明确的物理意义。曲线也克服了《规范》小偏心与轴压突变的问题。

在图 3 中比较统一曲线和规范曲线, 容易发现统一曲线大致可分为 3 个特征段: 1) 吻合段, 即在平衡点左侧, 统一曲线和规范曲线非常接近, 处于基本吻合状态, 与规范安全水平相当; 2) 偏高段, 即在平衡点右侧, 靠近平衡点的一个区段, 统一曲线略微处于规范曲线的上方, 较规范安全度偏低; 3) 偏低段, 即在平衡点右侧, 远离平衡点的区段, 统一曲线明显低于规范公式, 比规范公式保守。

图 3(a)表示随着截面配筋率的改变 M_u-N_u 曲线的变化情况, 由图 3(a)可知, 随着配筋率的增大, 偏高段特征变得更加明显并且范围扩大, 而偏低段范围有所减小, 偏高段与偏低段出现一清晰的交点; 由图 3(b)可看出, 混凝土强度的提高使偏高段范围缩小并使之趋于吻合, 而偏低段的范围因此有明显的扩大; 比较图 3(c)中各曲线可知, 随着截面尺寸的改变, 统一曲线与规范公式比较的 3 个特征段变化不明显, 依旧保持其各自的特征。

4 统一公式与规范公式的配筋比较

4.1 配筋计算方法

工程设计中, 当构件承受变号弯矩作用或者为了施工方便时, 常采用对称配筋截面, 对于一个给定截面尺寸及材料强度的矩形截面偏心受压构件, 并且给定其轴向力设计值 N 和弯矩设计值 M , 按规范公式计算配筋可按下列步骤进行:

1) 由式(19)计算混凝土受压区高度系数 ξ 。

2) 比较 ξ 与 ξ_b , 当 $\xi \leq \xi_b$ 时, 则为大偏心受压构件, 则有:

$$A_s = A'_s = \frac{Ne - \alpha_1 f_c b h_0^2 \left(\xi - \frac{\xi^2}{2} \right)}{f'_y A'_s (h_0 - a'_s)} \quad (23)$$

如 $\xi > \frac{2a'_s}{h_0}$, 则取 $\xi = \frac{2a'_s}{h_0}$, 则式(23)转化为:

$$A_s = A'_s = \frac{N \left(\eta e_i - \frac{h}{2} + a'_s \right)}{f'_y A'_s (h_0 - a'_s)} \quad (24)$$

当 $\xi > \xi_b$ 时, 则为小偏心受压构件, 将 ξ 转化为:

$$\xi = \frac{N - \xi_b \alpha_1 f_c b h_0}{\frac{Ne - 0.43 \alpha_1 f_c b h_0^2}{(\beta_1 - \xi_b)(h_0 - a_s')} + \alpha_1 f_c b h_0} + \xi_b \quad (25)$$

配筋仍按照式(23)计算。

按照统一公式计算配筋时，可取消判断大小偏心类别这一步骤，只要把给定的轴力设计值 N 和考虑二阶效应后的弯矩设计值 M 直接代入式(18)，同时把 A_s 和 A'_s 代入式(4)、式(7)、式(9)和式(10)，因为对称配筋， $A_s = A'_s$ ，则可得式(18)为一个关于 A_s 的一元方程，利用数值二分法编程可得 A_s 和 A'_s 。

4.2 配筋比较

为了较全面地了解统一公式和规范公式的配筋对比情况，本文考虑了构件截面尺寸、钢筋强度等级、混凝土强度等级等条件的变化，并且选取了偏压构件受力过程中不同 e_0 的 $M-N$ 组合，即选取了 M_u-N_u 曲线中各阶段相应的 $M-N$ 组合。根据 4.1 节步骤分别得到相应构件的配筋率，具体见表 2。

由表 2 可发现：1) 由统一公式计算所得的钢筋面积与规范公式比较接近，满足工程精度要求；2) 除个别构件外，统一公式计算的配筋较规范公式偏小，但偏小幅度较小；3) 在大多数情况下，当构件为受拉破坏时，两公式的配筋面积基本一致，误差在 5% 以内；当个别构件受压破坏且配筋率较大时则误差较大，在 10% 左右，由此可知该 $M-N$ 设计值落在该构件 M_u-N_u 曲线的偏高段，但从 M_u-N_u 曲线对比中可以发现，偏高段范围较小，只有少数点落在偏高段上，可靠度分析结果表明统一公式满足可靠指标要求。

表 2 列出了不同截面性质的构件规范公式与统一公式的配筋比较。比较表中①、②、③项可知：截面尺寸对两公式的配筋误差影响较小，相对误差在截面为 800mm×800mm 最小。从表 2 中②和④项可知：钢筋强度等级基本不影响两公式的配筋吻合度。由表 2 中②、⑤、⑥可以看出，随着混凝土强度等级的改变，两公式的配筋误差变化较小基本满足配筋要求。

在实际工程中，往往有一些偏压构件轴心压力很大，但弯矩却很小，从本文 3.2 节中 M_u-N_u 曲线的对比中发现，这些接近轴心受压的小偏心构件的 $M-N$ 设计值正好落在统一公式 M_u-N_u 曲线的偏低区段，配筋应该比规范公式更保守。下面通过算例来比较此时统一公式与规范公式的配筋情况。

表 2 考虑最小配筋率两公式计算配筋率比较($l_0=3.3m$)
Table 2 Comparison of two formulas reinforcement area when considering the minimal reinforcement ratio ($l_0=3.3m$)

截面性质 (mm×mm)	$M/(kN \cdot m)$	N/kN	破坏 类别	规范公式	统一公式	相对 误差/(%)
				$\rho/(%)$	$\rho/(%)$	
① 400×400 HRB400 C30	200	100	受拉	1.08	1.06	-1.68
	200	500	受拉	0.78	0.76	-2.97
	200	1000	受拉	0.58	0.56	-3.74
	200	1500	受压	0.58	0.58	-
	200	2000	受压	0.86	0.75	-12.3
② 600×600 HRB400 C30	200	3000	受压	1.72	1.47	-14.4
	400	100	受拉	0.58	0.58	-
	400	500	受拉	0.44	0.42	-4.02
	400	2000	受拉	0.20	0.20	-
	400	3000	受压	0.20	0.20	-
③ 800×800 HRB400 C30	400	4000	受压	0.47	0.44	-6.59
	400	5000	受压	0.84	0.79	-6.14
	800	200	受拉	0.46	0.45	-1.49
	800	400	受拉	0.41	0.40	-2.79
	800	2000	受拉	0.20	0.20	-
④ 600×600 HRB335 C30	800	5000	受压	0.20	0.20	-
	800	6000	受压	0.20	0.20	-
	800	8000	受压	0.48	0.48	-
	400	100	受拉	0.70	0.69	-1.25
	400	500	受拉	0.52	0.50	-4.42
⑤ 600×600 HRB400 C40	400	2000	受拉	0.20	0.20	-
	400	3000	受压	0.22	0.23	1.91
	400	4000	受压	0.56	0.52	-6.54
	400	5000	受压	1.01	0.95	-6.14
	600	200	受拉	0.85	0.84	-1.40
⑥ 400×400 HRB400 C50	600	1000	受拉	0.58	0.55	-3.96
	600	3000	受拉	0.28	0.27	-5.16
	600	4000	受压	0.37	0.36	-1.81
	600	5000	受压	0.63	0.58	-8.5
	600	6000	受压	0.95	0.90	-5.27
$l_0=3.3m$	800	400	受拉	1.09	1.07	-1.74
	800	2000	受拉	0.63	0.59	-5.78
	800	4000	受拉	0.46	0.46	-
	800	5000	受压	0.61	0.57	-5.29
	800	6000	受压	0.88	0.79	-10.1
	800	8000	受压	0.63	0.58	-8.5

表 3 考虑最小配筋率两公式配筋比较($N=6000kN$)
Table 3 Comparison of two formulas reinforcement area when considering the minimal reinforcement ratio ($N=6000kN$)

截面性质 (mm×mm)	$M/(kN \cdot m)$	规范公式		统一 公式	相对 误差/(%)
		轴压公式	小偏心公式		
	0	2109	1817	2109	16.07
	10	-	1872	2559	36.70
600×600	20	-	1928	2594	34.54
HRB400	100	-	2096	2699	28.77
C30	150	-	2377	2874	20.91
$l_0=3.3m$	200	-	2659	3051	14.74
	250	-	2943	3228	9.68
	300	-	3512	3286	-6.44

从表3中可以发现: 1) 当 $M=0$ 时, 用小偏心公式计算得到的配筋面积与轴心受压公式计算的配筋面积出现矛盾, 小偏心计算得到的比轴压的小, 而统一公式的配筋正好与规范轴心受压公式的相等; 2) 当弯矩较小轴力较大时, 利用小偏心公式计算的偏压配筋比相应轴力下轴压配筋还小, 如表中用小偏心公式计算 $M=100\text{kN}\cdot\text{m}$ 和 $N=6000\text{kN}$ 组合时的面积才与用轴压公式计算轴压 $N=6000\text{kN}$ 时的配筋基本相等, 而事实上, 当轴压力一定时, 配筋应随着弯矩的增大而增大, 小偏心公式在接近轴压点时的计算较轴压点安全度偏低。统一公式配筋在轴压时与规范轴压一致并最小, 且随着弯矩增加逐步增大, 配筋较合理; 3) 统一公式比规范公式稍保守, 但两公式的配筋面积仍然较接近, 满足工程精度的要求。

5 结论

(1) 《规范》计算偏心受压构件正截面承载力时需要判断大小偏心, 计算步骤较繁琐; 《规范》偏压公式具有不连续性不可导性, 并且接近轴压点的小偏心段较轴压点安全度偏低。

(2) 本文提出的统一计算模式能使受弯、偏压和轴压三种承载力计算公式统一起来, 具有明确的物理意义。利用统一公式计算对称配筋偏压构件时可取消判断大小偏心类别, 并且计算所得的钢筋面积能返回统一公式验算, 统一公式与试验数据拟合较好, 且可靠指标满足《统一标准》的要求。但统一公式系数较为复杂, 因此该公式手算较为繁琐, 需要将统一公式简化成一个方便手算的计算公式, 但该算法需要进一步研究。

(3) 规范公式的 M_u-N_u 曲线会出现尖点, 并且小偏心段不能很好地与轴压点衔接, 不具有很好的物理意义; 统一公式的 M_u-N_u 曲线是一条连续光滑的曲线, 曲线连接了纯弯、偏压、轴压三个受力状态, 并在平衡点处于最高, 具有明确的物理意义。统一曲线和规范曲线的拟合程度较好, 偏差很小, 拟合程度随着偏压构件配筋率、截面尺寸、混凝土强度等级的改变而改变。

(4) 统一公式计算所得的钢筋面积与规范公式比较接近, 满足工程精度要求; 除了个别构件外, 统一公式计算的面积较规范公式偏小; 在大多数情况下, 当构件为受拉破坏时, 两公式的配筋面积基本一致; 当个别构件受压破坏且配筋率较大时则误

差较大; 从轴压到小偏心受压的配筋比较中可以看出规范在公式的衔接问题上物理意义不明确, 轴压与接近轴压的小偏心段可靠度不一致, 并且小偏心公式在接近轴压点时计算较轴压公式安全度偏低; 统一公式的精度满足工程的要求, 可靠指标满足《统一标准》的要求。

参考文献:

- [1] Sanaa S Alaoui, Richard E Klingner. Reinforced concrete sections under moment and axial load [J]. Concrete International, 2007, 29(10): 63-67.
- [2] Hossein Mostafaei, Toshimi Kabeyasawa. Axial-shear-flexure interaction approach for reinforced concrete columns [J]. ACI Structural Journal, 2007, 104(3): 218-226.
- [3] Mark Aschheim, Enrique Hernandez-Montes, Luisa Maria Gil-Martin. Optimal domains for flexural and axial loading [J]. ACI Structural Journal, 2008, 105(11): 720-728.
- [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.
GB 50010-2002, Concrete structure design code [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [5] 沈蒲生, 梁兴文. 混凝土结构设计原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
Shen Pusheng, Liang Xingwen. Concrete structural design principle [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [6] 车宏亚. 钢筋混凝土结构设计原理(上册)[M]. 天津: 天津大学出版社, 1990.
Che Hongya. Reinforced concrete structural design principle (book I) [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1990. (in Chinese)
- [7] 偏心受压构件强度专题研究组. 钢筋混凝土结构研究报告选集 II[C]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981.
Eccentric Compression Strength Group. Reinforced Concrete Structure Research Reports II [C]. Beijing: China Building Industry Press, 1981. (in Chinese)
- [8] 马芹永. 混凝土结构基本原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
Ma Qinyong. Concrete structural design principle [M]. Beijing: Machine Industrial Press, 2005. (in Chinese)
- [9] 梁兴文, 叶艳霞. 混凝土结构非线性分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
Liang Xingwen, Ye Yanxia. Nonlinear analysis of Concrete structural [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [10] 贡金鑫, 魏巍巍. 工程结构可靠性设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
Gong Jinxin, Wei Weiwei. Principles of reliability design of engineering structures [M]. Beijing: Machine Industrial Press, 2007. (in Chinese)
- [11] GB 50068-2001, 建筑结构可靠度设计统一标准[S]. 2001.
GB 50068-2001, Unified standard for reliability design of building structures [S]. 2001. (in Chinese)