

对称配筋偏心受压钢筋混凝土柱 N_u-M_u 曲线特性及数值分析

周清¹, 国伟¹, 齐麟²

1. 滨州市规划设计研究院有限公司, 山东 滨州 256600; 2. 中国民航大学交通科学与工程学院, 天津 300300

摘要:为分析截面面积、配筋率、钢筋强度、混凝土强度等参数对对称配筋偏心受压钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)柱的极限弯矩 M_u 与极限轴力 N_u (N_u-M_u)曲线的影响,推导对称配筋偏心受压RC柱的 M_u 与 N_u 的函数关系式并绘制 N_u-M_u 曲线。采用软件ANSYS对RC柱进行数值分析,分析柱底截面的最大极限弯矩与最大极限轴力数值分析结果与理论计算结果的相对差。研究表明:极限轴力随截面面积、配筋率、钢筋强度、混凝土强度的增大而增大,截面面积对其影响最大,混凝土强度、配筋率对其影响较小,钢筋强度对其影响最小;最大极限轴力、最大极限弯矩的理论计算结果均大于数值分析结果;最大极限弯矩的理论计算结果与数值分析结果的相对差大于最大极限轴力,前者约为10%,后者约为5%。

关键词:偏心受压RC柱;对称配筋; N_u-M_u 曲线;参数分析;数值分析

中图分类号:U448.35; U663.9⁺3; TU312

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2024)03-0091-08

引用格式:周清,国伟,齐麟. 对称配筋偏心受压钢筋混凝土柱 N_u-M_u 曲线特性及数值分析[J]. 山东交通学院学报, 2024, 32(3): 91-98.

ZHOU Qing, GUO Wei, QI Lin. The characteristics of N_u-M_u curve and numerical analysis of eccentrically loaded RC columns with symmetric reinforcement[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2024, 32(3): 91-98.

0 引言

桥墩是桥梁工程的主要受力构件,受到自重、上部荷载传来的竖向作用力和由桥面水平力引起的弯矩作用,通常按偏心受压构件设计结构^[1-3]。采用对称配筋形式时,偏心受压构件的极限轴力 N_u 与极限弯矩 M_u 存在一定的函数关系,根据函数关系可绘制 N_u-M_u 曲线,此曲线在桥梁工程的桥墩设计与加固改造中有重要的应用价值^[4-5]。

从对称配筋偏心受压钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)柱大、小偏心受压构件的判定方法与承载力计算角度考虑,张波等^[6]推导HRB600级钢筋的对称配筋大、小偏心受压柱的基本公式及偏心受压类型的判别公式,并给出矩形截面偏心受压构件的截面设计方法,讨论配筋率、钢筋强度等级对 N_u-M_u 曲线的影响;张海涛等^[7]针对钢筋混凝土偏心受压构件提出判定大、小偏心破坏的准则和标准化承载力的计算方法;高丽等^[8]通过算例、数值分析、图解等方法分析判断对称配筋偏心受压柱大、小偏心破坏形态的2种判断方法;曾亮等^[9]研究对称配置HRB500级高强钢筋的偏心受压构件大、小偏心受压的判定条件及截面配筋的计算方法。已有研究中对称配筋大、小受压构件的判定方法及承载力计算公式均存在一定差异,大多数仅考虑单个参数对 N_u-M_u 曲线的影响^[10-11]。

收稿日期:2023-02-24

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB2600504);山东省住房城乡建设科技计划项目(2021-R3-010, 2021-K5-028)

第一作者简介:周清(1982—),男,山东滨州人,正高级工程师,工学硕士,主要研究方向为建筑结构加固理论与工程应用, E-mail:zhouqingtianda@163.com。

本文根据钢筋混凝土结构基本理论和大、小偏心受压构件的判定方法,基于力与力矩平衡的条件,推导对称配筋大、小偏心受压构件的承载力计算公式,并绘制 N_u-M_u 曲线,讨论钢筋强度、混凝土强度、截面面积、配筋率等相关参数对 N_u-M_u 曲线的影响,根据各参数的影响程度排序,采用软件 ANSYS 对偏心受压构件进行数值分析并研究轴力和弯矩的数值分析结果与理论计算结果间的误差,以为同类结构设计提供理论依据。

1 对称配筋偏心受压 RC 柱 M_u-N_u 函数关系

1.1 对称配筋大偏心受压 RC 柱 M_u-N_u 的函数关系

作用在 RC 柱截面上的弯矩较大、轴力较小时,RC 柱处于大偏心受压状态^[12-14]。受压区域的混凝土达到设计强度 f_c ,受拉区域的钢筋达到设计强度 f_y 。RC 柱截面的有效受压区高度 x 满足

$$x \leq \xi_b h_0,$$

式中: ξ_b 为相对界限受压区高度, h_0 为截面的有效高度。

设混凝土极限应变为 ε_{cu} ,混凝土界限受压区高度为 x_n ,受压钢筋面积为 A_s' ,柱截面高度为 h ,受拉钢筋面积为 A_s ,钢筋合力点到柱受拉边缘的距离为 a_s ,钢筋弹性模量为 E_s ,钢筋应变为 ε_s ,受压区钢筋设计强度为 f_y' ,偏心距为 e_i ,混凝土强度折减系数为 α ,轴向压力为 N ,未达到设计强度的受拉钢筋应力为 σ_s ,柱截面宽度为 b 。对称配筋偏心受压 RC 柱应变及受力分析示意图如图 1、2 所示。

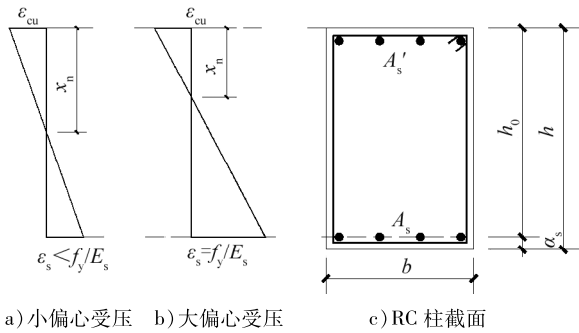


图 1 对称配筋偏心受压 RC 柱应变状态

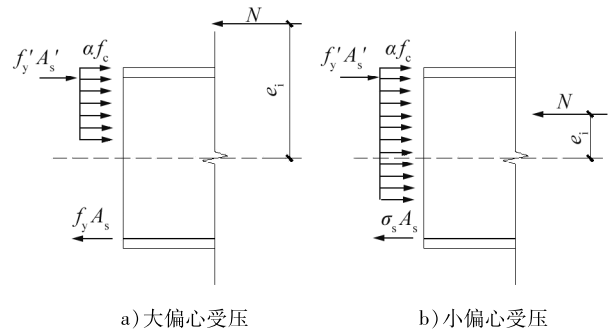


图 2 对称配筋偏心受压 RC 柱受力分析

大偏心受压 RC 柱截面破坏时,因钢筋屈服呈受拉破坏特征。大偏心受压 RC 柱同时满足力与力矩(对下部受力钢筋取力矩)平衡的 2 个基本方程^[15-19],力平衡方程为:

$$N = \alpha f_c b x + f_y' A_s' - f_y A_s, \quad (1)$$

力矩平衡方程为:

$$N(e_i + h/2 - a_s) = \alpha f_c b x (h_0 - x/2) + f_y' A_s' (h_0 - a_s'), \quad (2)$$

式中 a_s' 为钢筋合力点到 RC 柱受压边缘的距离。

偏心受压构件满足弯矩 $M = Ne_i$ 。

将对称配筋满足的条件 $A_s = A_s'$ 、 $f_y = f_y'$ 代入式(1)(2)并消去未知数 x ,将 N 、 M 替换为极限轴力 N_u 、极限弯矩 M_u ,得到 M_u-N_u 的函数关系为:

$$M_u = N_u e_i = -0.5 N_u^2 / (\alpha f_c b) + 0.5 N_u h + f_y' A_s' (h_0 - a_s'), \quad (3)$$

对称配筋的大偏心受压 RC 柱的 M_u 为 N_u 的二次函数。

1.2 对称配筋小偏心受压 RC 柱 M_u-N_u 的函数关系

作用在 RC 柱截面上的轴力较大、弯矩较小时,RC 柱处于小偏心受压状态^[20-22]。受压区域的混凝土达到设计强度 f_c ,但受拉区域的钢筋还未达到设计强度 f_y ,RC 柱截面的有效受压区高度 x 满足 $x > \xi_b h_0$ 。小偏心受压柱破坏时混凝土首先被压碎,呈受压破坏特征,如图 1a)所示。小偏心受压 RC 柱同样满足力与力矩(对下部受力钢筋取矩)平衡的 2 个基本方程,力平衡方程为:

$$N = \alpha f_c b x + f_y' A_s' - \sigma_s A_s, \quad (4)$$

式中: $\sigma_s = f_y(\xi - \beta) / (\xi_b - \beta)^{[15]}$, 其中 ξ 为混凝土相对受压区高度, 满足 $x = \xi h_0$, β 为混凝土强度系数, 当混凝土强度不大于 C50 时, $\beta = 0.8$ 。将 σ_s 代入式(4)得到

$$N = \alpha f_c b \xi h_0 + f_y' A_s' - f_y A_s (\xi - \beta) / (\xi_b - \beta)。 \quad (5)$$

将式(5)进行数学变换, 得到 ξ 与 N 的函数关系为:

$$\xi = \frac{\beta - \xi_b}{\alpha f_c b h_0 (\beta - \xi_b) + f_y A_s} N + \frac{f_y' A_s' \xi_b}{\alpha f_c b h_0 (\beta - \xi_b) + f_y A_s}。 \quad (6)$$

由式(6)可知, ξ 为 N 的一次函数, 为简化计算定义

$$\lambda_1 = \frac{\beta - \xi_b}{\alpha f_c b h_0 (\beta - \xi_b) + f_y A_s}, \lambda_2 = \frac{f_y' A_s' \xi_b}{\alpha f_c b h_0 (\beta - \xi_b) + f_y A_s},$$

式(6)可简化为

$$\xi = \lambda_1 N + \lambda_2。 \quad (7)$$

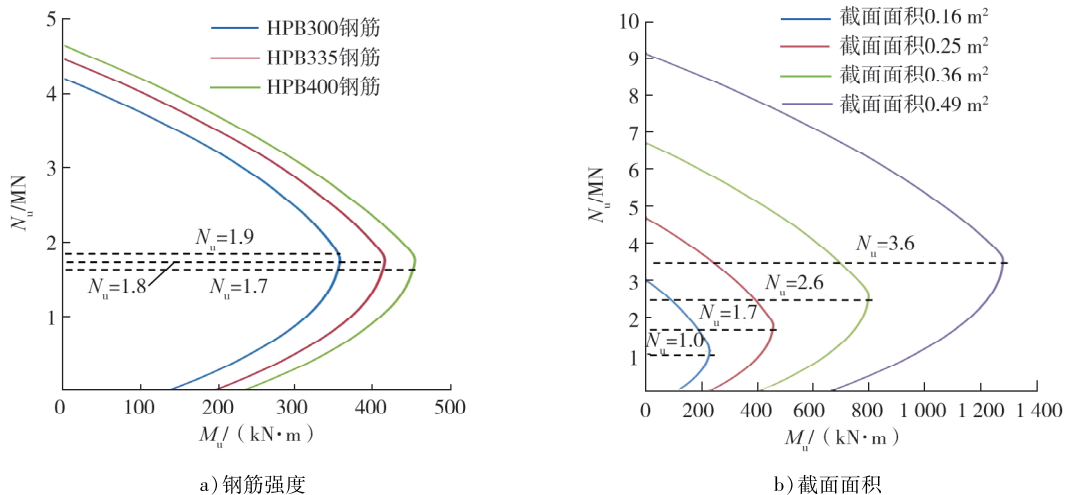
对称配筋满足条件 $A_s = A_s'$ 、 $f_y = f_y'$, 将式(7)与 $x = \xi h_0$ 代入式(2), 最终得到对称配筋小偏心受压柱 M_u-N_u 的函数关系为:

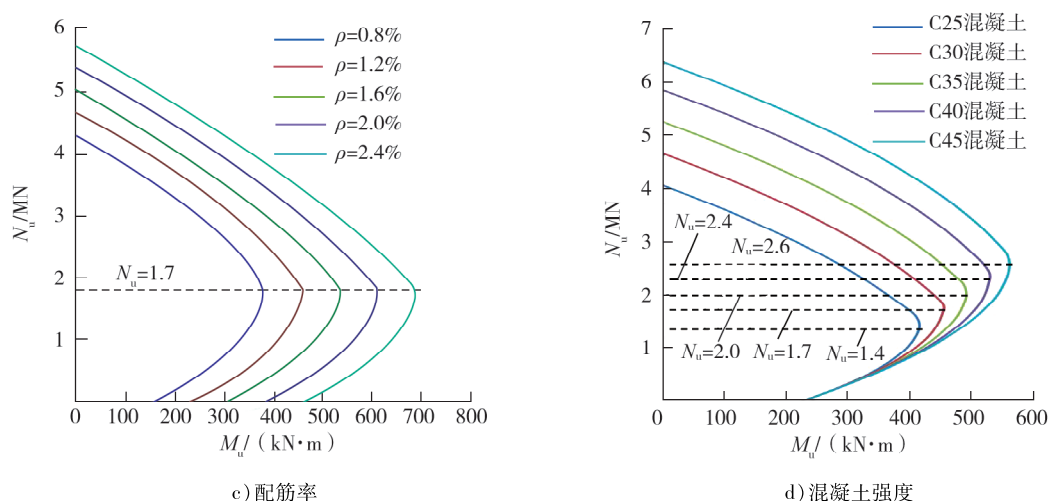
$$M_u = -0.5 \alpha f_c b h_0^2 \lambda_1^2 N_u^2 + (\alpha f_c b h_0^2 \lambda_1 - \alpha f_c b h_0^2 \lambda_1 \lambda_2 - 0.5 h + a_s) N_u + \alpha f_c b h_0^2 \lambda_2 - 0.5 \alpha f_c b h_0^2 \lambda_2^2 + f_y' A_s' (h_0 - a_s'), \quad (8)$$

可知, 对称配筋的小偏心受压 RC 柱的 M_u 为 N_u 的二次函数。

2 对称配筋偏心受压 RC 柱 N_u-M_u 曲线与影响因素分析

由对称配筋偏心受压 RC 柱的 M_u-N_u 函数关系可知, 已知材料强度与柱截面尺寸时, 任意给定的 N_u 均存在唯一对应的 M_u 。令 N_u 连续取值直至 $M_u = 0$, 可得到偏心受压 RC 柱的 M_u-N_u 曲线。实际工程中应用对称配筋偏心受压 RC 柱的 M_u-N_u 曲线时, 通常将自变量 N_u 与因变量 M_u 对换, 形成偏心受压 RC 柱的 N_u-M_u 曲线。由式(3)(8)可知, 影响对称配筋偏心受压 RC 柱承载力的参数主要为 f_y 、 f_c 、 b 、 h 与配筋率 ρ 。为研究各参数下偏心受压 RC 柱的 N_u-M_u 曲线, 定义 1 个标准柱作为参考基准, 假设该标准柱截面面积为 0.25 m^2 (截面为正方形, 边长为 0.5 m), 钢筋等级为 HRB400, 混凝土等级为 C30, 单侧配筋面积为 15 cm^2 , $\rho = 1.2\%$ 。 N_u-M_u 曲线理论计算所得最大极限弯矩为 $M_{u\max}$, 最大极限轴力为 $N_{u\max}$ 。按理论公式计算得到标准柱的 $M_{u\max} = 456 \text{ kN} \cdot \text{m}$, $N_{u\max} = 4.6 \text{ MN}$ 。在标准柱的基础上, 通过变换参数可得到 4 组不同钢筋强度、截面面积、配筋率、混凝土强度的对称配筋偏心受压 RC 柱 N_u-M_u 曲线, 如图 3 所示。



图 3 不同参数的对称配筋偏心受压 RC 柱的 N_u-M_u 曲线

由图 3 可知:1) $M_u=0$ 时,取得最大轴力, $N_u=0$ 时,未取得最大极限弯矩; $\xi=\xi_b$, $N_u=\alpha f_c \xi_b h_0$ 时取得最大极限弯矩。2) 大偏心受压, N_u 随 M_u 的增大而增大; 小偏心受压, N_u 随 M_u 的增大而减小。3) 对任意 N_u , 均有唯一的 M_u 与其对应, 部分 M_u 会出现大、小偏心 2 个对应的 N_u 。

由图 3 可知不同参数下 RC 柱的最大极限弯矩 $M_{u\max}$ 和最大极限轴力 $N_{u\max}$, 如表 1~4 所示。

表 1 不同钢筋强度下 RC 柱的 $M_{u\max}$ 和 $N_{u\max}$

钢筋强度	$M_{u\max}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$N_{u\max}/\text{MN}$
HPB300	359	4.2
HRB335	417	4.4
HRB400 ^①	456	4.6

①为标准柱参数。

表 2 不同截面面积下 RC 柱的 $M_{u\max}$ 和 $N_{u\max}$

截面面积/ m^2	$M_{u\max}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$N_{u\max}/\text{MN}$
0.16	227	2.8
0.25 ^①	456	4.6
0.36	798	6.6
0.49	1 279	9.0

①为标准柱参数。

表 3 不同配筋率下 RC 柱的 $M_{u\max}$ 和 $N_{u\max}$

配筋率/%	$M_{u\max}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$N_{u\max}/\text{MN}$
0.8	378	4.2
1.2 ^①	456	4.4
1.6	533	5.0
2.0	610	5.2
2.4	688	5.6

①为标准柱参数。

表 4 不同混凝土强度等级下 RC 柱的 $M_{u\max}$ 和 $N_{u\max}$

混凝土强度等级	$M_{u\max}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$N_{u\max}/\text{MN}$
C25	417	4.0
C30 ^①	456	4.6
C35	493	5.2
C40	531	5.8
C45	563	6.4

①为标准柱参数。

图 3a) 为 3 条 RC 柱 N_u-M_u 曲线, 钢筋强度不同, 其他条件与标准柱相同。轴力随钢筋强度的减小而减小, HPB300、HRB335、HRB400 的相对界限受压区高度 ξ_b 分别为 0.576、0.550、0.518, 分别在 $N_u=1.9$ 、1.8、1.7 MN 时取得 3 条曲线的最大极限弯矩。由表 1 可知: 钢筋强度分别为 HRB300、HPB335 时, 最大极限弯矩分别比标准柱减小 21.27%、8.55%, 最大极限轴力分别比标准柱减小 8.70%、4.35%。

图 3b) 为不同截面面积的 4 条 RC 柱 N_u-M_u 曲线, 除截面面积外, 其他条件与标准柱完全相同。由表 2 可知: 截面面积为 0.16 m^2 时, 最大极限弯矩和最大极限轴力分别比标准柱减小 50.22%、39.13%; 截

面面积为 0.36 m^2 时,最大极限弯矩和最大极限轴力分别比标准柱增大 75.00% 、 43.48% ;截面面积为 0.49 m^2 时,最大极限弯矩和最大极限轴力分别比标准柱增大 180.48% 、 95.65% 。

图 3c) 为 5 条 RC 柱 N_u-M_u 曲线,配筋率不同,其他条件与标准柱相同。由表 3 可知: $\rho=0.8\%$ 时,最大极限弯矩和最大极限轴力分别比标准柱减小 17.10% 、 8.70% ; $\rho=1.6\%$ 时,最大极限弯矩和最大极限轴力分别比标准柱增大 16.89% 、 13.64% ; $\rho=2.0\%$ 时,最大极限弯矩和最大极限轴力分别比标准柱增大 33.77% 、 18.18% ; $\rho=2.4\%$ 时,最大极限弯矩和最大极限轴力分别比标准柱增大 50.88% 、 27.27% 。

图 3d) 为 5 条 RC 柱 N_u-M_u 曲线,混凝土强度等级不同,其他条件与标准柱相同。 $N_u=0$ 时各曲线 $M_u=232 \text{ kN}\cdot\text{m}$, M_u 随 N_u 的增大而增大,直至 $\xi=\xi_b$ 时取得 $M_{u\max}$ 。由表 4 可知:混凝土强度等级为 C25 时,最大极限弯矩和最大极限轴力分别比标准柱减小 8.55% 、 13.04% ;混凝土强度等级为 C35 时,最大极限弯矩和最大极限轴力分别比标准柱增大 8.11% 、 13.04% ;混凝土强度等级为 C40 时,最大极限弯矩和最大极限轴力分别比标准柱增大 16.45% 、 26.09% ;混凝土强度等级为 C45 时,最大极限弯矩和最大极限轴力分别比标准柱增大 23.46% 、 39.13% 。

增大材料强度、截面面积、配筋率中的任一项,均可不同程度地提高偏心受压柱的 $M_{u\max}$ 与 $N_{u\max}$, 按对 $M_{u\max}$ 的影响从小到大的顺序排列依次为钢筋强度、混凝土强度、配筋率、截面面积,按对 $N_{u\max}$ 的影响从小到大的顺序排列依次为钢筋强度、配筋率、混凝土强度、截面面积。

3 对称配筋偏心受压 RC 柱的数值分析

3.1 数值分析模型

标准柱的受力简图如图 4 所示,对应的数值分析模型及应变云图如图 5 所示。

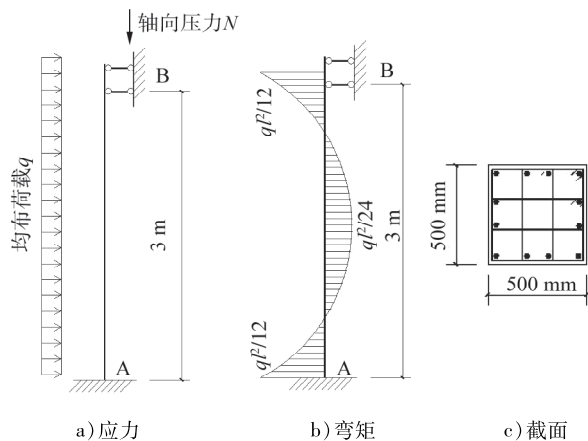


图 4 标准柱受力简图

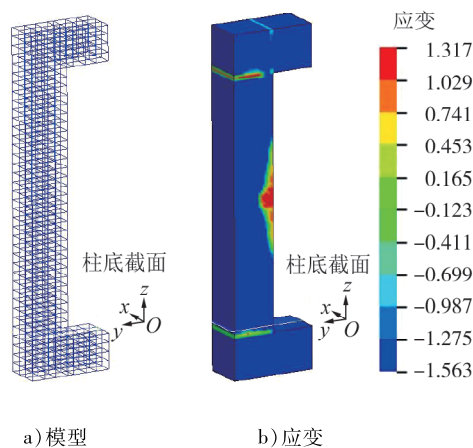


图 5 标准柱数值分析模型及应变云图

标准柱柱底为固定端约束,设置柱顶为可竖向滑动的支座以传递轴向压力 N 。水平均布荷载 q 产生固定端负弯矩 M^- 与跨中正弯矩 M^+ ,标准柱柱顶、柱底与柱中均处于偏心受压状态。标准柱底截面的弯矩与轴向压力均大于柱中截面,柱底截面为控制截面。

采用软件 ANSYS 进行数值模拟^[23-25],对标准柱同时施加轴力 N 与均布荷载 q ,荷载形式为持续静力荷载,持续 100 ms 。其中,C30 混凝土采用 SOILD 单元,密度为 2500 kg/m^3 ,弹性模量为 30 GPa ,泊松比为 0.2 ,极限抗拉、抗压强度分别为 30 、 3 MPa 。HRB400 钢筋采用 BEAM 单元,钢筋密度为 7850 kg/m^3 ,弹性模量为 206 GPa ,剪切模量为 7900 GPa ,泊松比为 0.3 。钢筋的设计抗拉强度、屈服抗拉强度分别为 360 、 400 MPa 。

3.2 理论计算结果与数值分析结果的对比分析

标准柱钢筋应达到设计抗拉强度 $f_y=360 \text{ MPa}$ 。相同情况下,标准柱的数值分析结果如图 6 所示。

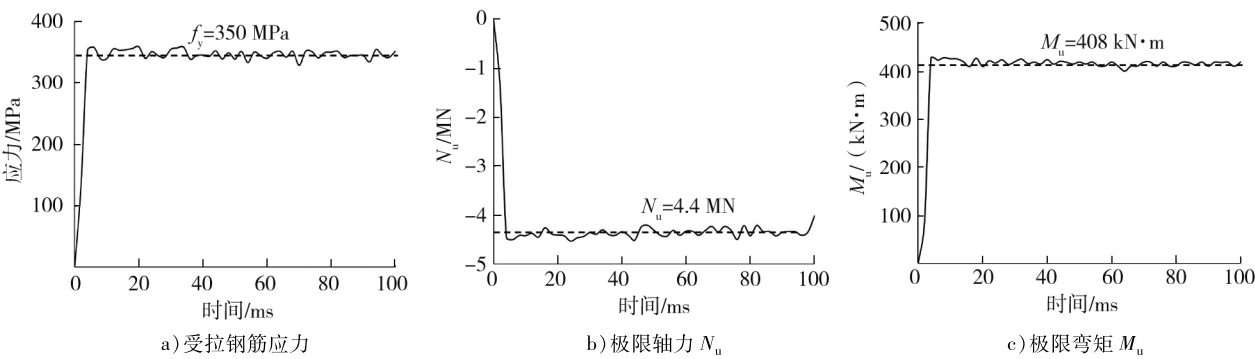


图 6 标准柱柱底截面钢筋应力、最大极限轴力与最大极限弯矩的数值分析曲线

由图 6 可知:持续静力荷载作用下,受拉钢筋的最大应力、柱底截面最大极限轴力和最大极限弯矩均在第 4 毫秒时出现并基本保持不变,数值分析的最大极限轴力 $N'_{umax}=4\ 400\ \text{kN}$,与理论计算结果的相对差 $E_1=4.35\%$ ($E_1=100\%\times(N'_{umax}-N_{umax})/N_{umax}$);数值分析的最大极限弯矩 $M'_{umax}=408\ \text{kN}\cdot\text{m}$,与理论计算结果的相对差 $E_2=10.53\%$ ($E_2=100\%\times(M'_{umax}-M_{umax})/M_{umax}$);数值分析的受拉钢筋应力为 $f_y'=350\ \text{MPa}$,与理论计算结果的相对差 $E_3=2.78\%$ ($E_3=100\%\times(f_y'-f_y)/f_y$)。标准柱的数值分析结果与理论计算结果相差不大。

不同钢筋强度、混凝土强度、截面面积、配筋率下最大极限轴力、最大极限弯矩的理论计算结果与数值分析结果对比如表 5~8 所示。

表 5 不同钢筋强度的最大极限轴力、最大极限弯矩理论计算结果与数值分析结果对比

截面面积/ m^2	钢筋型号	混凝土等级	$\rho/\%$	N_{umax}/MN	N'_{umax}/MN	$E_1/\%$	$M_{umax}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M'_{umax}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$E_2/\%$
0.25	HPB300	C30	1.2	4.20	4.08	2.86	359	328	8.64
	HRB335			4.40	4.25	3.41	417	377	9.60
	HRB400			4.60	4.40	4.35	456	408	10.53

表 6 不同混凝土强度的最大极限轴力、最大极限弯矩理论计算结果与数值分析结果对比

截面面积/ m^2	钢筋型号	混凝土等级	$\rho/\%$	N_{umax}/MN	N'_{umax}/MN	$E_1/\%$	$M_{umax}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M'_{umax}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$E_2/\%$
0.25	HRB400	C25	1.2	4.00	3.85	3.75	417	375	10.07
		C30		4.60	4.40	4.35	456	408	10.53
		C35		5.20	5.03	3.27	493	440	10.75
		C40		5.80	5.55	4.31	531	475	10.55
		C45		6.40	6.04	5.63	563	503	10.66

表 7 不同截面面积的最大极限轴力、最大极限弯矩理论计算结果与数值分析结果对比

截面面积/ m^2	钢筋型号	混凝土等级	$\rho/\%$	N_{umax}/MN	N'_{umax}/MN	$E_1/\%$	$M_{umax}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M'_{umax}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$E_2/\%$
0.16	HRB400	C30	1.2	2.80	2.71	3.21	227	203	10.57
0.25				4.60	4.40	4.35	456	408	10.53
0.36				6.60	6.35	3.78	798	715	10.40
0.49				9.00	8.58	4.67	1 279	1 142	10.71

表8 不同配筋率的最大极限轴力、最大极限弯矩理论计算结果与数值分析结果对比

截面面积/ m^2	钢筋型号	混凝土等级	$\rho/\%$	$N_{\text{umax}}/\text{MN}$	$N'_{\text{umax}}/\text{MN}$	$E_1/\%$	$M_{\text{umax}}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M'_{\text{umax}}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$E_2/\%$
0.25	HRB400	C30	0.8	4.20	4.05	3.57	378	347	8.20
			1.2	4.60	4.40	4.35	456	408	10.53
			1.6	5.00	4.77	4.60	533	465	12.75
			2.0	5.20	4.93	5.19	610	522	14.43
			2.4	5.60	5.33	4.82	688	579	15.84

由表5~8可知:1)理论计算的最大极限轴力、最大极限弯矩分别大于数值分析的最大极限轴力、最大极限弯矩,理论计算的最大极限弯矩与数值分析的 E_2 大于理论计算的最大极限轴力与数值分析的 E_1 ;2)各参数对 E_1 影响较小, $E_1 \approx 5\%$;3) E_2 随钢筋强度、配筋率的增大而增大,配筋率对 E_2 的影响最大。4)混凝土强度、截面面积对 E_2 的影响较小,混凝土强度、截面面积变化时 $E_2 \approx 10\%$ 。

E_1 、 E_2 产生的原因为:1)数值分析中网格尺寸、边界条件、材料模型及参数选取等因素均会对计算结果产生一定影响,而理论计算中各参数均为理想状态,数值分析结果小于理论计算结果;2)数值分析的柱顶轴力直接通过混凝土单元的节点传递至柱底截面,钢筋单元对轴力产生的影响较小, E_1 较小。与最大极限轴力不同,最大极限弯矩是由钢筋与混凝土单元共同作用的结果,钢筋与混凝土单元间的接触等因素会对最大极限弯矩的数值分析结果产生一定误差, $E_2 > E_1$, E_2 与钢筋强度、配筋率间存在密切关系。钢筋抗拉强度越大、配筋率越高,其与混凝土单元间的接触越复杂, E_2 越大。

4 结论

1)推导对称配筋偏心受压 RC 柱极限弯矩 M_u 与极限轴力 N_u 满足的函数关系式,并根据函数关系式绘制 N_u-M_u 曲线。 N_u-M_u 曲线受配筋率、截面尺寸、材料强度等因素影响。按对 M_{umax} 的影响从小到大的顺序排列依次为钢筋强度、混凝土强度、配筋率、截面面积;按对 N_{umax} 的影响从小到大的顺序排列依次为钢筋强度、配筋率、混凝土强度、截面面积。

2)采用软件 ANSYS 建立不同参数对称配筋偏心受压 RC 柱的数值分析模型,研究柱底截面的最大极限轴力、最大极限弯矩的理论计算结果与数值分析结果间的相对差。研究发现,各参数均对最大极限轴力的相对差影响较小,随各参数的改变,最大极限轴力的相对差约为 5%。因钢筋与混凝土单元间的相互作用,最大极限弯矩的相对差大于最大极限轴力。混凝土强度、截面面积对最大极限弯矩相对差的影响较小,钢筋强度、配筋率影响较大,配筋率影响最大。

参考文献:

- [1] 黄靓,鲁懿虬,徐紫鹏.对钢筋混凝土偏压构件承载力计算公式的修正建议[J].工程力学,2012,29(6):169-175.
- [2] 金浏,李炎锡,张仁波,等.锈蚀钢筋混凝土柱偏心受压性能精细化模拟[J].中国科学(技术科学),2022,52(4):599-612.
- [3] 黄靓,张怀安,江超,等.拉-弯-剪复合受力混凝土构件的承载力计算研究[J].工业建筑,2014,44(11):172-177.
- [4] 张波,邱利军,梁玲玉,等.矩形截面偏心受压柱对称配筋计算的程序设计[J].河北建筑工程学院学报,2019,37(4):79-82.
- [5] 贾英杰,丁永刚,姚谦峰. N_u-M_u 曲线中菱形区概念在矩形混凝土柱大小偏压判别中的应用[J].四川建筑科学研究,2009,35(1):47-50.
- [6] 张波,邱利军,陈学良,等. HRB600 级钢筋矩形截面偏心受压柱对称配筋计算研究[J].建筑结构,2021,51(16):116-120.

- [7] 张海涛,罗昊冲. 对称配筋钢筋混凝土偏心受压构件的计算研究[J]. 中外公路,2017,37(4):126-130.
- [8] 高丽,何明胜,曾晓云. 对称配筋偏心受压构件大小偏心受压判别的研究[J]. 结构工程师,2014,30(2):52-55.
- [9] 曾亮,华建民,兰定筠,等. HRB500级高强钢筋偏心受压截面对称配筋设计研究[J]. 四川建筑科学研究,2013,39(4):55-58.
- [10] 戎贤,申成成,张健新. HRB600钢筋混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. 混凝土,2020(2):28-32.
- [11] 戎贤,段微微,王浩. 配置600MPa级高强钢筋T形柱抗震性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程,2017,39(2):148-154.
- [12] 杨勇新,赵进阶,岳清瑞,等. HRBF500钢筋混凝土柱轴压试验研究[J]. 工业建筑,2009,39(11):26-28.
- [13] 王军. 矩形截面大偏心受压构件计算分析[J]. 科学技术与工程,2014,14(1):277-279.
- [14] 肖光宏,汤名豪,谢鑫. 偏心受压构件大小偏心不确定性的研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2018,37(11):21-25.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家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,2015.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 高层建筑混凝土结构技术规程:JGJ3—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [18] 周俐俐. 多层钢筋混凝土框架设计实例详解:手算与PKPM应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.
- [19] 李斌,薛刚,牛建刚,等. 混凝土结构设计原理[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,2017.
- [20] 邱鑫,高佳丰,肖红庆. 钢筋混凝土小偏心受压构件未屈服钢筋应力公式推导[J]. 建筑技术开发,2019,46(5):12-14.
- [21] 杜修力,卢爱贞,赵均. 小偏心钢筋混凝土柱受压性能的尺寸效应试验[J]. 建筑科学与工程学报,2015,32(1):1-7.
- [22] 王新忠,李传习. 玄武岩纤维混凝土长柱偏心受压承载能力试验研究[J]. 硅酸盐通报,2016,35(10):3242-3246.
- [23] 江见鲸,陆新征. 混凝土结构有限元分析[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,2013.
- [24] 尚晓江,邱峰. ANSYS结构有限元高级分析方法与范例应用[M]. 3版. 北京:中国水利水电出版社,2015.
- [25] 李裕春,石党勇,赵远. ANSYS/LS-DYNA11.0基础理论与工程实践[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.

The characteristics of N_u - M_u curve and numerical analysis of eccentrically loaded RC columns with symmetric reinforcement

ZHOU Qing¹, GUO Wei¹, QI Lin²

1. Binzhou Planning & Design Research Institute Co., Ltd., Binzhou 256600, China;

2. College of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract: To analyze the influence of parameters such as cross-sectional area, reinforcement ratio, steel bar strength, and concrete strength etc., the relationship between the ultimate bending moment M_u and the ultimate axial force N_u (N_u - M_u) curve of eccentrically loaded reinforced concrete (RC) columns with symmetrical reinforcement, the functional relationship between M_u and N_u for symmetrically reinforced eccentrically loaded RC columns is derived and the N_u - M_u curve is plotted. Software ANSYS for numerical analysis of RC columns is used to analyze the errors between the numerical analysis results of the maximum ultimate bending moment and the maximum ultimate axial force of the column base section and the theoretical calculation results. The study finds that the ultimate axial force increases with the increase of cross-sectional area, reinforcement ratio, rebar strength, and concrete strength, with the cross-sectional area having the greatest influence, concrete strength

(下转第103页)