钢筋混凝土 Z 形柱正截面承载力与延性

焦俊婷 刁 波 叶英华 李淑春

(北京航空航天大学 土木工程系，北京 100083)

摘 要：针对目前异形结构技术规程中没有明确 Z 形柱设计的技术规定，基于双向压弯钢筋混凝土构件截面的非线性分析和编制的相应分析程序，对钢筋混凝土 Z 形柱正截面极限承载力和延性进行了数值分析. 研究了轴压比、荷载角、配筋率、混凝土强度、肢长厚比等因素对双向压弯钢筋混凝土 Z 形柱正截面极限承载力、延性的影响，给出无量纲的正截面极限承载力的曲线和曲率延性与各种影响因素的关系曲线. 得出一些有益的结论：Z 形柱正截面极限承载力受轴压比、荷载角、混凝土强度、纵筋配筋率、肢长厚比的影响较大，箍筋配筋对正截面极限承载力影响不明显；轴压比是 Z 形柱截面延性的最主要影响因素，而肢长厚比对柱延性影响不大.

关 键 词：钢筋混凝土；正截面承载力；延性

中图分类号：TU 375

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2007)01-0110-05

Bearing capacity and ductility of reinforced concrete columns with Z-shaped cross-section

Jiao Junting Diao Bo Ye Yinghua Li Shuchun

(Dept. of Civil Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Against there is no design specification for reinforced concrete (RC) columns with Z-shaped cross-section in the technical regulation of structure with special shaped columns, the bearing capacity and ductility of RC Z-shaped cross-section were computed by utilizing the nonlinear analysis of RC cross-sections subjected to biaxial bending and compression and its computer program. Some factors affecting the bearing capacity and ductility of RC Z-shaped cross-section, were researched, for example ratio of axial compression, loading angle, reinforced ratio, concrete strength and ratio of limb length to limb thickness, and some curves of the bearing capacity and ductility were drawn. Some favorable results were obtained: the bearing capacity is mainly affected by ratio of axial compression, loading angle, concrete strength, long reinforced ratio and ratio of limb length to limb thickness mainly affect, and hoop reinforcement has little affect. ratio of axial compression is the most important affect factor for the ductility, but there is a little affect for the ductility from ratio of limb length to limb thickness.

Key words: reinforced concrete; bearing capacity; ductility

钢筋混凝土异形柱由于室内拐角处不出现凸棱，可增加使用面积等优点，在建筑结构中应用越来越多，如：L 形角柱、T 形边柱、十形中柱和 Z 形楼梯间柱等. 但由于异形柱截面不规则，在双向压弯荷载作用下截面中和轴一般不垂直弯矩作用平面，其位置随轴压比、荷载角、配筋率、混凝土强度、截面尺寸的改变而改变；截面极限承载力和延性也受上述诸多因素影响. 目前国内外对 L、T 和

收稿日期：2006-01-06

基金项目：国家自然科学基金项目资助(50678016)

作者简介：焦俊婷(1968—)，女，河北保定人，副教授，jiao1968@163.com.

十形截面柱的研究较多,相关技术规程也有规定[1].然而对 Z 形柱的研究还不够深入.本文在运用已提出的截面高斯积分法[2-3]建立的截面本构关系的基础上,对影响双向压弯钢筋混凝土 Z 形柱正截面极限承载力和截面延性的轴压比、荷载角、配筋率、混凝土强度、截面尺寸多个因素进行了全面分析,得出双向压弯钢筋混凝土 Z 形柱正截面极限承载力、截面延性的一些规律,为工程设计提供参考.

分析中不考虑受拉混凝土对截面刚度的贡献;假设截面受力前后保持平截面;忽略翘曲和扭转效应;假定钢筋的应力-应变关系为理想弹塑性;假定混凝土的应力-应变关系为文献[4]建议的 Kent-Park 模型.

1　本构关系

钢筋混凝土任意截面如图 1 所示.

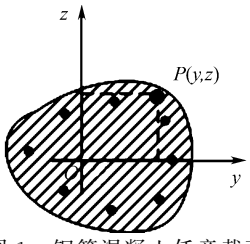

图 1　钢筋混凝土任意截面

1.1　基本方程

依据平截面假设,截面上截面力等于钢筋和混凝土应力之和.即

$$\left.\begin{aligned} N &= \iint_{A_c} \sigma_c(\varepsilon)\,\mathrm{d}A_c + \sum_{i=1}^{n} \sigma_s(\varepsilon) A_i \\ M_y &= \iint_{A_c} \sigma_c(\varepsilon) z\,\mathrm{d}A_c + \sum_{i=1}^{n} \sigma_s(\varepsilon) z_i A_i \\ M_z &= -\iint_{A_c} \sigma_c(\varepsilon) y\,\mathrm{d}A_c - \sum_{i=1}^{n} \sigma_s(\varepsilon) y_i A_i \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

式中,N,M 分别表示截面上轴力和绕轴弯矩;角标 y,z 分别表示截面上 y 轴和 z 轴;σ,A 分别表示应力和面积;角标 c,s 分别表示混凝土和钢筋;角标 i 表示第 i 根钢筋;n 表示截面上钢筋总根数.

1.2　截面刚度

对式(1)进行变分得:

$$\left.\begin{aligned} \mathrm{d}N &= \iint_{A_c} (E_{ct}\,\mathrm{d}\varepsilon)\,\mathrm{d}A_c + \sum_{i=1}^{n} (E_{st}\,\mathrm{d}\varepsilon) A_i \\ \mathrm{d}M_y &= \iint_{A_c} (E_{ct}\,\mathrm{d}\varepsilon \cdot z)\,\mathrm{d}A_c + \sum_{i=1}^{n} (E_{st}\,\mathrm{d}\varepsilon \cdot z_i) A_i \\ \mathrm{d}M_z &= -\iint_{A_c} (E_{ct}\,\mathrm{d}\varepsilon \cdot y)\,\mathrm{d}A_c - \sum_{i=1}^{n} (E_{st}\,\mathrm{d}\varepsilon \cdot y_i) A_i \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

式中,E_{ct},E_{st} 分别表示混凝土和钢筋材料的切线模量,$E_{ct}=\mathrm{d}\sigma_c(\varepsilon)/\mathrm{d}\varepsilon$,$E_{st}=\mathrm{d}\sigma_s(\varepsilon)/\mathrm{d}\varepsilon$.

如图 1 所示,依据平截面假设,截面上任意点 $P(y,z)$ 的应变 $\boldsymbol{\epsilon}$ 为

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + z\phi_y - y\phi_z = \boldsymbol{y}^{\mathrm{T}}\,\tilde{\boldsymbol{\epsilon}} \quad (3)$$

式中,ε_0,φ 分别表示截面坐标原点的轴向应变和绕轴曲率,角标 y,z 表示同上;$\boldsymbol{y}^{\mathrm{T}}=[1 \quad z \quad -y]$;$\tilde{\boldsymbol{\epsilon}}$ 表示截面应变矢量,$\tilde{\boldsymbol{\epsilon}}^{\mathrm{T}}=[\varepsilon_0 \quad \phi_y \quad \phi_z]$.式(3)的增量为

$$\mathrm{d}\varepsilon = \boldsymbol{y}^{\mathrm{T}}\,\mathrm{d}\,\tilde{\boldsymbol{\epsilon}} \quad (4)$$

将式(4)带入式(2)得:

$$\mathrm{d}\boldsymbol{P} = \boldsymbol{D}_t\,\mathrm{d}\,\tilde{\boldsymbol{\epsilon}} \quad (5)$$

式中,$\mathrm{d}\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}=[\mathrm{d}N \quad \mathrm{d}M_y \quad \mathrm{d}M_z]$;$\boldsymbol{D}_t$ 为 3×3 对称截面切线刚度矩阵.

2　Z 形柱截面数值分析

利用上述截面本构关系,对影响等肢 Z 形柱正截面极限承载力和截面延性的多个因素进行了数值分析.Z 形柱截面如图 2 所示,其中 L,b 分别表示截面的肢长、肢宽,α 表示荷载角,纵筋采用 HRB335 级筋,箍筋采用 HPB235 级筋.

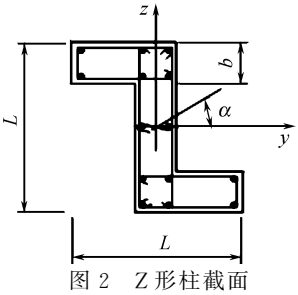

图 2　Z 形柱截面

2.1　正截面极限承载力的数值分析

2.1.1　轴压比 n 的影响

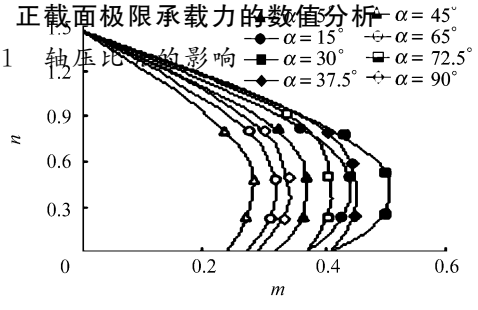

图 3　不同 α 情况的 n-m 关系曲线

图3～图8给出在不同影响因素下，钢筋混凝土Z形柱 n 与截面相对极限弯矩 m 的关系曲线，即 n-m 关系曲线. 图中 n 表示轴压比标准值；m 表示正截面的相对极限弯矩. 由图3～图8可以看出，n 是Z形柱正截面极限承载力重要影响因素之一. n 的大小决定着Z形柱的破坏形式. 当 n 小于Z形柱的界限轴压比时，柱发生延性好的大偏心受压破坏；反之，则发生脆性的小偏心受压破坏. 同时还发现，钢筋混凝土Z形柱的界限破坏轴压比值几乎不随荷载角 α、混凝土强度、肢长厚比 $\lambda(\lambda=L/b)$、纵筋配筋率 ρ、箍筋配筋的不同而变化，稳定在约0.4值附近，这一点不同于L形柱、T形柱.

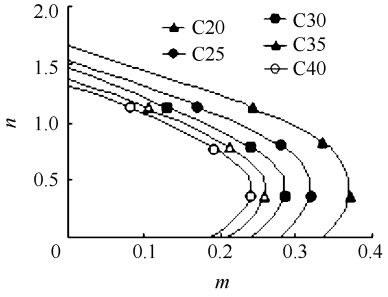

图4 不同混凝土强度情况的 n-m 关系曲线

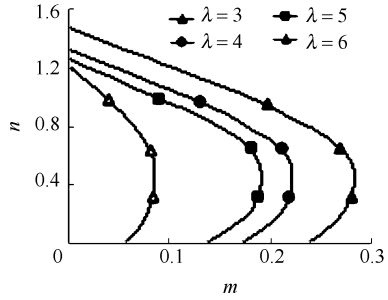

图5 不同 λ 情况的 n-m 关系曲线

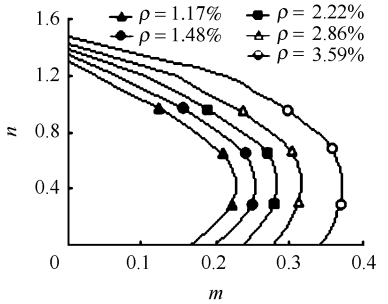

图6 不同 ρ 情况的 n-m 关系曲线

2.1.2 α 的影响

图3给出当混凝土强度、λ、ρ、箍筋配筋一定时，不同 α 情况下钢筋混凝土Z形柱的 n-m 关系曲线，其中混凝土强度为C30，$\lambda=3$，$\rho=1.83\%$，箍筋为 ϕ6@150. 由图3可以看出，α 不同，Z形柱的 m 不同，在 α 由5°达到30°的过程中，m 逐渐增大，$\alpha=30°$时，m 最大；在 α 由30°达到90°的过程中，m 逐渐减小，$\alpha=90°$时，m 最小. 这主要原因是：当 $\alpha=30°$时截面上混凝土的受压面积最大；当 $\alpha=90°$时截面上混凝土的受压面积最小. α 是影响Z形柱正截面极限承载力的重要因素之一.

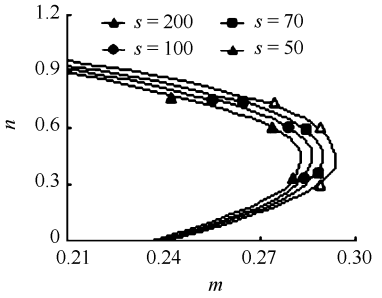

图7 不同 s 情况的 n-m 关系曲线

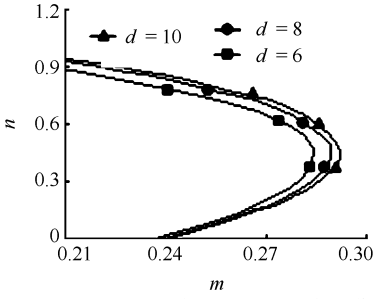

图8 不同 d 情况的 n-m 关系曲线

2.1.3 混凝土强度的影响

图4给出当 α、λ、ρ、箍筋配筋一定时，不同混凝土强度情况下钢筋混凝土 Z 形柱的 n-m 关系曲线，其中 $\alpha=90°$，$\lambda=3$，$\rho=1.83\%$，箍筋为 ϕ6@150. 由图4可以看出，当 n 相同时，Z形柱的 m 随混凝土强度增大而减小. 这表明尽管混凝土强度可以提高截面承载力，但是混凝土强度的提高，使得截面的 m 较低.

2.1.4 λ 的影响

图5给出当 α、混凝土强度、ρ、箍筋配筋一定时，不同 λ 情况下钢筋混凝土Z形柱的 n-m 关系曲线，其中 $\alpha=90°$，混凝土强度为C30，$\rho=1.83\%$，箍筋配筋为 ϕ6@150. 由图5可以看出，Z形柱的 m 随 λ 的增大而减小.

2.1.5 ρ 的影响

图6给出当 α、混凝土强度、λ、箍筋配筋一定时，不同 ρ 情况下钢筋混凝土Z形柱的 n-m 关系曲线，其中 $\alpha=90°$，混凝土强度为C30，$\lambda=3$，箍筋为 ϕ6@150. 由图6可以看出，随 ρ 的增加，Z形柱的 m 增加.

2.1.6 箍筋配筋的影响

图7、图8给出当 α、混凝土强度、λ、ρ 一定时，不同箍筋配筋情况下钢筋混凝土Z形柱的 n-m

关系曲线,其中 $\alpha=90°$,混凝土强度为 C30,$\lambda=3$,$\rho=1.83\%$. 图 7 为箍筋直径 d 不变而箍筋间距 s 改变时的情况,$d=6$;图 8 为 s 不变而 d 改变时的情况,$s=100$. 由图 7、图 8 可以看出,当改变 s 时,随着 s 减小,Z 形柱的 m 略有增加;当改变 d 时,随着 d 增大,Z 形柱的 m 略有增加. 因此改变箍筋配筋对 Z 形柱的 m 略有影响.

2.2　截面延性的数值分析

截面延性,通常采用曲率延性比作为延性指标,即:$\mu=\varphi_u/\varphi_y$;其中,μ 表示截面曲率延性比;φ 表示曲率;角标 u 表示受压钢筋失稳或弯矩下降到最大弯矩的 70%状态,角标 y 表示受拉钢筋屈服或混凝土压应变达到 −0.003 3 时的状态[5].

2.2.1　α 的影响

图 9 给出当 n、混凝土强度、ρ、λ、箍筋配筋一定时,不同 α 情况下钢筋混凝土 Z 形柱的 μ-α 关系曲线,其中混凝土强度为 C30,$\lambda=4$,$\rho=1.83\%$,箍筋为 ϕ6 @150. 由图 9 可以看出,当 n 小于 0.4 时,截面 μ 受 α 影响较大;当 n 大于等于 0.4 时,截面 μ 随 α 的变化很小,接近一水平直线.

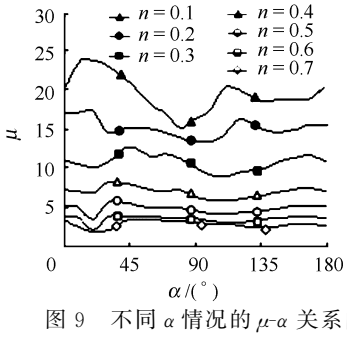

图 9　不同 α 情况的 μ-α 关系曲线

2.2.2　n 的影响

图 10 给出当混凝土强度、α、ρ、λ、箍筋配筋一定时,不同 n 情况下钢筋混凝土 Z 形柱的 μ-n 关系曲线,其中混凝土强度为 C30,$\lambda=4$,$\rho=1.83\%$,箍筋为 ϕ6 @150. 由图 10 可以看出,随 n 的增大,μ 减小.

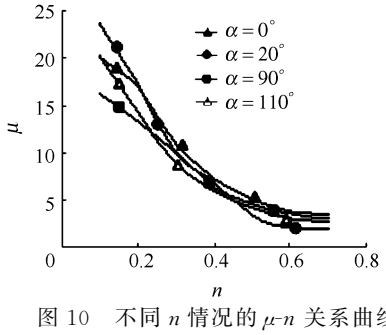

图 10　不同 n 情况的 μ-n 关系曲线

2.2.3　混凝土强度的影响

图 11 给出当 α、ρ、λ、箍筋配筋一定时,不同混凝土强度情况下钢筋混凝土 Z 形柱的 μ-n 关系曲线,其中 $\alpha=90°$,$\rho=1.83\%$,$\lambda=4$,箍筋为 ϕ6 @150. 由图 11 可以看出,当 n 小于等于 0.2 时,μ 受混凝土强度影响很小;当 n 大于 0.2 时,随混凝土强度的增大,μ 明显降低.

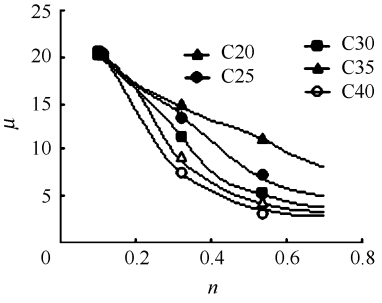

图 11　不同混凝土强度情况的 μ-n 关系曲线

2.2.4　λ 的影响

图 12 给出当 α、ρ、混凝土强度、箍筋配筋一定时,不同 λ 情况下钢筋混凝土 Z 形柱的 μ-n 关系曲线,其中 $\alpha=90°$,$\rho=1.83\%$,混凝土强度为 C30,箍筋为 ϕ6 @150. 由图 12 可以看出,λ 对钢筋混凝土 Z 形柱截面的 μ 影响不大.

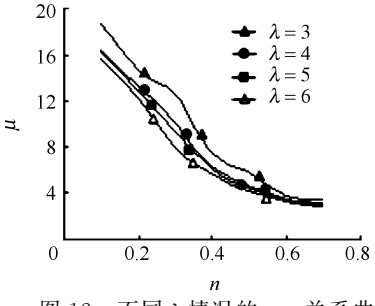

图 12　不同 λ 情况的 μ-n 关系曲线

2.2.5　ρ 的影响

图 13 给出当 α、λ、混凝土强度、箍筋配筋一定时,不同 ρ 情况下钢筋混凝土 Z 形柱的 μ-n 关系曲线,其中 $\alpha=90°$,$\lambda=4$,混凝土强度为 C30,箍筋为 ϕ6 @150. 由图 13 可以看出,当 n 小于 0.2 时,在 n 相同的情况下 ρ 越大 μ 越小;当 n 大于等于 0.2 时,在 n 相同的情况下 ρ 越大 μ 越大.

2.2.6　s/d 的影响

图 14 给出当 n、α、ρ、混凝土强度、λ 一定时,不同 s/d 情况下钢筋混凝土 Z 形柱的 μ-n 关系曲线,其中 $\alpha=90°$,$\rho=1.83\%$,混凝土强度为 C30,$\lambda=4$. 由图 14 可以看出,当 n 一定时,μ 随 s/d 的增加而减小.

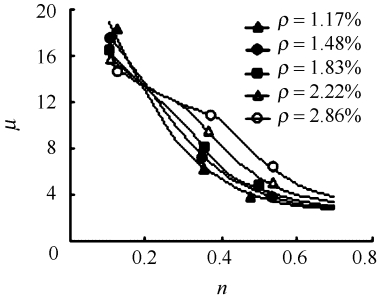

图 13 不同 ρ 情况的 μ-n 关系曲线

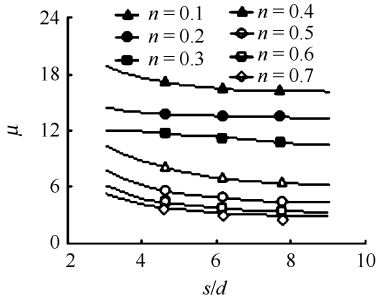

图 14 不同 s/d 情况的 μ-s/d 关系曲线

3 结 论

通过对双向压弯钢筋混凝土 Z 形柱正截面极限承载力和延性的数值分析,得出以下结论:

1) Z 形柱正截面极限承载力的破坏类型类似矩形截面的极限承载力,分为大偏心受压和小偏心受压.

2) Z 形柱正截面极限承载力在 $\alpha=90°$ 时,截面的承载力最弱,即 $\alpha=90°$ 是 Z 形柱最不利荷载角.建议设计时,Z 形柱正截面极限承载力应满足最不利荷载角的承载力要求.

3) Z 形柱正截面极限承载力受轴压比、荷载角、混凝土强度、纵筋配筋率、肢长厚比的影响较大,箍筋配筋对正截面极限承载力影响不明显.

4) 轴压比是 Z 形柱截面延性的最主要影响因素,随轴压比的增大,柱的延性减小.其次,影响柱截面延性的因素是:荷载角、混凝土强度、纵筋配筋率、箍筋配筋等因素.肢长厚比对柱截面延性影响不大.

5) Z 形柱的设计宜兼顾截面承载力和延性要求.建议设计时,综合考虑影响正截面极限承载力和延性的主要影响因素来提高 Z 形柱可靠性.

参考文献 (References)

[1] JGJ149-2006,混凝土异形柱结构技术规程[S]
JGJ149-2006,Technical specification for concrete structures with specially shaped columns[S](in Chinese)

[2] 焦俊婷,叶英华,刁波.钢筋混凝土偏压构件截面非线性分析高斯积分[J].北京航空航天大学学报,2003,29(4):370-373
Jiao Jungting, Ye Yinghua, Diao Bo. Gauss numerical integration in nonlinear analysis of reinforced concrete members under eccentric compression loading[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(4): 370-373(in Chinese)

[3] Jiao Junting, Ye Yinghua, Diao Bo. Bearing capacity analysis of reinforced concrete L-shape cross-section under biaxial eccentric compression [J]. Progress in Natural Science, 2003, 13(6):429-433

[4] Park R, Paulay T. Reinforced concrete structures[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1975

[5] 赵艳静,陈云霞,王玲永.钢筋砼异形截面双向压弯柱延性性能的理论研究[J].建筑结构,1999(1):16-21
Zhao Yanjing, Chen Yunxia, Wang Lingyong. Research on ductility of reinforced concrete special shaped columns subjected to biaxially eccentric loading[J]. Building Structures, 1999(1):16-21(in Chinese)

[6] 申冬建,陈云霞,赵艳静.Z 形截面钢筋混凝土偏压柱的简化设计方法究[J].建筑结构,2001(11):18-20
Shen Dongjian, Chen Yunxia, Zhao Yanjing. Simple design method of reinforced concrete Z-shaped columns subjected to axially eccentric loading[J]. Building Structures, 2001(11): 18-20(in Chinese)

[7] 徐海燕,薛海宏,袁志华.Z 形截面柱正截面承载力的试验与分析[J].华东交通大学学报,2004,21(1):8-11
Xu Haiyan, Xue Haihong, Yuan Zhihua. Experimental and theoretical research on load-bearing capacity of Z-shaped R C columns [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2004, 21(1): 8-11(in Chinese)

[8] GB50010-2002,混凝土结构设计规范[S]
GB50010-2002,Concrete structure design code[S](in Chinese)

(责任编辑:张 嵘)