

Z形截面柱延性性能及轴压比限值研究

王启文¹, 许贻懂¹, 陈云霞²

(1 深圳市建筑设计研究总院有限公司, 深圳 518031; 2 天津大学建筑工程学院, 天津 300072)

[摘要] 为了配合《混凝土异形柱结构技术规程》(JGJ 149—2006) 修订增设 Z 形截面柱的相关规定, 对 34 616 根 Z 形柱的延性进行了非线性有限元计算分析, 研究了弯矩作用方向角、轴压比、截面肢长比及箍筋的配置等因素对 Z 形柱的截面曲率延性的影响, 分析得到其延性变化规律。通过对 Z 形柱截面曲率延性进行回归分析, 得到其设计轴压比与配箍特征值的关系, 进而得到 Z 形截面柱的轴压比限值及箍筋加密区的最小配箍特征值的要求。

[关键词] Z 形截面柱; 延性; 轴压比限值; 配箍特征值

中图分类号: TU375 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2013)01-0048-06

Research on limited value of axial compression ratio and performance of ductility for Z-shaped RC columns

Wang Qiwen¹, Xu Yidong¹, Chen Yunxia²

(1 Shenzhen General Institute of Architectural Design and Research Co., Ltd., Shenzhen 518031, China;

2 School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to add correlative regulation of Z-shaped column for revising *Technical specification for concrete structures with specially shaped column* (JGJ 149—2006), ductilities of 34 616 Z-shaped columns were calculated and analyzed by nonlinear-finite element method. Many relevant factors, including action direction angle of bending moment, axial compression ratio, length ratio of two legs of inequiaxial Z-shaped column and scheme of lateral reinforcement etc., were analyzed, and its section curvature ductility behaviors were summarized. On the base of regression analysis for the section curvature ductility of Z-shaped columns, the designed value of axial compression ratio was obtained in relation with characteristic value for providing stirrup or hoop. Then the limited value of axial compression ratio and minimum characteristic value for providing stirrup or hoop in densified zone of Z-shaped columns were obtained.

Keywords: Z-shaped column; ductility; limited value of axial compression ratio; characteristic value for providing stirrup or hoop

0 引言

随着异形柱结构体系在全国的推广和应用, 设计人员经常在异形柱结构中遇到 Z 形截面柱, 而《混凝土异形柱结构技术规程》(JGJ 149—2006) (简称《规程》) 中仅对 L 形、T 形、十字形柱有规定, 且迄今为止, 尚未见相关文献对 Z 形截面柱的延性进行系统的分析和研究。为了配合《规程》修订增设 Z 形截面柱的相关规定, 对 34 616 根 Z 形柱的延性进行了非线性有限元计算分析。

1 Z 形截面柱延性性能分析

1.1 程序说明

根据文[1]编制计算机程序, 并作如下修改:

(1) Z 形截面平均应变基本上符合平截面假定^[2]。

(2) 忽略压区混凝土的收缩、徐变影响, 不考虑钢筋在加载过程中的粘结滑移。

(3) 不考虑 Z 形柱在加载时腹板的扭转变形。

(4) 压区混凝土的应力-应变关系(图 1)采用改进的 Kent-Park 模型^[3]:

AB 段($\varepsilon_c \leq k\varepsilon_0$):

$$\sigma_c = kf_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{k\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{k\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (1)$$

BC 段($\varepsilon_c > k\varepsilon_0$):

$$\sigma_c = kf_c [1 - Z_m(\varepsilon_c - k\varepsilon_0)] \quad \sigma_c \geq 0.2kf_c \quad (2)$$

其中:

$$Z_m = \frac{0.5}{\frac{3 + 0.29f'_c}{145f'_c - 1000} + 0.75\rho_{sv} \sqrt{\frac{h_c}{s_h}} - 0.002k} \quad (3)$$

$$k = 1 + \rho_{sv}(f_{yv}/f'_c) \quad (4)$$

式中: k 为由于约束箍筋的存在使混凝土强度增大的系数; ε_0 为未约束混凝土达到最大应力时对应的应变值, 取为 0.002; f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度, 近似取为 $f'_c = 0.8f_{cu}$; f_{cu} 为我国混凝土立方体抗压强度; ρ_{sv} 为柱的体积配箍率; h_c 为约束箍筋外缘所包围的混凝土宽度; s_h 为箍筋的间距; f_{yv} 为箍筋的屈服强度。

作者简介: 王启文, 博士, 教授级高工, 执行总工程师, 一级注册结构工程师, Email: wangqiwen@sadi.com.cn.

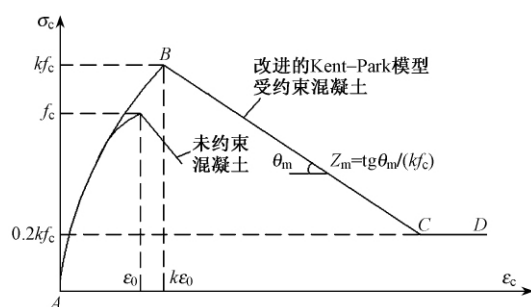
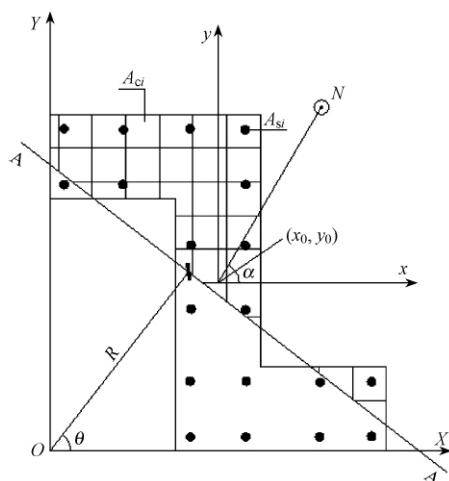


图 1 受约束混凝土应力-应变关系
(改进的 Kent-Park 模型)

(5) 双向压弯 Z 形截面柱非线性全过程分析所建立的坐标系、几何参数如图 2 所示。



注: x_0, y_0 为截面形心坐标; A-A 为截面中和轴; R 为中和轴至计算坐标原点的距离; θ 为通过原点的中和轴法线与 x 轴的夹角, 即中和轴法线的方向角; N 为偏心作用轴力; α 为弯矩作用方向角, 是指截面作用一偏心力 N 时, 荷载作用点与形心的连线和形心 x 轴正向的夹角, 规定逆时针为正。

图 2 Z 形截面柱坐标系的建立

1.2 程序计算结果与试验结果的比较

运用本文计算程序对文 [4] ~ [6] 中的试验构件进行计算分析, 见表 1。结果表明, 柱截面曲率延性比的理论计算值与试验值吻合得较好。

柱截面曲率延性比的理论计算值与试验结果比较 表 1

截面形式	试件编号	试验值	电算值	误差 / %	弯矩作用方向角 / °
L 形 ^[5]	Z-4	3.59	3.86	-7.52	135
矩形 ^[6]	Z-6	6.73	6.52	-3.1	15
十字形 ^[6]	Z-2	13.06	14.18	8.6	15
	Z-3	12.87	13.88	7.83	30
	Z-4	11.44	14.46	26.4	45
	Z-7	6.19	7.68	24.15	0
	Z-8	6.42	7.96	24	15
T 形 ^[4]	Z-10	6.41	6.48	1.02	45
	No4	4.81	5.15	-7.07	22.5
	No9	7.49	8.55	-14.15	67.5
	No10	5.28	5.57	-5.49	90

1.3 计算结果分析

1.3.1 计算参数

Z 形柱截面尺寸 $b \times h-b_1-b_2$ (图 3): Z200 × 500-350-350; Z200 × 600-400-400; Z200 × 700-450-450; Z200 × 800-500-500; Z250 × 800-525-525; Z200 × 500-400-400; Z200 × 600-500-500; Z200 × 700-500-500; Z200 × 800-400-400; Z200 × 600-400-500; Z200 × 800-500-400; Z250 × 800-550-450。若 $b_1 = b_2$ 且 $h = b_1 + b_2 - b$, 则为等肢 Z 形柱; 否则为不等肢 Z 形柱; 等肢 Z 形柱弯矩作用方向角 α : $0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ, 112.5^\circ, 135^\circ, 157.5^\circ, 180^\circ$; 不等肢 Z 形柱弯矩作用方向角 α : $0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ, 112.5^\circ, 135^\circ, 157.5^\circ, 180^\circ, 202.5^\circ, 225^\circ, 247.5^\circ, 270^\circ, 292.5^\circ, 315^\circ, 337.5^\circ, 360^\circ$; 标准轴压比 $n_k = N_k / (A f_{ck})$: 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6; 纵筋 (HRB335) 直径 d : 18 ~ 25mm; 箍筋 (HPB300) 直径 d_v : 6 ~ 10mm; 混凝土强度等级: C30 ~ C45; 箍筋间距 s : 70 ~ 150mm。Z 形截面柱纵筋、箍筋和拉筋均参照《规程》的构造要求布置, 如图 3 所示。

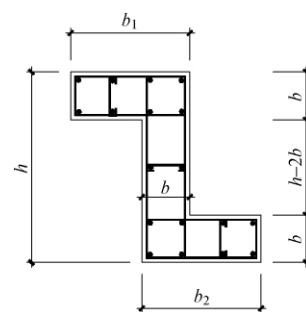


图 3 Z 形截面柱钢筋布置图

1.3.2 各参数对 Z 形柱截面曲率延性的影响

(1) 弯矩作用方向角和轴压比的影响

从图 4 可以看出, 对于等肢 Z 形柱 Z200 × 700-450-450, 当轴压比不大于 0.3 时, 弯矩作用方向角 $\alpha = 112.5^\circ$ 时, 截面曲率延性最好, 135° 时截面延性最差; 而对于不等肢 Z 形柱 Z200 × 600-400-500, 当轴压比不大于 0.3 时, 弯矩作用方向角 $\alpha = 292.5^\circ$ 时, 截面曲率延性最好, 337.5° 时截面延性最差。这主要是因为弯矩作用方向角的不同, Z 形截面柱受压区形状及受拉纵筋数量不同造成的。图 5 给出了其他条件相同的情况下, 两种 Z 形柱的截面延性最好

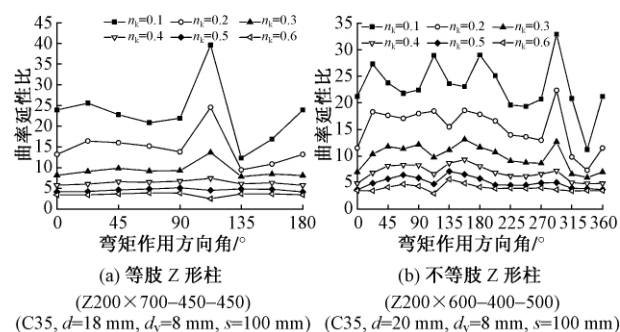


图 4 单向加载作用下 Z 形柱曲率延性比
与弯矩作用方向角的系数曲线

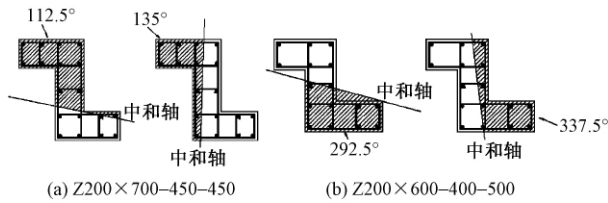


图5 Z形柱中和轴示意图

和最差弯矩作用方向角的中和轴示意图。从图中不难看出,在其他条件均相同的情况下,相比延性差的试件,在延性好的试件所对应的弯矩作用方向角的作用下,受压区宽度大,受拉纵筋少,受压区的高度相对较小,这样,在相同的拉筋屈服应变情况下,得到的屈服曲率 ϕ_y 偏小,另一方面在相同的纵筋压曲应变下,极限曲率 ϕ_u 就会偏大,从而得到截面曲率延性比 $\mu_\phi = \phi_u / \phi_y$ 较大,即截面延性好。另外,从图4还可看出,随着轴压比的增大(大于0.3),弯矩作用方向角对Z形截面柱曲率延性的影响减小。

此外,对不同Z形截面柱进行分析得到:对于等肢Z形柱,不同截面尺寸下延性最好和最差的弯矩作用方向角相同;但对于不等肢Z形柱,随着Z形柱的翼缘的不同且腹板高度的不同,延性最差、最好的弯矩作用方向角发生变化。当Z形柱一侧的翼缘减小到一定数量时,其延性变化规律向L形柱靠拢。这是由于随着截面尺寸的变化,在相同的弯矩作用方向角作用下,中和轴的位置不同,从而改变了受压区分布及高度,随着拉区和压区纵向钢筋到中和轴距离的变化,得到不同的屈服曲率 ϕ_y 和极限曲率 ϕ_u ,由此引起了曲率延性比 μ_ϕ 的差异。

从分析电算结果可知,轴压比的大小是决定Z形柱破坏形态的重要指标,随着轴压比的增大,Z形截面柱由大偏心受压破坏发展为界限破坏、小偏心受压破坏,且截面曲率延性下降(图4)。

(2) 纵筋直径的影响

以截面Z200×700-450-450和Z200×600-400-500,混凝土强度等级为C35,箍筋直径为8mm,弯矩作用方向角为45°,标准轴压比 $n_k = 0.3, 0.4, 0.5$,箍筋间距 $s = 60, 80, 100, 120, 140, 150\text{mm}$ 为例加以分析,得到不同纵筋直径下箍筋间距与曲率延性比的关系曲线,如图6所示。

从图6可以看出,在其他条件相同的情况下,不管是等肢Z形柱还是不等肢Z形柱,随着纵筋直径的增大(即纵向钢筋的配筋率的增大),柱截面延性略有提高。由于纵筋直径的增大,同等轴压比的情况下,截面屈服曲率 ϕ_y 略有提高,且随着箍筋间距与纵筋直径之比减小,延缓了纵筋的压曲,进而有效

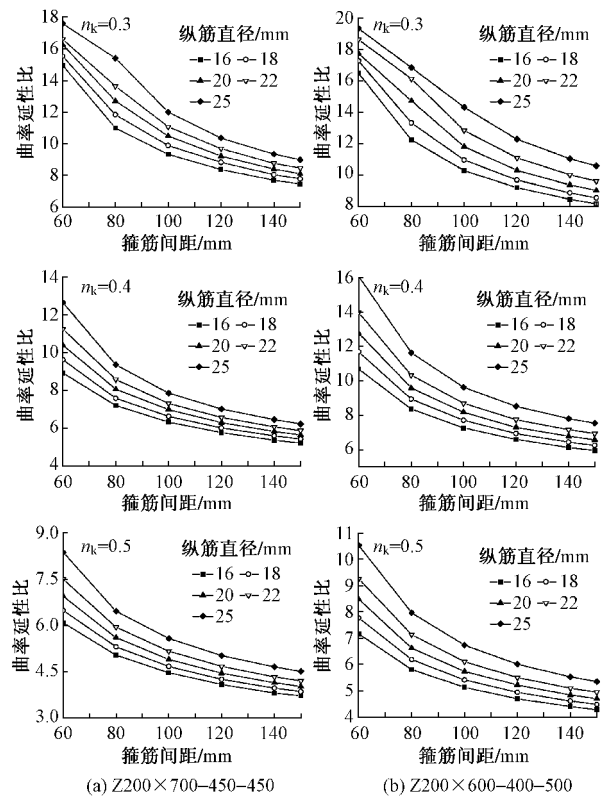


图6 纵筋直径对Z形柱曲率延性比的影响

地提高了柱截面极限曲率 ϕ_u ,从而提高了截面延性。但随着箍筋间距的增大,箍筋对混凝土的约束作用降低,混凝土的极限应变减小,进而对截面延性影响减小。由此可见,一般情况下,增大纵筋直径可提高柱截面的延性。为了提高柱截面的延性,选用纵筋直径 d 的同时需考虑合理的箍筋间距 s 。

(3) 混凝土强度等级的影响

图7是等肢Z形柱Z200×700-450-450、弯矩作用方向角0°、纵筋直径20mm、箍筋 $\phi 10@100$ 和不等肢Z形柱Z200×600-400-500、弯矩作用方向角45°、纵筋直径18mm、箍筋 $\phi 8@100$,在不同混凝土强度等级下得到的标准轴压比与曲率延性比的关系曲线。

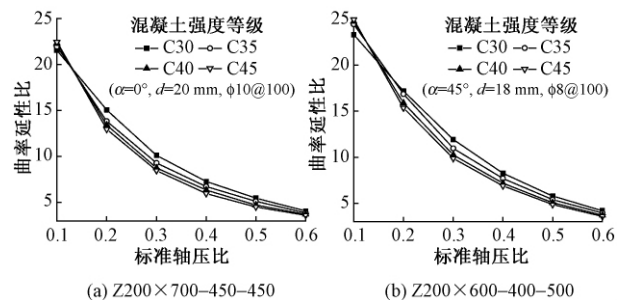


图7 混凝土强度等级对Z形柱曲率延性比的影响

从图7不难看出,尽管Z形柱截面和弯矩作用方向角不同,但随着混凝土强度等级的提高,Z形柱

截面延性下降,且随着轴压比的增大,混凝土强度等级影响很小,基本可以忽略其影响。其实混凝土强度等级对 Z 形柱截面延性的影响主要融于轴压比的变化中,若受到相同外在轴压力时,提高混凝土强度等级,可以降低柱截面的轴压比,从而提高了柱截面的延性;但轴压比相同时,混凝土强度等级对 Z 形柱截面延性的影响可以忽略不计。

(4) 箍筋的横向约束能力的影响

表 2 为 Z 形柱在不同箍筋配置的情况下计算参数及非线性分析得到的计算结果,相应弯矩-曲率关系曲线见图 8。从表 2 和图 8 可知,其他条件相同的情况下,不同的箍筋配置得到的屈服曲率 ϕ_y 大致相等。1-1 和 1-2 及 3-1 和 3-2 两组构件中,Z 形柱的体积配箍率相同,采用 $\phi 8@78$ 的箍筋比 $\phi 10@125$ 得到的极限曲率 ϕ_u 有所提高,从而 1-1 和 3-1 相应的曲率延性比 μ_ϕ 分别提高了 13.725% 和 19.090%,这主要是以下两方面的原因引起的: 1) 由于其他条件相同,采用较小的箍筋间距 s 得到了较小的箍筋间距与纵筋直径之比,也即减小了纵筋

的无支撑长度,从而提高了纵筋的受压失稳应变,延缓了纵筋的压曲失稳; 2) 采用较小的箍筋间距 s 增加了横向钢筋对混凝土的约束能力,使得混凝土应力-应变关系曲线下降段趋于平缓,两个方面都不同程度地提高了柱截面的极限曲率 ϕ_u ,进而得到较高的延性。因此,当 Z 形柱采用相同的体积配箍率 ρ_v 时,采用较小的箍筋直径 d_v 及箍筋间距 s 比采用较大箍筋直径 d_v 及箍筋间距 s 得到的柱截面延性好。另外 2-1 及 2-2、4-1 及 4-2、5-1 及 5-2 和 6-1 及 6-2 四组 Z 形柱构件中,其他条件相同,采用较大箍筋直径 d_v 及箍筋间距 s 比采用较小的箍筋直径 d_v 及箍筋间距 s 的柱截面体积配箍率 ρ_v 大,但由于随着箍筋间距 s 的增大,相应箍筋间距 s 与纵筋直径 d 之比 s/d 也变大,对核心混凝土及纵筋的综合约束作用反而减弱,并不能有效地提高柱截面极限曲率 ϕ_u ,从而得到较低的延性。由此可见,采用较大的箍筋直径 d_v 以提高体积配箍率 ρ_v 而不减小箍筋间距 s 不一定能提高 Z 形柱的延性;只有考虑箍筋间距 s 与纵筋直径 d 的比值达到一定要求时,增大体

Z 形柱在不同箍筋配置下的计算参数及结果汇总

表 2

编号	计算参数								计算结果					
	截面尺寸/mm	设计轴压比 n	混凝土强度等级	纵筋直径/mm	箍筋配置	s/d	体积配箍率及其提高百分比		弯矩作用方向角/ $^\circ$	破坏控制条件	屈服曲率 ϕ_y	极限曲率 ϕ_u	曲率延性比 μ_ϕ	$\frac{\mu_{\phi 2}-\mu_{\phi 1}}{\mu_{\phi 2}}/\%$
							$\rho_v/\%$	提高百分比/%						
1-1	Z200 × 700-450-450	0.50	C40	18	$\phi 8@78$	4.33	1.51	0	135	$0.85M_{max}$	0.005	0.058	11.600	13.725
1-2					$\phi 10@125$	6.94	1.51	0			0.005	0.051	10.200	
2-1		0.60	C45	20	$\phi 8@95$	4.75	1.24	1.61	45	$0.85M_{max}$	0.009	0.060	6.667	9.098
2-2					$\phi 10@150$	7.50	1.26	1.61			0.009	0.055	6.111	
3-1	Z200 × 600-400-500	0.50	C35	20	$\phi 8@78$	3.90	1.50	0	45	纵筋压曲	0.008	0.131	16.375	19.090
3-2					$\phi 10@125$	6.25	1.50	0			0.008	0.110	13.750	
4-1		0.60	C40	22	$\phi 8@95$	4.32	1.23	1.63	90	$0.85M_{max}$	0.008	0.076	9.500	8.571
4-2					$\phi 10@150$	6.82	1.25	1.63			0.008	0.070	8.750	
5-1	Z200 × 700-450-450	0.60	C35	22	$\phi 8@80$	3.64	1.47	17.01	90	$0.85M_{max}$	0.007	0.074	10.571	13.616
5-2					$\phi 10@110$	5.00	1.72	17.01			0.007	0.073	10.429	
6-1	Z200 × 600-400-500	0.50	C40	25	$\phi 8@80$	3.20	1.46	28.77	45	纵筋压曲	0.008	0.138	17.250	3.759
6-2					$\phi 10@100$	4.00	1.88	28.77			0.008	0.133	16.625	

注: M_{max} 是指柱截面所能承受的最大弯矩值; $n = N/(Af_c)$ 。

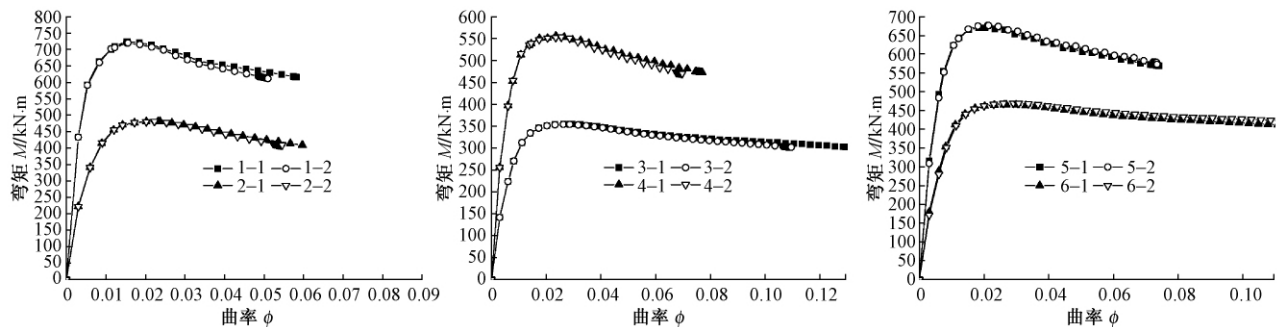


图 8 Z 形柱弯矩-曲率关系曲线

积配箍率 ρ_v 才能提高其相应的延性。

综上所述,与文[1],[7],[8]相比,影响钢筋混凝土 Z 形截面柱延性的重要因素仍然是轴压比、弯矩作用方向角及箍筋的配置,纵筋直径是与箍筋间距综合起来影响柱截面延性,混凝土强度等级对 Z 形柱延性影响较小,基本可以忽略不计。

2 Z 形截面柱轴压比限值

由于地震作用的方向具有随机变动性,轴压比的问题应综合考虑同一直线正反两个弯矩作用方向角的情况,本文采用的统计分析方法与其他异形柱相同^[1]。

2.1 不等肢 Z 形截面柱肢长比对其轴压比的影响

前面已提到,对于不等肢 Z 形柱随着肢长及腹板高度的变化,其延性最好和最差的弯矩作用方向角是变化的,而文中对 Z 形截面柱的轴压比分析是考虑最不利的弯矩作用方向角区域,因此,研究其肢长比的影响是从综合影响其轴压比的情况来加以分析的,间接反映了 Z 形柱截面在最不利方向角下其延性的好坏。采用文[1]回归分析的方法得到各不等肢 Z 形柱设计轴压比与配箍特征值的关系曲线,见图 9。

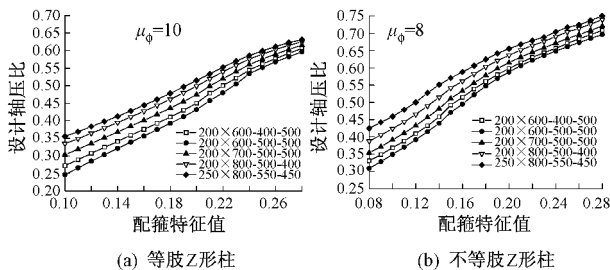
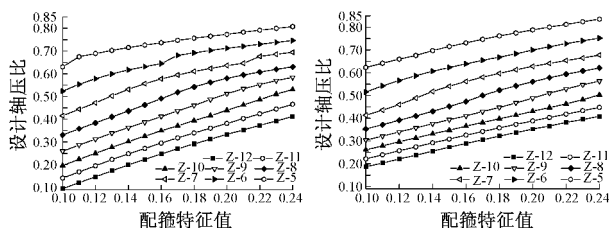


图 9 Z 形柱不同肢长时设计轴压比与配箍特征值关系曲线

计算的 Z 形截面 Z200 × 600-400-500, Z200 × 600-500-500, Z200 × 700-500-500, Z200 × 800-500-400, Z250 × 800-550-450 两个方向的肢长比依次为 1.16, 1.33, 1.14, 1.14, 1.06。从图 9 可以看出,肢厚相同时,随两个方向肢长比的增大, Z 形柱轴压比下降,即截面的曲率延性下降,肢厚不同时,随着肢厚的增大,截面的延性也略有上升,此变化规律与其他不等肢异形柱相同^[7]。另外,从图 9 还可以看出, Z200 × 700-500-500 和 Z200 × 800-500-400 两个方向肢长比均为 1.14,但腹板高的 Z 形柱截面延性要略好。需要特别说明的是,从回归分析 Z200 × 500-350-350 和 Z200 × 500-400-400 的结果来看,由于腹板高度太小,得到的轴压比相比其他 Z 形截面柱降低得较多,因此建议 Z 形柱腹板净高 ($h - 2b$) 不宜小于 200mm。

2.2 各抗震等级下 Z 形柱轴压比限值及箍筋加密区最小配箍特征值的确定

对 34 616 根 Z 形柱采用文[1]的方法进行回归分析,并参考文[9]取一、二、三、四级抗震等级下 Z 形柱的曲率延性比 μ_{ϕ} 分别为 11 ~ 12, 9 ~ 10, 7 ~ 8, 5 ~ 6, 且设计轴压比 $n = N / (A f_c) = 1.68 n_k$, 则可得到各抗震等级下配箍特征值 λ_v 与设计轴压比 n 的关系曲线,见图 10。



(a) 等肢 Z 形柱

(b) 不等肢 Z 形柱

注: Z-12 表示 Z 形柱截面曲率延性比取 12, 其他类同。

图 10 Z 形柱设计轴压比与配箍特征值的关系曲线

要确定轴压比限值,必须先确定 Z 形柱可能配置的配箍特征值的上限值 λ_{vmax} ,采用文[1]的方法,以 Z200 × 600-400-400、混凝土强度等级采用 C40、HPB300 的箍筋为例加以分析,此时 $\lambda_v = 270\rho_v / 39 = 14.211\rho_v$; 若采用 $\phi 8 @ 80$ 的箍筋,则 $\rho_v = 0.0144$, $\lambda_v = 0.20$; 若采用 $\phi 10 @ 100$ 的箍筋,则 $\rho_v = 0.0186$, $\lambda_v = 0.26$; 综合考虑 Z 形柱截面尺寸及混凝土强度等级的不同等因素的影响,框架结构和框架-剪力墙结构中 Z 形柱的 λ_{vmax} 依次取为 0.21, 0.23。由此可根据图 9 得到各抗震等级下 Z 形柱的轴压比限值,见表 3。并由图 9 设计轴压比与配箍特征值的关系曲线作适当调整后可得到 Z 形柱箍筋加密区的最小配箍特征值,见表 4。

Z 形柱轴压比限值 表 3

结构体系	抗震等级			
	一级	二级	三级	四级
框架结构	0.40	0.50	0.60	0.70
框架-剪力墙结构	0.45	0.55	0.65	0.75

Z 形柱箍筋加密区最小配箍特征值 表 4

抗震等级	柱轴压比								
	≤0.3	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70
一级	0.17	0.19	0.21	0.23	—	—	—	—	—
二级	0.12	0.14	0.16	0.18	0.21	0.23	—	—	—
三级	0.10	0.12	0.13	0.15	0.17	0.19	0.21	0.23	—
四级	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.15	0.17	0.19	0.21

3 结论和设计建议

(1) 与 L 形、T 形、十字形柱相同,影响 Z 形柱延性的主要因素仍然是弯矩作用方向角、轴压比和

箍筋配置;对于不等肢 Z 形柱,两肢长比及腹板高也有一定的影响,随着两肢长比的增大,其截面曲率延性下降,随腹板的增大,截面曲率延性提高,为了保证截面具有足够的延性,建议 Z 形柱腹板的净高 ($h-2b$) 不宜小于 200mm。

(2) 对于等肢 Z 形柱,当轴压比不大于 0.3 时,单向加载时延性最好的弯矩作用方向角为 112.5° ,最差角为 135° ;对于不等肢 Z 形柱,随着两肢长比及腹板高的变化,延性最好和最差的弯矩作用方向角是变化的;当轴压比大于 0.3 时,弯矩作用方向角对 Z 形柱截面曲率延性影响较小。

(3) 一般情况下,增大纵筋直径,可使 Z 形柱延性有所提高,但纵筋对其延性的影响是跟箍筋的横向约束共同产生影响。因此选用纵筋直径的同时需合理考虑箍筋间距。

(4) 随着混凝土强度等级的提高, Z 形柱截面延性下降,但随着轴压比的增大,混凝土强度等级影响很小,基本可以忽略其影响。混凝土强度对 Z 形柱延性的影响主要反映于轴压比的变化之中,在相同的轴压比下,其对柱截面延性的影响很小。

(5) 箍筋对 Z 形柱延性的影响主要是体现在对混凝土的横向约束能力和对受压纵筋压曲失稳应变;经分析,当体积配箍率 ρ_v 相同时,采用较小的箍筋直径 d_v 及箍筋间距 s 比采用较大箍筋直径 d_v 及箍筋间距 s 得到的柱截面延性好;不同箍筋间距 s 和箍筋直径 d_v 时,只有合理地确定箍筋间距 s 与纵筋直径 d 的比值,增大体积配箍率 ρ_v 才能达到提高 Z 形柱截面延性的目的。

(6) 通过电算回归分析得到 Z 形柱各抗震等级下轴压比限值和箍筋加密区的最小配箍特征值的要求(表 3 A)。

参 考 文 献

- [1] 王依群,许贻懂,陈云霞. 钢筋混凝土异形柱的轴压比限值与配箍构造[J]. 天津大学学报, 2006, 39(3): 295-300.
- [2] 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): 8-12.
- [3] PARK R, NIGEL PMMJ, WAYNE D G. Ductility of square-confined concrete columns [J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1982, 108(ST4): 929-950.
- [4] 高云海. 钢筋混凝土 T 形截面双向压弯构件正截面强度、延性的试验及理论研究[D]. 天津: 天津大学, 1993.
- [5] 刘超. 钢筋混凝土 L 形截面双向压弯构件正截面强度、延性的试验及理论研究[D]. 天津: 天津大学, 1994.
- [6] 何培玲. 钢筋混凝土十字形截面双向压弯构件正截面承载力、延性的试验及理论研究[D]. 天津: 天津大学, 1996.
- [7] 许贻懂,赵艳静,陈云霞,等. 不等肢异形柱延性性能及轴压比限值[C]//全国混凝土异形柱结构学术研讨会论文集, 2006: 32-41.
- [8] 赵艳静,陈云霞,王玲勇. 钢筋混凝土异形截面双向压弯柱延性性能的理论研究[J]. 建筑结构, 1999, 29(1): 2-7.
- [9] 赵艳静,陈云霞,于顺泉. 钢筋混凝土异形截面框架柱轴压比限值的研究[J]. 天津大学学报, 2004, 37(7): 600-604.
- [10] 建议[J]. 建筑结构, 2005, 35(11): 31-32.
- [8] 代红军,祁皓. 考虑楼梯影响的钢筋混凝土框架结构地震反应分析[J]. 福州大学学报, 2010, 38(2): 259-265.
- [9] 何世龙,宋吉荣. 钢筋混凝土框架结构中板式楼梯梯段板抗震分析及其设计对策[J]. 四川大学学报: 工学版, 2010, 42(S1): 177-182.
- [10] 冯远,吴小宾,李从春,等. 现浇楼梯对框架结构的抗震影响分析与设计建议[J]. 土木工程学报, 2010, 43(10): 53-62.
- [11] 刘郁馨,吕志涛,袁发顺. 多高层砼悬挂建筑结构体系及受力性质[J]. 工程力学, 1996(增刊): 542-546.
- [12] 涂文戈,邹银生. 悬挂结构动力特性的时频分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(1): 78-84.
- [13] 曹万林,卢智成,张建伟,等. 核心筒部分悬挂结构振动台试验及分析[J]. 土木工程学报, 2007, 40(3): 40-44.
- [14] 王春林,吕志涛,涂永明. 半柔性悬挂结构体系的风振响应参数优化及阻尼控制[J]. 土木工程学报, 2009, 42(3): 1-7.
- [1] 苏启旺,蔡宏儒,李力. 从“汶川大地震”引发对板式楼梯设计的思考[J]. 四川建筑科学研究, 2008, 34(4): 165-167.
- [2] 王亚勇. 汶川地震建筑震害启示——抗震概念设计[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 20-25.
- [3] 霍林生,李宏男,肖诗云,等. 汶川地震钢筋混凝土框架结构震害调查与启示[J]. 大连理工大学学报, 2009, 49(5): 718-723.
- [4] 全学友,米伟,张智强. 汶川地震中楼梯结构的破坏现象及对策[J]. 建筑结构, 2009, 39(11): 75-77.
- [5] 沈靓,柳炳康,张瑜中,等. 汶川地震中框架楼梯典型震害分析与有限元计算[J]. 工程抗震与加固改造, 2010, 32(4): 114-119.
- [6] 王奇,马宝民. 钢筋混凝土现浇楼梯对整体结构的影响[J]. 建筑结构, 2002, 32(4): 27-29.
- [7] 胡庆昌. 钢筋混凝土结构楼梯间与楼梯的震害及设计

(上接第 43 页)

参 考 文 献