

## 四级抗震等级时钢筋混凝土异形柱轴压比限值的研究

赵艳静, 李忠献, 陈云霞

(天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 考虑到二、三级抗震等级时异形柱轴压比限值显著低于矩形柱轴压比限值的实际情况, 需对四级抗震等级时异形柱轴压比限值问题进行深入研究。本文基于理论分析和非线性全过程分析, 取曲率延性比  $\mu_{pc} = 6$  作为四级抗震等级时异形柱应具有曲率延性水平, 不仅可以保证异形柱具有与矩形柱相当的延性性能, 而且满足抗震结构位移延性的需求; 然后以此为标准, 确定了四级抗震等级时异形柱的轴压比限值及相应的构造要求。本文研究成果将为工程设计中四级抗震等级时钢筋混凝土异形柱轴压比限值的确定提供参考, 也为完善相关设计规范提供理论依据。

**关键词:** 钢筋混凝土异形柱; 轴压比限值; 延性; 曲率延性比; 非线性分析

**中图分类号:** TU375.3      **文献标识码:** A

### Research on limit values of axial compression ratios of specially shaped RC columns in case of 4th aseismic grade

ZHAO Yanjing, LI Zhongxian, CHEN Yunxia

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

**Abstract:** Considering the fact that the limit values for axial compression ratios of specially shaped RC columns in case of 2nd and 3rd aseismic grades are much lower than those of the rectangular columns, it is necessary to make a thorough study on limit values for axial compression ratios of specially shaped RC columns in case of 4th aseismic grade. In this paper, based on the theoretical analysis and nonlinear analysis, the curvature ductility ratio 6 was taken as the curvature ductility level of specially shaped RC columns in case of 4th aseismic grade, which could assure that the specially shaped RC columns had the same ductility level as that of the rectangular RC columns and met the ductility requirements for aseismic structures. Then the limit values for axial compression ratios and the relevant construction requirements of the specially shaped RC columns in case of 4th aseismic grade were determined. Finally, the research results of the present paper will provide an important reference to determinate the limit values for axial compression ratios of the specially shaped RC columns in case of 4th aseismic grade as well as an important theoretical base to compile the related design code.

**Keywords:** specially shaped RC column; limit value of axial compression ratio; ductility; curvature ductility ratio; nonlinear analysis

## 1 引言

钢筋混凝土异形截面框架柱通常是指钢筋混

土框架结构中截面形状为 L 形、T 形和十字形的柱子, 由于其肢厚通常与墙等厚, 避免了矩形柱在房间内外突出的缺点, 使建筑内部美观、房间有效利用面积比例增加, 因此, 在 1999 年国务院办公厅 [72] 号文件——“关于推进住宅产业现代化提高住宅质量若干意见的通知”中, 异形柱框轻结构以其良好的建筑使用功能和显著的经济、社会综合效益, 被列为我国现代住宅建筑的五大结构体系之一。

**基金项目:** 国家建设部“混凝土异形柱结构技术规程”资助项目。

**作者简介:** 赵艳静 (1971 - ), 女, 山东淄博人, 工学博士。

**收稿日期:** 2003 年 1 月

为了使异形柱框架结构在遭受地震作用时具有一定延性而不因脆性破坏而倒塌,要求柱的轴压比应满足一定的限值要求。关于异形柱轴压比限值的研究,天津大学<sup>[1-4]</sup>、东南大学<sup>[5]</sup>、大连理工大学<sup>[6]</sup>等已开展了相关的工作。

天津市标准《大开间住宅钢筋混凝土异形柱框轻结构技术规程》(DB29—16—98)给出了二、三级抗震等级时异形柱的轴压比限值,对于四级抗震等级及非抗震设计时的异形柱轴压比限值和相应的构造措施均未涉及。迄今为止,国内外对于四级抗震等级时钢筋混凝土异形柱轴压比限值的研究还未见报道,考虑到二、三级抗震等级时异形柱的轴压比限值要显著低于矩形柱轴压比限值的实际情况,有必要进一步对四级抗震等级时异形柱的轴压比限值问题进行深入研究,以使异形柱结构体系的发展建立在扎实的科学基础上。

本文首先根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)中对四级抗震等级矩形截面框架柱规定的构造要求,分析计算其相应的延性水平;其次,对框架结构的位移延性与柱曲率延性之间的关系进行了理论分析,得到为保证结构一定的位移延性,框架柱所需的曲率延性比。最后综合上述分析结果,确定异形柱框架结构在四级抗震等级时,异形柱应具有的曲率延性水平( $\mu_{\phi c}$ ),以此为标准,分析计算满足上述延性水平的异形柱轴压比限值,并探讨了对箍筋间距与纵筋直径比、箍筋直径的要求。

## 2 钢筋混凝土异形柱截面延性的数值分析方法

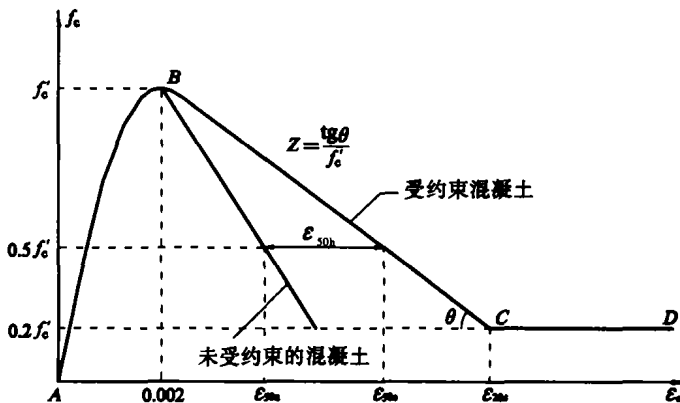
由于异形柱截面形状不规则,必须采用数值分析方法<sup>[1]</sup>,即采用逐级加曲率的方法求得钢筋混凝土异形柱截面在某荷载角轴力  $N$  作用下的  $M-\phi$  曲线,进而求得截面的曲率延性比。在此非线性全过程分析中,采用了如下基本假定:

(1)在整个受力过程中,截面的平均应变符合平截面假定。

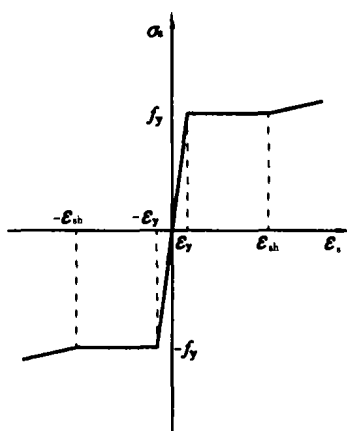
(2)拉区混凝土的强度忽略不计;而压区混凝土的应力-应变关系则选用新西兰 KENT 和 PARK 的模型,考虑箍筋约束对下降段的影响,如图 1a 所示。

(3)纵向钢筋的应力-应变关系考虑了纵向钢筋的强化作用,取三折线模型,如图 1b 所示。

(4)将截面划分为若干个小矩形单元,并近似认为单元上混凝土应力均匀分布,其合力位于单元形心。



(a) 受压混凝土



(b) 纵向钢筋

$f'_c$  为混凝土圆柱体强度;  $\epsilon_{50a}$  为未受约束混凝土应力下降到  $0.5 f'_c$  时对应的应变值;  $\epsilon_{50c}$ 、 $\epsilon_{20c}$  分别为受约束混凝土应力下降到  $0.5 f'_c$ 、 $0.2 f'_c$  时对应的应变值;  $\epsilon_{50b} = \epsilon_{50c} - \epsilon_{50a}$ ;  $Z$  规定了受约束混凝土下降段的坡度;  $\epsilon_y$ 、 $\epsilon_{sh}$  分别为纵向钢筋的屈服应变、强化应变。

图 1 受压混凝土和纵向钢筋应力-应变关系

Fig. 1 Stress-strain curves for compressive concrete and longitudinal steel

## 3 四级抗震等级时矩形截面框架柱的曲率延性比 $\mu_{\phi}$

在《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)和《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)中,对四级抗震等级及非抗震设计时矩形柱的轴压比限值均未作规定,但都规定了相应的构造措施,诸如框架柱的纵向钢

筋最小配筋率、柱端箍筋加密区的构造及最小体积配箍率等,以保证其具有一定的延性性能,能够正常工作,避免非正常破坏。

根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)对四级抗震等级时纵向受力钢筋和箍筋所作的构造规定,同时考虑到实际工程情况,本文确定了矩形柱相应的计算参数(表1),并且用数值分析方法<sup>[1]</sup>计算了各参数情况下矩形柱的曲率延性比 $\mu_{\phi_c}$ 。由文献[4]可知:45°和90°荷载角时的曲率延性比实际上包容了矩形柱各轴压比区段截面延性的最大值和最小值。

数值计算结果表明:对四级抗震等级的矩形柱,当纵筋和箍筋均按最小配筋率配置(表1)且轴压比为1.05时,其曲率延性比 $\mu_{\phi_c}$ 在2.75~6.21范围内变化,平均值是4.72。

表1 矩形柱曲率延性比的计算参数

Table 1 Parameters for computing curvature ductility ratio of rectangular column

	截面尺寸/mm	
	400×400	500×500
混凝土强度等级	C30、C40	C30、C40
纵筋、箍筋配置	12 $\Phi$ 14( $\rho = 1.16\%$ ) $\Phi$ 6@100、 $\Phi$ 8@100 ( $\rho_{sv} = 0.452\%、0.791\%$ )	12 $\Phi$ 16( $\rho = 0.97\%$ ) $\Phi$ 6@90、 $\Phi$ 8@100 ( $\rho_{sv} = 0.395\%、0.624\%$ )
荷载角	45°、90°	45°、90°
轴压比	0.162~1.053	0.162~1.053

注: $\rho$ 为配筋率; $\rho_{sv}$ 为体积配箍率;荷载角为轴力作用点和截面形心的连线与截面形心轴 $x$ 轴的夹角。

## 4 框架结构位移延性与框架梁、柱曲率延性的关系

### 4.1 框架结构位移延性与框架梁曲率延性的关系

图2给出了框架达到屈服时一根典型柱子的曲率分布<sup>[9-11]</sup>。从图中可以看出,由于这时柱子各截面的弯矩依然处于弯矩-曲率关系曲线的线性阶段内,因此,其曲率分布是遵循弯矩图的形状;而且,由于各层柱截面的性质、轴向力的不同,导致其曲率从一层到另一层也是不同的。

柱子在任一标高处的侧向位移可以通过用该标高以下的曲率图形对该标高取矩的办法来计算。若假定底层柱的反弯点是出现在距底面0.6倍柱高处,其它各层柱出现在层高中点。则结构开始屈服时,第 $r$ 层的

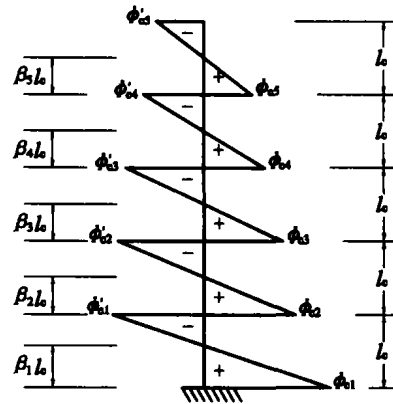


图2 框架发生屈服时典型柱中曲率分布  
Fig. 2 Curvature distribution in a typical column of the frame at yield

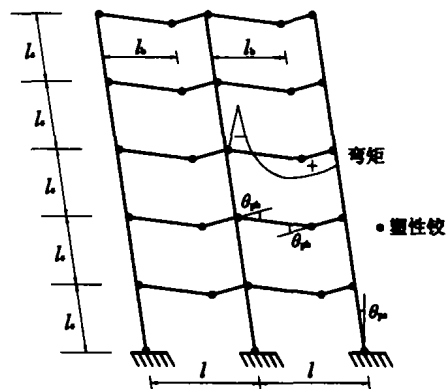


图3 梁铰侧移机构  
Fig. 3 Beam sidesway mechanism

顶面相对于结构底面的侧向位移为

$$\Delta_y = \frac{l_c^2}{6} [\phi_{c1} (r + \frac{1}{3}) + \phi_{c2} + \phi_{c3} + \dots + \phi_{c,r}] \quad (1)$$

式中, $\Delta_y$ 为结构屈服位移; $l_c$ 为柱层高; $r$ 为框架层数; $\phi_{c1}、\phi_{c2}、\dots、\phi_{c,r}$ 为当框架开始屈服时,第1、2、 $\dots$ 、 $r$ 层底部的柱子曲率。

对于框架结构,在设计中为保证其有较好的抗震性能,要求设计成强柱弱梁型(即梁铰破坏机制),如图3所示。此种类型框架结构在地震作用下,梁支座及跨中首先产生塑性铰,而后塑性变形发展,最终在柱根部也产生塑性铰而破坏,图3只给出了塑性变形。若假定所有梁同时在最大弯矩处屈服,且各屈服截面曲率相同,均为 $\phi_{yb}$ ,同时取 $\phi_{c1} = \phi_{c2} = \dots = \phi_{c,r} = 1.1\phi_{yb}$ ,则代入式(1)整理可得

$$\Delta_y = \frac{1.1l_c^2}{3} \left(r - \frac{1}{3}\right) \phi_{yb} \quad (2)$$

对图3所示变形状态进行的研究表明,在每根柱子底部的塑性转角为

$$\theta_{pc} = \frac{\Delta_u - \Delta_y}{r l_c} \quad (3)$$

式中,  $\Delta_u$  为结构极限位移。

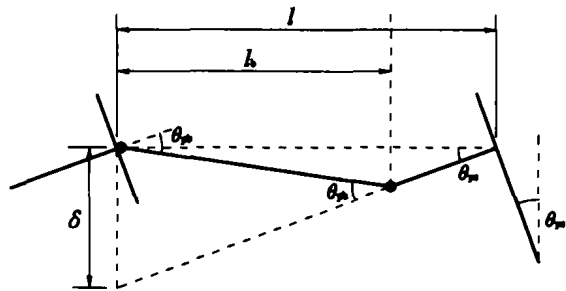


图4 梁、柱塑性变形几何关系

Fig. 4 Geometrical relationship of plastic deformations in beam and column

图4表示梁铰机制中梁和柱塑性变形的几何关系。由于变形都很小,梁中的极限塑性转角  $\theta_{pb}$  与每根柱脚的极限塑性转角  $\theta_{pc}$  之间的关系可表示为

$$\delta = l\theta_{pc} = l_b\theta_{pb} \quad \text{即} \quad \theta_{pc} = \frac{l_b}{l} \theta_{pb} \quad (4)$$

式中,  $l$ 、 $l_b$  分别为梁跨长及梁跨中塑性铰距支座距离。

$$\theta_{pb} = (\phi_{ub} - \phi_{yb}) l_{pb} \quad (5)$$

其中  $\phi_{ub}$ 、 $\phi_{yb}$  分别为框架梁的极限曲率和屈服曲率,  $l_{pb}$  为梁塑性铰区长度。

$$\theta_{pc} = (\phi_{uc} - \phi_{yc}) l_{pc} \quad (6)$$

其中  $\phi_{uc}$ 、 $\phi_{yc}$  分别为框架柱的极限曲率和屈服曲率,  $l_{pc}$  为柱塑性铰区长度。

令式(3)与式(4)相等,可得

$$\Delta_u = \Delta_y + \frac{r l_c l_b}{l} \theta_{pb} \quad (7)$$

两边同时除以  $\Delta_y$ , 并将式(2)、式(5)代入, 则有

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{\Delta_u}{\Delta_y} = 1 + \frac{r l_c l_b}{l} \frac{\theta_{pb}}{\Delta_y} = \\ &= 1 + \frac{r l_c l_b}{l} \frac{(\phi_{ub} - 1) l_{pb}}{\phi_{yb} \frac{1.1 l_c^2}{3} \left(r - \frac{1}{3}\right)} = \end{aligned}$$

$$1 + \frac{3 r l_b (\mu_{\phi_b} - 1) l_{pb}}{1.1 l_c \left(r - \frac{1}{3}\right)} \quad (8)$$

式中,  $\mu$  为结构位移延性系数;  $\mu_{\phi_b} = \phi_{ub} / \phi_{yb}$  为框架梁的曲率延性比。

不难看出, 当结构位移延性系数  $\mu$  的要求确定后, 框架层数  $r$  及梁、柱参数  $l_b$ 、 $l$ 、 $l_{pb}$ 、 $l_c$  等已知时, 即可通过式(8)求出梁所需的曲率延性比  $\mu_{\phi_b}$ 。

#### 4.2 框架梁曲率延性与框架柱曲率延性的关系

将式(5)和式(6)代入式(4), 即可得到框架梁、柱曲率延性比 ( $\mu_{\phi_b}$ 、 $\mu_{\phi_c}$ ) 之间的关系式

$$\mu_{\phi_c} = 1 + \frac{l_b (\mu_{\phi_b} - 1) \phi_{yb} l_{pb}}{l \phi_{yc} l_{pc}} \quad (9)$$

显然, 当梁的曲率延性比  $\mu_{\phi_b}$  已知, 即可通过式(9)求出框架柱所需的曲率延性比  $\mu_{\phi_c}$ 。

目前, 国内外对结构的位移延性系数  $\mu$  的取值范围一般为 3~5。此时, 构件延性应满足什么要求呢? 为此, 分别取  $\mu=4$  和  $\mu=3$  时, 对不同层数(3~14层, 约 9~40m) 的框架结构进行分析计算, 利用上述关系可得到相应情况下框架梁、柱所需的曲率延性比。

计算时假定:  $l_c = 6h_0$ 、 $7h_0$ ;  $l_{pb} = 0.7h_0$ 、 $0.8h_0$ 、 $0.9h_0$ ;  $l_{pc} = 0.7h_0$ 、 $0.8h_0$ 、 $0.9h_0$ ;  $l_b = 2l/3$ ; 其中  $h_0$  为梁的截面有效高度。

计算结果表明, 当结构位移延性系数  $\mu=4$  时, 框架柱所需的曲率延性比在 6.87~10.66 范围内变化; 而当结构位移延性系数  $\mu=3$  时, 框架柱所需的曲率延性比在 4.91~7.44 范围内变化。综合前面矩形柱曲率延性比电算结果的分析可知, 若取四级抗震等级异形截面框架柱的曲率延性比  $\mu_{\phi_c} = 6$ , 不仅可以保证其具有与矩形柱相当的延性性能, 而且能使结构位移延性系数达到 2.54~3.53。然后以  $\mu_{\phi_c} = 6$  为标准, 可分析计算满足上述延性水平的异形柱的轴压比限值, 以及相应对箍筋间距与纵筋直径比  $s/d$ 、加密区箍筋直径  $d_v$  的要求。

#### 5 四级抗震等级时异形柱轴压比限值的计算

在相同轴压比及配筋条件下, 荷载角不同时, 混凝土受压区图形及高度差异很大, 导致异形柱的曲率延

性比相差甚多,因此为保证柱在最不利荷载作用方向仍具有足够的延性,先确定不同轴压比区域截面延性最差的荷载角,然后根据计算结果回归出 $\mu_{\phi c}$ 与 $n$ 、 $s/d$ 的计算公式,最后取 $\mu_{\phi c}=6$ ,可以反算得四级抗震等级时异形柱的轴压比限值如表2所示。表2中的各项数值都是根据轴压比的反算值适当调整后得到的。

表2 四级抗震等级时异形柱的轴压比限值

Table 2 The limit values of axial compression ratios of the specially shaped RC columns in case of 4th aseismic grade

	s/d											
	7			6			5			4		
	d <sub>v</sub> =6	8	10	6	8	10	6	8	10	6	8	10
L形	0.50	0.55	0.60	0.55	0.60	0.65	0.60	0.65	0.70	0.65	0.70	0.80
T形	0.55	0.60	0.65	0.60	0.65	0.70	0.65	0.70	0.75	0.70	0.75	0.85
十形	0.65	0.70	0.75	0.70	0.75	0.80	0.75	0.80	0.85	0.80	0.85	0.90

注:表中 $d$ 、 $d_v$ 、 $s$ 分别为异形柱纵向钢筋直径、加密区箍筋直径及间距。

考虑到四级抗震等级可用 $\Phi 6$ 的箍筋,因此,表2给出了箍筋直径为6mm时相应的轴压比限值。

对于框架-剪力墙结构,当剪力墙具有足够的强度和延性,某些柱截面破坏不会导致结构倒塌时,轴压比可适当放宽。

柱净高与截面长边尺寸之比小于4且大于等于3时,轴压比限值按表内相应数值减小0.05取用。此时,四级抗震等级框架柱的箍筋直径不应小于8mm。

## 6 结论

本文通过对四级抗震等级时钢筋混凝土异形柱轴压比限值的系统研究,得出以下结论:

(1) 为了保证异形柱在最不利荷载角时也具有足

够的延性,其轴压比限值取各种荷载角时的较低值,这使得异形柱的轴压比限值显著低于矩形柱的轴压比限值。

(2) 建议四级抗震等级时异形柱的轴压比不宜超过表2所列限值,与四级抗震等级时矩形柱绝然不同。

(3) 对于非抗震设计的异形柱,可参照《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)所规定的纵筋及箍筋的构造要求,同时综合考虑异形柱的特点作出相应的规定。

## 参 考 文 献

- [1] 赵艳静,陈云霞,王玲勇. 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,1999,29(1).
- [2] 何培玲,赵艳静,王振武. 十字形截面钢筋砼双向压弯柱延性的试验及理论研究[J]. 建筑结构,1999,29(1).
- [3] DB 29—16—98 大开间住宅钢筋混凝土异形柱框轻结构技术规程[S]. 天津市城乡建设管理委员会.
- [4] 赵艳静. 钢筋混凝土异形截面双向压弯柱延性性能的理论研究[D]. 天津大学,1996.
- [5] 张晋. 异形柱框轻结构体系抗震能力研究[D]. 东南大学,2002.
- [6] 黄承逵,王丹,崔博. 钢筋混凝土异形柱轴压比限值研究[J]. 大连理工大学学报,2002,42(2).
- [7] GB 50010—2002 混凝土结构设计规范[S].
- [8] GB 50011—2001 建筑抗震设计规范[S].
- [9] PARK R, PAULAY T. Reinforced Concrete Structures[M]. New York: John Wiley and Sons, 1975.
- [10] BAYRAK Qguzhan, SHEIKH Shamim A. Plastic hinge analysis[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2001, 127(9): 1092—1100.
- [11] LU Yong, HAO Yong, CARYDIS P G et al. Seismic performance of RC frames designed for three different ductility levels [J]. Engineering Structures, 2001, 23: 537—547.