

二级抗震等级异形柱框架结构抗震性能评价

王依群¹, 刘中吉², 冉令让¹

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 中国石油华东设计院, 青岛 266071)

摘要: 通过计算一座二类场地八度(0.2g)抗震设防的异形柱框架在罕遇地震作用下的弹塑性时程响应, 对国家现行行业标准《混凝土异形柱结构技术规程》二级框架柱的设计规定进行了初步验证, 结果表明除框架底层柱根和T形截面边柱外, 该规程的相关设计规定基本上能起到“强柱弱梁”的控制效果. 对底层柱根和T形截面边柱的弯矩增强系数取值和配筋形式提出了建议. 建议的方案增加配筋量不多, 既能达到结构预期的塑性铰分布结果, 又方便施工.

关键词: 钢筋混凝土; 异形柱; 框架结构; 抗震设计; 柱弯矩增强系数

中图分类号: TU375.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0493-2137(2008)02-0209-06

Assessment on RC Frame Structures with Specially Shaped Columns in Earthquake-Resistant Grade II

WANG Yi-qun¹, LIU Zhong-ji², RAN Ling-xuan¹

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. CNPC East China Design Institute, Qingdao 266071, China)

Abstract: Through nonlinear analysis of a typical reinforcement concrete (RC) frame structure with specially shaped columns in earthquake-resistant grade II, which is under excitations of three ground motions with the rare intensity level of earthquake intensity 8(0.2g) reign, the effectiveness of design provisions in *The Technical Specification for Concrete Structures with Specially Shaped Columns* was verified. The result indicates that the design provisions in the technical specification are suitable for “strong column weak beam” requirement, except the moment amplification factors for column roots and T-shaped columns. On this basis, the moment amplification factors for column roots and T-shaped columns were investigated. And an effective reinforcement detail form was suggested. According to the suggestion, the optimal controlling effect on plastic hinge mechanism would be obtained, and the amount of reinforcement would be increased little and the structure would be easily constructed.

Keywords: reinforced concrete; specially shaped column; frame structure; earthquake-resistant design; amplification factor of column

异形截面柱, 即便是等肢 L、T 形截面柱, 由于截面惯性主轴与结构平面主轴不一致, 其受力变形一般为双向偏心受压(拉)状态, 应采用三维空间力学分析, 特别是柱受力较大时, 因问题的复杂性, 目前人们还没有开发出可用于异形柱的三维空间弹塑性计算软件. 为解决此问题, 笔者参照文献[1]对矩形柱框架结构的

做法, 采用平面弹塑性计算软件对受力扭转效应较小的规则异形柱框架结构进行了抗震分析, 对现行行业标准《混凝土异形柱结构技术规程》^[2] (简称“规程”) 二级抗震等级框架柱的设计规定进行了初步验证, 发现除框架底层柱根和 T 形截面边柱外, 该规程的相关设计规定基本上能起到“强柱弱梁”的控制效果. 根据分

析,文中对底层柱根和 T 形截面边柱的弯矩增强系数取值和配筋形式提出了建议.建议增加的配筋量不多,既能达到结构预期的塑性铰分布结果,又方便施工.

1 二级抗震等级异形柱框架性能评价

1.1 规程柱-梁抗弯强度级差规定及影响因素

我国《建筑抗震设计规范》(GB50011—2001)制定的强烈地震作用下框架结构的破坏机制和控制措施是:人为增大柱端的抗弯能力,在较强或更强的地震作用下塑性铰主要出现在梁端,部分柱端也可能出现塑性铰,但数量较少、出现较迟、塑性转动较小,形成“梁柱铰机构”^[1].这与欧共体 EC8 规范^[3]和美国 ACI-99 规范^[4]的精神是一致的.

《混凝土异形柱结构技术规程》^[2]对二级抗震等级框架柱设计规定的弯矩调整系数为 1.3,即节点上、下柱端弯矩设计值

$$\sum M_c = 1.3 \sum M_b \quad (1)$$

式中: $\sum M_b$ 为节点左、右梁端按顺时针和逆时针方向计算的两端有地震作用组合的弯矩设计值之和的较大值.

地震作用组合的框架结构底层柱下端截面(即柱根)的弯矩设计值,对二级抗震等级按地震作用组合的弯矩值乘以系数 1.4 确定.可见,其比国家标准《建筑抗震设计规范》(GB50011—2001)对矩形柱的取值规定略有提高.

以上便是人为增大了柱端相对于梁端或柱根的抗弯能力,也就是“强柱弱梁”措施.除此之外,规范和规程的其他规定也影响到“强柱弱梁”的程度,即影响到柱、梁抗弯强度相对比值的大小.如梁、柱纵筋最小配筋率,梁伸入支座最小纵筋根数及截面积和其他构造措施,以及施工时混凝土材料强度、钢筋强度和实际配筋量与计算配筋量的差距等因素.另外,现浇楼板混凝土和钢筋也提高了与其一起浇筑梁的抗弯能力.

可见,工程中影响柱端相对于梁端的弯矩增强幅度的因素众多、随机性强、规律复杂,很难通过解析或分离变量方法解决.目前实用、有效的方法是对考察对象进行仔细设计后,用多波输入下的非线性动力反应结构分析和揭示该结构在罕遇地震下的抗震性能,以对规程抗震设计措施的有效性进行评价^[1].

为与矩形柱框架相关研究^[2]相对照,本文也不计现浇楼板的混凝土和钢筋对梁抗弯能力的提高.

1.2 典型框架结构及其计算模型

某异形柱钢筋混凝土框架结构(见图 1),位于八

度(0.2g)区,Ⅱ类场地,抗震等级为二级,共 3 层,层高均为 3.0 m,等肢异形柱截面的肢厚×肢长尺寸为 250 mm×700 mm,柱截面为 L 形、T 形和十字形;框架梁截面为矩形,尺寸为 250 mm×500 mm.异形柱的混凝土等级为 C45,梁的混凝土等级为 C35;梁柱纵筋为 HRB400,箍筋和楼板钢筋为 HPB235.屋面和楼面均为现浇板,板厚 110 mm;恒荷载 9.0 kN/m²,活荷载 2.0 kN/m².

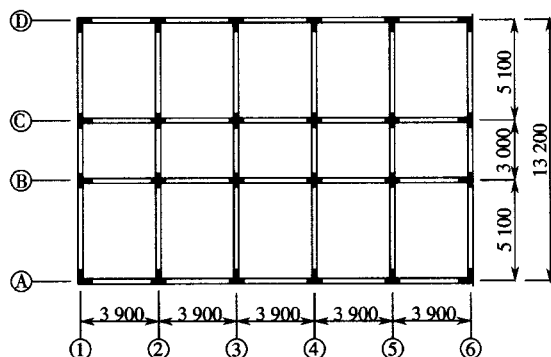


图 1 异形柱框架结构平面

Fig.1 Plane of frame structure with specially shaped columns

该工程采用中国建筑科学研究院开发的 TAT 软件对结构整体进行力学分析和设计,使用异形柱规程编制组成员开发的异形柱结构配筋专用软件 CRSC 进行配筋,梁柱节点均满足强度要求.柱受力纵筋配筋结果为:T 形柱配 10d20(d 前、后数字分别为受力纵筋根数和直径(mm)),十字形柱配 12d20;梁受拉钢筋配 3d14,受压钢筋配 2d22.T 形柱、十字形柱配筋形式见图 2(a)和图 2(c),这是规程推荐的配筋形式,以下称普通配筋形式.图 2 中的 α 为弯矩作用方向角,它是柱轴向压力作用点 P 与柱截面形心的连线和截面形心 x 轴正向的夹角,逆时针转为正.

图 3 为异形柱框架计算模型,平面框架取自图 1 中的③轴,质量取自③轴线左右各半跨共 3.9 m 范围内的质量.平面框架每层各节点的质量分别为 13.8 t、21.9 t、21.9 t 和 13.8 t.前两阶自振周期为 0.349 s、0.094 s.计算中结构阻尼采用比例阻尼,假设一、二阶振型阻尼比始终是 0.05,即偏安全地不计进入弹塑性状态后结构阻尼比的增大.

1.3 构件刚度和强度性质

根据梁柱截面尺寸计算出的截面积和惯性矩见表 1.梁和柱的弹性模量 E 分别取为 3.15×10^7 N/mm² 和 3.35×10^7 N/mm².

异形截面柱正截面受弯承载力是用笔者所在课题组开发的 MyNc 软件计算得出的.MyNc 软件是计算矩

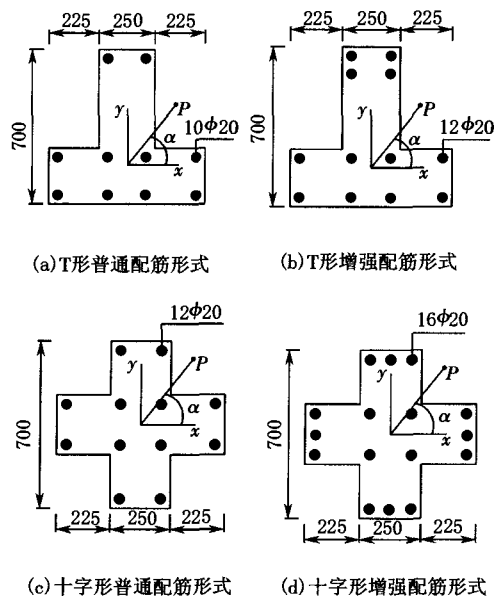


图2 T形、十字形截面尺寸与配筋形式

g.2 Dimension and reinforcement of T-, cross shaped cross sections

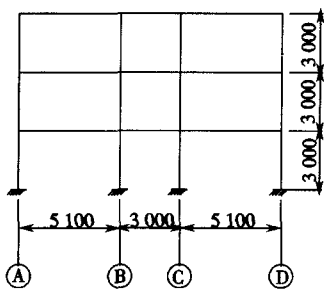


图3 异形柱框架计算模型

Fig.3 Calculating model of frame with specially shaped columns

形、L形、T形和十字形钢筋混凝土双向压弯构件正截面承载力的专用软件,其基本原理是将截面划分成有

限个小网格进行迭代计算,求出要求的结果.其依据的基本假定为:①截面保持平截面假定;②压区混凝土的应力-应变关系采用《混凝土结构设计规范》(GB50010—2002)的规定,即抛物线加平直线模型;③纵向钢筋的应力-应变关系采用理想弹性双直线模型;④不计混凝土的受拉强度和受压区混凝土收缩、徐变的影响.

表1 截面特性

Tab. 1 Properties of cross sections

截面类型	尺寸/(mm×mm)	截面积/m ²	惯性矩/m ⁴
矩形梁	250×500	0.125 0	0.002 6
T形截面柱	250×700	0.287 5	0.011 2
十字形截面柱	250×700	0.287 5	0.007 7

参考已有试验资料,材料强度取实测平均值:钢筋 $f_y = 500 \text{ N/mm}^2$, C45 混凝土 $f_c = 36.9 \text{ N/mm}^2$, C35 混凝土 $f_c = 29.8 \text{ N/mm}^2$,并按前述的配筋结果和受力纵筋在柱截面的位置(见图2)计算出梁的屈服弯矩和柱的 $N-M$ 相关曲线.

梁截面的正屈服弯矩 M_{y+} 为 269 kN·m,负屈服弯矩 M_{y-} 为 -361 kN·m.柱的 $N-M$ 相关曲线见图4,特性点数据见表2.

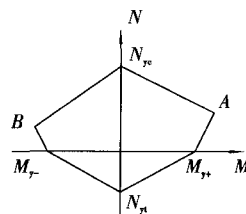


图4 柱的 $N-M$ 相关曲线

Fig.4 $N-M$ curve of column

表2 T形和十字形柱截面屈服面特性

Tab. 2 Properties of yield surface for T-, cross shaped columns

截面类型	纵筋	正截面屈服弯矩 $M_{y+}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	负截面屈服弯矩 $M_{y-}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	受压屈服力 N_{yc}/kN	受拉屈服力 N_{yt}/kN	平衡点 A 的坐标取为 M_{y+} 的比例	平衡点 A 的坐标取为 N_{yc} 的比例	平衡点 B 的坐标取为 M_{y-} 的比例	平衡点 B 的坐标取为 N_{yt} 的比例
T1	10d20	317.1	-654.5	11 666.6	1 570.5	3.479	0.60	1.567	0.20
T2	10d20	654.5	-317.1	11 666.6	1 570.5	1.567	0.20	3.479	0.60
T1	12d20	567.3	-678.3	11 980.8	1 885.0	2.202	0.55	1.741	0.25
T2	12d20	678.3	-567.3	11 980.8	1 885.0	1.741	0.25	2.202	0.55
T1	12d22	677.2	-817.7	12 376.6	2 280.8	1.974	0.55	1.551	0.20
T2	12d22	817.7	-677.2	12 376.6	2 280.8	1.551	0.20	1.974	0.55
+	12d20	526.0	-526.0	11 981.0	1 885.0	1.590	0.35	1.590	0.35
+	16d20	601.3	-601.3	12 609.1	2 513.3	1.770	0.35	1.770	0.35

注:表中截面类型中,T1和T2分别表示图3 ④轴 T形截面柱和③轴 T形截面柱.

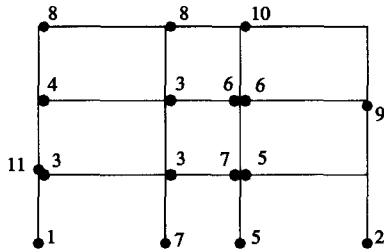
2 弹塑性动力时程分析方法与输入的地震波

采用平面结构弹塑性地震响应分析软件 NDAS2D^[5],分析中考虑了材料和几何非线性.该软件配有集中塑性铰出现在杆端的梁、柱单元,可用图形方式给出结构塑性铰出现的位置和顺序,为评价罕遇地震下的结构性能提供了有力工具.

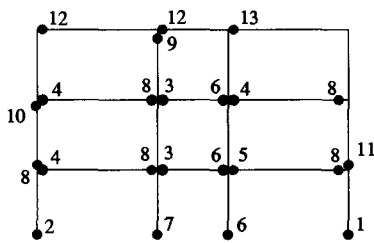
分析中分别输入了 3 条二类场地的地震波:El-Centro 波(1940,南北向)、Northridge 波(1997.1.17,南北向)和唐山地震北京饭店记录波(1978.7.28,东西向).按照建筑抗震设计规范八度(0.2g)罕遇烈度的规定将加速度幅值调整到 0.4g.

3 符合规程要求的框架抗震性能检验

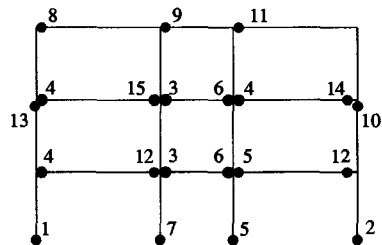
符合规程要求的框架是指上述按规范要求配筋或用 CRSC 软件配筋的框架结构,简称“模型 1”.八度(0.2g)罕遇地震作用下,结构顶点最大位移、层间最大位移角见表 3.塑性铰分布及出现顺序见图 5.



(a) El-Centro 波



(b) Northridge 波



(c) 北京记录波

图 5 模型 1 塑性铰出现位置和顺序

Fig. 5 Location and order of plastic hinges for model 1

表 3 地震波作用下的结构顶点最大位移、层间最大位移角

Tab. 3 Maximum shafts at top and at storey level of the frame under seismic wave

输入波	最大顶点位移/mm			最大层间位移角		
	模型 1	模型 2	模型 3	模型 1	模型 2	模型 3
El-Centro	34.4	32.3	32.3	1/223	1/227	1/227
Northridge	30.3	31.3	31.3	1/263	1/242	1/242
北京记录	43.7	37.6	37.5	1/180	1/199	1/200

由图 5 可见两边柱柱根首先出现塑性铰,这与理想的出铰位置和顺序大相径庭.理想的出铰位置和顺序应当是:梁端先出铰,柱端不能出现塑性铰,待所有梁端几乎都出现了塑性铰以后,柱根部再出现塑性铰.

除了柱根出现塑性铰的时间顺序太早以外,该结构其他部位的塑性铰出现位置和顺序还是接近理想状态的,于是下一步探讨加强柱根的抗弯能力.

4 增强配筋 T 形柱正截面受弯承载力

T 形柱较早出现塑性铰的原因,是普通配筋形式的 T 形截面柱,截面腹板方向受压(弯矩作用方向角 α 为 90° ,参见图 2(a))时,大小偏压界限的轴压比偏低,压力和弯矩共同作用下柱端塑性铰出现过早^[6].如不改变配筋形式,靠增加所有纵向钢筋直径(因规程^[2]规定纵向受力钢筋直径宜相同),势必增加很多纵筋截面积.本文探讨在 T 形腹板肢端增加纵向受力钢筋,如图 2(b)所示,简称“增强配筋形式”^[7],在增加配筋不很多(与图 2(a)增加所有受力纵筋直径相比)的情况下,提高大小偏心界限轴压比,推迟塑性铰出现.

以截面尺寸、混凝土、钢筋强度等级相同(材料强度取设计值)的 T 形柱按图 2(a)配 10d20、10d22 和按图 2(b)配 12d20 三种配筋方式为例,计算得到的 $N-M$ 相关曲线见图 6 和图 7.由图可得以下 3 点结论.

(1)当弯矩作用方向角 α 为 90° 时,增强配筋形式大小偏压界限时对应的轴力比普通配筋形式大;前者界限破坏时的轴压比为 0.294,后者为 0.228.增强配筋形式的 $N-M$ 曲线包住了普通配筋形式的 $N-M$ 曲线;增强配筋形式最大受弯承载力比普通配筋形式的大 12%(界限破坏附近).该方向角下 12d20 比 10d22 的受弯承载力要大些,但在轴压力接近零处后者的比前者的略大.

(2)当弯矩作用方向角 α 为 270° 时,增强配筋形式大小偏压界限时对应的轴力比普通配筋形式小;前者界限破坏时的轴压比为 0.646,后者为 0.683.增强配筋形式对应的 $N-M$ 曲线包住了普通配筋形式的 $N-M$ 曲线;尤其在前者的界限破坏点以下,前者的最大受弯承载力都要比后者大,界限破坏时大 11.3%.该方向

角下且大小偏压界限以下时 12d20 比 10d22 的受弯承载力要大些。

(3)当弯矩作用方向角 α 为 0° 和 180° 时,10d20 和 12d20 两者的 $N-M$ 曲线差距不大,图形略。

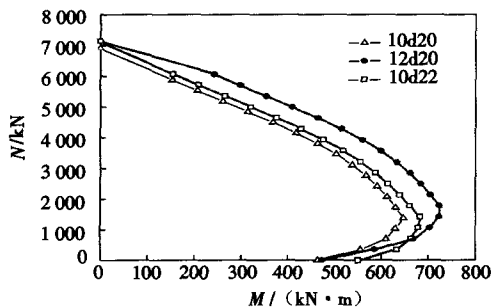


图6 $\alpha = 90^\circ$ 时 T 形柱的 $N-M$ 相关曲线

Fig.6 $N-M$ curve for T-shaped column when $\alpha = 90^\circ$

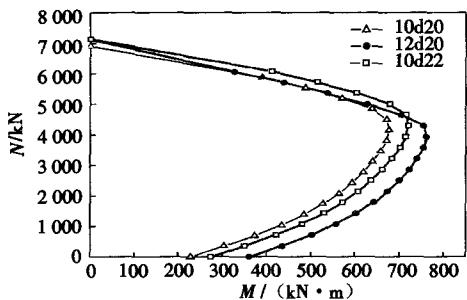


图7 $\alpha = 270^\circ$ 时 T 形柱的 $N-M$ 相关曲线

Fig.7 $N-M$ curve for T-shaped column when $\alpha = 270^\circ$

12d20 和 10d22 的配筋面积 A_s 分别为 3770 mm^2 和 3801 mm^2 ,可知增强配筋方式比普通配筋方式更有效地提高 T 形柱弯矩作用方向角 90° 和 270° 的抗弯能力。

对于十字形截面柱增强配筋形式如图 2(d) 所示,其最大受弯承载力比普通配筋形式的大(界限破坏附近大 11.4%), $N-M$ 相关曲线这里就不给出了。

5 柱根及边柱加强的框架抗震性能

由图 5 可知框架两侧边 T 形截面柱柱根出现塑性铰过早,中间的十字形柱柱根出现塑性铰的顺序不很靠前,所以这里先只对 T 形边柱柱根抗弯能力进行加强,即将其截面配筋由原先的 10d20 改为 12d22,截面屈服面参数见表 2. 上述 3 条地震波作用下弹塑性时程计算结果显示,中间十字形柱柱根塑性铰出现顺序在第 2 或第 3(为省篇幅图形略),所以这里又将十字形柱柱根配筋由原先的 12d20(见图 2(c))改为 16d20(见图 2(d)),即全部柱根都进行了加强. 简称此计算

模型为“模型 2”。

同样在结构基底输入上述 3 种地震波,得到的塑性铰出现的位置顺序见图 8。

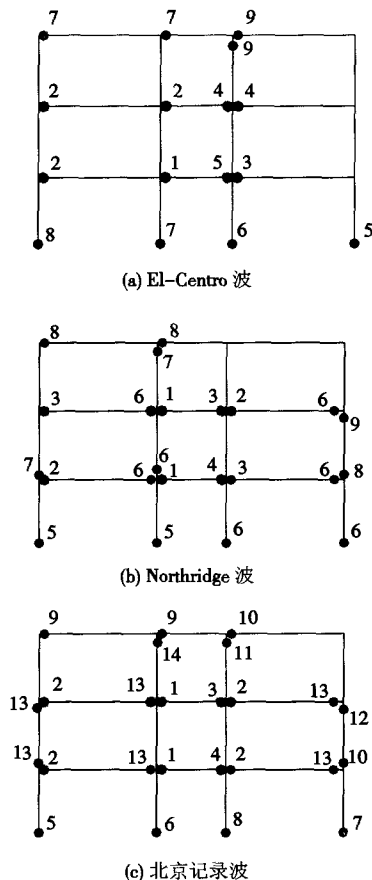


图8 模型 2 塑性铰出现位置和顺序

Fig.8 Location and order of plastic hinges for model 2

由图 8 可知,柱根出现塑性铰的顺序有较大幅度的推后,但二层边柱上、下端出现塑性铰的状况不但没有改善,而且在唐山地震北京记录波作用下还有些恶化,在 Northridge 波作用下,最大层间位移角也有所加大(见表 3),这是薄弱部位由底层转移到二层,使得二层柱上、下塑性铰出现较多的结果. 对此,对除柱根外的 T 形边柱纵向钢筋也进行加强,将其钢筋由原先的 10d20 改为 12d20,截面屈服面参数见表 2,称其为“模型 3”。

图 9 为模型 3 异形柱框架在 3 条波作用下的塑性铰出铰位置及顺序图,由图可以看出,改变了模型 2 柱上出铰较多的缺陷,基本上达到了“强柱弱梁”的要求。

综观模型 1、2 和 3 计算结果可见,模型 1,即规程^[2]规定的二级抗震等级框架柱根弯矩增强系数 1.4 有些偏小,模型 3 结果符合“强柱弱梁”要求. 参照模型 3 的配筋,根据本文第 5 节两种配筋 T 形柱受弯承载

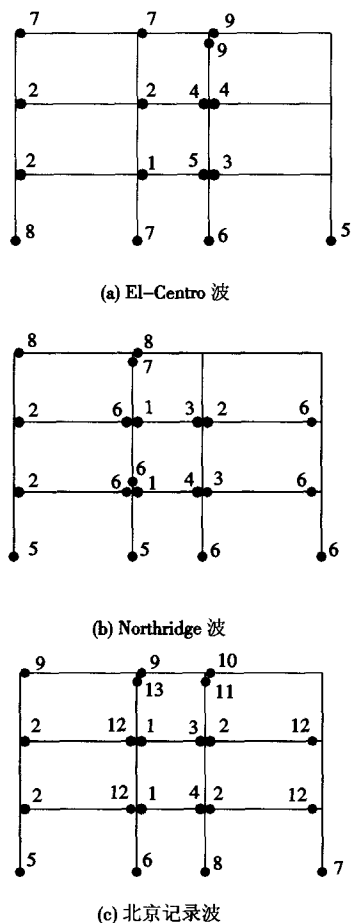


图9 模型3塑性铰出现位置和顺序

Fig.9 Location and order of plastic hinges for model 3

力比较,增强配筋(12d20)的比普通配筋(10d20)的高12%;两种配筋十字形柱受弯承载力比较,增强配筋(16d20)的比普通配筋(12d20)的高11.4%,并扣除模型1配筋结果由于最小配筋率要求和由配筋面积选配钢筋等原因比规程要求略大的因素,建议将底层中柱柱根弯矩增强系数由规程的1.4提高到1.5($\approx 1.4 \times 1.1$).T形边柱非柱根截面由规程的1.25提高到1.35($\approx 1.25 \times 1.1$),T形柱根由规程的1.4提高到1.6(T形柱根受弯承载力在大小偏压界限时模型3是模型1的1.214倍).

6 结论

(1)《混凝土异形柱结构技术规程》(JGJ149—2006)关于二级抗震等级一般部位的框架柱弯矩增强系数是合适的,但是柱根和T形边柱的弯矩增强系数值有些偏低,建议修订时适当增大.

(2)T形截面柱腹板肢端受压时,大小偏压界限的轴压比偏低是造成T形柱塑性铰过早出现的原因,本文提出的增强配筋形式在一定程度上缓解了此问题,增加的钢筋量不很多,且符合规程的构造要求,可供工程中应用.

(3)本文建议的措施推迟了柱端塑性铰的出现,使异形柱框架更符合“强柱弱梁”的屈服机制.

参考文献:

- [1] 刘光明,杨红,邹胜斌,等.基于新规范的钢筋混凝土框架抗震性能评价[J].重庆建筑大学学报,2004,26(1):40-49.
Liu Guangming, Yang Hong, Zou Shengbin, et al. Seismic assessment of RC frame structure based on new design codes [J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2004, 26(1): 40-49 (in Chinese).
- [2] 中华人民共和国建设部. JGJ149—2006 混凝土异形柱结构技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2006.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. JGJ149—2006 Technical Specification for Concrete Structures with Specially Shaped Columns [S]. Beijing: China Architectural Industry Press, 2006(in Chinese).
- [3] European Committee for Standardization. Doc CEN/TC250/SC8/N335 Eurocode 8 Design of Structures for Earthquake Resistance [S]. Brussels: CEN Central Secretariat, 2003.
- [4] ACI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318—99) and Commentary (ACI318—99 and ACI318R—99) [S]. Michigan: Farmington Hills, 1999.
- [5] 王依群.平面结构弹塑性地震响应分析软件 NDAS2D 及其应用[M].北京:中国水利水电出版社,2006.
Wang Yiqun. *Software of Inelastic Dynamic Response for Plane Structures NDAS2D and Applications* [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2006 (in Chinese).
- [6] 忻鼎康,邓景纹.钢筋混凝土T形截面柱双向轴压比及配筋研究[C]//王依群.混凝土异形柱结构理论及应用.北京:知识产权出版社,2006:42-48.
Xin Dingkang, Deng Jingwen. Study on bi-direction ratio of force and reinforcement of T shaped reinforced concrete columns [C]//Wang Yiqun. *Theory and Application of Concrete Structures with Specially Shaped Columns*. Beijing: Intellectual Property Publishing House, 2006:42-48 (in Chinese).
- [7] 刘中吉.不同配筋形式异形柱抗震性能研究[D].天津:天津大学建筑工程学院,2007.
Liu Zhongji. Study on Seismic Behavior of Specially Shaped Columns with Different Reinforcement Forms [D]. Tianjin: School of Civil Engineering, Tianjin University, 2007(in Chinese).