

文章编号: 1000-5013(2010)03-0322-05

异形柱框架结构抗震性能的概念设计

张大勇, 施养杭

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 针对异形柱框架结构的主要特征,在总结异形柱框架结构主要抗震性能试验成果的基础上,提出异形柱框架结构的概念设计。结合工程应用实际,通过对结构布置、柱肢长宽比、填充墙竖向刚度控制、柱梁刚度比和配筋形式及间距等方面的分析,明确初步设计中概念设计的原则和要求。通过算例,对影响异形柱框架结构抗震性能的主要参数进行分析,并采用动力时程分析方法,分别考察在设防和罕遇地震水准下结构的整体抗震性能。结果表明,在 7 度(0.15 g)下的异形柱结构的概念设计,符合抗震要求。

关键词: 异形柱; 框架结构; 概念设计; 抗震性能; 动力时程分析

中图分类号: TU 352.104

文献标识码: A

异形柱框架结构是以 T 字型、L 字型、十字形等截面柱代替传统的矩形截面柱组成的结构,近年来,国内学者对异形柱框架结构进行了一系列的抗震试验和理论分析工作。曹云中等^[1]用 3 个不同载力、延性、滞回特性、耗能能力、出铰顺序和破坏机制的试验,表明这种框架结构满足“强柱弱梁”的抗震要求。陈昌宏等^[2]对 6 个 T 字型截面柱框架节点试件(2/3 缩尺)进行低周期反复荷载作用下的试验研究,并用 ANSYS 进行了分析,推出 T 字型柱受力模型。艾兵等^[3]通过对一榀 4 层单跨混凝土宽肢异形柱框架结构在多质点低周反复荷载作用下的拟静力试验,分析其延性、滞回特性、骨架曲线及耗能等问题。刘进军等^[4]完成了 9 层异形柱框架结构(带转换层)1/8 比例模型振动台试验。但是,由于异形柱结构研究缺乏震害资料,《JGJ 149-2006 混凝土异形柱结构技术规程》(以下简称《规程》)中的抗震措施较普通混凝土柱的相应规定应有所提高。本文在总结部分抗震试验结论与理论分析的基础上,提出异形柱框架结构的概念设计。

1 异形柱框架结构概念设计

1.1 结构布置及梁截面尺寸

混凝土异形柱框架结构按力求布局合理、刚度均匀、减少扭转的布置原则,柱网按“密柱小梁”的布置思路,最佳轴网距离为 4~5 m,避免主次梁搭接。框架梁的截面高度按梁计算跨度的 1/15~1/10,且不小于 400 mm 确定,梁的净跨与截面净高的比值不宜大于 4,梁宽不小于柱宽及 200 mm。结构的高度限值和高宽比尽量符合《规程》的要求,7 度(0.15 g)框架结构的高度限值为 18 m,高宽比限值为 3。

1.2 柱肢长宽比

柱肢长宽比即柱肢长厚比,《规程》中规定柱肢长厚比不大于 4,且肢厚不小于 200 mm,肢长不小于 500 mm^[5]。从避免出现短柱的角度来说,异形柱的肢高短一些为好,但从框架节点对受力纵筋的锚固粘结来说,又要求肢高稍长一点为好。兼顾两个方面的原因,实际采用的柱肢高一般为 500~700 mm。为保证墙体的厚度适中,肢厚一般不宜超过 250 mm。文[6]研究表明,异形柱框架承载力、延性及滞回性能基本上随柱肢长宽比的增大而增强,抗扭性能却有所减弱;在肢长宽比为 3 左右时,异形柱框架结构

收稿日期: 2008-07-25

通信作者: 施养杭(1962-),男,教授,主要从事工程抗震与结构寿命的研究。E-mail: d.s666@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50578066); 华侨大学高层次人才科研启动项目(05BS303); 安徽省高校青年教师自然科学基金资助项目(2005JQ1231)

具有较好的延性和较大的顶层侧向极限位移;继续增大肢长宽比,各项性能却有所下降,而且对框架的刚度退化及破坏机制也有一定的影响。

1.3 填充墙竖向刚度控制

框架结构采用砌体填充墙且刚性连接,填充墙在与结构相互作用时,能够较大地增加结构的层间侧向刚度。结构构件的延性和抗弯承载力需求分布改变,可能改变结构的破坏机理,不应采用部分由砌体墙承重的混合结构形式。《规程》指出,框架的填充墙优先采用轻质墙体材料连接。文[7]研究表明,即使采用轻质墙体材料,刚性 5~10 倍,刚度效应仍十分明显。由此可见,结构设计时要重视框架填充墙结构的侧向刚度比纯框架结构的侧向刚度大的侧向刚度效应,避免楼层出现刚度突变。

目前,对于带填充墙的异形柱框架结构,可采用图 1 所示的模型计算抗侧刚度。侧向刚度 (K) 等于框架层间侧向刚度 (K_f) 与层间一片填充墙 (无洞填充墙) 侧向刚度 (K_w) 之和,即

$$K = K_f + K_w$$

式中: $K_f = 12k_c/H^2$, $K_w = 1/(\frac{l_w^3}{3E_wI_w} + \frac{1.2h_w}{G_wA_w})$ 。其中, h_w , A_w , I_w 分别为填充墙的墙体高度、

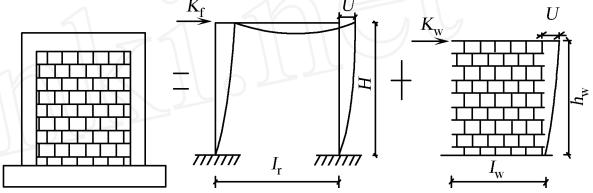


图 1 填充墙异形柱框架结构计算模型

Fig. 1 Analysis model of frames with special-shaped columns and infilled wall

截面面积和惯性矩; E_w , G_w 分别为砌体的弹性模量和剪切模量,可取 $G_w = 0.4 E_w$ 。由于非承重填充墙对结构整体刚度的影响,《规程》中规定,对异形柱框架结构的计算自振周期折减系数为 0.60~0.75。

1.4 柱梁刚度比

文[8-9]研究表明,异形柱框架结构在地震作用下属于典型的“强柱弱梁”结构,但没有考虑现浇楼板对梁端抗弯承载力的贡献。抗震规范一般要求考虑参与受拉的板筋和参与受压的梁侧有效板宽,或修正梁的初始抗弯刚度,以体现框架梁的抗震效应。但文[10-11]的研究表明,这些方式不能有效地估算梁在地震作用下的承载力和刚度的超强。

文[12]指出,提高柱端弯矩增大系数(CMAF),是“能力设计”措施中引导框架结构形成“强柱弱梁”型有利耗能机构的关键措施。采用较低的 CMAF,柱端不仅可能提前出现塑性铰,而且有可能塑性转动过大而形成同层各柱上、下端同时出现塑性铰的“柱铰机构”(层侧移屈服机构),导致地震中结构总体倒塌。分析表明,CMAF 大于 2.0 时,RC 框架结构能达到可以接受的形成柱铰机构的概率。

文[13]对柱梁抗弯强度比在 0.8~2.3 的异形柱框架结构进行研究。分析表明,柱梁抗弯强度比为 2.3 时,结构延性最好,而且结构倒塌前的顶点位移为柱梁抗弯强度比为 0.8 时的 543.7%。并且,要想实现“强柱弱梁”,柱梁抗弯强度比不应小于 2.0。

综上所述,异形柱框架结构的柱梁刚度比大于 2 时,才能基本形成“强柱弱梁”型有利耗能机构。但是,异形柱的抗弯强度求导较复杂,可按等效主轴惯性矩法将其换算成矩形截面进行估算。

1.5 配筋形式及间距

异形柱纵向受力钢筋的布置,以柱肢截面的内、外折角处均应设置为原则,二、三级抗震等级间距不大于 200 mm,直径要求是 14 mm \leq d \leq 25 mm。由于异形柱的肢厚都很小,对梁纵筋的锚固能力比普通矩形柱差,因此,异形柱结构贯通中柱的梁纵向钢筋直径还不应大于该纵筋方向柱肢长的 1/30。比如,支撑在肢长 600 mm 异形柱上的框架梁,其纵筋直径 $d \leq$ 20 mm。

异形柱箍筋为复合封闭式箍筋(禁止采用有内折角的箍筋),直径不应小于 8 mm,间距不应大于 150 mm,箍筋常用 10 @100/150,末端应做成 135° 的弯钩,弯钩端头直段长度应大于 10 d (d 为箍筋直径),且大于 75 mm。箍筋间距 s 与纵筋直径 d 之比 (s/d),是影响异形柱的延性的主要因素。文[14]建议在二级抗震等级下, s/d 的限值取 6,则纵筋压曲比例可控制在 0.34% 以下;而三、四级抗震等级时, s/d 的限值取 7。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 ,比采用较大的箍筋直径 d_v 及箍筋间距 s 的延性好。二级抗震等级异形柱箍筋加密区范围,角柱为全长加密,中柱及边柱取截面长边尺寸、柱净高的 1/6,500 mm 中的较大值,箍筋间距为 $\min\{6d, 100\text{ mm}\}$ 。

2 异形柱框架结构设计实例

2.1 工程概况

某异形柱框架结构,住宅楼长为 53.4 m,宽为 11.0 m,长宽比为 4.85,结构层高均为 3.0 m,总高为 18.0 m。楼板采用 120 mm 厚 C30 现浇混凝土板,梁截面为 200 mm ×450 mm,填充墙厚 200 mm。采用 9 kPa 空心混凝土砌块,所有梁柱截面纵向受力钢筋为 HRB335,板内钢筋及箍筋为 HPB235。

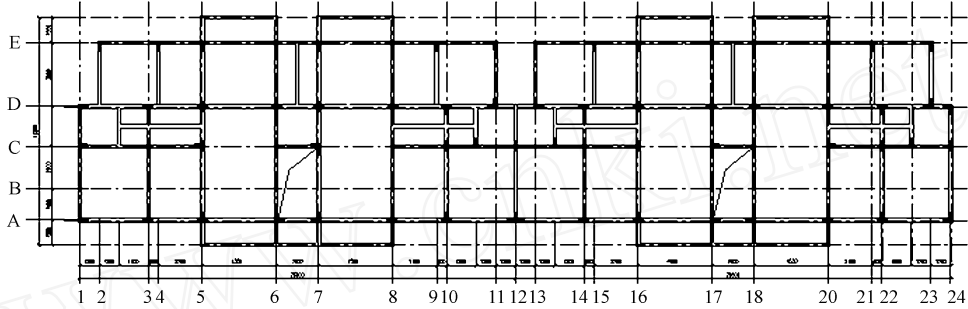


图 2 结构平面布置图

Fig. 2 Plans of frame structure

2.2 设计分析参数

工程结构初步设计采用 SATWE 有限元分析软件,设计输入参数周期折减系数为 0.7,中梁刚度放大系数 2.0,边梁为 1.5,梁柱重叠部分作为刚域;柱采用双偏压计算,特征周期为 0.55,多遇和罕遇地震作用下的影响系数分别为 0.12,0.72。全楼强制采用刚性楼板假定,柱梁最小刚度比满足强柱弱梁结构形式。L 字型、T 字型和十字型构件异形柱截面尺寸均为 600 mm ×200 mm ×200 mm,其矩形柱截面尺寸分别为 513 mm ×513 mm,441 mm ×540 mm,464 mm ×464 mm,而柱梁抗弯强度比分别为 2.62,2.23 和 2.37。校核配筋后,对影响异形柱框架结构设计合理性的几个主要参数进行分析。

3 结构设计合理性分析

3.1 轴压比

抗震设计中柱的轴压比(N/f_cA),是反映柱构件变形能力,影响柱破坏形式的重要因素。为了使异形柱框架结构在遭受地震作用时具有一定延性,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。通过限制轴压比,使框架柱发生延性较好的大偏心受压。对于小轴压比柱,增大轴压力能提高柱的抗震性能,形成更有利于“强柱弱梁”的屈服机制;对于大轴压比柱,却不利于柱的抗震性能。异形柱在单调荷载,特别在低周反复荷载作用下,粘结破坏较矩形柱严重,延性差,因此,异形柱的轴压比限值比矩形柱严格得多。

3.2 异形柱结构扭转效应的控制

在考虑偶然偏心影响的地震作用下,楼层竖向构件的最大水平位移和层间位移,分别不宜大于该楼层两端相应平均值的 1.2 倍,且不应大于该楼层两端相应平均值的 1.4 倍;结构扭转为主的第 3 自振周期 T_3 与平动为主的第 1 自振周期 T_1 之比不应大于 0.85。为了达到上述要求,应尽量使结构单元规则、刚度和承载力分布均匀。结构单元两个方向的抗侧移刚度差异太大,只能通过减少纵向侧移刚度、增大横向侧移刚度,即通过减少异形柱在纵向的柱肢高度,增大异形柱在横向的柱肢高度改变。算例周期计算结果,如表 1 所示。表 1 中, T 为周期, θ 为转角, γ 为平动系数, η 为扭转系数。

3.3 位移控制分析

现行规范中采用基于力的设计,即设计中常用的两阶段抗震设计。但文[15]研究表明,建筑结构在各阶段的性能与其位移有较好的相关性,与力没有很好的相关性。因此,在建筑结构设计初期,以位移作为设计变量更为合

表 1 周期计算结果

Tab. 1 Results of period calculation

振型	T	θ / rad	γ	η
1	0.787 3	89.98	1.00(0.00 + 1.00)	0.00
2	0.670 3	179.97	1.00(0.00 + 1.00)	0.00
3	0.650 3	169.95	0.00(1.00 + 0.00)	1.00

理. 层间位移角能够反映钢筋混凝土框架结构层间各构件变形的综合结果和层高的影响, 而且与结构的破坏程度有较好的相关性. 对结构进行振型分解反应谱分析和弹塑性时程分析, 分析结果如图 3 所示. 从图 3 的反应谱分析表明, 异形柱框架结构的位移限值满足《规程》要求, 具有良好的抗震能力, 在罕遇地震下结构不会发生倒塌, 满足人身安全保障.

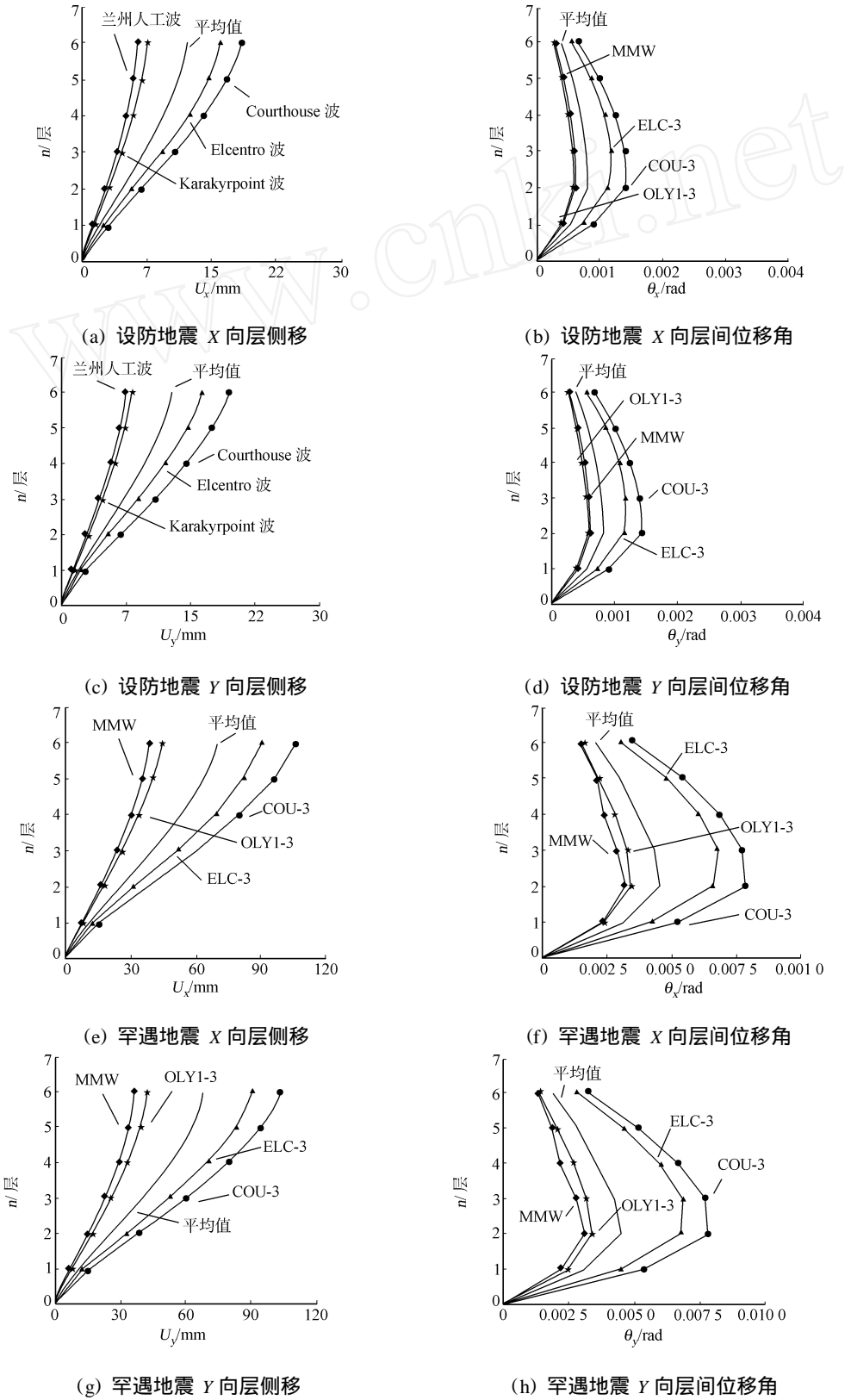


图 3 结构各层的最大层间位移角和最大层侧移

Fig. 3 Maximum story drift angle and maximum story lateral displacement

4 结束语

现阶段,不断采用新技术提高抗震计算分析能力,以实现抗震设计规范的抗震设防目标“小震不坏、中震可修、大震不倒”。对异形柱结构抗震设计来说,初期的概念设计比计算设计更为重要。只要进行合理的概念设计,符合一定的要求和原则,就能使计算分析结果较好地反映出地震时结构反应的实际情况,有效地控制结构在地震作用下的薄弱环节,达到合理抗震设计的目的。

参考文献:

- [1] 曹云中,干钢,唐锦春.柱肢长宽比对空间异形柱框架抗震性能的影响[J].工程力学,2007,24(4):118-123.
- [2] 陈昌宏,单建,马乐为,等.钢筋混凝土异形柱框架节点抗震性能试验[J].工业建筑,2007,37(2):6-10.
- [3] 艾兵,吴敏哲,郭棣,等.4层宽肢异形柱框架结构的抗震性能试验[J].工业建筑,2007,37(2):10-13.
- [4] 刘进军,吕志涛.9层(带转换层)钢筋混凝土异形柱框架结构模型振动台实验研究[J].建筑结构学报,2002,23(1):21-26.
- [5] 中华人民共和国建设部.JG 149-2006 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.
- [6] 王铁成,张学辉.异形柱框架抗震性能试验分析[J].四川建筑科学研究,2006,32(5):150-152.
- [7] FARDIS M N, PANAGIOTAKOS T B. Seismic design and response of bare and masonry-infilled reinforced concrete frame[J]. Journal of Earthquake Engineering, 1997, 1(1): 219-256.
- [8] 肖建庄,黄钰,张建荣,等.高性能混凝土异形柱边框架抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2002,23(6):19-25.
- [9] 郑汉兵,曹万林,马景春,等.底部矩形柱上部异形柱边框架抗震研究[J].世界地震工程,2002,18(4):106-110.
- [10] PANTAZOPOULOU S J, FRENCH C W. Slab participation in practical earthquake design of reinforced concrete frame[J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(4): 479-489.
- [11] LEE H S, WOO S W. Effect of masonry infill on seismic performance of a 3-storey RC frame with non-seismic detailing[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, 31(2): 353-378.
- [12] 蔡健,周靖,方小丹.柱端弯矩增大系数取值对 RC 框架结构抗震性能影响的评估[J].土木工程学报,2007,40(1):6-14.
- [13] 全国混凝土异形柱结构学术研讨会组委会.混凝土异形柱结构理论及应用[M].北京:知识产权出版社,2006.
- [14] 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.
- [15] 梁兴文,黄雅捷,杨其伟.钢筋混凝土框架结构基于位移的抗震设计方法研究[J].土木工程学报,2005,38(9):53-60.

Study on Seismic Performance and Conceptual Design of Frames with Special-Shaped Columns

ZHANG Da-yong, SHI Yang-hang

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: Based on summarizing the experimental results of seismic performance of frames with special-shaped columns, the requirements of conceptual design are clarified, which include structure layout, length-width ratio of columns limb, vertical rigidity of infilled wall, columns-beam rigidity ratio and reinforcement. The numerical example is presented, the main parameters influencing the seismic performance of special-shaped column frames are analyzed. The seismic performances of the structure under both frequent and rare earthquakes are discussed by the time-history dynamics analysis. The result indicates that the conceptual design of frame with special-shaped columns meets the seismic requirements of 0.15 g earthquake action.

Keywords: special-shaped column; frame structure; conceptual design; seismic performance; time-history dynamics analysis

(责任编辑:钱筠 英文审校:方德平)