

文章编号:1673-2049(2005)04-0045-05

加芯混凝土框架柱轴压比限值试验研究

郭军庆,王雪韵,雷自学,周天华

(长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061)

摘 要:为了解决高层结构设计中因轴压比限值影响使混凝土框架柱经常出现“胖柱少筋”等相关问题,通过 6 个加芯混凝土框架柱试件的低周反复伪静力试验,考察了试件的受力特性及破坏特征,分析了影响加芯混凝土框架柱延性的主要因素,并对各试件的 $V-\Delta$ 滞回曲线、位移延性比、极限位移转角等试验结果进行了研究。试验结果表明:轴压比、体积配箍率和芯柱纵筋配筋率对混凝土框架柱的延性及弹塑性变形性能均有较大的影响;在高轴压比下,采用较大的体积配箍率和芯柱纵筋配筋率是保证加芯混凝土框架柱抗震延性的重要措施。最后提出了加芯混凝土框架柱轴压比限值的新建议值。

关键词:加芯混凝土框架柱;试验研究;延性;轴压比限值

中图分类号:TU973.15

文献标志码:A

Experimental research on limit value of axial compression ratio for concrete frame columns with central reinforcement

GUO Jun-qing, WANG Xue-yun, LEI Zi-xue, ZHOU Tian-hua

(School of Architectural Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: In order to solve the problems frequently that the concrete frame columns are too fat and too lightly reinforced in the design of high-rise structures because of the limit values of axial compression ratio, through the test of six specimens of concrete frame column with central reinforcement under cyclic lateral loading, authors investigated the properties and failure pattern of specimens, analyzed the major factors affecting the ductility of concrete frame columns with central reinforcement, and studied the test results of each specimen, including V and Δ hysteresis curve, displacement ductility ratio, ultimate displacement rotation, etc. The test results show that axial compression ratio, volumetric tie ratio and longitudinal reinforcement ratio of central reinforcement are among the major factors affecting both the ductility and elastic-plastic behavior of concrete frame columns and that at a high level of axial compression ratio, large volumetric tie ratio and longitudinal reinforcement ratio are important measures to ensure good seismic ductility of concrete frame columns with central reinforcement. Finally, new limit values of axial compression ratio were recommended for concrete frame columns with central reinforcement.

Key words: concrete frame column with central reinforcement; experimental research; ductility; limit value of axial compression ratio

收稿日期:2005-08-15

基金项目:教育部科学技术研究重点项目(03162);陕西省自然科学基金项目(2002E₂01);

长安大学青年科技发展基金项目(Q0008009)

作者简介:郭军庆(1962-),男,山西闻喜人,长安大学副教授. E-mail:guojunq101@sohu.com

0 引言

轴压比是影响混凝土框架柱延性的主要因素之一。随着轴压比的增大,柱的延性将急剧下降^[1]。因此,中国现行抗震规范^[2](后文简称规范)中根据建筑的结构类型和抗震等级,对框架柱规定了不同的轴压比限值,以保证在地震作用时,框架柱具有较大的变形和耗能能力,实现结构的“大震不倒”。但在工程设计中,对于高层结构的框架柱,经常会因柱的截面尺寸由轴压比限值控制而出现“胖柱少筋”现象,即柱的断面很大,而纵向钢筋却为构造配筋^[3,4]。这样不仅减少了很多建筑空间,而且会对结构抗震产生更为不利的影响:①柱的剪跨比减小,延性随之降低^[3],并容易形成短柱;②由于结构自重增大,引起地震作用增大,更易加重结构震害。因此,在保证延性的前提下,如何提高柱的轴压比限值(对高层结构中的“胖柱”进行“减肥”),已成为中国结构抗震研究所关注的问题。目前对此问题的试验和理论研究也较多^[3~6],但除文献^[4]外,尚未检索到对加芯混凝土框架柱轴压比限值的相关研究。

加芯混凝土框架柱即在柱截面中部不小于三分之一的核心部分处附加纵筋与箍筋,形成矩形截面的芯柱(图 1),以提高柱的抗压能力和变形能力,减小柱的压缩变形,保持柱的外形和承载力,延缓结构的倒塌^[2]。规范中提出:当芯柱纵筋总面积不小于柱截面面积的 0.8%时,轴压比限值可增加 0.05。不难看出,规范对加芯混凝土柱可提高轴压比限值的规定是较为粗略和保守的,尚未考虑芯柱的纵筋配筋率、箍筋用量及截面大小等相关因素;而且轴压比限值增加 0.05 后,几乎对高层结构的“胖柱”没有“减肥”效果,如框架—剪力墙结构中的框架柱,混凝土采用 C40 级,最大设计轴力为 17 300 kN,当轴压比限值为 0.75 时,柱所需截面尺寸为 1 100 mm×1 100 mm,当轴压比限值增加 0.05 时,经计算,柱的截面尺寸约为 1 060 mm×1 060 mm。因此,有必要对加芯混凝土框架柱的轴压比限值作进一步研究。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

共设计了 6 个加芯混凝土框架柱试件,试件编号及参数见表 1,各试件均与各自梁式混凝土基座整浇制作。柱截面尺寸为 250 mm×250mm,基座截面尺寸为 350 mm×550 mm。

表 1 试件参数

Tab. 1 Specimen parameters

试件 编号	外围 纵筋	外围 箍筋	芯柱 纵筋	芯柱 箍筋	体积配箍 率 $\rho_v/\%$	轴压比标 准值 n_K	轴压比设 计值 n
KZA45		$\Phi 8-150$		无	0.67	0.45	0.765
KZB50		$\Phi 8-150$	4 $\Phi 12$	$\Phi 6.5-150$	0.92	0.50	0.850
KZC55*		$\Phi 8-75$		$\Phi 6.5-75$	1.85	0.55	0.935
KZD55*	12 $\Phi 12$	$\Phi 8-150$		无	0.67	0.55	0.935
KZE60*		$\Phi 8-150$	8 $\Phi 12$	$\Phi 6.5-150$	0.92	0.60	1.020
KZF65*		$\Phi 8-75$		$\Phi 6.5-75$	1.85	0.65	1.105

注: $n=1.7n_K$;标有*的试件,轴压比设计值已超过规范^[2]中表 6.3.7 的三级抗震轴压比限值;体积配箍率 ρ_v 的计算包括芯柱箍筋;表 1 中未列入的拉结筋为 $\Phi 8$,两根一组,随箍筋沿双向间隔设置。

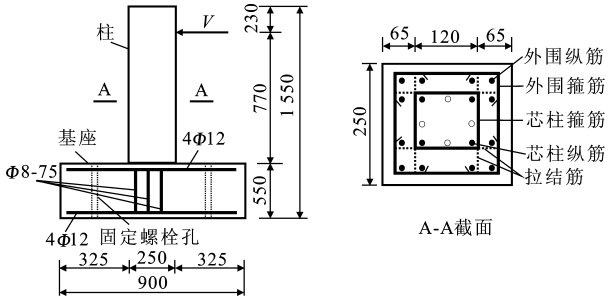


图 1 试件配筋及尺寸/mm

Fig. 1 Reinforcement and dimension of specimen

试件混凝土强度等级为 C25,柱纵筋为对称配筋,采用Ⅱ级螺纹钢筋 $\Phi 12$,箍筋为Ⅰ级光圆钢筋 $\Phi 6.5$ 、 $\Phi 8$ 。

1.2 材料性能

按《普通混凝土力学性能试验方法》(GBJ 81-85)进行了混凝土立方体抗压强度试验,实测平均立方体抗压强度为 26.63 MPa。依据《金属拉伸试验方法》(GB 228-87)对钢筋进行了材料性能试验,试验结果见表 2。

表 2 钢筋材料性能

Tab. 2 Properties of steel reinforcement material

直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	伸长率/%
$\Phi 12$	412	612	24.8
$\Phi 8$	398	507	23.7
$\Phi 6.5$	391	495	23.2

1.3 试验方法

试验是在长安大学建筑工程学院结构与抗震实验室进行的。试件的加载如图 2 所示。首先进行预加载,检查仪器是否正常工作。试验时按轴压比标准值一次施加恒定轴压力至预定值,采集数据,然后分级施加往复水平荷载。滚子滑板和球铰确保柱头只发生线位移而不发生角位移。试件的水平加载制

度均为全过程位移控制的变幅、等幅混合加载,加载曲线如图 3 所示。试件屈服点根据试件的实测水平剪力与柱顶位移的 $V-\Delta$ 曲线是否出现明显拐点及柱外围纵筋应变读数综合确定。柱顶(水平加载中心处)位移控制条件一般为每级增加 2~3 mm,直至水平荷载显著降低时,停止试验。

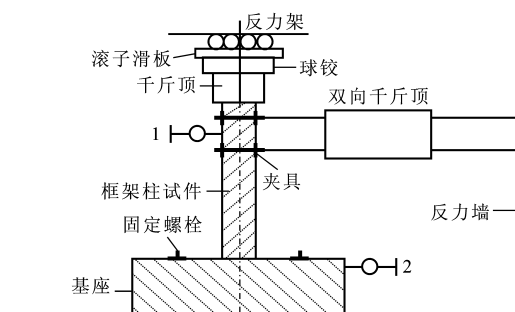


图 2 试验装置

Fig. 2 Test equipment

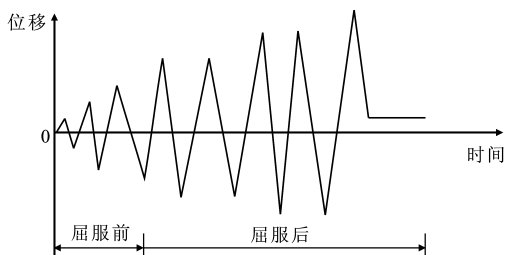


图 3 加载制度

Fig. 3 Loading system

对于每个试件,量测在各级荷载作用下的柱顶 $V-\Delta$ 滞回曲线、柱纵筋与箍筋应变。用两个百分表(图 2 中 1、2)分别监测柱顶和基座侧移。此外,观测和记录各级荷载作用下试件所发生的主要试验现象。

2 试验结果

2.1 破坏形态

2.1.1 混凝土

在加载初期,各试件基本处于弹性状态(Δ 为 2~6 mm 不等)。随着位移的增大,首先在柱根部高约 300 mm 的范围内会有水平裂缝出现,柱角附近相继有竖向裂缝产生。随着位移继续增大,水平裂缝逐渐贯通,宽度有所增加,且伴有新的水平裂缝出现;竖向裂缝趋于明显,并向上延伸,数量也有所增加。各试件破坏时,柱根部塑性铰发育较为充分,长度约在 200~500 mm 之间,且有一条较明显的水平通缝。在柱加载的正面和背面,根部混凝土严重压酥和剥落,多数试件有主筋和箍筋暴露现象,柱角的破坏也很突出。

2.1.2 纵向钢筋

在初始轴压力作用下,轴压比最大的试件 KZF65 外围纵筋压应变为 0.001 619,芯柱纵筋压应变为 0.001 38;其余试件外围纵筋平均压应变为 0.001 08,芯柱纵筋平均压应变为 0.000 89。不难看出:在未加水平荷载时,各试件外围及芯柱纵筋虽然尚未屈服,但初始压应变值已经较大。

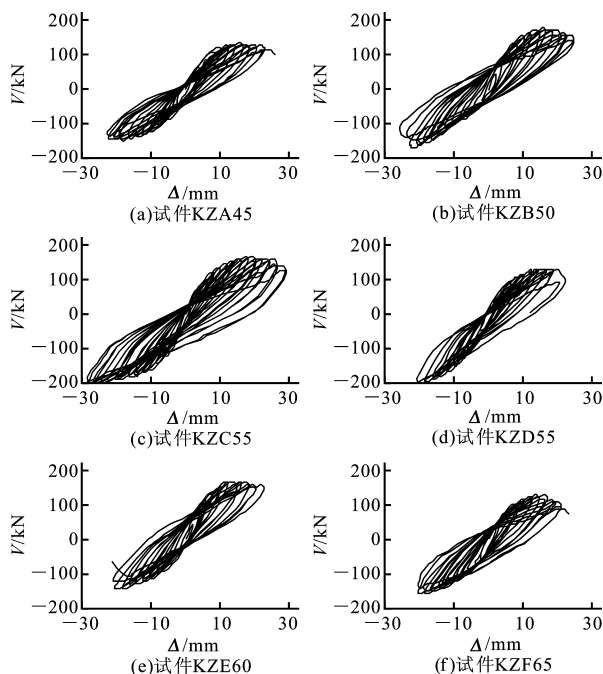
施加水平荷载后,当 $\Delta=6$ mm 左右时,大多数试件外围纵筋首先达到受压屈服。随着位移增大,所有试件芯柱纵筋也达到受压屈服(Δ 约为 10~16 mm)。当试件破坏时,外围纵筋和芯柱纵筋均未达到受拉屈服。

2.1.3 箍筋

试件破坏时,大多数试件的外围箍筋达到了受拉屈服,起到了约束效果。各试件的芯柱箍筋(KZA45 和 KZD55 除外)接近或达到受拉屈服,对柱的核心部分混凝土发挥了约束作用。

2.2 $V-\Delta$ 滞回曲线

6 个试件的 $V-\Delta$ 滞回曲线如图 4 所示。各试件的滞回环呈较为饱满的弓形,直至破坏均未出现“捏

图 4 柱 $V-\Delta$ 滞回曲线Fig. 4 Hysteresis loops curves of V and Δ

拢”现象,这说明其强度和刚度退化缓慢,具有良好的耗能能力。从图 4 可以看出:前 3 个试件(KZA45、KZB50、KZC55)的轴压比相对较小,曲线的滞回环相对较多;而后 3 个试件(KZD55、KZE60、KZF65)的轴压比相对较大,且有钢筋配置上的差

异,曲线的滞回环也明显减少。

2.3 变形性能

由于各试件的外围纵筋首先达到受压屈服,而且破坏时均未达到受拉屈服,则使滞回曲线上没有纵筋受拉屈服意义上的屈服点。因此,笔者根据骨架曲线按等能量法几何作图确定各试件的名义屈服点,并由此得到屈服位移 Δ_y 。取水平力下降至最大水平力的85%时为试件破坏,对应的柱顶位移为极限位移 Δ_u 。试件的最大水平剪力、延性系数($\mu=\Delta_y/\Delta_u$)及极限位移转角($R_u=\Delta_u/H$)见表3。试验结果表明:所有试件破坏时,极限位移转角均大于1/40 rad,满足规范关于框架结构弹塑性层间位移角限值1/50 rad的要求;从试件KZA45到KZF65,虽然轴压比设计值由0.765增至1.105,但位移延性比均能保持大于3,说明采取一定措施后,加芯混凝土框架柱在高轴压比下仍具有良好的塑性变形性能。

3 试验结果分析

3.1 影响延性的主要因素

试验表明:试件的轴压比、体积配箍率和芯柱纵筋配筋率是影响加芯混凝土框架柱滞回延性的主要因素。

3.1.1 轴压比

试件根据轴压比大小可分为KZA45、KZB50、KZC55与KZD55、KZE60、KZF65两组,按各组排序对应比较,即可看出轴压比的影响。如KZC55与KZF65,两个试件截面特征基本相同,只是后者芯柱纵筋配筋率较大;当轴压比设计值分别为0.975、1.105时,延性系数分别为3.3、3.2,极限位移转角分别为1/28、1/39 rad。由此可见:试件的延性将随轴压比的增大而减小。

表 3 主要试验结果
Tab. 3 Main test results

试件编号	最大水平剪力 V_{\max}/kN	延性系数 μ	极限位移转角 R_u/rad
KZA45	138	3.1	1/35
KZB50	160	3.2	1/32
KZC55	178	3.3	1/28
KZD55	161	3.2	1/39
KZE60	156	3.1	1/35
KZF65	136	3.2	1/39

注:最大水平剪力取最大水平推力与相应等位移水平拉力之和的平均值。

3.1.2 体积配箍率

KZA45、KZB50、KZC55的体积配箍率分别为

0.67%、0.92%、1.85%,其余截面特征相同;当轴压比设计值分别为0.765、0.850、0.975时,延性系数分别为3.1、3.2、3.3,极限位移转角分别为1/35、1/32、1/28 rad。说明当轴压比相对较小时,增大体积配箍率不仅可抵消轴压比增加对延性的不利影响,而且能够进一步改善试件的延性。

相比之下,KZD55、KZE60、KZF65的体积配箍率同样分别为0.67%、0.92%、1.85%,其余截面特征相同,且芯柱纵筋配筋率均较大;当轴压比设计值分别为0.975、1.020、1.105时,延性系数分别为3.2、3.1、3.2,极限位移转角分别为1/35、1/39、1/35 rad。可见当轴压比相对较大时,增大体积配箍率仍可抵消轴压比增加对延性的不利影响,能保持试件的滞回延性基本不变,但难以进一步改善试件的弹塑性变形性能。

3.1.3 芯柱纵筋配筋率

试件KZB50和KZE60的芯柱纵筋配筋率分别为0.72%、1.44%,轴压比设计值分别为0.85、1.02,其余截面特征完全相同;试验所得延性系数分别为3.2、3.1,极限位移转角分别为1/32、1/39 rad,即试件的延性性能变化不大。说明提高芯柱纵筋配筋率能够抵消轴压比增大的不利影响,改善试件的延性。

3.2 轴压比限值分析与建议

综上所述,轴压比仍是影响加芯混凝土框架柱滞回延性的不利因素。增大体积配箍率和芯柱纵筋配筋率可有效缓解高轴压比对延性的不利影响,使柱的弹塑性变形性能得以改善。以试件KZF65为例,虽然轴压比设计值已达1.105,但通过使体积配箍率和芯柱纵筋配筋率分别增大至1.85%、1.44%,可使延性系数达到3.2,极限位移转角达到1/35 rad,能够满足规范对混凝土框架柱的弹塑性变形要求。因此,当加芯混凝土框架柱在设计中采用较大的体积配箍率和芯柱纵筋配筋率时,轴压比限值的增加可以超过规范规定的0.05。

从图4(d)~(f)可以看出:对于轴压比较大的试件KZD55、KZE60、KZF65,其滞回曲线的滞回环相对较少,且骨架曲线下降段较短,破坏时呈现出一定的脆性特征。因此,为安全起见,建议加芯混凝土框架柱在抗震设计时采用表4所列的轴压比限值。

4 结 语

(1)加芯混凝土框架柱具有良好的抗震性能。即使轴压比超过规范限值,只要采取适当措施,其延

性是可以得到保证的,并能够满足规范中弹塑性变形的要求。

表 4 加芯混凝土框架柱轴压比建议限值
Tab. 4 Suggested limit values of axial compression ratio for concrete frame columns with central reinforcement

参 数	抗震等级		
	一级	二级	三级
轴压比限值	0.8	0.9	1.0
最小体积配箍率/%	2.0	1.8	1.6
芯柱纵筋最小配筋率/%	1.5		

注:芯柱箍筋的最小体积配箍率不应小于 0.30%,并按外围箍筋内表面所围的混凝土面积计算;芯柱纵筋配筋率按柱原截面面积计算。

(2)增大体积配箍率和芯柱纵筋配筋率是高轴压比下改善和提高框架柱延性的有效手段。

(3)在设计中采用表 4 所列的轴压比限值时,框架柱的混凝土强度等级不应低于 C30。

(4)芯柱截面面积和芯柱体积配箍率对框架柱滞回延性的影响有待进一步研究。

参考文献:

[1] 沈聚敏,周锡元,高小旺,等. 抗震工程学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2000.

[2] GB 50011-2001,建筑抗震设计规范[S].

[3] 肖建庄,朱伯龙. 钢筋混凝土框架柱轴压比限值试验研究[J]. 建筑结构学报,1998,18(5):2—7.

[4] 范 重,钱稼茹,吴学敏. 核心配筋柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2001,21(1):14—19.

[5] 肖建庄,张建荣,秦灿灿. 混凝土框架柱轴压比限值分析[J]. 建筑结构,2002,31(2):33—35.

[6] 郭军庆,许婷婷. 芯柱对混凝土框架柱轴压比限值的影响分析[J]. 工业建筑,2005,42(增):175—178.

《建筑结构学报》2006 年征订通知

《建筑结构学报》是由中国科学技术协会主管,中国建筑学会主办的学术性刊物;获首届及第二届“百种中国杰出学术期刊”称号、中国科协对基础性及高科技学术期刊择优支持经费资助;为中文核心期刊、中国科协优秀学术期刊、中国科协《中国学术期刊文摘》第一批入选期刊、中国学术期刊综合评价数据库及中国科学引文数据库来源期刊;被中国期刊网、中国学术期刊(光盘版)、美国工程索引(Ei Page One)收录。

《建筑结构学报》旨在报道和交流建筑结构领域中代表中国学术水平的最新研究成果,反映本学科发展最新动态和趋势,推动国内外的学术交流,为中国建筑科学技术研究的发展服务;主要刊登建筑结构、抗震防振、地基基础等学科的基础理论研究、应用研究和科学实验技术的学术论文、研究报告及最新进展动态。读者对象为:相关专业的高等院校师生和科研、设计、施工单位的工程技术人员,以及相关科技工作者。

《建筑结构学报》创刊于 1980 年,现为双月刊,大 16 开本,128 页。欢迎国内外读者订阅! 邮发代号 2-190,每期定价 20.00 元,全年共 120.00 元。

地址:北京三里河路 9 号建设部内《建筑结构学报》编辑部 邮编:100835

电话:(010)68715422 58933734 传真:(010)68715422 E-mail:jgxb@chinaasc.org