

文章编号:1671-6833(2014)01-0089-05

配置 HRB500 钢筋 T 形截面混凝土柱抗震性能研究

李艳艳^{1,2}, 李泽高¹, 刘 坤³, 张彦平^{1,2}

(1. 河北工业大学 土木工程学院, 天津 300401; 2. 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401;
3. 河北工业大学 校园规划处, 天津 300401)

摘 要: 对 4 根配置 HRB500 钢筋 T 形截面混凝土异形柱进行了低周反复试验, 分析了 HRB500 钢筋和与之匹配的高强混凝土 T 形截面异形柱的破坏形态, 承载能力及延性, 刚度退化, 滞回特性, 耗能能力等抗震性能指标, 讨论了配箍特征值和轴压比对 T 形截面柱的抗震性能的影响. 研究表明: 配置 HRB500 钢筋 T 形截面混凝土异形柱钢筋与高强混凝土协同工作较好, 具有较高的承载能力, 其延性性能和耗能能力等抗震性能指标良好, 能够在强震区的异形柱结构中使用.

关键词: HRB500 钢筋; T 形截面柱; 低周反复; 抗震性能

中图分类号: TU375.3 **文献标志码:** A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.01.021

0 引言

近年来, 钢筋混凝土异形柱结构体系作为一种新型结构体系越来越多地被应用于工程中, 而低强度钢筋、普通混凝土作为钢筋混凝土结构主材制约了异形柱结构体系的进一步推广应用. HRB500 钢筋因其强度高、延性好、社会经济效益显著等一系列优点, 在工程实际中的应用日益普遍^[1]. 目前针对普通钢筋混凝土异形柱的研究已较为完善^[2-4], 而对配置 HRB500 高强钢筋混凝土异形柱结构的性能研究尚未涉及, JGJ 149—2006《混凝土异形柱结构技术规范》^[5]及 GB 50011—2010《建筑结构抗震规范》^[6]也尚未列入. 因此, 为推广 HRB500 钢筋在异形柱结构中的应用, 笔者对配置 HRB500 钢筋 T 形截面混凝土异形柱进行了拟静力试验, 研究轴压比和配箍特征值对 T 形截面柱抗震性能的影响, 为 JGJ 149—2006《混凝土异形柱结构技术规程》的修编提供试验依据.

1 试验概况

1.1 试件设计

试验采用 1/3 缩尺设计试验构件, 考虑不同轴压比和配箍特征值两个因子共制作 4 个 T 形截

面混凝土异形柱构件, 肢宽肢厚比均为 2.9. 柱端设置高为 300 mm, 截面尺寸为 350 mm × 350 mm 的方形加载头, 固定底座高 450 mm. 设计两种箍筋间距: 60 mm, 90 mm, 配箍率分别为 2.69%, 1.97%. 混凝土强度等级 C50, 保护层 15 mm. 柱截面纵筋采用 16, 箍筋 8, 试件几何尺寸及配筋情况见图 1, 试件参数见表 1, 钢筋及混凝土的力学性能见表 2.

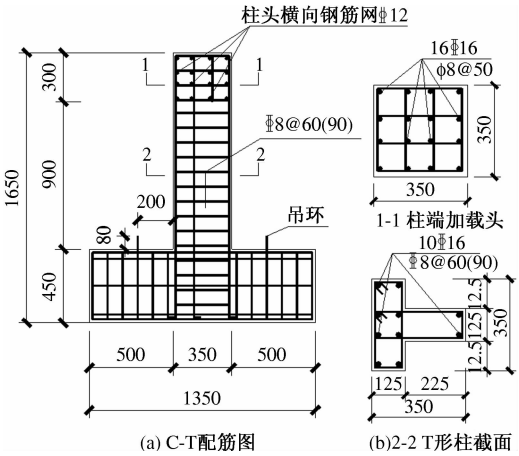


图 1 模型试件尺寸及配筋图

Fig. 1 Dimensions and reinforced details of specimens

1.2 加载方案

本次试验采用液压加载装置, 竖向力采用竖

收稿日期:2013-08-30; 修订日期:2013-10-19

基金项目: 天津市自然科学基金资助项目(12JCYBJC14100); 河北省建设科技研究计划项目(20122027); 河北省高等学校科学技术研究青年基金项目(Q2012083)

作者简介: 李艳艳(1979-), 女, 广西上林人, 河北工业大学副教授, 博士, 主要从事结构工程研究, E-mail: nicole_820@163.com.

向千斤顶在柱顶施加恒定压力,水平力通过反力墙上的水平液压伺服作动器作用在柱端加载头,加载装置如图 2 所示,试验加载采用力-位移混合控制加载制度,如图 3 所示,加载直至荷载下降至极限荷载的 85% 后,认为试件破坏,停止加载.

表 1 试件参数
Tab. 1 Parameters of specimens

编号	纵筋	箍筋	试验轴压比
C-TX60	10 Φ 16	Φ 8@ 60	0. 132
C-TX90	10 Φ 16	Φ 8@ 90	0. 132
C-TD60	10 Φ 16	Φ 8@ 60	0. 264
C-TD90	10 Φ 16	Φ 8@ 90	0. 264

表 2 实测钢筋和混凝土的力学性能
Tab. 2 Properties of reinforcing bars and concrete

规格	钢筋			混凝土		
	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	弹性模量/ $\times 10^5$ MPa	立方体抗压 强度/MPa	轴心抗压 强度/MPa	弹性模量/ $\times 10^4$ MPa
HRB500(8mm)	520	800	1. 78	51. 6	31. 6	3. 35
HRB500(16mm)	586	743	—			

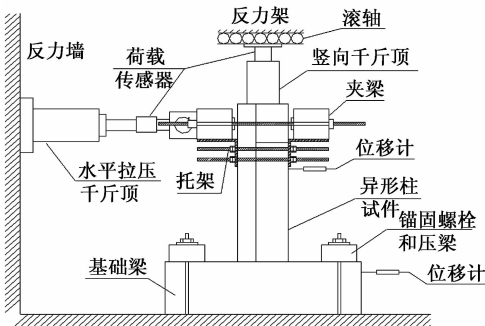


图 2 加载装置示意图
Fig. 2 Test set-up

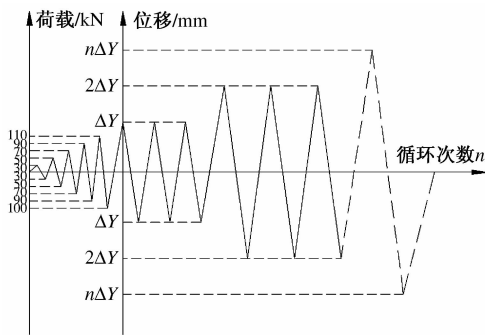


图 3 加载制度
Fig. 3 Loading system

破坏前,各试件的塑性变形发展较为充分,柱的塑性铰域主要发生在腹板柱底向上 30 ~ 250 mm 范围内,最终破坏形态为弯剪型破坏.

(2) C-TX60 和 C-TX90 腹板弯剪裂缝及剪切

2 试验结果分析

2.1 试验现象及破坏形态分析

各试件都经历了完整的加载过程.图 4 反映了配置 HRB500 钢筋 T 形截面混凝土异形柱在反复荷载作用下的破坏形态.

试验结果表明:

(1)屈服前,试件的水平裂缝较多,随着反复加载的进行,水平裂缝在柱底贯通,弯剪裂缝和斜裂缝迅速发展,剪切裂缝在柱底相交.加载后期,腹板柱底出现竖向裂缝,混凝土压溃剥落,纵筋和箍筋外露,纵筋屈曲外鼓,强剪弱弯性相对较强.

斜裂缝数量较多,宽度大,最终破坏时腹板剪切裂缝贯通.C-TD60 和 C-TD90 腹板剪切裂缝多产生在构件的中部,裂缝总体数量少,宽度小,剪切裂缝未贯通,加载后期翼缘背面出现较多的微小次斜裂缝.可见,随着轴压比的提高,试件破坏受剪力的影响也越大.

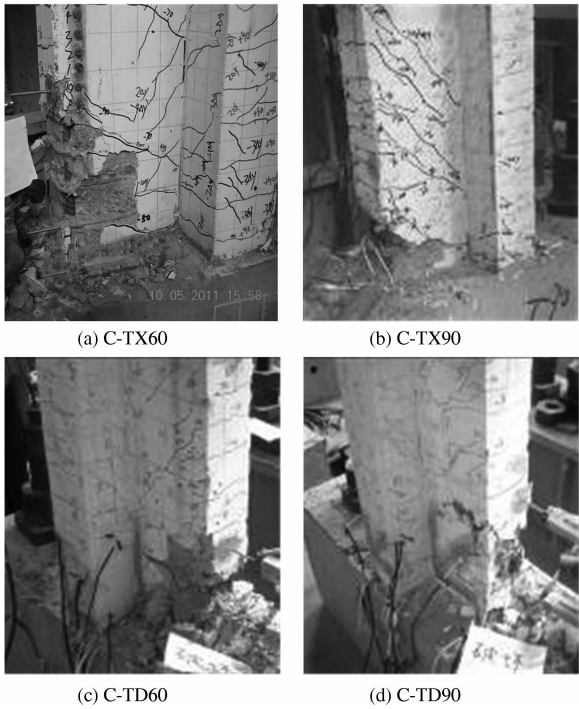


图 4 试件的破坏形态
Fig. 4 Failure mode of the specimens

(3)配箍率较高的 C-TX60 与 C-TD60 的塑性较域较大,发展的更为充分,表现出更优越的耗能性能.

2.2 承载力和位移延性

构件的位移延性系数表示为 $\mu_{\Delta} = \Delta_u / \Delta_y$. 其中: μ_{Δ} 为位移延性系数; Δ_u 为破坏时对应的位

移,取骨架曲线下降到 $0.85P_{\max}$ 时对应的位移,对于无明显下降段的取其最大位移; Δ_y 为屈服时对应的位移,对于无明显屈服点的构件,利用骨架曲线采用等效面积法来确定^[7]. 各主要阶段结果及位移延性系数列于表 3.

表 3 承载力、位移及延性系数
Tab. 3 Loading, displacement and ductility coefficient of T-shaped columns

试件编号		P/kN				Δ /mm				μ_{Δ}
		P_{cr}	P_y	P_{\max}	P_u	Δ_{cr}	Δ_y	Δ_{\max}	Δ_u	
C-TX60	正向	165.62	205.97	234.20	200.50	7.89	14.14	23.59	29.50	2.16
	反向	80.00	135.00	159.70	134.10	1.33	13.17	25.65	44.98	3.42
	均值	122.81	170.49	196.95	167.30	4.61	13.81	24.62	37.24	2.79
C-TX90	正向	109.70	188.78	210.34	178.79	6.84	12.38	23.38	28.52	2.30
	反向	58.67	140.92	171.38	154.62	1.56	11.85	22.51	39.29	3.32
	均值	84.19	164.85	190.86	166.71	4.20	12.12	22.95	31.91	2.81
C-TD60	正向	112.40	192.34	222.76	189.33	2.70	7.67	12.91	23.29	3.04
	反向	105.30	170.62	209.07	199.31	3.78	13.18	28.90	31.03	2.35
	均值	108.85	181.48	215.92	194.32	3.24	10.43	20.91	27.16	2.70
C-TD90	正向	86.67	219.92	258.60	219.83	2.46	11.62	21.38	27.81	2.40
	反向	69.30	126.67	152.07	143.76	2.80	10.43	20.50	33.65	3.23
	均值	77.99	173.30	205.34	181.80	2.63	11.03	20.94	30.73	2.81

注: P_{cr} 为试件开裂荷载, P_y 为试件屈服荷载, P_{\max} 为试件极限荷载, P_u 为试件破坏荷载; Δ_{cr} 为与 P_{cr} 对应的开裂位移, Δ_y 为与 P_y 对应的屈服位移, Δ_{\max} 为与 P_{\max} 相对应的极限荷载下的位移, Δ_u 为与 P_u 对应的破坏位移.

分析表 3 可知:

(1)由于 T 形截面柱正负向性能的迥异,正向加载时的开裂、屈服和极限荷载均较负向有不同程度的提高. 在较大轴压比下,当正向荷载下降至 $0.85P_{\max}$ 时,反向荷载仍未下降至反向的 $0.85P_{\max}$. 因此,正向荷载作用下的的力学性能和抗震指标成为衡量 T 形截面柱性能的决定因素. 在小轴压比范围内,随着轴压比的增大,试件极限承载力提高了 9.63% 和 7.59%,极限位移减小,主要原因是由于轴压比增大,使截面混凝土受压面积增大,改善了骨料咬合作用,提高了纵筋的销栓作用,从而提高构件的极限承载力. 但随着轴压比的增大,构件腹板受压时,延性系数略微有所提高,翼缘受压时,延性系数显著下降. 可见,适当提高轴压比可以提高构件极限承载力,但会降低构件整体延性;

(2)轴压比一定下,配箍特征值增大使试件的初始开裂荷载分别提高了 45.87% 和 39.57%,极限荷载提高 3.09% 和 5.15%,表明增大配箍率可以增强核心区混凝土抵抗横向变形的能力,约束混凝土斜裂缝开展,起到套箍约束的作用.

2.3 刚度退化

试件的等效刚度随弹塑性位移角变化的“刚度—位移角”关系曲线见图 5,可以看出加载全过程构件整体刚度的变化有以下特点.

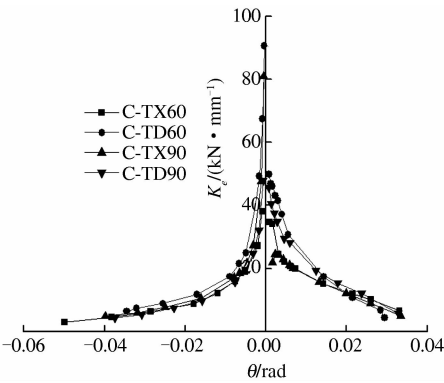


图 5 刚度 - 位移角关系曲线
Fig. 5 Curves of rigidity and displacement angle

(1)试件的正负向初始刚度有一定的差别, C-TD60 与 C-TD90 的初始正向刚度较 C-TX60 和 C-TX90 的大,分别提高了 44.3% 和 108.2%,表明适当增大轴压比可以提高构件正向初始刚度,这主要是因为 T 形柱本身的不对称性. 此外,随

着反复加载的不断进行,裂缝的开展与闭合引起的截面削弱,钢筋的 Bauschinger 效应,钢筋混凝土之间的锚固滑移等的作用使构件的正负向刚度趋于一致。

(2)试件反向刚度衰减情况类似,正向刚度随轴压比的不同出现差异。C-TD60 与 C-TD90 位移角为 1/80 时刚度开始缓降,而 C-TX60 与 C-TX90 在位移角达到 1/50 时刚度出现缓降,表明轴压比较小的试件后期抗震性能更加稳定。

2.4 滞回特性

实测 T 形截面柱的 $P-\Delta$ 滞回曲线及骨架曲线如图 6 和图 7 所示,曲线反映出 T 截面柱的显著特性—不对称性,其特点如下:

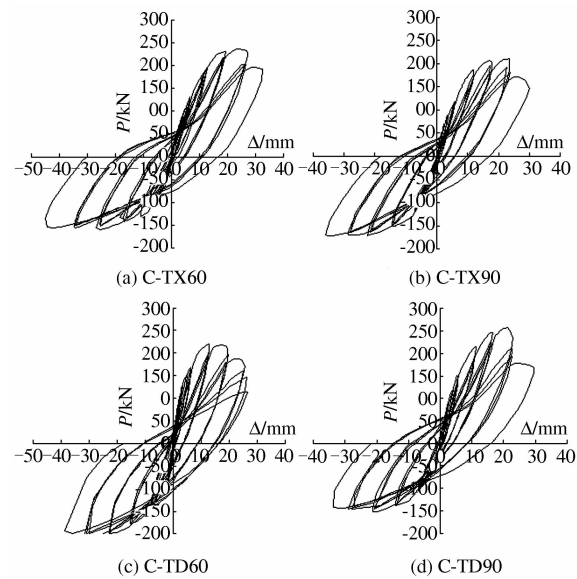


图 6 试件的滞回曲线
Fig. 6 Hysteretic loops of specimens

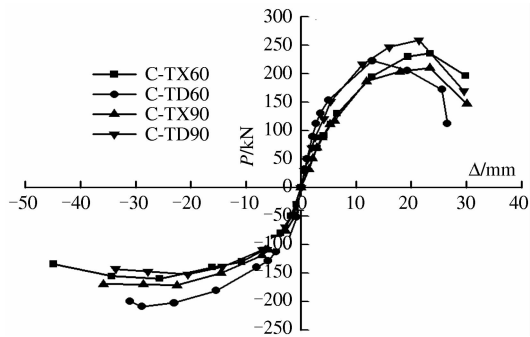


图 7 各试件的 $P-\Delta$ 骨架曲线
Fig. 7 Skeleton curves of specimens

(1)循环加载初期,试件处于弹性阶段,滞回曲线基本成直线,卸荷及变形恢复都比较充分;构件屈服后,随着位移幅值的增大及循环次数的增多,滞回环从梭形逐渐过渡到弓形,最后略呈反 S 形,曲线斜率随循环次数的增多而减小,滞回环面

积增大并向位移轴倾斜,加载后期呈现轻微“捏缩”现象,反映出剪切及钢筋的锚固滑移影响。

(2)同一滞回圈中正向水平荷载的衰减早于反向,且衰减速率较大,随着位移幅值的增大,衰减速率趋于一致,表明构件的变形和承载能力较好,刚度和强度退化比较平缓,后期延性性能良好。

(3)轴压比一定情况下,C-TX60 与 C-TD60 曲线相对更为饱满,变形更为充分,表现出较好的延性性能。

2.5 耗能能力

采用等效黏滞阻尼系数 h_e 来衡量试件的耗能能力,试件各主要阶段的等效黏滞阻尼系数 h_e 如表 4 所示,等效粘滞阻尼系数—位移变化曲线如图 8 所示。

表 4 等效黏滞阻尼系数
Tab. 4 Results of equivalent viscous damping coefficient

试件编号	等效黏滞阻尼系数 h_e			
	开裂	屈服	极限	破坏
C-TX60	0.087 1	0.171 3	0.338 9	0.435 5
C-TX90	0.054 4	0.089 4	0.133 8	0.211 3
C-TD60	0.096 2	0.101 8	0.164 7	0.242 6
C-TD90	0.081 4	0.097 7	0.145 9	0.227 7

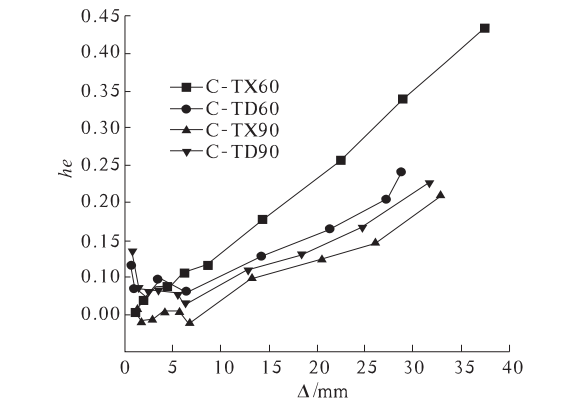


图 8 等效黏滞阻尼系数曲线
Fig. 8 Curves of equivalent viscous damping coefficient

分析表 4 和图 8 可知
(1)构件的的等效黏滞阻尼系数在屈服前均较小,屈服后增速较快,主要是由于加载后期,随着裂缝的不断开展,裂缝的张开与闭合要耗散大量能量,同时柱底塑性铰的形成和发展使塑性变形增大,耗能能力迅速增大。
(2)C-TD60 与 C-TX60 的较高,构件屈服前,C-TD60 与 C-TD90 的 h_e 较高,表明增大配箍率可以显著提高构件的耗能能力,适当增大轴压比,可

以改善构件屈服前的耗能性能,但对大变形后的影响不大.

3 结论

(1)配置 HRB500 钢筋的 T 形截面混凝土异形柱具有良好的延性,钢筋与混凝土协同工作较好,钢筋锚固滑移影响较小.增大配箍特征值可以显著提高异形柱的承载能力及后期耗能能力.

(2)在小轴压比(0.1~0.3)下,随着轴压比的增大,构件腹板受压时初始抗侧刚度略有提高,但构件整体延性有所下降.

(3)在小轴压比和适宜肢宽肢厚比情况下,配置 HRB500 钢筋 T 形截面混凝土异形柱承载力退化较慢,延性性能和耗能能力等抗震性能指标较好,能够在强震区的异形柱结构中使用.

参考文献:

[1] 李艳艳,杜闯,陈向上,等. HRB500 钢筋的锚固设计及可靠度分析[J]. 广西大学学报,2012,4(37):808

-813.

[2] RONG Xian, ZHANG Jian-xin, LI Yan-yan. Experimental research on seismic behavior of interior joints of specially shaped columns reinforced by fiber[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 94-96 :551-555.

[3] 王铁成,赵海龙. 纤维增强异形柱节点受剪承载力分析[J]. 江苏大学学报,2011,32(5):602-606.

[4] 吴波,荆亚涛. 高温下钢筋混凝土异形柱空间框架的试验研究[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2009,37(6):129-135.

[5] 中华人民共和国建设部. JGJ 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] 中华人民共和国建设部. GB 50011—2010,建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

[7] 中国建筑科学研究院. JGJ 101—96,建筑抗震试验方法规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.

Research on Seismic Behavior of HRB500 Reinforced Concrete T-shaped Section Columns

LI Yan-yan^{1,2}, LI Ze-gao¹, LIU Kun³, ZHANG Yan-ping^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Tianjin 300401, China; 3. Campus Planning Office of Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: Based on the tests of four HRB500 RC T-shaped section columns under axial compression and low cyclic reversed lateral load, the failure mode, bearing capacity, ductility performance, rigidity degradation, hysteretic behavior, energy dissipation and cumulative damage of the specimens were studied systematically. The influence of reinforcement characteristic value and axial compression ratio on the seismic behavior was discussed in the investigation. Experimental results indicate that, under certain width-thickness ratio and appropriate axial compression ratio, the member's bearing capacity, ductility and energy dissipation are improved dramatically with the increasing of the reinforcement characteristic value. It has been revealed that the HRB500 RC T-shaped section columns have excellent seismic performance, which can be used in the structure with specially shaped columns in meizoseismal regions.

Key words: HRB500 reinforced bar; T-shaped section column; low cyclic reversed loading; seismic behavior