

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.073



# 配置 HRB600E 高强钢筋的混凝土柱 抗震性能试验研究

戎贤<sup>1a,1b</sup>, 杜金<sup>1a</sup>, 陈晨曦<sup>2</sup>, 常伟峰<sup>2</sup>, 张建新<sup>1a,1b</sup>

(1. 河北工业大学 a. 土木与交通学院; b. 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401;  
2. 河北曲港高速公路开发有限公司, 河北 定州 073000)

**摘要:** HRB600E 钢筋是一种新型高强度钢筋, 为改善矩形柱抗震性能并推广 HRB600E 级高强钢筋的应用, 通过对 6 个配置 HRB600E 钢筋的不同轴压比、不同钢筋强度和纵筋配筋率的混凝土矩形柱进行低周往复荷载试验, 得到试件的滞回曲线、骨架曲线和纵筋应变曲线。对比分析高强钢筋混凝土柱的破坏特征、滞回特性、骨架曲线、刚度退化等抗震性能指标。研究表明: 配置 HRB600E 高强钢筋的混凝土柱的破坏特征与配置普通钢筋的混凝土柱相似; 通过减小轴压比或增加钢筋强度均能改善配置 HRB600E 高强钢筋试件的滞回特性、减缓刚度退化、提高试件的抗震性能; 配置高强钢筋的构件与高强混凝土配合使用时受力性能更优。

**关键词:** 高强钢筋; 框架柱; 轴压比; 纵筋率; 抗震性能

**中图分类号:** TU375.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2096-6717(2019)04-0069-08

## Experiment research on seismic performance of column reinforced with HRB600E bars

Rong Xian<sup>1a, 1b</sup>, Du Jin<sup>1a</sup>, Chen Chenxi<sup>2</sup>, Chang Weifeng<sup>2</sup>, Zhang Jianxin<sup>1a, 1b</sup>

(1. a. School of Civil Engineering and Transportation; b. Hebei Civil Engineering Technology Research Center, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China; 2. Hebei Qugang Expressway Development Co. Ltd., Dingzhou 073000, Hebei, P. R. China)

**Abstract:** HRB600E bar is a new type of high-strength reinforcing bar. For improving the seismic performance of rectangular columns and popularizing the HRB600E bar, the reversed cyclic loading test for different coaxial compression ratio, reinforcement strength and longitudinal reinforcement ratio is firstly carried out for the six high strength reinforced concrete columns with HRB600E bars. Then, the hysteric curve, skeleton curve and longitudinal reinforcement strain curve of specimen under low cyclic reversed loading were obtained. Finally, the failure characteristics, hysteresis characteristics, skeleton curves and stiffness degradation of high strength reinforced concrete columns are analyzed. The results showed that the failure characteristics of the high strength reinforced concrete columns with HRB600E are similar to the common reinforced concrete columns. Reducing the axial compression ratio or increasing the reinforcement

**收稿日期:** 2018-12-22

**基金项目:** 河北省自然科学基金(E2017202278, E2018202290); 河北省交通运输厅科技计划(QG2018-2)

**作者简介:** 戎贤(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事结构抗震研究, E-mail: xrong@hebut.edu.cn.

**Received:** 2018-12-22

**Foundation item:** Natural Science Foundation of Hebei (No. E2017202278, E2018202290); Hebei Provincial Department of Transportation Science and Technology Project (No. QG2018-2)

**Author brief:** Rong Xian (1965-), professor, doctoral supervisor, main research interest: structure aseismic, E-mail: xrong@hebut.edu.cn.

strength can improve the hysteresis characteristics of high strength reinforced concrete columns with HRB600E bars. Besides, the seismic performance of the specimen can be improved by reducing stiffness degradation. The mechanical behavior of the high strength reinforced concrete columns is better when used with high strength concrete.

**Keywords:** high-strength reinforcing bars; frame column; axial compression ratio; longitudinal reinforcement ratio; seismic performance

HRB600E 钢筋具有强度高、安全储备量大的特点,是一种经济、高效的新型钢筋<sup>[1-2]</sup>。学者 Oosalem 等<sup>[3]</sup>、Rautenberg 等<sup>[4]</sup>、Tokgozs 等<sup>[5]</sup>、Karayannis 等<sup>[6]</sup>做了许多关于配置高强钢筋结构体系的各类试验研究及分析,试验结果表明,在混凝土柱中采用高强钢筋可在一定程度上提高试件延性性能,减小残余变形,降低耗能,在一定程度上减少箍筋用量。

中国学者也进行了配置 600 MPa 高强钢的钢筋混凝土柱的试验研究<sup>[7-12]</sup>,戎贤等<sup>[13-14]</sup>对配置 HRB600 高强箍筋的 T 形柱和十字形柱进行抗震试验研究,试验结果表明,配置该钢筋的混凝土异形柱具有良好的承载能力和变形能力,同时,增加钢筋的配箍率可在一定程度上提高试件的变形能力,增强构件的延性性能。苏俊省等<sup>[15]</sup>和王君杰等<sup>[16]</sup>分别对配置 HRB335、HRB500E、HRB600 钢筋的混凝土柱的抗震性能进行低周反复试验。从纵筋强度、箍筋强度及混凝土强度 3 个方面分析其对试件抗震性能的影响。结果表明:相比配置普通钢筋的混凝土柱,配置高强钢筋的混凝土柱的抗震性能相近,但采用 HRB600 级钢筋能在一定程度上减少钢筋用量,降低能耗。

现行的《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中虽已列入 HRB500 钢筋,但未列入 HRB600 钢筋<sup>[17]</sup>。高强钢筋应用技术水平与国外还有显著差距。为改善矩形柱抗震性能并对 HRB600E 钢筋进行进一步推广应用,本文对配置 HRB600E 钢筋的混凝土矩形柱试件进行低周往复荷载试验,研究其抗震性能并分析轴压比、钢筋强度和纵筋配筋率对试件抗震性能影响。

在中国大力提倡节能减排、绿色环保的时代背景下,普通强度钢筋作为土木工程建设用钢主材的状况已无法满足建设发展的需要,现阶段许多科研单位及院校对配置 600 MPa 钢筋的混凝土柱有所研究。刘彬等<sup>[18]</sup>对配置 HRB600 箍筋的混凝土短柱进行实验,研究表明,密配高强箍筋的混凝土短柱在高轴压比下具有良好的延性,八角箍筋和井字箍筋比矩形箍筋的抗震性能更优;张建伟等<sup>[19]</sup>对配置

HRB600 级钢筋高强混凝土柱的轴心受压力学性能进行研究,结果表明:随着混凝土强度等级的提高,HRB600 级钢筋高强混凝土柱的承载力明显提高;增大配箍率,可以提高柱的承载力和延性,并给出 HRB600 级钢筋的抗压强度值取 500 MPa 时有足够的安全储备。张萍等<sup>[7]</sup>研究了轴压比对配置 HRB600 钢筋作为箍筋混凝土柱抗震性能的影响,认为随着轴压比的增大,试件抗震性能将变差。戎贤等<sup>[13-14]</sup>对配置 HRB600 高强箍筋的 T 形柱和十字形柱进行抗震试验研究,结果表明,增加钢筋的配箍率可在一定程度上提高试件的变形能力,增强构件的延性性能。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

试验以轴压比、钢筋强度和纵筋率为变化参数,共设计制作 6 个混凝土矩形柱试件。试件柱高 1 200 mm,截面尺寸为 300 mm×300 mm,保护层厚度为 20 mm,试件设计参数如表 1 所示,试件的几何尺寸及配筋如图 1 所示。为避免强剪力的影响,试件剪跨比  $\lambda$  均为 3.5,该试验采用 C50 混凝土,试验前期测量混凝土立方体抗压强度,实测平均值为 51.5 MPa,根据《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50512—2012)计算得到混凝土轴心抗压强度值为 33.1 MPa,对应其弹性模量 34.8 GPa。试件中钢筋的力学性能如表 2 所示。

表 1 高强钢筋混凝土柱试件设计参数

Table 1 Design parameters of specimens

编号	纵筋配置	纵筋配筋率/%	箍筋配置	配箍特征值	轴力/kN	轴压比
C-F1	8E16	1.79	E8@90	0.172	300	0.121
C-F2	8E16	1.79	E8@90	0.172	500	0.202
C-F3	8E16	1.79	E8@90	0.172	700	0.281
C-M1	816	1.79	8@90	0.124	500	0.202
C-M2	816	1.79	8@90	0.150	500	0.202
C-ZJ	8E20	2.79	E8@90	0.172	500	0.202

注:E表示配置的钢筋为 HRB600E 级钢筋。

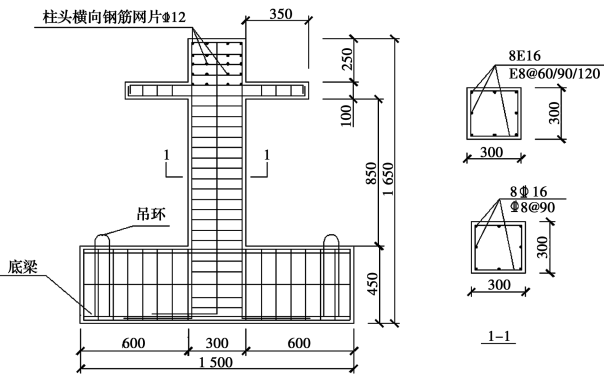


图 1 试件的几何尺寸及配筋

Fig. 1 Details of specimen

表 2 钢筋力学性能

Table 2 Properties of reinforcing bars

钢筋规格	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	伸长率/%
HRB600E(8 mm)	634.50	782.51	25.83
HRB600E(16 mm)	661.12	817.92	20.42
HRB600E(20 mm)	678.07	845.17	19.67
HRB500(8 mm)	456.61	632.98	28.33
HRB500(16 mm)	537.35	713.09	25.42
HRB400(8 mm)	488.85	519.57	17.50
HRB400(16 mm)	456.73	634.26	27.92

### 1.2 加载装置及制度

该试验采用拟静力加载制度,试验加载装置和加载程序如图 2 所示。

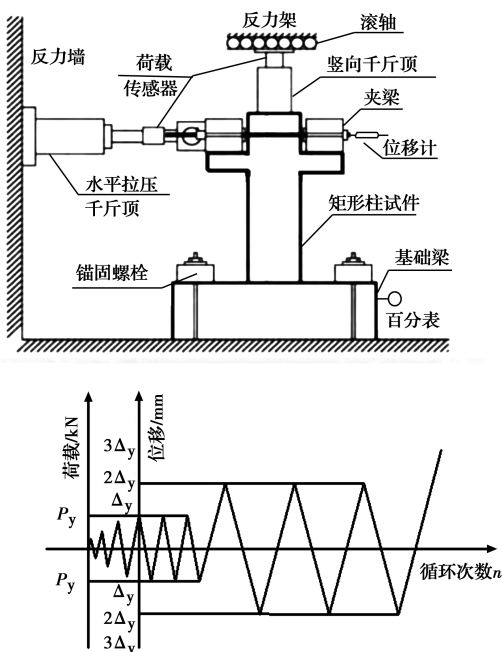


图 2 加载装置及加载制度

Fig. 2 Loading equipment and loading system

基于《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015),实验采用力-位移混合控制的加载方式。试验开始时,首先按照表 1 参数在混凝土柱柱顶施加相应的轴力,屈服荷载试验值为钢筋第 1 次达到屈服时施加的荷载值,此时对应的位移为试验屈服位移,在力控制阶段,分 3~5 次加载,使试件屈服。当试件达到屈服后,由力控制转向位移控制,并进行下一阶段的加载,此阶段以屈服位移的整数倍数进行逐级加载,每次加载时,荷载循环 3 次,当试验荷载降为试验峰值荷载的 85% 以下时,终止试验,认为试件破坏。

### 2 试件破坏特征

各个试件的裂缝开展与破坏形态基本一致,如图 3 所示。

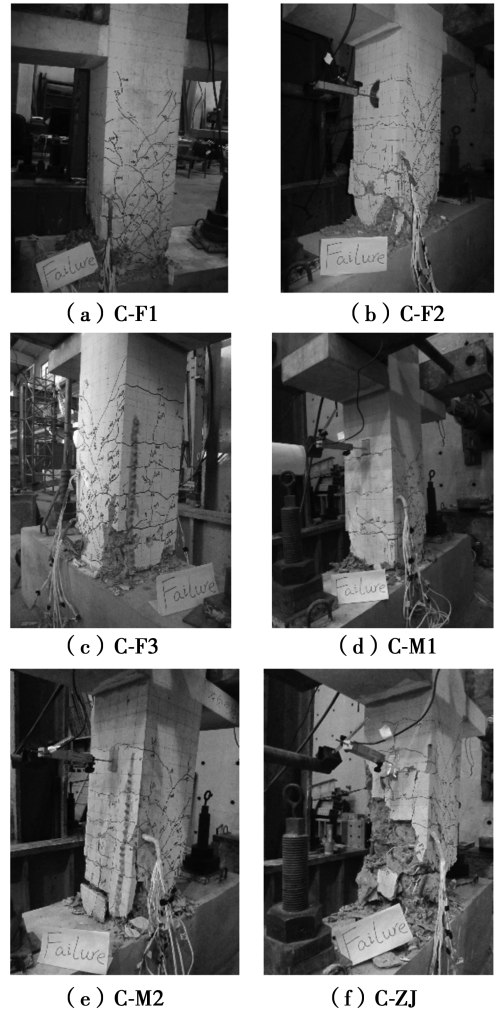


图 3 各试件破坏形态

Fig. 3 Failure characteristic of specimen

对比各个试件破坏特征可以发现:各试件破坏形态均为弯曲破坏。加载试件首先在受拉区距柱底

50~100 mm 处产生细微的水平受弯裂缝;随着荷载的增加,构件裂缝不断增加并形成贯通裂缝,并向非加载面延伸,钢筋屈服后,试件出现残余变形,裂缝进一步扩展,位移控制时,柱底混凝土受压起皮,柱脚开始被压裂;随后,纵筋位置对应的构件表面发生沿纵筋方向的竖向裂缝,并沿纵筋逐渐向上延伸,混凝土逐渐被压碎,混凝土保护层剥落,钢筋外露,试件达到破坏。

C-F1、C-F2、C-F3 3 个试件可知,轴压比较大的试件开裂和塑性铰产生得相对较晚,裂缝开展更为缓慢,承载力相对提升,但混凝土压碎情况更为严重,表明增大轴压比可以提高骨料的咬合性能,并在一定程度上推迟裂缝的产生和发展,但构件破坏形态加重。

对比试件 C-F2、C-M1、C-M2 可知,随着钢筋强度的增加,试件达到屈服的荷载和位移增加,裂缝宽度增大且数量增多,混凝土压碎得更加严重,但破坏位移稍有减小。

对比试件 C-F2、C-ZJ 可知,随着试件纵筋配筋率的增加,破坏时钢筋与混凝土之间出现裂缝较早,混凝土破坏严重,为了防止发生粘结破坏,建议限制构件配置高强钢筋时的纵筋配筋率。

### 3 试验结果分析

#### 3.1 滞回特性

根据试验得到各试件的水平荷载-柱顶位移曲线如图 4 所示。

分析滞回曲线,反映出配置高强钢筋的矩形截面柱具有 4 个特点:

1)各试件的滞回曲线均呈现梭形。在试验加载初期,试件处于弹性阶段,对应的滞回曲线近似呈现线性关系,残余变形较小,耗能较小。试件加载至屈服时,试验加载方式由力控制转到由位移控制,试件的变形不断增大,滞回曲线逐步趋近饱满,同时,表现出明显的非线性趋势,耗能增强,承载力有所提高。

2)对比 C-F1、C-F2、C-F3 3 个试件可知,当轴压比逐步增加时,单次循环的耗能能力有所增加,循环次数减少,试件的延性降低。

3)对比 C-M1、C-M2、C-F2 3 个试件可知,随着钢筋强度的提高、滞回环循环次数减少,试件的承载力有所上升。

4)对比 C-F2、C-ZJ3 个试件可知,提高纵筋率,试件的承载力明显提高,变形能力有所增加,滞回环更加饱满。

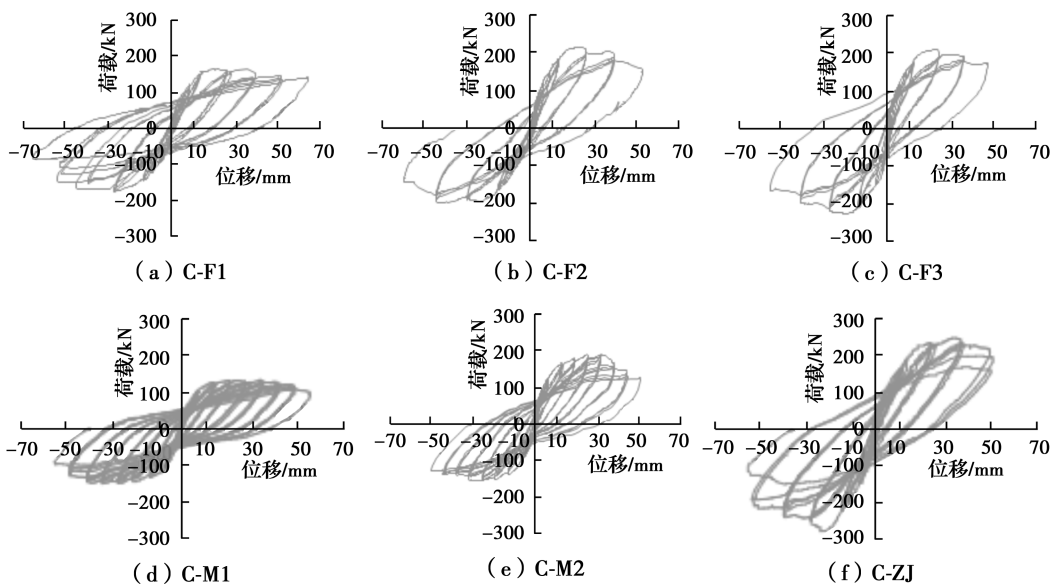


图 4 各试件滞回曲线

Fig. 4 Hysteretic loops of specimens

#### 3.2 位移和延性分析

各试件的屈服状态、峰值状态和破坏形态所对应的荷载、位移及位移延性系数如表 3 所示。因在试验位移加载阶段,当试验荷载降为峰值荷载的

85%以下时,即认为试件破坏。故试件破坏状态下的荷载即为 0.85 倍峰值荷载,此时,对应的位移值为破坏位移。

将各试件的承载力、位移及延性进行比较,可以



得出以下结论:

1)各试件的位移延性系数均值都达到 3 以上,表明配置 HRB600E 钢筋混凝土柱具有较好的变形能力。

2)对比 C-F1、C-F2、C-F3 3 个试件可知,随着轴压比的增加,竖向约束作用增强,改善了骨料咬合作用,同时使试件的受压区高度增加,试件承载力提高,C-F3 比 C-F1 的峰值荷载增大了 30.6%,但试件 C-F1、C-F2、C-F3 的破坏位移分别为 55.69、44.87、39.39 mm,位移延性系数分别为 4.60、3.65、3.61,表明轴压比增加,试件开裂荷载和承载力增大,延性降低。

3)对比 C-M1、C-M2、C-F2 3 个试件可知,随着钢筋强度的提高,试件 C-F2 的峰值荷载比 C-M1、C-M2 分别增大 27.6%、10.9%,试件 C-F2 的位移延性系数比 C-M1、C-M2 分别减少 17.2%、1.4%。表明高强钢筋可以增加试件的承载力,但延性性能有所降低。

4)对比 C-F2、C-ZJ 两个试件可知,提高纵筋率,试件 C-ZJ 的峰值荷载比 C-F2 高了 29.7%,破坏位移增加了 9.1%,位移延性系数减少了 15.9%,表明增加配筋率可以增加试件的承载力,但延性性能减低。

表 3 承载力、位移及延性系数

Table 3 Bearing capacity, displacement and ductility factor

编号	加载方向	屈服状态		峰值状态		破坏状态		位移延性系数
		荷载/kN	位移/mm	荷载/kN	位移/mm	荷载/kN	位移/mm	
C-F1	正向	137.71	11.21	164.64	21.55	139.94	63.86	5.70
	负向	146.73	13.56	173.57	26.08	147.53	47.51	3.50
	平均	142.22	12.39	169.11	23.82	143.74	55.69	4.60
C-F2	正向	171.66	10.98	197.86	26.13	168.18	46.77	4.26
	负向	164.40	14.15	196.07	23.26	166.66	42.97	3.04
	平均	168.03	12.57	196.97	24.70	167.42	44.87	3.65
C-F3	正向	177.09	11.96	210.71	22.84	179.11	40.83	3.41
	负向	183.15	9.96	230.91	19.47	196.27	37.94	3.81
	平均	180.12	10.96	220.81	21.16	187.69	39.39	3.61
C-M1	正向	112.05	10.18	132.50	33.99	112.63	49.84	4.90
	负向	128.98	11.78	152.86	33.80	129.93	46.11	3.91
	平均	120.52	10.98	142.68	33.90	121.28	47.98	4.41
C-M2	正向	160.81	11.17	193.57	24.77	164.53	38.40	3.44
	负向	134.68	11.68	157.50	30.28	133.88	46.30	3.96
	平均	147.75	11.43	175.54	27.53	149.21	42.35	3.70
C-ZJ	正向	203.83	18.77	247.14	34.16	210.07	52.43	2.79
	负向	221.54	13.63	263.93	26.71	224.34	45.51	3.34
	平均	212.69	16.20	255.54	30.44	217.21	48.97	3.07

### 3.3 骨架曲线

各个构件的滞回曲线图得到骨架曲线如图 5 所示。

分析滞回曲线反映出配制高强钢筋的矩形截面柱具有以下特点:

1)在试验加载初期,骨架曲线近似相同,斜率最大,随着加载的不断进行,试件受拉区出现开裂,进而裂缝不断开展,试件进入弹塑性工作阶段,骨架曲线斜率减小,直到试件达到极限承载状态,随后表现

出明显的刚度和强度退化特征。此外,各试件骨架曲线总体较为对称,在破坏阶段,负向加载时荷载下降较为迅速,曲线下降速率较为一致。

2)对比 C-F1、C-F2、C-F3 3 个试件可知,相较于高轴压比试件,低轴压比构件强度退化明显较晚,说明轴压比较低的时间累积损伤发展相对较慢,有利于抗震。

3)对比 C-M1、C-M2、C-F2 3 个试件可知,试件的峰值荷载随钢筋强度的提高而增大,进而提高了

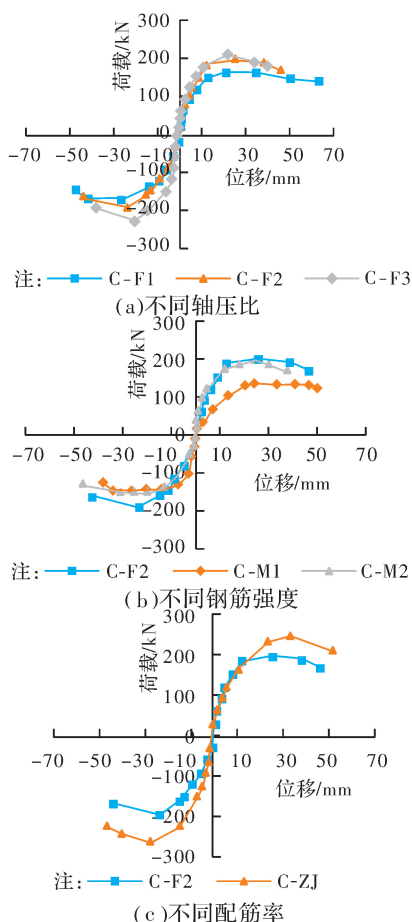


Fig. 5 Skeleton curves of the specimens

试件的承载力,试件的初始刚度有所增加,但是会相应地降低延性。

4)对比 C-F2、C-ZJ 两个试件可知,提高试件的配筋率,承载力会有明显提高,曲线上升和下降段更加陡峭。

### 3.4 刚度退化

各试件刚度退化曲线如图 6 所示。

对比分析图 6 各试件的刚度退化曲线可知:

1)试验中各个试件的刚度退化曲线呈现明显的非线性变化,且对称性相对完好。试验加载初期,曲线斜率较大,呈现出陡峭的趋势。当试验加载至屈服后,刚度退化速率有所降低,加载至峰值后,材料塑性变形累计,刚度退化曲线斜率降低,趋于平缓。

2)对对 C-F1、C-F2、C-F3 3 个试件可知,随着轴压比增大,试件竖向约束逐步加大,高轴压比试件的初始刚度有显著增强,但轴压比大的试件刚度退化速率较快,混凝土的压碎更为严重,不利于结构抗震。

3)对对 C-M1、C-M2、C-F2 3 个试件可知,提高

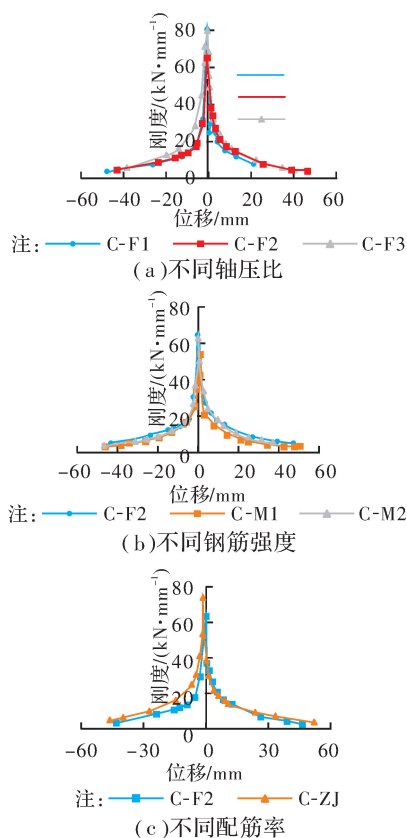


Fig. 6 Curves of stiffness degradation

钢筋强度,试件的初始刚度基本无影响,但钢筋强度越高,刚度退化速率有所减缓。

4)对对 C-F2、C-ZJ 两个试件可知,提高纵筋配筋率使试件的初始刚度有明显增大,配置 HRB600E 钢筋的试件在负向刚度退化率下降减缓,但延性相对较小。

### 3.5 耗能能力

试验中各个试件的等效黏滞阻尼比-位移曲线如图 7 所示。

分析图 7 各条曲线可知:

1)所有试样的等效粘滞阻尼系数先减小后增大,然后逐渐增大。在试验加载初期,试样呈现弹性状态,裂纹开展不多。弹性面积的增加明显大于滞回环面积的增加,故在试验初期等效粘滞阻尼比-位移曲线表现出下降趋势,当试验加载至屈服阶段及以后时,裂缝不断发展,塑性损伤不断增加,耗能增加,故曲线不断上升。

2)对比 C-F1、C-F2、C-F3 3 个试件可知,随着试验的轴压比不断增加,高轴压比构件在加载后期,其塑性性能无法得到足够的发挥,试验加载到破坏荷载时,试件耗能能力有所提升。

3)对比 C-M1、C-M2、C-F2 的可知,提高钢筋强

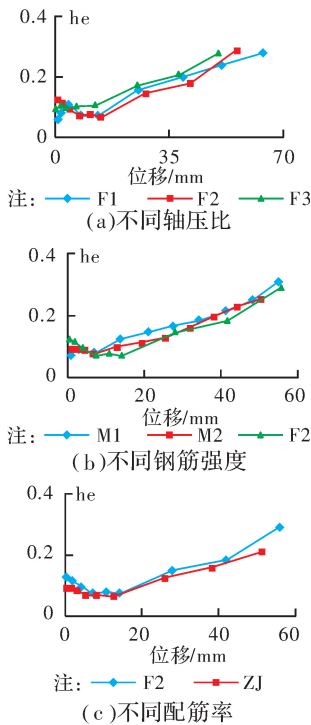


图7 等效黏滞阻尼比-位移曲线

Fig. 7 Curves of equivalent viscous damping coefficient of the specimens

度,试件 C-F2 的等效黏滞阻尼比低于试件 C-M1 和 C-F1,表明钢筋强度的提升使试件的耗能能力下降。

4)对比 C-F2、C-ZJ 两个试件可知,试验中 C-ZJ 配筋率较大,纵筋直径较大,与混凝土之间的粘结作用减小,相较于试件 C-F2,试件 C-ZJ 的耗能能力有所降低。

## 4 结论

通过对 6 个配置 HRB600E 钢筋混凝土柱进行低周反复荷载试验研究,得出如下结论:

1)试验中各试件的位移延性系数均值都达到 3 以上,满足延性要求。配置 HRB600E 级箍筋的试件表现出良好的变形能力,并且在同等条件下,配置 HRB600E 级纵筋的试件达到屈服时,荷载和位移有所增加,对应试件滞回环形状相对饱满,其骨架曲线和刚度退化曲线总体较为对称,刚度退化减缓,试件的抗震能力显著提高。

2)增加配置 HRB600E 钢筋混凝土柱的轴压比,承载力增大,总耗能能力略有提升,但刚度退化的速率加快,延性降低。

3)增加配置 HRB600E 钢筋混凝土柱的纵筋配筋率,混凝土压溃严重,骨架曲线上升和下降段更加陡峭,承载能力提高,变形能力增加,耗能能力降低。

研究发现,现阶段多数研究为将 600 MPa 钢筋

作为箍筋配置在混凝土柱,或配置 600 MPa 钢筋的异形柱实验研究。试验对轴压比的研究影响,与现有研究结论一致:配置高强钢筋使得构件承载力增大,延性降低。试验将 600 MPa 钢筋应用在结构中常见的矩形柱中,并在此基础上增加了与现常用钢筋型号的对比,并增加纵筋配筋率的影响因素。结果表明,增加配筋率虽可提高承载力,但极限位移减小,残余刚度增大,耗能能力降低,建议对配置高强钢筋的纵筋配筋率加以限制。

## 参考文献:

- [1] BARBOSA A R, LINK T, TREJO D. Seismic performance of high-strength steel RC bridge columns [J]. Journal of Bridge Engineer, 2016, 21(2): 40-44.
- [2] MOHAMED M, HOSSAM Z, AMAL A. The behavior of ultra-high-strength reinforced concrete columns under axial and cyclic lateral loads [J]. HBRC Journal, 2016, 12(3): 284-295.
- [3] OUSALEM H, TAKATSU H, ISHIKAWA Y, et al. Use of highstrength bars for the seismic performance of highstrength concrete columns [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2009, 7(1): 123-134.
- [4] RAUTENBERG J M, PUJOL S, TAVALLALI H, et al. Reconsidering the use of high-strength reinforcement in concrete columns [J]. Engineering Structures, 2012, 37: 135-142.
- [5] TOKGOZ S, DUNDAR C. Test of eccentrically loaded L-shaped section steel fibre high strength reinforced concrete and composite columns [J]. Engineering Structures, 2012, 38(5): 134-141.
- [6] KARAYANNIS C G, CHALIORIS C E. Design of partially prestress concrete beams based on the cracking control provisions [J]. Engineering Structures, 2013, 48: 402-416.
- [7] 张萍, 陈晓磊, 薛松, 等. 配置高强钢筋混凝土柱抗震性能试验研究 [J]. 结构工程师, 2017, 33(3): 147-155. ZHANG P, CHEN X L, XUE S, et. al. Experimental study on seismic performance of concrete columns reinforced with high-strength steel [J]. Structural Engineers, 2017, 33(3): 147-155.
- [8] 付广东, 赵海龙, 王铁成, 等. 配置 HRB600E 级钢筋异形柱梁柱节点抗震性能试验研究 [J]. 工业建筑, 2017; 47(3): 64-69. FU G D, ZHAO H L, WANG T C, et. al. Experiment research on seismic behavior of joints with specially shaped columns and 600 mega pascal rebars [J]. Industrial Construction, 2017; 47(3): 64-69.

- [9] 丁红岩,刘源,郭耀华. 高强钢筋混凝土结构抗震性能研究[J]. 建筑结构,2015,45(8):30-34.  
DING H Y, LIU Y, GUO Y H. Seismic behavior study on concrete structures reinforced with high-strength steel bars [J]. Building Structure, 2015, 45 (8):30-34.
- [10] RONG X, ZHANG J X, LI Y Y. Seismic behavior of specially shaped column joints with X-shaped reinforced [J]. Transaction of Tianjin University, 2013, 19: 110-117.
- [11] LI B, PHAM T P. Seismic performance assessment of L-shape reinforce concrete columns [J]. ACI Structural Journal, 2015, 112(6): 43-50
- [12] WANG T C, LIU X, ZHAO H L. Experimental research on seismic behavior of +-shaped columns reinforced with high-strength steel bars under cyclic loading [J]. Journal of Civil Engineer, 2015, 19(4): 982-993
- [13] 戎贤,段微微,王浩. 配置 600MPa 级高强钢筋 T 形柱抗震性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程,2017,39(2):148-154.  
RONG X, DUAN W W, WANG H. Experimental analysis of seismic behavior of 600 MPa RC T-shape columns [J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2017, 39(2):148-154.
- [14] 戎贤,乔超男,杨春晖. 配置 600MPa 级钢筋的十字形柱抗震性能试验研究[J]. 工业建筑,2017,47(6):17-21.  
RONG X, QIAO C N, YANG C H. Experimental research on seismic behavior of 600 mega pascal RC cross-shaped columns [J]. Industrial Construction, 2017;47(6):17-21.
- [15] 苏俊省,王君杰,王文彪,等. 配置高强钢筋的混凝土矩形截面柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014,35(11): 20-27.  
SU J S, WANG J J, WANG W B, et al. Comparative experimental research on seismic performance of rectangular concrete columns reinforced with high steel [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(11) : 20-27. (in Chinese)
- [16] 王君杰,苏俊省,王文彪,等. 配置 HRB500E, HRB600 钢筋的混凝土圆柱抗震性能试验[J]. 中国公路学报, 2015,28(5):94-100.  
WANG J J, SU J S, WANG W B, et al. Experiment on seismic performance of circular concrete columns reinforced with HRB500E, HRB600 steel [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(5): 94-100. (in Chinese)
- [17] 中华人民共和国建设部. 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.  
The Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in China).
- [18] 刘彬,韩松,王学峰. 配置高强钢筋混凝土短柱抗震性能研究[J]. 工程建设与设计,2017,(6):37-40.  
LIU B, HAN S, WANG X F. Research on seismic behavior of concrete short columns with HRB600 steel bars[J]. Construction & Design for Engineering, 2017 (6):37-40.
- [19] 张建伟,夏冬瑞,乔崎云,等. HRB600 级钢筋高强混凝土柱的轴心受压性能[J]. 工业建筑,2017,47(11): 77-83.  
ZHANG J W, XIA D R, QIAO Q Y, et al. Research on axial compression performance of high strength concrete columns with HRB600 steel bars [J]. Industrial Construction, 2017, 47(11): 77-83.

(编辑 胡玲)