

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.03.020



600 MPa 级钢筋混凝土十字形柱抗震性能 试验研究与恢复力特性分析

戎贤^{1,2}, 乔超男¹

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401)

摘要: 针对 7 个配置 600 MPa 级钢筋的十字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、箍筋应变曲线。研究表明: 各试件的滞回曲线饱满, 对称性较好, 具有良好的耗能能力; 配箍率增大, 试件的峰值荷载增大, 变形能力增强; 轴压比增大, 试件的承载力增大, 耗能能力提高, 刚度退化加快; 与配置 HRB500 钢筋的试件相比, 配置 600 MPa 级钢筋的试件峰值荷载较大, 塑性变形能力增强, 但其耗能能力降低。基于 ABAQUS 软件对试件进行有限元分析, 模拟结果与试验结果符合较好。

关键词: 钢筋; 十字形柱; 荷载试验; 有限元分析; 恢复力模型

中图分类号: TU375.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2018)03-0139-08

Experimental analysis on seismic behavior and analysis of restoring force characteristics of 600 MPa RC cross-shaped columns

Rong Xian^{1,2}, Qiao chaonan¹

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China;

2. Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Tianjin 300401, P. R. China)

Abstract: A low cyclic reversed loading test was carried out on seven cross-shaped columns with 600 MPa reinforcement. The hysteric curve, skeleton curve, longitudinal reinforcement strain curve and stirrup strain curve of the specimen under low cyclic reversed loading were obtained. The results show that the hysteric curve is full, the symmetry is good and the energy dissipation capacity is good. With the increase of the stirrup ratio, the peak load and the deformation capacity are enhanced. With the increase of the axial compression ratio, the ultimate bearing capacity increases, and the energy dissipation capacity raises while the stiffness degradation accelerate. The load capacity of the 600 MPa reinforced specimen is larger than that of the HRB500 reinforced specimen, and the plastic deformation capacity enhances while the energy dissipation capacity reduces. By using the ABAQUS software, the finite element analysis of the specimen was carried out. The simulation results were in good agreement with the experimental results.

收稿日期: 2017-09-20

基金项目: 河北省自然科学基金(E2017202278); 天津建委科技项目(2016—8)

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: xrong516@163.com.

Received: 2017-09-20

Foundation item: Hebei Province Natural Science Foundation (No. E2015202035); Tianjin Construction Science and Technology Research Program (No. 2014-122)

Author brief: Rong Xian (1965-), professor, doctoral supervisor, main research interest: structural seismic, E-mail: xrong516@163.com.

Keywords: reinforcement; cross-shaped column; loading test; finite element analysis; restoring force model

600 MPa 级钢筋具有强度高、安全储备量大的特点,是一种经济、高效的新型钢筋^[1-3]。异形柱结构体系具有空间布局灵活和增加使用面积等优点^[4-6],但由于承载力薄弱和抗震性能差,限制了异形柱结构在震区的应用^[7-9]。通过对高强钢筋异形柱抗震性能进行研究分析,表明轴压比、配箍率和加载方式对高强钢筋异形柱抗震性能的影响和普通钢筋混凝土柱相似^[10-12],L形、T形和十字形异形柱的破坏过程基本一致,高强钢筋与混凝土表现出良好的协同工作能力,性能得到较好地发挥,抗震性能良好^[13-15]。目前,关于 600 MPa 级钢筋混凝土异形柱的应用研究相对较少。因此,对 600 MPa 级钢筋混凝土十字形柱进行低周往复荷载试验,研究其抗震性能并对试验结果进行统计分析,建立其恢复力模型,可以为 600 MPa 级钢筋混凝土异形柱的推广应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

试验设计 7 个十字形柱试件,表 1 为试件设计参数。试件采用的混凝土强度等级为 C50,保护层厚度 15 mm。表 2 为混凝土力学性能。除对比试件 C+7 外,纵筋和箍筋均使用 600 MPa 级钢筋。表 3 为钢筋力学性能。图 1 为试件配筋详图。

表 1 试件设计参数汇总

Table 1 Specimen design parameters summary

试件编号	轴压比	纵筋配置	箍筋配置	配箍特征值
C+1	0.26	12E16	E8@60	0.304
C+2	0.26	12E16	E8@90	0.203
C+3	0.26	12E16	E8@120	0.152
C+4	0.21	12E16	E8@90	0.203
C+5	0.31	12E16	E8@90	0.203
C+6	0.36	12E16	E8@90	0.203
C+7	0.26	12D16	D8@90	0.135

注:E 表示 600 MPa 级钢筋。

表 2 混凝土力学性能指标

Table 2 Concrete mechanical performance index

立方体抗压强度/MPa	轴心抗压强度/MPa	弹性模量/GPa
60.1	40.2	36.0

表 3 钢筋力学性能指标

Table 3 Reinforcement mechanical performance index

钢筋规格	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
600 MPa(8 mm)	626	791
600 MPa(16 mm)	640	817
HRB500(8 mm)	520	800
HRB500(16 mm)	586	743

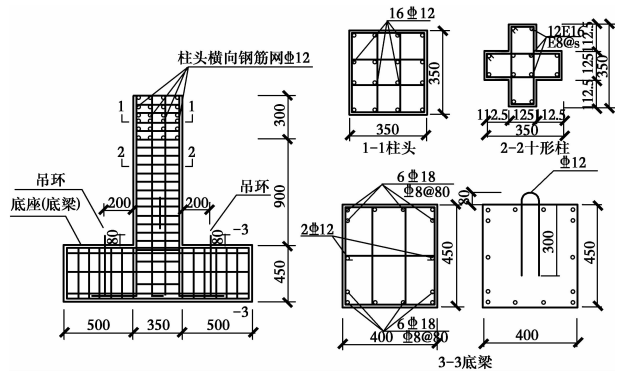


图 1 十字形柱配筋

Fig. 1 Reinforcement of cross-shaped column

1.2 试验装置及加载制度

试验采用立式加载,首先使用竖向千斤顶在柱截面的几何形心处施加竖向恒定轴力,然后使用水平拉压千斤顶在加载端的几何中心处施加水平荷载。在柱根部塑性铰区域粘贴纵筋和箍筋应变片,测量其应变。图 2 为钢筋应变片布置图。

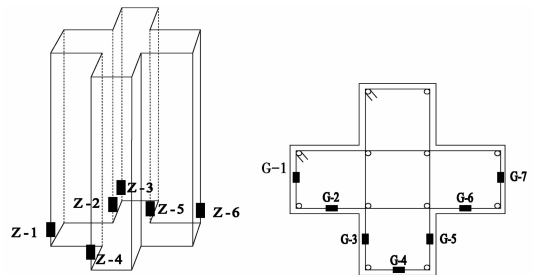


图 2 钢筋应变片布置图

Fig. 2 Reinforcement strain gauges layout

开始加载时,加载方式为荷载控制,按正向加载→正向卸载→反向加载→反向卸载循环一次,每级荷载增量为 30 kN。随着荷载的增加,试件屈服。屈服后加载方式为位移控制,按屈服位移值的整数倍循环 3 次加载,荷载下降至最大荷载的 85%时,试件破坏。试验加载装置及加载制度如图 3 所示。

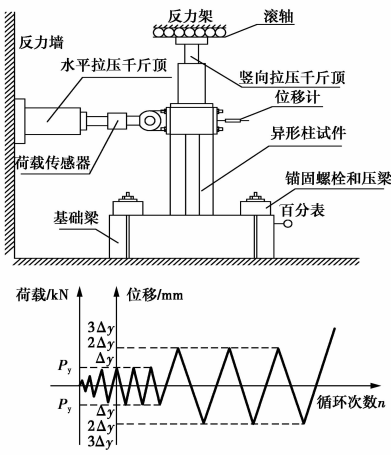


图 3 试验装置及加载制度
Fig. 3 Test device and loading system

2 试验结果分析

2.1 滞回曲线

各试件的柱顶水平荷载-位移滞回曲线如图 4 所示。

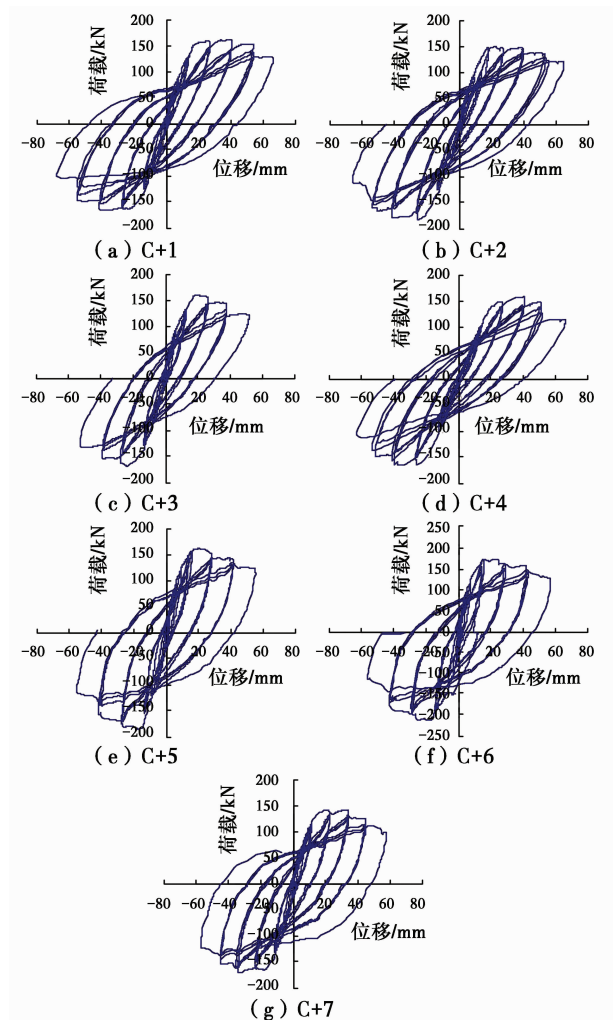


图 4 各试件荷载-位移滞回曲线
Fig. 4 Load-displacement hysteresis curves of specimens

由图 4 可知:加载初期,各试件的滞回曲线近似呈线性变化,试件屈服后,随着位移的增加,变形不断增大且速度也随之加快,所形成的滞回环也愈加丰满,承载力仍有部分提高。峰值荷载后,承载力逐渐下降,试件的塑性变形能力逐渐衰减。

对比试件 C+1、C+2、C+3 可知,配箍率增大,试件的滞回环越饱满,极限承载力后,滞回曲线向横轴倾斜的速率越缓慢,极限变形越大;对比试件 C+4、C+2、C+5、C+6 可知,轴压比增大,试件的滞回环面积增大,耗能能力增强,峰值荷载后滞回曲线向横轴倾斜的愈加明显,试件的强度和刚度退化加快,极限位移减小;对比试件 C+2 和 C+7 可知,钢筋强度增加,试件的滞回环面积减小,耗能能力降低,峰值荷载后滞回曲线倾斜的较缓慢,下降段较长,试件的强度和刚度退化缓慢,塑性变形能力增强。

2.2 骨架曲线

各试件的骨架曲线如图 5 所示。

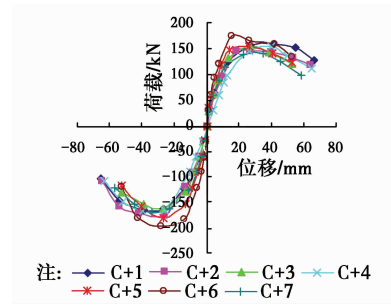


图 5 各试件骨架曲线
Fig. 5 Skeleton curves of specimens

由图 5 可知:加载初期,骨架曲线基本呈直线。随着荷载增加,骨架曲线开始弯曲,且越来越平缓,表明试件刚度逐渐降低,达到峰值荷载后,水平荷载随位移的增大而降低,试件进入破坏阶段。

对比试件 C+1、C+2、C+3 可知,配箍率越大,试件的峰值荷载越大,骨架曲线的下降段也越缓,变形能力越强。对比试件 C+4、C+2、C+5、C+6 可知,轴压比增大,峰值荷载逐渐增大,骨架曲线下降段较为陡峭,承载力下降较迅速,刚度退化快,变形能力降低。与配置 HRB500 钢筋的试件相比,配置 600 MPa 级钢筋试件的极限承载能力增强,骨架曲线到达峰值荷载后的下降段较长,荷载下降较缓慢,变形能力增加。

2.3 延性与耗能

各试件的位移延性系数如表 4 所示,弹塑性位移角和等效粘滞阻尼系数总和如表 5 所示。

由表 4、表 5 可知:对比配箍率不同的试件,与 C+3 相比,C+1、C+2 的位移延性系数分别大 8%

和 16%，总等效粘滞阻尼系数分别增加 18.8% 和 13.63%，表明配箍率增大，试件的延性增强，耗能能力增强；对比轴压比不同的试件，C+4、C+2、C+5、C+6 的总等效粘滞阻尼系数逐渐增加，表明轴压比增大，试件的峰值荷载增大，耗能能力增强。配置 HRB500 钢筋试件的等效粘滞阻尼系数比配置 600 MPa 级钢筋的试件增加 31.68%，具有更强的耗能能力，但位移延性系数降低 8.05%，延性降低。各试件的位移角均满足规范要求，表明均具有良好的塑性变形能力。

表 4 试件位移延性系数

Table 4 Displacement ductility coefficient of specimens

试件编号	正向	负向	均值
C+1	3.55	2.94	3.25
C+2	4.15	2.80	3.48
C+3	3.17	2.83	3.00
C+4	2.19	2.42	2.31
C+5	4.13	2.83	3.48
C+6	4.25	3.86	4.05
C+7	3.34	3.05	3.20

表 5 试件弹塑性位移角和等效粘滞阻尼系数

Table 5 Elastic-plastic displacement angle and equivalent viscous damping coefficient

C+1				C+2				C+3				C+4			
位移/ mm	弹性体 面积	滞回环 面积	h_e	位移/ mm	弹性体 面积	滞回环 面积	h_e	位移/ mm	弹性体 面积	滞回环 面积	h_e	位移/ mm	弹性体 面积	滞回环 面积	h_e
1.6	52.4	28.8	0.087 5	1.9	57.9	25.8	0.070 8	1.4	42.6	34.0	0.127 0	3.1	95.0	62.2	0.104 2
4.6	297.0	195.8	0.104 9	4.7	283.8	152.5	0.085 5	4.1	252.5	180.8	0.113 9	7.0	429.0	236.6	0.087 8
8.1	724.7	447.2	0.098 2	9.3	878.3	473.8	0.085 9	7.1	643.7	409.2	0.101 2	10.6	936.2	498.4	0.084 7
13.6	1 706.1	973.8	0.090 8	15.6	2 114.9	1 250.9	0.094 1	13.0	1 700.7	1 098.4	0.102 8	12.7	1 270.6	528.5	0.066 2
26.8	4 312.9	4 239.4	0.156 4	26.2	4 229.7	3 777.0	0.142 1	26.7	4 274.9	4 743.9	0.176 6	26.0	4 072.3	3 153.8	0.123 3
39.7	6 506.2	8 077.6	0.197 6	40.3	6 402.6	7 576.7	0.188 3	38.3	5 764.2	7 406.5	0.204 5	39.8	6 434.3	6 689.8	0.165 5
54.0	8 150.5	12 143.2	0.237 1	53.2	7 802.1	11 401.5	0.232 6	52.3	6 663.4	10 780.0	0.257 5	50.2	7 195.9	9 188.9	0.203 2
65.2	7 628.1	15 077.1	0.314 6	64.1	7 336.1	14 771.2	0.320 5					63.5	7013.6	11 292.1	0.256 2
h_e 总和			1.287 2				1.219 8				1.083 5				1.091 1
位移角			1/15				1/16				1/19				1/17
C+5				C+6				C+7							
位移/ mm	弹性体 面积	滞回环 面积	h_e	位移/ mm	弹性体 面积	滞回环 面积	h_e	位移/ mm	弹性体 面积	滞回环 面积	h_e	位移/ mm	弹性体 面积	滞回环 面积	h_e
1.0	32.6	27.8	0.135 7	0.7	21.1	22.0	0.166 3	1.1	33.0	30.8	0.148 4				
2.7	164.9	135.2	0.130 4	1.9	119.0	96.1	0.128 6	3.7	222.9	193.8	0.138 4				
5.6	511.6	439.0	0.136 6	3.9	364.6	314.4	0.137 2	6.8	614.3	443.8	0.115 0				
8.9	1 076.4	907.6	0.134 2	6.7	816.2	712.9	0.139 0	11.2	1 355.4	990.1	0.116 3				
13.5	2 054.2	1 692.1	0.131 1	14.4	2 593.7	2 584.1	0.158 6	22.7	3 461.5	4 173.3	0.191 9				
26.4	4 480.5	6 441.5	0.228 8	27.0	4 939.9	8 076.3	0.260 2	34.1	5 326.4	7 224.6	0.215 9				
40.3	6 072.1	10 763.9	0.282 1	41.8	7 186.3	12 757.0	0.282 5	44.9	6 275.4	11 084.3	0.281 1				
52.5	6 399.7	14 578.2	0.362 5	52.2	6 654.3	17 747.3	0.424 5	57.3	6 351.7	15 938.3	0.399 4				
			1.541 6				1.696 9				1.606 2				
			1/20				1/20				1/19				

2.4 纵筋应变

水平荷载与纵筋应变关系曲线见图 6。

由图 6 可知：试验加载过程中，各纵筋均出现不同程度受压和受拉状态的交替。腹板端部纵筋 +Z1

和 +Z6 两个应变片位置关于翼缘对称，+Z1 受压时 +Z6 受拉，两者水平荷载-纵筋应变曲线图呈现关于竖向轴对称的现象。腹板中部纵筋 +Z2 和 +Z5，翼缘端部纵筋 +Z3 和 +Z4，既有拉应变也有压

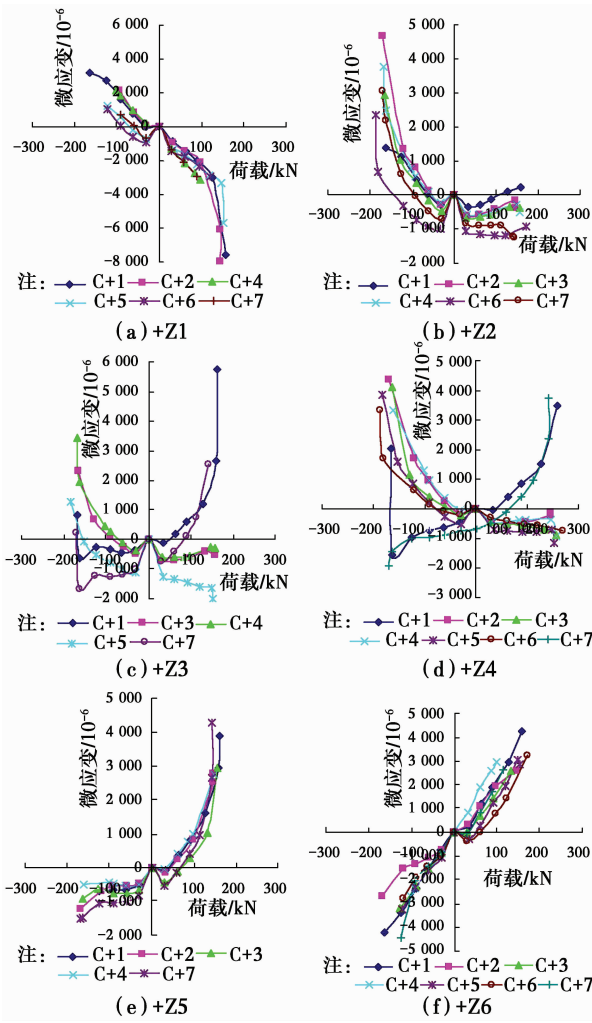


图 6 水平荷载-纵筋应变曲线

Fig. 6 Load-longitudinal strain curve

应变,但是拉应变峰值大于压应变峰值。

相同工况下,轴压比小的试件,纵筋应变大。原因是小轴压比试件的后期变形能力大;配箍率对试件纵筋应变影响不明显;配置 600 MPa 级钢筋试件与配置 HRB500 钢筋试件的纵筋应变增长速率和走势大体一致。总体来看,配置 600 MPa 级钢筋试件的纵筋应变较大,主要是因为钢筋强度增加,试件的塑性变形能力增强。

2.5 箍筋应变

水平荷载与箍筋应变关系曲线如图 7 所示。

由图 7 可知:加载过程中,箍筋基本处于受拉状态,加载初期,剪力主要由混凝土承担,各箍筋的应变较小,此时箍筋还没有发挥作用,随着荷载增加,斜裂缝不断出现和发展,箍筋开始承担剪力作用,箍筋应变增长较快。

相同荷载作用下,大轴压比试件箍筋应变大于小轴压比试件,配置 600 MPa 级钢筋的试件应变大于配置 HRB500 钢筋的试件。表明轴压比的提高

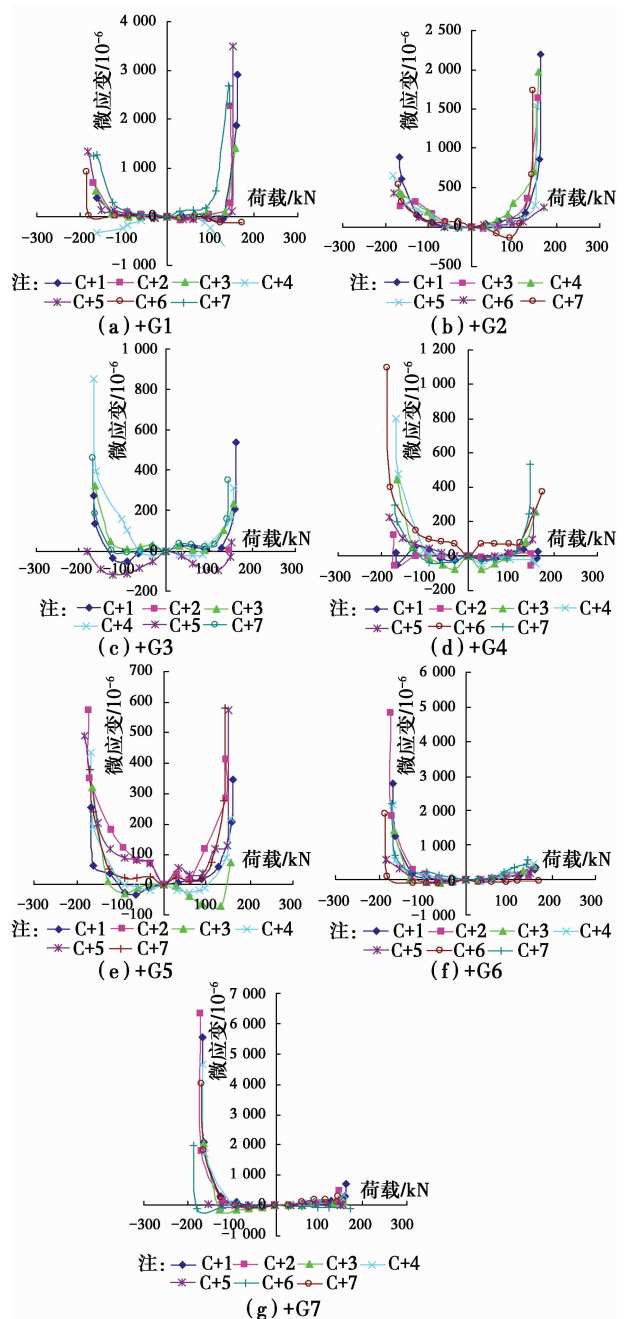


图 7 水平荷载-箍筋应变曲线

Fig. 7 Load-stirrup strain curves

能加速箍筋发挥其抗剪能力;箍筋间距大的试件,应变增长也迅速。表明加密箍筋可以增强混凝土的约束作用,延缓混凝土的压碎,从而提高混凝土抗剪能力,推迟箍筋参与抗剪。

3 有限元分析验证

采用有限元分析软件 ABAQUS 对 600 MPa 级钢筋混凝土十字形柱进行模拟分析。混凝土采用八节点减缩积分格式的三维实体单元 C3D8R、纵筋和箍筋采用二节点的三维桁架单元 T3D2。采用四折线钢筋本构,混凝土本构采用 ABAQUS 中给出的

混凝土塑性损伤模型。以试件 C+1 和 C+5 为例进行有限元分析,分析得到的滞回曲线与试验滞回曲线的对比如图 8 所示。由图 8 可知,有限元分析与试验得到的滞回曲线的整体变化趋势基本吻合,表明有限元分析能合理地模拟 600 MPa 级钢筋混凝土十字形柱低周反复加载试验。

用下 600 MPa 级钢筋混凝土十字形柱刚度退化规律。

1)将正向屈服前的试验数据点回归得到正向初始加载刚度 K_0^+ ;将正向屈服后的卸载点与卸载到荷载零点之间的数据点回归得到 K_1 ;利用软件 Origin8 对试验数据点拟合,得到正向卸载刚度拟合方程为

$$K_1/K_0^+ = 0.4664 + 1.1698e^{-2.8867(\Delta_1/\Delta_m^+)} \quad (1)$$

式中: Δ_1 为与之对应的卸载位移; Δ_m^+ 为正向加载的最大位移。正向卸载时刚度退化曲线见图 10。

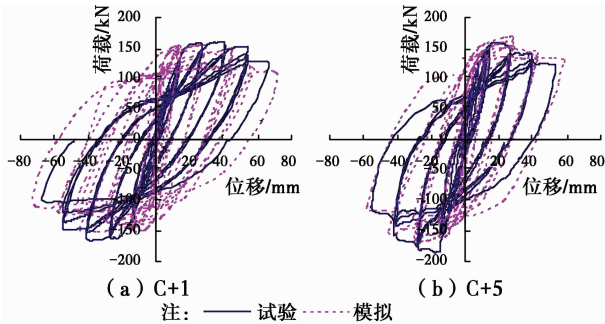


图 8 试验与有限元分析滞回曲线对比

Fig. 8 Comparison of hysteretic curves between the test results and finite element analysis

4 恢复力模型的建立

4.1 骨架曲线模型建立

将试验所得骨架曲线简化为三折线模型,如图 9 所示。横坐标为位移比 Δ/Δ_m ,纵坐标为荷载比 P/P_m ,其中 Δ_m 、 P_m 为试件峰值点的位移与荷载。图中 A(A')点、B(B')点和 C(C')点分别表示正(反)向加载的屈服点、峰值点和破坏点。计算得到 600 MPa 级钢筋混凝土十字形柱骨架曲线模型中各段的线性方程为

- OA 段: $P/P_m = 1.5678\Delta/\Delta_m$;
- AB 段: $P/P_m = 0.7075 + 0.2925\Delta/\Delta_m$;
- BC 段: $P/P_m = 1.1695 - 0.1695\Delta/\Delta_m$;
- OA'段: $P/P_m = 1.7292\Delta/\Delta_m$;
- A'B'段: $P/P_m = -0.5821 + 0.4179\Delta/\Delta_m$;
- B'C'段: $P/P_m = 1.2929 - 0.2929\Delta/\Delta_m$

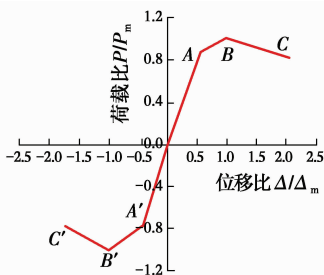


图 9 无量纲三折线骨架曲线模型

Fig. 9 Dimensional tri-linear skeleton curve model

4.2 刚度退化规律

对试验数据点统计分析,得到低周反复荷载作

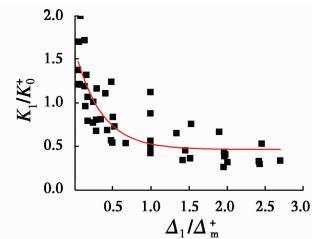


图 10 正向卸载时刚度退化曲线

Fig. 10 Stiffness degradation curves in positive unloading

2)负向加载刚度拟合方程为

$$K_2/K_0^- = 0.0493 + 0.6481e^{-1.3976(\Delta_2/\Delta_m^-)} \quad (2)$$

式中: K_0^- 为负向加载初始刚度; K_2 为负向加载刚度; Δ_2 为与之对应的卸载位移; Δ_m^- 为负向加载的最大位移。负向加载时刚度退化曲线见图 11。

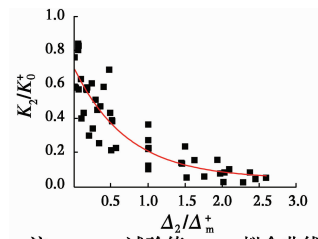


图 11 负向加载时刚度退化曲线

Fig. 11 Stiffness degradation curves in negative loading

3)负向卸载刚度拟合方程为

$$K_3/K_0^- = 0.4152 + 0.8760e^{-3.7975(\Delta_1'/\Delta_m^-)} \quad (3)$$

式中: K_3 为负向卸载刚度; Δ_1' 为与之对应的卸载位移。负向卸载时刚度退化曲线见图 12。

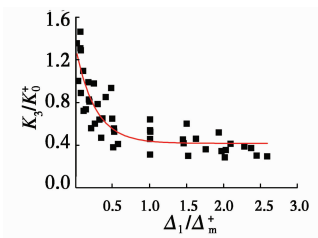


图 12 负向卸载时刚度退化曲线

Fig. 12 Stiffness degradation curves in negative unloading

4)正向加载刚度拟合方程为

$$K_4/K_0^+ = 0.0836 + 0.9167e^{-1.8174(\Delta_2^+/\Delta_m^+)} \quad (4)$$

式中: K_4 为正向加载刚度; Δ_2^+ 为与之对应的卸载位移。正向加载时刚度退化曲线见图 13。

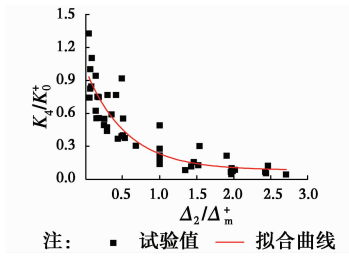


图 13 正向加载时刚度退化曲线

Fig. 13 Stiffness degradation curves in positive loading

4.3 恢复力模型的建立

600 MPa 级钢筋混凝土十字形柱的简化三折线恢复力模型如图 14 所示。具体说明如下:对试件在 $OA(OA')$ 段卸载,则卸载路线与加载路线重合;若 AB 段卸载,则卸载路线沿 12 进行,正向卸载至点 2 再沿负向加载时,若试件在负向未屈服,沿 $2A'B'C'$ 进行,反之,沿 $23B'C'$ 进行;负向在 $A'B'$ 段卸载时,沿 34 进行,负向卸载至点 4 再沿正向加载时,沿 41BC 进行;在 BC 段卸载时,沿 56 进行,正向卸载至点 6 再沿负向加载时,若负向荷载未达到峰值荷载,沿 $6B'C'$ 进行,反之,沿 $67C'$ 进行;在 BC 段卸载时,沿 78 进行,负向卸载至点 8 再沿正向加载时,沿 85C 进行。

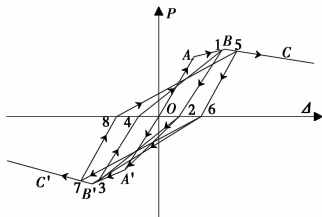


图 14 恢复力模型

Fig. 14 Restoring force model

4.4 建议的恢复力模型与试验结果对比

图 15 为根据恢复力模型计算得到的滞回曲线与试验滞回曲线的对比图。由图可知,600 MPa 级钢筋混凝土十字形柱计算滞回曲线、加卸载刚度与试验结果相差不大。表明建议的恢复力模型能够较好地预测 600 MPa 级钢筋混凝土十字形柱的抗震性能。

计算结果与试验结果存在差异的主要原因有:试验数据点较少,部分数据点存在着较大的离散性,恢复力模型与实际工程存在误差;有限元模拟时采用的材料的本构关系对材料有一定的假定和简化,

模拟得到的结果与试验结果存在差异。

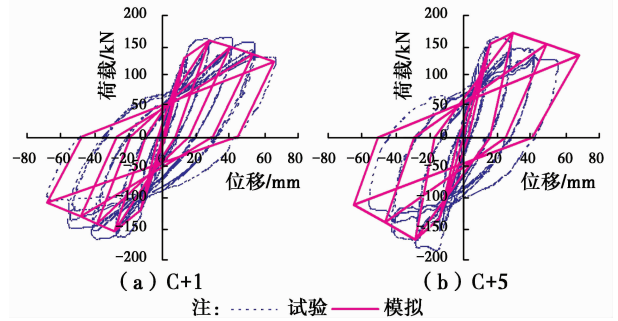


图 15 计算滞回曲线与试验结果对比

Fig. 15 Comparison between the calculated of

hysteretic curves and the test results

需要指出,本文提出的恢复力模型仅适用于配置 600 MPa 级钢筋的十字形截面柱,对于其他截面形式的 600 MPa 级钢筋混凝土异形柱,其恢复力模型的建立需要作进一步的试验理论研究。

5 结论

通过对 600 MPa 级钢筋混凝土十字形柱的抗震性能试验分析,可得出以下结论:

1) 低周反复荷载作用下,试件均发生弯曲破坏。600 MPa 级钢筋混凝土十字形柱具有良好的承载能力、变形能力和耗能能力,滞回曲线饱满,刚度退化缓慢,表现出较好的滞回性能。

2) 轴压比增大,试件的峰值荷载增大,耗能能力增强,但刚度退化加快;配箍率减小,试件的刚度退化速率增加,破坏位移减小,变形能力降低;钢筋强度增大,试件的极限承载力和变形能力均提高,延性增强,但其耗能能力降低。

3) 有限元分析得到的 600 MPa 级钢筋混凝土十字形柱滞回曲线与试验滞回曲线符合较好,结合试验数据的统计分析,得到 600 MPa 级钢筋混凝土十字形柱的骨架曲线特征点和刚度退化规律,确定滞回规则,建立简化三折线恢复力模型。建议的恢复力模型可以为 600 MPa 级钢筋混凝土十字形柱的抗震性能提供基础资料和依据。

参考文献:

[1] RAUTENBERG J M, PUJOL S, TAVALLALI H, et al. Drift capacity of concrete columns reinforced with high-strength steel [J]. *Aci Structural Journal*, 2013, 110(2): 307- 317.

[2] BARBOSA A R, LINK T, TREJO D. Seismic performance of high-strength steel RC bridge columns [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 21(2): 40-44.

- [3] 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.
- [4] WANG T C, WANG X W. Performance of cross-shaped concrete columns confined by stirrups [J]. *Transactions of Tianjin University*, 2010, 16(2): 89-95.
- [5] 丁晓玲. 钢筋混凝土异形柱框架结构的抗震分析[J]. *工业建筑*, 2010, 40(5): 51-54.
DING X L. The seismic analysis of an irregular-shaped pillar framework of reinforced concrete [J]. *Industrial Construction*, 2010, 40(5): 51-54. (in Chinese)
- [6] 左明. 钢筋混凝土异形柱结构抗震性能分析与比较[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
ZUO M. Analysis and comparison on the seismic performance of reinforced concrete structures with specially shaped columns [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [7] LI B, PHAM T P. Experimental study on the seismic response of L-shaped reinforced concrete columns [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2014, 17(2): 233-247.
- [8] 王铁成, 林海, 康谷峪, 等. 钢筋混凝土异形柱框架试验及静力弹塑性分析[J]. *天津大学学报*, 2006, 39(12): 1457-1464.
WANG T C, LIN H, KANG G Y, et al. Experiment and nonlinear static analysis of RC special shaped column frames [J]. *Journal of Tianjin University*, 2006, 39(12): 1457-1464. (in Chinese)
- [9] 王铁成, 白锡庆, 赵海龙. T形柱抗震性能的纤维增强作用对比[J]. *世界地震工程*, 2015, 31(4): 1-6.
WANG T C, BAI X Q, ZHAO H L. Comparison on seismic behavior of T-shaped columns reinforced by fiber [J]. *World Earthquake Engineering*, 2015, 31(4): 1-6. (in Chinese)
- [10] CAO W L, HU G Z, CUI L Z, et al. Experiment and analysis of seismic behavior of the +, L, T-shaped columns with concealed columns [J]. *Journal of Building Structures*, 2002, 23(1): 16-18
- [11] 范鹏. 钢筋混凝土十字形截面柱抗震性能试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
FAN P. Experimental research on seismic behavior of reinforced concrete column with cross-shaped section [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
- [12] LI B, PHAM T P. Seismic performance assessment of L-shaped reinforced concrete columns [J]. *Aci Structural Journal*, 2015, 112(6): 43-50.
- [13] SERKAN T, CENGIZ D. Tests of eccentrically loaded L-shaped section steel fibre high strength reinforced concrete and composite columns [J]. *Engineering Structures*, 2012, 38(4): 134-141.
- [14] 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]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2015, 19(4): 1-12.
- [15] 戎贤, 段微微, 王浩. 配置 600 MPa 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-shaped columns [J]. *Journal of Civil, Architectural and Environmental*, 2017, 39(2): 148-154. (in Chinese)

(编辑 胡玲)