

高轴压比框架柱抗震性能试验研究^{*}

郭子雄^① 吕西林^②

(① 华侨大学土木工程系, 泉州 362011; ② 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要 在低周反复荷载作用下, 进行7个1/3缩比钢筋混凝土框架柱试件的试验. 重点研究在高轴压比下, 常规钢筋混凝土框架柱的抗震性能, 以及轴压比变化对框架柱滞回特性影响. 研究结果表明, 当设计轴压比达到0.9时, 即使是具有良好的配筋构造, 钢筋混凝土框架柱屈服后也将体现出较为明显的强度及刚度退化. 对试件总体变形, 塑性铰区域的弯曲变形、剪切变形, 以及纵向钢筋在节点区的滑移量等局部变形成分进行试验测量. 在对其结果进行统计分析和简化计算的基础上, 研究塑性铰区域的各种局部形成所产生的侧移, 及其在常规框架柱的总侧移中所占的比例和规律.

关键词 钢筋混凝土, 框架柱, 滞回特性, 变形特征

分类号 TU 375.03

钢筋混凝土构件试验表明, 结构的总弹塑性变形主要是由关键受力区域(比如塑性铰区)的弯曲变形、剪切变形, 以及纵向受力钢筋的粘结滑移变形这三部分组成^[1]. 虽然, 国内外对框架柱的变形性能, 以及滞回特性已进行过大量的试验研究, 但仍存在着问题. (1) 研究主要集中在剪跨比小于2.0的短柱, 而目前工程中最常见的剪跨比在3.0左右的常规框架还缺乏研究. (2) 80年代, 我国进行为数较多的框架柱滞回特性试验研究, 却大多是针对剪跨比大于4.0的中长柱. (3) 框架结构下部楼层的高轴压比柱的滞回特性, 很大程度上决定着整个结构抗倒塌性能. 以往所进行的框架柱滞回特性试验研究中, 以轴压比为变化参数的试验研究还很系统, 并且所采用的轴压比均较低. (4) 对各种变形成分的量测还不全面. 因此, 本文主要针对上述问题进行研究.

1 试验情况

1.1 试件情况及试验方法

1.1.1 试件情况 试件取自一个常规框架结构楼层上下柱反弯点之间部分, 模型与原型的几何比例为1/3. 试件的几何尺寸及截面配筋如图1所示. 试验采用的设计轴压比($n = N/f_c b h$)约为0.3~0.9. 除了SP407的箍筋采用 $\cong 8@40$ 外, 其余试件的箍筋均采用 $\cong 6.5@40$. 试件材料的力学性能见表1.

1.1.2 加荷装置 试件的轴向力采用油压千斤顶加载. 水平力采用SCHENCK伺服作动器加载, 试件的加载装置及支承情况如图2所示.

表 1 试件材料力学性能表

试 件	f_{cu}/MPa	钢 筋			
		\approx / mm	f_y/MPa	E_s/TPa	ϵ/ϵ
SP301 ~ SP304	30.9	6.5	315	20.5	1 536
SP401 ~ SP403	41.2	8.0	345	20.5	1 683
SP404 ~ SP407	40.1	12.0	410	19.7	2 086

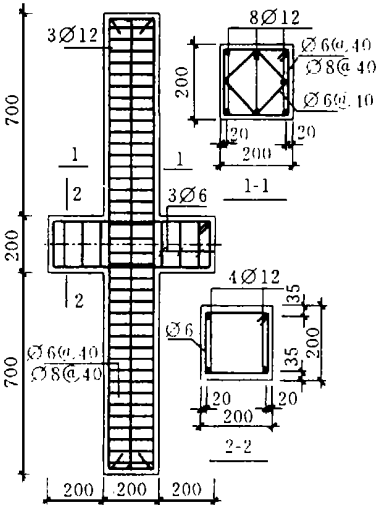


图 1 试件配筋图

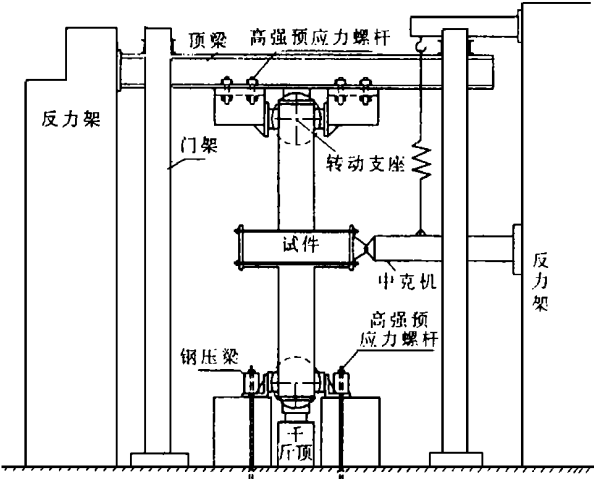


图 2 加载装置

1.1.3 测量内容及仪表布置 试验主要测量以下几项内容: (1) 采用电子位移计测量试件支座及加荷点的位移; (2) 采用电子引伸仪测量塑性铰区域的弯曲变形、剪切变形及节点区钢筋的滑移变形; (3) 用电阻应变片测量试件关键受力区域的纵向钢筋及箍筋的应变. 纵向钢筋应变片的布置范围为截面有效高度 h_0 , 目的是考察纵向钢筋的屈服范围. 仪表及应变测点的布置如图 3 所示. 所有力和变形信号均通过传感器或应变仪放大后, 由自动数据采集机采集.

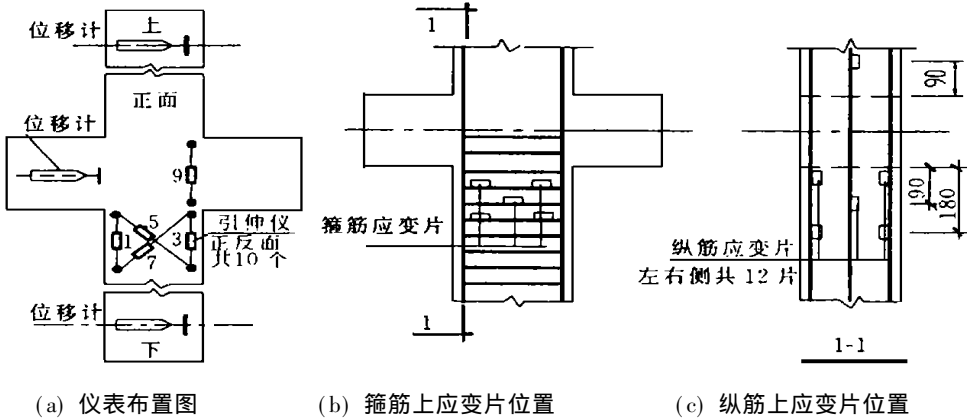


图 3 仪表及应变测点布置图

1.1.4 加荷程序 首先, 施加竖向荷载到试件的预定轴压力, 并使其保持恒定, 然后施加水平荷载. 水平荷载采用荷载和位移双控制方法. 下述具体过程. (1) 试件屈服以前, 按照荷载值

进行控制. 在试件开裂以前, 每级荷载增量为 10 kN, 每增加 4 级荷载进行一次往复循环, 直到试件开裂, 并以开裂荷载为幅值进行一次循环. 试件开裂以后, 每级荷载增量为 15 kN, 同样也是每增加 4 级荷载进行一次往复循环, 直到试件的受拉钢筋屈服. (2) 试件屈服以后, 按照记录到的试件屈服位移 Δ_y 的倍数(单倍和双倍)控制循环加载. 同时, 视承载力的退化情况, 在每个位移幅值分别进行 2~3 次循环, 直到试件的承载力下降至最大荷载的 80%.

1.2 主要试验现象及结果

1.2.1 开裂荷载和位移与轴压比的关系

试件的开裂荷载 P_{cr} 随着试件轴压比的增加而增加, 但开裂荷载与屈服荷载 P_y 的比值则比较稳定, 近似为 $0.6P_y$. 相应地, 试件的开裂侧移角也随着轴压比的增加而增大, 其变化区间为 $1/667 \sim 1/425$.

1.2.2 骨架曲线 从图 4 所示的不同轴压比试件的骨架曲线可知, 随着轴压比的增加, 骨架曲线的强化区段及强化幅度(P_{max}/P_y) 逐步减小. 设计轴压比为 0.9 的试件 (SP405~SP407), 屈服后, 很快进入强度退化阶段, 骨架曲线下降段的下降速度也随着轴压比的增加而加快. 试件骨架曲线特征点的试验结果详见表 2. 表 2 中, n , n 分别为实测和设计的轴压比.

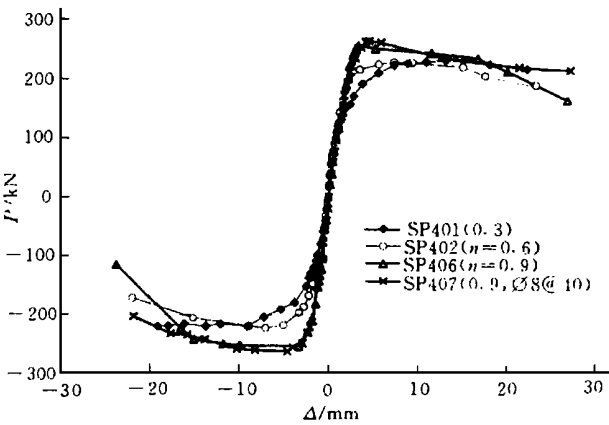


图 4 骨架曲线图

为 0.9 的试件 (SP405~SP407), 屈服后, 很快进入强度退化阶段, 骨架曲线下降段的下降速度也随着轴压比的增加而加快. 试件骨架曲线特征点的试验结果详见表 2. 表 2 中, n , n 分别为实测和设计的轴压比.

表 2 骨架曲线主要特征点试验结果

试 件	n	n	P_{cr}/kN	Δ_{cr}/mm	P_y/kN	Δ_y/mm	P_{max}/kN	Δ_u/mm	P_u/kN	Δ_u/mm	Δ_u/Δ_y
SP401	0.200	0.311	95	0.91	154	2.5	226	11.6	217	> 22.3	> 8.9
SP402	0.374	0.582	122	1.02	200	2.91	223	7.0	190	18.2	6.25
SP403	0.374	0.582	100	0.96	203	2.88	226	6.6	192	23.3	8.09
SP404	0.490	0.766	132	1.28	230	2.80	240	6.7	214	18.3	6.53
SP405	0.574	0.894	152	1.41	253	3.29	250	5.9	223	16.5	5.01
SP406	0.574	0.894	149	1.41	240	3.78	256	9.3	216	14.6	3.86
SP407	0.574	0.894	152	1.46	255	3.98	262	4.6	223	17.9	4.50

1.2.3 滞回曲线的特征 试件典型的滞回曲线如图 5 所示. 根据不同轴压比下试件的滞回曲线形状可知, 轴压比增大对试件的滞回特性有较大影响. (1) 在位移幅值大于 $3\Delta_y$, 同级位移幅值反复循环下, 试件的强度退化随着轴压比的增加而加快. 增加横向箍筋可以在一定程度上, 减缓高轴压比构件 (SP407) 在大变形过程中的强度退化进程. (2) 试件的卸载刚度随着轴压比在一定程度内的增加, 而有所增大. 当轴压比大于 0.6 时, 其对卸载刚度已无明显影响. (3) 随着轴压比的增加, 反向加载时滞回曲线的滑移现象趋向不明显. 这主要是, 由于较大轴压比下试件的裂面效应减弱所造成的.

1.2.4 破坏过程及钢筋的屈服情况 随着位移幅值的增加, 所有纵向钢筋测点的应变值先后达到屈服应变. 当试件位移为 $3\Delta_y$ 时, 轴压比较小的试件 (SP401) 受压区混凝土起皮压皱, 而轴压比较大的试件的压区混凝土保护层则发生压溃剥落. 这主要是, 轴压比较大的试件的混

凝土受压区高度较大, 压区混凝土的压屈区域发展较快. 此后, 试件的保有承载力在很大程度上取决于, 柱头箍筋对核心区混凝土的约束程度. 随着塑性铰区域内箍筋的逐步屈服, 构件的

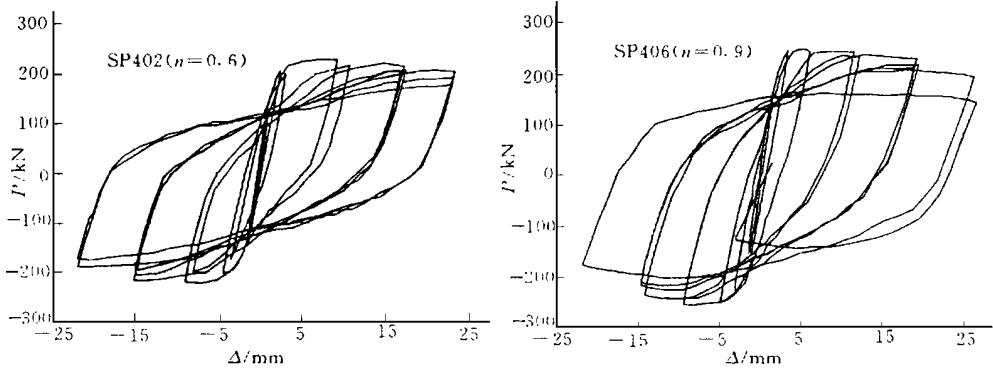


图 5 不同轴压比框架柱的滞回曲线

破坏程度逐步加剧. 根据箍筋应变的量测结果, 随着轴压比的增加, 箍筋发生屈服时所对应的位移幅值相应减小. 试件的整个破坏过程表现为: 纵向受拉钢筋屈服 压区混凝土压屈剥落 箍筋屈服的发展 核心区混凝土逐步压酥 个别纵向钢筋压屈 箍筋弯钩拉直张开 纵向钢筋压屈成灯笼状.

1. 2. 5 轴压比 对柱极限变形能力的影响 从表 2 可以看出, 随着轴压比的增大, 试件的极限变形能力呈现出明显的减小趋势. 当轴压比从 0.3 增大至 0.9 时, 位移延性比从 8.90 减小为 3.86, 极限位移角从 1/27 减小为 1/41. 该位移角已经接近了现行抗震设计规范所规定的 1/50 的极限位移角限值, 可见现行抗震设计规范把轴压比控制在 0.9 以内是合理的.

2 塑性铰区域的变形组成及分析

2. 1 测量方法

为了测量塑性铰区域的弯曲变形、剪切变形, 以及节点区钢筋的滑移量. 在塑性铰区域及节点内, 通过焊接在纵向钢筋上的螺杆, 在试件正反面安装 10 个电子引伸仪(图 3a). 其中, 沿试件纵向布置的 1[#] ~ 4[#] 引伸仪用来测量塑性铰区域的平均曲率, 沿塑性铰区域对角布置的 5[#] ~ 8[#] 引伸仪用来测量该区域内的剪切变形, 在节点内沿纵向钢筋布置的 9[#] ~ 10[#] 引伸仪用来测量纵向钢筋在节点区内的滑移量. 上述每个引伸仪的夹具均经过专门设计, 并通过精密万向轴承与预埋螺杆连接. 这样, 可以避免因塑性铰区有较大剪切变形或平面外变形, 造成滑杆被卡或仪表损坏.

2. 2 各种非线性变形成分及其产生的位移的简化分析

框架柱塑性变形产生的位移, 可以分解为塑性弯曲位移 Δ_p 、剪切位移 Δ_s 和滑移位移 Δ_{slp} 的 3 个部分(图 6).

由图 6(a), (b) 和(c) 可推导出, 塑性铰区的 Δ_p , Δ_s 和 Δ_{slp} 分别为

$$\Delta_p = \int_0^{l_p} y \approx y dy + \theta_p (H - l_p) = (H - 0.5l_p) (\delta_1 - \delta_2) / h, \tag{1}$$

$$\Delta_s = AD - BC / 2 \sin \alpha = (\delta_3 - \delta_4) \cdot l_p + h^2 / 2l_p, \tag{2}$$

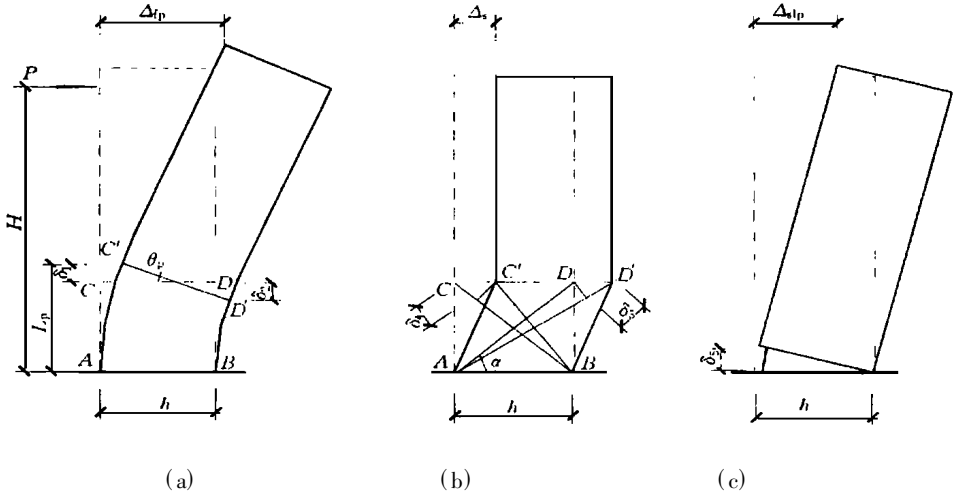


图 6 3 种主要塑性变形成分产生的位移

$$\Delta_{sp} = \delta_s H / h_0, \tag{3}$$

式中 l_p 为塑性铰的长度, δ_1 和 δ_2 分别为塑性铰区受拉侧和受压侧的伸长及压缩量, δ_3 和 δ_4 分别为塑性铰区两条对角线的伸长及压缩量, δ_s 为节点内受拉纵向钢筋的滑移量。

大量试验研究表明,影响钢筋混凝土构件铰的长度的主要因素有构件截面高度、剪跨比、轴压比,以及材料性能等。在此基础上,国内外学者曾经提出过许多经验公式,其中比较著名的有 Baker 公式和 Mattock 公式。一般认为钢筋混凝土柱塑性铰的长度为其截面高度的 0.5 ~ 1.0 倍^[1]。对于试验采用的试件,利用 Baker 提出的有约束构件塑性铰长度经验公式的计算,结果大约为 140 mm。由于采用较高的轴压比,为了考察塑性铰的实际长度,在试件的关键受力区域 h_0 范围内的纵向钢筋上布置了电阻应变片。根据试验测量的数据可知,该范围内钢筋几乎都受拉屈服。另外,从试件的破坏现象看,试件混凝土的开裂和屈服剥落范围正好集中在关键受力区域的测量标距范围内(160 mm)。因此,本文在试验数据的分析中取塑性铰长度为 $l_p = h_0 - a_s = 160 \text{ mm}$ 。

2.3 各种位移成分比例及其规律

根据试验所测量的 $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ 和 δ_s , 可求得 Δ_{fp}, Δ_s 和 Δ_{sp} 在加载全过程中的变化过程。根据不同位移幅值下的各种位移成分与对应的位移幅值的比值,对不同试件取平均值。这样,可以得出各种位移成分在总位移中所占的比例,以及其随位移幅值的变化规律(图 7)。综合图 7 及不同轴压比下的计算结果,得出以下规律。(1) 试件的塑性弯曲位移在总位移中所占的比例随着轴压比的增大而增大,并且增加的幅度随着位移幅值的增加而增大。这种现象的主要原因是

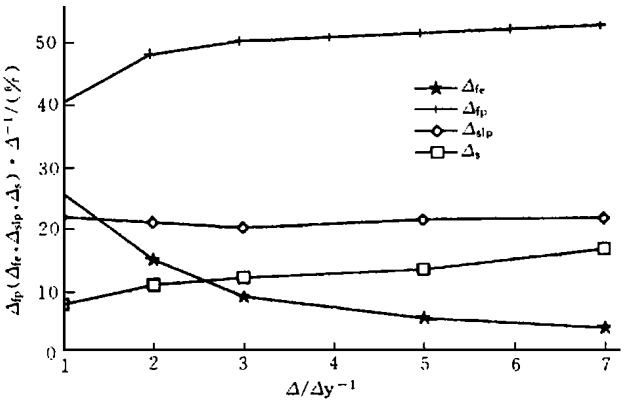


图 7 各种变形成分的分布情况

这种现象的主要原因是

的形成过程中, 轴压比的增加加快了试件混凝土截面的压屈进程, 从而可能较大地增加塑性铰区域的平均压应变。(2) 试件的剪切位移随位移幅值的增加而增大, 其在总位移中所占的比例在位移幅值为 $1\Delta_y \sim 3\Delta_y$ 之间有所增大, 而在 $3\Delta_y$ 之后变化不大, 大约为 13%。轴压比增大对 Δ_s 没有明显影响。(3) 试件的滑移位移随着轴压比的增加而有所减小, 并随着位移幅值的增大而增大。在不同位移幅值下, 各试件的滑移位移在总位移中所占比例几乎保持不变, 均值约为 21%。

3 主要结论

(1) 轴压比对常规钢筋混凝土框架柱的滞回性能有很大影响, 因而必须在钢筋混凝土框架柱的恢复力模型中, 考虑轴压比参数的影响。这方面的工作有待进一步研究。(2) 轴压比对框架柱的变形能力有较大的影响。过高的轴压比不仅会使构件在较小位移延性比下出现明显强度退化, 在较大位移延性比下的滞回环不稳定现象, 并且较易突然丧失对竖向荷载的承受能力。(3) 当位移延性比大于 3.0 后, 本试验中框架柱塑性铰区域的弯曲变形、剪切变形, 以及纵向受拉钢筋的滑移所产生的侧移, 在框架柱总侧移中所占的比例分别约为 50%, 13% 和 21%。

参 考 文 献

- 1 Alsliw at J, Saatcioglu M. Hysteretic of anchorage slip in R/C members. ASCM Journal of Struct. Engrg., 1992, 118: 2 439 ~ 2 458
- 2 Park P, Paulay T. Reinforced concrete structures. New York: John Wiley and Sons Inc., 1975. 245 ~ 253

Antiseismic Performance Test of RC Framed Column with High Axial Compression Ratio

Guo Zixiong^① Lu Xilin^②

(^① Dept. of Civil Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou;

^② College of Civil Eng., Tongji Univ., 200092, Shanghai)

Abstract By way of tests carrying out on 7 test specimens of framed column under subnormal frequency cyclic loading, a study is devoted to the antiseismic performance of framed column with high compression ratio and also to the effect of axial compression ratio on the hysteresis characteristic of framed column. As shown by the results, with an axial compression ratio up to 0.9, the yielded RC framed column will reflect the degeneration of strength and stiffness even if there is good reinforced structure. Test and measurement are made on global deformation of testpiece and such local deformation components as bending deformation and shear deformation of plastic hinge zone and anchorage slip of steel bar at nodal zone. Based on statistical analysis and short-cut calculation of these measuring results, a study is made on the lateral displacement due to these deformation components and on the their proportion in global lateral displacement of conventional framed column.

Keywords steel reinforced concrete, framed column, cyclic loading, hysteresis characteristic, deformation characteristic