

文章编号:1673-2049(2019)05-0119-08

高强混凝土框架柱截面尺寸效应的变化规律

张国军

(上海师范大学 建筑工程学院,上海 201418)

摘要:根据收集的117根高强混凝土框架柱在固定轴向荷载和水平反复荷载作用下的试验结果,用MATLAB软件编制的程序计算出试验柱的骨架曲线、屈服位移和屈服荷载、最大位移和最大荷载、极限位移和极限荷载、延性系数、弹性刚度、强化刚度、最大刚度和退化刚度、各滞回环面积和累计滞回环面积,并用ORIGIN软件一元线性拟合出各参数与截面面积或截面高度之间的关系式,然后根据ORIGIN软件回归结果分析了截面尺寸对框架柱承载力、延性、刚度及耗能的影响规律。结果表明:随着截面面积的增大,名义弯矩逐渐降低,试件承载力最大试验值与按照规范计算的最大承载力的比值逐渐减小,框架柱的延性逐渐降低;随着截面高度的增加,框架柱的极限位移角逐渐降低,框架柱的强化刚度、退化刚度及最大刚度与弹性刚度的比值均逐渐增大,框架柱的平均耗能系数逐渐降低。

关键词:高强混凝土;框架柱;尺寸效应;弯曲破坏;名义弯矩;延性;刚度;耗能

中图分类号:TU375.3

文献标志码:A

Variation Rules of Cross-section Size Effect of High-strength Concrete Frame Column

ZHANG Guo-jun

(College of Civil Engineering, Shanghai Normal University, Shanghai 201418, China)

Abstract: According to the collected test results of 117 high-strength concrete frame columns under fixed axial load and horizontal repeated load, the skeleton curve, yield displacement and yield load, maximum displacement and maximum load, ultimate displacement and ultimate load, ductility coefficient, elastic stiffness, strengthening stiffness, maximum stiffness and degradation stiffness, area of each hysteretic loop and accumulated hysteretic loop area of the test column were calculated by the program compiled by MATLAB software. The relationship between them and section area or section height was fitted linearly by ORIGIN software. Then the influences of section size on bearing capacity, ductility, stiffness and energy consumption of frame columns were analyzed according to ORIGIN software regression results. The results show that with the increase of section area, the nominal bending moment decreases gradually. The ratio of the maximum bearing capacity of specimens to the maximum bearing capacity calculated according to the code decreases gradually, and the ductility of frame columns decreases gradually. With the increase of section height, the ultimate displacement angle of frame columns decreases gradually, the strengthening stiffness, degradation stiffness and ratio of maximum stiffness to elastic stiffness of frame columns increase gradually, and the average energy dissipation coefficient of

收稿日期:2019-03-24

基金项目:上海师范大学教育教学改革专项建设项目(A-9103-18-417520)

作者简介:张国军(1964-),男,甘肃武威人,教授,工学博士,E-mail:zhgjxj@163.com。

frame columns decreases gradually.

Key words: high strength concrete; frame column; size effect; flexural failure; nominal moment; ductility; stiffness; energy dissipation

0 引 言

随着材料科学的发展和实际工程的需要,结构形式变得越来越复杂多样,同时结构跨度和高度也在不断增加,这就使得结构构件尺寸明显增大,钢筋混凝土柱破坏的尺寸效应问题变得越来越突出。国内外研究者对此问题开展了一定的试验及数值研究工作,主要探讨了长细比、混凝土强度等级、加载形式等因素对钢筋混凝土柱破坏的尺寸效应影响机制。现有试验工作中钢筋混凝土柱的尺寸较小,且对钢筋混凝土柱尺寸效应的定量影响依然不清晰^[1-7]。对于钢筋混凝土柱尺寸效应的抗震性能研究定性分析较少,定量分析几乎微乎其微。本文根据收集的 117 根高强混凝土框架柱抗震性能研究试验结果^[8-18],分析探讨了截面尺寸对高强混凝土框架柱受弯承载力、延性、刚度及耗能的影响规律,为高强混凝土结构尺寸效应研究提供基础资料和依据。

1 框架柱的试验数据收集

笔者收集了国内外近年来共 117 根剪跨比大于 2 且只发生弯曲破坏而不发生剪切破坏的高强混凝土框架柱在固定轴向荷载和水平反复荷载作用下的试验结果^[8-18]。所有试件中只有 15 根柱为矩形柱,其余均为方形柱;没有短柱,箍筋形式为普通箍和复合箍,所有柱均有完整的滞回曲线,对于两端固定或两端铰接形式加载的柱,已通过将位移或水平力除以 2 转化为悬臂柱,大多数研究者提供的数据都包括了荷载-位移($P-\Delta$)效应。各试验柱的基本参数根据文献^[11],^[12]来确定,试验柱的主要试验参数和试验结果见表 1。试件编号根据文献中的编号,弯矩最大值 M_{\max} 和剪力最大值 V_{\max} 为考虑 $P-\Delta$ 效应后柱根部的最大弯矩承载力和最大剪力承载力。

根据收集到的试验柱滞回曲线,用 MATLAB

表 1 试件的主要试验参数和试验结果

Tab. 1 Main Test Parameters and Results of Specimens

试件编号	f_c/MPa	b/mm	h/mm	H/mm	屈服状态		峰值状态		极限状态		延性系数	$M_{\max}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	V_{\max}/kN
					位移/ mm	荷载/ kN	位移/ mm	荷载/ kN	位移/ mm	荷载/ kN			
ORC1	62.8	305	508	1 829	36.7	134.0	77.6	251.7	111.0	214.0	3.02	472	258
ORC2	62.8	305	508	1 829	31.2	295.7	47.1	383.6	81.5	326.1	2.61	710	308
ORC3	62.8	305	508	1 829	30.4	343.9	40.1	420.4	70.1	357.4	2.31	775	423
AS-2HT	55.5	305	305	1 473	7.6	114.9	9.9	149.1	34.0	126.7	3.77	300	140
AS-3HT	55.6	305	305	1 473	6.3	123.8	7.8	145.7	24.8	123.8	3.32	296	135
AS-4HT	55.7	305	305	1 473	7.6	112.4	13.4	143.2	36.0	121.8	4.46	301	127
AS-5HT	73.4	305	305	1 473	4.2	160.9	5.6	190.7	11.8	162.1	2.74	349	173
AS-6HT	73.4	305	305	1 842	8.0	163.9	9.3	183.3	28.6	155.8	3.52	341	154
AS-7HT	73.5	305	305	1 473	8.2	147.9	9.5	165.6	19.1	140.7	2.26	316	144
ES-1HT	55.8	305	305	1 473	6.1	117.4	12.2	141.6	25.4	120.4	3.69	290	124
ES-8HT	73.6	305	305	1 473	7.1	153.4	8.4	173.7	18.8	147.6	2.57	349	166
AA1	60.9	250	250	1 140	8.2	79.1	13.9	128.7	15.6	109.4	1.12	169	130
AA2	60.9	250	250	1 140	8.7	72.9	15.1	121.8	16.7	103.6	1.20	159	121
AA3	60.9	250	250	1 140	8.3	56.4	15.4	96.8	19.0	82.3	1.23	124	95
AA4	60.9	250	250	1 140	7.9	74.4	14.8	134.3	19.5	114.2	1.32	171	138
AB1	60.9	250	250	1 140	14.2	113.7	22.6	166.9	43.0	141.9	2.03	221	175
AB2	60.9	250	250	1 140	11.6	113.0	18.0	164.9	37.0	140.2	2.06	224	165
AB3	60.9	250	250	1 140	12.5	114.3	23.3	169.3	34.9	143.9	1.82	230	166
AB4	60.9	250	250	1 140	13.9	137.5	21.4	202.4	30.1	172.1	1.52	255	205
BA1	60.9	250	250	1 140	9.1	92.4	16.2	139.1	20.5	118.2	1.35	176	141

续表 1

试件编号	f_c/MPa	b/mm	h/mm	H/mm	屈服状态		峰值状态		极限状态		延性 系数	$M_{\max}/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	$V_{\max}/$ kN
					位移/ mm	荷载/ kN	位移/ mm	荷载/ kN	位移/ mm	荷载/ kN			
BA2	60.9	250	250	1 140	8.8	83.9	14.2	127.0	19.9	107.9	1.40	163	126
BA3	60.9	250	250	1 140	8.4	79.9	14.3	130.9	15.8	111.3	1.10	170	131
BA4	60.9	250	250	1 140	9.7	68.3	16.3	107.7	22.6	91.6	1.39	141	110
BB	60.9	250	250	1 140	14.2	110.4	24.4	159.8	43.4	135.9	2.05	206	195
BB1	60.9	250	250	1 140	12.3	135.5	24.9	191.2	38.0	162.5	2.16	246	175
BB4	60.9	250	250	1 140	12.4	111.9	22.4	174.7	41.8	148.5	2.09	240	171
BB4B	60.9	250	250	1 140	12.6	110.1	22.2	169.1	42.2	143.8	2.09	234	171
CA1	60.9	250	250	1 140	9.3	59.1	16.7	100.2	25.2	85.2	1.51	131	101
CA2	60.9	250	250	1 140	9.6	83.7	16.4	126.5	27.3	107.5	1.84	173	126
CA3	60.9	250	250	1 140	8.5	70.8	16.1	129.2	26.6	109.8	1.79	166	132
CA4	60.9	250	250	1 140	9.0	71.7	16.9	130.0	23.0	110.5	1.36	178	135
CB1	60.9	250	250	1 140	15.3	117.8	25.9	168.9	47.4	143.5	2.08	229	172
CB2	60.9	250	250	1 140	16.3	127.9	24.1	170.0	42.7	144.5	1.77	216	167
CB3	60.9	250	250	1 140	13.3	94.0	26.1	168.4	51.6	143.2	2.11	252	170
CB4	60.9	250	250	1 140	14.8	110.3	29.4	174.6	39.9	148.4	1.73	246	172
No. 2	33.4	550	550	1 200	5.8	517.2	13.0	787.8	84.6	669.7	13.22	953	764
C10-05N	54.1	203	203	610	7.4	45.8	12.8	68.3	30.4	58.0	2.48	45	70
C10-05S	54.1	203	203	610	6.9	47.4	11.6	67.2	30.4	57.1	2.62	43	68
C10-10N	52.9	203	203	610	6.9	53.2	14.7	94.7	33.0	80.5	2.68	63	96
C10-10S	52.9	203	203	610	6.7	55.9	14.5	93.6	32.6	79.6	3.00	62	93
C10-20N	51.3	203	203	610	7.2	58.3	16.9	104.3	29.3	88.7	1.95	76	108
C10-20S	51.3	203	203	610	7.1	56.2	17.5	102.8	29.4	87.3	2.25	72	102
C5-20N	38.7	203	203	610	6.2	41.1	14.4	71.9	24.2	61.1	1.87	48	71
C5-20S	38.7	203	203	610	5.9	39.3	11.5	71.0	24.0	60.3	2.09	46	69
AH-2	64.4	200	200	500	3.3	149.9	7.5	244.6	21.3	207.9	5.59	137	242
AH-1	64.4	200	200	500	3.9	177.2	10.1	243.8	37.3	207.3	8.78	154	244
AL-1	64.4	200	200	500	3.3	188.5	7.0	240.8	21.5	204.7	5.73	132	239
AL-2	64.4	200	200	500	2.9	176.5	5.3	239.2	8.8	203.3	2.69	137	242
BH-1	79.8	200	200	500	2.8	158.4	5.2	250.7	33.7	213.1	7.42	147	246
BH-2	79.8	200	200	500	3.2	218.8	8.2	288.0	24.3	244.8	6.67	161	283
BL-1	79.8	200	200	500	2.6	140.1	6.4	247.8	25.0	210.6	5.76	136	241
BL-2	79.8	200	200	500	3.0	240.0	6.7	286.1	24.8	243.1	7.07	161	283
No. 1	32.8	279	279	2 134	16.8	38.5	30.3	60.2	34.8	51.1	2.06	121	42
No. 10013015	69.7	305	305	2 000	18.7	89.1	30.4	108.4	77.2	92.1	3.43	217	90
10013025	71.2	305	305	2 000	20.2	135.5	28.9	160.5	44.8	136.4	2.02	349	140
10013040	74.6	305	305	2 000	18.6	154.1	24.1	177.0	32.4	150.5	3.24	388	150
No. 1006015	68.3	305	305	2 000	18.9	80.9	30.7	118.9	133.4	101.1	5.91	237	100
No. 1006025	68.8	305	305	2 000	21.0	131.1	31.9	155.0	85.8	131.8	3.69	349	130
No. 1006040	71.5	305	305	2 000	18.7	152.4	25.0	178.5	66.2	151.7	3.24	344	123
No. 1005540	77.1	305	305	2 000	21.8	149.0	36.7	193.6	101.1	164.6	4.43	396	143
No. 1005552	74.7	305	305	2 000	13.3	161.7	15.0	197.0	51.3	167.5	3.80	403	150
No. 1006052	77.0	305	305	2 000	17.2	196.5	18.5	209.4	67.4	178.0	4.06	417	150
No. 1008040	74.6	305	305	2 000	20.8	166.9	25.9	193.8	52.9	164.8	2.46	372	136
No. 1206040	76.9	305	305	2 000	25.1	140.2	55.6	198.1	91.0	168.4	3.51	426	156

续表 1

试件编号	f_c/MPa	b/mm	h/mm	H/mm	屈服状态		峰值状态		极限状态		延性 系数	$M_{\max}/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	$V_{\max}/$ kN
					位移/ mm	荷载/ kN	位移/ mm	荷载/ kN	位移/ mm	荷载/ kN			
No. 806040	60.1	305	305	2 000	22.9	114.0	46.3	168.2	186.7	143.0	7.73	334	130
U1	35.1	305	305	1 000	21.1	226.5	45.2	263.8	54.9	224.2	2.56	284	267
B1	72.2	250	250	500	2.8	329.7	4.1	402.6	9.3	342.2	2.74	196	375
B2	72.2	250	250	500	3.1	296.0	7.6	410.1	15.8	348.6	4.33	203	371
B3	72.2	250	250	500	3.2	352.4	4.6	427.2	6.0	363.2	1.65	214	406
B4	72.2	250	250	500	2.6	331.1	4.3	397.6	11.8	338.0	3.56	195	375
B5	72.2	250	250	500	2.7	329.3	4.6	394.1	6.1	363.7	1.84	203	387
B6	72.4	250	250	500	2.9	340.4	4.3	416.7	7.0	354.2	2.02	210	400
B7	72.2	250	250	500	2.2	308.4	3.3	384.0	5.1	326.4	1.92	182	352
No. 1	37.4	400	400	1 600	11.7	118.6	32.5	192.9	87.5	164.0	6.66	354	200
No. 2	35.5	400	400	1 600	9.3	211.5	16.3	264.8	40.1	225.1	3.72	481	279
No. 3	35.5	400	400	1 600	9.2	217.0	15.1	271.9	33.0	231.2	3.18	474	277
No. 4	32.4	400	400	1 600	9.4	205.2	16.8	250.9	34.0	213.2	3.00	457	265
UC10H	80.7	225	225	450	1.7	285.5	2.5	324.5	4.8	275.8	2.80	161	334
UC15H	80.7	225	225	450	2.0	279.5	3.5	363.6	7.1	309.1	3.53	182	365
UC15L	80.7	225	225	450	2.1	264.7	4.9	365.1	12.2	310.4	5.64	176	363
UC20H	80.7	225	225	450	2.5	241.6	5.6	400.3	11.5	340.2	4.51	198	392
UC20L	80.7	225	225	450	2.2	227.8	5.9	363.0	13.9	308.6	6.25	179	370
A1	73.8	152	152	597	11.3	26.9	26.2	45.4	29.9	38.6	2.65	26	44
A3	64.8	152	152	597	4.5	43.8	8.6	65.7	16.6	55.8	3.69	44	67
B1	65.5	152	152	597	9.3	19.8	22.6	36.4	27.6	30.9	2.97	19	32
B2	63.0	152	152	597	4.4	26.9	10.1	53.5	17.0	45.5	3.96	31	48
B3	67.0	152	152	597	3.5	47.8	6.6	64.1	12.1	54.5	3.50	38	58
C1	52.7	152	152	597	10.5	22.1	22.5	36.3	23.0	33.3	2.47	22	37
C2	57.4	152	152	597	4.7	31.2	10.4	49.1	20.9	41.7	4.41	28	44
C3	62.1	152	152	597	3.6	34.4	7.8	56.6	13.4	48.1	4.11	33	50
D1	58.2	152	152	597	3.5	31.0	7.8	56.6	12.9	48.1	3.76	34	52
D2	65.2	152	152	597	3.7	35.1	7.5	61.0	14.0	51.8	3.80	35	55
D3	55.2	152	152	597	4.0	37.6	7.7	53.5	12.6	45.5	3.30	32	48
No. 5	33.1	400	400	1 600	8.7	199.4	17.9	286.8	31.6	243.7	3.17	535	292
No. 6	32.4	400	400	1 600	8.4	196.7	16.7	290.9	25.4	247.3	2.63	528	295
No. 7	33.9	400	400	1 600	6.3	210.5	9.6	265.4	13.6	225.6	1.99	525	293
No. 9	32.4	400	400	1 600	7.1	246.4	13.4	289.6	30.4	246.1	3.90	602	310
HC4T10-0.1P	64.6	254	254	508	4.8	159.5	11.5	265.0	35.3	225.2	7.31	144	268
HC4T10-0.2P	64.6	254	254	508	4.8	206.0	13.2	318.7	31.3	270.9	6.44	174	324
HC4T10-0.1P	58.4	254	254	508	6.3	124.3	26.3	321.0	46.9	272.8	7.42	179	324
HC4T10-0.2P	58.4	254	254	508	4.7	228.8	11.7	373.7	36.4	317.7	7.74	213	378
No. 8	32.4	400	400	1 600	11.8	163.7	46.9	264.0	66.6	224.4	5.03	554	269
C-4	38.3	140	280	1 120	1.1	91.8	1.6	109.2	2.8	92.8	2.65	122	109
C-5	38.3	140	280	1 120	1.0	88.2	1.8	110.6	2.4	94.0	2.35	124	111
C-6	38.3	140	280	1 120	0.9	79.4	1.4	108.1	2.3	91.9	2.54	121	108
C-7	38.3	140	280	1 400	1.1	60.6	1.7	74.1	2.4	63.0	2.25	104	74
C-8	38.3	140	280	1 400	1.3	66.0	1.8	81.7	3.2	69.5	2.44	114	82
C-9	38.3	140	280	1 400	1.2	66.9	1.9	83.4	3.0	70.9	2.42	117	83

续表 1

试件编号	f_c/MPa	b/mm	h/mm	H/mm	屈服状态		峰值状态		极限状态		延性系数	$M_{\max}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	V_{\max}/kN
					位移/ mm	荷载/ kN	位移/ mm	荷载/ kN	位移/ mm	荷载/ kN			
HC-1	56.7	450	650	1 690	22.6	841.0	31.7	1 064.5	42.1	904.9	1.86	1 799	1 065
HC-2	56.7	450	650	1 690	25.8	915.5	36.7	1 152.1	44.9	979.3	1.74	1 947	1 152
HC-3	56.7	450	650	1 690	28.3	1 022.6	38.4	1 255.7	47.6	1 067.3	1.68	2 122	1 256
HC-4	79.0	450	650	1 690	13.0	1 044.9	16.0	1 137.6	18.6	967.0	1.43	1 923	1 138
HC-5	79.0	450	650	1 690	30.0	940.1	40.1	1 122.2	55.2	953.9	1.84	1 897	1 122
HC-6	79.0	450	650	1 690	29.3	1 114.5	38.3	1 275.3	55.2	1 084.0	1.89	2 155	1 275
HC-7	85.0	450	650	1 690	30.1	834.3	39.8	1 034.0	61.5	878.9	2.04	1 747	1 034
HC-8	85.0	450	650	1 690	28.3	906.9	38.1	1 177.1	59.8	1 000.6	2.11	1 989	1 177
HC-9	85.0	450	650	1 690	28.7	1 042.4	31.4	1 107.3	35.9	941.2	1.25	1 871	1 107

注: f_c 为混凝土轴心抗压强度; b 为截面宽度; h 为截面高度; H 为柱高。

软件编制的程序计算出试验柱骨架曲线、屈服位移和荷载、最大位移和荷载、极限位移和荷载、延性系数、弹性刚度、强化刚度和退化刚度、各滞回环面积和累计滞回环面积,并用 ORIGIN 软件一元线性拟合出各参数与截面面积或截面高度之间的关系式。

2 试验柱结果分析

框架试验柱的位移延性系数 μ 、屈服位移角 R_y 、最大位移角 R_{\max} 和极限位移角 R_u [11] 的计算公式为

$$\mu=\frac{\Delta_u}{\Delta_y}, R_y=\frac{\Delta_y}{H}, R_{\max}=\frac{\Delta_{F_{\max}}}{H}, R_u=\frac{\Delta_y}{H} \tag{1}$$

式中: $\Delta_y, \Delta_{F_{\max}}, \Delta_u$ 分别为柱屈服荷载 F_{hy} 、最大荷载 $F_{h_{\max}}$ 和极限荷载 F_{hu} 时试件的柱顶位移。

位移延性系数 μ 对于反复荷载作用下的框架柱取滞回环骨架曲线上正、反 2 个方向的位移平均值 [11], 即

$$\mu=(|\Delta_{+u}|+|\Delta_{-u}|)/(|\Delta_{+y}|+|\Delta_{-y}|) \tag{2}$$

由于收集的框架柱只发生弯曲破坏而不发生剪切破坏,仅考虑峰值荷载时弯矩随截面尺寸的变化规律。为了正确分析正截面承载力与截面尺寸的关系,分析时为消除截面尺寸、混凝土强度、构件长度对承载力和变形的影响,可将峰值荷载时的弯矩 M_{\max} 用量纲一的名义弯矩表示 [4]。下面分别讨论截面尺寸对框架柱承载力、延性、刚度及耗能的影响规律。

2.1 截面尺寸对柱受弯承载力的影响规律

从柱尺寸角度分析,影响柱受弯承载力的主要有 2 个因素:截面宽度和截面高度。本文从钢筋混凝土柱的试验中发现,截面宽度或截面高度对柱受弯承载力影响的变化规律不是很明显,而柱截面面积对柱受弯承载力的影响存在一定变化规律。

图 1 给出了名义弯矩 M'_{\max} 随截面面积 A 的变化情况。从图 1 可以看出,随着截面面积 A 的增大,名义弯矩 M'_{\max} 逐渐降低,通过对试验结果进行一元线性拟合,可得名义弯矩 M'_{\max} 与截面面积 A 之间的关系式,即

$$M'_{\max}=0.26-0.29A \tag{3}$$

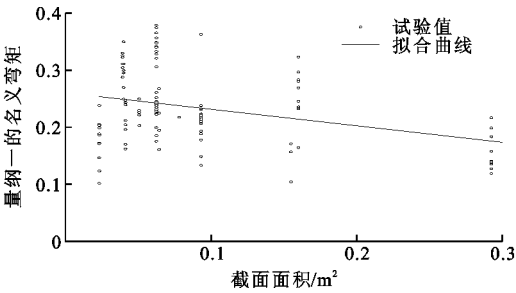


图 1 名义弯矩与截面面积关系

Fig. 1 Relationship Between Nominal Bending Moment and Sectional Area

按照美国混凝土结构设计规范 [19] (ACI 318-02) 和中国现行《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010) 中相应公式计算得到弯矩规范值 M_{cal} (材料强度按实测值代入),将实测值与规范值的比值 M_{\max}/M_{cal} 称为安全储备系数。图 2 为安全储备系数与截面高度的关系。由图 2 可知,随着截面面积 A 的增大,试件的安全储备系数 M_{\max}/M_{cal} 逐渐减小,通过对试验结果进行一元线性拟合,可得安全储备系数 M_{\max}/M_{cal} 与截面面积 A 之间的关系式为

$$M_{\max}/M_{cal}=1.17-5.78\times10^{-6}A \tag{4}$$

由此可以得出:基于小尺寸试件试验研究成果所建立的高强混凝土柱偏心受压承载力设计计算公式使设计结果偏于不安全,建议规范中高强混凝土柱偏心受压承载力设计计算公式中考虑截面尺寸的

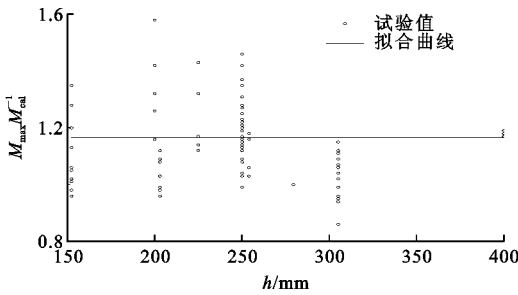


图 2 安全储备系数与截面高度关系

Fig. 2 Relationship Between Safety Reserve Coefficient and Section Height

影响。

2.2 截面尺寸对柱延性的影响规律

图 3 给出了框架柱延性系数随截面面积的变化规律。从图 3 可以看出,随着截面尺寸的增加,尺寸效应越来越明显,即随着截面面积的增加,框架柱的延性逐渐降低。通过对试验结果进行一元线性拟合,可得延性系数 μ 与截面面积 A 之间的关系式为

$$\mu = 3.35 - 1.09A \quad (5)$$

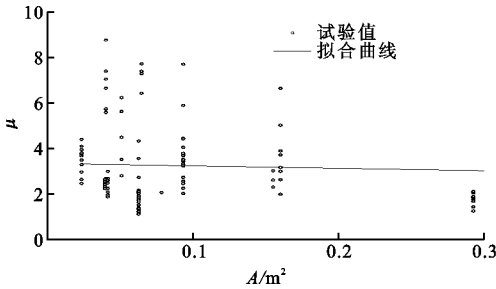


图 3 延性系数与截面面积关系

Fig. 3 Relationship Between Ductility Coefficient and Sectional Area

图 4 给出了框架柱极限位移角随截面高度的变化规律。从图 4 可以看出,随着截面高度的增加,尺寸效应越来越明显,即随着截面高度的增加,框架柱的极限位移角逐渐降低。通过对试验结果进行一元线性拟合,可得极限位移角 R_u 与截面高度 h 之间的关系式为

$$R_u = 3.38 - 7.27h \quad (6)$$

2.3 截面尺寸对柱刚度的影响规律

框架试验柱的弹性刚度、强化刚度 K_p 、最大刚度 K 和退化刚度 K_d 可表示为

$$K_e = \frac{F_{hy}}{\Delta_y}, K_p = \frac{F_{hmax} - F_{hy}}{\Delta_{Fmax} - \Delta_y}, K = \frac{F_{hmax}}{\Delta_{Fmax}}, K_d = \frac{F_{hmax} - F_{hu}}{\Delta_u - \Delta_{Fmax}} = \frac{0.15F_{hmax}}{\Delta_u - \Delta_{Fmax}} \quad (7)$$

由高强混凝土框架柱的试验结果分析可知,框架柱的强化刚度 K_p 、退化刚度 K_d 及最大刚度 K 与

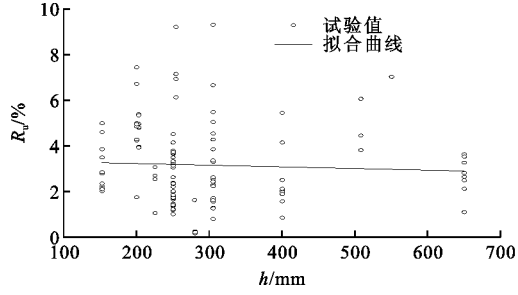


图 4 极限位移角与截面高度关系

Fig. 4 Relationship Between Limit Displacement Angle and Cross Section Height

截面尺寸均存在一定关系。它们与弹性刚度 K_e 的比值随截面高度的变化规律见图 5~7。可以看出,随着截面高度的增加,尺寸效应越来越明显,即随着截面高度的增加,框架柱的强化刚度 K_p 、退化刚度 K_d 及最大刚度 K 与弹性刚度 K_e 的比值均逐步增大。通过对试验结果进行一元线性拟合,可得框架柱的强化刚度 K_p 、退化刚度 K_d 及最大刚度 K 与弹性刚度 K_e 的比值和截面高度 h 之间的关系式为

$$K_p/K_e = 0.563 + 0.023h \quad (8)$$

$$K_d/K_e = 0.18 + 0.24h \quad (9)$$

$$K/K_e = 0.75 + 0.2h \quad (10)$$

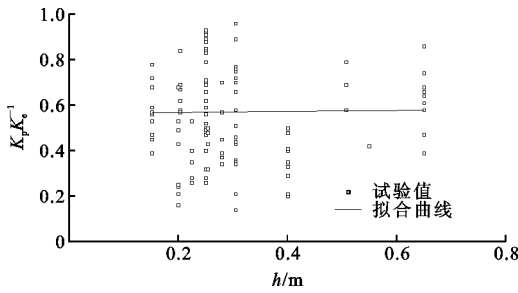


图 5 强化刚度与弹性刚度比值和截面高度的关系

Fig. 5 Relationship Between Ratio of Strengthening Stiffness to Elastic Stiffness and Section Height

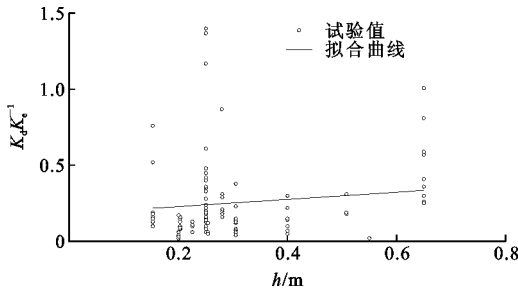


图 6 退化刚度与弹性刚度比值和截面高度的关系

Fig. 6 Relationship Between Ratio of Degradation Stiffness to Elastic Stiffness and Section Height

2.4 截面尺寸对耗能能力的影响规律

平均耗能系数 η_e 反映试件屈服后的耗能能

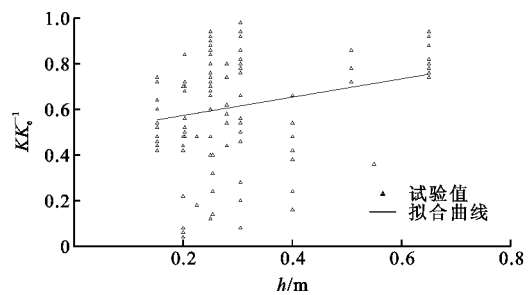


图 7 最大刚度与弹性刚度比值和截面高度的关系

Fig. 7 Relationship Between Ratio of Maximum Stiffness to Elastic Stiffness and Section Height

力^[4],其定义为

$$\eta_e = \frac{E}{nE_y} \quad (11)$$

式中: E 为试件屈服后至水平荷载下降到 $0.85F_m$ (F_m 为最大荷载)时各滞回曲线面积的总和; E_y 为名义弹性耗能; n 为试件经受的低周反复荷载循环次数。

平均耗能系数与截面高度的关系曲线见图 8。从图 8 可以看出,随着截面高度的增加,框架柱的平均耗能系数 η_e 逐渐降低。通过对试验结果进行一元线性拟合,可得平均耗能系数 η_e 与截面高度 h 之间的关系式为

$$\eta_e = 9.074 - 10.48h \quad (12)$$

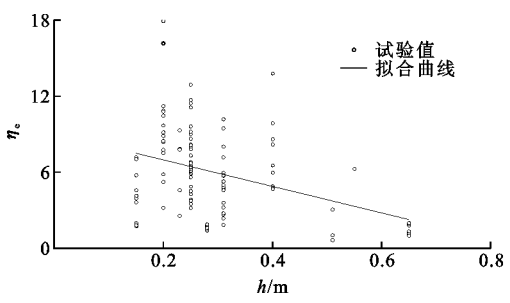


图 8 平均耗能系数与截面高度的关系

Fig. 8 Relationship Between Average Energy Dissipation Coefficient and Cross Section Height

3 结 语

- (1)随着截面面积的增大,名义弯矩逐渐降低,试件的安全储备系数逐渐减小,框架柱的延性逐渐降低。
- (2)随着截面高度的增加,框架柱的极限位移角逐渐降低,尺寸效应越来越明显,即随着截面高度的增加,框架柱的强化刚度、退化刚度、最大刚度与弹性刚度的比值均逐渐增大。随着截面高度的增加,框架柱的平均耗能系数逐渐降低。

参考文献: References:

[1] 陈肇元. 高强与高性能混凝土的发展及应用[J]. 土木工程学报, 1997, 30(5): 3-11.
CHEN Zhao-yuan. Development and Utilization of High-strength and High-performance Concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 1997, 30(5): 3-11.

[2] 杜修力, 卢爱贞, 赵均. 钢筋混凝土柱大偏心受压性能尺寸效应试验研究[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(3): 372-380.
DU Xiu-li, LU Ai-zhen, ZHAO Jun. Experimental Study on Size Effect of Large-eccentric Reinforced Concrete Columns Subjected to Compressive Loads [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41(3): 372-380.

[3] 杜修力, 符佳, 张建伟. 钢筋混凝土柱轴心受压性能尺寸效应的大比尺试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(增2): 1-8.
DU Xiu-li, FU Jia, ZHANG Jian-wei. The Experimental Study on Size Effect of the Large-size Reinforced Concrete Column Under Axial Loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(S2): 1-8.

[4] 解咏平, 李振宝, 杜修力, 等. 低周反复荷载作用下钢筋混凝土柱抗震性能尺寸效应试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(12): 86-93.
XIE Yong-ping, LI Zhen-bao, DU Xiu-li, et al. Experimental Study on Size Effect of Seismic Behavior for Reinforced Concrete Columns Under Low Cycle Reversed Loading [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(12): 86-93.

[5] 孙源, 杜修力, 张建伟, 等. 普通混凝土柱大偏心受压性能尺寸效应试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(增1): 297-301.
SUN Yuan, DU Xiu-li, ZHANG Jian-wei, et al. Experimental Study on Size Effect of Common Reinforced Concrete Column Under Large Eccentric Loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(S1): 297-301.

[6] 张国军. 高轴压比高强混凝土框架柱抗震性能尺度效应分析[J]. 结构工程师, 2017, 33(4): 117-122.
ZHANG Guo-jun. Scale Effect Analysis of Seismic Behavior of High Strength Concrete Frame Columns with High Axial Compression Ratio [J]. Structural Engineers, 2017, 33(4): 117-122.

[7] 杜修力, 卢爱贞, 赵均. 小偏心钢筋混凝土柱受压性能的尺寸效应试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(1): 1-7.
DU Xiu-li, LU Ai-zhen, ZHAO Jun. Experiment on

- Size Effect of Small Eccentric Reinforced Concrete Columns Under Compressive Loads [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015, 32(1): 1-7.
- [8] BERRY M, PARRISH M, EBERHARD M, PEER Structural Performance Database User's Manual[R]. Berkeley: University of California, 2004.
- [9] 刘伯权, 白国良, 张国军. 高轴压比高强混凝土框架柱抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(1): 45-50, 70.
- LIU Bo-quan, BAI Guo-liang, ZHANG Guo-jun. An Experimental Study on the Seismic Behavior of High Strength Reinforced Concrete Frame Columns with High Axial Compression Ratio [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(1): 45-50, 70.
- [10] 吕西林, 张国军, 陈绍林. 高轴压比高强混凝土足尺框架柱抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(3): 20-26.
- LU Xi-lin, ZHANG Guo-jun, CHEN Shao-lin. Research on Seismic Behavior of Full-scale High-strength Concrete Frame Columns with High Axial Compression Ratios [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(3): 20-26.
- [11] 张国军, 吕西林, 刘建新. 高强约束混凝土框架柱基于位移的抗震设计[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(2): 143-148.
- ZHANG Guo-jun, LU Xi-lin, LIU Jian-xin. Displacement-based Seismic Design of High-strength Concrete Frame Columns with Confinements [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(2): 143-148.
- [12] 张国军, 吕西林, 刘伯权. 高强混凝土框架柱的恢复力模型研究[J]. 工程力学, 2007, 24(3): 83-90.
- ZHANG Guo-jun, LU Xi-lin, LIU Bo-quan. Study on Resilience Models of High-strength Concrete Frame Columns [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(3): 83-90.
- [13] ZHANG G J, LIU B Q, BAI G L, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of High Strength Reinforced Concrete Frame Columns with High Axial Compression Ratios [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2009, 33(5): 653-656.
- [14] ZAHNG G J, LIU J X, LU X L. Displacement-based Seismic Design of High-strength Concrete Frame Columns [J]. Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China, 2008, 2(1): 93-101.
- [15] 张国军, 杜晓琴, 刘建新, 等. 高轴压比高强混凝土足尺框架柱的破坏形态分析[J]. 工程力学, 2009, 26(增 1): 89-93.
- ZHANG Guo-jun, DU Xiao-qin, LIU Jian-xin, et al. The Failure Modal Analysis of Full-scale High Strength Concrete Frame Columns with High Axial Compression Ratios [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(S1): 89-93.
- [16] 张国军, 吕西林. 高强混凝土框架柱的地震损伤模型[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(2): 100-104.
- ZHANG Guo-jun, LU Xi-lin. Seismic Damage Model of High Strength Reinforced Concrete Frame Columns [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(2): 100-104.
- [17] 张国军, 吕西林. 高轴压比扁柱的抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2005, 35(3): 54-56.
- ZHANG Guo-jun, LU Xi-lin. Experimental Study on Seismic Behavior of Flat Columns with High Axial Compression Ratio [J]. Building Structure, 2005, 35(3): 54-56.
- [18] 张国军, 刘伯权, 白国良. 钢筋混凝土框架柱在高轴压比下的抗震性能试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2002, 22(6): 53-57.
- ZHANG Guo-jun, LIU Bo-quan, BAI Guo-liang. Experimental Study on Aseismic Behavior of RC Frame Columns with High Axial Compression Ratio [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2002, 22(6): 53-57.
- [19] ACI 318-02, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary[S].