

钢筋混凝土柱变形性能指标限值及其试验验证

崔济东¹, 韩小雷^{1,2}, 龚涣钧¹, 季 静¹

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640; 2. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 基于收集的 469 个钢筋混凝土(RC)柱低周往复荷载试验结果,对 RC 柱破坏形态的影响因素进行研究,提出以剪跨比和弯剪比为参数划分 RC 柱破坏形态的方法,根据我国现行规范将 RC 柱的抗震性能状态划分为 7 个等级,基于构件的力-位移角骨架曲线的 3 个关键性能点(屈服点、承载力退化 20%点及丧失承载能力点)提出 RC 柱各性能状态变形指标限值的确定方法.结合 469 个 RC 柱试验结果的回归分析,确定不同破坏形态 RC 柱的变形性能指标限值,并对该变形性能指标限值体系进行易损性评估.进行 11 个 RC 柱的拟静力试验,利用试验结果进一步验证本文提出的 RC 柱变形性能指标限值.结果表明:本文提出的 RC 柱变形性能指标限值的准确性、离散性及超越概率均在合理范围内.

关键词: 变形性能指标限值; 钢筋混凝土柱; 拟静力试验; 试验数据收集; 回归分析

中图分类号: TU375

文献标志码: A

load capacity, point of losing bearing capacity) of the force-displacement backbone curves. Regression analyses of deformation limits of RC column, considering multiple combination of parameters, were performed using the collected test data of 469 RC columns, and deformation limits of RC columns of different failure modes were put forward using the most statistically significant regression formula. The proposed deformation limits were then evaluated using fragility analysis method. Finally, quasi-static tests on 11 RC columns were conducted and used to verify the proposed deformation limits. The results show that the accuracy, the discreteness and the failure probability of the deformation limits are all within reasonable range.

Key words: deformation limits; reinforced concrete (RC) column; quasi-static test; experimental data collection; regressive analysis

Deformation Limits of Reinforced Concrete Columns and Their Experimental Verification

CUI Jidong¹, HAN Xiaolei^{1,2}, GONG Huanjun¹, JI Jing¹

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Parameters affecting the failure modes of reinforced concrete (RC) columns were investigated using low frequency cyclic loading experimental data from 469 reinforced concrete (RC) columns. A method using shear span ratio and moment shear ratio as parameters was proposed to classify the failure modes of RC columns. With reference to the current codes for seismic design, the performance states of RC columns were divided into seven levels. And the method for determining the deformation limits of these levels were put forward. The proposed method was based on three key performance points (point of yielding, point of losing 20%

柱作为重要的抗侧力构件,其变形性能对建筑结构的整体抗震性能有着重要的影响.我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[1]虽然引入了性能化的抗震设计思想,但是在构件抗震性能评估上依然采用以承载能力验算为主的评估方法,构件在罕遇地震作用下的变形需求主要由相关的构造措施来保证,并且没有给出构件的变形性能指标限值,因此无法进行构件层次损伤的定量评估.虽然国内外很多文献^[2-11]对钢筋混凝土(RC)柱的变形性能指标限值进行了研究,但是这些研究成果主要集中在弯控 RC 柱上,对 RC 柱的破坏形态划分方法及非弯控 RC 柱的变形性能指标限值研究较少,这些均不利于建立系统的 RC 柱变形性能指标限值体系.

本文基于收集的 469 个矩形 RC 柱试验数据,对 RC 柱的破坏形态影响因素进行分析,并提出 RC 柱的破坏形态划分方法.根据我国现行规范,对 RC 柱

收稿日期: 2017-06-07

基金项目: 国家自然科学基金(51378221);亚热带建筑科学国家重点实验室自主研究项目(2015ZA05)

第一作者: 崔济东(1988—),男,工学博士,主要研究方向为高层建筑结构抗震. E-mail: jidong_cui@163.com

通讯作者: 韩小雷(1964—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为高层建筑结构抗震. E-mail: xlhan@scut.edu.cn

的性能状态进行划分,并基于构件的力-位移角骨架曲线的 3 个关键性能点(屈服点、承载力退化 20%点及丧失承载能力点)提出 RC 柱各性能状态变形指标限值的统一确定方法.在此基础上,结合 469 个 RC 柱试验结果的回归分析,建立 RC 柱的变形性能指标限值,并对该变形性能指标限值体系进行易损性评估,检验变形性能指标限值的准确性、离散性和超越概率.最后,进行了 11 个 RC 柱的低周往复荷载试验,利用试验结果进一步对提出的变形性能指标限值进行验证.

1 RC 柱试验数据整理

为进行 RC 柱的变形性能指标限值研究,从公开发表的文献收集了国内外 469 个 RC 柱试件低周往复荷载试验数据,提取了各试件的关键参数并汇编成数据库.数据库中所有试件试验过程中位移均为逐级增大直至试验停止,大部分试件均施加轴压力,对于施加轴压力的试件,整个试验过程中,轴压力保持恒定.

数据库中试件的主要加载模式如图 1 所示.图中, N 为试验轴压力, L_a 为试件的等效悬臂高度,数据库中记录的力-位移数据为等效悬臂杆件的力 V 和位移 Δ .

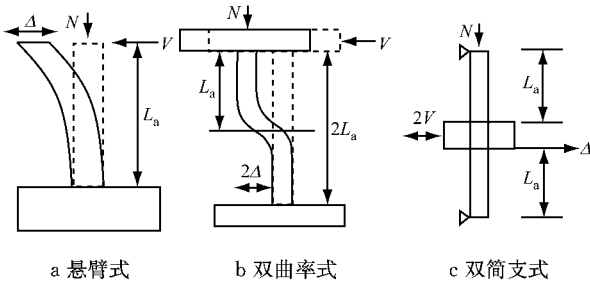


图 1 RC 柱试件侧向加载模式

Fig.1 Lateral loading pattern of RC column specimen

以下给出该数据库的数据来源及主要参数分布,如表 1 所示.其中, f_{ck} 为混凝土的试验轴心抗压强度标准值, λ 为试件剪跨比,定义为 L_a 与加载方向柱的截面高度之比, ρ_t 为加载方向柱的面积配箍率, β_v 为柱的配箍特征值, $\alpha\beta_v$ 为柱的有效配箍特征值, n 为试验轴压比, $V/f_{ck}bh_0$ 为名义剪压比, m 为弯剪比.柱的面积配箍率 ρ_t 按《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[12](以下简称 2010《混规》)的定义计算, α 为有效约束系数,按 Mander 模型^[13]计算.试验轴压比 n 、弯剪比 m 、名义剪压比 $V/f_{ck}bh_0$ 、配箍特征值 β_v 的计算式如下所示:

$$n = \frac{N}{f_{ck}A_c} \tag{1}$$

$$m = \frac{M_n}{V_n L_a} \tag{2}$$

$$\frac{V}{f_{ck}bh_0} = \frac{\min(M_n/L_a, V_n)}{f_{ck}bh_0} \tag{3}$$

$$\beta_v = \frac{\rho_v f_y}{f_{ck}} \tag{4}$$

式中: V 为 M_n/L_a 和 V_n 中的较小值; A_c 为柱的全截面面积; M_n 和 V_n 分别为按 2010《混规》6.2 节及 6.3.12 节计算的加载方向柱的抗弯和抗剪承载力,计算时钢筋的强度取试验屈服强度的平均值,混凝土强度取标准值; b 为垂直加载方向柱的截面宽度; h_0 为加载方向柱的有效截面高度; f_y 为箍筋的实测屈服强度平均值; ρ_v 为柱的体积配箍率.

2 RC 柱破坏形态划分

RC 柱的破坏形态通常可分为弯曲破坏、弯剪破坏和剪切破坏^[14],RC 柱的破坏形态不同,其变形能力的影响参数也不一样.为此,在进行 RC 柱的变形性能指标限值研究前,先对 RC 柱的破坏形态划分方法进行研究.分析收集的 469 个 RC 柱试件的破坏形态与试件剪跨比 λ 、试验轴压比 n 、弯剪比 m 、名义剪压比 $V/f_{ck}bh_0$ 、柱的配箍特征值 β_v 、加载方向柱的面积配箍率 ρ_t 的关系,最终确定能够较好区分 RC 柱破坏形态的主要参数有剪跨比 λ 和弯剪比 m .总体上,剪跨比越大,构件越趋向于弯曲破坏,弯剪比越大,构件越趋向于剪切破坏.以剪跨比和弯剪比为参数,提出 RC 柱的破坏形态划分准则,如表 2 所示.

表 2 的划分准则与收集的 469 个 RC 柱试件破坏形态的关系如图 2 所示,详细统计结果如表 3 所示.如表 3 所示,试验发生弯曲破坏的试件 87.15%

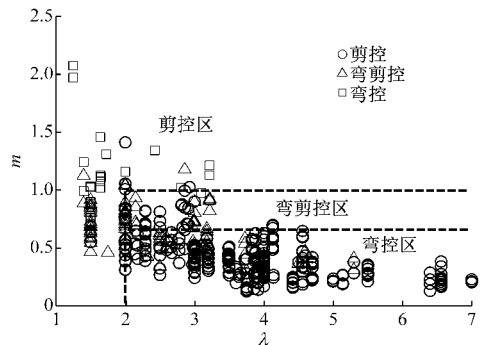


图 2 破坏形态与剪跨比、弯剪比关系

Fig.2 Failure modes influenced by shear span ratio and moment shear ratio

表 1 RC 柱的主要试验参数
Tab.1 Main experimental data of RC columns

试件数量	文献	f_{ck}/MPa	λ	$\rho_t/\%$	n	β_r	$\alpha\beta_r$	m	$V/f_{ck}bh_0$
187	[15]	17.10~76.32	1.37~5.43	0.07~2.17	0~0.93	0.02~0.68	0~0.51	0.13~2.07	0.022~0.175
4	[16]	25.07~27.31	4.32	0.07~0.28	0.09~0.10	0.02~0.06	0~0.04	0.46~0.63	0.033~0.035
8	[17]	10.33~23.37	5.49	0.26~0.62	0.23~0.24	0.18~0.30	0.08~0.18	0.19~0.27	0.035~0.044
2	[18]	22.69~22.94	1.85~2.66	0.13~0.18	0.12~0.21	0.07	0.02~0.03	1.31~1.34	0.083~0.113
9	[19]	34.35~37.32	4.30~4.32	0.37~0.50	0.29~0.44	0.11~0.14	0.07~0.10	0.40~0.46	0.045~0.048
2	[20]	22.80~26.90	3.23	0.38	0.10~0.30	0.09~0.10	0.05~0.06	0.51~0.53	0.055~0.056
4	[21]	22.42~29.87	2.31~3.23	0.71	0.10~0.30	0.16~0.22	0.11~0.15	0.29~0.54	0.036~0.093
5	[22]	22.19~23.33	4.35	0.45~1.12	0.35	0.14~0.36	0.05~0.17	0.25~0.44	0.056~0.058
4	[23]	22.88~29.11	4.19	0.70~0.86	0~0.35	0.17~0.45	0.10~0.30	0.14~0.39	0.029~0.058
4	[24]	21.58~31.24	4.15~4.19	0.34~0.54	0~0.35	0.13~0.29	0.06~0.18	0.25~0.41	0.028~0.082
4	[25]	14.36	3.23~3.24	0.42~0.69	0.13~0.62	0.20~0.27	0.08~0.10	0.36~0.44	0.070~0.080
22	[26]	26.30~50.80	1.61~2.69	0.24~0.47	0.04~0.20	0.06~0.17	0.03~0.08	0.55~0.91	0.046~0.141
24	[27]	41.91	1.54~5.82	0.33~0.66	0.20~0.49	0.06~0.13	0.02~0.06	0.28~1.24	0.030~0.135
4	[28]	44.80~47.20	3.11	1.66~2.98	0.46~0.59	0.31~0.57	0.15~0.39	0.37~0.58	0.114~0.124
9	[29]	56.09~62.19	3.23~3.27	0.34~0.95	0.35~0.51	0.06~0.13	0.03~0.08	0.49~0.90	0.058~0.077
10	[30]	57.89~72.16	4.33	0.55~0.88	0.34~0.45	0.17~0.37	0.11~0.28	0.24~0.34	0.042~0.047
6	[31]	56.68~85.33	2.78	1.14~1.68	0.30~0.54	0.10~0.15	0.07~0.10	0.48~0.58	0.051~0.071
11	[32]	50.98~56.38	3.07~3.40	0.25~0.90	0.32~0.55	0.03~0.11	0.01~0.06	0.68~1.18	0.058~0.080
11	[33]	23.71~46.44	1.60~7.55	0.47~1.35	0.25~0.63	0.08~0.30	0.02~0.14	0.20~1.03	0.028~0.143
10	[34]	57.51~73.80	1.67~2.23	0.39~1.06	0.43~0.65	0.14~0.43	0.10~0.34	0.47~0.90	0.088~0.117
6	[35]	46.14	1.67~4.46	0.75~1.34	0.47	0.18~0.34	0.11~0.23	0.28~0.82	0.047~0.124
4	[36]	67.57	4.31~4.36	1.68~2.68	0.15~0.23	0.25~0.40	0.12~0.25	0.16~0.30	0.032~0.044
5	[37]	53.91~68.61	4.08	0.68~1.35	0.22~0.53	0.12~0.72	0.08~0.44	0.12~0.41	0.039~0.047
12	[38]	51.17~69.62	3.76	0.48~1.65	0.24~0.52	0.05~0.24	0.02~0.14	0.26~0.51	0.035~0.043
4	[39]	19.99~22.50	4.30~4.35	0.29~0.59	0.35	0.17~0.38	0.06~0.26	0.26~0.40	0.057~0.065
2	[40]	44.27	5.01	0.67~0.84	0.17~0.43	0.11~0.14	0.07~0.09	0.36~0.38	0.036~0.043
1	[41]	31.16	1.63	1.00	0.42	0.30	0.20	0.81	0.170
6	[42]	30.48~31.31	3.45	1.42~2.15	0.18~0.50	0.37~0.64	0.24~0.42	0.24~0.36	0.067~0.078
6	[43]	32.07~42.53	3.54	0.67~1.75	0.10~0.24	0.17~0.38	0.03~0.11	0.30~0.50	0.056~0.077
2	[44]	40.63~41.65	1.62	0.60~0.80	0.46~0.47	0.19~0.24	0.11~0.16	0.63~0.73	0.118~0.119
6	[45]	27.44	3.57	0.38~0.75	0.12~0.49	0.16~0.32	0.07~0.21	0.34~0.51	0.059~0.072
2	[46]	28.88	3.91	0.88	0.40~0.60	0.31	0.23	0.25~0.27	0.051~0.055
1	[47]	29.64	2.49	0.88	0.61	0.25	0.19	0.42	0.079
4	[48]	31.16	5.20~5.22	0.40~0.54	0.30~0.41	0.15~0.21	0.05~0.08	0.33~0.42	0.043~0.055
10	[49]	32.60~48.15	4.68~4.69	0.43~0.79	0.06~0.08	0.12~0.26	0.09~0.19	0.15~0.25	0.020~0.040
15	[50]	21.96~24.78	3.41~3.42	0.11~0.32	0.24~0.48	0.04~0.12	0.01~0.04	0.36~0.67	0.045~0.057
1	[51]	56.19	2.38	0.76	0.42	0.11	0.07	0.70	0.075
2	[52]	35.64~42.53	4.36~4.37	0.65	0.03~0.04	0.12~0.15	0.10~0.12	0.27~0.37	0.025~0.039
1	[53]	26.48	2.73	0.90	0.24	0.42	0.30	0.34	0.085
1	[54]	26.48	1.91	0.90	0.24	0.42	0.30	0.46	0.121
1	[55]	37.08	4.00	0.67	0.15	0.17	0.08	0.28	0.035
2	[56]	30.93	3.28	0.34	0.01~0.17	0.07	0.01	0.53~0.72	0.04~0.063
1	[57]	31.31	4.43	0.34	0.32	0.09	0.05	0.60	0.062
10	[58]	42.00	4.69	0.95~1.56	0.38~0.47	0.23~0.38	0.12~0.27	0.48~0.70	0.104~0.109
1	[59]	55.02	2.13	0.50	0.15	0.07	0.03	1.16	0.081
1	[60]	22.95	2.55	0.19	0.58	0.16	0.09	1.05	0.117
22	[7]	27.25	2.52~3.00	0.60~1.10	0.35~0.45	0.17~0.37	0.07~0.20	0.39~0.82	0.083~0.111

表 2 RC 柱的破坏形态划分准则

Tab.2 Failure mode classification of RC columns

破坏形态	剪跨比	弯剪比
弯控	$\lambda \geq 2.0$	$m \leq 0.6$
弯剪控	$\lambda \geq 2.0$	$0.6 < m \leq 1.0$
剪控	$\lambda \geq 2.0$	$m > 1.0$
	$\lambda < 2.0$	—

被划分为弯控,试验发生剪切破坏的试件 84.62%被划分为剪控,试验发生弯剪破坏的试件 35.29%被划分为弯控,37.65%被划分为弯剪控,27.06%被划分为剪控.由此可见,表 2 的 RC 柱破坏形态划分方法合理,对弯曲破坏及剪切破坏 2 种破坏机制截然不同的破坏形态具有较高的判别率.

表 3 RC 柱的破坏形态划分统计结果

Tab.3 Statistical results of failure mode classification of RC columns

试验破坏形态	数量	分类	数量	百分比/%
弯曲破坏	358	弯控	312	87.15
		弯剪控	39	10.89
		剪控	7	1.96
弯剪破坏	85	弯控	30	35.29
		弯剪控	32	37.65
		剪控	23	27.06
剪切破坏	26	弯控	0	0
		弯剪控	4	15.38
		剪控	22	84.62
总数	469		469	

3 RC 柱抗震性能状态划分

我国《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)^[61](以下简称 2010《高规》)将构件的损伤状态划分为 5 个等级:无损坏、轻微损坏、轻度损坏、中度损坏、较严重损坏。其中,具有较为明确物理意义的是“无损坏”及“较严重损坏”状态。对于“无损坏”状态,可以认为在该状态下,构件基本保持弹性,该状态的极限为构件屈服;对于“较严重损坏”状态,2010《高规》附录指出,结构在罕遇地震作用下,满足第五性能水准时,有较严重的损坏,但不至于倒塌或发生危及生命的严重损坏。由于构件的倒塌严重危及生命财产安全,因此可认为“较严重损坏”状态的极限为承载力退化 20%,在该状态下构件未倒塌,仍能承载,未完全失去抗侧力;为方便结构的抗倒塌能力评估,与文献[8]的思路类似,在第 5 个构件损伤状态后增加“严重损坏”状态和“倒塌”状态。其中,构件“严重损坏”状态的极限是构件丧失承载能力(轴向承载能力或侧向承载能力),发生倒塌。

课题组前期研究^[62]发现,塑性位移角能较好地反映构件的破坏程度,为此本文以塑性位移角为变形指标,将 RC 柱的抗震性能状态划分为“无损坏”、“轻微损坏”、“轻度损坏”、“中度损坏”、“较严重损坏”、“严重损坏”及“倒塌”等 7 个等级,并基于构件的力-位移角骨架曲线确定各性能状态的变形限值,如图 3 所示。其中,前 6 个性能状态的极限对应 6 个性能点,“无损坏”、“较严重损坏”及“严重损坏”是构件的 3 个关键性能状态。图 3 中,横坐标为悬臂构件的位移角,纵坐标为构件的侧向力, V_{max} 为峰值承载力, θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 、 θ_5 和 θ_6 分别表示“无损坏”、“轻微损坏”、“轻度损坏”、“中度损坏”、“较严重损坏”、“严重损坏”状态的总位移角限值。“无损坏”状态的位移角

限值定义为名义屈服位移角^[63-64]。

如图 3 所示,经过原点及 $0.7V_{max}$ 点的割线与过峰值承载力 V_{max} 的水平直线相交于一点,从交点处作一竖直线,该竖直线与构件的力-位移角骨架曲线的交点即为名义屈服点,名义屈服点的位移角 θ_1 即为性能点 1 的位移角限值。在该状态下,构件处于基本弹性,受拉纵筋未屈服,产生细微裂缝,裂缝宽度一般不大于 0.5 mm^[14]。“较严重损坏”状态的位移角限值 θ_{sp} 取为承载力退化 20% 的塑性位移角,在该状态下,部分构件纵筋压屈或拉断,箍筋脱钩失效,混凝土保护层压碎严重^[14]。“严重损坏”状态的位移角限值 θ_{sp} 取为试件丧失轴向承载能力点的塑性位移角,若构件在试验过程中未发生丧失轴向承载能力破坏或不承受轴向荷载,则取侧向承载能力下降 50% 点对应的塑性位移角。“轻微损坏”、“轻度损坏”和“中度损坏”的塑性位移角限值分别取为“较严重损坏”塑性位移角限值的 0.25、0.50 和 0.75 倍,相应的破坏现象可参考课题组前期试验研究^[14]。

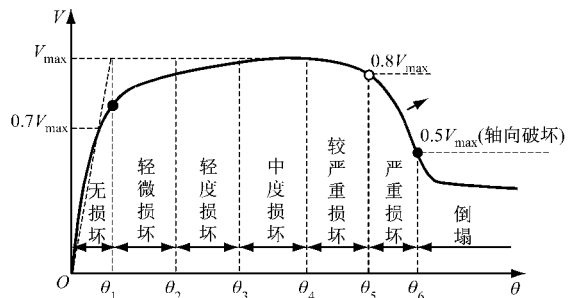


图 3 RC 柱的性能状态及位移角限值

Fig.3 Performance states and drift ratio limits of RC columns

将本文 RC 柱性能状态的划分标准进行总结,如表 4 所示。由表 4 可知,只需根据柱的顶点力-位移角骨架曲线获得“无损坏”、“较严重损坏”及“严重

表 4 RC 柱各性能状态的破坏现象及位移角限值

Tab.4 Failure phenomena and drift ratio limits of performance states of RC columns

性能状态	破坏现象	位移角限值
无损坏	构件基本弹性,纵筋受拉未屈服	θ_1
轻微损坏	混凝土保护层未压碎,受拉纵筋屈服,残余裂缝宽度小于 1 mm ^[14]	$\theta_{2p} = 0.25(\theta_5 - \theta_1)$
轻度损坏	混凝土保护层未剥落,核心区混凝土完好,残余裂缝宽度 1 ~ 2 mm ^[14]	$\theta_{3p} = 0.50(\theta_5 - \theta_1)$
中度损坏	保护层混凝土剥落,未发生明显压屈,残余裂缝宽度超过 2 mm ^[14]	$\theta_{4p} = 0.75(\theta_5 - \theta_1)$
较严重损坏	纵筋压屈,核心区混凝土部分压碎,承载力退化不超过 20%	$\theta_{5p} = \theta_5 - \theta_1$
严重损坏	侧向力严重退化但不倒塌,仍能承重,承载力退化不超过 50%	$\theta_{6p} = \theta_6 - \theta_1$

损坏”3个关键性能状态的总位移角 θ_1 、 θ_5 和 θ_6 ,便可根据表4的方法获得6个性能状态的位移角限值。

4 RC柱的位移角限值

为建立系统的RC柱变形性能指标限值体系,本文采用以下具体步骤:①选定各性能点位移角限值的目标超越概率;②采用多组不同的参数对弯控、弯剪控及剪控RC柱“无损坏”、“较严重损坏”及“严重损坏”3个关键性能状态的位移角限值进行回归分析,选取位移角限值的控制参数及回归公式;③采用易损性分析方法,评估第②步选定的回归公式的超越概率,并对回归公式进行调整,获得具有目标超越概率的回归公式,以调整后的公式初步建立RC柱各性能状态的位移角限值;④采用易损性分析方法,对第③步确定的位移角限值进行评估,若位移角限值的超越概率不大于第①步设定的目标超越概率,则位移角限值满足要求,否则对位移角限值再次进行调整,直到满足要求为止。

4.1 位移角限值超越概率的选取

美国性能评估规范ASCE/SEI 41-13^[65]给出的弯控RC梁、柱的变形指标体系中,塑性变形参数 a 的目标超越概率不大于35%,塑性变形参数 b 的目标超越概率不大于15%。由于塑性变形参数 a 与本文性能点5的塑性变形限值概念相似,塑性变形参数 b 与本文性能点6的塑性变形限值概念相似,因此本文位移角限值的超越概率统一按以下原则选取:①对于性能1(“无损坏”状态)的位移角限值,超越概率不大于35%,即保证率不小于65%;②对于性能5(“较严重损坏”状态)的位移角限值,超越概率不大于35%,即保证率不小于65%;③对于性能6(“严重损坏”状态)的位移角限值,超越概率不大于15%,即保证率不小于85%;④性能2(“轻微损坏”状态)、性能3(“轻度损坏”状态)及性能4(“中度损坏”状态)的位移角限值按本文第3节的原则由性能5的位移角限值三等分得到。

4.2 关键性能点位移角限值的回归分析

根据表4获得的469个RC柱试件“无损坏”、“较严重损坏”及“严重损坏”3个关键性能状态的位移角限值 θ_1 、 θ_{5p} 和 θ_{6p} ,将469个柱试验数据按表3的划分准则分为弯控组、弯剪控组及剪控组,以试验轴压比 n 、弯剪比 m 、名义剪压比 $V/f_{ck}bh_0$ 、柱的配箍特征值 β_v 、柱的有效配箍特征值 $\alpha\beta_v$ 、加载方向柱的

面积配箍率 ρ_t 这6个参数的不同组合,分别建立弯控组、弯剪控组及剪控组RC柱试件 θ_1 、 θ_{5p} 和 θ_{6p} 的回归公式,并从中选取相关性最强的回归公式,用于初步确立RC柱的位移角限值。对于弯控RC柱,以 n 、 $V/f_{ck}bh_0$ 和 $\alpha\beta_v$ 为控制参数;对于弯剪控RC柱,以 n 、 m 和 ρ_t 为控制参数;对于剪控RC柱,以 n 和 ρ_t 为控制参数。最终,弯控、弯剪控及剪控RC柱的回归公式选取如下所示:

(1) 弯控RC柱的位移角限值回归公式

$$\theta_1 = 0.0077 - 0.0059n + 0.0265 \frac{V}{f_{ck}bh_0} + 0.0024\alpha\beta_v \quad (5)$$

$$\theta_{5p} = 0.0279 - 0.0477n + 0.1948 \frac{V}{f_{ck}bh_0} + 0.0587\alpha\beta_v \quad (6)$$

$$\theta_{6p} = 0.0364 - 0.0515n + 0.1529 \frac{V}{f_{ck}bh_0} + 0.0848\alpha\beta_v \quad (7)$$

(2) 弯剪控RC柱的位移角限值回归公式

$$\theta_1 = 0.0083 - 0.0079n + 0.1858\rho_t \quad (8)$$

$$\theta_{5p} = 0.0396 - 0.0497n - 0.0166m + 2.8294\rho_t \quad (9)$$

$$\theta_{6p} = 0.0484 - 0.0585n - 0.0195m + 3.1498\rho_t \quad (10)$$

(3) 剪控RC柱的位移角限值回归公式

$$\theta_1 = 0.0065 - 0.0056n + 0.2463\rho_t \quad (11)$$

$$\theta_{5p} = 0.0115 - 0.0224n + 2.3885\rho_t \quad (12)$$

$$\theta_{6p} = 0.0155 - 0.0266n + 2.9782\rho_t \quad (13)$$

4.3 回归公式的超越概率

采用ATC-58^[66]建议的易损性分析方法,评估回归公式的超越概率,获得具有目标超越概率的回归公式。具体思路是:根据表4,确定469个RC柱试件“无损坏”、“较严重损坏”及“严重损坏”性能状态的试验位移角限值(试验值),并与按4.2节选取的各组位移角限值回归公式计算的变形限值(计算值)作比,建立位移角限值的试验值与计算值比值的累积概率分布曲线,通过累积概率分布和拟合的对数正态分布曲线,可获得回归公式的超越概率。若超越概率与目标超越概率相差较大,则对回归公式进行调整,对调整后的公式进行同样的评估,获得具有目标超越概率的回归公式。

图4为弯控RC柱“无损坏”状态位移角限值回归公式的易损性曲线。由图4可见,按式(5)计算的 θ_1 的超越概率为57.64%(见图4a),调整为0.80倍后超越概率接近目标超越概率的35%(见图4b)。按同样

的方法,可获得其余各组回归公式的超越概率及调整后具有目标超越概率的回归公式,如表 5 所示.

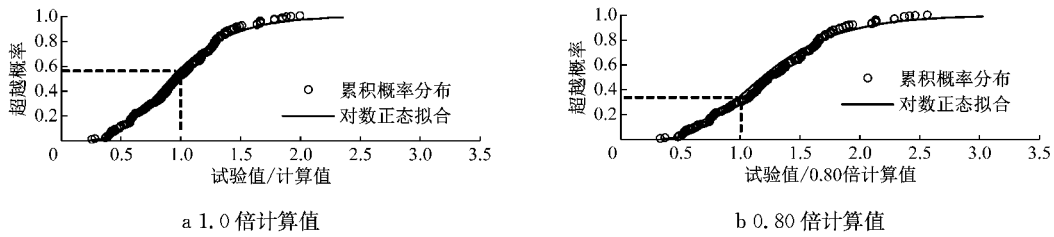


图 4 θ_1 易损性曲线

Fig.4 Fragility curve of θ_1

表 5 不同性能状态下回归公式的超越概率

Tab.5 Failure probability of regression formula at different performance states

分组	不同性能状态下超越概率					
	无损坏		较严重损坏		严重损坏	
弯控组	57.64%(式(5))	35%(0.80倍式(5))	52.44%(式(6))	35%(0.80倍式(6))	55.55%(式(7))	15%(0.70倍式(7))
弯剪控组	58.56%(式(8))	35%(0.83倍式(8))	56.01%(式(9))	35%(0.87倍式(9))	55.93%(式(10))	15%(0.71倍式(10))
剪控组	58.56%(式(11))	35%(0.82倍式(11))	56.01%(式(12))	35%(0.55倍式(12))	55.93%(式(13))	15%(0.55倍式(13))

4.4 RC 柱的位移角限值表

利用表 5 给出的调整后具有目标超越概率的回归公式建立 RC 柱的位移角限值,并进行调整,得到

最终 RC 柱的位移角限值,如表 6~8 所示.表中“无损坏”性能状态的位移角限值为总位移角,其余性能状态的位移角限值为塑性位移角.

表 6 弯控 RC 柱位移角限值

Tab.6 Drift ratio limits of RC columns controlled by flexure

构件参数			不同性能状态下位移角限值					
n	$\alpha\beta_c$	$V/f_{ck}bh_0$	无损坏	轻微损坏	轻度损坏	中度损坏	较严重损坏	严重损坏
≤ 0.1	≥ 0.40	≤ 0.02	0.006	0.008	0.015	0.023	0.030	0.044
≤ 0.1	≥ 0.40	≥ 0.10	0.008	0.014	0.028	0.041	0.055	0.060
≥ 0.6	≥ 0.40	≤ 0.02	0.005	0.006	0.012	0.017	0.023	0.025
≥ 0.6	≥ 0.40	≥ 0.10	0.005	0.006	0.012	0.018	0.024	0.028
≤ 0.1	≤ 0.02	≤ 0.02	0.004	0.006	0.012	0.018	0.024	0.028
≤ 0.1	≤ 0.02	≥ 0.10	0.008	0.010	0.020	0.030	0.040	0.048
≥ 0.6	≤ 0.02	≤ 0.02	0.005	0	0	0	0	0
≥ 0.6	≤ 0.02	≥ 0.10	0.005	0.005	0.009	0.014	0.018	0.022

表 7 弯剪控 RC 柱位移角限值

Tab.7 Drift ratio limits of RC columns controlled by flexure-shear

构件参数			不同性能状态下位移角限值					
n	ρ_t	m	无损坏	轻微损坏	轻度损坏	中度损坏	较严重损坏	严重损坏
≤ 0.1	≥ 0.010	≤ 0.6	0.008	0.009	0.018	0.027	0.036	0.043
≤ 0.1	≥ 0.010	≥ 1.0	0.008	0.008	0.016	0.024	0.032	0.034
≥ 0.6	≥ 0.010	≤ 0.6	0.003	0.004	0.009	0.013	0.017	0.020
≥ 0.6	≥ 0.010	≥ 1.0	0.003	0.005	0.010	0.015	0.020	0.023
≤ 0.1	≤ 0.0005	≤ 0.6	0.006	0.006	0.013	0.019	0.025	0.031
≤ 0.1	≤ 0.0005	≥ 1.0	0.006	0.003	0.007	0.010	0.013	0.016
≥ 0.6	≤ 0.0005	≤ 0.6	0.002	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002
≥ 0.6	≤ 0.0005	≥ 1.0	0.002	0	0	0	0	0

表 8 剪控 RC 柱位移角限值

Tab.8 Drift ratio limits of RC columns controlled by shear

构件参数		不同性能状态下位移角限值						
n	ρ_t	无损坏	轻微损坏	轻度损坏	中度损坏	较严重损坏	严重损坏	
≤ 0.1	≥ 0.008	0.004	0.003	0.005	0.008	0.010	0.015	
≥ 0.6	≥ 0.008	0.004	0.002	0.004	0.006	0.008	0.010	
≤ 0.1	≤ 0.0005	0.003	0.001	0.002	0.003	0.004	0.004	
≥ 0.6	≤ 0.0005	0.003	0	0	0	0	0	

4.5 位移角限值易损性评估

为验证表6~8的合理性,进行指标限值的分组易损性评估,将收集的469个RC柱试验数据按表3的破坏形态,考虑表6~8中控制参数(试验轴压比 n 、柱的有效配箍特征值 $\alpha\beta_v$ 、名义剪压比 $V/f_{ck}bh_0$ 、加载方向柱的面积配箍率 ρ_t 和弯剪比 m)的主要划分区间,划分为多个小组,如表9所示。

表9 RC柱试件分组

Tab.9 Bins of RC columns

大组	小组	参数范围	试件数量
	1	所有弯控试件	342
弯控组	2	$0 \leq n \leq 0.35, \alpha\beta_v \geq 0.2, 0 \leq V/f_{ck}bh_0 \leq 0.06$	17
	3	$0 \leq n \leq 0.35, \alpha\beta_v \geq 0.2, V/f_{ck}bh_0 \geq 0.06$	19
	4	$n \geq 0.35, \alpha\beta_v \geq 0.2, 0 \leq V/f_{ck}bh_0 \leq 0.06$	19
	5	$n \geq 0.35, \alpha\beta_v \geq 0.2, V/f_{ck}bh_0 \geq 0.06$	26
	6	$0 \leq n \leq 0.35, \alpha\beta_v \leq 0.2, 0 \leq V/f_{ck}bh_0 \leq 0.06$	111
	7	$0 \leq n \leq 0.35, \alpha\beta_v \leq 0.2, V/f_{ck}bh_0 \geq 0.06$	29
	8	$0 \leq n \leq 0.35, \alpha\beta_v \leq 0.2, 0 \leq V/f_{ck}bh_0 \leq 0.06$	79
	9	$0 \leq n \leq 0.35, \alpha\beta_v \leq 0.2, V/f_{ck}bh_0 \geq 0.06$	42
		1	所有弯剪控试件
弯剪控组	2	$n \leq 0.35, \rho_t \geq 0.005, m \leq 0.8$	3
	3	$n \leq 0.35, \rho_t \geq 0.005, m \geq 0.8$	4
	4	$n \geq 0.35, \rho_t \geq 0.005, m \leq 0.8$	23
	5	$n \geq 0.35, \rho_t \geq 0.005, m \geq 0.8$	8
	6	$n \leq 0.35, \rho_t \leq 0.005, m \leq 0.8$	15
	7	$n \leq 0.35, \rho_t \leq 0.005, m \geq 0.8$	13
	8	$n \geq 0.35, \rho_t \leq 0.005, m \leq 0.8$	6
	9	$n \geq 0.35, \rho_t \leq 0.005, m \geq 0.8$	3
		1	所有剪控试件
剪控组	2	$n \leq 0.35, \rho_t \geq 0.004$	7
	3	$n \geq 0.35, \rho_t \geq 0.004$	25
	4	$n \leq 0.35, \rho_t \leq 0.004$	14
	5	$n \geq 0.35, \rho_t \leq 0.004$	6

由于本文RC柱“轻微损坏”、“轻度损坏”和“中度损坏”的位移角限值是通过均分法得到的,所以本文只对“无损坏”、“较严重损坏”和“严重损坏”3个关键性能状态的位移角限值进行评估。将收集的469个RC柱试件3个关键性能状态的试验位移角限值与按表6~8计算的位移角限值相比,比值记作“位移角限值冗余度”。其中,位移角限值的准确性通过冗余度的平均值评估,冗余度的平均值越接近1,指标限值越准确;位移角限值的离散性通过冗余度的标准差评估;位移角限值的超越概率通过易损性分析方法建立的冗余度累积分布曲线及拟合对数正态分布曲线进行评估。表9中各组数据位移角限值的评估结果如表10所示。需要注意的是,由于部分分组的试件数量比较小,评估的超越概率可能不够合理,这里为了统一,均一并给出。

由表10得到以下结果:

(1) 弯控组、弯剪控组及剪控组性能状态1位移

角限值的超越概率不高于35%,且均低于30%,满足目标超越概率要求;弯控组、弯剪控组及剪控组性能状态5的塑性位移角限值在全局参数范围内的超越概率分别为26.65%、16.80%和14.47%,小于35%,除个别小组的超越概率略大于35%外,大部分小组的超越概率均低于30%,总体上满足目标超越概率要求;弯控组、弯剪控组及剪控组性能状态6的塑性位移角限值在全局参数范围内的超越概率分别为15.55%、13.70%和10.51%,除个别小组的超越概率略大于15%外,大部分小组的超越概率均低于15%,总体上满足目标超越概率要求。

(2) 弯控组和弯剪控组3个关键性能状态的位移角限值冗余度平均值除个别小组略大于1.5外,总体均在1.5左右,即位移角限值的计算值与试验值的比值在0.67左右($1/1.5=0.67$),说明本文给出的弯控和弯剪控RC柱的位移角限值比较接近试验值,准确性较高;剪控组3个关键性能状态的位移角限值冗余度平均值总体在2.0左右,说明本文给出的剪控RC柱的位移角限值偏安全。

(3) 弯控组和弯剪控组3个关键性能状态位移角限值的冗余度标准差在0.5左右,较小,表明本文给出的弯控和弯剪控RC柱的位移角限值离散性较小。剪控组3个关键性能状态位移角限值的冗余度标准差总体在1.0左右,相对较大。考虑本文剪控RC柱的位移角限值相对保守,且剪控RC柱位移角限值的超越概率均不高于目标超越概率,因此总体上认为本文提出的RC柱位移角限值的离散性在可接受范围内。

4.6 位移角限值试验验证

为进一步验证本文提出的RC柱位移角限值的合理性,本文考虑表2和表6~8主要参数的划分范围,按不同的试件剪跨比(2.5和4.0)、配箍率(0.14%、0.28%、0.39%和0.78%)和试验轴压比(0.17、0.34和0.51)设计了11个悬臂RC柱试件,并对其进行了低周往复加载试验。试件主要发生弯剪或弯曲破坏,试件的基本参数及破坏形态如表11所示,试件的其他详细参数参见文献[14]。

表11中试件编号包含试件剪跨比、配箍率及轴压比信息,如C-2.5-0.14-0.17表示试件剪跨比为2.5,配箍率为0.14%,试验轴压比为0.17,试验轴压比按式 $N/f_{ck}A_c$ 计算。

按表6~8计算11个RC柱3个关键性能状态(性能状态1、性能状态5及性能状态6)的位移角限值(计算值)并与根据试验结果按表4获得的位移角

表 10 RC 柱关键性能点位移角限值评估结果

Tab.10 Evaluation results of drift ratio limits of key performance points

大组	小组	试件数量	超越概率/%			冗余度平均值			冗余度标准差		
			性能状态 1	性能状态 5	性能状态 6	性能状态 1	性能状态 5	性能状态 6	性能状态 1	性能状态 5	性能状态 6
弯控组	1	342	19.38	26.65	15.55	1.52	1.31	1.45	0.59	0.52	0.56
	2	17	16.51	36.35	14.06	1.49	1.21	1.42	0.58	0.45	0.36
	3	19	6.49	2.12	8.25	1.60	1.44	1.43	0.41	0.23	0.31
	4	19	12.51	30.35	14.14	1.58	1.55	1.89	0.55	1.19	1.13
	5	26	26.11	17.45	14.68	1.45	1.48	1.61	0.67	0.53	0.68
	6	111	22.11	25.50	12.16	1.50	1.28	1.37	0.63	0.38	0.34
	7	29	22.27	26.34	9.54	1.51	1.21	1.40	0.56	0.31	0.33
	8	79	25.03	34.05	21.34	1.41	1.24	1.44	0.58	0.56	0.68
	9	42	5.00	22.08	14.93	1.74	1.34	1.43	0.53	0.50	0.51
弯剪控组	1	75	17.41	16.80	13.70	1.47	1.37	1.41	0.56	0.40	0.40
	2	3	20.41	1.45	3.23	1.84	1.29	1.47	0.90	0.15	0.28
	3	4	10.24	18.36	18.66	1.27	1.29	1.26	0.22	0.36	0.31
	4	23	14.46	19.36	13.99	1.63	1.37	1.45	0.65	0.42	0.41
	5	8	17.52	5.47	12.69	1.35	1.73	1.67	0.37	0.51	0.61
	6	15	16.31	8.43	10.62	1.14	1.40	1.32	0.14	0.32	0.28
	7	13	8.58	22.33	14.05	1.79	1.31	1.44	0.66	0.41	0.45
	8	6	22.89	43.39	25.78	1.19	1.05	1.14	0.26	0.19	0.19
	9	3	22.22	13.46	6.70	1.22	1.30	1.46	0.29	0.27	0.33
剪控组	1	52	6.05	14.47	10.51	1.93	1.93	1.96	0.80	1.15	0.99
	2	7	0.68	11.85	5.45	2.42	2.57	2.25	0.77	1.76	1.05
	3	25	6.55	12.82	10.50	1.90	2.02	2.12	0.88	1.23	1.19
	4	14	1.74	16.45	10.28	1.91	1.66	1.70	0.56	0.65	0.59
	5	6	26.44	20.68	17.79	1.49	1.44	1.51	0.80	0.57	0.62

表 11 RC 柱试件主要参数

Tab.11 Main parameters of RC column specimen

试件编号	混凝土等级	$V/f_{ck}bh_0$	$\alpha\beta_r$	破坏形态
C-2.5-0.14-0.17	C35	0.073 0	0.031 8	弯剪
C-2.5-0.39-0.17	C35	0.073 0	0.088 2	弯剪
C-2.5-0.14-0.34	C35	0.084 4	0.031 8	弯剪
C-2.5-0.39-0.34	C35	0.086 0	0.088 2	弯剪
C-2.5-0.14-0.51	C35	0.092 2	0.088 2	弯剪
C-4.0-0.28-0.17	C35	0.055 7	0.159 9	弯曲
C-4.0-0.78-0.17	C35	0.064 0	0.057 7	弯曲
C-4.0-0.28-0.34	C35	0.064 0	0.159 9	弯剪
C-4.0-0.78-0.34	C35	0.066 6	0.057 7	弯曲
C-4.0-0.28-0.51	C35	0.066 6	0.159 9	弯剪
C-4.0-0.78-0.51	C35	0.073 0	0.031 8	弯曲

限值(试验值)进行对比,结果如图 5 所示,详细统计结果如表 12 所示.表 12 中下标“test”表示位移角限值的试验值,下标“table”表示位移角限值的计算值.

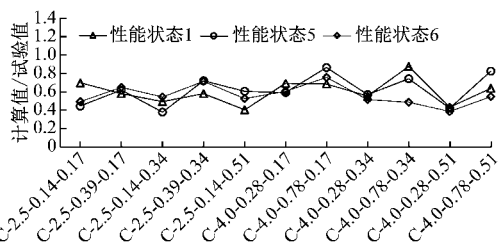


图 5 RC 柱关键性能状态位移角限值计算值与试验值的比值
Fig.5 Ratio of calculated value to test value of RC column drift ratio limits at key performance states

由图 5 和表 12 可见, $\theta_{1-table}/\theta_{1-test}$ 、 $\theta_{5-table}/\theta_{5-test}$ 及 $\theta_{6-table}/\theta_{6-test}$ 的平均值分别为 0.60、0.62 和 0.57,接近于 1 且小于 1, $\theta_{1-table}/\theta_{1-test}$ 、 $\theta_{5-table}/\theta_{5-test}$ 及 $\theta_{6-table}/\theta_{6-test}$ 的标准差较小,分别为 0.13、0.16 及 0.11,即本文指标给出的 RC 柱 3 个关键性能状态的位移角限值较接近于真实值,离散性较小且偏于安全.

表 12 位移角计算值与试验值比值的统计结果

Tab.12 Statistical results of ratio of calculated drift ratio limits to test drift ratio limits

项目	$\theta_{1-table}/\theta_{1-test}$	$\theta_{5-table}/\theta_{5-test}$	$\theta_{6-table}/\theta_{6-test}$
最大值	0.87	0.86	0.76
最小值	0.41	0.38	0.39
平均值	0.60	0.62	0.57
标准差	0.13	0.16	0.11

5 结论

(1) 提出以剪跨比和弯剪比为参数的 RC 柱破坏形态划分方法,该方法判别弯曲破坏及剪切破坏的准确率分别为 87.15%和 84.62%.

(2) 将 RC 柱的抗震性能划分为“无损坏”、“轻微损坏”、“轻度损坏”、“中度损坏”、“较严重损坏”、“严重损坏”及“倒塌”等 7 个状态,并基于构件的力-位移角骨架曲线的 3 个关键性能点(屈服点、承载力退化 20%点及丧失承载能力点),提出 RC 柱各性能点位移角限值的统一确定方法.

(3) 以轴压比、名义剪压比及有效配箍特征值为控制参数给出弯控 RC 柱的位移角限值,以轴压比、弯剪比及配箍率为控制参数给出弯剪控 RC 柱的位移角限值,以轴压比及配箍率为控制参数给出剪控 RC 柱的位移角限值,并采用 ATC-58 建议的易损性分析方法,对给出的位移角限值进行评估。结果表明,“无损坏”、“较严重损坏”及“严重损坏”3 个关键性能状态位移角限值的超越概率总体上分别不大于 30%、30% 及 15%,且位移角限值的准确性和离散性均在合理范围内。

(4) 通过开展的 11 个 RC 柱的拟静力试验,对本文提出的 RC 柱位移角限值进行验证,结果表明本文给出的“无损坏”、“较严重损坏”及“严重损坏”3 个关键性能状态的 RC 柱位移角限值计算值与试验值的比值平均在 0.60 左右,且离散性较小。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010. Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [2] SASANI M. Shear strength and deformation capacity models for RC columns[C]//Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, [s. n.], 2004.
- [3] 蒋欢军,王斌,吕西林. 钢筋混凝土梁和柱性能界限状态及其变形限值[J]. 建筑结构,2010,40(1):10. JIANG Huanjun, WANG Bin, LÜ Xilin. Performance limit states and deformation limits of RC beams and columns[J]. Building Structure, 2010, 40(1):10.
- [4] ERGUNER K. Analytical examination of performance limits for shear critical reinforced concrete columns[D]. Aakara: Middle East Technical University, 2009.
- [5] 熊朝晖,潘德恩. 钢筋混凝土框架柱侧向变形能力的研究[J]. 地震工程与工程振动,2001,21(2):103. XIONG Chaohui, PAN De'en. Study on lateral deformability of reinforced concrete frame columns [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(2): 103.
- [6] 蒋欢军,吕西林. 钢筋混凝土柱对应于各地震损伤状态的侧向变形计算[J]. 地震工程与工程振动,2008,28(2):44. JIANG Huanjun, LÜ Xilin. Lateral displacement estimation for RC columns in different seismic damage states[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(2): 44.
- [7] 关柱良. CRB550 级钢筋约束混凝土柱抗震性能研究[D]. 广州:华南理工大学,2011. GUAN Zhuliang. Seismic behavior of concrete columns with CRB550 stirrups[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [8] 钱稼茹,冯宝锐. 钢筋混凝土柱弯矩-转角骨架线特征点及性能点转角研究[J]. 建筑结构学报,2014,35(11):10. QIAN Jiaru, FENG Baorui. Study on rotation angles at characteristic point and performance point of $M-\theta$ skeleton curve for RC columns[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(11): 10.
- [9] TELEMACHOS B, PANAGIOTAKOS M N F. Deformations of reinforced concrete members at yielding and ultimate[J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(2): 135.
- [10] BISKINIS D, FARDIS M N. Deformations at flexural yielding of members with continuous or lap-spliced bars[J]. Structural Concrete, 2010, 11(3): 127.
- [11] BISKINIS D, FARDIS M. Flexure-controlled ultimate deformations of members with continuous or lap-spliced bars [J]. Structural Concrete, 2010, 11(2): 93.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010. Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. GB 50010—2010 Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [13] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. Journal of Structural Division, ASCE, 1988, 114(8): 1804.
- [14] 龚涣钧. RC 梁、柱构件变形性能指标限值试验研究[D]. 广州:华南理工大学,2016. GONG Huanjun. Experimental research on deformation limits of RC beam and column [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [15] BERRY M, PARRISH M, EBERHARD M. PEER structural performance database user's manual[R]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center of University of California, 2004.
- [16] ONGSUPANKUL S, KANCHANALAI T, KAWASHIMA K. Behavior of reinforced concrete bridge pier columns subjected to moderate seismic load[J]. Science Asia, 2007, 33(2): 175.
- [17] ACUN B. Energy based seismic performance assessment of reinforced concrete columns [D]. Ankara: Middle East Technical University, 2010.
- [18] LI B, PHAM T P. Seismic behaviour of RC columns with light transverse reinforcement under different loading directions[J]. ACI Structural Journal, 2013, 110(5): 833.
- [19] 钱稼茹,冯宝锐. 不同抗震等级钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2014,35(7):105. QIAN Jiaru, FENG Baorui. Experimental study on seismic behavior of different seismic grade RC columns[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(7): 105.
- [20] 张和平. 钢筋混凝土柱抗震性能试验及优化模拟分析[D]. 重庆:重庆大学,2012. ZHANG Heping. Experiment and optimized modeling on seismic performance of RC column[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [21] 李杨. 钢筋混凝土柱非线性变形分解试验及模拟[D]. 重庆:重庆大学,2010. LI Yang. A simulation and test of nonlinear deformation decomposition in reinforced concrete columns [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [22] 刘承文. 箍筋约束对钢筋混凝土柱抗震性能影响的试验研究 [D]. 重庆:重庆大学,2010. LIU Chengwen. Experimental studies on the effect of hoops on seismic behavior of reinforced concrete columns [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [23] 姚雷. 钢筋延性对柱抗震性能影响的试验研究[D]. 重庆:重

- 庆大学, 2011.
- YAO Lei. Experimental studies on the effect of ductility properties of reinforcing steel on seismic behavior of columns [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [24] 黄扬. 钢筋屈曲对柱抗震性能影响的试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- HUANG Yang. Experimental studies on the effect of buckling of reinforcing steel on seismic behavior of columns [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [25] 舒平. 钢筋混凝土框架柱抗震性能试验研究及数值模拟分析 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
- SHU Ping. Experimental study and numerical simulation on seismic performance of reinforced concrete frame columns[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010.
- [26] 孙治国, 司炳君, 王东升, 等. 高强箍筋高强混凝土柱抗震性能研究[J]. 工程力学, 2010, 27(5): 128.
- SUN Zhiguo, SI Bingjun, WANG Dongsheng, *et al.* Research on the seismic performance of high-strength concrete columns with high-strength stirrups[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(5): 128.
- [27] 马颖. 钢筋混凝土柱地震破坏方式及性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- MA Ying. Study on failure modes and seismic behavior of reinforced concrete columns[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [28] 李远瑛, 张德生. 高轴压比高强混凝土柱抗震性能试验研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(1): 172.
- LI Yuanying, ZHANG Desheng. Test study on seismic performance of high axial compression ratio and high-strength concrete columns[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 34(1): 172.
- [29] 王晓锋. 配置高强钢筋混凝土框架柱抗震性能研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2013.
- WANG Xiaofeng. Study on seismic behavior of concrete frame columns with high-yield-strength rebars[D]. Beijing: China Academy of Building Research, 2013.
- [30] 史庆轩, 杨坤, 白力更, 等. 高强箍筋约束高强混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(12): 9.
- SHI Qingxuan, YANG Kun, BAI Ligeng, *et al.* Experiments on seismic behavior of high-strength concrete columns confined with high-strength stirrups [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(12): 9.
- [31] 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.
- LÜ Xilin, ZHANG Guojun, CHEN Shaolin. 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.
- [32] 叶列平, 丁大钧, 程文灏. 高强砼框架柱抗震性能的试验研究 [J]. 建筑结构学报, 1992, 13(4): 41.
- YE Lieping, DING Dajun, CHENG Wenrang. Experimental research on earthquake resistance behavior of high-strength concrete frame columns[J]. Journal of Building Structures, 1992, 13(4): 41.
- [33] 张国军. 大型火力发电厂高强混凝土框架柱的抗震性能研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003.
- ZHANG Guojun. Research on seismic behavior of high strength reinforced concrete frame columns in large-scale thermal power plants[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2003.
- [34] 史庆轩, 杨文星, 王秋维, 等. 高强箍筋高强混凝土短柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(9): 49.
- SHI Qingxuan, YANG Wenxing, WANG Qiuwei, *et al.* Experimental research on seismic behavior of high-strength concrete short columns with high-strength stirrups[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(9): 49.
- [35] 史庆轩, 王朋, 田园, 等. 高强箍筋约束高强混凝土短柱抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(8): 1.
- SHI Qingxuan, WANG Peng, TIAN Yuan, *et al.* Experimental study on seismic behavior of high-strength concrete short columns confined with high-strength stirrups[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(8): 1.
- [36] 窦志明. 高强混凝土柱的抗震性能研究[D]. 广州: 广州大学, 2012.
- DOU Zhiming. Research on seismic performance of high-strength concrete column [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2012.
- [37] 陈鑫. 配有高强钢筋高强混凝土框架结构抗震性能试验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- CHEN Xin. Experimental study on seismic performance of high-strength concrete frame structure reinforced with high-strength rebars [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [38] 张志远, 蔡绍怀, 顾维平. 高强混凝土柱抗震性能与配箍率关系的试验研究[J]. 建筑科学, 1993(1): 12.
- ZHANG Zhiyuan, CAI Shaohuai, GU Weiping. Influence of volumetric ratio of stirrup on a seismic behavior of high strength concrete columns[J]. Building Science, 1993(1): 12.
- [39] 邓艳青. HRB500 钢筋混凝土柱的抗震性能试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- DENG Yanqing. Experimental studies on seismic behavior of HRB500 RC columns[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [40] 王建. 套筒浆锚连接钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
- WANG Jian. Experimental research on seismic behavior of reinforced concrete columns assembled by grout-filled sleeve and mechanical connection [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013.
- [41] 尹齐. 低周往复荷载作用下混凝土短柱抗剪性能试验研究 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2014.
- YIN Qi. Experimental study on shear resistance of concrete short columns under low cyclic loading [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2014.
- [42] 郭子雄, 吕西林. 低周反复荷载下高轴压比 RC 框架柱的研究 [J]. 建筑结构, 1999(4): 19.
- GUO Zixiong, LÜ Xilin. Research on RC frame columns with high axial compression ratios under low cyclic loading [J]. Building Structure, 1999(4): 19.
- [43] 刘金升, 苏小卒, 赵勇. 配 500 MPa 细晶钢筋混凝土柱低周反复荷载试验[J]. 结构工程师, 2009, 25(3): 135.
- LIU Jinsheng, SU Xiaozu, ZHAO Yong. Experiment on concrete columns reinforced with 500 MPa fine-grained rebar under low cycle reversed loading[J]. Structural Engineers, 2009, 25(3): 135.
- [44] 刘伟. 钢筋混凝土构造配筋短柱抗震性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- LIU Wei. Seismic behavior of reinforced concrete short

- columns with minimum reinforcements [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [45] 梁书亭,丁大钧,陆勤. 钢筋混凝土复合配箍柱铰的延性和抗震耗能试验研究[J]. 工业建筑, 1994(11): 16.
LIANG Shuting, DING Dajun, LU Qin. Experimental study of earthquake-resistant energy-dissipation and ductility of reinforced concrete column hinge with composite stirrups[J]. Industrial Construction, 1994(11): 16.
- [46] 解咏平,贾磊. 高轴压比钢筋混凝土柱受力性能试验研究[J]. 建筑结构, 2014, 44(15): 61.
XIE Yongping, JIA Lei. Experiment study on the mechanical performance of reinforced concrete columns under high axial compression ratio[J]. Building Structure, 2014, 44(15): 61.
- [47] 解咏平,李振宝,杜修力,等. 高轴压比足尺钢筋混凝土短柱抗震性能研究[J]. 世界地震工程, 2014, 30(2): 148.
XIE Yongping, LI Zhenbao, DU Xiuli, *et al.* Seismic behavior of full-scale reinforced concrete short columns with high axial compression ratio[J]. World Earthquake Engineering, 2014, 30(2): 148.
- [48] 葛文杰,张继文,曹大富,等. HRBF500级钢筋混凝土柱抗震性能研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2014, 36(2): 112.
GE Wenjie, ZHANG Jiwen, CAO Dafu, *et al.* Study on the seismic behaviour of HRBF500 RC columns[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2014, 36(2): 112.
- [49] 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.
SU Junsheng, WANG Junjie, WANG Wenbiao, *et al.* Comparative experimental research on seismic performance of rectangular concrete columns reinforced with high strength steel[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(11): 20.
- [50] 白雪霜,王亚勇,戴国莹. 不同构造条件下钢筋混凝土框架柱抗震性能试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2012, 34(3): 76.
BAI Xueshuang, WANG Yayong, DAI Guoying. Experimental research on seismic behavior of reinforced concrete columns with different details[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2012, 34(3): 76.
- [51] 李惠,王震宇,吴波. 钢管高强混凝土叠合柱抗震性能与受力机理的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 1999, 19(3): 27.
LI Hui, WANG Zhenyu, WU Bo. Experimental research on mechanism and seismic performance of laminated column with steel tube filled with high-strength concrete[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1999, 19(3): 27.
- [52] 何世钦,安雪晖,OBARA T,等. 配置夹式钢筋的钢筋混凝土柱抗震性能试验[J]. 中国公路学报, 2008, 21(4): 43.
HE Shiqin, AN Xuehui, OBARA T, *et al.* Experiment on anti-seismic performance of reinforced concrete columns with clip reinforcement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(4): 43.
- [53] 尹海鹏,曹万林,张亚齐,等. 不同配筋率的再生混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 震灾防御技术, 2010, 5(1): 99.
YIN Haipeng, CAO Wanlin, ZHANG Yaqi, *et al.* An experimental study on the seismic behavior of recycled concrete columns with different reinforcement ratio[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2010, 5(1): 99.
- [54] 张亚齐. 不同配箍率再生混凝土短柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(增1): 272.
ZHANG Yaqi. Experimental study on the seismic behavior of recycled concrete short columns with different stirrup ratios [J]. Building Structure, 2011, 41(S1): 272.
- [55] 白国良,刘超,赵洪金,等. 再生混凝土框架柱抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程震动, 2011, 31(1): 61.
BAI Guoliang, LIU Chao, ZHAO Hongjin, *et al.* Experimental research on seismic behavior of recycled concrete frame columns [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(1): 61.
- [56] 卢锦. 再生混凝土受压构件滞回性能试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
LU Jin. An experimental research on hysteretic behavior of recycled concrete compression member[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [57] 彭有开,吴徽,高全臣. 再生混凝土长柱的抗震性能试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(3): 576.
PENG Youkai, WU Hui, GAO Quanchen. Experimental study on seismic behavior of recycled concrete slender columns[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2013, 43(3): 576.
- [58] 张诚紫. 高轴压比下BCHSS高强混凝土柱抗震性能试验研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2014.
ZHANG Chengzi. Test study on seismic behavior of high strength concrete columns with butt-welded closed composite high strength stirrups under high axial compression ratios [D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2014.
- [59] 邓明科,张辉,梁兴文,等. 高延性纤维混凝土短柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(12): 62.
DENG Mingke, ZHANG Hui, LIANG Xingwen, *et al.* Experimental study on seismic behavior of high ductile fiber reinforced concrete short column [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(12): 62.
- [60] 安康. 内藏预制高强钢管混凝土芯柱组合柱抗震性能试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
AN Kang. Experimental study on seismic performance of composite column with embedded precast high-strength concrete filled steel tube core column [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2012.
- [61] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 3—2010 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. JGJ 3—2010 Technical specification for concrete structures of tall building [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [62] 戚永乐. 基于材料应变的RC梁、柱及剪力墙构件抗震性能指标限值研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
QI Yongle. Research on deformation limits of RC beams, columns and shear walls based on material strain [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [63] SEZEN H, MOEHLE J P. Shear strength model for lightly reinforced concrete columns [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(11): 1692.
- [64] GHANNOUM W M, MATAMOROS A B. Nonlinear modeling parameters and acceptance criteria for concrete columns[J]. ACI Special Publication, 2014, SP-297(1): 1.
- [65] American Society of Civil Engineers. ASCE/SEI 41-13 Seismic evaluation and retrofit of existing buildings [S]. Reston: American Society of Civil Engineers, 2014.
- [66] Applied Technology Council. FEMA P-58 Next-generation seismic performance assessment for buildings, Volume 1: methodology [R]. Washington DC: Federal Emergency Management Agency, 2012.