

The Influence of Axial Compression Ratio on the Seismic Behavior of RC Frame Column

Liu Yang, Gong Maosheng*, Zuo Zhanxuan

Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin, China

Email address:

1507879615@qq.com (Liu Yang), gmshiem@163.com (Gong Maosheng), zuozhanxuan@sina.com (Zuo Zhanxuan)

*Corresponding author

To cite this article:

Liu Yang, Gong Maosheng, Zuo Zhanxuan. The Influence of Axial Compression Ratio on the Seismic Behavior of RC Frame Column. *Science Discovery*. Vol. 9, No. 4, 2021, pp. 178-183. doi: 10.11648/j.sd.20210904.18

Received: April 27, 2021; Accepted: June 6, 2021; Published: June 9, 2021

Abstract: In order to analyze the quantitative influence of the axial compression ratio on the seismic performance of reinforced concrete (RC) frame column, this paper carried out the numerical analysis of the quasi-static simulation of a RC frame column and analyzed its hysteresis performance, bearing capacity, stiffness degradation, energy consumption capacity and ductility capacity under different axial compression ratios, based on OpenSees finite element software, considering the buckling and fatigue damage model. The results show that the smaller the axial compression ratio, the fuller the hysteresis curve and the slower the stiffness degradation of the column. The ultimate bearing capacity of the column increases by 24.6% when the axial compression ratio increases from 0.3 to 0.8, but bearing capacity decreasing and stiffness degradation is faster and faster. When the deformation does not exceed the ultimate displacement, the equivalent viscous damping at each displacement level of high axial compression ratio column is greater than that of the low axial compression ratio, but the total hysteretic energy decreases about 64.2% at maximum amplitude. The ultimate displacement gradually decreases with the increase in the axial compression ratio, and the ductility factor decreases about 55.9% at maximum amplitude. The results can be referenced by the seismic design and analysis of RC frame.

Keywords: Reinforced Concrete Column, Axial Compression Ratio, Seismic Behavior, Quasi-static Simulation, Constitutive Model

轴压比对RC框架柱抗震性能影响研究

刘洋, 公茂盛*, 左占宣

地震工程与工程振动重点实验室, 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨, 中国

邮箱

1507879615@qq.com (刘洋), gmshiem@163.com (公茂盛), zuozhanxuan@sina.com (左占宣)

摘要: 为了分析轴压比对钢筋混凝土(RC)框架柱抗震性能的定量影响, 本文基于OpenSees有限元软件建模, 采用考虑屈曲和疲劳损伤的模型, 对某RC框架结构柱进行了拟静力数值模拟, 分析了不同轴压比下柱的滞回性能、承载能力、刚度退化、耗能能力以及延性能力。分析结果表明: 轴压比越小, 柱的滞回曲线更饱满, 刚度退化越慢; 当轴压比从0.3增大到0.8时, 柱极限承载力增大24.6%, 但承载力下降和刚度退化的越来越快; 在未超过极限变形时, 高轴压比下柱单圈等效粘滞阻尼比更大, 但总累积耗能最大降低64.2%; 随着轴压比不断增大, 柱极限位移逐渐降低, 延性系数最大降低55.9%。结果可供RC框架结构抗震设计及分析等参考。

关键词：框架柱，轴压比，抗震性能，拟静力模拟，本构模型

1. 引言

国内外历次大地震震害经验表明，建筑结构倒塌是造成经济损失和人员伤亡的最主要原因。钢筋混凝土（RC）框架结构在世界范围内应用广泛，在多次地震中也发生了严重破坏甚至倒塌，RC框架结构发生严重破坏的原因之一是作为主要承重构件的框架柱变形和耗能能力不足，导致框架柱在地震荷载下发生破坏。

针对RC框架结构抗震性能及抗倒塌能力，国内外学者开展了广泛的研究。陆新征等[1]为研究汶川地震中RC框架结构地震破坏机理，开展了RC框架整体结构、节点及轴压比不同的边柱和中柱的拟静力倒塌试验，并将试验结果进行了公开，为检验结构及构件数值模拟分析方法提供了基础。Yao等[2]研究轴压比的增大对超高强钢筋混凝土框架结构抗震性能的影响。观察到随着轴压比从0.5增大到0.75和0.9，框架柱破坏模式从弯曲破坏变为弯曲粘结破坏，并进一步扩展为弯曲劈裂破坏。轴压比不断增大，伴随着强度、刚度和耗能能力的变化，框架结构的抗震性能降低。

白巨巨等[3]研究不同轴压比RC柱—钢梁组合件抗震性能，得出在一定范围内，提高轴压比可以增大组合件承载力，在高轴压比下，承载力略微降低。轴压比不断增大，组合件等效黏滞系数总体呈增大趋势。蔡健等[4]分析轴压比对组合剪力墙抗震性能的影响，完成了5个缩尺模型试件的拟静力试验。发现轴压比为0.3~0.9的范围内，试件承载力随轴压比的增大而提高，但高轴压比时其变形和滞回能力有所降低。

冯宝锐[5]对9根轴压比分别为0.69、0.89、0.97、1.05等的RC框架柱进行了抗震性能试验研究，建立了框架柱在地震作用下抗震性能点及损伤状态特征点与弹塑性转角的关系，为判别柱的损伤状态提供了参考依据。得出抗震等级相同的RC框架柱试件，轴压比高的框架柱的破坏程度比轴压比低的框架柱的破坏程度严重的结论。

Sun等[6]对玻璃纤维聚合物增强RC柱进行拟静力试验，将轴压比从0.3增大到0.45，再增大到0.6。柱的破坏模式从弯剪破坏变为弯曲破坏，轴压比大于0.45为弯曲破坏。柱极限承载力分别增加8.42%和21.49%，极限变形分别减少5.56%和11.76%，累积耗能分别降低43.56%和7.79%。

Liu等[7]使用有限元软件ABAQUS对纤维增强RC柱进行数值建模，将轴压比为0.15、0.25的柱模拟结果与试验现象进行对比验证，将为轴压比0.2、0.3、0.4、0.5的柱模拟结果进行对比分析。得出到达屈服荷载之前，构件的刚度退化率和耗能能力基本相同。到达屈服荷载后，随着轴压比增大，刚度退化率逐渐增大，耗能能力逐渐减小，累积耗能分别减少40.84%、59.16%和67.18%。

张静等[8]通过5根轴压比0.3~0.65的再生混凝土框架柱的抗震性能试验，得出在剪跨比、配箍率等条件一致的情况下，随着轴压比增加，试件的滞回曲线更加扁平，极

限承载力、延性和滞回耗能不断减小。林颖等[9]以实际10.5m高桥墩为例，通过OpenSees建立有限元模型，得出轴压比在0.1~0.3范围内，随轴压比增大，桥墩承载力不断增大，累计耗能最大降低41.2%，位移和延性显著减小。

Ou等[10]根据FEMA 461[11]推荐的拟静力试验加载制度，研究了考虑长持时和短持时地震动作用下的荷载加载制度，并对某桥墩开展了试验分析，结果表明桥墩纵筋的屈曲现象应该在分析中有所考虑。杨红等[12-13]考虑屈曲效应对不同轴压比的RC柱抗震性能的影响，通过改进低周疲劳损伤模型，更加精确地预测了柱纵筋的屈曲，得出屈曲的存在以及大应变幅疲劳损伤会加剧钢筋断裂破坏。

轴压比大小会直接影响混凝土柱的抗震性能，定量研究轴压比对柱的滞回性能和延性能力等在结构设计中具有重要意义。为了全面考虑轴压比对RC框架柱抗震性能的影响，本文以某实际RC框架柱为例，基于拟静力数值模拟方法，采用考虑屈曲和疲劳损伤的模型。通过比较RC框架柱的滞回曲线、骨架曲线、刚度退化、耗能性能以及延性等的影响，重点分析了轴压比对RC框架柱抗震性能影响。

2. RC框架柱基本设计参数

本文分析的RC框架柱选自某实际3层框架结构，该结构为7度抗震设防，抗震等级为三级，柱截面尺寸为450mm×450mm。考虑到柱的反弯点处弯矩为零，因此本文拟静力数值模拟中进行了简化，只取半柱进行了建模分析，即柱的计算高度为1.6m。该RC框架柱纵筋及箍筋均采用HRB400三级钢筋，靠近基础的柱底部箍筋加密区为500mm，底梁箍筋间距150mm，柱纵筋配筋率为1.24%，柱面积配箍率0.224%，体积配箍率0.6%。混凝土强度等级为C30，混凝土保护层厚度为25mm。框架柱的尺寸及配筋情况如图1所示。

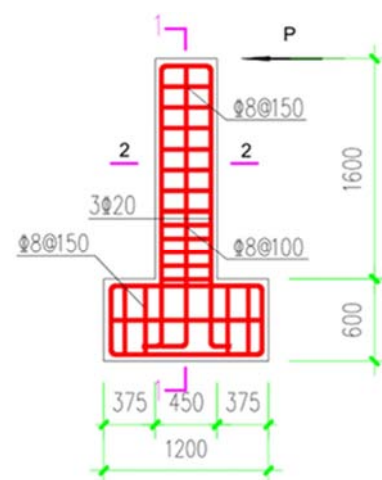


图1 框架柱配筋示意图（单位：mm）。

本文建模中钢筋本构控制参数取张耀庭等[14]单调拉伸及低周疲劳性能试验中测得的HRB400钢筋数据，初始弹性模量 $E_s = 2 \times 10^5 \text{Mpa}$ ，初始硬化弹性模量

$E_{sh} = 6600 \text{Mpa}$ 。钢筋及混凝土的力学性能指标分别如表1和表2所示。

表1 钢筋力学性能指标。

钢筋型号	d (mm)	f_y (MPa)	f_{su} (MPa)	ε_{sh}	ε_{su}
纵筋HRB400	20	452	639	0.0164	0.134
箍筋HRB400	8	452	639	0.0164	0.134

表1中， f_y 为屈服强度， f_{su} 为极限强度， ε_{sh} 为初始硬化应变， ε_{su} 为极限应变。

表2 混凝土力学性能指标。

混凝土	$f_{cu,k}$ (MPa)	f_{cm} (MPa)	f_c (MPa)	f_t (MPa)
C30	30	27	14.3	4

表2中， $f_{cu,k}$ 为混凝土立方体抗压强度， f_{cm} 为混凝土轴心抗压强度， f_c 为混凝土棱柱体抗压强度设计值， f_t 为混凝土抗拉强度。

3. RC框架柱建模及本构关系选取

针对上述混凝土柱，采用OpenSees有限元分析软件进行了建模，开展了拟静力数值模拟分析。建模分析时，在对钢筋和混凝土材料本构进行对比分析后，本文钢筋本构关系采用Reinforcing steel本构模型。Reinforcing steel本构是较为精确的钢筋力学特性模拟模型，钢筋本构曲线分四段描述，分别为线弹性阶段、屈服阶段、硬化阶段以及最后的软化阶段。该模型单调应力-应变本构如图2所示。

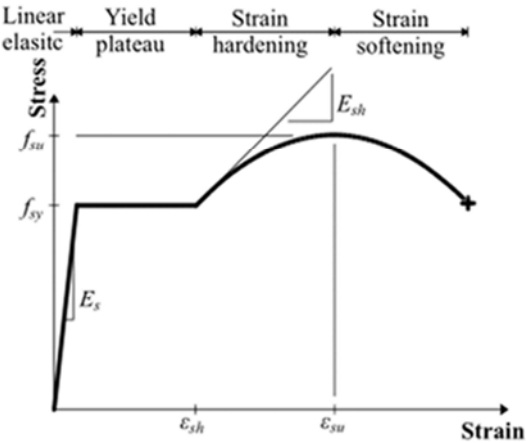


图2 Reinforcing steel单调应力-应变本构。

Reinforcing steel中使用的疲劳-寿命方程[15]如公式（1）所示：

$$\varepsilon_p = C_f (2N_f)^{-\alpha} \tag{1}$$

其中， ε_p 为应变幅值， C_f 为由疲劳测试决定的材料常数， $2N_f$ 为失效前的半循环次数， α 为疲劳指数， C_f 越小，破坏前的循环次数越少。

Reinforcing steel中使用的强度退化方程如公式（2）所示：

$$\varepsilon^P = C_d (f_p)^{-\beta} \tag{2}$$

其中， f_p 为应变为 ε^P 时测得每一循环的强度降低系数， β 和 C_d 为材料系数， C_d 越小，强度退化越大。

文中取张耀庭等[14]通过试验得到的疲劳损伤参数 $C_f=0.140$ 、 $C_d=0.379$ 、 $\alpha=0.379$ 。根据Opensees官网资料[16]，本文取屈曲模型参数 $\beta=1.0$ 、 $\gamma=0.5$ 、 $r=0.4$ ，其中 β 为屈曲应力应变曲线的放大系数，不考虑屈曲时放大系数无影响。 $r(0<r<1)$ 用于定义钢筋屈曲的程度， $r=1$ 表示不考虑屈曲的影响， $r=0$ 其结果接近传统GA模型[17]的屈曲骨架曲线。

未约束混凝土采用Concrete 02模型，保护层混凝土受压峰值强度 f_{c0} 为27Mpa，峰值应变 ε_{c0} 为0.002，极限强度 f_u 为8Mpa，考虑混凝土的剥落[18]，也可取0，极限应变 ε_{cu} 为0.01。Concrete 02模型的单调应力-应变本构模型如图3所示。

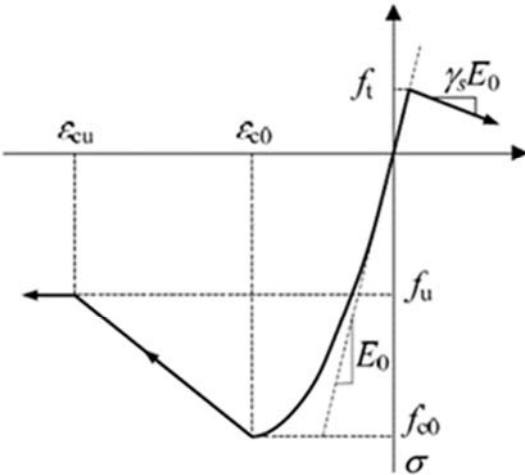


图3 Concrete 02单调应力-应变本构。

箍筋约束混凝土采用Mander[19]模型，该模型由Mander等完成的31根不同截面形式的钢筋混凝土柱轴心受压试验得到，试验中考虑了约束混凝土面积、箍筋间距、箍筋屈服强度以及体积配箍率等的影响。根据Mander模型计算得出，文中箍筋约束混凝土受压峰值强度 f_c 为34Mpa，峰值应变 ε_{c0} 为0.004，极限强度 f_{cu} 为5.2Mpa，极限应变 ε_{cu} 为0.04。

本文拟静力模拟中,采用位移控制加载方式,每个位移幅度加载一圈,位移增量为5mm,加载制度如图4所示。

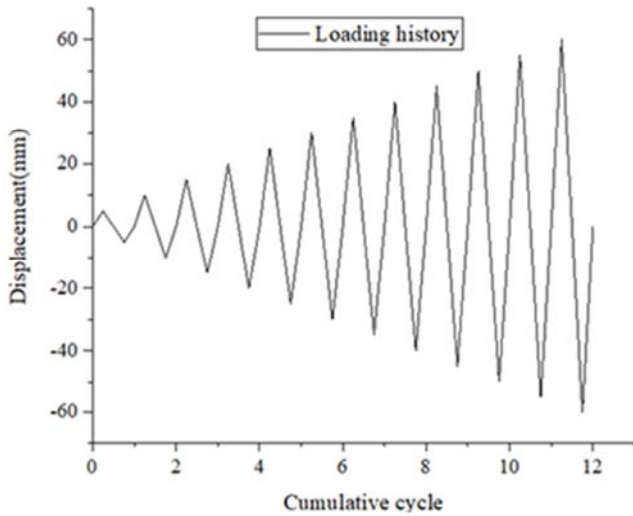


图4 位移控制阶段加载制度。

为了研究柱轴压比的影响,本文设置了4种加载工况,将柱的轴压比分别设置为0.30、0.40、0.60及0.80,分别模拟柱轴压比从小到大的情况,具体的施加竖向轴力及轴压比如表3所示。

表3 轴压比的确定。

工况编号	轴力(kN)	轴压比
Z1	2316.6	0.80
Z2	1734.5	0.60
Z3	1158.3	0.40
Z4	868.7	0.30

4. 模拟结果分析

4.1. 轴压比对滞回曲线影响

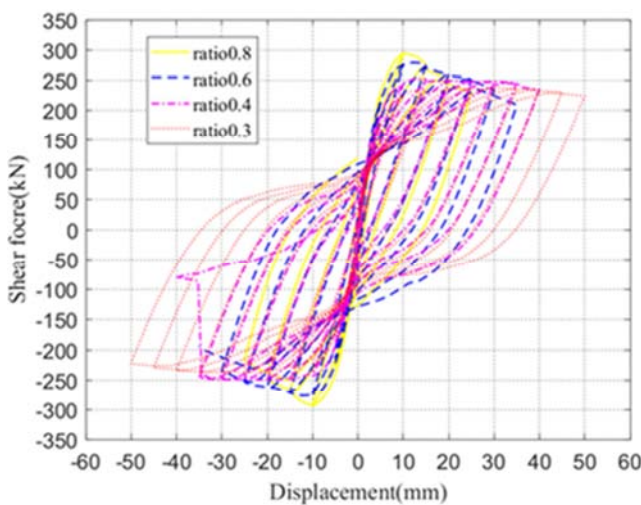


图5 不同轴压比下柱滞回曲线对比。

根据拟静力模拟结果,不同轴压比下柱的滞回曲线对比如图5所示。由图5可知,柱的轴压比越大,其极限承载

力越大,滞回曲线变得越来越扁平,逐步出现“捏缩”现象,最终成弓形;柱子的抗侧刚度越大,骨架曲线的下降段越来越陡,位移延性则明显降低。因此,在RC框架结构设计中,十分有必要限制轴压比的取值范围,不要将柱的轴压比取值过大,以免在地震中发生脆性破坏。

4.2. 轴压比对骨架曲线影响

一般情况下,柱的骨架曲线为滞回曲线的包络线,也可表述为滞回曲线上同向(拉或压)各次加载的荷载极值点依次相连得到的包络曲线称为骨架曲线。通过对图5中模拟结果滞回曲线分析可知,不同轴压比下,在两个方向骨架曲线均呈现出S型,本文取上半部分分析,提取的柱滞回曲线骨架曲线如图6所示。

由图6可知,当施加位移荷载较小时,曲线斜率较大,说明柱的刚度较大,随着荷载进一步增大,骨架曲线的斜率增加较为平缓,最后进入下降段。说明柱在往复荷载作用下经历了弹性、弹塑性和塑性破坏三个受力阶段。而在弹性阶段,4个轴压比下滞回曲线基本重合,说明在弹性范围内,柱的侧向承载力基本不受轴压比的影响。当轴压比为0.3时,柱的极限承载力为236kN,当轴压比为0.8时,柱的极限承载力为294kN,柱的最大承载力增大了24.6%。因此柱的极限承载力会随着轴压比的增加而增大,但轴压比越大,柱的承载力随位移增加下降速度越快。

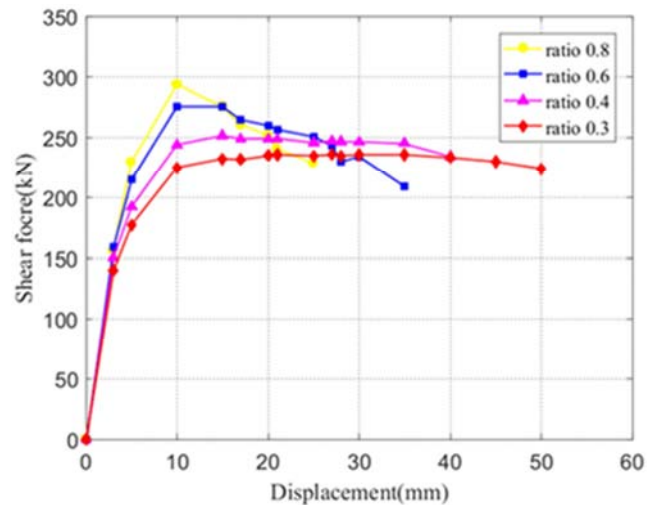


图6 不同轴压比下柱骨架曲线对比。

4.3. 轴压比对刚度退化曲线影响

刚度退化是材料塑性变形发展的充分体现,刚度定义为各级第一循环的滞回曲线峰值点荷载值与对应位移值之比。通过对模拟结果分析,得到的不同轴压比下柱刚度退化曲线对比如图7所示。

由图可知,在柱进入弹塑性阶段后,随着位移增加,各轴压比下刚度开始退化,直至最终破坏。轴压比取值越大,柱的刚度退化的越来越快,表明RC柱的塑性变形能力随着轴压比的增大变差。

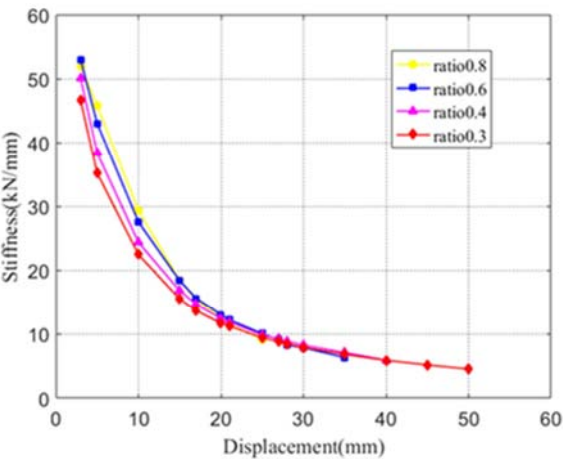


图7 不同轴压比下柱刚度退化曲线对比。

4.4. 轴压比对耗能能力影响

根据滞回耗能的定义，柱在每级加载下的耗能可以等效为相对应滞回环的面积。可以采用等效粘性阻尼[20]的表示耗能，等效粘性阻尼越大，柱的塑性程度越严重，即柱的破坏程度越严重，其表达式如公式（3）所示：

$$h_e = \frac{E_d}{2\pi K_{sec} \Delta_o^2} \tag{3}$$

其中： E_d 是每个加载周期消耗的总能量， K_{sec} 是割线刚度， Δ_o 是循环的幅度。对本文框架柱而言，分析结果如图8所示。

由图8可知，随加载位移幅值增大，等效粘性阻尼比不断增大。在未超过极限变形时，同一位移幅值下，高轴压比下的柱等效粘性阻尼比更大，即同一幅值加载下柱的单圈耗能较大。轴压比从0.6增大到0.8时，等效粘滞阻尼比的变化率更大。

把柱每级荷载下滞回环的面积相加可以得到结构的总耗能，不同轴压比下柱的总耗能如图9所示。可以看出，轴压比从0.3增加到0.8时，累积耗能值从85.4kN·m降低到30.5kN·m，降低幅度为64.2%，即随着轴压比增大，柱的耗能能力越来越差。

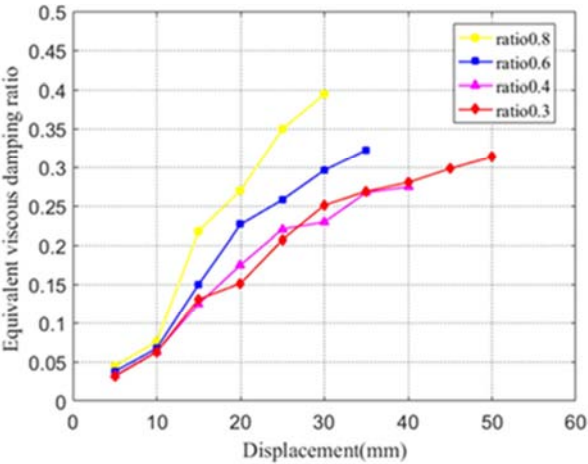


图8 不同轴压比下等效粘性阻尼比对比。

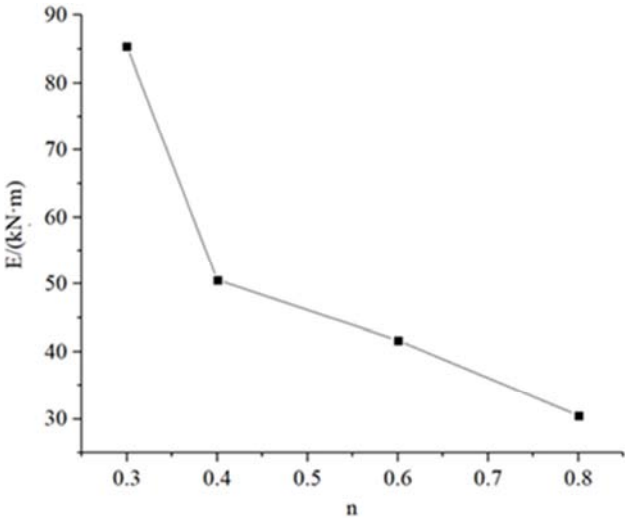


图9 不同轴压比下柱总耗能对比。

4.5. 轴压比对延性能力影响

定义柱的延性系数 u 为极限位移 Δ_u 与屈服位移 Δ_y 的比值， F_y 为屈服荷载， F_u 为极限荷载。

表4 柱位移延性系数计算结果。

轴压比	F_y (kN)	Δ_y (mm)	F_u (kN)	Δ_u (mm)	u
0.3	212.4	7.3	200.6	50.0	6.8
0.4	226.7	7.2	214.3	40.0	5.6
0.6	250.6	6.8	236.7	28.0	4.1
0.8	260.2	6.6	250.0	20.0	3.0

由表4可知，轴压比从0.3增大到0.8，柱的屈服位移不断降低，但变化的幅度不大，极限位移不断降低，降低的幅度为最大为60%；屈服荷载和极限荷载不断增大，增大的幅度分别为22.5%和24.6%；柱的位移延性系数不断减小，轴压比为0.8时相较轴压比为0.3时，柱的延性系数降低了55.9%，说明轴压比增大，柱的延性能力会降低。

5. 结论

本文采用OpenSees有限元软件，对某RC框架柱进行了拟静力数值模拟，分析中采用了考虑纵筋屈曲和疲劳损伤的模型，主要分析了轴压比对柱滞回曲线、刚度、耗能以及延性的影响，得到如下结论：

- （1）柱轴压比在0.3~0.8范围内，随着轴压比增加，柱的滞回曲线变得越来越扁平，峰值承载力不断增大，最大可增大24.6%，但柱承载力下降速度也越快，刚度退化越来越快。
- （2）同一位移幅值下，高轴压比柱的等效粘滞阻尼更大，但到达破坏状态时，低轴压比构件的总耗能明显大于高轴压比构件，轴压比从0.3增大到0.8时，构件累积耗能值降低了64.2%。
- （3）轴压比的增大会降低柱的屈服位移和极限位移，会增大屈服荷载和极限荷载，轴压比为0.8时柱延性系数比轴压比为0.3时的延性系数降低了55.9%。

致谢

本文为国家重点研发计划项目课题《城市工程强震反应观测新型传感器及组网观测技术》(2017YFC1500601)及其省级资助项目(GX18C005)与国家自然科学基金面上项目《基于贝叶斯估计的RC框架结构地震损伤概率识别方法改进与验证》(51678541)的阶段性成果之一。

参考文献

- [1] 陆新征, 叶列平, 潘鹏,等. 钢筋混凝土框架结构拟静力倒塌试验研究及数值模拟竞赛 II:关键构件试验[J]. 建筑结构, 2012, 42(11): 23-26.
- [2] Yao D L, Ma Y C, Jia J Q. The Influence of Axial Compression Ratio on Seismic Behavior of SRUHSC Frame under Cyclic Loading[J]. KSCE Journal of Civil Engineering,2019,23(2).
- [3] 白巨巨, 李升才. 不同轴压比RCS梁柱组合件抗震性能分析[J].中南大学学报(自然科学版),2020,51(8):2183-2196.
- [4] 蔡健, 段伟宁, 汤序霖,等. 轴压比与剪跨比对带约束拉杆双层钢板-混凝土组合剪力墙抗震性能影响研究[J].建筑结构学报,2018,39(2):37-43.
- [5] 冯宝锐. 钢筋混凝土柱抗震性能点转角研究[D]. 清华大学, 2014.
- [6] Sun L, Yang Z Y, Jin Q, et al. Effect of Axial Compression Ratio on Seismic Behavior of GFRP Reinforced Concrete Columns[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics,2020,20(6).
- [7] Liu M, Yin S P, Cong X. Seismic behavior of textile-reinforced concrete-strengthened RC columns under different axial compression ratios[J]. Journal of Engineered Fibers and Fabrics,2019,14.
- [8] 张静, 周安, 柳炳康,等. 不同轴压比再生混凝土框架柱抗震性能试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2012, 35(4): 503-507.
- [9] 林颖, 李刚. 轴压比对钢筋混凝土桥墩抗震性能的影响分析[J]. 北方交通, 2020, 322(2): 16-19.
- [10] Ou Y C, Song J, Wang P H, et al. Ground Motion Duration Effects on Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Bridge Columns[J]. Journal of Structural Engineering,2013.
- [11] FEMA 461, Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components (FEMA 461) [S], Applied Technology Council for the Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA, 2007.
- [12] 杨红, 张洛, 张和平. 考虑纵筋屈曲及疲劳损伤的钢筋混凝土柱抗震性能试验研究与非线性分析[J].建筑结构学报,2013,34(11):130-140.
- [13] 杨红, 冉小峰, 谢琴. 考虑屈曲效应的混凝土柱纵筋低周疲劳性能和变形能力研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(3): 105-116.
- [14] 张耀庭, 赵璧归, 李瑞鸽,等. HRB400钢筋单调拉伸及低周疲劳性能试验研究[J]. 工程力学, 2016, 33(4): 121-129.
- [15] Brown J, Kunnath S K. Low Cycle Fatigue Behavior of Longitudinal Reinforcement in Reinforced Concrete Bridge Columns[R]. University at Buffalo, State University of New York, Technical Report MCEER-00-0007, 2000.
- [16] McKenna F, Fenves G L, Scott M H. Open System for Earthquake Engineering Simulation. Berkeley, CA:University of California, Available from: <http://OpenSees.berkeley.edu>, 2000.
- [17] Gomes A, Appleton J. Nonlinear Cyclic Stress-Strain Relationship of Reinforcing Bars Including Buckling[J]. Engineering Structures, 1997, 19(10): 822-826.
- [18] 李雁军, 吕大刚, 王震宇,等. 钢筋混凝土框架结构拟静力倒塌实验数值模拟[J]. 工程力学, 2012, 29(S2): 205-209.
- [19] Mander J A B, Priestley M J N. Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1804-1826.
- [20] Ou Y C, Wang P H, Tsai M S, et al. Large-Scale Experimental Study of Precast Segmental Unbonded Posttensioned Concrete Bridge Columns for Seismic Regions[J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 136(3): 255-264.