

# 变轴力下钢筋混凝土柱的抗震性能分析

汪训流 陆新征 叶列平

(清华大学土木工程系 北京 100084)

**摘要** 准确预测地震作用下钢筋混凝土(RC)柱的受力特性,对评估混凝土结构的抗震性能具有重要意义。地震作用下,混凝土结构中的RC柱除承受水平荷载外,还由于地震作用引起的倾覆力矩影响承受变轴力作用。因此,往复荷载下RC柱受力及变形特性的研究应该考虑变轴力的影响。本文首先通过恒轴力和变轴力下RC柱滞回性能的模拟,验证了本研究基于纤维模型程序开发的数值分析模型的准确性。然后,利用该数值模型和分析程序,对一RC柱进行了不同变轴力模式下滞回性能的分析研究。分析结果表明,轴力的变化对RC柱的滞回性能有很大影响。由于非耦合型变轴力变化过程的随机性,为便于变轴力下RC柱的抗震性能分析和试验研究,本文提出了等代定轴力的概念及其确定方法。

**关键词** 纤维模型 变轴力 混凝土柱 抗震性能 滞回分析

## Analysis of Earthquake-resistant behaviors for RC Columns under Variable Axial Loads

Wang Xunliu, Lu Xinzheng, Ye Lieping

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** Precise prediction for the hysteretic behaviors of reinforced concrete (RC) column under seismic load is important to assess the safety of RC structures under earthquake. Due to the overturning moment in the earthquakes, besides being subjected to seismic lateral forces, RC columns also experience variable axial loads. Therefore the influence of variable axial forces must be taken into account when to study the hysteretic behaviors of RC columns under cyclic loads. In this paper, a numerical analysis model based on a fiber model program have been validated firstly through the rational hysteretic simulations of two RC columns under various patterns of axial loads, Then a frame column has been simulated under various patterns of variable axial loads by numerical method. The analytical results indicate that the variety of axial loads has considerable effect on the hysteretic behaviors of RC columns. Because of the randomness of axial loads and to facilitate carrying on experimental researches and analyzing earthquake-resistant behaviors for RC structures, a equivalent fixed axial load method is put forward to determine the seismic behaviors of RC column in structures under earthquake.

**Keywords** fiber model; variable axial load; concrete column; earthquake-resistant behavior; hysteretic analysis

### 1 引言

目前,对于钢筋混凝土(RC)柱滞回性能的研究一般基于恒轴力条件,即认为整个受力过程中柱承受恒定轴压力,而对变轴力下RC柱往复受力特性的研究则还不充分。文献[1]~[7]对变轴力下RC柱的受力性能进行了相关研究,但关于往复水平加载的变轴力下RC压弯柱的试验及分析研究多基于耦合型变轴力<sup>[1][3][4][6][7]</sup>,即轴力与水平荷载(或位移)同时施加且同时达到各自的最大或最小值;对于非耦合型变轴力下RC压弯柱的研究又主要基于单调水平加载<sup>[2][6][7]</sup>。文献[5]虽然对水平往复加载的非耦合型变轴力下的RC压弯柱进行了计算分析,但所用方法为集中塑性较非线性分析模型,轴力变化模式的确定也缺乏依据。

本文基于精度更高的纤维模型程序<sup>[8][9]</sup>,采用更加完善的钢筋和混凝土本构模型,并将其嵌入MSC.MARC分析软件,形成复杂受力状态下钢筋混凝土杆系结构及构件受力计算的数值分析模型。通过对定轴力和变轴力下的两根RC压弯柱试件的模拟,验证了本文数值分

析模型预测不同受力形式下的 RC 柱的准确性。然后，利用本文模型和分析程序对文献[10]中的一根 RC 压弯柱进行了不同形式变轴力下水平往复加载的滞回性能分析，其中非耦合型变轴力变化模式来源于 RC 框架在不同地震波下的动力分析结果。计算结果表明，轴力的变化对往复荷载下 RC 柱的受力性能有重大影响。由于非耦合型变轴力变化过程的随机性，本文提出了等代定轴力的概念及其确定方法。

### 2 数值分析模型及其验证

对于纤维模型的杆件单元，其截面被划分若干个纤维，每个纤维均为单轴受力，并用其单轴应力应变关系来描述该纤维材料的特性，纤维间的变形协调则采用平截面假定。

混凝土单调受压加载包络线选取 Légeron&Paultre 模型<sup>[11]</sup>；单调受拉加载包络线采用江见鲸模型<sup>[12]</sup>；加卸载本构考虑混凝土的刚度退化及滞回行为，并模拟拉压过渡区。混凝土本构模型如图 1(a)所示。钢筋本构可描述拉压等强的具有屈服台阶的普通钢筋和拉压不等强的没有屈服台阶的高强钢筋或钢绞线，如图 1(b)所示，其中，单调加载包络线采用 Esmaily&Xiao 模型<sup>[7]</sup>，卸载曲线为直线，再加载曲线选用 Légeron 等模型<sup>[13]</sup>。

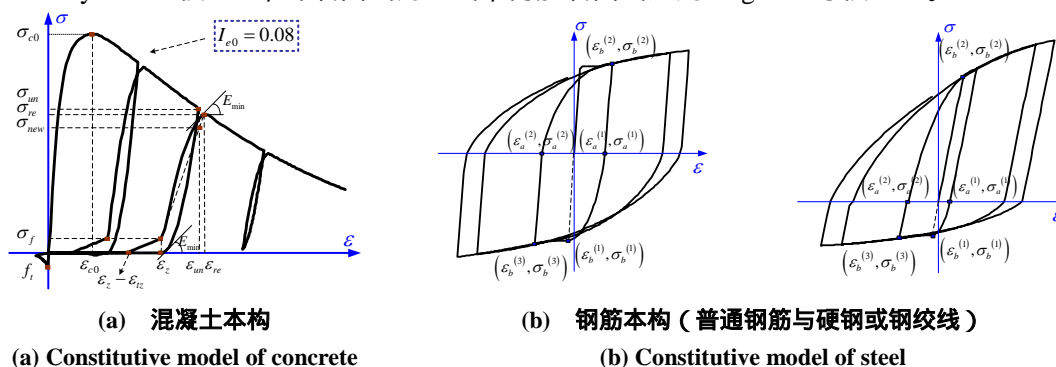


图 1 材料本构

Fig.1 Constitutive model of materials

将所编制的材料本构模型，通过 Ubeam 用户子程序接口嵌入通用有限元分析软件 MSC.MARC<sup>[8][9]</sup>，采用位移或荷载增量加载法，实现钢筋混凝土杆系结构或构件在复杂受力状态下的非线性计算分析。

采用本文数值分析模型，先对文献[10]的定轴力 RC 压弯柱试件 YW0 进行了数值模拟，计算结果见图 2(a)；再对文献[1]的变轴力 RC 压弯柱试件 C8 进行了模拟计算，计算结果见图 2(b)。由图可见，数值分析模型的预测结果良好，表明本文基于纤维模型开发的 RC 结构非线性数值分析方法和程序，可以准确用于定轴力及变轴力下 RC 柱滞回性能的模拟。

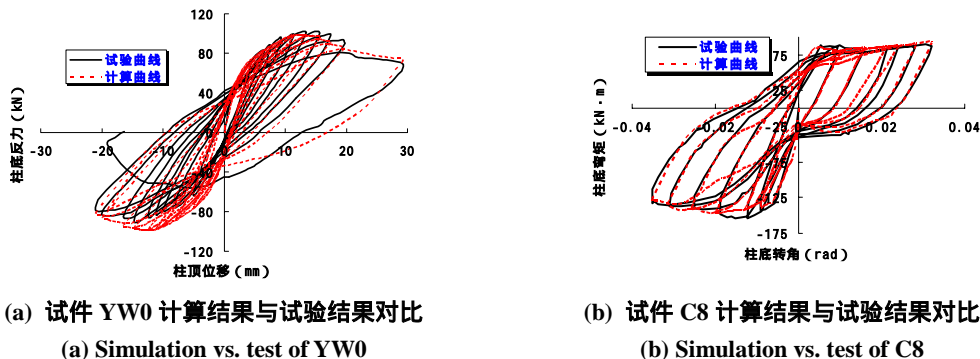


图 2 试件计算结果与试验结果的对比

Fig.2 Comparison between simulation and test result of specimens

### 3 变轴力下 RC 柱滞回性能的数值分析

文献[10]的 RC 压弯柱试件 YW0 的配筋率为 1.29%，轴压比为 0.44，是高层建筑框架柱

常见范围。考虑到高层框架结构在地震作用下变轴力影响较大,本文对 YW0 柱进行不同轴力形式下的滞回性能模拟,其受力方式及横向加载位移同文献[10]试验的加载条件。

### 3.1 轴力变化形式

考虑到已有研究主要集中于耦合型变轴力的现状,本文着重对非耦合型变轴力 RC 压弯柱的滞回性能进行研究,并侧重于轴力变化频率大于水平荷载或位移变化频率的情形,以反映竖向地震频率一般高于水平地震的客观实际<sup>[5]</sup>。基于以上考虑,所考察的轴力变化形式见表 1,表中以相对轴力  $N/N_0$  来表示轴力的变化, $N$  为柱顶轴力, $N_0$  为设计轴压力(760kN,即文献[10]试验轴力)。

表 1 轴力变化形式列表

Table 1 List of development styles of axial loads

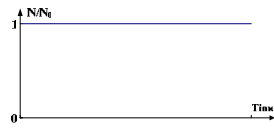
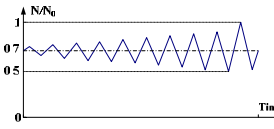
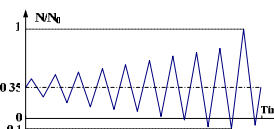
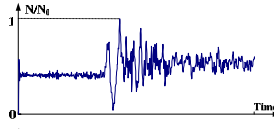
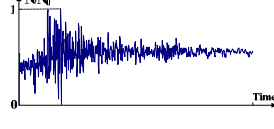
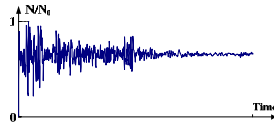
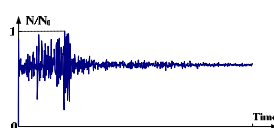
Case	轴力变化形式(以压为正)	说明
Case 1		恒轴力,即整个加载过程轴力保持不变(同文献[10]的试验加载条件)
Case 2		耦合型变轴力,轴力与横向位移成正比,其中,平衡点相对轴力 $N/N_0$ 为 0.7,轴力最大相对幅值为 1、最小相对幅值为 0.5。
Case 3		耦合型变轴力,轴力与横向位移成正比,其中,平衡点相对轴力 $N/N_0$ 为 0.35,轴力最大相对幅值为 1、最小相对幅值为 -0.1。
Case 4		非耦合型变轴力,相应于某 RC 框架在天津波(南北波加相应的竖向地震波)下的动力模拟中某底层边柱柱顶轴力随时间的变化模式
Case 5		非耦合型变轴力,相应于某 RC 框架在 Taft 波(北偏东 21° 波加相应的竖向地震波)下的动力模拟中某底层边柱柱顶轴力随时间的变化模式
Case 6		非耦合型变轴力,相应于某 RC 框架在 EL Centro 波(南北波加相应的竖向地震波)下的动力模拟中某底层边柱柱顶轴力随时间的变化模式
Case 7		非耦合型变轴力,相应于某 RC 框架在迁安波(南北波加相应的竖向地震波)下的动力模拟中某底层边柱柱顶轴力随时间的变化模式

表 1 中,Case1 为恒轴力基准试件;Case2 和 Case3 为耦合型变轴力试件,分析轴力变化幅度对 RC 柱滞回性能的影响,其中 Case3 柱子有受拉,以模拟大震柱子可能出现的受拉情形;Case 4~Case 7 的轴力变化是遵循某 RC 框架在不同地震波下的动力模拟中底层边柱柱顶轴力随时间的变化模式。

### 3.2 计算结果及分析

图 3 为不同变轴力形式下试件 YW0 的水平力-位移曲线分析结果。由图可见,轴力的变化对 RC 柱的承载力、刚度、耗能及变形性能均有很大影响。考察图 3 可得以下几点结论:

(1) 与定轴力 Case1 相比,耦合型变轴力下 Case2 和 Case3 (图 3a 和图 3b) 的刚度和

峰值承载力明显降低,且降低幅度随着轴力最大变化幅值的增大而增大(即 Case3 小于 Case2)。Case1、Case2、Case3 的累计滞回耗能分别为 100.8、55.6、52.2 kN-m,可见在变轴力情况下 RC 柱的耗能能力显著减小,而 Case2 和 Case3 的耗能能力相当。

(2) 与定轴力 Case1 相比,非耦合型变轴力下 Case4~Case7 (图 3(c)~(f)) 的刚度和峰值承载力也明显降低,虽然不出现某个加载向(如负向加载)刚度及承载力整体急剧下降现象,但非耦合型变轴力下表现出不稳定特征,曲线变得不光滑。Case4~Case7 的累计滞回耗能分别为 44.3、44.5、47.3、47.2kN-m,可见非耦合型变轴力下柱子的累计滞回耗能不到定轴力下(100.8)的 1/2,而 Case4~Case7 的峰值承载力和滞回耗能基本相近。

(3) 综合比较图 3 中各曲线可知,若直接采用以结构动力过程中 RC 柱承受的最大轴力为恒轴力的滞回特性来代替 RC 柱的滞回特性(即用 Case1 代替其他 6 种情况),显然过高估计 RC 柱的耗能能力,不能真实反映其实际受力特性,甚至会导致偏于不安全的结果。

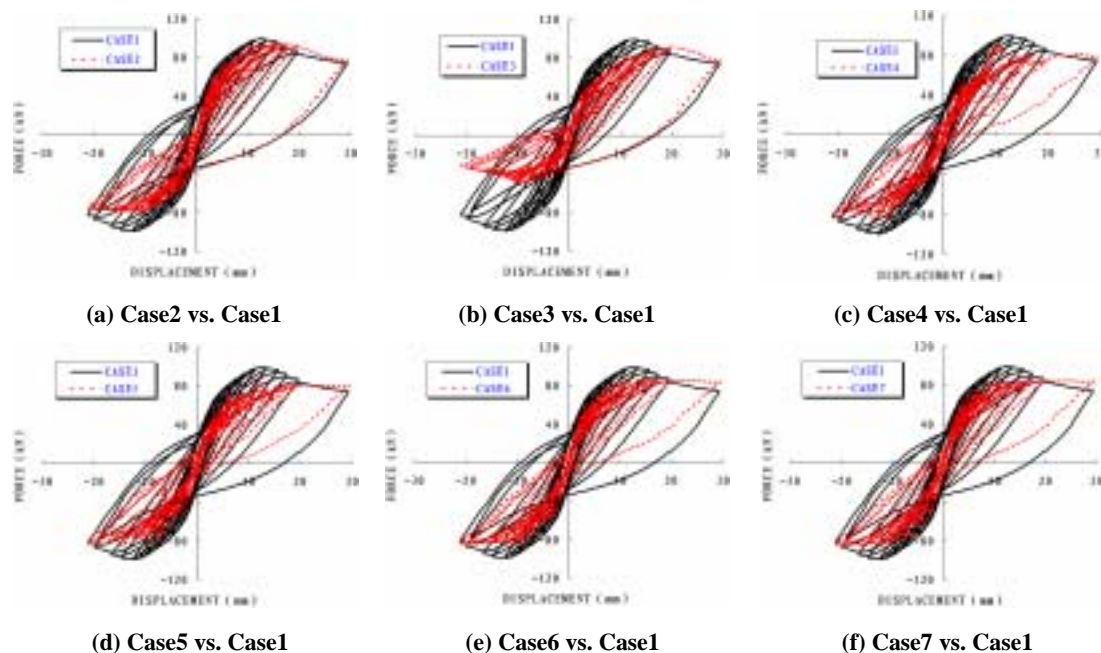


图 3 不同轴力形式下试件 YW0 数值计算结果的比较

Fig.3 Comparison of simulation results of YW0 under various style of axial loading

#### 4 等代定轴力

由表 1 可见,地震中框架柱轴力的变化过程随地震波的不同而异。这种轴力变化过程的随机性使得预先准确预测某次地震中 RC 柱轴力变化的真实过程变得不可能,而且复杂的轴力变化过程在目前框架柱的静力及拟静力试验研究中也难以实现。为使静力及拟静力试验研究和相关计算分析能更为准确地反映实际结构中 RC 柱在变轴力下的滞回特性,本文提出 RC 柱等代定轴力方法,具体方法如下:选取多条地震波(同时包括横波和纵波)对相应的实际结构进行动力分析,得到 RC 框架柱的轴力变化过程,并用最大轴压力进行归一化得到相对轴力  $n_{eq}$ ,取相对轴力的最大值和最小值的平均值  $\bar{n}_{eq}$  与 RC 柱最大轴力  $N_0$  的乘积作为等代定轴力。

对于表 1 中 4 条地震波作用下某 RC 框架结构中框架柱的分析结果,  $\bar{n}_{eq}=0.55$ ,乘以前述 YW0 试件的试验最大轴力  $N_0$  所得到的等代定轴力,按该等代定轴力进行 RC 柱滞回特性分析,与变轴力下的分析结果对比见图 4。由图可见,当实际最大轴压比达 0.44 时,等代定轴力下 RC 柱的刚度、承载力均与变轴力情形的结果保持很好的一致性,且累计滞回耗能为 46.2 kN-m,与变轴力 Case4~Case7 接近。



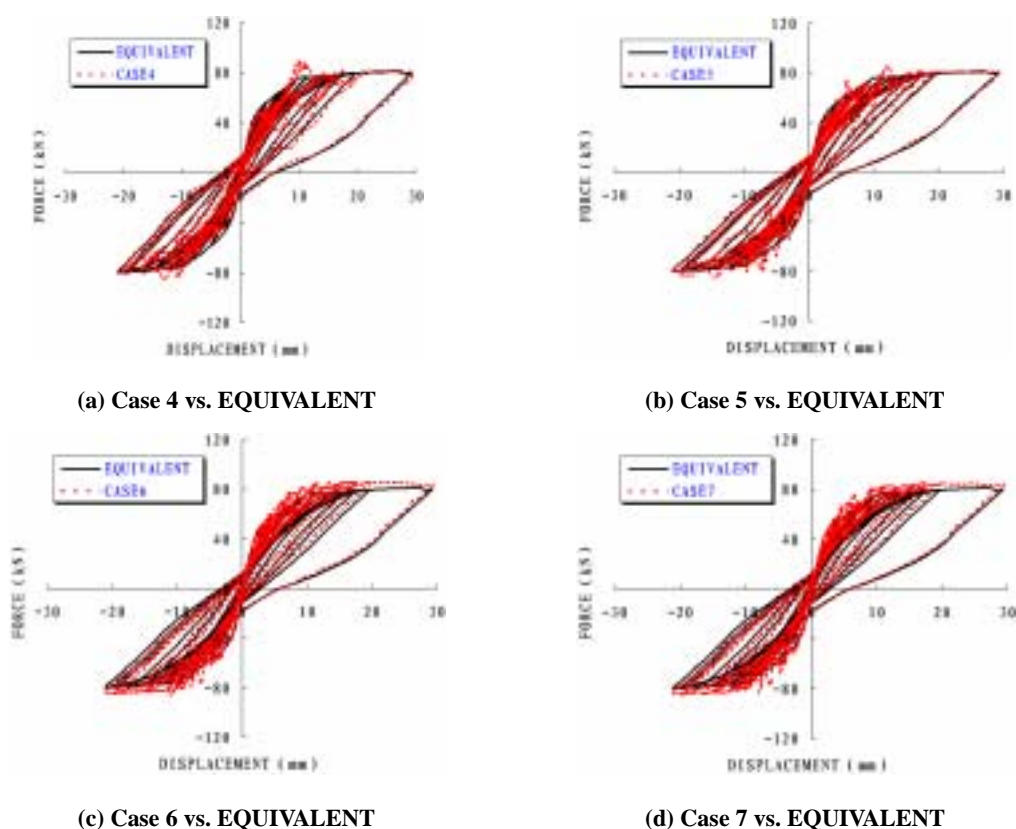


图 4 等代定轴力与非耦合型变轴力下 RC 柱滞回性能的对比

Fig.4 Comparison of hysteretic behaviors of RC column

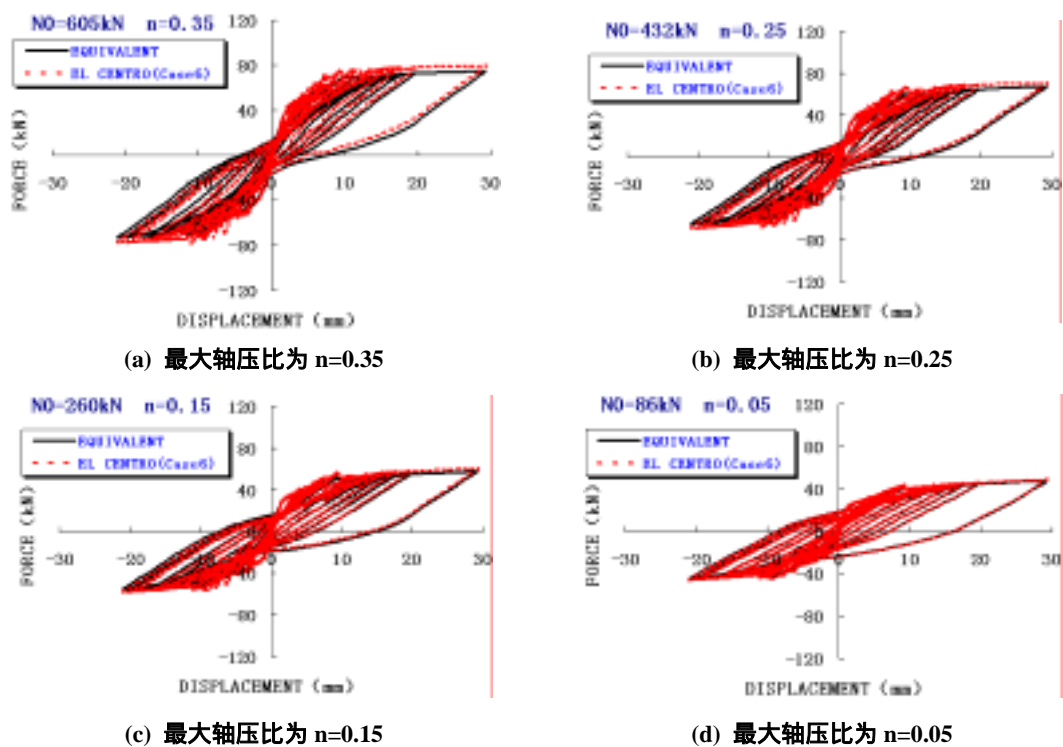


图 5 最大轴比的影响对比

Fig.5 Influence of maximum ratios of axial load

为考察不同最大轴力  $N_0$  对等代定轴力的影响, 对于 YW0 试件分别取  $N_0 = 605$ 、432、260、86kN(相应最大轴压比分别为 0.35、0.25、0.15 和 0.05), 并取等代定轴力  $0.55N_0$  的 RC 柱与非耦合型变轴力的 RC 柱进行对比计算分析。限于篇幅, 这里只列出 EL Centro 波(即表 1 中的 Case 6)导致的变轴力的结果对比, 如图 5 所示。由图可见, 虽然  $N_0$  不同, 但等代定轴力下的 RC 柱刚度、承载力和耗能均与相应变轴力下 RC 柱的结果保持很好的一致性, 进一步验证了本文关于等代定轴力的合理性。

因此, 在 RC 柱的静力和拟静力试验研究和相关计算分析中, 可以用等代定轴力(而不是最大设计轴力)代替非耦合型变轴力来进行 RC 柱的抗震性能研究。当不具备对结构进行动力分析的条件时, 可近似取 0.5~0.6 倍最大轴力作为等代定轴力。

## 5 结语

本文基于纤维模型的混凝土结构数值分析模型, 通过对一根 RC 框架柱在 7 种不同轴力形式下的滞回性能分析, 探讨了轴力变化模式对 RC 柱滞回性能的影响。计算结果表明, 轴力的变化对柱子的承载力、刚度、滞回性能均有很大影响, 在相同最大轴压力的情况下, 相对于定轴力柱而言, 变轴力柱具有较低的承载力、较小的刚度和耗能能力。其中, 耦合型变轴力会导致在轴力较小的加载方向上柱子抗震性能显著下降; 而非耦合型变轴力则会引起柱子承载力的“跳跃”状不稳定现象。由于非耦合型变轴力变化模式的随机性, 可以采用平均轴力作为等代定轴力(而不是最大轴力)来近似模拟变轴力情况下 RC 柱的抗震滞回性能, 当不具备对结构进行动力分析的条件时, 可近似取 0.5~0.6 倍最大设计轴力作为等代定轴力。

## 参考文献

- [1] Abrams, D. P. "Influence of axial force variations on flexural behaviour of reinforced concrete columns", *ACI Structural Journal*, 1987;84(3):246-54.
- [2] Saadeghvaziri, M. A., "Nonlinear Response and Modeling of RC Columns Subjected to Varying Axial Load," *Engineering Structures*, V. 19, No. 6, 1997, pp. 417-424.
- [3] 杨红、白绍良, 基于结构弹塑性地震反应的柱变轴力加载方法研究, *世界地震工程*, 18(2), 2002, 80-84
- [4] 杨红、白绍良, 基于变轴力和定轴力试验对比的钢筋混凝土柱恢复力滞回特性研究, *工程力学*, 20(6), 2003, 58-64
- [5] ElMandooh Galal, K., and Ghobarah, A., "Flexural and shear hysteretic behaviour of reinforced concrete columns with variable axial load," *Engineering Structures*, V. 25, 2003, pp. 1353-1367.
- [6] Esmaily, A., and Xiao, Y. (2005). "Behavior of Reinforced Concrete Columns under Variable Axial Loads", *ACI Structural Journal*, 101(1), 124-132
- [7] Esmaily, A., and Xiao, Y. (2005). "Behavior of Reinforced Concrete Columns under Variable Axial Loads: Analysis", *ACI Structural Journal*, 102(5), 736-744.
- [8] 陆新征、缪志伟、黄羽立、叶列平, 静力和动力荷载作用下混凝土高层结构的倒塌模拟, 2005 年 MSC. Software 中国用户年会, 成都, 2005, 1-10.
- [9] 汪训流、陆新征、叶列平, 无粘结预应力混凝土框架的动力分析, 城市与工程安全减灾研究与进展(第一届全国学术研讨会论文集), 唐山, 2006, 689-694
- [10] 李静, 矩形截面 FS 约束混凝土柱抗震性能的试验研究与理论分析, 清华大学博士论文, 2003 年 12 月
- [11] Légeron, F., and Paultre, P.(2003). "Uniaxial confinement model for normal and high-strength concrete columns," *J. Struct. Eng.*, ASCE, 129(2), 241-252.
- [12] 江见鲸、陆新征、叶列平(2005), 混凝土结构有限元分析, 清华大学出版社, 51-52
- [13] Légeron, F., Paultre, P., and Mazar, J.(2005). "Damage Mechanics Modeling of Nonlinear Seismic Behavior of Concrete Structures," *J. Struct. Eng.*, ASCE, 131(6), 946-954.