

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2017.01.005

轴压比对框架节点抗震性能影响的数值模拟分析

占亚翔, 蒋隆敏, 唐从青, 吴城林

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 运用 ANSYS 有限元分析软件制作 3 个相同的钢筋混凝土框架节点模型, 在控制竖向轴压力的条件下, 当轴压比分别为 0.3, 0.5, 0.7 时, 对其进行低周反复加载, 研究框架节点的抗震性能, 包括裂缝开展情况、延性、耗能能力等的变化规律。研究表明: 在一定程度内, 随着框架柱端轴压力的增加, 框架节点核心区混凝土的约束作用逐步增强, 节点核心区的剪切变形被有效地限制, 而抗剪承载力、耗能能力得到了一定的提高。

关键词: 框架节点; 轴压比; 抗震性能

中图分类号: TU375.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2017)01-0030-05

A Numerical Simulation Analysis of the Influence of Axial Compression Ratio on the Seismic Capacity of Frame Nodes

ZHAN Yaxiang, JIANG Longmin, TANG Congqing, WU Chenglin

(School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Three identical reinforced concrete frame node models have been made by utilizing ANSYS finite element analysis software. A reversed low cycle loading has been made on the seismic capacity of frame nodes, under the control of vertical shaft pressure, with its axial compression ratios being 0.3, 0.5, 0.7. A research has thus been conducted on the seismic capacity of frame nodes, as well as the change regulation of crack development, ductility, and energy dissipation capacity. The results show that, to a certain extent, with the increase of frame column end shaft pressure, the restraint effect of concrete in the core area of frame nodes gradually increases, the shear deformation in the core region of the frame nodes is effectively limited, and the shear bearing capacity and energy dissipation ability is improved to some degree.

Keywords: frame node; axial compression ratio; seismic capacity

0 引言

框架结构体系在地震作用下最容易受到损坏的部位是节点核心区, 而节点核心区的破坏将直接打破梁柱受力平衡关系, 从而导致整个框架承载能力丧失, 以致结构发生倒塌。大部分钢筋混凝土框架结构的破坏或倒塌都是由于节点核心区破坏造成的^[1]。节

点是框架梁与柱连接的关键性传力部位, 必须要有足够的强度来保证其正常运行, 其重要性在整个框架节点体系中是无法忽视的。因此在抗震结构体系中, 对框架节点的研究具有重要的实际意义。

轴压比是影响钢筋混凝土框架节点抗震性能的重要因素之一, 近年来国内外学者已经做了较多的相

收稿日期: 2016-10-17

基金项目: 湖南省自然科学基金株洲联合基金资助项目(2016JJ5037)

作者简介: 占亚翔(1991-), 男, 江西上饶人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为新型材料在结构加固中的应用,

E-mail: 1974275524@qq.com

关研究^[2-5], 取得了一些重要研究成果, 如提出轴压比的建议值范围及轴压比对框架结构构件抗震性能的具体影响等。但有关轴压比对框架节点抗震性能有限元数值模拟分析的研究文献较少。又因试验研究比模拟研究耗时长, 需要大量的人力、物力。因此本文拟运用 ANSYS 有限元分析软件, 制作 3 个相同的钢筋混凝土框架节点模型, 研究轴压比分别为 0.3, 0.5, 0.7 时框架节点的抗震性能。

1 试件

1.1 试件参数

框架节点模型中, 设置框架柱净高 1 675 mm, 截面尺寸 250 mm × 250 mm; 梁长 2 600 mm, 截面尺寸 150 mm × 300 mm。在柱底部布置一块 20 mm 厚刚性钢板防止发生应力集中无法收敛。试件的尺寸与配筋及主要参数分别见图 1 和表 1。

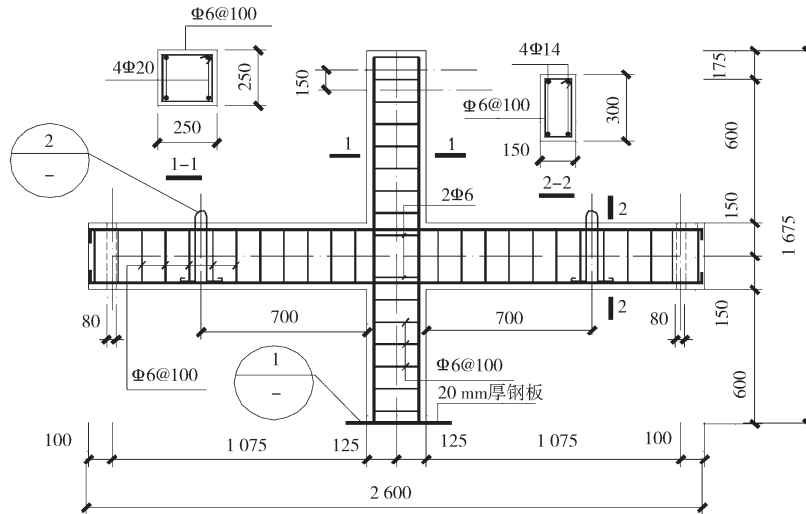


图 1 试件的尺寸与配筋

Fig. 1 Size and reinforcement of specimens

表 1 试件主要参数

Table 1 Main parameters of specimens

试件编号	轴压比	柱配筋率 /%	柱体积配箍率 /%	梁配筋率 /%	梁体积配箍率 /%
K-1	0.3	2.01	0.54	1.78	0.73
K-2	0.5	2.01	0.54	1.78	0.73
K-3	0.7	2.01	0.54	1.78	0.73

1.2 计算参数

模拟采用等级为 C20 的混凝土, 混凝土立方体抗压强度、单轴抗压强度标准值分别为 20 MPa, 9.6 MPa, 单轴抗拉强度设计值为 1.1 MPa, 泊松比为 0.2, 弹性模量为 2.55×10^4 MPa。钢筋采用 HRB335, 屈服强度为 300 MPa, 弹性模量为 2.0×10^5 MPa, 泊松比为 0.3。分别取闭合、张开裂缝剪力传递系数为 0.95, 0.25。

2 有限元建模分析

2.1 单元选取

混凝土采用 SOLID65 单元, SOLID65 单元是用于模拟混凝土等非线性、非均匀材质的单元; 钢筋采用 LINK8 单元^[6], LINK8 单元用来模拟钢筋, 其具有塑性、膨胀、大变形等功能。

2.2 材料本构关系与破坏准则

SOLID65 单元在缺省的条件下, 混凝土单轴应

力应变关系上升段采用 GB50010—2002《混凝土结构设计规范》规定的公式, 下降段则采用文献 [6] 中 Hongnestad 的处理方式, 即:

当 $\epsilon_c \leq \epsilon_0$ 时,

$$\sigma_c = f_c \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^n \right],$$

式中: σ_c 为当混凝土压应变为 ϵ_c 时的压应力;

f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值;

ϵ_0 为当混凝土压应力大小等于 f_c 时的应变。

当 $\epsilon_0 < \epsilon_c \leq \epsilon_{cu}$ 时,

$$\sigma_c = f_c \left[1 - 0.15 \left(\frac{\epsilon_c - \epsilon_0}{\epsilon_{cu} - \epsilon_0} \right) \right],$$

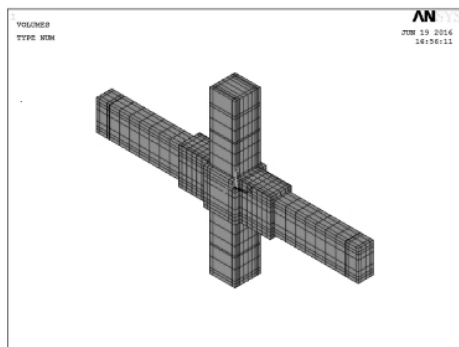
式中 ϵ_{cu} 为正截面的混凝土极限压应变。

按照《混凝土结构设计规范》取 $n=2$, $\epsilon_0=0.002 0$, $\epsilon_{cu}=0.003 3$, 采用多线性模型 MISO 模拟; 钢筋的应力

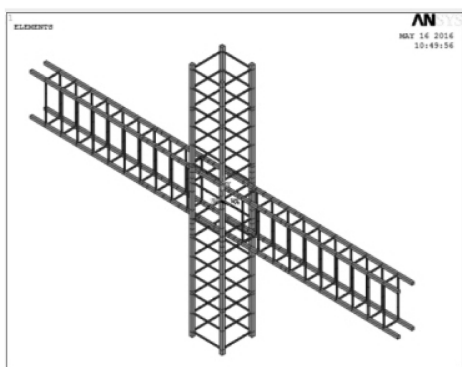
应变关系采用双线性等向强化模型 BISO 模型模拟^[7]。

2.3 模型的建立

分离式建模能够考虑钢筋和混凝土之间的滑移和粘结，相比于整体式建模更符合工程实际情况。本文采用分离式建模；框架节点的有限元模型如图 2 所示。



a) 混凝土单元



b) 钢筋单元

图 2 框架节点有限元模型

Fig. 2 A finite element model of frame nodes

2.4 加载程序

在整个数值模拟地震的过程中，在控制轴压力的条件下分别对 3 个框架节点模型梁端施加水平低周往复加载。框架柱竖向荷载在加载过程中保持恒定；框架梁端加载方法采用力 - 位移混合控制，即当框架梁在屈服以前按荷载控制，在屈服以后就按位移控制，加载程序见图 3 所示。

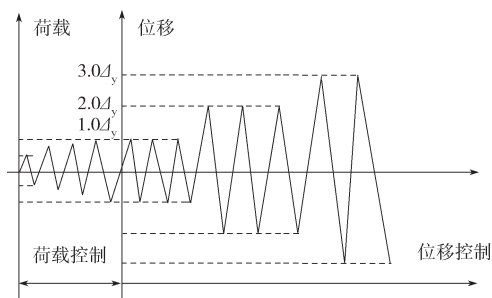


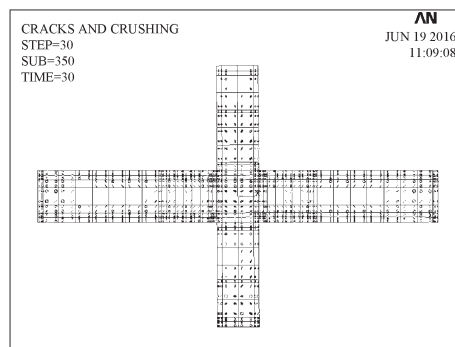
图 3 加载程序

Fig. 3 Loading program

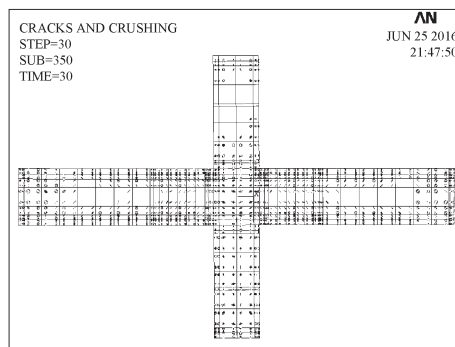
3 有限元结果分析

3.1 裂缝开展及破坏形态

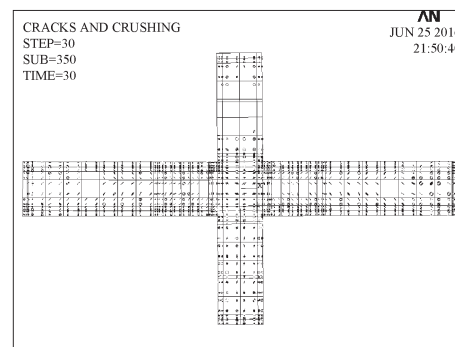
选各框架柱顶的水平位移为 8 mm 时的裂缝作为对比裂缝图，如图 4 所示。由图可知，各框架试件节点核心区都发生了不同程度的剪切破坏。K-1 试件节点核心区裂缝开展情况较 K-2 试件严重，K-2 试件裂缝开展情况稍大于 K-3 试件。这说明在一定程度内提高框架柱端轴压力，框架节点核心区混凝土的约束能力得到相应地增强，从而限制了框架节点核心区的剪切变形，使框架节点核心区斜裂缝的发展被有效减缓。



a) K-1 试件



b) K-2 试件



c) K-3 试件

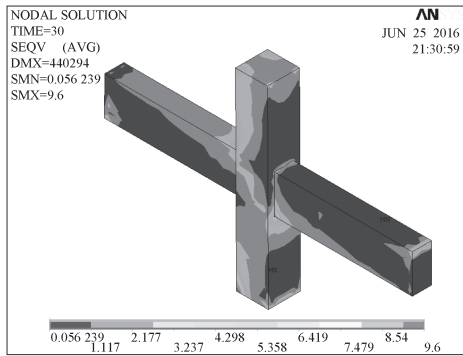
图 4 不同轴压比下各框架试件的裂缝图

Fig. 4 A crack pattern diagram of frame specimens under different axial compression ratios

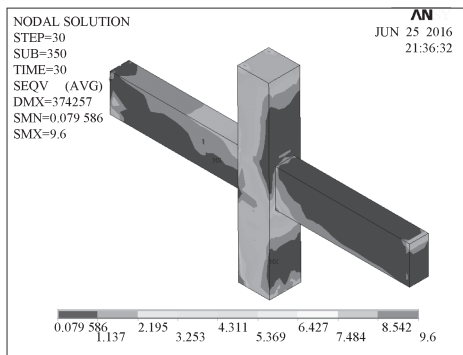
3.2 各构件应力图

各框架构件的应力图如图 5 所示。由图可知，框

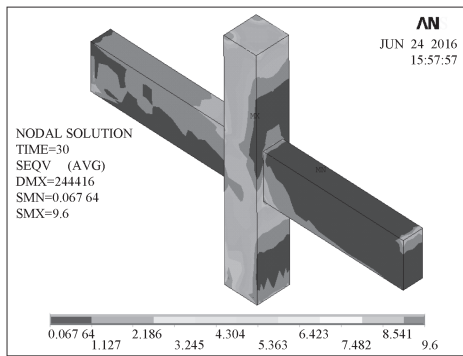
架柱角的受力最大; 随着轴压比的增大, 试件的受压范围也随之增大, 受压区混凝土受压膨胀外鼓, 进而使混凝土侧向约束力也增大。这表明在一定程度内适当增大框架柱端轴压力, 节点核心区的抗剪强度能够得到提高。



a) K-1 试件



b) K-2 试件



c) K-3 试件

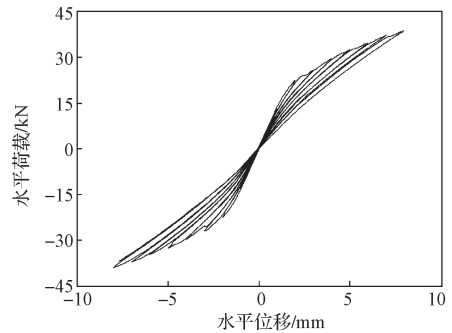
图 5 不同轴压比下各框架构件的应力图

Fig. 5 A stress diagram of framework components under different axial compression ratios

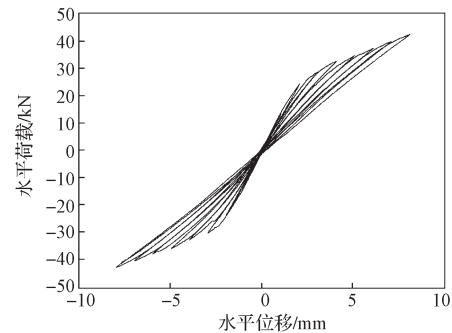
3.3 滞回曲线及骨架曲线

结构在低周往复荷载作用下得到的荷载 - 位移曲线图综合体现了其抗震性能。各框架试件的滞回曲线及骨架曲线如图 6 所示。由图可知, 滞回曲线图都呈反 S 型, 这反映了此次模拟的各框架试件在地震作用下受到滑移影响较大, 且各试件延性和吸能能力较差。K-2 试件比 K-1 试件的滞回曲线图饱满, 而

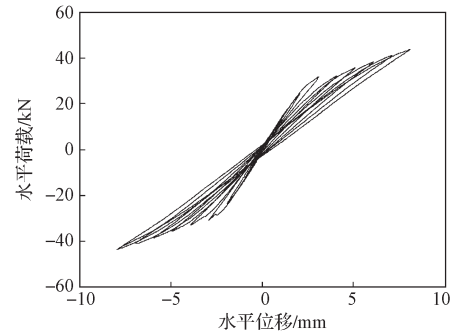
K-3 试件与 K-2 试件的滞回曲线饱满程度相差不大, 这说明轴压比在一定限值内提高框架柱端轴压力, 对于框架节点核心区的抗剪能力和耗能能力是有利的, 但提高轴压比超过这一范围, 则对构件的各项抗震性能影响并不明显。



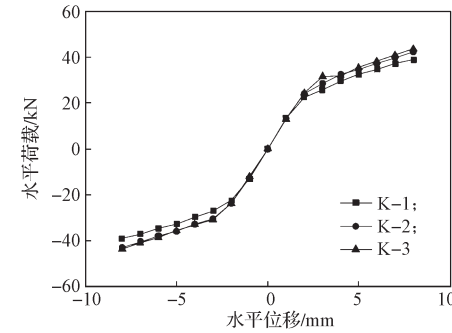
a) K-1 试件滞回曲线



b) K-2 试件滞回曲线



c) K-3 试件滞回曲线



d) 荷载 - 位移骨架曲线

图 6 滞回曲线及骨架曲线

Fig. 6 Hysteresis curve and skeleton curve

滞回曲线上的外包络连线称为骨架曲线, 骨架曲线能够作为衡量试件加载过程中力与变形间的关系。

由图 6d 可以看出, 框架试件 K-1 的骨架曲线覆盖面积小于 K-2 的, 而 K-2 的略小于 K-3 的并且几乎接近。这进一步说明, 在一定程度内提高框架试件的轴压比, 能够加强框架节点核心区混凝土的约束作用; 抗剪承载力、耗能能力亦能相应地提高, 从而节点的抗震性能得到改善。

3.4 位移延性

因为钢筋混凝土结构在遭遇地震时即进入塑性阶段, 此时结构产生的塑性变形能够吸收并耗散地震所带来的能量^[8], 因此延性可作为衡量构件抗震性能的依据之一。分析框架节点位移延性, 可采用公式计算位移延性系数的方法来表述, 公式为

$$\mu_d = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} = \frac{\text{极限位移}}{\text{屈服时的位移}}。$$

由滞回曲线图相应得到的骨架曲线, 再通过绘图法可以得到相应的柱端屈服位移 Δ_y 。各试件的延性系数及相关参数如表 2 所示。

表 2 各试件的延性系数及相关参数

Table 2 Ductility coefficient and related specimen parameters

试件编号	Δ_u/mm	Δ_y/mm	μ_d	位移延性降低程度/%
K-1	6.37	2.86	2.23	
K-2	5.52	2.64	2.09	6.3
K-3	4.31	2.38	1.81	13.4

由表 2 可知, 框架试件 K-3 的位移延性系数相比 K-2 降低约 13.4%, 试件 K-2 的位移延性相比 K-1 降低约 6.3%。这表明随着轴压比的提高钢筋混凝土框架节点的延性系数下降, 节点的脆性增强, 而延性性能降低对于节点抗震抗剪是不利的。

3.5 耗能能力

结构能够吸收地震时所释放的巨大能量, 即具有足够的耗能能力是保证其在地震作用下不倒塌的必要前提。耗能能力是衡量结构抗震性能的一个重要参数。为了研究框架试件的耗能能力, 采用 Celebl 和 Penzien 在研究中所采用的方法来表达构件的耗能能力, 即等效粘滞阻尼系数 h_e 。耗能计算简图见图 7, h_e 表达式^[9-10]为

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{S_{(ABC+CDA)}}{S_{(OBE+ODF)}}。$$

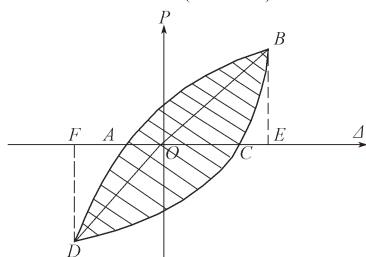


图 7 耗能计算简图

Fig. 7 A computing model energy consumption

各框架试件的 h_e 及相关参数见表 3。

表 3 各试件的 h_e 及相关参数

Table 3 Equivalent viscous damping coefficient and related specimen parameters

试件编号	轴压比	h_e	h_e 提高程度/%
K-1	0.3	0.065 7	
K-2	0.5	0.083 9	27.7
K-3	0.7	0.084 6	0.8

由表 3 可以看出轴压比分别为 0.3, 0.5, 0.7 时, 各等效粘滞阻尼系数模拟值分别约为 0.065 7, 0.083 9, 0.084 6。试件 K-2 的 h_e 相比于试件 K-1 的提高了 27.7%, 而 K-3 的比 K-2 的却只提高 0.8%。这说明随着轴压力的增大, 试件吸能能力、耗能能力都能够逐渐提高, 但当轴压比到达某一限值时, 提高轴压比对耗能能力的提高效果并不明显。

4 结论

通过对不同轴压比下钢筋混凝土框架节点的抗震性能进行数值模拟分析, 研究框架节点裂缝开展情况、滞回曲线、耗能性能、延性等的变化规律, 可得如下结论:

1) 在一定程度内, 随轴压比的增加, 框架节点核心区的受剪承载力随之增加, 并且起到约束节点核心区裂缝发展的作用, 在一定程度上框架节点的剪切变形被限制, 同时抗剪承载力、耗能能力相应提高。可见适当提高轴压比有利于提高框架结构的抗震性能, 然而随着轴压比的增加同时也增加了节点的脆性, 使得框架节点延性降低。

2) 框架节点的轴压比并不是越大越好, 选用适当的轴压比以及增加对核心区的配箍, 对提高框架节点的抗震性能是非常有效的。

参考文献:

- [1] 冯 远, 刘兰花, 易 勇, 等. 多层钢筋混凝土框架柱震害调查分析与启示 [J]. 土木工程学报, 2010, 43(10): 63-72.
FENG Yuan, LIU Lanhua, YI Yong, et al. Seismic Damages of Frame Columns in Multi-Storey Reinforced Concrete Buildings Investigation and Learning [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(10): 63-72.
- [2] 傅剑平, 张 川, 陈 滔, 等. 钢筋混凝土抗震框架节点受力机理及轴压比影响的试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2006, 27(3): 67-77.
FU Jianping, ZHANG Chuan, CHEN Tao, et al. Experimental Investigation of Shear Mechanism

(下转第 40 页)