

考虑轴向应变不均匀性的 RC 柱轴压性能研究

许鹏红^{1,2}, 刘亚³, 刘阳^{1,4}, 黄秋来², 黄群贤^{1,4}

- (1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 北京华巨建筑设计有限公司厦门分公司, 福建 厦门 361008;
3. 中国联合工程公司厦门分公司, 福建 厦门 361021;
4. 福建省结构工程与防灾重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要: 为评价变形不均匀性对钢筋混凝土(RC)柱轴向变形性能的影响,采用 MATLAB 编制计算程序,对 RC 柱在单调轴压工况下的荷载变形关系进行计算分析.通过与已有试验结果和有限元方法的对比,验证程序的合理性,并在此基础上进行参数分析.研究表明:是否考虑轴向变形不均匀,对 RC 柱峰值荷载所对应轴向变形的影响不明显,但是对 RC 柱极限荷载所对应变形的影响显著,最大差异可超过 50%.

关键词: 钢筋混凝土柱; 轴向应变; 不均匀; 轴压性能; 约束混凝土; 体积配箍率

中图分类号: TU 318

文献标志码: A

目前,国内外关于钢筋混凝土(reinforced concrete,RC)柱的轴压性能已经做了一系列的试验研究.1984 年,Mander^[1]对 RC 柱的轴压性能进行了大量的试验,试验参数包括圆形截面、方形截面和矩形截面的 RC 柱,得到了相应的应力-应变关系曲线.在此基础上,Mander 等^[2]又提出了不同截面和配箍形式的 RC 柱相应的约束混凝土本构模型.1993 年,Cusson 等^[3]进行了 50 个足尺高强混凝土的 RC 柱的轴压试验研究,研究了不同混凝土强度、纵筋配筋率以及箍筋间距对其性能的影响.杨勇新等^[4]对 7 个配置 HRBF 500 级钢筋混凝土柱进行了轴压试验,研究不同混凝土强度、配筋率和长细比对试件破坏形态、承载力的影响.刘阳等^[5-6]完成了 2 个 RC 柱和 4 个 CSRC 柱的轴压性能试验,研究不同配筋率和配箍特征值对试件轴压承载力和变形能力的影响.史庆轩等^[7]进行了 31 根高强螺旋箍筋约束高强混凝土方形截面柱的轴心受压试验,研究不同箍筋强度、箍筋间距、箍筋形式及截面尺寸对轴压性能的影响.关于 RC 柱轴压变形的计算,传统方法均假设其轴向压应变是均匀分布的,并取试件最不利截面进行分析得到试件的轴向变形.而实际上,由于箍筋约束的影响,不同截面处的轴向应变分布是不同的,传统方法计算结果与试件的实际轴向变形存在偏差.国内外学者在 RC 柱的加固方面也开展了一些研究^[8-9],额外增加的约束在一定程度上加剧了试件轴向应变的不均匀分布,但已有研究均未考虑其对试件轴向变形的影响.为评估传统方法对 RC 柱轴向变形计算的误差,本文考虑了 RC 柱轴向应变的不均匀性,编制 MATLAB 程序,在试验和有限元验证的基础上,进行了参数分析.

1 编程编制

将钢筋混凝土柱构件沿轴向划分为 N 段,共 $(N+1)$ 个截面,分别为箍筋所在截面、箍筋中部截面及上下底面,截面编号如图 1 所示.由图 1 可知:在相同轴力下,箍筋所在截面 $i-i$ 由于箍筋约束的影

收稿日期: 2014-05-14

通信作者: 刘阳(1982-),男,副教授,博士,主要从事工程结构抗震减灾的研究. E-mail: lyliuyang@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51208219);福建省科技重大项目(2013Y4006);福建省科技重点项目(2012Y0051);福建省泉州市科技计划项目(2012Z93)

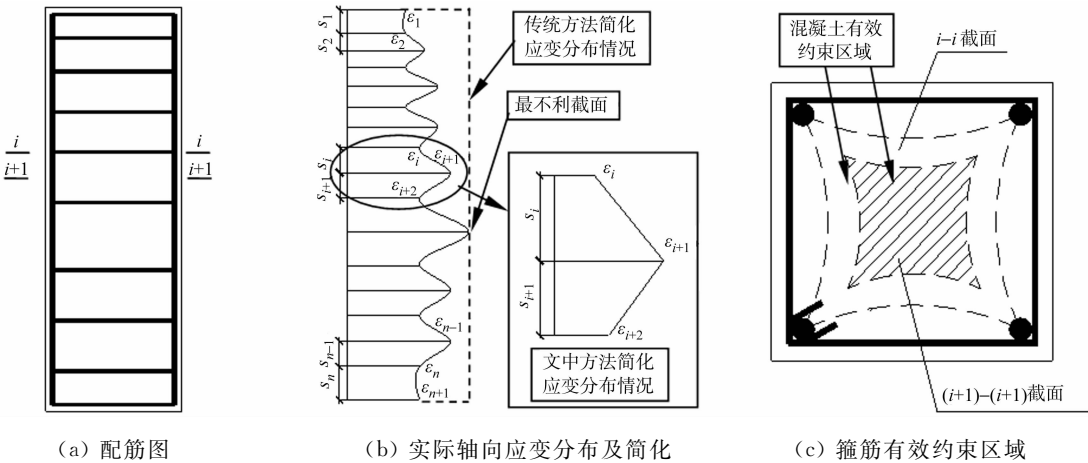


图 1 轴压 RC 柱轴向应变及截面受力示意图

Fig. 1 Axial strain and cross section of RC columns under axial compression

响较强,轴向应变较小,两道箍筋之间的截面 $(i+1)-(i+1)$ 受到的箍筋约束效应较弱,轴向应变较大.各截面的轴向应变连续变化,试件轴向变形即为应变沿轴向的积分.为了编程和计算方便,做以下假设:

- 1) 试件受均匀轴向压力,且各材料间变形协调,无相对滑移;
- 2) 不考虑试件端部约束的影响;
- 3) 相邻截面轴向应变线性变化,如图 1(b)所示;
- 4) 纵筋和箍筋采用理想弹塑性本构;
- 5) 混凝土划分为约束区和无约束区,如图 1(c)所示,无约束混凝土采用 Saenz 模型^[10],约束混凝土采用 Mander 模型^[2].

编程计算流程图,如图 2 所示.

无约束区混凝土承担的轴力 N_{co} ,约束区混凝土承担的轴力 N_{cc} 和纵筋承担的轴力 N_s 的计算式分别为

$$N_{co} = \sigma_{co} \cdot A_c, \tag{1}$$

$$N_{cc} = \sigma_{cc} \cdot A_c, \tag{2}$$

$$N_s = \sigma_s \cdot A_s. \tag{3}$$

式(1)~(3)中: σ_{co} 为无约束混凝土的应力; σ_{cc} 为约束混凝土相对于不考虑箍筋约束时的应力提高幅度; $\sigma_s = E_s \epsilon (\leq f_y)$ 为纵筋的应力; E_s 为纵筋弹性模量; ϵ 为轴向应变; f_y 为纵筋屈服强度; A_c 为混凝土的净截面积; A_e 为箍筋约束混凝土的有效约束面积; A_s 为纵筋的截面积. σ_{co}, σ_{cc} 计算式分别表示为

$$\sigma_{co} = \frac{E_0 \epsilon}{1 + (\frac{E_0}{E_s} - 2)(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}) + (\frac{\epsilon}{\epsilon_0})^2}, \tag{4}$$

$$\sigma_{cc} = \sigma_{co}(-2.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_1}{f_{co}}} - 2 \frac{f'_1}{f_{co}}). \tag{5}$$

式(4)~(5)中: E_0 为初始弹性模量; $E_s = \sigma_0 / \epsilon_0$ 为应力达峰值时的割线弹性模量; σ_0, ϵ_0 分别为应力达峰值时的应力和应变; f_{co} 为未约束混凝土的抗压强度; f'_1 为箍筋约束下的侧向有效约束应力.

2 算例验证

分别选取文献[11]中的试件 GC,BC 和文献[12]中的试件 RC1,RC2 进行计算对比. 分别采用文中

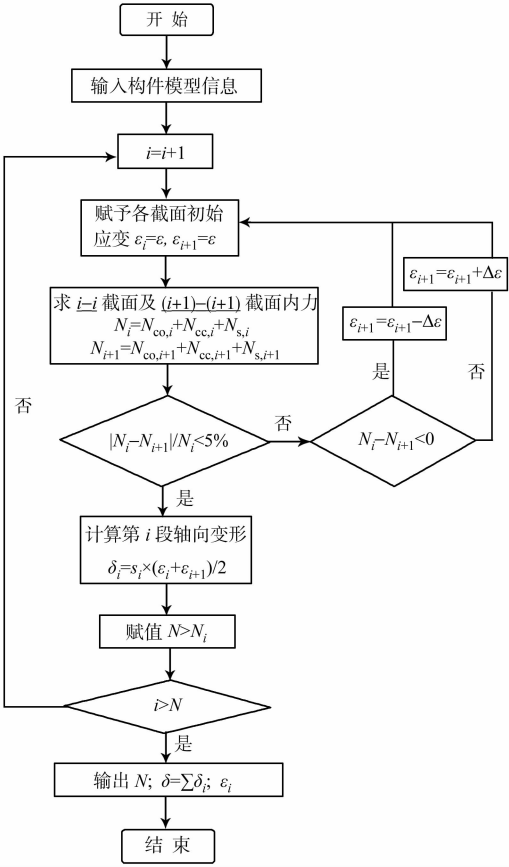


图 2 计算流程图
Fig. 2 Calculation flow chart

提出的方法、传统方法和 ABAQUS 计算试件的荷载(P)-位移(Δ)曲线,与试验结果的对比如图 3 所示。

由图 3(a),(b)可知:试件 GC,BC 的轴向变形通过量测加载端板间的相对变形得到,由于试验中存在不可避免的虚变形成分,如试件加载面的平整度、设备连接之间的虚变形、设备本身的弹性变形等,试验曲线的位移明显大于其他 3 种方法的计算结果。由图 3(c),(d)可见:试件 RC1,RC2 的轴向变形通过试件端部设置预埋件量测得到,避免了设备误差的影响,所得到的试件轴向变形与计算结果吻合良好。

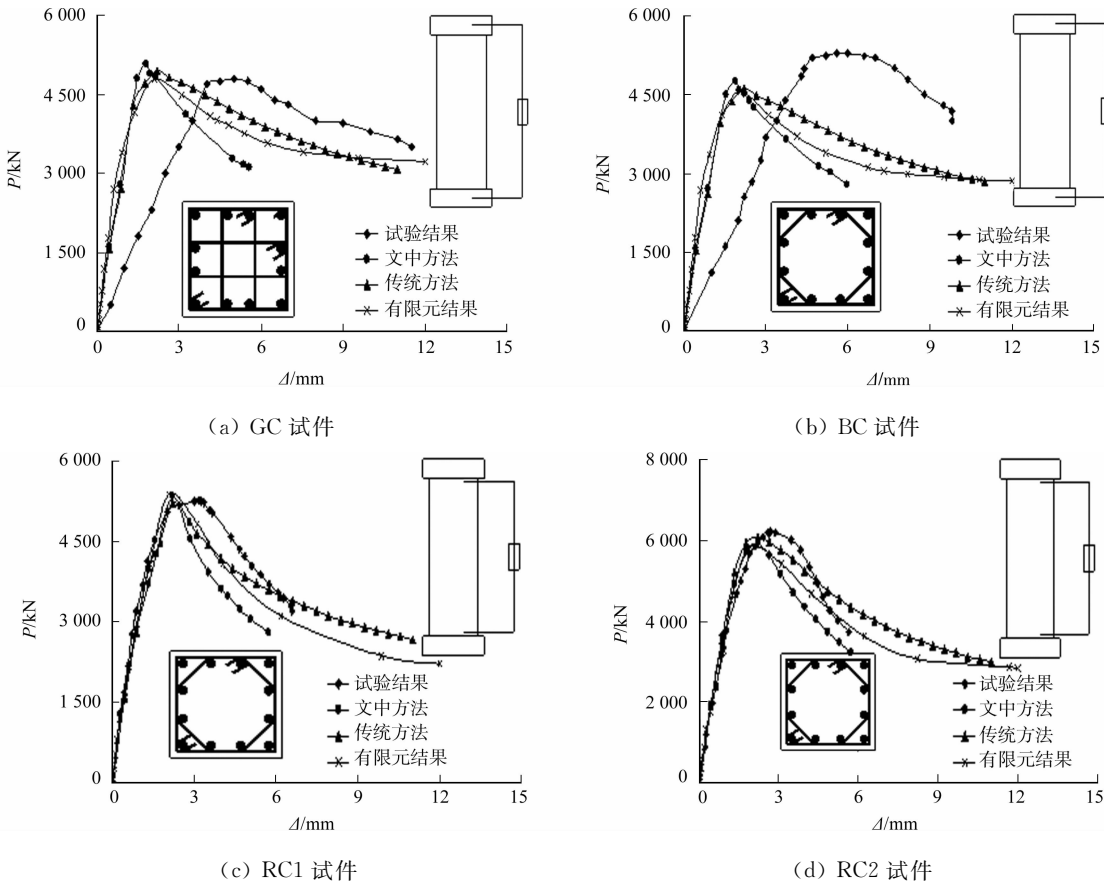


图 3 计算结果与试验结果的对比

Fig. 3 Comparison between experimental results and different calculation ones

考虑轴向应变不均匀计算所得试件的荷载位移曲线与传统方法计算结果相比,在峰值荷载之前,两者差别不大。超过峰值荷载之后,前者计算所得试件轴向变形小于后者,且两者的差异随加载历程的发展不断增大。前者计算变形与试验结果更加吻合,说明文中采用的计算方法合理可靠。ABAQUS 计算结果介于两种方法之间。

3 参数分析

对轴压 RC 柱轴向应变不均匀性影响最显著的因素是箍筋的构造形式,包括箍筋间距、箍筋直径、截面配箍形式和箍筋强度等级等。以一截面尺寸为 $400\text{ mm}\times 400\text{ mm}$,高度为 $1\,200\text{ mm}$ 的 RC 柱为研究对象进行参数分析,混凝土采用 C30,纵筋采用 HRB 335 级钢筋。荷载-位移曲线极限点(下降段上 80%峰值荷载对应点)处,文中方法与传统方法计算所得试件轴向变形的相对误差用符号 δ 表示。

3.1 箍筋间距的影响

箍筋间距(s)对 δ 的影响,如图 4 所示。采用八角复合箍,箍筋直径为 10 mm ,箍筋采用 HPB 300 级钢筋,箍筋间距分别采用 $50, 90, 130\text{ mm}$ 进行计算,纵筋为 $12\Phi 16$ 。由图 4 可知:箍筋间距越小,试件轴向应变不均匀性越明显,不考虑轴向应变不均匀性导致的计算误差越大, δ 最大可达 55.85% 。

3.2 箍筋直径的影响

箍筋直径(d)对 δ 的影响,如图 5 所示。采用八角复合箍,箍筋间距为 100 mm ,箍筋采用 HPB 300 级钢筋,箍筋直径分别采用 $8, 10, 12\text{ mm}$ 进行计算,纵筋为 $12\Phi 16$ 。由图 5 可知:箍筋直径越大,试件轴

向应变不均匀性越明显, δ 最大为 51.6%.

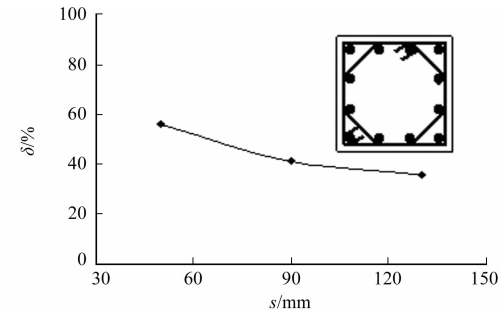


图 4 箍筋间距对轴向变形的影响
Fig. 4 Influence of stirrup spacing on axial deformation

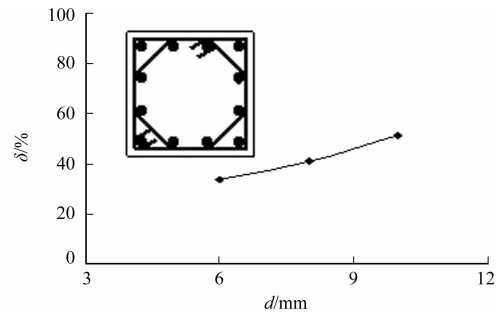


图 5 箍筋直径对轴向变形的影响
Fig. 5 Influence of stirrup diameter on axial deformation

3.3 截面配箍形式的影响

截面配箍形式对 δ 的影响,如图 6 所示. 箍筋截面形式为双肢箍、菱形复合箍和八角复合箍,箍筋采用 HPB 300 级钢筋,箍筋直径为 10 mm,间距为 100 mm. 由图 6 可知:八角复合箍对试件轴向变形不均匀性的影响最大, δ 值为 46.15%;双肢箍的影响最小, δ 值仅为 10.88%.

3.4 箍筋强度的影响

箍筋强度(f_{yv})对 δ 的影响,如图 7 所示. 采用八角复合箍,箍筋直径为 10 mm,箍筋间距为 100 mm,箍筋分别采用 HPB 300,HRB 400,HRB 500 级钢筋,对应屈服强度分别为 300,400,500 MPa,纵筋为 12 Φ 16. 由图 7 可知:随着箍筋强度的增大,试件轴向变形不均匀性越明显, δ 最大为 52.67%.

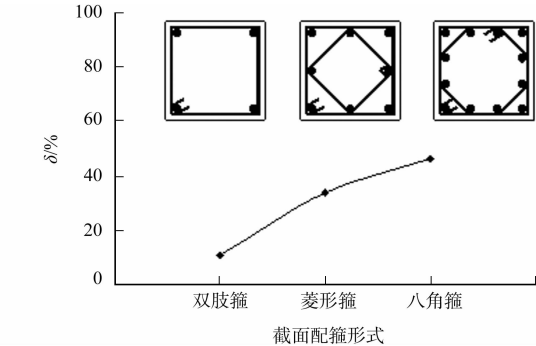


图 6 截面配箍形式对轴向变形的影响
Fig. 6 Influence of section stirrup form on axial deformation

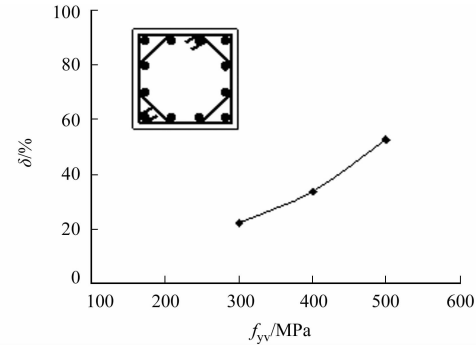


图 7 箍筋强度对轴向变形的影响
Fig. 7 Influence of stirrup strength on axial deformation

4 结论

- 1) 文中方法可以合理准确地计算 RC 柱的轴压荷载-变形曲线,相对于传统方法,文中方法的计算结果与试验结果和有限元分析结果整体更加吻合.
- 2) 轴压 RC 柱考虑轴向应变不均匀计算所得变形在峰值荷载之前,与不考虑轴向应变不均匀计算结果差别不明显,超过峰值荷载后,前者计算结果小于后者,两者差别随试件弹塑性的发展不断增加.
- 3) 箍筋间距越小、箍筋直径越大、箍筋强度越大,其对试件轴向应变不均匀性的影响越明显.
- 4) 八角复合箍对试件轴向应变不均匀性的影响要强于菱形复合箍和双肢箍,双肢箍的影响最小.

参考文献:

[1] MANDER J B. Seismic design of bridge piers[D]. New Zealand:University of Canterbuty,1983;96-257.
[2] MANDER J B,PRIESTLEY M J N,PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. Journal of Structure Engineering,1988,114(8):1804-1826.
[3] CUSSON D,PAULTRE P. Stress-strain model for confined high-strength concrete[J]. Journal of Structure Engi-

neering,1995,121(3):468-477.

[4] 杨勇新,赵进阶,岳清瑞,等. HRCBF500 钢筋混凝土柱轴压试验研究[J]. 工业建筑,2009,39(11):26-28.

[5] 刘阳,郭子雄,谢吓弟. 核心型钢混凝土柱轴压性能试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2007,39(增刊 2):137-141.

[6] 谢吓弟,郭子雄,刘阳. CSRC 柱轴压性能试验及非线性全过程分析[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2008,29(4):584-587.

[7] 史庆轩,杨坤,刘维亚,等. 高强箍筋约束高强混凝土轴心受压力学性能试验研究[J]. 工程力学,2012,29(1):141-149.

[8] 郭子雄,曾建宇,黄群贤,等. 预应力钢板箍加固 RC 柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2012,33(11):124-131.

[9] BERTHET J F,FERRIER E,HAMELIN P. Compressive behavior of concrete externally confined by composite jackets. Part A: Experimental study[J]. Construction and Building Materials,2005(19):223-232.

[10] SAENZ L P. Discussion of equation for the stress strain curve of concrete[J]. ACI Journal,1964,61(12):1229-1235.

[11] 袁彬. 高强约束足尺 RC 柱轴压性能试验研究[D]. 厦门:华侨大学,2011:23-46.

[12] 许鹏红. 核心型钢混凝土柱轴压性能试验研究[D]. 厦门:华侨大学,2013:9-53.

Study on the Axial Compression Performance of RC Columns Considering the Nonuniformity of Axial Strain

XU Peng-hong^{1,2}, LIU Ya³, LIU Yang^{1,4},
HUANG Qiu-lai², HUANG Qun-xian^{1,4}

- (1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Beijing VAGE Architechture Designing Company Limited (Xiamen Branch), Xiamen 361008, China;
3. China United Engineering Company, Xiamen 361021, China;
4. Key Laboratory for Structural Engineering and Disaster Prevention of Fujian Province, Xiamen 361021, China)

Abstract: The load-deformation relationship of reinforced concrete (RC) columns under monotonic axial load was analyzed by calculation program writing of MATLAB to evaluate effect of axial deformation nonuniformity on the axial deformation performance of RC columns. The program was validated by comparison between existed experimental results and calculation results by FEM method. The parametric study was then carried out. It is indicated that the influence of axial deformation nonuniformity on the axial deformation corresponding to the peak load is not obvious, while the influence on the ultimate axial deformation is remarkable, the maximum difference can be more than 50%.

Keywords: reinforced concrete column; axial strain; nonuniformity; axial compressive performance; confined concrete; stirrup ratio

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 方德平)