

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.02.011

十字形钢筋混凝土轴心受压柱三维 非线性数值模拟分析

胡海燕, 刘忠, 陈根, 刘杰
(湘潭大学 土木工程与力学学院, 湖南 湘潭 411105)

摘要: 异形柱以其明显优势在我国得到广泛应用。为了研究十字形钢筋混凝土轴心受压柱的性能, 以拟静力试验为基础, 采用有限元分析方法建立有限元模型, 选取 Mander 约束本构模型, 对轴心受压情况下的十字形钢筋混凝土柱进行力学性能分析, 讨论了箍筋间距、混凝土强度、配筋率等因素对十字形钢筋混凝土柱力学性能的影响。结果表明箍筋间距、混凝土强度和配筋率对十字形钢筋混凝土柱受力性能的影响都较大。

关键词: 十字形钢筋混凝土柱; 数值模拟; 本构模型

中图分类号: TU375.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2017)02-0060-05

Three Dimensional Nonlinear Numerical Simulation Analysis of Cross Shaped Reinforced Concrete Column Under Axial Loading

HU Haiyan, LIU Zhong, CHEN Gen, LIU Jie

(College of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan, Hu'nan 411105, China)

Abstract: Special shaped columns have been widely used in our country because of their obvious advantages. In order to study the performance of reinforced concrete columns under axial compression, based on the quasi static test, this paper established finite element model by finite element analysis. Mander constitutive model was used to analyze the mechanical properties of cross shaped reinforced concrete column under axial compressive loads, and the influence of stirrup spacing, strength of concrete and concrete reinforcement ratio on the mechanical performance of cross shaped reinforced concrete column were discussed. The results show that stirrup spacing, strength of concrete and concrete reinforcement ratio have great influence on the stress performance of cross shaped concrete column.

Keywords: cross shaped reinforced concrete columns; numerical simulation; constitutive model

截面几何形状为 T 形、L 形和十字形, 且截面各肢的肢长与其厚度之比不大于 4 的柱, 称为异形柱^[1]。异形柱近年来在我国得到较广泛地应用。天津大学孙林柱等^[2]人进行了关于异形柱的试验研究。

本文针对十字形钢筋混凝土轴心受压柱的受力性能, 采用有限元分析方法进行三维有限元非线性数值模拟分析, 探讨箍筋间距、混凝土强度、配筋率等因素对其力学性能的影响^[3-14]。

1 有限元数值模拟分析

1.1 数值模型建立

根据孙林柱等^[2]人对十字形钢筋混凝土轴心受压柱的试验, 试件加载装置和配筋如图 1 和图 2 所示。

应用有限元分析软件 ABAQUS, 建立了三维有限元模型, 如图 3 所示。该模型以柱底截面形心为坐标原点, Z 轴方向为柱的高度方向, 轴向荷载施加

在截面形心处。在柱的两端分别设置了刚性垫板,以避免柱端因应力集中导致局部损坏严重。在柱底端施加 X、Y、Z 方向的约束,在柱顶端施加 X、Y 方向的约束。

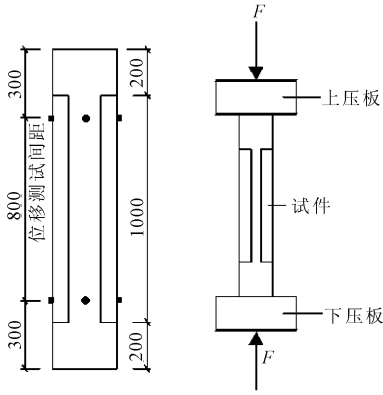


图 1 试件加载装置示意图

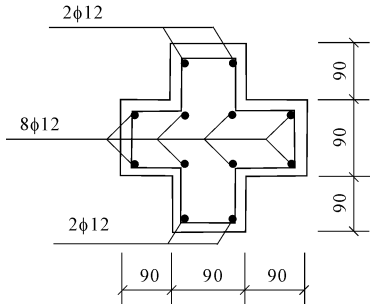


图 2 试件配筋图

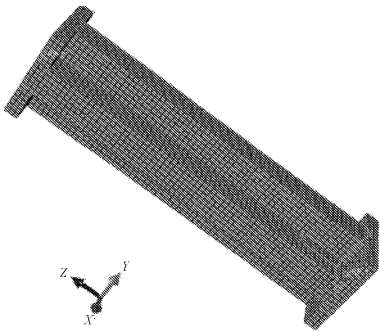


图 3 有限元模型

钢筋本构关系采用理想弹塑性本构关系。混凝土的本构关系采用 Mander J B^[15]本构模型,其关系式为:

$$\sigma_c = \frac{f'_{pc} x r}{r - 1 + x^r} \quad (1)$$

其中:

$$x = \frac{\epsilon_c}{\epsilon'_{pc}}; r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}}; E_{sec} = \frac{f_{pc}}{\epsilon'_{pc}}$$

式中: f'_{pc} 是约束混凝土峰值应力; f_{pc} 是无约束混凝土轴心抗压强度; ϵ'_{pc} 是约束混凝土达到的最大压

应变; E_c 是混凝土弹性模量。

采用上述模型,针对十字形钢筋混凝土轴心受压柱,进行有限元数值分析,得到了荷载 - 应变曲线,如图 4 所示。计算结果与试验曲线的趋势一致,基本吻合。

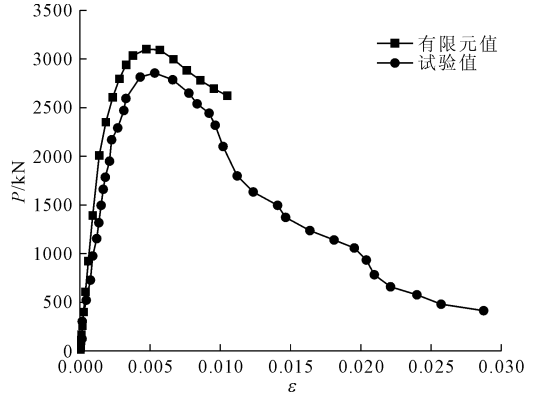


图 4 荷载 - 应变曲线

1.2 受力性能分析

1.2.1 正截面应力分析

不同荷载作用下,柱中截面($Z = 500 \text{ mm}$)处混凝土和钢筋的应力分布,如图 5 所示。

由图 5 可知,在十字形钢筋混凝土柱在轴心荷载加载初期,钢筋还未达到屈服强度,箍筋对混凝土的约束作用还不明显,保护层和核心混凝土的应力基本一致,截面应力分布十分均匀。而随着荷载的增加,钢筋达到受压屈服强度,混凝土截面应力呈现截面中央和指向截面角部的延伸区域应力较大,混凝土截面周边区域及箍筋直线段中部的附近区域的应力较小的现象。这种现象形成的主要原因是因为随荷载增加其核心混凝土的横向膨胀,变形使箍筋的直线段产生水平弯曲,由于箍筋的抗弯刚度较小,它对核心混凝土的反作用力也较小,所以箍筋的直线段中部附近的应力较小,而箍筋的转角部刚度大,变形小,两个垂直方向的拉力合成对核心混凝土对角线方向的产生强力约束,导致箍筋转角部位和混凝土截面中央区域应力较大。

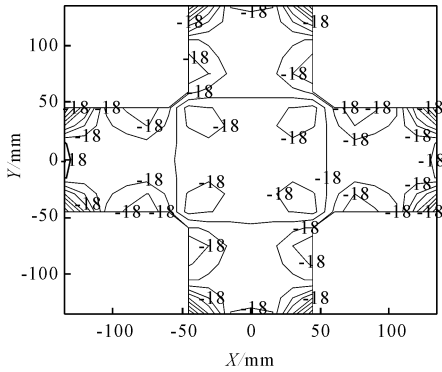
1.2.2 混凝土变形分析

柱中截面($Z = 500 \text{ mm}$)处混凝土横向(X 方向)位移分布,如图 6 所示。

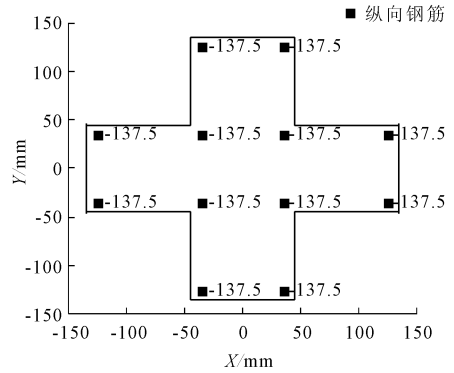
由图 6 可知,十字形钢筋混凝土柱在轴向荷载作用下,柱中截面处 X 方向位移沿 Y 轴对称分布,混凝土向外横向膨胀,且变形值以 $Y = 0$ 为中轴线向两侧按梯度增大。

混凝土($Y = 135, Y = 0$)横向应变沿柱身高度方

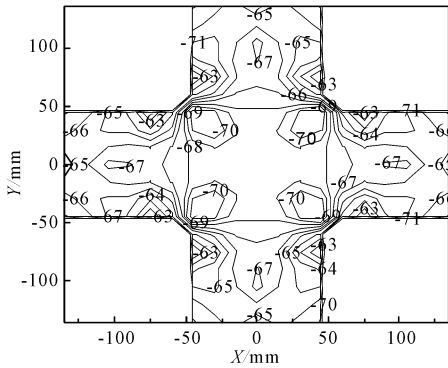
向分布,如图 7 所示。



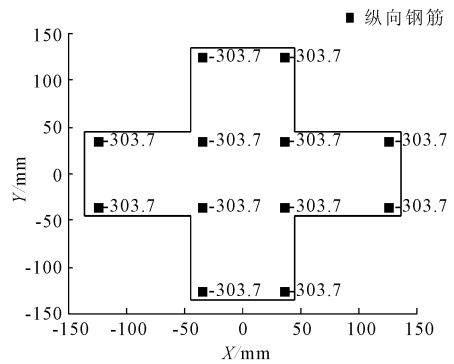
(a) 921 kN混凝土纵向应力分布



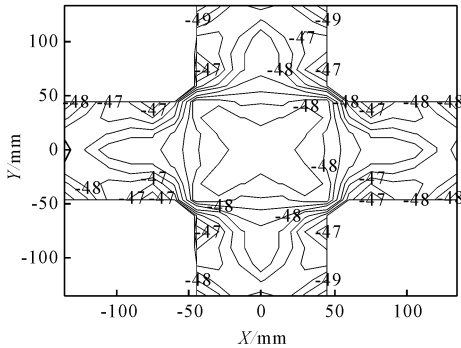
(b) 921 kN纵筋应力分布



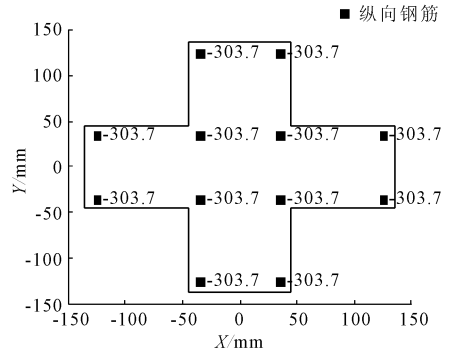
(c) 2351 kN混凝土纵向应力分布



(d) 2351 kN纵筋应力分布



(e) 3105 kN混凝土纵向应力分布



(f) 3105 kN纵筋应力分布

图 5 十字形钢筋混凝土轴压柱横截面轴向应力分布图

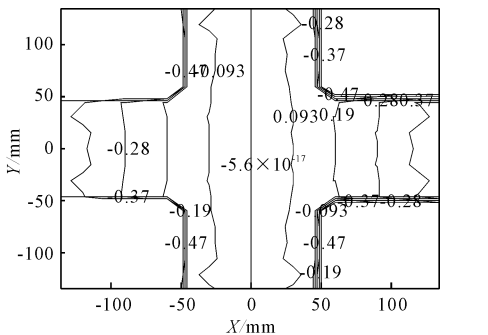


图 6 混凝土截面横向位移

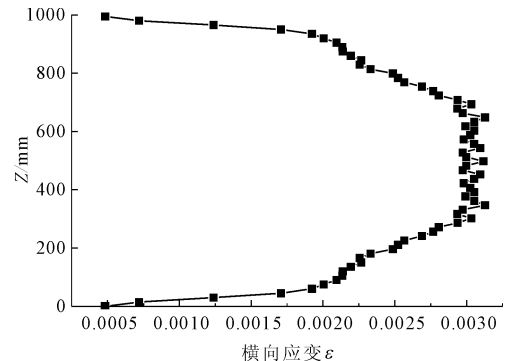


图 7 混凝土轴向应变沿柱高方向分布

由图 7 可知,由于柱端的约束作用,混凝土横向应变在两端较小,而柱身中部位置的应变较两端大,且以柱身中部为对称轴呈对称分布。这与轴心受压柱的变形特征一致,柱身中部变形最大,向外曲屈并外鼓最终呈灯笼状破坏。

2 参数分析

2.1 箍筋间距的影响

不同箍筋间距下荷载 - 纵向位移曲线如图 8 所示。由图 8 可知,箍筋间距对十字形钢筋混凝土轴心受压柱承载能力有一定影响。

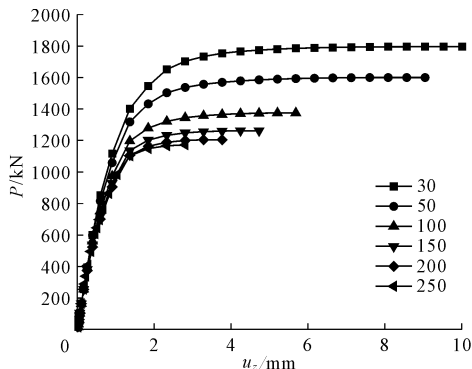


图 8 箍筋间距对荷载 - 纵向位移曲线的影响

极限承载力随箍筋间距的变化如图 9 所示。由图 9 可知,当箍筋间距从 250 mm 减少到 150 mm 的过程中,箍筋间距的减少对极限承载力的影响较小,其强度增加不明显。当箍筋间距从 150 mm 减少到 30 mm 的过程中,极限承载力和纵向位移明显增大。故对于十字形钢筋混凝土轴心受压柱而言,当箍筋间距在少于 150 mm 的范围内,减少箍筋间距箍筋的约束作用增强明显,能提高其强度和改善延性性能,当箍筋间距在大于 150 mm 的范围内减少箍筋间距对其强度和延性性能影响不大。

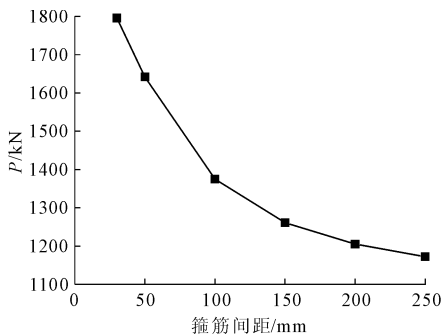


图 9 极限承载力随箍筋间距的变化

2.2 混凝土强度的影响

不同混凝土强度荷载 - 纵向位移如图 10 所示。

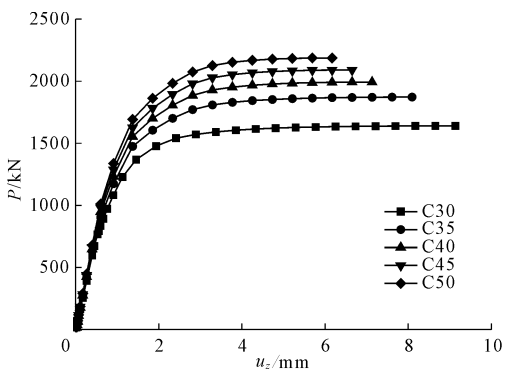


图 10 混凝土强度对荷载 - 位移曲线的影响

由图 10 可知,随着混凝土强度等级的增加,极限荷载承载力值不断增加,纵向位移逐渐减小。混凝土强度从 C30 增加至 C50,其承载力提高的幅度达 31.2%。产生以上现象的主要原因是混凝土强度越高,其弹性模量就越大,则应力应变比越大,脆性性质越明显。

2.3 配筋率的影响

不同配筋率下荷载 - 纵向位移曲线如图 11 所示。

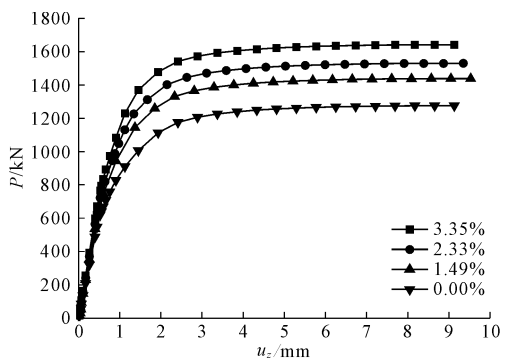


图 11 配筋率对荷载 - 纵向位移曲线的影响

由图 11 可知,随着配筋率的不断增加,十字形钢筋混凝土轴心受压柱的承载能力也在不断提高,但在这四种不同配筋率情况下,其纵向位移基本不变。说明十字形钢筋混凝土柱随着配筋率的增加,对纵向位移影响可以忽略。

3 结 语

本文对十字形钢筋混凝土轴心受压柱进行有限元分析得到:

(1) 十字形钢筋混凝土轴心受压柱在加载初期,箍筋对混凝土的约束作用较小,混凝土截面应力分布均匀,随荷载增加,箍筋约束作用增强,由于箍筋的直线段抗弯刚度比箍筋的转角部刚度小,导致

混凝土截面应力呈现截面中央和指向截面角部的延伸区域应力较大,混凝土截面周边区域及箍筋直线段中部的附近区域的应力较小。

(2) 在轴压作用下,箍筋间距小于 150 mm 时,随箍筋间距减少,对混凝土提供的 55 约束作用越明显,当箍筋间距较大时,箍筋对混凝土提供的约束作用不大。

(3) 在轴压作用下,随着混凝土强度的提高,十字形钢筋混凝土轴心受压柱的承载能力提高,相应的纵向位移减少,脆性性质明显越明显。

(4) 在轴压作用下,随着配筋率的提高,十字形钢筋混凝土轴心受压柱的承载能力提高,但对纵向位移影响不大。

参考文献:

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土异形柱结构技术规程: JGJ149-2006[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.

[2] 孙林柱. 钢筋混凝土异形柱轴心受压性能的试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.

[3] 沈蒲生. 异形柱结构设计与施工[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.

[4] 卢怡思, 张耀庭. 基于 ABAQUS 的钢筋混凝土柱非线性有限元分析[J]. 第 22 届全国结构工程学术会议论文集第 II 册, 2013: 83-91.

[5] 徐亚丰, 白首晏, 刁晓征. 异形截面钢骨钢管混凝土柱技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010.

[6] 苏德利, 曹菲. 十字形钢筋混凝土异形柱非线性全过程分析[J]. 沈阳建筑大学学报, 2010, 26(5): 920-924.

[7] 陈叶, 刘忠, 李佩, 等. L 形混凝土偏心受压柱力学性能数值分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(3): 167-171.

[8] 李佩, 刘忠, 李科峰, 等. 钢筋混凝土轴心受压 T 形柱力学性能研究[J]. 工程建设与设计, 2016, 8(5): 41-44.

[9] 陈兰响, 关萍, 刘晴晴, 等. 基于 ABAQUS 分析型钢-圆钢管混凝土的力学性能[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(2): 15-19.

[10] 谭良斌, 刘忠, 朱勇光, 等. 带约束拉杆 L 形钢管混凝土轴压柱受力性能分析[J]. 土木工程与管理学报, 2012, 29(4): 70-74.

[11] 张继承, 吕行, 吴胜, 等. L 形钢管混凝土柱-钢梁框架受力性能有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(S1): 27-33.

[12] 刁晓征, 徐亚丰. 十字形钢骨混凝土异形柱偏心受压试验研究[J]. 建筑钢结构进展, 2011, 13(2): 44-50.

[13] 徐亚丰, 侯晓曦. 偏压作用下 L 形钢骨混凝土异形柱的非线性分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 26(3): 511-516.

[14] 刘鸿文. 材料力学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2010.

[15] Mander J B, Priestley M J N, Park R. Theoretical stress-strain model for Confined concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1804-1826.

(上接第 59 页)

[7] 吴良骥, Bloomaburg G L. 饱和一非饱和区中渗流问题的数值模型[J]. 水利水运科学研究, 1985(2): 1-12.

[8] 朱岳明, 龚道勇. 三维饱和非饱和渗流场求解及其逸出面边界条件处理[J]. 水科学进展, 2003, 14(1): 67-71.

[9] Marinoschi G. A free boundary problem describing the saturated-unsaturated flow in a porous medium[J]. Abstract and Applied Analysis, 2004(9): 729-755.

[10] 李援农, 林性粹. 均质土壤积水入渗的气阻变化规律及其影响[J]. 水土保持学报, 1997, 3(3): 89-93.

[11] 张华, 吴争光. 封闭气泡对一维积水入渗影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(S2): 132-137.

[12] Borsi I, Farina A, Primicerio M. A rain water infiltration model with unilateral boundary condition: qualitative analysis and numerical simulations[J]. Mathematical Methods in the Applied Sciences, 2006, 29(17): 2047-2077.

[13] 刘刚, 童富果, 习念念, 等. 通气和封气条件下降雨对粘性土入渗速率、含水率及孔隙压力的影响试验[J]. 水电能源科学, 2015, 33(12): 19-21.

[14] Tong F, Niemi A, Yang Z, et al. A numerical model of tracer transport in a non-isothermal two-phase flow system for CO₂ geological storage characterization[J]. Transport in Porous Media, 2013, 98(1): 173-192.

[15] Carrick S, Buchan G, Almond P, et al. Atypical early-time infiltration into a structured soil near field capacity: The dynamic interplay between sorptivity, hydrophobicity, and air encapsulation[J]. Geoderma, 2011, 160(3/4): 579-589.

[16] 付建新, 宋卫东, 杜建华. 考虑二维降雨入渗的非饱和土边坡瞬态体积含水率分析[J]. 工程科学学报, 2015, 37(4): 407-413.