

文章编号: 1673- 9469(2011) 02- 0019- 05

配置高强箍筋混凝土柱承载力数值分析

阴寅宏^{1,2}, 杨德健^{1,2}, 王玉良^{1,2}

(1. 天津城市建设学院 土木工程系, 天津 300384; 2. 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384)

摘要:通过对 6 根配置不同强度、不同箍筋间距的高强混凝土柱在轴向压力作用下进行非线性有限元数值模拟, 研究了混凝土轴压柱应力—应变关系曲线和裂缝开展规律、箍筋约束混凝土的机理、箍筋间距和箍筋强度对混凝土轴压柱承载力的影响。结果表明: 伴随着箍筋间距的加密和箍筋强度的提高, 混凝土柱的承载力和峰值应变有着显著的提高。

关键词: 高强混凝土; 高强螺旋箍筋; 应力—应变曲线; 裂缝; 配箍率

中图分类号: TU 375. 3

文献标识码: A

FE analysis of concrete columns capacity confined by high- strength spiral stirrup

YIN Yin-hong^{1,2}, YANG De-jian^{1,2}, WANG Yu-liang^{1,2}

(1. Department of Civil Engineering of Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin, 300384, China;

2. Tianjin Key Laboratory Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, Tianjin, 300384, China)

Abstract: Based on FE Analysis of six high- strength concrete columns confined by different intensity and different spacing spiral stirrup under axial pressure, the specimen stress- strain relationship curves and crack propagation rules were researched. Confining mechanism of spiral stirrup was discussed. And then the effect of the spacing and strength of stirrup were analyzed based on the numerical results. The results show that the bearing capacity and peak strain increase significantly with the stirrup ratio and stirrup strength increase.

Key words: high- strength concrete; high- strength spiral stirrup; stress- strain curves; crack; ratio of hoops

近年来, 随着混凝土结构应用领域的不断扩展, 建筑物的特点向更高、跨度更大、荷载更重的方向发展, 对混凝土结构的要求相应提高。研究表明^[1], 使用高强混凝土可以减少受压构件的截面面积, 并且减轻结构自重、节省材料、增加建筑使用空间等。但是混凝土强度越高, 脆性越大, 对抗震造成不利影响。若使用高强混凝土作为材料, 在配置强度较低的普通箍筋时, 在地震作用下, 混凝土破碎, 箍筋屈服, 甚至是被拉直, 松扣, 失去约束作用, 而纵向钢筋被压屈, 向外鼓出呈灯笼状破坏。但利用高强螺旋箍筋约束高强混凝土可以有效的提高其抗压承载力, 改变其破坏形态, 改善其抗震性能, 增强其横向约束作用, 保证其有

良好的变形和耗能性能。目前研究普通箍筋较多, 高强螺旋箍筋还较少, 而且试验方法、试验仪器与测量手段不统一, 因此各个研究分析结果具有一定的适用范围和局限性。本文将利用大型有限元分析软件 ANSYS 对 6 根配有螺旋箍筋约束高强混凝土轴压柱进行数值模拟的仿真分析, 分析了箍筋强度和箍筋间距对轴压柱的受力性能、裂缝开展和约束能力的影响, 为工程应用提供理论依据。

1 构件设计

试验构件选取 6 个 200mm× 200mm× 600mm

收稿日期: 2010- 12- 17

作者简介: 阴寅宏(1986-), 男, 天津人, 硕士研究生, 从事混凝土结构、工程抗震的研究。

表1 试件参数

Tab. 1 Specimen parameters

试件编号	尺寸/mm	箍筋强度/MPa	纵筋强度/MPa	箍筋间距/mm	配箍率/%	配筋率/%
试件 1	200×200×600	350	350	20	2.826	0.872
试件 2	200×200×600	1150	350	20	2.826	0.872
试件 3	200×200×600	1150	800	20	2.826	0.872
试件 4	200×200×600	350	350	60	0.942	0.872
试件 5	200×200×600	1150	350	60	0.942	0.872
试件 6	200×200×600	1150	800	60	0.942	0.872
试件 7	150×150×450	711	235	50	1.720	0.993

以及 1 个 150mm×150mm×450mm 的螺旋箍筋约束高强混凝土短柱模型,混凝土等级取 C80,箍筋和纵筋直径分别选取 6mm 和 10mm,其中试件 7 与文献[2]的试件参数相同,以验证模型的正确性。试件配筋如图 1 所示,试件参数如表 1 所示。

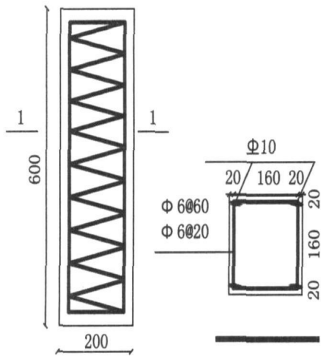


图1 试件配筋

Fig.1 Reinforcement of specimen

2 有限元模型建立

2.1 混凝土和钢筋单元

混凝土采用 Solid65 单元和专门的材料模型 Concrete 来实现,钢筋单元采用 Link8 单元。考虑到钢筋和混凝土之间粘结较好,两者之间不会有相对滑移,故使用分离式模型。

2.2 本构模型

通过分析中外学者提出的几种有代表性的约束混凝土模型,选用文献[2-4]提出的多线性等向强化(MISO+Concrete)模型,其应力-应变表达式为

$$\text{峰值应力 } \frac{f_{cc}}{f_c} = 1 + 1.2459 \left(\frac{f_{lc}}{f_c} \right)^{0.4647} \quad (1)$$

$$\text{峰值应变 } \frac{\epsilon_c}{\epsilon_c} = 1 + 35.458 \left(\frac{f_{lc}}{f_c} \right)^{0.9839} \quad (2)$$

$$\text{全曲线方程 } f_r = f_{cc} \left[\frac{\alpha (\epsilon_r / \epsilon_c)}{\alpha - 1 + (\epsilon_r / \epsilon_c)^\alpha} \right] \quad (\epsilon \leq \epsilon_c) \quad (3)$$

$$f_r = f_{cc} \cdot \exp[k_1 (\epsilon - \epsilon_c)^{k_2}] \quad (\epsilon_r \geq \epsilon_c) \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{E_s}{E_c - \left(\frac{f_{cc}}{\epsilon_c} \right)} \quad (5)$$

式中 f_{cc} 、 f_c —约束与非约束混凝土的峰值强度; ϵ_c 、 ϵ —约束与非约束混凝土的峰值应变; f_{lc} —约束混凝土达到峰值强度时对应的箍筋有效侧向约束力; α —控制曲线初始刚度和上升段的系数; k_1 、 k_2 —控制曲线下降段坡度和凸凹的系数。

钢筋为理想弹性塑性结构,使用经典的双线性随动强化(BKIN)模型^[5]。其应力-应变表达式为 $\epsilon < \epsilon_s$ 时, $\sigma_s = E_s \epsilon_s$; 当 $\epsilon_s = \epsilon$ 时, $\sigma_s = f_s$ 。式中 E_s —钢筋的弹性模量; f_s —钢筋的抗拉强度设计值。

3 数值模拟及分析

3.1 实体建模及网络划分

按照试件配筋图及试件参数表,按照自底向上构造实体模型。划分单元后,取柱的底端为固定段,施加三向约束,在柱顶面上以等位移方式施加荷载。

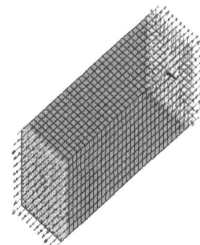


图2 试件模型

Fig.2 Specimen model

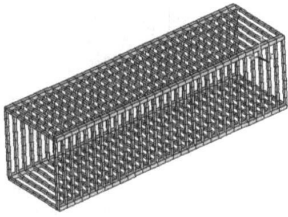


图3 钢筋有限元模型

Fig.3 Finite element model of reinforced

经过对试件节点的非线性有限元模拟及分析, 试件 7 柱底部峰值应力达到 74.5MPa, 所对应的应变为 4.2×10^{-3} , 而文献[2]中相同试验构件的应力值和应变值分别为 72.4MPa 和 3.8×10^{-3} , 两者差别不大, 即承载力和变形的计算与实验结果吻合较好, 证明模型建立过程正确, 作为实际构件的简化分析其结果是有效可靠的。

3.2 应力-应变关系分析

构件的应力-应变曲线见图 4, 由曲线的趋势可以明显看出, 加载初期, 应力应变均成正比递增, 比值约为混凝土的初始弹性模量。随着荷载的加大, 柱开始出现塑性变形, 曲线微凸, 但由于混凝土的泊松比不是很大, 在试件应力未达到素混凝土抗压强度之前, 箍筋未发挥其约束效应, 所以在此阶段, 各个试件的曲线都很相似。继续施加荷载, 混凝土的强度超过素混凝土抗压强度, 箍筋的约束作用开始发挥。此后, 各试件的上升段存在明显的差异, 其中试件 4 很快达到屈服, 其峰值应变只达到 3.2×10^{-3} 左右, 而试件 5 和试件 6

的曲线非常相似, 在应变接近 4×10^{-3} 时进入屈服阶段, 峰值应力达到 60MPa 左右, 承载力好于试件 4, 说明高强度的箍筋较之普通箍筋更能有效地对混凝土进行横向约束, 对提高承载力有一定作用。试件 1 峰值应变约为 5×10^{-3} , 此时处于屈服阶段, 有下降的趋势, 而同样配箍率的试件 2 和试件 3, 其应力应变曲线虽越发平缓, 但却仍未达到屈服阶段, 且试件 3 峰值应力还要略大于试件 2, 二者均体现出了非常良好的变形能力。总之, 从试件中可以看出, 当配箍率相同时, 配有高强箍筋约束的混凝土柱, 其承载力明显高于配置普通箍筋的混凝土柱; 而密排箍筋, 混凝土柱的峰值强度有着非常明显的提高, 且当密排箍筋为高强度箍筋时, 其变形能力能够达到最佳, 这与以往的实验研究比较吻合。

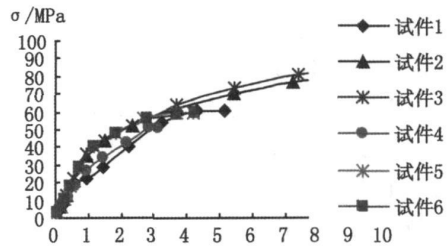


图4 各试件应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curve of every specimen

4 构件裂缝的开展分析

通过对 6 个构件的分析, 选取试件 2 和试件 5 的裂缝图(见图 5) 进行分析。

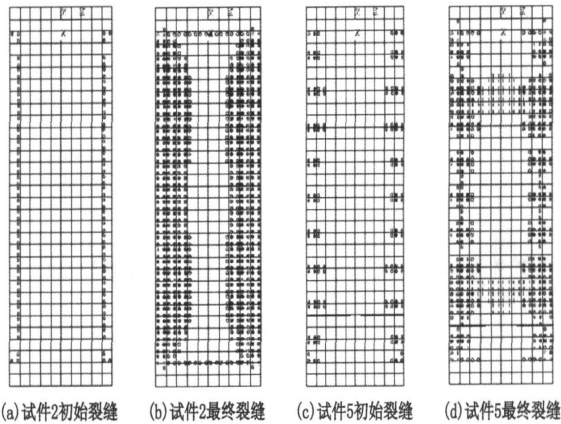


图5 试件2和试件5的裂缝开展

Fig.5 Crack development of specimens 2 and 5

混凝土作为一种脆性材料,其塑性变形是材料内部裂纹不断发生、发展而积累的过程,其在承受轴压荷载产生压缩变形的同时,将产生横向的拉伸变形。在混凝土开裂以后,由于轴向裂缝的不断扩展、累积而使横向变形急剧增长,而钢筋混凝土的约束作用主要由螺旋箍筋提供,加密螺旋箍筋可以增大对混凝土的横向约束,形成较强的套箍效应。套箍效应以箍筋屈服时的配箍特征值 $\lambda = \rho f_y / f_c$ 表示,其中 λ 又称套箍指数, ρ 为体积配箍率, f_y 为箍筋屈服强度, f_c 为混凝土抗压强度, λ 值愈大,则套箍效应愈强。套箍约束作用主要发生在荷载接近素混凝土峰值压应力以后,并伴随混凝土纵向开裂及横向变形的增加而不断增长。因此,当混凝土强度增加使 λ 值降低时,使用密排高强螺旋箍筋可以弥补 λ 值降低造成的影响,有效的约束混凝土的横向变形,阻止裂缝向核心混凝土发展,延缓试件的破坏^[6-9]。

通过观察试件 2 的裂缝图可知,在试件接近于破坏荷载之前,最初在边缘处出现几条竖向裂缝,裂缝较长且连续对称分布。随着压应力的增长,出现越来越多的纵向贯通裂缝,并且不断的向核心区发展,继而是外边缘混凝土慢慢的剥落,但是由于核心区混凝土得到密排螺旋箍筋的强有力的横向约束,裂缝的开展得到了控制,后期核心区混凝土横向裂缝并无贯通,且没有斜裂缝出现。

对于配箍率较小的试件 5,加载过程中首先出现多条竖直不连续的裂缝,与主压应力方向平行,裂缝分布比较均匀,随着压应变的不断增长,外围混凝土逐渐剥落,后期部分核心区混凝土由于得不到足够有效的套箍约束而出现裂缝贯通的现象。以上两个试件的裂缝发展现象与文献[6]的理论分析大致吻合。

5 箍筋约束机理的探讨

矩形螺旋箍筋混凝土柱在轴向压力作用下,核心混凝土发生横向变形,箍筋因核心混凝土的向外挤压而承受拉力,核心混凝土则受到螺旋箍筋的横向约束作用而处于三轴受压状态。而实际上高强螺旋箍筋与普通箍筋相比是对混凝土柱提供了一系列更有效的弹性支撑,增加结构刚度,从而使得强度提高;当发生第一次失稳后,若能控制荷载,结构将处于随遇平衡状态。对于不同的箍筋强度和间距,所提供的弹性支撑的刚度是不同的,因而影响也不相同^[6]。

5.1 箍筋强度对试件约束能力的影响

图 6(a)(b) 分别为试件 1 和试件 2 在峰值应力(极限承载力)时箍筋应力最大截面(柱高中部)的应力分布图和截面中部沿柱高方向箍筋应力分布图。

由图 6 可以看出,在达到极限荷载时,试件边长中部的箍筋应力值均高于角部,这是由于边长中部较角部抗弯刚度较小,对于混凝土的横向约束较小,从而使混凝土侧向变形较大,箍筋应力较大;而沿柱高方向看,柱两端受到强有力的约束,而中部截面混凝土横向变形较大,致使靠近中部截面箍筋应力远大于两端。

通过分析图 4 和图 6 可知,在极限荷载时,配置箍筋强度为 350MPa 的试件其箍筋截面应力大多已进入屈服阶段,而配置箍筋强度为 1150MPa 的试件其箍筋则远未达到屈服,此时混凝土继续膨胀变形,低强度箍筋由于屈服已不能够提供有效的横向约束,试件 1 应力—应变曲线在达到 60MPa 左右时即达到峰值应力进入屈服阶段,并

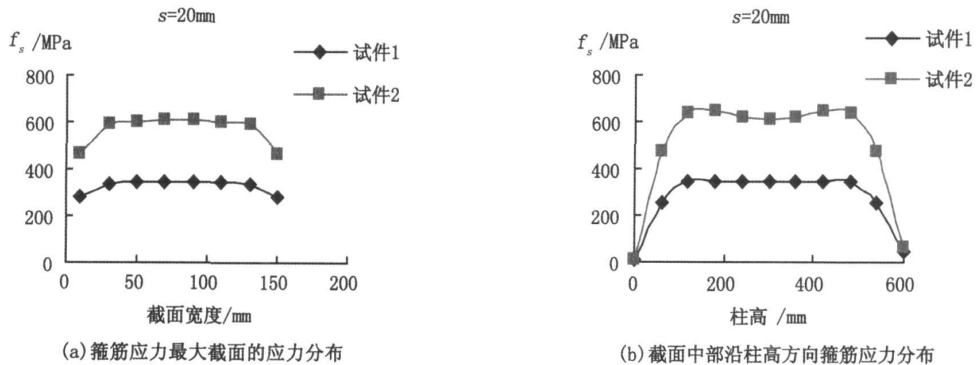


图6 峰值应力下不同强度箍筋应力分布对比

Fig.6 The distribution contrast of stirrups with different strength under peak stress

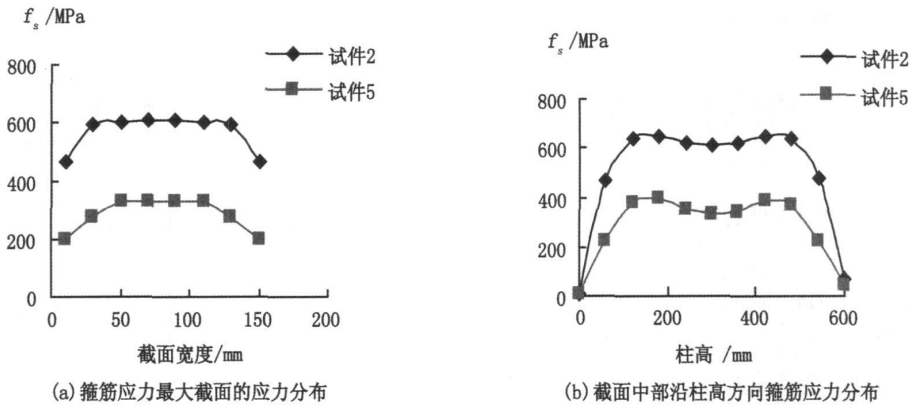


图7 峰值应力下不同间距箍筋应力分布对比

Fig. 7 The distribution contrast of stirrups with different spacing under peak stress

伴随有下降的趋势; 试件 2 由于配置高强箍筋则远未达到屈服, 仍然可以发挥其自身的优势, 对混凝土提供有效的侧向约束, 而且由于套箍作用较强, 有效保护了纵筋, 防止其过早压屈, 其应力-应变曲线在达到峰值应力后仍然有上升的趋势, 显著的提高了混凝土柱的承载力和变形能力^[10-11]。

5.2 箍筋间距对试件约束能力的影响

图 7(a) (b) 分别为试件 2 和试件 5 在峰值应力(极限承载力)时箍筋应力最大截面(柱高中部)的应力分布图和截面中部沿柱高方向箍筋应力分布图。

由图 7 可知, 随着箍筋间距的减小, 箍筋应力沿截面边长分布和沿柱高方向分布都更加大且均匀。试件 2 和试件 5 虽然都配置高强度箍筋, 但前者由于配箍率较大, 套箍作用较强, 在极限荷载时, 箍筋能够提供更大的约束反力来抑制混凝土的横向变形, 而使应力-应变曲线在达到极限荷载时仍能小幅度的上升趋势。试件 5 由于箍筋间距较大, 在柱高中部混凝土侧向膨胀变形时难以对其提供更为有效的横向约束, 应力达到 60MPa 时曲线即进入屈服段, 此时箍筋应力较小, 并没有充分发挥其高强度的优势。总之, 单纯的提高螺旋箍筋强度并不能抵消配箍率的下降对混凝土轴压柱承载力的影响, 配置密排高强螺旋箍筋能够达到最好的效果。

6 结论

1) 在混凝土轴压柱中配置高强螺旋箍筋并减小箍筋间距可以对核心混凝土形成有效的套箍作用, 增大对混凝土的横向约束作用, 防止裂缝向核心区开展。

2) 配置高强度密排的螺旋箍筋较之低强度的箍筋可以有效的发挥其自身优势, 避免过早屈服, 有效抑制混凝土的侧向膨胀压碎, 提高了混凝土轴压柱的承载力和峰值应变。

3) 当配筋率较低时, 提高钢筋混凝土轴压柱中的纵筋强度, 对高配箍率轴压柱的整体的承载力和变形能力略有提高, 对配箍率较低混凝土柱则没有明显的影响。

参考文献:

- [1] 郭忠贤, 杨志红. 配有方形螺旋箍筋柱箍筋受力性能分析[J]. 工程力学(增刊), 2001: 364- 368.
- [2] 杨坤, 史庆轩. 高强箍筋约束高强混凝土力学性能及柱的抗震性能研究[D]. 西安: 西安建筑大学, 2009.
- [3] 叶裕明, 刘春山. ANSYS 土木工程应用实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [4] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 石家庄: 石家庄铁道学院出版社, 2004.
- [5] 江见鲸, 陆新征. 用 ANSYS Solid 65 单元分析混凝土组合构件复杂应力[J]. 建筑结构, 2003, 33(6): 22- 24.
- [6] 叶列平, 叶燕华. 箍筋约束高强混凝土应力-应变全曲线的试验研究[J]. 南京建筑工程学院学报, 1994 (4): 31- 72.
- [7] 丁星, 蒲心城. 三维网格配纤及配筋高强混凝土强度与韧性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2000.
- [8] 刘文峰. 混凝土结构设计原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [9] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [10] 陈宇彤, 樊江. 加强箍筋约束对提高钢筋混凝土柱延性的探讨[J]. 四川建筑, 2005(10): 67- 68.
- [11] 陈继东, 史庆轩. 高强箍筋约束高强混凝土柱抗震性能试验和非线性分析[D]. 西安: 西安建筑大学, 2009.

(责任编辑 刘存英)