

约束混凝土柱配置高强纵筋小偏压性能分析

常沙¹,杨德健^{1,2},王玉良^{1,2}

(1.天津城建大学 土木工程学院,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:采用高强箍筋能够对高强混凝土形成有效约束并大幅提高其变形能力,为受压构件中配置高强度纵筋奠定了基础。本文提出采用高强度钢筋(500 MPa 以上)作为高强箍筋约束高强混凝土柱中的纵筋。首先对建立的有限元模型与相同参数下的试验结果进行对比,验证了模型的准确性;然后,采用有限元方法分析了箍筋间距、纵向钢筋配筋率对纵筋应力水平、混凝土强度的影响,结果表明合理的选择箍筋间距,高强纵筋在构件中可发挥较好的作用;最后,探讨了纵向钢筋强度与构件承载力之间的关系,为约束混凝土柱中配置高强纵筋的理论研究与应用提供了参考。

关键词:高强纵筋;约束混凝土柱;有限元分析;偏心受压

中图分类号:TU375.3

文献标识码:A

Study on the small eccentric compression behavior of confined concrete column with high - strength longitudinal reinforcement

CHANG Sha¹, YANG De - jian^{1,2}, WANG Yu - liang^{1,2}

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

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

Abstract: Using high - strength stirrups can form an effective constraint on high - strength concrete and greatly improve the deformation capacity, which above lay the foundation for high - strength longitudinal reinforcement used in the compressed member. This paper puts forward using high - strength steel bars (above 500 MPa) as longitudinal reinforcement of high - strength concrete column confined by high - strength stirrups. At first, the finite element model results were compared with the test results under the same parameters, and the accuracy of the model was verified. Then, the influence of the stirrup spacing and longitudinal reinforcement ratio on longitudinal reinforcement stress level and concrete strength were analyzed by using the finite element method. The results show that high - strength longitudinal reinforcement will play a good role in the member with reasonable stirrup spacing. Finally, the relationship between the strength of longitudinal reinforcement and bearing capacity of the member were discussed. The results provide a reference for theory research and application of high - strength longitudinal reinforcement used in confined concrete column.

Key words: high - strength longitudinal reinforcement; confined concrete column; finite element analysis; eccentric compression

混凝土是一种脆性材料,强度越高脆性越明显,高强混凝土的脆性使结构的延性降低,给工程结构带来很大的危害,这也是阻碍高强混凝土在实际中应用的一个方面。研究表明^[1],采用高强

度箍筋能够对高强混凝土形成有效约束,可以改变高强混凝土的脆性性质并大幅提高其变形能力。

因此,国内外围绕约束混凝土及其在混凝土

收稿日期:2013-03-28

基金项目:天津市自然科学基金项目(项目编号:12JCQNJC05000)

作者简介:常沙(1987-),女,河北邯郸人,硕士研究生,从事混凝土结构、工程抗震方面的研究。

结构中的应用做了较多工作,并取得一定成果^[2-8]。但是,上述研究主要集中在横向约束对强度和变形提高方面。混凝土变形能力的提高为受压构件中配置高强度纵筋奠定了基础。本文提出采用高强度钢筋(500 MPa 以上)作为高强箍筋约束高强混凝土柱中的纵筋,拟采用数值模拟方法分析其在小偏心受压条件下的受力性能,为约束混凝土柱中配置高强纵筋的理论研究与应用提供参考。

1 模型建立及参数确定

本文采用大型通用有限元计算软件 ANSYS 进行数值模拟,采用文献[10]中的试验构件 HSC1-15 做为验证构件,构件尺寸为 150 mm × 150 mm × 450 mm,混凝土强度为 C80,箍筋为高强箍筋,强度为 1 120 MPa,直径为 6.5 mm,箍筋间距为 50 mm,纵向钢筋直径为 8 mm,配筋形式如图 1 所示。本文采用分离式模型,将实体单元和钢筋作为不同的单元处理。

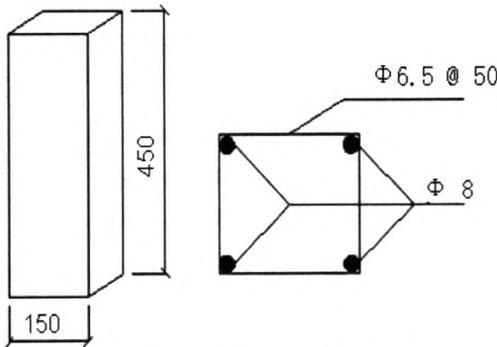


图 1 构件尺寸和截面配筋形式

Fig.1 The member size and reinforcement forms of cross-section

1.1 单元类型的选择

混凝土采用三维加筋混凝土实体单元 SOL-ID65 单元,该单元具有开裂和压碎的功能,可模拟混凝土的开裂、压碎、塑性变形及徐变,可模拟钢筋的拉伸、压缩、塑性变形和蠕变。

钢筋采用三维杆单元 LINK8,该单元可承受轴向拉压,具有延 X、Y、Z 三个方向的自由度。

刚性垫块采用三维 8 节点结构实体单元 SOL-ID45 单元。

1.2 选择材料模型

1) 混凝土。核芯混凝土采用 Willam - Warnke 五参数破坏准则和 Von Mises 屈服准则,选用多线

性等向强化模型 MISO,其应力 - 应变关系采用文献[10]提出的高强箍筋约束高强混凝土的应力 - 应变曲线表达式,见式(1) ~ 式(5)。

$$f_c = f_{cc} \left[\frac{a(\varepsilon_c / \varepsilon_{cc})}{a - 1 + (\varepsilon_c / \varepsilon_{cc})^a} \right] \quad (\varepsilon_c \leq \varepsilon_{cc}) \quad (1)$$

$$f_c = f_{cc} \cdot \exp[k_1(\varepsilon_c - \varepsilon_{cc})^{k_2}] \quad (\varepsilon_c \geq \varepsilon_{cc}) \quad (2)$$

$$a = \frac{E_c}{E_c - \left(\frac{f_{cc}}{\varepsilon_{cc}}\right)} \quad (3)$$

$$\text{其中: } \frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 1.2459 \left(\frac{f_{le}}{f_{co}}\right)^{0.4647} \quad (4)$$

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1 + 35.458 \left(\frac{f_{le}}{f_{co}}\right)^{0.9839} \quad (5)$$

式中 f_{cc} 与 f_{co} - 约束与非约束混凝土的峰值强度; ε_{cc} 与 ε_{co} - 约束与非约束混凝土的峰值应变; f_{le} - 约束混凝土达到峰值强度时对应的箍筋有效侧向约束力; k_1 与 k_2 - 控制曲线下降段坡度和凸凹的系数。

混凝土的 MISO 模型如图 2 所示。

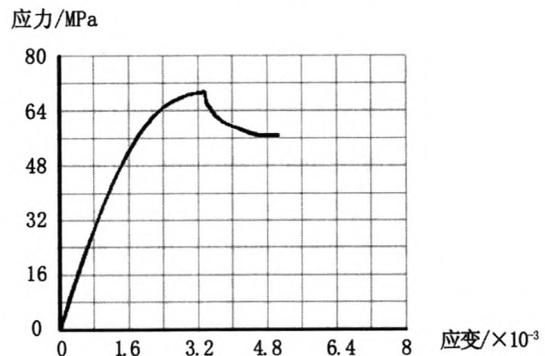


图 2 混凝土的 MISO 模型

Fig.2 The MISO model of concrete

保护层混凝土的屈服准则和破坏准则与核心区混凝土类似,应力 - 应变关系采用如下公式:

$$\text{当 } \varepsilon_c \leq \varepsilon_0 \text{ 时 } \delta_c = f_{ck} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)^2 \right] \quad (7)$$

$$\text{当 } \varepsilon_0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \text{ 时 } \delta_c = f_{ck} \left[1 - 0.15 \left(\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_0}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_0}\right) \right] \quad (8)$$

其中 $\varepsilon_0 = 0.002$, $\varepsilon_{cu} = 0.0033$ 。

2) 钢筋。钢筋有限元模型采用双线性随动强化模型 BIKN。

1.3 建立有限元模型

钢筋和混凝土采用分离式模型进行有限元分析。首先创建箍筋的模型,按照由下而上的建模顺序建模,并对箍筋进行映射网格划分,箍筋单元

长度为 30 mm。纵筋的建模方法同箍筋,单元长度为 50 mm,钢筋有限元模型如图 3 所示。

混凝土实体模型采用自上而下的方法进行建模,并进行单元网格划分,钢筋与混凝土之间共用节点,模型一端为固定端,另一端采用位移加载方式施加面荷载,混凝土有限元模型如图 4 所示。

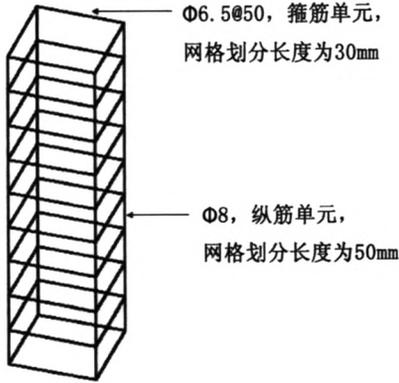


图3 钢筋的有限元模型

Fig.3 The finite element model of steel bars

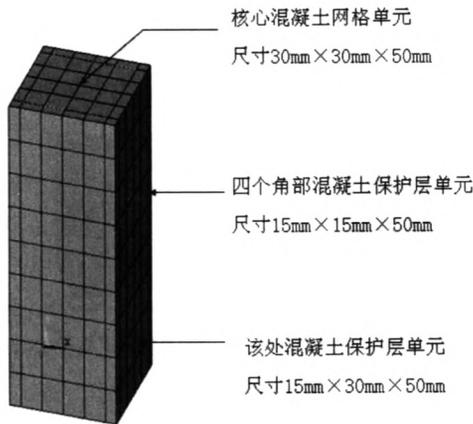


图4 混凝土的有限元模型

Fig.4 The finite element model of concrete

通过有限元分析得出构件 HSC1 - 15 混凝土的应力 - 应变曲线,并与试验所得结果进行对比,结果表明有限元分析结果与试验曲线拟合较好,如图 5 所示。

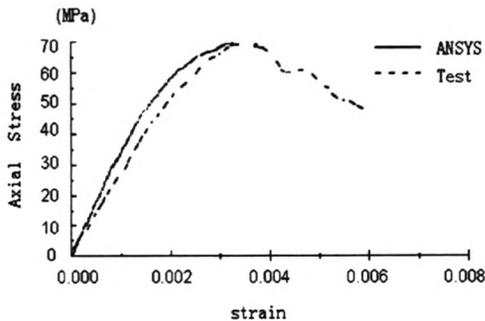


图5 有限元分析结果与试验结果对比

Fig.5 The comparison of finite element analysis result and test result

2 有限元分析构件设计

本文采用 10 个高强混凝土构件进行有限元模拟,构件截面尺寸为 300 mm × 300 mm,柱高为 750 mm,混凝土强度为 C80。对构件施加小偏心荷载,荷载偏心距为 41.67 mm,考虑的变化因素为纵筋强度、纵筋配筋率、箍筋间距等。为防止构件两端因应力集中而产生突然破坏,在构件两端设置刚性垫块。构件设计详见表 1,配筋形式如图 6 所示。

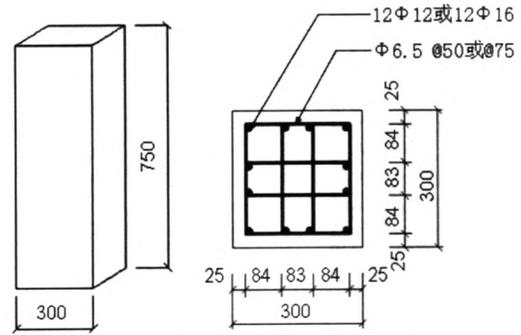


图6 构件尺寸及截面配筋形式

Fig.6 The member size and reinforcement forms of cross-section

表 1 构件参数表

Tab.1 Table of members parameters

构件编号	混凝土强度 /MPa	箍筋			纵筋	
		直径 /mm	强度 /MPa	间距 /mm	配筋	强度 /MPa
1	50.2	6.5	1 120	75	12Φ16	400
2	50.2	6.5	1 120	75	12Φ16	600
3	50.2	6.5	1 120	75	12Φ16	800
4	50.2	6.5	1 120	75	12Φ16	1000
5	50.2	6.5	1 120	50	12Φ16	400
6	50.2	6.5	1 120	50	12Φ16	600
7	50.2	6.5	1 120	50	12Φ16	800
8	50.2	6.5	1 120	50	12Φ16	1 000
9	50.2	6.5	1 120	75	12Φ12	1 000
10	50.2	6.5	1 120	50	12Φ12	1 000

3 有限元分析结果

按照前面分析步骤,依次对构件 1 至构件 10 进行有限元分析,钢筋和混凝土有限元模型如图 7 所示,在偏心荷载作用下混凝土达到峰值应变时构件变形如图 8 所示。

3.1 箍筋间距对纵筋应力水平的影响

分别对箍筋间距为 75 mm、50 mm 的构件进行有限元分析,得出靠近荷载作用侧沿柱高度方

向中部核心混凝土单元的分析结果,以构件4和构件8为例,当箍筋间距为75 mm时,混凝土单元的峰值强度和峰值应变分别为62.03 MPa、0.003 1;箍筋间距为50 mm时,混凝土单元的峰值应力和峰值应变分别为69.57 MPa、0.005 2,峰值强度和峰值应力分别是箍筋间距75 mm时的1.12倍、1.68倍,如图9所示。表明改变箍筋间距能提高构件核心混凝土的强度和构件的变形能力,这为高强纵筋在受压构件中应用奠定了基础。

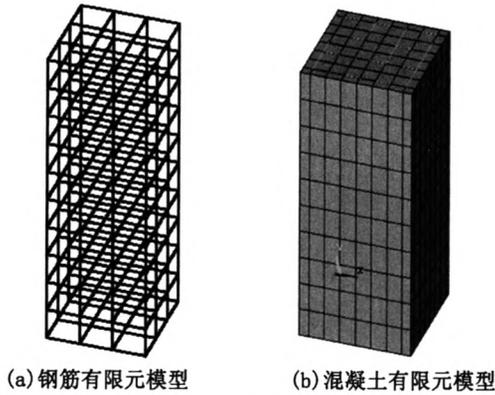


图7 钢筋和混凝土有限元模型

Fig.7 The finite element models of steel bars and concrete

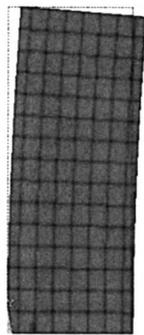


图8 混凝土达到峰值强度时构件变形

Fig.8 The deformation of concrete reaching peak strength

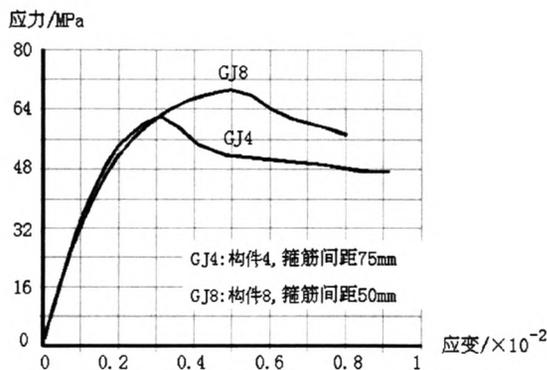


图9 核心混凝土单元应力-应变曲线

Fig.9 The stress-strain curve of core concrete element

构件中纵筋编号如图10所示。当核心混凝土达到峰值应变时,箍筋间距为75mm的构件中纵向钢筋最大应力值为649 MPa,纵筋强度还有富余;箍筋间距为50 mm时,处于编号4、5、6位置的纵筋应力值均比箍筋间距为75 mm时同位置纵筋应力值高,且纵向钢筋最大应力值为1 000 MPa,配置高强纵筋的强度得到充分发挥,如图11、12所示,图中编号对应图10中钢筋编号。由以上分析表明,纵向钢筋的应力水平与箍筋间距有关,减小箍筋间距,可使高强纵筋强度得到发挥,为高强约束混凝土中配置400 MPa以上高强度纵向钢筋提供参考。

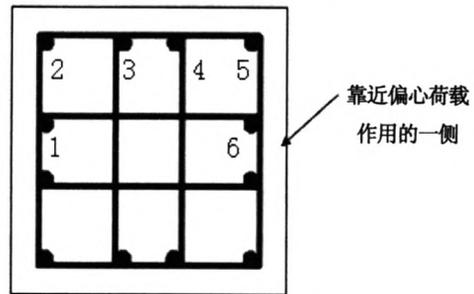


图10 纵向钢筋编号

Fig.10 The numbers of longitudinal reinforcement

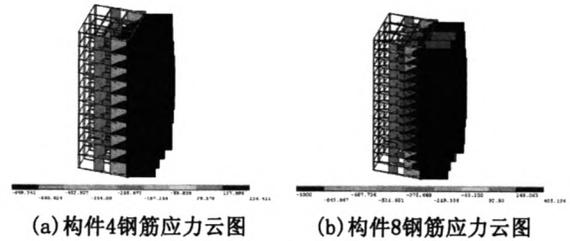


图11钢筋应力分布

Fig.11 The distribution of reinforcement stresses

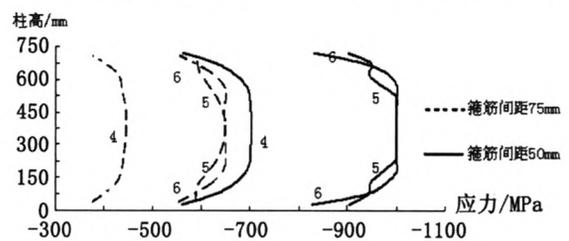


图12 纵筋在不同箍筋间距下沿柱高应力分布

Fig.12 The distribution of longitudinal reinforcement stresses along the height of column when stirrup spacing is different

3.2 纵筋配筋率对纵筋应力水平的影响

分别对配置纵筋直径为12 mm、16 mm的构件8、10进行有限元分析,纵筋配筋率分别为2.7%、1.5%,得出构件核心混凝土达到峰值应变时纵向钢筋沿柱高方向的单元应力和施加的荷载值,通过对比发现,配筋率不同时,纵向钢筋最大

应力值均为 1 000 MPa,构件 8 和构件 10 所承受的荷载值分别为 1 277.1 kN、1 102.6 kN。由以上分析可得出增加纵向钢筋的配筋率可提高构件承载力,但不影响纵筋应力水平,如图 13 所示。

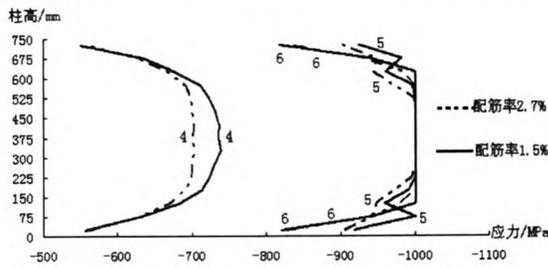


图13 纵筋在不同配筋率下沿柱高应力分布

Fig.13 The distribution of longitudinal reinforcement stresses along the height of column when reinforcement ratio is different

3.3 纵筋强度对构件承载力的影响

对纵向钢筋配筋率为 2.7%,纵筋强度分别为 400 MPa、600 MPa、800 MPa、1 000 MPa 的构件 1 到构件 8 进行有限元分析,分析结果表明,当核心混凝土达到峰值应变时,箍筋间距为 75 mm 的构件随着配置纵筋强度的增加,施加最大偏心荷载值依次为 1 080.21 kN、1 145.67 kN、1 155.92 kN、1 155.92kN,纵筋强度为 800 MPa 的构件与纵筋强度为 1 000 MPa 的构件承载力相同;箍筋间距为 50 mm 时,施加最大偏心荷载值依次为 1 159.25 kN、1 242.56 kN、1 331.76 kN、1 388.14 kN,构件承载力随纵向钢筋强度的增加而增大,配置 1 000 MPa 级高强纵筋构件承载力比配置 400 MPa 级普通强度纵筋构件提高了 20%,如图 14 所示。由此可得出高强纵筋对构件承载力的影响是建立在一定箍筋间距的基础上,通过合理选择箍筋间距,高强纵筋在提高构件的承载力方面可发挥较好的作用。

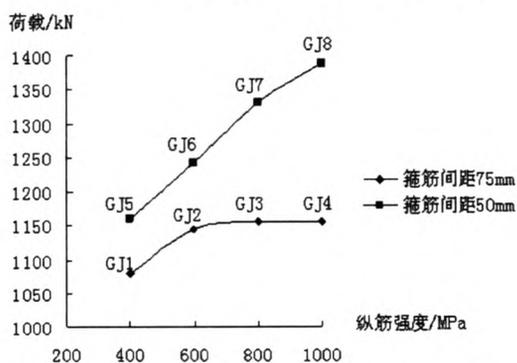


图14 构件承载力随纵筋强度变化规律

Fig.14 The change rule of bearing capacity with different longitudinal reinforcement strength

4 结论

1) 约束混凝土柱有限元分析结果与同参数条件下试验结果进行对比,结果吻合较好,验证了模型的准确性。

2) 纵向钢筋的应力水平与箍筋间距有关,减小箍筋间距,可使高强纵筋强度得到发挥,为高强约束混凝土中配置 400 MPa 以上高强度纵向钢筋提供参考。

3) 高强纵筋对构件承载力的影响与箍筋间距有关,当纵筋配筋率为 2.7%、箍筋间距为 50 mm 时,配置 1 000 MPa 级高强纵筋比配置普通强度 (400 MPa) 纵筋的构件承载力提高了 20%。合理的选择箍筋间距,高强纵筋在提高构件的承载力方面可发挥较好的作用。

参考文献:

- [1] 杨坤, 史庆轩, 王秋维, 等. 高强箍筋约束混凝土轴心受压性能分析[J]. 西安建筑科技大学学报, 2009, 41(2): 161 - 167.
- [2] 邓明科, 梁兴文, 刘青山. 横向约束钢筋新配筋方案高性能混凝土剪力墙抗震性能的试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然版, 2006, 38(4): 538 - 543.
- [3] 刘涛, 冯伟, 张智梅. 碳纤维布约束混凝土矩形柱的抗压性能研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(12): 41 - 47.
- [4] 胡海涛, 叶知满. 复合箍筋约束高强混凝土应力应变性能[J]. 工业建筑, 1997, 27(10): 23 - 28.
- [5] 阎石, 季保健, 陈鑫. 高强钢筋高强混凝土柱的非线性数值分析[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2010, 26(2): 244 - 249.
- [6] DANIEL CUSSON, PATRICK PAULTRE. Stress - strain model for confined high - strength concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(3): 468 - 477.
- [7] MASAMI, OSAMI, NOBUYUKI. Construction material technology supporting social infrastructure [R]. JFE Technical Report, 2004(2): 68 - 84.
- [8] 赵东. 高强箍筋约束混凝土偏心受压构件试验机非线性分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
- [9] 王新敏. ANSYS 结构分析单元与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [10] 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: 西安建筑科技大学, 2009.
- [11] 盛太和, 喻海良, 范训益. ANSYS 有限元原理与工程应用实例大全[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006, 329 - 376.

(责任编辑 刘存英)