

钢板笼混凝土短柱轴压性能的数值模拟

梁扬滨,曾志兴,陈荣淋,苏江林,湛意雄

(华侨大学 土木工程学院,福建 厦门 361021)

摘要: 基于 ANSYS 有限元平台,通过考虑材料非线性及相关几何参数,建立钢板笼混凝土短柱的三维有限元数值模型,分析不同配箍特征值下钢板笼混凝土短柱的荷载位移曲线,以及核心混凝土受压强度.结果表明:所建立的钢板笼混凝土短柱轴压有限元数值模拟分析模型是可行的,与试验结果基本吻合.

关键词: 钢板笼;混凝土;短柱;轴压性能;有限元分析

中图分类号: TU 360.2 **文献标志码:** A

2005 年,Shamsai 等^[1]提出一种新型钢-混凝土结构组合体系——钢板笼(PCS)混凝土.与钢筋混凝土构件相比,钢板笼混凝土构件具有较好整体性、定位精确性及较强核心混凝土约束能力^[2-4].国内外对钢板笼混凝土结构体系的基本力学性能研究尚处于初级阶段. Shamsai 等通过选取不同钢板厚度与混凝土强度等级为参数,对钢板笼混凝土短柱的轴压性能进行了研究,并与普通钢筋混凝土柱进行对比^[3-5];Matthew^[6]研究钢板笼混凝土梁柱节点的抗震性能,分析钢板笼梁柱节点的延性;Thenmozhi 等^[7]对不同厚度钢板与混凝土强度等级的钢板笼混凝土梁进行了抗弯试验,发现钢板笼与普通钢筋混凝土相比具有更高的承载力和延性.目前,国内尚未检索到有关钢板笼混凝土结构体系的研究报道.本文在针对钢板笼混凝土短柱轴压试验研究基础上,对钢板笼混凝土短柱轴压进行 ANSYS 有限元分析,探讨建立数值模拟模型的可行性.

1 试验概述

根据国家标准 GB 50010—2010《建筑抗震设计规范》规定,考虑柱配箍特征值,柱轴压比及抗震等级影响,柱配箍特征值最小值要求在 0.05~0.24 之间^[7].试验是通过改变配箍特征值,讨论钢板笼混凝土短柱力学性能的影响.构件采用缩尺模型,钢板笼混凝土短柱高度均为 750 mm,截面尺寸均为 250 mm×250 mm,保护层为 25 mm,混凝土强度等级为 C30,钢板笼采用的 Q235 级 200 mm×200 mm×6 mm 无缝方钢管.表 1 为实验构件的具体参数.表 1 中: s 为箍筋间距; ρ 为纵筋配筋率; ρ_v 为体积配箍率; λ_v 为配箍特征值.此外,采用数控等离子切割技术在钢管上面开洞,可忽略切割时对钢材产生的热影响.

表 1 试验主要参数

Tab.1 Parameters of specimens

| 试件 | s/mm | $\rho/\%$ | $\rho_v/\%$ | λ_v |
|-------|---------------|-----------|-------------|-------------|
| PCS-1 | 160 | 2.61 | 0.71 | 0.095 |
| PCS-2 | 90 | 2.61 | 1.27 | 0.169 |
| PCS-3 | 70 | 2.61 | 1.63 | 0.218 |

2 有限元模型的建立

图 1 为钢板笼试验模型.钢板笼混凝土结构有限元模型与钢筋混凝土类似,可分为整体式和分离式.在整体式和分离式有限元模型中,ANSYS 对混凝土裂缝均采用弥散裂缝模型处理方式,文中采用分离式建模方式,即把钢板和混凝土作为不同的单元来处理.

2.1 本构关系

混凝土单轴受压应力-应变关系上升段采用国家标准 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》规定

的公式^[8], 下降段则采用 Hognestad^[9] 表达式, 即

$$\delta_c = \begin{cases} f_c [1 - (1 - \xi_c / \xi_0) n], & \xi_c \leq \xi_0; \\ f_c \{1 - 0.15 [1 - (\xi_c - \xi_0) / (\xi_{cu} - \xi_0)]^n\}, & \xi_0 < \xi_c \leq \xi_u. \end{cases} \quad (1)$$

根据式(1), 采用一系列数据拟合输入. 按照非线性弹性材料定义模型, 采用多线性等向强化模型 MISO 模拟, 其中输入的混凝土弹性模量为初始弹性模量 $E_c = 30 \text{ GPa}$, 泊松比为 0.2; 破坏准则采用 Willam-Warnker 五参数强度准则^[10], 混凝土张开裂缝的剪切传递系数取 0.5, 闭合裂缝的剪切连接系数取 1.0^[11]. 钢板应力-应变关系采用理想弹塑性模型, 文中使用双线性等向强化模型 BISO 模拟, 弹性模量 $E_s = 30 \text{ GPa}$, 泊松比为 0.3.

2.2 单元选择

根据试验试件的几何尺寸和主要参数, 建立 ANSYS 有限元模型, 如图 2 所示. 在模型中, 钢板与混凝土节点共享, 不考虑两者之间的粘结-滑移影响. 其中, 混凝土选用三维 8 节点非线性实体单元 Solid 65, 并考虑混凝土的开裂和压溃; 钢板采用的是三维 4 节点有限应变壳单元 Shell 181, 在非线性分析中考虑了壳单元厚度的变化. 对于混凝土实体单元与钢板壳单元连接部位建立竖相刚性线, 建模时使壳单元与实体单元共节点, 以壳单元为主节点, 实体单元为从节点. 建立主节点的自由度与从节点的 U_x 和 U_z 的约束方程, 即建立刚性线自动生成约束方程^[12]. 这种建模方式较为简便, 需明确单元自由度的约束和壳体连接外轮廓线坐标, 在次节点上存在大量系数, 增加了模型的计算量.

为避免产生集中荷载产生的应力集中, 加载点以均布荷载近似代替钢板垫板. 支座处采用线约束, 在短柱底部施加在 X, Y, Z 三个方向的约束, 顶部施加 X, Z (柱的轴心为 Y 方向) 方向的约束. 考虑到由于网格越密, 容易造成应力集中, 从而造成开裂越早, 因此单元尺寸以 80 mm 左右为宜.

3 数值模拟结果分析

由于分析过程中考虑混凝土的开裂、钢筋的塑性变形, 因此采用位移收敛、关闭混凝土压碎、放松收敛准则, 所有的计算均进行至实验加载过程或不再收敛为止^[8-11].

3.1 荷载位移曲线

根据上述建立的有限元数值分析模型, 对 PCS-1~PCS-3 共 3 根钢板笼短柱进行数值模拟, 其荷载位移曲线如图 3 所示. 由图 3(a), (b), (c) 可知: 荷载位移曲线的实验结果与计算模拟结果基本吻合. 说明文中所建立钢板笼混凝土短柱有限元模型是有效的, 选用材料和本构是合理的. 从图 3(d) 可知: 钢板笼混凝土短柱承载力随着配箍特征值的增加呈现增长趋势. 这是由于在轴向荷载作用下, 钢板笼与混凝土同时受力产生纵向压缩变形, 而材料的泊松效应, 导致横向产生变形. 当核心混凝土横向变形大于钢板笼横向变形, 此时钢板笼产生横向约束, 阻碍混凝土向外扩张, 在核心混凝土与钢板笼间产生相互作用



图 1 钢板笼试验模型

Fig. 1 Test model of prefabricated cage system

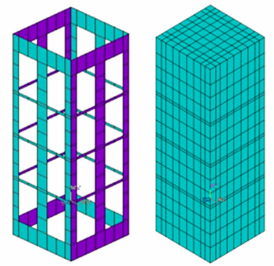
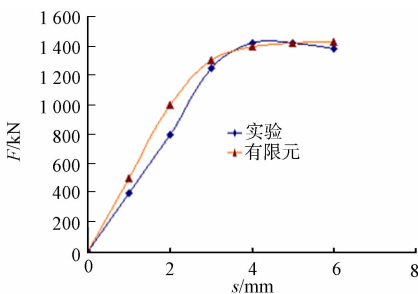
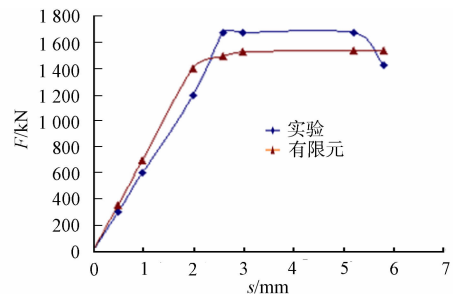


图 2 钢板笼有限元模型

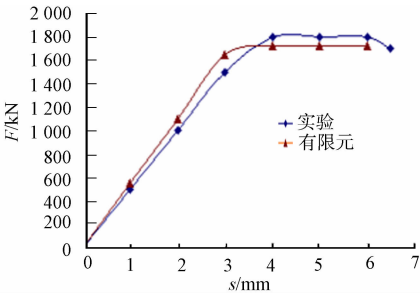
Fig. 2 Finite element model of prefabricated cage system



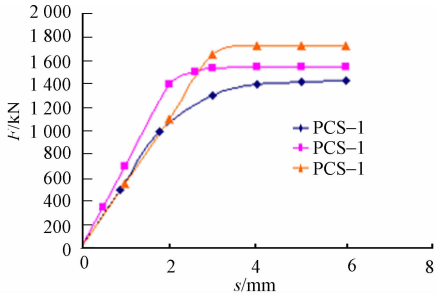
(a) PCS-1



(b) PCS-2



(c) PCS-3



(d) 3 根 PCS 对比

图 3 钢板笼短柱的荷载位移曲线

Fig. 3 Load-displacement curve

用的约束应力,钢板笼与混凝土进入共同工作阶段.

随着配箍率的增加,核心区混凝土更接近三向受压,其轴心抗压强度不断提高,相应的极限荷载对比值如表 2 所示.表 2 中: $P_{U,T}$ 为实测值; $P_{U,FEM}$ 为有限元计算值; $\gamma=(P_{U,FEM}-P_{U,T})/P_{U,T}$.

3.2 核心混凝土强度

在建立的 3 个钢板笼混凝土短柱有限元模型中,PCS-1 的数值曲线的拟合度较高,试验破坏效果较为明显,故取 PCS-1 模型分析混凝土强度.图 4 为 PCS-1 试验变形图.由图 4 可知:核心区混凝土被压碎并从孔中脱落.由于此根短柱的配箍特征值较小,对核心区混凝土约束相对较差,在钢板笼进入塑性阶段后,核心混凝土内应变急剧增加,外观体积也因为内部混凝土微裂缝的发展而急剧增长,最终导致钢板笼向外突起.图 5 为钢板笼混凝土柱矢量变形图,由图 5 可知应力的传递方向.

图 6 为 PCS-1 钢板笼 Y 方向的应力云图,蓝色区域为核心区混凝土受压应力最大区域,应力数值为 26.792 MPa.图 7 为 PCS-1 约束混凝土 Y 方向的应力云图,蓝色区域为应力最大部位,屈服荷载值为 295.989 MPa.通过实验数据所取得的 PSC-1 极限荷载值 f_{cc} 为 26.210 MPa,钢板笼的纵筋实测屈服强度 f_y 为 276.7 MPa,试验数据与数值模拟结果较为相近.

表 2 极限荷载力对比值
Tab. 2 Values of ultimate load

| 试件 | $P_{U,T}/\text{MN}$ | $P_{U,FEM}/\text{MN}$ | $\gamma/\%$ |
|-------|---------------------|-----------------------|-------------|
| PCS-1 | 1.438 | 1.440 | 1.4 |
| PCS-2 | 1.698 | 1.550 | 8.7 |
| PCS-3 | 1.853 | 1.720 | 7.2 |

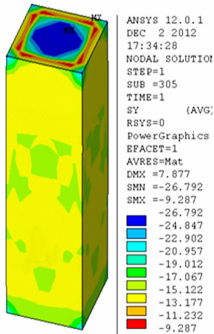
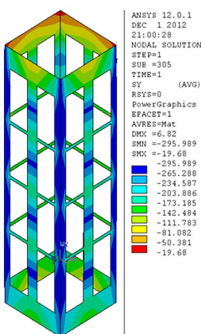
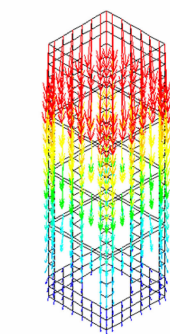


图 4 试验变形图
Fig. 4 Experimental deformation

图 5 矢量变形图
Fig. 5 Vector deformation

图 6 钢板应力云图
Fig. 6 Steel stress contour

图 7 混凝土应力云图
Fig. 7 Concrete stress contour

4 结论

建立混凝土材料非线性 ANSYS 有限元模型,对钢板笼混凝土短柱进行仿真模拟.通过与试验数据曲线进行对比,探讨不同配箍率对钢板笼混凝土短柱的轴压力学性能影响,得出以下 3 个结论.

- 1) 数值模拟结果曲线与试验数据曲线基本吻合,钢板笼及核心区混凝土的最大应力较为接近,说明该模型可以有效模拟钢板笼混凝土短柱轴压受力性能.
- 2) 随着配箍率的增加,钢板间距减小,钢板笼混凝土短柱承载力逐渐增大,混凝土约束增强,核心

区混凝土抗压强度也得到提高。

3) 由于钢板笼是种新型构件,理论研究还不够成熟,在 ANSYS 有限元模型过程中,很多参数都还需要从实验结果中获得. 另外,ANSYS 混凝土材料还存在一些不足,如材料的本构曲线取全应力-应变曲线,未分开考虑受拉区、受拉区混凝土的本构,计算效率较低,精度不理想,需要不断地改进和完善。

参考文献：

[1] SHAMSAI M,SEZEN H. Behavior of square concrete columns reinforced with prefabricated cage system[J]. Materials and Structures,2011,44(1):89-100.

[2] CHITHRA R,THENMOZHI R,RAVATHI M C. Flexural ductility of prefabricated cage reinforced steel-concrete composite beams[J]. Asian journal of Civil Engineering,2011,12(6):719-729.

[3] SHAMSAI M,WHITLATCH E,SEZEN H. Economic evaluation of reinforced concrete structures with columns reinforced with prefabricated cage system[J]. Journal of Construction Engineering and Management. 2007,133(11):864-870.

[4] SEZEN H,SHAMSAI M. High-strength concrete columns reinforced with prefabricated cage system [J]. Journal of Structural Engineering,2008,134(5):750-757.

[5] SEZEN H. Experimental evaluation of reinforcement methods for concrete beam-column joints [D]. The Ohio State University,2009:61-70.

[6] CHITHRA R,THENMOZHI R. Studies on prefabricated cage reinforced steel concrete composite beam [J]. Asian Journal of Civil Engineering (building and housing),2011,12(1):27-37.

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010:64-65.

[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010:207-211.

[9] 王彬. ANSYS 混凝土结构的计算问题[J]. 工业建筑,2007,37(11):106-112.

[10] 江见鲸,陆新征,叶列平. 混凝土结构有限元分析[M]. 北京:清华大学出版社,2005:320-325.

[11] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京:人民交通出版社,2007:479-487.

Numerical Simulation for Prefabricated Cage System
of Concrete Short Columnns

LIANG Yang-bin, ZENG Zhi-xing, CHEN Rong-lin,
SU Jiang-lin, CHEN Yi-xiong

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Based on ANSYS finite element software, considering the material nonlinearity and geometric parameters, the numerical model of concrete short columns with prefabricated cage three-dimensional finite element numerical was established to analyze the short column load-displacement curve under the different stirrup characteristic values, and core concrete compressive strength. It is shown that the finite element model of the prefabricated cage system concrete short columns under axial compression is valid, the numerical simulation results conform with the experimental results.

Keywords: prefabricated cage system; concrete; short column; axial compression behavior; finite element analysis

(责任编辑：陈志贤 英文审校：方德平)