

分散式钢棒混凝土柱非线性数值模拟研究^{*}

叶茂, 皮音培, 任珉, 刘爱荣, 黎泳言

(广州大学结构安全与健康监测广州市重点实验室//

广东高校结构安全与健康监测工程技术研究中心, 广东 广州 510006)

摘要: 针对实腹式型钢混凝土柱施工难度大、造价高的特点, 文中基于核心区钢筋含钢量相同的原则给出了一种低工程造价、低施工难度的分散式钢棒核心钢筋混凝土柱, 初步试验已验证两种柱的力学性能相近, 该论文则是更深入地研究这种新型截面柱的抗震性能。通过考虑材料本构关系的非线性以及 $P-\Delta$ 效应, 应用有限元软件 (ABAQUS) 建立分散式钢棒核心钢筋混凝土柱的非线性有限元模型, 开展轴压比、含钢率、混凝土强度以及核心钢棒屈服强度等对分散式钢棒核心钢筋混凝土柱荷载位移曲线、水平极限承载力及延性系数影响的研究, 结果表明: 分散式钢棒核心钢筋混凝土柱水平极限承载力受轴压比和混凝土强度的影响明显, 而含钢率和核心钢棒屈服强度对水平极限承载力影响很小; 延性系数是一个比较敏感的指标, 受各种因素的影响均较明显。

关键词: 结构工程; 分散式钢棒; 柱; 有限元法; 非线性; 抗震性能

中图分类号: TU 398 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2013) 01-0023-06

Nonlinear Numerical Investigations on the Steel Reinforced Concrete of Distributed Steel Bar Core Section

YE Mao, PI Yinpei, REN Min, LIU Airong, LI Yongyan

(Guangzhou Municipal Key Laboratory for Structural Safety and Health Monitoring//

Research Center for Structural Safety and Health Monitoring of Guangdong Education Department, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Because of the SRC column are difficult to construct and the high cost, the new SRC cross-section of distributed steel bar with low cost is proposed based on the principle of which the same core steel ratio. The two types columns has been validated similar mechanical properties by the preliminary tests, and more in-depth study of the seismic performance of this new cross-section column is presented. Considering the nonlinearity of the materials and the appearance of $P-\Delta$, analysis models of SRC of distributed steel bar core section with FEM's software are built. Parameters of axial compression ratio, the core steel ratio, the strength of concrete and core steel bar which influence the $P-\Delta$ curves, horizontal ultimate load and ductility coefficients were analyzed for further study of the new SRC section. The conclusion is as follows: the horizontal ultimate load of new SRC cross-section of distributed steel bar was obvious influenced by the axial compression ratio and strength of concrete and less affected by the core steel ratio and the strength of the core steel bar; ductility coefficients which was obvious influenced by many factors is a sensitive indicator.

Key words: structure engineering; distributed steel bar; finite element analysis; nonlinear analysis; earthquake resistance

* 收稿日期: 2012-07-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51178126, 50978062); 广东省自然科学基金资助项目 (S2011040004020) 广东省科技计划资助项目 (国际合作) (2009B050200015)

作者简介: 叶茂 (1982年生), 男, 博士; E-mail: yemao@gzhu.edu.cn

随着建筑结构向着超高层方向发展,混凝土往超高强混凝土的方向发展,越来越多的实际工程结构采用钢管混凝土组合结构;钢管混凝土结构 (SRC) 延性比普通混凝土结构 (RC) 有了明显的改善,尤其是表现出优良的抗震性能^[1-2]。现阶段钢管混凝土组合结构 (SRC) 柱大部分截面都是在核心位置加入型钢或在钢管中内填混凝土的钢管混凝土,大量学者对此进行了研究,如:文献 [3] 研究表明设置核心型钢可有效提高 RC 抗震性能及轴压比限制,文献 [4] 对钢管混凝土柱在弯剪和压弯剪受力状态下的力学性能进行了实验研究,文献 [5] 通过对钢-混凝土组合柱的静载轴压承载力试验,分析了组合柱的工作及破坏机;同时许多学者对 SRC 结构的梁柱节点进行了研究,如:文献 [6] 对在节点位置截断柱截面在轴向承载力作用下进行了试验研究,文献 [7] 对钢梁与钢管混凝土柱相连接的节点形式框架进行了试验研究。SRC 结构在核心区设置型钢导致了柱的箍筋布置以及梁的纵筋布置都较为困难,不但施工难度大,而且造价昂贵^[8]。因此,工程界希望找出一种即可媲美实腹式型钢混凝土柱力学性能,又能大幅降低施工难度和工程造价的柱,本文给出的分散式钢棒核心钢管混凝土柱将可作为其中一种选择。本文课题组已完成分散式钢棒核心钢管混凝土柱初步对比试验研究 (与实腹式型钢混凝土柱对比),研究表明^[9]:分散式钢棒核心钢管混凝土柱的抗震性能可与实腹式型钢混凝土柱媲美,可作为实腹式型钢混凝土柱的替代者应用于工程结构。因此,用分散式钢棒核心钢管混凝土柱来替代型钢核心钢管混凝土柱,不但可使得箍筋及梁柱节点钢筋布置与施工的难度大大降低,而且可降低工程造价,其在工程结构、特别在高层建筑结构中的应用前景将十分广阔。

国内外对 SRC 结构进行了大量研究,但所涉及的截面形式大多都是核心位置加入型钢,我国现

行规范《型钢混凝土结构技术规程》(JGJ 138—2001) 和中《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002) 对于分散式钢棒核心钢管截面未做提及^[10-11],目前还缺乏针对分散式钢棒核心钢管截面柱的研究。为此,本文在已完成分散式钢棒核心钢管混凝土柱初步试验基础上,基于核心区钢管含钢量相同的原则,建立分散式钢棒核心钢管混凝土柱的非线性有限元模型,并采用试验数据验证分析模型的正确性,开展轴压比、核心含钢率、混凝土强度以及核心钢棒屈服强度等影响参数的分析,对分散式钢棒核心钢管混凝土柱的抗震性能进行深入研究。

1 非线性有限元分析模型

1.1 分散式钢棒核心钢管混凝土柱的参数

分散式钢棒核心钢管混凝土柱的截面形式如图 1 所示,柱高 900 mm,横截面 300 mm × 300 mm;混凝土强度等级为 C60 混凝土;核心钢棒分是 A45 # 钢棒,直径 30 mm,含钢率为 3.14%;核心区外纵向钢筋采用 HRB400 II 级螺纹钢筋,配筋率为 1.79%;箍筋采用 Φ10HRB335 热轧钢筋。其余参数见表 1。

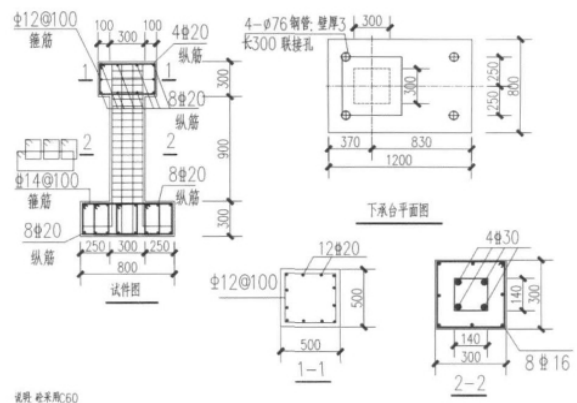


图 1 试件示意图 (单位: mm)

Fig. 1 Schematic of specimen

表 1 分散式钢棒钢管混凝土柱主要参数

Table 1 The major parameters of steel reinforced concrete of distributed steel bar core section

参数	截面尺寸 / mm × mm	混凝土强度	剪跨比 λ	设计轴压比 N/N_0	含钢率 / %	纵筋配筋 率 / %	体积配筋 率 / %
大小	300 × 300	C60	3.0	0.7	3.14	1.79	0.93

1.2 材料本构模型

本文采用塑性损伤本构模型,该材料适合准脆性材料的分析,使用修正的 Drucker-Prager 屈服准

则和非关联流动法则描述混凝土在低围压下的脆性损伤及高围压下的塑性流动两种主要变形机制^[12]。混凝土应力-应变关系采用 Mander、Priestley 和

Park 1988 建议的模型^[13], 如图 2 所示, 方程为

$$\sigma_c = \frac{\sigma_{cc} x r}{r - 1 + x^r} \quad (1)$$

式中, $x = \varepsilon_c / \varepsilon_{cc}$, $r = E_c / (E_c - E_{sec})$, $E_{sec} = f_{cc} / \varepsilon_{cc}$, $E_c = 5000 \sqrt{\sigma_{c0}}$, E_c 是切线模量, E_{sec} 是割线模量, σ_{cc} 约束混凝土的抗压强度, ε_{cc} 是抗压强度对应的应变:

$$\sigma_{cc} = \sigma_{c0} \left(2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 \sigma_l}{\sigma_{c0}}} - 2 \frac{\sigma_l}{\sigma_{c0}} - 1.245 \right) \quad (2)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{c0} [1 + 5(\sigma_{cc} / \sigma_{c0} - 1)] \quad (3)$$

式中, σ_{c0} 无约束混凝土的抗压强度, ε_{c0} 是 σ_{c0} 对应的应变, σ_l 作用在混凝土周边的约束应力。

模型中钢材等效应力 - 应变曲线采用文献 [14] 的建议, 应力 - 应变关系曲线如图 3 所示。

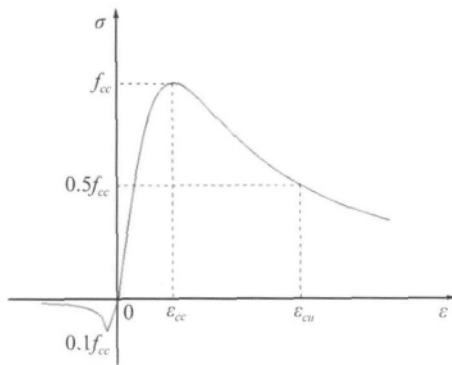


图 2 混凝土应力 - 应变曲线
Fig. 2 The stress-strain curve of concrete

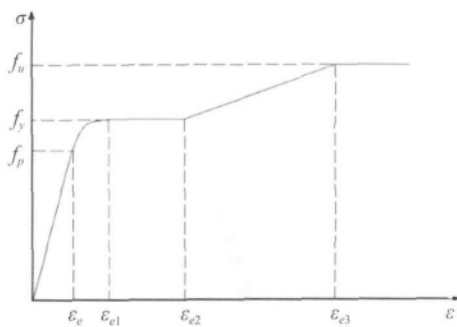


图 3 钢材应力 - 应变曲线
Fig. 3 The stress-strain curve of steel

1.3 有限元模型的建立

选用 ABAQUS 作为本文的有限元分析软件。混凝土选用实体单元 - C3D8R, 8 节点六面体线性减缩积分单元, 采用该单元进行三维分析时, 能够以最少时间获取更精确的结果; 钢筋及核心区钢棒

采用桁架单元 - T3D2, 两节点桁架单元。模型一端自由度全部约束, 用于施加竖向荷载以及水平推力的一端自由。轴向力采用力控加载制度, 在模型自由端面施加轴向力以达到试验轴压比; 水平加载采用位移加载制度; 分析中不考虑了钢筋与混凝土的粘结与滑移。建立的有限元模型如图 4 所示。

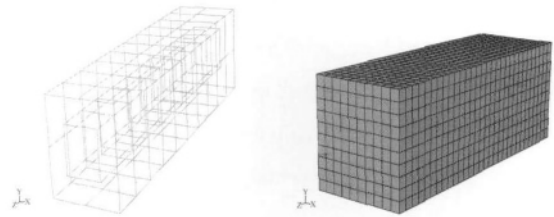


图 4 有限元模型
Fig. 4 Finite element model

2 试验验证有限元模型

图 1 所示分散式钢棒核心钢骨混凝土柱已进行初步的试验, 如图 5 所示。为验证本文所建分析模型的正确性, 现将试验与有限元分析得到的骨架曲线进行对比, 如图 6 所示。



图 5 实验加载装置图
Fig. 5 Diagram of loading apparatus

图 6 表明有限元计算结果与试验结果的骨架曲线均由上升段、屈服段、下降段及后继平台段组成, 其中水平极限承载力试验值与模拟值相差 2.8%。总的来说, 模拟与试验整体吻合良好, 破坏情况一致, 本文所建有限元分析模型正确, 可将此模型用于后续的参数分析。

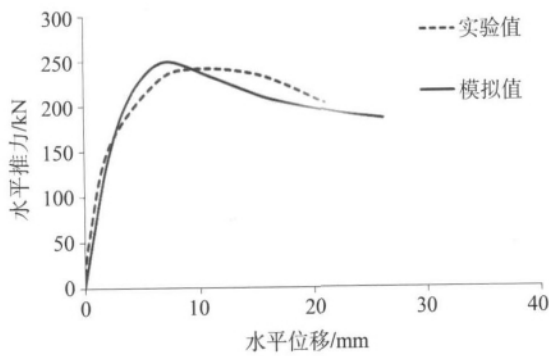


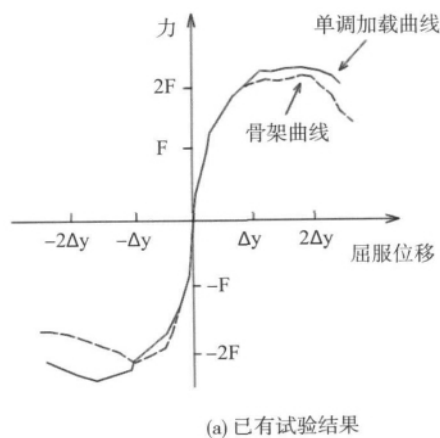
图 6 ABAQUS 计算骨架曲线与试验值对比

Fig. 6 Comparison of ABAQUS's skeleton curves and experimental value

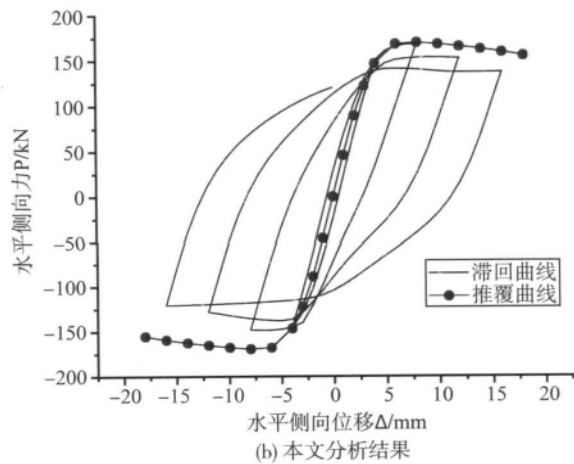
3 分散式钢棒混凝土柱参数分析

基于试验研究的局限性,在已验证数值模型基础上,本节将开展核心钢骨混凝土柱抗震性能的参数研究。分析对象为分散式钢棒核心钢骨混凝土柱荷载位移曲线、水平极限承载力及延性系数的影响,影响参数主要考虑轴压比、含钢率、混凝土强度及钢材屈服强度。

低周反复荷载作用下结构的骨架曲线是反映结构抗震性能的重要依据,但是,相关试验研究结果表明:滞回骨架曲线与单调推覆加载时的力-变形曲线基本重合^[15-16],如图 7 (a) 所示。为此,本文也对比了结构单调推覆加载和滞回加载的计算结果,表明滞回骨架曲线与单调推覆加载的力-变形曲线基本重合,如图 7 (b) 所示。因此,本文在开展非线性有限元参数分析时,采用单调推覆加载替代滞回加载研究各个参数对分散式钢棒核心钢骨混凝土柱抗震性能的影响。



(a) 已有试验结果



(b) 本文分析结果

图 7 单调加载与滞回加载对比

Fig. 7 Comparison of drab loading and hysteresis loading

将第一次加载曲线和各峰值点进行连线可得到滞回曲线的骨架曲线(包络线)。用骨架曲线所包围面积相等的方法确定等效屈服点,其相对应的位移为屈服位移 Δ_y ,取峰值荷载下降到 85% 时对应的位移作为极限位移 Δ_u ,极限位移 Δ_u 和屈服位移 Δ_y 之比为位移延性系数^[17]:

$$\mu_{\Delta} = \Delta_u / \Delta_y \quad (4)$$

图 8、图 9、图 10 分别给出了轴压比、含钢率、混凝土强度及钢材屈服强度对荷载位移曲线、水平极限承载力及延性系数的影响规律。

3.1 轴压比的影响

图 8 (a) 为分散式钢棒核心钢骨混凝土柱随轴压比变化 ($\mu = 0.1 \sim 0.7$) 的水平侧向力-水平侧向位移 ($P-\Delta$) 曲线。可以看出,随着轴压比的增大,水平极限承载力先增大后减小,当轴压比 ($\mu = 0.1 \sim 0.3$) 时,水平极限承载力 (P_m) 由 214 kN 增加到 228 kN,当轴压比 ($\mu = 0.3 \sim 0.7$) 时,水平极限承载力由 228 kN 减小到 132 kN,水平极限承载力随轴压比变化趋势见图 9 (a); 图 10 (a) 为延性系数与轴压比关系曲线,随着轴压比的增加,构件的延续逐渐降低,随着轴压比的增加 ($\mu = 0.1 \sim 0.7$),延性系数由 5.52 降低到 1.42。

3.2 含钢率的影响

图 8 (b) 给出了分散式钢棒核心钢骨混凝土柱随含钢率变化 ($\alpha = 0.2 \sim 0.8$) 的 $P-\Delta$ 曲线,可以看出初始刚度变化不明显屈服后的软化阶段趋于平缓,呈现出理想弹-塑性的曲线特征,当 $\alpha = 0.8$,由于含钢量比较大,分散式钢棒核心钢骨混凝土柱屈服后的 $P-\Delta$ 曲线呈现钢筋强化阶段的特

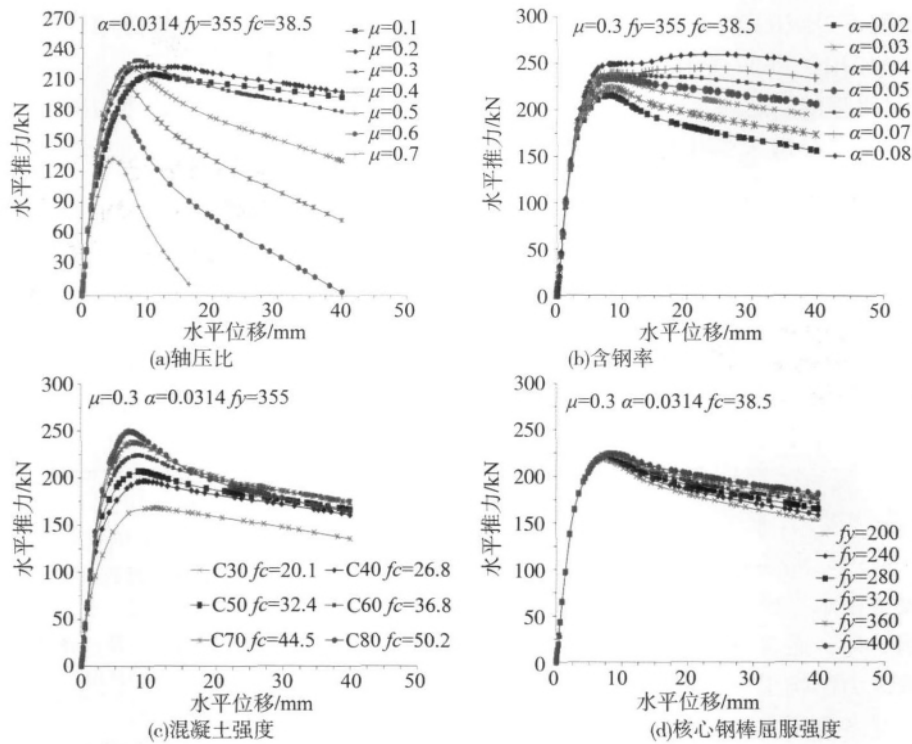


图 8 不同参数影响下的 $P-\Delta$ 曲线

Fig. 8 The $P-\Delta$ curves under the influence of different parameters

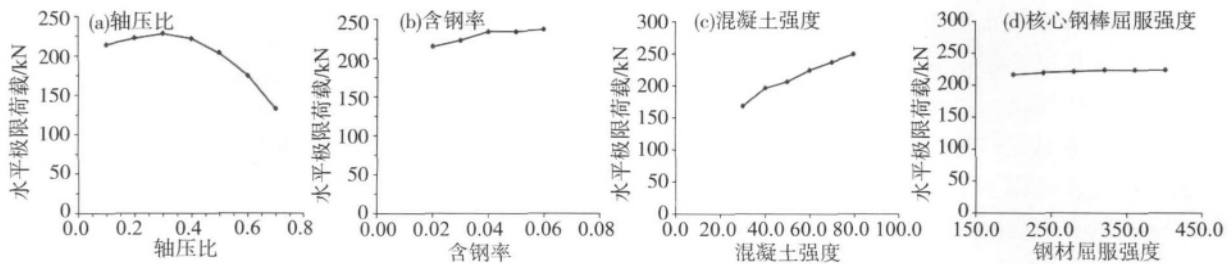


图 9 不同参数影响下的水平极限承载力变化趋势

Fig. 9 The trend of ultimate horizontal capacity under the influence of different parameters

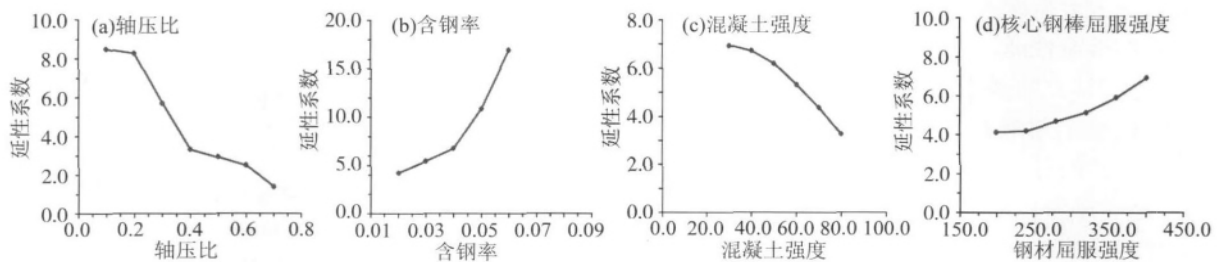


图 10 不同参数影响下的延性系数变化趋势

Fig. 10 The trend of ductility factor under the influence of different parameters

征；水平极限承载力随着含钢率的变化见图 9 (b)，表明含钢率越大，水平极限承载力增大，但是增长幅度缓慢；随着含钢率的增大，分散式钢棒核心钢骨混凝土柱延性性能快速增强，呈指数增加趋势，如图 10 (b) 所示。

3.3 混凝土强度的影响

分散式钢棒核心钢骨混凝土柱随着混凝土强度变化 (C30 ~ C80) 的 $P-\Delta$ 曲线如图 8 (c) 所示，柱的初始刚度随着混凝土强度的增大而增大；图 9 (c) 表明混凝土强度越大，水平极限承载力越大，

同时随着混凝土强度等级的提高,塑性阶段明显变陡,延性降低,如图 10 (c) 所示。

3.4 核心钢棒屈服强度的影响

图 8 (d) 给出了分散式钢棒核心钢骨混凝土柱随着核心钢棒屈服强度变化 ($f_y = 200 \sim 400$) 的 $P-\Delta$ 曲线,表明随着核心钢棒屈服强度的提高,柱的初始刚度几乎没有变化;如图 9 (d) 所示,分散式钢棒核心钢骨混凝土柱的水平极限承载力增大,但趋势不明显,屈服位移和极限位移也都有所增加但不明显;图 10 (d) 表明随着核心钢棒屈服强度的提高,延性系数逐渐增大,这是由于钢骨的存在,在混凝土开裂后,钢骨承担了相当大的剪力,由于钢骨屈服强度大,使得柱的极限位移增大。

总的来说,通过以上参数分析表明:分散式钢棒核心钢骨混凝土柱水平极限承载力受轴压比和混凝土强度的影响明显,而含钢率和核心钢棒屈服强度对水平极限承载力影响很小;延性系数是一个比较敏感的指标,受各种因素的影响非常明显。

4 结 论

已完成分散式钢棒核心钢骨混凝土柱初步试验研究结果表明:分散式钢棒核心钢骨混凝土柱的抗震性能可媲美实腹式型钢混凝土柱,同时,与实腹式型钢混凝土柱相比,还有施工难度低、工程造价低等特点,初步研究结果表明可作为实腹式型钢混凝土柱的替代者应用于工程结构。为了进一步研究分散式钢棒核心钢骨混凝土柱的工作机理和力学性能,本文应用 ABAQUS 通用有限元分析软件,建立了分散式钢棒核心钢骨混凝土柱的非线性有限元模型,并通过初步试验研究结果验证了模型的正确性,通过参数分析深入研究了分散式钢棒核心钢骨混凝土柱的抗震性能,主要结论如下:

1) 本文建立的采用约束混凝土本构关系的有限元计算模型能够很好的计算出试件的推覆力曲线,并与试验的骨架曲线吻合良好。

2) 随着轴压比的增加,试件的水平极限承载力先增加后减小符合压弯柱破坏规律;延性系数逐渐减小,柱的延性性能逐渐降低。

3) 水平极限承载力随着核心含钢率、混凝土强度等级的提高而增大,核心钢棒屈服强度影响不明显;延性系数随着核心含钢率、混凝土强度等级提高而减小,随着核心钢棒屈服强度增大而增大。

4) 分散式钢棒核心钢骨混凝土柱水平极限承载力受轴压比和混凝土强度的影响明显,而含钢率和核心钢棒屈服强度对水平极限承载力影响很小;

延性系数是一个比较敏感的指标,受各种因素的影响非常明显。

本文的研究成果,将为后续参数影响的试验研究奠定基础。

参考文献:

- [1] 胡庆昌. 1995 年 1 月 17 日本阪神大地震中神戸市房屋结构震害简介[J]. 建筑结构学报, 1995, 16(3): 10-12.
- [2] 中日联合考察团,周福霖,崔鸿超,等. 东日本大地震灾害考察报告[J]. 建筑结构, 2012, 42(4): 1-20.
- [3] 刘阳,郭子雄,欧阳文俊,等. 核心型钢混凝土柱抗震性能及轴压比限值试验研究[J]. 土木工程学报, 2010(6): 57-66.
- [4] 蔡健,梁伟盛,林辉. 方钢管混凝土柱抗剪性能试验研究[J]. 深圳大学学报理工版, 2012, 29(3): 189-194.
- [5] 张春梅,周云,阴毅. 钢-混凝土组合柱轴压性能的实验对比研究[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2004, 43(2): 46-49.
- [6] QI Hongtuo, GUO Lanhui. Axial load behavior and strength of tubed steel reinforced-concrete (SRC) stub columns [J]. Thin-Walled Structures, 2011, (49): 1141-1150.
- [7] HAN Linhai, WANG Wenda, ZHAO Xiaoling. Behaviour of steel beam to concrete-filled SHS column frames: Finite element model and verifications [J]. Engineering Structures, 2008(30): 1647-1658.
- [8] 卜楠楠. 国贸三期钢骨混凝土组合结构施工技术[J]. 施工技术, 2010, 39(10): 89-92.
- [9] 赵松林,彭水利,皮音培,等. 分散式钢棒混凝土柱抗震性能对比试验研究[J]. 建筑结构, 2012, 42(6): 95-98.
- [10] 中国建筑科学研究院. JGJ 138-2001 型钢混凝土组合结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [11] 中国建筑科学研究院. GB50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [12] ABAQUS Inc. ABAQUS theory manual and user manuals, Version 6.5 [R]. Providence, R. I.: ABAQUS Inc., 2004.
- [13] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, Park. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. J Struct. Eng, 1988, 114(8): 1804-1826.
- [14] 卢方伟,李四平,孙国钧,等. 方钢管混凝土轴压短柱的非线性有限元分析[J]. 工程力学, 2007, 24(3): 110-114.
- [15] 周明华. 土木工程结构试验与检测[M]. 南京: 东南大学出版社, 2002.
- [16] 张新培. 钢筋混凝土抗震结构非线性分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [17] 贾金青,赵国藩. 高强混凝土框架短柱力学性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(3): 43-47.