

文章编号: 1000-4750(2014)Suppl-0201-06

内配型钢方钢管混凝土轴压短柱力学性能 及参数分析

史艳莉^{1,2}, 王文达², 王亚伟²

(1. 兰州大学土木工程与力学学院, 兰州 730000; 2. 兰州理工大学土木工程学院, 兰州 730050)

摘 要: 在钢管混凝土构件内部配置型钢可显著提高其承载能力和延性等性能。在合理选取材料本构模型的基础上, 用 ABAQUS 软件建立了内配型钢的方钢管混凝土轴压短柱受力全过程分析的数值模型, 数值计算结果和已有研究者完成的试验结果吻合良好, 基于此模型对其在轴压受力全过程中各部件的荷载分配进行了分析。在工程常用参数范围内对影响其荷载-变形曲线的主要因素进行了参数分析, 结果表明: 随着钢管强度、型钢强度、混凝土强度、钢管和型钢截面含钢率的提高构件的极限承载力有所提高。参数分析的结果上可为进一步明晰该类组合构件工作机理和确定承载力指标等提供基础。

关键词: 结构工程; 内配型钢钢管混凝土; 轴压短柱; 有限元模型; 数值模拟; 参数分析

中图分类号: TU398^{+.9} **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.03.S010

MECHANICAL BEHAVIOR AND PARAMETRIC STUDY OF CONCRETE-FILLED STEEL TUBULAR STUB COLUMNS WITH ENCASED PROFILED STEEL UNDER AXIAL COMPRESSION

SHI Yan-li^{1,2}, WANG Wen-da², WANG Ya-wei²

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The encased profiled steel can significantly improve the bear-capacity and ductility of concrete-filled steel tubular (CFST) members. This paper presents a finite element model (FEM) to investigate the axial compressive mechanical behavior of a square CFST stub column with internal profiled steel using ABAQUS based on reasonable constitutive models of steel and core concrete. The numerical results were verified and matched well with the other researchers' experimental results. Based on the model, the load distribution of different components of the column were calculated and analyzed. Parametric analysis was performed based on the typical practical factors. The results show that the ultimate strength of this type of CFST columns will be enhanced effectively due to the incremental strength of steel and concrete, the strength of profile steel, the steel ratios of steel tube and internal steel, respectively. The results are referred to further research on the mechanical behavior and strength index of the new type of composite column.

Key words: structural engineering; concrete-filled steel tube (CFST) with encased profiled steel; axial compressive stub column; finite element model (FEM); numerical simulation; parametric analysis

随着建筑物向高耸和大跨方向发展, 框架柱作为结构承载的主要竖向构件, 对其承载能力和延性

等的要求也越来越高。近年来, 钢管混凝土新型组合构件因其承载力高、塑性韧性好、抗震和抗火性

收稿日期: 2013-03-31; 修改日期: 2013-09-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51268035)

通讯作者: 王文达(1976—), 男, 甘肃天水人, 教授, 博士, 从事钢-混凝土组合结构、混合结构研究(E-mail: wangwd@lut.cn).

作者简介: 史艳莉(1977—), 女, 河北涿州人, 副教授, 博士生, 主要从事钢与混凝土组合结构研究(E-mail: ceshiyi@163.com);

王亚伟(1988—), 男, 河南许昌人, 助工, 硕士, 主要从事钢与混凝土组合结构研究(E-mail: cewangyw@gmail.com).

能良好以及施工方便快捷等优良的承载和力学性能,在多高层、超高层建筑及大跨度桥梁中应用越来越广泛,取得了良好的经济效益和社会效益^[1]。在众多高层、超高层建筑中,因为底部柱承受的荷载往往非常大,因此钢管混凝土柱构件的截面一般均不是简单的在钢管中填充素混凝土的构件,而是新型的组合构件,由于承载力、延性或抗火性能的要求在核心混凝土增加很多附加构造,例如配置纵向钢筋或型钢。例如台北 101 大厦中的钢管混凝土柱、深圳京基金融中心中的矩形钢管混凝土柱等典型工程中,柱截面构造非常复杂,内部构造既有竖向的型钢,也存在不同方向的加劲板,同时也配置了钢筋,形成一种非常复杂的钢与混凝土组合柱。对于这样的新型组合柱构件,目前国内设计规范或规程中均没有给出设计方法,国外设计标准中欧洲规范 Eurocode 4^[2]给出了钢管中配置几类型钢或钢筋并填充混凝土时的设计方法,但也不能直接引进用于我国的实际工程中,因为其中还有荷载取值、材料设计指标取值、规范可靠度指标等诸多方面的差异。因此,有必要进行内部配置型钢的钢管混凝土组合构件的力学性能研究,系统的静力性能、抗震性能、抗火性能及施工阶段力学性能等方面的研究内容都是很有必要且紧迫面对的。图 1 为工程中常见的两种内配十字形型钢钢管混凝土柱截面形式示意。

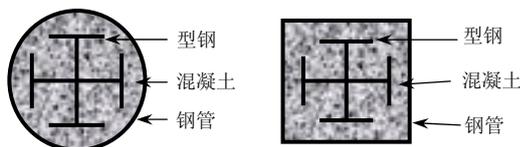


图 1 内配型钢钢管混凝土构件截面示意

Fig.1 The cross section of CFST column with encased profiled steel

国内外对该类新型组合构件的静力性能已有一些相关试验研究和理论分析,如 Kato^[3]、Wang 等^[4]、朱美春等^[5]、王兵等^[6]、何益斌等^[7]、王连广等^[8]、周海兵等^[9]、丁发兴等^[10]、王连广等^[11-12]均对内部配置了不同截面形式型钢的圆形或方形截面钢管混凝土构件进行了试验研究。在现有研究者完成的内配型钢方钢管混凝土轴压短构件试验结果的基础上,本文采用 ABAQUS 对该类构件进行数值模拟,对此类组合构件中钢管、内部型钢和核心混凝土之间的相互作用及受力机理进行初步分析,对影响此类组合构件承载力的因素进行了参数分析,以期为该类型组合柱承载力设计方法及工

程实践应用提供参考。

1 有限元模型的建立

1.1 材料模型的选择

内配型钢的钢管混凝土构件的主要组成部分有外部钢管、内部型钢及核心混凝土。在用 ABAQUS 建模时,外钢管和内配型钢采用弹塑性材料模型,对于普通低碳软钢应力-应变关系可采用二次塑流模型,具体表达式见式(1),高强钢材可采用线性强化模型,具体见文献[1]。该本构模型在钢管混凝土构件的数值模拟中得到广泛应用,且取得良好的计算效果。

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_s, & \varepsilon_s \leq \varepsilon_e \\ -A\varepsilon_s^2 + B\varepsilon_s + C, & \varepsilon_e < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{e1} \\ f_y, & \varepsilon_{e1} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{e2} \\ f_y \left[1 + 0.6 \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{e2}}{\varepsilon_{e3} - \varepsilon_{e2}} \right], & \varepsilon_{e2} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{e3} \\ 1.6f_y, & \varepsilon_s > \varepsilon_{e3} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\varepsilon_e = 0.8f_y / E_s$; $\varepsilon_{e1} = 1.5\varepsilon_e$; $\varepsilon_{e2} = 10\varepsilon_{e1}$; $\varepsilon_{e3} = 100\varepsilon_{e1}$; $A = 0.2f_y / (\varepsilon_{e1} - \varepsilon_e)^2$; $B = 2A\varepsilon_{e1}$; $C = 0.8f_y + A\varepsilon_e^2 - B\varepsilon_e$ 。

韩林海^[1]给出了考虑约束效应系数影响的、适用于被动约束状态下的钢管混凝土中核心混凝土受压应力-应变关系。采用该本构模型进行了大量钢管混凝土构件轴压、偏压、压弯及扭转剪切等受力时的数值分析,取得了良好的计算效果。内配型钢钢管混凝土构件中的核心混凝土受力和钢管混凝土构件类似,其核心混凝土在受力时也要受到外钢管的约束效应,因此本文核心混凝土同样采用该模型,其受压应力-应变关系表达式为:

$$y = \begin{cases} 2x - x^2, & x \leq 1 \\ \frac{x}{\beta(x-1)^{\eta} + x}, & x > 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $x = \varepsilon / \varepsilon_0$; $y = \sigma / \sigma_0$, $\sigma_0 = f'_c$, $\varepsilon_0 = \varepsilon_c + 800\xi^{0.2} \times 10^{-6}$, $\varepsilon_c = (1300 + 12.5f'_c) \times 10^{-6}$ 。其余参数详见文献[1]。对于混凝土受拉性能采用破坏能量准则计算,具有较好的计算收敛性。

1.2 单元类型和边界条件

有限元模型中外钢管采用四节点壳单元 S4,核心混凝土和加载板采用三维实体单元 C3D8(不考虑缩减积分),内部型钢可采用实体单元或壳单元建模。分别用壳单元和实体单元进行了分析对比,发

现不同单元类型对计算结果并无明显影响,但壳单元数值模拟效率较高,因此采用壳单元模拟内部型钢。

钢管与核心混凝土界面模型由界面法线方向硬接触和切线方向的粘结滑移构成,界面法线方向采用硬接触,界面切向力模拟采用库仑摩擦模型,其摩擦系数取 0.25。内部型钢与核心混凝土之间可考虑接触模型,切向用库仑摩擦来实现,也可用嵌入“Embedded”方式建模。型钢和核心混凝土之间在受力全过程中并无明显滑移,因此不考虑相对滑移的嵌入方式建模与考虑库仑摩擦模型的建模计算结果也无明显差异。模型边界条件为柱下部固定约束,约束平动位移和转动位移,顶部自由的边界条件,用位移加载方式加载。具体有限元模型如图 2 所示。

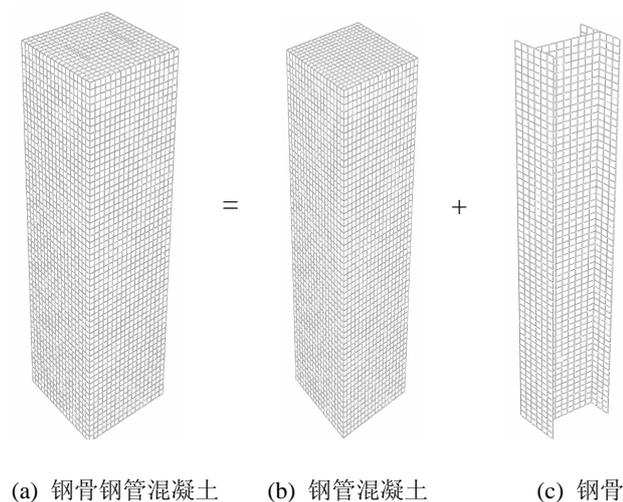


图 2 构件有限元分析模型示意图

Fig.2 Finite element analysis model of member

2 模型验证与受力分析

2.1 数值模型验证

采用上述建模方法,对前已述及的研究者完成的内配型钢的圆形及方形截面钢管混凝土轴压短柱试验试件进行了数值模拟,对文献[5]中的部分算例结果对比曲线如图 2 所示,其中 B 和 t 分别为方钢管边长和厚度, L 为试件长度, f_y 为钢管强度, f_{ay} 为内部型钢强度, f_c 为核心混凝土强度, A_s 为内部型钢面积。由图 3 可见,总体上数值计算曲线和试验实测曲线吻合良好。上述建模方法可以较好进行内配型钢的方钢管混凝土构件轴压受力性能分析。

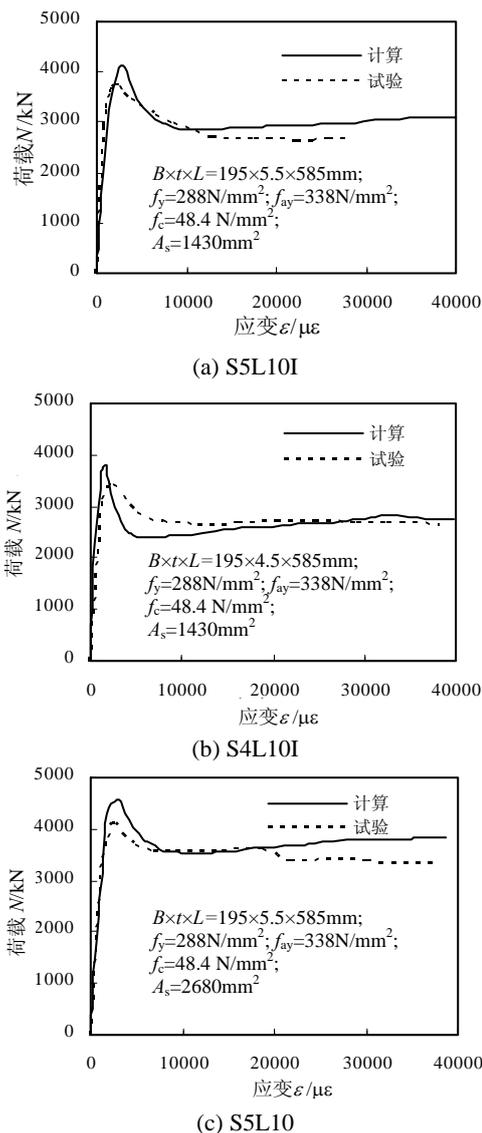


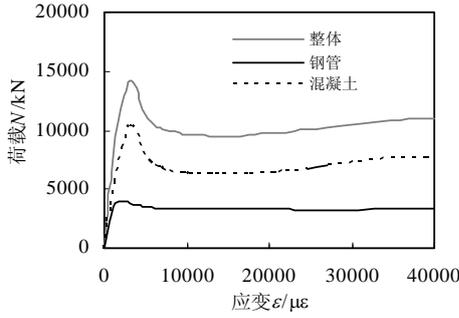
图 3 试验结果与计算结果的曲线对比

Fig.3 Comparisons between test and calculation results

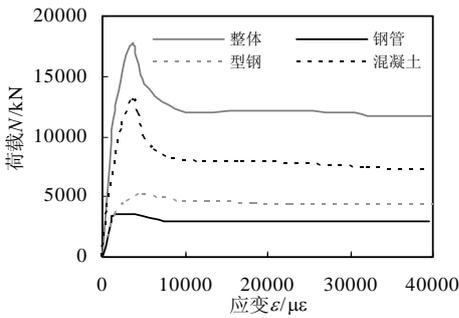
2.2 受力机理分析

为对比钢管混凝土内部是否配置型钢对其承载力和受力性能的影响,设计了一组方钢管混凝土短柱和内部配置工字型钢的方钢管混凝土短柱构件,构件几何尺寸为 $B \times t \times L = 443 \text{mm} \times 11.1 \text{mm} \times 1500 \text{mm}$,混凝土强度 $f_{cu} = 60 \text{N/mm}^2$,钢管强度 $f_y = 345 \text{N/mm}^2$,型钢强度 $f_{ay} = 345 \text{N/mm}^2$,钢管含钢率为 0.1。内配型钢含钢率为 0.06。采用前述建模方式分别对上面两个轴压短柱进行受力全过程模拟,得到其轴向荷载-轴向应变关系曲线如图 4 所示,为便于对比,除输出整体构件的荷载-应变关系外,还将每部分组件(钢管、核心混凝土及型钢)承担的荷载-应变曲线也给出。可见上述两个构件都是由混凝土承担了大部分的荷载,核心混凝土所承担的荷载

达到峰值与整体构件达到各自的极限承载力时刻接近，钢管都是先于混凝土达到极限荷载，从而能够进入塑性而对核心混凝土形成更好的约束作用。对于内配型钢的方钢管混凝土构件，其型钢也要承担一部分荷载，且型钢达到其极限承载力的时刻要晚于整个构件达到极限的时刻，从中也可反映出其三部分组件虽然是共同工作，但承担荷载多少及达到各自极限荷载的次序有所不同。



(a) 方钢管混凝土轴压短柱



(b) 内配工字钢的方钢管混凝土轴压短柱

图 4 典型构件荷载分配曲线

Fig.4 The load distribution of the typical members

2.3 破坏模式分析

在数值模拟中不考虑实际试验中由于试件焊接、加载仪器等造成的试件初始缺陷和偶然偏心等的影响，图 5 给出了内配型钢的方钢管混凝土轴压短柱的破坏模式，可以看出本文模拟中的构件的破坏形态均为典型的压屈型破坏。

由图 5 可见，在轴压受力全过程中方钢管中部急速鼓曲，产生较大的变形，内部型钢由于核心混凝土的约束作用，不用担心型钢的平面外失稳，这就极大的释放了型钢的承载能力。总体上，该类构件在轴力作用下首先钢管向外产生鼓曲，接着核心混凝土被压碎从而发生破坏。

3 影响因素分析

参考已有内配型钢钢管混凝土轴压短柱的试验研究结果和钢管混凝土轴压短构件的已有成果，

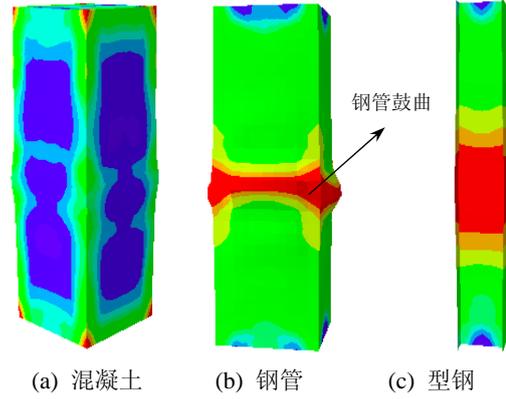


图 5 内配型钢的方钢管混凝土轴压短柱破坏模式

Fig.5 The failure mode of square CFST stub column with internal profiled steel

可能影响内配型钢钢管混凝土轴压短柱力学性能的主要影响因素有钢管强度、内配型钢强度、核心混凝土强度、钢管的截面含钢率、型钢的截面含钢率和型钢截面形式，本文参数分析时选用工字型钢。结合工程常用参数范围和有关设计规范，选择的标准试件基本信息如下：截面为 $B \times t \times L = 500\text{mm} \times 11.1\text{mm} \times 1500\text{mm}$ ，C60 混凝土，钢管及内配型钢均为 Q345，钢管截面含钢率为 0.1，内配型钢含钢率 0.06，其中钢管截面含钢率定义为 $\alpha = A_s / A_c$ ，型钢的截面含钢率定义为 $\rho = A_d / A_c$ ， A_s 为钢管面积， A_a 为内配型钢截面面积， A_c 为核心混凝土的名义截面面积，为统一不减去型钢的面积。 f_y 为钢管强度， f_{ay} 为内配型钢强度， f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度。对内配工字型钢的方钢管混凝土轴心受压短柱力学性能的主要影响因素进行参数分析，主要规律如下。

1) 钢管强度

图 6(a)所示为不同钢管强度时内配型钢的方钢管混凝土短柱轴向荷载-应变关系曲线，可见总体上构件承载力随着钢管强度提高而增大，变化规律与内部填充素混凝土的钢管混凝土构件类似，承载力提高幅度随钢材强度的提高幅度有关，且构件延性随钢管强度无明显变化。

2) 型钢强度

图 6(b)为内配不同材料强度型钢时轴压短柱的荷载-应变关系曲线。总体上随型钢强度的提高构件的极限承载力增大，且曲线形状无明显变化，说明其延性并无明显变化。同时可看出，由于参数分析基本算例中型钢面积较小(含钢率为 0.06)，数值分析对比过程中仅变化其强度数值，构件的承载力增加幅度比钢管强度变化引起的承载力变化幅度小。另一方面，内部工字型钢对整个构件承载力的主要

贡献仅在于其自身承载能力的充分发挥，而外钢管对其承载力的贡献不但在于自身承载力能力，而且由于钢管强度提高对核心混凝土约束作用的提高还会提高核心混凝土的承载能力。因此，对于内配型钢的钢管混凝土构件，内部型钢的含钢率及强度不宜过高。

3) 核心混凝土强度

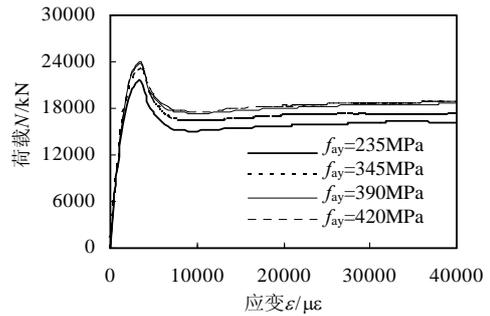
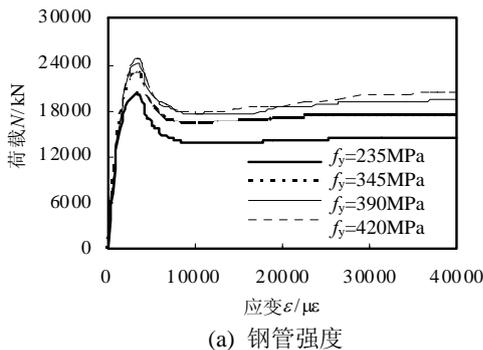
图 4 反映出在内配型钢的钢管混凝土轴压短柱中的内部核心混凝土是承担轴向荷载的主要部件。图 6(c)为不同核心混凝土强度时轴压短柱构件荷载-应变曲线，可见，当混凝土立方体强度由 C40 提高到 C60 时，构件极限承载力提高了 18%，由 C40 到 C80 时极限承载力提高了 29.5%，由 C40 提高到 C100 时极限承载力提高了 54.4%。可见提高混凝土抗压强度对内配型钢的方钢管混凝土轴压短柱极限承载力的提高影响显著，但从曲线形状来看其延性呈逐渐降低趋势。

4) 钢管截面含钢率

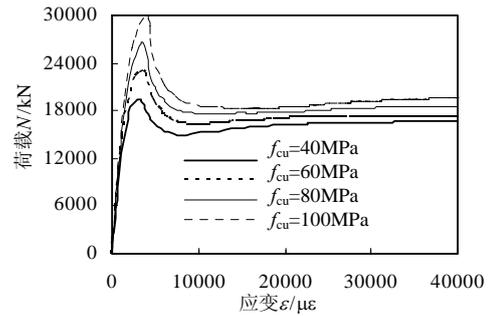
图 6(d)为不同钢管含钢率时轴压短构件的轴向荷载-应变关系，可见钢管含钢率对构件极限承载力有显著影响，随钢管含钢率的提高构件的极限承载力明显提高，同时曲线形状也有所不同，随着钢管含钢率的增加曲线过峰值点后下降趋势趋于平缓，可见增加钢管含钢率也提高了构件的延性。主要原因是提高钢管的含钢率使得钢管对混凝土的约束效应更加显著，从而增强了钢管对混凝土的约束效果。

5) 型钢截面含钢率

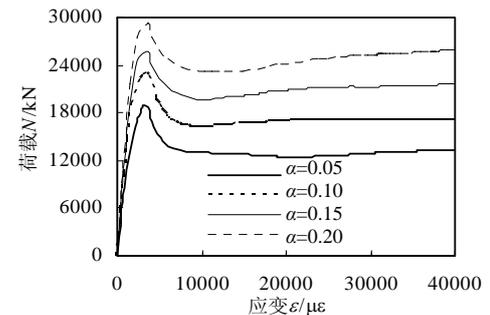
图 6(e)为变化内部型钢的含钢率时内配型钢方钢管混凝土轴压短柱轴向荷载-应变曲线。可见随着型钢含钢率的增大，构件的极限承载力均表现为增加趋势，本文算例中型钢含钢率分别从 4%~10%按照 2%级差增加，曲线增加的幅度也较为一致，且曲线形状变化不明显，可见型钢含钢率对构件的延性影响不明显。



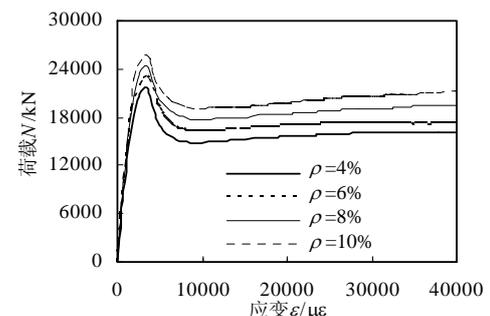
(b) 内部型钢强度



(c) 核心混凝土强度



(d) 钢管含钢率



(e) 内配型钢含钢率

图 6 各主要参数对内配工字钢的方钢管混凝土轴压短柱荷载-应变曲线影响

Fig.6 The main factors effect on the load versus strain curves of square CFST stub column with internal profiled steel

4 结论

通过上述对内配型钢的方钢管混凝土轴压短柱受力性能分析，可得以下几点结论：

(1) 内部型钢采用实体单元或壳单元建模对计算结果影响不明显，是否考虑内部型钢与核心混凝土

土之间的相互滑移对计算结果也影响不明显。

(2) 内配工字钢的方钢管混凝土轴压短柱受力特征和钢管混凝土构件类似, 混凝土承担了大部分荷载, 内部型钢承担部分荷载, 且其达到极限承载力的时刻要晚于整个构件达到极限的时刻。

(3) 影响内配型钢方钢管混凝土轴压短柱承载力的主要因素有钢管强度、内配型钢强度、核心混凝土强度、钢管的截面含钢率、型钢的截面含钢率。总体上随着上述参数的提高, 构件的极限承载力有所提高。

参考文献:

- [1] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践[M]. 第2版. 北京: 科学出版社, 2007: 106—108.
Han Linhai. Concrete filled steel tubular structure-theory and practice [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2007: 106—108. (in Chinese)
- [2] Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures, part 1.1, general rules and rules for buildings [S]. Brussels (Belgium): European Committee for Standardization, 2004.
- [3] Kato Ben. Column curves of steel-concrete composite members [J]. Journal Construction of Steel Research, 1996, 39(2): 121—135.
- [4] Wang Qingxiang, Zhao Dazhou, Guan Ping. Experimental study on the strength and ductility of steel tubular columns filled with steel-reinforced concrete [J]. Engineering Structures, 2004, 26(7): 907—915.
- [5] 朱美春, 王清湘, 冯秀峰. 轴心受压钢管-方钢管自密实高强混凝土短柱的力学性能研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(6): 35—41.
Zhu Meichun, Wang Qingxiang, Feng Xiufeng. Behavior of axially-loaded square steel tube short columns filled with steel-reinforced self-consolidating high-strength concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(6): 35—41. (in Chinese)
- [6] 王兵, 王连广, 刘晓. 钢管钢管混凝土组合柱大偏心受压承载力分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2009, 25(4): 712—716.
Wang Bing, Wang Lianguang, Liu Xiao. Calculation of bearing capacity for steel tube filled with steel-reinforced concrete subjected to large eccentric compression load [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2009, 25(4): 712—716. (in Chinese)
- [7] 何益斌, 肖阿林, 郭健, 等. 钢管钢管自密实高强混凝土偏压柱力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(4): 102—109.
He Yibin, Xiao Alin, Guo Jian, et al. Experimental study on behavior of eccentrically loaded steel-reinforced self-compacting high-strength concrete filled steel tubular columns [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(4): 102—109. (in Chinese)
- [8] 王连广, 赵同峰, 李宏男. 方钢管-钢管高强混凝土偏压柱试验研究与理论分析[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(7): 64—71.
Wang Lianguang, Zhao Tongfeng, Li Hongnan. Experimental research and theoretical analysis of square steel tube columns filled with steel-reinforced high-strength concrete subjected to eccentric loading [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(7): 64—71. (in Chinese)
- [9] 周海兵, 何益斌, 郭健, 等. 钢管钢管混凝土柱-钢管混凝土梁组合节点试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(3): 67—73.
Zhou Haibing, He Yibin, Guo Jian, et al. Experimental study on composite joints of steel-reinforced concrete filled steel tubular columns and steel-reinforced concrete beams [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(3): 67—73. (in Chinese)
- [10] 丁发兴, 李刚, 龚永智, 等. 钢管-圆钢管混凝土轴压短柱力学性能分析[J]. 中南大学学报, 2012, 43(9): 3625—3630.
Ding Faxing, Li Gang, Gong Yongzhi, et al. Behavior of tubular stub columns of axially loaded steel-reinforced concrete-filled circular steel [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(9): 3625—3630. (in Chinese)
- [11] 王连广, 赵同峰, 安山河. 方钢管-钢管混凝土双向偏压试件试验研究与理论分析[J]. 工程力学, 2009, 26(5): 137—141.
Wang Lianguang, Zhao Tongfeng, An Shanhe. Experimental research and theoretical analysis of square tube filled with reinforced concrete subjected to axial compression and bi-axial bending moment [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(5): 137—141. (in Chinese)
- [12] 王连广, 刘晓, 常江. 钢管钢管高强混凝土偏心受压承载力试验研究[J]. 工程力学, 2010, 27(2): 124—129.
Wang Lianguang, Liu Xiao, Chang Jiang. Capacity of steel tube column filled with steel-reinforced high-strength concrete subjected to eccentric loading [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(2): 124—129. (in Chinese)