

# 钢管初应力对钢管混凝土节点力学性能影响研究

史艳莉,王双,王文达(兰州理工大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730050)

[摘要] 钢管混凝土结构中的钢管在施工期间首先作为施工支撑和混凝土浇筑模板,因此钢管中已存在初始的应力。基于 ABAQUS 软件,对有初应力的钢管混凝土构件进行了数值分析,理论计算结果与试验结果吻合良好。在此基础上对有钢管初应力的钢管混凝土柱-钢梁节点力学性能进行了数值模拟和参数分析。结果表明:钢管初应力的存在使得钢管混凝土节点极限承载力有一定程度降低;参数分析结果表明,钢管初应力对节点承载力的降低随柱轴压比和长细比的增大而趋于更加明显,而梁柱强度比和梁柱线刚度比的变化对其影响不明显。

[关键词] 钢管混凝土;钢管初应力;钢梁;节点;力学性能

[中图分类号] TU398+.9

[文献标识码] A

## Research on Behavior of the Joint with Concrete-filled Steel Tubular Column Under Pre-load in Steel Tube

Shi Yan-li, Wang Shuang, Wang Wen-da

(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** The hollow steel tubes of concrete-filled steel tubular (CFST) structure have initial stress because they are served as construction support and concrete casting framework during construction stage. The CFST members with pre-load in steel tubes are analyzed using ABAQUS, and the numerical results are matched well with the others' experiments. The composite joints with CFST column and steel beam are simulated based on the same numerical model under the pre-load in the hollow steel tubes or not. Parametric study is performed to investigate the performance of the joints under the parameters, the axial load ratio of column, slenderness ratio, the beam to columns strength ratio and beam-column linear stiffness ratio. The results show that the ultimate strength of the composite joints is slightly decreased because of the initial stress in steel tubes in general. The descend of the ultimate strength of the joints with pre-load in steel tubes became much more evident with the incremental axial load ratio and slenderness ratio of the CFST column. It is not obvious change for the joint with the incremental beam to columns strength ratio and beam-column linear stiffness ratio.

**Keywords:** concrete-filled steel tube (CFST); pre-load in steel tube; steel beam; connection; mechanical behavior

**E-mail:** wangwd@lut.cn

### 1 引言

钢管混凝土结构由于具有承载力高、塑性和韧性好、施工方便、耐火性能好、经济效益显著等优异特性,在现代高层超高层建筑中的应用越来越广泛<sup>[1]</sup>。在实际工程中,钢管混凝土结构的施工工序一般是:先支好空钢管,施工几层楼盖后再浇筑其中的核心混凝土,如构筑物中的构架柱、厂房柱以及多高层建筑中的框架柱,这样,在形成钢管混凝土组

合结构共同工作之前,钢管中就存在着因承受施工阶段的施工荷载及混凝土的自重等而产生的初始应力和初始应变。

国内外学者对考虑钢管初应力时的钢管混凝土构件力学性能已经进行了许多研究,并取得了相关研究成果,如黄世娟和钟善桐<sup>[2]</sup>进行了初应力对钢管混凝土轴压构件承载力影响的试验研究,张晓庆和钟善桐<sup>[3]</sup>进行了初应力对钢管混凝土偏压构件承载力影响的试验研究。查晓雄等<sup>[4]</sup>分析了钢管混凝土高层及超高层建筑在平行立体交叉法施工及施工中初应力的影响。Han 和 Yao<sup>[5]</sup>系统研究了钢

[收稿日期] 2012-02-06

[基金项目] 甘肃省建设科技攻关项目(JK2011-16)

管初应力对钢管混凝土构件力学性能的影响。熊德新等<sup>[6]</sup>进行了偏心初应力对方钢管混凝土构件工作性能的影响分析; Xiong 和 Zha<sup>[7]</sup>进行了有钢管初应力时钢管混凝土构件性能的研究。黄福云和陈宝春<sup>[8]</sup>进行了钢管混凝土拱桥初应力问题的研究。甘肃省工程建设标准《钢管混凝土结构技术规程 DB62/T25-3041-2009》<sup>[9]</sup>等规范中也提出对钢管混凝土构件的钢管初应力值给予一定的限定,并结合上述研究成果规定了考虑初应力时钢管混凝土构件的承载力计算方法。

钢管混凝土构件在结构中一般作为承载柱,在结构体系中的钢管混凝土构件的力学性能受到不同边界约束,因而也体现出不同的力学性能特点,也就是说,在框架结构体系中有初应力的钢管混凝土柱必然对其节点或框架的力学性能产生一定的影响。目前对考虑钢管初应力时钢管混凝土构件节点力学性能影响的研究尚不多见,本文基于考虑初应力时钢管混凝土构件力学性能研究成果的基础上,通过建立数值模型,研究钢管初始应力对钢管混凝土柱-钢梁节点力学性能的影响,对钢管混凝土节点在施工阶段及使用阶段的力学性能分析提供参考。

## 2 有限元模型

本文以有侧移钢管混凝土柱-钢梁中间层节点为研究对象,研究考虑钢管初应力情况下,此类节点的极限承载力和刚度等指标的变化规律。数值模拟时采用 ABAQUS 软件建模。

### 2.1 材料本构模型

选用 ABAQUS 软件中的塑性损伤模型作为混凝土材料本构模型。韩林海等<sup>[10]</sup>基于该模型对钢管混凝土节点及框架进行了数值模拟,理论分析结果和试验结果吻合良好,其中给出了适合于 ABAQUS 中应用的核心混凝土的单轴受压应力应变关系表达式如下:

$$y = \begin{cases} 2x - x^2 & (x \leq 1) \\ \frac{x}{\beta_0(x-1)^n + x} & (x > 1) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $x = \varepsilon/\varepsilon_0$ ,  $y = \sigma/\sigma_0$ ,  $\varepsilon$  和  $\sigma$  分别为混凝土受压应变和应力;  $\varepsilon_0$  和  $\sigma_0$  分别为混凝土受压时峰值应变和峰值应力,其余参数含义及表达式可参见文献[10]。

混凝土受拉软化性能采用基于能量的破坏准则通过断裂能与应变的关系表达式实现<sup>[10]</sup>,其中混

凝土受拉峰值应力为  $\sigma_p = 0.26(1.25f_c)^{2/3}$ , 式中  $f_c$  为混凝土圆柱体抗压强度,单位为  $\text{N}/\text{mm}^2$ 。

钢梁及钢管中的钢材采用弹塑性材料模型,满足 Von Mises 屈服准则,钢材应力-应变关系对于低碳软钢采用二次塑流模型,高强钢材采用双折线强化模型,具体表达式可参见文献[10]。

### 2.2 有限元模型的建立

在 ABAQUS 有限元模型中,钢管混凝土柱-钢梁环板节点是由钢管、钢管内核心混凝土、钢梁、环板及加载板组成。钢管内核心混凝土和加载板采用 8 节点实体单元 C3D8; 钢管、钢梁及环板采用 4 节点壳单元 S4; 钢管与核心混凝土的界面模型由界面法线方向的硬接触和切线方向库伦摩擦模型的粘结滑移构成; 加载端板与柱之间,钢管与环板、钢梁与环板的接触面均采用绑定约束(Tie); 钢管初始应力通过在 Key words 里增加命令语句\* Initial condition, type = stress 命令,将钢管初应力作为初始应力施加到模型中。

### 2.3 模型校验

为了验证本文有限元模型的有效性,对 Han 等<sup>[5]</sup>有初应力时钢管混凝土构件试验进行了数值模拟,部分试件的理论计算荷载-位移曲线与试验实测结果及文献[5]中采用纤维模型法的计算结果比较如图 1 所示,可见总体上吻合较好。图中  $\beta$  为初应力系数,定义为

$$\beta = \frac{\sigma_0}{\varphi_s \cdot f} \quad (2)$$

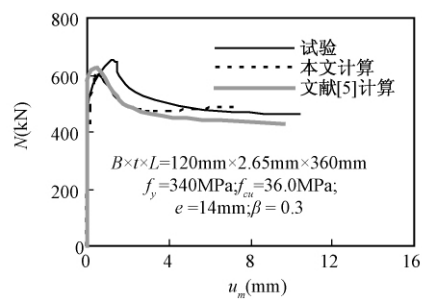
式中  $\sigma_0$  为钢管中的初始应力;  $\varphi_s$  为空钢管的稳定系数;  $f$  为钢管强度。

基于同样数值模型对熊德新等<sup>[6]</sup>有钢管初应力时圆钢管混凝土偏压构件试验进行了数值模拟,理论计算荷载-位移曲线与试验曲线比较如图 2 所示,可见总体上吻合较好。

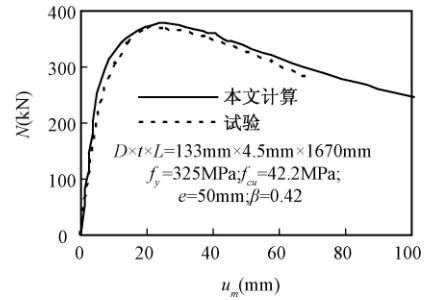
目前尚未找到有钢管初应力时节点的试验结果,故暂先对无钢管初应力时节点试验结果进行分析对比。选择王文达等<sup>[11]</sup>有关钢管混凝土节点试件进行了理论分析,图 3 为部分试件的试验实测骨架曲线与本文理论模型计算结果的对比,总体上本文计算结果与试验结果吻合良好。

## 3 有初应力节点受力特性分析

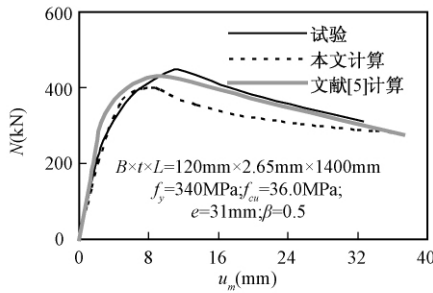
为了初步了解钢管初始应力对钢管混凝土节点力学性能的影响,进行了大量有初应力的钢管混凝土



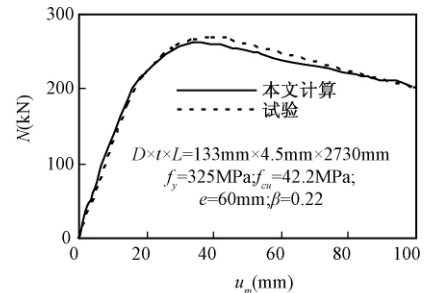
(a) SP-5



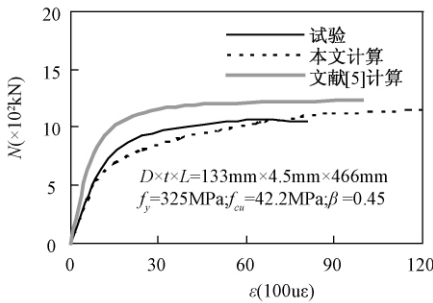
(a) ZM3



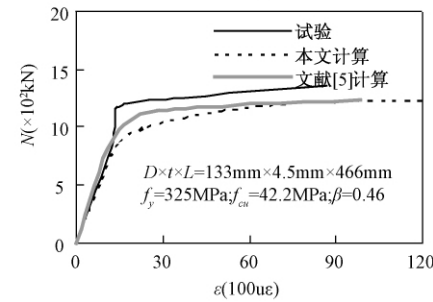
(b) LP-4



(b) ZML2



(c) SJ4



(d) SJ5

图 1 有初应力时钢管混凝土构件比较<sup>[5]</sup>

Fig. 1 Comparison on CFST members with preload in steel tube<sup>[5]</sup>

土节点算例分析。图 4 为王文达等<sup>[11]</sup>对节点试件 SJ-21 和 SJ-22 分别按有无初应力的  $P-\Delta$  曲线对比, 图中实线为试验实测曲线, 其中  $\beta$  为初应力系数。从图 4 中可以看出, 曲线组从上至下, 表明随着初应力系数的增大, 对钢管混凝土节点的极限承载力和

图 2 有初应力时圆钢管混凝土偏压构件比较<sup>[6]</sup>

Fig. 2 Comparison on circular CFST members with preload in steel tube<sup>[6]</sup>

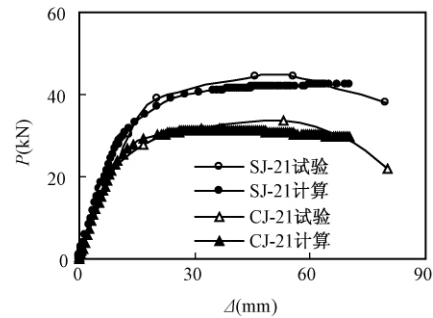


图 3 钢管混凝土节点试验与理论比较<sup>[11]</sup>

Fig. 3 Comparison on connections with CFST columns between tested and numerical results<sup>[11]</sup>

刚度有一定影响。主要是因为钢管初应力作用阶段, 此时空钢管独自受力, 但是钢梁对空钢管和核心混凝土有一定的约束作用, 使原本随空钢管一起变形的核心混凝土不会有太大的初始变形, 而空钢管和核心混凝土共同承载受力后, 随着外载的增加, 钢管进入塑性阶段, 抗弯刚度降低很小, 其对极限承载力有一定影响。从结构抗震设计角度来分析, 要求结构按“强柱弱梁”设计, 就是柱不先于梁破坏, 而梁破坏属于构件破坏, 是局部性的, 柱子破坏将危及整个结构的安全, 因此, 对有钢管初应力的钢管混凝土

土节点力学性能的分析很有必要。

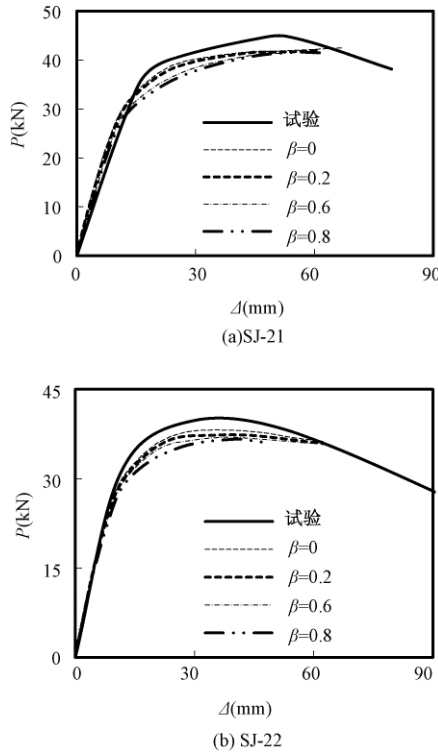


图 4 有初应力时节点骨架曲线试验与数值结果比较  
Fig. 4 The comparison of joints with preload in steel tube between tested and numerical results

对有无钢管初应力的钢管混凝土柱-钢梁节点进行分析,其中试件 SJ-21、SJ-22 的有限元结果分析比较见表 1 所示。表中  $K_{jp}$  为承载力影响系数,  $P_{up}$  和  $P_u$  分别为考虑和不考虑钢管初应力影响时的钢管混凝土节点极限承载力。对于初应力系数  $\beta = 0.2$  时,节点 SJ-21 承载力低于无钢管初应力节点承载力约 1.6%;初应力系数  $\beta = 0.6$  时,节点 SJ-21 承载力低于无钢管初应力节点承载力约 6.6%;初应力系数  $\beta = 0.8$  时,节点 SJ-21 承载力低于无钢管初应力节点承载力约 6.9%。说明随着初应力系数的增大节点水平承载力下降,极限承载力降低约为 2%~7%,这也验证了图 4 的结论。

#### 4 影响因素分析

为了更进一步了解柱钢管初应力对节点力学性能的影响,设计了一组典型的方钢管混凝土柱-钢梁节点进行参数分析。分析参数包括:柱轴压比(定义  $n = N_0/N_u$ ,其中  $N_0$  为施加在柱顶的竖向荷载,  $N_u$  为钢管混凝土柱极限承载力,按照《钢管混凝土结构技术规程 DBJ13-51-2003》<sup>[9]</sup> 确定)、柱长细比

( $\lambda$ )、梁柱强度比( $k_m = M_{ub}/M_{uc}$ ,其中  $M_{ub}$  为钢梁的屈服弯矩,  $M_{uc}$  为钢管混凝土柱的屈服弯矩)、梁柱线刚度比( $k = (E_b I_b) H / (E_{sc} I_{sc}) L$ ,其中  $E_b I_b$  和  $E_{sc} I_{sc}$  分别为梁和柱的抗弯刚度,  $H$  为柱高,  $L$  为梁跨度。钢管混凝土柱的抗弯刚度  $E_{sc} I_{sc}$  按照规程 DB62/T25-3041-2009<sup>[9]</sup> 确定)。进行参数分析时,只改变其中的一个参数而保持其它参数不变。典型算例的基本条件为:  $B = 400\text{mm}$ (方柱), Q345 钢材, C60 混凝土,柱轴压比  $n = 0.4$ ,柱截面含钢率  $\alpha = 0.1$ ,节点柱高度  $H = 3.3\text{m}$ ,节点梁跨度  $L = 6000\text{mm}$ ,初应力系数  $\beta = 0.6$ 。

表 1 钢管混凝土节点极限承载力

Table 1 CFST joints limit bearing capacity

试件编号	初应力系数	$P_u$ (kN)	$P_{up}$ (kN)	$K_{jp} = P_{up}/P_u$
SJ-21	0.2	39.87	39.23	0.984
SJ-21	0.6	39.87	37.38	0.934
SJ-21	0.8	39.87	37.12	0.931
SJ-22	0.2	37.84	37.20	0.983
SJ-22	0.6	37.84	36.29	0.959
SJ-22	0.8	37.84	35.44	0.936

#### 4.1 柱轴压比

图 5(a) 给出了不同节点柱轴压比情况下有无钢管初应力时方钢管混凝土节点的  $P-\Delta$  关系曲线。可见钢管初应力只影响曲线弹塑性阶段的极限承载力大小,对其弹性刚度和延性影响不大,相比之下,有钢管初应力时随着轴压比的增大,曲线组从上至下,表明随着轴压比的增大,对钢管混凝土柱力学性能的影响趋于明显,钢管混凝土节点的极限承载力下降,屈服状态提前。其原因是在钢管初应力作用下,随着轴压比的增大,受力越大,空钢管变形会随着增大,核心混凝土在初应力阶段虽然不能承载,但会随空钢管一起变形,相对于没有初应力作用的试件,此时有初应力作用时核心混凝土随着轴压比在更大的初始变形下开始承载,核心混凝土由于初始挠度增大而自身的承载力降低,继而影响整个试件的极限承载力。

#### 4.2 柱长细比

图 5(b) 给出了不同节点柱长细比情况下有无钢管初应力时方钢管混凝土节点的  $P-\Delta$  关系曲线。

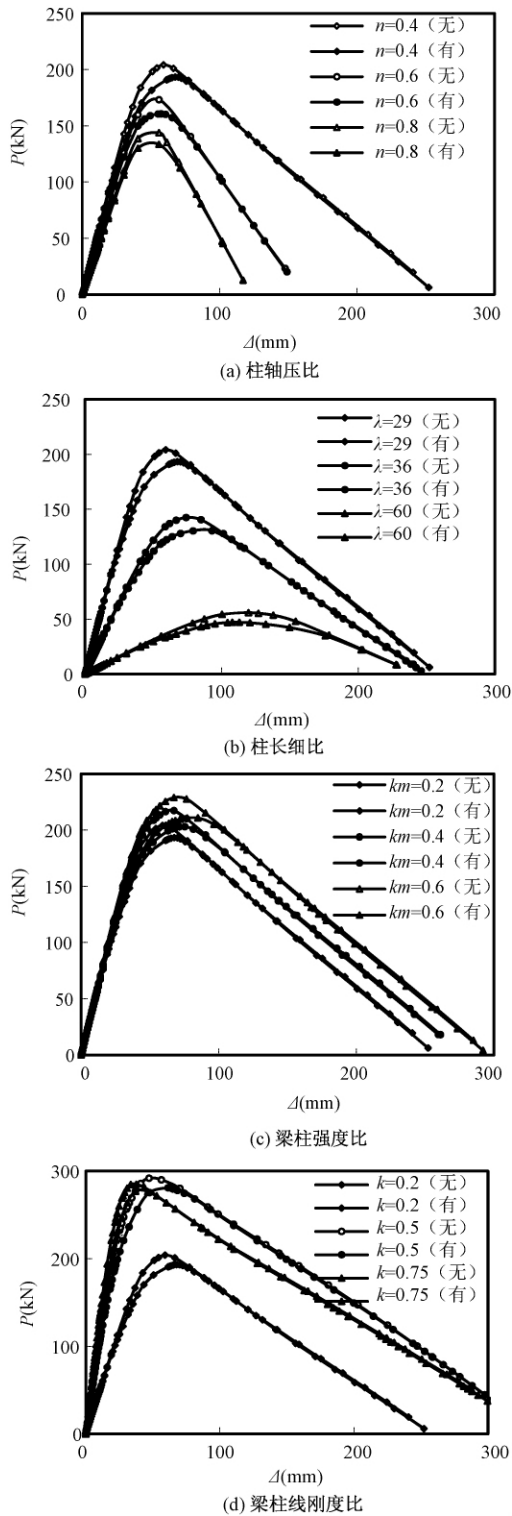


图 5 各主要参数对有无初应力的方钢管混凝土节点  $P-\Delta$  骨架曲线的影响  
 Fig. 5 The influence of main parameters on  $P-\Delta$  curves of CFST joints with preload or not

可见,有钢管初应力时,随着  $\lambda$  的增加,钢管混凝土

节点的极限承载力明显下降。其主要原因是柱的长细比越大,即试件越长,对钢管初应力的影响越大,在相同的初应力作用下试件产生的挠度越大,钢管初应力的影响就越大。

#### 4.3 梁柱强度比

从图 5(c) 可以看出,随着梁柱强度比的增加,有钢管初应力时,钢管混凝土节点的极限承载力有一定降低,但总体上不很明显。其主要原因是梁强度的提高对有钢管初应力的空钢管变形影响并不明显,即对试件极限承载力和刚度影响较小。

#### 4.4 梁柱线刚度比

图 5(d) 给出了不同节点梁柱线刚度比情况下有无钢管初应力时方钢管混凝土节点的  $P-\Delta$  关系曲线。可见,有钢管初应力时,钢管混凝土节点的极限承载力有所降低。其主要原因是梁对柱的约束作用越强,钢管初应力对空钢管影响越小,即对极限承载力和刚度影响较小。

### 5 结语

基于本文的分析,可初步得到以下结论:

- (1) 基于 ABAQUS 软件对有钢管初应力的钢管混凝土节点试件进行了水平荷载-水平位移全过程分析,理论分析结果表明,钢管初应力对节点力学性能有一定影响,极限承载力降低约为 2% ~ 7%。
- (2) 随着柱轴压比和长细比增大,钢管初应力对节点的承载力降低程度将趋于明显。

#### 参考文献 (References):

- [1] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践(第二版) [M]. 北京: 科学出版社, 2007  
 Han Lin-hai. Concrete Filled Steel Tubular Structure-theory and Practice (2nd Edition) [M]. Beijing: Science Press, 2007 (in Chinese)
- [2] 黄世娟, 钟善桐. 初应力对钢管混凝土轴压构件承载力影响的实验研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1996, 29(6): 44 ~ 50  
 Huang Shi-juan, Zhong Shan-tong. Experimental Research of Prestress Effect on Bearing Capacity of Concrete-filled Steel Tubular Axial Compressive Members [J]. Journal of Harbin University of Architecture and Engineering, 1996, 29(6): 44 ~ 50 (in Chinese)
- [3] 张晓庆, 钟善桐, 闫善章. 初应力对钢管混凝土偏压构件承载力影响的实验研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报

- 报,1997,30(1):50~56  
Zhang Xiao-qing, Zhong Shan-tong, Yan Shan-zhang. Experimental Study About the Effect of Initial Stress on Bearing Capacity of Concrete Filled Steel Tubular Members Under Eccentric Compression [J]. Journal of Harbin University of Architecture and Engineering, 1997,30(1):50~56 (in Chinese)
- [4] 查晓雄,唐家祥,钟善桐. 钢管混凝土高层及超高层建筑中平行立体交叉法施工及施工中初应力的影响[J]. 工业建筑,1998,28(11):32~34  
Zha Xiao-xiong, Tang Jia-xiang, Zhong Shan-tong. The Parallel Grade Separation Construction and the Initial Steel Stress Effect on Concrete-filled Steel Tubular for Highrise and Super Highrise Structures [J]. Industrial Construction, 1998,28(11):32~34 (in Chinese)
- [5] Han Lin-hai, Yao Guo-huang. Behaviour of Concrete-filled Hollow Structural Steel (HSS) Columns with Preload on the Steel Tubes [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2003,59(12):1455~1475
- [6] 熊德新,查晓雄,朱宏平. 偏心初应力对方钢管砼构件工作性能的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报,2005,37(2):112~117  
Xiong De-xin, Zha Xiao-xiong, Zhu Hong-ping. Effect of Eccentric Initial Stresses on the Behaviour of Concrete-filled Square Steel Tubular Member [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005,37(Sup. 2):112~117 (in Chinese)
- [7] Xiong De-xin, Zha Xiao-xiong. A Numerical Investigation on the Behavior of Concrete-filled Steel Tubular Columns under Initial Stresses [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007,63(5):599~611
- [8] 黄福云,陈宝春. 钢管混凝土拱桥初应力问题研究综述[J]. 公路交通科技,2006,23(11):68~72  
Huang Fu-yun, Chen Bao-chun. Review of Initial Stress on Concrete Filled Steel Tubular Arch Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006,23(11):68~72 (in Chinese)
- [9] DB62/T 25-3041-2009 钢管混凝土结构技术规程[S] DB62/T 25-3041-2009, Technical Specification for Concrete-filled Steel Tubular Structures [S] (in Chinese)
- [10] 韩林海,陶忠,王文达. 现代组合结构和混合结构—试验、理论和方法[M]. 北京:科学出版社,2009  
Han Lin-hai, Tao Zhong, Wang Wen-da. Advanced Composite and Mixed Structures—testing, Theory and Approach [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2009 (in Chinese)
- [11] 王文达,韩林海,游经团. 方钢管混凝土柱-钢梁外加强环节点滞回性能的试验研究[J]. 土木工程学报,2006,39(9):17~25  
Wang Wen-da, Han Lin-hai, You J T. Experimental Studies on Hysteretic Behaviors of Steel Beam to Concrete Filled SHS Column Connections with Stiffening Ring [J]. China Civil Engineering Journal, 2006,39(9):17~25 (in Chinese)

[作者简介] 史艳莉(1977-),女,河北涿州人,工学硕士,副教授,主要从事钢与混凝土组合结构及轻钢结构研究