

文章编号: 1000-4750(2015)01-0168-08

# 钢管混凝土框架柱计算长度研究

王 凤<sup>1,2</sup>, 王文达<sup>2</sup>, 史艳莉<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西, 西安 710055; 2. 兰州理工大学甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃, 兰州 730050)

**摘 要:** 钢管混凝土框架柱计算长度是合理正确计算其承载力的重要参数, 是进行钢管混凝土结构内力分析和设计必不可少的参数, 因缺乏系统研究, 现行钢管混凝土框架柱计算长度暂参照钢框架柱取值, 由于两种结构体系受力特性的差异会导致结果不合理。该文基于 ABAQUS 软件, 通过合理选取钢管混凝土框架的稳定简化模型, 同时考虑几何非线性和材料非线性的影响对框架体系进行非线性屈曲分析, 从而求解有侧移和无侧移钢管混凝土框架柱计算长度。在此基础上通过大量参数分析, 分别得到了有侧移和无侧移钢管混凝土框架柱计算长度系数表, 并回归了简化计算公式。为比较不同方法计算结果的差异, 选取某四层四跨钢管混凝土框架典型算例进行比较, 结果表明: 该文考虑初始缺陷和非线性行为所得到的计算长度系数取值方法比现行按采用钢框架柱计算方法的结果偏大, 无侧移框架柱变化范围为 0.97%~4.05%, 有侧移框架柱变化范围为 9.95%~27.17%, 可见材性差异及初始缺陷对计算长度系数影响较大, 不可忽视。

**关键词:** 钢管混凝土框架柱; 有侧移框架; 无侧移框架; 计算长度系数; 线性屈曲分析; 非线性屈曲分析

中图分类号: TU398 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.08.0707

## RESEARCH ON THE EFFECTIVE LENGTH OF CONCRETE-FILED STEEL TUBE FRAME COLUMNS

WANG Feng<sup>1,2</sup>, WANG Wen-da<sup>2</sup>, SHI Yan-li<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China; 2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China;)

**Abstract:** The effective length of concrete-filled steel tubular (CFST) frame columns is a key parameter to determine its ultimate strength rationally and correctly, and is also an important parameter to perform structural internal force analysis and design for CFST frame. Currently this parameter is determined based on the steel structural columns because of the lack of research. This method is unreasonable and illogical because the CFST frame columns and steel frame columns are different in mechanical characteristic. This paper presents a simplified stable model of frame with CFST columns to perform the nonlinear buckling analysis using ABAQUS. The material and geometric nonlinear are considered to derive the effective length of CFST columns of the sway frame and nonsway frame, respectively. An effective length factors table of the CFST columns of sway frame and nonsway frame is obtained based on a large number of parametric analyses, while a regressive simplified formula is proposed. A typical 4-bay and 4-story plane CFST frame is selected to compare the results of different methods. It is shown that the effective length factors derived by the proposed method in this paper are larger than the conventional approaches for steel frames, because the proposed method takes into account the initial imperfection and nonlinear behavior of the CFST columns. The error range is from 0.97% to 4.05% for nonsway frame, and from 9.95% to 27.17% for sway frame. This means the initial imperfection and material variance are the key issue

收稿日期: 2013-08-01; 修改日期: 2014-01-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51268038); 甘肃省科技支撑计划项目(1204FKCA146)

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、混合结构和钢结构研究(E-mail: wangwd@lut.cn).

作者简介: 王 凤(1985), 女, 河北定州人, 博士生, 从事钢-混凝土组合结构、钢结构研究(E-mail: cewangf@gmail.com);

史艳莉(1977), 女, 河北涿州人, 副教授, 博士生, 从事钢-混凝土组合结构和钢结构研究(E-mail: ceshiyl@163.com).

and cannot be ignored for the effective length factors.

**Key words:** concrete filled steel tube (CFST); sway frame; nonsway frame; effective length factor; linear buckling analysis; nonlinear buckling analysis

钢管混凝土结构具有良好的受力性能,因此在多、高层建筑中得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。目前钢管混凝土框架柱设计方法一般是先对结构整体进行内力分析,获得构件杆端内力,再进行框架柱截面设计或承载力验算。对于钢筋混凝土框架柱及钢框架柱,规范中均给出了其计算长度的确定方法,而钢管混凝土框架柱计算长度则缺乏相应的研究。目前对钢框架柱计算长度方面的研究较多,文献[2]和文献[3]采用解析法,以梁柱线刚度比作参数,避免了对结构作整体屈曲分析,通过简便计算得出钢框架柱计算长度系数。由于该方法受到一些基本假定的限制,许多研究者对上述计算长度求解方法的进行了持续的研究,如文献[4]提出了考虑层与层相互作用的框架柱计算长度的简单代数方法,对于二层或三层框架可通过求解简单的代数运算求得柱计算长度系数,并且对于考虑层间相互作用的三层以上框架柱计算长度系数的确定给出了建议。文献[5]则考虑了柱间相互作用,对层通用长细比和层稳定系数重新进行了定义,参照现行《钢结构设计规范》<sup>[3]</sup>中柱曲线,提出了可以考虑框架有侧移失稳和无侧移失稳相互作用的层稳定系数公式。文献[6]提出了考虑剪切变形影响的杆件单元一阶、二阶转角位移方程,并给出了考虑剪切变形影响,计算两端任意转动约束轴压杆有侧移失稳及无侧移失稳的近似公式。文献[7]通过引入梁柱线刚度比修正系数考虑节点连接的非线性,采用变刚度螺旋弹簧模拟节点半刚性,推导了无侧移半刚接钢框架考虑剪切变形影响柱子的计算长度系数计算公式。文献[8]根据 Timoshenko 广义位移梁理论,导出了考虑剪切变形影响的压弯构件的解析解和弯矩-转角位移方程,并分析了考虑剪切变形对计算长度系数确定的影响。文献[9]采用变截面梁的转角位移方程,通过分析柱子的近端影响,引入梁柱修正线刚度比,推导出翼缘削弱型节点无侧移和有侧移框架柱分别对应的计算长度系数的计算公式。文献[10]根据等效负刚度相等原则建立了框架柱中力与柱顶力之间的等效关系,推导了等效力系数的计算公式。通过该系数,可以将柱中力折算到柱顶,直接通过规范查取计算长度系数验算框架的整体稳定,而不

需要重新对计算长度系数进行折算。文献[11]根据无侧移压杆的屈曲形态提出了以轴力对压杆跨中抗侧刚度的削弱来表征轴力负刚度的力学模型,并利用该模型阐释了无侧移框架计算长度系数的力学意义,并进一步提出了等效力法,该方法可解决无侧移框架柱的变轴力问题。目前对钢管混凝土框架柱计算长度一般参照钢框架柱的计算方法<sup>[12]</sup>,通过计算组合柱刚度、框架柱上、下端梁柱线刚度比,参照《钢结构设计规范》<sup>[3]</sup>附录 D 确定其计算长度系数值。钢构件对缺陷相对比较敏感,局部屈曲或整体屈曲均可导致结构失稳,且因结构形式的不同其失稳模式有所差异<sup>[2]</sup>;而钢管混凝土结构由于钢管对混凝土起到约束作用,不易出现局部屈曲,结构失稳一般由整体缺陷导致,并且随混凝土强度、钢管厚度等材料差异使结构受力性能有所改变。故钢管混凝土框架与钢框架具有不同的失稳模式,简单套用钢框架柱计算方法可能会带来一定误差,因此,根据钢管混凝土框架受力及失稳特性并结合工程实际情况,给出钢管混凝土框架柱计算长度系数的计算方法是亟待解决的问题。

文献[13]采用 SAP2000 对某超高层钢管混凝土框架-核心筒结构进行线性和非线性整体稳定分析,对结构中底部跨层柱的计算长度系数取值进行了探讨。文献[14]以线性稳定分析杆件失稳模态为基础,进行几何非线性稳定整体分析,求解了复杂边界条件杆件的计算长度。可见采用有限元技术进行结构的整体稳定分析,从而推导出相应的框架柱计算长度系数是可行的途径。本文用 ABAQUS 软件同时考虑几何和材料非线性,对有、无侧移钢管混凝土平面框架进行非线性屈曲分析,得到的框架柱的屈曲临界荷载值,将计算结果代入欧拉公式反算得到钢管混凝土框架柱计算长度系数。通过参数分析可获得出不同梁柱线刚度比对应的计算长度系数,将数据整理、绘制成表格,并根据表格中数据回归了建议公式。最后通过某四层四跨钢管混凝土框架算例,对现行钢管混凝土计算长度方法、查取本文计算长度系数表方法、以及回归的计算长度公式三种方法的计算结果进行了对比分析。



有限元分析中模型梁柱节点为刚性连接，通过线性屈曲分析，将得到的三阶变形模态作为z5柱的屈曲模态引入非线性屈曲分析中。线性屈曲分析得到z5柱的临界荷载为 $P_{cr}=2.74 \times 10^7 \text{N}$ ，其屈曲模态如图3所示。采用弧长法对框架进行非线性屈曲分析，得到的 $LPF-\Delta$ 曲线如图4所示，分析中定义的参考荷载 $P_{ref}=1.2 \times 10^7 \text{N}$ ，得到的荷载比例因子最大值为0.851，由式(1)计算得到模型的非线性屈曲荷载为 $P'_{cr}=1.02 \times 10^7 \text{N}$ ，代入欧拉公式反算得到该模型中钢管混凝土框架柱的计算长度系数为 $\mu=1.28$ ，与文献[7]中结果 $\mu=1.22$ 接近，可见采用上述有限元分析方法计算框架柱计算长度系数是可行的。

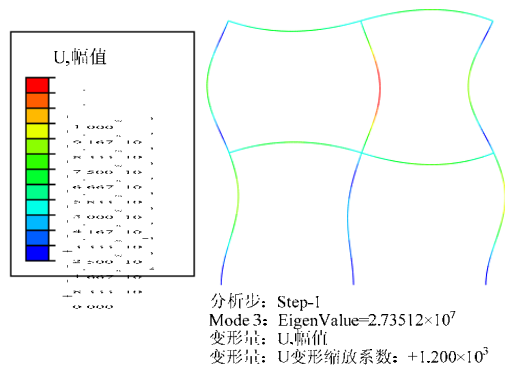


图3 钢框架三阶屈曲模态

Fig.3 The third-order buckling mode of steel frame

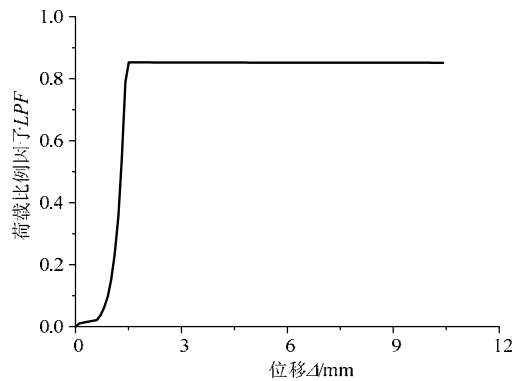


图4 钢框架的 $LPF-\Delta$ 曲线

Fig.4 The  $LPF$  versus  $\Delta$  curve of steel frame

## 2 框架柱简化数值模型的选取

首先选取框架结构中包含独立构件以及其两端约束构件在内的局部结构作为有限元分析模型，并将构件的具体截面、材性、周边约束情况等详细的反映到局部结构有限元模型中，然后对包括拟计算构件在内的局部框架结构进行了非线性屈曲分析。如图5所示的无侧移框架模型中，中间柱AB及其周围约束构件，可以简化为图6的局部框架模型，图中AC、AD和BM、BN分别为柱上端和下

端所连框架梁的半跨。这样不仅可以综合考虑柱端约束对柱的影响，并且可以通过简单计算得到柱的临界屈曲荷载和所求柱计算长度系数。

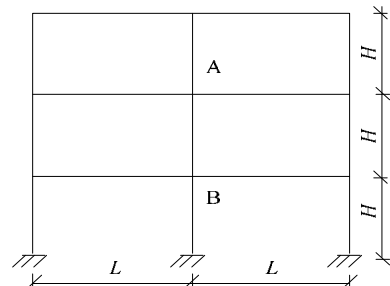


图5 整体框架模型

Fig.5 The whole frame structure model

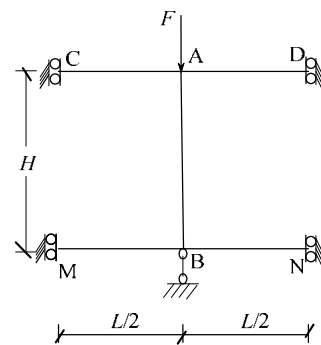


图6 简化框架柱计算模型

Fig.6 The simplified model of frame column

## 3 无侧移钢管混凝土框架柱计算长度

### 3.1 无侧移框架柱线性和非线性屈曲分析

按图7所示的无侧移钢管混凝土框架柱稳定模型单元建立ABAQUS有限元分析模型，模型中柱高为 $H=4\text{m}$ ，梁跨为 $L=6\text{m}$ ，选取钢梁截面为 $\text{H}360\text{mm} \times 180\text{mm} \times 8.5\text{mm} \times 12\text{mm}$ ，柱截面 $D \times t=400\text{mm} \times 9\text{mm}$ ，柱内采用C60混凝土，柱钢管及组合梁中钢材均为Q345，钢管混凝土柱组合弹性抗弯刚度的计算参照文献[12]。分析模型中梁取半跨，对梁端节点U1和UR3方向、柱底U2方向分别进行约束，建立了柱上、下端梁柱线刚度比 $K_1=0.5$ 、 $K_2=0.5$ 的无侧移钢管混凝土框架数值模型，在柱顶节点施加 $F=-1$ 的单位荷载进行线性屈曲分析，得到框架柱线性屈曲临界荷载为 $P_{cr}=5.14 \times 10^7 \text{N}$ ，其一阶变形模态如图8所示。将一阶屈曲模态作为屈曲模态引入非线性屈曲分析，缺陷比例因子定义为 $H/1000$ ， $H$ 为框架柱高度。

采用弧长法对组合框架进行非线性屈曲分析，分析中定义的参考荷载 $P_{ref}=9.0 \times 10^7 \text{N}$ ，得到的荷载比例因子最大值为0.671，由式(1)计算得到模型的非线性屈曲荷载为 $P'_{cr}=6.04 \times 10^7 \text{N}$ ，代入欧拉公式，算

得该模型中钢管混凝土框架柱的计算长度系数为  $\mu=0.867$ ，经非线性屈曲得到模型的  $LPF-\Delta$  曲线如图9所示。

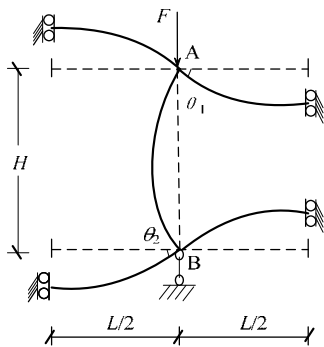


图7 无侧移组合框架稳定计算模型

Fig.7 The simplified stably model of nonsway CFST frame

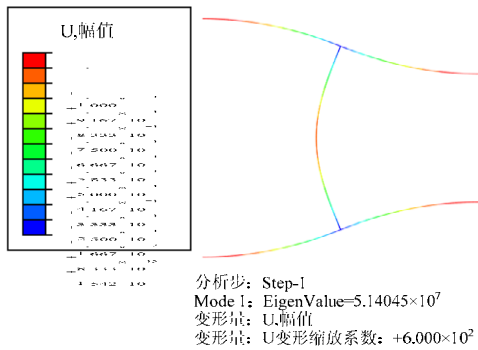


图8 无侧移框架柱一阶屈曲模式

Fig.8 The first-order buckling mode of nonsway frame column

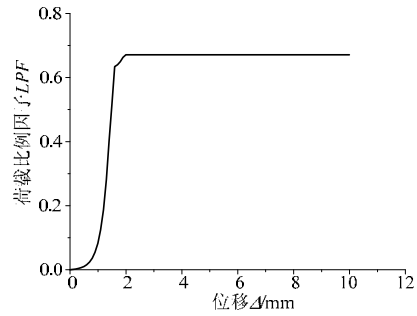


图9 无侧移框架柱 LPF-Δ 曲线

Fig.9 The LPF versus Δ curve of nonsway frame column

### 3.2 无侧移框架柱计算长度系数表及公式

通过调整模型参数，建立不同梁柱线刚度比的无侧移钢管混凝土组合框架简化模型，并按上述方法进行非线性屈曲分析，得到模型非线性屈曲的临界荷载  $P'_{cr}$ ，结合欧拉公式，求解钢管混凝土框架柱计算长度系数  $\mu$  的值。经过大量算例的分析计算，并将结果绘制成无侧移钢管混凝土计算长度系数表，如表1所示。表中  $K_1$ 、 $K_2$  分别为钢管混凝土无侧移框架中相交于柱上端、柱下端节点的横梁线刚度之和与柱线刚度之和的比值。

对表1中的计算长度系数用MATLAB的多项式函数polyfit()进行回归分析，得出无侧移钢管混凝土框架柱计算长度系数  $\mu$  的计算公式如下：

$$\mu = 0.17 \left( \frac{K_1 + K_2}{10} \right)^2 - 0.433 \left( \frac{K_1 + K_2}{10} \right) + 0.9506 \quad (2)$$

表1 无侧移钢管混凝土框架柱计算长度系数表  $\mu$

Table 1 The effective length factor  $\mu$  of nonsway CFST frame columns

$K_2$	$K_1$											
	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	10
0.05	0.986	0.978	0.962	0.945	0.935	0.923	0.870	0.827	0.800	0.790	0.778	0.755
0.1	0.978	0.970	0.954	0.937	0.927	0.916	0.863	0.820	0.794	0.783	0.772	0.749
0.2	0.962	0.954	0.939	0.923	0.913	0.902	0.850	0.808	0.783	0.773	0.762	0.739
0.3	0.945	0.937	0.923	0.907	0.897	0.886	0.836	0.797	0.773	0.762	0.752	0.730
0.4	0.935	0.927	0.913	0.897	0.891	0.877	0.828	0.787	0.763	0.753	0.742	0.721
0.5	0.923	0.916	0.902	0.886	0.877	0.867	0.819	0.780	0.756	0.746	0.736	0.715
1.0	0.870	0.863	0.850	0.836	0.828	0.819	0.774	0.742	0.719	0.710	0.700	0.680
2.0	0.827	0.820	0.808	0.797	0.787	0.780	0.742	0.702	0.681	0.672	0.663	0.648
3.0	0.800	0.794	0.783	0.773	0.763	0.756	0.719	0.681	0.660	0.652	0.643	0.624
4.0	0.790	0.783	0.773	0.762	0.753	0.746	0.710	0.672	0.652	0.643	0.634	0.616
5.0	0.778	0.772	0.762	0.752	0.742	0.736	0.700	0.663	0.643	0.634	0.633	0.607
10	0.755	0.749	0.739	0.730	0.721	0.715	0.680	0.648	0.624	0.616	0.607	0.589

## 4 有侧移钢管混凝土框架柱计算长度

### 4.1 有侧移框架线性和非线性屈曲分析

按图10所示的有侧移框架稳定计算简图单元建立其有限元分析模型，模型的几何尺寸、梁柱截

面、以及材料强度均与无侧移框架简化模型相同，同样依据文献[12]求解柱组合弹性抗弯刚度。分析模型中柱上端和下端梁取半跨，对下层梁左端节点  $U_1$ 、 $U_2$  方向进行约束，并对下层梁右端节点，上层梁两端节点和柱底节点  $U_2$  方向进行约束，建立了



柱上、下端梁柱线刚度比 $K_1=0.5$ 、 $K_2=0.5$ 的有侧移钢管混凝土框架数值模型,在柱顶节点施加 $F=-1$ 的单位荷载进行线性屈曲分析,得到框架柱线性屈曲临界荷载为 $P_{cr}=9.30\times 10^7\text{N}$ ,其二阶变形模态如图11所示,将其作为屈曲模态引入非线性屈曲分析。

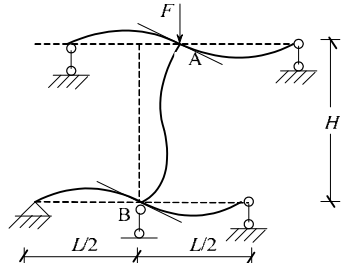


图 10 有侧移组合框架稳定计算模型

Fig.10 The simplified stably model of sway CFST frame

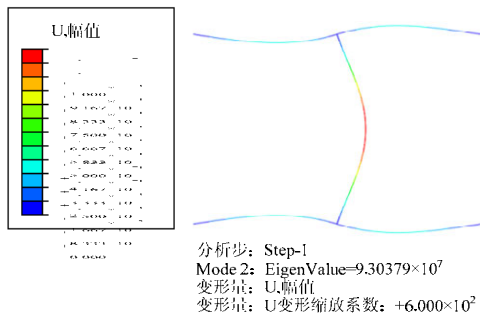


图 11 有侧移框架柱二阶变形图

Fig.11 The second-order buckling mode of sway frame column

非线性屈曲分析中定义的参考荷载 $P_{ref}=1.9\times 10^7\text{N}$ ,得到的荷载比例因子最大值为0.696,由式(1)计算得到模型的非线性屈曲荷载为 $P'_{cr}=1.32\times 10^7\text{N}$ ,代入欧拉公式,反算得到该模型中钢管混凝土框架柱的计算长度系数为 $\mu=1.86$ ,屈曲分析得到 $LPF-\Delta$ 曲线如图12所示。

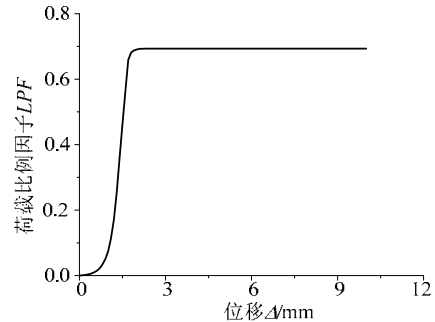


图12 有侧移框架柱 $LPF-\Delta$ 曲线

Fig.12 The  $LPF$  versus  $\Delta$  curve of sway CFST frame column

#### 4.2 有侧移框架柱计算长度系数表及公式

采用与上述无侧移框架简化模型相同的几何参数,建立不同梁柱线刚度比的侧移框架有限元模型,进行屈曲分析求解柱计算长度系数 $\mu$ 值,将结果绘制成有侧移钢管混凝土框架柱计算长度系数表,如表2所示。同样,表中 $K_1$ 、 $K_2$ 分别为相交于框架柱上、下端节点的横梁线刚度之和与柱线刚度之和的比值。

表 2 有侧移钢管混凝土框架柱计算长度系数  $\mu$

Table 2 The effective length factor  $\mu$  of sway CFST frame columns

$K_2$	$K_1$											
	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	10
0.05	4.21	3.56	3.04	2.74	2.63	2.53	2.28	2.19	2.15	2.13	2.12	2.09
0.1	3.56	3.13	2.74	2.5	2.41	2.33	2.12	2.04	2.00	1.99	1.97	1.95
0.2	3.04	2.74	2.45	2.26	2.19	2.12	1.94	1.86	1.83	1.82	1.81	1.79
0.3	2.74	2.50	2.26	2.10	2.03	1.97	1.81	1.78	1.75	1.73	1.72	1.71
0.4	2.63	2.41	2.19	2.03	1.97	1.89	1.76	1.70	1.67	1.66	1.65	1.64
0.5	2.53	2.33	2.12	1.97	1.89	1.86	1.71	1.68	1.63	1.62	1.61	1.6
1.0	2.28	2.12	1.94	1.81	1.76	1.71	1.57	1.52	1.50	1.49	1.48	1.46
2.0	2.19	2.04	1.86	1.78	1.7	1.68	1.52	1.44	1.42	1.41	1.40	1.39
3.0	2.15	2.00	1.83	1.75	1.67	1.63	1.50	1.42	1.38	1.37	1.36	1.35
4.0	2.13	1.99	1.82	1.73	1.66	1.62	1.49	1.41	1.37	1.36	1.35	1.34
5.0	2.12	1.97	1.81	1.72	1.65	1.61	1.48	1.40	1.36	1.35	1.34	1.32
10	2.09	1.95	1.79	1.71	1.64	1.60	1.46	1.39	1.35	1.34	1.32	1.27

用MATLAB的多项式函数polyfit( )对表2中的数据进行分析得出有侧移钢管混凝土框架柱计算长度系数 $\mu$ 的计算公式如下:

$$\mu = 0.81 \left( \frac{K_1 + K_2}{10} \right)^2 - 1.846 \left( \frac{K_1 + K_2}{10} \right) + 2.4238 \quad (3)$$

#### 5 算例验证

为验证前述钢管混凝土框架柱计算长度系数表及拟合公式的适用性,设计了一个四层四跨钢管混凝土柱-钢与混凝土组合梁算例进行验证,如图13所示,结构层高为4m,跨长为6m,钢管混凝土组

合柱截面采用 $D \times t=480\text{mm} \times 11\text{mm}$ ，钢梁截面为 $H300\text{mm} \times 150\text{mm} \times 6.5\text{mm} \times 9\text{mm}$ ，采用钢与混凝土组合楼盖，其混凝土强度为C30，压型钢板型号为3WDEK-305-915，压型钢波高为76mm，波距为305mm，压型钢板以上混凝土厚度为74mm，楼板总厚为150mm，组合梁截面如图14所示。柱内采用C60混凝土，柱钢管及组合梁中的钢材均为Q345。根据c1~c20钢管混凝土柱的截面形状和大小计算柱上、下端梁柱线刚度比，参照文献[16]计算组合梁刚度，计算结果如表3所示。

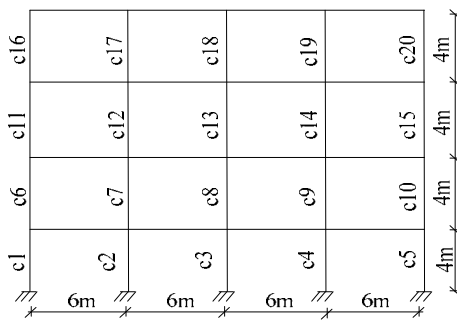


图 13 钢管混凝土组合框架算例  
Fig.13 The example of the CFST frame

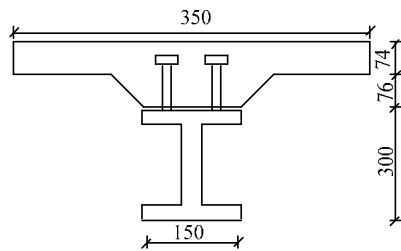


图 14 组合梁截面 /mm

Fig.14 The section of the composite beam

表 3 柱上、下端梁柱线刚度比

Table 3 Linear stiffness ratios of beam to column

	序号					
	c1, c5	c2, c3, c4	c6, c10, c11, c15	c7, c8, c9, c12, c13, c14	c16, c20	c17, c18, c19
$K_i$						
$K_1$	0.206	0.412	0.206	0.412	0.412	0.824
$K_2$	$\infty$	$\infty$	0.206	0.412	0.206	0.412

参照钢框架有、无侧移判别方式，支撑刚度大于等于5倍的结构本身的侧向刚度时，按无侧移失稳计算，不足5倍时一律按有侧移失稳计算<sup>[17]</sup>。算例框架按无侧移失稳计算时，按现行设计方法、查取本文给出的计算长度系数表格以及按本文的回归公式三种方法计算得到的该组合框架无侧移失稳时各框架柱的计算长度系数，得到的结果如表4所示，其中 $\mu$ 是现行方法计算结果； $\mu'$ 是参照本文所得计算长度系数表求解结果； $\mu''$ 是由MATLAB

回归分析公式得出的计算结果。

表 4 三种方法获得无侧移框架柱计算长度系数结果对比  
Table 4 Comparison of CFST columns effective length factors in non-sway frame calculating by three methods

序号	不同方法求解钢管混凝土框架柱计算长度系数		
	$\mu$	$\mu'$	$\mu''$
c1, c5	0.710	0.738	0.686
c2, c3, c4	0.692	0.720	0.684
c6, c10, c11, c15	0.928	0.937	0.933
c7, c8, c9, c12, c13, c14	0.874	0.905	0.916
c16, c20	0.901	0.911	0.924
c17, c18, c19	0.837	0.865	0.899

对比分析表4中的数据，参照本文给出的计算长度系数表得到的数据较现行方法的计算结果偏大，变化范围在0.97%~4.05%，因为本文得到的计算长度系数表考虑了模型几何非线性和材料非线性，求得钢管混凝土框架临界荷载偏小，计算长度系数偏大。采用回归公式计算中层和顶层柱的结果相对安全，而对底层柱的计算，计算时取下节点梁柱线刚度比 $K'_2=10$ ，求得的计算长度系数较小，所以采用本文回归公式计算无侧移组合框架底层柱时，需作进一步验证。

同样，当算例框架按有侧移失稳计算时，采用上述三种方法计算得到各框架柱计算长度系数的结果如表5所示。其中 $\mu$ 是现行方法计算结果； $\mu'$ 是参照本文所得计算长度系数表求解结果； $\mu''$ 是由回归分析公式得出的计算结果。

表 5 三种方法求解有侧移框架柱计算长度系数结果对比  
Table 5 Comparison of CFST columns effective length factors in sway frame calculating by three methods

序号	不同方法求解钢管混凝土框架柱计算长度系数		
	$\mu$	$\mu'$	$\mu''$
c1, c5	1.51	1.78	1.38
c2, c3, c4	1.34	1.63	1.37
c6, c10, c11, c15	2.21	2.43	2.35
c7, c8, c9, c12, c13, c14	1.70	1.95	2.28
c16, c20	1.92	2.17	2.31
c17, c18, c19	1.55	1.85	2.21

由于本文中给出的有侧移钢管混凝土计算长度系数表中的数据考虑了几何和材料非线性的影响，得到的计算长度系数较现行方法结果偏大，上述算例结果的变化范围为9.95%~21.64%。在有侧移的框架中，由于框架存在初始缺陷，会增大二阶效应的影响，可见几何非线性对侧移框架柱计算长度系数影响较大，不可忽视。而用拟合公式计算中

层和顶层框架结果较理想,而对于底层同样取 $K_2'=10$ ,得到的计算长度系数较小,故采用本文回归公式计算侧移框架底层柱时,也需作进一步验证。

## 6 结论

基于本文的研究,可初步得出以下结论:

(1) 通过合理选取有侧移和无侧移钢管混凝土框架的稳定分析简化模型,考虑几何及材料非线性影响,对其进行线性和非线性屈曲分析,可得到框架柱的临界屈曲荷载,结合欧拉公式,可反算柱计算长度系数。

(2) 通过改变钢管混凝土组合框架参数,进行大量算例分析,求解出不同梁柱线刚度比对应的钢管混凝土框架柱计算长度系数,将结果绘制成表格,并通过 MATLAB 的多项式函数进行回归分析,给出了有侧移和无侧移钢管混凝土框架柱计算长度系数公式,供工程设计参考。

(3) 结合四层四跨钢管混凝土组合框架算例,分别采用现行设计方法、本文计算长度系数表、及回归的计算公式三种方法计算框架中各组合柱计算长度系数,比较了三种方法的计算结果,给出各种方法的计算精度及应用范围。

### 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: 72 73.  
Han Linhai. Concrete filled steel tubular structure-theory and practice [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2007: 72 73. (in Chinese)
- [2] 陈骥. 钢结构稳定理论与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 138 143.  
Chen Ji. Stability of steel structures theory and design [M]. Beijing: Science Press, 2008: 138 143. (in Chinese)
- [3] GB 50017-2003, 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.  
GB 50017-2003, Code for design of steel structures [S]. Beijing: China Plane Press, 2003. (in Chinese)
- [4] Tong G S, Wang J P. Column effective length considering inter-story and inter-column interactions in sway-permitted frames [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62(5): 413 423.
- [5] 童根树, 邢国然. 框架弹塑性失稳的层稳定系数[J]. 工程力学, 2007, 24(3): 13 19.  
Tong Genshu, Xing Guoran. Story-based elastic-plastic stability coefficients of frames [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(3): 13 19. (in Chinese)

- [6] 童根树, 翁赞. 考虑剪切变形影响的框架柱弹性稳定 [J]. 工程力学, 2008, 25(12): 171 178.  
Tong Genshu, Weng Yun. The elastic buckling of frame columns considering the effect of the shear deformations [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(12): 171 178. (in Chinese)
- [7] 王燕, 刘慧, 郁有升. 无侧移半刚接钢框架柱考虑剪切变形影响的计算长度系数研究[J]. 工程力学, 2008, 25(11): 122 127.  
Wang Yan, Liu Hui, Yu Yousheng. Effective length factor of columns in semi-rigid jointed and braced frames with consideration of shear effects [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(11): 122 127. (in Chinese)
- [8] 夏桂云, 李传习, 曾庆元, 俞茂宏. 考虑剪切变形影响的框架稳定分析[J]. 工程力学, 2009, 26(3): 99 105.  
Xia Guiyun, Li Chuanxi, Zeng Qingyuan, Yu Maohong. Buckling analysis of frame considering shear considering deformation effect [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(3): 99 105. (in Chinese)
- [9] 韩明岚, 王燕. 梁翼缘削弱型节点钢框架柱弹性稳定分析[J]. 工程力学, 2012, 29(8): 255 261.  
Han Minglan, Wang Yan. Elastic stability analysis of column in steel frames with reduced beam section connections [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(8): 255 261. (in Chinese)
- [10] 田炜烽, 郝际平, 丁戈, 付磊. 任意分布轴力作用下框架柱弹性稳定的实用解法[J]. 工程力学, 2012, 29(2): 74 80.  
Tian Weifeng, Hao Jiping, Ding Ge, Fu Lei. A practical method for the elastic stability of frame column under random distribution axial force [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(2): 74 80. (in Chinese)
- [11] 田炜烽, 郝际平, 樊春雷, 吴元莅. 无侧移变轴力框架柱稳定性的等效力法[J]. 工程力学, 2012, 29(11): 212 220.  
Tian Weifeng, Hao Jiping, Fan Chunlei, Wu Yuanli. Equivalent force method for the stability of non-sway frame column with varying axial force [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(11): 212 220. (in Chinese)
- [12] DB62/T25-3041-2009, 钢管混凝土结构技术规程[S]. 兰州: 甘肃省建设厅, 2009.  
DB62/T25-3041-2009, Technical specification for concrete-filled steel tubular structures [S]. Lanzhou: Gansu Construction Bureau, 2009. (in Chinese)
- [13] 尧国皇, 孙占琦, 孙素文, 潘东辉, 赵群昌. 某超高层钢管混凝土框架-核心筒结构的整体稳定性分析[J]. 钢结构, 2010, 25(6): 35 38.  
Yao Guohuang, Sun Zhanqi, Sun Suwen, Pan Donghui, Zhao Qunchang. The whole stability analysis of a high-rise CFT frame-tube structure [J]. Steel Construction, 2010, 25(6): 35 38. (in Chinese)

(参考文献[14] [17]转第 191 页)



- Chinese)
- [7] 张爱林, 于劲, 李健, 刘会军. 低周反复荷载作用下 T 形截面钢异形柱-钢梁节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(7): 118-126.  
Zhang Ailin, Yu Jin, Li Jian, Liu Huijun. Experimental research on seismic behavior of steel especially shaped column with T-shaped section to steel beam connections under cyclic loading [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(7): 118-126. (in Chinese)
- [8] 王春刚, 张壮南, 张耀春. 冷弯薄壁斜卷边槽钢轴压构件承载力计算的直接强度法研究[J]. 工程力学, 2012, 29(3): 75-82.  
Wang Chungang, Zhang Zhuangnan, Zhang Yaochun. Direct strength method study on bearing capacity calculation of channel columns with inclined simple edge stiffeners under axial compression [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(3): 75-82. (in Chinese)
- [9] Dundu M, Kemp A R. Strength requirement of single cold-formed channels connected back-to-back [J]. Journal of Construction Steel Research, 2006, 62(3): 250-261.
- [10] Lim J B P, Nethercot D A. Ultimate strength of bolted moment-connections between cold-formed steel member [J]. Thin-Walled Structures, 2003, 41(11): 1019-1039.
- [11] Lim J B P, Nethercot D A. Stiffness prediction for bolted moment-connections between cold-formed steel member [J]. Journal of Construction Steel Research, 2004, 60(1): 85-107.
- [12] GB/T 2975-1998, 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.  
GB/T 2975-1998, Steel and steel products - Location and preparation of test pieces for mechanical testing [S]. Beijing: China Standard Press, 1998. (in Chinese)
- [13] JGJ 101-96, 建筑抗震试验方法规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996  
JGJ 101-96, Specification of testing methods for earthquake resistant building [S]. Beijing: China Architecture Building Press, 1996. (in Chinese)
- [14] 高春彦. 矩形钢管混凝土梁柱节点抗震性能的试验研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2007.  
Gao Chunyan. Experimental study of seismic performance of rectangular concrete-filled steel tube beam-column joints [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [15] 王军. 冷弯薄壁型钢框架半刚性节点动力性能试验研究及有限元分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.  
Wang Jun. Dynamic performance testing study and finite element analysis of semi-rigid nodes of cold-formed thin-walled steel framework [D]. Chongqing: Chongqing University, 2005. (in Chinese)
- [16] 马萧. ANSYS 的网格划分技巧[J]. 矿山机械, 2004, 26(5): 16-24.  
Ma Xiao. ANSYS meshing technique [J]. Mining Machinery, 2004, 26(5): 16-24. (in Chinese)
- [17] 石永久, 王萌, 王元清. 钢框架不同构造形式焊接节点抗震性能分析[J]. 工程力学, 2012, 29(7): 75-83.  
Shi Yongjiu, Wang Meng, Wang Yuanqing. Seismic performance of steel frame different form welding joints [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(7): 75-83. (in Chinese)

(上接第 175 页)

- [14] 张建军, 刘琼祥, 郭满良, 刘臣, 杨德喜, 彭德昭. 深圳大运中心体育场空间钢结构杆件计算长度研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(5): 63-69.  
Zhang Jianjun, Liu Qiongxian, Guo Manliang, Liu Chen, Yang Dexi, Peng Dezhao. Research on effective length of bar of space steel structure of the Shenzhen Universidad Sports Center [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(5): 63-69. (in Chinese)
- [15] 王文达, 韩林海, 陶忠. 钢管混凝土框架柱计算长度研究初探[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(增刊 2): 167-170.  
Wang Wenda, Han linhai, Tao Zhong. Research on effective length of concrete filled steel tubular planar frame columns [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(Suppl2): 167-170. (in Chinese)
- [16] 王静峰, 李国强. 无侧移半刚性连接组合框架的稳定分析: (I)柱的有效长度系数方程[J]. 力学季刊, 2006, 27(3): 481-488.  
Wang Jingfeng, Li Guoqiang. Stability analysis for non-sway composite frames with semi-rigid joints: Part I. Equation of column effective length factor [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2006, 27(3): 481-488. (in Chinese)
- [17] 刁云云, 刘坚, 黄襄云. 影响钢框架柱计算长度系数的因素[J]. 钢结构, 2006, 21(6): 9-12.  
Diao Yunyun, Liu Jian, Huang Xiangyun. Factors affecting effective length coefficient of steel frame columns [J]. Steel Construction, 2006, 21(6): 9-12. (in Chinese)