

文章编号:1674-2974(2016)03-0055-11

不锈钢工字形截面构件轴心受压 整体稳定计算方法*

杨璐^{1†}, 尚帆¹, 赵梦晗¹, 徐东辰², 张勇²

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 2. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要:为了研究不锈钢工字形轴心受压构件的整体稳定承载力,采用 ANSYS 软件建模对不锈钢轴压构件进行非线性有限元模拟,将模拟结果与试验结果进行对比,验证了所建立的有限元模型的准确性.采用经试验验证的有限元模型对不同几何初始缺陷、截面残余应力、材料力学性能、截面宽厚比以及长细比的不锈钢工字形构件整体稳定承载力进行了参数分析,通过对比可确定材料力学性能、构件长细比为主要影响承载力的因素.在参数分析的基础上通过稳定承载力的数据拟合提出了整体稳定系数的三段式计算方法,并将该计算方法与试验数据进行对比,表明此计算方法可以较为准确地计算不锈钢工字形轴心受压构件整体稳定承载力.

关键词: 不锈钢; 有限元法; 整体稳定性; 参数分析; 计算方法

中图分类号: TU391

文献标识码: A

Calculation Method of the Overall Stability for I-shaped Stainless Steel Member under Axial Compression Load

YANG Lu^{1†}, SHANG Fan¹, ZHAO Meng-han¹, XU Dong-chen², ZHANG Yong²

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing Univ of Technology, Beijing 100124, China;

2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong Univ, Beijing 100044, China)

Abstract: In order to investigate the overall stability of I-shaped stainless steel member under axial compression load, the nonlinear finite element analysis of the stainless steel members subjected to axial compression load was performed by ANSYS software. By comparing the numerical results with the experimental results, the accuracy of the finite element model was verified. The effects of initial geometric imperfections, section residual stress, material mechanical properties, and section width-thickness ratio and slenderness ratio on the overall stability of the members were parametrically analyzed by means of the validated finite element analysis. According to the comparison, it can be seen that the material mechanical properties and slenderness ratio of the members are the key influential factors. Based on the parameter analysis, a new three-segment formula for calculating the overall stability coefficient was proposed by data fitting. The proposed three-segment formula can accurately predict the overall stability bearing capacity for I-shaped stainless steel member under axial compression load.

* 收稿日期:2015-05-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51108007), National Natural Science Foundation of China(51108007)

作者简介:杨璐(1982-),男,湖北宜昌人,北京工业大学副教授,工学博士

† 通讯联系人, E-mail: lyang@bjut.edu.cn

Key words: stainless steel; FEA(Finite Element Analysis); overall stability; parametric analysis; calculation method

不锈钢材料具有易维护和全生命周期成本低等优势,在建筑结构中得到广泛的应用^[1].目前有关不锈钢结构的研究比较广泛,但研究尚处于初期阶段.对于不锈钢材料的应力-应变关系,Mirambell 和 Real^[2]提出了两阶段的 Ramberg-Osgood 模型,此外,Quach 等^[3]通过引入 $\sigma_{2.0}$,提出了一个三阶段修正模型. Gardner 等^[4]和 Quach 等^[5]分别对不同情况构件提出了残余应力模型.王元清^[6]和杨璐^[7]等进行了相应的试验和理论研究,提出了纯弯作用下焊接工字形不锈钢梁的整体稳定计算表达式. Yuan 等^[8]对不锈钢焊接截面轴心受压构件的相关稳定性进行了试验研究,并提出了相应的设计方法.舒赣平等^[9-10]对冷弯不锈钢轴心受压构件的稳定承载力以及压弯构件平面稳定承载力进行了研究. Gardner 等^[11-12]根据若干不锈钢试件的试验研究结果进行分析,总结并提出了连续强度法^[13].在不锈钢受压构件研究方面, Gardner^[14-15]等对不锈钢的短柱试件进行了试验,对比了现行欧洲不锈钢设计规范的计算结果,提出了新的设计方法和设计建议.此外还有一些学者对不锈钢构件的变形性能和不锈钢管混凝土进行了研究.

不锈钢的应力-应变曲线特征以及构件受力性能特征与普通钢有很大的不同,不锈钢材料具有明显的非线性特征以及明显的应变硬化特性,因此在进行不锈钢整体稳定性能分析时不宜使用钢结构规范.目前,中国不锈钢设计规范正在编制中,对不锈钢轴心受压构件整体稳定性能的研究对规范的编纂有一定的价值.

1 试验概况

1.1 试件设计

本文对奥氏体型和双相体型焊接工字型不锈钢共计 22 根构件进行了轴压试验,根据试验设定其中 12 个构件绕弱轴出现失稳,10 个构件绕强轴出现失稳.所有构件在设计前均进行了试算,确保施加荷载能够使构件发生整体失稳,同时限制构件的截面尺寸以防构件出现局部屈曲.构件的材料属性通过材性实验获得.

1.2 试验装置

试验过程中使用的加载装置如图 1 所示,采用 500T 液压式长柱压力试验机进行加载,加载过程

中,试件两端各布置一个单刀铰,使得加载装置与柱子端部实现单向铰接,单刀铰的转动轴线与试件弯曲失稳平面垂直.通过单刀铰约束方向来控制构件绕强轴或弱轴的失稳,单刀铰转动中心至柱端面距离为 170 mm,试件的铰接长度 $L_t = L + 340$.



图 1 试验加载装置
Fig. 1 Test setup

1.3 测量内容

位移计架设示意图如图 2 所示,在柱中设置 2 个位移计 LVDT-5 和 LVDT-6 用于测量试件失稳平面内柱中截面的水平位移,同时在柱中失稳平面外设置一个位移计 LVDT-7 用于测量试件失稳时失稳平面外柱中截面的水平位移.通过 LVDT-3 和 LVDT-4 两个位移计可以测量试件在受压时的竖向变形,即试验仪器加载点的竖向位移.此外在柱两端截面各布置了 4 个应变片,用于根据试件在弹性受力阶段端部截面的应变分布推算荷载初偏心值.在试验开始前,采用光学测量设备通过测量沿柱长方向四分点位置处截面中心偏离柱两端截面中心连线的距离来对每个试件的整体几何初始弯曲进行了测量.

2 有限元方法及试验验证

对工字形构件的整体稳定性能的研究需要考虑不同的影响因素,并分别进行参数化分析,由于试验本身的局限性,需引入有限元软件进行分析.在建立有限元模型及计算分析的过程中考虑了材料的非线性、构件几何初始缺陷以及截面残余应力的因素,并

用试验结果对有限元模型进行了验证。

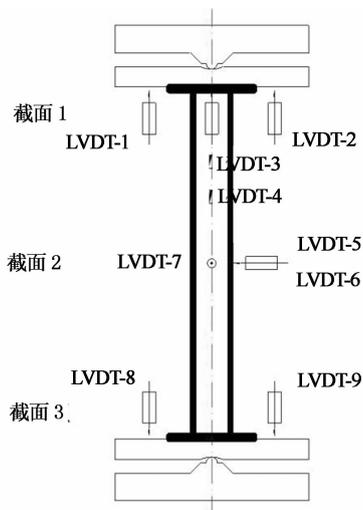


图 2 位移计架设示意图

Fig. 2 Displacement transducers of columns

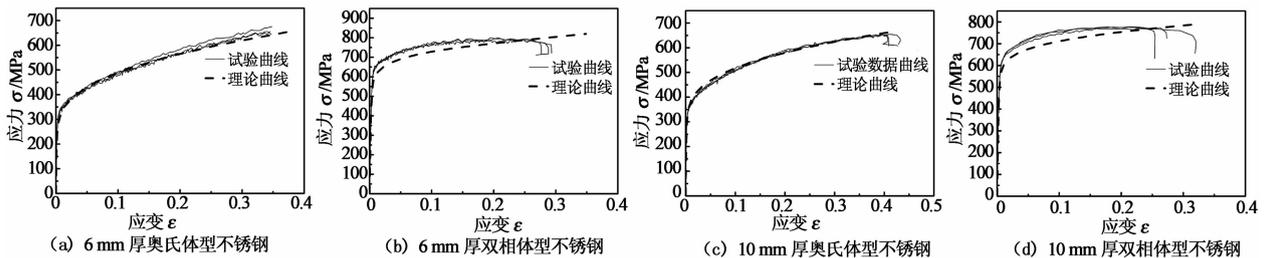


图 3 应力-应变试验曲线与平均值模型曲线的对比

Fig. 3 Stress-strain curves of the tested coupons compared with the average value model curve

2.1.3 构件的初始缺陷

目前,在钢结构稳定计算中,各国规范都考虑了构件的初始几何缺陷。在进行有限元模拟时可偏于安全地取一阶整体屈曲模态作为几何初始缺陷的变形状态,用总的初始缺陷作为构件的一阶模态的最大位移,并对模型节点的坐标进行更新以实现初始缺陷的模拟。初始几何缺陷模型如图 4 所示。

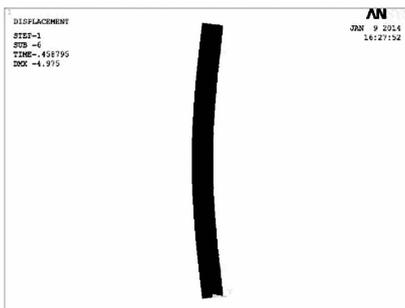


图 4 初始几何缺陷模型

Fig. 4 The initial geometry imperfections model

2.1 有限元模型的建立

2.1.1 单元的选择及边界约束

本文主要对轴压构件的整体稳定性能进行研究,因此采用 BEAM188 单元。为了与试验的柱端约束情况取得一致,首先在有限元模型的两端采用固定约束,在此基础上释放特定方向的扭转。对于工字形截面构件,应对构件绕强轴与弱轴失稳分别进行考虑^[16]。

2.1.2 不锈钢材料的本构模型

不锈钢的本构模型中比较准确的有两阶段的 R-O 模型和三阶段模型,其中两阶段模型相对简洁,使用较多。为能更好地反映试验的实际情况,本文采用试验测得的 3 条应力-应变曲线的平均值模型。有限元分析采用多线性等向强化本构模型进行模拟。应力-应变试验曲线与平均值模型曲线的对比如图 3 所示。

2.1.4 构件残余应力的分布

焊接构件中普遍存在残余应力,且残余应力的存在会对构件的极限承载力产生影响。本文采用袁焕鑫^[17]测得的残余应力分布图[图 5(a)]和他提出的残余应力分布模型[图 5(b)]。根据残余应力自平衡特点将残余应力分布模型进行简化,如图 5(c)所示,并将其施加在有限元模型中,如图 5(d)所示^[17]。

2.2 有限元模型与试验对比

2.2.1 荷载位移曲线对比

采用上述方法对 22 根不锈钢焊接工字形截面轴压构件进行有限元模拟,有限元模拟得到各构件的荷载与端部的竖向位移曲线与试验曲线的对比如图 6 所示,模拟得到各构件的荷载与构件中点处水平位移曲线与试验曲线的对比如图 7 所示,其中取构件内侧与外侧的残余应力测量值的平均值作为实测值。

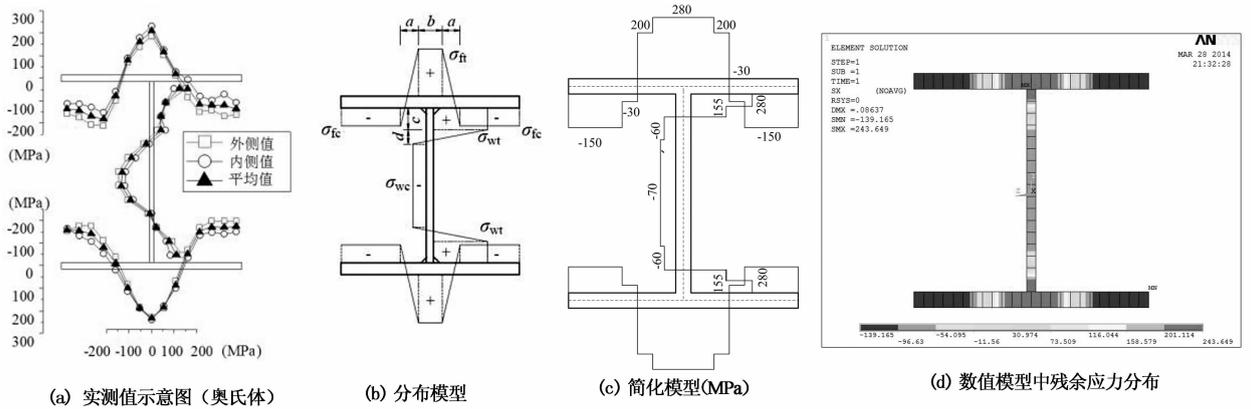


图5 残余应力分布
Fig. 5 The distribution of residual stress

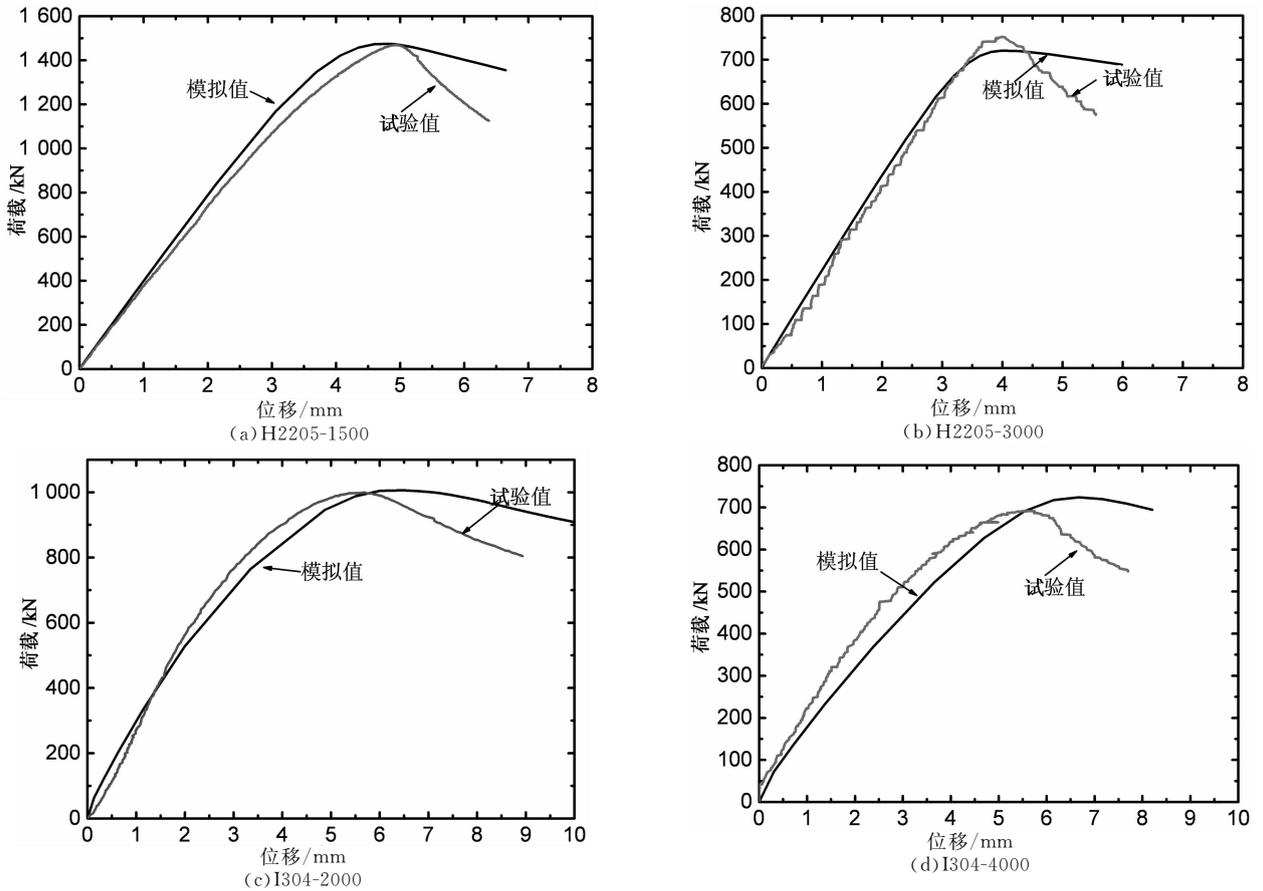


图6 竖向位移荷载曲线对比
Fig. 6 Comparisons of load-vertical displacement

由图6和图7可知,试验值与模拟值的荷载位移曲线匹配得较好,有限元模型能够较准确地模拟奥氏体型与双相体型不锈钢构件整体失稳的真实受力情况.由于试验需要克服单刀铰的摩擦力,无法达到理想状态;另一方面,在进行有限元模拟时,构件初始缺陷是按构件最大初始缺陷的一阶模态来取用的,因此,试验和数值模拟曲线之间存在一定的差别.此外,模拟还受到了构件的计算长度以及残余应

力模型简化的影响.

2.2.2 极限荷载的对比

目前,欧洲不锈钢规范以及美国不锈钢规范是不锈钢设计的主要依据.本文对比了模拟和试验得到的极限承载力,同时也分别按欧洲不锈钢规范和美国不锈钢规范对稳定承载力进行了计算,通过对比验证了有限元模拟的准确性,并对两种规范的合理性进行了评估.

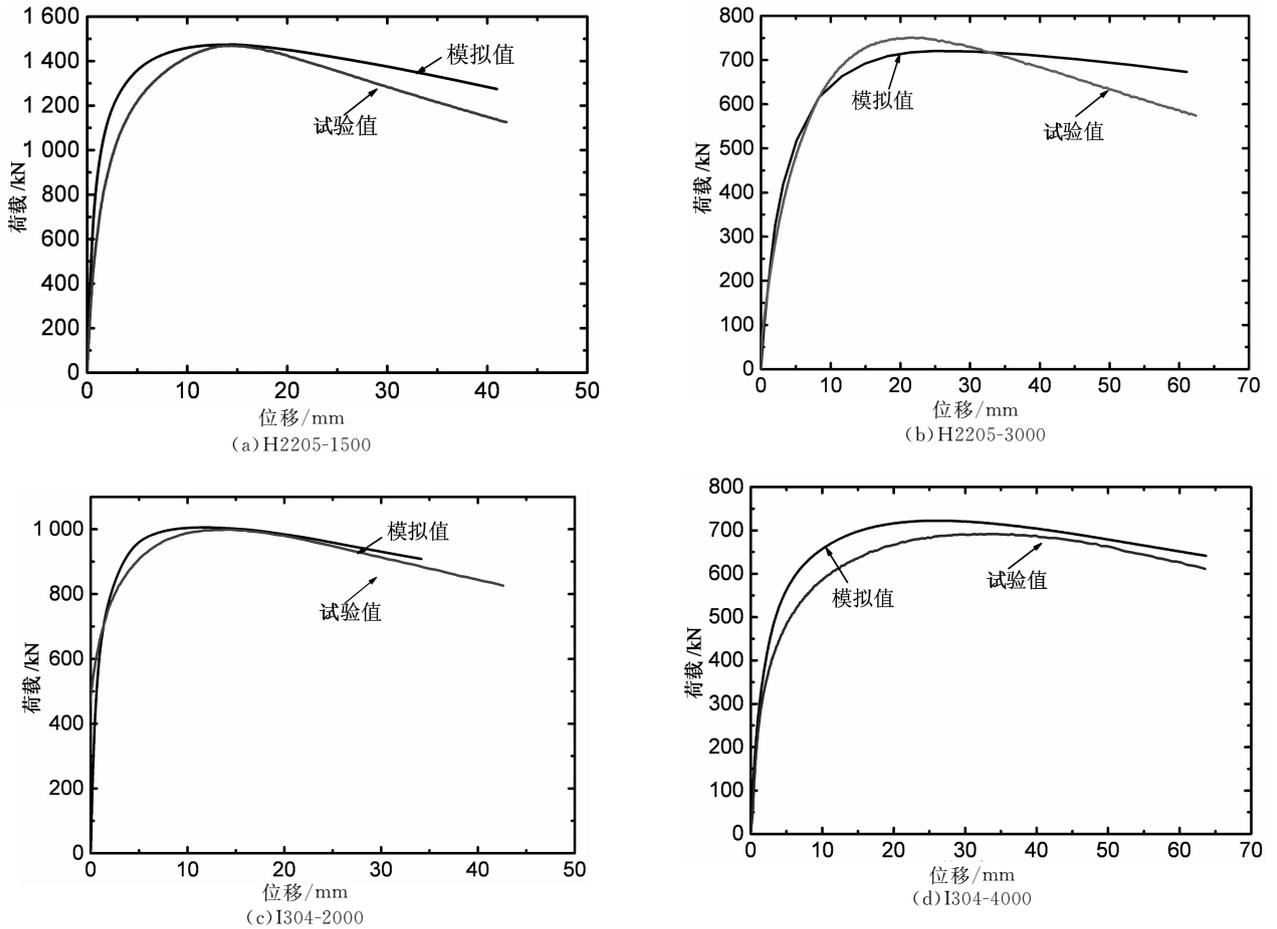


图7 水平位移荷载曲线对比
Fig. 7 Comparisons of load-lateral displacement

模拟中采用的构件参数如表1所示. 其中 B 为截面宽度, H 为截面高度, t_w 为截面腹板厚度, t_f 为截面翼缘厚度. 试件编号中 H 表示构件绕弱轴失稳, I 表示构件绕强轴失稳, 304 代表奥氏体型材料, 2205 代表双相体型材料. L 为试件几何长度, L_1 为钢柱两端单刀铰支座转动中心间距 ($L_1 = L + 340$, 即实际长度), e 为考虑了初弯曲和荷载的初始偏心, e/L_1 为初始几何缺陷系数. 根据欧洲不锈钢结构规范得到的构件稳定承载力设计值为 P_1 ^[18]. 根据美国不锈钢结构规范得到的稳定承载力设计值为 P_2 ^[19], 构件的屈曲极限荷载试验值为 P_t , 构件的屈曲极限荷载的有限元模拟值为 P_y .

由表1可知, 双相体型的模拟值与试验值的差别比奥氏体型模拟值与试验值的差别小, 这主要是由于双相体型构件在极限荷载状态下未达到屈服状态, 构件均属于弹性失稳; 构件绕强轴失稳时模拟值

与试验值的差别比构件绕弱轴失稳时的差别小. 总体来看, 有限元模拟值与试验值的误差控制在 10% 以内, 平均误差在 5% 以内, 本文的有限元方法能够很好地模拟不锈钢轴心受压构件整体稳定承载力.

对于不锈钢构件, 根据欧洲不锈钢规范得到的设计值普遍低于试验值和模拟值, 随长细比的增加两者的差异逐渐变小, 欧洲不锈钢规范相对较保守且符合实际情况. 根据美国不锈钢规范得到的设计值整体上高于试验值与模拟值, 美国规范相对较激进不适用于焊接不锈钢构件. 当构件长细比较小时, 根据美国规范得到的设计值与构件极限承载力差别较小, 而对于长细比较大的构件按照欧洲规范得到的设计值与构件的极限荷载差别较小.

综合来看, 试验与模拟之间的差别在可接受的范围之内, 故此有限元方法比较准确.

表1 极限荷载对比
Tab.1 The compare ultimate load

	试件编号	B /mm	H /mm	t_t /mm	t_w /mm	L_t /mm	e/L_t /‰	P_t /kN	P_y /kN	P_1 /kN	P_2 /kN	P_y/P_t	
弱轴	H304-1500	149.1	150.2	10.00	6.00	1 875.7	-3.25	956.2	882.1	742.1	933.5	0.922 5	
	H304-2000	149.1	150.1	10.00	6.00	2 377.4	-6.16	820.6	768.7	626.2	834.3	0.936 8	
	H304-3000	149.6	150.0	10.00	6.00	3 383.7	-1.08	598.7	533.2	440.7	669.1	0.890 6	
	H304-3500	149.6	149.6	10.00	6.00	3 877.3	7.62	489.5	466.0	369.1	590.1	0.952 1	
	H304-4000	149.4	150.0	10.00	6.00	4 376.8	5.70	392.2	371.7	310.8	511.1	0.947 8	
	H304-4000-B	119.1	149.7	10.00	6.00	4 369.1	-2.38	261.5	244.8	177.2	268.7	0.936 1	
强轴	I304-2000	149.2	149.8	10.00	6.00	2 377.1	-1.80	999.5	1 005.9	919.6	1 048.2	1.006 4	
	I304-3000	149.3	150.3	10.00	6.00	3 373.5	0.96	914.4	873.6	800.0	904.9	0.955 4	
	I304-3500	149.5	110.4	10.00	6.00	3 874.8	-0.96	608.2	642.8	521.5	846.7	1.056 9	
	I304-4000	150.0	150.2	10.00	6.00	4 374.4	0.84	691.4	724.1	669.1	793.8	1.047 4	
	I304-4500	120.1	100.0	10.00	6.00	4 872.9	-0.18	282.0	296.0	266.9	380.7	1.049 7	
	Avg												0.972 9
	Cov												0.003 3
弱轴	H2205-1500	149.9	150.8	10.20	6.00	1 879.3	4.51	1 469.5	1 474.3	1 230.7	1 554.7	1.003 3	
	H2205-2000	150.0	150.4	10.20	6.00	2 378.9	1.81	1 127.9	1 100.2	978.7	1 335.5	0.975 5	
	H2205-3000	149.7	150.3	10.20	6.00	3 381.4	11.85	751.0	720.5	603.5	888.7	0.959 4	
	H2205-3500	151.2	150.1	10.20	6.00	3 880.8	-10.18	677.0	623.2	497.2	695.5	0.920 5	
	H2205-4000	149.9	150.1	10.20	6.00	4 375.5	0.82	523.5	511.0	397.8	551.9	0.976 1	
	H2205-4000-B	120.1	150.3	10.20	6.00	4 378.2	-2.90	320.7	301.8	217.4	283.0	0.941 1	
强轴	I2205-2000	150.7	150.3	10.20	6.00	2 380.2	3.66	1 704.6	1 792.1	1 478	1 779.6	1.051 3	
	I2205-3000	149.9	150.0	10.20	6.00	3 377.2	0.98	1 366.1	1 360.4	1 157	1 495.7	0.995 9	
	I2205-3500	150.9	150.4	10.20	6.00	3 883.68	0.32	1 227.5	1 235.1	1 014	1 364.2	1.006 2	
	I2205-4000	148.5	150.1	10.20	6.00	4 378.7	-0.11	1 064.8	1 080.4	864.9	1 234.9	1.014 7	
	I2205-4500	150.4	110.8	10.20	6.00	4 876.0	0.18	619.1	605.5	441.7	618.8	0.978 0	
	Avg												0.983 8
	Cov												0.001 3

3 参数分析

本节使用以上经试验确定的有限元方法进行参数化分析,分别讨论构件几何初始缺陷、截面残余应力、材料力学性能、截面宽厚比以及长细比对构件极限承载力的影响。

3.1 构件几何初始缺陷

为研究构件几何初始缺陷对构件极限承载力的影响,本文在不改变其他参数情况下,采用改变初始缺陷大小的方法进行验证。本文选取初始缺陷系数分别为0.000 5L,0.001L和0.002L时构件绕强轴失稳及绕弱轴失稳2种情况进行有限元分析,并将初始缺陷值为0.000 5L与0.002L时的极限荷载值与初始缺陷值为0.001L时的极限荷载值进行对比。对比结果如图8所示。

图8中横坐标表示构件长细比,纵坐标表示初始缺陷分别为0.002L,0.000 5L构件的极限荷载 $F_{0.002}$, $F_{0.000 5}$ 与初始缺陷为0.001L构件的极限荷

载 $F_{0.001}$ 的比值。由图8可知,初始缺陷为0.000 5L时的极限荷载比初始缺陷为0.001L的极限荷载高5%左右,且随正则化长细比的变化有轻微的波动;初始缺陷为0.002L时的极限荷载比初始缺陷为0.001L的极限荷载低7%左右,且随正则化长细比的变化有轻微的波动。初始缺陷大小对构件的极限承载力影响较大,但对不同长细比的构件,初始缺陷对于绕弱轴失稳和绕强轴失稳2种情况的极限承载力影响不大。此外,通过奥氏体型与双相体型对比可知,不同初始缺陷对两者的影响基本相同,但初始缺陷对双相体型构件影响较小且对绕弱轴失稳构件影响更大。

3.2 构件截面残余应力的影响

为研究构件截面残余应力的影响,本文在不改变其他参数情况下,分别对考虑残余应力与不考虑残余应力2种情况进行了有限元分析,并对考虑残余应力时构件的极限荷载与不考虑残余应力时的极限荷载进行了对比。对比结果如图9所示。

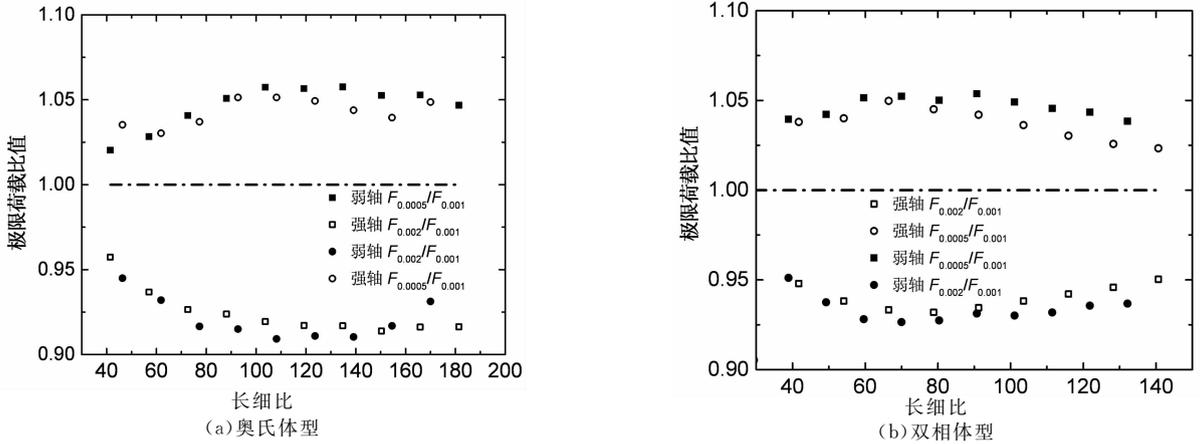


图 8 初始缺陷的影响
Fig. 8 The influence of initial defects

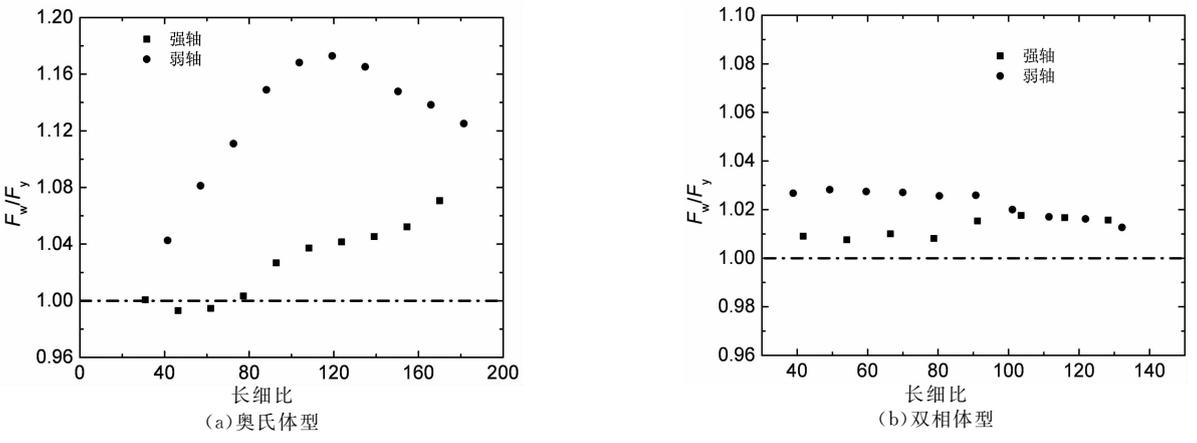


图 9 残余应力的影响
Fig. 9 The influence of residual stress

图 9 中横坐标表示构件长细比, 纵坐标表示不考虑残余应力时构件的极限荷载 F_w 与考虑残余应力的极限荷载 F_y 的比值. 从构件的残余应力影响来看, 随长细比的变化, 残余应力对构件的极限承载力的影响也随之发生改变; 残余应力对构件绕弱轴失稳时的极限承载力影响较大, 表明绕弱轴失稳时构件对残余应力更为敏感. 此外, 残余应力对奥氏体型不锈钢构件的极限承载力的影响较大, 而对双相体型不锈钢构件的极限承载力的影响较小, 主要是由于残余应力的存在使得奥氏体型不锈钢构件更容易达到屈服应力 f_y .

3.3 材料力学性能的影响

在探讨材料力学性能的影响时, 在保证其他影响因素不变的前提下, 分别取用 2 种奥氏体型与 2 种双相体型不锈钢材料进行有限元分析, 并对有限

元模拟得到的极限荷载进行对比, 对比结果如图 10 所示.

图 10 中横坐标表示构件长细比, 纵坐标表示 2 种牌号的材料极限荷载 F_1 和 F_2 的比值. 由图 10 可知, 绕强轴失稳和弱轴失稳时材料力学特性对整体稳定承载力的影响均表现为随构件长细比的增加先变大后变小. 材料的力学性能对双相体型不锈钢构件的极限承载力影响较大, 同一种材料使用正则化长细比考虑材料特性后 2 种牌号的材料稳定系数与正则化长细比的关系基本相同.

3.4 截面宽厚比的影响

考虑宽厚比的影响时, 在不改变其他参数的情况下, 通过改变截面宽厚比, 使用有限元分析获得极限荷载并对比按照中国钢结构规范中 $\varphi = F/f_y A$ 计算得到稳定系数的变化. 如图 11 所示.

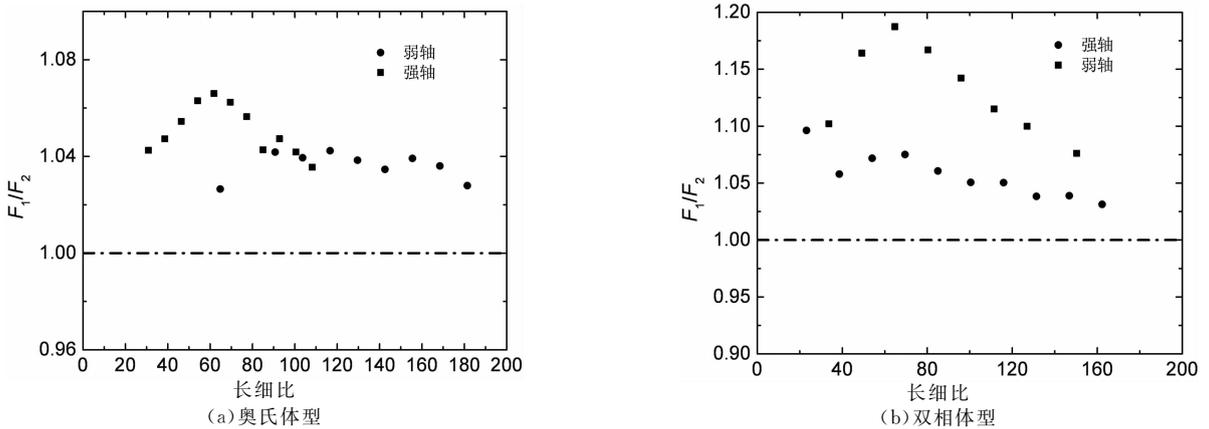


图 10 材料力学特性的影响

Fig. 10 The influence of material mechanical properties

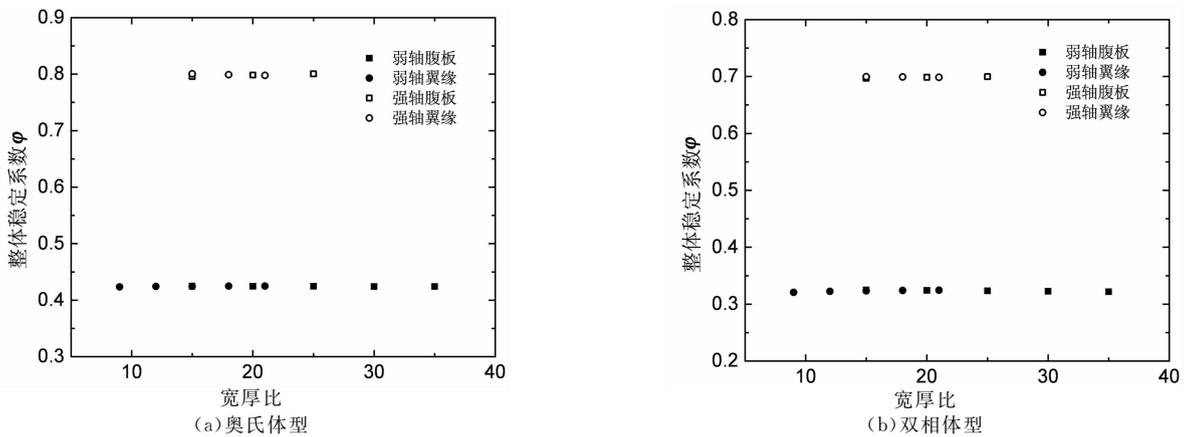


图 11 宽厚比的影响

Fig. 11 The influence of width-thickness ratio

图 11 中横坐标表示构件宽厚比,纵坐标表示不考虑残余应力时与考虑残余应力时的整体稳定系数.由图 11 可知,腹板的宽厚比和翼缘的宽厚比对绕弱轴失稳和绕强轴失稳的极限承载力的影响可以忽略,且宽厚比对奥氏体型与双相体型不锈钢构件极限承载力的影响相同.

3.5 构件长细比的影响

当讨论长细比对构件的极限荷载的影响时,在不改变其他因素的前提下,通过改变构件的长度来改变构件的长细比,通过有限元分析确定当构件长细比改变时构件极限荷载按照中国钢结构规范中 $\varphi = F/f_y A$ 计算得到整体稳定系数变化,如图 12 所示.

图 12 中横坐标表示构件长细比,纵坐标表示构件的整体稳定系数.由图 12 可知,奥氏体型与双相体型不锈钢的极限荷载随长细比的变化均呈现出较明显的改变,构件长细比越大极限荷载值越小.

4 计算方法的提出

4.1 计算方法

本文采用正则化长细比构建整体稳定系数,将柱子曲线分为 3 段分别进行计算.第 1 段,由于正则化长细比较小,构件失稳时由于截面屈服应力已超过 f_y ,边缘屈服准则已不再成立,因此对于此类问题可采用 Gardner 提出的连续强度法.由于此种方法计算比较复杂且在实际中此类长细比较小的构件较少,因此为了使用方便以及曲线的完整可采用一段保守的函数曲线来代替.第 2 段,考虑到材料的非线性特性,构件失稳形式为弹塑性失稳,综合美国钢结构规范以及冷弯构件的直接强度法,可采用美国冷弯不锈钢规范中给出的公式形式进行计算.第 3 段,此时构件正则化长细比较大,构件失稳形式为弹性失稳,可采用基于构件边缘屈服准则的 perry 公式的形式进行计算.

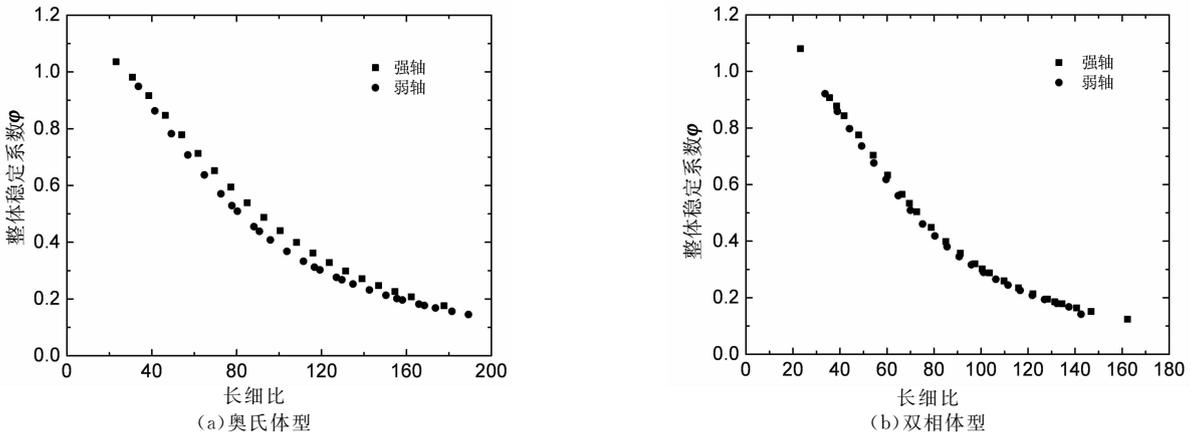


图 12 长细比的影响
Fig. 12 The influence of slenderness ratio

轴心受压构件的整体稳定系数公式形式可表示为:

$$\varphi = \begin{cases} a_1 + a_2\lambda^2, & \lambda \leq a; \\ a_2\lambda^2, & a < \lambda \leq b; \\ \frac{1}{2\lambda^2}[(a_5 + a_6\lambda + \lambda^2) - \sqrt{(a_5 + a_6\lambda + \lambda^2)^2 - 4\lambda^2}], & b < \lambda. \end{cases}$$

此公式的示意图如图 13 所示。

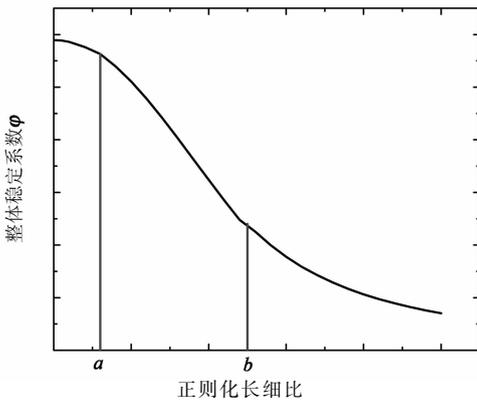


图 13 柱子曲线示意图
Fig. 13 Column curve diagram

对于 2 个分界点, 第 1 个分界点可根据美国不锈钢规范中当应力达到 σ 构件失稳的规定, 以截面屈服应力 f_y 作为临界应力, 即满足:

$$\sigma = \pi^2 E_c / (KL/r)^2 = [\pi^2 / (KL/r)^2] \times E_0 f_y / [f_y + 0.002nE_0 (\sigma/f_y)^{n-1}].$$

当 $\sigma = f_y$ 时对应的长细比为:

$$(KL/r)^2 = \pi^2 E_0 / (f_y + 0.002nE_0).$$

考虑到数据的简便性, 取奥氏体型的第 1 分界点为 0.25, 双相体型的第 1 分界点为 0.4.

由于不锈钢的弹塑性失稳与弹性失稳之间没有明确的界定, 可通过拟合的方法获得第 2 个分界点的值. 分别选取不同数值作为第 2 点, 然后对比各种情况拟合曲线的回归值并考虑到数值的简便来确定第 2 点的数值, 如表 2 所示.

4.2 数据拟合

通过对奥氏体型与双相体型不锈钢进行参数化有限元分析, 将得到的有限元参数分析结果使用 Matlab 提出的稳定系数公式进行拟合, 最终确定公式中系数的取值, 并考虑到系数的简便以及曲线的连续性对系数进行简单处理, 如表 2 所示.

表 2 系数取值
Tab. 2 Coefficient values

		分界点	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
奥氏体型强轴	拟合值	1.0	1.222	-2.932	1.033	0.511 3	0.849 4	0.528 8
	建议取值	1.0	1.2	-2.93	1.03	0.51	0.85	0.53
奥氏体型弱轴	拟合值	1.0	1.203	-1.85	1.052	0.432	0.836	0.727 9
	建议取值	1.0	1.2	-1.85	1.05	0.43	0.84	0.73
双相体型强轴	拟合值	1.1	1.106	0.768 8	1.062	0.565 7	1.029	0.224 7
	建议取值	1.1	1.1	-0.77	1.06	0.57	1.03	0.23
双相体型弱轴	拟合值	1.2	1.088	-1.044	0.996 4	0.542 6	1.039	0.377 2
	建议取值	1.2	1.1	-1.04	1	0.54	1.04	0.38

将拟合得到的曲线与试验数值以及欧洲规范中不锈钢曲线进行对比,如图 14 所示。

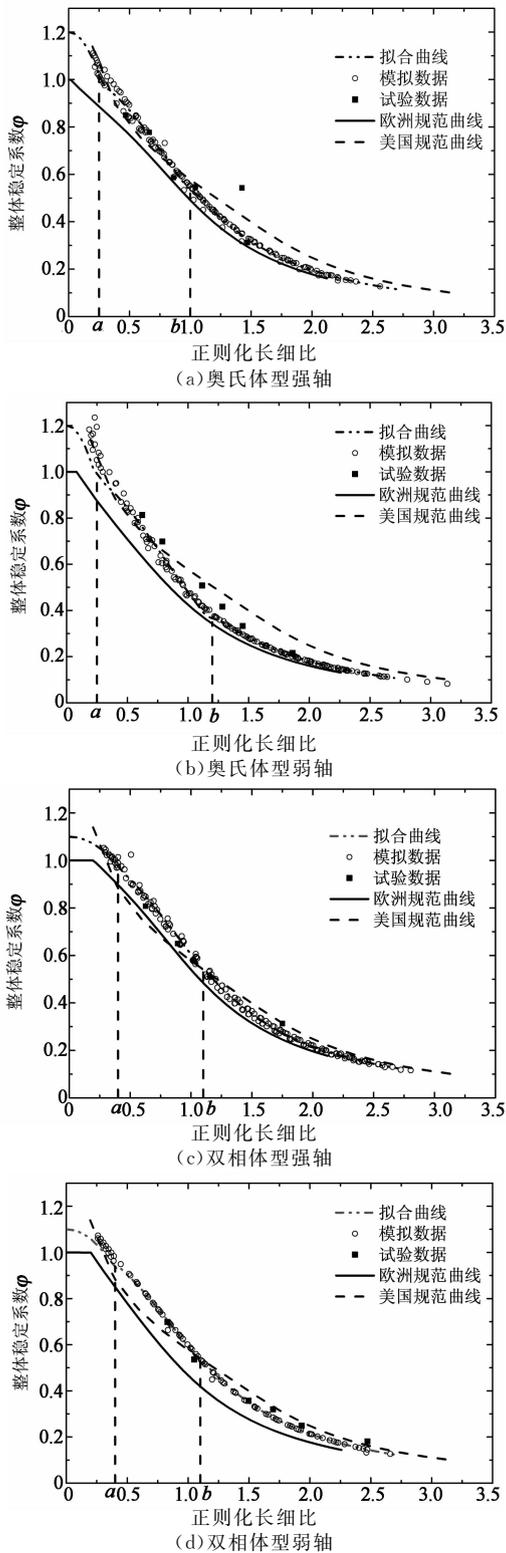


图 14 拟合曲线
Fig. 14 Fitting curve

将通过计算得到的柱子曲线与欧洲不锈钢规范和美国不锈钢规范得到的曲线进行对比可以看出:计算得到的柱子曲线高于欧洲规范曲线,且长细比

越大两者柱子曲线的差别越小;当正则化长细比较小时,计算得到的柱子曲线高于规范曲线,当正则化长细比较大时,计算得到的柱子曲线低于规范曲线。当正则化长细比较小时,计算得到的柱子曲线与美国规范曲线间的差距较小,当正则化长细比较大时,计算得到的柱子曲线与欧洲不锈钢规范的柱子曲线间的差距较小。

此外,对于奥氏体型不锈钢构件,模拟得到的整体稳定系数与欧洲规范曲线差值较小,对于双相体型不锈钢构件,模拟得到的整体稳定系数与欧洲规范曲线差值较大,表明不同材料对构件整体稳定承载力影响较大,因此两者应分别进行讨论。构件绕强轴失稳时模拟得到的整体稳定系数与欧洲规范曲线差值小于构件绕弱轴失稳时模拟得到的整体稳定系数与欧洲规范曲线差值,因此应分别讨论工字形构件绕强轴失稳和绕弱轴失稳 2 种情况。

本文提出的三段式计算方法适用于奥氏体型和双相体型 2 类不锈钢构件。由图 14 可知,模拟值明显高于欧洲不锈钢规范曲线,表明欧洲不锈钢规范较保守;模拟值与美国不锈钢柱子曲线相差较大,表明美国不锈钢规范不适用于焊接不锈钢构件。三段式与试验和有限元数据点的分布形态吻合较好,对工字形截面构件的承载力计算值与试验和有限元的平均比值均近似为 1,表明建议公式能够对奥氏体型、双相体型不锈钢的工字形截面构件的整体稳定承载力进行合理的计算。

5 结论

1) 通过考虑了不锈钢材料力学性能、焊接残余应力、整体几何初始缺陷等因素的有限元模型对试验进行验证,表明了有限元模型的可靠性和适用性。

2) 通过参数分析可确定不锈钢构件的材料特性、几何初始缺陷与长细比对构件整体稳定承载力影响较大,截面残余应力对构件整体稳定承载力影响较小,截面宽厚比对构件整体稳定承载力影响可忽略。

3) 欧洲不锈钢规范对于构件整体稳定性能的预测较保守,美国不锈钢规范对于焊接构件可能不适用。

4) 计算了 742 个焊接工字形不锈钢构件的数值算例,根据算例结果提出了三段式计算方法,建议公式可很好地预测不锈钢构件的整体稳定承载力,可以为工程设计应用和相关设计规范编制提供参考。

参考文献

- [1] 王元清,袁焕鑫,石永久,等. 不锈钢结构及其应用和研究现状[J]. 钢结构, 2010(2): 1-13.
WANG Yuan-qing, YUAN Huan-xin, SHI Yong-jiu, *et al.* A review of current applications and research of stainless steel structure [J]. Steel Structure, 2010(2): 1-13. (In Chinese)
- [2] MIRAMBELL E, REAL E. On the calculation of deflections in structural stainless steel beams; an experimental and numerical investigation [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2000, 54(1): 109-133.
- [3] QUACH W M, TENG J G, CHUNG K F. Three-stage full-range stress-strain model for stainless steels [J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(9): 1518-1527.
- [4] GARDNER L, CRUISE R B. Modeling of residual stresses in structural stainless steel sections [J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(1): 42-53.
- [5] QUACH W M, TENG J G, CHUNG K F. Residual stresses in press-braked stainless steel sections I: coiling and uncoiling of sheets [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(8): 1803-1815.
- [6] 王元清,高博,戴国欣,等. 焊接不锈钢工字形截面受弯构件整体稳定与设计方法 [J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(1): 57-62.
WANG Yuan-qing, GAO Bo, DAI Guo-xin, *et al.* Analysis on overall buckling behavior of stainless steel welded I-beams and design methods [J]. Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(1): 57-62. (In Chinese)
- [7] YANG Lu, WANG Yuan-qing, GAO Bo, *et al.* Two calculation methods for buckling reduction factors of stainless steel welded I-section beams [J]. Thin-Walled Structures, 2014, 83: 128-136.
- [8] YUAN H X, WANG Y Q, GARDNER L, *et al.* Local-overall interactive buckling of welded stainless steel box section compression members [J]. Engineering Structures, 2014, 67(5): 62-76.
- [9] 舒赣平,郑宝锋,沈晓明. 不锈钢压弯构件平面内稳定承载力计算方法研究 [J]. 工业建筑, 2012, 42(5): 41-44.
SHU Gan-ping, ZHENG Bao-feng, SHEN Xiao-ming. In-plane stability design method of stainless steel beam-columns [J]. Industrial Construction, 2012, 42(5): 41-44. (In Chinese)
- [10] 舒赣平,郑宝锋,沈晓明. 不锈钢轴心受压构件稳定承载能力计算方法研究 [J]. 工业建筑, 2012, 42(5): 21-28.
SHU Gan-ping, ZHENG Bao-feng, SHEN Xiao-ming. New design method for stainless steel cold-formed tubular columns under axial load [J]. Industrial Construction, 2012, 42(5): 21-28. (In Chinese)
- [11] GARDNER L, NETHERCOT D A. Experiments on stainless steel hollow sections-part 1: material and cross-sectional behavior [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60(9): 1291-1318.
- [12] GARDNER L, NETHERCOT D A. Experiments on stainless steel hollow sections-part 2: member behavior of columns and beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60(9): 1319-1332.
- [13] GARDNER L. The continuous strength method [J]. Structures & Buildings, 2008, 161(S3): 127-133.
- [14] GARDNER L, NETHERCOT D A. Experiments on stainless steel hollow sections—part 2: member behavior of columns and beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60(9): 1319-1332.
- [15] GARDNER L, NETHERCOT D A. Experiments on stainless steel hollow sections—part 1: material and cross-sectional behaviour [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60(9): 1291-1318.
- [16] 班慧勇,施刚,石永久. Q420 高强度等边角钢轴压构件整体稳定性能设计方法研究 [J]. 工程力学, 2014, 31(3): 63-70.
BAN Hui-yong, SHI Gang, SHI Yong-jiu. Investigation on design method of overall buckling behaviour for Q420 high strength steel equal-leg angle members under axial compression [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(3): 63-70. (In Chinese)
- [17] 袁焕鑫. 焊接不锈钢轴心受压构件局部稳定和相关稳定性能研究 [D]. 北京:清华大学土木工程系, 2014.
YUAN Huan-xin. Local and local-overall buckling behaviour of welded stainless steel member under axial compression [D]. Beijing: Department of Civil Engineering, Tsinghua University, 2014. (In Chinese)
- [18] EN 1993-1-4 Eurocode 3: design of steel structures, part 1-4: general rules-supplementary rules for stainless steels [S]. London: BSI, 2006.
- [19] ASCE 8-02 Specification for the design of cold-formed stainless steel structural members [S]. Virginia: American Society of Civil Engineers, 2001.