

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.03.001



高强钢焊接薄腹工形截面 双向压弯构件的稳定性

杨应华¹, 曹凯翔^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055; 2. 宁夏回族自治区电力设计院, 银川 750000)

摘要:应用 ANSYS 有限元, 分析了 Q460 高强钢焊接薄腹工形截面双向压弯构件的稳定性能, 提出了可供实际应用参考的设计公式。分析中考虑的主要参数有腹板高厚比, 构件长细比, 翼缘宽厚比及荷载偏心率。结果表明, 对受压为主的构件, 腹板局部屈曲对构件稳定承载力影响较大, 而对受弯为主的构件, 这一因素对构件稳定承载力影响较小。有限元分析结果与现行规范方法计算结果比较表明, 目前规范方法尚不能较好地计算高强钢焊接薄腹工形截面双向压弯构件的稳定承载力, 因而提出了修正直接强度法, 该法精度较好且偏于安全。

关键词:高强钢; 焊接薄腹工形截面; 双向压弯; 稳定; 直接强度法

中图分类号: TU391, TU323.1, TU311.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2017)03-0001-12

Stability analysis of welded Q460 I-section columns with slender web under biaxial bending

Yang Yinghua¹, Cao Kaixiang^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Xian University of Architecture and Technology, Xian 710055, China;

2. Ningxia Hui Autonomous Regional Electric Power Design Institute, Yinchuan 750000, China)

Abstract: Applying the ANSYS FE, the paper analyzed the stability behavior of welded Q460 I-section columns with slender web under biaxial bending and proposed practical formulas for predicting the stability capacities of such members. Parameters considered in the analysis included web slenderness, member slenderness, flange slenderness and loading eccentricities. The results showed that the detrimental effect of web local buckling on the stability capacity of the member is more significant for axial load dominated members than for bending moment prevailed members. Comparison to the current code method showed that the later can not accurately predict stability capacities of such members. The proposed modified DSM method demonstrates rather good accuracy, meanwhile is safe.

Keywords: high-strength steel; welded I-section with slender web; biaxial bending; stability; direct strength method

收稿日期: 2017-01-10

基金项目: 教育部留学回国人员科研基金(教外司留[2007]1108号)

作者简介: 杨应华(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事钢结构研究, (E-mail) yhyang@xauat.edu.cn。

Received: 2017-01-10

Foundation item: Research Funds for Returned Overseas Chinese Scholars(No. [2007]1108)

Author brief: Yang Yinghua(1965-), professor, doctoral supervisor, research interest: steel structure, (E-mail) yhyang@xauat.edu.cn.

工形压弯构件腹板局部屈曲后,构件尚具有较高的稳定承载力,若将腹板高厚比适当放大,形成薄腹工形截面构件,可以充分利用腹板的屈曲后强度,实现钢材经济有效地利用。普通钢材(Q235)此类构件的稳定性能已得到较深入的研究^[1-6]。近来,随着高强钢在工程实际中的广泛应用^[7-8],高强钢构件的稳定设计方法研究成为急需解决的问题。目前,对高强钢构件稳定性研究主要集中于受压构件整体稳定性^[9-13],对受压构件相关屈曲也有一些研究^[14-15],而对高强钢焊接薄腹工形截面受压构件稳定性的研究尚未见报道。鉴于此类构件的优越性以及高强钢焊接构件与普通钢构件受力性能的差异,需对高强钢焊接薄腹工形截面受压构件稳定性能进行深入研究。本文应用 ANSYS 有限元,分析 Q460 高强钢焊接薄腹工形截面双向压弯构件的稳定性能,同时提出可供实际应用参考的设计公式。

1 有限元模型及验证

1.1 有限元模型

研究对象为两端铰接薄腹工形截面双向偏压构件,如图 1 所示。Q460 钢材本构关系采用 Mises 屈服准则、多线性随动强化模型^[16],其应力-应变关系如图 2 所示,其中, $f_y = 460 \text{ MPa}$, $f_u = 550 \text{ MPa}$, $\epsilon_y = f_y / E$, $\epsilon_{st} = 0.02$, $\epsilon_u = 0.14$, 弹性模量 $E = 2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, 材料泊松比 $\nu = 0.3$ 。构件的初始几何缺陷包括构件的初弯曲和腹板的局部凸曲。整体初弯曲在 x 轴和 y 轴方向各取为一个正弦半波,矢高为 $L/1\,000$ (L 为构件长度),按照《钢结构工程施工质量验收规范》(GB 50205—2001)^[17],腹板的局部初始凸曲应不超过 $3h_w/1\,000$ (h_w 为腹板高度)。经有限元初步试算,施加初始局部缺陷 $3h_w/1\,000$ 和 $h_w/1\,000$ 后的计算结果基本接近,因此,所分析的构件均选取 $h_w/1\,000$ 。施加初始几何缺陷时,先进行双向压弯构件特征值屈曲模态分析,分别得到腹板屈曲模态及构件绕 2 个主轴的整体屈曲模态,再按上述限值同时引入模型中。

Q460 焊接工型截面残余应力采用文^[18]给出的模式,如图 3 所示。其中,残余拉应力峰值分别为 $\sigma_{frc} = 345 \text{ MPa}$, $\sigma_{frc} = 35 \text{ MPa}$, $\sigma_{wrc} = 35 \text{ MPa}$;残余压应力峰值按式(1)计算:

$$\begin{cases} \sigma_{frc} = 420 - 1\,200 \frac{1}{b_f} - 5\,000 \frac{1}{t_f}, -460 \leq \sigma_{frc} \leq -46 \\ \sigma_{wrc} = 200 - 2\,300 \frac{1}{h_w} - 2\,400 \frac{1}{t_w}, -460 \leq \sigma_{wrc} \leq -46 \end{cases} \quad (1)$$

式中: t_w 、 b_f 、 t_f 分别为腹板厚度,翼缘自由外伸宽度和翼缘厚度。

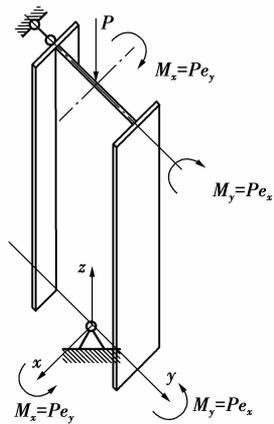


图 1 构件的计算简图

Fig. 1 Calculation model of the beam-column

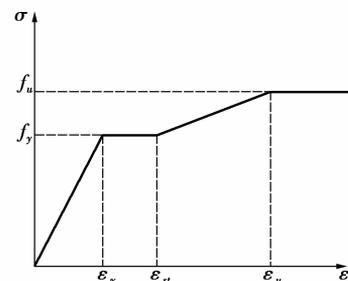


图 2 材料本构关系

Fig. 2 Stress-strain relationship of the material

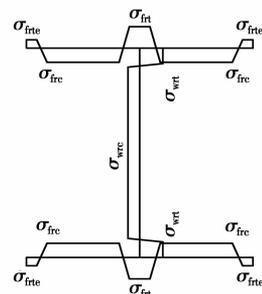


图 3 残余应力的分布模式

Fig. 3 Distribution pattern of residual stresses

把残余应力作为初应力,编制成残余应力文件,在第一个荷载步读取该文件施加在单元积分点上。模型单元选取适用于大应变非线性分析的四边形壳

单元 shell181。模型端截面所有节点的自由度与主节点进行耦合,以防止荷载施加处局部应力集中。两端部约束按理想铰接处理,施加在主节点上,上部约束为 $U_x=U_y=ROT_z=0$,下部约束为 $U_x=U_y=U_z=ROT_z=0$,如图4。

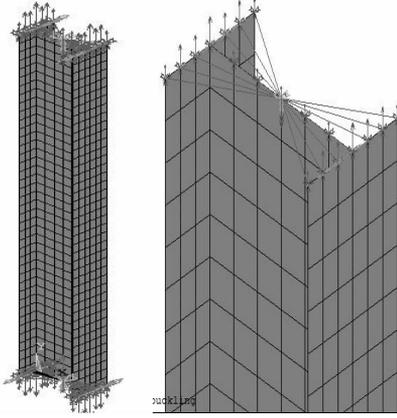


图4 有限元模型

Fig. 4 Finite element model

1.2 有限元模型的验证

1.2.1 模型验证1 对文[19]腹板高厚比超限的焊接工字钢压弯构件平面外失稳的试验构件进行有限元模拟。试件几何尺寸、初始几何缺陷、残余应力分布模式及材料的屈服强度见文[19],有限元分析结果和试验对结果比如表1所示。其中, P_u 表示实验值, P_e 表示有限元分析值, $(P_e - P_u)/P_u \times 100\%$ 为误差。

表1 有限元结果与文献[19]实验结果对比

Table 1 Comparison of finite element results with experimental results of Ref. [19]

试件	P_u	P_e	误差/%
LC70A	201.6	205.78	2.07
LC80A	195	198.63	1.86
LC90A	112.9	115.44	2.54
LC90C	172.5	169.85	-1.54
LC100A	92.8	97.51	5.08
LC100C	122.3	118.76	-2.89
LC120A1	75.5	82.66	9.48
LC120A2	70.0	74.39	6.27

误差最大值为9.48%,最小值为-2.89%,有限元模拟值与实验结果吻合较好,所建有限元模型可以较准确地模拟薄腹构件的承载力。

1.2.2 模型验证2 文献[20]提供了工形截面双向偏心受压的试验数据,取其中的8个构件进行有

限元模拟,钢材均为ASTMA36钢,试件几何尺寸、初始几何缺陷和残余应力分布模式见文[20],有限元结果与试验结果对比如下表2。

表2 有限元结果与文献[20]实验结果对比

Table 2 Comparison of finite element results with experimental results of Ref. [20]

试件	P_u	P_e	误差/%
2	240.75	245.32	1.90
3	279.02	291.55	4.49
4	384.04	379.64	-1.15
5	220.72	238.82	8.2
6	213.16	206.46	-3.14
7	340.87	352.33	3.36
8	486.83	512.07	5.18
10	378.25	375.71	-0.67

从表2中可以看出,误差最大值8.2%,最小值-3.14%,误差平均值2.27%,有限元模拟值与试验结果吻合较好,说明有限元模型能较准确地模拟双向偏压构件的承载力。

2 参数分析

2.1 参数的选取

变化参数为:腹板高厚比,翼缘宽厚比,构件长细比,荷载偏心率。腹板高厚比 h_w/t_w 选取大于钢结构规范[21]规定的压弯工形截面腹板高厚比的限值。根据规范,计算得所选取构件腹板高厚比限值最大为43.6,分别取50、60、80、100、120进行参数分析。

选取构件的翼缘宽厚比 b_f/t_f 满足钢结构规范[21]的限值规定。Q460高强度钢压弯构件翼缘宽厚比应满足 $b_f/t_f \leq 9.29$,分别取5.6、6.5、7.1、7.8、8.7进行分析。构件常用的长细比在50~100之间,取较大长细比 $\lambda_y = 40 (\lambda_x = 13)$; $\lambda_y = 50 (\lambda_x = 17)$; $\lambda_y = 60 (\lambda_x = 20)$; $\lambda_y = 70 (\lambda_x = 23)$ 和 $\lambda_y = 80 (\lambda_x = 27)$ 5种情况进行分析。荷载相对偏心率分别取 $\epsilon_x = 1.0$ 、 $\epsilon_y = 0.5$; $\epsilon_x = 2.0$ 、 $\epsilon_y = 1.0$; $\epsilon_x = 5.0$ 、 $\epsilon_y = 1.5$ 共3种情形。其中, λ_y 和 λ_x 表示绕截面强轴和弱轴的长细比, ϵ_x 和 ϵ_y 表示截面强轴和弱轴方向的偏心率。

2.2 腹板高厚比的影响

保持腹板高度、翼缘宽度、翼缘厚度以及构件长

细比不变,改变腹板厚度来分析腹板高厚比变化对 Q460 高强钢焊接薄腹工形截面双向压弯构件稳定性能的影响。

图 5(a) 给出了一典型构件 ($\lambda_y = 80$ 、 $\lambda_x = 27$ 、 $h_w/t_w = 80$) 的荷载位移曲线。图中横坐标表示跨中 x 轴方向的挠度 U_x , 纵坐标为轴向压力 P (下同)。

图 5(b) 所示为典型构件 ($\lambda_y = 80$ 、 $\lambda_x = 27$) 腹板高厚比与构件极限承载力的关系曲线。由图 5 可知, 构件的稳定承载力随腹板高厚比的增大而减小, 这主要是因为腹板高厚比增大的同时, 腹板局部屈曲越容易产生, 致使构件承载力降低。此外, 构件的承载力随偏心率增大不断下降, 而且荷载偏心率增加的幅度越大, 腹板高厚比与构件稳定承载力的相关曲线越平缓。这是因为, 随着偏心率的增大, 弯矩起主导作用, 轴压力影响变弱, 局部屈曲对构件稳定承载力的影响变小。腹板高厚比由 50 增至 120, 构件承载力最大降低达 10.22%。

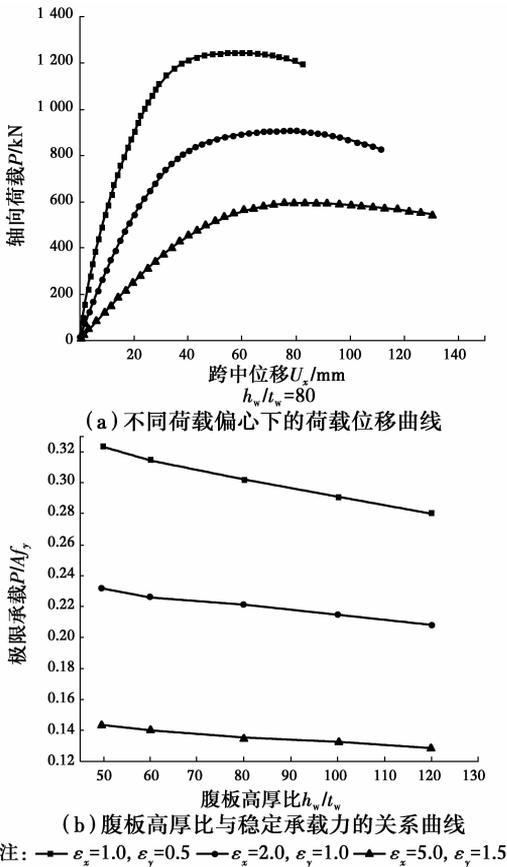


图 5 不同荷载偏心下的荷载位移曲线和腹板高厚比与构件极限承载力的关系曲线

Fig. 5 Load displacement curves for different loading eccentricities and Correlation curves between the web slenderness and the stability capacity

以 M_x/M_{px} 、 M_y/M_{py} 、 P/P_y 为坐标绘出 Q460 高强钢焊接薄腹工形截面双向压弯构件极限承载力相关曲线, 如图 6 ($\lambda_y = 60$ 、 $\lambda_x = 20$), $P_y = Af_y$, $M_{px} = W_{px}f_y$, $M_{py} = W_{py}f_y$, 其中, W_{px} 和 W_{py} 为截面强轴和弱轴方向塑性抵抗矩。

从图 6(a)、6(b) 以看出: 相关曲线随着腹板高厚比的增大而不断降低。同样可见, 轴压力起主导作用时, 腹板高厚比影响严重。双向受弯的相关曲线为图 6(c) 所示。

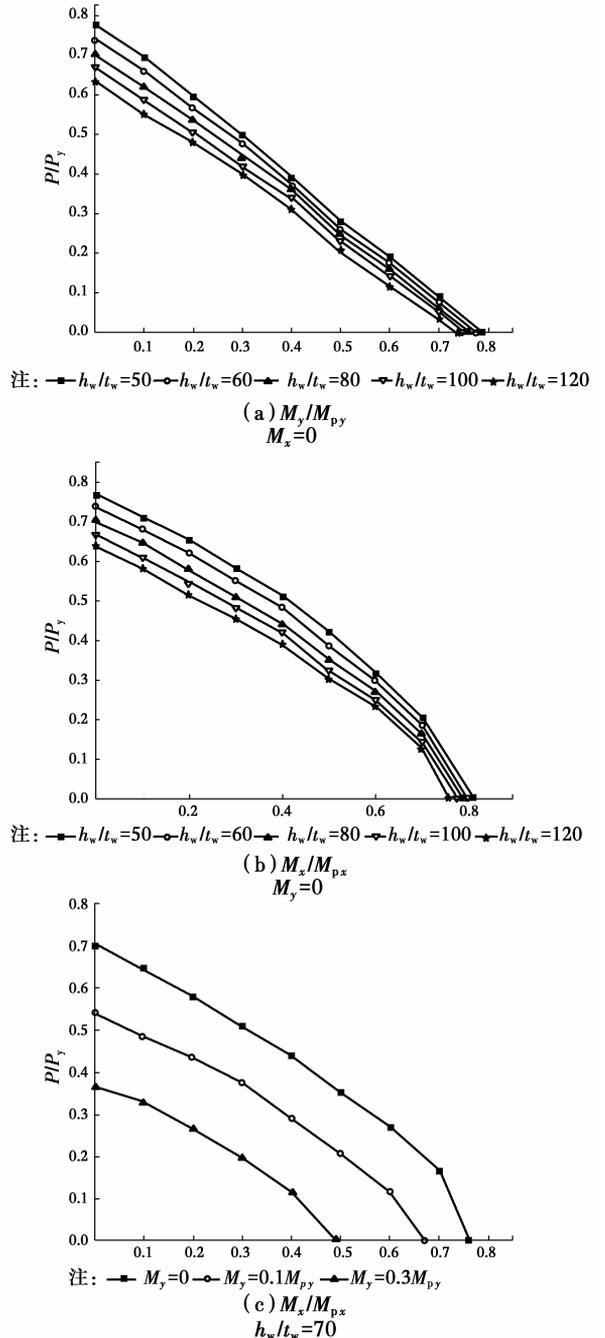


图 6 不同腹板高厚比的相关曲线

Fig. 6 Interaction curves between axial loads and bending moments for different web slendernesses

2.3 构件长细比的影响

保持构件截面腹板和翼缘的尺寸均不变化,通过改变构件长度来分析长细比变化对构件承载力的影响。当 $h_w/t_w=80$ 时,荷载偏心率 $\epsilon_x=1.0, \epsilon_y=0.5$, 所得构件荷载位移曲线如图 7(a) 所示。图 7(b) 给出了长细比与构件极限承载力关系曲线。

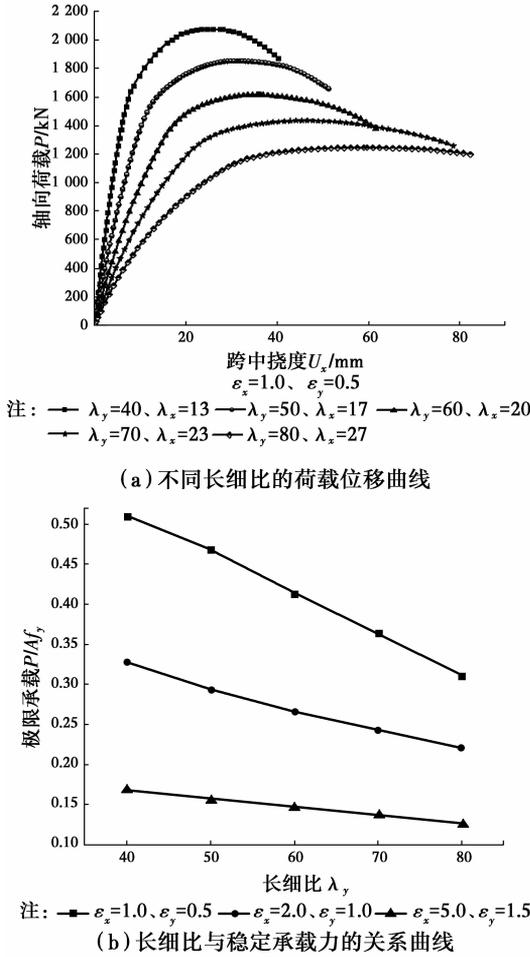


图 7 不同长细比的荷载位移曲线和长细比与稳定承载力的关系曲线

Fig. 7 Load displacement curves for different slenderness ratios and correlation curves between the member slenderness and the stability capacity

由图 7(b) 可知,随着长细比的增大,构件的承载力降低,且随着荷载偏心率的增加,长细比对构件极限承载力的影响减小,这同样是因为随着偏心率的增大,弯矩起主导作用,轴压力影响变弱,局部屈曲对构件极限承载力的影响减弱。长细比由 40 增至 80,构件承载力最大降低 40.30%。

图 8 给出了构件稳定承载力的相关曲线 ($h_w/t_w=80$)。图 8(a)、8(b) 为单向受弯的相关曲线,图 8(c) 为双向受弯时的相关曲线,其变化规律同

2.2 节。

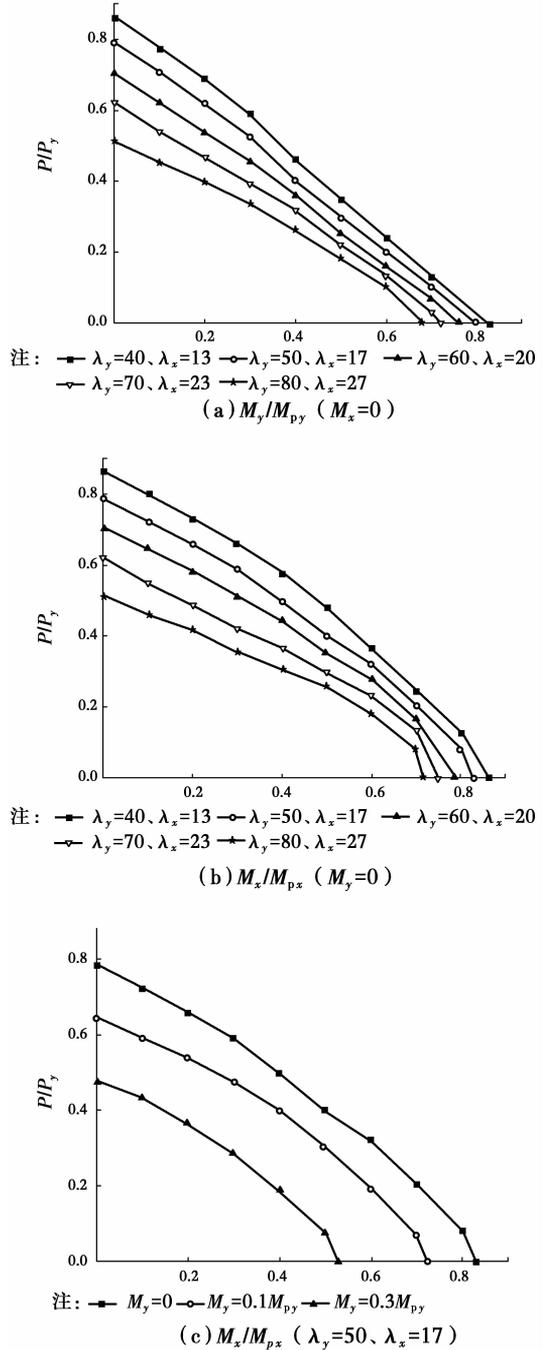


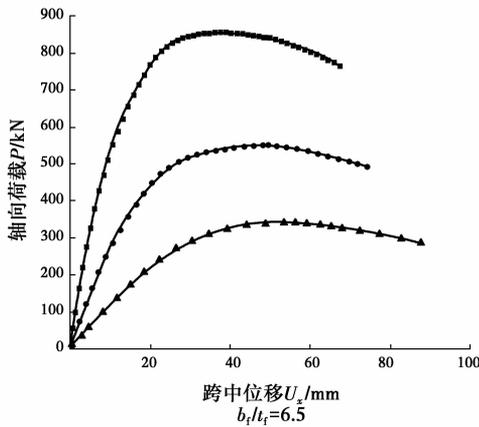
图 8 不同长细比的相关曲线

Fig. 8 Interaction curves between axial loads and bending moments for different slenderness ratios

2.4 翼缘宽厚比的影响

保持构件的长细比,构件截面腹板尺寸和翼缘宽度不变,通过改变翼缘厚度来分析参数翼缘宽厚比对构件稳定承载力的影响。图 9(a) 给出了构件 ($\lambda_y=80, \lambda_x=17, h_w/t_w=100, b_f/t_f=6.5$) 的荷载位移曲线。图 9(b) 所示为翼缘宽厚比与构件极限承载力的关系曲线。

由图 9(a)中可以看出,随着翼缘宽厚比增大,构件的承载力降低。这是因为翼缘对腹板约束作用随翼缘宽厚比增大而减弱,腹板局部屈曲更容易发生,从而降低构件的稳定承载力。翼缘宽厚比由 5.6 至 8.7,构件承载力最大降低 13.11%。

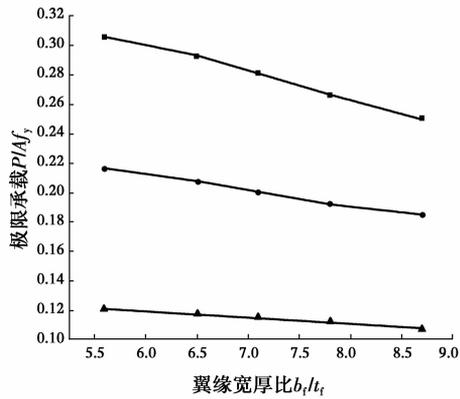


(a) 不同荷载偏心下的荷载位移曲线

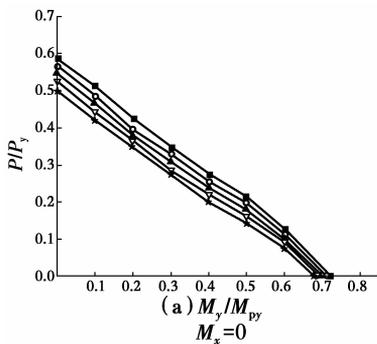
注: $\square \rightarrow \varepsilon_x=1.0, \varepsilon_y=0.5$ $\circ \rightarrow \varepsilon_x=2.0, \varepsilon_y=1.0$ $\triangle \rightarrow \varepsilon_x=5.0, \varepsilon_y=1.5$

图 9 不同荷载偏心下的荷载位移曲线和翼缘宽厚比与稳定承载力的关系曲线

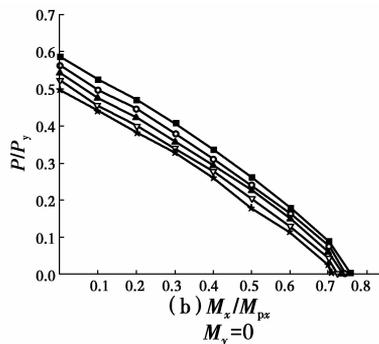
Fig. 9 Load displacement curves at different loading eccentricities and correlation curves between the flange slenderness and the stability capacity



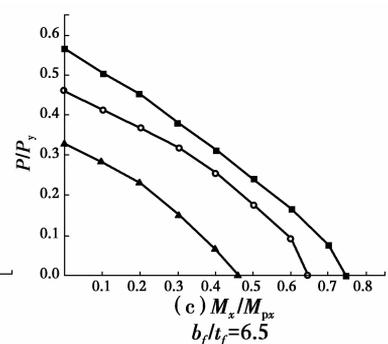
(b) 翼缘宽厚比与稳定承载力的关系曲线



注: $\square \rightarrow b_f/t_f=5.6$ $\circ \rightarrow b_f/t_f=6.5$ $\triangle \rightarrow b_f/t_f=7.1$ $\diamond \rightarrow b_f/t_f=7.8$ $\star \rightarrow b_f/t_f=8.7$



(b) M_x/M_{px}
 $M_y=0$



注: $\square \rightarrow M_y=0$ $\circ \rightarrow M_y=0.1 \text{ Mpy}$ $\triangle \rightarrow M_y=0.3 \text{ Mpy}$

图 10 不同翼缘宽厚比的相关曲线

Fig. 10 Interaction curves between axial loads and bending moments for different flange slendernesses

2.5 钢材强度等级的影响

选取一典型的 Q460 钢构件($\lambda_y=80, \lambda_x=27, \varepsilon_x=2.0, \varepsilon_y=1.0$)和与之相当的 Q235 钢构件($\lambda_y=112, \lambda_x=38, \varepsilon_x=2.0, \varepsilon_y=1.0$),分析其稳定承载力,其中,将 Q460 钢构件的长细比、腹板高厚比和翼缘宽厚比乘以 $\sqrt{460/235}$ 得到 Q235 钢构件相应参数,所分析的 Q235 钢构件采用的应力应变曲线及残余应力模式详见文[1]。如图 11(a)为 Q460 构件($\lambda_y=80, \lambda_x=27, h_w/t_w=80, \varepsilon_x=2.0, \varepsilon_y=1.0$)和与之相当的 Q235 钢构件($\lambda_y=112, \lambda_x=38, h_w/t_w=112, \varepsilon_x=2.0, \varepsilon_y=1.0$)的荷载位移曲线。分

图 10 为构件承载力的相关曲线($\lambda_y=80, \lambda_x=17, h_w/t_w=100$)。图 10(a)、10(b)为单向受弯的相关曲线,图 10(c)为双向受弯时的相关曲线,其变化规律同 2.2 和 2.3 节。

别取不同腹板高厚比,分析得到腹板高厚比与构件稳定承载力关系曲线,如图 11(b)。可以看出,与 Q235 钢构件相比, Q460 高强钢构件的承载力较高,且在腹板高厚比较大时,差别较大,最大差别达 8.95%。

选相同腹板高厚比($h_w/t_w \times \sqrt{\frac{f_y}{460}} = 80$)的两种强度等级的钢构件,得到 Q460 钢构件($h_w/t_w=80$)和与之相当的 Q235 钢构件($h_w/t_w=112$)的稳定承载力随长细比($\lambda_y \times \sqrt{\frac{f_y}{460}}$)变化的关系曲线,如

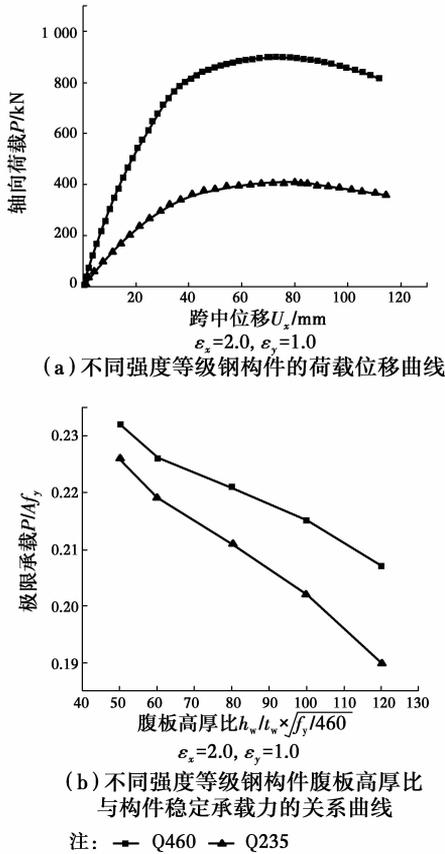


图 11 不同强度等级钢构件的荷载位移曲线和不同强度等级钢构件腹板高厚比与构件稳定承载力的关系曲线

Fig. 11 Load displacement curves of members with different steel grade and correlation curves between the web slenderness and stability capacity for different steel grade

图 12 所示。Q460 高强度钢构件的承载力高于 Q235 钢构件,且在长细比较小时,差别较大,最大差别达 9.24%。

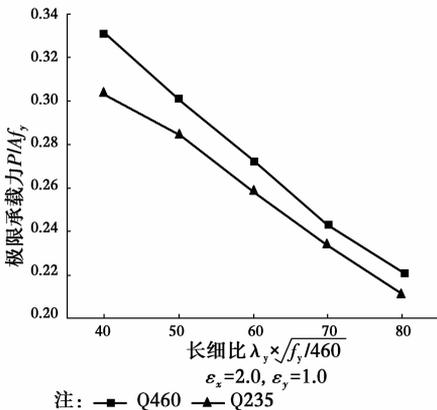


图 12 不同强度等级钢构件长细比与稳定承载力的关系曲线

Fig. 12 Correlation curves between the slenderness ratio and stability capacity for different steel grade

图 13 为 Q460 钢构件 ($h_w/t_w = 100, \lambda_y = 80, \lambda_x = 17, \epsilon_x = 2.0, \epsilon_y = 1.0$) 及相当的 Q235 钢构件 ($h_w/t_w = 140, \lambda_y = 112, \lambda_x = 24, \epsilon_x = 2.0, \epsilon_y = 1.0$) 翼缘宽厚比与稳定承载力的关系曲线。同样,相对于 Q235 钢构件, Q460 高强度钢构件的承载力较高,且在翼缘宽厚比较大时,差别较大,最大差别达 8.18%。

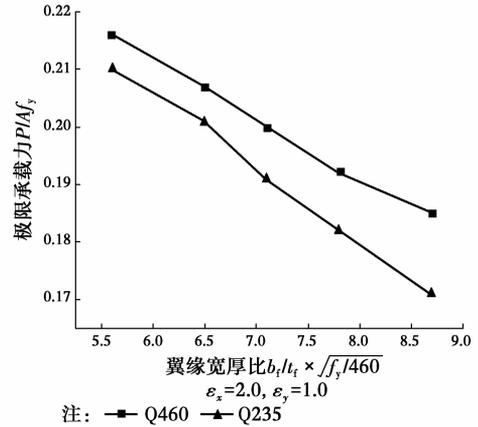


图 13 不同强度等级钢构件翼缘宽厚比与极限承载力的关系曲线

Fig. 13 Correlation curves between the flange slenderness and the stability capacity for different steel grade

可见,与 Q460 高强度钢轴压构件一样^[16],普通钢构件的稳定承载力计算方法不适宜于 Q460 高强度焊接薄腹工形截面受压构件。

3 设计公式

3.1 现行设计方法

根据钢结构设计规范^[21],薄腹工形截面双向压弯构件稳定设计公式如下:

$$\frac{P}{A_e \varphi_x} + \frac{M_x}{\gamma_x W_{ex} (1 - 0.8 \frac{P}{P_{Ex}})} + \frac{M_y}{\varphi_{by} W_{ey}} \leq f \quad (2)$$

$$\frac{P}{A_e \varphi_y} + \frac{M_x}{\varphi_{bx} W_{ex}} + \frac{M_y}{\gamma_y W_{ey} (1 - 0.8 \frac{P}{P_{Ey}})} \leq f \quad (3)$$

式中: P 为轴向压力设计值; M_x 和 M_y 为绕截面强轴和弱轴的弯矩设计值; A_e, W_{ex}, W_{ey} 为工形截面腹板屈曲后截面有效截面面积和有效截面 2 个方向受压最大纤维抵抗矩,腹板有效截面取腹板两侧 $20t_w$

$\sqrt{\frac{235}{f_y}}$ 范围内的腹板; φ_x 和 φ_y 为轴心受压构件绕截面 2 个主轴失稳的稳定系数; φ_{bx} 和 φ_{by} 为受弯构件

的稳定系数,对于工形截面 $\varphi_{by} = 1.0$; γ_x 和 γ_y 为截面两个方向的塑性发展系数; f 钢材强度设计值; $P'_{Ex} = \pi^2 EA / (1.1\lambda_x^2)$, $P'_{Ey} = \pi^2 EA / (1.1\lambda_y^2)$ 。

根据上述方法,用 f_y 替代 f 算得前节有限元分析构件的稳定承载力见表 3 的第 3 列,与有限元分析结果比较见表 6 列,可见这一方法大多数情况偏于保守。误差最大为 51.1%、最小为 22.9%、平均值为 36.7%、标准差为 7.9%。误差的原因一是由于规范有效截面法本身不够准确^[3-4],二是规范稳定系数是依据 Q235~Q420 钢构件的残余应力而确定,与 Q460 有所差别^[9-11,24]。

3.2 直接强度法 (DSM1)

鉴于现行规范方法误差较大,根据文[22],并结合上述规范方法,提出如下直接强度法的设计公式

$$\frac{P}{P_{nlx}} + \frac{M_x}{\gamma_x(1-0.8\frac{P}{P'_{Ex}})M_{nlx}} + \frac{M_y}{M_{nly}} \leq 1 \quad (4)$$

$$\frac{P}{P_{nly}} + \frac{M_x}{M'_{nlx}} + \frac{M_y}{\gamma_y(1-0.8\frac{P}{P'_{Ey}})M_{nly}} \leq 1 \quad (5)$$

当 $\lambda_{nlx} < 0.776$ 时,

$$P_{nlx} = P_{nex} \quad (6)$$

$\lambda_{nlx} > 0.776$ 时,

$$P_{nlx} = \left(1 - 0.15\left(\frac{P_{cr1}}{P_{nex}}\right)^{0.4}\right)\left(\frac{P_{cr1}}{P_{nex}}\right)^{0.4} P_{nex} \quad (7)$$

$$\lambda_{nlx} = \sqrt{\frac{P_{nex}}{P_{cr1}}} \quad (8)$$

$\lambda_{nly} < 0.776$ 时,

$$P_{nly} = P_{ney} \quad (9)$$

$\lambda_{nly} > 0.776$ 时,

$$P_{nly} = \left(1 - 0.15\left(\frac{P_{cr1}}{P_{ney}}\right)^{0.4}\right)\left(\frac{P_{cr1}}{P_{ney}}\right)^{0.4} P_{ney} \quad (10)$$

$$\lambda_{nly} = \sqrt{\frac{P_{ney}}{P_{cr1}}} \quad (11)$$

式中: P_{nex} 和 P_{ney} 为轴压构件绕截面强轴和弱轴的整体稳定承载力; $P_{nex} = \varphi_x A f_y$, $P_{ney} = \varphi_y A f_y$, φ_x 和 φ_y 采用钢结构规范的 b 类曲线乘以提高系数 β 所得^[16], β 按式(12)确定,式中 λ_n 为轴压构件的正则化长细比。

$$\beta = \begin{cases} (235/f_y)^{-0.09\lambda_n^{1.6}}, & \lambda_n < 1.2 \\ (235/f_y)^{0.05\lambda_n - 0.18} \geq 1.0, & \lambda_n \geq 1.2 \end{cases} \quad (12)$$

式中: P_{cr1} 为腹板局部屈曲时的杆件的受压承载力; $P_{cr1} = \sigma_{ncr1} A$; 轴压构件腹板局部屈曲应力 σ_{ncr1} 可采用计算程序软件 CUFSM v4.05 计算^[23]。

$\lambda_{mlx} < 0.776$ 时,

$$M_{nlx} = M_{nex} \quad (13)$$

$\lambda_{mlx} > 0.776$ 时,

$$M_{nlx} = \left(1 - 0.15\left(\frac{M_{cr1}}{M_{nex}}\right)^{0.4}\right)\left(\frac{M_{cr1}}{M_{nex}}\right)^{0.4} M_{nex} \quad (14)$$

$$\lambda_{mlx} = \sqrt{\frac{M_{nex}}{M_{cr1}}} \quad (15)$$

$\lambda_{mly} < 0.776$ 时,

$$M_{mly} = M_{ney} \quad (16)$$

$\lambda_{mly} > 0.776$ 时,

$$M_{mly} = \left(1 - 0.15\left(\frac{M_{cr1}}{M_{ney}}\right)^{0.4}\right)\left(\frac{M_{cr1}}{M_{ney}}\right)^{0.4} M_{ney} \quad (17)$$

$$\lambda_{mly} = \sqrt{\frac{M_{ney}}{M_{cr1}}} \quad (18)$$

$\lambda'_{mlx} < 0.776$ 时,

$$M'_{nlx} = M'_{nex} \quad (19)$$

$\lambda'_{mlx} > 0.776$ 时,

$$M'_{nlx} = \left(1 - 0.15\left(\frac{M_{cr1}}{M'_{nex}}\right)^{0.4}\right)\left(\frac{M_{cr1}}{M'_{nex}}\right)^{0.4} M'_{nex} \quad (20)$$

$$\lambda'_{mlx} = \sqrt{\frac{M'_{nex}}{M_{cr1}}} \quad (21)$$

式中: M_{cr1} 为腹板局部屈曲时杆件绕强轴的受弯承载力; $M_{cr1} = \sigma_{mcr1} W_x$, 受弯构件腹板局部屈曲应力 σ_{mcr1} 可采用计算程序软件 CUFSM v4.05 计算^[23]; $M_{nex} = W_x f_y$, $M_{ney} = W_y f_y$; M'_{nex} 为受弯构件的整体稳定承载力, $M'_{nex} = \varphi_b W_x f_y$, φ_b 可按式(22)计算确定^[24]。

$$\varphi_b = \frac{1}{(1 - \lambda_{b0}^{2n} + \lambda_b^{2n})^{\frac{1}{n}}} \leq 1 \quad (22)$$

式中: $n = 2.5\sqrt{\frac{b}{h}}$, 对焊接截面简支梁, $\lambda_{b0} = 0.4$,

$\lambda_b = \sqrt{\frac{\gamma_x M_{nex}}{M_{cr}}}$, M_{cr} 为均匀受弯简支梁的弹性临界弯矩,按式(23)确定。

$$M_{cr} = \frac{\pi^2 EI_y}{l^2} \sqrt{\frac{I_w}{I_y} \left(1 + \frac{GI_t l^2}{\pi^2 EI_y}\right)} \quad (23)$$

根据本节方法,算得前节有限元分析构件的稳定承载力见表 3 的第 4 列,与有限元分析结果比较见表 7 列,可见这一方法大多数情况仍然偏于保守。误差最大为 50.3%、最小为 18.6%、平均值 32.2%、标准差 9.6%。

误差的主要原因是由于 P_{nl} 和 M_{nl} 是基于冷弯薄壁型钢构件得出的,通常采用的板件宽厚比及考虑的初始缺陷与焊接薄壁钢构件有所不同^[25]。

3.3 修正的直接强度法 (DSM2)

鉴于上述计算方法对于 Q460 高强钢焊接薄腹构件的有限元计算结果偏于保守,故参照 Q235 焊接薄壁轴压构件类似的修正方法^[25],依据已有直接强度法公式形式和有限元结果进行非线性回归分析,对相关屈曲承载力 P_{nl} 和 M_{nl} 的系数进行修正,具体公式如下。

当 $\lambda_{nlx} < 0.626$ 时,

$$P_{nlx} = P_{nex} \quad (24)$$

$\lambda_{nlx} > 0.626$ 时,

$$P_{nlx} = \left(1 - 0.006 \left(\frac{P_{cr1}}{P_{nex}}\right)^{0.2}\right) \left(\frac{P_{cr1}}{P_{nex}}\right)^{0.2} P_{nex} \quad (25)$$

$\lambda_{nly} < 0.626$ 时,

$$P_{nly} = P_{ney} \quad (26)$$

$\lambda_{nly} > 0.626$ 时,

$$P_{nly} = \left(1 - 0.006 \left(\frac{P_{cr1}}{P_{ney}}\right)^{0.2}\right) \left(\frac{P_{cr1}}{P_{ney}}\right)^{0.2} P_{ney} \quad (27)$$

$\lambda_{mlx} < 0.626$ 时,

$$M_{mlx} = M_{nex} \quad (28)$$

$\lambda_{mlx} > 0.626$ 时,

$$M_{nlx} = \left(1 - 0.006 \left(\frac{M_{cr1}}{M_{nex}}\right)^{0.2}\right) \left(\frac{M_{cr1}}{M_{nex}}\right)^{0.2} M_{nex} \quad (29)$$

$\lambda_{mly} < 0.626$ 时,

$$M_{mly} = M_{ney} \quad (30)$$

$\lambda_{mly} > 0.626$ 时,

$$M_{mly} = \left(1 - 0.006 \left(\frac{M_{cr1}}{M_{ney}}\right)^{0.2}\right) \left(\frac{M_{cr1}}{M_{ney}}\right)^{0.2} M_{ney} \quad (31)$$

$\lambda'_{mlx} < 0.626$ 时,

$$M'_{mlx} = M'_{nex} \quad (32)$$

$\lambda'_{mlx} > 0.626$ 时,

$$M'_{mlx} = \left(1 - 0.006 \left(\frac{M_{cr1}}{M'_{nex}}\right)^{0.2}\right) \left(\frac{M_{cr1}}{M'_{nex}}\right)^{0.2} M'_{nex} \quad (33)$$

根据此法,算得前节有限元分析构件的稳定承载力见表 3 的第 5 列,与有限元分析结果比较见第 8 列,可见此法较前两种方法精度大有提高。误差最大为 30.2%、最小为 13.8%、平均值为 21.5%、标准差为 4.4%。

表 3 钢结构设计规范、DSM1 及 DSM2 与有限元结果的比较

Table 3 Comparison of finite element results with the Code for Steel Structures, DSM1 and DSM2

$I-h_w/t_w-b_f/t_f-\lambda_y-\epsilon_x-\epsilon_y$	$\frac{P_u}{Af_y}$	$\frac{P_{20tw}}{Af_y}$	$\frac{P_{DSM1}}{Af_y}$	$\frac{P_{DSM2}}{Af_y}$	$\frac{P_u}{P_{20tw}}$	$\frac{P_u}{P_{DSM1}}$	$\frac{P_u}{P_{DSM2}}$
I-60-8.7-40-1.0-0.5	0.526	0.348	0.373	0.404	1.511	1.410	1.302
I-80-8.7-40-1.0-0.5	0.512	0.340	0.353	0.399	1.505	1.450	1.283
I-100-8.7-40-1.0-0.5	0.496	0.333	0.330	0.391	1.490	1.503	1.269
I-60-8.7-40-2.0-1.0	0.343	0.235	0.254	0.270	1.459	1.350	1.270
I-80-8.7-40-2.0-1.0	0.331	0.230	0.242	0.266	1.439	1.368	1.244
I-100-8.7-40-2.0-1.0	0.318	0.227	0.222	0.257	1.401	1.433	1.237
I-60-8.7-40-5.0-1.5	0.188	0.136	0.148	0.151	1.382	1.271	1.245
I-80-8.7-40-5.0-1.5	0.183	0.134	0.143	0.148	1.366	1.280	1.236
I-100-8.7-40-5.0-1.5	0.176	0.132	0.130	0.141	1.333	1.354	1.248
I-60-8.7-60-1.0-0.5	0.430	0.294	0.325	0.347	1.463	1.323	1.239
I-80-8.7-60-1.0-0.5	0.418	0.290	0.302	0.331	1.441	1.384	1.263
I-100-8.7-60-1.0-0.5	0.404	0.287	0.276	0.327	1.408	1.464	1.235
I-60-8.7-60-2.0-1.0	0.289	0.206	0.225	0.235	1.403	1.284	1.230
I-80-8.7-60-2.0-1.0	0.280	0.203	0.206	0.230	1.379	1.359	1.217
I-100-8.7-60-2.0-1.0	0.272	0.201	0.188	0.220	1.353	1.447	1.236

续表 3

$I-h_w/t_w-b_f/t_f-\lambda_y-\epsilon_x-\epsilon_y$	$\frac{P_u}{Af_y}$	$\frac{P_{20tw}}{Af_y}$	$\frac{P_{DSM1}}{Af_y}$	$\frac{P_{DSM2}}{Af_y}$	$\frac{P_u}{P_{20tw}}$	$\frac{P_u}{P_{DSM1}}$	$\frac{P_u}{P_{DSM2}}$
I-60-8.7-60-5.0-1.5	0.171	0.124	0.137	0.143	1.379	1.248	1.196
I-80-8.7-60-5.0-1.5	0.166	0.123	0.130	0.139	1.350	1.277	1.194
I-100-8.7-60-5.0-1.5	0.163	0.122	0.123	0.135	1.336	1.325	1.207
I-60-8.7-80-1.0-0.5	0.314	0.238	0.258	0.269	1.319	1.217	1.167
I-80-8.7-80-1.0-0.5	0.306	0.235	0.246	0.263	1.302	1.244	1.163
I-100-8.7-80-1.0-0.5	0.297	0.233	0.227	0.258	1.275	1.308	1.151
I-60-8.7-80-2.0-1.0	0.226	0.172	0.184	0.191	1.314	1.228	1.183
I-80-8.7-80-2.0-1.0	0.221	0.170	0.175	0.186	1.300	1.263	1.188
I-100-8.7-80-2.0-1.0	0.215	0.168	0.168	0.185	1.280	1.280	1.162
I-60-8.7-80-5.0-1.5	0.140	0.111	0.117	0.119	1.261	1.197	1.176
I-80-8.7-80-5.0-1.5	0.134	0.109	0.113	0.117	1.229	1.186	1.145
I-100-8.7-80-5.0-1.5	0.132	0.107	0.110	0.116	1.234	1.200	1.138
平均值					1.367	1.322	1.215
标准差					0.079	0.096	0.044

注: $I-h_w/t_w-b_f/t_f-\lambda_y-\epsilon_x-\epsilon_y$ 表示工形截面构件的相关参数(见 2.1 节); P_u/Af_y 表示有限元无量纲承载力; P_{20tw}/Af_y 表示钢结构规范的无量纲承载力; P_{DSM1}/Af_y 表示直接强度法的无量纲承载力; P_{DSM2}/Af_y 表示修正的直接强度法的无量纲承载力; P_u/P_{20tw} 表示有限元结果与钢结构规范承载力比值; P_u/P_{DSM1} 表示有限元结果与直接强度法承载力比值; P_u/P_{DSM2} 表示有限元结果与修正直接强度法承载力比值。

从表 3 中可以看出,对于长细比较小和腹板高厚比较小的构件,钢结构规范的方法偏于保守,DSM1 有所改善,DSM2 与有限元的结果较接近;对于长细比较小和腹板高厚比较大的构件,钢结构规范和 DSM1 的计算结果都偏于保守,DSM2 与有限元结果较接近;腹板高厚比一定时,对于偏心较小和长细比较小的构件,钢结构规范的计算结果偏于保守,DSM1 有所改善,DSM2 的计算结果与有限元结果较接近,而对于偏心和长细比较大的构件,三种方法与有限元的结果都较接近。总体来看,修正的直接强度法(DSM2)与有限元的结果较接近。

4 结论

通过上述 ANSYS 有限元 Q460 高强钢焊接薄腹工形截面双向压弯构件的稳定性能分析,可以得到下面的结论:

1) 与普通钢材焊接薄腹工形截面压弯构件的稳定性能类似,腹板高厚比增大,构件的稳定承载力则降低;承载力降低程度除与腹板高厚有关外,还与构

件参数长细比、荷载的偏心率和翼缘的宽厚比直接相关。较大宽厚比翼缘对腹板的约束小,腹板屈曲更容易发生。偏心率增大,轴压力影响变小,对承载力的影响也就相对减弱。

2) 现行规范的方法不能准确地计算 Q460 高强钢焊接薄腹工形截面双向压弯构件的稳定承载力,该方法绝大多数情况偏于保守。

3) 所提修正直接强度法(DSM2)与有限元的结果较接近,且偏于安全,可用于计算 Q460 高强钢焊接薄腹工形截面双向压弯构件的稳定承载力及其相关设计。

参考文献:

- [1] YANG Y H, GU Q, CHEN S F. Behavior and design of thin-webbed beam-columns [C]// Proc. of Intl. Conf. on Advances in Steel Structures, ed. CHAN S L, TENG J G, Pergamon, Hong Kong, 1996:73-78.
- [2] YANG Y H, CHEN S F. Out-of-plane behavior of I-section beam-columns with slender web[J]. Advances in Structural Engineering, 1998, 1(3):169-176.

- [3] YANG Y H. Design of I-sectioned beam-columns with slender web-I: In-plane stability [C]// Proceedings of Xi'an Intl. Conf. of Architecture and Technology, 2006, China Architecture & Building Press, Beijing, 2007, 287-292.
- [4] YANG Y H. Design of I-sectioned beam-columns with slender web-II: Out-of-plane stability [C]// Proc. of 3rd Intl. Conf. on Technology of Architecture and Structure, Nov. 2010, Science Press, Beijing, 2010: 254-260.
- [5] YANG Y H, CHEN S F. Direct strength design of welded I-section beam-columns with slender web [C]// Proc. of 3rd Intl. Forum on Advances in Structural Engineering, Nov. 2009, China Architecture & Building Press, Beijing, 2009:2-8.
- [6] 张咪. 宽腹工形截面双向压弯构件的稳定分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2008.
ZHANG M. Stability analysis of bi-axially bent I-section beam-columns with slender web [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2008. (in Chinese)
- [7] 施刚,石永久,王元清. 超高强度钢材钢结构的工程应用[J]. 建筑钢结构进展,2008,10(4): 32-38.
SHI G, SHI Y J, WANG Y Q. Engineering application of ultra-high strength steel structures [J]. Progress in Steel Building Structures, 2008, 10(4): 32-38. (in Chinese)
- [8] 施刚,班慧勇,石永久,等. 高强度钢材钢结构的工程应用与研究进展[J]. 工业建筑,2012,42(1): 1-7.
SHI G, BAN H Y, SHI Y J, et al. Engineering application and recent research progress on high strength steel structures [J]. Industrial Construction, 2012, 42(1):1-7. (in Chinese)
- [9] 王彦博,李国强,陈素文,等. Q460 钢焊接 H 形轴心受压极限承载力试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(6): 58-64.
WANG Y B, LI G Q, CHEN S W, et al. Experimental and numerical study on the behavior of axially compressed Q460 high strength steel columns with H-section [J]. Journal of Civil Engineering, 2012, 45(6): 58-64. (in Chinese)
- [10] 李国强,闫晓雷,陈素文. Q460 高强度钢材焊接 H 形截面弱轴压弯柱承载力实验研究[J], 建筑结构学报, 2013, 33(12):31-37.
LI G Q, YAN X L, CHEN S W. Experimental study on bearing capacity of welded H-section columns using Q460 high strength steel under bending and axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2013, 33(12): 31-37. (in Chinese)
- [11] 班慧勇,施刚,石永久,等. 国产 Q460 高强度钢焊接工形柱整体稳定性能研究[J]. 土木工程学报,2013,46(2): 1-9.
BAN H Y, SHI G, SHI Y J, et al. Experimental and numerical investigation on the overall buckling behavior of the Q460 high strength steel welded I-section columns [J]. Journal of Civil Engineering, 2013, 46(2):1-9. (in Chinese)
- [12] 班慧勇,施刚,石永久. 高强度钢焊接箱形轴压构件整体稳定设计方法研究[J]. 建筑结构学报,2014,35(5): 57-64.
BAN H Y, SHI G, SHI Y J. Research on design method for overall buckling behavior for welded box columns fabricated from high-strength steels [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(5):57-64. (in Chinese)
- [13] 班慧勇,施刚,石永久. 不同等级高强度钢焊接工形轴压柱整体稳定性能及设计方法研究 [J]. 土木工程学报, 2014,47(11):19-28.
BAN H Y, SHI G, SHI Y J. Overall buckling behavior and design method for axially compressioned welded I-sectional columns constructed with different grades of high-strength steels [J]. Journal of Civil Engineering, 2014, 47(11):19-28. (in Chinese)
- [14] 申红侠. 高强度钢焊接方形截面轴心受压构件的局部和整体相关屈曲[J]. 工程力学,2012,29(7): 221-227.
SHEN H X. Local-overall interaction buckling of high strength steel welded square box columns [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(7): 221-227. (in Chinese)
- [15] 申红侠. 高强度钢焊接薄腹矩形管截面压弯构件平面内的极限承载力[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2015,47(5):642-648.
SHEN H X. In-plane ultimate carrying capacity of high-strength steel welded thin-webbed rectangular tube section beam-columns [J]. Journal of Xi'an University of Architecture And Technology (Natural Science Edition), 2015, 47(5):642-648. (in Chinese)
- [16] 班慧勇. 高强度钢材轴心受压构件整体稳定性与设计方法研究[D]. 北京:清华大学,2012.
BAN H Y. Research on the overall buckling behavior and design method of high strength steel columns under axial compression [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012. (in Chinese)
- [17] 钢结构工程施工质量验收规范:GB 50205—2001[S].

- 北京:中国计划出版社,2001.
Code for acceptance of construction quality of steel structures: GB50205-2001[S]. Beijing: China Planning Press, 2003.
- [18] BAN H Y, SHI G, SHI Y J, et al. Overall buckling behavior of 460 MPa high strength steel columns: Experimental investigation and design method [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 74: 140-150
- [19] 杨应华. 宽薄腹截面压弯构件的平面外稳定设计[J]. 钢结构, 2006, 21(5):88-91.
YANG Y H. Out-of-plane stability design of I-section beam-columns with slender web [J], Steel Construction, 2006, 21(5): 88-91. (in Chinese)
- [20] BIRNSTIEL C. Experiments on H-columns under biaxial bending [J]. Journal of Structural Division, ASCE, 1968, 94 (ST10): 2429-2448.
- [21] 钢结构设计规范:GB 50017—2003[S]. 北京:中国计划出版社,2003.
Code for design of steel structures:GB 50017-2003 [S]. Beijing: China Planning Press, 2003.
- [22] NORTH AMERICAN SPECIFICATION. Supplement 2004 to the North American specifications for the design of cold-formed steel structural members [S]. Washington DC: American Iron and Steel Institute (AISI), 2004.
- [23] SCHAFER B, LI Z J. CUFSM v4.05[EB/OL]. Thin-walled structures research group, Johns Hopkins University, 2012.
- [24] 杨应华,张振彬. Q460 高强钢焊接工形截面梁整体稳定分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2014,46(5):651-659.
YANG Y H, ZHANG Z B. Analysis of lateral-torsional buckling of Q460 high strength steel welded I-section beams [J]. Journal of Xi'an University of Architecture And Technology (Natural Science Edition), 2014, 46(5):651-659. (in Chinese)
- [25] YOUNG B K, NAK G K, HANCOCK G J. Constructional tests of welded section columns undergoing buckling interaction [J]. Journal of Construction Steel Research, 2007, 63: 1590-1602.

(编辑 胡玲)