

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220524001

高温下焊接 Q960 钢 H 形截面柱局部稳定设计方法*

王卫永^{1,2}, 杨启波¹, 李翔¹

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室(重庆大学), 重庆 400045)

摘要: 为考察焊接 Q960 钢 H 形截面轴心受压柱局部稳定性能, 采用 ABAQUS 软件建立有限元模型, 经试验数据验证后, 分析翼缘宽厚比、腹板高厚比、构件温度、构件长细比、初始几何缺陷和残余应力等参数对焊接 Q960 钢 H 形截面轴心受压柱局部屈曲强度的影响。研究表明, 轴心受压柱的局部屈曲承载力主要与截面尺寸及构件温度有关。采用多国规范对试验试件的局部屈曲承载力进行计算, 发现现有规范的设计方法不适用于高温下焊接 Q960 钢 H 形截面轴心受压柱局部屈曲承载力的计算。根据有限元分析结果提出焊接 Q960 钢 H 形截面轴心受压柱局部屈曲设计方法, 与试验数据和有限元分析结果的对比表明所提方法能较准确地计算焊接 Q960 钢 H 形截面轴心受压柱不同温度下的局部屈曲承载力。

关键词: 局部屈曲; 高强 Q960 钢; 有限元分析; 设计方法

中图分类号: TU391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)01-0183-09

Local Buckling Design Method of Welded Q960 Steel H-section Column at Elevated Temperatures

WANG Weiyong^{1,2}, YANG Qibo¹, LI Xiang¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area (Ministry of Education), Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: In order to study the local stability of Q960 welded H-section axial compression columns, ABAQUS software package is employed to establish the finite element model. After verified by the experimental data, the effects of different parameters, such as flange width to thickness ratio, web height to thickness ratio, member temperature, member slenderness ratio, initial geometric imperfection and residual stress, on the local buckling ultimate strength of Q960 welded H-section axial compression columns are analyzed. The results show that the local buckling capacity of axially compressed columns is mainly related to the section dimension and member temperature. It is found that the design method of current codes is not suitable for estimating the local buckling capacity of welded Q960 steel H-section axial compression columns at high temperatures. According to test data and finite element analysis results, a local buckling design method for welded Q960 steel H-section axial compression columns is proposed. The comparison with experimental data and finite element analysis results shows that the proposed method can accurately calculate the local buckling capacity of welded Q960 steel H-section axial compression columns at different temperatures.

Keywords: local buckling; high-strength Q960 steel; finite element analysis; design method

* 收稿日期: 2022-05-24; 修回日期: 2022-08-17

基金项目: 国家自然科学基金(52178110)、重庆市自然科学基金杰出青年基金(cstc2021jcyj-jqX0021)资助

作者简介: 王卫永(1982—), 男, 教授, 博士。主要从事钢结构抗火研究。E-mail: wywang@cqu.edu.cn

0 引言

随着冶炼技术的进步,高强钢逐步应用于建筑结构中。为了能够充分发挥高强钢屈服强度高的优势,高强钢构件的宽厚比一般要大于普通钢构件,使得高强钢构件的稳定问题更加突出。郭小农等^[1]对高强 Q690 钢梁的高温后承载力进行了试验研究及有限元分析,提出了高温后高强钢梁整体稳定承载力计算公式;熊晓莉等^[2]基于试验结果提出了高强 Q460 钢焊接 T 形截面残余应力分布模型;何保康^[3]对 4 组焊接 H 形截面柱进行局部屈曲试验,根据等稳定性原则提出了焊接 H 形截面轴心受压柱腹板和翼缘宽厚比限值的计算方法;W. Y. Wang 等^[4]对 Q235 钢及 Q460 钢焊接 H 形截面短柱进行了局部屈曲试验,发现高温下 Q460 钢短柱的局部屈曲承载力下降更明显;S. E. Quiel 等^[5]基于数值分析提出了高温下金属板件局部屈曲极限应力计算方法;C. Couto 等^[6-7]认为欧洲钢结构规范基于 0.2% 残余应变对应屈服强度的有效宽度法过于保守,并根据数值分析结果提出了基于 2% 总应变对应屈服强度的有效宽度法;L. Gardner 等^[8]考虑组成受压构件的板件之间的相互作用,根据数值分析提出了全截面弹性屈曲应力的计算方法;施刚等^[9-10]对高强钢短柱的局部屈曲性能进行了系列研究,发现欧洲规范能较为准确的计算高强钢短柱常温下的局部屈曲承载力;李翔等^[11]对 Q690 焊接 H 形截面轴心受压柱的局部稳定性能进行了有限元分析,发现高温下残余应力和初始几何缺陷对屈曲应力影响较大,但对极限应力影响较小。

目前对高温下 Q960 钢构件局部稳定的研究还比较少,也缺少高温下 Q960 焊接 H 形截面轴心受压柱局部屈曲设计方法,本文通过 ABAQUS 建立有限元模型,经试验数据验证后进行参数分析,基于分析结果提出设计公式,可供抗火设计参考。

1 试验及有限元模型

1.1 试验概况

W. Y. Wang 等^[12]对 Q960 钢焊接柱的局部屈曲性能进行了试验研究,共设计了 8 根焊接 H 形截面钢柱,包括 2 个常温试件、4 个恒温加载试件和 2 个

恒温升温试件。试件总高度均为 1 500 mm,包括 A 组 3 根截面为 H400×400×12×12 的钢柱和 B 组 3 根截面为 H450×220×12×12 的钢柱,A 组试件翼缘先发生屈曲,B 组试件腹板先发生屈曲。为使局部屈曲发生在试件中部,在试件的两端设置了加劲肋。试验结果表明,相同荷载条件下,恒温升温试验得到的屈曲破坏临界温度略高于恒温加载试验。为与现有设计思路保持一致,选取常温及恒温加载试验进行分析,据此得到的设计方法将偏于安全。试件的试验温度与得到的极限荷载见表 1。

表 1 试验及有限元得到的承载力结果对比

Table 1 Comparison of ultimate load from test and FEM

试件 编号	试验温 度/°C	试验极限荷 载 F_E /kN	模拟极限荷 载 F_M /kN	$(F_M-F_E)/$ $F_E/\%$
Q960A1	20	8 857.30	9 012.40	1.75
Q960A2	480	6 559.30	7 044.80	7.40
Q960A3	632	3 800.00	4 146.10	6.48
Q960B1	20	8 036.50	8 190.90	1.92
Q960B2	472	5 746.60	6 144.30	6.96
Q960B3	683	2 069.80	2 175.80	5.12

1.2 有限元模型及验证

采用通用有限元分析软件 ABAQUS 中的 S4R 单元建立模型,纵向网格尺寸取 15 mm,横向网格尺寸主要根据残余应力分布模型设定;根据文献[13]中拉伸试验结果,采用三折线模型描述钢材应力-应变关系;在钢柱端板外 47.5 mm 处设置参考点并通过 coupling 将参考点与端板耦合,顶部参考点仅保留沿纵向位移与绕弱轴转动 2 个自由度,底部参考点约束所有自由度。

采用 ABAQUS 的 Lanczos 求解器进行特征值屈曲分析,通过修改关键词 *NODE FILE 输出屈曲模态;初始缺陷按一阶屈曲模态变形,幅值按《钢结构工程施工质量验收标准》^[14]对腹板和翼缘分别取为 $h_0/200$ 和 $b_f/100$,通过修改关键词 *IMPERFECTION 将初始缺陷引入模型。

残余应力参照文献[15]的分布模型通过初始应力施加,如图 1 所示。 $\eta_1 \sim \eta_5$ 表示常温下残余应力与名义屈服强度之比; $\eta_1=0.3$, $\eta_2=0.55$, $\eta_3=0.18$, $\eta_4=0.58$, $\eta_5=0.1$ 。 $\alpha_1 \sim \alpha_5$ 为高温下残余应力折减系数,为方便计算取 $\alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_1$,其值按式(1)计算; $a \sim h$ 为截面残余应力分布范围,取值见表 2。

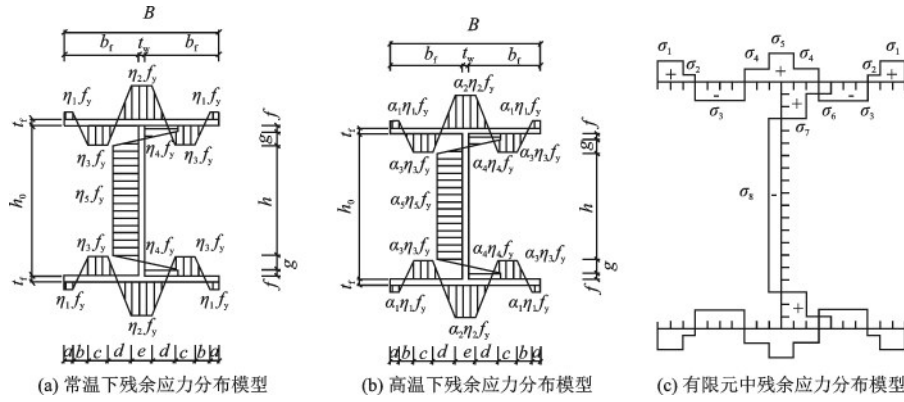


图1 H形截面焊接残余应力分布模型

Fig.1 Residual stress distribution model of H-shaped section welding columns

表2 残余应力分布范围

Table 2 Distribution range of residual stress

a	b	c	d	e	f	g	h
$(b_t - h_t)/15$	$(b_t - h_t)/5$	$(B - 2a - 2b - d - e)/2$	$(b_t - h_t)/5$	$t_w + h_t$	h_t	$h_0/20$	$h_0 - 2f - 2g$

$$\alpha_1 = \begin{cases} \frac{1}{(1 + T/550)^{2.05}} & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 400^\circ\text{C} \\ \frac{1}{(1 + T/460)^{4.66}} & 400^\circ\text{C} \leq T \leq 600^\circ\text{C} \\ \frac{1}{(1 + T/485)^{5.82}} & 600^\circ\text{C} \leq T \leq 900^\circ\text{C} \end{cases} \quad (1)$$

式中, T 为试件的温度, $^\circ\text{C}$ 。

将试验及有限元分析所得极限荷载列于表1, 荷载—轴向位移曲线绘于图2。由表1和图2可见, 采用有限元分析得到的局部屈曲极限荷载与试验值误差较小, 最大偏差不超过7.5%。有限元分析所得破坏模式与试验相近, 翼缘和腹板的屈曲位置均位于试件的1/2高度处, 如图3所示。因此, 有限元模型能准确预测试件的局部屈曲性能。

2 参数分析

采用验证后的有限元模型, 分析翼缘宽厚比(6~35)、腹板高厚比(20~60)、温度(20 $^\circ\text{C}$ ~800 $^\circ\text{C}$)、长细比(20~40)、初始几何缺陷和残余应力对焊接Q960钢H形截面轴心受压柱局部屈曲承载力的影响, 板件的极限应力用 $\sigma_{u,T}$ 表示, 为板件的极限承载力除以板件的截面面积, 板件的极限承载力为峰值荷载下有限元模型中板件内所有节点内力之和。

设立一组试件为标准组, 变化参数为腹板高厚比和翼缘宽厚比, 腹板高厚比变化范围为20~60, 翼缘宽厚比变化范围为6~35, 构件长细比为30, 翼

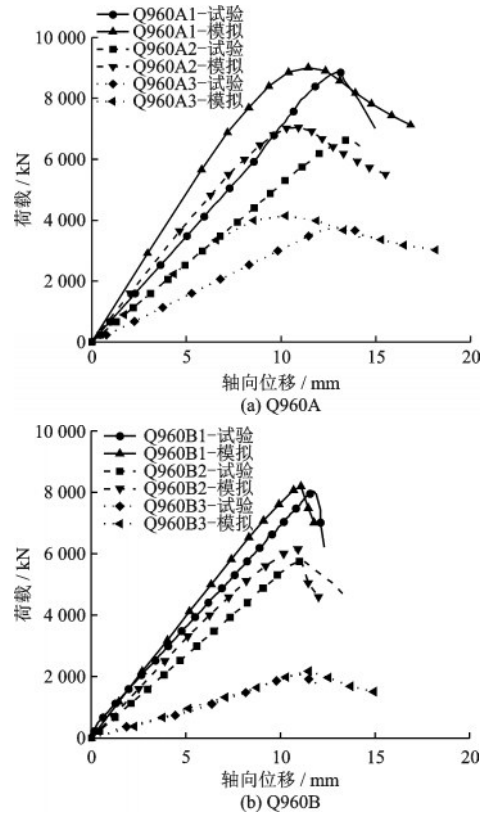


图2 荷载—轴向位移曲线对比

Fig.2 Comparison of load-axial displacement curves

缘厚度为14 mm, 腹板厚度为10 mm, 其他截面参数见表3。

2.1 截面形状及构件温度

截面形状包括翼缘宽厚比和腹板高厚比, 截面

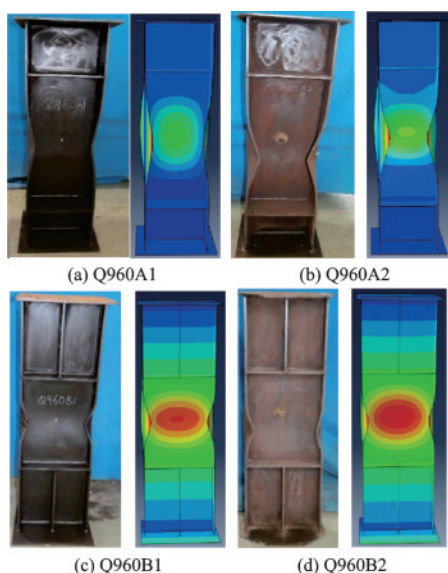


图3 试验和有限元破坏模式对比

Fig.3 Comparison of failure modes between test and FEM

表3 标准组截面参数

Table 3 Details of normal specimens

试件 编号	翼缘外伸宽 度 b_f /mm	腹板计算高 度 h_0 /mm	翼缘宽厚 比 b_f/t_f	腹板高厚 比 h_0/t_w
I-6-30	84	300	6	30
I-8-30	112	300	8	30
I-10-20	140	200	10	20
I-10-30	140	300	10	30
I-10-40	140	400	10	40
I-10-50	140	500	10	50
I-10-60	140	600	10	60
I-12-30	168	300	12	30
I-14-30	196	300	14	30
I-16-30	224	300	16	30
I-18-30	252	300	18	30
I-20-30	280	300	20	30
I-25-30	350	300	25	30
I-30-30	420	300	30	30
I-35-30	490	300	35	30

形状对翼缘极限应力的影响如图4所示,对腹板极限应力的影响如图5所示。由图4可见:翼缘极限应力随着翼缘宽厚比和腹板高厚比的增加而降低。翼缘宽厚比在8~20时,翼缘极限应力变化迅速;翼缘宽厚比大于20后,翼缘极限应力下降趋缓。腹板高厚比对翼缘极限应力影响较小,不超过10%。翼缘极限应力随温度升高而降低,以翼缘宽厚比为10、腹板高厚比为30的模型为例,600℃时翼缘极限应力下降了29%,700℃时翼缘极限应力

下降了73%,800℃时翼缘极限应力下降了91.5%。由图5可见:腹板极限应力随着腹板高厚比的增加而降低,宽厚比小于30时,腹板极限应力缓慢降低;高厚比超过30后,腹板极限应力迅速降低。翼缘宽厚比对腹板极限应力影响较小,不超过10%。腹板极限应力随温度升高而降低。以腹板高厚比为30,翼缘宽厚比为10的模型为例,600℃、700℃和800℃下,腹板极限应力分别下降了26.2%、72.9%和91.7%。

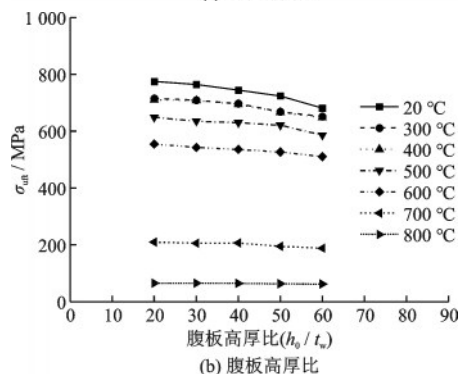
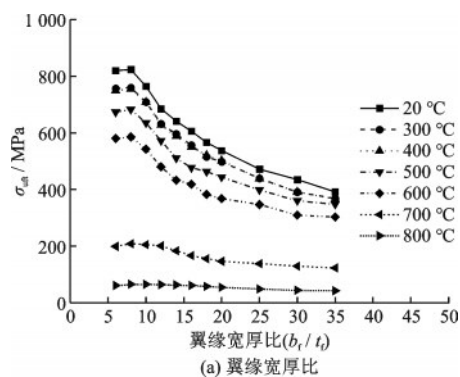


图4 截面形状对翼缘极限应力的影响

Fig.4 Effect of cross-section shape on ultimate stress of flange

2.2 构件长细比及温度

以标准组中腹板高厚比为30,翼缘宽厚比为6~35的试件为对象,长细比 λ 分别取为20和40(均为短柱,试件发生局部屈曲破坏),其他参数不变,分析不同长细比下翼缘极限应力。以标准组中翼缘宽厚比为10,腹板高厚比为20~60的试件为对象,长细比 λ 分别取为20和40,其他参数不变,分析不同长细比下腹板极限应力。应力比为调整长细比后板件的极限应力与标准组相应板件的极限应力的比值,长细比对翼缘极限应力的影响如图6所示,对腹板极限应力的影响如图7

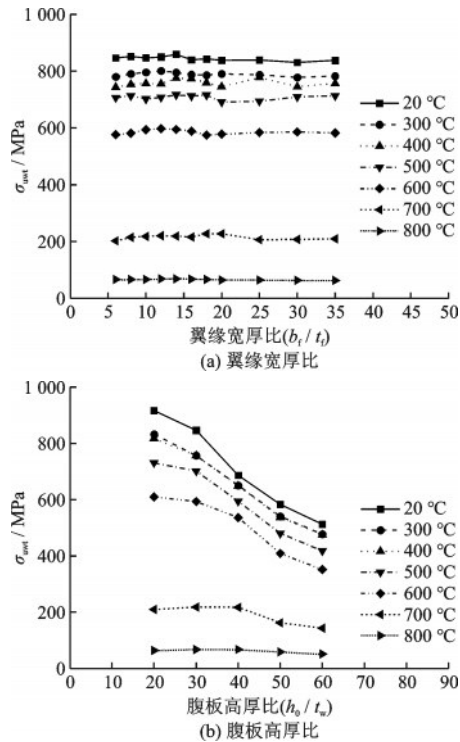


图5 截面形状对腹板极限应力的影响

Fig.5 Effect of cross-section shape on ultimate stress of web

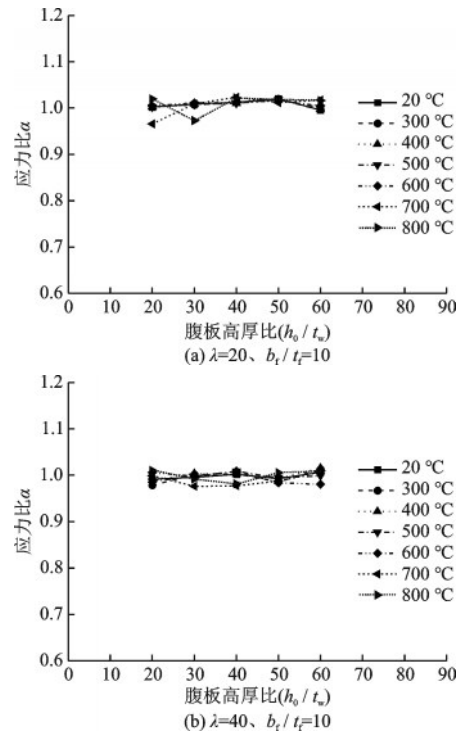


图7 长细比对腹板极限应力的影响

Fig.7 Effect of slenderness ratio on ultimate stress of web

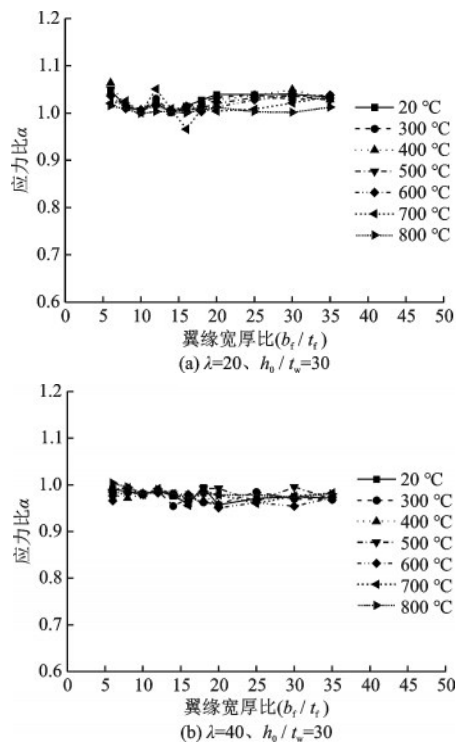


图6 长细比对翼缘极限应力的影响

Fig.6 Effect of slenderness ratio on ultimate stress of flange

所示。

由图6、7可见,构件长细比对Q960焊接H形截面局部屈曲承载力影响较小,改变构件长细比后,

翼缘极限应力最大偏差为6%,腹板极限应力最大偏差为4%,与文献[10]中试验结果一致。长细比对翼缘和腹板极限应力的影响与温度无显著关系。这是因为构件长细比主要影响钢柱的整体屈曲,而分析试件均为局部屈曲破坏,整体屈曲尚未发生,因此不同温度下改变构件的长细比对板件的极限应力影响较小。

2.3 初始几何缺陷及温度

以标准组中腹板高厚比为30,翼缘宽厚比为6~35的试件为对象,翼缘缺陷幅值分别取为 $b_f/25$ 和 $b_f/500$,其他参数不变,分析不同初始几何缺陷下翼缘极限应力;以标准组中翼缘高厚比为10,腹板宽厚比为20~60的试件为对象,腹板缺陷幅值分别取为 $h_0/50$ 和 $h_0/500$,其他参数不变,分析不同初始几何缺陷下腹板极限应力。应力比为调整初始几何缺陷后板件的极限应力与标准组相应板件的极限应力的比值,初始几何缺陷对翼缘极限应力的影响如图8所示,对腹板极限应力的影响如图9所示。

由图8、9可见:初始几何缺陷对翼缘和腹板的极限应力影响较小,增大或减小初始几何缺陷后,翼缘极限应力变化幅度不超过7%,腹板极限应力变化幅度不超过4%,与文献[11]中结论一致。初

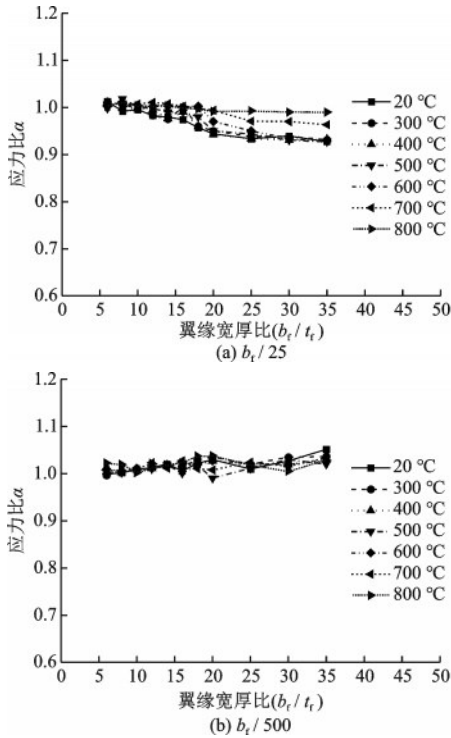


图8 初始几何缺陷对翼缘极限应力的影响

Fig.8 Effect of initial geometric imperfection on ultimate stress of flange

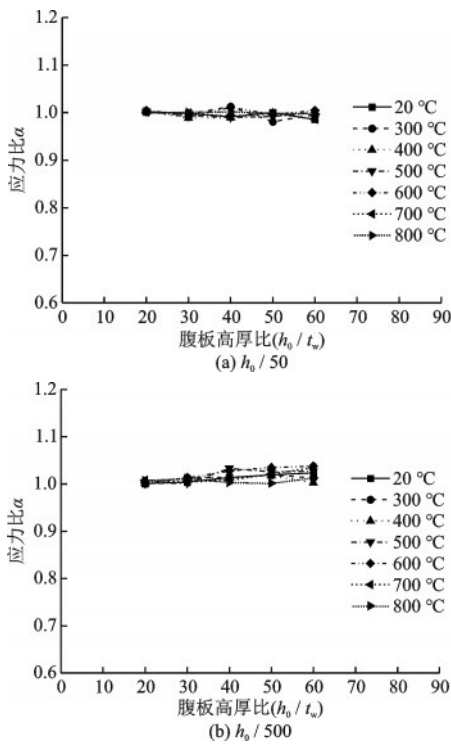


图9 初始几何缺陷对腹板极限应力的影响

Fig.9 Effect of initial geometric imperfection on ultimate stress of web

始几何缺陷对翼缘和腹板极限应力的影响与温度无显著关系。这是因为初始几何缺陷按整体失稳

的一阶屈曲模态施加,主要影响钢柱的整体屈曲,而分析试件均为局部屈曲破坏,整体屈曲尚未发生,因此不同温度下改变板件的初始几何缺陷对极限应力影响较小。

2.4 残余应力及温度

以标准组中腹板高厚比为30,翼缘宽厚比为6~35的试件为对象,残余应力分别取为标准组试件的0.5倍和1.5倍,其他参数不变,分析不同残余应力下翼缘极限应力。以标准组中翼缘高厚比为10,腹板宽厚比为20~60的试件为对象,残余应力分别取为标准组试件的0.5倍和1.5倍,其他参数不变,分析不同残余应力下腹板极限应力。应力比为调整残余应力后板件的极限应力与标准组相应板件的极限应力的比值,残余应力对翼缘极限应力的影响如图10所示,对腹板极限应力的影响如图11所示。

由图10、11可见:残余应力对翼缘和腹板极限应力的影响很小,与温度无显著关系。这是因为残余应力主要对板件的屈曲应力产生影响,而屈曲后的板件受到未屈曲板件的约束,应力还能进一步增长,直到所有板件全部屈曲;高温下截面残余应力减小,对板件的极限应力影响更小。

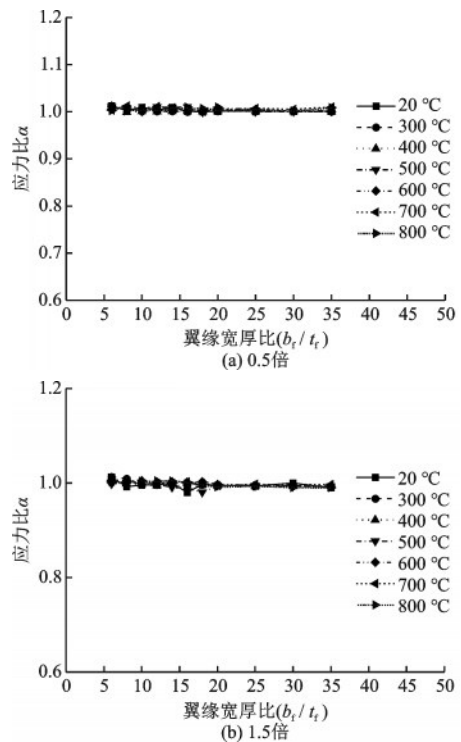


图10 残余应力对翼缘极限应力的影响

Fig.10 Effect of residual stress on ultimate stress of flange

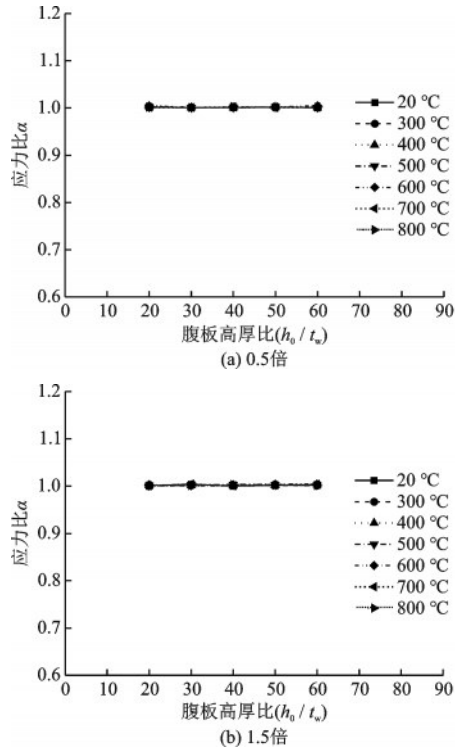


图11 残余应力对腹板极限应力的影响

Fig.11 Effect of residual stress on ultimate stress of web

3 设计方法

3.1 现有规范的方法评估

对于需要考虑局部屈曲的轴心受压短柱,中国规范 GB50017-2017^[16]、美国规范 AISC 360-16^[17]、欧洲规范 EC3^[18]均采用有效截面法计算板件的极限应力,统一采用正则化宽厚比 λ_p 进行表示, λ_p 取为屈服强度与弹性屈曲应力比值的平方根,如式(2)所示。将式(3)代入式(2),并取泊松比 $\mu=0.3$ 、腹板弹性屈曲系数 $k_w=4.0$ 、翼缘弹性屈曲系数 $k_f=0.425$,得到常温下腹板和翼缘的正则化高厚比或宽厚比,如式(4)所示。高温下,钢材的屈服强度及弹性模量出现不同程度的降低,腹板和翼缘的正则化高厚比或宽厚比为式(5)所示。

$$\lambda_p = \sqrt{f_y / \sigma_{cr,e}} \quad (2)$$

$$\sigma_{cr,e} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\nu^2)(b/t)^2} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \lambda_{p,w} = 0.526 \sqrt{f_y/E} \cdot h_0/t_w \\ \lambda_{p,f} = 1.614 \sqrt{f_y/E} \cdot b/t_f \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \lambda_{p,w} = 0.526 \sqrt{k_{y,T}/k_{E,T}} \cdot \sqrt{f_y/E} \cdot h_0/t_w \\ \lambda_{p,f} = 1.614 \sqrt{k_{y,T}/k_{E,T}} \cdot \sqrt{f_y/E} \cdot b/t_f \end{cases} \quad (5)$$

GB50017-2017^[16]未给出H形截面翼缘有效截面系数 ρ_f 的计算公式,腹板的有效截面系数 ρ_w 按式(6)计算:

$$\rho_w = \begin{cases} 1 & h_0/t_w \leq 42 \sqrt{235/f_y} \\ (1 - 0.19/\lambda_{p,w})/\lambda_{p,w} & h_0/t_w > 42 \sqrt{235/f_y} \end{cases} \quad (6)$$

根据 AISC 360-16^[15]的规定,H形截面轴心受压构件腹板的有效截面系数按式(7)计算,翼缘的有效截面系数按式(8)计算:

$$\rho_w = \begin{cases} 1 & h_0/t_w \leq 1.49 \sqrt{E/f_y} \\ (1 - 0.18/\lambda_{p,w})/\lambda_{p,w} & h_0/t_w > 1.49 \sqrt{E/f_y} \end{cases} \quad (7)$$

$$\rho_f = \begin{cases} 1 & b/t_f \leq 0.64 \sqrt{k_c E/f_y} \\ (1 - 0.22/\lambda_{p,f})/\lambda_{p,f} & b/t_f > 0.64 \sqrt{k_c E/f_y} \end{cases} \quad (8)$$

式中, $k_c = 4/\sqrt{h_0/t_w}$,且 $0.35 \leq k_c \leq 0.76$ 。

根据 EC3^[18]的规定,H形截面轴心受压构件腹板的有效截面系数按式(9)计算,翼缘的有效截面系数按式(10)计算。H形截面轴心受压柱的局部屈曲极限荷载取为翼缘及腹板极限荷载之和,如式(11)所示。极限荷载的试验值与计算值列于表4,其中 I-960-2~I-960-4 为文献[10]中焊接 Q960 钢 H 形截面柱局部屈曲常温试验试件。

$$\rho_w = \begin{cases} 1 & \lambda_{p,w} \leq 0.673 \\ (1 - 0.22/\lambda_{p,w})/\lambda_{p,w} & \lambda_{p,w} > 0.673 \end{cases} \quad (9)$$

$$\rho_f = \begin{cases} 1 & \lambda_{p,f} \leq 0.748 \\ (1 - 0.188/\lambda_{p,f})/\lambda_{p,f} & \lambda_{p,f} > 0.748 \end{cases} \quad (10)$$

$$F_u = (\rho_w \times A_w + \rho_f \times A_f) \times f_y \quad (11)$$

由表4可见,欧洲规范^[18]与美国规范^[17]计算所得极限强度数值相近,常温下计算荷载小于试验荷载,高温下计算荷载大于试验荷载,且温度越高,差异越大,温度达到683 °C时,差异超过40%,表明现有设计方法不适用于Q960高强钢构件高温下局部屈曲极限荷载计算。

3.2 建议公式

通过参数分析发现,当试件温度达到800 °C后,翼缘和腹板的极限应力与钢材的屈服强度十分接近,因此,本文提出的高温下局部稳定设计方法适

表 4 试验及计算极限荷载对比

Table 4 Comparison of ultimate load from test and calculation

试件	试验极限荷载	欧洲规范 ^[18] 极	美国规范 ^[17] 极	建议公式极限	$(F_{u1}-F_E)/F_E/\%$	$(F_{u2}-F_E)/F_E/\%$	$(F_{u3}-F_E)/F_E/\%$
	F_E/kN	限荷载 F_{u1}/kN	限荷载 F_{u2}/kN	荷载 F_{u3}/kN			
Q960A1	8 857.30	7 574.27	7 622.93	8 068.07	-14.49	-13.94	-8.91
Q960A2	6 559.30	6 774.95	6 821.51	7 062.17	3.29	4.00	7.67
Q960A3	3 800.00	4 701.79	4 747.74	4 004.62	23.73	24.94	5.38
Q960B1	8 036.50	7 247.34	7 209.87	6 891.97	-9.82	-10.29	-14.24
Q960B2	5 746.60	6 513.09	6 477.17	6 167.51	13.34	12.71	7.32
Q960B3	2 069.80	2 987.80	3 058.56	2 373.59	44.35	47.77	14.68
I-960-2	10 291.70	9 103.36	10 487.50	8 981.12	-11.55	-11.90	-12.73
I-960-3	11 217.40	9 720.51	9 810.40	9 983.44	-13.34	-12.54	-11.00
I-960-4	10 438.70	9 747.83	9 816.40	9 990.62	-6.62	-5.96	-4.29

用的温度范围为 20~700 °C。

将有限元分析结果及欧洲规范^[18]设计曲线绘于图 12,可以看出,温度不超过 600 °C 时,不同温度下有限元分析所得的应力比非常接近。因此,在 20~600 °C 温度范围内,翼缘和腹板的极限应力可采用同一条设计曲线计算。

当试件温度不超过 600 °C 时,翼缘的有效截面系数按式(12)计算;当试件的温度为 600~700 °C 时,按式(13)计算。

$$\rho_f = \begin{cases} 0.90 & \lambda_{p,f} \leq 0.65 \\ 1.199 - 0.46\lambda_{p,f} & 0.65 < \lambda_{p,f} \leq 1.35 \\ 0.686 - 0.08\lambda_{p,f} & \lambda_{p,f} > 1.35 \end{cases} \quad (12)$$

$$\rho_f = \begin{cases} 0.90 & \lambda_{p,f} \leq 0.35 \\ 1.061 - 0.46\lambda_{p,f} & 0.35 < \lambda_{p,f} \leq 0.987 \\ 0.686 - 0.08\lambda_{p,f} & 0.987 < \lambda_{p,f} \end{cases} \quad (13)$$

当试件温度不超过 600 °C 时,腹板的有效截面系数按式(14)计算,当试件的温度为 600~700 °C 时,按式(15)计算。

$$\rho_w = \begin{cases} 0.90 & \lambda_{p,w} \leq 0.809 \\ (\lambda_{p,w} - 0.22)/\lambda_{p,w}^2 & \lambda_{p,w} > 0.809 \end{cases} \quad (14)$$

$$\rho_w = \begin{cases} 0.90 & \lambda_{p,w} \leq 0.5 \\ 1.20 - 0.60\lambda_{p,w} & \lambda_{p,w} > 0.5 \end{cases} \quad (15)$$

按照建议公式和现有规范分别计算试验中 Q960 焊接 H 形截面轴心受压柱的极限荷载,对比结果见表 4。可见,建议公式与试验结果的偏差在 15% 以内。

4 结 论

(1)有限元模型能准确模拟焊接 Q960 钢 H 形轴心受压柱的局部屈曲性能,得到与试验结果相近的破坏模式和极限荷载。

(2)轴心受压柱的局部屈曲承载力主要与截面尺寸及构件温度有关,受构件长细比、初始几何缺陷、焊接残余应力影响较小。

(3)中国规范、欧洲规范、美国规范对局部屈曲极限强度的设计方法相近,现有规范的设计方法不适用于高温下焊接 Q960 钢 H 形截面轴心受压柱局部屈曲强度计算。

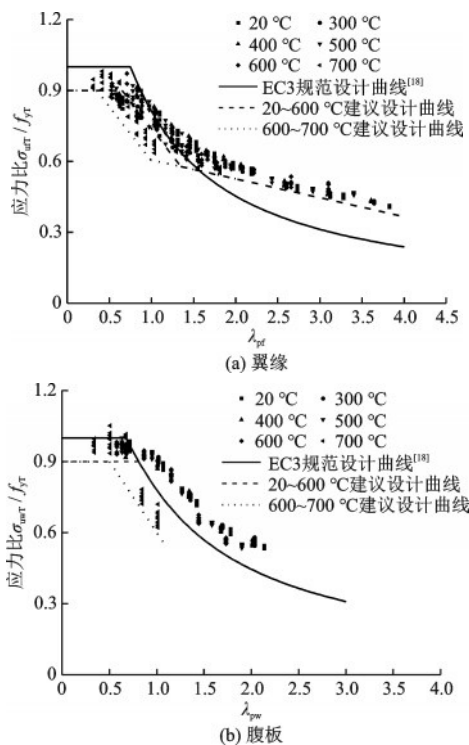


图 12 有限元计算结果与规范设计曲线对比

Fig.12 Comparison between finite element calculation results and standard design curves

(4)提出的建议公式能较好地预测焊接Q960钢H形截面轴心受压柱的局部屈曲承载力,计算值与试验结果偏差在15%以内。

参考文献:

- [1] 郭小农,宗绍哈,于孟同,等.Q690高强钢梁火灾后承载性能研究[J].建筑钢结构进展,2021,23(11):103-111.
Guo X N,Zong S H,Yu M T, et al. The bearing capacity of Q690 high-strength steel beams after fire [J].Progress in Steel Building Structures, 2021, 23(11): 103-111. (in Chinese)
- [2] 熊晓莉,王田,谌磊.国产Q460高强钢焊接T形截面残余应力分布试验研究[J].建筑钢结构进展,2021,23(9):42-53.
Xiong X L,Wang T,Chen L. Experimental study on residual stress in welded T-section using domestic Q460 high strength steel [J].Progress in Steel Building Structures,2021,23(9):42-53. (in Chinese)
- [3] 何保康.轴心压杆局部稳定试验研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),1985,41(1):23-37.
He B K. Experimental study of local buckling of the centrally compressed members [J].Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition),1985,41(1):23-37. (in Chinese)
- [4] Wang W Y, Kodur V, Yang X C, et al. Experimental study on local buckling of axially compressed steel stub columns at elevated temperatures[J].Thin-Walled Structures,2014,82(3):33-45.
- [5] Quiel S E, Garlock M E M. Calculating the buckling strength of steel plates exposed to fire [J].Thin-Walled Structures,2010,48(9):684-695.
- [6] Couto C, Real P V, Lopes N, et al. Effective width method to account for the local buckling of steel thin plates at elevated temperatures[J].Thin-Walled Structures,2014,84(6):134-149.
- [7] Couto C, Real P V, Lopes N, et al. Resistance of steel cross-sections with local buckling at elevated temperatures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015,109(3):101-114.
- [8] Gardner L, Fieber A, Macorini L. Formulae for calculating elastic local buckling stresses of full structural cross-sections[J].Structures,2019,17(1):2-20.
- [9] 施刚,林错错,王元清,等.高强度钢材工字形截面轴心受压短柱局部稳定试验研究[J].建筑结构学报,2012,33(12):20-30.
Shi G,Lin C C,Wang Y Q, et al. Experimental study on local buckling of high strength steel I-section stub columns under axial compression [J]. Journal of Building Structures,2012,33(12):20-30. (in Chinese)
- [10] 施刚,林错错,周文静,等.960 MPa高强度钢材轴心受压构件局部稳定试验研究[J].建筑结构学报,2014,35(1):126-135.
Shi G,Lin C C,Zhou W J, et al. Experimental study on local buckling of 960 MPa high strength steel columns under axial compression [J]. Journal of Building Structures,2014,35(1):126-135. (in Chinese)
- [11] 李翔,王卫永,于克强.高温下轴心受压高强Q690钢柱的局部稳定[J].建筑钢结构进展,2021,23(3):54-63.
Li X,Wang W Y,Yu K Q. Local buckling of Q690 high-strength steel columns subjected to axial compression at elevated temperature[J].Progress in Steel Building Structures,2021,23(3):54-63. (in Chinese)
- [12] Wang W Y, Li X, Al-azzani H. Experimental study on local buckling of high-strength Q960 steel columns at elevated temperatures[J]. Journal of Constructional Steel Research,2021,183(4):106716.
- [13] Wang W Y,Zhang Y H,Xu L, et al. Mechanical properties of high-strength Q960 steel at elevated temperature [J]. Fire Safety Journal,2020,114(4):103010.
- [14] 钢结构工程施工质量验收标准:GB 50205—2020[S].北京:中国计划出版社,2020.
- [15] 张娟.高强Q690钢焊接截面柱受火后残余应力及受力性能研究[D].重庆:重庆大学,2019.
Zhang J. Study on residual stress and load capacity of welded high-strength Q690 steel column after fire exposure [D]. Chongqing: Chongqing University,2019. (in Chinese)
- [16] 钢结构设计标准:GB 50017—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [17] Specification for structural steel buildings:AISC 360—16[S].Chicago: American Institute of Steel Construction,2016.
- [18] Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-5: Plated structural elements: EN 1993-1-5[S].Brussels: European Committee for Standardization,2006.

(本文编辑:池营营)