

文章编号: 1000-4750(2012)08-0129-07

轴心受压等边角钢构件局部稳定受力性能 随钢材强度变化规律的研究

施 刚¹, 刘 钊², 张 勇², 王元清¹, 石永久¹

(1. 土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 清华大学土木工程系, 北京 100084; 2. 北京交通大学土木工程学院, 北京 100044)

摘 要: 随着钢结构的发展, 高强度热轧等边角钢在钢结构中的应用越来越广泛, 如输电铁塔和大跨度桁架等。而高强度钢材在材料性能方面与普通强度钢材有明显的区别, 使得钢材强度不同时轴心受压等边角钢构件的局部稳定受力性能存在较大差异。目前国内外关于这方面的研究成果较少。笔者利用通用有限元分析软件 ANSYS 建立有限元模型, 考虑了构件的残余应力和几何初始缺陷, 对轴心受压等边角钢构件的局部稳定受力性能进行了有限元分析, 研究其随钢材强度和宽厚比变化的影响规律, 并与美国规范(AISC 360-05)和欧洲规范(Eurocode 3)的设计方法进行了比较, 提出了设计建议, 为相关设计提供了参考。

关键词: 钢结构; 有限元分析; 角钢; 局部稳定; 钢材强度; ANSYS

中图分类号: TU391 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2010.10.0724

STUDY ON THE RELATIONSHIP OF LOCAL BUCKLING BEHAVIOR OF STEEL EQUAL ANGLE MEMBERS UNDER AXIAL COMPRESSION WITH THE STEEL STRENGTH

SHI Gang¹, LIU Zhao², ZHANG Yong², WANG Yuan-qing¹, SHI Yong-jiu¹

(1. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry,

Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

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

Abstract: With the development of steel structures, the application of high strength hot-rolled steel equal angles in steel structures is increasing, especially in transmission towers and long span trusses. But high strength steel is quite different from ordinary strength steel in the aspect of material properties, which causes that the local buckling behavior of steel equal angle members under axial compression varies with the steel strength. The research in this field is deficient currently. A finite element model was developed in this paper by using the finite element software named ANSYS, with the residual stresses and the initial geometric imperfections of the specimens were taken into consideration to analyze the local buckling behavior of steel equal angle members under axial compression, and study its behaviors with the variety of the steel strength and the width-thickness ratio. By comparing the finite element analysis (FEA) results with those of the design methods in the American and European steel structures design codes (AISC 360-05 and Eurocode 3), the corresponding design suggestion was proposed, which provided a reference for the related design.

Key words: steel structure; finite element analysis; angle; local buckling; steel strength; ANSYS

收稿日期: 2010-10-11; 修改日期: 2011-04-18

基金项目: 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室研究基金项目(LP0901)

通讯作者: 施 刚(1977—), 男, 安徽铜陵人, 副教授, 博士, 主要从事钢结构方面研究(E-mail: shigang@tsinghua.edu.cn).

作者简介: 刘 钊(1985—), 男, 山东莱芜人, 硕士生, 从事钢结构方面研究(E-mail: lwz0712@sina.com);

张 勇(1970—), 男, 安徽阜阳人, 副教授, 博士, 从事钢结构方面研究(E-mail: 13601222805@139.com);

王元清(1963—), 男, 安徽霍山人, 教授, 博士, 从事钢结构方面研究(E-mail: wang-yq@tsinghua.edu.cn);

石永久(1962—), 男, 黑龙江鸡东人, 教授, 博士, 从事钢结构方面研究(E-mail: shiyj@tsinghua.edu.cn).

随着钢结构的发展,高强度钢材(名义屈服强度 $\geq 420\text{MPa}$)已经在世界上多个国家和地区的建筑物和桥梁结构中得到了广泛的应用,如日本、美国、欧洲、澳大利亚和中国等,并取得了很好的效果^[1]。与普通钢材相比,高强度钢材具有受力性能良好、结构可靠性高、降低工程成本、降低能耗以及利于环境保护等多方面的显著优势^[2],因此高强度钢材钢结构的工程应用前景十分广阔。目前已有的研究表明,对于高强度钢材轴心受压构件,截面残余应力与钢材屈服强度的比值要比普通钢材受压构件小得多^[3],从而能够提高受压构件的局部稳定承载力。

角钢构件是钢结构中常用的一种结构杆件,我国传统钢结构中角钢钢材一般为 Q235 和 Q345。近年来,我国电力、通信以及建筑行业的发展要求角钢钢材提高强度,增大结构承载力,减小总体用钢量,因此 Q420 和 Q460 高强度热轧等边角钢在钢结构中的应用逐渐增多^[4]。

高强度钢材在材料性能方面与普通强度钢材的区别不仅仅体现在强度提高,更重要的是无明显屈服平台、屈服比高等,这使得钢材强度不同时轴心受压等边角钢构件的局部稳定受力性能会存在较大差异。目前国内外关于这方面的研究比较缺乏,而对轴心受压等边角钢构件局部稳定受力性能随钢材强度变化规律的研究,不论是对于相应设计规范的修订,还是对于高强度等边角钢的应用与推广,都具有十分重要的意义。

随着有限元理论和计算机技术的发展,有限元分析已成为计算受压构件受力性能的一种准确有效的方法。本文采用通用有限元软件 ANSYS 建立有限元模型,对轴心受压等边角钢构件的局部稳定受力性能进行了有限元分析,研究了其随钢材强度和宽厚比变化的影响规律,并将有限元计算结果与美国规范(AISC 360-05)和欧洲规范(Eurocode 3)的设计方法进行了比较,提出了设计建议,为相关设计提供了参考。

1 材料性能

钢材静力拉伸试验的性能常用应力-应变曲线来表示,如图 1 所示^[5]。与普通强度钢材相比,高强度钢材在材料性能方面有两个主要的区别:一是屈服阶段不明显;二是高屈服比。

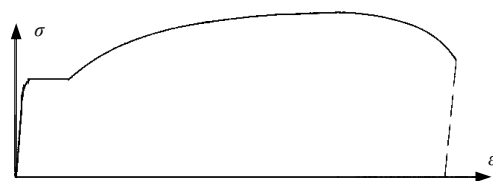


图 1 钢材应力-应变曲线

Fig.1 Stress-strain curve of steel

1.1 屈服阶段

对于碳素结构钢(Q235)和普通低合金高强度结构钢(Q345~Q460),图 1 所示的屈服阶段较为明显,通常从屈服应变 $\varepsilon_y \approx 0.2\%$ 一直延续到 $\varepsilon_y \approx 2.5\%$ ^[6]。而对于高强度钢材(屈服强度大于 460MPa),通常屈服阶段不明显,图 1 所示的应力-应变曲线在经历弹塑性阶段后直接进入强化阶段。

Rasmussen 等人^[7]对名义屈服强度为 650MPa 和 690MPa 的钢材进行了材性试验,其结果如图 2 和图 3 所示。从图 2 和图 3 中可以看出,两种钢材均未表现出明显的屈服阶段,其屈服强度取残余应变 $\varepsilon_y = 0.2\%$ 对应的应力值。

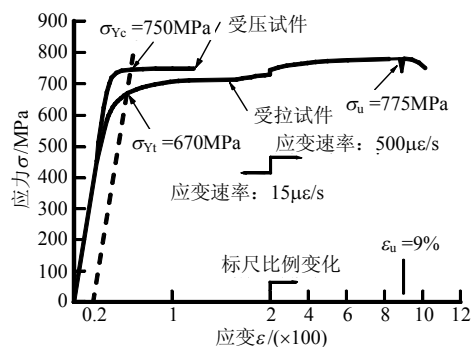


图 2 650MPa 钢材应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curves for 650MPa steel

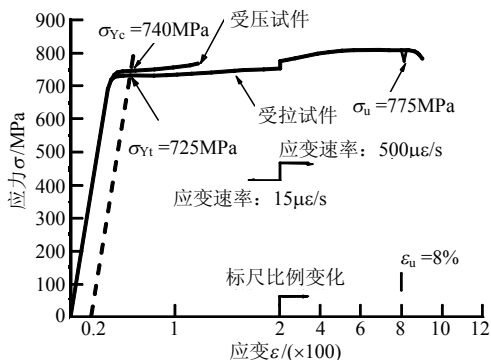


图 3 690MPa 钢材应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves for 690MPa steel

Clarín 等人^[8]对名义屈服强度为 420MPa、700MPa 和 1100MPa 的钢材进行了材性试验,其结果如图 4 所示,其中 D420、W700 和 W1100 分别

表示三种钢材强度。可以看出, 420MPa 钢材的应力-应变曲线有明显的屈服阶段, 而且经历屈服阶段后会有很长的应变强化过程; 700MPa 钢材的应力-应变曲线没有表现出明显的屈服阶段, 而且屈服后的应变强化过程较短; 1100MPa 钢材的应力-应变曲线不仅没有屈服阶段, 而且应变强化过程很短, 表现出很强的脆性。

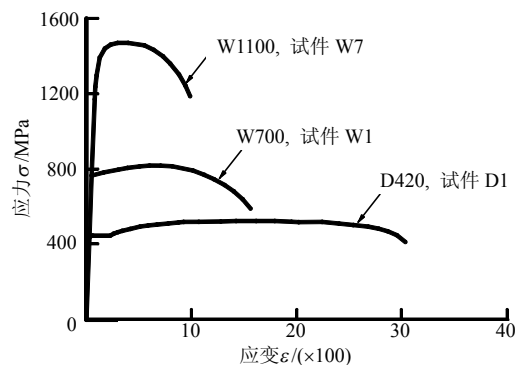


图 4 三种钢材的应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves for three kinds of steel

1.2 屈强比

我国《钢结构设计规范》(GB 50017-2003)^[9]规定按塑性设计时, 钢材的力学性能应满足强屈比 $f_u/f_y \geq 1.2$ (即屈强比 $f_y/f_u \leq 0.83$)。《建筑抗震设计规范》(GB 50011-001)^[10]规定钢材的屈服强度实测值与抗拉强度实测值的比值 (即屈强比 f_y/f_u) 不应大于 0.85。

我国国家标准《碳素结构钢》(GB/T 700-2006)^[11]和《低合金高强度结构钢》(GB/T 1591-2008)^[12]规定了各种牌号钢材的屈服强度与极限强度, 由此可计算出其屈强比, 如表 1 所示, 其中屈服强度和极限强度分别对应厚度 $\leq 16\text{mm}$ 和厚度 $\leq 40\text{mm}$ 。

表 1 我国规范钢材的力学性能

Table 1 Material properties of steel by Chinese codes

牌号	屈服强度 f_y/MPa	极限强度 f_u/MPa	屈强比 f_y/f_u
Q235	≥ 235	370~500	0.47~0.64
Q345	≥ 345	470~630	0.55~0.73
Q390	≥ 390	490~650	0.60~0.80
Q420	≥ 420	520~680	0.62~0.81
Q460	≥ 460	550~720	0.64~0.84
Q500	≥ 500	610~770	0.65~0.82
Q550	≥ 550	670~830	0.66~0.82
Q620	≥ 620	710~880	0.70~0.87
Q690	≥ 690	770~940	0.73~0.90

欧洲建筑结构用高强度钢材规范 (EN 10025-6)^[13]规定了各种强度等级钢材的屈服强度与极限强度, 由此可计算出其屈强比, 如表 2 所示, 其中屈服强度和极限强度均对应厚度 $3\text{mm} \leq t \leq$

50mm。

表 2 欧洲规范钢材的力学性能

Table 2 Material properties of steel by the European code

等级	屈服强度 f_y/MPa	极限强度 f_u/MPa	屈强比 f_y/f_u
S460	≥ 460	550~720	0.64~0.84
S500	≥ 500	590~770	0.65~0.85
S550	≥ 550	640~820	0.67~0.86
S620	≥ 620	700~890	0.70~0.88
S690	≥ 690	770~940	0.73~0.90
S890	≥ 890	940~1100	0.81~0.95
S960	≥ 960	980~1150	0.83~0.98

由表 1 和表 2 可以看出, 随着钢材强度的提高, 其屈强比增大, 也就是说, 高强度钢材虽然强度高, 但是强度储备较小。

2 残余应力

残余应力不影响构件的静力强度, 但是残余应力的存在可能使构件的某些部位提前达到屈服并发展塑性, 降低截面侧向刚度, 导致构件过早发生局部屈曲。

我国钢结构设计规范在制定柱子曲线时所采用的热轧等边角钢截面的残余应力分布如图 5 所示^[14], 其中负号表示压应力, 正号表示拉应力, f_y 为钢材的屈服强度, β 为峰值系数, 分别取 0.2、0.25 和 0.3。

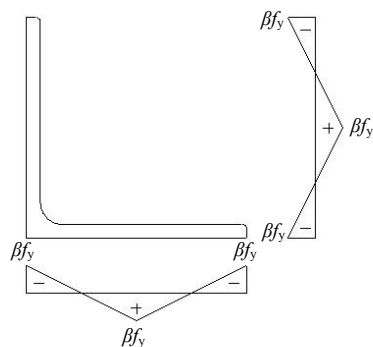


图 5 等边角钢截面残余应力分布

Fig.5 Distribution of residual stress of steel equal angle

由图 5 可以看出, 一般认为型钢截面的残余应力峰值与钢材的屈服强度成正比, 即钢材屈服强度越高, 残余应力峰值越大, 但是对于热轧型钢, 由于热轧工艺比较稳定, 所以残余应力变化很小, 与钢材强度并没有直接关系^[15]。

班慧勇等人^[16]采用分割法对 Q420 热轧等边角钢的纵向残余应力进行了试验测量, 提出了残余应力峰值系数 β 的建议公式, 如下式所示:

$$\beta = \begin{cases} -0.03(b/t) + 0.48, & 11 \leq b/t < 14 \\ 0.06, & b/t \geq 14 \end{cases} \quad (1)$$

式中： b 为角钢肢的自由外伸宽度； t 为角钢肢的厚度。

由式(1)可以看出，残余应力峰值系数 β 随板件宽厚比的增大而减小。根据式(1)计算班慧勇所做试验中 5 种角钢截面的残余应力峰值系数 β ，如表 3 所示。由表 3 可以看出，按照建议公式计算所得的残余应力峰值系数明显小于我国钢结构设计规范所采用的数值。

表 3 残余应力峰值系数

Table 3 The peak value factor of residual stress

截面	L125×8	L140×10	L160×10	L180×12	L200×14
β	0.09	0.13	0.08	0.10	0.12

3 有限元分析

3.1 试件概况

我国国家标准《热轧型钢》(GB/T 706-2008)^[17]共列举了 114 种等边角钢截面，其中宽厚比 w/t (如图 6 所示)最小值为 5.00(L20×4 截面)，最大值为 18.75(L150×8 截面)。在进行有限元分析时，选取 14 种角钢截面，如表 4 所示。钢材的屈服强度取 9 种，即 Q235、Q345、Q390、Q420、Q460、Q550、Q690、Q890 和 Q960，共计 126 个试件。所有试件的长细比均取 $\lambda_x=10$ (绕弱轴方向，如图 6 所示)，为不发生整体弯曲失稳的短柱。

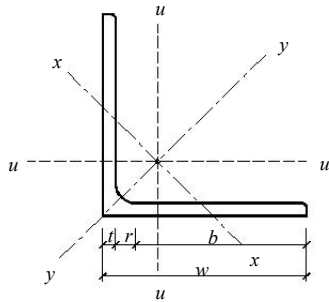


图 6 等边角钢截面

Fig.6 Section of steel equal angle

表 4 角钢截面及宽厚比

Table 4 Sections and width-thickness ratios of steel angle

截面	L20×4	L100×16	L56×8	L40×5	L63×7
w/t	5.00	6.25	7.00	8.00	9.00
截面	L200×20	L110×10	L36×3	L160×12	L140×10
w/t	10.00	11.00	12.00	13.33	14.00
截面	L180×12	L80×5	L70×4	L150×8	
w/t	15.00	16.00	17.50	18.75	

3.2 有限元模型

所有试件均采用 SHELL181 单元进行有限元分析。在模型的端部建立了端板，以传递荷载和消

除应力集中的影响。在有限元模型中， x 轴沿试件长度方向， y 轴和 z 轴分别沿截面两肢方向。对于所有的有限元模型，底部端板约束 x 、 y 、 z 三个方向的平动位移和绕 x 轴的转动位移，顶部端板约束 y 、 z 两个方向的平动位移和绕 x 轴的转动位移， x 方向的平动位移不约束^[18]。

在本文的有限元模型中，端板与角钢肢连接线的位置并不共用一条线，仅仅是将对应节点的 x 、 y 、 z 三个方向平动自由度耦合，以保证角钢肢在端部是简支。典型试件的有限元模型如图 7 所示。

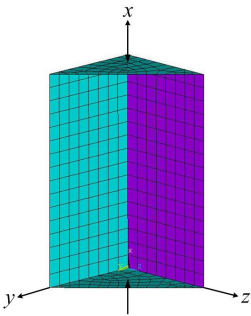


图 7 典型试件的有限元模型(L160×12)

Fig.7 Finite element model of representative specimen (L160×12)

所有试件的钢材均采用 von Mises 屈服准则。对于 Q235 钢材~Q460 钢材，由于其应力-应变曲线有明显的屈服阶段，故材料本构关系采用多线性各向同性强化模型，如图 8 所示；对于 Q550 钢材~Q960 钢材，由于其应力-应变曲线无明显的屈服阶段，钢材屈服后直接进入强化阶段，故材料本构关系采用三线性各向同性强化模型，如图 9 所示。

图 8 和图 9 中的数据如表 5 所示，其中屈服强度 f_y 取名义值，极限强度 f_u 取表 1 和表 2 中极限强度的下限，屈服应变 $\epsilon_y=f_y/E$ ，屈服平台末端应变 ϵ_{st} 和极限应变 ϵ_u 根据相关的试验结果取值。钢材弹性模量取 $E=2.06\times10^5\text{MPa}$ ，泊松比取 $\nu=0.3$ 。

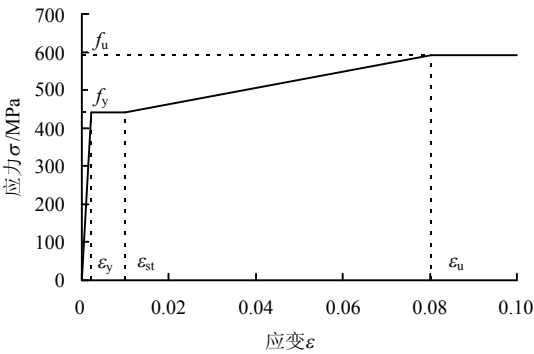


图 8 多线性应力-应变关系

Fig.8 Multilinear stress-strain relationship

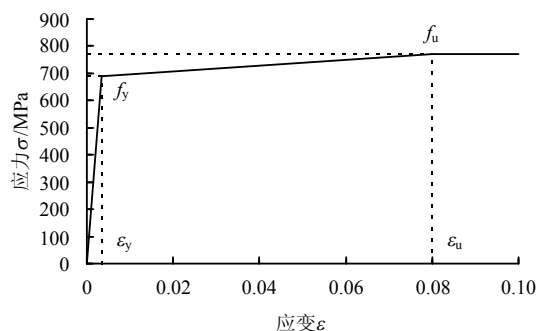


图9 三线性应力-应变关系

Fig.9 Trilinear stress-strain relationship

表5 钢材材料属性

Table 5 Material properties of steel

钢材	f_y /MPa	f_u /MPa	ε_y	ε_{st}	ε_u
Q235	235	370	0.0011	0.025	0.20
Q345	345	470	0.0017	0.017	0.16
Q390	390	490	0.0019	0.015	0.14
Q420	420	520	0.0020	0.013	0.13
Q460	460	550	0.0022	0.010	0.12
Q550	550	640	0.0027	/	0.10
Q690	690	770	0.0033	/	0.08
Q890	890	940	0.0043	/	0.06
Q960	960	980	0.0047	/	0.05

目前关于角钢局部失稳几何初始缺陷的取值尚无明确规定,本文参考《钢结构工程施工质量验收规范》(GB 50205-2001)^[19]对钢材矫正后的允许偏差中角钢肢的垂直度的规定,取截面宽度 w 的1/100作为几何初始缺陷的数值。

由于热轧型钢的制作工艺比较稳定,残余应力变化很小,并且不随钢材强度变化,因此所有试件的残余应力峰值均取 $\beta f_y = 0.3 \times 235 \text{ MPa} = 70.5 \text{ MPa}$ 。

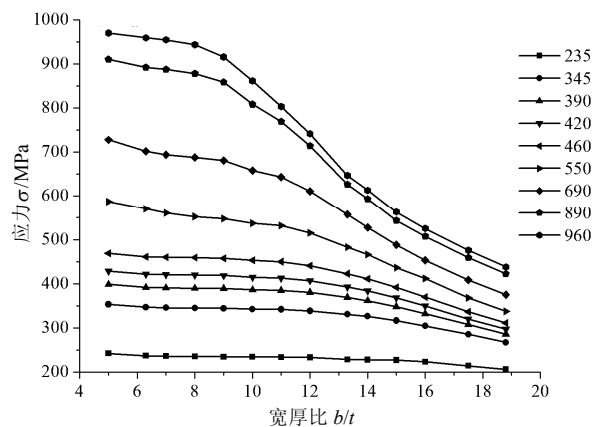
3.3 结果分析

所有试件的有限元计算结果如图10所示,其中图10(a)为屈服强度不同时试件的屈曲应力随宽厚比的变化关系曲线,图10(b)为宽厚比不同时试件的屈曲应力随屈服强度的变化关系曲线。

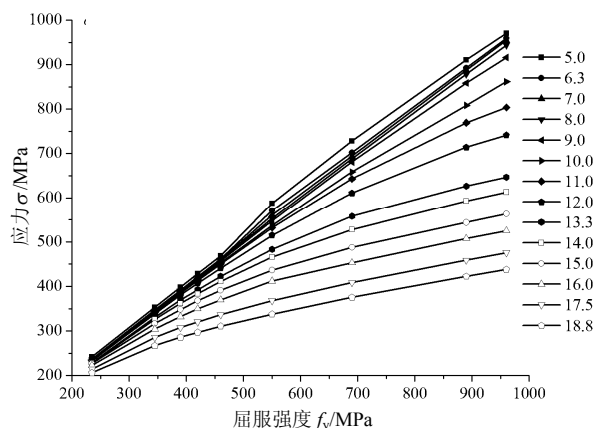
由图10(a)可以看出,对于Q235钢材~Q460钢材,当宽厚比较小时,试件的屈曲应力几乎相等;当宽厚比较大时,屈曲应力随宽厚比的增大而减小,其曲线可分为近似水平段和下降段两部分,水平段较长,下降段不仅较短而且斜率较小。

对于Q550钢材~Q960钢材,由于材料本构关系发生了变化,当宽厚比较小时,试件的屈曲应力高于其钢材的屈服强度,即试件已进入应变强化阶段;当宽厚比较大时,屈曲应力随宽厚比的增大而减小,其曲线下降段较长且斜率较大。

由图10(b)可以看出,当宽厚比较小时,屈曲应力随钢材屈服强度呈线性增长,这说明增大屈服强度对于提高局部稳定承载力效果显著,高强度钢材的强度优势可以充分发挥。当宽厚比较大时,屈曲应力随钢材屈服强度呈非线性增长,且宽厚比越大,非线性程度越高,屈曲应力随钢材屈服强度增长越缓慢;但是对于同样截面的等边角钢轴心受压构件,其局部稳定承载力随着钢材强度等级的提高仍然有较大的增长。



(a) 屈曲应力随宽厚比的变化关系



(b) 屈曲应力随屈服强度的变化关系

图10 有限元计算结果

Fig.10 FEA results

4 设计方法

我国《钢结构设计规范》(GB 50017-2003)对于轴心受压构件的局部稳定采用限制板件宽厚比的办法来保证构件不发生局部屈曲,但是当构件截面的宽厚比超过限值时,没有给出相应的计算方法和设计规定。本文将有限元计算结果与美国规范(AISC 360-05)和欧洲规范(Eurocode 3)的板件强度曲线进行了比较,对轴心受压角钢构件局部稳定承载力的计算方法提出了建议。

AISC 360-05 对于宽厚比超过限值的轴心受压构件, 采用强度折减的方法考虑局部屈曲的影响, 其板件强度公式 σ/f_y 即为折减系数 Q_s ^[20]:

$$Q_s = 1.0, w/t \leq 0.45\sqrt{E/F_y} \quad (2)$$

$$Q_s = 1.34 - 0.76\left(\frac{w}{t}\right)\sqrt{\frac{F_y}{E}}, \\ 0.45\sqrt{E/F_y} < w/t \leq 0.91\sqrt{E/F_y} \quad (3)$$

$$Q_s = \frac{0.53E}{F_y(w/t)^2}, w/t > 0.91\sqrt{E/F_y} \quad (4)$$

Eurocode 3 对于宽厚比超过限值的轴心受压构件, 采用有效截面的方法考虑局部屈曲的影响, 其板件强度公式 σ/f_y 即为有效截面系数 ρ ^[21]:

$$\rho = 1.0, \bar{\lambda}_p \leq 0.748 \quad (5)$$

$$\rho = (\bar{\lambda}_p - 0.188) / \bar{\lambda}_p^2, \bar{\lambda}_p > 0.748 \quad (6)$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{w/t}{28.4\sqrt{235/f_y}\sqrt{k_\sigma}} \quad (7)$$

式中, k_σ 为屈曲系数, 取 0.43。

不同屈服强度的有限元计算结果与 AISC 360-05 和 Eurocode 3 板件强度曲线的比较如图 11 所示。可以看出, 对于 Q235 钢材~Q460 钢材, AISC 360-05 的曲线由水平段和直线下降段两部分组成; 对于 Q550 钢材~Q960 钢材, AISC 360-05 的曲线由水平段、直线下降段和曲线下降段 3 部分组成。对于所有钢材, Eurocode 3 的曲线均由水平段和曲线下降段两部分组成。水平段和下降段的分界点即为宽厚比限值。由于宽厚比限值随钢材屈服强度的增大而减小, 故钢材强度越高, 水平段越短, 下降段越长。

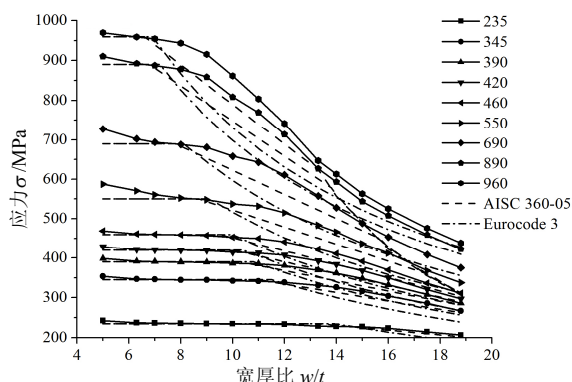


图 11 有限元计算结果与规范曲线的比较

Fig.11 Comparison between FEA results and code curves

对于 Q235 钢材~Q460 钢材, 两种规范曲线的

水平段与有限元计算结果符合的很好; 而对于 Q550 钢材~Q960 钢材, 由于材料本构关系发生了变化, 故两种规范曲线的水平段均低于有限元计算结果。对于所有钢材, 两种规范曲线的下降段均低于有限元计算结果, 且钢材屈服强度越高, 两者之间的差距越大, 但 AISC 360-05 曲线与有限元计算结果的差距相对较小。另外, 对于 Q550 钢材~Q960 钢材, AISC 360-05 的曲线下降段重合在一起, 即当宽厚比超过第二个限值时, 屈曲应力只与宽厚比有关, 与钢材屈服强度无关, 属于弹性屈曲, 这说明对于宽厚比很大的角钢构件, 采用高强度钢材效果不明显。

由以上分析可见, AISC 360-05 能够比 Eurocode 3 更准确的计算轴心受压等边角钢构件的局部稳定承载力, 较为经济与合理, 同时又具有足够的安全度。因此本文建议采用 AISC 360-05 的计算方法, 即式(2)~式(4)计算轴心受压等边角钢构件的局部稳定承载力。

5 结论

本文运用通用有限元软件 ANSYS 建立有限元模型, 对轴心受压等边角钢构件的局部稳定受力性能进行了有限元分析, 研究了其随钢材强度和宽厚比变化的影响规律, 并与 GB 50017-2003、AISC 360-05 和 Eurocode 3 的设计方法进行了比较。通过分析研究, 本文得出以下结论:

(1) 由于高强度钢材的材料性能、残余应力与普通钢材存在较大差别, 钢材强度对轴心受压等边角钢构件的局部稳定受力性能会有很大的影响。

(2) 当屈服强度较低时, 屈曲应力随宽厚比增大而减小的趋势不明显; 当屈服强度较高时, 屈曲应力随宽厚比增大有明显的减小趋势。屈服强度越高, 屈曲应力开始出现明显下降时所对应的宽厚比越小, 且屈曲应力减小的越快。

(3) 当宽厚比较小时, 屈曲应力随钢材屈服强度呈线性增长; 当宽厚比较大时, 屈曲应力随钢材屈服强度呈非线性增长, 且宽厚比越大, 非线性程度越高, 屈曲应力随钢材屈服强度增长越缓慢; 但是对于同样截面的等边角钢轴心受压构件, 其局部稳定承载力随着钢材强度等级的提高仍然有较大的增长。

(4) 分析表明 AISC 360-05 比 Eurocode 3 更能准确计算轴心受压等边角钢构件的局部稳定承载

力, 较为经济合理, 且具有足够的安全度。为此建议采用 AISC 360-05 的设计方法。

参考文献:

- [1] 施刚, 王元清, 石永久. 高强度钢材轴心受压构件的受力性能[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(2): 92—97.
Shi Gang, Wang Yuanqing, Shi Yongjiu. Behavior of high strength steel columns under axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(2): 92—97. (in Chinese)
- [2] 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 Gang, Shi Yongjiu, Wang Yuanqing. Engineering application of ultra-high strength steel structures [J]. Progress in Steel Building Structures, 2008, 10(4): 32—38. (in Chinese)
- [3] 班慧勇, 施刚, 石永久, 王元清. 超高强度钢材焊接截面残余应力分布研究[J]. 工程力学, 2008, 25(增刊 II): 57—61, 98.
Ban Huiyong, Shi Gang, Shi Yongjiu, Wang Yuanqing. Study on the residual stress distribution of ultra-high strength steel welded sections [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(Suppl II): 57—61, 98. (in Chinese)
- [4] 施刚, 刘钊, 班慧勇, 张勇. 高强度角钢轴心受压构件稳定设计方法研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(6): 18—21.
Shi Gang, Liu Zhao, Ban Huiyong, Zhang Yong. Study on the stability design method of high strength steel angle members under axial compression [J]. Industrial Construction, 2009, 39(6): 18—21. (in Chinese)
- [5] 陈骥. 钢结构稳定理论与设计[M]. 第 3 版. 北京: 科学出版社, 2006: 17—21.
Chen Ji. Stability of steel structures-theory and design [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2006: 17—21. (in Chinese)
- [6] 王国周, 瞿履谦. 钢结构——原理与设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993: 17—20.
Wang Guozhou, Qu Lvqian. Steel structure-theory and design [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993: 17—20. (in Chinese)
- [7] Rasmussen K J R, Hancock G J. Plate slenderness limits for high strength steel sections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1992, 23(1/2/3): 73—96.
- [8] Mattias Clarin, Ove Lagerqvist. Plate buckling of high strength steel - experimental investigation of welded box section under compression [J]. Eurosteel, 2005, Vol. A, 1.4-207—1.4-214.
- [9] 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 Planning Press, 2003. (in Chinese)
- [10] GB 50011-2001, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
GB 50011-2001, Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001. (in Chinese)
- [11] GB/T 700-2006, 碳素结构钢[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
GB/T 700-2006, Carbon structural steels [S]. Beijing: China Standard Press, 2006. (in Chinese)
- [12] GB/T 1591-2008, 低合金高强度结构钢[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
GB/T 1591-2008, High strength low alloy structural steels [S]. Beijing: China Standard Press, 2008. (in Chinese)
- [13] EN 10025-6: Hot rolled products of structural steels - Part 6: Technical delivery conditions for flat products of high yield strength structural steels in the quenched tempered condition [S]. Europe: CEN National Members, 2004.
- [14] 《钢结构设计规范》编制组. 《钢结构设计规范》应用讲解[M]. 北京: 中国计划出版社, 2003: 184—185.
Editorial Team of Code for Design of Steel Structures. Explanation of code for design of steel structures [M]. Beijing: China Planning Press, 2003: 184—185. (in Chinese)
- [15] International Association for Bridge and Structural Engineering. Use and application of high-performance steels for steel structures [M]. Zurich: IABSE, 2005: 124—125.
- [16] 班慧勇, 施刚, 邢海军, 李茂华, 石永久, 王元清. Q420 等边角钢轴压杆稳定性能研究(1)——残余应力的试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(7): 14—21.
Ban Huiyong, Shi Gang, Xing Haijun, Li Maohua, Shi Yongjiu, Wang Yuanqing. Stability of Q420 high strength steel equal-leg angle members under axial compression (1): Experimental study on the residual stress [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(7): 14—21. (in Chinese)
- [17] GB/T 706-2008, 热轧型钢[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
GB/T 706-2008, Hot rolled section steel [S]. Beijing: China Standard Press, 2008. (in Chinese)
- [18] 张勇, 施刚, 刘钊, 王元清, 石永久. 高强度等边角钢轴心受压局部稳定的有限元分析和设计方法研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(9): 27—34.
Zhang Yong, Shi Gang, Liu Zhao, Wang Yuanqing, Shi Yongjiu. Finite element analysis and design method study on the local buckling of high strength steel equal angles under axial compression [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(9): 27—34. (in Chinese)
- [19] GB 50205-2001, 钢结构工程施工质量验收规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2001.
GB 50205-2001, Code for acceptance of construction quality of steel structures [S]. Beijing: China Planning Press, 2001. (in Chinese)
- [20] ANSI/AISC 360-05. Specification for structural steel buildings [S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2005.
- [21] CEN: EN 1993-1-5 Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1.5 Plated structural elements [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2006.