

# 单角钢构件稳定承载力设计方法与研究综述

张爱林<sup>1,2</sup>, 张庆芳<sup>1,3</sup>

(1. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124; 2. 北京市高层和大跨度预应力钢结构工程技术研究中心, 北京 100124;  
3. 石家庄铁道大学土木工程学院, 石家庄 050043)

**摘要:** 中国《钢结构设计规范》对单角钢截面构件的设计规定相对简化甚至空白. 为了解决这个问题, 通过对比分析美国钢结构规范 ANSI/AISC360—2010、英国钢结构规范 BS5950—1: 2000 和欧洲钢结构规范 Eurocode 3 对单角钢构件受压(包括轴心受压和单面连接单角钢受压)、受弯的设计规定发现: 美国规范中当分肢的宽厚比  $b/t \leq 20$  时只考虑弯曲屈曲的规定不甚合理; 英国规范对单角钢梁的规定偏于保守. 最后, 提出 3 条建议: 深入开展单角钢用作受弯构件时的承载力研究; 将单角钢分肢、工字钢与槽钢截面的自由外伸翼缘三者作为“非加劲板”对待时宜考虑板件间约束的强弱; 将局部稳定和整体稳定两方面验算统一为考虑了局部屈曲影响的构件整体承载力验算.

**关键词:** 单角钢; 稳定承载力; 受压; 受弯; 设计规范

中图分类号: TU 311.2

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2016)08-1199-09

doi: 10.11936/bjtxb2015100015

## Review of Steel Single Angles Subject to Compression and Bending

ZHANG Ailin<sup>1,2</sup>, ZHANG Qingfang<sup>1,3</sup>

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;  
2. Beijing Engineering Research Center of High-Rise and Large-Span Prestressed Steel Structure, Beijing 100124, China;  
3. College of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** The provisions about the stability capacity of members with single angle section are simple or have not been provided in Chinese Code for Design of Steel Structures (GB50017—2003). In order to solve this problem, in this paper, the principles of angles subject to compression and bending were introduced according to foreign codes such as ANSI/AISC360—2010, BS5950—1: 2010, Eurocode 3, etc. It is somewhat questionable when single angle with  $b/t \leq 20$  does not require the computation of flexural-torsional buckling in AISC code and may be conservative to single angle flexural member when using BS5950. The authors proposed three main questions which were answered in the future codification: 1) research of flexural capacity of single angle should be carried out; 2) a unified concept, unstiffened element should be applied to these sections such as angle leg, I or C-shapes, and the web-flange interaction should be considered; 3) the member capacity considering local buckling should be adopted instead of overall stability and local stability.

**Key words:** single angle; stability capacity; compression; bending; design code

与工字形、箱形等双轴对称截面不同, 单角钢截面仅有一个对称轴(等肢角钢)或者无对称轴(不等

肢角钢), 这一特点使得其力学性能十分复杂:

1) 作为轴心受压构件使用时可能发生弯扭屈

收稿日期: 2015-10-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278010); 北京市自然科学基金重点资助项目(8131002)

作者简介: 张爱林(1961—), 男, 教授, 主要从事现代钢结构方面的研究, E-mail: zhangal@bjut.edu.cn

曲而并非只是弯曲屈曲。

2) 当单角钢构件用于腹杆时,一方面,构件本身并非轴心受力,另一方面,端部约束难以准确表达。

3) 作为受弯构件使用时,弯矩通常并非作用于主刚度平面,用于工字形截面绕强轴受弯的临界弯矩公式在这里不适用。

中国现行《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)<sup>[1]</sup>中对单角钢构件受弯的情况没有规定。

基于以上原因,有必要对国际上较为成熟的钢结构规范进行比较分析。本文第一、二部分分别介绍了单角钢构件受压(单面连接单角钢构件作为特殊情况)、受弯时的设计方法,所依据的钢结构规范依次为美国规范<sup>[2]</sup>、欧洲规范<sup>[3]</sup>、英国规范<sup>[4]</sup>和中国规范<sup>[1]</sup>。鉴于单角钢构件受压的理论研究已相对成熟,近年国外的研究集中于受弯以及压弯,本文第三部分对此加以论述。最后,在整理了中国近年单角钢构件承载力研究的基础上,针对今后的研究方向提出建议。

## 1 单角钢受压构件

### 1.1 单角钢轴心受压构件

1968年,Galambos指出两端铰接的单角钢截面对理想轴心压杆的弹性屈曲临界力为下列方程的最小根<sup>[5-7]</sup>:

$$(P_u - P)(P_v - P)(P_z - P) - P^2 [(P_u - P)v_0^2 + (P_v - P)u_0^2] \frac{1}{i_0^2} = 0 \quad (1)$$

$$P_u = \frac{\pi^2 EI_u}{l^2} \quad (2)$$

$$P_v = \frac{\pi^2 EI_v}{l^2} \quad (3)$$

$$P_z = \frac{GI_t}{i_0^2} \quad (4)$$

$$i_0^2 = u_0^2 + v_0^2 + \frac{I_u + I_v}{A} \quad (5)$$

式中: $P_u$ 、 $P_v$ 分别为构件绕 $u$ 、 $v$ 轴的弹性弯曲屈曲临界力(角钢的轴线如图1所示); $P_z$ 为绕 $z$ 轴(构件长度方向)的弹性扭转屈曲临界力; $i_0$ 为截面相对剪心的极回转半径; $u_0$ 、 $v_0$ 为截面剪心相对于形心的坐标; $I_u$ 、 $I_v$ 分别为截面绕 $u$ 、 $v$ 轴的惯性矩; $I_t$ 为自由扭转惯性矩; $E$ 、 $G$ 分别为钢材的弹性模量和剪变模量; $A$ 为截面的面积; $l$ 为构件的长度。

根据式(1)求解结果可知,截面为等肢时发生

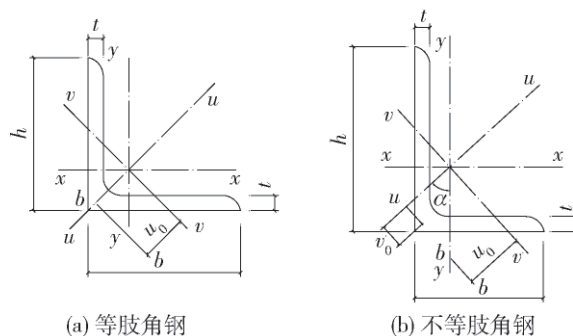


图1 角钢截面的轴线

Fig. 1 Axes and dimensions of angle cross-section

弯扭屈曲或绕 $v$ 轴的弯曲屈曲,不等肢时必然发生弯扭屈曲。

#### 1.1.1 美国规范的规定

尽管如此,美国钢结构学会(简称AISC)编制的钢结构规范1989版<sup>[8]</sup>、1993版<sup>[9]</sup>、1999版<sup>[10]</sup>对于单角钢压杆均不考虑弯扭屈曲。1989版在条文说明中明确指出,由于扭转屈曲和弯扭屈曲通常不控制设计,或者,弯扭屈曲临界力与绕弱轴的弯曲屈曲时相差很小,对称截面的扭转屈曲和非对称截面的弯扭屈曲在设计热轧柱时通常不必考虑。若一定要考虑弯扭屈曲,可先计算出弯扭屈曲的临界应力理论值,然后按临界应力相等原则求得弯曲屈曲时的长细比。

2000年,AISC专门编制了单角钢构件的设计规范<sup>[11]</sup>作为1999版规范的补充。这些规定被写入钢结构规范2005版<sup>[12]</sup>、2010版<sup>[2]</sup>(表达形式略有差异但本质完全相同)。

2010版美国钢结构规范<sup>[2]</sup>(以下简称AISC 360)中,轴心受压构件的稳定承载力计算公式中并未直接出现稳定系数,但其原理与中国《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)<sup>[1]</sup>(以下简称GB50017)相同,因此仍可以表达为类似的形式:

$$N \leq \varphi A f \quad (6)$$

式中: $A$ 为构件截面积; $f$ 为钢材的强度设计值( $f = \phi_c f_y$ ,系数 $\phi_c = 0.9$ , $f_y$ 为钢材的屈服强度); $\varphi$ 为稳定系数,是正则化长细比 $\lambda_n$ 的函数。值得一提的是,AISC 360中柱子曲线只有1条。

单角轴截面心压杆承载力的计算以上述规定为基础,另外特别规定如下:

1) 当分肢的宽厚比 $b/t \leq 20$ 时只考虑弯曲屈曲, $b/t > 20$ 时才考虑弯扭屈曲。弯扭屈曲时的弹性屈曲临界力由式(1)确定,求得的临界力代入正则化长细比公式求出 $\lambda_n$ ,进而求出 $\varphi$ 。

2) 当分肢宽厚比  $\frac{b}{t} > 0.45 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$  时属于“薄柔”

截面,应采用“Q 系数法”考虑局部屈曲对整体稳定承载力的折减。

### 1.1.2 欧洲规范的规定

欧洲钢结构规范 EN1993-1-1: 2005<sup>[3]</sup> 中(欧洲钢结构规范 Eurocode 3 共有 6 卷,第 1 卷为基本规定,第 1 卷包括 12 个分卷,编号为 EN1993-1-1 ~ EN1993-1-12,以下统称 EC3) 确定压杆稳定系数  $\chi$

的柱子曲线共有 5 条  $\chi$  为正则化长细比  $\lambda_n = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}}$

的函数( $N_{cr}$  为构件的弹性屈曲临界力),并采用 Perry 公式的形式表达。单角钢截面时应按弯扭屈曲得到  $N_{cr}$ ,然后以柱子曲线 b 确定  $\chi$ 。当角钢分肢的宽厚比大于  $15 \sqrt{235/f_y}$  时属于“等级 4”截面,计算  $\lambda_n$  以及稳定承载力时应以有效截面积  $A_{eff}$  代替毛截面积  $A$ 。计算  $A_{eff}$  用到的有效宽度  $b_{eff}$  需要依据 EN1993-1-5: 2006<sup>[13]</sup> 确定。

### 1.1.3 英国规范的决定

英国钢结构规范 BS 5950: 2000<sup>[4]</sup> (以下简称 BS 5950) 中,压杆的稳定承载力本质上仍可以认为采用了式(6)的形式。柱子曲线共有 4 条,稳定系数同样采用了 Perry 公式的形式。单角钢截面时采用柱子曲线 c 确定稳定系数。对于等肢角钢,当  $b/t > 15 \sqrt{275/f_y}$  时属于“薄柔”截面,此时,由全截面求得的

压杆承载力应乘以折减系数  $\frac{15 \sqrt{275/f_y}}{b/t}$ 。

### 1.1.4 中国规范的规定

GB50017 中,确定稳定系数  $\varphi$  的柱子曲线共 4 条。单角钢压杆绕  $u$  轴的长细比取为“换算长细比”(相当于将弯扭屈曲按弹性临界力相等折算成弯曲屈曲)并按柱子曲线 b 确定  $\varphi$ 。为保证局部屈曲不发生,限制肢件宽厚比应满足

$$b/t \leq (10 + 0.1\lambda) \sqrt{235/f_y}$$

式中:  $b$  为肢宽减去肢厚;  $\lambda$  为绕 2 个主轴的长细比较大者。

### 1.1.5 各国规范对比

对比各规范的做法,可以发现:

1) 除 AISC360 外,EC3、BS5950 以及 GB50017 均采用 Perry 公式的形式表达整体稳定系数,具有相似的思路。

2) 依据 AISC360、EC3、BS5950、GB50017 分别画出正则化长细比与稳定系数的关系曲线,如图 2

所示(图中取钢材屈服强度为  $235 \text{ N/mm}^2$ )。由此可见,当  $\lambda_n$  相等时,除 AISC360 取值略大外,其他三者稳定系数取值十分接近。这里需要特别说明的是,在 BS5950 中,稳定系数会随屈服强度提高而稍有增大。

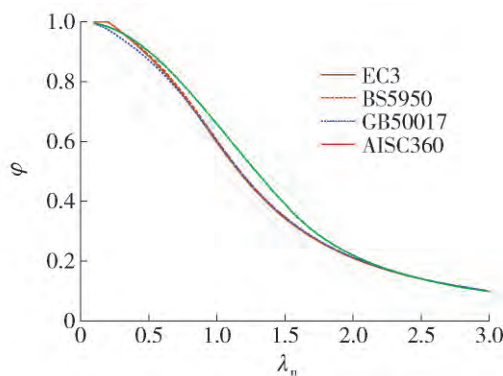


图 2 单角钢轴心压杆的  $\lambda_n-\varphi$  曲线

Fig. 2  $\lambda_n-\varphi$  curve of angle struts

3) 根据热轧角钢截面尺寸表,分肢宽厚比均不满足  $b/t > 20$ ,因此,按照 AISC360 规定均不必考虑弯扭屈曲。然而,笔者对等肢角钢压杆的分析表明,当压杆绕  $u$  轴计算长度满足

$$l_{0u} < 1.09 \frac{b_0^2}{t}$$

时必然发生弯扭屈曲,式中  $b_0$  为按中面线得到的肢宽  $b_0 = b - t/2$ 。若不考虑弯扭屈曲的控制作用,求得的临界应力会随长细比减小而显著高估,偏于不安全。限于篇幅,对此问题的进一步讨论将另文展开。

4) 当单角钢截面由于分肢宽厚比较大而属于“薄柔”截面时,GB50017 不能处理,BS5950 采用简化方法,AISC360 采用“Q 系数法”,EC3 采用“有效宽度法”。笔者认为,EC3 的这种做法在整本规范中是统一的,最为合理。

## 1.2 单面连接的单角钢压杆

国际上,各本规范对单面连接的单角钢压杆承载力计算规定较为一致,即按照修正后的轴心受压构件处理。

### 1.2.1 美国规范的规定

AISC360 规定,当单角钢作为腹杆在端部只有一个分肢与构件相连时,若同时满足以下 4 个条件,可视轴心压杆,否则应按压弯构件计算:

- 1) 构件在端部的受力作用于同一分肢。
- 2) 构件以焊缝相连,或最少以 2 个螺栓相连。
- 3) 构件中间没有横向荷载。

4) 长肢与短肢宽度之比  $b_1/b_s \leq 1.7$ .

作为轴心受压构件计算时,确定稳定系数所需的有效长细比按  $\lambda_x$  的函数求出,  $x$  轴为平行于连接肢的几何轴.

### 1.2.2 欧洲规范的规定

EC3 规定,当角钢构件作为腹杆使用,端部连接螺栓数不少于 2 个时,视为轴心受压,按平面内弯曲屈曲设计,计算长度取 0.9 倍几何长度,有效长细比按  $x, y, v$  轴分别计算后取三者最不利者.当端部只有 1 个螺栓相连时,应视为压弯构件,计算长度取为几何长度.角钢构件端部单面焊接时,视为轴心受压但采用有效截面积以考虑偏心受力的影响,具体规定为:若等肢角钢或不等肢角钢以长肢相连,有效截面积取为毛截面积;若不等肢角钢以短肢相连,计算截面承载力时取为等肢截面(但肢宽取为短肢长度),计算构件屈曲承载力时取为实际截面积.

### 1.2.3 英国规范的规定

BS5950 规定,单面连接的单角钢压杆按照轴心受压考虑,计算长度取几何长度,端部有 2 个及以上螺栓连接时,与连接肢平行的  $x$  轴长细比不折减,绕  $y$  轴、 $v$  轴的长细比乘以折减系数 0.85, 3 个方向的有效长细比取最不利者.

## 2 单角钢受弯构件

1978 年 Leigj 和 Lay 研究了单角钢构件承受均匀弯矩发生侧扭屈曲时的弹性临界弯矩问题.以不等肢单角钢截面为研究对象,假定弯矩  $M$  与  $u$  轴夹角为  $\theta$ (以顺时针转动为正),若忽略翘曲刚度,可建立如下通用方程<sup>[5]</sup>:

$$\varphi''(GJ + \beta_u M \cos \theta - \beta_v M \sin \theta) + \varphi \frac{M^2}{E} \left( \frac{\cos^2 \theta}{I_v} + \frac{\sin^2 \theta}{I_u} \right) + \frac{M^2 \sin \theta \cos \theta}{E} \left( \frac{1}{I_u} - \frac{1}{I_v} \right) = 0 \quad (7)$$

式中:  $\phi$  为距离原点为  $z$  处截面的扭转角;  $I_u, I_v$  分别为绕截面主轴  $u, v$  轴的惯性矩,可按角钢由 2 块矩形板组成的简化模型求出;  $J$  为扭转常数;  $E, G$  分别为钢材的弹性模量和剪变模量;  $\beta_u, \beta_v$  均为与截面尺寸有关的值,详见文献[5].解此微分方程并考虑边界条件,可得单角钢承受均匀弯矩时的弹性临界弯矩  $M_{cr}$ . 当为等肢角钢时,  $M_{cr}$  得以简化为

$$M_{cr} = \frac{\sqrt{2} \pi^2 E b^4 t}{6(1 + 3 \cos^2 \theta) L^2} \cdot \left[ \sqrt{\sin^2 \theta + \frac{4G(1 + 3 \cos^2 \theta) L^2 t^2}{\pi^2 E b^4}} - \sin \theta \right] \quad (8)$$

式中:  $L$  为梁的长度;  $b, t$  分别为角钢截面的肢宽与厚度.当  $\theta = 0$  时对应于绕主轴  $u$  轴弯曲,式(8)可简化为

$$M_{cr} = \frac{\sqrt{2} \pi b^2 t^2 \sqrt{EG}}{6L} \quad (9)$$

绕几何轴弯曲时,有 2 种情况,肢尖受最大压应力与肢尖受最大拉应力,分别对应于  $\theta = 45^\circ$  和  $\theta = -45^\circ$ .

### 2.1 美国规范的规定

利用以上理论,2000 年 AISC 编制的《单角钢构件设计规范》<sup>[11]</sup>中规定了单角钢构件受弯时的设计方法,并在钢结构规范 2005 版<sup>[12]</sup>、2010 版<sup>[2]</sup>中一直采用(只是形式上略有改变).

依据 AISC360<sup>[2]</sup>,单角钢构件受弯时的名义承载力  $M_n$  取截面屈服、侧扭屈曲、局部屈曲 3 种极限状态时的最小者,即:

1) 截面屈服极限状态,名义承载力取为屈服弯矩  $M_y$  的 1.5 倍.

2) 按式(9)计算出弹性临界弯矩  $M_{cr}$  后,乘以系数  $C_b$  以考虑弯矩沿梁纵向的分布情况,得到弹性侧扭承载力理论值  $M_e$ . 名义承载力  $M_n$  为  $M_e, M_y$  的函数,公式如下:

$M_e \leq M_y$  时

$$M_n = \left( 0.92 - \frac{0.17 M_e}{M_y} \right) M_e \quad (10)$$

$M_e > M_y$  时

$$M_n = \left( 1.92 - 1.17 \sqrt{\frac{M_y}{M_e}} \right) M_y \leq 1.5 M_y \quad (11)$$

当无阻止扭转屈曲的约束时,  $M_y$  乘以折减系数 0.8. 当最大弯矩点处有阻止扭转屈曲的约束时,将  $M_e$  乘以放大系数 1.25.

3) 当肢尖受压时应考虑局部屈曲极限状态,按以下规定确定  $M_n$ :

截面的分肢属于半厚实时

$$M_n = f_y W_c \left[ 2.43 - 1.72 \left( \frac{b}{t} \right) \sqrt{\frac{f_y}{E}} \right] \quad (12)$$

截面的分肢属于薄柔时

$$M_n = \frac{0.71 E}{\left( \frac{b}{t} \right)^2} W_c \quad (13)$$

式中:  $W_c$  为按受压最大纤维求出的弹性截面模量,当绕几何轴弯曲没有侧扭约束时,乘以折减系数 0.8.

### 2.2 英国规范的规定

BS5950 规定,单角钢截面构件受弯时,侧扭屈

曲抗力验算可以采用简化方法或基本方法. 简化方法的适用条件是: 等肢单角钢绕几何轴  $x$  轴弯曲, 且满足  $b/t \leq 15\varepsilon$ . 此时, 侧扭屈曲的验算公式为

$$M_x \leq M_b / m_{LT} \quad (14)$$

肢根受压时

$$M_b = 0.8f_y W_x \quad (15)$$

肢根受拉时

$$M_b = f_y W_x \left( \frac{1.350\varepsilon - l_{0v}/i_v}{1.625\varepsilon} \right) \leq 0.8f_y W_x \quad (16)$$

式中:  $\varepsilon = \sqrt{275/f_y}$ ;  $m_{LT}$  为侧扭屈曲的等效均匀弯矩系数;  $W_x$  为绕  $x$  轴的较小截面模量;  $l_{0v}$ 、 $i_v$  分别为绕  $v$  轴的计算长度与回转半径.

基本方法则是将弯矩向 2 个主轴方向 ( $u$  轴和  $v$  轴) 分解, 然后按双向受弯进行验算. 需要首先求出等效长细比, 对于等肢角钢, 公式为

$$\lambda_{LT} = 2.25 \sqrt{\phi_a \lambda_v} \quad (17)$$

$$\phi_a = \sqrt{\frac{W_u^2 \left( 1 - \frac{I_v}{I_u} \right)}{AJ}} \quad (18)$$

式中:  $W_u$  为绕  $u$  轴的截面模量;  $I_u$ 、 $I_v$  分别为绕  $u$ 、 $v$  轴的惯性矩;  $A$  为角钢截面积;  $J$  为扭转常数;  $\lambda_v$  为绕  $v$  轴的长细比. 然后, 由  $\lambda_{LT}$  算出弯曲强度  $p_b$  (相当于稳定系数乘以屈服强度), 进而根据截面的等级 (分为 1、2、3、4 共 4 个等级) 选用塑性截面模量、弹性截面模量或有效弹性截面模量得到  $M_b$ . 双向受弯应满足以下要求:

$$\frac{m_u M_u}{f_y W_u} + \frac{m_v M_v}{f_y W_v} \leq 1 \quad (19)$$

$$\frac{m_{LT} M_{LT}}{M_b} + \frac{m_v M_v}{f_y W_v} \leq 1 \quad (20)$$

式中:  $m_u$ 、 $m_v$  为受弯屈曲的等效均匀弯矩系数;  $M_{LT}$  为区段内绕主轴  $u$  的最大弯矩.

### 2.3 各国规范的对比

由于 EC3 和 GB50017 对单角钢构件的受弯承载力没有规定, 因此, 仅能对比 AISC360 和 BS5950, 可以发现:

1) AISC360 区分截面屈服、侧扭屈曲、局部屈曲 3 种极限状态以理论公式为依据给出设计受弯承载力, 在概念上十分明晰, 尤其符合“弹性理论值—考虑缺陷、非弹性并进行简化—设计值”的思路.

2) BS5950 给出的简化公式区分肢尖受拉与肢尖受压 2 种情况 (前者更有利), 使用方便. 而采用基本方法时, 由于  $v$  轴为非对称轴, 采用相当于“应力叠加”的方式处理 (见该规范第 I.3 条), 如此做

法并不能体现出肢尖受拉与肢尖受压的差别.

3) 计算表明, 与 AISC360 相比, BS5950 所得结果偏于保守.

## 3 国外单角钢构件承载力的研究进展

### 3.1 单角钢构件受弯

AISC360 中, 截面分类直接影响到受弯构件的承载力, 因此, 1997—2001 年, Earls 等<sup>[14-16]</sup> 以转动能力  $R = \frac{\theta_u}{\theta_p} - 1 \geq 3$  ( $\theta_u$  为卸载段对应于塑性铰弯矩  $M_p$  时的转角,  $\theta_p$  为第 1 次达到塑性铰弯矩时的转角) 作为受弯状态下“厚实”截面的判定标准, 对单角钢截面梁的性能进行研究, 发现:

1) 对于如图 3 所示的 4 种荷载受力情况, 情况 2、情况 4 时所有热轧角钢属于厚实截面, 情况 1、情况 3 相对不利,  $\lambda_p$  可分别取为 14、13 (分肢的宽厚比  $\lambda = b/t \leq \lambda_p$  时为厚实截面)<sup>[14]</sup>.

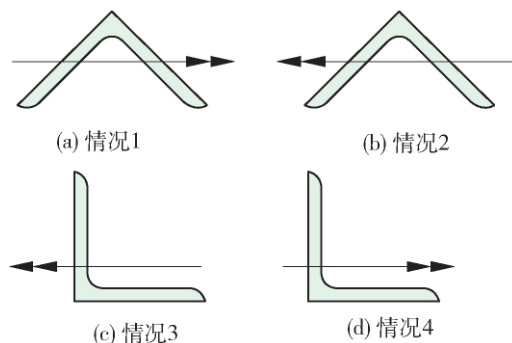


图 3 单角钢梁承受弯矩

Fig. 3 Single angle flexural orientations

2) 单角钢梁绕强轴承受弯矩作用时, 可取

$$\lambda_p = -0.075 \left( \frac{L_b}{i_v} \right) - 2.900 \left( \frac{f_y}{E} \right) + 20$$

式中  $L_b$  为梁的无支长度. 同时, 利用 ABAQUS 软件分析发现, 单角钢梁截面受力状态可达全塑性, 将截面承载力取为  $1.5M_y$ , 属于严重低估<sup>[15]</sup>.

3) 当弯矩按情况 3 作用时, ABAQUS 软件分析结果表明, “厚实”的判别准则应包含板件宽厚比、构件长细比与屈服强度共 3 个因素, 回归分析得到的适用于  $6 \leq b/t \leq 20$  且  $276 \text{ MPa} \leq f_y \leq 552 \text{ MPa}$  的界限值为<sup>[16]</sup>

$$\frac{L_b}{i_v} = \frac{310.5}{f_y} \left[ -0.1258 \left( \frac{b}{t} \right)^3 + 6.46 \left( \frac{b}{t} \right)^2 - 111.72 \left( \frac{b}{t} \right) + 658.89 \right] \quad (21)$$

2002 年, Earls<sup>[17]</sup> 分析了等肢单角钢梁绕几何



轴受弯的性能. 利用 ABAQUS 软件分析发现, 梁端部刚度的变化对极限承载力的影响不明显, 故设计时无须考虑有效长度的差别.

2007年, Aydin等<sup>[18]</sup>研究了单角钢截面梁承受双向弯曲时的屈曲问题. 通过理论分析并结合自编程序, 给出了首次屈服弯矩( first yield moment)  $M_{yu}$ 、均布荷载作用下侧扭屈曲临界弯矩  $M_{ob}$  以及对最小主轴的名义抵抗弯矩  $M_m$  的量纲一系数表格, 简化了依据 AISC360 计算时的流程.

### 3.2 单角钢构件受压弯

2008年, Liu等<sup>[19]</sup>对28根等肢单角钢构件进行试验. 截面为  $51 \times 6.4$ , 按长度分成3组, 长细比分别是95、125、155, 除1个试件按轴心受压受力外, 其余均为单向偏心受压( 偏心距记作  $e_x$ 、 $e_y$  ), 如图4(a)所示. 观察发现, 仅  $e_y \neq 0$  时破坏形式为弯扭屈曲; 仅  $e_x \neq 0$  时破坏形式为弯曲屈曲. 将测得的最大破坏荷载与 AISC360 的2000版、2005版以及 Adluri & Madugula 公式比较发现, 与2005版的预测值最为接近( 试验值/预测值平均为1.09 ).

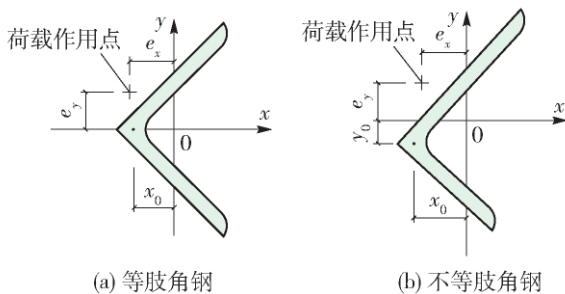


图4 单角钢构件受压时的偏心距

Fig. 4 Eccentrically loaded single-angle strut

2009年, Aydin<sup>[20]</sup>对两端简支等肢单角钢压弯构件进行了理论分析. 以承受沿几何轴的均布荷载情况为例, 给出了计算公称承载力的步骤. 构件的承载力应从4个方面考虑: 截面某点达到屈服( 文中称作“首次屈服”); 全截面达到塑性; 侧扭屈曲和局部屈曲. 并将弯矩形式的承载力制作成量纲一的系数表格. 算例表明, AISC360 中将全截面屈服承载力取为  $1.5M_y$ , 偏于保守.

2011年, Liu等<sup>[21]</sup>对26根不等肢单角钢构件进行试验. 截面为  $76 \times 51 \times 6.4$ , 按长度分成2组, 分别是1200 mm和1800 mm, 除5根试件为轴心受压外, 其余均为单向偏心受压. 试验同样发现, 绕强轴( 图4中的  $x$  轴) 发生弯扭屈曲, 绕弱轴发生弯曲屈曲. 试验中还发现一个奇怪的现象, 当  $e_y$  为负值时(  $e_y$  见图4 ), 承载力甚至会高于轴心受压时.

将试验值与 AISC360 的2005版以及直接强度法的预测结果对比, 发现与后者更为接近( 试验值与预测值之比平均为1.11 ). 前者预测值偏低的原因是:

- 1) 没有认识到绕强轴弯曲时, 弯矩为有利影响.
- 2) 角钢的截面受弯承载力取为  $1.5M_y$ , 偏于保守.

2011年, Aydin<sup>[22]</sup>对18根  $100 \times 10$  的单角钢构件进行了试验研究. 按受力状况分为3组: 2根轴心受压, 4根受弯, 12根压弯. 弯矩由作用于跨中的集中力( 沿几何轴) 产生. 将 ABAQUS 软件、EC3、AISC360( 2005版) 以及作者方法4种结果与试验数据对比, 发现最接近的排序为: ABAQUS 软件、AISC360、作者方法、EC3. 由于压力会引起二阶效应, Aydin 建议规范应增加对轴压力的限制. 无论 EC3 还是 AISC360 都认为截面尺寸为  $100 \times 10$  的单角钢构件不会发生局部屈曲, 但是, 试验中跨度为1000~1500 mm 的一些试件观察到了局部屈曲. 由于偶然的局部屈曲仍然在规范的安全范围内, 因而设计中可不必考虑.

## 4 中国单角钢构件承载力的研究进展

中国对单角钢构件承载力的研究目前仅针对受压( 包括单面连接情况). 对受弯性能的研究, 截至本文写作时尚未见到.

### 4.1 单角钢轴心压杆

《钢结构设计规范》TJ 17—74<sup>[23]</sup>对单角钢轴心压杆并无特殊的规定, 因此, 只考虑绕最小回转半径轴的弯曲屈曲.

1982年, 沈祖炎等<sup>[24]</sup>将单角钢压杆视为双向压弯构件, 考虑初弯曲和残余应力的影响后采用有限元分析, 得到了杆件的  $\lambda-\varphi$  曲线. 计算表明, 等肢单角钢计算结果与规范结果相一致, 当单角钢为不等肢截面时, 规范方法偏于不安全.

《钢结构设计规范》GBJ 17—88<sup>[25]</sup>中柱子曲线改为3条. 对于单角钢轴心压杆, 仍按绕最小回转半径轴的弯曲屈曲计算长细比, 稳定系数按柱子曲线 b 确定.

2000—2001年, 陈绍蕃<sup>[26-27]</sup>指出对单轴对称截面轴压杆有必要做弯扭屈曲分析, 并利用“稳定承载力相等”原则, 将复杂的弯扭屈曲简化为以弯曲屈曲形式表达, 具体表现为“换算长细比”的计算公式. 该公式后被正式写入《钢结构设计规范》GB

50017—2003.

2004 年 郭兵<sup>[28]</sup> 根据角钢截面特性的规律性和弹性稳定理论,推导了等边角钢和非等边角钢长细比简化计算公式和屈曲条件,得到了较为实用的公式.

2010 年 陈绍蕃等针对文献 [29] 报道的 Q460 钢单角钢压杆试验,研究了采用 Q420、Q460 等高强度钢材时单角钢压杆的宽厚比限值问题以及稳定承载力<sup>[30]</sup>. 基于“板件临界屈曲应力 =  $f_y$ ”和“板件临界屈曲应力 = 构件整体的临界应力”准则,单角钢压杆的宽厚比限值可取为

$$w/t \leq \max(15 \sqrt{235/f_y}, 5 \sqrt{235/f_y} + 0.135\lambda_v) \quad (22)$$

式中  $w = b - 2t$ . 当  $w/t > 15 \sqrt{235/f_y}$  时,应采用“有效屈服强度法”计算屈曲后压杆的整体稳定承载力,有效屈服强度  $f_{ye} = \rho f_y$ ,折减系数  $\rho$  以板件的通

用高厚比  $\lambda_p = \frac{w/t}{16.75} \sqrt{\frac{f_y}{235}}$  求出;确定稳定系数  $\varphi$  时

需将长细比乘以  $\sqrt{\rho}$ . 利用以上原则对文献 [29] 中的杆件进行计算并与试验结果对比,发现符合程度高于美国规范《输电铁塔设计导则》ASCE 10—97<sup>[31]</sup>.

#### 4.2 单面连接的单角钢压杆

中国规范中,单面连接单角钢受压构件承载力按照轴心受压构件计算但应将强度乘以折减系数.

在 TJ 17—74 中<sup>[23]</sup> 对折减系数的规定为:计算强度和连接时取为 0.85;计算稳定性时,若  $\lambda \leq 100$  取为 0.7,若  $\lambda \geq 100$  取为 1.00,对于中间无联系的单角钢压杆  $\lambda$  按最小回转半径求出.

1982 年 沈祖炎<sup>[24]</sup> 将单面连接的单角钢压杆视为双向压弯构件,采用有限元分析,并考虑初弯曲和残余应力的影响,得到了杆件的  $\lambda-\varphi$  曲线. 研究发现,若以回转半径  $i_{\min}$  (即  $i_v$ ) 求算稳定系数,在长细比相同情况下,不等肢角钢长肢外伸(即短肢相连)时,会比等肢角钢承载力更高.

GBJ17—88<sup>[25]</sup> 继承了 TJ 17—74 的做法,只是对稳定计算时的强度折减系数加以细分,区分截面为等肢还是不等肢以及哪一肢相连.

GB50017—2003 保留了 GBJ17—88 的做法,同时增加了专为单面连接单角钢而规定的 5.1.2 条第 4 款,采用考虑了弯扭效应的“换算长细比” $\lambda_{uz}$  计算( $u$  轴为与节点板平行的几何轴). 实践中,这一体现了规范的发展方向的作法却极少被采用,其原因是,该条的注释 2 允许对单面连接单角钢采用“不

考虑弯扭效应而只折减强度”的方法,而后者显然更简便(文献 [32] 甚至认为  $\lambda_{uz}$  的规定无意义,应删去).

2008 年 陈绍蕃<sup>[33]</sup> 以  $a_g = t_g/b$  ( $t_g$  为节点板厚度  $b$  为连接肢的宽度) 衡量节点板对杆端的约束,认为在一定的条件下,“等效长细比”可按以下公式计算:

$$20 \leq \bar{\lambda}_x \leq 80 \text{ 时} \quad \bar{\lambda}_e = 76 + 0.7\bar{\lambda}_x \quad (23)$$

$$80 < \bar{\lambda}_x \leq 140 \text{ 时} \quad \bar{\lambda}_e = 36 + 1.2\bar{\lambda}_x \quad (24)$$

式中:  $\bar{\lambda}_x = \frac{l}{i_x} \sqrt{\frac{f_y}{235}}$   $x$  轴为与连接肢平行的形心轴.

求得的  $\bar{\lambda}_e$  按柱子曲线 b 确定稳定系数  $\varphi$  且不考虑屈服强度的调整. 这一点有利于高强度钢材的合理利用.

2010 年 陈绍蕃等<sup>[30]</sup> 针对其在 2008 年的研究成果进行了部分修正,将单面连接单角钢压杆的等效长细比改为

$$20 \leq \bar{\lambda}_x \leq 80 \text{ 时} \quad \bar{\lambda}_e = 76 + 0.7\bar{\lambda}_x \quad (25)$$

$$80 < \bar{\lambda}_x \leq 160 \text{ 时} \quad \bar{\lambda}_e = 52 + \bar{\lambda}_x \quad (26)$$

式中:  $\bar{\lambda}_x$  由有效屈服强度  $f_{ye}$  算出

$$\bar{\lambda}_x = \frac{l}{i_x} \sqrt{\frac{f_{ye}}{235}} = \rho_a f_y$$

折减数  $\rho_e$  依据

$$\lambda_{pe} = \frac{w/t}{14} \sqrt{\frac{f_y}{235}}$$

确定. 据此得到的承载力与文献 [34] 所报道的试验数值对比,一致性优于美国《输电铁塔设计导则》ASCE10—97. 其后,在文献 [35] [36] 中一直采用此方法.

中国行业标准《架空送电线路杆塔结构设计技术规定》DL/T 5154—2012<sup>[37]</sup> 规定中两端单面连接单角钢长细比修正系数为  $0.5 + 60/(L_0/r)$ . 式中:  $L_0$  为按照不同布置所得的计算长度;  $r$  为相应的回转半径. 为计及局部屈曲的不利影响,强度  $f$  应乘以折减系数,折减系数取值与美国《输电铁塔设计导则》ASCE 10—97 一致. 稳定系数按《钢结构设计规范》中的柱子曲线 b 确定.

## 5 结论

综上所述,中国对于单角钢构件稳定承载力的

研究尚有很多不完善甚至空白之处. 因此, 笔者建议, 今后需在以下几个方面展开工作:

1) 对单角钢梁的承载力进行深入的试验与理论研究. 可借鉴 AISC360 的思路, 从单角钢梁承受均匀弯矩情况下的弹性临界弯矩入手, 通过试验数据对其加以修正得到设计用的实用公式.

2) 考虑到力学模型的统一以及规范体系的一致性, 宜将单角钢分肢、工字钢与槽钢截面的自由外伸翼缘三者都视为“非加劲板”, 在宽厚比超限后采取类似方法处理, 但计算模型应考虑板件之间约束的强弱.

3) 将局部稳定和整体稳定验算统一为一种, 即构件承载力验算. 这可以通过对截面划分等级, 直接给出考虑了局部屈曲影响的构件承载力计算公式实现, 如此, 可以避免因采用高强度钢材导致宽厚比超限而无法使用的情况.

#### 参考文献:

[1] 北京钢铁设计研究总院. 钢结构设计规范: GB50017—2003 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.

[2] American Institute of Steel Construction. Specification for structural steel buildings [S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2010.

[3] European Committee for Standardization. Eurocode 3: design of steel structure—part 1-1: general rules and rules for buildings [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.

[4] British Standards Institution. British standard: structural use of steelwork in building—part 1: code of practice for design rolled and welded sections [S]. London: British Constructional Steelwork Association, 2001.

[5] ZIEMIAN R D. Guide to stability design criteria for metal structures [M]. 6th Ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2010.

[6] TIMOSHENKO S P, GERE J M. Theory of elastic stability [M]. New York: McGraw-Hill, 1961.

[7] 陈骥. 钢结构稳定理论与设计 [M]. 第 6 版. 北京: 科学出版社, 2014.

[8] American Institute of Steel Construction. Specification for structural steel buildings—allowable stress design and plastic design [S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 1989.

[9] American Institute of Steel Construction. Load and resistance factor design specification for structural steel buildings [S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 1993.

[10] American Institute of Steel Construction. Load and resistance factor design specification for structural steel buildings [S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 1999.

[11] American Institute of Steel Construction. LRF design specification for the design of single-angle members [S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2000.

[12] American Institute of Steel Construction. Specification for structural steel buildings [S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2005.

[13] European Committee for Standardization. Eurocode 3: design of steel structure—part 1-5: plated structural elements [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2006.

[14] EARLS C J, GALAMBOS T V. Design recommendations for equal leg single angle flexural members [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1997, 43(1/2/3): 65–85.

[15] EARLS C J. On single angle major axis flexure [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1999, 51(1): 81–97.

[16] EARLS C J. Single angle geometric axis flexure compactness criteria: horizontal leg tension [J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(6): 616–624.

[17] EARLS C J. On the notion of effective length for single angle geometric axis flexure [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2002, 58(1): 1195–1210.

[18] AYDIN R, DOGAN M. Elastic, full plastic and lateral torsional buckling analysis of steel single-angle section beams subjected to biaxial bending [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(1): 13–23.

[19] LIU Y, HUI L. Experimental study of beam-column behaviour of steel single angles [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(5): 505–514.

[20] AYDIN R. Analysis of equal leg single-angle section beams subjected to biaxial bending and constant axial compressive force [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(2): 335–341.

[21] LIU Y, CHANTEL S. Experimental study of steel single unequal-leg angles under eccentric compression [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(6): 919–928.

[22] AYDIN R. Experimental and code based study of beam-column behaviour of equal leg single-angles [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(2): 780–789.

[23] 北京钢铁设计院. 钢结构设计规范: TJ17—74 [S]. 北京: 冶金工业出版社, 1975.



- [24] 沈祖炎,胡学仁. 单角钢压杆的稳定计算[J]. 同济大学学报,1982(3): 56-71.  
SHEN Z Y, HU X R. Ultimate strength of single angle columns[J]. Journal of Tongji University, 1982(3): 56-71. (in Chinese)
- [25] 北京钢铁设计研究总院. 钢结构设计规范: GBJ17—88[S]. 北京: 中国计划出版社,1988.
- [26] 陈绍蕃. 角钢、剖分 T 型钢压杆的弯扭屈曲(1)[J]. 钢结构,2000,15(4): 47-49.  
CHEN S F. Flexural-torsional buckling of angle and cut-T struts(1)[J]. Steel Construction, 2000, 15(4): 47-49. (in Chinese)
- [27] 陈绍蕃. 角钢、剖分 T 型钢压杆的弯扭屈曲(2)[J]. 钢结构,2001,16(1): 46-47.  
CHEN S F. Flexural-torsional buckling of angle and cut-T struts(2). Steel Construction, 2001, 16(1): 46-47. (in Chinese)
- [28] 郭兵. 单角钢压杆的屈曲及稳定计算[J]. 建筑结构学报,2004(6): 108-111.  
GUO B. The buckling and stability calculation of single angle compression members[J]. Journal of Building Structures, 2004(6): 108-111. (in Chinese)
- [29] 范金凯. Q460 高强等边单角钢轴心受压杆件的理论与试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学,2009.  
FAN J K. Theoretical and experimental study on Q460 single equal-legged angle under axial compression[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009. (in Chinese)
- [30] 陈绍蕃,王先铁. 单角钢压杆的肢件宽厚比限值和超限杆的承载力[J]. 建筑结构学报,2010,31(9): 70-77.  
CHEN S F, WANG X T. Limiting width-thickness ration and strength of beyond-limit members for single angle struts[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(9): 70-77. (in Chinese)
- [31] American Society of Civil Engineers. Design of latticed steel transmission structures[S]. Reston: American Society of Civil Engineers, 1997.
- [32] 邱鹤年. 钢结构设计禁忌与实例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社,2009.
- [33] 陈绍蕃. 单边连接单角钢压杆的计算与构造[J]. 建筑科学与工程学报,2008,25(2): 72-78.  
CHEN S F. Calculation and construction of single-angle steel struts connected by one leg[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25(2): 72-78. (in Chinese)
- [34] 薛振农. Q460 高强角钢两端偏心压杆力学性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学,2009.  
XUE Z N. Research on mechanical properties of the Q460 high-strength angle struts eccentricity at both ends[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009. (in Chinese)
- [35] 陈绍蕃,申红侠. 论高强度钢压杆稳定计算中的屈服强度因数[J]. 建筑钢结构进展,2011,13(5): 1-5.  
CHEN S F, SHEN H X. Discussion on the yield strength factor in the stability calculation of high-strength steel struts[J]. Progress in Steel Building Structures, 2011, 13(5): 1-5. (in Chinese)
- [36] 陈绍蕃. 美国房屋钢结构规范几个问题的评论[J]. 建筑钢结构进展,2012,14(6): 57-62.  
CHEN S F. Comments on some issues of the american specification for structural steel buildings[J]. Progress in Steel Building Structures, 2012, 14(6): 57-62. (in Chinese)
- [37] 电力规划设计总院. 架空送电线路杆塔结构设计技术规范: DL/T 5154—2012[S]. 北京: 中国计划出版社,2012.

(责任编辑 郑筱梅)