



单角钢压杆的肢件宽厚比限值和超限杆的承载力

陈绍蕃, 王先铁

(西安建筑科技大学 结构工程与抗震教育部重点实验室, 陕西西安 710055)

摘要:在采用低碳素结构钢制作单角钢压杆时,肢件宽厚比限值不是需要关心的问题。现在高强度的 Q420 钢和 Q460 钢开始在输电塔架中应用,设计工作者不仅要关心宽厚比限值,还要了解超限杆的承载力应如何计算。单角钢压杆的受力情况分为轴压和偏压两类,它们对肢件宽厚比有不同的要求,但现有塔架设计的技术规定并未对此做出区分。根据理论分析和现有文献的试验结果,发现宽厚比限值对轴压单角钢和偏压单角钢有不同意义,分别是防止局部屈曲和防止整体失稳时抗扭性能过低。据此,分别提出两类杆件宽厚比限值和超限杆承载力的计算公式,计算了两批 Q460 单角钢压杆的承载力,与对应文献试验值符合较好。

关键词:单角钢压杆; 宽厚比限值; 超限杆; 局部屈曲; 弯扭屈曲

中图分类号:TU392.1 **文献标志码:**A

Limiting width-thickness ratio and strength of beyond-limit members for single angle struts

CHEN Shaofan, WANG Xiantie

(Key Laboratory of Structural and Aseismic Engineering of China Ministry of Education, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In the days structural carbon steel is widely used for single angle strut, the issue of limiting width-thickness ratio is not a major one. Nowadays, high strength steels Q420 and Q460 begin to be used in transmission towers, not only limiting width-thickness ratio, but also strength of beyond-limit members, are to be of concern to designers. Single angle struts are divided into two categories according to the force application, namely axial compression and eccentric compression. Their demand of width-thickness ratio is not the same, but current technical provisions do not distinguish the two cases. Based on theoretical analysis and experimental observation, this article revealed the different meanings of limiting width-thickness ratio to axially and eccentrically compressed angle struts: to prevent local buckling and to avoid excessively low resistance to twisting. Hence, two types of limiting width-thickness ratio and formula for beyond-limit strength calculation were suggested. These formulas correlate well with test results of two sets of Q460 single angle strut specimens.

Keywords: single angle strut; limiting width-thickness ratio; beyond-limit member; local buckling; flexural-torsional buckling

作者简介:陈绍蕃(1919—),男,浙江海盐人,教授。E-mail:chensf2@yahoo.com.cn
收稿日期:2009年9月

0 引言

单角钢压杆是塔架和轻型桁架常用的构件,按照构造情况的不同,分为轴压和偏压两种类型。塔架的主杆通常认为是轴压一类(虽然由于节点偏心也会引起一定弯矩),而单边连接的腹杆则属于偏压性质,并且在弯曲时伴随有扭转。这两类不同性质的压杆,在肢件宽厚比的问题上,应区别对待。

长期以来,由于角钢压杆大多采用 Q235 钢,而现行角钢规格中肢件宽厚比超过 15 的很少,人们普遍认为角钢压杆的局部稳定不是什么问题。GB 50017—2003《钢结构设计规范》(以下简称《规范》)中并没有明确规定单角钢压杆肢件宽厚比的限值。单边连接的单角钢简化为轴压杆计算其强度和稳定时,强度设计值都要进行折减,而肢件宽厚比限值是否需要加以考虑,并没有规定。当前,高强度钢材的应用越来越广泛, Q420 和 Q460 角钢已经在 750kV 和 1000kV 特高压输电塔中应用^[1]。钢材强度提高,不但防止局部失稳的肢件宽厚比限值需要探讨,还需要分析超限角钢的承载力,提出相应的计算公式。文[1]只对国内外三本有关的技术标准作出了比较和评论,没有提出新的计算公式;文[2]在等稳概念的基础上提出了肢件宽厚比限值的计算公式及和美国输电塔架标准类似的超限杆的强度折减系数,但没有用试验资料进行检验。最近,在西安建筑科技大学完成了两批 Q460 钢单角钢压杆试验,轴压者和两端偏心者各一批,文[3-4]给出了详细资料。文[4]还对现有计算公式进行了探讨,提出了肢件宽厚比限值和构件等效长细比的修正公式,但对超限杆的强度折减系数没有发表意见。

本文从理论和应用两方面出发,对两类单角钢压杆分别提出肢件宽厚比限值的计算公式和超限杆的有效屈服强度计算公式。这些公式和文[3-4]试验资料对比,符合程度很好。

1 轴压单角钢

1.1 肢件宽厚比限值

轴压杆的板件宽厚比限值由局部屈曲确定,并宜兼用屈服准则和等稳准则^[5]。等边角钢的肢属于一边自由三边简支的板,它的临界应力由式(1)计算。

$$\sigma_{cr,p} = \frac{0.425\pi^2 \sqrt{E} \eta \cdot \frac{t}{b} \eta^2}{12(1-\nu^2)} \quad (1)$$

式中: b 和 t 分别为板件宽度和厚度; E 和 ν 分别为钢材的弹性模量和泊松比; τ 为切线模量系数, $\tau = E_s/E$, 在弹性范围内, $\tau = 1$ 。

令临界应力等于钢材屈服强度 f_y , 并取 $\tau = 1$, 即可得到基于屈服准则的理想弹塑性板宽厚比限值:

$$b/t = 18.35 \sqrt{235/f_y}$$

考虑几何缺陷和残余应力的不利影响,把 18.35 降低为 15。对于热轧角钢,扣除圆角只计平板部分,则限值为(图 1):

$$\frac{w}{t} = 15 \sqrt{235/f_y} \quad (2)$$

$$w = b - r - t \approx b - 2t \quad (3)$$

式中, w 和 r 分别为角钢肢平板宽度和圆角半径,后者可以近似取为和厚度 t 相等。

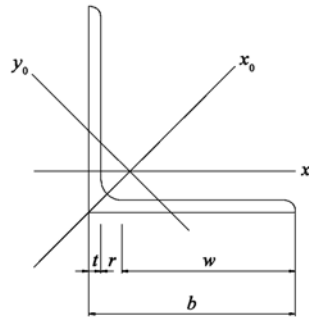


图 1 角钢肢的平板宽度

Fig. 1 Flat width of an angle leg

令式(1)的临界应力和杆件的临界应力相等,得出的 b/t 即为等稳准则的肢件宽厚比限值。考虑杆件几何缺陷对角钢肢应力分布的不利影响,在等式右端加上放大系数 α , 则有:

$$\frac{0.425\pi^2 \sqrt{E} \eta \cdot \frac{t}{b} \eta^2}{12(1-\nu^2)} \cdot \frac{1}{\alpha} = \alpha \frac{\pi^2 \tau E}{\lambda^2} \text{ 或 } \frac{b}{t} = \frac{0.197\lambda}{\sqrt{\alpha^4 \tau}} \quad (4)$$

式中, λ 为杆件的长细比,放大系数 α 的取值分析如下:

当杆件有矢高 $l/1000$ 的初弯曲时,中央截面上最大应力为(图 2):

$$\sigma = \frac{N}{A} \eta_1 + \frac{lA}{1000W_{y0}} \eta$$

取忽略圆角的近似值,截面面积 $A = 2bt$, 截面模量 $W_{y0} = \frac{\sqrt{2}}{6} b^2 t$, 则有:

$$\sigma = \frac{N}{A} \eta_1 + \frac{8.5l}{1000b} \eta$$

按长细比 $\lambda_{y0} = 120$ 的杆件计算,取忽略圆角的肢宽和回转半径的关系式 $b = 4.9i_{y0}$, 可知 $l/b = 24.5$, 则肢尖应力为 $\sigma_1 = 1.21N/A$, 角钢根部应力相应地为 $\sigma_2 = 0.79N/A$, 对应这一应力分布的肢件稳定系数 k , 按照 GB 50018—2002《冷弯薄壁型钢结构技术规范》^[6] 的公式计算,为: $k = 0.567 - 0.213 \times (0.79/1.21) + 0.071 \times (0.79/1.21)^2 = 0.458$ 。此值

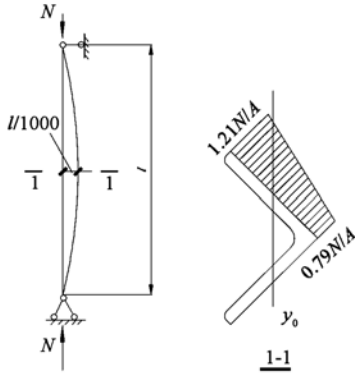


图2 杆件初曲对应力分布的影响

Fig. 2 Effect of initial crookedness on stress distribution

对应于最大应力 σ_1 , 化作对应于平均应力的值, 则成为: $k = 0.458/1.21 = 0.379$ 。

放大系数 α 应取为: $\alpha = 0.425/0.379 = 1.12$ 。

由于以上计算有近似性, 且未计及轴力与挠度的二阶效应, 把 α 增大到 1.2。这样, 式(4)成为:

$$\frac{b}{t} = \frac{0.18\lambda}{\sqrt[4]{\tau}} \quad (5)$$

式中, 切线模量系数 τ 由下式计算^[5]:

$$\tau = \lambda_n^2 [1 - \alpha_p (1 - \alpha_p) \lambda_n^2]$$

式中: λ_n 为正则化长细比, $\lambda_n = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{\lambda}{93} \sqrt{\frac{f_y}{235}}$;

α_p 为比例极限系数, $\alpha_p = (f_y - \sigma_{rc})/f_y$; σ_{rc} 为截面上残余压应力的最大值, 现有资料有取 $\sigma_{rc} = 0.3f_y$ 者, 也有取 $\sigma_{rc} = 0.25f_y$ 者。这里取 $\sigma_{rc} = 0.27f_y$, 则有:

$$\tau = \lambda_n^2 (1 - 0.2\lambda_n^2) \quad (6)$$

取不同的长细比 λ , 算得 τ 后代入式(5), 即可得到相应的肢件宽厚比限值, 考察这些值和 λ 之间的关系可以归纳出简化公式。用 w 取代 b 后为: $w/t = 5 \sqrt{235/f_y} + 0.135\lambda$, 此值不应小于式(2)计算值。

总结以上计算, 轴压单角钢压杆不产生局部屈曲的肢件宽厚比限值是:

$$\frac{w}{t} = \max(15 \sqrt{235/f_y}, 5 \sqrt{235/f_y} + 0.135\lambda_{y0}) \quad (7)$$

值得注意的是, 对于长细比超过 50 的高强钢压杆(Q345 钢 $\lambda_{y0} > 62$, Q460 钢 $\lambda_{y0} > 52$), 宽厚比限值并非全部按 $\sqrt{235/f_y}$ 折减, 这对高强钢的应用颇为有利。

1.2 超限压杆的承载力

对均匀受压的单角钢压杆来说, 超限是指超过不产生局部屈曲的肢件宽厚比限值, 超限承载力就是经常说的屈曲后强度。限值本应由式(7)确定, 但是此式有两个变量 f_y 和 λ_{y0} , 以它为基础计算将十分复杂。因此, 现在偏于保守地以式(2)为超限的准

则, 来推算超限杆的承载力。

屈曲后强度计算通常以正则化肢件宽厚比 $\lambda_p = \sqrt{f_y/\sigma_{cr,p}}$ 为参变量, $\sigma_{cr,p}$ 为板件弹性临界应力, 即式(1)在 $\tau = 1$ 时给出的数值。以 w 取代 b 后, 得:

$$\lambda_p = \frac{w/t}{18.35} \sqrt{\frac{f_y}{235}}$$

为了考虑初始缺陷的不利影响, 对式(1)的 $\sigma_{cr,p}$ 除以 1.2 进行折减, 则有:

$$\lambda_p = \frac{w/t}{16.75} \sqrt{\frac{f_y}{235}} \quad (8)$$

可以考虑在式(8)中用杆件临界应力 $\sigma_{cr} = \varphi f_y$ 代替式中的 f_y , 但是, 既然肢件宽厚比限值采用不和杆件长细比挂钩的式(2), 这里也不引进杆件稳定系数 φ 。

计算杆件的屈曲后强度, 最初采用的是有效截面法, 现在逐渐被有效屈服强度法所取代^[7]。为此, 这里采用后一方法, 有效屈服强度由式(9)给出。

$$f_{ye} = \rho f_y \quad (9)$$

式中, ρ 为屈服强度折减系数, 取值如下:

$$\rho = 1 \quad (\lambda_p \leq 0.89) \quad (10a)$$

$$\rho = \frac{1}{\lambda_p} \left[1 - \frac{0.10}{\lambda_p} \right] \quad (\lambda_p > 0.89) \quad (10b)$$

当 $\lambda_p = 0.89$ 时, 式(8)给出 $w/t = 14.9 \sqrt{235/f_y}$, 和式(2)计算结果基本相同。

超限压杆的承载力为:

$$N = \varphi A f_{ye} \quad (11)$$

其设计值则取为:

$$N = \varphi A \rho f \quad (12)$$

式(11)中不但用有效屈服强度 f_{ye} 代替 f_y , 而且在由《规范》表格查稳定系数 φ 时也要用 f_{ye} 取代 f_y , 即按 $\lambda \sqrt{f_{ye}/235}$ 查表。

1.3 计算值和试验值比较

文[3]报道的试验包括 4 种不同截面的试件, 即 L125 × 8, L125 × 10, L160 × 10 和 L160 × 12。钢材为 Q460, 实测屈服强度为 530MPa。4 种截面的肢件平板宽厚比分别为 13.6, 10.5, 14.0 和 13.3, 均超过 $15 \sqrt{235/530} = 10$ 。每种截面的试件各有 4 种长度, 按长细比 30, 45, 60 和 80 设计, 每种长度各有 3 根。开始试验时采用球铰支座, 由于球铰实际摩擦力太大, 未能起到铰的作用, 这部分试件的计算长度取几何长度之半。第二部分试件采用双刀口支座, 实现了铰接的试验意图。由于这些试件都是绕弱轴弯曲屈曲, 为了简单起见, 最后一部分试件采用平行于弱轴的单刀口支座, 这部分试件的计算长度为上端刀口线至下端刀口线的距离, 双刀口试件的计算长度为平行于弱轴的两刀口间的距离, 更大一些。

表1 给出 48 根试件试验承载力和由式(8),式(10), 式(11)计算得出的承载力的比较。Q460 的热轧型钢,残余压应力的峰值和钢材屈服强度的比大约只有 Q235 的一半。因此,在计算试件承载力时,稳定

表 1 Q460 单角钢轴压杆承载力建议公式和试验对比

Table 1 Comparison between suggested formulas and test results for axially compressed Q460 single angle strut

试件编号	A/cm^2	λ	λ_p	ρ	f_{ye}/MPa	$\lambda \sqrt{\frac{f_{ye}}{235}}$	φ	$N_c = A\varphi f_{ye}/\text{kN}$	$N_t/\text{kN}^{[3]}$	N_c/N_t	备注
12508C30-1	20.2	15.0	1.19	0.77	408	19.8	0.98	808	845	0.96	Q
12508C30-2	19.9	15.0	1.20	0.76	403	19.6	0.98	786	850	0.92	Q
12508C30-3	20.3	15.1	1.19	0.77	408	19.9	0.98	817	825	0.98	Q
12508C45-1	20.0	22.6	1.20	0.76	403	29.6	0.96	774	785	0.99	Q
12508C45-2	19.9	22.5	1.20	0.76	403	29.5	0.96	770	760	1.01	Q
12508C45-3	20.0	22.6	1.21	0.74	403	29.6	0.96	774	815	0.95	Q
12508C60-1	20.0	73.4	1.21	0.76	403	96.1	0.67	540	610	0.89	S
12508C60-2	20.1	73.4	1.20	0.76	403	96.1	0.67	543	725	0.75	S
12508C60-3	20.0	73.5	1.20	0.76	403	96.3	0.67	540	620	0.87	S
12508C80-1	19.8	93.4	1.22	0.75	398	121.5	0.48	378	360	1.05	S
12508C80-2	19.8	93.4	1.22	0.75	398	121.5	0.48	378	410	0.92	S
12508C80-3	20.0	93.4	1.20	0.76	403	122.3	0.48	387	520	0.73	S
12510C30-1	24.1	15.0	0.95	0.94	498	21.8	0.98	1176	1175	1.00	Q
12510C30-2	24.3	15.0	0.94	0.95	504	22.0	0.98	1200	1190	1.01	Q
12510C30-3	24.2	15.0	0.95	0.94	498	21.8	0.98	1181	1165	1.01	Q
12510C45-1	24.2	22.5	0.95	0.94	498	32.8	0.96	1157	1145	1.01	Q
12510C45-2	24.2	22.5	0.95	0.94	498	32.8	0.96	1157	1200	0.96	Q
12510C45-3	24.1	22.5	0.95	0.94	498	32.8	0.96	1152	1145	1.01	Q
12510C60-1	24.3	73.3	0.94	0.95	504	107.3	0.58	710	670	1.06	S
12510C60-2	24.4	73.2	0.94	0.95	504	107.2	0.58	713	705	1.01	S
12510C60-3	24.4	73.3	0.94	0.95	504	107.3	0.58	713	715	1.00	S
12510C80-1	24.2	93.2	0.95	0.94	498	135.7	0.40	482	500	0.96	S
12510C80-2	24.2	93.1	0.95	0.94	498	135.5	0.40	482	540	0.89	S
12510C80-3	24.4	93.1	0.94	0.95	504	136.3	0.40	492	505	0.97	S
16010C30-1	31.2	15.0	1.25	0.74	392	19.4	0.98	1199	1260	0.95	Q
16010C30-2	31.0	15.1	1.26	0.73	387	19.5	0.98	1176	1230	0.96	Q
16010C30-3	31.3	15.1	1.25	0.74	392	19.5	0.98	1202	1260	0.95	Q
16010C45-1	31.2	22.5	1.25	0.74	392	29.1	0.96	1174	1240	0.95	Q
16010C45-2	31.1	22.6	1.24	0.74	392	29.2	0.96	1170	1205	0.97	Q
16010C45-3	31.1	22.5	1.24	0.74	392	29.1	0.96	1170	1220	0.96	Q
16010C60-1	31.2	70.6	1.24	0.74	392	91.2	0.70	853	1120	0.76	S
16010C60-2	31.3	70.4	1.25	0.74	392	90.9	0.71	871	1145	0.76	S
16010C60-3	31.1	66.0	1.24	0.74	392	85.2	0.75	914	1075	0.85	D
16010C80-1	31.2	86.0	1.24	0.74	392	111.1	0.55	673	805	0.84	D
16010C80-2	31.3	86.0	1.24	0.74	392	111.1	0.55	675	810	0.83	D
16010C80-3	31.2	86.0	1.24	0.74	392	111.1	0.55	673	740	0.91	D
16012C30-1	36.9	40.5	1.02	0.88	466	57.0	0.89	1530	1875	0.82	S
16012C30-2	36.7	15.0	1.03	0.88	466	21.1	0.98	1676	1920	0.87	Q
16012C30-3	36.8	15.1	1.02	0.88	466	21.3	0.98	1681	1860	0.90	Q
16012C45-1	37.2	22.5	1.01	0.89	472	31.9	0.96	1686	1830	0.92	Q
16012C45-2	36.8	22.6	1.02	0.88	466	31.8	0.96	1645	1830	0.90	Q
16012C45-3	36.8	55.6	1.02	0.88	466	78.3	0.79	1355	1450	0.93	S
16012C60-1	36.8	66.2	1.02	0.88	466	93.2	0.69	1183	1315	0.90	D
16012C60-2	37.0	66.1	1.02	0.88	466	93.1	0.69	1190	1350	0.88	D
16012C60-3	36.8	66.2	1.02	0.88	466	93.2	0.69	1183	1460	0.81	D
16012C80-1	37.4	86.1	0.99	0.91	482	123.3	0.47	847	940	0.90	D
16012C80-2	37.7	85.1	1.00	0.90	477	121.2	0.49	881	895	0.98	D
16012C80-3	36.8	86.1	1.02	0.88	466	121.2	0.49	840	910	0.92	D

共计:48 根试件 N_c/N_t 平均值 0.92, 标准差 0.078

注:Q 代表球铰支座,S 代表双刀口支座,D 代表单刀口支座。

系数 φ 由《规范》的 a 类截面表 C-1 查得。由表 1 可见,除少数试件的计算值略大于试验值外,大多数都略低于试验值。计算值与试验值之比平均值为 0.92,标准差为 0.078,在可以接受的范围之内。文 [3] 还给出了这批试件的试验值和 ASCE 10-1997^[8] 计算值的比较,其符合程度不如本文推出的公式,其中设计长细比为 80 的 12 根试件中有 9 根高估了试件的承载力,高估幅度最大达 23.5%,不能满足可靠度要求。

1.4 不等边单角钢

不等边角钢承受大的轴线压力时,宽肢趋向于先屈曲,而窄肢对它提供约束,使局部失稳推迟。这种约束作用由约束系数 χ 来表达,宽肢的稳定系数由 0.425 提高为 0.425χ 。

现行不等边角钢规格的肢宽比,除 L100 × 80 为 1.25 外,其他规格均不小于 1.5。约束系数可以用 GB 50018—2002《冷弯薄壁型钢结构技术规范》^[6] 的公式进行计算:

$$\chi = \frac{1}{\sqrt{\xi}}, \quad \xi = \frac{c}{b} \sqrt{\frac{k}{k_c}} \quad (13)$$

式中: b 和 c 分别是计算板件的宽度和与计算板件邻接的板件宽度; k 和 k_c 是二者的稳定系数。由于 $k = k_c$, $b = 1.5c$, 可得:

$$\chi = \sqrt{1.5} = 1.22$$

因此,对应于式(2)的肢件宽厚比限值为 $\frac{w}{t} = 15 \sqrt{235/f_y} \times \sqrt{1.22} = 16.6 \sqrt{235/f_y}$, 比式(2)略大。此式可以用作不等边角钢长肢的宽厚比限值。

考虑到不等边角钢较少用于塔架和桁架,不妨把不等边角钢和等边角钢同样对待,也采用式(7)作为长肢的宽厚比限值,超限杆的承载力也采用和等边角钢同样的公式计算。

2 两端偏心的等边单角钢压杆

2.1 失稳模态的分析

中、大长细比的轴压单角钢,失稳时绕弱主轴弯曲,没有扭转变形。小长细比的轴压单角钢,尤其是用高强度钢材者,失稳时先出现扭转,然后才是弯曲变形。这里,扭转失稳和局部屈曲是等价的,扭转变形起因于肢件的局部屈曲。因此,如上节所述,轴压单角钢的肢件宽厚比限值按局部屈曲来处理。

两端承受偏心压力的单角钢,情况有所不同。单边连接的单角钢,在失稳前就会出现弯曲变形。弯曲轴大体上和连接边平行,同时还伴随有扭转。单角钢弯曲时,除绕弱主轴外,都会出现扭转^[9]。这

类扭转变形并不等同于肢件局部屈曲。

既然是弯扭屈曲,稳定承载力就不仅和抵抗弯曲屈曲的能力有关,也和抵抗扭转屈曲的能力有关。轴压单角钢的扭转屈曲临界应力是^[9]:

$$\sigma_\phi = \frac{1}{A} \cdot \frac{GI_t}{i_0^2} = \frac{GI_t}{I_p} = G \left(\frac{t}{b} \right)^2$$

式中: i_0 和 I_p 分别是绕剪心的回转半径和极惯性矩; G 和 I_t 分别是剪变模量和截面抗扭惯性矩。此式表明扭转屈曲的临界应力和肢件宽厚比的平方成反比。这就是说,宽厚比越大,则抵抗扭转失稳的能力越低。

把单边连接的单角钢压杆简化为轴线受压杆来计算,是当前设计工作中常用的手法。合理的简化方法是采用等效长细比^[10]。然而等效长细比并不能充分反映抗扭性能,对于肢件宽厚比较大的角钢,抗扭性能弱的特点需要在计算中有所考虑。因此,对这种两端有偏心力矩的单角钢,肢件宽厚比的限值和超限杆的承载力主要不是应对局部屈曲,而是和整体弯扭屈曲承载力密切关连。

2.2 肢件宽厚比限值

为了说明问题,先分析防止局部屈曲的需要。文[11]报道了桁架单边连接单角钢受压竖杆的受力分析。图 3 给出了竖杆中央截面应力分布,其中图 3a 为竖杆与斜杆连接在 T 形截面弦杆的同侧的工况;图 3b 为两杆连接在弦杆异侧的工况。为了计算方便,现在取图 3c 的分布进行分析:角钢的连接肢应力均匀分布,外伸肢则在肢尖处压应力为零。和这两种应力分布相对应的板件稳定系数分别是 0.425 和 1.70。连接肢趋于先屈曲而受到外伸肢的约束,约束系数仍按式(13)计算:

$$\chi = \frac{1}{\sqrt{\xi}} = \sqrt[4]{\frac{k_c}{k}} = \sqrt[4]{\frac{1.70}{0.425}} = 1.414$$

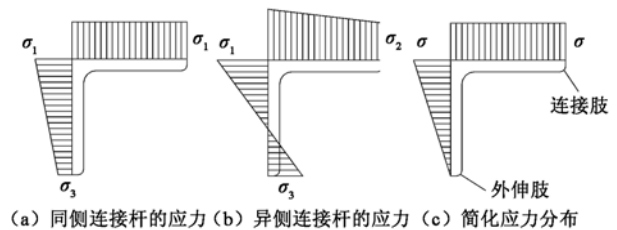


图 3 单角钢受压腹杆中央截面的应力分布

Fig. 3 Stress distribution at mid-section of single angle web members under compressive force

由于是压弯构件,角钢绕平行轴失稳时连接肢将进入塑性,因此,按照屈服准则确定肢件宽厚比限值。在式(1)中引进约束系数 χ 并取 $\tau = 1.0$,又以 w 代替 b , 得到:

$$\frac{w}{t} = 21.8 \sqrt{235/f_y}$$

和 1.1 节同样进行折减,得到肢件宽厚比限值:

$$\frac{w}{t} = 17.8 \sqrt{235/f_y} \quad (14)$$

式(14)值比轴压单角钢要大。试验表明,虽然肢件宽厚比并未超过此限,许多试件承载力还是受到肢件宽厚比的影响^[4]。因此,需要确定一个比式(14)小一些的宽厚比限值。《规范》第 5.1.2 条第 4 款给出单角钢压杆绕平行轴失稳时计及扭转效应的换算长细比的计算公式。两个公式的分界点出现在 $b/t = 0.69l_{0x}/b$; 当 b/t 小于此值时,扭转效应居于次要地位;当 b/t 大于此值时,扭转效应上升到主要地位。因此,单角钢肢件宽厚比的限值可以参照此值确定。取近似值 $b = 3.28i_x$, 得到 $\frac{b}{t} = 0.21\lambda_x$, $\lambda_x = l_{0x}/i_x$, 其中 l_{0x} 为杆件计算长度, i_x 为角钢绕平行轴的回转半径。

取 $\lambda_x = 70 \sqrt{235/f_y}$, 并略去小数点后的数字,又以 w 代替 b , 则:

$$\frac{w}{t} = 14 \sqrt{235/f_y} \quad (15)$$

式(15)经过和试验数据比较,是较合适的。

2.3 超限杆的承载力

仍然采用有效屈服强度法计算超限杆的承载力,但具体公式不同于轴压单角钢。这里,正则化宽厚比 λ_{pe} 和屈服强度折减系数 ρ_e 分别由式(16)~(17)计算。

$$\lambda_{pe} = \frac{w/t}{14} \sqrt{\frac{f_y}{235}} \quad (16)$$

$$\rho_e = 1.0 \quad (\lambda_{pe} \leq 1) \quad (17a)$$

$$\rho_e = 1.3 - 0.3\lambda_{pe} \quad (\lambda_{pe} > 1) \quad (17b)$$

由于偏压单角钢抗局部屈曲的能力较强,有效屈服强度随 λ_{pe} 下降的程度比式(10b)缓慢。超限压杆的承载力仍然可以用式(11)表达,即:

$$N = \varphi A f_{ye} = \varphi A \rho_e f_y$$

和轴压单角钢相比,另一个不同之处是稳定系数 φ 应考虑偏心力矩效应的等效长细比 $\bar{\lambda}_e$ 确定。按照文[10]的建议,等效长细比由两个公式给出,这里对第二个公式略加修改,两式分别是:

$$\bar{\lambda}_e = 76 + 0.7 \bar{\lambda}_x \quad (20 \leq \bar{\lambda}_x \leq 80) \quad (18a)$$

$$\bar{\lambda}_e = 52 + \bar{\lambda}_x \quad (80 < \bar{\lambda}_x \leq 160) \quad (18b)$$

其中 $\bar{\lambda}_x$ 为关于 x 轴的正则化长细比:

$$\bar{\lambda}_x = \frac{l}{i_x} \sqrt{f_{ye}/235} \quad (19)$$

由于 $\bar{\lambda}_x$ 的计算式中已经包含有屈服强度的修正,直接用 $\bar{\lambda}_e$ 由《规范》表格查稳定系数 φ , 不再需要乘 $\sqrt{f_{ye}/235}$ 再查表。

2.4 计算值和试验值的比较

文[4]报道的两端偏心单角钢压杆,也是 Q460 钢,共 4 种角钢规格,4 种不同长度。这 16 组试件,每组各 3 根,共 48 根试件,数量和文[3]相同,但角钢规格不尽相同,L140 × 12 代替了 L160 × 10。除了 4 根试件两端加设单刀口铰支座外,44 根试件不加任何支座设施,见图 4。表 2 给出这 44 根试件的试验承载力和按式(16)~(19)算得的承载力比较,计算时稳定系数 φ 由《规范》a 类截面表 C-1 查得。两端设铰支座的试件和桁架腹杆的实际情况不一致,不进行比较。由表 2 可见大多数试件的计算承载力都低于试验值,只有 E30 试件和 16012E45-2 试件计算值略高于试验值,高出的幅度不超过 5%,计算与试验值之比的平均值为 0.96,标准差为 0.054,表明符合程度很好。



图 4 单边连接单角钢压杆的试件

Fig. 4 Set-up of specimens of single angle strut connected by one leg

文[4]给出了这批试件的试验值和美国标准 ASCE10-1997 计算值的比较,和轴压构件不同的是,计算值普遍低于试验值,偏于保守的幅度最高达到 34%。美国标准对轴压和偏压的单角钢采取同一宽厚比限值和超限杆的有效屈服强度,或许是造成对两类试件都不能较精确地估计其承载力,并且产生不同方向偏差的原因。

3 结语

(1) 肢件宽厚比限值对轴压单角钢和偏压单角钢有不同的含义。对于前者,遵守限值是为了防止肢件局部屈曲;对于后者,则主要是为了不使构件抗扭性能太弱。强度很高的钢材,如 Q460,肢件宽厚比很容易超限,超限杆承载力的折减,两类角钢压杆也不相同。文中针对两类压杆的特点提出的两组等边角钢宽厚比限值和超限杆承载力的计算公式,计算结果与试验资料符合很好,可以推荐给修订规范时采用。

表 2 Q460 单角钢偏压杆承载力建议公式和试验对比

Table 2 Comparison between suggested formulas and test results for eccentrically compressed Q460 single angle strut

试件编号	A/cm^2	λ_x	f_y/MPa	λ_{pe}	f_{ye}/MPa	$\bar{\lambda}_x$	$\bar{\lambda}_e$	φ	$N_c = A\varphi f_{ye}/kN$	$N_t/kN^{[4]}$	N_c/N_t
12508E30-1	19.8	20.1	530	1.47	455.3	28.0	95.6	0.67	604	600	1.01
12508E30-2	19.9	20.1	530	1.46	456.9	28.0	95.6	0.67	609	602	1.01
12508E30-3	20.0	20.3	530	1.45	458.5	28.4	95.9	0.67	614	616	1.00
12510E30-1	23.9	20.2	555	1.19	523.4	30.1	97.1	0.66	826	800	1.03
12510E30-2	23.8	20.7	555	1.20	521.7	30.4	97.3	0.66	819	796	1.03
12510E30-3	23.9	20.3	555	1.19	523.4	30.3	97.2	0.66	826	788	1.05
14012E30-1	32.5	20.2	550	1.07	538.5	30.6	97.4	0.66	1155	1115	1.04
14012E30-2	32.6	20.2	550	1.07	538.5	30.6	97.4	0.66	1159	1180	0.98
14012E30-3	32.0	20.1	550	1.09	535.2	30.3	97.2	0.66	1130	1100	1.03
16012E30-1	38.0	20.0	545	1.23	507.4	29.4	96.6	0.66	1273	1228	1.04
16012E30-2	37.9	20.0	545	1.22	509.0	29.4	96.6	0.66	1273	1236	1.03
16012E30-3	37.7	20.0	545	1.24	505.8	29.3	96.5	0.66	1259	1200	1.05
12508E45-1	19.9	29.7	530	1.47	455.3	41.3	104.9	0.60	544	590	0.92
12508E45-2	19.8	29.7	530	1.47	455.3	41.3	104.9	0.60	541	570	0.95
12508E45-3	20.1	29.7	530	1.46	456.9	41.4	105.0	0.60	551	591	0.93
12510E45-1	24.0	29.8	555	1.19	523.4	44.5	107.2	0.58	729	754	0.97
12510E45-2	24.1	29.8	555	1.18	525.0	44.5	107.2	0.58	734	772	0.95
12510E45-3	23.8	29.8	555	1.19	523.4	44.5	107.2	0.58	723	735	0.98
14012E45-1	32.3	29.8	550	1.07	538.5	45.1	107.6	0.58	1009	1048	0.96
14012E45-2	32.4	29.7	550	1.07	538.5	45.0	107.5	0.58	1012	1040	0.97
14012E45-3	31.8	29.7	550	1.09	535.2	44.8	107.4	0.58	987	1025	0.96
16012E45-1	38.3	29.7	545	1.21	510.7	43.8	106.7	0.59	1150	1160	0.99
16012E45-2	38.6	29.6	545	1.21	510.7	43.6	106.5	0.59	1163	1136	1.02
16012E45-3	38.1	29.6	545	1.22	509.0	43.6	106.5	0.59	1144	1154	0.99
12508E60-1	19.8	39.5	530	1.47	455.3	55.0	114.5	0.53	478	528	0.91
12508E60-2	20.3	39.6	530	1.42	463.2	55.6	114.9	0.53	498	555	0.90
12508E60-3	20.3	39.4	530	1.43	461.6	55.2	114.6	0.53	497	562	0.88
12510E60-1	23.7	39.4	555	1.21	520.0	58.6	117.0	0.51	629	670	0.94
12510E60-2	23.9	39.3	555	1.20	521.7	58.6	117.0	0.51	635	670	0.95
12510E60-3	23.7	39.3	555	1.21	520.0	58.5	117.0	0.51	629	682	0.92
14012E60-1	32.5	39.4	550	1.07	538.5	59.6	117.7	0.51	893	995	0.90
14012E60-2	32.0	39.5	550	1.08	536.8	59.7	117.8	0.51	876	985	0.89
16012E60-1	38.7	39.1	545	1.21	510.7	57.6	116.3	0.52	1026	1035	0.99
16012E60-2	38.0	39.2	545	1.23	507.4	57.6	116.3	0.52	1003	1000	1.00
16012E60-3	38.7	39.2	545	1.20	512.3	57.9	116.5	0.52	1031	1035	1.00
12508E80-2	20.1	52.0	530	1.44	460.0	72.8	127.0	0.45	416	475	0.88
12508E80-3	20.1	52.1	530	1.45	458.5	72.8	127.0	0.45	415	475	0.87
12510E80-1	23.7	52.2	555	1.21	520.0	77.6	130.3	0.43	530	595	0.89
12510E80-2	24.1	52.2	555	1.18	525.0	78.0	130.6	0.43	544	590	0.92
14012E80-1	32.2	52.3	550	1.08	536.8	79.0	131.3	0.43	743	817	0.91
14012E80-2	32.2	52.2	550	1.08	536.8	78.9	131.2	0.43	743	865	0.86
14012E80-3	32.2	52.1	550	1.08	536.8	78.7	131.1	0.43	743	835	0.89
16012E80-2	38.4	52.0	545	1.21	510.7	76.7	129.7	0.44	863	915	0.94
16012E80-3	38.8	51.7	545	1.22	509.0	76.1	129.3	0.44	869	910	0.95

共计:44 根试件 N_c/N_t 均值 0.96, 标准差 0.054

(2) 均匀受压时, 轴压不等边单角钢的长肢受到短肢约束, 局部屈曲临界应力高于等边角钢, 因而肢件宽厚比限值大于后者。但是, 鉴于不等边角钢在轴压杆件设计中较少采用, 为了简单起见, 可以和等边角钢同样对待。偏压不等边角钢的工作状态随连接边不同而有差异, 有待今后进一步分析。

参 考 文 献

- [1] 施刚, 刘钊, 班慧勇, 等. 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, et al. 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))

- [2] 郝际平,范金凯,王先铁,等. 等边单角钢轴心压杆局部稳定计算问题的讨论[J]. 工业建筑,2009,39(6):22-24. (Hao Jiping, Fan Jinkai, Wang Xiantie, et al. Calculation investigation of local buckling stability for axially compressed single equal leg angle members[J]. Industrial Construction, 2009, 39(6): 22-24. (in Chinese))
- [3] 范金凯. Q460 高强等边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 Jinkai. Theoretical and experimental study on Q460 single equal-legged angle under axial compression[D]. Xi'an Xi'an University of Architecture & Technology, 2009. (in Chinese))
- [4] 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 Zhenong. Study on the behavior of high strength Q460 angle under eccentric compression at both ends[D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture & Technology, 2009. (in Chinese))
- [5] 陈绍蕃. 轴心压杆板件宽厚比限值的统一分析[J]. 建筑钢结构进展,2009,11(5):1-7. (Chen Shaofan. Unified analysis of limiting width-thickness ratio of plate elements in axially compressed members[J]. Progress in Steel Building Structures, 2009, 11(5): 1-7. (in Chinese))
- [6] GB 50018—2002 冷弯薄壁型钢结构技术规范[S]. (GB 50018—2002 Technical code of cold-formed thin-wall steel structures[S]. (in Chinese))
- [7] 陈绍蕃. 焊接薄壁箱形截面轴心压杆的承载力计算[J]. 建筑钢结构进展,2009,11(6):1-7. (Chen Shaofan. Capacity calculation of welded axially compressed members with thin-walled box section[J]. Progress in Steel Building Structures, 2009, 11(6): 1-7. (in Chinese))
- [8] ASCE 10-1997 Design of latticed steel transmission structures[S].
- [9] 陈绍蕃. 钢结构设计原理[M]. 第3版. 北京:科学出版社,2005. (Chen Shaofan. Principles of steel structure design[M]. 3rd Ed. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese))
- [10] 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 Shaofan. 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))
- [11] Woolcock S T, Kitipornchai S. The design of single angle struts[J]. Steel Construction, 1980, 14(4): 2-23.
- ★这篇论文在刊登前出现错误,需要参阅的读者请向《建筑科学与工程学报》编辑部索取此文的《更正》。