

文章编号:1000-582X(2010)01-0094-05

轴心受压 Q460 等边角钢局部屈曲稳定分析

李正良¹, 孟路希¹, 李茂华^{1,2}

(1. 重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045;
2. 中国电力科学研究院, 北京 100055)

摘要:对美国土木工程师协会 ASCE《输电铁塔设计导则》(简称《美国导则》)与中国的《架空送电线路杆塔结构设计技术规定》(DL/T 5154—2002)中热轧角钢宽厚比限值进行了探讨,并且比较了角钢局部屈曲失稳问题的不同方法得到的强度折减系数。通过六组不同长细比的等边角钢轴心受压试验,结果表明现行杆塔结构设计中采用 DL/T 5154—2002 标准计算方法得到的等边角钢强度折减系数是偏保守的。在借助有限元分析结果并结合我国的《钢结构设计规定》(GB 50017—2003)和《美国导则》的基础上,对《架空送电线路杆塔结构设计技术规定》中等边角钢的强度折减系数提出了修正建议。

关键词:Q460 钢;强度折减系数;宽厚比;稳定系数;局部屈曲

中图分类号: TM753

文献标志码: A

Analysis on local buckling of axially compressed Q460 single angle columns

LI Zheng-liang¹, MENG Lu-xi¹, LI Mao-hua^{1,2}

(1a. College of Civil Engineering; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of China in Mountainous Area, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100055, P. R. China)

Abstract: The limit value for the width-to-thickness ratio of the hot-rolled equilateral angle steel member from ‘Guide for design of transmission tower’ by American Society of Civil Engineers and ‘Technical Regulation of design for tower and pole structure of overhead transmission line’(DL/T5154-2002) in China is discussed. And the different method of dealing with local buckling instability of single angle columns is compared. With six group axial compressed test of different slenderness ratio, it is found that the current structural design standards DL/T5154-2002 used in the calculation of high-strength steel stability is conservative. According to finite element method(FEM), the strength subtraction coefficient under axial compression in DL/T5154-2002 is amended.

Key words: Q460 steel; intensity subtraction coefficient; the ratio of width to its thickness; stability coefficient; local buckling

长期以来,中国输电铁塔所用钢材局限于 Q235 和 Q345 两种强度等级,和国外先进国家相比,中国输电杆塔结构所用的钢材种类少、强度值偏低^[1-2]、可选择余地小。当杆塔荷载较大时,只能采

用组合截面来弥补材料强度低的不足,增大了设计、加工的工作量和投资。在中国第一条西北 750 kV 输电线路中成功采用了 Q420 高强钢,取得了较好的经济效益^[3],随着电网建设的加快和特高压电网

收稿日期:2009-10-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50678181);重庆大学“211 工程”三期创新人才培养计划建设项目(S09105)

作者简介:李正良(1963-),男,重庆大学教授,博士,博士生导师,主要从事结构工程方向的研究,(E-mail)lizhengli@hotmail.com。

的建设,更大范围地使用高强钢已成为共识,但要在我国输电线路铁塔中广泛地使用高强钢还需要开展大量的研究工作。由于中国目前尚无 Q460 高强钢在输电线路铁塔上应用的先例,中国《钢结构设计规范》^[4] (GB 50017—2003) 中只提到了 Q390 和 Q420,缺少必要的设计参数,在输电线路铁塔上使用 Q460 高强钢,需要开展一些必要的前期研究。为了给 1 000 kV 级交流输电线路工程杆塔方案设计和施工提供必要的支持,保障 1 000 kV 级交流输电线路工程的技术可靠性和经济性^[5-7],研究高强度钢材在输电铁塔上的应用,推广使用高强钢,可显著减少铁塔耗钢,可有效地节约资源和能源,有显著的经济效益和社会效益^[5-7]。铁塔结构的计算模型是空间桁架结构,构件的设计是按拉杆和压杆稳定计算,在采用高强度钢材的情况下,构件的界面尺寸相对较小,压杆的稳定将是结构承载力最为重要的影响因素。传统的设计理念为了保证角钢的整体稳定能力就希望角钢截面有较大的回转半径,以减小主材节间的长细比,从而提高其屈曲稳定系数,增加端面的承载能力,这样就希望采用肢宽与肢厚之比较大的角钢,但是当截面上的正应力较大时,肢边缘处会在杆件尚未发生整体失稳前先发生肢边缘处局部性的屈曲失稳,以致使杆件达不到预期的整体失稳的承载能力^[8]。由此设计者会对采用超高强钢材产生疑虑,使超高强钢材的推广应用成为一个障碍,因此不仅要对高强钢的整体稳定性能进行研究,还要对其局部稳定能力进行探讨。

1 Q460 角钢局部屈曲试验概况

1.1 试验加载装置及试验方法

为了保证试件轴心受压,且两端铰接,其试验加载装置如图 1。

其试验步骤如下:

1)角钢肢边缘贴应变片;

2)按 5% 级逐级加载,加载至 60%,回 0%,调整装置,第二次加载至破坏,根据应变片判断角钢肢的受力情况以便于了解局部屈曲失稳特征。

分析思路

$$m_N f = \frac{N}{\varphi A}; m_N = \frac{N}{f \varphi A},$$

其中: f 为 $\angle 125 \times 8$ 的屈服强度试验值; A 为根据试验杆件的重量得到的换算截面积; φ 为稳定系数。

1.2 试验样本点的选取

考虑到现有 Q460 角钢规格选取的局限性,该

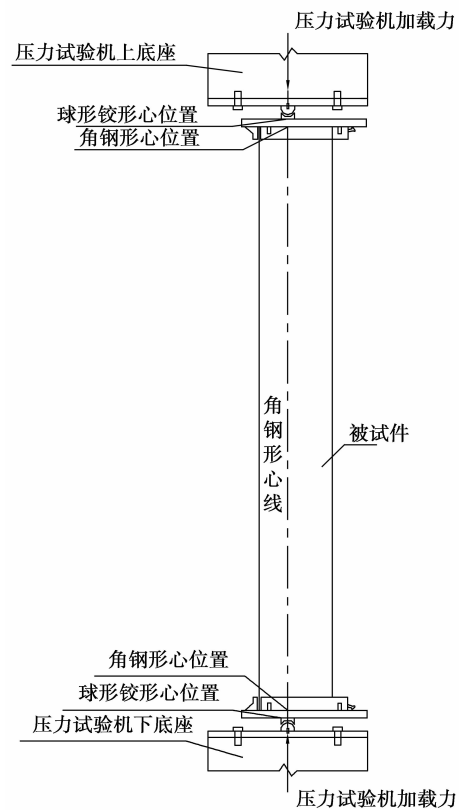


图 1 Q460 高强钢材局部屈曲试验装置工作原理示意图

次试验选取折减较大的角钢 $\angle 125 \times 8$ 为试验对象,进行轴心受压试验,研究其局部屈曲特征。试验样本见表 1。

表 1 Q460 局部屈曲试验样本

规格	样 本		备 注
	长细比	单根试件长度 /mm	
$\angle 125 \times 8$	30	750	1 组、每组 3 件
	45	1 123	1 组、每组 3 件
	60	1 500	1 组、每组 3 件
	70	1 750	1 组、每组 3 件
	80	2 000	1 组、每组 3 件
	100	2 500	1 组、每组 3 件

1.3 试验应变测点布置及说明

试验中构件为轴心受压试验,其试验目的是弄清楚在不同长细比情况下等边角钢的强度折减系数;在轴心受压试验中,为了较为准确的保证等边角钢是完全轴心受压在试验构件上粘帖应变片,根据

实测应变来对比两肢对称点的应变值,以符合构件轴心受压的条件;根据实测应变值,来掌握构件的受力情况,以及来判定构件达到失稳破坏的情况。应变测点的布置如图 2 所示,每肢上布置 3 个应变片,而且以构件中间处为中心,以 $0.5L$ (L 为角钢肢厚) 为间距,上下布置应变片,即在构件中部以及上下 $0.5L$ 和 L 处两肢对称布置应变片。根据实测应变值,来掌握构件的受力情况,以及来判定构件达到失稳破坏的情况。应变测点的布置如图 2 所示。

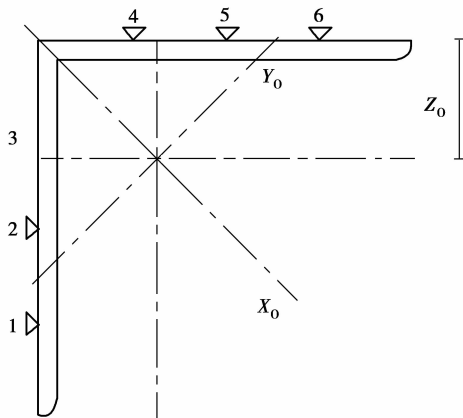


图 2 轴心受压应变测点布置

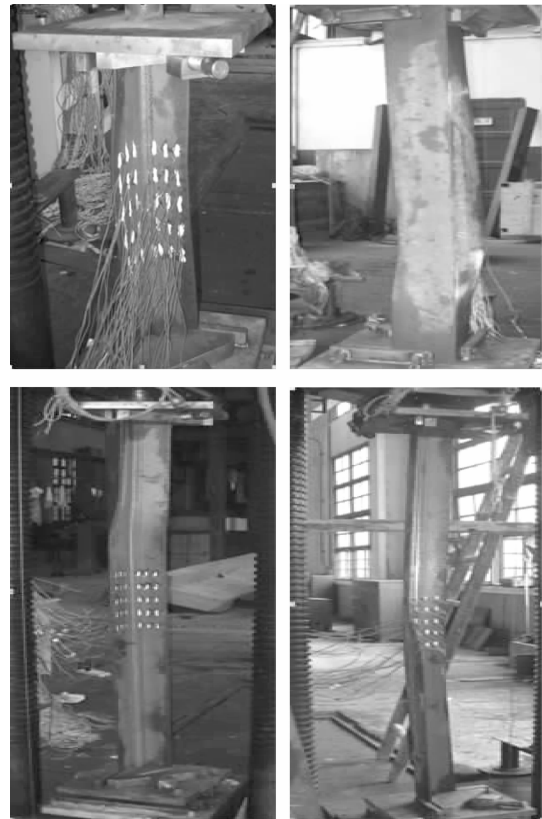


图 3 构件破坏形态

1.4 试验现象

从应变片的记录来看,中间肢边的地方最早进入屈服,然后向两边发展。在长细比为 30,45 时很明显,因为局部失稳先于整体失稳发生。在长细比为 60,70 时局部失稳几乎与整体失稳同时发生。在长细比为 80,100 时,构件的整体失稳并没有伴随有局部屈曲,因为长细比对构件的强度折减是有很大的影响的。轴心受压的角钢构件,长细比为 30,45 时失稳形态为绕最小轴的弯扭失稳,其它的构件失稳形态均为绕最小轴的弯曲失稳,中间压应力最大,最早进入塑性且该处塑性发展最快,中间的位移也最大。

2 局部失稳计算方法探讨

无论是在《钢结构设计规范》、《02 规定》还是在《美国导则》中,局部稳定问题都会涉及到肢宽与肢厚之比的问题,即 w/t 。当 $w/t \leq (w/t)_{lim}$ 时,角钢不会发生肢边缘处局部屈曲失稳的情况,因此计算时不必对此问题作考虑,按整体失稳作计算。当 $w/t \geq (w/t)_{lim}$ 时,角钢会发生肢边缘处的局部屈曲失稳。

2.1 《美国导则》计算方法

在《美国导则》^[10-14] 中

$$(w/t)_{lim} = 80 / \sqrt{f_y} \text{ (ksi 制)} =$$

$$80 \times 2.62 / \sqrt{f_y} = 210 / \sqrt{f_y},$$

当 $w/t \leq (w/t)_{lim}$ 时,不考虑局部屈曲失稳问题,其整体稳定计算方法为

$$\sigma = N/A \leq F_a = \varphi \cdot f_y,$$

其中: $\frac{kl}{r} \leq C_c$ 时, $\varphi = 1 - 0.5(kl/C_c)^2$; $\frac{kl}{r} > C_c$ 时,

$$\varphi = \frac{\pi^2 E}{(kl/r)^2} \text{ 且 } C_c = \pi \sqrt{2E/f_\sigma}; \text{ 当 } (w/t)_{lim} < w/t <$$

$$144 / \sqrt{f_y} \text{ (ksi 制)} = 380 / \sqrt{f_y}, \text{ 用 } f_\sigma \text{ 替代 } f_y,$$

$$f_\sigma = \left[1.677 - 0.677 \frac{w/t}{(w/t)_{lim}} \right] f_y, \text{ 即用降低屈服强度}$$

的方法处理,这时的允许使用应力为 $F_a = \varphi \cdot f_\sigma$ 。整体稳定计算方法为

$$\sigma = N/A \leq F_a = \varphi \cdot f_\sigma.$$

2.2 《架空送电线路杆塔结构设计技术规定》计算方法

《架空送电线路杆塔结构设计技术规定》^[15] (DL/T 5154—2002) (以后简称《02 规定》) 在轴心受压构件的稳定计算时,对角钢构件给出的压杆稳定强度折减方法如下

$$\frac{N}{\varphi A} \leq m_N f,$$

若宽厚比的最小限值为 $(\frac{w}{t})_{lim}$, 有

$$(\frac{W}{t})_{lim} = \frac{202}{\sqrt{f_y}} = 213 / \sqrt{f_y} \approx 210 / f_y,$$

那么, 当 $\frac{w}{t} \leq (\frac{w}{t})_{lim}$ 时, $m_N = 1.0$, 当 $(\frac{w}{t})_{lim} \leq \frac{w}{t} \leq \frac{363}{\sqrt{f_y}} = 380 / f_y$ 时, $m_N = 1.677 - 0.677 \frac{w/t}{(\frac{w}{t})_{lim}}$, 但没有考虑长细比对压杆稳定强度折减系数的影响。

2.3 《钢结构设计规范》计算方法

在《钢结构设计规范》^[4]中

$$(\frac{w}{t})_{lim} = (10 + 0.1\lambda) \sqrt{235/f_y}.$$

《钢规》对受宽厚比影响的杆件长细比限制在闭区间[30,100]内, 相当于人为规定了受宽厚比影响的杆件最大长细比值为 100, 该值与美国规范 $c_c = \pi \sqrt{\frac{2E}{f_y}}$ 所规定的限值相比, 除 Q235 的差异较大外 (为 131.54), 其余钢种均基本相同。

3 对《02 规定》中宽厚比限值及强度折减系数的修正建议

归纳前面的论述, 也鉴于《钢规》和美国规范对角钢宽厚比限值处理的一致性, 现建议《02 规定》对宽厚比的限值取值及其引起的强度折减方法如下。

对等边角钢, 根据其物理参数, 宽厚比 w/t 、有效长细比 $k\lambda$ (k 为长细比修正系数)。当 $k\lambda > 100$ 时, 不考虑宽厚比对杆件强度的影响, 且杆件的稳定屈服强度为

$$\sigma_{cr} = \frac{N}{\varphi A} \leq f,$$

当 $k\lambda \leq 100$, 且当 $k\lambda < 30$ 时, 取 $k\lambda = 30$, 按照下式来考虑宽厚比对杆件强度可能存在的影响;

$$\sigma_{cr} = \frac{N}{\varphi A} \leq f \cdot m_N.$$

式中, 对 m_N 的处理方法如下

取宽厚比的最小限值为

$$(\frac{w}{t})_{lim} = (10 + 0.1\lambda) \sqrt{235/f_y},$$

当 $\frac{w}{t} \leq (\frac{w}{t})_{lim}$ 时, $m_N = 1.0$, 当 $(\frac{w}{t})_{lim} \leq \frac{w}{t} \leq \frac{380}{\sqrt{F_y}}$

时, $(\frac{w}{t}) / (\frac{w}{t})_{lim}$ 。

需要说明的是, 这里仍沿用了美国规范在欧拉临界点对宽厚比的限值, 目的在于理论上的合理性, 实际中所用角钢杆件的宽厚比要远远小于此值。另外, 在美国规范中, 宽厚比的影响使得角钢的局部屈曲强度降低, 从而使 C_c 值增大, 因此, 宽厚比对 C_c 的影响是有利的。在这里, 由于采用《钢规》的轴心受压杆件稳定系数公式, 因而, 无法再去计及这样的有利作用。

表 2 为在宽厚比一定的情况下, 各种长细比时, 分别用试验方法、ANSYS 计算方法、建议方法和《02》规定的方法计算得到的强度折减系数值。

表 2 m_N 值不同计算方法的比较

λ	m_{N1}	m_{N2}	m_{N3}	m_{N4}	备注
30	0.856	0.775	0.739	0.79	
45	0.901	0.857	0.836	0.79	
60	0.972	0.953	0.915	0.79	试验值和 ANSYS 值取均值
70	0.999	0.984	0.960	0.79	
80	1	1	0.999	0.79	
100	1	1	1	0.79	

说明: $m_{N1}, m_{N2}, m_{N3}, m_{N4}$ 分别为试验值、ANSYS 值、建议值、《02》规定值, λ 为长细比。

图 4 为在宽厚比一定的情况下强度折减系数的关系曲线。图中建议方法为按强度折减修正建议方法计算的结果, ANSYS 的计算值为有限元计算值。

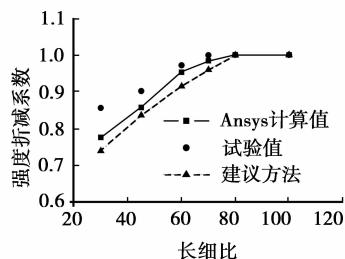


图 4 长细比与强度折减系数的关系曲线

从承载力结果中可以看出随着长细比的增大承载力逐渐减小, 这与规范中变化规律基本相符。从数值分析的结果与试验值的比较可以看出在长细比为 30, 45 时试验值比数值分析的结果大, 主要是试验的边界条件约束较大。随着长细比的增大两者结果比较接近, 且强度折减系数是随长细比而变化的, 并不是固定不变的, 建议采用公式 $M_N = 1.677 - \frac{8.7164}{7.1475 + 0.071475\lambda}$ 。

4 结 论

1) 宽厚比较大的角钢构件如 $L125 \times 8$, 在长细比较小时杆件局部失稳比整体失稳先发生, 降低了整体失稳的承载力。

2) 宽厚比限值 $(w/t)_{lim}$ 是角钢局部屈曲的重点, 当 $w/t < (w/t)_{lim}$ 时不用考虑局部屈曲对整体失稳的影响; 当 $w/t > (w/t)_{lim}$ 时要考虑局部屈曲对整体失稳的影响。《美国导则》、《02 规定》、《钢结构设计规范》有各自的计算方法。《美国导则》利用宽厚比折减后板的屈曲强度作为杆件整体稳定强度对应的材料屈服强度, 将角钢宽厚比的影响借助界限长细比 C_c 限定在一定范围, 而《02 规定》则直接采用材料强度设计值, 并且直接对稳定强度进行修正, 没有考虑杆件长细比对宽厚比的影响作用。

3) 《02 规定》在考虑角钢局部屈曲时, 使用系数 m_N 直接对强度设计值作降低修正而 φ 值不变, 控制过于严格, 对使用超高强钢不利, 且《02 规定》和《美国导则》的 $(w/t)_{lim}$ 值只与钢材的屈服强度有关, 而我国《钢结构设计规范》中的 $(w/t)_{lim}$ 值不仅与钢材屈服强度有关, 还与构件的长细比有关, 比较合理。

4) 宽厚比对杆件强度的影响主要集中在高强角钢杆件的小长细比范围内, 设计者应对该现象予以充分注意, 《02 规定》对热轧角钢宽厚比的折减方法欠妥, 建议按照推荐方法处理^[16-18]。

参考文献:

- [1] 何长华. 高强冷弯型钢在输电铁塔上应用可行性的探讨[J]. 钢结构, 2004, 19(74):35-37.
HE CHANG-HUA. Feasibility discussion on application of high-strength cold-formed section steel in transmission towers[J]. Steel Construction, 2004, 19(74):35-37.
- [2] 李茂华. Q420 和 Q460 高强钢在输电线路铁塔应用的研究[R]. 北京: 国网北京电力建设研究院, 2006.
- [3] 陈海波, 李振福. 西北电网 750KV 输变电工程关键技术研究-杆塔方案及荷载研究[R]. 北京: 国网电力建设研究所, 2002.
- [4] 《钢结构设计规范》编制组. 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
- [5] 李正良, 刘红军. Q460 高强钢在 1000 kV 杆塔上的应用研究[J]. 电网技术, 2008, 32(24):1-5.
LI ZHENG-LIANG, LIU HONG-JUN. Research on utilization of high-strength steel in 1000kV transmission towers[J]. Power System Technology, 2008, 32(24):1-5.
- [6] 袁清云. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2005, 29(14):1-3.

YUAN QING-YUN. Present state and application prospect of ultra HVDC transmission in China [J]. Power System Technology, 2005, 29(14):1-3.

- [7] 黄道春, 魏远航, 钟连宏, 等. 我国发展特高压直流输电中一些问题的探讨[J]. 电网技术, 2007, 31(8):6-12.
HUANG DAO-CHUN, WEI YUAN-HAHNG, ZHONG LIAN-HONG, et al. Discussion on several problems of developing UHVDC transmission in China [J]. Power System Technology, 2007, 31(8):6-12.
- [8] 舒印彪, 刘泽洪, 高理迎, 等. ± 800 kV 6400MW 特高压输电工程设计[J]. 电网技术, 2006, 30(1):1-8.
SHU YIN-BIAO, LIU ZE-HONG, GAO LI-YING, et al. A preliminary exploration for design of ± 800 kV UHVDC project with transmission capacity of 6400MW[J]. Power System Technology, 2006, 30(1):1-8.
- [9] 陈骥. 钢结构稳定理论与设计(第三版)[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [10] Standards Committee for Design of Steel Transmission Towers, American Society of Civil Engineers. Design of Latticed Steel Transmission Structures, ASCE 10-90[S]. New York: ASCE, 1992.
- [11] GALAMBOS T V. Guide to stability design criteria for metal structures [M]. 5th ed. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- [12] WOOLCOCK S T, KITIPORNCHAI S. Design of single angle web struts in trusses [J]. Journal of Structures Engineering, 1986, 112(6):1327-1345.
- [13] KENMEDY J B, MURTY M K S. Buckling of steel angle and T-struts [J]. Journal of Structures Engineering, ASCE, 1972, 11(6):2507-2522.
- [14] MARCH C. Design of single and multiple angle columns and beams [J]. Journal of Structures Engineering, 1997, 123(7):848-856.
- [15] 中华人民共和国国家标准. 架空送电线路杆塔结构设计技术规定(DL/T5154-2002)[S]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [16] 沈祖炎, 胡学仁. 单角钢压杆的稳定计算[J]. 同济大学学报, 1982 年(3):56-71.
SHEN ZU-YAN, HU XUE-REN. Ultimate strength of single angle columns [J]. Journal of Tongji University, 1982(3):56-71.
- [17] ELGAALY M, DAGHER H, DAVIDS W. Behavior of Single-angle-compression members [J] Journal of Structural Engineering, 1991, 117(12):3720-3741.
- [18] WOOLCOCK S T, KITIPORNCHAI S. The design of single angle struts [J]. Steel Construction, 1980, 14(4):2-23.

(编辑 赵 静)