

大规格高强等边角钢轴压构件承载力研究

龚坚刚¹, 姜文东¹, 王灿灿¹, 夏之罡¹, 张彤¹, 王笑棠¹, 李正良²

(1.浙江丽水电力公司, 浙江 丽水 323000; 2.重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 对 L220X20 的 Q420 角钢进行了轴心受压试验研究, 在此基础上进行了理论分析. 结合有限元, 对大规格角钢进行了参数分析, 并与现行《钢结构设计规范》中给出的柱子曲线进行了比较. 结果表明: 大规格高强等边角钢柱子曲线高于现有《钢结构设计规范》中 b 类截面柱子曲线, 总体介于 a 类与 b 类截面柱子曲线之间, 现有规范 b 类柱子曲线适用于大规格高强等边角钢.

关键词: 大规格高强等边角钢; 逆算单元法; 柱子曲线; 承载力

中图分类号: TU392.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2014)03-0353-07

随着我国电网的升级, 我国输电线路铁塔日趋大型化发展, 大容量、长距离、高电压的输电线路越来越多, 杆塔的荷载越来越大, 常用的 Q235、Q345 热轧角钢在强度和规格上都难以满足大荷载塔的使用要求^[1]. 近年来, 随着我国冶金工业的不断发展, 大规格高强角钢的生产已经不再是难事, 质量提高较快且日渐稳定, 供货渠道日趋通畅, 将越来越多的应用到输电线路杆塔中. 角钢的受力性能, 国内外进行了许多研究^[2-7]. 国内在建的锦屏~苏南±800 kV 直流特高压线路工程中已经试点应用了大规格高强角钢, 并且在结构安全度和经济性两方面都取得了较好的成效^[8]. 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, 压杆的稳定将是结构承载力最为重要的影响因素. 现行《钢结构设计规范》和《架空送电线路杆塔结构设计技术规定》都没有给出大规格高强角钢的设计规定, 且《钢结构设计规范》中给出的柱子曲线适用于中等规格的角钢, 与大规格高强度角钢的柱子曲线可能会存在一定的差异. 本文的研究内容是进行 Q420、Q460 大规格等边角钢轴心受压构件柱子曲线的理论计算、试验研究和有限元分析, 并探索出适合于大规格高强度角钢的柱子曲线, 为实际工程设计提供参考依据.

1 试验研究

试验中所用试件为不同长细比的 L220×20 等边角钢, 材料为 Q420, 具体参数见表 1. 构件加载前将两端铣平, 使两端面尽可能的与构件轴线垂直. 图 1 是 Q235、Q345、Q420 三种钢材拉伸试验所得应力-应变曲线, 其中 E 曲线表示钢材弹性阶段应力-应变曲线的切线, E0.2 曲线为 E 曲线平移至 0.2% 应变处得到. Q235 钢材有明显的屈服现象, 而随着钢材强度的提高, 钢材呈现逐步屈服的特性. 对屈服点不明显的金属材料用非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ ^[9] 作为屈服强度, 则屈服应变介于 0.43%~0.46%. 图 2 是 JG-35-1 和 JG-90-1 的材性试验应力-应变曲线.

表 1 等边角钢轴压试验试件样本

Tab.1 The axial compression test samples

试件编号	长细比 λ	截面实测值/mm	杆件长度/mm	
			理论值	实测值
JG-30-1	30	222.0x221.0x20.5	1 299	1 296.5
JG-30-2		222.0x221.0x20.5		1 300
JG-35-1	35	223.0x223.5x20.2	1 515.5	1 514
JG-35-2		221.5x221.5x19.8		1 510.5
JG-40-1	40	223.0x221.0x20.5	1 732	1 730
JG-40-2		223.0x221.0x20.5		1 731
JG-45-1	45	223.0x222.0x20.5	1 948.5	1 949.5
JG-45-2		222.2x221.5x20.0		1 949.5
JG-45-3		221.0x222.5x20.0		1 970
JG-50-1	50	223.2x223.5x20.8	2 165	2 162.5
JG-50-2		223.5x223.6x21.0		2 162
JG-55-1	55	221.5x222.0x20.0	2 381.5	2 380
JG-55-2		223.5x223.6x21.0		2 378
JG-60-1	60	222.0x222.0x20.0	2 598	2 595.2
JG-60-2		222.5x222.5x20.5		2 598
JG-70-1	70	223.5x223.6x22.0	3 031	3 030
JG-70-2		223.5x223.6x22.0		3 030
JG-90-1	90	222.5x218.8x20.0	3 897	3 893.9
JG-90-2		220.0x223.0x20.0		3 898

收稿日期: 2012-04-15

修改稿日期: 2014-06-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078367); 西安建筑科技大学结构工程与抗震教育部重点实验室资助项目

作者简介: 龚坚刚(1964-), 男, 高级工程师, 主要从事电网防雷技术及结构工程方面的研究. E-mail: Gong_jiangang@zj.sgcc.com.cn

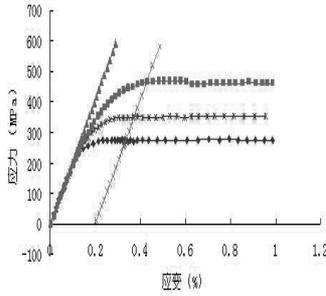
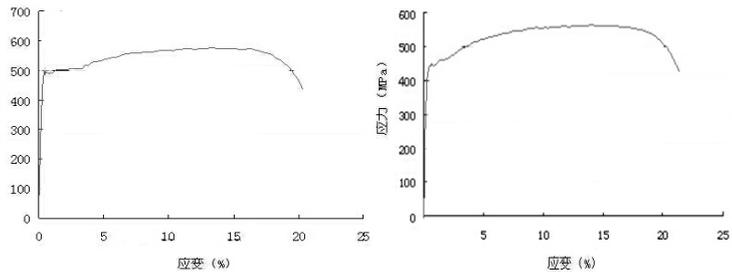


图1 3种钢材拉伸试验曲线

Fig.1 The tensile test curve of three kinds steel



(a) JG-35-1 (b) JG-90-1

图2 材性试验应力-应变曲线

Fig.2 The stress-strain curve of the material properties test

2 试验加载和试验现象

本试验所有试件均按两端铰支进行,在试件两端设置球形铰支座,并在两球铰各设置两套夹具固定角钢,如图3所示。试验为单调加载静力试验,采用分级加载,预加载为理论极限荷载的20%。试验的前25级荷载,每级为理论极限荷载的2%,每级加载稳定1min后记录相应荷载的应变;之后每级为理论极限荷载的1%,每级加载稳定1min后记录。加载时出现角钢纵向应变持续增大,而角钢无法稳定自动卸荷的情况时停止加载。

验中主要测量构件的中部挠度和纵向应变,考虑各种初始缺陷等的影响,在构件中部截面贴3层应变片,每层均布6片,测量纵向最大应变,用DH3816电阻应变仪采集数据,如图4。部分构件试验现象如图5。

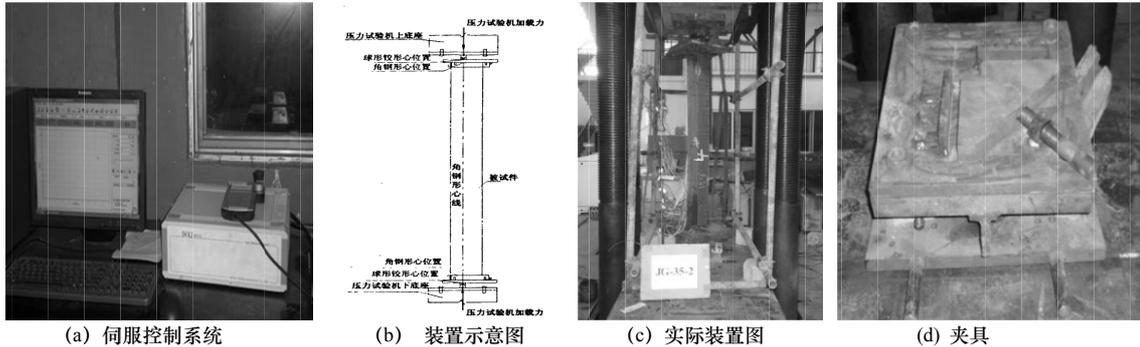


图3 角钢试件装置图

Fig.3 The test equipment of the equal steel samples



图4 应变片布置图

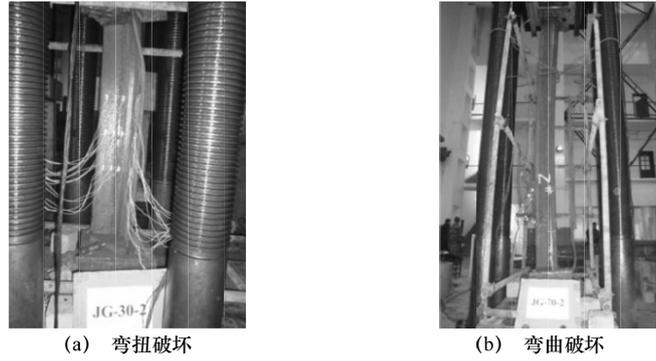
Fig.4 The figure of strain gage arrangement

图5 角钢试验破坏形态图

Fig.5 The state of instability

在 $\lambda \leq 45$, 试件发生弯扭失稳破坏; 构件达到临界屈服应力时仍具有一定的塑性变形能力和承载能力, 构件失稳时中部大部分区域已经进入塑性阶段; $\lambda > 45$ 时角钢构件发生绕非对称轴的弯曲失稳破坏, 在加载过程中, 角钢外侧应变增加较内侧快, 出现荷载-应变曲线分岔现象, 构件达到极限承载力后杆件瞬间发生失稳破坏, 压杆失稳时大部分区域基本处于弹性阶段, 轴压力产生的应变比小长细比时明显小, 角

钢承载力主要由稳定控制. 两种典型破坏形态见图 6.



(a) 弯扭破坏

(b) 弯曲破坏

图 6 两种典型破坏形态
Fig.6 The two kinds of instability

3 数据处理和结果分析

从试验结果知, 试验中各种长细比角钢均发生整体失稳. 加载初期中部纵向纤维全部受压, 当角钢变形后内凹侧纵向纤维应变持续增大, 外凸侧纵向纤维应变逐渐减小, 弯曲到一定程度后外凸侧纤维变为受拉. 应变片位置取每一列应变片中微应变最大的应变片作为荷载-应变曲线中的应变片, 按图 4 中从左到右由小到大编号. 荷载-应变曲线如图 7.

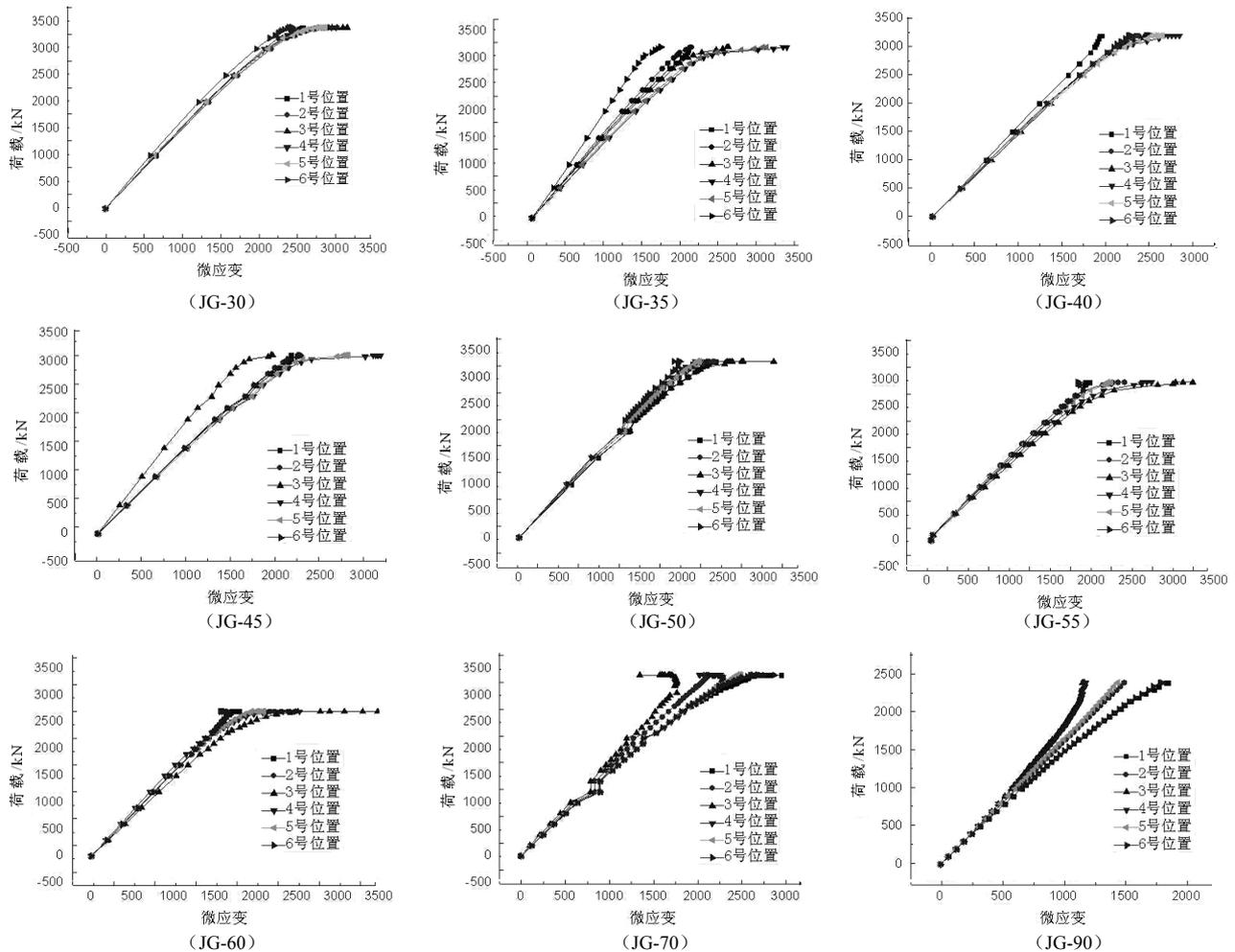


图 7 角钢荷载-应变曲线
Fig.7 The load strain curve

根据材性试验结果知, 应变超过 0.3% 即可认为材料开始进入屈服阶段. $\lambda \leq 50$ 时角钢失稳时中部大部分区域已经进入塑性阶段, 构件发生弯扭失稳, 角钢强度对承载力影响较大, 采用高强度优势明显; $\lambda = 50 \sim 90$ 时压杆失稳时大部分区域基本处于弹性阶段, 轴压力产生的应变比小长细比时明显小. 角钢承载力主要由稳定控制; 规范计算值和试验值见表 2, 拟合曲线见图 8. 由表 2 和图 8 知, 试验所得压杆稳定系数高于规范 b 类截面稳定系数.

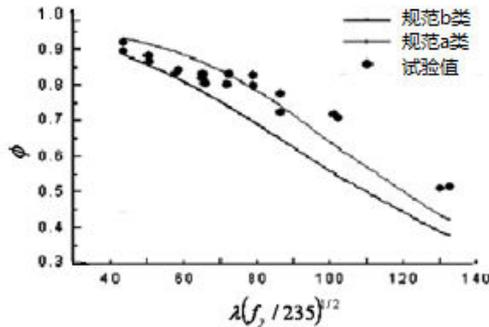


图 8 柱子曲线比较

Fig.8 The column curves compared

Q420 L220×20 角钢 $\lambda \leq 50$ 时角钢失稳时中部大部分区域已经进入塑性阶段, 构件发生弯扭失稳. 角钢承载力主要由强度控制, 采用高强度优势明显; $\lambda = 50 \sim 90$ 时钢管失稳后大部分区域处于弹性阶段, 角钢承载力主要由稳定控制; 根据试验分析得到的大规格高强度等边角钢柱子曲线高于现有《钢结构设计规范》中 b 类截面柱子曲线, 总体介于 a 类与 b 类截面柱子曲线之间, 现有规范柱子曲线适用于大规格高强度等边角钢荷载的计算.

4 理论计算

采用逆算单元长度法^[10], 在切线刚度理论的基础上, 导出压力不变时计算截面变形的的方法和算式, 从而确定压力-弯矩-曲率的关系, 根据所算出的变形逆算柱的单元长度, 即可求出临界力的精确解. 计算模型如图 9.

利用 FORTRAN95 语言编制程序计算得出的数据导入 Excel, 绘制出不同截面尺寸的 Q420 等边角钢的柱子曲线, 即 $\phi - \lambda$ 曲线, 并加入了现行《钢结构设计规范》b 类截面的 $\phi - \lambda$ 曲线形成对比^[11], 如图 10. 需要注意的是程序中输出的 λ 是经过修正的, 即为 $\lambda = \lambda_1 \sqrt{f_y / 235}$ ^[12], f_y 取钢材理论屈服强度. 假设材料为理想弹塑性模型.

根据以上对大量不同规格的等边角钢轴心受压构件柱子曲线的计算所得数据, 按正态分布的规律, 取近似 95% 的保证率, 得到一组数据点, 采用现行《钢结构设计规范》使用的 perry 公式的表达式采用非线性函数的最小二乘法^[13]来拟合, 通过编程进行待定系数的计算, 得出: $\alpha_2 = 0.976$,

$\alpha_3 = 0.298$, $\alpha_1 = 0.870$ 从而得到了 Q420 大规格等边角钢受压构件的稳定系数计算表达式^[14], 由该表达式计算出的柱子曲线与规范的 a 类和 b 类柱子曲线进行对比, 见图 12.

表 2 稳定系数表
Tab.2 Stability coefficient

λ	$\lambda \sqrt{f_y / 235}$	ϕ_b	ϕ_a	ϕ_{exp}
30	43.3	0.885	0.933	0.894
	43.3	0.885	0.933	0.921
35	50.1	0.856	0.916	0.882
	50.3	0.855	0.915	0.866
40	57.6	0.82	0.893	0.831
	58.3	0.817	0.889	0.841
	64.7	0.783	0.866	0.818
45	64.9	0.78	0.863	0.829
	65.6	0.776	0.86	0.803
50	72.1	0.739	0.829	0.83
	71.5	0.742	0.832	0.801
55	78.7	0.696	0.79	0.826
	78.7	0.696	0.79	0.797
60	86.2	0.647	0.741	0.774
	86.2	0.647	0.741	0.722
70	101.9	0.542	0.622	0.708
	100.9	0.549	0.63	0.716
90	129.7	0.383	0.429	0.508
	132.4	0.377	0.421	0.514

注: λ —长细比, ϕ_b —规范 b 类截面稳定系数, ϕ_a —规范 a 类截面稳定系数, ϕ_{exp} —实测值对应稳定系数.

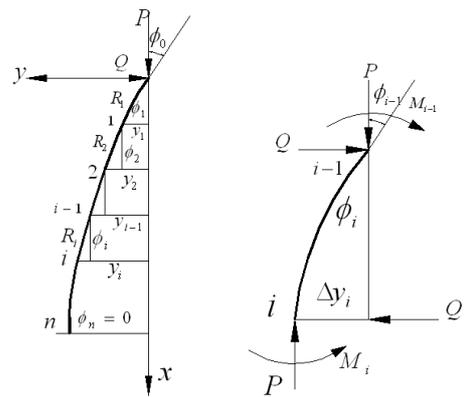


图 9 计算模型

Fig.9 Calculation model

同理: 得到不同截面尺寸的 Q460 等边角钢的柱子曲线, 如图 11. 由 $\phi-\lambda$ 曲线得到了 Q460 大规格等边角钢受压构件的稳定系数计算表达式^[15], 由该表达式计算出的柱子曲线见图 13.

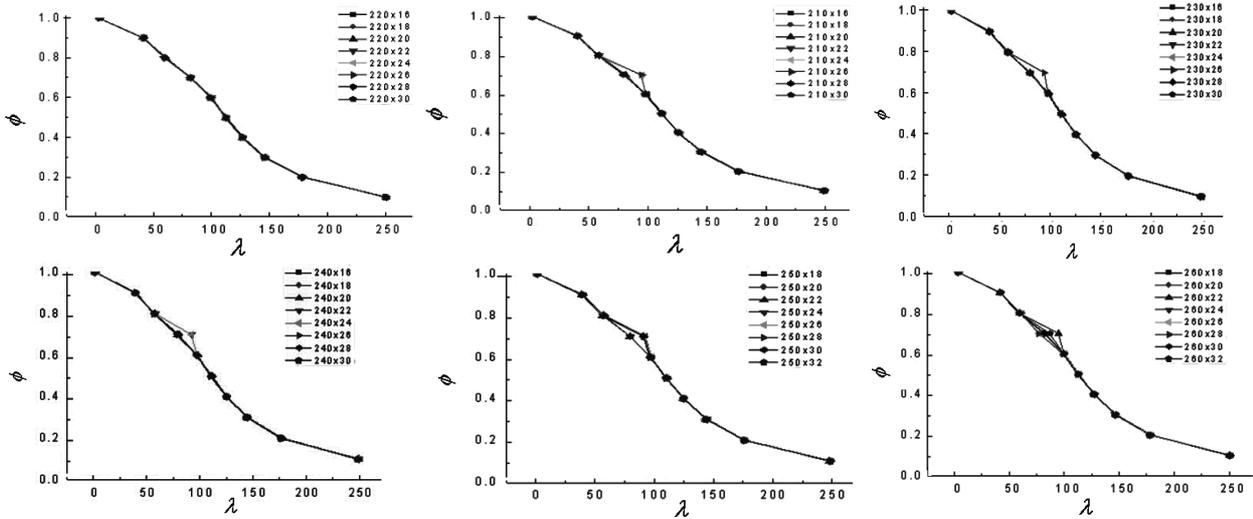


图 10 大规格 Q420 等边角钢与规范 b 类 $\phi-\lambda$ 曲线

Fig.10 The $\phi-\lambda$ curves of the code and the Q420 large size equal angle steel

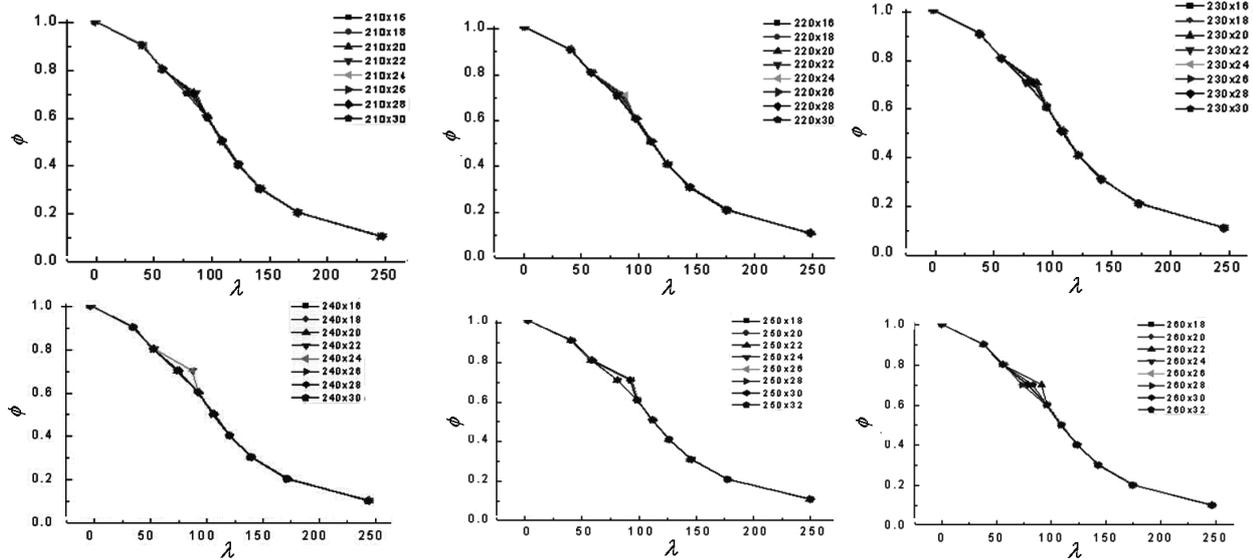


图 11 大规格 Q460 等边角钢与规范 b 类 $\phi-\lambda$ 曲线

Fig.11 The $\phi-\lambda$ curves of the code and the Q460 large size equal angle steel

由计算结果可以看出, Q420、Q460 大规格等边角钢柱子曲线与《钢结构设计规范》b 类柱子曲线很接近, 可按《钢结构设计规范》b 类柱子曲线设计 Q420、Q460 等边角钢受压构件.

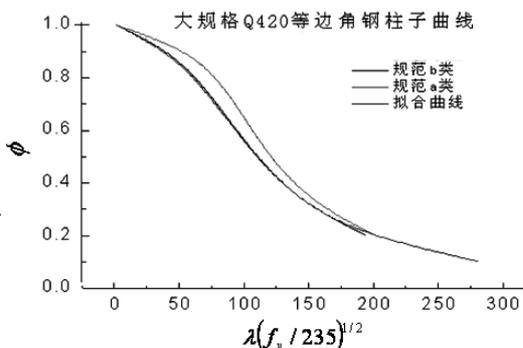


图 12 大规格 Q420 等边角钢柱子曲线
Fig.12 The $\phi-\lambda$ curves of the Q420 large size equal angle steel

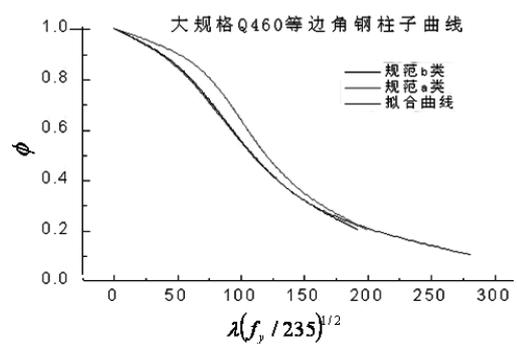


图 13 大规格 Q460 等边角钢柱子曲线
Fig.13 The $\phi-\lambda$ curves of the Q460 large size equal angle steel

5 大规格高强等边角钢有限元分析

采用 ANSYS10.0 进行有限元分析, 单元为 4 节点四边形 shell181 壳单元, 构件两端按铰接考虑, 加载方式与试验相同, 模型如图 14. 材料选取 Q420 和 Q460, 应力-应变关系根据材性试验得到如图 15 形式, 泊松比取 0.3, 忽略自重的影响. 材料采用双线性模型, 弹性模量 $E=200\ 000\ \text{MPa}$, 切线模量 $E_t=0.02E$, 材料弹塑性的发展和单元刚度由 Von-Mises 屈服准则及相关的流动法则确定, 采用等向强化理论, 并考虑构件的初始弯曲和残余应力的影响. 初弯曲均按特征屈曲分析一阶模态形式施加, 残余应力的分布模式见图 16 所示.

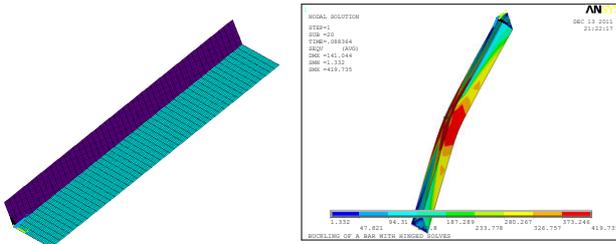


图14 大规格等边角钢分析模型
Fig.14 The FEM model

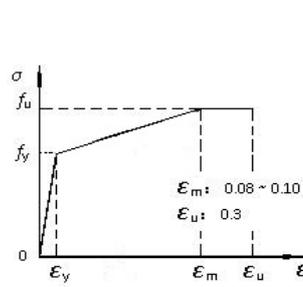


图15 钢材本构关系
Fig.15 The constitutive relations

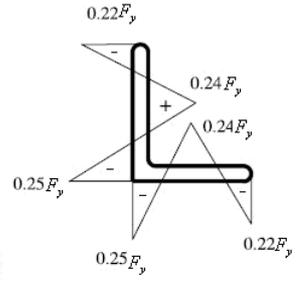


图16 残余应力分布模式
Fig.16 The residual stress distribution

大规格等边角钢 ANSYS 分析共分为五组, 分别为肢宽 210~250mm 等规格的等边角钢, 肢厚为 16~30 mm, 长细比 30-120, 钢材强度分为 Q420、Q460. 本文选取肢宽 $b=220\ \text{mm}$ 和 $250\ \text{mm}$ 两种规格的构件进行参数分析, 并和现行《钢结构设计规范》进行对比, 得到大规格高强等边角钢的柱子曲线, 如图 17-图 19.

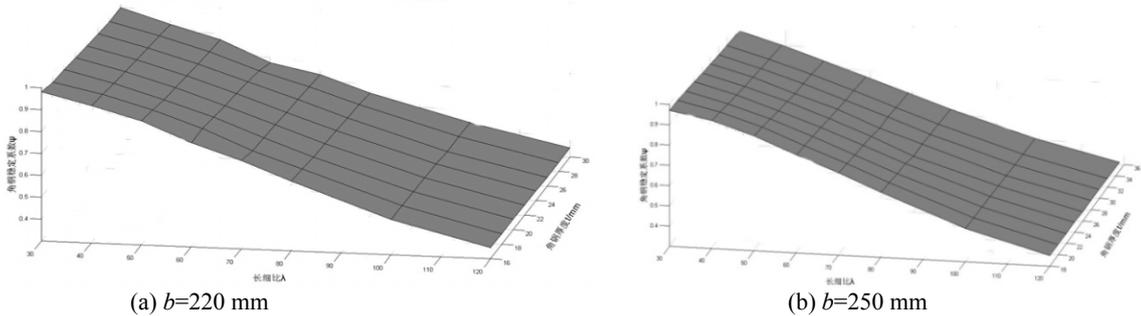


图17 等边角钢几何参数对承载力的影响
Fig.17 Load-carrying capacity of axial compression members

从图17到图19可以看出, 构件长细比对角钢稳定系数影响较大, 构件肢宽和肢厚对角钢稳定系数的影响很小, 在采用不同钢材时, 构件的承载力变化规律基本一致, 其受力机理相同. Q460构件的柱子曲线较 Q420构件柱子曲线偏低是因为承载力的增幅较强度增幅相对偏小. 强度破坏和材料的强度有直接关系, 稳定破坏则和构件的几何尺寸关系明显.

由计算结果看出, 有限元计算出的部分柱子曲线高于《钢结构设计规范》b类柱子曲线, 按《钢结构设计规范》b类柱子曲线设计Q420、Q460等边角钢受压构件是可行的.

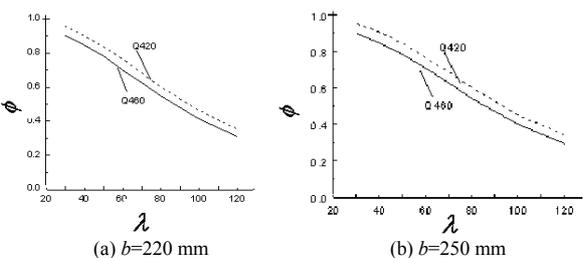


图 18 钢材强度对承载力的影响
Fig.18 The influence of the steel strength for the $\phi-\lambda$ curves

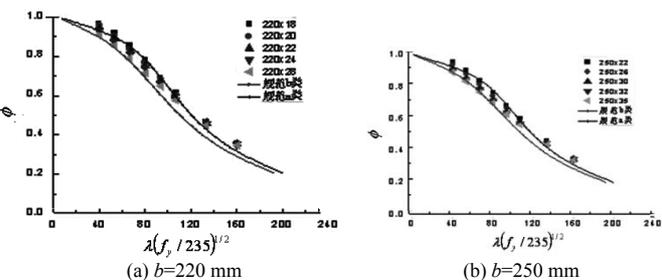


图 19 大规格等边角钢承载力比较
Fig.19 Compared with the $\phi-\lambda$ curves of the code

6 结论

本文通过对大规格高强等边角钢轴压构件进行理论计算、试验研究和有限元分析并和十字组合双角钢进行对比,得到如下结论:

(1)采用逆算单元法得出的大规格高强等边角钢的部分柱子曲线与《钢结构设计规范》b类柱子曲线很接近,试验和有限元分析得到的大规格高强等边角钢柱子曲线吻合较好,且均高于现有《钢结构设计规范》中b类截面柱子曲线,总体介于a类与b类截面柱子曲线之间,现有规范b类柱子曲线适用于大规格高强等边角钢荷载的计算.

(2)通过理论计算、试验研究和有限元分析得到大规格高强等边角钢的稳定系数计算公式和柱子曲线,为实际工程提供设计参考依据.

参考文献 References

- [1] 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 Daochun,WEI Yuanhang,ZHONG Lianhong,et al. Discussion on Several Problems of Developing UHVDC Transmission in China[J].Power System Technology,2007,31(8):6-10.
- [2] KENNEDY J B,MADUGULA M K S.Buckling of steel angle and tee struts[J].Journal of the Structural Division,1972,98(11): 2507-2522.
- [3] KENNEDY J B, MADUGULA M K S. Buckling of angles: State of the art[J].Journal of the Structural Division,1982,108(9):1967-1980.
- [4] KITIPORNCHAI S, AL-BERMANI F, KANG W J,et al. Some practical aspects of modeling lattice towers[C]//The Fourth International Conference on Advances in Steel Structures,Shanghai,China,2005.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 班慧勇,施刚,邢海军,等. Q420 等边角钢轴压杆稳定性能研究(I)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,et al. Stability of Q420 high strength steel equal leg angle members under axial compression(I): experimental study on the residual stress[J]. China Civil Engineering Journal,2010, 43(7): 14-21.
- [8] 史世伦,李正良,张东英.高强等边角钢轴压构件承载力研究[J].电网技术,2009,33 (20):197-201.
SHI Shilun,LI Zhengliang,ZHANG Dongying.Research into Bearing Capacity of Axially Loaded Compression Member of High Strength Equal Angle Steel[J].Electric Power Construction,2009,33 (20):197-201.
- [9] GB/T 228-2002. 金属材料室温拉伸试验方法[S].北京:中国标准出版社,2002.
GB/T 228-2002.Metallic materials—Tensile testing at ambient temperature[S]. Beijing:Standards Press of China,2002.
- [10] 李开禧,肖允徽. 逆算单元长度法计算单轴失稳时钢压杆的临界力[J].重庆建筑工程学院学报,1982.(4) :26-45.
LI Kaixi, XIAO Yunhui. Calculating steel compression members critical force by the inverse calculationsegment length method[J].Journal of Chongqing Ar-chitectural and Civil Engineering Institute,1982(4):26-45.
- [11] 李开禧,肖允徽,饶晓峰,等.钢压杆的柱子曲线[J].重庆建筑工程学院学报,1985(1):24-33.
LI Kaixi, XIAO Yunhui, RAO Xiaofeng,et al.Column curves for steel compression member[J].Journal of Chongqing Architectural and Civil Engineering Institute,1985(1):24-33.
- [12] 刘红燕,李志业.受压角钢杆件长细比修正系数研究[J].建筑钢结构进展,2004,6(4):29-31.
LIU Hongyan LI Zhiye. Research on Modified Coefficient of Slenderness Ratio of Angle Member in Compression [J]. Progress in Steel Building Structures, 2004,6(4):29-31.
- [13] GB 50017-2003. 钢结构设计规范[S].北京:中国计划出版社,2003.
GB50017-2003 Code for design of steel structures[S]. Beijing:China Planning Press,2003.
- [14] 陈骥. 钢结构稳定理论与设计(第三版)[M].北京:科学出版社,2006.
Chenji, Stability of Steel Structures Theory and Design(5thEdition)[M],Beijing:Science Press,2006.
- [15] 赵仕兴,李正良.双角钢十字组合截面偏心压杆承载力研究[J].钢结构,2012,27(1):5-10,16.

(下转第 366 页)

- [9] 李爱群. 工程结构减振控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
LI Aiqun. Vibration control of engineering structures[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [10] DYRBYE C, HANSEN S O. Wind loads on structures[M]. New York: John Wiley & Sons Ltd., 1996.
- [11] DAVERNPORT A G. Wind loads on structures[R]. National Research Council, 1960.
- [12] Holmes J. Wind loading structures[M]. 2nd ed New York: Taylor & Francis, 2007.
- [13] 杨靖波, 韩军科, 华旭刚, 等. 1000 kV 淮南—上海输变电工程同塔双回钢管塔风振控制[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 104-110.
YANG Jingbo, HAN Junke, HUA Xungang, et al. Wind-induced vibration suppression of tubular towers for 1000 kV double-circuit transmission lines on the same tower from Huainan to Shanghai[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 104-110.
- [14] SOONG T T, DARGUSH G F. Passive energy dissipation systems in structural engineering[M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 1997.

Wind-induced dynamic response and vibration control of steel tubular tower in the 1000 kV large span crossing transmission line

YUAN Jun, WANG Huchang, HU Jianmin, WANG Xueming, SHEN Weiwei

(Northwest Electric Power Design Institute, Xi'an 710075, China)

Abstract: A finite element model with ANSYS was created for an analysis of wind-induced response and vibration control of steel tubular tower in the 1000 kV large span crossing transmission line. Randomly fluctuating wind on spatial joints of the model was simulated using Davenport spectrum. Based on analysis of tubular tower dynamic characteristics and wind-induced response, three vibration control systems were used: tuned mass dampers (TMD), viscoelastic dampers (VED), TMD-VED were discussed to assess the vibration isolation effectiveness of vibration countermeasures in large-span crossing transmission tower. The result demonstrates that the damping performance of TMD is better than the VED, with limited significance, having adverse effects of dynamic magnification in accident causes. TMD with small mass in TMD-VED system offers limited effect for control torsional vibration. It is further shown that, VED is most viable method for reduction of wind-induced response, providing an approximately 9%~13% reduction of displacement responses and 20%~30% reduction of acceleration responses on tower body.

Key words: tower; AC transmission line; large span crossing; wind-induced dynamic response; vibration control; damper

(本文编辑 桂智刚)

(上接第 359 页)

ZHAO Shixing, LI Zhengliang. Study of Ultimate Strength of Eccentric Compression Members with Combined Angle Iron Cross-Section [J]. steel structure, 2012,27(1):5-10,16.

Study on the bearing capacity of axially loaded compression member of large size high strength equal angle steel

GONG Jiangang¹, JIANG Wendong¹, WANG Cancan¹, XIA Zhigang¹,
ZHANG Tong¹, WANG Xiaotang¹, LI Zhengliang²

(1. Zhejiang Lishui Electric Power Bureau, Lishui 323000, China;
2. Department of Civil Engineering, Chong Qing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The Q420 angle of L220X20 axial compression test is carried out, and make a theoretical analysis is made on this basis. Combined with the finite element, analysis is made on the angle of the large size parameters, which is compared with the columns curve of the current steel design code. The results showed that: the columns curve of the large-size high-strength edge angle is higher than the current "design code of steel structures" class section column curve, in general between a class between the curve and b-type cross-section columns. The b-class columns curve of current "design code of steel structures" can apply to the high-strength side angle.

Key words: large size high strength angle steel; inverse calculate element method; column curves; cross combination double angle steel; bearing capacity

(本文编辑 吴海西)