

文章编号: 1000-4750(2014)03-0063-09

# Q420 高强度等边角钢轴压构件 整体稳定性能设计方法研究

班慧勇<sup>1,2</sup>, 施刚<sup>1</sup>, 石永久<sup>1</sup>

(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. School of Civil &amp; Environmental Engineering, The University of New South Wales, Sydney, 2052, Australia)

**摘 要:** 为研究 Q420 高强度等边角钢轴压构件的整体稳定受力性能与设计方法, 该文采用有限元软件 ANSYS 建立数值模型, 并经与试验结果对比验证后进行了大量参数分析, 研究了构件几何初始缺陷、残余应力和钢材屈强比对该类轴压构件整体稳定性能的影响, 分析了已有设计方法的适用性。结果表明, 构件初始缺陷对其稳定性能的影响与构件长细比及失稳模态有关, 残余应力的影响与构件长细比有关, 钢材屈强比的影响较小。基于数值计算结果建议了 Q420 高强度等边角钢轴压构件考虑板件局部屈曲相关作用的整体稳定设计方法, 为补充和完善我国钢结构设计规范提供了参考, 同时也有利于促进高强度钢材在我国钢结构工程中的应用。

**关键词:** 高强度角钢; 轴心受压; 有限元分析; 整体稳定; 局部屈曲; 设计方法

中图分类号: TU391 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.06.0561

## INVESTIGATION ON DESIGN METHOD OF OVERALL BUCKLING BEHAVIOUR FOR Q420 HIGH STRENGTH STEEL EQUAL-LEG ANGLE MEMBERS UNDER AXIAL COMPRESSION

BAN Hui-yong<sup>1,2</sup>, SHI Gang<sup>1</sup>, SHI Yong-jiu<sup>1</sup>

(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 &amp; Environmental Engineering, The University of New South Wales, Sydney, 2052, Australia)

**Abstract:** In order to investigate the overall buckling behaviour and design method of Q420 high strength steel (HSS) angle columns under axial compression, a finite element model is developed through the finite element software ANSYS, which is validated against the test results and is utilized to undertake a large amount of parametric studies. The effects of the imperfections and  $Y/T$  ratio of steel on the overall buckling behaviour are elucidated, and the applicability of current design methods is analyzed. It is found that the effect of geometric imperfections is significantly related to the column slenderness and failure mode, and the effect of residual stresses is related to the column slenderness, whilst that of  $Y/T$  ratio is very slight. Design approaches for the overall buckling design method allowing for the local buckling are suggested for Q420 HSS angle columns, which contributes to the improvement of current steel structural design code, and has a potential application of HSS structures.

**Key words:** high strength steel angle; axial compression; FEA; overall buckling; plate buckling; design method

收稿日期: 2013-06-20; 修改日期: 2013-12-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078205)

通讯作者: 施刚(1977-), 男, 安徽铜陵人, 副教授, 博士, 主要从事结构工程研究(E-mail: shigang@tsinghua.edu.cn).

作者简介: 班慧勇(1985-), 男, 内蒙古人, 博士后, 主要从事结构工程研究(E-mail: huiyongban@gmail.com);

石永久(1962-), 男, 黑龙江鸡东人, 教授, 博士, 主要从事结构工程研究(E-mail: shiyj@tsinghua.edu.cn).

现代大型结构工程对材料高强度需求的日趋显著,以及相应生产和加工制备工艺的逐步成熟,极大促进了高强度钢材结构的工程应用。采用高强度钢材不仅能够保证结构具有更高的安全性,同时能够有效减小构件尺寸,降低钢材消耗量,减轻结构自重,从而降低下部结构基础的设计要求和建造成本以及上部结构的地震响应,具有显著的经济和可持续发展效益<sup>[1-3]</sup>。我国除在部分建筑结构和桥梁结构中采用了高强度钢材外<sup>[4]</sup>,在大型输电铁塔结构中也开始采用 Q420 高强度热轧角钢<sup>[5]</sup>。

目前高强钢结构已成为结构工程领域的研究热点之一<sup>[4]</sup>,研究内容主要针对材料力学性能、截面残余应力、受压构件稳定性能以及抗震性能等;其中受压构件整体稳定性能的研究主要针对焊接工字形和箱形截面试件,钢材强度等级涵盖 460MPa、690MPa 以及 960MPa 等<sup>[6-11]</sup>,通过一系列试验研究与数值分析,已提出了相应的设计建议与柱子曲线。对于热轧成型截面构件,目前仅对 Q420<sup>[12]</sup>和 Q460<sup>[13-14]</sup>角钢受压柱的整体稳定性能进行了一定的研究,其中针对 Q420 角钢轴压构件仅进行了初步的试验研究,并未对其设计方法进行全面的参数分析和设计方法研究。

上述试验与数值分析研究表明,随着钢材强度的提高,轴压钢柱的稳定性能发生变化;由于初始缺陷特别是残余应力的影响变小,高强度钢材钢柱的整体稳定系数要比具有相同正则化长细比普通强度钢材钢柱的明显提高。对于高强钢热轧截面轴压构件,其整体稳定系数的提高可能导致板件局部屈曲先于构件整体屈曲发生<sup>[15]</sup>,板件宽厚比的限值及对构件整体稳定性能的影响有待进一步研究。

我国现行钢结构设计规范 GB50017-2003<sup>[16]</sup>针对轴心受压钢柱的整体稳定设计并未考虑局部屈曲的影响(即相关屈曲),仅通过给定板件宽厚比限值来防止局部屈曲先于整体失稳发生;对于板件宽厚比超限的构件,GB50017-2003 并未给出相应的设计计算方法。欧美等地规范(如 Eurocode 3<sup>[17]</sup>、ANSI/AISC 360-10<sup>[18]</sup>等)通过引入折减系数的方法考虑板件宽厚比超限对整体稳定设计的影响。实际工程应用中高强度钢材构件的截面尺寸一般较大,板件宽厚比也较大;加之我国规范宽厚比限值计算公式中系数  $(235/f_y)^{1/2}$  的影响,高强度钢材构件的板件宽厚比更容易超限,因此更有必要在其整体稳

定设计中考虑板件局部屈曲的影响。

该文基于 Q420 高强度热轧等边角钢轴压构件整体稳定试验研究结果<sup>[12,19]</sup>,采用 ANSYS 软件建立有限元模型进行参数分析,深入研究该类轴心受压钢柱的稳定性能,提出考虑板件宽厚超限对整体稳定性能影响的设计方法,为今后的实际工程应用提供指导,为规范的修订和完善提供参考。

## 1 有限元模型与验证

### 1.1 有限元模型

本文采用大型通用有限元程序 ANSYS 建立 3 维有限元模型。现有针对高强钢轴压构件整体稳定性能的数值研究主要采用 BEAM188 梁单元进行分析,且具有足够的准确性和可靠性<sup>[8-11,20-21]</sup>;但梁单元无法模拟板件屈曲。本文研究的 Q420 高强度等边角钢柱存在板件宽厚比超限的情况,需要考虑板件屈曲,因此采用了能够模拟残余应力与板件屈曲的 SOLID186 高阶 3 维 20 节点实体单元。截面的网格划分如图 1(a)所示:角钢每肢圆弧倒角之间的平行段均分为 10 个网格,角部为 1 个正方形网格,内角圆弧段为 3 个网格;试算表明,当把每肢平行段的网格数量增大一倍变为 20 个时(图 1(b)所示),钢柱的稳定承载力变化小于 0.035%,因此采用图 1(a)所示的截面网格尺寸已经足够精确。

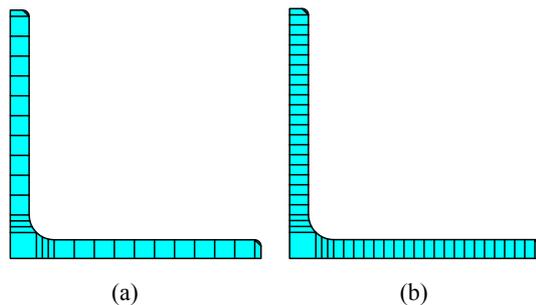


图 1 有限元模型截面网格划分

Fig.1 Mesh of the column section in the FEA model

钢柱沿长度方向的网格划分因试件长度改变而改变,同时保证主要实体单元长边与短边比值小于 3。为便于在柱两端施加轴向集中荷载和铰支约束条件,模型中试件柱两端均设置一 40mm 厚刚性盖板。构件两端为铰接约束。钢柱的整体有限元模型单元网格划分如图 2 所示。

有限元模型中角钢柱采用图 3 所示的多折线随动强化本构模型,柱两端盖板的材料设为理想线弹性,弹性模量取钢柱的  $10^3$  倍;泊松比统一取 0.3。

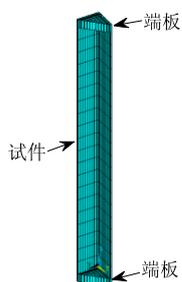


图 2 有限元模型网格划分

Fig.2 Mesh of the column in the FEA model

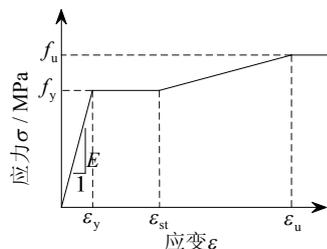


图 3 角钢柱材料本构模型

Fig.3 Stress-strain relationship of angle steels

有限元模型几何初始缺陷的施加是以特征值屈曲模态为依据、根据缺陷数值确定更新模型节点坐标的比例系数来实现。截面残余应力的施加通过在单元积分点上设置初始应力来实现，分布模型采用文献[19]的研究成果确定，如图 4 所示；为了建模与计算方便，本文针对单个网格所有积分点输入相同的残余应力，即每个网格区域的残余应力取平均值施加到该网格的积分点，因此实际采用的残余应力分布为阶梯状分布。

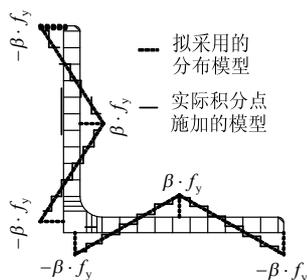


图 4 残余应力分布模型

Fig.4 Residual stress distribution model

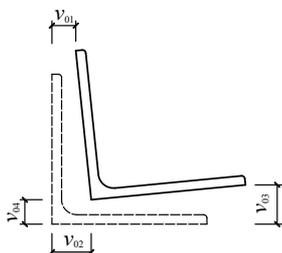


图 5 几何初始缺陷符号

Fig.5 Symbols for the geometric imperfections

## 1.2 有限元模型验证

通过模拟计算文献[12]的 60 个 Q420 高强度热轧等边角钢轴压试件及文献[22]补做的 6 个长柱试件的整体稳定性能，验证模型的准确性与可靠性。

试件截面板件厚度  $t$  及全肢宽  $w$  取试验研究<sup>[12,22]</sup>的实测值；截面的倒角半径、内倒角圆弧起点至肢边缘的自由外伸宽度以及截面形心位置由于无法精确量测均采用名义值<sup>[23]</sup>。试算表明，这一处理方式能够保证将施加荷载的截面形心位置与实际位置的偏差控制在 0.3mm 以内，由此造成的构件稳定承载力误差小于 1.7%；因此可以认为该处理方式能够准确模拟试件截面的几何尺寸和轴心荷载施加位置。试件的有效计算长度  $L_0 = 0.65L_t = 0.65(L + 464.5)$ ，其中  $L_t$  为试件两端铰转动中心间距，计算长度系数 0.65 根据文献[22]补做的弯曲失稳长柱试件承载力标定得到。

图 3 中钢材本构模型的屈服强度  $f_y$ 、抗拉强度  $f_u$ 、屈服应变  $\epsilon_y$ 、屈服平台末端应变  $\epsilon_{st}$  以及极限应变  $\epsilon_u$  根据相应的材性试验结果确定；各类角钢试件截面对应的参数如表 1 所示<sup>[12]</sup>；屈服应变  $\epsilon_y = f_y / E$ 。

为了更好地模拟试件的几何初始形状和破坏失稳模态，利用试验研究<sup>[12,22]</sup>测得的几何初始缺陷值，提取板件局部屈曲和构件整体屈曲两个特征值屈曲模态，对有限元模型的节点坐标进行两次更新；施加局部缺陷的比例系数根据图 5 所示缺陷  $v_{01}$ 、 $v_{03}$  的较大值与局部屈曲模态中板件鼓曲的最大值之比确定，施加整体缺陷时根据图 5 所示肢背棱线的偏离值即  $v_{02}$ 、 $v_{04}$  的较大值与整体屈曲模态中棱线的最大横向位移之间的比值确定。

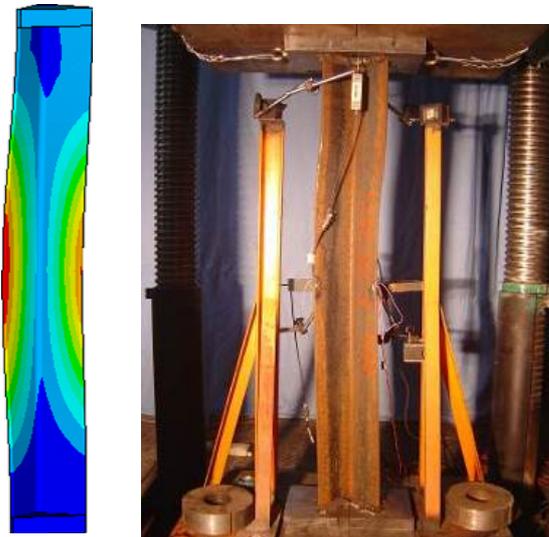
截面纵向残余应力分布(图 4)的具体数值参考文献[19]的研究成果确定；考虑到构件板厚较小，本文并未考虑残余应力沿厚度分布不均匀的影响。

表 1 Q420 钢材材料本构模型取值

Table 1 Material properties for Q420 high strength steels					
截面类型	$E/(\times 10^5 \text{MPa})$	$f_y/\text{MPa}$	$f_u/\text{MPa}$	$\epsilon_{st}$	$\epsilon_u$
L 125×8	2.01	442.1	595.0	0.009	0.080
L 140×10	2.00	449.1	612.0	0.007	0.102
L 160×10	2.13	460.7	618.6	0.012	0.085
L 180×12	2.26	459.4	614.4	0.014	0.164
L 200×14	2.10	448.8	609.0	0.012	0.158
L 140×12	1.93	452.4	637.9	0.009	0.106

模型端部施加轴压荷载并进行非线性求解，采用弧长法得到荷载峰值，即构件的整体稳定承载

力。图 6 为有限元分析得到的构件典型失稳破坏形态与相应试件照片对比，可以看到二者基本一致，均在构件中部发生扭转变形；图 7 为试件典型荷载一柱中水平位移曲线有限元计算结果与试验结果的对比，可以看出变形发展和失稳特征的总体趋势基本一致，但构件变形刚度差别较大，这主要是由于有限元模型中无法精确模拟构件几何初始形状和考虑试验设备系统误差；图 8 为整体稳定承载力有限元计算结果与所有 66 个试件钢柱试验结果的对比；可以看出，二者平均误差仅为 2.8%，标准偏差为 0.076。这表明本文建立的有限元模型能够准确模拟 Q420 角钢受压构件的整体稳定受力性能。



(a) 有限元计算结果 (b) 试验照片  
图 6 试件典型失稳破坏形态对比  
Fig.6 Comparison of a typical failure mode

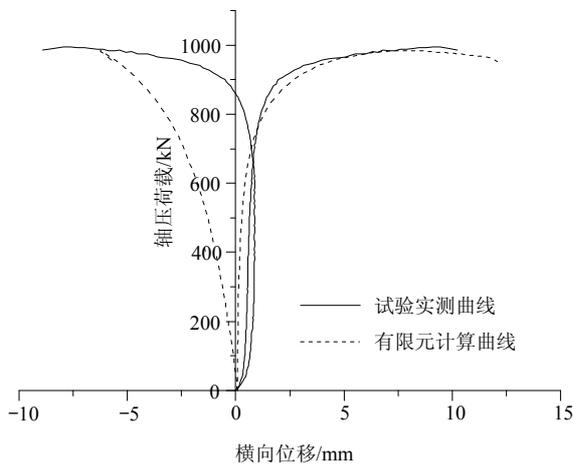


图 7 试件典型荷载-位移曲线对比  
Fig.7 Comparison of typical load-deflection curves from FEA results and test results

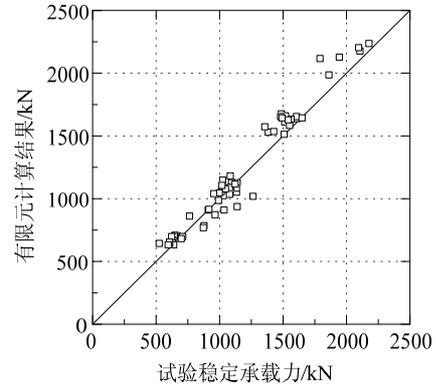


图 8 钢柱稳定承载力有限元值和试验值对比  
Fig.8 Comparison of FEA buckling capacity calculation results with test results

## 2 有限元参数分析

为全面研究 Q420 等边角钢柱的整体稳定受力性能，采用上述验证后的有限元模型进行大量参数分析。算例的截面尺寸均采用相应标准<sup>[23]</sup>规定的的名义值，构件长度根据设计长细比确定。Q420 钢材本构关系采用理想弹塑性模型，屈服强度  $f_y$  取标准值 420MPa<sup>[24]</sup>；弹性模量  $E$  取名义值  $2.06 \times 10^5$ MPa<sup>[16]</sup>，泊松比取 0.3。残余应力采用文献[19]提出的三折线分布模型；几何初始缺陷根据模型一阶特征值屈曲模态对节点坐标进行更新，一阶模态为板件局部屈曲的取局部缺陷，一阶模态为整体弯曲屈曲的取整体缺陷。

### 2.1 几何初始缺陷的影响

为研究构件几何初始缺陷对 Q420 钢材热轧等边角钢轴压构件整体稳定性能的影响，计算了 36 个构件，包括 3 种截面尺寸：L 140×10、L 90×8、L 70×8，6 种长细比：绕截面弱轴  $\lambda_x=30、40、50、70、90、110$  以及 2 种几何初始缺陷取值：即板件局部缺陷和构件整体初弯曲分别取为  $w/100、L/1000$ (记为标准缺陷)或  $w/250、L/2500$ (记为对比缺陷)； $w$  为截面肢宽， $L$  为柱长；前者( $w/100、L/1000$ )是参考我国钢结构工程施工质量验收规范 GB 50205-2001<sup>[25]</sup>的相关规定确定。

图 9 汇总了三类不同截面构件采用两种几何初始缺陷取值的计算结果对比；横坐标为绕截面弱轴  $x$  的长细比  $\lambda_x$ ，纵坐标为轴压构件的整体稳定系数  $\varphi = P_u / (A \cdot f_y)$ ；图中标出了试件的一阶特征值失稳模态形式(即长细比较短的为局部屈曲模态，长细比较大的为整体屈曲模态)。从图 9 的计算结果对比可以看出，几何初始缺陷的影响表现为：

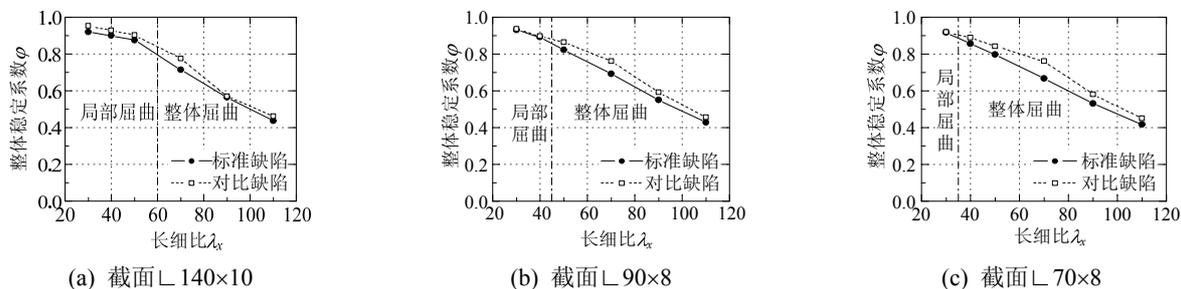


图9 几何初始缺陷的影响

Fig.9 Effects of initial geometric imperfection

1) 与构件长细比有关: 在  $\lambda_x = 70$  附近几何初始缺陷的影响最大, 为 10% 左右, 最大超过 14%;

2) 与构件失稳模态有关: 长细比较小的构件以局部屈曲模态为主, 几何初始缺陷的影响较小, 小于 4%; 长细比较大的构件以弯曲屈曲模态为主, 几何初始缺陷的影响较大, 大部分在 10% 左右。

3) 与构件截面宽厚比有关: 总体上随着 3 类截面宽厚比的减小(截面  $L 70 \times 8$  的最小), 几何初始缺陷的影响增大, 这是由于宽厚比减小后构件更容易发生整体弯曲失稳破坏。

### 2.2 残余应力的影响

为研究构件截面残余应力对 Q420 钢材热轧等边角钢轴压构件整体稳定性能的影响, 计算了 36 个构件, 包括 3 种截面尺寸:  $L 140 \times 10$ 、 $L 90 \times 8$ 、 $L 70 \times 8$ , 6 种长细比: 绕截面弱轴  $\lambda_x = 30$ 、40、50、70、90、110 以及 2 种残余应力分布取值: 一种采

用文献[19]提出的三折线分布模型(三种截面  $L 140 \times 10$ 、 $L 90 \times 8$  和  $L 70 \times 8$  的残余应力峰值系数  $\beta$  分别为 0.132、0.210 和 0.278), 记为标准缺陷; 一种不考虑截面残余应力, 即残余应力峰值系数均取 0, 记为无残余应力。构件几何初始缺陷取上节介绍的标准缺陷。

图 10 汇总了三类不同截面构件采用两种残余应力分布取值的计算结果对比; 从图中可以看出截面残余应力对其整体稳定承载力的影响表现为:

1) 与构件长细比有关: 长细比  $\lambda_x$  在 50 附近时影响最大, 最大超过 12%;

2) 与构件屈曲模态关系并不明显;

3) 与构件截面宽厚比有关: 残余应力的影响随着 3 类截面宽厚比的减小(截面  $L 70 \times 8$  的最小)而增大, 这主要是因为截面宽厚比减小后, 残余应力数值变大<sup>[19]</sup>, 因而影响也变大。

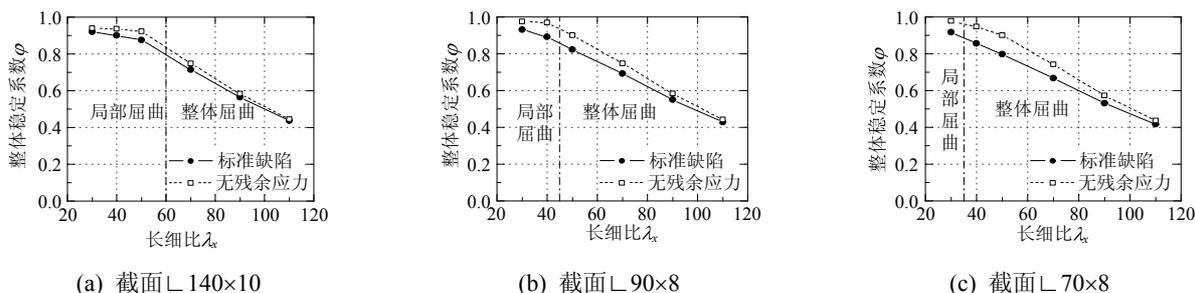


图10 截面残余应力的影响

Fig.10 Effects of cross-sectional residual stresses

### 2.3 钢材力学性能的影响

为研究钢材屈强比  $Y/T$  对 Q420 热轧等边角钢轴压构件整体稳定承载力的影响, 计算了 36 个构件, 包括 3 种截面尺寸( $L 140 \times 10$ 、 $L 90 \times 8$ 、 $L 70 \times 8$ )、6 种长细比( $\lambda_x = 30$ 、40、50、70、90、110)以及 2 种材料本构关系: 即采用图 3 所示模型, 应变统一参考文献[26]中 460MPa 钢材的取值, 屈服强度  $f_y$  统一取标准值 420MPa, 而抗拉强度  $f_u$  分别取我国低

合金高强度结构钢标准<sup>[24]</sup>中规定的上、下限值 520MPa 和 680MPa, 对应的屈强比  $Y/T$  分别为 0.808 和 0.618。图 11 给出了材料本构关系中采用两种屈强比的 Q420 热轧等边角钢轴压构件整体稳定系数对比; 可以看出, 两组的计算结果非常一致, 钢材屈强比变化对其整体稳定承载力没有影响, 这主要是由于失稳时所有构件临界截面的塑性发展没有到达应变强化阶段。

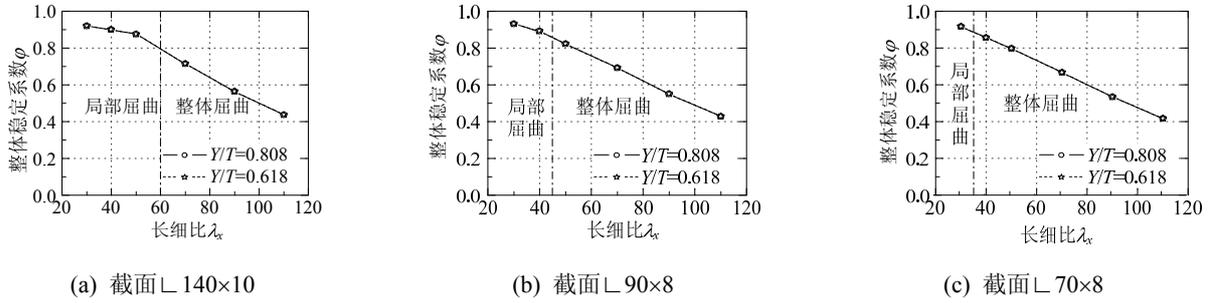


图 11 钢材屈强比的影响  
Fig.11 Effects of Y/T ratio

### 3 设计方法

采用本文的有限元分析方法计算了 50 个 Q420 热轧等边角钢轴压构件的整体稳定承载力，得到的大量柱子计算曲线作为本文制定整体稳定设计方法的主要依据。算例包括 5 种截面尺寸(L 70×8、L 56×5、L 90×8、L 140×10 及 L 160×10)、10 种长细比：绕截面弱轴  $\lambda_x=30、40、\dots、110、130$ 。

#### 3.1 现行规范柱子曲线的选择

将 Q420 热轧等边角钢轴压构件的整体稳定系数有限元计算结果与国内外主要钢结构设计规范设计曲线进行对比分析。

图 12 为计算结果与我国规范 GB50017-2003<sup>[16]</sup> 设计曲线的对比，其中横坐标正则化长细比  $\lambda_n$  是由绕弱轴弯曲长细比  $\lambda_x$  与绕强轴弯扭换算长细比  $\lambda_{yz}$  二者的较大值算得。有限元计算结果明显高于所属的 b 类设计曲线，平均高出 28.7%，比最高的 a 类曲线平均高 14.4%；宽厚比较大的截面 L 140×10 和 L 160×10 构件的稳定系数甚至接近欧拉曲线。这表明 Q420 热轧等边角钢轴压构件的稳定系数有明显提高，可采用中国规范的 a 类柱子曲线进行设计；同时表明我国规范中弯扭换算长细比的计算并不十分合理，特别对于宽厚比较大的单角钢构件。

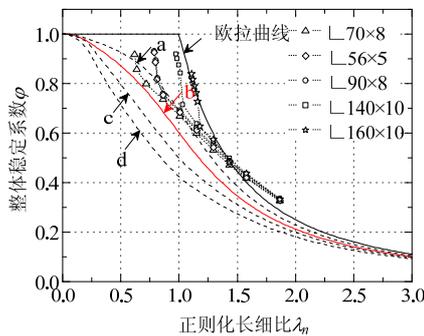


图 12 有限元计算结果与我国规范设计曲线对比  
Fig.12 Comparison of FEA results with column curves in accordance with GB50017-2003

图 13 为计算结果与欧洲规范 Eurocode 3<sup>[17]</sup> 设计曲线的对比，其中横坐标正则化长细比  $\lambda_n$  考虑了弯扭失稳模态以及板件局部屈曲折减(有效截面)的影响，纵坐标的稳定系数  $\phi$  考虑了板件局部屈曲的折减。计算结果明显高于对应的 b 类设计曲线，部分计算结果的稳定系数甚至大于 1.0，表明该规范对板件局部屈曲的折减效应设计过分保守，即有效截面面积计算值偏小，导致整体稳定系数计算值大于 1.0；截面 L 56×5 的构件由于截面面积和板厚太小，导致其弹性扭转和弯扭屈曲临界力远小于其他构件，由此算得的正则化控制长细比太大，计算数据点偏离到欧拉曲线右侧。

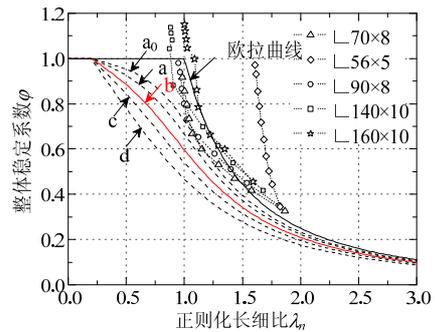


图 13 有限元计算结果与欧洲规范设计曲线对比  
Fig.13 Comparison of FEA results with column curves in accordance with Eurocode 3

图 14 为计算结果与美国规范 ANSI/AISC 360-10<sup>[18]</sup> 设计曲线的对比，其中横坐标正则化长细比  $\lambda_n$  仅考虑了弯曲失稳模态<sup>[18]</sup>，纵坐标的稳定系数  $\phi$  考虑了板件局部屈曲的折减；由于不同截面尺寸构件的折减系数  $Q$  不同，图中给出了 5 种截面对应的考虑板件局部屈曲折减效应后的设计曲线(折减系数分别为 1.0、0.96、0.95、0.86、0.79)。从图 14 可以看出，计算结果随长细比的变化趋势与规范设计曲线比较一致，前者平均高于设计值 15.1%，设计曲线仍有提高的空间。

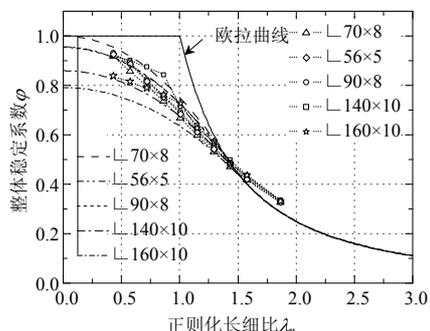


图 14 有限元计算结果与美国规范设计曲线对比  
Fig.14 Comparison of FEA results with column curves in accordance with ANSI/AISC 360-10

对于单轴对称的热轧等边角钢柱，板件局部屈曲和构件整体弯扭失稳可以认为相互等效，二者不宜重复考虑<sup>[27]</sup>。欧洲规范 Eurocode 3 重复考虑了弯扭失稳和局部屈曲效应，导致设计结果过分保守；我国和美国规范只考虑了其中一项因素。本文建议可以采用我国规范的 a 类柱子曲线和换算长细比设计 Q420 热轧等边角钢轴压构件，也可以采用美国规范 ANSI/AISC 360-10 设计此类构件。

### 3.2 新柱子曲线建议

根据上述研究结果，本文建议的新设计方法仅考虑板件局部屈曲的折减效应，而不重复考虑构件弯扭失稳模式的影响，因此控制长细比采用绕弱轴的弯曲长细比  $\lambda_x$ ，使设计结果更加合理。板件局部屈曲的折减系数采用美国规范 ANSI/AISC 360-10<sup>[18]</sup>中无加劲肋板件局部屈曲折减系数  $Q_s$  的计算公式，因为已有 Q420 热轧等边角钢短柱的局部稳定试验研究表明<sup>[28]</sup>，该折减公式最能准确反映此类钢材的板件稳定性能；折减公式见下式<sup>[18]</sup>：

$$Q_s = \begin{cases} w/t \leq 0.45\sqrt{E/f_y} \text{ 时,} \\ 1.0; \\ 0.45\sqrt{E/f_y} < w/t \leq 0.91\sqrt{E/f_y} \text{ 时,} \\ 1.34 - 0.76(w/t)\sqrt{f_y/E}; \\ w/t > 0.91\sqrt{E/f_y} \text{ 时,} \\ 0.53E/[f_y \cdot (w/t)^2] \end{cases} \quad (1)$$

当单角钢柱长细比较大时，失稳模式以弯曲屈曲控制；当长细比较小时，对于截面板件宽厚比超限的构件，板件局部屈曲折减效应较明显。本文有限元计算结果(见图 14)表明，当  $\lambda_n \geq 1.0$  时，不同截面尺寸(宽厚比)轴压构件的整体稳定系数比较接近；当  $\lambda_n < 1.0$  时，不同截面尺寸构件整体稳定系数

间的差距逐渐拉大，特别是宽厚比最大的 L 160x10 截面构件整体稳定系数明显降低，板件局部屈曲折减效应明显。本文建议当  $\lambda_n \geq 1.0$  时，不考虑板件局部屈曲折减效应，即  $Q_s=1.0$ ；当  $\lambda_n < 1.0$  时考虑局部屈曲折减系数  $Q_s$ ，并参考美国规范<sup>[18]</sup>在柱子整体稳定设计中采用  $Q_s$  进行强度折减的设计思路，可在我国规范<sup>[16]</sup>柱子曲线公式中如下考虑这一折减系数，即原设计公式整体乘以折减系数  $Q_s (P_u = A(\phi Q_s) f_y)$ 、正则化长细比乘以  $\sqrt{Q_s} (\lambda_n = (\lambda/\pi)\sqrt{Q_s f_y/E} = \sqrt{Q_s} (\lambda/\pi)\sqrt{f_y/E})$ 。根据这一设计思路及我国规范<sup>[16]</sup>柱子曲线表达式，利用有限元计算结果拟合新柱子曲线的参数。

图 15 为 Q420 热轧等边角钢轴压构件设计曲线拟合的结果，参数  $a_2 = 0.976$ 、 $a_3 = 0.112$  根据非线性拟合确定， $a_1 = 0.00$  根据曲线在  $\lambda_n = 0.215$  处连续确定。为便于和拟合曲线对比，图 15 中  $\lambda_n < 1.0$  的有限元计算数据点横坐标处理为  $\sqrt{Q_s} \lambda_n$ ，纵坐标处理为  $\phi/Q_s$ 。从图 15 可以看出， $\lambda_n > 1.0$  时拟合曲线低于数值计算结果，因此此时不考虑局部屈曲折减是安全的； $\lambda_n < 1.0$  时拟合曲线位于有限元数据点分布区域中间，这主要是由于拟合过程参考我国规范柱子曲线的制定原则，即基于 50%分位值<sup>[16]</sup>。

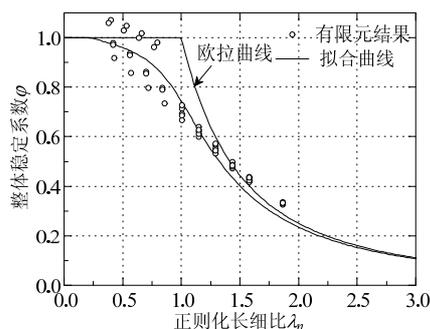


图 15 有限元计算结果与拟合曲线对比  
Fig.15 Comparison of FEA results with proposed curve

由于  $\lambda_n < 1.0$  对应的有限元计算结果较离散，有必要在本文提出的设计方法基础上，进行更广泛的试验研究与数值计算，完善 Q420 等边角钢板件屈曲对整体稳定承载力折减效应的计算方法。

## 4 结论

该文基于 66 个 Q420 热轧等边角钢轴压构件整体稳定的试验研究结果，充分验证了提出的三维有限元模型，并进行了大量参数分析，提出了相应的设计建议；研究主要得到如下结论：

(1) 该文采用 ANSYS 实体单元 SOLID186 建立的有限元模型能够准确模拟 Q420 热轧等边角钢轴压构件的整体稳定受力性能;

(2) 几何初始缺陷对此类轴压构件整体稳定承载力的影响与构件长细比有关, 在  $\lambda_x = 70$  附近影响最大, 为 10% 左右; 还与失稳模态有关, 对整体弯曲失稳构件的影响较大, 对板件局部屈曲为主的构件影响较小;

(3) 截面残余应力的影响与构件长细比有关, 在  $\lambda_x = 50$  附近影响最大, 超过 12%; 其影响程度与失稳模态并无直接关系;

(4) 钢材屈强比  $Y/T$  对此类构件的整体稳定承载力没有影响;

(5) 建议采用我国规范的 a 类曲线或美国规范 ANSI/AISC 360-10 设计此类构件的整体稳定承载力; 另外本文拟合的新设计曲线同样能够很好预测此类构件的稳定性能。

#### 参考文献:

- [1] IABSE. Use and application of high-performance steels for steel structures [M]. Zurich: IABSE, 2005: 136—143.
- [2] Pocock G. High strength steel use in Australia, Japan and the US [J]. The Structural Engineer, 2006, 84(21): 27—30.
- [3] 施刚, 石永久, 王元清. 超高强度钢材结构的工程应用[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)
- [4] 施刚, 班慧勇, 石永久, 王元清. 高强度钢材钢结构研究进展综述[J]. 工程力学, 2013, 30(1): 1—13.  
Shi Gang, Ban Huiyong, Shi Yongjiu, Wang Yuanqing. Overview of research progress for high strength steel structures [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(1): 1—13. (in Chinese)
- [5] 秦永坚, 王登科, 唐其练, 等. 500 kV 双回路输电线路铁塔采用 Q420 高强钢的研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2007, 40(增刊): 200—203.  
Qin Yongjian, Wang Dengke, Tang Qilian, et al. Research on adoption of high-strength steel Q420 in 500kV double-circuit transmission line tower [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2007, 40(Suppl): 200—203. (in Chinese)
- [6] Rasmussen K J R, Hancock G J. Tests of high strength steel columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1995, 34(1): 27—52.
- [7] Usami T, Fukumoto Y. Local and overall buckling of welded box columns [J]. Journal of the Structural Division, 1982, 108(ST3): 525—542.
- [8] 施刚, 班慧勇, Bijlaard F S K, 石永久, 王元清. 端部带约束的超高强度钢材受压构件整体稳定受力性能[J]. 土木工程学报, 2011, 44(10): 17—25.  
Shi Gang, Ban Huiyong, Bijlaard F S K, Shi Yongjiu, Wang Yuanqing. Experimental study and finite element analysis on the overall buckling behavior of ultra-high strength steel compression members with end restraints [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(10): 17—25. (in Chinese)
- [9] 班慧勇, 施刚, 石永久, 王元清. Q460 高强钢焊接箱形截面轴压构件整体稳定性性能研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(1): 22—29.  
Ban Huiyong, Shi Gang, Shi Yongjiu, Wang Yuanqing. Overall buckling behavior of Q460 high strength steel welded box section columns [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(1): 22—29. (in Chinese)
- [10] 班慧勇, 施刚, 石永久, 王元清. 国产 Q460 高强钢焊接工形柱整体稳定性性能研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(2): 1—9.  
Ban Huiyong, Shi Gang, Shi Yongjiu, Wang Yuanqing. Experimental and numerical investigation on the overall buckling behavior of Q460 high strength steel welded I-section columns [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(2): 1—9. (in Chinese)
- [11] 班慧勇, 施刚, 石永久. 960MPa 高强度钢材轴压构件整体稳定性性能研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(1): 118—126.  
Ban Huiyong, Shi Gang, Shi Yongjiu. Overall buckling behavior of 960MPa high strength steel welded section columns subjected to axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(1): 118—126. (in Chinese)
- [12] 班慧勇, 施刚, 刘钊, 石永久, 王元清, 邢海军, 李茂华. Q420 等边角钢轴压杆整体稳定性性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(2): 60—67.  
Ban Huiyong, Shi Gang, Liu Zhao, Shi Yongjiu, Wang Yuanqing, Xing Haijun, Li Maohua. Experimental study on overall buckling behavior of Q420 high strength equal angle members under axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(2): 60—67. (in Chinese)
- [13] 拓燕艳. Q460 高强角钢轴心受压构件整体稳定性的理论和试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.  
Ta Yanyan. Theoretical and Experimental Study on Integral Stability of High Strength (Q460) Angle Bars to Axial Compression [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009. (in Chinese)
- [14] 孟路希. Q460 等边角钢稳定承载力的试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.  
Meng Luxi. Experiments and Investigation on the Bearing Capacity and Stability of Q460 Equilateral-Angle Steel [D]. Chongqing: Chongqing University, 2009. (in Chinese)
- [15] 班慧勇, 施刚, 石永久, 王元清. 高强度等边单角钢轴

- 压构件稳定设计研究回顾与问题探讨[J]. 四川建筑科学研究, 2012, 38(2): 1—8.
- Ban Huiyong, Shi Gang, Shi Yongjiu, Wang Yuanqing. A review on buckling design research of high strength steel equal-leg angle members under axial compression [J]. Sichuan Building Science, 2012, 38(2): 1—8. (in Chinese)
- [16] GB50017-2003, 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 (in Chinese)
- [17] BS EN 1993-1-1, Eurocode 3: Design of steel structures: Part 1-1: General rules and rules for buildings [S]. 2005.
- [18] ANSI/AISC 360-10, Specification for structural steel buildings [S]. Chicago: AISC, INC, 2010.
- [19] 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(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, Li Maohua, Shi Yongjiu, Wang Yuanqing. 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. (in Chinese)
- [20] 施刚, 石永久, 王元清. 运用 ANSYS 分析超高强度钢材钢柱整体稳定特性[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2009, 39(1): 113—118.
- Shi Gang, Shi Yongjiu, Wang Yuanqing. Analysis on overall buckling behaviour of ultra-high strength steel columns by ANSYS [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2009, 39(1): 113—118. (in Chinese)
- [21] 施刚, 石永久, 王元清. 超高强度钢材焊接箱形轴心受压柱整体稳定的有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2009, 25(2): 255—261.
- Shi Gang, Shi Yongjiu, Wang Yuanqing. Finite element analysis on overall buckling of ultra-high strength steel welded box section columns under axial compression [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2009, 25(2): 255—261. (in Chinese)
- [22] 班慧勇. 高强度钢材轴心受压构件整体稳定性能与设计方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- Ban Huiyong. Research on the overall buckling behavior and design method of high strength steel columns under axial compression [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012. (in Chinese)
- [23] 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: Standards Press of China, 2008. (in Chinese)
- [24] GB/T 1591-2008, 低合金高强度结构钢[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- GB/T 1591-2008, High strength low alloy structural steels [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. (in Chinese)
- [25] 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)
- [26] 班慧勇, 施刚, 石永久, 王元清. 建筑结构用高强度钢材力学性能研究进展[J]. 建筑结构, 2013, 43(2): 88—94.
- Ban Huiyong, Shi Gang, Shi Yongjiu, Wang Yuanqing. Research advances on mechanical properties of high strength structural steels [J]. Building Structure, 2013, 43(2): 88—94. (in Chinese)
- [27] Rasmussen K J R. Design of angle columns with locally unstable legs [J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(10): 1553—1560.
- [28] 施刚, 刘钊, 班慧勇, 张勇, 石永久, 王元清. 高强度角钢等边角钢轴心受压局部稳定的试验研究[J]. 工程力学, 2011, 28(7): 45—52.
- Shi Gang, Liu Zhao, Ban Huiyong, Zhang Yong, Shi Yongjiu, Wang Yuanqing. Experimental study on the local buckling of high strength steel equal angles under axial compression [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(7): 45—52. (in Chinese)