

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2017.01.005

方管截面铝合金轴心受压构件力学性能研究

郑秀梅¹, 张铮^{1,2}, 李剑彬¹, 谈夏维¹

(1.福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118; 2.福建省土木工程新技术与信息化重点实验室, 福建 福州 350118)

摘要: 通过有限元软件 ANSYS 构建非线性数值模型, 并利用现有试验数据进行模型准确性验证。分析了板件宽厚比、截面尺寸效应以及是否约束某一主轴方向位移对构件稳定承载力的影响, 发现三者影响均可不予考虑。在大规模参数分析的基础上, 建议对于 6061-T6, 几何缺陷系数中的两个参数分别取 $\alpha = 0.17$ 和 $\bar{\lambda} = 0.09$, 对于 6061-T4 建议取 $\alpha = 0.21$ 和 $\bar{\lambda} = -0.14$ 。对比中、欧规范计算结果发现, 该建议与试验及参数分析结果具有更好的吻合性, 满足计算精度和安全度的工程设计要求。

关键词: 铝合金; 轴心受压构件; 方管截面; 稳定系数; 非线性有限元分析

中图分类号: TU395

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2017)01-0021-05

Study on mechanical performance of box-section aluminium alloy members under axial compression

Zheng Xiumei¹, Zhang Zheng^{1,2}, Li Jianbin¹, Tan Xiawei¹

(1.College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2.Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Technology and Informationization in Civil Engineering, Fuzhou 350118, China)

Abstract: To study the mechanical properties of box-section aluminium alloy members under axial loading, a non-linear numerical (finite element) model was constructed by finite element algorithm ANSYS. The model was verified by experimental data. The influences of the alloy member (plate) width to thickness ratio, the section size and the constraint of a principal axis displacement on the bearing capacity of the alloy members were analysed, showing that the influences of the three factors can be neglected. For alloy member 6061-T6, the geometric defect coefficient $\alpha = 0.17$ and $\bar{\lambda} = 0.09$ were obtained, and for 6061-T4, $\alpha = 0.21$ and $\bar{\lambda} = -0.14$ were recommended. The results indicate that the proposed values are in agreement with the experimental and the parameter analysis results, which can meet the engineering design requirements of the calculation accuracy and safety.

Keywords: aluminium alloy; axially loaded member; box section; stability coefficient; nonlinear finite element analysis

铝合金被广泛应用于建筑领域, 具有质轻、压铸性能良好和耐腐蚀性强等优点。但铝合金弹性模量仅为钢材的三分之一, 相比钢结构, 对铝合金结构稳定问题的研究则更为重要。目前国内关于

方管截面受力性能的研究涉及的并不多, 且主要集中在弱硬化合金构件稳定性能的分析^[1-2], 缺乏强硬化合金构件的研究。另外, 我国《铝合金结构设计规范》GB50429-2007^[3] (下简称“规范”)

收稿日期: 2016-12-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208109); 福建省高校青年自然科学基金重点项目(JZ160465); 福建省高校杰出青年科研人才培育计划项目(JA13209)

通讯作者: 张铮(1978-), 男, 河南焦作人, 博士, 副教授, 研究方向: 桥梁与结构工程。

是基于 H 型铝合金轴心受压构件分析,规定了稳定系数的计算方法。虽然 H 形截面和方管截面均为双轴对称截面,但作为闭口截面的铝合金方管,有必要更深一步验证规范对其适用性。此外,现有研究中稳定系数计算公式的形式大多不同于“规范”的规定,制约了修正相关参数时对它的借鉴。因此,需要通过更深、更有针对性的分析研究,为铝合金结构在相关工程的应用提供重要参考。

本文首先利用大型通用有限元分析软件 ANSYS 构建数值模型,分析了两类工程常用铝合金方管构件在轴压荷载作用下的稳定承载力、破坏模式,并通过试验数据验证模型准确性。然后通过大规模参数分析,利用有限元分析结果拟合得到新的柱子曲线。最后,基于“规范”轴心受压稳定验算公式的基本形式,确定相关参数的取值,提出适用于工程实际的方管截面铝合金轴压构件设计建议。

1 数值分析方法

铝合金的应力-应变曲线具有非线性和连续性,所以其本构关系不能直接简化为钢材常用的理想弹塑性模型。为准确分析铝合金的本构关系,采用了较为复杂的模型。Ramberg-Osgood^[4]模型(即 $\varepsilon = \sigma/E + 0.002(\sigma/f_{0.2})^n$)是应用广泛的较为理想的本构模型,因为它可以很好地描述铝合金的应力-应变关系,式中参数 n 的数值对曲线形状有较大的影响,关于 n 值有不同的取法。Steinhardt^[5]给出的近似表达式(即 $n = f_{0.2}/10$)形式简单且具有一定准确性。通常情况下,对铝合金材料进行划分有一种简单有效的分类方法,即 $n > 20$ 为弱硬化合金, $n < 20$ 为强硬化合金。“规范”规定状态为 T6 的铝合金材料属于弱硬化合金,除 T6 状态的其他铝合金材料属于强硬化合金。

在利用 ANSYS 建立方管截面构件有限元分析模型时,单元类型选择 BEAM189,该单元基于 Timoshenko 梁理论,适用于大变形和大应变的非线性分析。杆端施加铰支约束,并限制绕杆轴的扭转。考虑材料非线性以及由大位移和大转动引起的几何非线性问题,初始缺陷考虑以构件特征值的屈曲形状为基础,其值取 $l/1\ 000$ (l 为构件的长度)。通常情况下,作为挤压型材的铝合金构

件其截面尺寸只会有较小的偏差,且残余应力值很小,所以分析时可不考虑残余应力和力学性能的非均匀性对承载力带来的影响^[6]。最终,有限元计算所得荷载-变形曲线的峰值点即为构件的稳定承载力。

2 数值分析结果验证

将有限元分析结果与文献[6]的试验数据进行比对。如图 1,文献[6]试件屈曲模态与本文有限元模拟结果一致。构件荷载-变形曲线的模拟

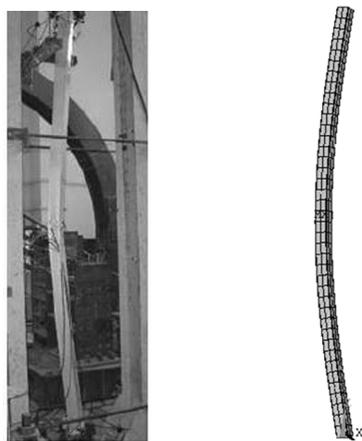


图 1 有限元分析结果与试件实际破坏形态比较

Fig.1 Comparison between finite element analysis result and the actual failure mode of test specimen

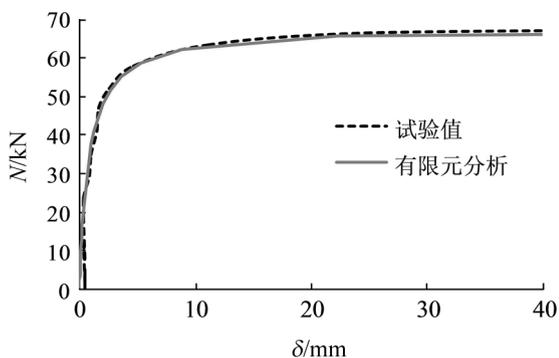


图 2 荷载-跨中位移曲线对比图

Fig. 2 Comparison of load-deformation curve between parameter analysis and tests

结果与试验结果的比较如图 2,两条曲线有很高的吻合度。另外,表 1 给出了试验稳定承载力与有限元计算结果的比较,可看出两者的相对误差不大于 4%。

表 1 承载力实测值与有限元分析结果比较

Tab.1 Comparison of results between numerical calculation and tests

试件 编号	极限承载力 N/kN	计算承载力 N'/kN	$\frac{N' - N}{N} \times 100/\%$
□-3060A	84.060	81.619	-2.90
□-3060B	85.600	82.181	-3.99
□-3500A	69.770	67.590	-3.12
□-3500B	68.140	67.500	-0.94
平均值	—	—	-2.74

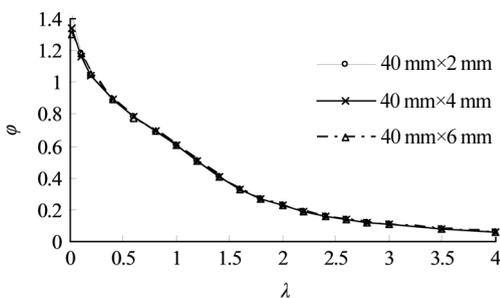
由以上对比分析可知,采用有限元分析方法及模型较为合理可靠,可以利用此分析方法及其模型进行铝合金方管截面轴压构件的分析计算。

3 参数分析及设计建议

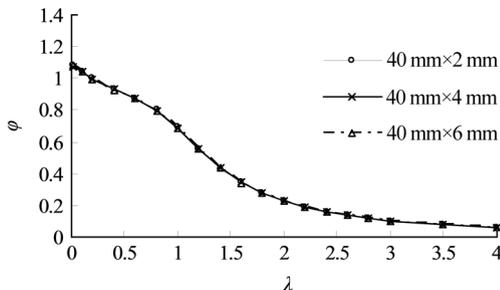
3.1 参数分析

参数分析共计算了 228 个构件的稳定承载力,选取 6061-T4 强硬化合金以及 6061-T6 弱硬化合金两种工程中常用的合金类型进行分析,并选择运用广泛的 Ramberg - Osgood 模型和 Steinhardt 建议,两种合金类型的弹性模量 E 均取 70 000 MPa,泊松比取 0.3,其名义屈服强度 $f_{0.2}$ 根据我国铝合金结构设计规范分别取 110 MPa 和 240 MPa。所分析方管截面的基本尺寸为 40 mm × 2 mm,为两边相等的双轴对称闭口截面。为考察板件宽厚比对构件稳定性能的影响,另行分析了 40 mm × 4 mm 和 40 mm × 6 mm 两种截面。为考察截面尺寸效应对构件稳定性能的影响,补充计算了 20 mm × 1 mm 和 80 mm × 4 mm 两种截面。此外还分析了约束和不约束 y 方向位移两种情况的 $\varphi - \bar{\lambda}$ 曲线。为使柱子曲线更加准确,相对长细比 $\bar{\lambda}$ 选取了 19 个值分别为 0.01、0.1、0.2、0.4、……、2.8、3.0、3.5、4.0。

图 3 和图 4 分别给出了考虑板件宽厚比以及截面尺寸效应影响的 $\varphi - \bar{\lambda}$ 关系曲线,通过两幅图可知,不论是弱硬化合金还是强硬化合金,随着板件宽厚比的变化以及截面尺寸的缩放,有限元分析的柱子曲线几乎保持不变。说明对于方管截面铝合金轴心受压构件,板件宽厚比及截面尺寸效应对其柱子曲线的影响均不需考虑。



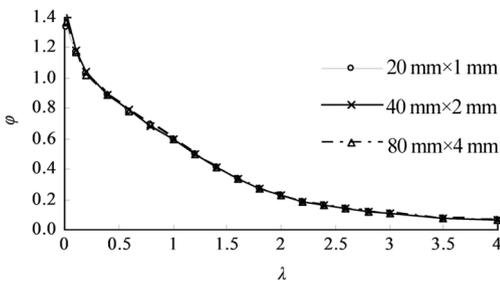
(a) 6061-T4



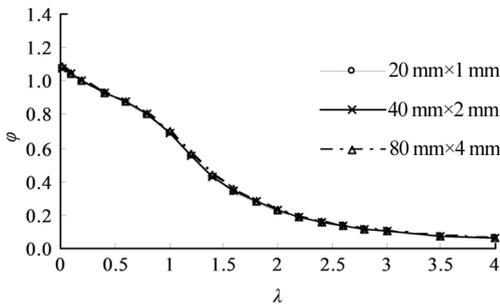
(b) 6061-T6

图 3 板件宽厚比对柱子曲线的影响

Fig.3 The influence of alluminium alloy member width to thickness ratio on the column curves



(a) 6061-T4

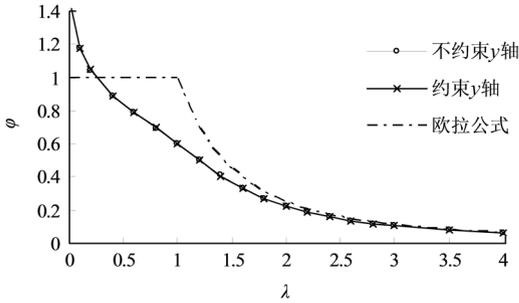


(b) 6061-T6

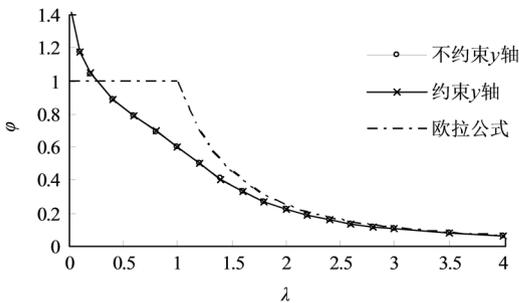
图 4 截面尺寸效应对柱子曲线的影响

Fig.4 The influence of section sizes on column curves

图 5 所绘为是否约束 y 方向位移的柱子曲线对比图,对不同的合金类型分别进行绘制,对于方管截面而言,所有通过形心轴的惯性矩都相等,则相同的 $\bar{\lambda}$ 所对应的长度相等,承载力大小也几乎没有变化。不论图 5(a) 还是图 5(b),两条柱子曲线的重合度均非常高。这说明是否约束某一主轴方向位移对方管截面柱子曲线的影响不显著,可不予考虑。



(a) 6061-T4



(b) 6061-T6

图 5 是否约束 y 轴方向位移对柱子曲线的影响
Fig.5 The influence of the constraint of the y axis displacement on column curves

3.2 实用计算公式

“规范”对双轴对称轴心受压构件的相关要求如式(1):

$$N/\varphi A \leq f \quad (1)$$

式中, N 为所计算构件段范围内的轴心压力; φ 为铝合金轴压构件稳定系数,按式(2)计算:

$$\varphi = \frac{1 + \eta + \bar{\lambda}^2}{2\bar{\lambda}^2} - \sqrt{\left(\frac{1 + \eta + \bar{\lambda}^2}{2\bar{\lambda}^2}\right)^2 - \frac{1}{\bar{\lambda}^2}} \quad (2)$$

式中, $\bar{\lambda}$ 为构件的相对长细比,按式(3)计算:

$$\bar{\lambda} = (\lambda/\pi) \sqrt{f_{0.2}/E} \quad (3)$$

η 为构件考虑初始弯曲及初偏心的系数,按式(4)

计算:

$$\eta = \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) \quad (4)$$

式(4)中, α 和 $\bar{\lambda}_0$ 均为几何缺陷系数中的相关参数,对于弱硬化合金: $\alpha = 0.20$, $\bar{\lambda}_0 = 0.15$;对于强硬化合金: $\alpha = 0.35$, $\bar{\lambda}_0 = 0.10$ 。

“规范”与欧洲铝合金结构设计规范 EN1999-1-1:2007^[8]对轴心受压构件的承载力计算方法均来源于 Perry 公式即式(2),不同之处在于 EN1999-1-1 中规定:弱硬化合金: $\alpha = 0.20$, $\bar{\lambda}_0 = 0.10$;强硬化合金: $\alpha = 0.32$, $\bar{\lambda}_0 = 0$ 。

3.3 柱子曲线对比分析

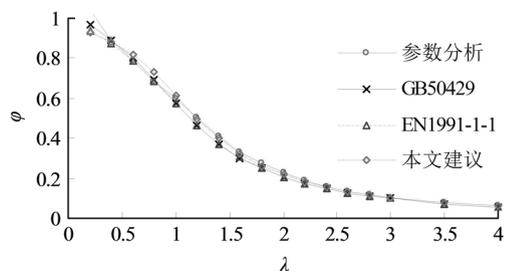
“规范”及 EN1999-1-1 中关于轴压构件整体稳定公式的得出均源于 H 形截面,关于方管截面的计算适用性需进一步确定。

因此,在计算参数拟合的柱子曲线时选用基本尺寸为 40 mm×2 mm 方管截面,且弯曲轴为主轴的情况。利用有限元分析所得柱子曲线,并采用非线性函数的最小二乘拟合法基于 Perry 公式基本形式,通过 Origin 软件拟合出几何缺陷系数中的相关参数,得到两条新的关于不同合金类型且专门对方管截面的柱子曲线。其中计算公式中两个参数取值如下:

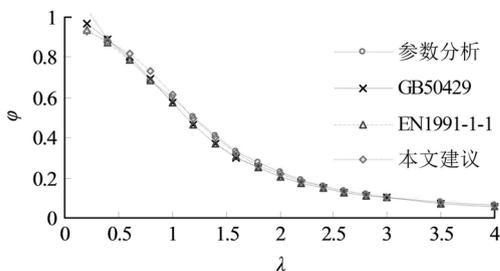
对于 6061-T6: $\alpha = 0.17$, $\bar{\lambda}_0 = 0.09$;

对于 6061-T4: $\alpha = 0.21$, $\bar{\lambda}_0 = -0.14$ 。

图 6 给出了不同合金类型的“规范”、EN1999-1-1、参数分析以及建议柱子曲线的对比图。表 2 给出了各柱子曲线与参数分析的相对误差。由此可看出,对于强硬化合金,“规范”及 EN1999-1-1 基于 H 形截面而得到柱子曲线与参数分析结果相比偏保守,而本文建议柱子曲线与参数分析吻合效果较好,相对误差小于规范公式所得,且总体仍偏于安全;对于弱硬化合金,其曲线吻合效果比



(a) 6061-T4



(b) 6061-T6

图 6 各柱子曲线与试验结果及参数分析的比较

Fig. 6 Comparison between column curves and the results of parameter analysis and test

强硬化合金好,且本文建议柱子曲线与参数分析结果吻合度最好,相对误差最小。因此不论强硬化合金还是弱硬化合金,本文建议公式都更适用于方管截面铝合金轴压构件稳定承载力的验算。

表 2 各柱子曲线与试验结果及参数分析的相对误差

Tab.2 Relative error between column curves and the results of parameter analysis and tests

规范	6061-T4	6061-T6	%
“规范”	-5.545	-1.061	
EN1991-1-1	-5.587	-1.602	
本文建议	-1.369	-0.087	

参考文献:

- [1] 郭小农,沈祖炎,李元齐,等. 铝合金轴心受压构件理论和试验研究[J]. 建筑结构学报,2007,28(6):118-28.
- [2] 张铮,陈学超,庄金平,等. H 形截面 6061-T6 铝合金轴心受压构件试验及计算方法研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2016,48(2):195-201/206.
- [3] 同济大学,现代建筑设计集团上海建筑设计研究院有限公司. 铝合金结构设计规范:GB50429—2007[S]. 北京:中国计划出版社,2008.
- [4] Ramberg W, Osgood W R. Description of stress-strain curves by three parameters[R]. Washington D C: National Advisory Committee for Aeronautics, TN-902,1943.
- [5] Steinhardt O. Constructions in civil engineering[J]. Aluminum,1971,47:31-39;254-261.
- [6] 张铮,陈建良. 铝合金轴心受压构件截面非对称性系数研究[J]. 福建工程学院学报,2009,7(3):216-220.
- [7] 郭小农. 铝合金结构构件理论和试验研究[D]. 上海:同济大学,2006.
- [8] ESA. Design of aluminium structures - General structural rules: EN1999-1-1;2007[S]. Brussels: CEN,2007.

4 结论

1) 不论是 6061-T4 合金还是 6061-T6 合金的方管截面构件,其荷载-变形曲线的变化趋势基本一致,稳定系数随着相对长细比的增大而减小,其稳定承载力也逐渐降低。

2) 对于不同的合金类型,板件宽厚比及截面尺寸效应对方管截面轴压构件柱子曲线的影响不显著,在理论分析及工程实际应用时可不考虑板件宽厚比及截面尺寸效应的影响。另外,对于高宽比为 1 的方管截面构件,不论有否约束某一主轴方向位移,其所得的柱子曲线也几乎重合,可以忽略该条件的不同所带来的影响。

3) 对于 6061-T6 铝合金方管截面轴压构件,本文建议的柱子曲线与有限元分析结果的吻合度要高于“规范”与 EN1999-1-1 计算公式所得柱子曲线,且本文建议的柱子曲线与参数分析及试验结果的相对误差最小。对于 6061-T4 铝合金方管截面轴压构件,“规范”与 EN1999-1-1 偏于保守,本文建议的柱子曲线与参数分析结果的吻合效果要好于两本规范。

4) “规范”从 H 形截面出发得到的稳定系数并不完全适用于方管截面,建议对几何缺陷系数中的两个参数分别进行调整,对于 6061-T6 建议取 $\alpha = 0.17$ 和 $\bar{\lambda} = 0.09$,对于 6061-T4 建议取 $\alpha = 0.21$ 和 $\bar{\lambda} = -0.14$ 。