

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2016.06.005

6061-T4 铝合金方管压弯构件平面内稳定性研究

李剑彬¹, 张铮^{1,2}, 郑秀梅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: 为研究 6061-T4 铝合金方管压弯构件平面内稳定力学性能,建立 ANSYS 有限元模型,分析初始缺陷幅值和单元划分精度对数值计算稳定承载力的影响,并通过现有试验数据对 ANSYS 有限元模型加以验证。在此基础上,进一步分析构件长细比和荷载偏心率对构件稳定承载力的影响。将《铝合金结构设计规范》GB50429-2007 压弯构件面内稳定计算公式得到的相关曲线与数值计算的相关曲线进行比较,发现规范公式偏保守较多。基于大量参数分析,建议对于强硬化铝合金,GB50429 相关公式中修正系数 η_1 改取 0.8,将文中建议结果和数值计算结果进行比较,较原公式吻合更好。

关键词: 铝合金;压弯构件;方管截面;平面内稳定承载能力;数值模拟

中图分类号: TU395 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-4348(2016)06-0538-05

Stability bearing capacity research of 6061-T4 aluminium alloy members beam-column with box section

Li Jianbin¹, Zhang Zheng^{1,2}, Zheng Xiumei¹, 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 6061-T4 aluminum alloy beam-column, a finite element model was constructed by the nonlinear finite element analysis (FEA). The effect of the initial imperfection and the element segmentation/meshing (mesh size) accuracy on the stability of the 6061-T4 aluminum alloy beam-column was analysed. The nonlinear finite element model was verified by relevant experimental data. Then the length to slenderness ratio and eccentricity rate were analysed by the FEA. Comparing the N/N_y - M/M_p relation curves of Chinese code with that of the FEA, it can be concluded that the in-plane stability capacity of the Chinese code is rather conservative. When the value of η_1 of the Chinese code is 0.8, the results of the revised interaction expression show a good agreement with that of the FEA.

Keywords: aluminum alloy; beam-column; box section; in-plane stability (bearing) capacity; finite element analysis (FEA)

铝合金广泛应用于房屋和桥梁结构,建造过程中节约资源,后期维护费用低,回收价值高。与钢材相比铝合金的弹性模量较低,使得铝合金构件失稳问题突出,国内外研究人员都以铝合金稳定问题作为研究重点。由于欧美各国铝合金结构研究开展较早,结构稳定方面的研究已经十分成熟,因此,压弯构件稳定承载力计算公式较为完善。国内压弯构件稳定承载力研究以弱硬化铝合

铝合金广泛应用于房屋和桥梁结构,建造过程中节约资源,后期维护费用低,回收价值高。与钢材相比铝合金的弹性模量较低,使得铝合金构件失稳问题突出,国内外研究人员都以铝合金稳

金为主,且试件截面类型单一^[1-2](以 H 形为主)。郭小农、翟希梅^[2-3]等都对弱硬化铝合金方管压弯构件的稳定问题进行研究,但是未涉及到强硬化铝合金压弯构件的相关内容。张铮^[4]基于 H 形截面压弯构件的试验提出压弯构件稳定承载力计算公式,即《铝合金结构设计规范》GB50429-2007^[5]压弯构件稳定承载力计算公式,并对强硬化铝合金箱形截面压弯构件进行验证。GB50429 中压弯构件平面内稳定计算公式适用于 H 形截面压弯构件稳定承载力计算,但是对于强硬化铝合金方管压弯构件稳定承载力计算还需要进一步完善。由于 6061-T4 是强硬化铝合金中最常用的一种,本文选取 6061-T4 作为研究对象。建立有限元模型,并分析初始缺陷幅值和单元划分精度对有限元模型稳定承载力的影响。在确定初始缺陷幅值和单元划分精度后,对有限元模型进行验证。在此基础上,对不同长细比和荷载偏心率的压弯构件进行分析,获取 6061-T4 铝合金压弯构件稳定承载力数值模拟数据,并对 GB50429 中压弯构件平面内稳定承载能力计算公式进行修正。

1 有限元数值模拟

1.1 有限元模型的建立

以两端简支的 6061-T4 铝合金挤压型材方管截面压弯构件为研究对象,其截面宽度和厚度为 40 mm×2 mm。材料本构关系采用 Ramberg-Osgood 模型^[6],即 $\varepsilon = \sigma/E + 0.002(\sigma/f_{0.2})^n$,该材料模型的参数 E 、 $f_{0.2}$ 和 n 物理意义表达明确,该材料模型可以较好模拟出 6061-T4 铝合金材料的实际性质,与 6061-T4 铝合金材料的吻合良好^[7]。根据 GB50429 中的规定,6061-T4 的弹性模量 E 取 70 GPa,名义屈服强度 $f_{0.2}$ 取 110 MPa。用来描述材料应变硬化的 n 采用 Stein Hardt 提出的建议公式 $10n = f_{0.2}(f_{0.2} \text{ 的单位为 MPa})$ ^[8],该公式十分简洁明了,适用于铝合金,与实测材料拉伸试验数据比较两者偏差很小^[3]。

有限元模型采用 Beam189 单元。该单元基于 Timoshenko 梁理论,适用于分析中等柔度、大柔度构件^[9]。非线性屈曲分析时,采用 Newton-Raphson 法进行平衡迭代控制,求得方管压弯构件的稳定承载力。

1.2 初始缺陷的幅值对稳定承载力的影响

为了解方管截面(40 mm×2 mm)压弯构件的初始缺陷敏感度,初始缺陷幅值取构件计算长度 l 的 1/500、1/1 000、1/1 500 和 1/2 000。图 1 为方管压弯构件在荷载偏心距 e 取 0.017 mm 时初始缺陷幅值对稳定承载力的影响。说明对于长细比 $\lambda \leq 45$ 和长细比 $\lambda > 120$ 的构件,初始缺陷影响很小,而对于 $45 < \lambda \leq 120$ 的构件,初始缺陷影响较大。由于本文研究对象为铝合金挤压型材构件,其残余应力影响可以忽略不计^[10],因此,构件的初始缺陷可以偏保守取 $l/1\ 000$ (涵盖铝合金构件的几何缺陷和力学缺陷)^[11]。该取法符合《铝合金建筑型材》GB/T5237-2008^[12],对于高精级建筑型材,结构构件初始弯曲应小于构件长度的 1/1 250 要求。

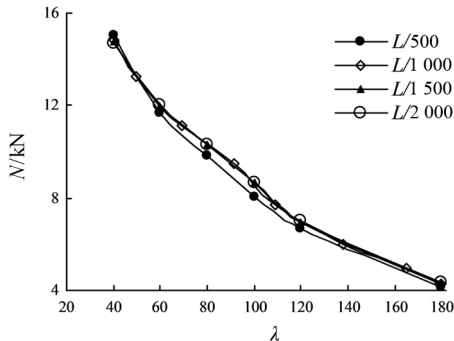


图 1 初始缺陷幅值对稳定承载力的影响

Fig.1 The influence of initial imperfection on stability capacity

1.3 单元划分精度对稳定承载力的影响

单元划分精度决定构件单元数目,划分稀疏对结果准确有一定影响。对于 Beam189 单元,截面网络细化程度对有限元结果影响很小,本文截面网络细化程度为 2。分别选模型分段数 4、20、50、80 段,来分析单元划分精度对方管截面(40 mm×2 mm)压弯构件的稳定承载力的影响。图 2 为方管压弯构件的荷载偏心距 e 取 0.017 mm 时单元划分精度对稳定承载力的影响。数值计算结果表明,划分稀疏对构件稳定承载力有影响。分段数 $m \geq 20$ 段时,对应的曲线基本重合,故采用的分段数为 20 段。

为验证有限元模型,选用文献[3]提供的 6 个铝合金绕弱轴受弯偏压试件的试验数据验证。

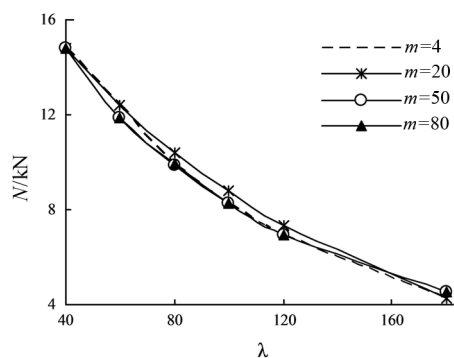


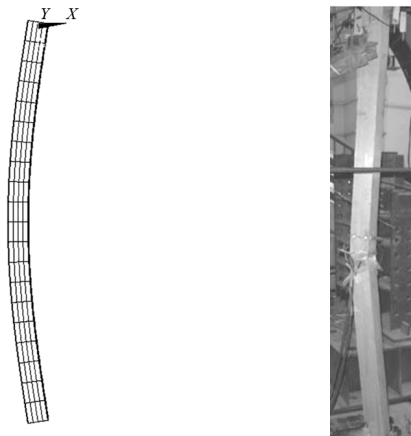
图 2 单元划分精度对稳定承载力的影响
Fig.2 The influence of meshing accuracy on stability capacity

采用实测材性试验数据分析^[3], 屈服强度 266.1 MPa、弹性模量 67 979.6 MPa、指数 n 为 34.3。

1.4 有限元模型的验证

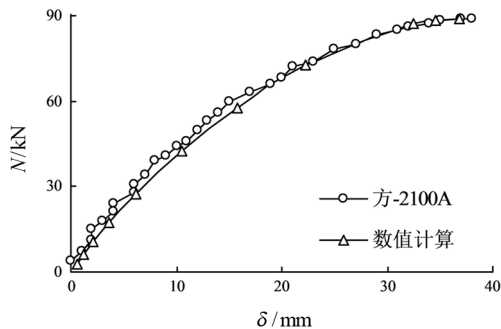
图 3 为有限元结果与文献[3]中试件实际破坏形态的比较。分析得到的有限元破坏模态为平面内整体弯曲屈曲, 与试验的破坏模态一致。图 4 为数值分析结果与文献[3]中试件实际荷载位移的比较。结果表明数值计算的位移荷载曲线与试

验的吻合良好。表 1 为数值分析结果与文献[3]承载力实测值的比较。数值计算得到的稳定承载力与试验的平均误差为 0.06%, 两者的最大相对误差为-2.34%。两者的结果很接近, 说明本文的数值计算方法适用于 6061-T4 铝合金方管压弯平面内稳定分析, 计算结果准确可靠。

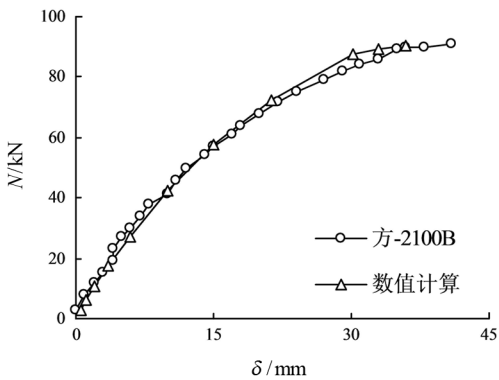


(a) 方-2100A (b) 有限元分析

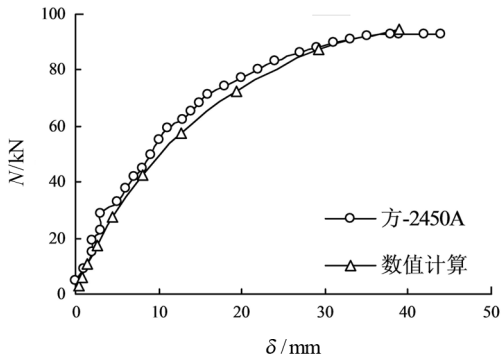
图 3 有限元结果与文献[4]试件实际破坏形态比较^[3]
Fig.3 Comparison of failure mode between FEA and tests



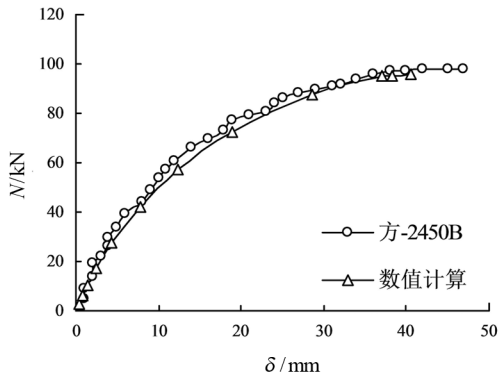
(a) Box-2100A



(b) Box-2100B



(c) Box-2450A



(d) Box-2450B

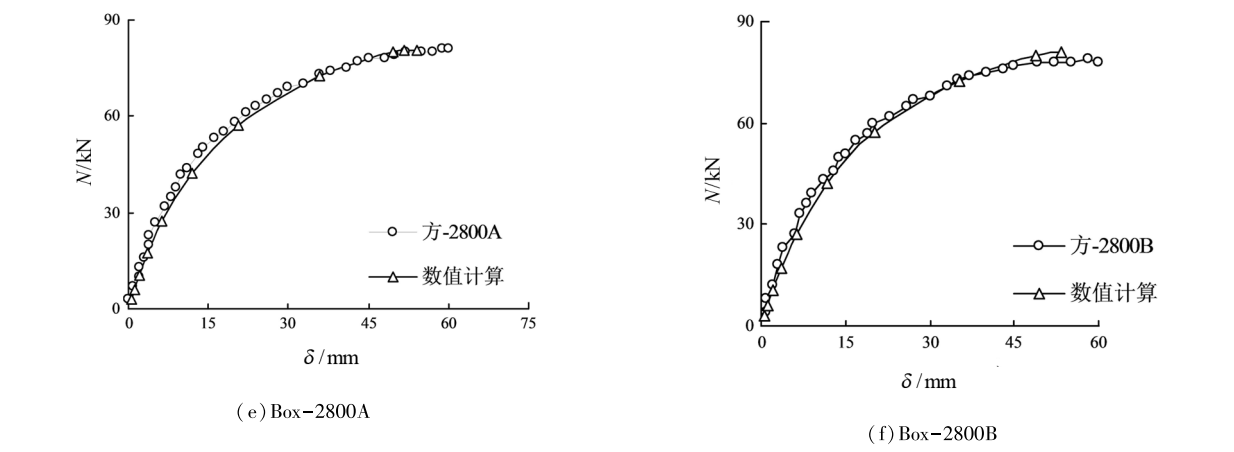


图 4 数值计算结果与文献[4]试验结果的比较

Fig.4 Comparisons of the N - δ curves between numerical calculation and tests

表 1 文献[4]承载力实测值与数值计算结果比较							
Tab.1 Comparison of results between numerical calculation and tests							
试件编号	E/MPa	$f_{0.2}/\text{MPa}$	l/mm	e/mm	P_u/kN	P_e/kN	$(P_e - P_u)/P_u/\%$
方-2100A	67 979.6	272	2100	30	88.51	88.78	0.31
方-2100B	67 979.6	272	2 100	30	90.38	90.19	-0.21
方-2450A	67 979.6	272	2 450	15	93.28	94.88	1.71
方-2450B	67 979.6	272	2 450	15	97.94	95.64	-2.34
方-2800A	67 979.6	272	2 800	15	81.56	80.64	-1.12
方-2800B	67 979.6	272	2 800	15	79.22	80.81	2.01
平均误差	-	-	-	-	-	-	0.06

注:表中 P_u 表示试验值; P_e 表示数值计算结果。

2 参数分析

为了获取构件长细比和荷载偏心率对 H 形和方管截面压弯构件的失稳承载力的影响规律,选用的长细比 λ 为 20、40、60、80、100、120,荷载偏心率为 0.061、0.090、0.180、0.300、0.500、0.900、1.500、3.000、12.000。计算结果见图 5 虚线部分。
 $N_y=f_{0.2}A, M_y=f_{0.2}W_p, W_p$ 为全截面塑性截面模量。

3 计算结果与规范计算值比较

我国《铝合金结构设计规范》GB50429-2007 中压弯平面内整体稳定计算公式如下:

$$\frac{N}{\varphi_x} + \frac{\beta_{mx}M_x}{\gamma_x W_{1x} (1 - \eta_1 N/N'_{Ex})} \leq f \quad (1)$$

式中, N 为所计算构件段范围内的轴心压力; φ_x 为弯矩作用平面内的轴心受压构件稳定计算系数。
本文构件为铝合金挤压型材,其破坏模态为

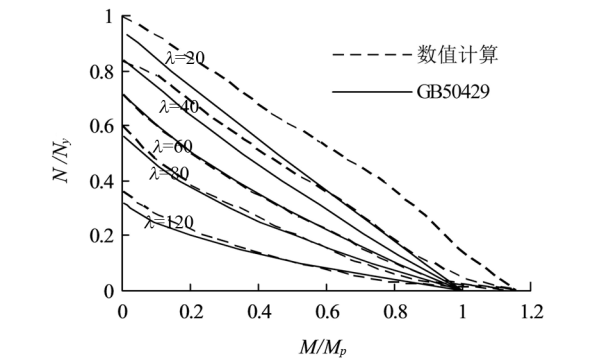


图 5 GB50429 中公式计算结果与数值计算结果的比较

Fig.5 Comparison between calculated results by GB50429 and that of the numerical methods

整体失稳,不考虑局部屈曲影响和焊接缺陷影响,故由式(2)确定; f 为铝合金材料强度设计值,其值按现有规范取; β_{mx} 为等效弯矩系数; γ_x 为截面

塑性发展系数,其值按现有规范取; W_{lx} 为截面模量;对于强硬化合金,修正系数 η_1 取 0.9。

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

式中: $\bar{\lambda}$ 为构件的相对长细比,

$\bar{\lambda} = (\lambda/\pi)\sqrt{f_{0.2}/E}$; $\eta = \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0)$, 本文选用强硬化合金,故 $\alpha = 0.35$, $\bar{\lambda}_0 = 0.10$ 。

图 5 为公式(1)得到相关曲线和数值计算曲线的比较。结果表明,大部分的有限元结果相关曲线都在规范相关曲线的上方,说明 GB50429 可以用于指导国产 6061-T4 铝合金压弯构件的设计。但从这两类的相关曲线偏离度来看,GB50429 中公式对于 6061-T4 铝合金方管截面压弯构件偏保守,需要合理修正。

通过数值分析可以得到方管平面内稳定承载力 N_u ,由此得到方管压弯构件计算的稳定系数 $\varphi' = N_u/N_y$;从式(1)可以得到规范的稳定系数 φ 基于计算的稳定系数与规范的稳定系数比值接近 1 的原则^[4],得到强硬化合金系数 η_1 取 0.8。图 6 为式(1)中强硬化合金系数 η_1 取 0.8 时,式(1)得到相关曲线和数值计算的相关曲线的比较。图 6 和图 5 比较表明,修正后公得到的相关曲线和数值计算的相关曲线更为接近。

参考文献:

- [1] 郭小农, 沈祖炎, 李元齐, 等. 铝合金受弯构件理论和试验研究[J]. 建筑结构学报, 2007(6): 129-135.
- [2] 翟希梅, 孙丽娟, 赵远征. 6082-T6 铝合金箱形与 L 形截面压弯构件稳定承载力研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(9): 73-82.
- [3] 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.
- [4] 张铮. 铝合金结构压弯构件稳定承载力研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [5] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 铝合金结构设计规范: GB50429-2007[S]. 北京: 中国计划出版社, 2007.
- [6] Ramberg W, Osgood W R. Description of stress-strain curves by three parameters[S]. Washington D C: National Advisory Committee for Aeronautics, 1943.
- [7] Mazzolani F M. Aluminium Alloy Structures[M]. 2nd ed. London: Chapman & Hall, 1978.
- [8] Federico M M. Aluminium Alloy Structures[M]. 2nd ed. London: Chapman & Hall, 1995.
- [9] 张庆余, 张伟, 高相胜. ANSYS 非线性有限元分析方法与范例应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [10] 李元齐, 沈祖炎, 郭小农. 铝合金结构研究现状简述[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(6): 100-109.
- [11] 张铮, 张其林. H 形截面铝合金压弯构件平面内稳定承载力的试验及理论研究[J]. 建筑结构学报, 2006(5): 9-15.
- [12] 国家质量技术监督局. 铝合金建筑型材: GB/T5237[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

(责任编辑: 陈雯)

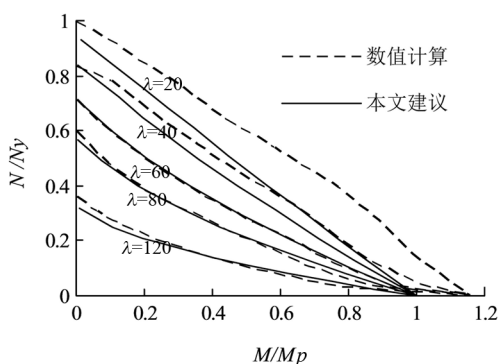


图 6 修正后公式与数值计算结果的比较

Fig.6 Comparison of calculated results by revised interaction expression to that of the numerical methods

4 结论

1) 初始缺陷幅值减小则构件屈曲荷载随之增大。初始缺陷幅值在 $l/1000$ 之内, 构件屈曲荷载变化不明显。中等长构件 ($45 < \lambda \leq 120$) 对初始缺陷幅值的变化比较敏感; 数值分析的精确度与单元划分精度有关。

2) 对于国产 6061-T4 铝合金方管压弯构件, 我国现行规范 GB50429 平面内压弯稳定承载力计算公式偏保守。

3) 基于参数分析, 对强硬化合金 GB50429 平面内稳定承载力计算公式中修正系数 η_1 改取 0.8 时, 得到的相关曲线与数值计算的相关曲线吻合更好, 可以更为精确地计算 6061-T4 铝合金方管压弯构件的平面内稳定承载力。