

工字形铝合金偏心压杆平面内稳定承载力研究

罗小燕, 王志骞, 王鹏军, 渠丽花, 童晓敏

(西安交通大学建筑工程与力学学院, 710049, 西安)

摘要: 运用 ANSYS 软件对常用的铝合金挤压型材偏心压杆的平面内稳定承载力进行了研究, 分析了不同长细比和偏心率杆件的稳定性能, 并讨论了残余应力与初弯曲对杆件承载力的影响. 研究结果表明: 除相对偏心率很大及长细比很小的情况外, 工字形截面偏心压杆受拉翼缘不会进入塑性状态; 初弯曲对杆件的影响随长细比和弯矩的增大而减小; 铝合金挤压型材残余应力峰值很小, 对杆的承载力影响不大, 可忽略不计. 在大量数值分析的基础上, 拟合出了工字形铝合金偏心压杆的平面内稳定计算公式, 可供工程设计参考.

关键词: 铝合金; 偏心压杆; 平面内稳定承载力

中图分类号: TU395 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 - 987X(2004)11 - 1207 - 04

In2Plane Stability Capacity of I2Section Aluminum Alloy Bars under Eccentric Compression

Luo Xiaoyan, Wang Zhiqian, Wang Pengjun, Qu Lihua, Tong Xiaomin

(School of Architectural Engineering and Mechanics, Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China)

Abstract: In2plane stability capacity of I2section aluminum alloy bars under eccentric compressions was investigated with FEA program of ANSYS. The stability of the bars with different slenderness ratio and eccentricity was analyzed and the influence of initial crookedness and residual stresses on the stability was emphatically discussed. The results show that the plastic extension would not occur in tensile region until eccentricity is large and slenderness ratio is small. Moreover, the influence of initial crookedness would be reduced as slenderness ratio and bending moment are increased. In addition, the influence of residual stresses can be neglected because the maximum residual stresses are small. Based on a large number of calculated data, a formula was presented for in2 plane stability capacity of I2section aluminum alloy bars under eccentric compressions, which could be used for engineering design.

Key words: aluminum alloy; eccentric compressive bar; in2plane stability capacity

铝合金作为一种新型材料, 由于具有重量轻、美观、耐腐蚀性强等优点, 在大跨度空间结构中得到了越来越广泛的应用. 欧美各国对铝合金结构的研究较为成熟, 在 20 世纪 70 年代, 欧洲钢结构协会 (ECCS) 就制定了《欧洲铝合金结构建议》^[1], 美国铝业协会制定了《铝合金结构规范》^[2], 英国、意大利等国家也出版了相应的设计规范和文献. 随着国民经济的快速发展, 我国铝合金结构的应用也在逐渐增多, 然而, 国内对铝合金结构的研究较少, 尚无正

式的设计规范和制作、安装、验收标准, 在一定程度上影响了铝合金结构的推广应用.

本文考虑构件大挠度和材料塑性扩展的影响, 用 ANSYS 软件对常用的铝合金挤压型材偏心压杆的平面内稳定进行了研究, 分析了不同长细比和偏心率杆件的稳定极限状态, 讨论了截面残余应力与构件初弯曲对承载力的影响, 在大量的数值分析的基础上拟合出了工字形铝合金偏心压杆的平面内稳定计算公式, 以供设计参考.

收稿日期: 2004 - 05 - 11. 作者简介: 罗小燕(1980~), 女, 硕士生; 王志骞(联系人), 男, 教授.

1 计算模型的建立及其验证

1.1 基本假定

(1) 材料的应力 - 应变模型如图 1 所示. 图 1 为试验得出的挤压铝合金型材的应力 - 应变曲线示意图, 其中 σ_p 为比例极限, σ_e 为弹塑性极限. 对于铝合金材料的 $\sigma - \epsilon$ 曲线的描述有多种表达式, 其中形式为 $\sigma = E \epsilon + (\sigma_e - E \epsilon_p) \left(\frac{\epsilon - \epsilon_p}{\epsilon_e - \epsilon_p} \right)^n$ 的兰伯格 - 奥古德 (Luders-Good) 模型^[3]与铝合金材料的实际性质最为接近, 故本文采用该模型, 其表达式为

$$\sigma = E \epsilon + (\sigma_e - E \epsilon_p) \left(\frac{\epsilon - \epsilon_p}{\epsilon_e - \epsilon_p} \right)^n \quad (1)$$

式中: E 为铝合金材料的弹性模量; $B = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{\sigma_e - E \epsilon_p}{\sigma_e - E \epsilon_e} \right)$.

- (2) 杆件截面在变形后仍保持平面.
- (3) 忽略杆件压缩的影响.
- (4) 杆件的局部稳定和平面外稳定可得到保证.

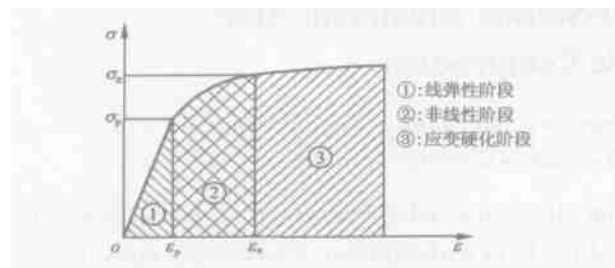


图 1 铝合金型材的应力 - 应变关系示意图

1.2 模型单元的选取

本文结合偏心压杆稳定问题的特点, 采用 ANSYS 软件中的 BEAM189 单元^[4]对铝合金偏心压杆的稳定承载力进行了计算. 该单元为二次三节点空间梁单元, 支持自定义截面及自由网格划分.

1.3 计算结果正确性检验

为了验证模型的正确性, 用本文的方法分析了文献[5]中的几个试件, 分析结果与试验结果见表 1. 为了方便比较, 杆件沿用了文献[5]的编号. 分析时根据文献[6]取铝合金材料的泊松比为 0.13. 由表 1 可见, 本文的计算结果与文献[5]中的试验值极为接近, 说明本文采用的模型适用于铝合金偏心压杆

表 1 ANSYS 计算值与试验值的比较

试件编号	极限承载力/kN		相对误差/%
	试验值 ^[5]	计算值	
T1	83164	83160	- 0105
T7	111167	114138	2140
B6	98133	97106	- 1129
B9	88109	90115	2130

的稳定问题, 计算结果是可靠的.

2 计算结果的分析

2.1 构件的极限状态分析

由计算结果可知, 对称的工字形截面偏心压杆失稳时, 根据相对偏心率 $\eta = eA/W$ (其中 e 为偏心距, A 为杆的截面面积, W 为截面抵抗矩) 和长细比 λ 的不同, 中央截面的应力状态可能有 4 种, 如图 2 所示: 第 1 种状态是受压翼缘进入塑性状态; 第 2 种状态是受压翼缘及部分受压的腹板进入塑性状态; 第 3 种状态是受压区和受拉区翼缘同时进入塑性状态; 第 4 种状态是受拉区腹板也部分进入塑性状态.

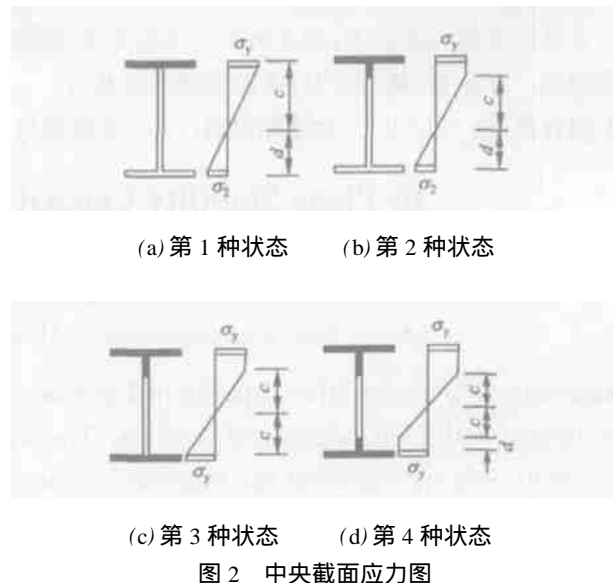


图 3 是截面为 63 mm × 63 mm × 4 mm × 4 mm 的铝合金工字形偏心压杆的平均应力 σ_0 、相对偏心率 η 与长细比 λ 的关系曲线, 材料为热处理铝合金 6061 - T6, $\sigma_{0.2} = 25616$ MPa, $E = 76\ 46718$ MPa. 图中 λ_{12} 为第 1、2 状态分界线; λ_{23} 为第 2、3 状态分界线, 即工字形截面受拉翼缘进入塑性状态的分界线. 可见, 除相对偏心率 η 很大及长细比 λ 很小 (本例中 $\eta > 6$ 时 $\lambda < 30$, $\eta > 4$ 时 $\lambda < 9$) 的情况外, 工字形截面受拉翼缘不会进入塑性状态, 即绝大多数情况下处于第 1、第 2 状态, 而第 3 状态和第 4 状态出现的可能性很小.

2.2 初始缺陷对偏心压杆平面内稳定的影响

2.2.1 初始弯曲的影响 为了考察初始弯曲对铝合金偏心压杆稳定性能的影响, 选用截面为 63 mm × 63 mm × 4 mm × 4 mm 的偏心压杆, 材料为 6061 - T6, $\sigma_{0.2} = 25616$ MPa, $n = 3312$, $E = 76\ 46718$

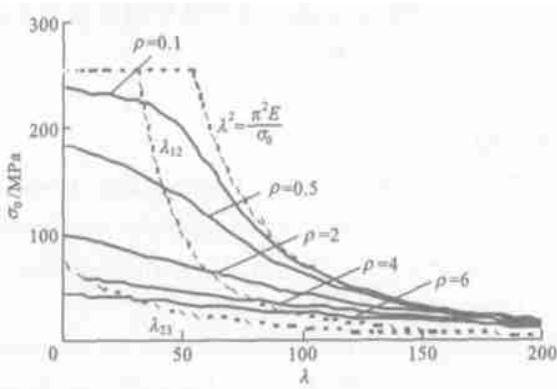
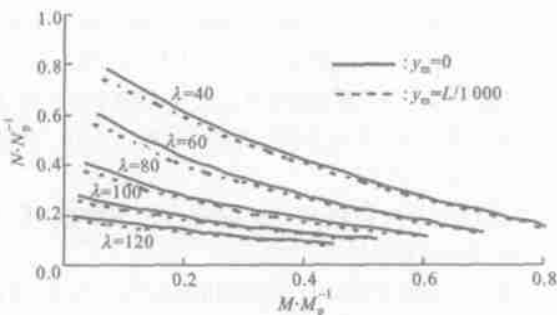


图 3 \$\rho\$ - \$\sigma_0\$ 关系图

MPa, 计算了初始弯曲 \$y_m\$ 分别为 0 和 \$L/1\ 000\$ (\$L\$ 为杆件长度) 时的 \$M - N\$ (弯矩 - 压力) 相关曲线. 整理后的计算结果如图 4 所示, 可见: 随着长细比的增大, 初弯曲的影响减小; 随着弯矩的增大, 初弯曲的影响也随之减小.



\$N\$ 为杆件承受的轴向力; \$N_p = A \sigma_{012}\$; \$M\$ 为杆截面承受的弯矩;

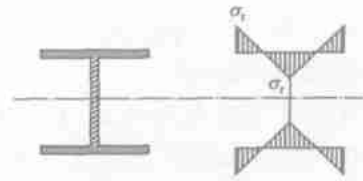
$$M_p = W_p \sigma_{012}, W_p \text{ 为截面塑性抵抗矩}$$

图 4 初始弯曲的影响

2.2.2 残余应力的影响 为了研究残余应力对铝合金偏心压杆承载力的影响, 在下面的分析中, 采用法国根据实测结果给出的工字形截面 (\$63\text{ mm} \times 63\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 4\text{ mm}\$) 铝合金杆件的残余应力模式^[7], 取截面上的最大拉压残余应力峰值相等, 均为 \$50\text{ MPa}\$, 见图 5. 材料仍然选用热处理合金 6061 - T6, 残余应力对压弯构件平面内稳定的影响见图 6. 可见, 残余应力的存在使承载力降低很少, 最大值出现在 \$\lambda = 60, \rho = 0.11\$ 处, 仅降低了 \$31.3\%\$, 小于工程误差限制 (\$5\%\$). 由于铝合金挤压型材的残余应力峰值较小, 对杆的承载力影响不大, 故可忽略不计.

3 铝合金偏心压杆平面内稳定计算

为了拟合出工字形铝合金偏心压杆的平面内稳定计算公式, 本文共计算了 3 种截面, 分别为: \$63\text{ mm} \times 63\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 4\text{ mm}\$、\$100\text{ mm} \times 140\text{ mm} \times\$



(a) 杆截面 (b) 残余应力分布
图 5 残余应力模型

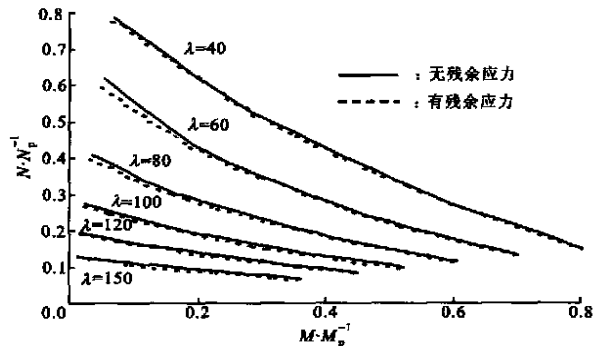


图 6 残余应力的影响

\$10\text{ mm} \times 10\text{ mm}\$、\$100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 7\text{ mm}\$。所选铝合金材料包括了工程中常用的热处理合金 6061 - T6 和非热处理合金 5083 - H321, 长细比取 \$40, 60, 80, 100, 120, 150\$, 偏心率为 \$0.11, 0.15, 1, 2, 3, 4, 5, 6\$, 共计 288 根杆件.

根据文献^[7], 在实际构件中杆件的初始不平直度一般小于 \$L/1\ 000\$, 故在以下的计算中, 均给杆件施加 \$L/1\ 000\$ 的初始弯曲以考虑杆件不平直的影响. 因为残余应力峰值在铝合金挤压型杆件中普遍较小, 故忽略其对杆件稳定承载力的影响.

常用的偏心压杆平面内稳定计算准则主要有 2 个: 边缘屈服准则和最大强度准则.

3.1 边缘屈服准则

以弯矩最大截面边缘纤维开始屈服作为计算准则, 考虑初始缺陷的影响, 则截面边缘纤维屈服的表达式为

$$\frac{N}{A} + \frac{mM}{W(1 - N/N_e)} = \sigma_y \quad (2)$$

式中: \$\phi\$ 为稳定系数; \$m\$ 为弯矩等效系数, 取为 1; \$\sigma_y\$ 为材料的屈服强度; \$N_e\$ 为欧拉临界荷载.

3.2 最大强度准则

压弯构件的受力性质实际上与具有初偏心和初弯曲的轴心压杆相同. 对实腹式压弯杆件来说, 其承载力宜用最大强度准则确定. 对于钢压弯杆件, 文献^[8]认为借用边缘屈服准则导出的相关公式较为合

适,即采用以下形式

$$\frac{N}{A} + \frac{M}{W_p \left(1 - \frac{N}{N_0} \right)} = \sigma_y \quad (3)$$

式中: W_p 为截面塑性抵抗矩。

本文采用最大强度准则公式,由上述构件的有限元分析所得的杆件极限状态承载力 N^3 和极限状态弯矩 M^3 反算出相应的 σ_y , 然后对 σ_y 进行数理统计。由数理统计的中心极限定理可知,大样本母体 ($n > 50$) 是服从正态分布的,统计结果如下

$$\mu = 11282.347 \text{ (样本均值)}$$

$$S = 01436.66 \text{ (样本标准值)}$$

$$\sigma_y = \mu + 11645 S / 288^{1/2} = 11325$$

式中: 11645 是与 95% 的保证率相对应的数值。

因此,可用下式计算工字形铝合金偏心压杆绕强轴弯曲平面内的稳定

$$\frac{N}{A} + \frac{M}{W_p \left(1 - \frac{11325 N}{N_0} \right)} = \sigma_y \quad (4)$$

4 结 论

本文通过对工字形铝合金挤压型材偏心压杆平面内稳定承载力的分析研究,得出以下结论。

(1) 除相对偏心率很大及长细比很小的情况外,工字形截面受拉一侧不会进入塑性状态。

(2) 随着长细比的增大,初弯曲的影响减小;随着弯矩的增大,初弯曲的影响也随之减小。

(3) 铝合金挤压型材的残余应力峰值较小,对杆的承载力影响不大,设计时可忽略不计。

(4) 工字形铝合金偏心压杆绕强轴弯曲平面内的稳定可按式(4)计算。

参考文献:

- [1] European Convention for Constructional Steelwork (ECCS). European recommendations for aluminum alloy structures[Z]. London: European Convention for Constructional Steelwork, 1978.
- [2] Aluminum Association. Specification for aluminum structures[Z]. Washington: Aluminum Association, 1976.
- [3] Ramberg W, Osgood W R. Description of stress-strain curves by three parameters [R]. Technical Note 902. Virginia: National Advisory Committee for Aeronautics, 1943.
- [4] ANSYS Inc. ANSYS element reference [Z]. 9th ed. Pittsburgh: ANSYS Inc, 1997.
- [5] Clark J W. Eccentrically loaded aluminum columns[J]. ASCE Trans, 1955, 120(10): 1116 - 1132.
- [6] 工程材料实用手册编辑委员会. 工程材料实用手册: 铝合金, 镁合金, 钛合金 [Z]. 北京: 标准出版社, 1989. 13, 20, 34, 47, 67.
- [7] [意]马佐拉尼 F M. 铝合金结构 [M]. 谭梅祝, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1992.
- [8] 魏明钟. 钢结构设计新规范应用讲评 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991. 185 - 192.

(编辑 葛赵青)

[文摘预登]

具有钛框架增强结构的人工骨的降解规律

刘亚雄¹, 李涤尘², 卢秉恒², 孙明林³, 王 珏¹

(1. 西安交通大学生物医学信息工程教育部重点实验室, 710049, 西安; 2. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安; 3. 第四军医大学西京医院, 710032, 西安)

为了解决磷酸钙骨水泥(CPC)复合骨形态发生蛋白(BMP)植入体强度低的缺陷,提出一种钛框架/CPC/BMP复合结构的人工骨,并通过长达半年的动物实验及后续分析研究其降解规律,得出了这种植入体降解的动力学模型。研究表明:在植入动物体内后,CPC的孔隙率按对数规律递增,靠近植入体表面的孔隙率明显低于其内部的孔隙率,植入体与骨接壤的端部界面因大块降解呈现出中凸状推进曲线,钛框架上小孔处的孔隙率明显高于无孔处的孔隙率;钛框架能有效提高植入体的整体强度,同时对CPC的整体降解速度没有明显影响。因此,该复合植入体在大段骨修复中具有很高的临床应用价值。这些结论为设计钛框架的形状提供了实验依据。