

# H 形截面 6061-T6 铝合金轴心受压构件试验及计算方法研究

张 铮<sup>1,2</sup>, 陈学超<sup>3</sup>, 庄金平<sup>1,2</sup>, 郑秀梅<sup>1</sup>

(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;

3. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350116)

**摘要:** 以长细比为主要参数, 测试了 6 个两端铰支的 H 形截面 6061-T6 铝合金挤压型材轴压构件的稳定承载力, 所有试件均在强轴平面内发生了整体弯曲屈曲, 得到了实测稳定系数. 同时进行了铝合金材料的性能测试, 获得了材料数据. 建立了有限元分析模型, 并经由试验结果的验证. 进行了参数分析, 并据此建议了新的柱子曲线. 将 GB50429、EN1999 和建议的柱子曲线与参数分析结果和国内现有试验数据分别进行了比较, 发现这两部规范的计算结果很接近且均过于保守, 而建议的柱子曲线与参数分析和试验结果均吻合最好且总体偏于安全, 可供工程应用和规范修订参考.

**关键词:** 铝合金轴心受压构件; H 形截面; 6061-T6; 稳定系数; 柱子曲线

中图分类号: TU395

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)02-0195-07

## Experimental investigation and numerical method research on axially loaded H-section 6061-T6 aluminium compression members

ZHANG Zheng<sup>1,2</sup>, CHEN Xuechao<sup>3</sup>, ZHUANG Jinping<sup>1,2</sup>, ZHENG Xiumei<sup>1</sup>

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

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

3. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

**Abstract:** Stability tests were conducted on axially loaded extruded H-section 6061-T6 aluminum compression members. The main parameters varied in the tests are slenderness ratio. All 6 specimens that were hinged at both ends and tested failed by overall flexural buckling in the plane of the major axis. The measured stability coefficients were determined. At the same time, the performances of aluminum alloy material used in test were surveyed, and the material property data were obtained. The finite element analysis model was established and verified by the test results. A series of parametric analysis was carried out, and on the basis of this a new column curve was proposed by a non-linear fitting. The computational column curves of GB50429, EN1999 and the proposal were compared with the parametric analysis results and the domestic existing test data at home. It is found that the two codes are very close and both are too conservative. Meanwhile, the proposed column curve is in agreement with the parametric analysis results and the experimental results and are overall safety, which can provide useful information for engineering application and specification revision of such aluminium structures.

**Key words:** axially loaded aluminium compression members; H-section; 6061-T6; stability coefficient; column curve

铝合金结构具有轻质、美观、耐腐蚀、施工方便等特点, 广泛应用于房屋结构、桥梁结构和海洋结构中<sup>[1]</sup>. 欧美各国对铝合金结构的研究已较为成熟, 欧洲《铝合金结构设计规范》EN1999<sup>[2]</sup>和美国《铝合金结构设计指南》<sup>[3]</sup>反映了欧美各国铝合金结构的最新研究水平. 在国内, 铝合金结构的研究开展时间相对较短, 对铝合金轴压构件的研究已取得一定成果<sup>[4-11]</sup>. 在此基础上, 国家标准《铝合金结构设计规范》GB50429-2007<sup>[12]</sup>的颁布实施, 对促进铝合金结构在我国的应用起到了很大作用.

目前, 国内对铝合金轴心受压构件的试验研究还显得较不充分, 试验数据很少且仅为同济大学一家单位的成果<sup>[4,5,9]</sup>, 规范公式的试验依据还有待加强. 此外, 对 H 形截面 6061-T6 轴压构件的设计方

法研究还较为欠缺, 规范公式是笼统对弱硬化合金和强硬化合金两大类分别规定了稳定系数的计算方法<sup>[12]</sup>, 对特定材料的针对性不强, 且相关研究的公式形式<sup>[4-5,9]</sup>又与规范的规定不相一致, 对制订规范的支撑作用还不足够. 鉴于此, 有必要进行更多的试验及有针对性的设计方法研究, 以增强我国规范的编制基础.

本文主要针对工程常用的 H 形截面 6061-T6 铝合金挤压型材进行铝合金轴压构件稳定承载力和柱子曲线的研究, 通过一次加载静力试验考察试件长细比对稳定承载力的影响, 获得实测的稳定系数, 并在此基础上建立经过验证的有限元分析模型, 进而基于参数分析和国内现有试验数据提出适用于 H 形截面 6061-T6 铝合金轴压构件的柱子曲

线,以期获得可供相关工程实践参考的结果.

1 试验概括

1.1 试件设计

稳定承载力试验包括 6 个轴压构件的屈曲实测,轴压构件试件均取自截面尺寸为 102×66×6×6 的 H 形截面国产铝合金挤压型材,合金的类型均为 6061-T6. 轴压构件的试件编号和各参数值如表 1 所示.

表 1 稳定承载力试验试件一览  
Tab.1 Test members of stability bearing capacity

试件 编号	截面规格 $H\times B\times t_w\times t_f$ /mm	计算长度 $l$ /mm	长细比 $\lambda$	相对长细比 $\bar{\lambda}$
T6C01-1	102×66×6×6	884	60	1.133
T6C01-2	102×66×6×6	884	60	1.133
T6C02-1	102×66×6×6	1 326	90	1.699
T6C02-2	102×66×6×6	1 326	90	1.699
T6C03-1	102×66×6×6	1 768	120	2.265
T6C03-2	102×66×6×6	1 768	120	2.265

1.2 材性试验

根据《金属材料室温拉伸试验方法》GB/T228-2002<sup>[13]</sup>的相关规定,利用电子万能试验机施加一次单向拉伸荷载,共测试了一组 4 根材性试件. 材性试验所用的试件均取自稳定承载力试验所用的同批铝合金型材,试件尺寸见图 1.

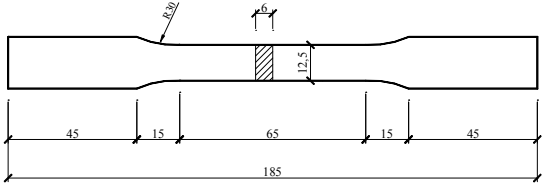


图 1 材性试件  
Fig.1 Material specimens

材性试验结果表明,6061-T6 铝合金在受拉前期表现为线弹性. 当拉应力接近名义屈服强度时,其弹性模量下降很快. 但与低碳钢不同的是,6061-T6 铝合金不存在明显的屈服平台,而是在此后立即进入应变硬化阶段. 根据材性试验实测的荷载—变形值可以得出 6061-T6 铝合金的应力—应变关系,如图 2 所示.

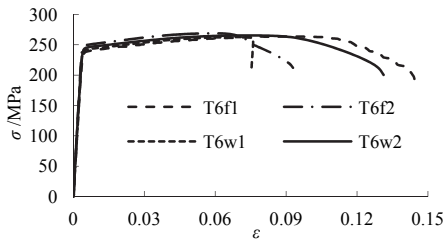


图 2 材料应力—应变关系  
Fig.2 Stress-strain relationship of the material

根据 GB/T 228-2002<sup>[13]</sup>的相关规定对材性试验所得的实测数据进行了处理,得到此批铝合金材料的主要力学性能,如表 2 所示. 表中, $f_{0.1}$ 和 $f_{0.2}$ 为规定非比例伸长应力, $f_{0.2}$ 也称名义屈服强度;试件编号中 $f$ 表示取自翼缘, $w$ 表示取自腹板.

表 2 材性试件实测值  
Tab.2 Measured values of material specimens

试件 编号	合金 类型	弹性模量 $E$ /MPa	$f_{0.1}$ /MPa	$f_{0.2}$ /MPa	抗拉强度 $f_u$ /MPa	伸长率 $\delta$ /%
T6f1	6061-T6	69 254	234.9	238.6	263.8	15.4
T6f2	6061-T6	69 397	247.9	249.5	268.8	13.4
T6w1	6061-T6	69 125	240.1	241.9	262.7	13.3
T6w2	6061-T6	69 464	242.7	245.1	265.2	14.8
平均值	—	69 310	241.4	243.8	265.1	14.2

1.3 加载方案

稳定承载力试验采用卧位的试验方式,将试件置于两个反力墩组成的自平衡加载系统中,利用液压千斤顶施加轴向压力,如图 3 所示.

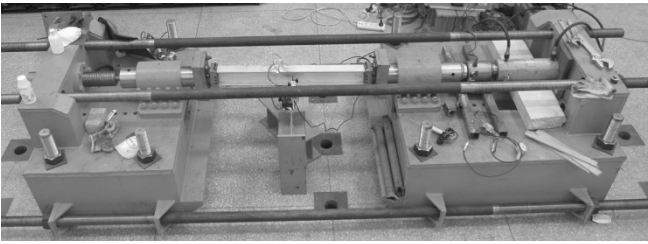


图 3 稳定承载力加载装置  
Fig.3 Loading device of stability bearing capacity

将试件两端嵌入钢制端板中并用螺栓紧固,采用点式铰支座加载方式,以模拟端部铰接的边界条件,并通过调整端板螺栓进行对中,如图 4 所示.

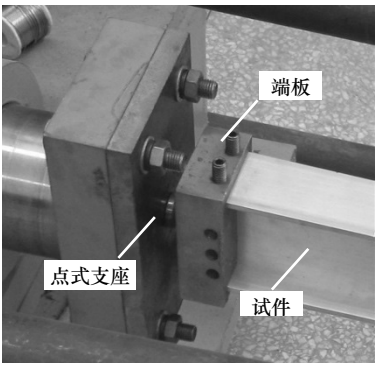


图 4 点式铰支座  
Fig.4 Support of point type

正式加载前,均进行了预加载. 试件全部采用连续加载制度.

1.4 量测方案

千斤顶处布置压力传感器实时测定所加轴向压力. 利用位移计在试件跨中两个主轴方向上进行跨中挠度量测. 同时在试件跨中截面处粘贴沿周长

平均布设的一共四对八片电阻应变片进行跨中截面的纵向应变量测,如图 5 所示. 上述量测内容均利用数据采集系统通过计算机自动采集,并实时进行数据监测.

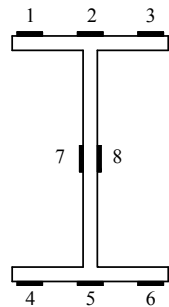


图 5 应变片布置  
Fig.5 Locations of strain gauges

2 试验结果及分析

2.1 试验过程及破坏特征

试验过程中,当荷载较小时,轴压构件跨中截面各处的纵向应变基本比较均匀,且应变与荷载基本成正比.随着荷载不断增大,轴压构件的纵向应变分布开始分化,增长速度也变快.

当荷载接近极限承载力时,轴压构件均出现较为突然的弯曲屈曲,之后很快丧失了承载力.由于所用型材的翼缘和腹板的宽厚比都较小,试验过程中所有轴压构件都没有出现局部屈曲的现象.轴压构件的破坏情况如图 6 所示.

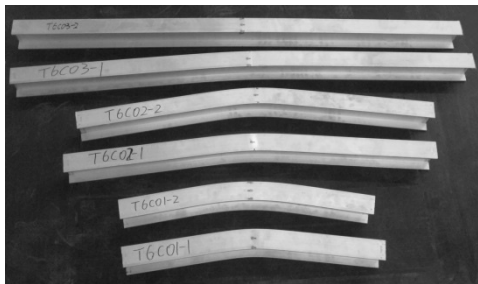


图 6 轴压构件的破坏形态  
Fig.6 Failure forms of members

2.2 荷载—位移关系

轴压构件荷载—跨中挠度关系试验曲线如图 7 所示.

从图 7 可以发现,铝合金轴压构件的长细比从 60 变化到 90 和 120 后,实测试件初始刚度越来越小,跨中挠度发展更为显著,稳定承载力逐渐降低.

2.3 截面应力—应变关系

轴压构件跨中截面平均应力—应变关系试验曲线如图 8 所示,图中应变包括凹侧平均应变、凸侧平均应变和截面总平均应变三种情况.定义压应变为负,拉应变为正.

由图 8 可见,随着铝合金轴压构件长细比增大,跨中截面的应变发展也更快.此外,轴压较小时,跨中截面应变均保持为压应变,试验过程的后期,尤其是长细比较大时,跨中截面凸侧的压应变逐渐减小并可能变号为拉应变.

2.4 试验稳定承载力

轴压构件稳定承载力试验全部试件的试验结果如表 3 所示.表中初偏心  $e_0$  根据初始加载阶段实测跨中应变和挠度由式(1)计算得到.表中还列出了根据试验极限承载力计算得到的稳定系数  $\varphi$ .

$$e_0 = \frac{2I_y(\varepsilon_{凸} - \varepsilon_{凹})}{Ab_0(\varepsilon_{凸} + \varepsilon_{凹})} - \delta$$

(1)

式中,  $I_y$  为绕弱轴的截面惯性矩,  $\varepsilon_{凸}$  为实测跨中截面凸侧平均应变值,  $\varepsilon_{凹}$  为实测跨中截面凹侧平均应变值,  $A$  为截面面积,  $b_0$  为实测跨中截面凸侧和凹侧应变片的间距,  $\delta$  为实测跨中挠度.

表 3 稳定承载力试验结果  
Tab.3 Test results of stability bearing capacity

试件 编号	相对长细比 $\bar{\lambda}$	初偏心 $e_0$ /mm	极限承载力 $N$ /kN	$\varphi =$ $N/(Af_{0.2})$	破坏 模式
T6C01-1	1.133	0.77	200.8	0.650	弯曲 屈曲
T6C01-2	1.133	1.38	194.5	0.630	弯曲 屈曲
T6C02-1	1.699	1.27	108.4	0.351	弯曲 屈曲
T6C02-2	1.699	1.73	110.1	0.357	弯曲 屈曲
T6C03-1	2.265	0.70	57.10	0.182	弯曲 屈曲
T6C03-2	2.265	0.59	61.83	0.195	弯曲 屈曲

3 数值分析

3.1 材性模型

从材性试验的结果(见图 2)可以看出,铝合金材料的应力—应变关系呈现为典型的连续非线性.对于此类材料,经常采用 Ramberg-Osgood 模型来模拟<sup>[1-2]</sup>,如式(2)所示:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002\left(\frac{\sigma}{f_{0.2}}\right)^n$$

(2)

式(2)中的指数  $n$  用来描述材料应变硬化的程度.由于规范一般都不提供  $n$  值,为了便于分析,本文采用 Steinhardt 表达式<sup>[1]</sup>:  $n = f_{0.2}/10$  ( $f_{0.2}$  的单位为 MPa).该式具有相当的有效性<sup>[14]</sup>且形式简单,得到了普遍的应用<sup>[6-10]</sup>.

### 3.2 数值计算方法

本文采用通用有限元分析软件 Ansys 进行铝合金轴压构件荷载—变形全过程分析,同时考虑材料非线性、几何非线性和初始缺陷的影响。

构件在进行有限元建模时采用 Beam189 单元,端部为铰接约束,两端不可扭转但可自由翘曲。

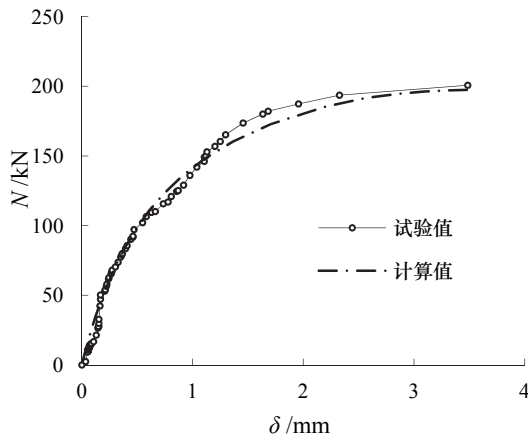
基于之前的研究成果<sup>[1,4,6-10]</sup>,铝合金轴压构件的初始弯曲矢高(包括初偏心的影响)可取为  $l/1000$  ( $l$  为构件计算长度),且铝合金挤压型材的残余应力很小、可以忽略不计。综上,本文采用轴压构件的一阶线性屈曲模态(最大幅值取为  $l/1000$ )作为初始缺陷进行双重非线性分析,得到的荷载—变形曲线上的极值点即为构件的稳定承载力。

### 3.3 数值计算验证

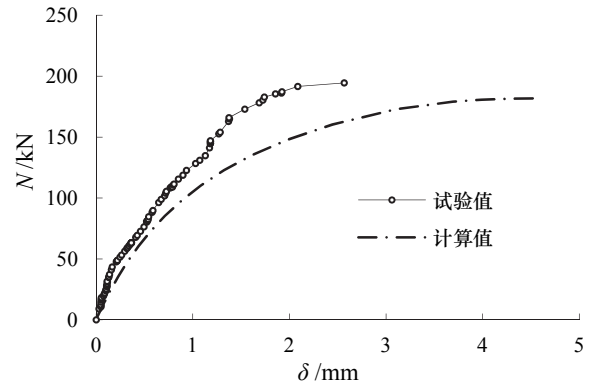
为了验证所建立的有限元分析模型的准确性,结合本文试验的轴压试件进行了数值模拟验证。其中,铝合金材料的应力—应变关系取为材性试验实测结果基于 Ramberg-Osgood 模型的总和模拟,即  $E$  和  $f_{0.2}$  取实测平均值,  $n$  值取  $f_{0.2}$  平均值/10 即 24.38,参见表 2;构件的初弯曲幅值取为承载力试验实测结果基于式(1)的初偏心推算值  $e_0$ ,参见表 3;泊松比取为 0.3<sup>[12]</sup>。

数值模拟计算得到的最终破坏形态与稳定承载力试验的实际破坏形态一致,所有试件都呈现整体弯曲失稳。图 7 中给出了数值计算得出的荷载—变形关系曲线与本次试验结果比较,两者稳定承载力的比较如表 4 所示。

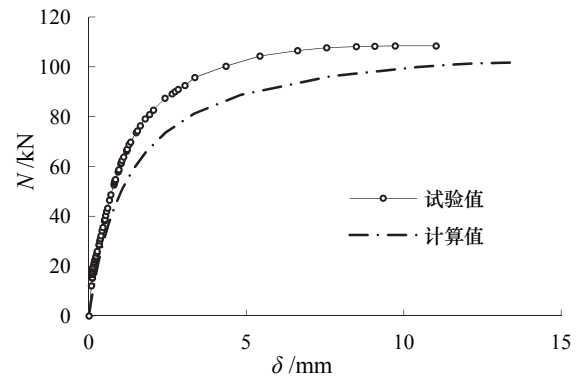
通过图 7 和表 4 的比较可以看出基于本文试验的数值模拟比较令人满意,且数值模拟计算结果总体偏于安全,说明本文的数值计算方法适用于铝合金轴压构件稳定问题的分析,计算结果是可靠的。



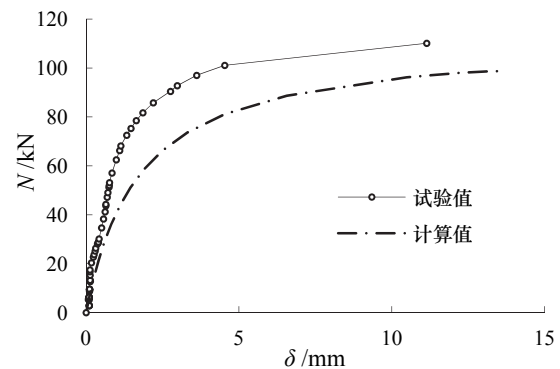
(a) T6C01-1



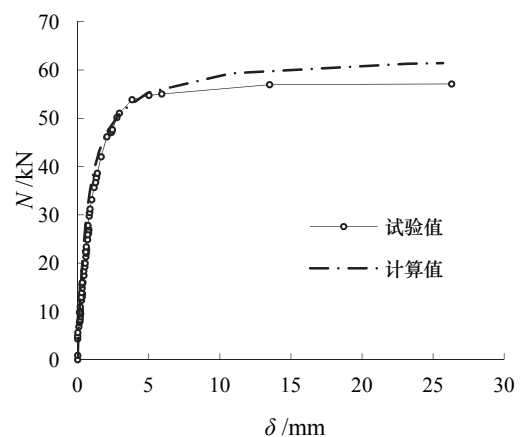
(b) T6C01-2



(c) T6C02-1



(d) T6C02-2



(e) T6C03-1

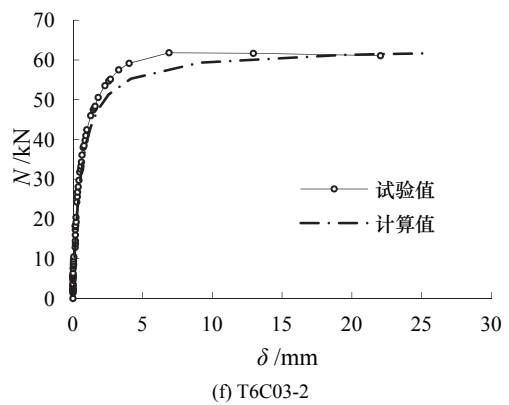


图 7 轴压构件荷载—跨中挠度关系实测曲线与数值模拟计算结果的比较

Fig.7 Comparison of load-midspan deflection curves between measurement and calculation

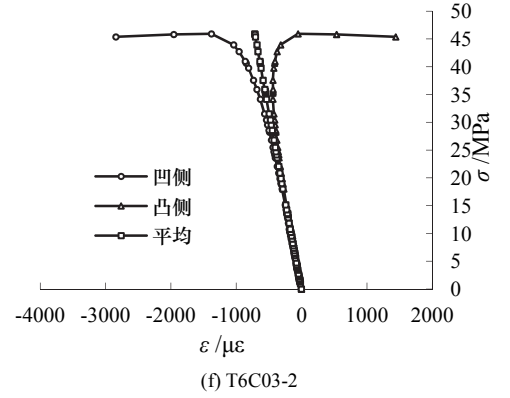
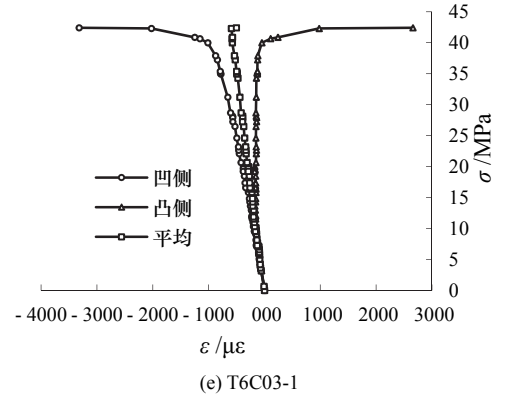
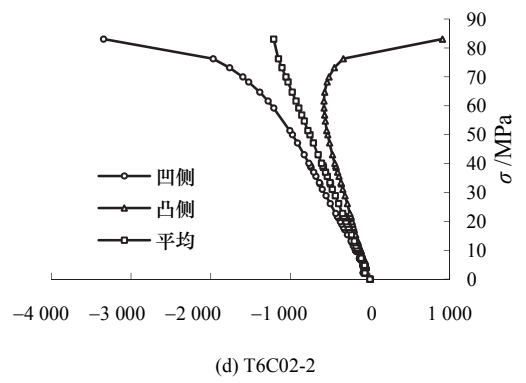
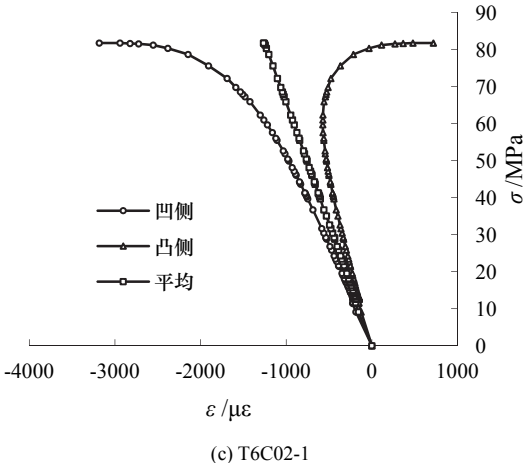
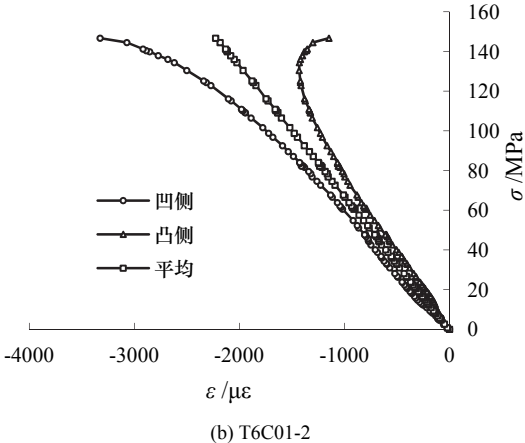
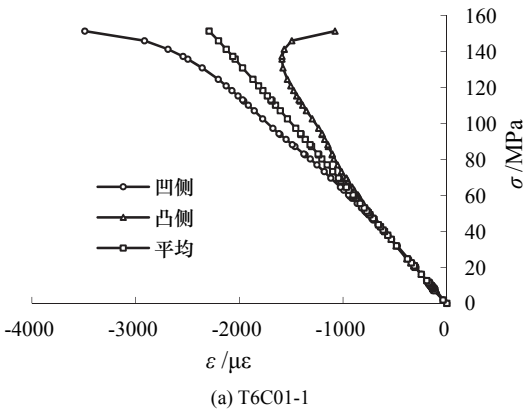


图 8 轴压构件跨中截面平均应力—应变关系试验曲线

Fig.8 Measured mean stress-strain curves of midspan sections of columns

表 4 数值计算结果与试验结果的比较

Tab.4 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	$\frac{N' - N}{N} \times 100$ /%
T6C01-1	200.8	197.4	-1.69
T6C01-2	194.5	181.8	-6.53
T6C02-1	108.4	101.7	-6.18
T6C02-2	110.1	98.76	-10.3
T6C03-1	57.10	61.42	7.56
T6C03-2	61.83	61.68	-0.24
平均值	—	—	-2.90

4 计算方法研究

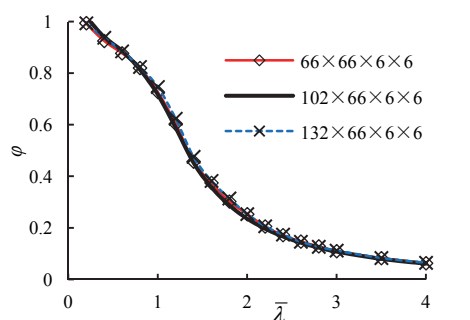
4.1 参数分析

本文利用经验证的有限元模型和分析方法对绕强轴失稳与绕弱轴失稳两种情况下的两端铰接

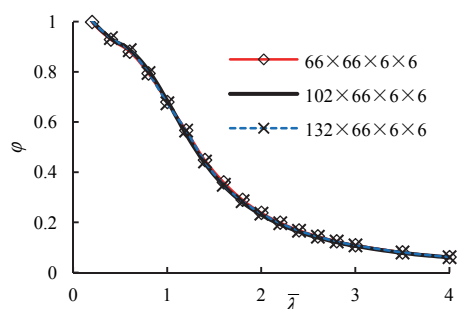


轴压构件进行分析,基本截面尺寸取为  $102 \times 66 \times 6 \times 6$ , 所分析的材料均为 6061-T6 ( $E = 70\text{GPa}$ ,  $f_{0.2} = 240\text{MPa}$ ,  $n = 24$ ), 构件的初弯曲幅值取为  $l/1000$ , 相对长细比  $\bar{\lambda}$  取为 0.01、0.1、0.2、0.4、0.6、...、2.6、2.8、3.0、3.5、4.0. 为了研究截面宽高比的影响, 另行分析了  $66 \times 66 \times 6 \times 6$ 、 $132 \times 66 \times 6 \times 6$  等两种截面. 为了研究板件宽厚比的影响, 另行分析了  $102 \times 66 \times 4 \times 4$ 、 $102 \times 66 \times 8 \times 8$  等两种截面.

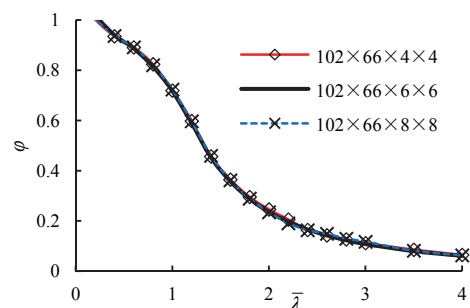
轴压构件绕强轴失稳与绕弱轴失稳的稳定系数  $\varphi$  与相对长细比  $\bar{\lambda}$  关系如图 9 所示.



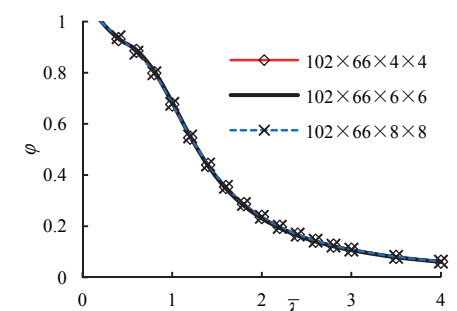
(a) 绕弱轴失稳, 截面宽高比不同



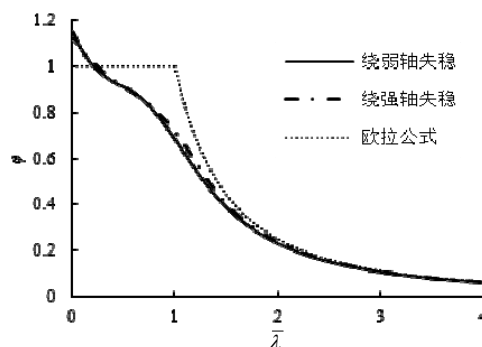
(b) 绕强轴失稳, 截面宽高比不同



(c) 绕弱轴失稳, 板件宽厚比不同



(d) 绕强轴失稳, 板件宽厚比不同



(e) 绕弱轴失稳与绕强轴失稳的比较 ( $102 \times 66 \times 6 \times 6$ )

图9 参数分析结果

Fig.9 Parametric analysis results

由图 9(a)、(b)可发现, 铝合金轴压构件不论是绕弱轴失稳还是绕强轴失稳, 不同截面宽高比的  $\varphi - \bar{\lambda}$  关系曲线重合度非常高. 同时, 由图 9(c)、(d)可发现, 不同板件宽厚比的  $\varphi - \bar{\lambda}$  关系曲线重合度也很高. 这些发现表明, 对 H 形截面铝合金轴压构件而言, 不必考虑其截面尺寸对其柱子曲线影响.

而从图 9(e)还可发现, 铝合金轴压构件绕强轴失稳与绕弱轴失稳的  $\varphi - \bar{\lambda}$  关系曲线非常接近, 完全可以采用一条柱子曲线来进行设计, GB50429 与 EN1999 也均没有对绕强轴失稳与绕弱轴失稳这两种情况进行区分, 这与钢构件在这两种情况下的柱子曲线相差较大有着显著差异.

## 4.2 实用计算公式

### 4.2.1 国家标准《铝合金结构设计规范》

GB50429-2007 的相关规定

实腹式轴心受压构件的稳定性应按式计算:

$$\frac{N}{A} \leq f \quad (3)$$

式中,  $N$  为所计算构件段范围内的轴心压力;  $\varphi$  为轴心受压构件的稳定系数 (取截面两主轴稳定系数中的较小者), 按下式进行计算:

$$\phi = \frac{1 + \eta + \bar{\lambda}^2}{2\bar{\lambda}^2} - \sqrt{\left(\frac{1 + \eta + \bar{\lambda}^2}{2\bar{\lambda}^2}\right)^2 - \frac{1}{\bar{\lambda}^2}} \quad (4)$$

其中,  $\bar{\lambda}$  为构件相对长细比,  $\bar{\lambda} = (\lambda/\pi)\sqrt{f_{0.2}/E}$ ;  $\eta = \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0)$ ; 对于弱硬化合金:  $\alpha = 0.20$ ,  $\bar{\lambda}_0 = 0.15$ .

### 4.2.2 欧盟标准《铝合金结构设计规范》EN1999:

2007 的相关规定

$$\frac{N_{Ed}}{\chi N_{Rd}} \leq 1.0 \quad (5)$$

式中  $N_{Ed}$  为轴心压力;  $N_{Rd}$  为  $Af$ ;  $\chi$  为屈曲时的稳定系数, 按下式取值:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}, \text{ 且 } \chi \leq 1.0 \quad (6)$$

其中,  $\phi = 0.5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2]$ , 对于弱硬化合金:  
 $\alpha = 0.20$ ,  $\bar{\lambda}_0 = 0.10$ .

#### 4.2.3 新的柱子曲线

GB50429 与 EN1999 所规定的柱子曲线其实都是基于 Perry 公式, 只是其中考虑初始缺陷的等效初弯曲  $\eta$  中的两个缺陷系数的取值略有不同. 本文根据 4.1 节参数分析的结果, 利用 Origin 软件采用最小二乘法, 针对 H 形截面 6061-T6 铝合金轴压构件进行了基于式(4)的双参数非线性拟合, 得到了新的柱子曲线. 由图 9 可见, 绕弱轴失稳时的  $\phi - \bar{\lambda}$  关系曲线总是比绕强轴失稳时稍微偏低一些, 因此本文在进行拟合时采用了绕弱轴失稳时的  $\phi - \bar{\lambda}$  关系曲线. 拟合得到的新的柱子曲线中,  $\eta$  计算公式里两个缺陷系数的取值分别为:  $\alpha = 0.16$ ,  $\bar{\lambda}_0 = 0.11$ .

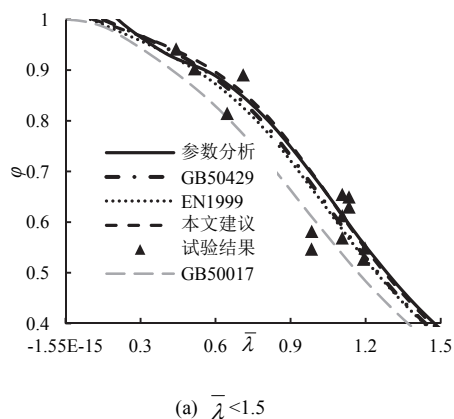
#### 4.3 对比分析

本文轴压构件稳定承载力试验所用试件的合金类型为 6061-T6, 均属于 GB50429 以及 EN1999 规定的弱硬化合金.

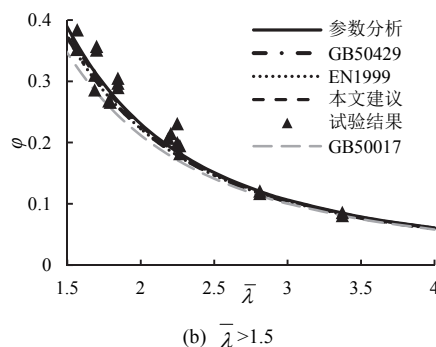
GB50429、EN1999 和本文建议的柱子曲线与参数分析结果(绕弱轴失稳)和本文以及国内现有其他试验数据<sup>[4-5,9]</sup>的比较如图 10 所示.

为了考察铝合金构件与钢构件之间的差异, 图 10 中还画出了《钢结构设计规范》GB50017-2003 的相应柱子曲线. 此外, 表 5 给出了各柱子曲线与参数分析和试验结果之间的相对误差.

从图 10 可看出, 《钢结构设计规范》GB50017 给出的柱子曲线明显不适用于铝合金轴压构件, 曲线的走势有着显著的差异. 从图 10 和表 5 均可看出, GB50429 和 EN1999 这两部规范的柱子曲线很接近, 且与参数分析和试验结果相比较均过于保守. 而本文建议的柱子曲线与参数分析和试验结果均最为吻合且总体偏于安全, 最适用于验算 H 形截面 6061-T6 铝合金轴压构件的稳定承载力.



(a)  $\bar{\lambda} < 1.5$



(b)  $\bar{\lambda} > 1.5$

图 10 各柱子曲线与参数分析和试验结果的比较  
 Fig.10 Comparison of column curves with results of parametric analysis and tests

表 5 各柱子曲线与参数分析和试验结果的相对误差  
 Tab.5 Relative errors between column curves and results of parametric analysis and tests

柱子曲线	与参数分析的相对误差平均值/%	与试验结果的相对误差平均值/%
GB50429	-2.37	-4.01
EN1999	-2.92	-4.60
本文建议	-0.67	-1.86

## 5 结论

本文对 H 形截面 6061-T6 铝合金挤压型材轴压构件的稳定承载力进行了试验及计算方法研究, 得到了以下几点结论:

- (1) 6061-T6 铝合金轴压构件的长细比越大, 则试件初始刚度越小、跨中挠度发展越快、跨中截面应变发展越快、稳定承载力越低.
- (2) 本文采用的数值模拟方法可以得到较为准确的铝合金轴压构件稳定承载力, 计算结果可靠.
- (3) GB50429 和 EN1999 两部规范的柱子曲线较偏保守, 本文建议的柱子曲线与参数分析和试验结果均最为吻合且总体偏于安全.

## 参考文献 References

- [1] Federico M. Mazzolani. Aluminium structural design[M]. New York: Springer-Verlag Wien, 2003.
- [2] Design of aluminium structures-general structural rules: EN1999-1-1:2007 [S]. Brussels: CEN, 2007.
- [3] Aluminum design manual 2005: Specifications for aluminum structures[S]. Arlington: AA, Inc., 2005.
- [4] 沈祖炎, 郭小农. 对称截面铝合金挤压型材压杆的稳定系数[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(4): 31-36.  
 SHEN Zhuyan, GUO Xiaonong. Column curves of aluminum alloy extruded members with symmetrical sections[J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(4): 31-36.
- [5] 李明, 陈扬骥, 钱若军, 等. 工字形铝合金轴压构件稳定系数的试验研究[J]. 工业建筑, 2001, 31(1): 52-54.  
 LI Ming, CHEN Yangji, QIAN Ruojun, et al. Experimental research on stability parameters for I-section alu-

(下转第 206 页)