

基于连续强度法的铝合金箱型截面轴压构件 稳定承载力研究

陈向荣¹,李文博¹,卢小松²,连 鸣¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院,陕西 西安 710055;2. 西安工业大学建筑工程学院,陕西 西安 710021)

摘 要 目的 将连续强度法(Continuous Strength Method, CSM)应用到 6061-T6 铝合金箱型截面轴压构件稳定承载力预测上,解决连续强度法仅适用于计算构件截面承载能力的问题。**方法** 采用有限元软件 ABAQUS 建立试件的有限元模型,在已有的试验验证的基础上进行扩大参数分析,研究我国铝合金规范对不同截面柔度系数和正则化长细比构件稳定承载力预测的准确度;基于连续强度法对我国规范的稳定系数计算公式进行修正,提出适用于连续强度法的稳定承载力计算公式,将两种方法的计算结果进行对比。**结果** 我国铝合金规范对截面柔度系数在 0.228~0.906 内构件的稳定承载力预测普遍偏于保守;对长细比较大构件的稳定承载力预测较保守;笔者提出的修正计算公式能够获得更加精确的结果。**结论** 笔者提出的公式比我国铝合金规范更准确地预测铝合金轴压构件的稳定承载力,且离散度更低,为铝合金构件的稳定设计提供新的设计参考方法。

关键词 连续强度法;铝合金;箱型截面;轴压构件;稳定承载力

中图分类号 TU395

文献标志码 A

Research on Stability Bearing Capacity of Aluminum Alloy Box Section Axial Compression Members Based on Continuous Strength Method

CHEN Xiangrong¹, LI Wenbo¹, LU Xiaosong², LIAN Ming¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, China, 710055; 2. School of Architecture Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, China, 710021)

Abstract: The CSM was proposed in this paper to determine the member buckling resistance of 6061-T6 aluminum alloy box section axial compression columns, which solved the problem that the continuous strength method is currently limited to the determination of cross-sectional resistance only. The finite element model was established and verified by using analysis software

收稿日期:2021-12-02

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51708444);陕西省自然科学基金面上项目(2022JM-268)

作者简介:陈向荣(1972—),女,副教授,博士,主要从事钢结构、轻钢结构等方面研究。

ABAQUS based on experimental results. The expanded parameter analysis was carried out to study the accuracy of Chinese code for the determination of member buckling resistance of columns with different section slenderness and member slenderness; Based on the CSM, the calculation formula of stability coefficient in Chinese code is modified, and the calculation formula of member buckling resistance suitable for the CSM is proposed. The determination of member buckling resistance of columns with section slenderness in range of 0.228 ~ 0.906 in Chinese code, as well as large member slenderness, is generally conservative. Compared with the results of FE data and two design methods, it shows that the CSM provides more accurate member buckling resistance predictions than Chinese code, the proposed calculation method provides a new design reference method for the stability design of aluminum alloy columns.

Key words: continuous strength method; aluminum alloy; box section; axial compression members; stability bearing capacity

铝合金具有轻质高强、耐腐蚀性好、易于加工和美观等优点,被广泛应用于建筑、人行天桥、大型空间结构等领域^[1]。铝合金材料价格比较昂贵,在进行构件设计时充分发挥材料的性能显得尤为关键。

我国现行的《铝合金结构设计规范》(GB 50429—2007)^[2]在进行构件设计时和欧洲铝合金规范^[3]相似。材料本构模型采用理想弹塑性模型,忽略了铝合金材料的应变强化性能;对宽厚比超限的构件,采用有效厚度法对组成构件截面的单个板件进行折减,忽略了构件板件之间的约束影响作用,造成了对构件承载力的保守预测,王元清等^[4]在其文中也证实这一结果。为解决以上问题,L. Gardner^[5]基于不锈钢材料提出了连续强度法(CSM),该方法采用更准确的双线性材料强化模型,通过大量试验数据得到截面变形能力和截面柔度系数之间关系,根据截面的变形能力和双线性材料强化模型来确定截面承载力。该方法能同时考虑材料的应变强化能力和截面的板组效应,可以准确预测构件的截面承载力,在结构设计中能够充分利用材料强度,使结构更加经济。

国外关于连续强度法应用于铝合金材料的研究多集中于对构件截面承载能力的预测,也即对构件强度的预测。M. Ashraf^[6]将CSM应用到焊接铝合金短柱强度预测中,通过引入弱化系数来考虑焊接对铝合金强度的

折减;M. N. Su等^[7]提出了适用于铝合金的双线性强化模型,定义了薄柔截面和厚实截面的分界点,指出连续强度法更适合厚实截面构件的强度预测;M. N. Su等^[8-10]结合试验和有限元模拟,研究了不同截面柔度系数对连续梁承载力的影响,并指出CSM适合于厚实截面梁的强度预测;M. N. Su等^[11]将CSM扩展到薄柔截面构件的截面承载力计算,避免了有效厚度法计算时的繁琐。

国内对于CSM应用到铝合金构件承载力预测的研究较少。2020年,赵远征^[12]研究了CSM对6082-T6铝合金压弯构件、稳定承载力的适用性,指出CSM的预测偏于不安全。

综上所述,连续强度法在铝合金构件中的应用多为对构件的强度进行预测,对铝合金轴压构件的稳定承载力预测尚缺乏相关研究。为了将CSM应用到铝合金构件的稳定计算中,笔者进行了6061-T6铝合金轴压构件的数值模拟研究,探究我国铝合金规范对不同截面柔度系数和不同长细比构件稳定承载力预测的精度,并提出适用于铝合金材料的连续强度法稳定承载力计算公式。

1 有限元模型的建立

1.1 试验构件选取

对本课题组轴压试验构件^[13]采用ABAQUS软件建立有限元模型,试验构件尺

寸见表 1,试件编号含义以“F70 - 50 - 3 - 60”为例,“F”代表箱型截面,“70”代表截面高度,“50”代表截面宽度,“3”代表截面厚度,“60”代表试件长细比,材料参数平均值见表 2。

表 1 试件尺寸						
Table 1 The specimen size						
试件编号	高 × 宽 × 厚/mm	长度/mm	长细比 λ	宽厚比	截面类别	试验承载力/kN
F40 - 40 - 3 - 30	40 × 40 × 3.00	455	30	11.3	二类	105.20
F40 - 40 - 3 - 60	40 × 40 × 3.00	910	60	11.3	二类	61.80
F40 - 40 - 3 - 90	40 × 40 × 3.00	1 365	90	11.3	二类	38.40
F70 - 50 - 3 - 30	70 × 50 × 3.00	600	30	21.3	三类	148.50
F70 - 50 - 3 - 60	70 × 50 × 3.00	1 205	60	21.3	三类	113.40
F70 - 50 - 3 - 90	70 × 50 × 3.00	1 805	90	21.3	三类	55.80
F100 - 50 - 3 - 60	100 × 50 × 3.00	1 250	60	31.0	四类	109.80
F100 - 50 - 2 - 30	100 × 50 × 2.00	640	30	49.7	四类	94.28
F100 - 50 - 2 - 60	100 × 50 × 2.00	1 275	60	49.7	四类	65.25
F100 - 50 - 2 - 90	100 × 50 × 2.00	1 910	90	49.7	四类	46.20

表 2 6061 - T6 铝合金材料参数					
Table 2 The material parameters of 6061 - T6 aluminum alloy					
材 料	弹性模量/MPa	$f_{0.1}$ /MPa	$f_{0.2}$ /MPa	f_u /MPa	伸长率 δ/%
6061 - T6	67 945	242	249	277	11.1

1.2 6061 - T6 铝合金本构模型

Romberg-Osgood 模型已被证实适合表示非线性材料的本构关系,文中铝合金材料模型采用该模型,其应力 - 应变关系如式(1)所示,其中的弹性模量、屈服应力按照表(2)取值,硬化指数 n 的取值可以参考 Steinhardt 的建议按照式(2)取值。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{f_{0.2}} \right)^n. \tag{1}$$

$$10n = f_{0.2}. \tag{2}$$

R - O 模型材料本构关系曲线为名义应力 - 应变曲线,在有限元分析中,需将其转化为真实应力 - 应变曲线。名义应力、应变和真实应力应变的表达式如式(3) ~ 式(6)所示,联立可得到其转换关系式如式(7)、式(8)所示。式中, l_0 、 A_0 分别为材料拉伸试验前试样长度、横截面积; l 、 A 分别为材料拉伸试验后试样长度、横截面积; σ_{ture} 、 ε_{ture} 分别为真实应力、真实应变; σ_{nom} 、 ε_{nom} 分别为工程应力、工程应变,两者应力 - 应变曲线对比

图如图 1 所示。

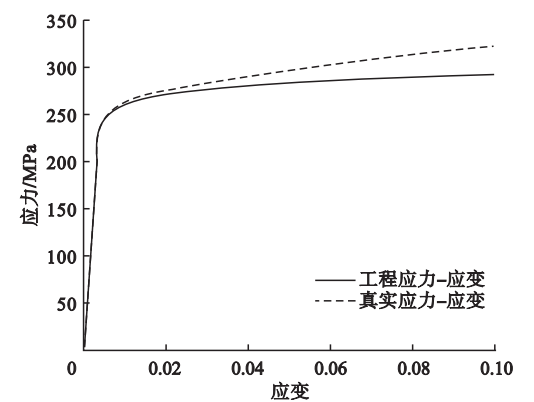


图 1 工程与真实应力 - 应变对比
Fig. 1 The comparison diagram of engineering and field stress-strain

$$\sigma_{nom} = \frac{F}{A_0}. \tag{3}$$

$$\sigma_{ture} = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} \frac{l}{l_0}. \tag{4}$$

$$\varepsilon_{nom} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1. \tag{5}$$

$$\varepsilon_{ture} = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \left(\frac{l}{l_0} \right). \tag{6}$$

$$\sigma_{ture} = \sigma_{nom} (1 + \varepsilon_{nom}). \tag{7}$$

$$\varepsilon_{ture} = \ln(1 + \varepsilon_{nom}). \tag{8}$$

1.3 边界条件和荷载

试验构件的两端为铰接,垫板为钢垫板。在构件两端截面中心位置设置参考点,由于钢材和铝合金材料刚度相差较大,可以通过刚体绑定连接的方式将参考点与构件端部连接。通过约束参考点自由度来实现对试验边界条件的模拟。通过对上端参考点施加 $U3$ 方向的位移荷载来模拟位移控制的加载方式。

1.4 单元选取和网格划分

有限元模型单元采用四节点减缩积分单元(S4R 壳单元),该单元类型被广泛应用于薄壁构件模拟分析中,具有较高的计算效率和计算精度。同时,有限元模型划分网格尺寸的大小也影响有限元模拟的精度和所消耗的时间。笔者综合对比了 5 mm、10 mm 和 15 mm 三种网格尺寸对有限元结果的影响,采用 10 mm 尺寸可以满足计算精度要求,且计算效率高。

1.5 初始缺陷的引入

铝合金构件的初始缺陷主要包括几何缺陷和力学缺陷,几何缺陷主要包括初始弯曲和局部缺陷,力学缺陷主要是残余应力。张铮^[14]指出,根据一致缺陷模态法,构件的初始缺陷分布宜采用结构的最低阶屈曲模态。笔者对轴压条件的理想直杆有限元模型进行屈曲分析,得到构件的低阶整体屈曲模态和局部屈曲模态,如图 2 所示。将其作为初始几何缺陷分布情况,通过修改关键字的方法引入到模型中。有限元模型初弯曲幅值的大小按照郭小农^[15]的建议取构件长度的 1/1 000,局部屈曲缺陷的幅值按照 Walker 公式 $\omega_d = 0.3t \sqrt{f_{0.2}/\sigma_{cr}}$ 来计算。铝合金构件为挤压成型,其内部残余应力很小, M. F. Mazzolani^[16]也在其文中指出挤压成型铝合金构件的残余应力仅为 20 MPa 左右,残余应力对铝合金构件的承载力影响很小,几乎可以忽略,因此,笔者模型中不考虑残余应力

的影响。

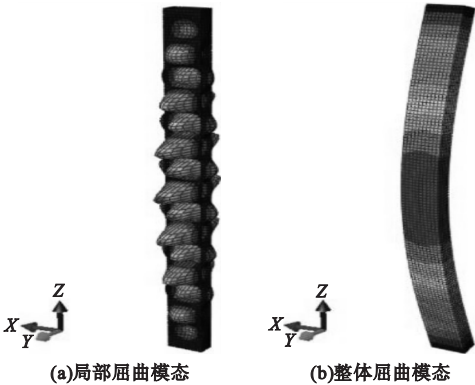


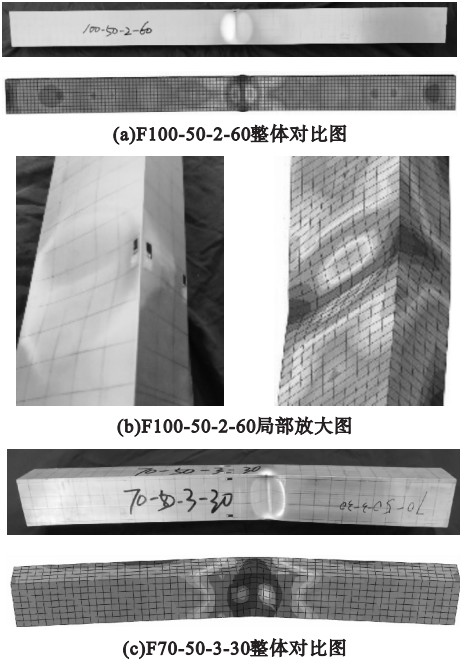
图 2 理想直杆屈曲分析

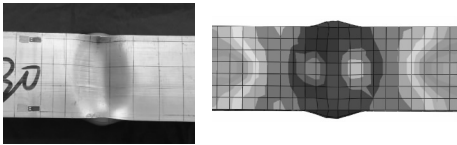
Fig. 2 The buckling analysis of ideal straight bar

1.6 有限元模型的验证

1.6.1 破坏形态对比

选取试验中具有典型破坏形态的试件 F100-50-2-60 和试件 F70-50-3-30 与其有限元模型的破坏形态对比。选取的试件截面宽厚比较大,为第三、四类薄柔截面,构件的破坏形式为局部屈曲和整体失稳的耦合破坏,对比试验和有限元破坏形态如图 3 所示。由图可见,试验和有限元两者获得的破坏形态吻合较好。





(d)F70-50-3-30局部放大图

图3 试验^[13]与有限元破坏形态对比

Fig.3 The comparison of failure modes between test and finite element

1.6.2 荷载－轴向位移曲线对比

将试件 F100－50－2－60 和试件 F70－50－3－30 的试验和有限元模拟所得荷载－轴向位移曲线进行对比,如图4所示。

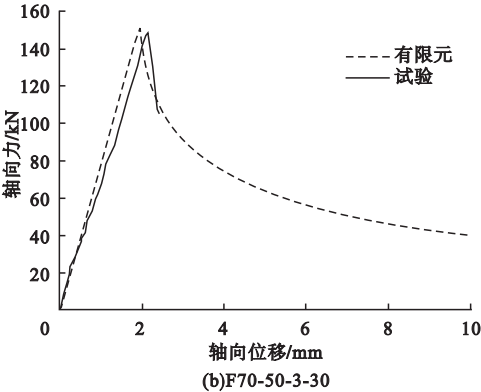
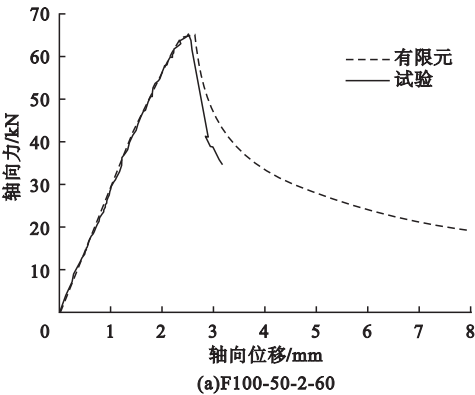


图4 试验和有限元荷载－轴向位移曲线对比

Fig.4 The comparison of load-displacement curves between test and finite element

由图可知,试验曲线与有限元模拟曲线两者吻合较好,有限元曲线下降段在试验曲线上方,考虑为有限元模型约束条件较为理想所致。

1.6.3 构件试验与有限元承载力对比

将所有试件的试验和有限元承载力对比,详细数据如表3所示。由表可知,大部分构件

的试验和有限元承载力误差在10%以内。

表3 试验和有限元承载力对比

Table 3 The comparison of bearing capacity between test and finite element

试件编号	$N_{\text{test}}/\text{kN}$	N_{FE}/kN	$N_{\text{test}}/N_{\text{FE}}$
F40－40－3－30	105.20	101.41	1.04
F40－40－3－60	61.80	70.14	0.88
F40－40－3－90	38.40	34.70	1.11
F70－50－3－30	148.50	151.55	0.98
F70－50－3－60	113.40	105.13	1.08
F70－50－3－90	55.80	53.06	1.05
F100－50－3－60	109.80	118.18	0.93
F100－50－2－30	94.28	95.29	0.99
F100－50－2－60	65.25	64.27	1.02
F100－50－2－90	46.20	46.79	0.99

注: N_{test} 为试验承载力; N_{FE} 为有限元承载力。

综上所述,说明笔者所建立的有限元模型能够准确地模拟铝合金轴压试验过程,为进一步的参数分析提供依据。

2 参数分析

为验证我国铝合金规范对不同截面柔度系数和长细比的轴压构件稳定承载力预测的准确度,基于已经验证的有限元模型,建立了10种截面尺寸,13种长细比,共计130个构件的有限元模型。截面尺寸涵盖了欧洲规范的四类截面,截面柔度系数变化范围为0.228~0.906,长细比变化范围为30~90,具体参数设置方案见表4。

表4 参数设置

Table 4 The parameter settings

截面类型	截面规格	截面柔度系数 λ_p	长细比 λ
第一类截面	40－40－5	0.228	30、35、40、45、50、55、60、65、70、75、80、85、90
	80－80－7	0.336	
第二类截面	70－50－5	0.378	
	100－100－7	0.426	
第三类截面	80－80－5	0.480	30、35、40、45、50、55、60、65、70、75、80、85、90
	100－50－5	0.533	
	100－100－5	0.607	
	80－40－3	0.718	
第四类截面	100－100－4	0.765	90
	100－50－3	0.906	

将我国规范计算结果与所得的有限元计算结果的比值绘制于图5中。其中, N_{GB} 为规范中给定的承载力。由图5(a)可知,我国规范对长细比较长构件的稳定承载力预测偏于保守。由图5(b)可以看出,对于全范围的截面柔度,我国规范对构件稳定承载力的预测普遍偏于保守,其原因主要:①对于截面宽厚比未超限的构件,构件失稳时的极限应力往往能够达到并超过0.2%名义应力,进入应变强化阶段,而规范忽略了铝合金材料的这种应变强化能力;②对于宽厚比超限的构件,有效厚度法对截面强度和刚度进行了两次折减^[17],低估构件的稳定承载力。

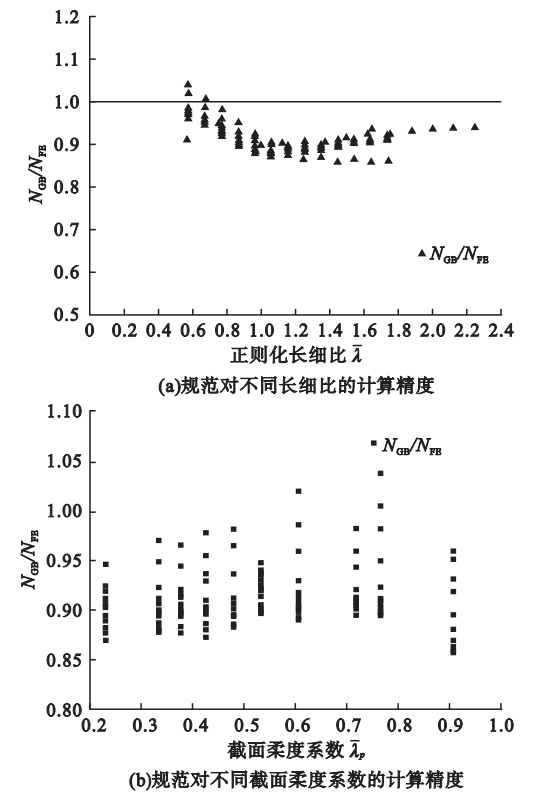


图5 中国规范与有限元计算结果对比

Fig.5 The comparison of calculation results between Chinese code and finite element method

3 基于连续强度法的稳定承载力计算

3.1 中国规范稳定承载力计算方法

中国规范关于铝合金轴压构件稳定承载

力的计算方法是基于截面边缘纤维屈服准则,由式(9)计算。式(9)引入等效初始缺陷

系数 $\eta_0 = \frac{e_0}{W_{el}/A}$, 可得式(10)。

$$\frac{P}{N_{0.2}} + \frac{Pe_0}{M_{el}\left(1 - \frac{P}{P_E}\right)} = 1. \tag{9}$$

$$\frac{P}{Af_{0.2}} + \frac{P\eta_0}{f_{0.2}\left(1 - \frac{P}{P_E}\right)} = 1. \tag{10}$$

在结构设计时采用式(11)来计算稳定承载力。其中, $\bar{\varphi} = \eta_e \eta_{haz} \varphi$; η_e 为考虑板件局部屈曲的修正系数; η_{haz} 为焊接缺陷影响系数; φ 为稳定系数,由 Perry-Robertson 公式计算,如式(12)所示。式(12)中, $\bar{\lambda}$ 为正则化长细比,等效初始缺陷系数 η_0 在结构设计中通常采用与正则化长细比 $\bar{\lambda}$ 有关的表达式计算如式(13)所示。其中, $\alpha, \bar{\lambda}_0$ 为缺陷系数,取值见规范^[2]。

$$\frac{N}{\varphi A} \leq f. \tag{11}$$

$$\varphi = [1 + (1 + \eta_0)/\bar{\lambda}^2]/2 - \sqrt{[1 + (1 + \eta_0)/\bar{\lambda}^2]^2/4 - 1/\bar{\lambda}^2}. \tag{12}$$

$$\eta_0 = \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) = \frac{e_0}{W_{el}/A}. \tag{13}$$

3.2 连续强度法稳定承载力计算方法

连续强度法通过预测构件截面的极限变形能力来确定截面承载力,其主要内容包括基础曲线和材料的应变强化模型。M. N. Su 等^[11]详细阐述了这两部分的内容并根据大量实验和有限元数据确定了适用于6061-T6 铝合金的基础曲线和双线性强化本构模型,笔者将采用文献[11]中的基础曲线和材料强化模型来计算构件截面的受压承载力 N_{csm} 和受弯承载力 M_{csm} 。

如果直接将连续强度法的截面承载力 N_{csm} 、 M_{csm} 替换式(9)中的 $N_{0.2}$ 、 M_{el} 来计算构件的稳定承载力,如式(14)所示。将会忽略构件截面塑性发展导致的截面抗弯刚度降低对构件稳定的不利影响,从而高估构件的稳定承载力。因此,将连续强度法应用于稳定

承载力的预测尚需对稳定系数加以修正。

$$\frac{P}{N_{\text{csm}}} + \frac{Pe_{\text{csm}}}{M_{\text{csm}}\left(1 - \frac{P}{P_E}\right)} = 1. \quad (14)$$

I. Arrayago 等^[18]基于不锈钢材料,通过提高规范中的等效初始缺陷系数 η_0 来反应塑性发展对构件稳定的不利影响,笔者参照中国规范给出适用于连续强度法稳定系数计算的等效初始缺陷系数 η_{csm} ,如式(15)所示。其中, $\bar{\lambda}_{\text{csm}} = \sqrt{f_{\text{csm}}/\sigma_E}$ 。联立式(15)和式(13)可确定参数 α_{csm} ,如式(16)所示。式(16)中除 e_{csm}/e_0 外各个参数均已知,接下来将确定 e_{csm}/e_0 的取值。

$$\eta_{\text{csm}} = \alpha_{\text{csm}}(\bar{\lambda}_{\text{csm}} - \bar{\lambda}_0) = \frac{e_{\text{csm}}}{W_{\text{el}}/A}. \quad (15)$$

$$\alpha_{\text{csm}} = \frac{e_{\text{csm}}}{e_0} \frac{N_{\text{csm}} M_{\text{el}}}{N_{0.2} M_{\text{csm}}} \frac{(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0)}{(\bar{\lambda}_{\text{csm}} - \bar{\lambda}_0)}. \quad (16)$$

3.3 参数 e_{csm}/e_0 的确定

对于 e_0 和 e_{csm} 的值,可由试验和有限元所得的承载力值代入到式(9)和式(14)中反算得到,反算得到的 e_{csm}/e_0 的比值如图6所示。因为 e_{csm} 相对 e_0 的变化是为了反应塑性发展对稳定的不利影响,截面越厚实的构件,其塑性发展能力越强,因此 e_{csm}/e_0 的比值采用与截面柔度系数有关的线性回归表达式来表示,如式(17)所示,拟合的结果绘于图6中。

$$\frac{e_{\text{csm}}}{e_0} = 2.51 - 2.22\bar{\lambda}_p. \quad (17)$$

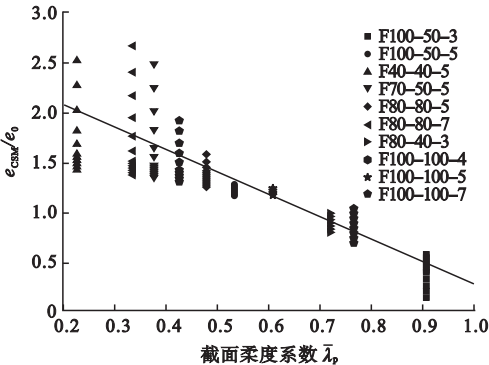


图6 e_{csm}/e_0 与截面柔度系数 $\bar{\lambda}_p$ 的关系

Fig. 6 The relationship between e_{csm}/e_0 and local slenderness $\bar{\lambda}_p$

由图6可知,对于同一种截面, e_{csm}/e_0 的比值还会随着构件正则化长细比 $\bar{\lambda}_{\text{csm}}$ 的变化而变化,将两者的关系表示在图7中。

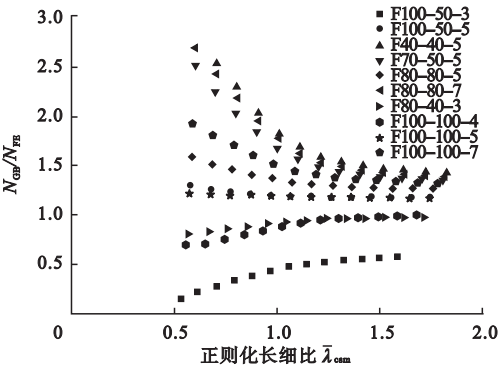


图7 e_{csm}/e_0 与正则化长细比 $\bar{\lambda}_{\text{csm}}$ 的关系

Fig. 7 The relationship between e_{csm}/e_0 and slenderness $\bar{\lambda}_{\text{csm}}$

由图7可知, e_{csm}/e_0 的比值随着正则化长细比 $\bar{\lambda}_{\text{csm}}$ 的增加逐渐趋向于1,在正则化长细比 $\bar{\lambda}_{\text{csm}} > 1$ 时, e_{csm}/e_0 比值的 变化已不再明显。因此,对正则化长细比 $\bar{\lambda}_{\text{csm}} > 1$ 的构件, e_{csm}/e_0 的比值可取1,以避免对 e_{csm} 的高估而造成对构件承载力的过度折减。同时,图7中 e_{csm}/e_0 比值小于1的构件为截面宽厚比超限的第四类截面构件,在确定构件强度时已经通过基础曲线进行了折减,对于这些构件,在正则化长细比 $\bar{\lambda}_{\text{csm}} > 1$ 时, e_{csm}/e_0 的取值仍按照式(17)取值,避免对 e_{csm} 的高估。

综上, e_{csm}/e_0 的取值按照式(18)取值,该式仅适用于截面柔度系数小于0.906的构件,对于截面柔度系数超过0.906的构件,本公式是否适用尚待进一步研究。

$$\frac{e_{\text{csm}}}{e_0} = \begin{cases} 2.51 - 2.22\bar{\lambda}_p; \\ 1; \bar{\lambda}_p \leq 0.68 \text{ 且 } \bar{\lambda}_{\text{csm}} \geq 1. \end{cases} \quad (18)$$

3.4 连续强度法稳定承载力计算流程

对中国规范的稳定系数进行修正后使其可用于连续强度法的稳定承载力计算,将连续强度法稳定承载力计算流程总结如下:

$$N = \varphi_{\text{csm}} N_{\text{csm}}, \quad (19)$$

$$\varphi_{\text{csm}} = \frac{1}{\varphi_{\text{csm}} + \sqrt{\varphi_{\text{csm}}^2 - \bar{\lambda}_{\text{csm}}^2}}, \quad (20)$$

$$\bar{\lambda}_{\text{csm}} = \sqrt{f_{\text{csm}}/\sigma_{\text{E}}}, \tag{21}$$

$$\varphi_{\text{csm}} = 0.5 [1 + \eta_{\text{csm}} + \bar{\lambda}_{\text{csm}}^2], \tag{22}$$

$$\eta_{\text{csm}} = \alpha_{\text{csm}} (\bar{\lambda}_{\text{csm}} - \bar{\lambda}_0), \tag{23}$$

$$\alpha_{\text{csm}} = \frac{e_{\text{csm}} N_{\text{csm}} M_y (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0)}{e_0 N_y M_{\text{csm}} (\bar{\lambda}_{\text{csm}} - \bar{\lambda}_0)}, \tag{24}$$

$$\frac{e_{\text{csm}}}{e_0} = \begin{cases} 2.51 - 2.22 \bar{\lambda}_{\text{p}}; \\ 1; \bar{\lambda}_{\text{p}} \leq 0.68 \text{ 且 } \bar{\lambda}_{\text{csm}} \geq 1. \end{cases} \tag{25}$$

目前该公式仅根据截面柔度系数在 0.228~0.906 内的 6061-T6 铝合金箱型截面得出,是否适用于其他型号和截面的铝合金材料尚待进一步研究。

4 两种计算方法的对比

将连续强度法和中国规范的计算结果与有限元结果的比值进行对比,对比结果如表 5 和图 8 所示。

表 5 两种计算方法的对比

Table 5 The comparison between the two calculation methods

数据来源	结果对比	均值	协方差
有限元	$N_{\text{GB}}/N_{\text{FE/test}}$	0.912	0.047
	$N_{\text{csm}}/N_{\text{FE/test}}$	0.949	0.037
文献[13]	$N_{\text{GB}}/N_{\text{FE/test}}$	0.899	0.120
	$N_{\text{csm}}/N_{\text{FE/test}}$	0.948	0.064
文献[19]	$N_{\text{GB}}/N_{\text{FE/test}}$	0.895	0.096
	$N_{\text{csm}}/N_{\text{FE/test}}$	0.927	0.079
文献[15]	$N_{\text{GB}}/N_{\text{FE/test}}$	0.831	0.077
	$N_{\text{csm}}/N_{\text{FE/test}}$	0.965	0.058

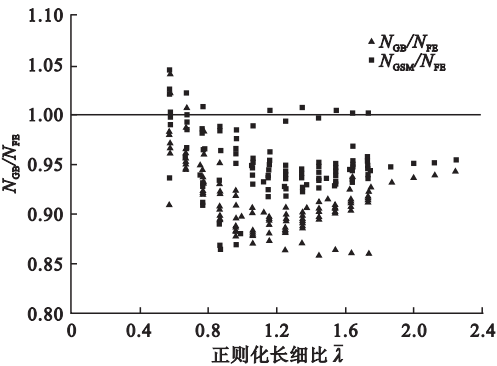


图 8 两种计算方法的对比

Fig. 8 The comparison between the two calculation methods

由表 5 和图 8 可知,连续强度法的计算结果与有限元结果的平均误差只有 5% 左右,变异系数为 0.037;中国规范的计算结果与有限元结果的平均误差有 10% 左右,变异系数为 0.047。连续强度法对 6061-T6 铝合金箱型截面轴压构件稳定承载力的预测精度更高,离散程度更低。

为进一步验证该方法的准确性,笔者将文献[13,15,19]中的箱型截面轴压构件的实验数据与两种方法的计算结果进行对比,对比结果见表 5。

由表 5 可知,连续强度法均能取得比中国规范更准确的预测结果。综上,笔者提出的连续强度法计算公式能够应用于 6061-T6 铝合金箱型截面构件的稳定承载力计算,能取得比中国规范更加准确地预测结果,且离散度更低。

5 结 论

(1)经过与试验结果的对比分析,笔者所建立的箱型截面轴压构件的有限元模型可以模拟构件的真实试验状况,获得准确的极限承载力。

(2)由于没有考虑铝合金材料的应变强化能力,中国规范对不同截面柔度系数和较大长细比的轴压构件的稳定承载力预测结果过于保守,大部分误差超过 10%,造成对材料性能的浪费。

(3)笔者提出的适用于 6061-T6 铝合金箱型截面轴压稳定承载力计算的连续强度法能够取得比中国规范更为精确的预测结果,离散程度更低,为连续强度法的工程应用提供参考。

参考文献

[1] 沈祖炎,郭小农,李元齐. 铝合金结构研究现状简述[J]. 建筑结构学报,2007(6): 100-109.
(SHEN Zuyan, GUO Xiaonong, LI Yuanqi. State-of-the-arts of research on aluminum alloy

- structures [J]. Journal of building structures, 2007(6):100-109.)
- [2] 上海市建设交通委员会. 铝合金结构设计规范:GB50429—2007 [S]. 北京:中国计划出版社,2008.
(Shanghai Construction Municipal Transportation Commission. Code for design of aluminium structures:GB50429—2007 [S]. Beijing: Ministry of Construction of the People's Republic of China,2008.)
- [3] EUROCODE B E. Design of aluminium structures-general structure rules [S]. Brussels: European Committee for Standardization,2007.
- [4] 王元清,常婷,石永久,等. 各国规范铝合金轴压构件局部稳定设计方法对比[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2013,29(6):961-968.
(WANG Yuanqing, CHANG Ting, SHI Yongjiu, et al. Comparison on design codes for local buckling of aluminium alloy columns under uniform compression [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2013, 29(6):961-968.)
- [5] GARDNER L. The continuous strength method [J]. Proceedings structures and buildings, 2008,161(3):127-133.
- [6] ASHRAF M, YOUNG B. Design formulations for non-welded and welded aluminium columns using continuous strength method [J]. Engineering structures,2011,33(12):3197-3207.
- [7] SU M N, YOUNG B, GARDNER L. Continuous strength method for aluminium alloy structures [J]. Advanced materials research,2013,742:70-75.
- [8] SU M N, YOUNG B, GARDNER L. Continuous beams of aluminum alloy tubular cross sections. I:tests and FE model validation [J]. Journal of structural engineering, 2014, 141(9):4014232.
- [9] SU M N, YOUNG B, GARDNER L. Deformation-based design of aluminium alloy beams [J]. Engineering structures, 2014, 80: 339-349.
- [10] SU M N, YOUNG B, GARDNER L. Continuous beams of aluminum alloy tubular cross sections. II: parametric study and design [J]. Journal of structural engineering, 2015, 141(9):4014233.
- [11] SU M N, YOUNG B, GARDNER L. The continuous strength method for the design of aluminium alloy structural elements [J]. Engineering structures,2016,122:338-348.
- [12] 赵远征. 6082-T6 铝合金偏压、受弯构件力学性能研究及可靠度分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
(ZHAO Yuanzheng. Research on mechanical behaviors and reliability of 6082-T6 aluminum alloy members subjected to eccentric compression and bending [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2020.)
- [13] 勾成伟. 基于直接强度法的 6061-T6 铝合金轴压构件稳定承载力研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2021.
(GOU Chengwei. Study on stability bearing capacity of 6061-T6 aluminum alloy axial compression member based on direct strength method [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology,2021.)
- [14] 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.
(ZHANG Zheng. Study on stability capacity of aluminum beam-columns [D]. Shanghai: Tongji University,2006.)
- [15] 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.
(GUO Xiaonong. Theoretical and experimental research on aluminium alloy members [D]. Shanghai: Tongji University,2006.)
- [16] MAZZOLANI F M. Structural applications of aluminium in civil engineering [J]. Structural engineering international, 2006, 16(4): 280-285.
- [17] 王元清,郑韶挺,王中兴,等. 大截面铝合金轴压构件整体稳定试验研究[J]. 钢结构,2018, 33(3):94-99.
(WANG Yuanqing, ZHENG Shaoting, WANG Zhongxing, et al. Experimental research on the overall stability of large-section aluminum alloy columns under axial compression [J]. Steel construction,2018(3):94-99.)
- [18] ARRAYAGO I, REAL E, MIRAMBELL E, et al. The continuous strength method for the design of stainless steel hollow section columns [J]. Engineering structures, 2020, 154(5):106825.
- [19] 王誉瑾. 6082-T6 铝合金轴心受压构件稳定性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
(WANG Yujin. Investigation on the stability of aluminium alloy 6082-T6 members in axial compression [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2015.)

(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)