



工字形铝合金受弯构件的整体稳定性分析

程 明* 石永久 王元清

(清华大学土木工程系, 清华大学结构工程与振动教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要 研究铝合金无侧向支撑受弯构件在各种荷载作用下的整体稳定问题. 介绍了国外现行铝合金规范中的受弯构件整体稳定性的设计方法; 通过有限元计算研究了材料热处理方式对铝合金受弯构件整体稳定性的影响; 针对几个算例, 比较了各种规范计算结果与有限元计算结果. 以我国钢结构设计规范为基础, 参考欧洲铝合金规范、英国铝合金规范和美国铝合金规范, 适当修改了钢结构受弯构件稳定系数的计算公式, 提出了铝合金受弯构件稳定系数的计算方法. 通过对大量的有限元计算结果的统计分析, 验证了文中建议的铝合金受弯构件稳定系数计算公式的准确性. 通过与文献中试验结果的对比, 可以证明文中提出的设计方法能够很好的应用于实际设计中.

关键词 铝合金受弯构件 侧向失稳 稳定系数 有限元分析 设计方法

铝合金材料具有自重轻、可模性好、比强度高、防腐性能优良和可以循环利用等优点, 是可以大规模应用于建筑结构的理想结构材料. 欧美一些国家从 20 世纪中叶就开始大规模修建铝合金建筑, 结构形式也多种多样; 我国在 20 世纪末开始出现铝合金结构, 多数为铝合金网架、网壳结构^[1].

欧美国家对铝合金结构的研究起步较早, 研究成果比较成熟. 早在 20 世纪 70 年代, ECCS 出版了《欧洲铝合金结构建议》^[2], 美国铝业协会出版了《铝合金结构规范》^[3], 英国(CP 118)、法国(DTU)、德国(DIN 4113)、意大利(UNI 8634)等国也在同一时期出版了各自的规范. 我国在铝合金结构的研究方面起步较晚, 目前已经发表的研究成果主要集中在轴心受压杆件的稳定性上^[4-9].

本文主要研究铝合金受弯构件的整体稳定问题. 首先介绍国外现有设计方法; 其次根据有限元计算的结果, 适当修改了我国钢规中关于受弯构件整体稳定性的设计公式, 以用于计算铝合金梁的稳定系数. 最后通过比较建议公式计算结果与试验结果, 说明本文提出的设计方法的适用性.

1 有限元模型简介

有限元计算应用ABAQUS进行^[10], 单元类型采用壳单元S4R, 在厚度方向上取5个积分点. 图1(a)显示了有限元模型的几何形状和网格划分.

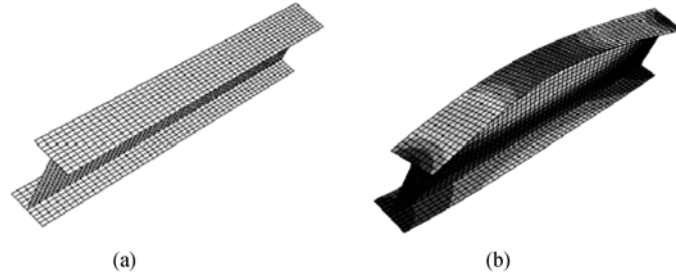


图1 有限元模型的网格划分和初始缺陷模态
(a) 网格划分; (b) 初始几何缺陷

材料的应力-应变关系按照 Ramberg-Osgood 方程定义^[1].

$$\varepsilon = (\sigma/E) + 0.002(\sigma/f_{0.2})^n, \quad (1)$$

式中 n 为材料系数, $n = \ln 2 / \ln(f_{0.2}/f_{0.1})$; $f_{0.1}$ 和 $f_{0.2}$ 分别为残余应变为 0.1% 和 0.2% 时对应的应力. 由于铝合金材料没有明显的屈服平台, 所以通常用 $f_{0.2}$ 作为其强度的标准值.

在钢梁的稳定理论中, 已经研究了初始几何缺陷、残余应力、边界条件、荷载类型及作用位置等因素的影响^[11,12]. 铝合金构件一般通过挤压成型, 在挤压过程中会出现板件厚度不均, 在拉伸校直过程中会出现 Bauschinger 效应^[13].

以上因素中, 边界条件一般考虑得比实际情况不利, 其影响可以不计, 而作为安全储备. 初始几何缺陷、材料的 Bauschinger 效应和板件厚度不均的影响在有限元建模中统一考虑为构件初始变形为梁长的 1/1000^[13], 初始变形的形式参考构件的一阶失稳模态(图 1(b)). 由于铝合金的弹性模量较小, 所以铝合金梁中残余应力的影响不像钢梁中那么显著, 挤压型材中的残余应力更小, 可以忽略. 荷载类型及作用位置、构件的热处理方式和构件截面形状对铝合金梁的稳定影响很大, 在研究中作为参数加以考虑. 此外为了避免局部屈曲的影响, 有限元模型中的板件宽厚比都较小.

有限元计算主要包括两个步骤: 首先进行构件的失稳模态分析; 然后把基于一阶失稳模态的初始缺陷加到模型中, 考虑二阶效应, 用弧长法计算构件的极限承载力.

2 现有设计方法介绍

2.1 弹性理论解

用弹性分点理论导出的工字形截面梁的整体稳定临界弯矩表达式为^[12]:

$$M_{cr,0} = \beta_1 \frac{\pi^2 EI_y}{l^2} \left[\beta_2 a + \beta_3 B_y + \sqrt{(\beta_2 a + \beta_3 B_y)^2 + \frac{I_\omega}{I_y} \left(1 + \frac{l^2 GJ}{\pi^2 EI_\omega} \right)} \right], \quad (2)$$

式中 E 为弹性模量; G 为剪切模量; l 为梁长; I_y 为弱轴惯性矩; I_ω 为翘曲常数; J 为抗扭常数; a 为加载点到截面剪切中心的距离, 在上为负; B_y 为截面不对称影响系数; β_1 和 β_2 及 β_3 的值取决

于荷载类型.

2.2 ECCS 早期设计方法

铝合金梁的弯扭屈曲极限荷载可以用下面的公式计算^[13]:

$$M_{cr} = M_{pl} \left[1 / (1 + (M_{pl} / M_{cr,0})^m) \right]^{\frac{1}{m}}, \quad (3)$$

式中 M_{pl} 为全塑性弯矩; $M_{cr,0}$ 为按照式(2)求出的弹性临界弯矩; $m=2$ 为系数.

这种方法是直接从 ECCS 的钢结构建议中得到的, 在钢梁的稳定性设计中, 取 $m=2.5$.

2.3 EC9 和 BS8118 的设计方法

EC9^[14]和BS8118^[15]的设计方法在表述上虽有差异, 但是二者经过变换后可以得到相同的形式:

$$M_{cr} = \chi_{LT} M_{pl}, \quad (4)$$

式中 $\chi_{LT} = 1 / (\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}) \leq 1$, 是稳定系数; $\phi_{LT} = 0.5[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{O,LT}) + \bar{\lambda}_{LT}^2]$, $\alpha_{LT} = 0.1$, $\bar{\lambda}_{O,LT} = 0.6$, $\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{M_{pl} / M_{cr,0}}$.

这种方法是 EC9 早期方法经过少量修改得到的, 其中 α_{LT} 和 $\bar{\lambda}_{O,LT}$ 的取值变化可以考虑局部屈曲的影响, 但是本文研究不包括局部屈曲, 所以把两个参数取为固定值.

2.4 美国铝业协会规范的设计方法

美国与欧洲的设计方法有很大差别, 采用许用应力法^[16]

$$f_c = \begin{cases} f_{cy} / n_y, & \text{当 } L_b / r_y \leq S_1 \text{ 时,} \\ [B_c - D_c(L_b / 1.2r_y)] / n_y, & \text{当 } S_1 < L_b / r_y < S_2 \text{ 时,} \\ (\pi^2 E) / [n_y(L_b / 1.2r_y)^2], & \text{当 } L_b / r_y \geq S_2 \text{ 时,} \end{cases} \quad (5)$$

式中 f_c 是许用应力; f_{cy} 是材料强度; $n_y=1.65$ 为安全系数; L_b 为梁的有效长度; r_y 为截面绕弱轴的回转半径. B_c , D_c , S_1 和 S_2 的值取决于材料强度和热处理方式^[17,18].

2.5 参照我国钢规的设计方法

《钢结构设计规范》^[19]中的设计方法由弹性理论解经过适当的简化得来, 当构件发生塑性屈曲时, 稳定系数是通过曲线拟合得到的. 把钢材的弹性模量 205 GPa 换成铝合金的弹性模量 70 GPa, 可得铝合金工字形梁的弹性稳定系数的计算公式

$$\phi_b = \beta_b \frac{1730}{\lambda_y^2} \cdot \frac{Ah}{W_x} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_y t_1}{4.4h} \right)^2} + \eta_b \right] \frac{200}{f_{0.2}}, \quad (6)$$

式中 β_b 是等效临界弯矩系数; λ_y 是弱轴长细比; t_1 为受压翼缘厚度; A 为截面面积; h 为梁高; W_x 为按受压纤维确定的弹性截面模量; η_b 为截面不对称影响系数; $f_{0.2}$ 为铝合金材料标准强度, 单位是 MPa.

当 ϕ_b 大于 0.6 时, 按下式计算稳定系数:

$$\phi_b' = 1.07 - 0.282 / \phi_b \leq 1.0 \quad (7)$$

3 材料热处理对稳定系数的影响

铝合金构件一般要经过热处理来改善材料力学性能,不同的热处理方式对材料系数 n 的影响不同,而 n 的值对构件的稳定系数影响很大.作者用 ABAQUS 计算了截面尺寸为 $150 \times 80 \times 10 \times 10$ 的工字形截面铝合金简支梁在满跨均布荷载作用在上翼缘的情形下,稳定系数与长细比的关系随材料系数 n 的变化情形,计算结果见图 2.

由图 2 可以看出:当 $n \geq 20$ 时,构件的稳定系数随 n 的增长没有明显变化;当 $n \leq 10$ 时,构件的稳定系数随 n 的减小有明显的变化.

一般的弱应变强化合金的 n 值变化范围是 20~35;强应变强化合金对应的 n 值一般为 10~15,少数情形下 n 可能小于 10.出于安全考虑,对于弱应变强化合金,在后面的研究中采用 $n=20$ 作为其材料参数;对于强应变强化合金,在后面的研究中取 $n=5$ 作为其材料参数.

图 3 中对比了用各国规范计算的稳定系数与上述有限元结果(图中的 $n=5$ 和 $n=20$ 对应的结果)的差别.研究中同时考虑了强应变强化合金($n=5$)和弱应变强化合金($n=20$).由图 3 可以得出如下结果.

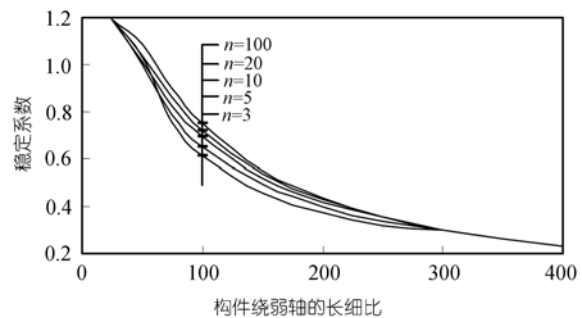


图2 材料系数 n 对构件稳定系数的影响

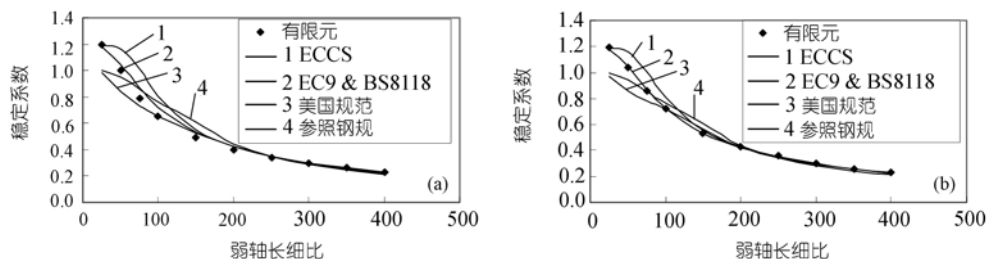


图3 各国规范计算的稳定系数与有限元计算结果的比较

1) 在弹性失稳阶段,无论合金热处理的类型如何,几种规范的计算方法总能得到准确的结果.

2) 在弹塑性失稳阶段, ECCS 早期方法得到的结果都偏于不安全.对于弱应变强化合金, EC9 和 BS8118 计算的结果非常准确;对于强应变强化合金,该方法计算得到的结果偏于不安全.美国铝业协会规范计算的结果在长细比较小时比较保守,但是在长细比较大时,无论合金的热处理类型如何,都能得到较准确的结果.我国钢规的计算方法由于没有考虑铝合金材料非线性的特点,所以总不能得到合理的结果.

3) 美国铝业协会规范采用许用应力法,与我国钢规的设计方法差异很大,但是其中区分合金热处理类型的思想值得借鉴. EC9 和 BS8118 的方法是由 ECCS 早期方法经过改进后得到的,在设计思想上是一致的;对于弱应变强化合金,这种方法可以得到非常准确的结果,所以其中弹塑性稳定系数的修正方法值得借鉴.

4 基于钢规的建议公式及数值计算验证

钢材与铝合金同属于建筑金属材料,我国钢结构的设计方法已经很成熟,所以铝合金结构的设计方法应该采用钢结构设计的理论体系.这样得到的铝合金结构设计方法更加容易被工程技术人员接受和掌握.但是铝合金和钢材的材料性能有很大差异,不能直接应用钢结构的设计方法去设计铝合金结构.我们应该根据铝合金的材料性能,适当的修正钢结构设计公式,以便得到铝合金结构的设计公式.

4.1 基于钢规的建议公式

通过上面的分析,结合有限元试算,我们可以通过适当修改《钢结构设计规范》中的受弯构件稳定系数的计算方法,得到铝合金受弯构件稳定系数的计算方法.通过(6)式计算出 φ_b ,然后用下面公式进行修正:

$$\varphi'_b = \varphi_b / (1 + 0.75 \varphi_b^m)^{\frac{1}{m}} \leq 1.0, \tag{8}$$

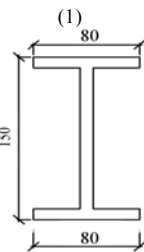
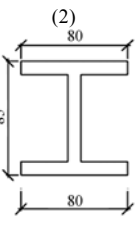
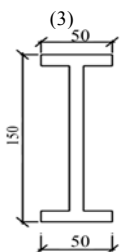
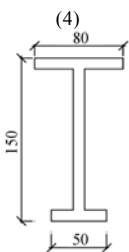
式中,对于弱应变强化合金, $m=2.0$; 对于强应变强化合金, $m=1.5$.

钢规中取 $\varphi_b=0.6$ 作为弹性失稳与弹塑性失稳的分界点,这是由钢材的材性决定的.但是由于铝合金材料自身的特点,其构件的弹性失稳与弹塑性失稳的分界点不固定.所以在计算铝合金受弯构件的稳定系数时无论 φ_b 的值是什么,我们都用 φ'_b 代替它.建议公式的正确性在后面验证.

4.2 有限元计算验证

为了证明(8)式的正确性,我们需要对大量的有限元计算结果进行统计分析.有限元计算中考虑的参数主要有:合金的热处理类型、构件的截面形状、荷载的类型和作用位置(表 1).

表 1 有限元计算所考虑的参数

考虑参数	包含情形				
热处理	弱应变强化		强应变强化		
构件截面/mm	(1) 	(2) 	(3) 	(4) 	(5) 
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
荷载类型及作用位置	满跨均布荷载在上翼缘	满跨均布荷载在下翼缘	跨中集中荷载在上翼缘	跨中集中荷载在下翼缘	
	(f)	(g)			

注:表中荷载类型及作用位置与《钢结构设计规范》中完全相同,不考虑有侧向支撑的情况;构件板厚统一取 10 mm.

对应表中每一种热处理类型、截面形状和荷载形式的组合,用 ABAQUS 计算 10 根铝合金梁的弯扭屈曲极限承载力,所得的结果与文中提出的建议公式计算的结果进行对比(图 4~8).

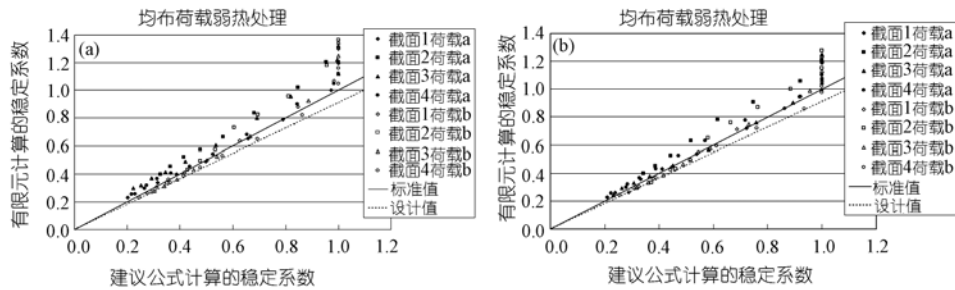


图4 满跨均布荷载下铝合金受弯构件稳定系数的有限元计算结果与建议公式结果的比较

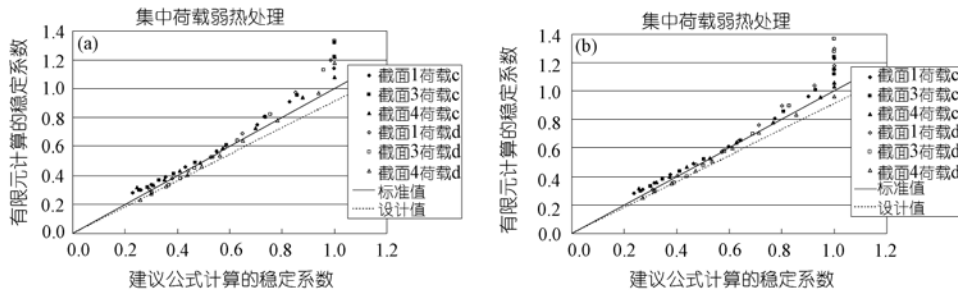


图5 跨中集中荷载下铝合金受弯构件稳定系数的有限元计算结果与建议公式结果的比较

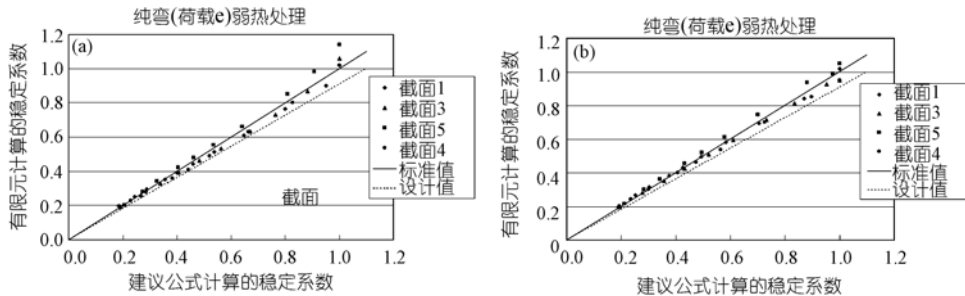


图6 纯弯作用下铝合金受弯构件稳定系数的有限元计算结果与建议公式结果的比较

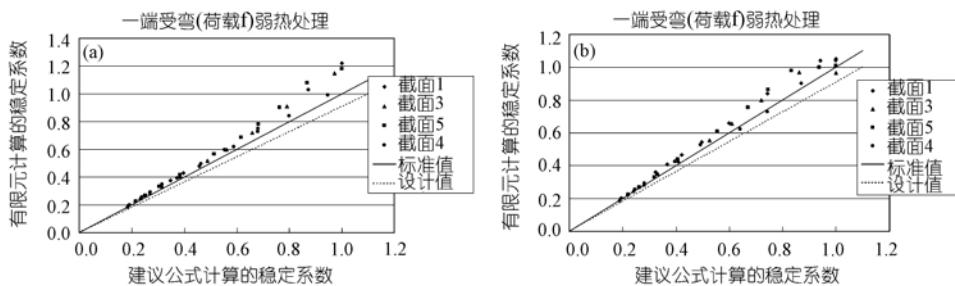


图7 一端受弯时铝合金受弯构件稳定系数的有限元计算结果与建议公式结果的比较

在图 4~8 中, 所有散点的横坐标表示用本文的建议公式计算出的构件弯扭屈曲稳定系数, 纵坐标表示有限元计算出的结果. 图中“标准值”和“设计值”代表的两条直线分别表示用材料强度标准值($f_{0.2}$)和材料强度设计值($f_{0.2}/1.1$)进行计算时的安全界限, 当散点位于直线上方时,

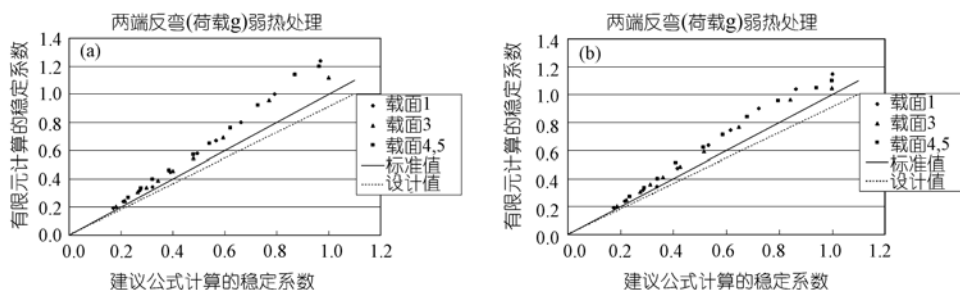


图 8 两端反弯时铝合金受弯构件稳定系数的有限元计算结果与建议公式结果的比较

说明建议公式计算的结果是安全的。

由图 4~8 可以看出,用本文建议公式计算所得的结果基本上均匀的位于“标准值”直线两侧,并且保证位于“设计值”直线上方.这说明本文提出的建议公式的计算结果是比较准确的.由于设计时应用的是材料强度的设计值,所以用建议公式计算的结果是可以保证安全的.

5 建议公式与试验结果的对比

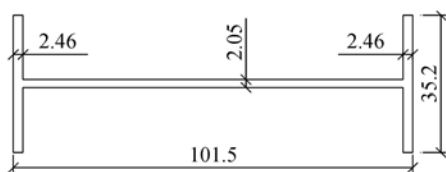


图 9 试验构件的截面尺寸/mm

为了进一步证明本文提出的铝合金受弯构件稳定系数计算方法的准确性,我们将本文建议公式的计算结果和美国铝业公司进行的一组试验^[20]的测量结果进行比较.试验所用铝合金材料强度为 $f_{0.2}=370$ MPa,属于弱应变强化合金;构件的截面尺寸如图 9,承受纯弯曲的作用.

从表 2 可以看出,用本文建议公式计算的结果与试验结果吻合得相当好,尤其是在构件的稳定系数较小时.当构件的稳定系数较大时,用本文的建议公式进行设计可以得到偏安全的结果.

表 2 本文建议公式计算的稳定系数与国外试验值的比较

梁编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
梁长/m	2.2352	1.9812	1.7272	1.4732	1.2192	0.9652	0.8382	0.7112	0.5842	0.4572
试验值	0.1445	0.1754	0.2194	0.2774	0.3681	0.5620	0.6897	0.8254	0.9554	1.0309
计算值	0.1435	0.1731	0.2154	0.2787	0.3777	0.5355	0.6426	0.7636	0.8825	0.9091
误差/%	-0.71	-1.34	-1.84	0.45	2.60	-4.71	-6.84	-7.48	-7.63	-11.82

注:表中的计算值是应用材料强度设计值 $f_{0.2}/1.1$ 计算出来的

6 结论和展望

(i) 研究中只考虑工字形截面铝合金梁的整体稳定性,截面可以是双轴对称,也可以是在垂直于受弯轴方向单轴对称.

(ii) 梁上作用的荷载分别考虑了满跨均布荷载、跨中集中荷载和梁端受弯,荷载的类型与作用位置与《钢结构设计规范》中完全相同.

(iii) 梁的约束条件按照《钢结构设计规范》中的规定,但是研究中不考虑侧向支撑的作用.

(iv) 研究提出的设计方法以《钢结构设计规范》中受弯构件整体稳定的设计方法为基础,

借鉴了欧洲规范中对稳定系数的修正方法, 同时借鉴了美国规范中考虑合金热处理类型的思想.

(v) 本文建议公式的计算结果与试验结果非常接近, 可以用于实际设计中.

(vi) 考虑侧向支撑的梁的稳定系数、其他截面形式的梁的稳定系数、薄壁构件的稳定系数等问题还需要进行大量的研究.

参 考 文 献

- 1 石永久, 程明, 王元清. 铝合金在建筑结构中的应用及研究. 建筑科学, 2005, 21(6): 7—11
- 2 ECCS. European Recommendations for Aluminum Alloy Structures. 1978
- 3 Aluminum Association. Specification for Aluminum Structures. Washington, DC, 1976
- 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. 建筑结构学报, 2001, 22(4): 31—36
- 5 罗永峰, 季跃, 芮渊, 等. 铝合金结构轴心压杆稳定性研究. 同济大学学报, 2001, 29(4): 401—405
- 6 杨联萍, 姚念亮, 邱枕戈, 等. 铝合金轴心受压杆件的稳定系数研究. 建筑结构, 2001, 31(2): 28—29
- 7 张茂功 吴东红, 向华, 等. 铝合金圆管轴心受压构件稳定系数的试验研究. 长安大学学报(建筑与环境科学版), 2004, 21(1): 12—14
- 8 李明, 陈扬冀, 钱若军, 等. 圆管形铝合金轴心压杆稳定系数的试验研究. 空间结构, 2000, 6(1): 59—64
- 9 李明, 陈扬冀, 钱若军, 等. 工字形铝合金轴心压杆稳定系数的试验研究. 工业建筑, 2001, 31(1): 52—54
- 10 ABAQUS Inc. 庄茁等译. ABAQUS 有限元软件 6.4 版入门指南. 北京: 清华大学出版社, 2004
- 11 陈绍蕃. 钢结构设计原理. 北京: 科学出版社, 2005
- 12 陈骥. 钢结构稳定理论与设计. 北京: 科学出版社, 2003
- 13 Mazzolani F M. Aluminum Alloy structures. Boston: Pitman, 1985
- 14 ECCS. Eurocode 9: Design of aluminum structures. CEN, prEN1999-1-1:2002
- 15 British Standards Institute, BS8118-the structural use of aluminium. London, 1991
- 16 Aluminum Association. Specification for aluminum structures. 5th edn., Washington, DC, 1986
- 17 Sharp M L. Behavior and Design of Aluminum Structures. New York: McGraw-Hill, 1993
- 18 Kissell J R, Ferry R L. Aluminum Structures: A Guide to Their Specifications and Design. New York: J Wiley, 2002
- 19 GB 50017-2003. 钢结构设计规范. 中华人民共和国国家标准, 2003
- 20 Dumont C, Hill H N. The lateral stability of equal-flanged alu-alloy I-beams in pure bending. NACA Tech. Note 770, 1940