

文章编号:1673-2049(2007)04-0064-06

波折腹板工形构件翼缘稳定性能研究

郭彦林,张庆林

(清华大学 土木工程系,北京 100084)

摘要:提出了研究波折腹板工形构件翼缘稳定性能的合理简化模型,探讨了翼缘弹性屈曲应力与翼缘名义宽厚比、腹板波形的关系;基于翼缘屈曲时可能出现的2种屈曲模态,分别解释了其发生机理并给出了相应的临界荷载计算公式;提出了2种屈曲模态的判断依据,通过一系列弹塑性分析考察了不同屈曲模态下构件承载力随宽厚比的变化特点。结果表明,屈曲模态Ⅰ对构件的翼缘稳定十分不利,应尽量避免。基于屈曲模态Ⅱ的屈曲应力,提出可用于工程设计的合理宽厚比限值。

关键词:波折腹板;屈曲模态;翼缘宽厚比;弹性屈曲应力;极限承载力

中图分类号:TU357 **文献标志码:**A

Research on Stability Behavior of Flanges in H-shaped Members with Corrugated Web

GUO Yan-lin, ZHANG Qing-lin

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A rational simplified model was developed to study the stability behavior of flanges in H-shaped members with corrugated web. The relationship of elastic buckling stress of flanges, nominal width-to-thickness ratio of flanges and profile of web was discussed. Two different buckling modes were observed and corresponding equations to calculate the critical load were given. A series of elastoplastic analyses were performed on sinusoidal web members with varied buckling modes and characteristics of the ultimate loading capacity versus width-to-thickness ratio were pointed out. It is shown that when buckling mode I controls, the behavior of flange stability will be very bad, and rational limit value of width-to-thickness ratio is suggested for design based on the buckling stress of buckling mode II.

Key words: corrugated web; buckling mode; width-to-thickness ratio of flange; elastic buckling stress; ultimate loading capacity

0 引言

波折腹板工形构件由波折形的腹板与平翼缘通过高频连续焊接组成。波折腹板工形构件有很明显的受力特点:在轴力、弯矩或压弯综合作用下,构件的翼缘承受了绝大部分荷载(99%以上);在剪力作

用下,构件的腹板承受绝大部分剪力且剪应力沿腹板高度方向均匀分布。在轴力和弯矩作用下,仅翼缘有效,腹板不承受任何轴向作用力;在剪力作用下,仅腹板有效,且剪应力均匀分布^[1]。

工形构件在受压或受弯时,必须要保证受压翼缘在构件整体失效前不发生局部失稳。翼缘局部失

收稿日期:2007-10-20

基金项目:奥地利-中国国际合作项目(200606)

作者简介:郭彦林(1958-),男,陕西富平人,教授,博士生导师,工学博士,E-mail:gyl@tsinghua.edu.cn。

稳会导致构件承载力极大地降低,《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)和《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》(CECS 102:2002)中都对翼缘板的宽厚比提出了限制^[2-3]。对于波折腹板工形构件,因波折腹板的约束作用使得翼缘的屈曲性能与普通工形构件存在着很大的差别。国外规程中对翼缘稳定的处理方法主要有 2 种:①将翼缘的计算宽度取为实际宽度减去腹板波折高度的 1/2,以反映腹板约束对翼缘稳定的有利作用^[4];②认为翼缘的屈曲系数为单波长度范围内的三边简支板(宽度取翼缘边缘到腹板距离的最大值)的屈曲系数与 0.6 之间的较小值^[5]。这 2 种方法均认为波折腹板会在一定程度上增加翼缘的稳定性,并且力图利用这种有利性。然而,美国学者 Johnson 在对梯形波折腹板工形构件的翼缘进行数值分析后认为,只有在保证腹板对翼缘的约束区域占一定比例以上这个条件后,波折腹板工形构件的翼缘稳定性才会高于普通平腹板构件^[6]。为了提出更加合理的正弦波折腹板工形构件翼缘宽厚比限值,笔者对构件翼缘的屈曲性能进行了系统的研究。

1 计算模型的确定

波折腹板工形构件在工程中的应用如图 1 所示。波折腹板沿构件长度方向的刚度非常小,可以认为腹板完全不约束翼缘的平面内变形。腹板波折后,由于腹板不易失稳,沿构件高度方向的抗压刚度大幅度提高,可以认为翼缘上沿波浪线的一系列点的面外变形被完全约束,而且翼缘板两端面外变形亦被约束。在翼缘板两端施加平衡的均布压力,计算翼缘板的弹性屈曲应力,计算简图如图 2 所示。



图 1 波折腹板工形构件在工程中的应用

Fig. 1 Application of H-shaped Members with Corrugated Web in Engineering

翼缘板的弹性屈曲应力不仅与翼缘的名义宽厚比 b_1/t 有关,同时也与腹板的几何形状有关。本文中,定义腹板波幅系数和腹板波长系数分别为:腹板

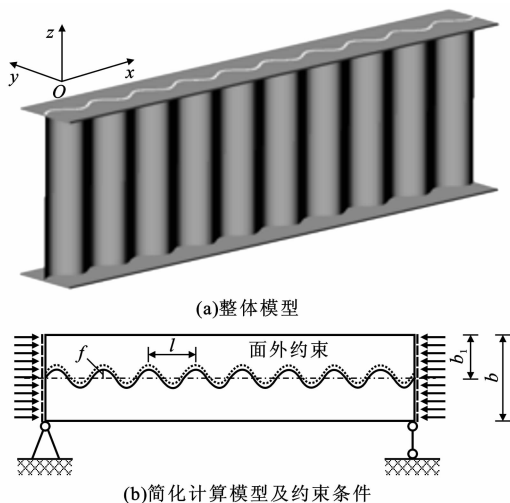


图 2 构件模型及约束条件

Fig. 2 Models and Restraint Condition of Members

波幅系数 $\alpha = f/b_1$; 腹板波长系数 $\beta = l/b_1$ 。

采用通用有限元分析软件 ANSYS 进行弹性特征值分析,并考察各参数对翼缘板的弹性屈曲应力的影响。

2 翼缘宽厚比的影响

图 3、4 分别为不同的 f/b_1 及不同的 l/b_1 下的板件屈曲应力与名义宽厚比 b_1/t 的关系曲线。在各种不同的腹板波形下,随着翼缘名义宽厚比的增大,屈曲应力成二次函数递减。为了更清楚地研究宽厚比的影响,以三边简支板的屈曲应力作为参照,计算出不同参数翼缘板的屈曲应力与同宽厚比三边简支板屈曲应力的比值并绘制成曲线,如图 5、6 所示。三边简支板的屈曲应力为

$$\sigma_1 = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b_1}\right)^2 \quad (1)$$

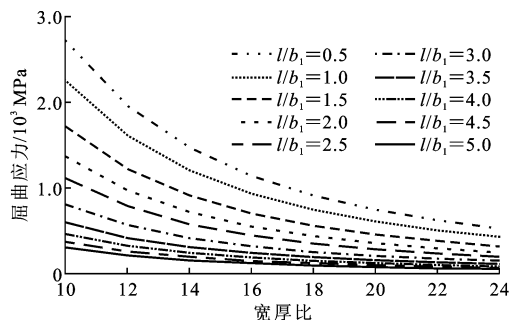


图 3 不同 l/b_1 下的宽厚比与屈曲应力关系 ($f/b_1 = 0.2$)

Fig. 3 Relation of Width-to-thickness Ratio and Buckling Stress Under Different l/b_1 when $f/b_1 = 0.2$

当翼缘板的长度较长时,可认为 k 为常数, $k = 0.425$,则式(1)可表示为

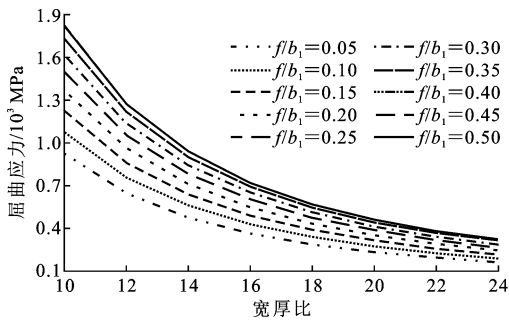


图 4 不同 f/b_1 下的宽厚比与屈曲应力关系 ($l/b_1=2$)

Fig. 4 Relation of Width-to-thickness Ratio and Buckling Stress Under Different f/b_1 when $l/b_1=2$

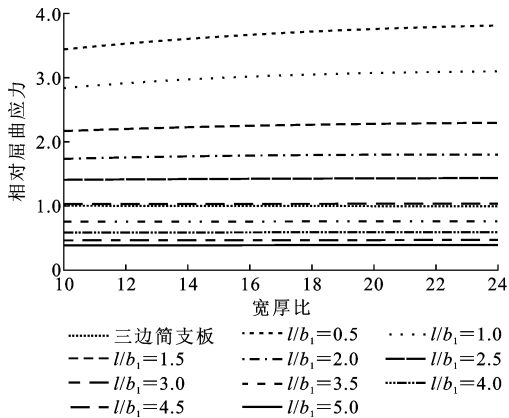


图 5 不同 l/b_1 下的宽厚比与相对屈曲应力关系 ($f/b_1=0.2$)

Fig. 5 Relation of Width-to-thickness Ratio and Relative Buckling Stress Under Different l/b_1 when $f/b_1=0.2$

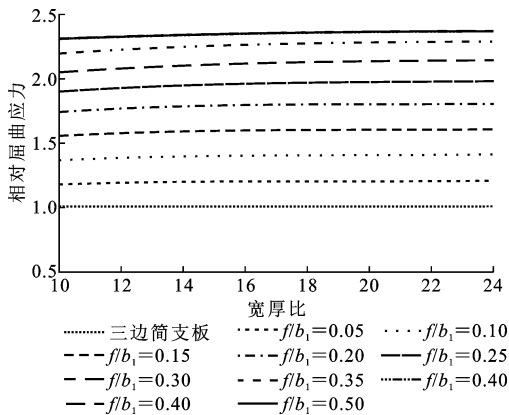


图 6 不同 f/b_1 下的宽厚比与相对屈曲应力关系 ($l/b_1=2$)

Fig. 6 Relation of Width-to-thickness Ratio and Relative Buckling Stress Under Different f/b_1 when $l/b_1=2$

$$\sigma_1 = C_1 \left(\frac{t}{b_1} \right)^2 \quad (2)$$

假设翼缘板屈曲应力可以表示为

$$\sigma_{cr} = f \left(\frac{f}{b_1}, \frac{l}{b_1}, \frac{t}{b_1} \right) \left(\frac{t}{b_1} \right)^2 \quad (3)$$

则图 5 中的曲线可表示为

$$\varphi = \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_1} = f \left(\frac{f}{b_1}, \frac{l}{b_1}, \frac{t}{b_1} \right) / C_1 \quad (4)$$

由图 5 可见, b_1/t 对相对屈曲应力的影响并不显著, 从而忽略 b_1/t 的影响, 可使翼缘板屈曲应力函数简化为

$$\sigma_{cr} = f \left(\frac{f}{b_1}, \frac{l}{b_1} \right) \left(\frac{t}{b_1} \right)^2 \quad (5)$$

基于上述结论, 在下面的研究中, 可以剔除 b_1/t 的影响, 这样获得的结论可以推广到任意宽厚比。

3 腹板约束的影响

取 $b_1/t=16$, 计算不同的腹板波幅系数 α 和腹板波长系数 β 下的屈曲应力比 r ($r=\sigma_{cr}/\sigma_1$), 并将结果绘制成曲面, 见图 7。

参数 α 、 β 对翼缘屈曲应力的影响主要有以下 3 个特点:

(1) 当 $\beta=l/b_1$ 逐渐增大时, 翼缘屈曲应力逐渐减小, 且当 β 趋向无穷时, 翼缘屈曲应力趋向于 0。

(2) 当 β 较小时, 翼缘屈曲应力随 α 的增大而增大; 当 β 较大时, 翼缘屈曲应力随 α 的增大而减小, 但很快收敛于一定值。

(3) 较之平腹板工形构件的翼缘, 当 β 小于 3 时, 波折腹板工形构件的翼缘屈曲应力偏大, 而 β 大于 3 时则偏小。由此可知, 波折腹板的约束并非一定会增加翼缘稳定性。

按屈曲模态的不同, 图 7 中的曲面可以分为 2 个部分, 对应于屈曲模态 I 和屈曲模态 II, 如图 8 所示。

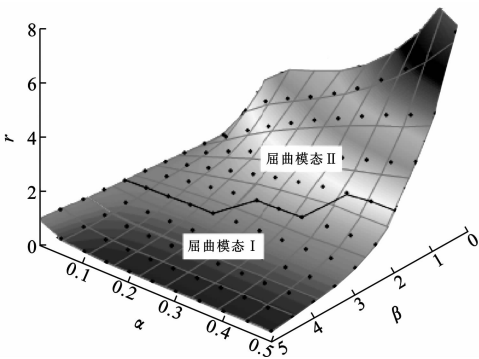


图 7 $r-\alpha-\beta$ 关系

Fig. 7 Relation of r, α and β

屈曲模态 I 的特征是腹板两侧的翼缘板分别向相反方向发生整体的单波状变形, 在此基础上, 叠加多个余弦波变形, 余弦波的分布与腹板波形相对应, 如图 8(a)、(b) 所示。

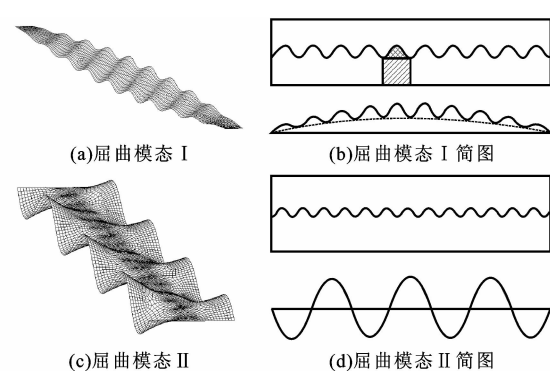


图 8 翼缘的 2 种屈曲模式

Fig. 8 Two Buckling Modes of Flanges

屈曲模式 II 接近于加载边简支,其为一边夹支,另一边自由的板的屈曲模式。翼缘边缘以初始位置为基准,在此基础上,叠加多个正弦波变形,正弦波的分布与腹板波形无关而与翼缘长宽比密切相关,如图 8(c)、(d)所示。

以下分别针对这 2 种屈曲模式提出翼缘屈曲应力计算公式。

对于屈曲模式 I,由于单个波长范围内翼缘外伸长度不一样,中间的翼缘外伸长度较长,导致单波长内翼缘非加载边的约束大幅度减弱。翼缘屈曲应力小于三边简支板屈曲应力,且屈曲应力与波长的平方成反比。忽略非加载边的约束后,可采用欧拉板柱模型描述翼缘的屈曲行为,则屈曲应力为

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 EI_f}{(0.5l)^2 A_f} = \frac{\pi^2 E}{3\beta^2} (t/b_1)^2 \quad (6)$$

式中: EI_f 为翼缘厚度方向的弯曲刚度; A_f 为上下翼缘的总面积。

图 9 为 $\alpha=0.5$ 时的翼缘板屈曲应力与式(6)计算得到的结果的对比。在发生 I 型屈曲时($\beta>2$),式(6)与有限元计算结果非常吻合。

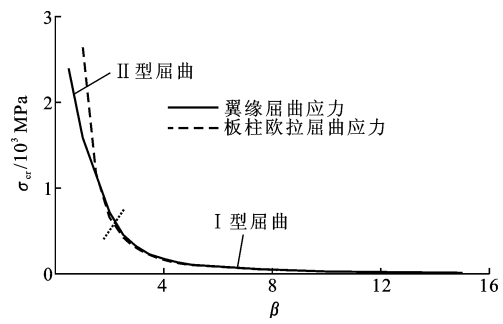


图 9 欧拉屈曲应力与有限元计算结果对比

Fig. 9 Comparison Between Euler Buckling Stress and Finite Element Calculation Results

对于屈曲模式 II,翼缘可视为加载边简支,非加载边一边自由,另一边约束的板。约束边的约束是由波折的简支边界和翼缘板的柱面刚度共同形成的

弹性约束,约束刚度由 l/f 控制,如图 10 所示。假定翼缘的计算宽度为翼缘的最大外伸宽度,大量数值分析结果表明,波幅系数为 α 时,翼缘的屈曲应力约与 $1+\alpha$ 的 3 次方成反比。用 l/f 作为控制刚度的参数,可构造拟合公式,即

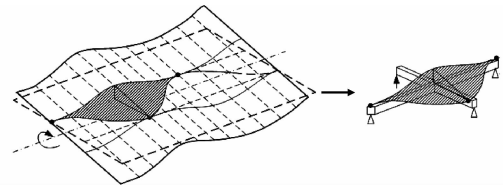


图 10 波折腹板的弹性约束

Fig. 10 Flexible Restraint by Corrugated Web

$$\sigma_{cr} = \left[\sigma_1 + \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{1 + c(l/f)^2} \right] / (1 + \alpha)^3 = \left[\sigma_1 + \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{1 + c(\beta/\alpha)^2} \right] / (1 + \alpha)^3 \quad (7)$$

式中: $\sigma_1 = 0.425 \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)(b_1/t)^2}$; σ_2 为一边夹支,另一边自由的板的屈曲应力^[7], $\sigma_2 = 1.28 \times \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)(b_1/t)^2}$; c 值建议取 0.003 5。

式(7)的构造过程中进行了一个假设,即翼缘的计算宽度为翼缘的最大外伸宽度,该假设过于保守地考虑了腹板波折区域内翼缘板的作用。事实上,腹板波折区域内翼缘板并不一定会使翼缘的计算宽度增加,也可能因为腹板的约束而基本不发生变形,从而减小翼缘的计算宽度,这取决于腹板波形 l/f 。实际应用中 l/f 一般取 5~15。引入有效宽度增大系数 μ ,该变量的物理意义为腹板波折区域内的翼缘中,参与翼缘整体屈曲变形的部分所占的比例。不同的 l/f 下有效宽度增大系数 μ 的取值见表 1。

考虑计算宽度增大系数 μ 对式(7)进行的修正,屈曲模式 II 所对应的屈曲应力可表示为

$$\sigma_{cr} = \left[\sigma_1 + \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{1 + c(\beta/\alpha)^2} \right] / (1 + \mu\alpha)^3 \quad (8)$$

表 1 不同 l/f 下计算宽度增大系数 μ 的取值

Tab. 1 Values of Calculation Width Increasing Coefficient μ Under Different l/f

$l \cdot f^{-1}$	5	6	7	8	9	11	≥ 13
μ	0.00	0.17	0.33	0.50	0.60	0.80	1.00

翼缘弹性屈曲时,可能发生 I 型模式屈曲或 II 型模式屈曲,这取决于哪种屈曲模式对应的屈曲应力较小^[8]。翼缘的屈曲应力可以表示为

$$\sigma_{cr} = \begin{cases} \min \frac{\pi^2 E}{3\beta^2} (t/b_1)^2 & \text{I 型} \\ \min \left[\sigma_1 + \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{1 + c(\beta/\alpha)^2} \right] / (1 + \mu\alpha)^3 & \text{II 型} \end{cases} \quad (9)$$

屈曲应力比 $r=\sigma_{cr}/\sigma_1$ 的计算公式为

$$r=\begin{cases} \min 8.56/\beta^2 & \text{I 型} \\ \min[1+\frac{2.012}{1+c(\beta/\alpha)^2}]/(1+\mu\alpha)^3 & \text{II 型} \end{cases} \quad (10)$$

有限元计算结果与拟合公式(10)结果对比见图 11。式(10)的计算结果与有限元计算结果的相对误差在 10% 以内,且拟合公式(10)的值是偏于保守的。式(10)适用于 $\alpha<0.25$ 、 $l/f>5$ 的情况,可用于判断翼缘屈曲模态,且能估算翼缘屈曲应力的

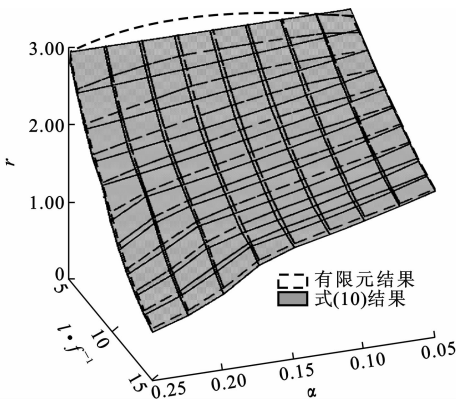


图 11 有限元计算结果与式(10)结果对比

Fig. 11 Comparison Between Finite Element Calculation Results and Equation (10) Results

4 宽厚比限值的确定

取不同参数的波折腹板工形构件的短柱模型进行抗压弹性屈曲分析,以比较简化边界条件下得到的屈曲应力与整体构件的有限元结果之间的差异。具体结果对比见表 2。

由于腹板与翼缘之间的相互约束,在整体构件计算时,第 1 阶屈曲模态对应的屈曲应力与简化边界条件下翼缘屈曲应力的数值有一定区别。这种区别主要是由边界条件的差异所导致的,它体现在 2 个方面:①简化边界条件认为腹板仅提供面外约束而不约束翼缘各点的转动,实际中腹板与翼缘焊接在一起,腹板面外刚度较大,能部分约束翼缘的转动;②简化边界条件认为腹板能完全约束翼缘的面外自由度,实际中腹板仍然会发生微小的整体转动,导致翼缘上相应各点发生不同的面外变形,从而减弱腹板波形产生的约束刚度。腹板自身的转角约束和变形作为翼缘转动约束刚度的缓冲,使翼缘弹性屈曲应力的变化范围小于简化模型的值;然而,观察整体模型的屈曲模态可以发现,腹板的约束不会改变翼缘的屈曲模态。尽管式(10)在整体计算中存在误差,但仍可以作为判断翼缘屈曲模态的依据。

表 2 不同参数的有限元结果与式(10)结果比较

Tab. 2 Comparison Between Finite Element Results and Equation (10) Results for Different Parameters

构件编号	1-1	1-2	2-1	2-2	2-3	2-4	3-0	
α	0.40	0.20	0.05	0.10	0.20	0.20		平腹板
β	3.0	3.0	1.5	1.5	1.5	1.0		
$\sigma_{cr} \cdot \sigma_1^{-1}$ [式(10) 结果]	0.951★	0.951★	1.339*	1.597*	2.109*	2.850*	1.000*	
$\sigma_{cr} \cdot \sigma_1^{-1}$ (简化模 型结果)	1.027★	1.029★	1.316*	1.652*	2.257*	3.015*	1.000*	
$\sigma_{cr} \cdot \sigma_1^{-1}$ (整体计 算结果)	1.32★	1.57★	1.36*	1.63*	2.09*	2.58*	0.12*	

注:★为屈曲模态 I; *为屈曲模态 II; *为平腹板受压屈曲。

在此基础上,采用弹塑性大挠度分析方法,对不同参数的波折腹板工形构件短柱进行抗压极限承载力分析,得到 7 种不同参数的波折腹板工形构件短柱的抗压极限应力比与翼缘宽厚比的关系曲线,见图 12。其中,纵轴为极限应力比 $r, r=P_{cr}/(f_y A_f)$, P_{cr} 为抗压极限承载力, f_y 为翼缘屈服应力;横轴为翼缘名义宽厚比,即 b_1/t 。

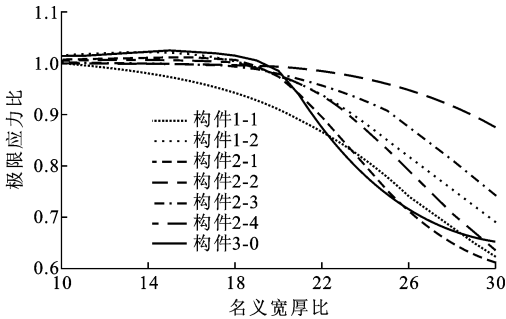


图 12 抗压极限应力比与翼缘宽厚比的关系

Fig. 12 Relation of Compressive Critical Stress Ratio and Width-to-thickness Ratio of Flanges

图 12 中的构件 1-1、1-2 的第 1 阶屈曲模态均为 I 型;构件 2-1、2-2、2-3、2-4 的第 1 阶屈曲模态均为 II 型。由图 12 可以看出,构件 1-1、1-2 在名义宽厚比较小时就已经达不到全截面屈服。随着名义宽厚比的增大(翼缘厚度的减小),相对而言腹板提供的转动约束刚度增大,极限应力比减小速度相对较慢。而 II 型屈曲模态的构件均在名义宽厚比较大时才开始达不到全截面屈服,视腹板约束刚度的大小,极限应力比减小的速度有所不同。

在考虑构件初始缺陷的弹塑性计算中,构件的极限承载力并不完全取决于构件的弹性屈曲应力,

还与其缺陷敏感性有关。大量算例表明,Ⅰ型屈曲模态的构件对初始缺陷较为敏感。一旦初始缺陷引发了与Ⅰ型屈曲模态相似的变形将会导致部分截面过早进入屈服,构件承载力急剧下降;Ⅱ型屈曲模态的构件对初缺陷相对不敏感。由于腹板能在几何上提供较好的约束,在达到弹性屈曲应力或屈服应力之前,翼缘的变形能够被很好被抑制,不会产生过大不均匀的内力,故翼缘容易达到全截面屈服。

尽管在整体构件弹性屈曲应力的计算中,发生Ⅰ型屈曲模态时翼缘的弹性屈曲应力并没有明显减弱,但考虑了材料弹塑性和翼缘的初始几何缺陷的2阶弹塑性分析表明,腹板局部转动刚度约束导致较高弹性屈曲应力对提高构件的弹塑性极限承载力没有任何有益的帮助。因此,在设计时应避免翼缘发生Ⅰ型屈曲,并可以用以下3种方法确定构件的翼缘名义宽厚比。

(1)控制腹板波形,使

$$8.56/\beta^2 > [1 + \frac{2.012}{1 + c(\beta/\alpha)^2}]/(1 + \mu\alpha)^3$$

(2)计算 ν

$$\nu = \sqrt{[1 + \frac{2.012}{1 + c(\beta/\alpha)^2}]/(1 + \mu\alpha)^3}$$

式中: ν 为在理想边界条件及相同的弹性屈曲应力的情况下,波折腹板工形构件翼缘宽厚比与平腹板构件翼缘宽厚比的比值。

(3)根据《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》(CECS 102:2002)中的规定,取翼缘宽厚比限值为 $15\sqrt{\nu}\sqrt{235/f_y}$,其中 ν 取平方根是考虑到边界条件差异及初始缺陷的影响进行的折减,一般取值范围为 1.00~1.32,最大宽厚比约为 $20\sqrt{235/f_y}$ 。

5 结 语

(1)波折腹板工形构件翼缘的约束条件与普通工形构件相比有显著区别。翼缘弹性屈曲应力和弹塑性极限承载力不仅与翼缘宽厚比有关,还受腹板波形和腹板转动刚度等方面因素的影响。合理地利用腹板约束对翼缘屈曲应力的增强作用可以放宽翼缘宽厚比限值,使构件绕弱轴惯性矩增大,从而有效增加构件的弱轴抗弯能力和整体弯扭性能。

(2)目前,随着研究的深入和相关制作加工工艺

的成熟,波折腹板工形构件这种高效型材将在中国得到广泛应用。确定翼缘的宽厚比限值,并且对一些不利于翼缘稳定的腹板波形进行限制是设计中的关键问题。本文研究的是国外学者尚未涉及或研究不够深入的部分,笔者首次提出了正弦形波折腹板工形构件翼缘的2种屈曲模态并初步讨论了对构件弹塑性极限承载力的影响,提出的宽厚比限值可为波折腹板工形构件在中国的应用及研究提供有益的参考。

参考文献:

References:

- [1] 郭彦林,张庆林.波折腹板工形构件截面承载力设计方法[J].建筑科学与工程学报,2006,23(4):58-63.
GUO Yan-lin, ZHANG Qing-lin. Design Method of Section Bearing Capacity of I-type Member of Corrugated Web[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(4): 58-63.
- [2] GB 50017:2003,钢结构设计规范[S].
GB 50017: 2003, Code for Design of Steel Structures [S].
- [3] CECS 102:2002,门式刚架轻型房屋钢结构技术规程[S].
CECS 102:2002, Code for Steel Structure Technology of Light Type House with Portal Steel Frame[S].
- [4] SIOKOLA W. Corrugated Web Beam: Technical Documentation[M]. Vienna: Zeman & Co, 1999.
- [5] Eurocode 3, Design of Steel Structures-part 1-5: Plated Structural Elements[S].
- [6] JOHNSON R P, CAFOLLA J. Local Flange Buckling in Plate Girders with Corrugated Webs[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings, 1997, 122(2): 148-156.
- [7] 陈 骥. 钢结构稳定理论与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
CHEN Ji. Stability of Steel Structures Theory and Design[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [8] 徐爱敏,陈衡治,谢 旭. 结构极限承载力计算方法及其收敛性[J]. 中国公路学报, 2006, 19(5): 65-70.
XU Ai-min, CHEN Heng-zhi, XIE Xu. Calculation Method for Ultimate Bearing Capacity of Structure and Its Convergence [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(5): 65-70.