

文章编号: 1674—8247(2018)02—0049—04

中外钢结构规范钢梁局部稳定性计算对比研究

张琳 赵东平

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要:钢梁是钢结构工程中最常见的受力构件之一,其局部稳定性是设计关注的重点。文章介绍了中国、美国及欧洲钢结构设计规范中对钢梁局部稳定性计算方法的规定,分别以三种规范推荐的方法对受弯钢梁局部稳定抗剪承载力进行了计算分析,结果表明:(1)中国钢结构设计规范规定了翼缘自由外伸与其厚度的相对值,确保设计上翼缘不发生局部屈曲;(2)美国钢结构设计规范规定,根据板件是否发生局部屈曲将钢梁进行分类,若翼缘的宽厚比超过限值,则钢梁截面为细长型,应进行翼缘的局部屈曲计算;(3)欧洲钢结构设计规范规定,根据转动能力的强弱把截面分为四个类型,其中IV类截面最为薄宽,一般在钢梁达到屈服前就会产生局部屈曲;(4)受弯钢梁局部稳定抗剪承载力计算结果表明,中国规范和欧洲规范的计算结果相近,美国规范的计算结果略大。

关键词:钢结构;钢梁;局部稳定;计算

中图分类号:U442 **文献标志码:**A

Comparative Study on the Calculation Methods of Local Stability of Steel Beams as per Chinese Standards, EU and American Standards

ZHANG Lin, ZHAO Dongping

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: Steel beams are the most common force members in steel structure engineering, while the local stability of steel beams is the focus of design. In this paper, the regulations for the local stability of steel beams stipulated in steel design specifications of China, the United States and European are discussed respectively. Shear capacity of local stability of curved members is calculated and analyzed with 3 methods recommended from 3 specifications, the results show: (1) China's steel structure design code stipulates the relative value of the free extension of the flange and the thickness of the flange to ensure that the flange has no local buckling. (2) According to the design rules of American steel structure, the steel beams are classified according to whether the local buckling of the plates occurs or not, the width-thickness ratio of the flange exceeds the specified value, the section of the steel beam is slender, and the local buckling calculation of the flange should be taken into account. (3) The European Code for Design of Steel Structures stipulates that cross-sections are divided into four types according to their ability to rotate, of which Class IV is the thinnest, and local buckling usually occurs before the steel beam reaches yielding. (4) The calculated results of local stable shear bearing capacity of steel beam flexural members show that the calculation results of Chinese and European codes are similar, and the calculation results of American codes are slightly larger.

Key words: steel structure; steel beam; local stability; calculation

收稿日期:2018-01-22

作者简介:张琳(1967-),女,高级工程师。

引文格式:张琳,赵东平. 中外钢结构规范钢梁局部稳定性计算对比研究[J]. 高速铁路技术,2018,9(2):49-52.

ZHANG Lin, ZHAO Dongping. Comparative Study on the Calculation Methods of Local Stability of Steel Beams as per Chinese Standards, EU and American Standards [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(2): 49-52.

钢结构具有受力均匀、自身强度大及重量轻等优点,已经被广泛应用于建筑结构中。钢梁是钢结构工程中最常见的受力构件之一,而钢梁的局部稳定性是设计关注的重点。GB 50017-2003《钢结构设计规范》,对钢梁受弯构件局部稳定性的计算有比较详细的规定^[1]。2001年有关学者研究了工字梁受到弯曲与局部压力时弹塑性屈曲情况,并提出了适用的公式^[2]。2002年相关研究者计算弯矩和局部荷载对工字梁的作用,根据计算结果得出了中国钢结构规范中计算方式的安全度^[3]。这些研究取得的成果,对规范中关于钢梁受弯构件稳定性计算都是十分有益的补充。中国研究者对钢梁受弯构件局部稳定性的关注点,更多的是集中在截面形式对局部稳定性的影响与钢梁自身强度对稳定性的影响,这与国外的做法有一定的差异。

本文全面论述了中美欧钢结构规范中受弯构件局部稳定性的计算方法,以带加劲肋的受弯钢梁抗剪承载力计算为例,分析并提出了中外规范在受弯构件局部稳定性计算方面的差异。

1 钢梁局部稳定性计算方法

对于钢结构受弯构件,一般采用增大截面尺寸的方式保证其截面刚度的增大,达到确保钢梁的稳定性的目的。一方面考虑到经济性和降低自重,钢梁的翼缘和腹板一般都会尽可能的变薄,所以腹板都是高且薄的板件,翼缘都为宽且薄的板件。另一方面,因板件的高厚比过大,在受到外力作用时,容易发生偏离正常平面位置的波状屈曲^[4],这就是钢梁的局部失稳现象。钢梁的翼缘与腹板发生局部失稳,虽然不会造成梁丧失承载力,但会使钢梁的刚度和整体稳定性下降。防止局部失稳的方法一般采用加劲肋加固,这样就把腹板分割为多个矩形板,大幅度提高钢梁腹板的稳定性^[5]。

为最大程度保证钢梁的局部稳定性,中国的钢结构设计规范(以下简称“中国规范”)中规定了翼缘自由外伸与其厚度的相对值,确保设计规定上翼缘不发生局部失稳。

美国的钢结构设计规范(以下简称“美国规范”)中明确规定,根据板件是否发生局部屈曲将钢梁进行分类,分为紧凑型、非紧凑型与细长型3种类型。翼缘的宽厚比超过规定值,则钢梁截面为细长型,应考虑翼缘的局部屈曲计算,且美国规范中的翼缘宽度是翼缘总宽度的二分之一,也就是中国规范翼缘自由外伸与腹板厚度一半之和。有了这种分类之后,可以在规范中规定每种截面的破坏方式,这种方法可以大幅度减

少计算工作。

欧洲钢结构设计规范(以下简称“欧洲规范”)中,根据转动能力的强弱把截面分为I、II、III、IV四种类型,其中第IV类截面最为薄宽,在达到屈服应力之前会发生局部屈曲,不同的截面其计算方法有所不同。与美国规范相似,不同的截面种类,其钢梁稳定性的计算方式也会不同。欧洲规范一般用板件的宽厚比表示,其中在工字梁的翼缘中,板件宽度为外伸翼缘圆角半径端部至最外缘的板件部分,且受压翼缘的宽厚比超过界限后,达到IV类截面,钢梁有可能产生局部失稳屈曲。

中国规范规定,在分析钢梁局部稳定时不将腹板当成一个完全弹性的板,应考虑非弹性变形和钢梁自身的几何问题,并给出考虑屈曲后强度的计算方法;美国规范中是考虑屈曲后拉力,并给出计算方式;欧洲规范采用的是简单屈曲后方法。由此可见,中国规范中确定钢结构受弯构件局部稳定和对屈曲后强度稳定分析与欧美相比存在一定的差异。

1.1 中国规范局部稳定性计算方法^[6]

钢梁受弯构件腹板的作用力分别为弯曲压应力、剪应力与局部压应力,设计一般会设置横向与纵向的加劲肋,以保障钢梁局部稳定性。

对于配置横向加劲肋的钢梁,其局部稳定性计算公式如下:

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_{cr}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)^2 + \frac{\sigma_c}{\sigma_{c,cr}} \leq 1 \quad (1)$$

式中: σ ——腹板边缘弯曲压应力;

τ ——腹板平均剪应力;

σ_{cr} 、 τ_{cr} 、 $\sigma_{c,cr}$ ——各应力临界值;

σ_c ——腹板边缘局部压应力。

对于腹板加设短加劲肋的钢梁,也是采用上式计算。

1.2 美国规范局部稳定性计算方法^[7]

美国规范中,规定构件不发生局部屈曲的情况如下:

$$F_{cr} \geq \frac{1}{\lambda_c^2} F_y \quad (2)$$

钢梁翼缘的宽厚比:

$$\frac{b}{t} \leq 0.95 \lambda_c \sqrt{\frac{kE}{F_y}} \quad (3)$$

式中: F_{cr} ——局部压力临界值;

b ——翼缘宽度;

t ——翼缘厚度;

k ——应力系数;

E ——弹性模量;

λ_c ——缺陷系数;

F_y ——设计应力。

无加劲肋条件下, $k=0.415$, $\lambda_c=0.6$, 这种情况下钢梁翼缘为紧凑型, 不用计算局部屈曲; 当翼缘宽厚比超过限值时, 则应计算翼缘局部屈曲情况; 若设加劲肋, 此钢梁翼缘就是细长型。

抗剪强度的表达式如下:

$$V_n = 0.6 F_y A_w C_v \quad (4)$$

式中: V_n ——剪力;

A_w ——腹板面积;

C_v ——腹板剪力系数。

1.3 欧洲规范局部稳定性计算规定^[8]

欧洲规范中, 对于钢梁抗剪承载力计算公式如下:

$$V_{rd} = \frac{A_v f_{yw}}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (5)$$

式中: V_{rd} ——抗剪承载力;

A_v ——剪切面积;

f_{yw} ——剪切应力;

A_v ——剪切面积;

γ_{M1} ——失稳系数, 一般为 1.0。

2 钢梁抗剪承载力计算实例

对工字梁而言, 钢梁的剪力大部分作用于腹板, 而腹板多是高且薄的构件, 通常需要设加劲肋。接下来以焊接工字梁为实例, 在保证局部不失稳前提下, 以三种规范规定的计算方法, 分别计算抗剪承载力。计算参数: 腹板尺寸 $h_0 \times t_w = 800 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$, 翼缘尺寸 $b \times t_f = 400 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$, 钢材为 Q235 型, $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$, $f_v = 125 \text{ N/mm}^2$, 换算系数 $\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = 1.0$ 。加劲肋的间隔为 $a = 1\,200 \text{ mm}$ 。如图 1 所示。

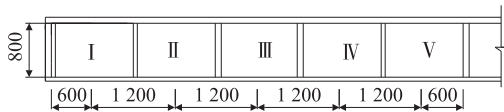


图1 工字钢加劲肋布置图 (mm)

2.1 采用中国规范计算

(1) 腹板长细比

根据图 1 的构件尺寸参数, 腹板长细比计算如下:

$$\begin{aligned} \lambda_s &= \frac{h_0/t_w}{41 \sqrt{5.34 + 4(h_0/a)^2}} \sqrt{\frac{f_y}{235}} \\ &= \frac{800/8}{41 \sqrt{5.34 + 4(800/1\,200)^2}} \sqrt{\frac{235}{235}} = 0.914 \end{aligned}$$

(2) 临界剪应力

$$\tau_{cr} = f_v [1 - 0.59(\lambda_s - 0.8)]$$

$$= 125 \times [1 - 0.59 \times (0.914 - 0.8)]$$

$$= 116.58 \text{ N/mm}^2$$

(3) 抗剪承载力

腹板的抗剪承载力计算如下:

$$V_{cr} = \tau_{cr} A_w = 116.58 \times 800 \times 8 = 746.1 \text{ kN}$$

2.2 采用美国规范计算

(1) 腹板剪力系数

由于 $a/h_0 < 3.0$ 且 $a/h_0 < [260/(h_0/t_w)]^2$, 故屈曲系数可按式计算:

$$\begin{aligned} k_v &= 5 + 5 \times (h_0/a)^2 \\ &= 5 + 5 \times (0.8/1.2)^2 = 7.22 \end{aligned}$$

又因为 $1.1 \sqrt{K_v E / F_y} < h_0/t_w < 1.37 \sqrt{K_v E / F_y}$, 故剪力系数可按式计算:

$$\begin{aligned} C_v &= \frac{1.1 \sqrt{k_v E / f_y}}{h_0/t_w} \\ &= \frac{1.1 \sqrt{7.22 \times 206 \times 10^3 / 235}}{800/8} = 0.875 \end{aligned}$$

(2) 抗剪承载力

腹板的抗剪承载力计算如下:

$$\begin{aligned} V_n &= 0.6 f_y A_w C_v \\ &= 0.6 \times 235 \times 800 \times 8 \times 0.875 = 789.6 \text{ kN} \end{aligned}$$

2.3 采用欧洲规范计算

(1) 腹板长细比

腹板长细比计算如下:

$$\lambda_w = \frac{h_0/t_w}{37.4 \sqrt{k_v}} \sqrt{\frac{f_y}{235}} = 0.995$$

(2) 腹板剪切屈曲折减系数

因 $0.83 < \lambda_w < 1.08$, 故腹板剪切屈曲折减系数计算如下:

$$\chi_w = 0.83/\lambda_w = 0.83/0.995 = 0.834$$

(3) 抗剪承载力

腹板的抗剪承载力计算如下:

$$V_{rd} = \frac{\chi_w A_v f_{yw}}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = \frac{0.834 \times 800 \times 8 \times 235}{\sqrt{3} \times 1} = 724.2 \text{ kN}$$

由以上三种规范的计算结果可知, 对于带加劲肋的腹板, 局部稳定分析时, 按中国规范和欧洲规范计算的抗剪承载力结果相近, 而美国规范的计算结果略大, 这说明中国规范及欧洲规范对受弯构件局部稳定的控制更为严格。

3 结束语

本文分析了中国、美国和欧洲三种钢结构规范中受弯构件局部稳定性的计算方法, 并以带加劲肋的钢梁腹板局部稳定性计算为例进行了计算比较, 得到以

下结论:

(1)为保证钢梁的局部稳定性,中国规范规定了翼缘自由外伸与其厚度的相对值,确保设计规定上翼缘不发生局部屈曲。

(2)美国规范规定,根据板件是否发生局部屈曲将钢梁分为紧凑型、非紧凑型与细长型三种类型。若翼缘的宽厚比超过规定值,则钢梁截面为细长型,应考虑翼缘的局部屈曲计算。

(3)欧洲规范根据转动能力的强弱把截面分为四个类型,其中IV类截面最为薄宽,一般在钢梁达到屈服前就会产生局部屈曲,不同的截面种类,其钢梁稳定性的计算方式也会不同。

(4)带加劲肋钢梁腹板受弯构件的局部稳定性计算结果表明,按中国规范和欧洲规范计算的抗剪承载力结果相近,而按美国规范计算的抗剪承载力略大。

参考文献:

- [1] 沈祖炎. 中国《钢结构设计规范》的发展历程[J]. 建筑结构学报, 2010,31(6):1-6.
SHEN Zuyan. Development of the Chinese "Code for Design of Steel Structure" [J]. Journal of Building Structures, 2010,31(6):1-6.
- [2] 徐彬. 梁腹板在纯弯与局压联合作用下的弹塑性屈曲[D]. 西安:

西安建筑科技大学, 2001.

- XU Bin. Elastic-plastic Buckling of Beam Web under Pure Bending and Partial Edge Loading [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture And Technology, 2001.
- [3] 蔺军. 梁腹板在弯、剪及局压复合应力作用下的弹性及弹塑性屈曲分析[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2002.
LIN Jun. Elastic and Elastic-plastic Buckling Analysis of Beam Web under Combined Bending, Shear and Patch Loading [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2002.
- [4] 于海丰, 张耀春. 中美欧钢结构标准设计方法比较[J]. 低温建筑技术, 2006,28(6):53-55.
YU Haifeng, ZHANG Yaochun. Comparison of Standard Design Methods for Steel Structure among China, the United States and Europe [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2006, 28(6): 53-55.
- [5] 李洋. 中欧钢结构设计规范对比研究[D]. 武汉:武汉工程大学, 2016.
LI Yang. Comparative Study on Design Specifications of Steel Structure in China and Europe [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2016.
- [6] GB 50017-2017 钢结构设计规范[S].
GB 50017-2017 Code for Design of Steel Structures[S].
- [7] ANSI/AISC360-05 Specification for Structural Steel Building.
- [8] BS EN1993-1-8-2005 Design of steel structures.

(编辑:赵立红 白雪)

(上接第36页)

- [2] 孙树礼. 连续梁拱组合桥梁设计关键技术对策研究[J]. 铁道标准设计, 2005,49(5):25-28.
SUN Shuli. Study on the Key Technologies' Countermeasure in the Design of Combined Bridges with Prestressed Continuous Beam and Arch [J]. Railway Standard Design, 2005,49(5):25-28.
- [3] 黄晓彬, 李涛, 吴定俊. 大跨度单线铁路连续梁拱桥动力特性分析[J]. 铁道标准设计, 2009,53(7):59-62.
HUANG Xiaobin, LI Tao, WU Dingjun. Dynamic Analysis of a Continuous-beam Arch Bridge on Long-span Single Track Railway [J]. Railway Standard Design, 2009,53(7):59-62.
- [4] 成明. 高速铁路无横撑组合拱桥设计[J]. 铁道标准设计, 2009,53(12):62-64.
CHENG Ming. Design of a Hybrid Arch Bridge without Wind Bracing on High Speed Railway [J]. Railway Standard Design, 2009, 53(12):62-64.
- [5] 朱林根. 单线铁路大跨度连续梁拱组合结构设计[J]. 铁道标准设计, 2010,54(7):50-52.
ZHU Ling. Design of Long-span Continuous Girder and Arch on Single Track Railway [J]. Railway Standard Design, 2010,54(7): 50-52.
- [6] 陈晓波. 某高速铁路连续梁拱组合桥结构设计[J]. 铁道标准设

计, 2011,55(5):60-62.

- CHEN Xiaobo. Design of a Hybrid Bridge of Continuous Girder and Arch on High Speed Railway [J]. Railway Standard Design, 2011, 55(5):60-62.
- [7] 李奇, 吴定俊, 邵长宇. 考虑车体柔性的车桥耦合系统建模与分析方法[J]. 振动工程学报, 2011, 24(1): 41-47.
LI Qi, WU Dingjun, SHAO Changyu. Modeling and Analysis Method of Vehicle-bridge Coupling System Considering Car-body Flexibility [J]. Journal of Vibration Engineering, 2011,24(1):41-47.
- [8] ZHAI W M. Two Simple Fast Integration Methods for Large-scale Dynamic Problems in Engineering [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1996, 39(24): 4199-4214.
- [9] TB 10002-2017 铁路桥涵设计规范[S].
TB 10002-2017 Code for Design on Railway Bridge and Culvert [S].
- [10] 铁运函[2004]120号, 铁路桥梁检定规范[S].
Tie Yun Han [2004] No. 120, Code for Rating Existing Railway Bridges [S].
- [11] 夏禾, 张楠. 车辆与结构动力相互作用[M]. 北京:科学出版社, 2005.
XIA He, ZHANG Nan. Dynamic Interaction of Vehicle and Structures [M]. Beijing: Science Press, 2005.

(编辑:车晓娟 白雪)