

文章编号: 1000-4750(2014)09-0174-08

冷弯薄壁型钢卷边槽形截面构件畸变屈曲承载力计算方法研究

姚行友^{1,2}, 李元齐¹

(1. 同济大学建筑工程系, 上海 200092; 2. 南昌工程学院土木与建筑工程学院, 江西, 南昌 330099)

摘 要: 基于能量法对冷弯薄壁型钢卷边槽形截面的弹性畸变屈曲应力进行了推导分析, 得到相应畸变屈曲半波长、畸变屈曲应力以及稳定系数计算公式。通过与有限条法进行对比分析, 表明推导出的畸变屈曲应力计算方法具有较高的精度和较好的适用性。在此基础上, 建立了冷弯薄壁型钢卷边槽形截面部分加劲板件弹性局部和畸变屈曲稳定系数的统一计算公式。最后通过算例分析, 验证了该文提出方法的合理性和适用性, 相对于中国现行《冷弯薄壁型钢结构技术规范》能够更加准确的计算部分加劲板件的屈曲稳定系数及卷边槽形截面构件的稳定承载力。

关键词: 冷弯薄壁型钢; 部分加劲板件; 能量法; 畸变屈曲; 局部屈曲; 稳定系数

中图分类号: TU392.1; TU318.1 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.04.0308

DISTORTIONAL BUCKLING STRENGTH OF COLD-FORMED THIN-WALLED STEEL MEMBERS WITH LIPPED CHANNEL SECTION

YAO Xing-you^{1,2}, LI Yuan-qi¹

(1. Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. School of Building and Civil Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang, Jiangxi 330099, China)

Abstract: The half-wave length, the elastic buckling stress of the distortional-buckling of cold-formed thin-walled steel members with lipped channel sections and the corresponding stability coefficient of partially stiffened elements are developed, based on the energy method. With the comparison among the calculated results of elastic buckling stress using the proposed method and the finite strip method, the suitability and good precision of the developed method are illuminated. Then, a uniform formula for the stability coefficient of partially stiffened elements considering both local and distortional buckling effects is established. Finally, with examples' analysis, it is shown that the proposed uniform formula has higher precision to calculate the stability coefficient of partially stiffened elements and the ultimate load-carrying capacity of cold-formed thin-walled steel members with lipped channel sections, comparing that of the current method provided by the technical code of cold-formed thin-walled steel structures (GB50018-2002).

Key words: cold-formed thin-walled steel; partially stiffened elements; energy method; distortional buckling; local buckling; stability coefficient

近年来, 冷弯薄壁型钢在建筑钢结构中应用日益广泛, 且卷边槽形截面是其主要截面形式之一(图1)。由于卷边对于翼缘支承作用的强弱不同, 卷

边槽形截面构件在外力作用下会出现局部屈曲和畸变屈曲, 进而降低构件的整体稳定承载力。目前, 各国冷弯薄壁型钢结构设计规范^[1-4]均采用有效宽

收稿日期: 2013-04-03; 修改日期: 2013-08-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078288, 51308277); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ14760)

通讯作者: 李元齐(1971—), 男, 湖北人, 教授, 博士, 博导, 主要从事冷弯型钢结构、空间结构及结构抗风研究(E-mail: liyq@tongji.edu.cn).

作者简介: 姚行友(1978—), 男, 湖北人, 高工, 博士, 主要从事冷弯型钢结构、钢-混凝土组合结构研究(E-mail: yaoxingyoujd@163.com).

度法计算构件有效截面来考虑局部屈曲的影响。另一方面,对于畸变屈曲承载力大致分为两种处理方式:一种与局部屈曲处理方法相同,采用降低部分加劲板件的稳定系数来实现,澳洲规范、北美规范、欧洲规范以及中国规范等均给出了相应的计算方法;一种是把畸变屈曲当作一种单独的失稳模态计算其相应承载力,澳洲规范和北美规范在相关研究成果^[5-8]的基础上给出了相应的计算方法。有效宽度法首先需要计算截面的弹性屈曲应力^[1,3]或相应部分加劲板件的稳定系数^[2]。相关文献^[9-12]表明,中国规范采用较小的部分加劲板件稳定系数的方法相对比较保守且显粗糙。国内学者姚谏等对于弹性畸变屈曲荷载^[13]、转动约束刚度^[14]以及简化计算方法^[15]进行了相应的分析探讨,罗洪光等^[16]对斜卷边轴压构件畸变屈曲进行了计算分析,分析表明对于卷边槽形截面构件必须进行畸变屈曲承载力的计算。为此,本文基于能量法对卷边槽形截面弹性畸变屈曲及相应部分加劲板件的稳定系数进行推导分析,并采用已有的相关试验结果验证本文建议方法的合理性。

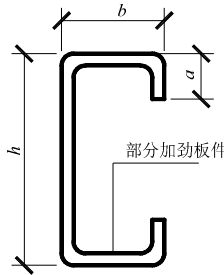


图 1 卷边槽形截面构件

Fig.1 Members with lipped channel section

1 卷边槽形截面构件弹性畸变屈曲分析

1.1 基本假定和边界条件

对卷边槽形截面构件弹性屈曲分析采用以下基本假定^[17]: 1) 视卷边为弹性支承梁,且忽略卷边对翼缘(部分加劲板件)的嵌固作用; 2) 板件周边剪应力为零,非加载边正应力为零。

卷边槽形截面构件部分加劲板件的分析简图和坐标系如图 2(a)所示,以压应力为正,板件厚度为 t 、长度为 λ 。若以 w 表示板件的挠度函数,则相应边界条件为:

1) 当 $y=0$ 时板的挠度为零:

$$w|_{y=0} = 0 \tag{1}$$

2) 当 $y=0$ 时弯矩为零,由于 $y=0$ 的边界保持为直线,则:

$$\left. \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right|_{y=0} = 0 \tag{2}$$

3) 卷边的支承条件为:

卷边挠曲微分方程为:

$$EI \left. \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \right|_{y=b} = q(x) \tag{3}$$

卷边对部分加劲板件的弹性反力为:

$$q(x) = D \left[\frac{\partial^3 w}{\partial y^3} + (2-\nu) \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} \right]_{y=b} \tag{4}$$

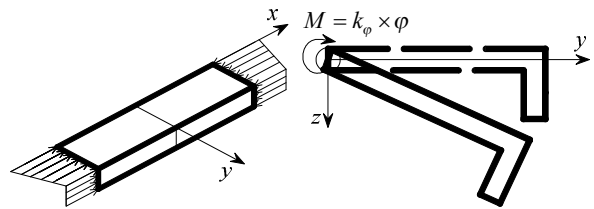
则卷边对部分加劲板件的支承作用可表示为:

$$D \left[\frac{\partial^3 w}{\partial y^3} + (2-\nu) \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} \right]_{y=b} = EI \left. \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \right|_{y=b} \tag{5}$$

其中, D 、 E 、 I 、 ν 分别为单位板宽抗弯刚度、钢材弹性模量、卷边相对于卷边部分加劲板件形心的惯性矩以及泊松比。

1.2 能量法求解

对于仅发生畸变屈曲及畸变屈曲半波长较长的卷边槽形截面构件,其部分加劲板件稳定系数随着半波长长度的增大而逐渐降低^[12],因此构件畸变屈曲应力是一个随半波长变化的值,无法给出像局部屈曲一样的具体值。但由于部分加劲板件一般和其他板件如腹板相连,存在一定转动约束,因此在畸变屈曲分析中必须考虑相邻板件的约束作用。这样对于发生畸变屈曲的卷边槽形截面构件,其部分加劲板件稳定系数的计算简图可采用图 2(b)所示简化模型,变形函数取为 $w = \cos(\pi x / \lambda) f y$, 其中 f 为参数。



(a) 分析简图和坐标系 (b) 畸变屈曲简化模型

图 2 卷边槽形截面部分加劲板件畸变屈曲分析模型

Fig.2 Analytical model for distortional buckling for partially stiffened plate of lipped channel section

部分加劲板件的弯曲应变能按下式计算:

$$U_f = \frac{D}{2} \int_{-\lambda/2}^{\lambda/2} \int_0^b \left\{ \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1-\nu) \cdot \right.$$

$$\left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \times \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dy dx \quad (6a)$$

代入变形函数得部分加劲板件弯曲应变能为:

$$U_f = \frac{Db\lambda f^2}{4} \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^2 \left[\left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^2 b^2 / 3 + 2(1-\nu) \right] \quad (6b)$$

卷边的弯曲应变能按下式计算:

$$U_{lip} = \frac{EI}{2} \int_{-\lambda/2}^{\lambda/2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)_{y=b}^2 dx \quad (7a)$$

代入变形函数得卷边弯曲应变能为:

$$U_{lip} = \frac{EI}{4} f^2 b^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^4 \lambda \quad (7b)$$

腹板的扭转应变能按下式计算:

$$U_w = \frac{k_\phi}{2} \int_{-\lambda/2}^{\lambda/2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)_{y=0}^2 dx \quad (8a)$$

代入变形函数得腹板扭转应变能为:

$$U_w = \frac{k_\phi}{4} f^2 \lambda \quad (8b)$$

当最大应力作用于加劲边, 部分加劲板件的外力势能按下式计算:

$$V_f = -\frac{1}{2} \int_{-\lambda/2}^{\lambda/2} \int_0^b \sigma_x \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 t dy dx = -\frac{1}{2} \int_{-\lambda/2}^{\lambda/2} \int_0^b \sigma_w (1-\alpha y/b) \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 t dy dx \quad (9a)$$

式中 α 为部分加劲板件的应力不均匀系数, 代入变形函数得部分加劲板件外力势能为:

$$V_f = -\frac{1}{4} f^2 b^3 t \lambda \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^2 \sigma_{lip} (1/3 - \alpha/4) \quad (9b)$$

卷边的外力势能按下式计算:

$$V_{lip} = -\frac{1}{2} at \int_{-\lambda/2}^{\lambda/2} \sigma_{lip} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)_{y=b}^2 dx = -\frac{1}{2} at \int_{-\lambda/2}^{\lambda/2} \sigma_w (1-\alpha) \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)_{y=b}^2 dx \quad (10a)$$

代入变形函数得卷边外力势能为:

$$V_{lip} = -\frac{1}{4} at f^2 b^2 \lambda \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^2 \sigma_w (1-\alpha) \quad (10b)$$

部分加劲板件的总势能为下式:

$$\Pi = V_{lip} + V_f + U_f + U_{lip} + U_w \quad (11)$$

把式(6b)、式(7b)、式(8b)、式(9b)以及式(10b)代入式(11)化简, 并令 $\partial \Pi / \partial f = 0$ 得到畸变屈曲应力如下式所示:

$$\sigma_w = \frac{k_\phi / (\pi/\lambda)^2 + Db((\pi b/\lambda)^2/3 + 2(1-\nu)) + EI(\pi b/\lambda)^2}{tb^3(1/3 - \alpha/4) + atb^2(1-\alpha)} \quad (12)$$

若忽略半波长对于腹板转动刚度的影响, 并令 $\partial \sigma_w / \partial \lambda = 0$ 得畸变屈曲半波长计算公式为:

$$\lambda = \pi^4 \sqrt{(b^3 D / 3 + EIb^2) / k_\phi} \quad (13)$$

同理可得到最大应力作用于非加劲边, 卷边槽形截面构件的弹性畸变屈曲应力和半波长为式(14)和式(15):

$$\sigma_{lip} = \frac{k_\phi / (\pi/\lambda)^2 + Db((\pi b/\lambda)^2/3 + 2(1-\nu)) + EI(\pi b/\lambda)^2}{tb^3(1/3 - \alpha/12) + atb^2} \quad (14)$$

$$\lambda = \pi^4 \sqrt{(b^3 D / 3 + EIb^2) / k_\phi} \quad (15)$$

1.3 腹板转动约束

在畸变屈曲半波长计算公式(13)和式(15)中, 半波长和腹板转动约束刚度有关。但从文献[12, 5]结论可以看出, 对于半波长较长的轴压构件, 其转动约束刚度 k_ϕ 近似等于 $2D/h$, 即 $k_\phi = 2D/h$ 。对受弯构件转动约束刚度, 可以近似按 $k_\phi = 4D/h$ 计算。在轴压和受弯间的偏压应力作用下, 可近似按线性插值计算, 取 $k_\phi = (2 + \alpha_w)D/h$, 其中 α_w 为腹板压应力不均匀系数。

1.4 弹性畸变屈曲应力和稳定系数

把腹板转动约束刚度代入式(15)可得到相应畸变屈曲半波长:

$$\lambda = \pi^4 \sqrt{\frac{b^2 h}{6(1 + 0.5\alpha_w)}} (b + 3EI/D) \quad (16)$$

将式(16)代入式(14)和式(12), 可得卷边槽形截面构件的畸变屈曲应力。为了与局部屈曲稳定系数不考虑板组相关的计算方法相一致, 可令式(14)和式(12)的转动约束刚度 k_ϕ 为 0, 并把板件稳定系数与屈曲应力的换算公式 $\sigma = kE\pi^2 / (12(1-\nu^2)) \cdot (t/b)^2$ 代入, 可得不考虑腹板和部分加劲板件板组相关作用的部分加劲板件畸变屈曲稳定系数:

当最大应力作用于加劲(腹板)边时:

$$k = \frac{b[(b/\lambda)^2/3 + 2(1-\nu)/\pi^2] + 12(1-\nu^2)I(b/\lambda)^2/t^3}{b(1/3 - \alpha/12) + a} \quad (17a)$$

当最大应力作用于部分加劲边(卷边)时:

$$k = \frac{b[(b/\lambda)^2/3 + 2(1-\nu)/\pi^2] + 12(1-\nu^2)I(b/\lambda)^2/t^3}{b(1/3 - \alpha/4) + a(1-\alpha)} \quad (17b)$$

对于式(17b), 当 $\alpha \geq (b/3 + a)/(b/4 + a)$, 屈曲稳定系数 k 趋近于无穷大并转化为负值, 说明在这个范围内畸变屈曲不可能发生, 仅会发生局部屈曲。

1.5 弹性畸变屈曲应力对比分析

选取部分加劲板件宽度 $b=60\text{mm}$ 、厚度 $t=1\text{mm}$

的卷边槽形截面构件为例分析畸变屈曲应力计算方法的精确性, 腹板高度 h 从 $60\text{mm}\sim 300\text{mm}$ 变化、卷边 a 从 $0\text{mm}\sim 24\text{mm}$ 变化, 即宽厚比 $b/t=60$ 、 $a/b=0\sim 0.4$ 、 $h/b=1\sim 5$ 。采用本文方法和有限条法计算得到的轴压构件畸变屈曲应力的对比见表 1, 应力单位为 MPa。

由表 1 可以看出, 式(12)计算的屈曲应力与有限条模型计算的结果误差在 8%以内。说明式(12)可达到较高的精度。对受弯构件、弱轴或强轴偏压构件计算结果的对比与轴压构件基本相同, 具体计算结果见文献[12]。

表 1 建议方法与有限条法计算应力对比

Table 1 Comparison on distortional buckling stress between the proposed method and the Finite Strip Method

	h	$a=0$	$a=3$	$a=6$	$a=9$	$a=12$	$a=15$	$a=18$	$a=21$	$a=24$
本文	60	34.84	45.48	75.50	107.77	138.92	168.06	195.03	219.90	242.85
	90	32.49	40.65	64.76	90.78	115.95	139.53	161.37	181.52	200.12
	120	31.08	37.77	58.35	80.65	102.26	122.52	141.30	158.64	174.65
	150	30.13	35.80	53.98	73.74	92.92	110.92	127.61	143.03	157.27
	180	29.42	34.35	50.75	68.64	86.02	102.35	117.50	131.50	144.44
	210	28.87	33.22	48.24	64.67	80.66	95.69	109.64	122.54	134.46
	240	28.43	32.31	46.22	61.48	76.34	90.32	103.31	115.32	126.43
	270	28.06	31.56	44.54	58.83	72.76	85.87	98.06	109.34	119.77
	300	27.75	30.92	43.13	56.59	69.73	82.11	93.62	104.28	114.14
	有限条	60	32.16	42.72	72.50	106.42	139.71	171.31	200.81	228.04
90		30.64	38.64	62.75	90.46	117.57	143.29	167.28	189.38	209.59
120		29.72	36.17	56.87	80.80	104.21	126.41	147.09	166.16	183.57
150		29.11	34.48	52.81	74.14	95.02	114.81	133.24	150.23	165.75
180		28.64	33.22	49.80	69.21	88.20	106.20	122.98	138.43	152.55
210		28.29	32.24	47.44	65.35	82.88	99.49	114.98	129.25	142.22
240		28.01	31.45	45.53	62.23	78.58	94.08	108.53	121.84	133.98
270		27.76	30.79	43.96	59.64	75.01	89.59	103.17	115.68	127.10
300		27.57	30.24	42.62	57.45	71.99	85.78	98.63	110.47	121.29
本文/有限条		60	1.08	1.06	1.04	1.01	0.99	0.98	0.97	0.96
	90	1.06	1.05	1.03	1.00	0.99	0.97	0.96	0.96	0.95
	120	1.05	1.04	1.03	1.00	0.98	0.97	0.96	0.95	0.95
	150	1.04	1.04	1.02	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.95
	180	1.03	1.03	1.02	0.99	0.98	0.96	0.96	0.95	0.95
	210	1.02	1.03	1.02	0.99	0.97	0.96	0.95	0.95	0.95
	240	1.02	1.03	1.02	0.99	0.97	0.96	0.95	0.95	0.94
	270	1.01	1.02	1.01	0.99	0.97	0.96	0.95	0.95	0.94
	300	1.01	1.02	1.01	0.99	0.97	0.96	0.95	0.94	0.94

2 部分加劲板件稳定系数统一公式

把泊松比 $\nu=0.3$ 以及 π 代入式(17), 并考虑卷边槽形截面构件发生局部屈曲时部分加劲板件稳定

系数且不考虑腹板的相关作用, 得:

当最大应力作用于加劲边:

$$k = \min \left(2\alpha^3 + 2\alpha + 4, \frac{b[(b/\lambda)^2/3 + 0.142] + 10.92I(b/\lambda)^2/t^3}{b(1/3 - \alpha/12) + a} \right) \quad (18a)$$

当最大应力作用于非加劲边:

$$k = \begin{cases} \min \left(2\alpha^3 + 2\alpha + 4, \frac{b[(b/\lambda)^2/3 + 0.142] + 10.92I(b/\lambda)^2/t^3}{b(1/3 - \alpha/4) + a(1 - \alpha)} \right), & \alpha < \frac{b/3 + a}{b/4 + a} \\ 2\alpha^3 + 2\alpha + 4, & \alpha \geq \frac{b/3 + a}{b/4 + a} \end{cases} \quad (18b)$$

式中, 半波长应取畸变屈曲半波长和构件计算长度的最小值。

3 卷边槽形截面构件弹性畸变屈曲承载力算例分析

利用式(18)得到的考虑畸变和局部屈曲的部分加劲板件稳定系数, 可采用中国规范^[2]的相关方法计算卷边槽形截面构件考虑畸变屈曲的稳定承载力。在北美规范^[1]中, 对于卷边槽形截面构件承载力采用有效宽度法考虑局部和整体稳定相关作用, 畸变屈曲承载力单独计算, 具有较高的准确性。本文通过和北美规范方法的对比分析, 来考察提出的考虑局部屈曲、畸变屈曲与整体屈曲相关作用的稳

定承载力建议计算方法。

3.1 规范附录的截面形式

中国规范^[2]附录列出了国内常用卷边槽形截面构件的截面尺寸。采用规范附录的截面形式, 构件长度分别取腹板宽度的 5 倍、10 倍和 15 倍, 其构件长细比覆盖范围为 30~150。表 2 给出了对不同截面尺寸采用中国规范^[2]现有计算方法、本文建议计算方法以及北美规范^[1]计算方法得到的构件轴压稳定承载力对比。其中, P_{c1} 、 P_{c2} 分别为中国规范^[2]考虑板组相关和不考虑板组相关的计算结果, P_{cr1} 、 P_{cr2} 分别为本文建议的局部和畸变统一设计方法考虑板组相关和不考虑板组相关的计算结果, P_A 为依据北美规范^[1]的稳定承载力。

表 2 不同方法计算中国规范附录截面形式的轴压构件承载力对比

Table 2 Comparison on load-carrying capacities of axially-compressed members with sections in the appendix of Chinese code

L/mm	h/mm	b/mm	a/mm	t/mm	P_{c1}/kN	P_{c2}/kN	P_{cr1}/kN	P_{cr2}/kN	P_A/kN	P_{c1}/P_A	P_{c2}/P_A	P_{cr1}/P_A	P_{cr2}/P_A
400	80	40	15	2	103.02	103.64	108.24	108.88	111.32	0.93	0.93	0.97	0.98
500	100	50	15	2.5	155.67	155.66	163.10	163.77	168.40	0.92	0.92	0.97	0.97
600	120	50	20	2.5	163.48	166.76	172.41	174.36	177.92	0.92	0.94	0.97	0.98
600	120	60	20	3	227.61	228.18	242.06	239.91	247.60	0.92	0.92	0.98	0.97
700	140	50	20	2	115.40	121.56	124.72	133.55	132.23	0.87	0.92	0.94	1.01
700	140	50	20	2.2	133.71	140.04	142.98	150.27	149.66	0.89	0.94	0.96	1.00
700	140	50	20	2.5	162.75	168.27	171.71	175.17	176.73	0.92	0.95	0.97	0.99
700	140	60	20	3	228.85	231.58	240.86	242.54	248.80	0.92	0.93	0.97	0.97
800	160	60	20	2	118.34	126.01	132.70	140.70	145.20	0.82	0.87	0.91	0.97
800	160	60	20	2.2	141.25	147.23	153.30	164.04	165.71	0.85	0.89	0.93	0.99
800	160	60	20	2.5	172.14	179.43	184.45	195.89	195.58	0.88	0.92	0.94	1.00
800	160	70	20	3	241.07	245.14	256.29	267.67	270.11	0.89	0.91	0.95	0.99
900	180	70	20	2	118.51	129.31	134.34	146.67	141.72	0.84	0.91	0.95	1.03
900	180	70	20	2.2	142.40	151.77	161.17	171.00	165.53	0.86	0.92	0.97	1.03
900	180	70	20	2.5	180.97	187.32	195.78	210.36	203.75	0.89	0.92	0.96	1.03
1000	200	70	20	2	114.84	127.70	130.22	143.62	140.44	0.82	0.91	0.93	1.02
1000	200	70	20	2.2	137.99	149.63	156.27	167.49	164.85	0.84	0.91	0.95	1.02
1000	200	70	20	2.5	176.54	184.71	195.05	206.09	202.22	0.87	0.91	0.96	1.02
1100	220	75	20	2	113.60	127.25	128.80	145.13	141.69	0.80	0.90	0.91	1.02
1100	220	75	20	2.2	136.51	150.90	154.60	169.26	162.53	0.84	0.93	0.95	1.04
1100	220	75	20	2.5	174.69	186.29	197.51	208.28	204.28	0.86	0.91	0.97	1.02
800	80	40	15	2	94.00	94.01	98.20	97.28	97.72	0.96	0.96	1.00	1.00
1000	100	50	15	2.5	140.66	140.66	147.39	145.56	146.78	0.96	0.96	1.00	0.99
1200	120	50	20	2.5	142.96	144.88	149.80	148.36	147.96	0.97	0.98	1.01	1.00
1200	120	60	20	3	206.58	206.58	219.17	213.78	216.46	0.95	0.95	1.01	0.99
1400	140	50	20	2	95.43	99.60	101.75	106.09	103.17	0.92	0.97	0.99	1.03
1400	140	50	20	2.2	110.27	113.99	116.40	118.68	116.60	0.95	0.98	1.00	1.02
1400	140	50	20	2.5	132.72	136.53	139.33	137.94	137.26	0.97	0.99	1.02	1.00

(续表)

L/mm	h/mm	b/mm	a/mm	t/mm	P_{c1}/kN	P_{c2}/kN	P_{cr1}/kN	P_{cr2}/kN	P_A/kN	P_{c1}/P_A	P_{c2}/P_A	P_{cr1}/P_A	P_{cr2}/P_A
1400	140	60	20	3	199.71	201.77	209.88	206.87	207.31	0.96	0.97	1.01	1.00
1600	160	60	20	2	102.41	106.99	110.95	119.23	116.04	0.88	0.92	0.96	1.03
1600	160	60	20	2.2	118.51	123.62	127.17	135.32	131.16	0.90	0.94	0.97	1.03
1600	160	60	20	2.5	143.97	148.45	152.62	157.33	154.55	0.93	0.96	0.99	1.02
1600	160	70	20	3	212.27	214.40	224.17	228.97	227.80	0.93	0.94	0.98	1.01
1800	180	70	20	2	104.95	111.32	118.12	125.47	124.68	0.84	0.89	0.95	1.01
1800	180	70	20	2.2	125.68	130.09	136.42	146.27	143.92	0.87	0.90	0.95	1.02
1800	180	70	20	2.5	153.11	158.66	164.05	175.68	170.66	0.90	0.93	0.96	1.03
2000	200	70	20	2	97.46	104.05	110.42	116.42	119.11	0.82	0.87	0.93	0.98
2000	200	70	20	2.2	116.93	121.54	127.79	135.67	134.89	0.87	0.90	0.95	1.01
2000	200	70	20	2.5	143.68	149.69	153.51	163.29	159.16	0.90	0.94	0.96	1.03
2200	220	75	20	2	94.54	102.35	107.10	114.72	117.05	0.81	0.87	0.91	0.98
2200	220	75	20	2.2	113.44	119.58	127.44	133.70	134.92	0.84	0.89	0.94	0.99
2200	220	75	20	2.5	143.05	147.47	153.22	163.14	161.12	0.89	0.92	0.95	1.01
1200	80	40	15	2	77.47	77.46	78.49	77.83	78.50	0.99	0.99	1.00	0.99
1500	100	50	15	2.5	114.05	114.05	114.68	114.15	116.10	0.98	0.98	0.99	0.98
1800	120	50	20	2.5	103.39	102.44	105.04	102.44	108.56	0.95	0.94	0.97	0.94
1800	120	60	20	3	168.80	168.80	170.37	169.25	172.26	0.98	0.98	0.99	0.98
2100	140	50	20	2	62.76	64.53	65.93	64.57	68.33	0.92	0.94	0.96	0.95
2100	140	50	20	2.2	71.62	72.12	75.23	72.12	76.91	0.93	0.94	0.98	0.94
2100	140	50	20	2.5	85.41	83.61	86.42	83.61	89.81	0.95	0.93	0.96	0.93
2100	140	60	20	3	145.25	143.63	146.39	143.63	152.53	0.95	0.94	0.96	0.94
2400	160	60	20	2	69.76	71.72	73.81	75.43	78.90	0.88	0.91	0.94	0.96
2400	160	60	20	2.2	80.08	82.04	84.40	84.28	89.00	0.90	0.92	0.95	0.95
2400	160	60	20	2.5	95.79	97.78	100.93	97.78	104.40	0.92	0.94	0.97	0.94
2400	160	70	20	3	156.41	157.54	164.73	160.11	169.10	0.92	0.93	0.97	0.95
2700	180	70	20	2	75.30	77.87	80.60	85.72	88.59	0.85	0.88	0.91	0.97
2700	180	70	20	2.2	86.95	89.22	92.31	95.79	100.00	0.87	0.89	0.92	0.96
2700	180	70	20	2.5	104.79	107.00	110.65	111.16	117.53	0.89	0.91	0.94	0.95
3000	200	70	20	2	66.05	68.43	70.25	73.39	75.03	0.88	0.91	0.94	0.98
3000	200	70	20	2.2	76.07	78.41	80.47	82.10	84.75	0.90	0.93	0.95	0.97
3000	200	70	20	2.5	91.22	94.05	96.46	95.41	99.71	0.91	0.94	0.97	0.96
3300	220	75	20	2	64.76	67.27	69.01	72.85	73.46	0.88	0.92	0.94	0.99
均值										0.8990	0.9283	0.9616	0.9908
方差										0.0469	0.0292	0.0262	0.0294
变异系数										0.0521	0.0314	0.0272	0.0297

对于受弯构件和偏压构件的计算结果见文献[12], 其计算结果的统计分析结果如表3和表4。表中, M_{c1} 和 P_{c1} 、 M_{c2} 和 P_{c2} 分别为中国规范^[2]考虑板组相关和不考虑板组相关的计算结果, M_{cr1} 和 P_{cr1} 、 M_{cr2} 和 P_{cr2} 分别为本文建议的局部和畸变统一设计方法考虑板组相关和不考虑板组相关的计算结果, M_A 和 P_A 为依据北美规范^[1]的稳定承载力。

表3 中国规范附录截面的受弯构件承载力对比

Table 3 Comparison on load-carrying capacities of bending members with sections in the appendix of Chinese code

	M_{c1}/M_A	M_{c2}/M_A	M_{cr1}/M_A	M_{cr2}/M_A
均值	0.9443	0.9386	0.9945	0.9940
方差	0.0312	0.0174	0.0102	0.0103
变异系数	0.0331	0.0186	0.0102	0.0104

表4 中国规范附录截面的偏压构件承载力对比
Table 4 Comparison on load-carrying capacities of eccentrically -compressed members with sections in the appendix of Chinese code

	P_{c1}/P_A	P_{c2}/P_A	P_{cr1}/P_A	P_{cr2}/P_A
均值	1.0816	1.1661	1.0188	1.1094
方差	0.0591	0.0502	0.0389	0.0526
变异系数	0.0547	0.0431	0.0382	0.0474

从表2可以看出: 对于中国规范^[2]附录的截面形式, 1) 由于建议的计算方法和北美规范考虑了卷边-翼缘宽度比变化对于翼缘(部分加劲板件)稳定系数的影响, 同时北美规范也考虑了畸变屈曲承载力, 采用建议的计算方法考虑畸变屈曲影响的计算结果与北美规范比较吻合, 特别是考虑翼缘和腹板的板组相关后, 均值较好, 变异性较小; 2) 中国规

范由于没有考虑卷边-翼缘宽度比变化对于部分加劲板件稳定系数的影响,采用了统一的 0.98 作为稳定系数,计算承载力相对比较保守,变异性较大。

从表 3 和表 4 的计算结果来看:对于受弯和偏压构件,建议方法由于考虑了部分加劲板件稳定系数的修正,能够较好的反映不同截面卷边槽形截面构件的局部屈曲、畸变屈曲和整体稳定相关的稳定承载力。

3.2 基于国内外试验结果的对比

本文收集了国内外卷边槽形截面轴压、受弯、偏压构件各 77 个、62 个、186 个,试件截面见文献[12],表 5、表 6 和表 7 给出了分别采用中国规范^[2]计算方法、建议计算方法以及北美规范^[1]计算方法计算得到的构件承载力对比。其中, P_t 、 M_t 为轴压和偏压构件以及受弯构件的实验承载力, P_{c1} 、 P_{c2} 、 M_{c1} 、 M_{c2} 、 P_{cr1} 、 P_{cr2} 、 M_{cr1} 、 M_{cr2} 、 P_A 、 M_A 同前。

表 5 轴压试件试验结果与承载力分析结果的对比

Table 5 Comparison on load-carrying capacities of axially-compressed members between the tested and calculated results

	P_{c1}/P_t	P_{c2}/P_t	P_{cr1}/P_t	P_{cr2}/P_t	P_A/P_t
均值	1.1416	1.0739	1.0877	1.0257	0.9751
方差	0.1963	0.1907	0.1084	0.0987	0.1100
变异系数	0.1719	0.1776	0.0997	0.0962	0.1128

表 6 受弯试件试验结果与承载力分析结果的对比

Table 6 Comparison on load-carrying capacities of bending members between the tested and calculated results

	M_{c1}/M_t	M_{c2}/M_t	M_{cr1}/M_t	M_{cr2}/M_t	M_A/M_t
均值	1.0500	1.0487	1.0040	0.9856	1.0037
方差	0.1291	0.1318	0.1124	0.1182	0.0974
变异系数	0.1230	0.1256	0.1119	0.1200	0.0970

表 7 偏压试件试验结果与承载力分析结果的对比

Table 7 Comparison on load-carrying capacities of eccentrically-compressed members between the tested and calculated results

	P_{c1}/P_t	P_{c2}/P_t	P_{cr1}/P_t	P_{cr2}/P_t	P_A/P_t
均值	1.1934	1.1184	1.1139	1.0547	1.1370
方差	0.2342	0.2067	0.2001	0.1823	0.1720
变异系数	0.1963	0.1848	0.1797	0.1729	0.1513

从表 5、表 6 和表 7 可以看出:对于卷边槽形截面构件,由于建议方法考虑了部分加劲板件稳定系数的修正,能够较好地考虑不同截面卷边槽形截面构件的局部屈曲、畸变屈曲和整体稳定相关的稳定承载力,特别是考虑翼缘和腹板的板组相关后,与试验结果比较接近,变异性相对较小。

4 结论

本文基于能量法对卷边槽形截面构件弹性畸变屈曲应力进行了推导分析,得到了构件畸变屈曲半波长、畸变屈曲应力以及部分加劲板件(翼缘)稳定系数的计算公式。通过与有限条法的对比分析,表明推导的计算方法具有较高的精度和较好的通用性。在此基础上,建立了卷边槽形截面部分加劲板件考虑弹性局部屈曲和畸变屈曲相统一的稳定系数计算公式。最后,通过算例分析,表明本文提出的卷边槽形截面构件承载力计算公式是合理且适用的,相对于现行国家标准《冷弯薄壁型钢结构技术规范》能够更加准确地计算卷边槽形截面部分加劲板件(翼缘)的稳定系数,以及卷边槽形截面构件的稳定承载力。

参考文献:

- [1] AISI-S100-2007, North American cold-formed steel specification [S]. Washington: American Iron and Steel Institute, 2007.
- [2] GB 50018-2002, 冷弯薄壁型钢结构技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2002.
GB 50018-2002, Technical code of cold-formed thin-wall steel structures [S]. Beijing: China Planning Press, 2002. (in Chinese)
- [3] AS/NZS 4600:2005, Australian/New Zealand standard cold-formed steel structures [S]. Sydney: Standards Australia and Standards New Zealand, 2005.
- [4] EN 1993-1-3:2006, Supplementary rules for cold formed thin gauge members and sheeting [S]. London: BSI, CEN, 2006.
- [5] Lau C W, Hancock G J. Distortional buckling formulas for channel columns [J]. Journal of Structural Engineering, 1987, 113(5): 1063-1078.
- [6] Hancock G J. Design for distortional buckling of flexural members [J]. Thin-walled Structures, 1997, 27(1): 3-12.
- [7] Schafer B W, Pekoz T. Laterally braced cold-formed steel flexural members with edge stiffened flanges [J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(2): 118-127.
- [8] Schafer B W. Local, distortional, and Euler buckling of thin-walled columns [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(3): 289-299.
- [9] 陈绍蕃. 卷边槽钢的局部相关屈曲和畸变屈曲[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(1): 27-32.
Chen Shaofan. Local interactive buckling and distortional buckling of lipped channels [J]. Journal of Building Structures, 2002, 23(1): 27-32. (in Chinese)
- [10] 李元齐, 王树坤, 沈祖炎, 等. 高强冷弯薄壁型钢卷边

- 槽形截面轴压构件试验研究及承载力分析[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(11): 17—25.
- Li Yuanqi, Wang Shukun, Shen Zuyan, et al. Experimental study and load-carrying capacity analysis of high-strength cold-formed thin-walled steel lipped channel columns under axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(11): 17—25. (in Chinese)
- [11] 李元齐, 刘翔, 沈祖炎, 等. 高强冷弯薄壁型钢卷边槽形截面偏压构件试验研究及承载力分析[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(11): 26—35.
- Li Yuanqi, Liu Xiang, Shen Zuyan, et al. Experimental study and load-carrying capacity analysis of eccentrically-compressed high-strength cold-formed thin-walled steel lipped channel columns [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(11): 26—35. (in Chinese)
- [12] 姚行友. 冷弯薄壁型钢开口截面构件畸变屈曲性能与设计方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2012: 146—153, 155—187.
- Yao Xingyou. Distortional buckling behavior and design method of cold-formed thin-walled steel members with opening section [D]. Shanghai: Tongji University, 2012: 146—153, 155—187. (in Chinese)
- [13] 姚谏. 普通卷边槽钢的弹性畸变屈曲荷载[J]. 工程力学, 2008, 25(12): 30—34.
- Yao Jian. Distortional buckling loads of cold-formed lipped channels [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(12): 30—34. (in Chinese)
- [14] 姚谏, 滕锦光. 冷弯薄壁卷边槽钢弹性畸变屈曲分析中的转动约束刚度[J]. 工程力学, 2008, 25(4): 65—69.
- Yao Jian, Teng Jinguang. Web rotational restraint in elastic distortional buckling of cold-formed lipped channel sections [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(4): 65—69. (in Chinese)
- [15] 姚谏, 程婕, 刑丽. 冷弯薄壁卷边槽钢梁的弹性畸变屈曲荷载简化计算公式[J]. 工程力学, 2011, 28(10): 21—26.
- Yao Jian, Cheng Jie, Xing Li. Simple formulae for distortional buckling loads of cold-formed lipped channels subjected to major axis bending [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(10): 21—26. (in Chinese)
- [16] 罗洪光, 郭耀杰, 马石城. 斜卷边冷弯薄壁槽钢轴压柱弹性畸变屈曲计算[J]. 工程力学, 2012, 29(4): 72—77.
- Luo Hongguang, Guo Yaojie, Ma Shicheng. Calculation of the elastic distortional buckling for cold-formed thin-walled channel columns with inclined simple edge stiffeners under axial pressure [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(4): 72—77. (in Chinese)
- [17] 周绪红, 王世纪. 薄壁构件稳定理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 94—95.
- Zhou Xuhong, Wang Shiji. Stability and application of thin-walled members [M]. Beijing: Science Press, 2009: 94—95. (in Chinese)

(上接第 159 页)

- [15] Hajirasouliha I, Pilakoutas K, Moghaddam H. Topology optimization for the seismic design of truss-like structures [J]. Computers & Structures, 2011, 89(7/8): 702—711.
- [16] 叶继红, 江季松. 遗传算法在单层球壳动力响应优化中的应用[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(2): 414—419.
- Ye Jihong, Jiang Jisong. Application of genetic algorithm in dynamic response optimization of single layer dome [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2010, 40(2): 414—419. (in Chinese)
- [17] Agarwal J, Blockley D J, Woodman N J. Vulnerability of systems [J]. Civil Engineering and Environmental Systems, 2001, 18(2): 141—165.
- [18] Wu X, Blockley D I, Norman J Woodman. Vulnerability of structural systems part1: Rings and clusters [J]. Civil Engineering Systems, 1993, 10(4): 301—317.
- [19] Wu X, Blockley D I, Norman J Woodman. Vulnerability of structural systems part2: Failure scenarios [J]. Civil Engineering Systems, 1993, 10(4): 319—333.
- [20] Lu Z, Yu Y, Woodman N J, Blockley D I. A theory of structural vulnerability [J]. The Structural Engineer, 1999, 77(18): 17—24.
- [21] Agarwal J, Blockley D I, Woodman N J. Vulnerability of 3-dimensional trusses [J]. Structural Safety, 2001, 23(3): 203—220.
- [22] Agarwal J, Blockley D J, Woodman N J. Vulnerability of structural systems [J]. Structural Safety, 2003, 25(3): 263—286.
- [23] Ye J H, Liu W Z, Pan R. Research on failure scenarios of domes based on form vulnerability [J]. Science in China (Series E: Technological Sciences), 2011, 54(11): 2834—2853.
- [24] Gen M, Cheng R. A survey of penalty techniques in genetic algorithms [C]// Proceedings of the 1996 International Conference on Evolutionary Computation. Nagoya University, Japan, IEEE, 1996: 804—809.
- [25] Goldberg D E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning [M]. New York: Addison Wesley, 1989: 12—43.
- [26] Kirkpatrick S, Gelatt C D, Vecchi M P. Optimization by simulated annealing [J]. Science, 1983, 220(4598): 671—680.
- [27] 王凌. 智能优化算法及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001: 22—46.
- Wang Ling. Intelligent optimization algorithms and applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001: 22—46. (in Chinese)
- [28] Srinivas M, Patnaik L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms [J]. IEEE Trans on SMC, 1994, 24(4): 656—667.
- [29] Jeong I K, Lee J J. Adaptive simulated annealing genetic algorithm for system identification [J]. Engineering Application of Artificial Intelligence, 1996, 9(5): 523—532.