

卷边角度对 C 型冷弯构件抗畸变屈曲性能的影响

孙国军¹, 赵银海^{2*}, 黄栩浩¹, 朱 珏^{1*}

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 浙江省二建钢结构有限公司, 浙江 宁波 315207)

摘要: 应用有限条程序研究斜卷边的角度对轴压和纯弯作用下 C 型截面冷弯钢构件的畸变屈曲临界应力的影响. 采用直接强度计算法分别得到各构件受畸变屈曲后的极限承载力, 并与直卷边构件的计算结果进行对比. 结果表明: 受轴压和纯弯作用下, 卷边与水平方向夹角在 $90^\circ \sim 120^\circ$ 之间时, 构件的畸变屈曲极限承载力有不同程度的提升, 在 105° 时构件的极限承载力提升最为明显. 结果可供 C 型冷弯薄壁斜卷边槽钢工程设计参考.

关键词: 斜卷边槽钢; 卷边角度; 直接强度法; 畸变屈曲; 极限承载力

中图分类号: TU392.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2015) 03-0068-06

钢构件的屈曲模式对其极限承载力有重要影响, 冷弯薄壁型钢构件的屈曲模式包括整体屈曲、局部屈曲和畸变屈曲(图 1)^[1]. 在已有的文献中, 国内外学者对整体屈曲(弯曲屈曲、侧扭屈曲、弯扭屈曲)、局部屈曲及局部与整体相关屈曲做了大量研究, 其研究成果已被写入了各国的冷弯型钢结构设计规范^[2-5]. 相对而言, 畸变屈曲的研究比较缺乏, 近年来随着冶金技术的发展, 冷成型钢构件朝着高强、薄壁、复杂截面形式的趋势发展, 局部稳定性有很大提高, 由于畸变屈曲已成为控制构件极限承载力的重要因素, 因此也成为了该领域新的研究焦点^[6].

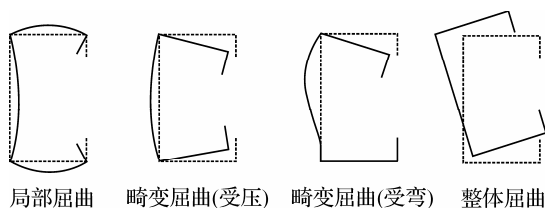


图 1 屈曲模式

在计算冷弯薄壁钢构件的极限承载力方法的选择中, 采用了已经纳入北美规范的直接强度法 (Direct Strength Method, DSM). 该方法适用范围广

且精度相对较高, 克服了有效宽度法的缺点, 无需计算截面中各板件的有效宽度及有效截面特性, 只需计算构件的全截面几何特性即可. 与此同时, 其在计算中对构件屈曲模式的考虑比较全面, 并且把局部屈曲的相关作用、构件的屈曲后强度以及将畸变屈曲模式作为独立的影响因素都考虑在其中.

研究表明, 卷边弯起角度 θ (图 2) 的变化不仅会改变斜卷边槽钢的截面几何特性, 还会改变构件卷边对翼缘提供的约束作用^[7]. 因此, 斜卷边槽钢构件发生畸变屈曲时的临界应力, 以及发生破坏时的极限承载力等特性都和直卷边槽钢构件(卷边和翼缘的夹角为直角)不同. 在北美冷弯型钢结构构件设计规范(NAS:2004)^[3]和澳大利亚冷弯型

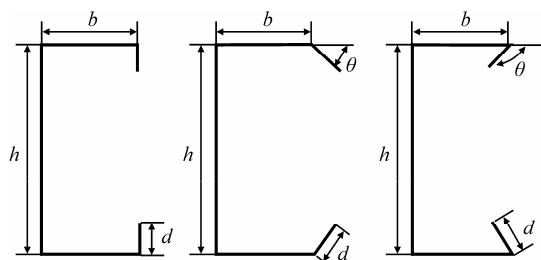


图 2 直卷边和斜卷边槽钢截面

收稿日期: 2014-07-03.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journallg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 第 47 批教育部留学回国人员科研启动基金; 浙江省自然科学基金 (LY13A020007); 宁波市自然科学基金 (2012A610162); 浙江省教育厅科研项目 (Y201121000); 宁波大学王宽诚幸福基金.

第一作者: 孙国军 (1989-), 男, 辽宁丹东人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 冷弯钢结构畸变屈曲机理. E-mail: 15888022572@163.com

*通信作者: 赵银海 (1975-), 男, 浙江诸暨人, 高级工程师, 主要研究方向: 钢结构的设计和施工. E-mail: 13777115411@139.com

朱珏 (1979-), 女, 浙江金华人, 副教授, 主要研究方向: 冷弯钢结构稳定性分析. E-mail: zhujue@nbu.edu.cn

钢结构构件设计规范(AS/NZS 4600:2005)^[4]中都提供了斜卷边槽钢的设计方法, 但其所参考的都是直卷边槽钢的试验结果。

国内学者张耀春等人^[8]近年来也对斜卷边冷弯薄壁钢构件的畸变屈曲做了相关研究, 以构件横截面各板件尺寸及卷边弯起角度为变量, 推导出了斜卷边槽形截面在卷边弯起不同角度的情况下截面几何特性的通用简化计算公式^[9]。在文献[10]中, 陈骥则选取轴心受压和纯弯两种构件, 研究了斜卷边对冷弯薄壁槽钢的截面畸变屈曲的影响, 并采用直接强度法对构件的稳定承载力进行了分析。

现有大部分对斜卷边冷弯薄壁钢构件的研究中^[11], 卷边与翼缘的夹角(后简称卷边角度)多数小于 90°, 取值比较固定而且特殊化, 例如 45°、60°、120°、135°等, 不能有效地说明改变卷边的角度对构件的稳定承载力的具体影响。笔者利用 CUFSM 有限条程序在轴压和纯弯两种模式下对 C 型截面斜卷边冷弯钢构件的畸变屈曲性能进行了研究, 采用直接强度法计算其相应角度的承载力, 并与相同尺寸直卷边钢构件的承载力进行对比分析。

1 斜卷边 C 型截面几何性质的计算方法

在对斜卷边 C 型截面冷弯薄壁钢构件畸变屈曲应力和整体屈曲应力的计算中, 需要用到相应的截面几何特性, 与常规的 C 型截面槽钢(卷边与翼缘夹角为 90°)不同, 卷边角度变化对截面的整体几何特性计算都会产生相应影响。

斜卷边槽钢截面特性计算简图如图 3 所示。图中, h 、 b 、 d 分别为腹板高度、翼缘宽度和卷边长

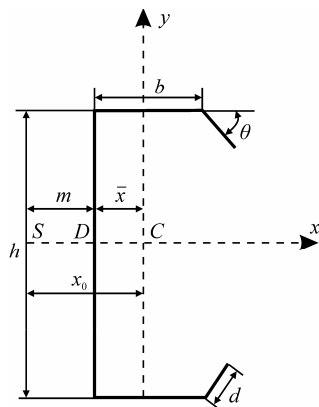


图3 斜卷边槽钢截面特性计算简图

度; t 为试样厚度; θ 为翼缘与卷边夹角; x 和 y 为截面的形心轴; 点 S 和点 C 分别为截面的形心和剪心; D 为腹板中点。文中出现的各试样尺寸, 例如 100-50-10-2.5, 其中的各数据所对应的物理意义分别为 h - b - d - t 。

直接强度法的计算过程中需要用到的截面几何特性——扭转惯性矩 I_t 、惯性矩 I_x 和 I_y 、扇形惯性矩 I_w 等, 可分别按照下面各式进行计算^[9]。

$$I_t = \frac{t^3}{3}(h + 2b + 2d), \quad (1)$$

$$I_x = \frac{t}{12}(h^3 + 6(b+d)h^2 + 2bt^2 - 12hd^2 \sin \theta + 8d^3 \sin^2 \theta), \quad (2)$$

$$I_y = \frac{ht^3}{12} + ht\bar{x}^2 + 2I_{y_0} + 2(b - x_0 - \bar{x})^2 \cdot (b+d)t, \quad (3)$$

$$I_w = t(b^3h^2 + d^3(2b \sin \theta + h \cos \theta)^2 + 3b^2h^2d + 3bhd^2(2b \sin \theta + h \cos \theta) + md^2(8bd \cdot \sin^2 \theta + 2hd \sin 2\theta - 3h^2 \cos \theta) - mbh^2 \cdot (3b + 6d)) / 6 + m^2(I_x - bt^3/6), \quad (4)$$

其中, 形心 C 到腹板中心点 D 的距离为:

$$\bar{x} = \frac{b^2 + 2bd + d^2 \cos \theta}{h + 2b + 2d},$$

$$x_0 = \frac{b^2 - d^2 \cos \theta}{2(b+d)},$$

$$I_{y_0} = t(b^4 + 4b^3d + 6b^2d^2 \cos \theta + (4b+d) \cdot d^3 \cos^2 \theta) / (12(b+d)),$$

剪心 S 与腹板中心点 D 间的距离 m 为:

$$m = t(3h^2(b^2 + 2bd + d^2 \cos \theta) - 2d^3(h \sin 2\theta + 4b \sin^2 \theta)) / (12I_x).$$

斜卷边 C 型冷弯薄壁钢构件的截面几何特性还可由 Ben Schafer 编写的有限条程序(CUFSM)

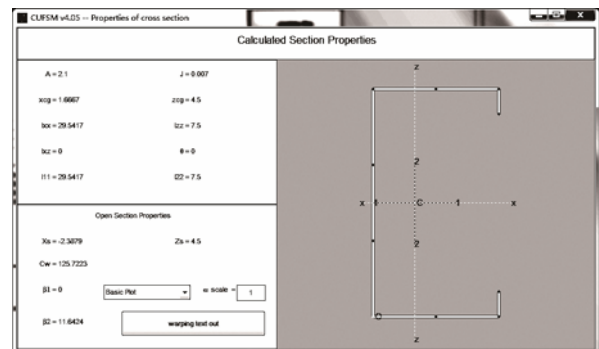


图4 有限条程序(CUFSM)中得出的截面几何特性

得出(图4)。

将C型截面钢构件各尺寸、卷边与翼缘夹角输入后即可,文中所采用的截面几何特性相关数据皆来自有限条程序计算结果。其中, A 为构件截面面积; J 为扭转惯性矩 I_t ; I_{xx} 和 I_{yy} 为惯性矩 I_x 和 I_y ; C_w 为扇形惯性矩 I_w 。

2 直接强度法

在计算冷弯薄壁钢构件的承载力方法的选用中,直接强度法克服了有效宽度法的缺点,但国内外学者对压杆畸变屈曲承载力计算方法以及畸变屈曲性能如何界定等问题还存在较大争议,国内外现存7种直接强度法及相关修正法^[12]。

文中采用的是Schafer对Cornell大学等研究机构的试验数据进行了总结与回归分析后,于2003年提出的直接强度法,现已纳入北美冷弯型钢设计规范NAS2004中^[3]。该方法考虑了畸变屈曲的屈曲后强度,又将畸变屈曲当作一种稳定极限状态,因此与试验结果较吻合。

在对轴心受压构件进行分析时,直接强度法考虑了构件局部与整体的相关屈曲,根据Schafer的研究结果^[13],忽略畸变屈曲与整体屈曲的相关影响,只需单独考虑畸变屈曲即可。

受压构件畸变屈曲极限承载力公式为:

当 $\lambda_d \leq 0.561$ 时,

$$P_d = P_y; \quad (5)$$

当 $\lambda_d > 0.561$ 时,

$$P_d = [1 - 0.25(P_{crd}/P_y)^{0.6}](P_{crd}/P_y)^{0.6} P_y, \quad (6)$$

其中, $\lambda_d = \sqrt{P_y/P_{crd}}$,为反映构件截面柔性程度的影响系数, $P_y = f_y A$, $P_{crd} = f_{crd} A$, A 为截面的横截面积, f_y 为构件的受压屈服强度, f_{crd} 为构件受压发生畸变屈曲时的临界应力,可通过有限条程序CUFSM计算得出。

受弯构件畸变屈曲同样忽略与整体屈曲的相关作用,只单独考虑畸变屈曲。

受弯构件畸变屈曲极限承载力公式为:

当 $\lambda_d \leq 0.673$ 时,

$$M_d = M_y; \quad (7)$$

当 $\lambda_d > 0.673$ 时,

$$M_d = (1 - 0.22(M_{crd}/M_y)^{0.5})(M_{crd}/M_y)^{0.5} M_y, \quad (8)$$

其中, $\lambda_d = \sqrt{M_y/M_{crd}}$,反映构件截面柔性程度的

影响系数; $w_x = 2I_x/h$,为毛截面抵抗矩; $M_y = f_y w_x$, $M_{crd} = w_x \sigma_{crd}$, f_y 为构件的受弯屈服强度, σ_{crd} 为构件受弯发生畸变屈曲时的临界应力,可通过有限条程序CUFSM计算得出。

为方便计算,(5)~(8)式中的 P_{crd}/P_y 和 M_{crd}/M_y 的值皆可从有限条程序(CUFSM)的分析图像中读取载荷系数,受压时载荷系数为 P_{crd}/P_y ;受弯时载荷系数为 M_{crd}/M_y 。

3 斜卷边槽钢畸变屈曲极限承载力结果分析

3.1 分析过程及DSM结果

目前,在国内有关斜卷边C型冷弯薄壁型钢构件的研究中,卷边与翼缘的夹角部分多数小于90°,虽然部分角度标定为30°~150°,但实际所取角度偏向于固定而且特殊化,不能有效说明改变卷边的角度对构件的畸变屈曲极限承载力的具体影响。笔者文针对不同尺寸的试样在30°~150°之间分别作出了具体分析,并指出了改变卷边角度对构件极限承载力的具体影响以及最佳角度。

文中所用试样尺寸均参考自浙江精工科技股份有限公司和英国Albion Sections实际投产的C型冷弯薄壁钢构件尺寸,并且所选尺寸受压和受弯时均以畸变屈曲为主。

由(6)~(9)式可以看出,在计算构件发生畸变屈曲极限承载力时,载荷系数即 P_{crd}/P_y (M_{crd}/M_y ,受弯)的值对结果有决定性影响,由图5受压时卷边角度与载荷系数的值相关变化曲线可知,极限承载力大小随卷边角度的增大先提升后下降。

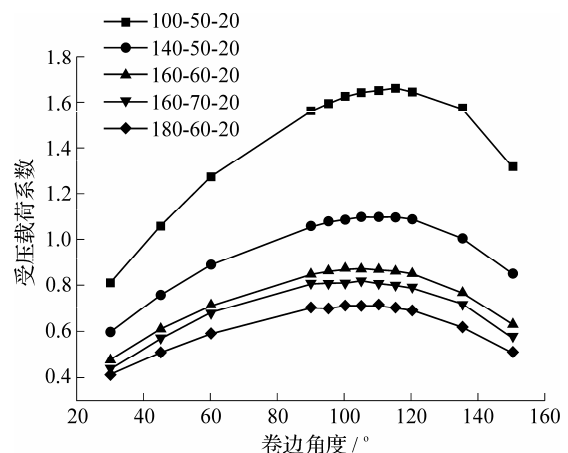


图5 受压时构件卷边角度—载荷系数变化曲线

受弯时载荷系数变化规律与构件受压时相似,

由图 6 可见, 峰值主要范围集中于 90°~120°之间. 因此为方便提取曲线的峰值, 以及计算构件发生畸变屈曲时极限承载力的最大值所对应角度, 以下分析过程皆集中于卷边角度 90°~120°范围内.

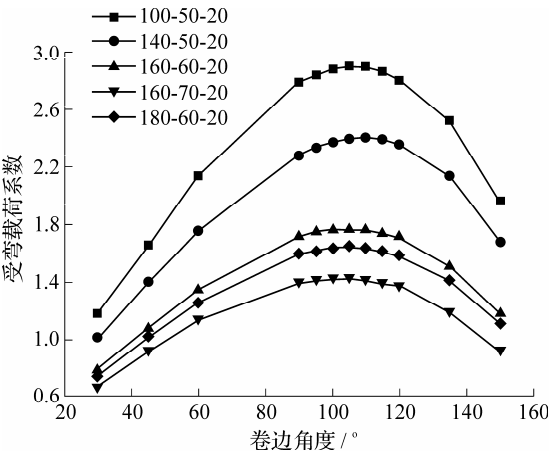


图 6 受弯时构件卷边角度—载荷系数变化曲线

笔者利用直接强度法计算了以下各尺寸构件的极限承载力, 并与正常生产用构件(即卷边与翼缘角度为 90°的构件)进行对比分析. 为近似确定构件最大极限承载力所对应的角度, 在卷边角度 90°~120°区间范围内, 每间隔 5°对构件极限承载力进行计算分析, 并列出与正常槽钢极限承载力的差值. 轴压和纯弯构件极限承载力计算结果分别见表 1 和表 2.

3.2 结果分析

由表 1 可见, 轴压时由 DSM 计算的斜卷边构件极限承载力峰值与正常构件(即卷边角度为 90°构件)相比, 皆有不同程度的提升, 且峰值多集中于 100°~105°、95°~105°、100°~110°范围内, 极限

承载力与卷边角度的变化和 Load Factor 与卷边角度的变化基本一致.

为方便看出受压构件极限承载力随卷边角度的变化情况, 略去部分无明显变化及极限承载力数值较大的计算数据. 由图 6 的受压构件极限承载力与卷边角度变化曲线图可看出, 在 90°~120°之间, 受压时构件极限承载力随卷边角度的增大先升高后下降.

综合表 1 中数据以及受压构件极限承载力与卷边角度变化曲线(图 7)结果, 可取卷边与翼缘角度为 105°时为卷边弯起的最佳角度, 与正常构件相比, 差值分别为 361, 0, 1 038, 578, 1 551, 1 738, 976, 1 051 N, 小部分构件极限承载力无明显影响, 大部分极限承载力皆有明显提升, 所计算试样中最大可提升 1 738 N 约 1.069%的极限承载力.

由表 2 可见, 受弯时由 DSM 计算的斜卷边构

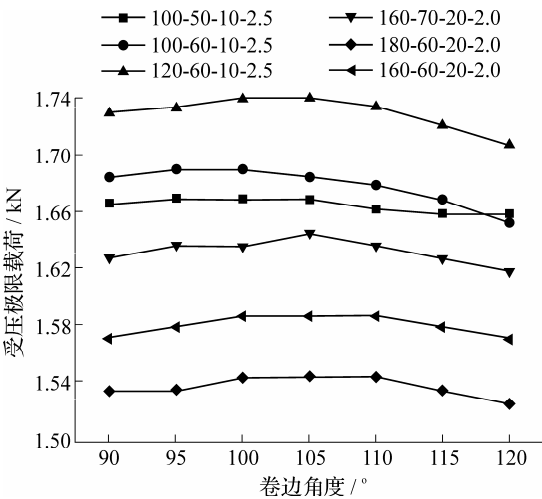


图 7 受压构件极限承载力—卷边角度变化曲线

表 1 轴压斜卷边槽钢畸变屈曲极限承载力

尺寸 (h-b-d-t)/mm	卷边角度及相应畸变屈曲极限承载力/kN							最大差 值/kN	105°差 值/kN
	90°	95°	100°	105°	110°	115°	120°		
100-50-10-2.5	166.515	166.876	166.876	166.876	166.151	165.783	165.783	0.361	0.361
100-60-10-2.5	168.416	168.936	168.936	168.416	167.890	166.829	165.185	0.520	0.000
120-60-10-2.5	172.916	173.264	173.954	173.954	173.301	171.976	170.625	1.038	1.038
120-80-15-2.5	199.265	200.116	200.116	199.843	198.405	197.536	197.536	0.851	0.578
160-60-20-2.0	157.111	157.891	158.662	158.662	158.662	157.891	157.111	1.551	1.551
160-70-20-2.0	162.654	163.528	163.528	164.392	163.528	162.654	161.770	1.738	1.738
180-60-20-2.0	153.366	153.366	154.342	154.342	154.342	153.366	152.378	0.976	0.976
180-70-20-2.5	225.255	226.306	226.306	226.306	226.306	225.255	223.119	1.051	1.051

表2 纯弯斜卷边槽钢畸变屈曲极限承载力

尺寸 ($h-b-d-t$)/mm	卷边角度及相应畸变屈曲极限承载力/kN							最大差 值/Nm	105°差 值/Nm
	90°	95°	100°	105°	110°	115°	120°		
100-50-10-2.5	6 545.00	6 545.57	6 547.31	6 550.18	6 548.18	6 546.31	6 543.53	5.180	5.180
100-60-10-2.5	6 799.63	6 800.16	6 801.75	6 799.63	6 755.96	6 720.55	6 671.33	2.120	0.000
120-60-10-2.5	8 349.33	8 359.86	8 361.46	8 356.93	8 350.62	8 267.48	8 200.46	12.130	7.600
120-80-15-2.5	10 005.9	10 006.9	10 010.1	10 009.7	9 965.04	9 874.70	9 886.09	4.200	3.820
160-60-20-2.0	11 433.3	11 435.1	11 440.4	11 449.3	11 442.6	11 437.4	11 435.7	16.000	16.000
160-70-20-2.0	10 986.9	11 038.9	11 068.6	11 076.4	11 062.3	10 999.9	10 912.1	89.500	89.500
180-60-20-2.0	12 179.6	12 227.7	12 278.5	12 309.5	12 298.4	12 267.3	12 215.0	129.900	129.900
180-70-20-2.5	18 251.9	18 254.1	18 260.9	18 272.2	18 288.3	18 269.2	18 263.7	36.400	20.300

件极限承载力峰值与正常构件相比,其变化规律和受压时构件极限承载力的变化规律相似。而极限承载力方面皆有不同程度的提升,且与卷边角度的变化和载荷系数与卷边角度的变化基本一致,在 90°~120°之间,受压时构件极限承载力随卷边角度的增大先升高后下降。

由于受弯时不同尺寸构件极限承载力的计算结果数值相差较大,因此在同一坐标轴中无法判断其变化规律,故只取其中数值变化范围相似且变化明显的几组数据作图比较(图 8)。

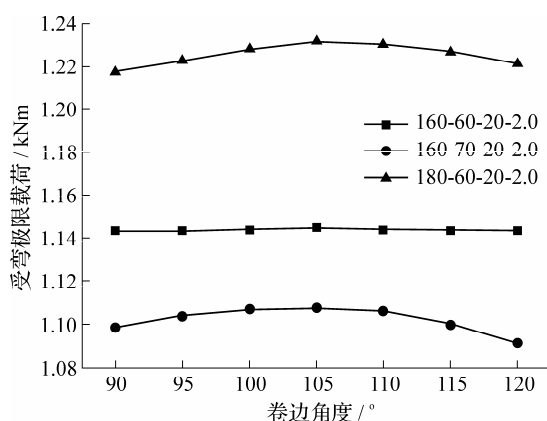


图8 受弯构件极限承载力—卷边角度变化曲线

综合表 2 中数据以及受弯构件极限承载力与卷边角度变化曲线(图 8)可以看出:不同尺寸构件极限承载力峰值所对应的角度集中于 100°~110°之间,对比其极限承载力的变化仍可取卷边与翼缘角度为 105°时为卷边弯起的最佳角度;与正常构件相比,差值从 0~129.9 Nm 不等,小部分构件极限承载力无明显影响,大部分极限承载力皆有明

显提升,所计算试样中最大可提升 129.9 Nm,约为 1.067%的极限承载力。

4 结论

(1)介绍了轴压与纯弯载荷下斜卷边冷弯薄壁型钢构件的计算方法:运用有限条程序(CUFSM)或解析计算公式计算斜卷边 C 型截面冷弯钢构件的截面几何特性,采用 Schafer 提出的直接强度法计算斜卷边 C 型槽钢发生畸变屈曲时的极限承载力,计算及分析过程中忽略畸变屈曲与整体屈曲的相关影响,单独考虑畸变屈曲。

(2)斜卷边冷弯薄壁型钢构件在轴压作用下发生畸变屈曲时:在卷边角度 90°~120°范围内,构件的极限承载力随卷边的角度增大先上升后下降;可取卷边与翼缘角度为 105°时为卷边弯起的最佳角度,小部分构件极限承载力无明显影响,大部分极限承载力皆有明显提升。在纯弯发生弹性畸变屈曲时承载力与卷边角度的变化规律与轴压时相同。

(3)为有效提高斜卷边冷弯薄壁型钢构件的整体抗性能即抗轴压和纯弯的极限承载力,建议卷边的设计角度为 105°。

参考文献:

- [1] Zeinoddini V M, Schafer B W. Simulation of geometric imperfections in cold-formed steel members using spectral representation approach[J]. Thin-walled Structures, 2012, 60:105-117.
- [2] European committee for standardization, design of steel

- structures, Part 1.3: General rules-supplementary rules for cold-formed thin gauge members and sheeting[S].
- [3] American iron and steel institute, Canadian standard association, NAS:2004, North American specification for the design of cold-formed steel structural members[S].
- [4] Sydney Wellington, standards of Australian and standards of New Zealand, AS/NZS:4600[S].
- [5] GB50018-2002, 冷弯薄壁型钢结构技术规范[S].
- [6] Schafer B W. Review: The direct strength method of cold-formed steel member design[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64:766-778.
- [7] 王春刚, 张耀春, 张壮南. 冷弯薄壁斜卷边槽钢受压构件的极限承载力试验研究[J]. 建筑结构学报. 2006, 27(3):1-9.
- [8] 王海明, 张耀春. 直卷边和斜卷边受弯构件畸变屈曲性能研究[J]. 工业建筑, 2008, 38(6):106-109.
- [9] 王春刚, 张耀春. 直接强度法计算冷弯薄壁斜卷边槽钢轴压柱的极限承载力[J]. 工业建筑, 2006, 36(1):71-74.
- [10] 陈骥. 冷弯薄壁槽钢斜卷边对截面畸变屈曲的影响和构件的稳定极限承载力[C]//国钢协结构稳定与疲劳分会 2004 年学术交流会论文集, 钢结构: 增刊, 2004:76-87.
- [11] 吴金秋, 童根树. 不同斜卷边檩条的局部屈曲和畸变屈曲[J]. 钢结构, 2006, 21(5):70-73.
- [12] 胡国萍, 宁涛, 史美晨, 等. 薄壁冷成型钢压杆畸变屈曲极限承载力计算方法归纳与分析[C]. 全国钢结构学术年会论文集, 2011:112-115.
- [13] Schafer B W. Local, distortional and Euler buckling of thin-walled columns[J]. Journal Structure Engineering, 2002, 128(3):289-299.
- [14] Albion Sections Limited. Manufactures of cold rolled section[EB/OL]. [2014-01-12]. <http://www.albionsections.co.uk/>.

Influence of Angle of Lip on Performance against Distortional Buckling of C-section Cold-formed Members

SUN Guo-jun¹, ZHAO Yin-hai^{2*}, HUANG Xu-hao¹, ZHU Jue^{1*}

(1.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.ZheJiang Er Jian Steel Structure Co., Ltd., Ningbo 315207, China)

Abstract: The influence of angle of lip on the critical stresses of distortional buckling of cold-formed C-section flexural members and compression members is studied using Finite Strip. Using the Direct Strength Method, the ultimate load capacities of the distortional buckling members are obtained, and the results are compared with the results calculated from the upright lipped members. It shows that the ultimate capacities are improved to varying extents for the angle of lip ranging from 90° to 120°, and both anti compressive and flexural capacities are obviously increased at the angle of 105°. The findings may be rendered as a reference in engineering design of the C-section cold-formed lipped steel members.

Key words: inclined lipped channel steel; angle of lip; direct strength method; distortional buckling; ultimate bearing capacity

(责任编辑 章践立)