

文章编号: 1000-4750(2013)Suppl-0068-04

# 翼缘加劲的冷弯薄壁型钢受弯构件 弹性屈曲应力研究

于欣永, 王春刚, 贾连光, 马 平

(沈阳建筑大学土木工程学院, 沈阳 110168)

**摘 要:** 利用有限条软件 CUFSM 对普通卷边槽钢和在受压翼缘不同位置设置加劲肋的普通卷边槽钢受弯构件进行了弹性屈曲应力的计算。对计算结果进行比较分析后发现: 在受压翼缘的不同位置增设加劲肋对普通卷边槽钢受弯构件弹性局部屈曲应力平均提高了 53.15%, 而弹性畸变屈曲应力平均提高了 7.39%, 其中偏向卷边一侧设置加劲肋对构件弹性畸变屈曲应力的提高效果不明显。总体而言, 在受压翼缘中间设置加劲肋对提高构件的稳定性能效果最好。

**关键词:** 翼缘; 加劲肋; 受弯构件; 弹性屈曲应力; 有限条

中图分类号: TU392.1 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.06.S062

## STUDY ON THE ELASTIC BUCKLING STRESS OF COLD-FORMED STEEL FLEXURAL MEMBERS WITH STIFFENERS IN THE FLANGE

YU Xin-yong, WANG Chun-gang, JIA Lian-guang, MA Ping

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

**Abstract:** The finite strip program of CUFSM was used to calculate the elastic buckling stress of channel flexural members with ordinary edge stiffeners and channel flexural members with stiffeners in the compression flange. It is found that adding stiffening ribs in different positions of the compression flange will make the average of elastic local buckling stress of channels with ordinary edge stiffeners increase 53.09%, and make the average of elastic distortional buckling stress increase 7.39%. But the elastic distortional buckling stress of the flexural members increased little when the stiffening ribs in the flange near the edge stiffeners. Overall, adding stiffening ribs in the middle of the compression flange is the best plan to increase the stability behavior of the flexural members.

**Key words:** flange; stiffening rib; flexural member; the elastic buckling stress; finite strip

冷弯型钢是以热轧或冷轧带钢为原料, 在常温下, 通常采用辊弯成型或冷拔成型的方法得到的各种断面形状的高效型材<sup>[1-2]</sup>。我国习惯上把壁厚不超过 6mm 的冷弯型钢称为冷弯薄壁型钢<sup>[3]</sup>。由于其具有优越的强度自重比, 在荷载相对较轻的低层轻钢建筑结构中应用非常广泛<sup>[4]</sup>。

冷弯薄壁型钢大多为开口单轴对称截面, 其中以普通卷边槽钢最为常见。这类构件的壁厚较薄, 板件宽厚比通常较大, 使得稳定承载力在构件的破坏过程中起控制作用。冷弯薄壁型钢受弯构件有 3 种可能的失稳模式: 局部屈曲、畸变屈曲和整体弯扭屈曲<sup>[5]</sup>。通过在板件上多次弯折形成加劲的方法,

收稿日期: 2012-06-19; 修改日期: 2013-02-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51008200); 辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目(LJQ2011059); 沈阳市科技计划项目(F12-277-1-31)

通讯作者: 王春刚(1978—), 男, 辽宁人, 副教授, 博士, 从事钢结构研究(E-mail: wangcgln@163.com).

作者简介: 于欣永(1985—), 男, 辽宁人, 硕士生, 从事钢结构研究(E-mail: yxy\_syjz@163.com);

贾连光(1961—), 男, 辽宁人, 教授, 硕士, 院长, 从事钢结构研究(E-mail: syjlg@163.com);

马 平(1988—), 男, 辽宁人, 硕士生, 从事钢结构研究(E-mail: kobebyrant871123@163.com).

能够有效地减小板件的宽厚比,从而提高其承载力和钢材的利用率,经济效益显著。但构件截面形式的复杂化也导致其失稳模式和屈曲临界应力更加具有不确定性,因此有必要针对构件加劲的不同位置和形式等参数开展深入研究,进一步明确其弹性稳定性能。

目前,对冷弯薄壁型钢构件弹性屈曲临界应力的求解方法大致分为3类:第1类是方便用于手算的近似解析法。各国学者在理论研究工作的基础上分别建立了不同的弹性屈曲临界应力计算表达式<sup>[6-7]</sup>,这类简化计算方法的优点是便于工程应用,但精度一般;第2类是近年来在屈曲研究领域中兴起的广义梁理论(Generalized Beam Theory, GBT)法<sup>[8]</sup>。它以模态的方式展示截面变形情况,并具有独特的模态组合方式,这使得它比其他分析方法更容易得到问题的解析解,对于分析不同屈曲模式之间的相互作用问题更加方便。该方法的优点是计算结果较精确,缺点是计算过程非常繁琐,不便于实际应用;第3类是数值法。该类方法是目前求解各类弹性屈曲问题最有效的方法,其中以有限条法最为常用。有限条法非常适合用于棱柱形板壳结构,它的半解析性使得与有限元方法相比可以减小计算量,同时又保留了有限元方法的基本优点<sup>[9]</sup>。有限条法在条长方向上可以自动适应屈曲半波长的变化,特别适用于分析屈曲问题,但有限条法只适用于边界条件为简支的等截面构件,且对处理弹塑性问题仍有一定的困难。

国内外学者现已开发了多种可供薄壁构件弹性屈曲分析的有限条软件,如 Schafer 等人开发的 CUFSM 和悉尼大学 Hancock 等人开发的 THIN-WALL<sup>[10]</sup>。本文采用有限条数值分析软件 CUFSM 对普通卷边槽钢和在受压翼缘不同位置设置加劲肋的普通卷边槽钢受弯构件开展弹性局部屈曲应力和弹性畸变屈曲应力问题的对比分析,暂不考虑整体弯扭屈曲。

## 1 试件截面设计与参数选取

由于冷弯薄壁型钢构件在纯弯状态下截面上的应力呈梯度分布,一侧翼缘受拉,另一侧翼缘受压,因此在受压翼缘增设加劲肋能有效提高构件的稳定性。以下分别在受压翼缘中间、偏腹板和偏卷边3种位置增设加劲肋后进行弹性屈曲应力的计算,并与相同条件下的普通卷边槽钢进行对比。

图1为本文所研究试件的截面形式及几何尺寸。钢材的材料性能按文献<sup>[11]</sup>选取,其中屈服强度( $f_y$ )均为351.4MPa,弹性模量( $E$ )取为202754MPa,剪切模量( $G$ )取为78587MPa,泊松比( $\nu$ )取为0.29。截面的腹板高  $H=200\text{mm}$ ,翼缘宽度  $B=80\text{mm}$ ,卷边长度  $a=40\text{mm}$ ,受压翼缘加劲弯折端点至卷边与翼缘外廓交点尺寸用  $b$  表示。本文中  $b$  选取了10mm、30mm和50mm这3种长度,将普通卷边槽钢视为  $b=0$  的情况。板件厚度  $t$  分别选取0.8mm和1mm。

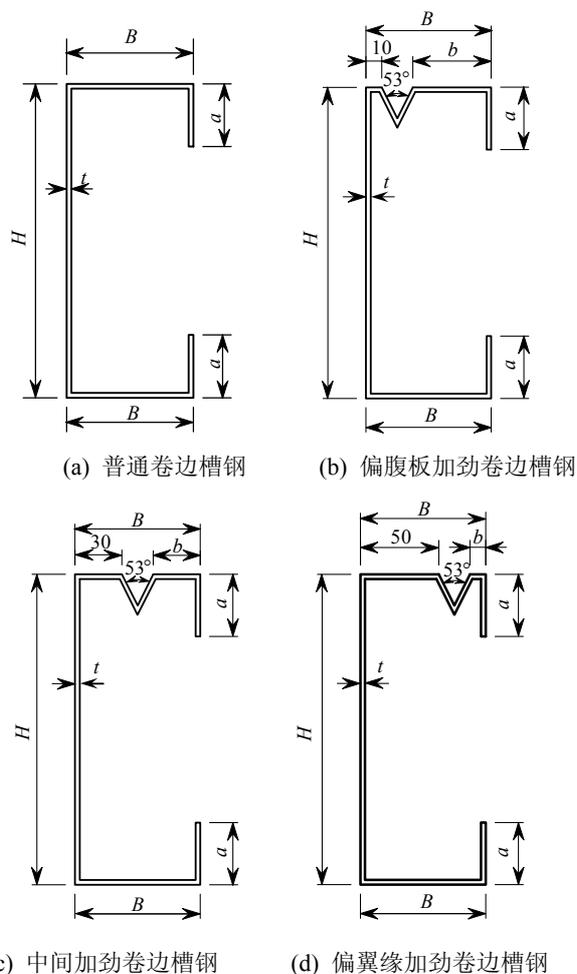


图1 截面形式和几何参数

Fig.1 Cross section and geometric symbols

图2为构件编号的定义方式。将在受压翼缘不同位置设置加劲肋用字母L、M、R表示,分别对应图1(b)~图1(d)。

## 2 有限条计算及结果分析

以下试件均采用有限条软件 CUFSM 进行计算。试件两端的边界条件为简支,在端部施加弯矩作用。图3以U-t1试件为例,绘制了有限条程序 CUFSM 计算得到的弹性屈曲应力与失稳半波长度

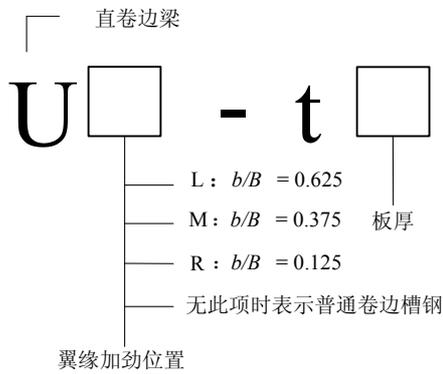


图2 构件编号规则

Fig.2 Specimen labeling rule

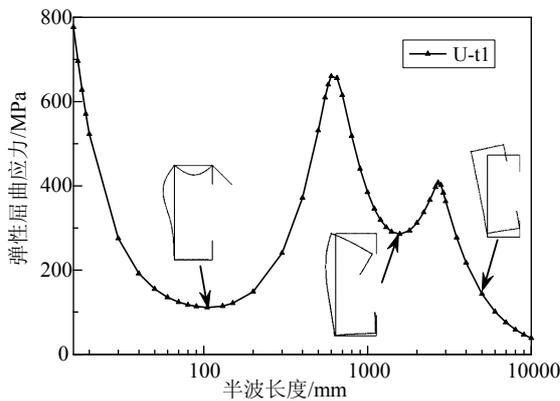


图3 有限条屈曲分析

Fig.3 Finite strip buckling analysis

关系曲线以及相应的失稳模式变形图。图3中左侧的失稳变形图为局部屈曲，取自弹性局部屈曲临界应力对应的变形；中间的失稳变形图为畸变屈曲，取自弹性畸变屈曲临界应力对应的变形；最右侧的失稳变形图为构件整体的弯扭屈曲变形。

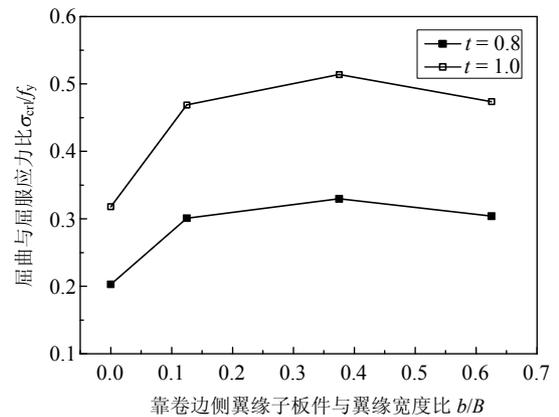
表1列出了用有限条程序CUFSM计算得到的8个试件的弹性局部屈曲应力和弹性畸变屈曲应力。由于在受压翼缘上增设了加劲肋，因此加劲后的构件在材料用量上较普通卷边槽钢构件增加了7.12%，但弹性局部屈曲应力有明显的提高。其中，翼缘加劲肋从偏腹板到偏卷边的3种截面的弹性局部屈曲应力分别平均提高了49.46%、62.13%和47.85%；而弹性畸变屈曲应力较局部屈曲应力的提高效果并不明显，三者分别平均提高仅10.16%、10.75%和0.65%。

将弹性局部屈曲应力、弹性畸变屈曲应力分别与材料屈服点之比作为纵坐标，以受压翼缘加劲边缘距离卷边与翼缘交点尺寸 $b$ 与翼缘宽度 $B$ 之比作为横坐标，绘制了两者之间关系的散点图(见图4)，以方便比较不同加劲位置对弹性屈曲应力的影响。

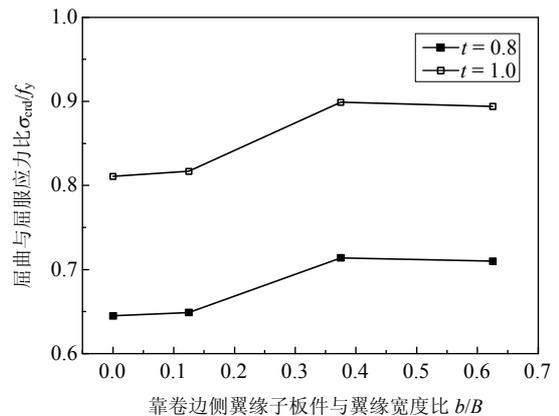
表1 构件弹性屈曲应力计算结果

Table 1 Buckling stress calculation results of members

构件编号	弹性局部屈曲应力 $\sigma_{cr1}/\text{MPa}$	弹性畸变屈曲应力 $\sigma_{crd}/\text{MPa}$
U-t0.8	71.44	226.69
UL-t0.8	106.84	249.63
UM-t0.8	115.99	250.92
UR-t0.8	105.69	227.96
U-t1	111.61	285.06
UL-t1	166.71	314.11
UM-t1	180.69	315.88
UR-t1	164.92	287.18



(a) 弹性局部屈曲应力分析曲线



(b) 弹性畸变屈曲应力分析曲线

图4 弹性屈曲应力分析曲线

Fig.4 Elastic buckling stress analysis curves

从图4可以看出，相对于普通卷边槽钢构件而言，在受压翼缘中间增设加劲肋对弹性局部屈曲应力和弹性畸变屈曲应力的提高幅度最大；在受压翼缘偏向卷边一侧增设加劲肋对弹性局部屈曲应力和弹性畸变屈曲应力的提高幅度最小，尤其是对弹性畸变屈曲应力的提高可以忽略不计。总体而言，在不改变截面外廓尺寸的情况下，翼缘加劲肋的设置对弹性局部屈曲应力的提高作用最为明显。这主要是因为弹性局部屈曲应力的大小主要取决于板

件宽厚比, 而加劲肋的设置能够有效地减小板件宽厚比, 从而大幅度提高弹性局部屈曲应力。

为了更直观地比较加劲肋的设置对弹性局部屈曲应力、弹性畸变屈曲应力提高程度的影响, 将有限条软件计算所得各构件的弹性屈曲应力除以相同条件下普通卷边槽钢的弹性屈曲应力, 所得结果以百分比的形式列于表 2。

表 2 弹性屈曲应力提高幅度

Table 2 Heighten extent of elastic buckling stress

构件编号	弹性局部屈曲应力 提高幅度/(%)	弹性畸变屈曲应力 提高幅度/(%)
UL-t0.8	49.55	10.12
UM-t0.8	62.36	10.69
UR-t0.8	47.94	0.56
UL-t1	49.37	10.19
UM-t1	61.89	10.81
UR-t1	47.76	0.74

由表 2 的数据可以看出, 对于弹性局部屈曲应力而言, 若板件的宽厚比越大, 则设置加劲肋后的屈曲应力提高幅度也越大; 而对于弹性畸变屈曲应力而言, 则是宽厚比较小的板件在设置加劲肋后的屈曲应力提高幅度更大。

### 3 结论

本文利用有限条软件计算了普通卷边槽钢和在其受压翼缘不同位置增设加劲肋的 3 种构件的弹性屈曲应力, 并进行了对比分析。所得结论如下:

(1) 在受压翼缘增设加劲肋后, 构件的弹性局部屈曲应力有很大提高, 平均提高幅度达到 53.15%; 而对弹性畸变屈曲应力的提高作用并不明显。其中偏卷边增设加劲肋的构件弹性畸变屈曲应力基本与不设加劲肋时相当, 另两种构件的弹性畸变屈曲应力平均提高幅度也仅为 10.46%。

(2) 总体而言, 在受压翼缘中部设置加劲肋对构件的弹性屈曲应力提高效果最好; 其次是在偏腹板一侧设置加劲肋; 而在偏卷边一侧设置加劲肋只对构件的弹性局部屈曲应力有较明显的提高作用, 对弹性畸变屈曲应力影响很小。由于设置加劲肋后, 构件的弹性局部屈曲应力提高显著, 因此这类构件在破坏时发生畸变屈曲的可能性大大增加。这一点应当在设计中予以足够的重视。

(3) 对于弹性局部屈曲应力而言, 若板件的宽

厚比越大, 则设置加劲肋后的弹性局部屈曲应力提高幅度也越大; 而对于弹性畸变屈曲应力而言, 则是宽厚比较小的板件在设置加劲肋后的弹性畸变屈曲应力提高幅度更大。

### 参考文献:

- [1] Yu W W. Cold-formed steel design [M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 2000: 1—5.
- [2] Hancock G J. Cold-formed steel structures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2003, 59(4): 473—487.
- [3] 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 structure [S]. Beijing: China Plan Press, 2002. (in Chinese)
- [4] 丁成章. 低层轻钢骨架住宅设计——工程计算[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 1—5.  
Ding Chengzhang. Lower light gauge steel framing house design, engineering calculate book [M]. Beijing: China Machine Press, 2003: 1—5. (in Chinese)
- [5] 陈绍蕃. 钢结构稳定设计指南[M]. 第 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 209—217.  
Chen Shaofan. Guide to stability design of steel structures [M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004: 209—217. (in Chinese)
- [6] Hancock G J. Design for distortional buckling of flexural members [J]. Thin-Walled Structures, 1997, 27(1): 3—12.
- [7] Schafer B W, Peköz T. Lateral braced cold-formed steel flexural members with edge stiffened flanges [J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(2): 118—127.
- [8] Dinis P B, Camotim D, Silvestre N. GBT formulation to analyse the buckling behaviour of thin-walled members with arbitrarily branched open cross-sections [J]. Thin-Walled Structures, 2006, 44(1): 20—38.
- [9] Graves S T, Sridharan S. A finite strip method for the buckling of plate structure under arbitrary loading [J]. International Journal of Mechanical Science, 1978, 20(1): 685—693.
- [10] Hancock G J, Murray T M, Ellifritt D S. Cold-formed steel structures to the AISI specification [M]. New York: Marcel Dekker, Incorporated, 2001: 348—422.
- [11] 王海明. 冷弯薄壁型钢受弯构件稳定性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.  
Wang Haiming. Study on the stability behavior of cold-formed steel flexural members [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)