

# 斜卷边槽钢偏心受压构件的稳定性分析

张壮南<sup>1,2</sup>, 张耀春<sup>1</sup>, 王春刚<sup>1,2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090, zhuangnanzh@163.com; 2. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 沈阳 110168)

**摘要:** 为进一步推动斜卷边槽钢在实际工程中的应用, 明确其与直角卷边槽钢的区别, 采用 ANSYS 非线性有限元程序, 对共计 70 个算例的斜卷边槽钢在对称轴平面内偏心受压状态下的构件稳定性能进行分析. 研究 7 种卷边弯起角度、10 种偏心距对斜卷边槽钢偏心受压构件稳定承载力、失稳模式及变形等性能的影响. 结果表明: 偏心距对构件的承载力和失稳模式影响显著, 所有构件均不是在偏心距为零时获得承载力的最大值. 相同负向偏心距下, 随卷边弯起角度的增大构件承载力逐渐降低; 当卷边弯起角度达钝角后, 各构件之间承载力相差较小, 基本不再受弯起角度的影响. 在正向偏心荷载作用下, 越早出现畸变屈曲的构件承载力越低.

**关键词:** 斜卷边槽钢; 偏压构件; 稳定性能; 整体弯曲变形; 有限元分析

**中图分类号:** TU392.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0367-6234(2010)12-1866-04

## Stability behavior of channels with inclined simple edge stiffeners under eccentric compression loading

ZHANG Zhuang-nan<sup>1,2</sup>, ZHANG Yao-chun<sup>1</sup>, WANG Chun-gang<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, zhuangnanzh@163.com;  
2. Civil Engineering College, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

**Abstract:** In order to promote the engineering application of the channels with inclined simple edge stiffeners and definite the difference between it and lipped channels, a total of 70 examples with seven stiffener inclined angles and ten different eccentricities under eccentric compression loading acted in the plane of axis of symmetry were selected to be studied by nonlinear finite element analysis using program ANSYS. Effects of the above parameters on stability capacity, buckling modes and deflection behavior of channels with inclined simple edge stiffeners under eccentric compression loading were investigated. The result shows that the stability capacity and buckling modes are notably affected by eccentricity. No member got the maximum carrying capacity at zero-eccentricity. At the same negative eccentricity, the carrying capacity of member gradually reduced with the stiffener inclined angles increasing, but little differences among the carrying capacities could be observed when the stiffener inclined angle is an obtuse angle, which doesn't affect the carrying capacity anymore. The earlier distortional buckling occurred, the lower carrying capacity of member would be obtained under the positive eccentric compression loading.

**Key words:** channels with inclined simple edge stiffeners; members under eccentric compression loading; stability behavior; overall bending deflection; finite element analysis

目前,斜卷边槽钢(卷边与翼缘不呈直角)作

为钢货架柱的一种常见形式已经在实际结构中得到了比较广泛的应用<sup>[1]</sup>,但针对其稳定性能的研究开展得还很有限.北美冷弯型钢结构构件设计规范(NAS)<sup>[2]</sup>和澳大利亚冷弯型钢结构构件设计规范(AS/NZS)<sup>[3]</sup>将直角卷边槽钢的设计准则直接沿用到斜卷边槽钢的设计当中,并未充分考

收稿日期: 2009-05-07.

基金项目: 建设部研究开发项目(2008-k2-3);  
中国博士后科学基金面上资助项目(20080440132).

作者简介: 张壮南(1977—),女,博士,讲师;  
张耀春(1937—),男,教授,博士生导师.

考虑卷边弯起角度的变化对构件承载力和失稳模式等特性的影响. 文献[4]通过对比有限元分析与规范计算的结果指出上述两规范对斜卷边槽钢固支柱的设计都偏保守. 因此,有必要深入开展斜卷边槽钢受压构件稳定性能的研究,明确与直角卷边槽钢间的区别,使斜卷边槽钢在实际结构中发挥更为有效的作用. 以往关于斜卷边槽钢的试验研究及理论分析大多集中在轴压或纯弯构件上<sup>[4-8]</sup>,对压弯构件的研究报道还比较少见. 本文在文献[9]试验研究的基础上,利用 ANSYS 软件对斜卷边槽钢偏压构件的静力稳定性能进行了有针对性的非线性有限元分析. 通过变化卷边弯起角度( $\theta$ )和偏心距( $e$ )研究了对称轴平面内偏心受压的斜卷边槽钢稳定性能,重点讨论了卷边弯起角度、偏心距对斜卷边槽钢偏压构件的承载力、失稳模式及变形等特性的影响.

## 1 参数选取

截面的几何参数定义如图 1 所示. 分析中选取的截面翼缘外廓长度  $B = 80 \text{ mm}$ , 腹板外廓长度  $H = 160 \text{ mm}$ , 卷边外廓宽度  $D = 20 \text{ mm}$ , 试件长度  $L = 2 \text{ m}$ , 板厚  $t = 2.0 \text{ mm}$ , 取弯曲内径  $r = t$ . 共选取了 7 种卷边弯起角度( $\theta$  分别为  $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $135^\circ$  和  $150^\circ$ ) 和 10 种偏心距( $e$  分别为  $\pm 1$ ,  $\pm 2$ ,  $\pm 4$ ,  $\pm 8$ ,  $\pm 12 \text{ mm}$ ), 对试件进行了对称轴平面内偏心受压状态下的非线性有限元分析. 钢材的屈服强度取  $345 \text{ MPa}$ , 弹性模量取  $2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$ , 泊松比取  $0.3$ .

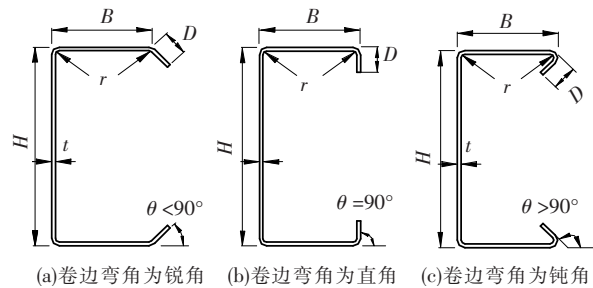


图 1 截面形式和几何参数定义

## 2 分析方法及过程

有限元分析对于研究冷弯薄壁构件的承载力、变形特性和各种复杂的破坏模式是非常有效的方法,但其正确性必须通过试验验证,文献[10]针对简支边界条件下斜卷边槽钢偏心受压构件的有限元分析方法进行了详细阐述,并对分析过程的有效性进行了验证. 结果表明,该分析方法能够较准确地对斜卷边槽钢偏压柱的稳定性能

进行模拟,可以用来开展参数分析研究.

本文的非线性屈曲分析采用与文献[10]一致的模型及加载方式,分析中同时考虑几何与材料非线性. 由于弯角处残余应力和材料屈服强度的提高对试件的受压承载力特性具有相反的作用,可近似认为相互抵消<sup>[11]</sup>,分析中忽略了弯角处残余应力和材料屈服点提高的影响. 薄壁构件的稳定性能表现出对几何初始缺陷的高度敏感,为了利用数值方法进行参数分析,构件的几何初始缺陷必须量化. 根据文献[9]对 36 根斜卷边槽钢试件的实测缺陷结果,本文在分析中取局部初始缺陷最大值为  $0.0025$  倍的腹板宽,整体缺陷最大值取构件计算长度的千分之一. 分析采用弧长法进行,以便获得荷载-位移曲线的下降段.

## 3 偏心受压构件结果分析

### 3.1 $e$ 、 $\theta$ 对承载力和失稳模式的影响

试件的编号规则如图 2 所示. 有限元分析所得构件的极限承载力( $P_u$ )和失稳模式列于表 1 中. 其中 L、D、F 和 FT 分别代表局部屈曲、畸变屈曲、整体弯曲屈曲和弯扭屈曲失稳模式.

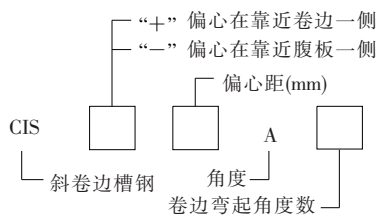


图 2 试件编号规则

图 3 绘出了卷边弯起角度不同的构件承载力随偏心距变化的曲线,并标明了不同偏心距下构件的失稳模式. 图 3(a)为卷边弯起角度小于等于直角的构件,图 3(b)为卷边弯起角度大于等于直角的构件. 从表 1 及图 3(a)可见:当  $e \leq -2 \text{ mm}$  时,所有构件均发生了局部与整体弯曲的相关屈曲模式,各构件随负向偏心距的增大承载力逐渐降低;在偏心距相等的条件下,卷边弯起角度越大的构件承载力越低. 这主要是卷边弯起角度越小的构件截面相对越开展,绕非对称轴的惯性矩越大,从而提高了构件绕非对称轴整体抗弯刚度的缘故. 当  $e = -1 \text{ mm}$  时,弯角为  $30^\circ$  构件的屈曲模式首先由局部与整体弯曲的相关屈曲转变为畸变与整体弯曲的相关屈曲模式. 此后,当偏心距增大到  $4 \text{ mm}$  时,弯角为  $45^\circ$  构件的屈曲模式也转变为 D + F. 偏心距继续增大到  $e \geq 8 \text{ mm}$  后,所有构件均发生了 D + F 的失稳模式. 畸变屈曲的出现,使得构件的极限承载力迅速下降,这导致构件在承

受相同的正向偏心荷载作用时,先出现畸变屈曲模式的构件承载力明显低于后出现畸变屈曲模式的构件承载力.从表 1 及图 3(b)可见:弯起角度为钝角的构件承载力随偏心距变化的规律与弯角为直角时基本一致.当  $e \leq 2$  mm 时,所有构件均发生 L + F 失稳;在  $e = 4$  mm 时,弯角为  $90^\circ$  和  $120^\circ$  的构件仍然发生 L + F 失稳,而弯角为  $135^\circ$  和  $150^\circ$  的构件则表现为局部与整体弯扭的相关

屈曲;当  $e \geq 8$  mm 后,所有构件均发生 D + F 失稳.比较同一偏心距下各构件的承载力可知,仅  $e = 12$  mm 时弯角为钝角的构件承载力高于弯角为直角构件的承载力,除此之外弯角为钝角与直角构件的承载力非常接近.可以认为,对斜卷边偏压构件,当卷边弯起角度大于直角时,构件的承载力特性基本上不再受卷边弯起角度的影响.

表 1 斜卷边槽钢偏心受压构件有限元分析结果

试件编号	失稳模式	$P_u/kN$	试件编号	失稳模式	$P_u/kN$
CIS + 01A30	D + F	91.429	CIS + 01A45	L + F	147.496
CIS + 02A30	D + F	87.677	CIS + 02A45	L + F	153.588
CIS + 04A30	D + F	81.538	CIS + 04A45	D + F	107.678
CIS + 08A30	D + F	72.616	CIS + 08A45	D + F	97.529
CIS + 12A30	D + F	64.537	CIS + 12A45	D + F	84.389
CIS - 01A30	D + F	99.560	CIS - 01A45	L + F	137.193
CIS - 02A30	L + F	134.077	CIS - 02A45	L + F	132.833
CIS - 04A30	L + F	126.500	CIS - 04A45	L + F	125.285
CIS - 08A30	L + F	114.497	CIS - 08A45	L + F	113.186
CIS - 12A30	L + F	105.104	CIS - 12A45	L + F	103.797
CIS + 01A60	L + F	146.084	CIS + 01A90	L + F	141.579
CIS + 02A60	L + F	152.527	CIS + 02A90	L + F	148.481
CIS + 04A60	L + F	169.757	CIS + 04A90	L + F	168.022
CIS + 08A60	D + F	104.653	CIS + 08A90	D + F	128.020
CIS + 12A60	D + F	93.364	CIS + 12A90	D + F	101.079
CIS - 01A60	L + F	135.529	CIS - 01A90	L + F	130.609
CIS - 02A60	L + F	131.089	CIS - 02A90	L + F	126.082
CIS - 04A60	L + F	123.430	CIS - 04A90	L + F	118.151
CIS - 08A60	L + F	111.185	CIS - 08A90	L + F	106.149
CIS - 12A60	L + F	101.863	CIS - 12A90	L + F	97.019
CIS + 01A120	L + F	141.312	CIS + 01A135	L + F	141.321
CIS + 02A120	L + F	148.503	CIS + 02A135	L + F	148.598
CIS + 04A120	L + F	169.255	CIS + 04A135	L + FT	170.033
CIS + 08A120	D + F	130.465	CIS + 08A135	D + F	131.002
CIS + 12A120	D + F	112.824	CIS + 12A135	D + F	113.161
CIS - 01A120	L + F	130.055	CIS - 01A135	L + F	129.911
CIS - 02A120	L + F	125.471	CIS - 02A135	L + F	125.283
CIS - 04A120	L + F	117.557	CIS - 04A135	L + F	117.323
CIS - 08A120	L + F	105.362	CIS - 08A135	L + F	105.038
CIS - 12A120	L + F	96.062	CIS - 12A135	L + F	95.792
CIS + 01A150	L + F	141.402	CIS - 01A150	L + F	129.897
CIS + 02A150	L + F	148.745	CIS - 02A150	L + F	125.214
CIS + 04A150	L + FT	170.478	CIS - 04A150	L + F	117.222
CIS + 08A150	D + F	130.182	CIS - 08A150	L + F	104.873
CIS + 12A150	D + F	113.542	CIS - 12A150	L + F	95.584

受截面有效形心偏移的影响<sup>[12-13]</sup>,所有斜卷边(包括直角卷边)槽钢构件均不是在  $e = 0$  时,而是在某一特定偏心距下获得承载力的最大值.卷边弯起角度为  $30^\circ$  的构件在略为负偏心的情况下获得最大的承载力,弯起角度为  $45^\circ$  的构件则在略为正偏心受荷时承载力最大.而弯起角度  $\theta \geq 60^\circ$  的槽钢构件最大承载力均发生在  $e = 4$  mm 附近,且其值也很接近.这主要是因为卷边弯起角

度较小时,卷边无法给翼缘提供足够的约束作用,在轴向荷载的作用下,卷边与翼缘的组合体通常会先于腹板失稳而发生畸变屈曲.这将导致截面的有效形心向腹板一侧(负向偏心一侧)移动,并使得构件在略为负偏心时获得最大的承载力;随着卷边弯起角度的增大,卷边对翼缘的约束作用不断增强,其与翼缘组合体的畸变屈曲应力也随之提高.当畸变屈曲应力高于腹板局部屈曲应力

时,腹板将先于卷边与翼缘的组合体发生失稳,截面的有效形心向卷边(正向偏心)移动,此时构件将在一定的正向偏心距下获得最大的承载力。

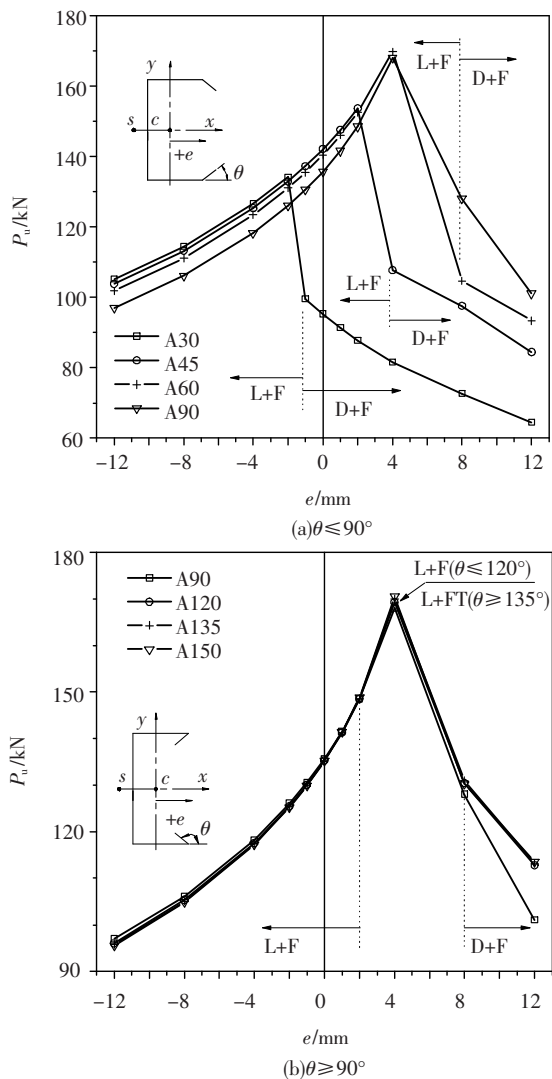


图 3 承载力与偏心距的关系曲线

### 3.2 偏心距对构件整体变形的影响

偏心荷载的作用位置不但对斜卷边构件最终的极限承载力和失稳模式影响较大,还对构件的整体变形特性有一定的影响.图 4 绘制了部分偏压构件中央高度处截面整体  $x$  向位移随荷载变化的曲线.由图 4 中卷边弯起角度为  $30^\circ$  的构件在偏心距分别为  $-1\text{ mm}$  和  $-2\text{ mm}$  时的荷载-位移曲线可见,偏心距仅  $1\text{ mm}$  之差不但使得构件的承载力相差很大,而且还导致构件最终整体弯曲变形的方向发生了变化.弯起角度为  $30^\circ$  时,卷边对翼缘提供的约束作用较弱,在负向偏心距较小时,虽然偏心荷载产生的弯矩使得截面上的最大压应力分布在腹板一侧,但卷边一侧的压应力仍然较大,畸变屈曲模式常先于腹板的局部屈曲发生.构件在发生畸变屈曲前,柱的整体弯曲变形朝

$x$  轴(位移轴)正方向发展;当畸变屈曲发生后,截面的有效形心向腹板侧偏移,使实际负偏心距变小,直至变为正偏心距,构件的整体弯曲变形将转变为朝  $x$  轴负方向发展.而当负向偏心距达  $2\text{ mm}$  或更大后,腹板的局部屈曲先于卷边翼缘组合体的畸变屈曲发生,截面的有效形心向卷边侧偏移,使负偏心距增大,构件在局部屈曲发生前后整体弯曲变形都将朝向  $x$  轴正向发展,荷载-位移曲线没有反向现象发生。

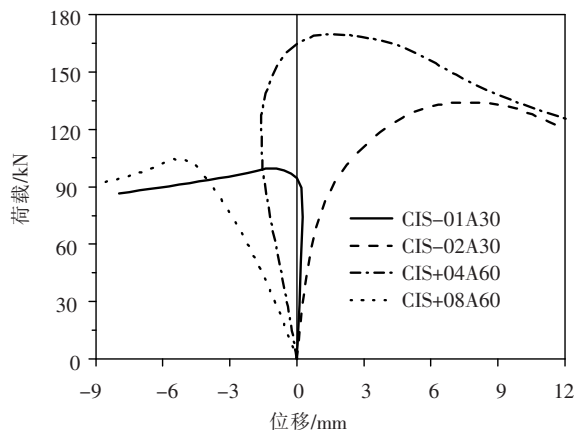


图 4 偏压构件荷载-位移曲线

随卷边弯起角度的增大,卷边提供给翼缘的约束作用也不断加强,从而提高了构件的畸变屈曲临界荷载和极限承载力.图 4 中卷边弯起角度为  $60^\circ$  的构件在  $e = 4\text{ mm}$  时荷载-位移曲线的反向现象表明,此时构件腹板的局部屈曲仍先于畸变屈曲发生,有效形心向卷边侧偏移,使实际偏心距由大变小,甚至变为负偏心距,构件最终整体弯曲变形朝向  $x$  轴正向发展;当偏心距增大到  $8\text{ mm}$  时,卷边弯角为  $60^\circ$  构件的畸变屈曲将首先发生,有效形心向腹板侧偏移,构件整体弯曲变形始终朝向  $x$  轴负向发展.以上现象说明,此类构件的稳定性受偏心荷载作用位置的影响非常明显,偏心距上的微小差别都可能导致构件的承载力、失稳模式和变形等特性发生很大的变化。

## 4 结 论

1) 所有斜卷边(包括直角卷边)槽钢构件均不是在  $e = 0$  时获得承载力的最大值.大部分构件在承受负向偏心荷载作用下均发生局部与整体弯曲的相关屈曲模式,各构件随负向偏心距的增大,承载力逐渐降低;且在偏心距相等时,随卷边弯起角度的增大构件承载力逐渐降低,当卷边弯起角度大于直角后,各构件的承载力非常接近,基本不再受卷边弯起角度的影响。

(下转第 1976 页)