

文章编号:1673-9469(2016)01-0035-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2016.01.009

## 角钢轴压构件畸变与局部相关屈曲分析

李清扬<sup>1</sup>,杜小飞<sup>1</sup>,刘远鹏<sup>2</sup>,李红<sup>3</sup>

(1. 河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038;2. 河北工程大学 建筑设计研究院,河北 邯郸 056038;  
3. 河北工程大学 财务处,河北 邯郸 056038)

**摘要:**采用 ANSYS 有限元软件,对冷弯薄壁加劲卷边角钢轴压构件的畸变与局部相关屈曲性能进行模拟分析。研究不同卷边宽度对构件的屈曲模式及临界荷载的影响,以及不同厚度对构件的畸变与局部相关屈曲临界荷载及经济系数的影响。结果表明:卷边宽度对构件的屈曲模式及临界荷载有较大影响,对比不同卷边宽度下各构件的临界荷载值,得出卷边宽度与肢长比在 6/25 左右较合理;板件厚度对于畸变与局部相关屈曲临界荷载有较大的影响,对比不同板件厚度下各构件经济系数的变化,得出板件厚度与肢长比在 7/150 左右较合理。

**关键词:**加劲卷边角钢;畸变与局部相关屈曲;卷边宽度;板件厚度;临界荷载

**中图分类号:**TU392.1

**文献标识码:**A

## Distortional – local interactive buckling analysis on stiffening lipped angle steel member under axial compression

LI Qing – yang<sup>1</sup>, DU Xiao – fei<sup>1</sup>, LIU Yuan – peng<sup>2</sup>, LI Hong<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, Hebei;2. Research Institute of Architecture Design, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, Hebei;3. Finance Department, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China)

**Abstract:** The performance of distortional – local interactive buckling on stiffening lipped angle steel members under axial compression is studied in the thesis by using ANSYS finite element software. The effect of different edge width on buckling mode and critical load and the effect of different panel thickness on distortional – local interactive buckling critical load are studied. The results indicate that: Edge width has great effects on distortional – local interactive buckling mode and critical load of the component. The critical load value under different edge width is contrasted to get a reasonable edge width and limb length ratio range; the panel thickness has great effects on the critical load of distortional – local interactive buckling. The change of economic coefficient under different panel thickness is contrasted to get a reasonable panel thickness and limb length ratio range.

**Key words:** stiffening lipped angle steel; distortional – local interactive buckling; edge width; panel thickness; critical load

开口薄壁构件会出现板件局部屈曲、全截面畸变屈曲和构件整体屈曲三种屈曲模式<sup>[1]</sup>自上世纪四十年代起,国内外对理想轴心受压构件的稳定性即展开了研究。上世纪末 Rogers 等通过试验方法得出畸变与局部屈曲有相关性,相关研究也随之发展。但是目前为止针对冷弯薄壁轴压构件畸变与局部相关屈曲的试验及理论成果还不够成

熟,我国现行的规范对畸变与局部相关屈曲还没有具体的条文规定。卷边加劲角钢作为一类重要的冷弯薄壁型钢,被广泛应用于塔架、格构柱、桁架及支撑等结构<sup>[2]</sup>。本文针对轴压冷弯薄壁加劲角钢构件,在角钢的肢上设置外凸加劲肋<sup>[3]</sup>,以提高板件的局部稳定性。但加劲后的角钢构件截面形式复杂,容易发生畸变屈曲及畸变与局部相关

收稿日期:2015-11-13

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(E2010001012)

作者简介:李清扬(1964-),女,天津人,教授,硕士生导师,高级工程师,从事钢结构教学、科研、设计工作。

屈曲。而构件发生畸变屈曲与局部屈曲耦合破坏会降低构件的承载力<sup>[4]</sup>；卷边角钢的肢做为部分加劲板件,受压后的行为复杂,合理选择卷边尺寸可以有效提高构件的稳定性<sup>[5]</sup>。文章运用 ANSYS 有限元软件,对不同的卷边宽度、板件厚度的加劲卷边角钢轴压构件的畸变与局部相关屈曲性能进行了模拟分析,与加劲角钢构件对比,得出不同卷边宽度与板件厚度下构件畸变与局部耦合相关作用对其破坏模式、临界荷载及经济系数的影响。

## 1 建立模型及求解

### 1.1 单元的选取和有限元模型建立

本文采用 ANSYS 有限元软件,选取 SHELL181 单元模拟轴压的角钢构件。构件长度 900 mm,角钢肢宽 75 mm,加劲宽度 18 mm,加劲高度 12 mm<sup>[6]</sup>。选择弹性材料,弹性模量  $E = 2.06 \times 10^5$  MPa,泊松比  $\nu = 0.3$ 。在构件模型两端添加刚性板<sup>[7]</sup>,将其与构件模型耦合在一起,连接时保证刚性板形心与构件截面的形心重合。采用自由网格划分,网格划分尺寸为 3 mm × 3 mm。加劲角钢截面示意图与模型图如图 1 所示。两端约束条件为:下端约束 X、Y、Z 方向的三个平动自由度,

释放三个转动自由度;上端约束 X、Z 方向的两个平动自由度,释放 X、Y、Z 方向的三个转动自由度以及 Y 方向的竖向自由度,并在上端刚性板的形心施加 Y 方向的单位集中力。选取六种卷边宽度的加劲角钢构件,具体编号及尺寸见表 1。

表 1 不同卷边宽度的加劲角钢构件

Tab. 1 Stiffener angle steel components with different edge width

| 构件           | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 |
|--------------|----|----|----|----|----|----|
| 卷边宽度 $a$ /mm | 9  | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 |

### 1.2 数据处理

在模态图扩展阶段定义 10 阶屈曲模态<sup>[8]</sup>,进行屈曲求解。局部与畸变相关屈曲主要出现在高阶屈曲模态中<sup>[9]</sup>,故从 10 阶屈曲模态中选取 5 ~ 10 阶进行整理分析。

不同卷边宽度加劲角钢构件的屈曲临界荷载与屈曲模式如表 2 所示;根据表 2 中数据绘制不同卷边宽度加劲卷边角钢构件(A1 ~ A6)的屈曲临界荷载曲线图,如图 2 所示。发生相关屈曲构件的相关屈曲临界荷载增量见表 3;不同卷边宽度加劲角钢构件用钢量增量见表 4;从屈曲模态图中选取第 9 阶模态图,如图 3 所示。

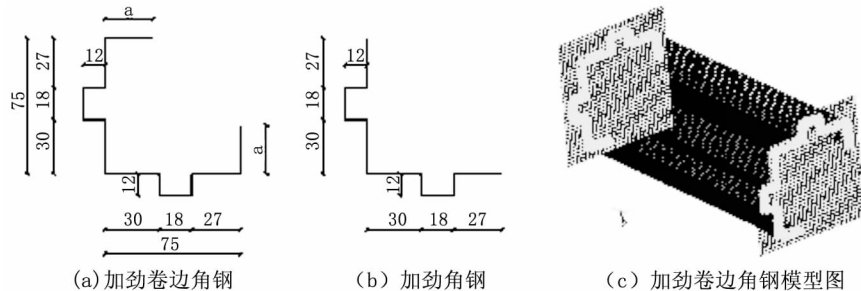


图 1 加劲卷边角钢及加劲角钢截面示意图和模型图

Fig.1 Section diagram and model diagram of

表 2 不同卷边宽度加劲角钢构件的屈曲临界荷载(kN)与屈曲模式

Tab. 2 Buckling critical load(kN) and buckling mode of stiffener angle components with different edge width

| 模态阶数 | A1     | A2     | A3     | A4     | A5     | A6     |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 5    | 27.161 | 34.783 | 45.720 | 59.429 | 72.656 | 57.725 |
| 6    | 31.416 | 41.728 | 54.896 | 66.153 | 72.657 | 57.932 |
| 7    | 32.627 | 41.743 | 56.398 | 72.177 | 72.771 | 57.933 |
| 8    | 36.028 | 46.839 | 57.224 | 74.343 | 72.772 | 60.245 |
| 9    | 38.926 | 53.548 | 68.152 | 75.930 | 74.489 | 60.247 |
| 10   | 45.312 | 56.312 | 73.208 | 93.298 | 74.495 | 60.472 |
| 屈曲模式 | 畸变屈曲   | 畸变屈曲   | 相关屈曲   | 相关屈曲   | 相关屈曲   | 局部屈曲   |

表3 不同卷边宽度加劲角钢构件的相关屈曲临界荷载增量/%

Tab.3 Interactive buckling critical load increment /% of stiffener angle components with different edge width

| 模态阶数 | A3     | A4     | A5     |
|------|--------|--------|--------|
| 5    | 80.75  | 134.94 | 187.23 |
| 6    | 108.18 | 150.87 | 175.54 |
| 7    | 112.22 | 171.60 | 173.83 |
| 8    | 113.71 | 177.64 | 171.77 |
| 9    | 153.53 | 182.47 | 177.11 |
| 10   | 165.72 | 238.64 | 170.39 |

注:临界荷载增量=(加劲卷边角钢临界荷载-加劲角钢临界荷载)/加劲角钢临界荷载

表4 不同卷边宽度加劲角钢构件的用钢量增量/%

Tab.4 Steel quantity increment /% of stiffener Angle components with different edge width

| 构件    | A3    | A4    | A5    |
|-------|-------|-------|-------|
| 用钢量增量 | 15.15 | 18.18 | 21.21 |

注:用钢量增量=(加劲卷边角钢用钢量-加劲角钢用钢量)/加劲角钢用钢量

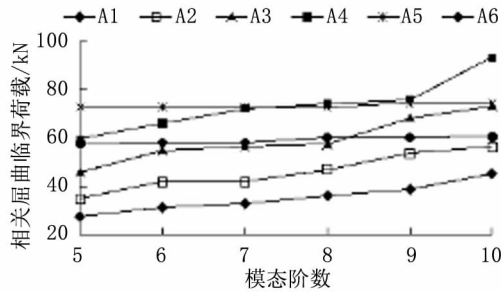


图2 不同卷边宽度加劲角钢构件的屈曲临界荷载曲线图

Fig.2 Buckling critical load curve of stiffener angle components under different edge width



图3 不同卷边宽度加劲角钢构件屈曲模式对比图

Fig.3 Buckling mode comparison of stiffener angle steel under different edge width

由表2、表3可知,不同的卷边宽度对构件的相关屈曲临界荷载有很大影响。结合图2、图3,

从中选取相关屈曲临界荷载增加幅度最大且相关屈曲现象最明显的A4(卷边宽度为18mm)构件,

选取六种不同的厚度(编号及尺寸见表5);并选取5~10阶屈曲模态进行整理分析,得到数据如表6所示;卷边宽度0 mm、不同厚度的 $T_01 \sim T_06$ 构件的相关屈曲临界荷载值见表7。根据表6中

数据绘制不同厚度加劲卷边角钢构件的畸变与局部相关屈曲临界荷载曲线图,如图4所示。根据表8、表9绘制出不同厚度加劲卷边角钢构件的经济系数曲线图,如图5所示。

表5 不同厚度的加劲卷边角钢构件

Tab. 5 The stiffening edge Angle steel components with different thickness

| 构件                 | T1  | T2  | T3  | T4  | T5  | T6  |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 构件厚度 $t/\text{mm}$ | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 |

表6 不同厚度加劲卷边角钢构件的相关屈曲临界荷载值/kN

Tab. 6 Interactive critical buckling load value (kN) of stiffening edge angle steel components with different thickness

| 模态阶数 | T1     | T2     | T3      | T4      | T5     | T6     |
|------|--------|--------|---------|---------|--------|--------|
| 5    | 54.030 | 59.429 | 65.030  | 70.819  | 76.783 | 82.908 |
| 6    | 59.383 | 66.153 | 72.546  | 78.344  | 83.708 | 88.829 |
| 7    | 66.066 | 72.177 | 78.683  | 85.444  | 92.366 | 99.499 |
| 8    | 68.004 | 74.343 | 80.909  | 87.703  | 94.725 | 101.97 |
| 9    | 69.888 | 75.93  | 82.843  | 90.875  | 99.828 | 109.33 |
| 10   | 77.354 | 93.298 | 104.040 | 112.460 | 121.09 | 129.95 |

表7 不同厚度加劲角钢构件的相关屈曲临界荷载值/kN

Tab. 7 Interactive buckling critical load value/kN of stiffener angle components with different thickness

| 模态阶数 | $T_01$ | $T_02$ | $T_03$ | $T_04$ | $T_05$ | $T_06$ |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 5    | 21.917 | 25.295 | 28.717 | 32.337 | 36.157 | 40.141 |
| 6    | 22.096 | 26.369 | 30.409 | 34.026 | 37.679 | 41.453 |
| 7    | 22.290 | 26.575 | 31.407 | 36.521 | 40.403 | 43.606 |
| 8    | 22.431 | 26.777 | 31.498 | 36.669 | 41.966 | 47.002 |
| 9    | 22.508 | 26.881 | 31.784 | 36.905 | 42.150 | 47.491 |
| 10   | 23.746 | 27.551 | 32.007 | 37.310 | 43.010 | 48.850 |

表8 不同厚度加劲卷边角钢构件的用钢量增量及相关屈曲临界荷载增量/%

Tab. 8 Interactive critical buckling load increment/% and steel quantity increment of stiffening edge angle steel components with different thickness

| 模态阶数 | 用钢量增量 | T1    | T2    | T3    | T4    | T5    | T6    |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 5    |       | 32.11 | 34.13 | 36.31 | 38.48 | 40.63 | 42.77 |
| 6    |       | 37.29 | 39.78 | 42.14 | 44.32 | 46.03 | 47.38 |
| 7    |       | 43.78 | 45.60 | 47.28 | 48.92 | 51.96 | 55.89 |
| 8    | 18.18 | 45.57 | 47.57 | 49.41 | 51.03 | 52.76 | 54.95 |
| 9    |       | 47.38 | 49.05 | 51.06 | 53.97 | 57.68 | 61.84 |
| 10   |       | 53.61 | 65.75 | 72.03 | 75.15 | 78.08 | 81.10 |

注:临界荷载增量=(加劲卷边角钢临界荷载-加劲角钢临界荷载)/加劲角钢临界荷载

表9 不同厚度加劲卷边角钢构件的经济系数

Tab. 9 Economic coefficient of stiffening lipped Angle steel components with different thickness

| 模态阶数 | T1   | T2   | T3   | T4   | T5   | T6   |
|------|------|------|------|------|------|------|
| 5    | 0.57 | 0.53 | 0.50 | 0.47 | 0.45 | 0.45 |
| 6    | 0.49 | 0.46 | 0.43 | 0.41 | 0.39 | 0.44 |
| 7    | 0.42 | 0.40 | 0.38 | 0.37 | 0.35 | 0.42 |
| 8    | 0.40 | 0.38 | 0.37 | 0.36 | 0.34 | 0.39 |
| 9    | 0.38 | 0.37 | 0.36 | 0.34 | 0.32 | 0.38 |
| 10   | 0.34 | 0.28 | 0.25 | 0.24 | 0.23 | 0.37 |

注:经济系数=用钢量增量/临界荷载增量

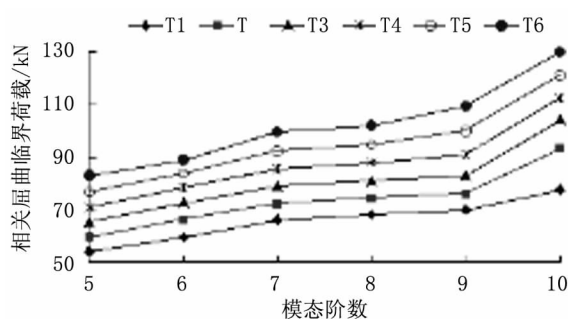


图4 不同厚度加劲卷边角钢的相关屈曲临界荷载曲线图  
Fig.4 Buckling critical load curve of stiffening edge Angle with different thickness

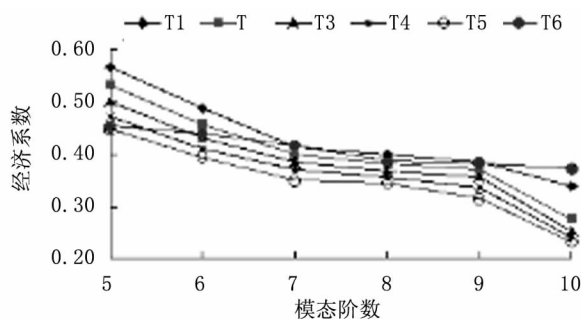


图5 不同厚度加劲卷边角钢的经济系数曲线图  
Fig. 5 Economic coefficient curve of stiffening edge Angle with different thickness

## 2 结果分析

从表1、图2、图3可以看出:

卷边宽度在9~18 mm范围,随着卷边宽度的增大,构件的变形逐渐减小,临界荷载逐渐增大。卷边宽度大于18 mm后,构件的临界荷载有所减小。

对于肢长75 mm加劲角钢构件,卷边宽度从9 mm增大到12 mm,构件仅发生畸变屈曲;卷边宽度从15 mm增大到21 mm,构件发生畸变与局部相关屈曲,卷边对角钢肢的约束逐渐增大,相关屈曲临界荷载逐渐增大;卷边宽度为18 mm时临界荷载最大,卷边宽度为21 mm时,相关屈曲临界荷载减小;当卷边宽度为24 mm时,角钢肢沿角钢脊的转动被限制,构件仅发生局部屈曲。

由表3、表4可以看出:与加劲角钢构件相比,加劲卷边角钢构件的畸变与局部相关屈曲临界荷载都有明显的增大,增量约为80%~170%;设置卷边导致用钢量的增加,增量约为15%~25%。

结合表6~表9和图4、图5可以看出:对于肢长75 mm的加劲角钢构件,板件厚度由1.5 mm增大到3.5 mm,其畸变与局部相关屈曲临界荷载相应增加,经济系数相应减小。厚度在1.5~3.5 mm范围时,经济系数呈减小趋势,且厚度为3.5 mm时经济系数最小。厚度为4.0 mm的经济系数比3.5 mm的有所增大。

## 3 结论

1) 卷边宽度与角钢肢长比值在3/25~6/25范围,随着比值的增大,构件的变形逐渐减小,临界荷载逐渐增大。比值大于6/25后,构件的临界荷载有所减小。

2) 卷边宽度与角钢肢长比值为3/25~1/5,构件仅发生畸变屈曲;两者比值为1/5~7/25,构件发生畸变与局部相关屈曲,且比值为6/25时,其

相关屈曲临界荷载最大;比值大于7/25后,构件仅发生局部屈曲。

3) 加劲角钢设置卷边后,在用钢量增加不大的情况下(增量约为15%~25%),构件的畸变与局部相关屈曲临界荷载明显增大(增量约为80%~170%)。

4) 板件厚度与角钢肢长比值从1/50增加到7/150,构件畸变与局部相关屈曲临界荷载相应地增加,经济系数相应地减小;两者比值大于7/150时,构件经济系数较大,不可取。故两者比值为7/150时比较合理。

## 参考文献:

- [1] 姚行友,李元齐,沈祖炎.冷弯薄壁型钢构件畸变屈曲研究现状[J].结构工程师,2010(5):148-156.
- [2] 袁卫宁,常伟,李丽.轴压冷弯薄壁卷边角钢稳定系数研究[J].工业建筑,2008(38):606-609.
- [3] 魏群,王镇岳.一种新型超薄壁冷弯钢构件组合截面形式及其力学特性分析[J].华北水利水电学院学报,2010,31(6):1-5.
- [4] 何子奇,周绪红,刘占科,等.冷弯薄壁卷边槽钢轴压构件畸变与局部相关屈曲试验研究[J].建筑结构学报,2013,34(11):98-108.
- [5] 何子奇.冷弯薄壁型钢轴压构件畸变及与局部相关的失稳机理和设计理论[D].兰州:兰州大学,2014.
- [6] 李清扬,许寅,王刚,等.加劲卷边角钢轴压力学性能有限元分析[J].施工技术,2015(2):75-77.
- [7] 李清扬,王建超,刘远鹏,等.冷弯薄壁加劲C型钢构件畸变性能有限元分析[J].建筑科学,2013,29(9):17-20.
- [8] 王羨农,周晓慧,张付彬. ANSYS对钢框架结构地震谱响应的计算分析[J].河北工程大学学报:自然科学版,2013,30(3):1-4.
- [9] 申红侠.卷边槽钢压杆的局部屈曲与畸变屈曲[C]//中国钢结构学会.2010全国钢结构学术年会论文集.北京:国家钢结构工程技术研究中心,2010:253-256.

(责任编辑 李军)