

不锈钢矩形管轴心受压构件弹性屈曲板组相关性研究

梁勇^{1,2} 李少华³

1 同济大学, 上海 200092

2 嘉兴南洋职业技术学院, 浙江 嘉兴 314000

3 嘉兴大源建筑工程有限公司, 浙江 嘉兴 314000

[摘要]文章以截面形状系数、板件高厚比为主要参数,研究了冷成型不锈钢矩形管轴心受压构件弹性屈曲时板组相关性能。首先利用有限元软件 Abaqus 对直角矩形管轴心受压构件进行弹性屈曲分析,得到截面板件的弹性屈曲系数的建议公式。然后通过计算数据进行分析来讨论截面形状系数和板件高厚比与弹性系数的关系。

[关键词]冷成型; 不锈钢; 板组相关性; 弹性屈曲

DOI: 10.33142/sca.v3i9.3262

中图分类号: TU391

文献标识码: A

Study on the Correlation between Elastic Buckling Plate Group of Stainless Steel Rectangular Tube Axial Compression Member

LIANG Yong^{1,2}, LI Shaohua³

1 Tongji University, Shanghai, 200092, China

2 Jiaying Nanyang Polytechnic Institute, Jiaying, Zhejiang, 314000, China

3 Jiaying Dayuan Construction Engineering Co., Ltd., Jiaying, Zhejiang, 314000, China

Abstract: The paper studies the relative properties of the plate group when the cold formed stainless steel rectangular tube axial compression members are subjected to elastic buckling, taking the section shape coefficient and the ratio of the thickness to height of the plate as the main parameters. Firstly, the elastic buckling analysis of rectangular tube members under axial compression is carried out by using Abaqus, and the suggested formula of elastic buckling coefficient of cross-section plate is obtained. Then, the relationship between the shape coefficient of the section, the ratio of height to thickness of the plate and the elastic coefficient is discussed by analyzing the calculation data.

Keywords: cold forming; stainless steel; plate group correlation; elastic buckling

从 20 世纪初开始, 不锈钢就在工程领域中得到使用, 主要应用在建筑装饰工程、围护结构和屋盖结构。本世纪以来, 不锈钢结构的应用逐渐增多, 特别是在近海结构、海洋平台等特殊环境下, 由于不锈钢良好的结构性能、抗腐蚀性能和耐久性而受到了工程领域的广泛应用, 我国粗钢年产量超过 10 亿吨, 已经成为钢结构生产和应用大国。

1 板组相关性的研究现状及本文研究的意义

1.1 板组相关性研究的现状

陈绍蕃^[2]阐明受弯构件中的卷边翼缘可以考虑按两边支承板对待, 板件屈曲具有相关性; 张利若、陈绍蕃等^[3]的研究表明翼缘对腹板屈曲的约束系数与截面几何尺寸以及塑性的开展深度有关; 陈绍蕃^[4]基于盈亏相抵的思想给出了板件约束系数的近似公式; 郭兵等^[5]研究表明影响板件屈曲系数的主要因素是板件的宽厚比的比值, 而与其自身宽厚比无关。曾锋^[6]拟合得到了均匀受压矩形管翼缘和腹板的板组约束系数计算公式。

周锋^[7]等用数值方法研究表明不锈钢矩形受压构件的板组相关作用对构件的正则化承载力有显著的影响; 龙甘^[8]采研究发现当截面高宽比 $\alpha=1.0$ 时冷成型不锈钢矩形管受弯构件板组相关程度最弱, 随着 α 的增加, 构件正则化承载力 (M_u/M_e 或 M_u/M_p) 也逐渐增加, 当 α 超过 2 以后, 对构件正则化承载力的影响趋于稳定。

现有文献对不锈钢轴心受压构件弹性屈曲板组相关性的研究较少, 对其进行研究可以全面准确的把握结构构件整体受力行为并且能够清晰反映构件在荷载作用下全过程的变形性能, 有利用促进对不锈钢结构的设计理念和方法的把握。

1.2 本文研究的意义

目前, 世界上已有美国规范^[7] (ASCE)、欧洲规范^[8] (EC3)、澳新规范^[9] (AS/NZS) 等不锈钢结构设计规范, 现行不

锈钢结构规范在考虑板件的局部失稳时，采用的都是基于单一板件准则的截面分类和有效面积法，即根据最薄柔板件的高厚比进行分类，没有考虑板组之间的相互作用，偏于保守。而冷成型不锈钢结构构件可以看作板件组合体，其组成板件间相互约束形成一个整体，当任一板件发生屈曲时必然带动相邻板件一起变形，强板件对弱板件产生一定的约束作用，这种现象简称为板组相关屈曲^[10]。不锈钢材料是贵重金属材料，研究不锈钢矩形管轴心受压构件弹性屈曲板组之间的相关作用从而提出更精确的设计方法对于节省工程造价、促进不锈钢的应用发展具有十分重要的意义。

2 轴心受压构件中板件的弹性屈曲有限元分析

2.1 轴心受压构件中板件的弹性屈曲

对于单向均匀受压筒支板（如图 1^[9]所示），板的中面力 $N_x = -P_x$ ， $N_y = 0$ ， $N_{xy} = 0$ 。

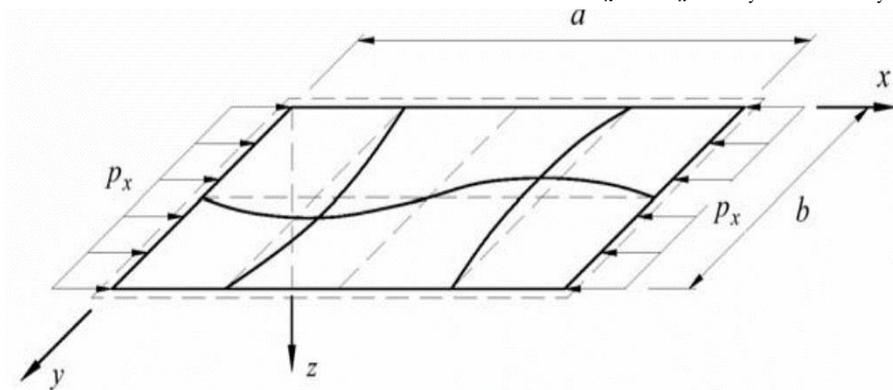


图 1 薄板轴向受压受力分析

根据板的弹性稳定理论^[9]，可得：

$$P_{crx} = k \times \frac{\pi^2 D}{b^2} \quad (1)$$

上式中，

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2)$$

为单位宽度板的抗弯刚度， k 为板的弹性屈曲系数， P_{crx} 为板的弹性屈曲临界承载力。因此，板的屈曲应力为（3）式。

$$\sigma_{cr} = \frac{P_{crx}}{t} = \frac{k}{12(1-\nu^2)} \times \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{b}{t}\right)^2} \quad (3)$$

式（3）中 ν 为泊松比， E 为杨氏模量， b 为板宽， t 为板件厚度。由式（3）可知板件的宽厚比 b/t 对板件弹性屈曲临界应力影响最大，同时，弹性屈曲系数 k 也对板件弹性屈曲临界应力有较大影响。 k 的取值与板件的受力状态、长宽比和边界条件相关，现行规范中不同支承条件对单向均匀受压板件弹性屈曲系数的取值为定值。

2.2 有限元弹性屈曲分析模型

基于横截面的中心线尺寸创建有限元模型（FEM），首先对直角不锈钢矩形管（如图 2）轴心受压短构件进行模拟，有限元模型均采用 S4R 单元。根据欧洲规范^[9]（EC3），本节设定材料的弹性模量和泊松比分别为： $E_0=201000\text{MPa}$ ， $\nu=0.3$ 。为了提高计算效率将 $2 \times 2 \text{ mm}$ 至 $10 \times 10 \text{ mm}$ 的有限元网格尺寸用于试件的平板部分。短柱的典型有限元网格如图 5 所示。

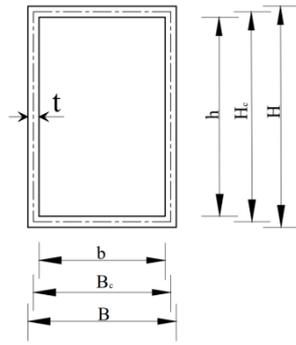


图2 直角不锈钢矩形管截面尺寸示意图

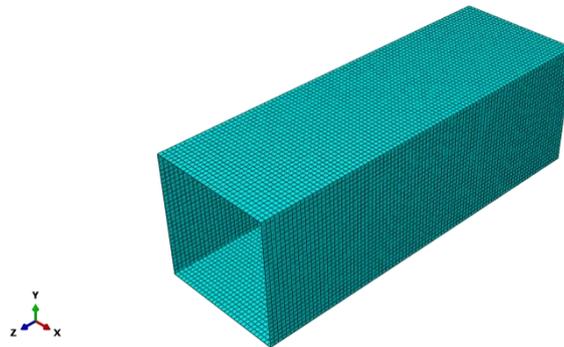


图3 模型有限元网格划分

轴心受压试件模型的边界条件通过基准点 (RP-1 和 RP-2) 进行控制 (如图 3), 采用 Abaqus 中的 “couple” 命令, 分别将基准点同两端截面耦合在一起, 模型下侧作为固定端, 约束住 RP-1 所有自由度; 模型上侧约束住 RP-2 除了 Z 向平动自由度以外的所有自由度。

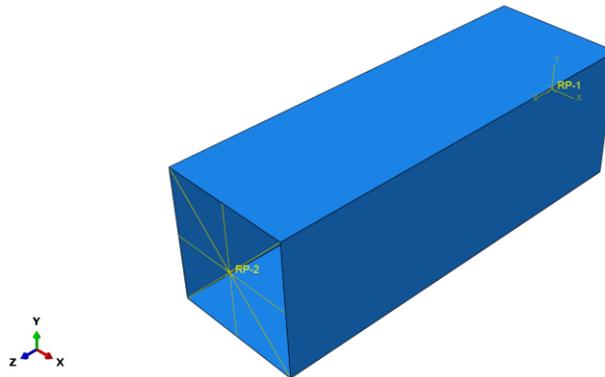


图4 模型边界条件

2.3 加载方式及分析方法

加载方式采用力加载, 在模型件上侧基准点 RP-2 上施加 Z 向单位集中压荷载, 采用 Abaqus 中的 “buckle” 分析方法计算不锈钢矩形管轴心受压构件弹性屈曲临界荷载, 进而计算其弹性屈曲临界应力。

既有研究^[7]表明翼缘和腹板板件宽度的比值能够直接反映矩形管截面的板组相关作用强弱程度, 因此本文定义并研究截面形状系数 $\alpha = H_c/B_c$ 的影响, 该系数实际反映了轴心受压矩形管截面中组成板件间的稳定性相互强弱程度。

本文对 6 种不同矩形管截面形状系数 ($\alpha = H_c/B_c \geq 1$) 进行了参数计算, 共分析了 42 根直角不锈钢矩形管轴心受压构件 (如表 2), 截面形状系数 α 分别取为 1.00、1.25、1.67、2.50、3.33 和 5.00。对于所有的试件, 腹板高度 (H_c) 保持 300 mm 不变, 翼缘宽度 (B_c) 从 300mm 逐渐减小为 60mm, 因此截面形状系数从 1.00 逐渐增大到 5.00。对于每一个截

面形状系数系列，试件的厚度（ t ）从 3.0mm 逐渐增大到 12.0mm，同时覆盖厚实截面和薄柔截面。符号 t 、 B_c 、 H_c 的规定详见图 2.2。为了防止直角不锈钢矩形管轴心受压构件发生整体屈曲，本文模型均选用较短的试件长度 L ，并保持 900mm 不变。

表 2 直角不锈钢矩形管轴心受压构件弹性屈曲分析模型参数设置

截面	t	H_c	B_c	H_c / t		截面	t	H_c	B_c	H_c / t	
	mm	mm	mm				mm	mm	mm		
300 300 3.0	3	300	300	100	1.00	300 120 3.0	3	300	120	100	2.5
300 300 4.0	4	300	300	75	1.00	300 120 4.0	4	300	120	75	2.5
300 300 5.0	5	300	300	60	1.00	300 120 5.0	5	300	120	60	2.5
300 300 6.0	6	300	300	50	1.00	300 120 6.0	6	300	120	50	2.5
300 300 8.0	8	300	300	37.5	1.00	300 120 8.0	8	300	120	37.5	2.5
300 300 10.0	10	300	300	30	1.00	300 120 10.0	10	300	120	30	2.5
300 300 12.0	12	300	300	25	1.00	300 120 12.0	12	300	120	25	2.5
300 240 3.0	3	300	240	100	1.25	300 90 3.0	3	300	90	100	3.33
300 240 4.0	4	300	240	75	1.25	300 90 4.0	4	300	90	75	3.33
300 240 5.0	5	300	240	60	1.25	300 90 5.0	5	300	90	60	3.33
300 240 6.0	6	300	240	50	1.25	300 90 6.0	6	300	90	50	3.33
300 240 8.0	8	300	240	37.5	1.25	300 90 8.0	8	300	90	37.5	3.33
300 240 10.0	10	300	240	30	1.25	300 90 10.0	10	300	90	30	3.33
300 240 12	12	300	240	25	1.25	300 90 12	12	300	90	25	3.33
300 180 3.0	3	300	180	100	1.67	300 60 3.0	3	300	60	100	5.00
300 180 4.0	4	300	180	75	1.67	300 60 4.0	4	300	60	75	5.00
300 180 5.0	5	300	180	60	1.67	300 60 5.0	5	300	60	60	5.00
300 180 6.0	6	300	180	50	1.67	300 60 6.0	6	300	60	50	5.00
300 180 8.0	8	300	180	37.5	1.67	300 60 8.0	8	300	60	37.5	5.00
300 180 10.0	10	300	180	30	1.67	300 60 10.0	10	300	60	30	5.00
300 180 2	12	300	180	25	1.67	300 60 12	12	300	60	25	5.00

3 直角不锈钢矩形管轴心受压构件弹性屈曲时板组相关性

3.1 直角不锈钢矩形管轴心受压构件弹性屈曲的特点

整理直角不锈钢矩形管轴心受压构件弹性屈曲计算结果，得到其弹性屈曲临界荷载 N_{cr} 。图 5 给出典型试件 300 300 3.0 弹性屈曲时的变形图和应力云图，发现直角不锈钢矩形管轴心受压构件在弹性屈曲时具备如下特征：

- (1) 组成截面的翼缘和腹板同时屈曲，翼缘和腹板具备相同的屈曲应力；
- (2) 翼缘和腹板之间的夹角保持直角；
- (3) 弹性屈曲时翼缘和腹板相交的棱线依然保持挺直；
- (4) 翼缘和腹板的屈曲半波长度相同；
- (5) 翼缘和腹板的邻边棱线处具有相同的应力和角位移。

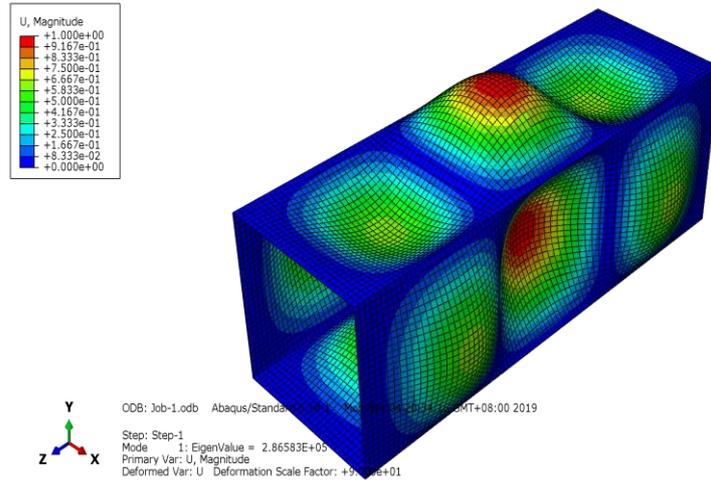


图5 直角不锈钢矩形管 300x300x3.0 弹性屈曲时变形图

3.2 直角不锈钢矩形管轴心受压构件弹性屈曲系数的计算

对于直角矩形管轴心受压构件，这里将通过计算翼缘和腹板的弹性屈曲系数来研究弹性屈曲时板组相关性。根据有限元结果计算翼缘和腹板弹性屈曲系数的过程如下：首先根据有限元计算得到的弹性屈曲临界荷载 N_{cr} 计算翼缘和腹板的弹性屈曲临界应力，然后根据前文公式 (2) 将翼缘和腹板的弹性屈曲临界应力分别代入到式 (3) 和 (4) 中，即可得到翼缘和腹板弹性屈曲系数的表达式，如式 (5) 和 (6) 所示，式中 E 为材料的弹性模量， ν 为泊松比， t 、 B_c 、 H_c 均为不锈钢矩形管构件的截面尺寸，符号定义见图 2。

$$\sigma_{crf} = f(N_{cr}) = \frac{k_f \pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{B_c}\right)^2 \quad (3)$$

$$\sigma_{crw} = f(N_{cr}) = \frac{k_w \pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{H_c}\right)^2 \quad (4)$$

$$k_f = f(N_{cr}) \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 E} \left(\frac{B_c}{t}\right)^2 \quad (5)$$

$$k_w = f(N_{cr}) \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 E} \left(\frac{H_c}{t}\right)^2 \quad (6)$$

本文通过对 42 个有限元模型的数值，并深入考虑板组相关的特性而提出更为精确且方便掌握的计算公式，从而为工程技术人员提供应用方便。通过前面的分析发现，不锈钢矩形管轴心受压构件的弹性屈曲系数主要与截面形状系数相关。根据有限元计算结果，进行非线性拟合得到了直角矩形管截面轴心受压构件翼缘和腹板弹性屈曲系数的建议计算公式，如式 (7) 和 (8) 所示。直角不锈钢矩形管轴心受压构件腹板弹性屈曲系数的建议计算公式：

$$k_{w_Proposed} = \frac{-173.07+292.93\alpha}{-20.12+47.59\alpha} \quad (7)$$

直角不锈钢矩形管轴心受压构件翼缘弹性屈曲系数的建议计算公式：

$$k_{f_Proposed} = \frac{-173.07+292.93\alpha}{-20.12+47.59\alpha} \left(\frac{1}{\alpha}\right)^2 \quad (8)$$

式中， α 为截面形状系数。公式的适用条件为： $1 \leq \alpha \leq 5$ 。

3.3 直角不锈钢矩形管轴心受压构件弹性屈曲时板组相关性分析

对表 2 直角不锈钢矩形管轴心受压构件进行弹性屈曲分析，首先得到其对应的弹性屈曲临界荷载 N_{cr} ，然后按上节弹性屈曲系数的计算方法，分别得到腹板和翼缘的弹性屈曲系数，在此基础上，图 8、9 和图 10、11 分别给出了腹板

和翼缘弹性屈曲系数与截面形状系数和板件宽厚比之间的关系。

图 6 对直角不锈钢矩形管轴心受压构件腹板弹性屈曲系数(k_w)与截面形状系数(α)之间的关系进行了研究,可以看出,矩形管轴心受压构件腹板弹性屈曲系数(k_w)与截面形状系数(α)明显相关。当 $\alpha=1.0$ 时,腹板的弹性屈曲系数最小,此时翼缘具有与腹板相同的稳定性,翼缘对腹板的支承约束作用最弱。随着 α 的增加,腹板的弹性屈曲系数(k_w)也持续增加,这是由于相邻较为厚实的翼缘对腹板提供约束的程度也不断增加,延缓了腹板的屈曲,从而导致了腹板弹性屈曲系数的提高。图 7 对直角不锈钢矩形管轴心受压构件腹板弹性屈曲系数(k_w)与腹板高厚比(H_c/t)之间的关系进行了分析,可以看出,腹板的弹性屈曲系数与板件高厚比(H_c/t)相关性不大。在相同的截面形状系数(α)下,对比发现板件高厚比 $H_c/t=25$ 和板件高厚比 $H_c/t=100$ 的腹板弹性屈曲系数(k_w)相差不到 3%,说明板件高厚比(H_c/t)对腹板弹性屈曲系数(k_w)的影响可以忽略不计。

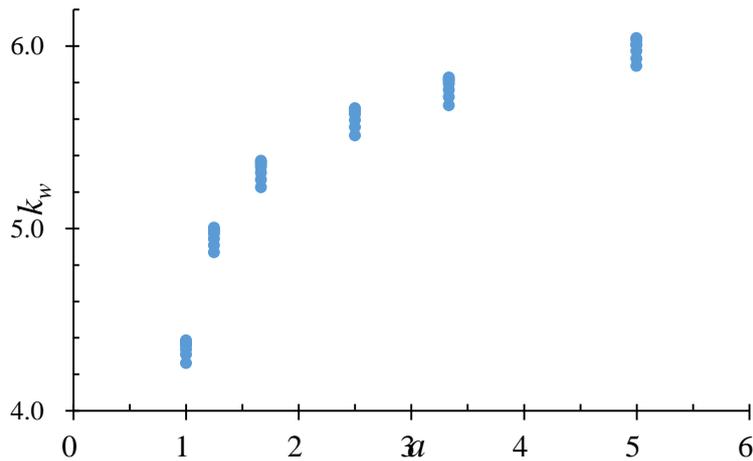


图 6 截面形状系数(α)对直角不锈钢矩形管轴心受压构件腹板弹性屈曲系数(k_w)的影响

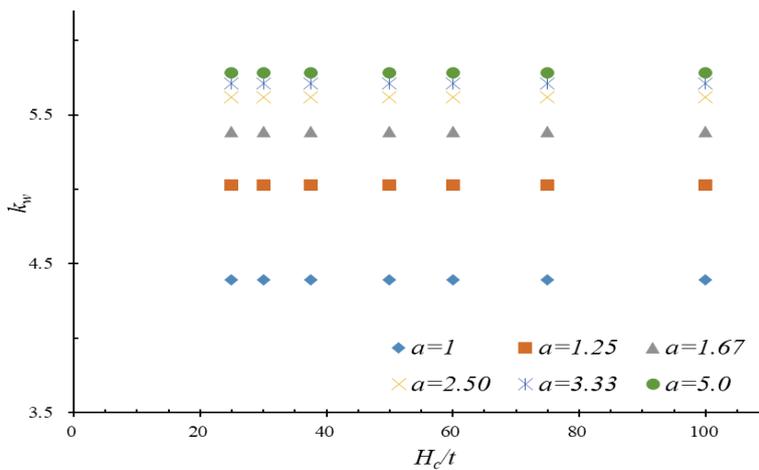


图 7 腹板高厚比(H_c/t)对直角不锈钢矩形管轴心受压构件腹板弹性屈曲系数(k_w)的影响

图 8 对直角不锈钢矩形管轴心受压构件截面翼缘弹性屈曲系数(k_f)与截面形状系数(α)之间的关系进行了分析,可以看出,矩形管轴心受压构件翼缘弹性屈曲系数(k_f)主要与截面形状系数(α)相关。当截面形状系数 $\alpha=1.0$ 时,翼缘的弹性屈曲系数最大,此时翼缘和腹板宽度相同,腹板对翼缘的支承约束作用最强。随着 α 的增加,相邻腹板变得薄柔,翼缘相较于腹板更为厚实,导致腹板对翼缘的约束程度减小,翼缘的弹性屈曲系数(k_f)也随之减小。图 9 对轴心受压构件翼缘弹性屈曲系数(k_f)与翼缘宽厚比(B_c/t)之间的关系进行了分析,由图可以看出,在相同的截面形状系数(α)下,翼缘弹性屈曲系数(k_f)随翼缘宽厚比(B_c/t)变化很小,对比发现翼缘宽厚比 $B_c/t=25$ 和翼缘宽厚比 $B_c/t=100$ 的翼缘弹性屈曲系数(k_f)值相差不到 3%,说明翼缘宽厚比(B_c/t)对翼缘弹性屈曲系数(k_f)的影响也可以忽略不计。

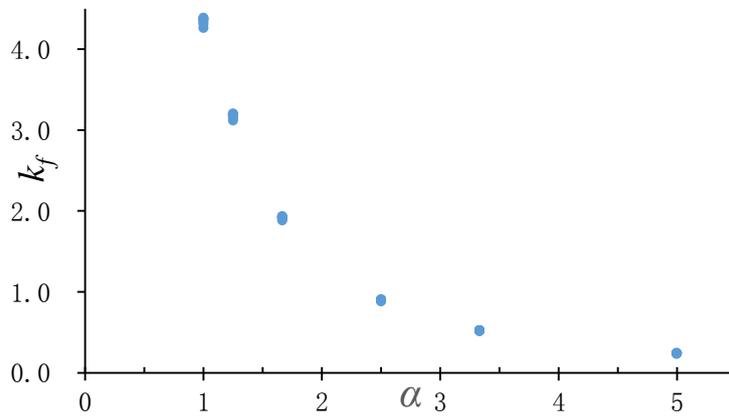


图8 截面形状系数(α)对直角不锈钢矩形管轴心受压构件翼缘弹性屈曲系数(k_f)的影响

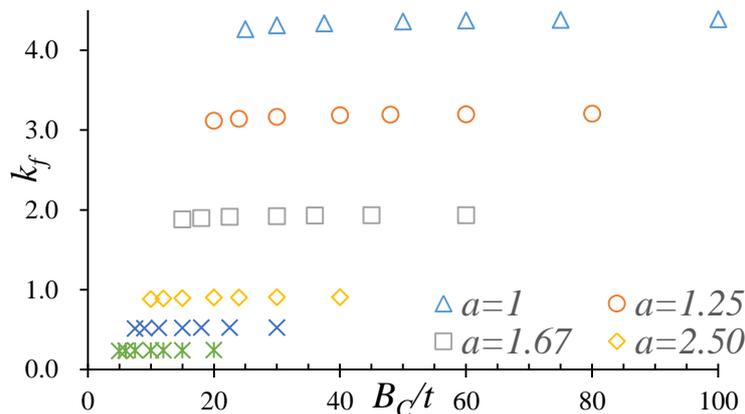


图9 翼缘宽厚比(B_c/t)对直角不锈钢矩形管轴心受压构件翼缘弹性屈曲系数(k_f)的影响

通过以上图6~9的分析,考虑板组相关作用,截面腹板的弹性屈曲系数(k_w)最大可达到6以上,增大了50%;而截面翼缘的弹性屈曲系数(k_f)最小可为0.23,这是由于较为厚实板件对较为薄柔板件提供了支撑,而较薄柔板件推动了厚实板件提前屈曲,这种板组之间的相关作用对构件截面弹性屈曲的影响较大,不可忽视。

4 结语

本文通过对截面形状系数、板件高厚比对板组相关作用的影响研究,得出如下结论:

(1) 对于不锈钢轴心受压矩形管截面腹板,当 $\alpha=1.0$ 时,板组相关程度最弱,截面腹板的弹性屈曲系数最小,随着截面形状系数(α)的增加,腹板的弹性屈曲系数也随之增加;对于矩形管截面翼缘,当 $\alpha=1.0$ 时,翼缘的弹性屈曲系数最大,随着(α)的增大,腹板宽度增加,相对薄柔的腹板反过来促进了翼缘的提前屈曲,翼缘的弹性屈曲系数也随之减小。

(2) 相较于截面形状系数,板件宽厚比对弹性屈曲时的板组相关性影响很小,在相同的截面形状系数(α)下,弹性屈曲系数随板件高厚比(H_c/t 、 B_c/t)变化很小,板件高厚比(H_c/t 、 B_c/t)对板组相关性的影响可以忽略不计。

[参考文献]

- [1]周绪红等. 钢结构稳定[M]. 北京: 建筑工业出版社, 2009.
- [2]陈绍蕃, 惠颖. 冷弯型钢局部屈曲的相关性和卷边板件的有效宽度[J]. 西安建筑科技大学学报, 1996(4): 438-443.
- [3]张利若, 陈绍蕃, 顾强. 工形截面纯弯曲梁翼缘腹板的相关屈曲[J]. 西安建筑科技大学学报, 1996(4): 438-443.
- [4]陈绍蕃. 冷弯型钢板件相关屈曲和极限承载力[J]. 建筑钢结构进展, 2002(1): 3-6.
- [5]郭兵, 宋振森, 顾强. I型轴压构件中板件的相关屈曲及宽厚比[J]. 建筑结构, 2001(1): 56-59.
- [6]曾锋, 何保康. 冷弯薄壁矩形钢管屈曲后板组相关性分析[C]. 河北: 全国现代结构工程学术研讨会, 2003.
- [7]龙甘. 冷成型不锈钢矩形管受弯构件板组屈曲相关及设计方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2016.

作者简介: 梁勇 (1984.3-), 同济大学硕士, 嘉兴南洋职业技术学院讲师; 李少华, 工程师。