

文章编号:1673-2049(2012)04-0001-06

冷弯薄壁型钢拼合截面柱轴压承载力计算

周绪红^{1,2}, 李 喆¹, 刘永健¹, 石 宇¹

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 兰州大学 土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要:为了研究冷弯薄壁型钢拼合截面柱的轴压承载力,对各国有关冷弯薄壁型钢拼合截面柱的轴压试验进行了 ANSYS 有限元模拟分析,有限元计算结果与试验结果吻合良好,从而验证了有限元方法的正确性。采用有限元方法分析了构件截面形式、截面尺寸以及长细比对冷弯薄壁型钢拼合截面柱拼合效应的影响,提出了冷弯薄壁型钢拼合截面柱轴压承载力的简化计算方法。分析结果表明:随着长细比的增大,拼合截面柱的拼合效应随之增大。对于主要通过螺钉将腹板进行拼合的构件,当翼缘宽厚比一定时,随着截面宽高比的增大,腹板拼合的整体性增强,从而使拼合效应增大,而截面面积的改变对拼合效应的影响则不是很明显。

关键词:冷弯薄壁型钢;轴压承载力;数值分析;拼合效应;屈曲模式

中图分类号:TU392.1

文献标志码:A

Calculation Method for Bearing Capacity of Cold-formed Steel Built-up Columns Under Axial Compression

ZHOU Xu-hong^{1,2}, LI Zhe¹, LIU Yong-jian¹, SHI Yu¹

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China;

2. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University,
Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: In order to investigate bearing capacity of cold-formed steel built-up columns under axial compression, authors used ANSYS finite element program to analyze the cold-formed steel built-up columns at home and abroad. Compared with experimental results, the validity of the finite element method (FEM) was verified. Furthermore, a detailed parametric study by FEM was carried out to mainly determine the influence of cross-section form, cross-section dimension and slenderness ratio of component for the built-up effect. The simplified calculation method to the bearing capacity of cold-formed steel built-up columns under axial compression was extracted. The analytical results show that with the increase of the slenderness ratio, the built-up effect improves. As for these columns connected with screws through web, when width-thickness ratio of flange is certain, with the increase of width-height ratio of cross-section, the integrity of the built-up web increases, which leads the built-up effect to strengthen. But the influences of different areas of cross-sections are not so obvious.

Key words: cold-formed steel; bearing capacity under axial compression; numerical analysis; built-up effect; bucking mode

收稿日期:2012-10-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51108033);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2012ZD006)

作者简介:周绪红(1956-),男,湖南南县人,教授,博士研究生导师,中国工程院院士,工学博士,E-mail:zhouxuhong@126.com。

0 引言

冷弯薄壁型钢具有优越的强度自重比、截面形式灵活多样、易于加工成型等优点,为了满足房屋中各个部位的受力要求,在冷弯薄壁型钢结构住宅的墙体边角、门窗洞口处等需要加强的部位,广泛采用由多根 C 形和 U 形截面冷弯薄壁型钢经自攻自钻螺钉拼合而成的构件。相对于一个整体截面构件,拼合截面构件的轴压承载力与各构件能否协同工作以及拼合处的螺钉间距有关,加上构件截面形式、长细比及钢材强度等诸多因素的影响,使得冷弯薄壁型钢拼合截面柱的轴压承载力理论计算比较复杂。

北美规范 AISI S100-2007^[1] 中采用修正长细比的方法计算双肢拼合截面柱的轴压承载力,但此方法对复杂多肢拼合截面柱是否适用还有待进一步研究。Whittle 等^[2] 的研究表明,北美规范 AISI S100-2007 修正长细比的设计方法对双肢面对面拼合截面柱轴压承载力的计算偏于保守。Peters^[3] 的研究表明,螺钉连接间距对 C 形和 U 形冷弯薄壁型钢组成的双肢拼合截面柱的受力性能影响较大。Stone 等^[4] 采用试验分析了螺钉连接间距、钢材强度以及截面尺寸对两端铰接开洞口工字形双肢拼合截面柱的轴压承载力的影响。郭彦林等^[5] 采用有限元方法分析了带卷边翼缘工字形拼合截面柱的受力性能,并提出了计算该类拼合截面柱承载力的直接承载力法。李元齐等^[6] 对由 2 个槽形截面组成的高强冷弯薄壁型钢拼合箱形截面柱的受压承载力进行了试验和理论分析,提出了箱形拼合截面柱的承载力计算方法,该方法被《低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程》(JGJ 227—2011)^[7] 所采用。周天华等^[8-10] 对多肢拼合截面柱的轴压性能进行了试验和理论研究,分析了截面形式、构件长细比、连接螺钉间距等因素对拼合截面柱轴压性能的影响。综上所述,拼合截面柱形式多样,影响其承载力的因素较多,目前各国已有的研究成果缺乏对拼合截面柱的拼合效应研究,且没有统一的方法来计算冷弯薄壁型钢轴心受压拼合截面柱的稳定承载力。

本文中笔者建立了考虑材料和几何非线性的有限元模型,对文献[4]中的冷弯薄壁型钢双肢拼合工字形截面柱进行模拟分析,在验证有限元方法正确性的基础上,分析了构件截面形式、截面尺寸以及长细比对拼合截面柱拼合效应的影响,并提出了计算拼合截面柱轴压承载力的简化计算方法。

1 试验概况

文献[4]中试件是由 2 根 C 形冷弯薄壁型钢通过 ST4.8 自攻自钻螺钉将其腹板进行连接,形成拼合工字形截面柱并测试腹板高厚比、螺钉间距以及钢材强度等因素对拼合截面柱轴心受压构件绕弱轴的稳定承载力(本文中无特殊说明均指构件绕 $y-y$ 轴的稳定承载力)的影响。试件长度均为 2 100 mm,板材厚度 t 取 1.40, 1.20, 0.90, 0.84 mm 四种,螺钉间距沿柱长取 305, 610 mm 两种。试件腹板开设椭圆形洞口,洞口直径 38 mm,长度 112 mm,螺钉位置距端部尺寸为 50 mm,距翼缘的尺寸为 19 mm,如图 1 所示,其中, b_w 为腹板高度, b_f 为翼缘宽度, b_l 为卷边长度。试件编号规则见图 2,试件编号及截面尺寸见表 1。钢材的材料性能如表 2 所示。试验采用液压千斤顶进行加载,构件两端与 U 形冷弯薄壁型钢导梁连接,并采用半球铰作为支座。

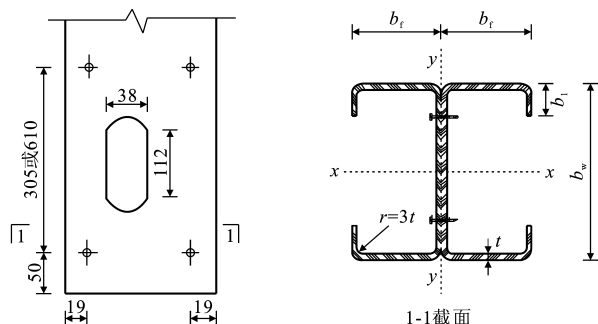


图 1 试件设计(单位:mm)

Fig. 1 Specimen Design (Unit:mm)

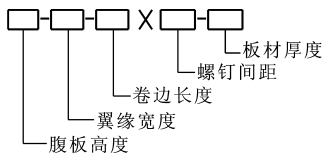


图 2 试件编号规则

Fig. 2 Specimen Labeling Rule

2 开洞口双肢拼合截面柱的有限元模拟

2.1 模型的建立

采用大型结构分析软件 ANSYS 对试件进行模拟分析,选用塑性壳单元 Shell181 模拟拼合截面柱及其端部导梁,采用耦合螺钉连接处节点自由度模拟 ST4.8 自攻自钻螺钉。建模时首先根据冷弯薄壁型钢构件的实际尺寸,输入反映截面形式和截面

表 1 试件编号及截面尺寸
Tab. 1 Numbers and Cross-section Dimensions of Specimens

试件编号	b_w/mm	b_t/mm	b_l/mm	t/mm	$b_t t^{-1}$
152-41-9.5×305-1.40	152	41	9.5	1.40	29.3
152-41-9.5×610-1.40	152	41	9.5	1.40	29.3
92-41-9.5×305-1.20	92	41	9.5	1.20	34.2
92-41-9.5×610-1.20	92	41	9.5	1.20	34.2
92-41-9.5×305-0.90	92	41	9.5	0.90	45.6
92-41-9.5×610-0.90	92	41	9.5	0.90	45.6
152-41-9.5×305-0.84	152	41	9.5	0.84	48.8
152-41-9.5×610-0.84	152	41	9.5	0.84	48.8

表 2 钢材材料性能
Tab. 2 Material Properties of Steel

板材厚度 t/mm	屈服强度 f_y/MPa	抗拉强度 f_u/MPa	弹性模量 $E/10^7\text{ MPa}$	伸长率 $\delta/\%$	泊松比 ν
1.40	388.04	510.98	2.06	22.38	0.3
1.20	297.06	439.35	2.06	27.44	0.3
0.90	205.30	297.03	2.06	20.47	0.3
0.84	266.52	357.47	2.06	19.02	0.3

尺寸的各关键点坐标,接着将关键点连接成线,创建相关的面模拟试件,然后对几何模型进行网格划分,将其转化为有限元模型。由于形状规则,采用精度较高的映射网格划分方法对几何模型进行网格划分,单元大小取为 10 mm×10 mm。

2.2 材料特性

构件参数分析时材料采用理想弹塑性应力-应变($\sigma\epsilon$)关系,如图 3 所示,其中 ϵ_y 为屈服应变。为了防止集中荷载施加位置处导梁发生局部破坏,假定构件两端的导梁为线弹性材料,取弹性模量 $E=2.06\times10^7\text{ MPa}$,泊松比 $\nu=0.3$ 。

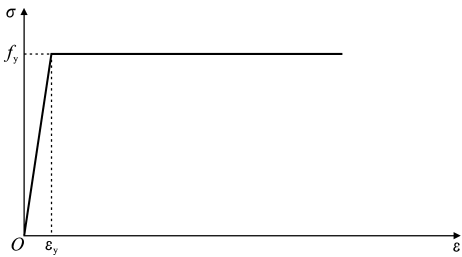


图 3 钢材的本构关系
Fig. 3 Constitutive Relation of Steel

2.3 边界约束和荷载的施加

试验过程中试件两端均为半球形铰支座,因此将支座与导梁形心点的接触简化为一个点,对该接触点进行约束。假定受压构件截面沿翼缘方向为 z 轴,沿腹板方向为 x 轴,沿构件长度方向为 y 轴。为了模拟两端铰接的边界条件,约束上端接触节点沿 x,z 方向的平动自由度 U_x,U_z ,约束下端接触节

点沿 x,y,z 方向的平动自由度 U_x,U_y,U_z ,如图 4 所示。

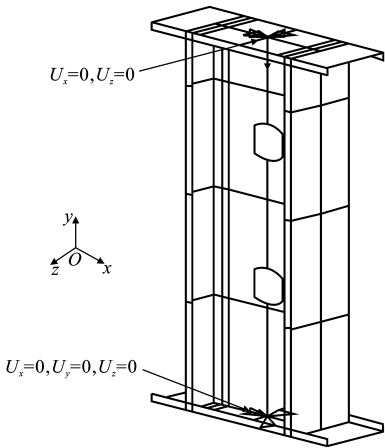


图 4 拼合截面柱有限元模型
Fig. 4 Finite Element Model of Built-up Column

2.4 初始缺陷的施加

拼合截面柱通过特征值屈曲分析得到整体屈服及局部屈曲+畸变屈曲 2 种屈曲模态,如图 5 所示。



图 5 拼合截面柱的屈曲模态
Fig. 5 Bucking Modes of Build-up Columns

进行有限元分析时,先对拼合截面柱进行特征值分析,然后对模型施加相应的初始缺陷,根据《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB 50018—2002)^[11]中的规定,局部初始缺陷采用多波形的局部屈曲模式,取 $\delta=\Delta_l=0.01b_t$, Δ_l 为初始缺陷;整体初始缺陷取为 $l/750$ 。最后采用弧长法进行非线性分析,同时考虑材料非线性和几何非线性。

2.5 有限元分析结果与试验结果的比较

采用 ANSYS 结构分析软件对 8 个试件进行有限元分析,试件承载力的有限元分析结果与试验结果比较见表 3,有限元分析所得试件最大荷载与试

表 3 拼合截面柱有限元分析与试验结果的比较

Tab. 3 Comparisons of Finite Element Analysis Results and Test Results of Build-up Columns

试件编号	P_u^t/kN	P_u/kN	$\frac{P_u}{P_u^t}$	破坏特征
152-41-9.5×300-1.4	80.60	90.00	1.12	L+D+F
152-41-9.5×600-1.4	82.96	88.40	1.07	L+D+F
92-41-9.5×300-1.2	61.09	61.87	1.01	L+D+F
92-41-9.5×600-1.2	51.24	53.70	1.05	L+D+F
92-41-9.5×300-0.9	42.75	45.40	1.06	L+D+F
92-41-9.5×600-0.9	42.48	45.20	1.06	L+D+F
152-41-9.5×300-0.84	38.20	46.50	1.22	L+D+F
152-41-9.5×600-0.84	43.80	44.90	1.02	L+D+F

注： P_u^t 为绕 y - y 轴的试验轴压承载力； P_u 为绕 y - y 轴的有限元计算轴压承载力；L 表示局部屈曲；D 表示畸变屈曲；F 表示整体屈曲。

验荷载相比，误差较小，试件 152-41-9.5×300-1.4 与试件 152-41-9.5×300-0.84 误差较大，可能是由于试验试件存在加工误差及初始缺陷等原因造成的，因为随着螺钉连接间距的减小，试件的承载力有所增大。

有限元分析所得的破坏特征与试验破坏特征相吻合，如图 6 所示。模型在加载初期先出现局部屈曲，随着荷载的增加，局部屈曲逐渐加剧并伴随发生畸变屈曲，最后接近破坏时发生整体弯曲屈曲，从而验证了本文有限元分析方法的正确性。

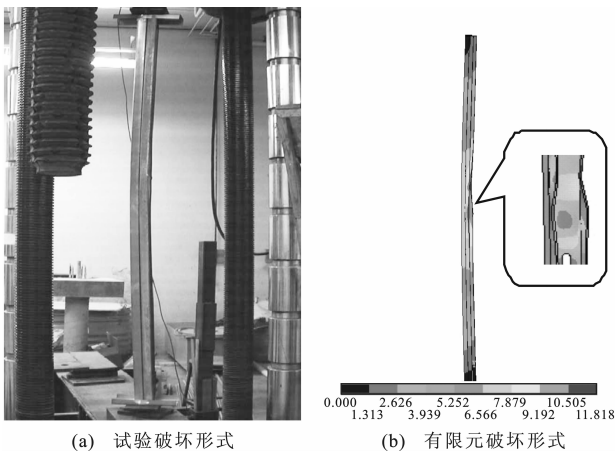


图 6 试件破坏特征比较(单位: mm)

Fig. 6 Comparisons with Failure Patterns of Specimens (Unit: mm)

3 拼合截面柱轴压承载力简化计算

对于拼合截面柱，当截面拼合连接处有可靠保证时，可将拼合截面简化为一个整体截面，然后依据《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB 50018—2002)计算出按整体截面绕 y - y 轴的稳定承载力 N_u ，

$N_u = \varphi A_e f$ ，其中， φ 为构件的稳定系数， A_e 为构件按整体截面计算的有效截面面积， f 为构件材料的强度设计值。通过 ANSYS 程序可以计算出各种参数影响下拼合截面柱绕 y - y 轴的轴压承载力 P_u ，令 $\eta = P_u/N_u$ ，即可得到拼合截面柱按整体截面计算的稳定承载力的折减系数 η 值，即拼合截面柱的拼合效应系数。

影响拼合截面柱轴压承载力的因素很多，试验很难将各种因素均考虑在内，故本文中在验证有限元分析方法正确的基础上，分析了 4 种不同截面形式、截面尺寸以及长细比对拼合柱轴压承载力的影响，拼合截面形式如图 7 所示。

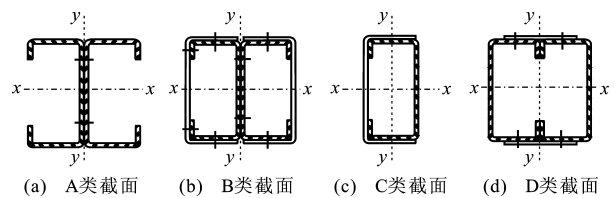


图 7 多肢拼合冷弯薄壁型钢柱的截面形式

Fig. 7 Cross-section Forms of Multi-limbs Cold-formed Steel Built-up Columns

有限元分析时材料采用理想弹塑性应力-应变关系， f_y 取 235 MPa；并假定两端导梁为线弹性材料，取弹性模量 $E = 2.06 \times 10^7$ MPa，泊松比 $\nu = 0.3$ 。板材厚度 $t = 1, 2$ mm；翼缘宽厚比 $b_f/t = 20, 40, 60$ ；截面宽高比 $b_f/b_w = 0.4, 0.6$ ；绕 y - y 轴的长细比 $\lambda = 30, 50, 100$ ；自攻自钻螺钉连接沿着柱轴线方向间距 300 mm。

各构件的轴压承载力及拼合效应系数见表 4， η 值在 0.77~2.30 范围内变化。对表 4 进行比较分析，可以发现：随着长细比的增大，拼合柱的拼合效应即 η 值随之增大。对于 a, b 截面构件主要通过螺钉将腹板进行拼合，因此当翼缘宽厚比一定时，随着截面宽高比的增大，腹板拼合的整体性增强，从而使拼合效应增大。c, d 截面主要通过螺钉连接各构件翼缘，拼合效应较差。在截面面积、截面宽高比、截面拼合形式以及长细比等因素共同影响下， η 值的规律不是很明显，因此本文中建议将 η 值简化为一个常数。

结合文献[8]~[10]中的拼合截面柱试验，按照上述方法得到拼合截面柱按整体截面计算的轴压承载力折减系数 η 值与本文有限元分析得到的 η 值随着绕 y - y 轴的长细比 λ 的变化如图 8 所示， η 值在 0.78~2.28 范围内变化。为了安全起见，当截面拼合连接处有可靠保证时，拼合构件的稳定承载力取

表 4 有限元参数分析结果

Tab. 4 Finite Element Parametric Analysis Results

截面 编号	t/mm	$b_{\text{f}}t^{-1}$	$b_{\text{f}}b_{\text{w}}^{-1}$	$\lambda=30$			$\lambda=50$			$\lambda=100$		
				P_{u}/kN	N_{u}/kN	η	P_{u}/kN	N_{u}/kN	η	P_{u}/kN	N_{u}/kN	η
a	1	20	0.4	48.00	36.85	1.14	47.00	34.56	1.18	41.00	25.5	1.61
			0.6	40.00	27.61	1.45	40.05	25.62	1.56	29.00	17.37	1.67
		40	0.4	68.00	55.06	1.22	67.00	51.18	1.31	66.00	33.62	1.96
			0.6	69.60	51.81	1.34	70.00	48.54	1.26	66.20	33.58	1.62
		60	0.4	68.00	62.23	1.09	67.30	57.98	1.24	50.00	41.20	1.21
			0.6	80.00	59.13	1.35	81.00	54.90	1.48	75.00	36.73	2.04
	2	20	0.4	192.00	146.08	1.15	193.00	138.85	1.21	135.00	99.16	1.19
			0.6	162.00	110.39	1.47	156.00	102.46	1.52	116.00	69.48	1.67
		40	0.4	270.00	220.24	1.23	270.00	204.70	1.32	269.00	134.50	2.00
			0.6	281.00	207.54	1.22	276.00	194.22	1.24	234.32	139.91	1.46
		60	0.4	308.25	248.91	1.24	280.23	231.94	1.21	240.25	164.83	1.46
			0.6	316.47	236.48	1.33	315.68	218.81	1.46	308.00	146.90	2.17
b	1	20	0.4	88.89	66.34	1.34	88.59	61.24	1.44	67.25	41.12	1.63
			0.6	72.69	52.94	1.36	70.58	49.14	1.42	66.00	33.91	1.95
		40	0.4	106.57	115.59	0.92	102.72	106.15	0.98	100.00	67.65	1.48
			0.6	116.67	103.31	1.13	116.58	95.87	1.21	114.39	64.89	1.78
		60	0.4	122.00	133.78	0.91	120.00	122.95	0.98	118.36	81.37	1.45
			0.6	130.47	134.04	0.97	126.74	122.85	1.03	98.28	79.29	1.24
	2	20	0.4	358.85	265.35	1.35	359.00	244.93	1.47	172.85	164.75	1.05
			0.6	280.66	220.83	1.27	283.56	205.00	1.38	210.35	104.40	2.01
		40	0.4	442.62	462.36	0.96	436.54	424.66	1.03	328.25	270.62	1.21
			0.6	450.78	415.54	1.08	439.00	384.21	1.14	424.21	255.66	1.66
		60	0.4	411.67	535.11	0.77	392.39	491.76	0.80	255.36	325.48	0.78
			0.6	485.25	536.12	0.90	481.33	491.45	0.98	430.95	325.48	1.32
c	1	20	0.4	40.32	33.31	1.21	39.66	31.26	1.27	30.58	21.70	1.41
			0.6	35.42	27.61	1.28	33.00	25.61	1.29	27.33	17.68	1.55
		40	0.4	50.33	52.90	0.95	49.00	49.08	0.99	39.63	33.93	1.17
			0.6	55.32	49.58	1.12	54.00	46.40	1.16	46.22	32.89	1.41
		60	0.4	55.00	58.42	0.94	55.00	54.43	1.01	42.28	38.80	1.09
			0.6	60.00	61.83	0.97	52.36	57.42	0.91	45.96	39.31	1.17
	2	20	0.4	145.63	133.22	1.09	135.76	125.05	1.09	103.27	86.79	1.19
			0.6	105.67	110.40	0.96	105.00	102.47	1.02	97.81	70.71	1.38
		40	0.4	201.77	211.62	0.95	200.00	196.30	1.02	155.86	135.74	1.15
			0.6	221.38	198.68	1.11	202.68	185.94	1.09	200.37	131.55	1.52
		60	0.4	243.69	279.46	0.87	240.00	262.85	0.91	205.00	155.15	1.32
			0.6	246.00	247.33	0.99	233.00	229.67	1.01	235.36	157.22	1.50
d	1	20	0.4	38.28	33.87	1.13	37.79	31.44	1.20	22.20	19.70	1.13
			0.6	30.33	27.60	1.10	30.00	25.62	1.17	23.03	17.68	1.30
		40	0.4	55.00	43.26	1.27	69.00	40.03	1.72	63.00	27.49	2.30
			0.6	40.27	41.99	0.96	35.08	38.92	0.90	30.00	26.83	1.12
		60	0.4	41.33	43.26	0.96	40.00	40.39	0.99	35.80	30.86	1.16
			0.6	40.00	46.93	0.85	41.28	43.51	0.95	33.20	29.59	1.12
	2	20	0.4	122.62	133.22	0.92	125.36	125.06	1.00	123.00	86.79	1.42
			0.6	120.33	110.40	1.09	120.00	102.46	1.17	119.00	69.78	1.71
		40	0.4	155.73	173.03	0.90	150.32	160.10	0.94	147.00	110.00	1.34
			0.6	158.33	167.99	0.94	150.23	155.71	0.97	120.70	107.34	1.12
		60	0.4	196.29	173.04	1.13	190.75	161.56	1.18	130.32	117.14	1.11
			0.6	163.26	187.73	0.87	160.37	174.03	0.92	144.80	127.65	1.13

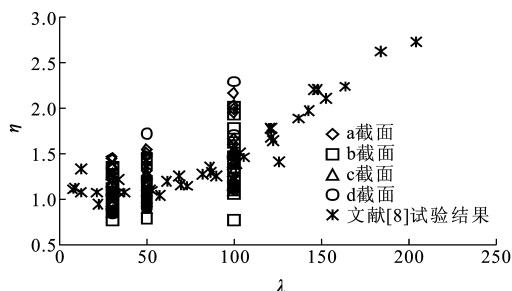


图8 拼合截面柱 η 与 λ 的关系

Fig. 8 Relations Between η and λ of Build-up Columns

其对应整体截面稳定承载力的 0.70 倍,即 $N_u = 0.70\varphi A_e f$ 。

4 结 语

(1)采用大型结构分析软件 ANSYS 对试件进行了模拟分析,有限元计算结果与试验结果吻合良好,验证了本文有限元分析方法的正确性。

(2)采用参数分析,得到不同截面形式、截面尺寸以及长细比对冷弯薄壁型钢拼合截面柱拼合效应的影响。分析结果表明:随着长细比的增大,拼合截面柱的拼合效应即 η 值也随之增大。对于主要通过螺钉将腹板进行拼合的构件,当翼缘宽厚比一定时,随着截面宽高比的增大,腹板拼合的整体性增强,从而使拼合效应增大。而截面面积的改变对拼合效应的影响则不是很明显。

(3)当截面拼合连接处有可靠保证时,拼合构件的稳定承载力可取按整体截面计算的稳定承载力的 0.70 倍,即 $N_u = 0.70\varphi A_e f$ 。

参考文献:

References:

- [1] AISI S100-2007, North American Specification for the Design of Cold-formed Steel Structural Members[S].
- [2] WHITTLE J, RAMSEYER C. Buckling Capacities of Axially Loaded, Cold-formed, Built-up C-channels[J]. Thin-walled Structures, 2009, 47(2): 190-201.
- [3] PETERS G K. An Investigation of the Effects of Fastener Spacing in Build-up Cold-formed Steel Compression Members[D]. Halifax; University of Dalhousie, 2003.
- [4] STONE T A, LABOUBE R A. Behavior of Cold-formed Steel Built-up I-sections[J]. Journal of Thin-

Walled Structures, 2005, 43(12): 1805-1817.

- [5] 郭彦林, 张婀娜. 卷边翼缘工形截面构件在轴心压力作用下的稳定承载力研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(9): 7-14.
- GUO Yan-lin, ZHANG E-nuo. Load-carrying Capacity of Lipped H-section Members Under Axial Load[J]. Industrial Construction, 2009, 39(9): 7-14.
- [6] 李元齐, 姚行友, 沈祖炎, 等. 高强冷弯薄壁型钢抱合箱形截面受压构件承载力试验研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(6): 36-41.
- LI Yuan-qi, YAO Xing-you, SHEN Zu-yan, et al. Load-carrying Capacity of 550 MPa High-strength Cold-formed Thin-walled Steel Built-up Box Section Columns[J]. Building Structure, 2011, 41(6): 36-41.
- [7] JGJ 227—2011, 低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规范[S].
- JGJ 227—2011, Technical Specification for Low-rise Cold-formed Thin-wall Steel Buildings[S].
- [8] 周天华. 拼合截面冷弯薄壁型钢柱轴压承载力试验研究报告[R]. 西安: 长安大学, 2008.
- ZHOU Tian-hua. Report on the Performance of Cold-formed Steel Multi-limbs Built-up Columns Under Axial Compression[R]. Xi'an; Chang'an University, 2008.
- [9] 周天华, 聂少锋, 刘向斌. 冷弯薄壁型钢开口三肢拼合立柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(3): 22-29.
- ZHOU Tian-hua, NIE Shao-feng, LIU Xiang-bin. Experimental Study on Cold-formed Steel Three Limbs Built-up Section Members Under Axial Compression[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(3): 22-29.
- [10] 周天华, 杨东华, 聂少锋, 等. 四肢拼合冷弯薄壁型钢截面立柱轴压性能试验研究及数值分析[J]. 土木工程学报, 2012, 45(1): 77-85.
- ZHOU Tian-hua, YANG Dong-hua, NIE Shao-feng, et al. Experimental Study and Numerical Analysis of the Behavior of Cold-formed Steel Quadruple-C Built-up Section Members Under Axial Compression[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(1): 77-85.
- [11] GB 50018—2002, 冷弯薄壁钢结构技术规范[S].
- GB 50018—2002, Technical Code of Cold-formed Thin-wall Steel Structures[S].