第 28 卷 第 3 期
2011 年 9 月

建筑科学与工程学报
Journal of Architecture and Civil Engineering

Vol. 28 No. 3
Sept. 2011

文章编号:1673-2049(2011)03-0119-08

冷弯薄壁型钢开口三肢拼合立柱轴压性能有限元分析

刘向斌[1],周天华[2],聂少锋[2],吴函恒[2]

(1. 长安大学 基建处,陕西 西安 710064;2. 长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061)

摘要:建立了考虑材料、几何和接触非线性的有限元模型,利用 ANSYS 有限元程序分析了长细比、螺钉连接间距、截面板件最大宽厚比对冷弯薄壁型钢开口三肢拼合立柱轴压性能的影响。结果表明:立柱长细比对 A、B 两类截面拼合立柱轴压承载力和轴压性能有很大影响,随着立柱长细比的增大,立柱轴压极限承载力逐渐降低;当螺钉连接间距为 450、300、150 mm 时,A、B 两类截面拼合立柱轴压极限承载力和刚度变化均不大;由于基本构件板材厚度不同引起截面板件最大宽厚比的不同,对 A、B 两类截面 3 种长度的拼合立柱的承载力和刚度影响很大;对于 A、B 两类截面立柱,当立柱长度和截面厚度相同时,基本构件腹板高度由 89 mm 增加到 140 mm,拼合截面轴压立柱轴压极限承载力变化不大。

关键词:冷弯薄壁型钢;拼合立柱;极限承载力;非线性有限元;轴压性能

中图分类号:TU392.1 **文献标志码**:A

Finite Element Analysis of Cold-formed Thin-walled Steel Three Open Limbs Built-up Columns Under Axial Compression

LIU Xiang-bin[1], ZHOU Tian-hua[2], NIE Shao-feng[2], WU Han-heng[2]

(1. Infrastructure Projects Office, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;
2. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: The finite element model involving materials nonlinearity, geometric nonlinearity and contact nonlinearity was established, the influences of slenderness ratios, screw connection spacings, maximum width-thickness ratios on cold-formed thin-walled steel three open limbs built-up columns under axial compression were analyzed by using ANSYS finite element program. Results show that the slenderness ratio has great influence on the bearing capacity of axial compression and the axial compression performance for class A, B section built-up columns, with the increase of the column slenderness ratio, the ultimate bearing capacity gradually decreases. For two class section built-up columns, when screw connection spacing has arranged 450, 300, 150 mm, the ultimate bearing capacity of axial compression and the rigidity are little affected. For the three different lengths to the two class section built-up columns, as different thicknesses of the basic component plates cause different width-thickness ratios of the section, the ultimate bearing capacity of axial compression and the rigidity are obviously affected. When length and thickness of class A, B section built-up columns are same, and the basic component web height is increased

收稿日期:2011-06-20
基金项目:陕西省自然科学基础研究计划项目(SJ08E$_2$11)
作者简介:刘向斌(1983-),男,陕西凤翔人,工学硕士,E-mail:lbx_818@163.com。

from 89 mm to 140 mm, the ultimate bearing capacity of axial compression is not obviously improved.

Key words: cold-formed thin-walled steel; built-up column; ultimate bearing capacity; nonlinear finite element; axial compression performance

0 引 言

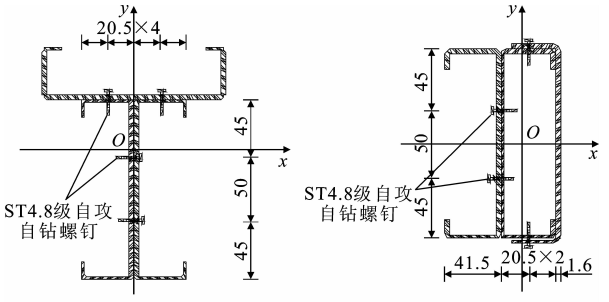
冷弯薄壁型钢结构作为一种新型结构体系，近年来在各国得到了广泛应用，由 C 型和 U 型截面基本构件通过自攻自钻螺钉连接形成各种截面形式的拼合立柱，作为主要承重构件被广泛应用于冷弯薄壁型钢结构住宅墙体边角处、门窗洞口等需要加强的部位[1-2]。各国对其研究相对较少，美国、加拿大、澳大利亚及中国的学者对拼合立柱做了一些相关研究，但是关于轴压拼合立柱的相关研究还很不足。

本文中笔者对 2 种截面类型的冷弯薄壁型钢开口三肢拼合立柱的轴压性能进行了分析研究，主要利用 ANSYS 有限元程序针对影响冷弯薄壁型钢拼合立柱的长细比、螺钉连接间距、板件最大宽厚比进行有限元参数分析，分析其对冷弯薄壁型钢开口三肢拼合立柱轴压性能的影响。

1 有限元模型的建立

1.1 ANSYS 几何模型

拼合立柱由 C 型和 U 型冷弯薄壁型钢基本构件通过自攻自钻螺钉拼合而成，拼合立柱截面类型分为 A、B 两种。拼合立柱截面类型及尺寸见图 1，立柱设计见图 2。



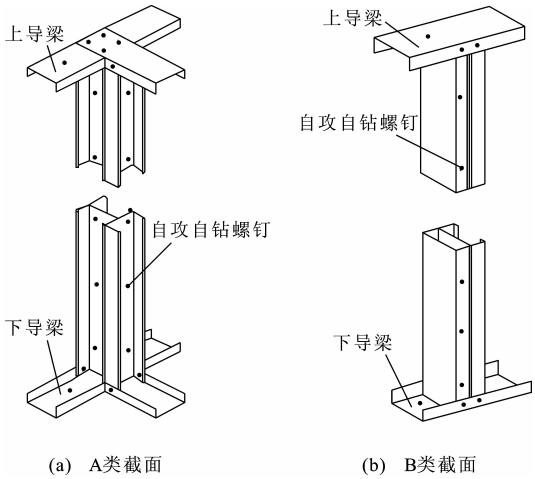
(a) A类截面 (b) B类截面

图 1 构件截面类型及尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Section Types and Dimensions of Components (Unit:mm)

1.2 有限元模型

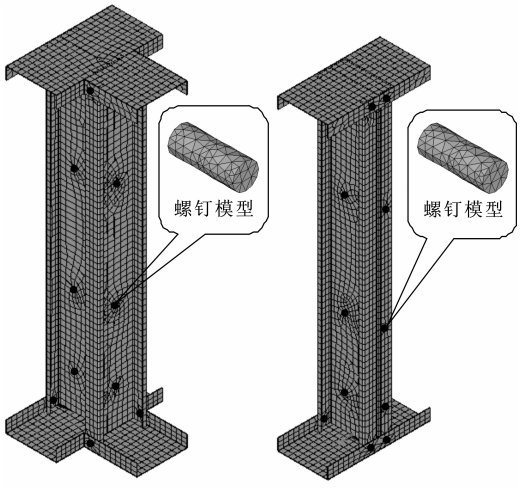
利用 ANSYS 有限元程序进行模拟分析时，参照文献[3]，采用有效应变壳单元 Shell181 模拟立柱和导梁，采用三维结构实体单元 Solid45 模拟 ST4.8 级自攻自钻螺钉。在立柱端部和导梁之间建立点-面接触，立柱各分肢之间建立面-面接触。模型边界条件采用与工程实际情况相近约束：约束模型下端底面所有节点平动自由度 U_x、U_y、U_z，上端顶面所有节点平动自由度 U_x、U_y，将立柱上端顶面所有节点的 z 方向位移耦合到一个关键点上，然后在此关键点上施加 z 方向位移荷载。接触摩擦因数 $\mu=0.3$[4]，摩擦应力 $\sigma=f_y/\sqrt{3}\approx192.86$ MPa，f_y 为屈服强度。立柱有限元模型见图 3。



(a) A类截面 (b) B类截面

图 2 立柱设计

Fig. 2 Designs of Columns



(a) A类截面 (b) B类截面

图 3 立柱有限元模型

Fig. 3 Finite Element Models of Columns

1.3 初始缺陷及求解

立柱在加工制作过程中，存在的初始缺陷可以

分为两大类：几何初始缺陷和残余应力初始缺陷。几何初始缺陷主要包括试件的初弯曲、荷载初偏心和试件的局部缺陷。

参考文献[4]～[7]，本文中模型统一施加$l/750$几何初始缺陷（l 为立柱长度），未考虑残余应力和冷弯效应的影响。

本文有限元分析具有材料非线性、几何非线性、接触非线性的特点，在进行非线性屈曲分析时打开大变形及应力刚化开关。屈服准则选用 Von Mises 屈服准则，强化准则选择等向强化准则[8-18]。

1.4　试件材性

有限元分析时材料应力-应变关系采用文献[7]中的试验材性曲线，见图 4，模型材性弹性模量 $E=223$ GPa，泊松比 $\mu=0.3$，屈服强度 $f_y=334.03$ MPa。

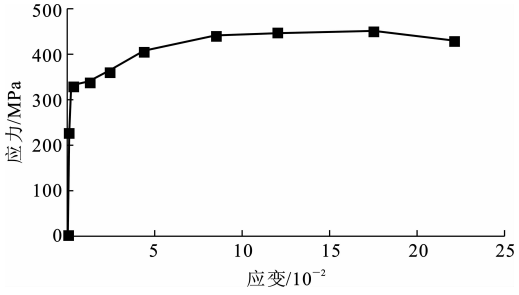


图 4　应力-应变曲线

Fig. 4　Stress-strain Curve

2　有限元参数分析

立柱编号说明：CA-140-1.6-2400-S450 表示 A 类截面拼合立柱，拼合立柱截面中 C 型基本构件截面高度为 140 mm，基本构件板材厚度为 1.6 mm，立柱长度为 2 400 mm，自攻自钻螺钉连接间距为 450 mm，其余依此类推。

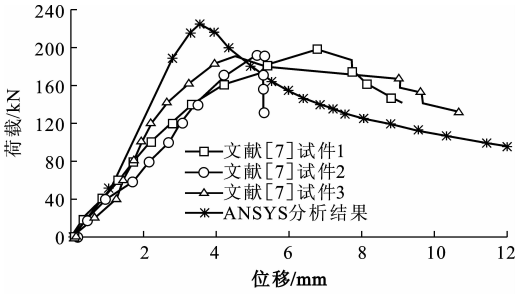
2.1　有限元分析验证

将试件 CA-140-1.6-1200-S300 和 CB-140-1.6-1200-S300 有限元分析结果与文献[7]中所对应试验结果进行对比分析，见图 5。

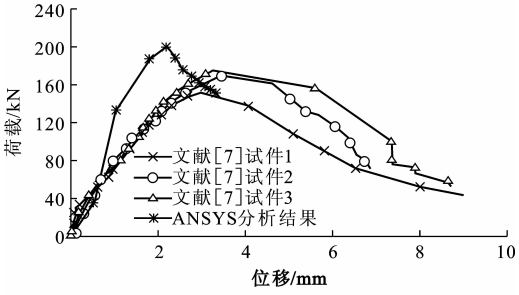
由图 5 可知，有限元分析得到的立柱极限承载力与文献[7]中相应试验试件极限承载力相差在 15%左右，考虑拼合立柱试件加工误差、初始缺陷及试验复杂性等原因，说明本文中采用的有限元分析方法是准确有效的。

2.2　长细比

A 类和 B 类截面立柱分别设计 12 种和 11 种长度，立柱长细比变化范围为 19～160，以获得分布范围较广、较完整的荷载与长细比关系曲线，了解拼合立柱轴压极限承载力随长细比的变化趋势。



(a)　试件CA-140-1.6-1200-S300



(b)　试件CB-140-1.6-1200-S300

图 5　有限元分析验证

Fig. 5　Finite Element Analysis Verifications

2.2.1　破坏模式

立柱的破坏模式随长细比的变化而变化，立柱长细比较大时，对于 A 类截面立柱表现为绕 y 轴的弯扭屈曲破坏，B 类截面立柱表现为绕 y 轴的弯曲屈曲破坏。随着试件长细比减小，试件的破坏形态也发生了变化，A 类截面立柱由弯扭屈曲破坏转变为畸变屈曲破坏，B 类截面立柱也由弯曲破坏模式转变为以畸变屈曲破坏为主并伴有弯曲屈曲的破坏模式。

2.2.2　极限承载力

立柱极限承载力随长细比的变化关系曲线见图 6，有限元分析得到的立柱极限承载力见表 1。

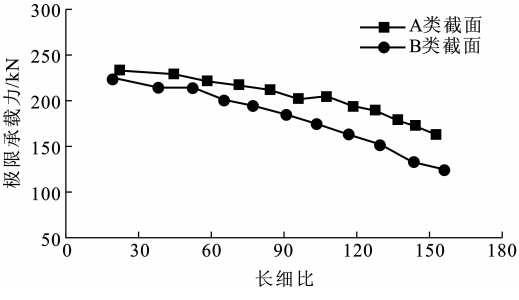


图 6　立柱极限承载力与长细比关系曲线

Fig. 6　Relations of Ultimate Bearing Capacities and Slenderness Ratios of Columns

由图 6 及表 1 可知：对于 A 类截面立柱，长细比变化范围由 22.306 增加到 150.823，其极限承载力从

表 1 不同长细比有限元分析结果

Tab. 1 Finite Element Analysis Results for Different Slenderness Ratios

截面类型	试件编号	立柱长度/mm	长细比	稳定系数	P_A/kN	破坏模式	截面类型	试件编号	立柱长度/mm	长细比	稳定系数	P_A/kN	破坏模式
A 类	CA-140-1.6-3900-S300	3 900	150.823	0.238	163.19	弯扭屈曲	B 类	CB-140-1.6-3600-S300	3 600	154.137	0.229	125.10	弯曲屈曲
	CA-140-1.6-3600-S300	3 600	143.236	0.262	172.96			CB-140-1.6-3300-S300	3 300	141.292	0.269	134.56	
	CA-140-1.6-3300-S300	3 300	135.080	0.292	179.59			CB-140-1.6-3000-S300	3 000	128.447	0.320	154.20	
	CA-140-1.6-3000-S300	3 000	126.283	0.329	189.70			CB-140-1.6-2700-S300	2 700	115.603	0.384	164.05	
	CA-140-1.6-2700-S300	2 700	116.784	0.377	195.96			CB-140-1.6-2400-S300	2 400	102.758	0.466	175.21	
	CA-140-1.6-2400-S300	2 400	106.537	0.440	205.82			CB-140-1.6-2100-S300	2 100	89.913	0.566	186.81	
	CA-140-1.6-2100-S300	2 100	95.515	0.520	204.12			CB-140-1.6-1800-S300	1 800	77.068	0.672	195.98	
	CA-140-1.6-1800-S300	1 800	83.714	0.619	212.40	畸变屈曲		CB-140-1.6-1500-S300	1 500	64.224	0.757	201.79	以畸变屈曲为主，伴随有弯曲屈曲
	CA-140-1.6-1500-S300	1 500	71.155	0.713	217.16			CB-140-1.6-1200-S300	1 200	51.379	0.822	216.18	
	CA-140-1.6-1200-S300	1 200	57.893	0.792	222.07			CB-140-1.6-900-S300	900	38.534	0.871	214.95	
	CA-140-1.6-900-S300	900	44.013	0.851	230.96			CB-140-1.6-450-S300	450	19.267	0.941	227.08	
	CA-140-1.6-450-S300	450	22.306	0.931	233.92								

注：P_A 为极限承载力。

233.92 kN 下降为 163.19 kN，降低 30.24%；对于 B 类截面立柱，长细比由 19.267 增加到 154.137，其极限承载力从 227.08 kN 下降为 125.10 kN，降低 44.91%。可见，拼合立柱轴压极限承载力随着立柱长细比的增大逐渐降低。

综上所述，长细比对拼合立柱的轴压极限承载力和轴压性能有很大影响。

2.3 螺钉连接间距的影响

螺钉连接间距分别为 450、300、150 mm，每种螺钉连接间距对应有 900、1 800、2 700 mm 三种立柱长度，利用有限元模拟来分析螺钉连接间距变化对立柱轴压极限承载力的影响，分析结果见表 2，不同立柱长度的荷载-轴向位移曲线如图 7 所示。

随着螺钉连接间距的减小，拼合立柱的轴压整体工作性能和相连板件的协同工作能力得到提高。由表 2 可知，螺钉连接间距从 450 mm 减小到 150 mm，立柱极限承载力有所提高，但提高幅度不大，A 类和 B 类截面立柱极限承载力分别提高 4.95%、2.86%、3.41%和 9.92%、5.18%、5.57%。由此可以看出，螺钉连接间距分别为 450、300、150 mm 时，其轴压极限承载力变化不大。

表 2 不同螺钉连接间距有限元分析结果

Tab. 2 Finite Element Analysis Results for Different Screw Connection Spacings

截面类型	试件编号	立柱长度/mm	螺钉连接间距/mm	P_A/kN	$\frac{P_{A1}-P_{A2}}{P_{A2}}$/%	截面类型	试件编号	立柱长度/mm	螺钉连接间距/mm	P_A/kN	$\frac{P_{A1}-P_{A2}}{P_{A2}}$/%
A 类	CA-140-1.6-2700-S450	2 700	450	189.57	4.95	B 类	CB-140-1.6-2700-S450	2 700	450	151.65	9.92
	CA-140-1.6-2700-S300		300	193.81			CB-140-1.6-2700-S300		300	158.36	
	CA-140-1.6-2700-S150		150	198.95			CB-140-1.6-2700-S150		150	166.70	
	CA-140-1.6-1800-S450	1 800	450	213.91	2.86		CB-140-1.6-1800-S450	1 800	450	186.64	5.18
	CA-140-1.6-1800-S300		300	216.01			CB-140-1.6-1800-S300		300	190.57	
	CA-140-1.6-1800-S150		150	220.02			CB-140-1.6-1800-S150		150	196.31	
	CA-140-1.6-900-S450	900	450	226.33	3.41		CB-140-1.6-900-S450	900	450	212.15	5.57
	CA-140-1.6-900-S300		300	229.06			CB-140-1.6-900-S300		300	217.39	
	CA-140-1.6-900-S150		150	234.04			CB-140-1.6-900-S150		150	223.96	

注：P_{A1}、P_{A2}分别为螺钉连接间距为 150 mm 和 450 mm 时的 P_A 值。

由图 7 可知，螺钉连接间距对立柱极限承载力的影响主要体现在荷载-轴向位移曲线的下降段，在达到极限承载力以后螺钉连接间距较小立柱的刚度与螺钉连接间距较大的立柱相比下降较为缓慢，但曲线形状基本没有太大的变化。结果表明，螺钉连接间距分别为 450、300、150 mm 时，拼合立柱的轴压刚度变化不大。

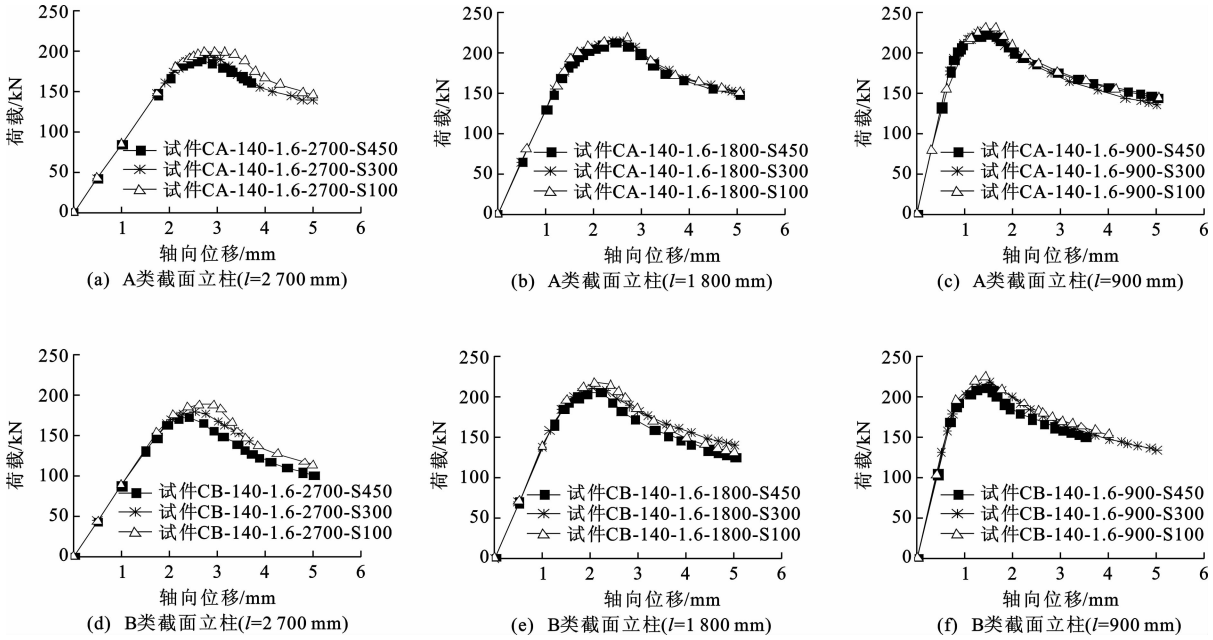


图 7　不同立柱长度荷载-轴向位移曲线

Fig. 7　Load-axial Displacement Curves for Different Lengths of Columns

综上所述，螺钉连接间距对拼合立柱的轴压极限承载力和轴压刚度影响不大。

2.4　截面板件最大宽厚比

对 2 类截面板件最大宽厚比为 87.5、116.67、140.0、175.0 和 55.634、74.17、89.0、111.25 的拼合立柱来进行模拟分析，结果见表 3。不同宽厚比拼合立柱的荷载-轴向位移曲线见图 8，其中 t 为基本构件板材厚度。A、B 两类截面立柱不同板件最大宽厚比有限元分析结果及比较见表 3，立柱极限承载力与板件最大宽厚比关系见图 9，其中 h 为截面高度。

由表 3 及图 8 可知：当截面高度为 140 mm，立柱长度分别为 2 700、1 800、900 mm，板件最大宽厚比由 87.5 增加到 175 时，A、B 两类截面立柱的极限承载力分别降低 59.36%、62.45%、63.04% 和 64.62%、57.66%、60.03%；当截面高度为 89 mm，立柱长度分别为 2 700、1 800、900 mm，板件最大宽厚比由 55.63 增加到 111.25 时，A、B 两类截面立柱极限承载力分别降低 59.73%、62.46%、64% 和 64.71%、66.17%、66.51%；截面板件厚度 $t=0.8$ mm 立柱的极限承载力较厚度 $t=1.6$ mm 立柱降低均在 60%左右。此外，由图 8 还可知，基本构件板材厚度对立柱刚度有显著影响，当厚度变小时，曲线上升段斜率减小，立柱刚度显著降低。综上所述，板件最大宽厚比的不同对 A、B 两类截面 3 种长度拼合立柱的极限承载力和刚度影响很大。

由表 3 及图 9 可知：A、B 两类截面拼合立柱轴压极限承载力 P_A/P'_A 值为 1.00～1.17 和 1.00～1.27，说明对于本文中 A、B 两类截面立柱，当立柱长度和截面厚度相同时，基本构件腹板高度由 89 mm增加到 140 mm，拼合截面轴压立柱轴压极限承载力变化不大。

3　结　语

(1)立柱长细比对 A、B 两类截面拼合立柱轴压承载能力和轴压性能影响很大。

(2)对本文中 A、B 两类截面，螺钉连接间距为 450、300、150 mm 时，立柱极限承载力和刚度变化不大。

(3)截面板件最大宽厚比对 A、B 两类截面 3 种长度拼合立柱的轴压极限承载力和轴压刚度影响很大。

(4)对于本文中 A、B 两类截面立柱，当立柱长度和截面厚度相同时，基本构件腹板高度由 89 mm 增加到 140 mm，拼合截面轴压立柱轴压极限承载力变化不大。

参考文献：

References：

[1]　周绪红，石　宇，周天华，等. 低层冷弯薄壁型钢结构住宅体系[J]. 建筑科学与工程学报，2005，22(2)：1-14. ZHOU Xu-hong，SHI Yu，ZHOU Tian-hua，et al.

表 3 不同宽厚比有限元分析结果

Tab. 3 Finite Element Analysis Results for Different Width-thickness Ratios

试件编号	截面高度/mm	板材厚度/mm	宽厚比	P_A/kN	$\frac{P_2-P_1}{P_1}$/%	试件编号	截面高度/mm	板材厚度/mm	宽厚比	P'_A/kN	$\frac{P'_2-P'_1}{P'_1}$/%	$P_A P'_A{}^{-1}$
CA-140-1.6-2700-S300	140	1.6	87.50	193.81	59.36	CA-89-1.6-2700-S300	89	1.6	55.63	167.23	59.73	1.16
CA-140-1.2-2700-S300		1.2	116.67	127.53		CA-89-1.2-2700-S300		1.2	74.17	115.62		1.10
CA-140-1.0-2700-S300		1.0	140.00	100.36		CA-89-1.0-2700-S300		1.0	89.00	90.49		1.11
CA-140-0.8-2700-S300		0.8	175.00	78.76		CA-89-0.8-2700-S300		0.8	111.25	67.34		1.17
CA-140-1.6-1800-S300		1.6	87.50	216.01	62.45	CA-89-1.6-1800-S300		1.6	55.63	202.57	62.46	1.07
CA-140-1.2-1800-S300		1.2	116.67	142.55		CA-89-1.2-1800-S300		1.2	74.17	125.12		1.14
CA-140-1.0-1800-S300		1.0	140.00	110.73		CA-89-1.0-1800-S300		1.0	89.00	99.89		1.11
CA-140-0.8-1800-S300		0.8	175.00	81.12		CA-89-0.8-1800-S300		0.8	111.25	76.05		1.07
CA-140-1.6-900-S300		1.6	87.50	229.06	63.04	CA-89-1.6-900-S300		1.6	55.63	230.03	64.00	1.00
CA-140-1.2-900-S300		1.2	116.67	149.43		CA-89-1.2-900-S300		1.2	74.17	133.43		1.12
CA-140-1.0-900-S300		1.0	140.00	112.96		CA-89-1.0-900-S300		1.0	89.00	114.31		0.99
CA-140-0.8-900-S300		0.8	175.00	84.67		CA-89-0.8-900-S300		0.8	111.25	82.80		1.02
CB-140-1.6-2700-S300		1.6	87.50	158.36	64.62	CB-89-1.6-2700-S300		1.6	55.63	150.44	64.71	1.05
CB-140-1.2-2700-S300		1.2	116.67	102.27		CB-89-1.2-2700-S300		1.2	74.17	101.05		1.01
CB-140-1.0-2700-S300		1.0	140.00	77.06		CB-89-1.0-2700-S300		1.0	89.00	75.28		1.02
CB-140-0.8-2700-S300		0.8	175.00	56.02		CB-89-0.8-2700-S300		0.8	111.25	53.19		1.05
CB-140-1.6-1800-S300		1.6	87.50	190.57	57.66	CB-89-1.6-1800-S300		1.6	55.63	187.26	66.17	1.02
CB-140-1.2-1800-S300		1.2	116.67	122.68		CB-89-1.2-1800-S300		1.2	74.17	118.11		1.04
CB-140-1.0-1800-S300		1.0	140.00	94.20		CB-89-1.0-1800-S300		1.0	89.00	89.84		1.05
CB-140-0.8-1800-S300		0.8	175.00	80.68		CB-89-0.8-1800-S300		0.8	111.25	63.35		1.27
CB-140-1.6-900-S300		1.6	87.50	217.39	60.03	CB-89-1.6-900-S300		1.6	55.63	217.05	66.51	1.00
CB-140-1.2-900-S300		1.2	116.67	140.82		CB-89-1.2-900-S300		1.2	74.17	130.22		1.08
CB-140-1.0-900-S300		1.0	140.00	108.57		CB-89-1.0-900-S300		1.0	89.00	100.46		1.08
CB-140-0.8-900-S300		0.8	175.00	86.88		CB-89-0.8-900-S300		0.8	111.25	72.70		1.20

注：P_1、P_2 分别为板材厚度为 1.6 mm 和 0.8 mm 时的承载力 P_A 值；P'_1、P'_2 分别为板材厚度为 1.6 mm 和 0.8 mm 时的承载力 P'_A 值。

Cold-formed Steel Framing System of Low-rise Residential Building[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(2): 1-14.

[2] YU W W. Cold Formed Steel Design[M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2000.

[3] 陈精一，蔡国忠. 电脑辅助工程分析——ANSYS 使用指南[M]. 北京：中国铁道出版社，2001.
CHEN Jing-yi, CAI Guo-zhong. Computer Aided Engineering Analysis—ANSYS Using Guide[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2001.

[4] GB 50017—2003，钢结构设计规范[S].
GB 50017—2003, Steel Structure Design Code[S].

[5] 王士奇，董 军. 轴心受压冷成型厚壁钢构件非线性有限元分析[J]. 建筑结构，2004，34(增 1)：349-352.
WANG Shi-qi, DONG Jun. Cold Forming Axial Compression Thick Wall Steel Components Nonlinear Finite Element Analysis[J]. Building Structure, 2004, 34(S1): 349-352.

[6] 王 广. 冷弯薄壁卷边槽钢受压畸变屈曲性能分析[D]. 杭州：浙江大学，2007.
WANG Guang. Analysis of Distortional Buckling of Cold-formed Thin-walled Lipped Channel Column[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.

[7] 刘向斌. 开口三肢冷弯薄壁型钢拼合立柱轴压承载力试验与理论研究[D]. 西安：长安大学，2010.
LIU Xiang-bin. Experimental and Theoretical Research on Axial Compression Bearing Capacity of Three Limbs Open Section Built-up Cold-formed Steel Columns [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.

[8] 张朝晖. ANSYS 11.0 结构分析工程应用实例解析[M]. 2 版. 北京：机械工业出版社，2008.
ZHANG Zhao-hui. ANSYS 11.0 Structure Analysis Engineering Application Examples to Analyze[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2008.

[9] 祝效华，余志祥. ANSYS 高级工程有限元分析范例精选[M]. 北京：电子工业出版社，2004.
ZHU Xiao-hua YU Zhi-xiang. ANSYS Finite Elem-

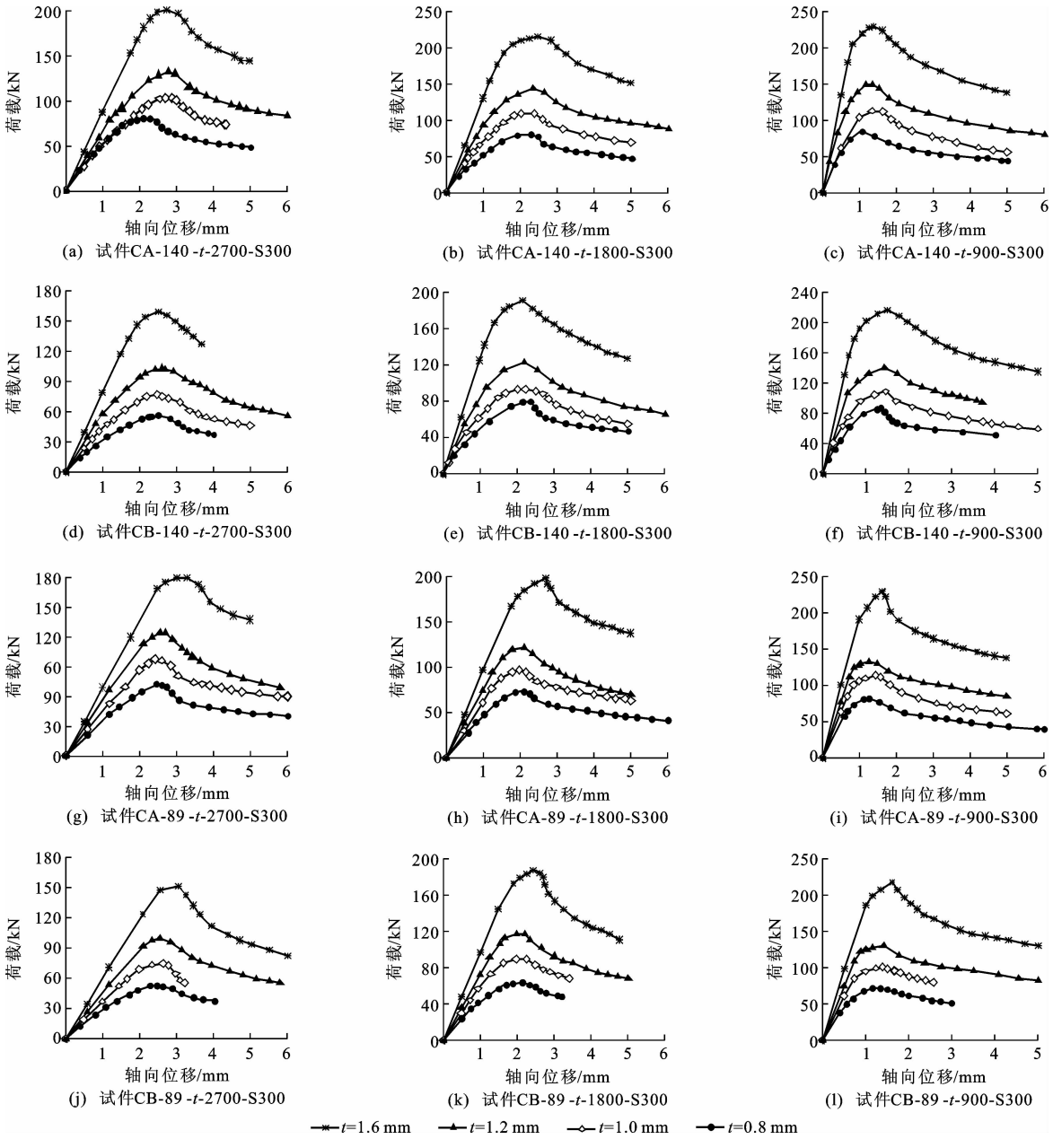


图 8　不同宽厚比立柱的荷载-轴向位移曲线

Fig. 8　Load-axial Displacement Curves for Different Width-thickness Ratios of Columns

ent Analysis of the Senior Project Examples Selection [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.

[10] 徐鹤山. ANSYS 在建筑工程中的应用[M]. 北京：机械工业出版社，2005.
XU He-shan. ANSYS in the Construction Engineering Application[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.

[11] 蒋友琼. 非线性有限元法[M]. 北京：清华大学出版社，2002.
JIANG You-qiong. The Nonlinear Finite Element Method[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.

[12] 刘　涛，杨凤鹏. 精通 ANSYS[M]. 北京：清华大学出版社，2002.
LIU Tao, YANG Feng-peng. Proficient in ANSYS [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.

[13] 李晓莉，常玉珍，吴敏哲. 异形柱和短肢剪力墙的轴压比限值比较分析[J]. 西安建筑科技大学学报：自然科学版，2010，42(4)：504-508.
LI Xiao-li, CHANG Yu-zhen, WU Min-zhe. Comparative Analysis on the Axial Compression Ratio Limit of the Special-shape Column and the Short-shear Wall[J]. Journal of Xi'an University of Architecture

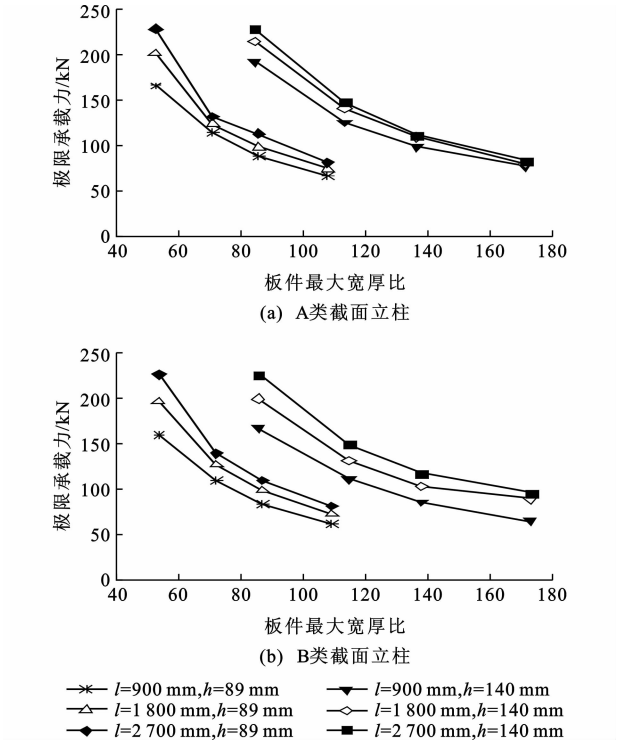


图 9 立柱极限承载力与板件最大宽厚比关系曲线

Fig. 9 Relations of Ultimate Bearing Capacities of Columns and Maximum Width-thickness Ratios of Plates

& Technology: Natural Science Edition, 2010, 42(4):504-508.

[14] 张淑云,白国良,赵来顺. 高层混合结构筒体厚度优化设计[J]. 西安科技大学学报,2010,30(2):175-181.
ZHANG Shu-yun, BAI Guo-liang, ZHAO Lai-shun. Optimal Design of Core Thickness of Hybrid Structures in High-rise Buildings[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2010, 30(2):175-181.

[15] 贡金鑫,李金波,程 玲. 锈蚀钢筋混凝土圆柱加固后的抗震性能[J]. 中国公路学报,2010,23(6):41-48.
GONG Jin-xin, LI Jin-bo, CHENG Ling. Seismic Behavior of Strengthened Corrosion-damaged Circular Reinforced Concrete Columns[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(6):41-48.

[16] 狄 谨,周绪红,孔祥福,等. 波形钢腹板预应力混凝土组合箱梁试验[J]. 长安大学学报:自然科学版,2009,29(5):64-70.
DI Jin, ZHOU Xu-hong, KONG Xiang-fu, et al. Experimental Research on Pre-stressed Concrete Composite Box Girders with Corrugated Steel Webs[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(5):64-70.

[17] 周绪红,林新元,谭冬莲,等. 波纹钢腹板组合箱梁疲劳试验[J]. 中国公路学报,2010,23(4):33-38.
ZHOU Xu-hong, LIN Xin-yuan, TAN Dong-lian, et al. Fatigue Test of Composite Box Beams with Corrugated Steel Webs[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(4):33-38.

[18] 任红伟,刘保东,陈海波. 波纹钢腹板混凝土箱梁的扭转振动分析[J]. 中国公路学报,2008,21(6):64-68.
REN Hong-wei, LIU Bao-dong, CHEN Hai-bo. Analysis of Torsional Vibration of Concrete Box-girder with Corrugated Steel Webs[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(6):64-68.

《空间结构》2012 年征订通知

《空间结构》是由国家教育部主管、浙江大学主办的全国性专业科技期刊,1994 年创刊,面向国内外公开发行。《空间结构》主要刊载空间结构的理论研究、分析设计、试验与实测、建筑造型、施工工艺、管理经验、工程实例、信息报道及有特色的空间结构工程照片等方面的内容。读者对象为科研单位、设计院、生产施工单位、质检管理部门的科技人员及大专院校师生。

《空间结构》为季刊,大 16 开本,96 页,每期定价 15 元,全年共 60 元。本刊兼营广告,10 月起征订下一年度广告。《空间结构》自办发行,请直接汇款至本编辑部订阅,发行组收到汇款后即寄发票并按期寄给订户,务请在汇款用途栏内注明订购《空间结构》份数及年限。订购款按以下方式汇寄:

开户行:工商银行杭州市浙大分理处 **电 话**:(0571)87952414(带传真)
账 号:1202024619914482876 **邮 编**:310006
账 户:浙江大学《空间结构》杂志编辑部 **E-mail**:kjjgzz@163.com
地 址:杭州玉泉浙江大学空间结构研究中心《空间结构》杂志编辑部