

冷弯薄壁型钢拼合箱形截面立柱轴压性能试验研究

聂少锋¹, 周天华¹, 袁涛涛², 高婷婷¹, 吴函恒¹

(1. 长安大学 建筑工程学院, 西安 710061; 2. 西安有色冶金设计研究院, 西安 710001)

摘要:对 17 根冷弯薄壁型钢拼合箱形截面立柱的轴压性能进行试验研究, 截面分为 A、B 两类, 得到了各试件荷载-位移曲线和破坏特征, 并将试验结果与《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB 50018-2002)“有效宽厚比法”和美国相关规范中“直接强度法”、“有效截面法”计算结果进行对比分析。结果表明: LC 和 MC 系列立柱的破坏模式为整体弯曲屈曲, SC 系列立柱则为局部屈曲和端部承压破坏; B 类试件的最大承载力大于 A 类截面试件的最大承载力的 2 倍, 即有“1+1>2”的拼合效应; 对于 A 类截面 LC 系列立柱, GB 50018 和 AISI 规范公式计算结果过于保守, 而对于 MC 和 SC 系列试件, 公式计算结果与试验结果比较吻合; 对于 B 类截面 LC 和 MC 系列试件, 公式计算结果偏于不安全, 而 SC 系列试件, 公式计算最大承载力偏于安全。

关键词:冷弯薄壁型钢; 拼合箱形截面立柱; 轴压; 试验研究; 承载力; 直接强度法; 有效宽度法
中图分类号: TU392.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2012)04-0046-07

Experimental Analysis on Behavior of Cold-formed Steel Box Built-up Section Columns under Axial Compression

NIE Shaofeng¹, ZHOU Tianhua¹, YUAN Taotao², GAO Tingting¹, WU Hanheng¹

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

2. Xi'an Engineering & Research Institute of Nonferrous Metals, Xi'an 710001, P. R. China)

Abstract: 17 specimens of cold-formed steel box built-up section columns were tested under axial compression load. The section forms were divided into two categories; A and B. Load-displacement curves and failure characteristics of specimens were obtained. The test results are compared with the calculated results according to “effective ratio of width to thickness” in code of “Technical code of cold-formed thin-wall steel structures” (GB 50018 - 2002), “effective section method” and “direct strength method” in AISI specification. The results show that: the failure characteristics of LC and MC series columns are overall flexural buckling, while SC series columns are local buckling and ends confined damage. The ultimate bearing capacity of B categories section columns is three times as great as that of A categories section columns, so it has the effect of “1 + 1 > 2”. The results calculated according to “GB50018” and AISI specification are much conservative for LC series columns of A categories section, while in agreement with test results for MC and SC series columns. For B categories section columns, the calculated results are non-conservative for LC and MC series columns, while conservative for SC series columns.

Key words: cold-formed steel; box built-up section column; axial compression; experimental study; bearing capacity; direct strength method; effective width method

收稿日期: 2011-11-25

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研项目(20110205110006); 陕西省自然科学基金项目(2012JQ7014、SJ08E211); 中央高校基本科研业务费专项基金项目(CHD2012TD012)

作者简介: 聂少锋(1981-), 男, 博士, 主要从事结构工程研究, (E-mail) niesf126@126.com.

近年来,冷弯薄壁型钢结构住宅在中国得到迅速发展,并应用于汶川地震灾后重建工程中。具有复杂截面形式的冷弯薄壁型钢拼合箱形截面立柱作为冷弯薄壁型钢结构住宅体系的主要承重构件,常用于墙体边角和门窗洞口等需要加强的部位,该类拼合立柱由C型和U型冷弯薄壁型钢基本构件通过自攻自钻螺钉连接而成^[1-2]。

Peters^[3]通过试验研究不同螺钉间距下闭合箱形截面立柱(C和U型冷弯薄壁型钢构件拼合而成)的受压性能表明:螺钉间距对该类箱形拼合截面立柱的极限承载力影响较大。Young等^[4]对由2个 Σ 型冷弯薄壁型钢基本构件通过自攻自钻螺钉在翼缘处连接而形成的闭合箱形截面立柱的轴压性能进行了相关试验研究,并对直接强度法计算该类截面柱的有效性进行了分析。澳洲AS/NZS规范^[5]和北美AISI规范^[6]规定对于冷弯薄壁型钢双肢拼合截面立柱轴压承载力均采用修正长细比的方法计算。Stone等^[7]对32根由2个C型冷弯薄壁型钢基本构件通过自攻自钻螺钉背靠背连接而成的工形截面立柱进行了轴压试验研究,并将试验结果与北美AISI规范^[6]相关公式计算结果进行对比分析。Whittle^[8]对由C型钢通过不同电焊方式和间距连接而成的拼合箱形截面立柱轴压承载力的试验研究表明:北美AISI规范^[6]中修正长细比的设计方法计算该类闭合截面柱的轴压承载力偏于保守。Wilson等^[9]对48根由2个C型冷弯薄壁型钢基本构件通过焊接而成闭合箱形截面试件的受压性能进行了相关试验研究。武胜等^[10]采用有限元分析方法,对翼缘对焊箱形组合截面和翼缘叠焊箱形组合截面的两类受压构件进行了数值分析,研究表明:两类新型截面构件比单肢截面构件能够显著提高截面平均应力。郭彦林等^[11]对具有翼缘卷边的工形截面构件的轴压受力性能进行了相关研究,在大量数值分析结果的基础上,归纳总结出了卷边工形构件在轴向压力作用下的稳定承载力设计公式。周天华等^[12-13]对G550级高强冷弯薄壁型钢方管截面轴压长柱和短柱进行了试验研究,并给出了高强冷弯薄壁型钢方管截面柱按中国《冷弯薄壁型钢结构技术规范》^[14](GB 50018—2002)(以下简称GB 50018)计算有效宽度时的建议。GB 50018规范对于C型和U型截面拼合立柱的设计规定尚未提及。

笔者对2种新型截面类型的17根冷弯薄壁型钢拼合箱形截面构件进行轴压性能试验研究,并将试验结果与中、美两国现行相关规范“有效宽度法”和“直接强度法”计算结果进行对比分析,为该拼合

箱形截面立柱的推广应用提供理论依据。

1 试验概况

1.1 试件设计

拼合箱形截面立柱构件均通过自攻自钻螺钉由C型(C140×41×14×1.6)和U型(U144×34.5×1.6)冷弯薄壁型钢基本构件连接而成。拼合箱形截面立柱分为A、B两种类型,见图1。

2类拼合箱形截面试件根据长度不同分为短柱(SC)、中柱(MC)和长柱(LC)3组,对应长度分别为450、1200、3000 mm,共计17个试件。其中,SC试件自攻自钻螺钉纵向间距为150 mm,MC和LC试件自攻自钻螺钉纵向间距为300 mm,约为基本构件腹板高度的2倍,并在立柱底部100 mm处加强连接。试件端部连接方式采用工程实际连接方式,即试件两端通过自攻自钻螺钉与U型冷弯薄壁型钢导梁连接。试件两端经过打磨磨平处理,以确保试件纵轴与其端面垂直,且加载后试件与U型导梁垂直紧密接触。试件设计及连接示意图见图2。经材料性试验确定钢材主要性能指标:弹性模量 $E = 2.23 \times 10^5$ MPa,屈服强度 $f_y = 334.04$ MPa,抗拉强度 $f_u = 444.73$ MPa,泊松比 $\nu = 0.3$ 。试件编号及尺寸见表1。

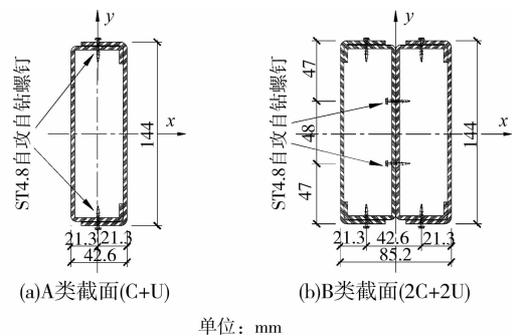


图1 试件截面形式及尺寸

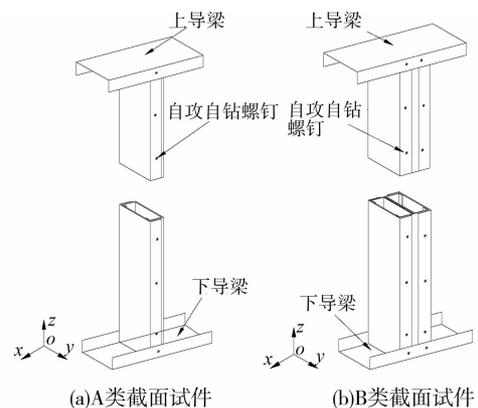


图2 试件设计示意图

1.2 测点布置、试验装置及加载制度

1.2.1 测点布置 在各试件 1/2 高度处横截面相应位置布置应变片,见图 3(a),在试验加载过程中进行物理对中和测定局部屈曲荷载。位移计布置如图 3(b)所示,圆括号中位移计仅在 LC 系列试件中布置,方括号中位移计仅在 MC 系列试件中布置,D1 位移计量测试件的轴向压缩位移,D6 位移计量测试件顶部水平侧移,D7 位移计量测 MC 系列试件距底端部 50 mm 处绕弱轴位移。

1.2.2 试验装置 短柱(SC)和中柱(MC)试件采用 WE-30 型液压万能材料试验机加载,长柱(LC)试件采用液压千斤顶加载,见图 4。试验数据通过 TDS-602 数据采集仪自动采集。

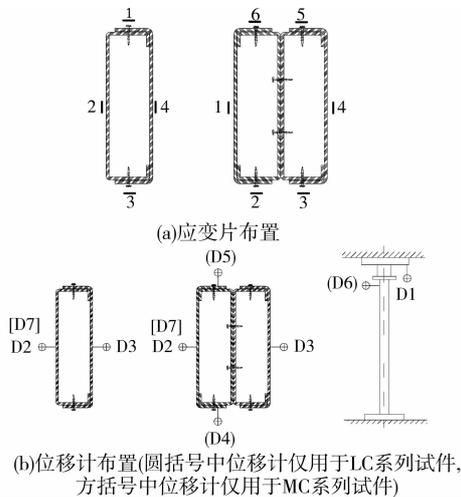


图 3 测点布置

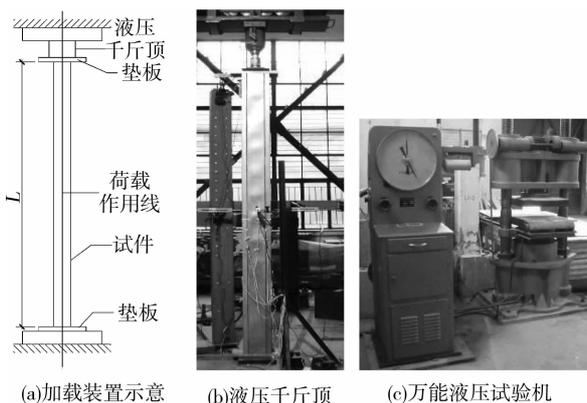


图 4 试件加载装置

1.2.3 加载制度 首先将试件放置在已定位好的刚性垫板(LC 试件)或试验机台座上(MC 和 SC 试件)进行几何对中,然后施加 1 kN 预压荷载进行物理对中。试验加载采取缓慢匀速的手动控制加载,每级加载为预估最大荷载的 5%左右,保持荷载 1~2 min 后进行数据自动采集;当试件截面出现局部

屈曲后减小每级加载幅度为 3 kN;荷载达到最大值后继续加载,直到试件彻底破坏。

1.3 试验过程及试验现象

部分试件破坏特征见图 5。由图 5 可知:A 类截面立柱和 B 类截面立柱破坏模式基本相同。自攻自钻螺钉间距为 150~300 mm 能够保证拼合箱形截面立柱各肢间整体协同工作。

1.3.1 LC 系列试件 在加载初期立柱基本保持挺直,随后立柱发生微小弯曲;LC-A 试件在荷载为 45 kN 时,LC-B 试件在荷载为 115 kN 时,立柱腹板首先出现局部屈曲,见图 5(a)、(b);随着荷载的增加,立柱局部屈曲和弯曲屈曲发展显著,当达到最大荷载时,立柱最终均发生绕弱轴的弯曲失稳而破坏,见图 5(c)。在试件加载过程中,部分自攻自钻螺钉被剪断。

1.3.2 MC 系列试件 在加载初期立柱基本保持挺直,随后立柱腹板首先出现不明显局部屈曲,见图 5(d)、(g);随着荷载的增加,局部屈曲显著发展并出现绕弱轴弯曲屈曲,见图 5(e)、(h);当达到最大荷载时,试件中截面形成局部塑性区域进而发生弯折破坏,见图 5(f)、(i)。

1.3.3 SC 系列试件 在加载初期立柱基本保持挺直,随荷载的增加,立柱腹板出现局部屈曲;当达到最大荷载时,腹板局部塑性凹陷过大而产生弯折破坏,且立柱端部最终被压溃而破坏,见图 5(j)~(l)。

1.4 主要试验结果

典型试件 1/2 柱高处截面的荷载-应变曲线见图 6,荷载-位移曲线见图 7,各试件试验最大承载力 P^u 及破坏模式列于表 1。

各试件最大承载力对比分析见图 8。由图 8 可知:试验中 B 类截面试件是由 2 个 A 类截面试件通过自攻自钻螺钉连接而成,B 类试件的最大承载力大于 A 类截面试件的最大承载力的 2 倍,即有“1+1>2”的拼合效应。

各试件的荷载-轴向位移曲线见图 9、图 10。由图 9、图 10 可知:在加载初期,构件端部便与 U 型冷弯薄壁型钢导梁紧密接触而顶紧;随后,荷载-位移曲线表现出较大的刚度,在达到最大荷载之前,曲线基本呈线弹性;荷载达到最大轴压承载力之后,荷载便迅速下降,轴向位移急剧加大,直至试件彻底破坏。

2 中、美相关规范计算结果与试验结果对比分析

按照中国《冷弯薄壁型钢结构技术规范》^[14](GB 50018-2002)中的“有效宽厚比法”,北美 AISI 规

范^[6]中的“直接强度法”和“有效截面法”分别计算各试件的轴压最大承载力,并进行对比分析,以验证相关规范的适用性。



图5 部分试件破坏特征

2.1 GB 50018—2002 规范“有效宽厚比法”

GB 50018 规定轴心受压构件的强度和稳定性分别按式(1)和式(2)计算。

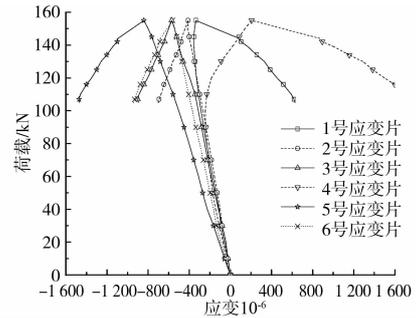


图6 典型试件 LC-B1 荷载-应变曲线

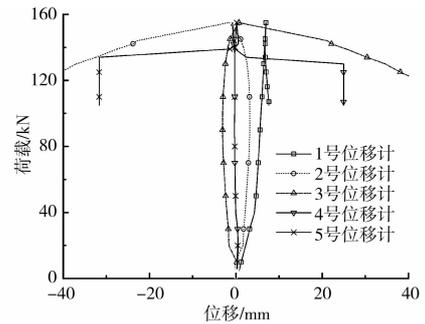


图7 典型试件 LC-B1 荷载-位移曲线

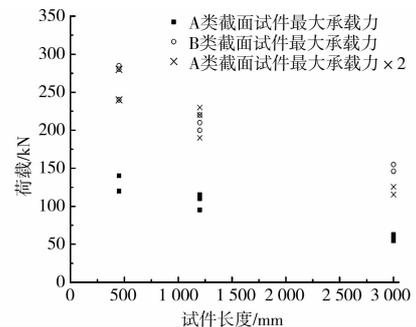


图8 试件最大承载力对比分析

$$N_u = A_{en} f \quad (1)$$

$$N_u = \varphi A_e f \quad (2)$$

其中: A_{en} 为有效净截面面积; A_e 为有效截面面积; f 为钢材强度设计值,为便于公式计算结果与试验结果对比分析,根据材性试验结果,取为钢材屈服强度 334.04 MPa; φ 为轴心受压构件的稳定系数,按式(3)计算。

$$\varphi = \frac{\left[1 + \frac{(1 + \epsilon_0)}{\bar{\lambda}^2}\right]}{2} - \sqrt{\frac{\left[1 + \frac{(1 + \epsilon_0)}{\bar{\lambda}^2}\right]^2}{4} - \frac{1}{\bar{\lambda}^2}} \quad (3)$$

其中: $\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_E}} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}}$, E 为钢材弹性模量; f_y 为钢材屈服强度; σ_E 为欧拉临界应力; λ 为长细比; ϵ_0 为等效偏心率。

加劲板件、部分加劲板件和非加劲板件的有效宽厚比应按式(4)、(5)、(6)计算。

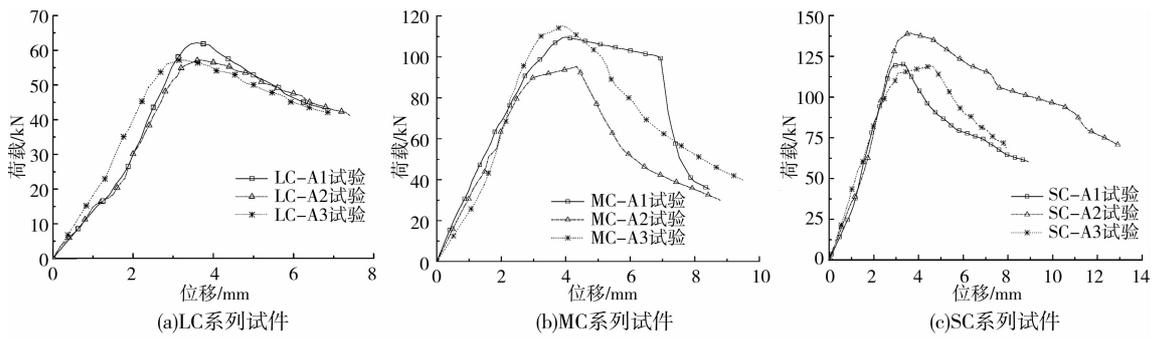


图 9 A 类截面立柱荷载-轴向位移曲线

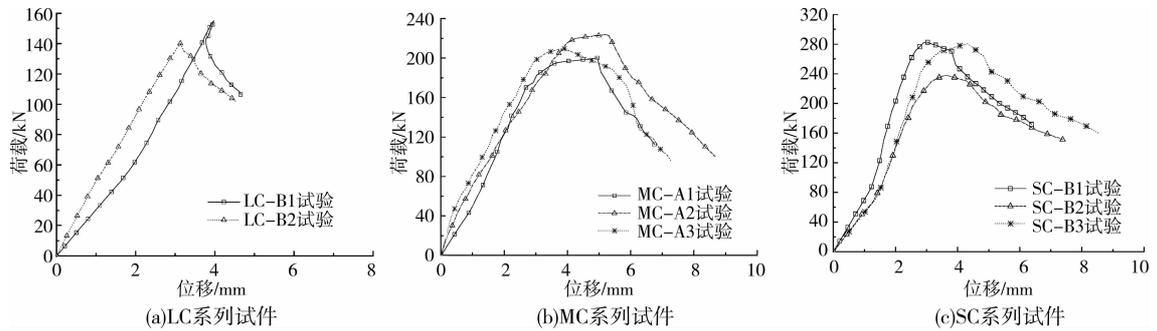


图 10 B 类截面立柱荷载-轴向位移曲线

当 $\frac{b}{t} \leq 18\alpha\rho$ 时, $\frac{b_e}{t} = \frac{b_c}{t}$

当 $18\alpha\rho < \frac{b}{t} < 38\alpha\rho$ 时,

$$\frac{b_e}{t} = \left[\sqrt{\frac{21.8\alpha\rho}{\frac{b}{t}}} - 0.1 \right] \frac{b_c}{t}$$

当 $\frac{b}{t} \geq 38\alpha\rho$ 时, $\frac{b_e}{t} = \frac{25\alpha\rho}{\frac{b}{t}} \frac{b_c}{t}$

(4)

式(7)、(8)、(9)计算。

$$\begin{cases} \lambda_c \leq 1.5 & P_{ne} = (0.658\lambda_c^2) P_y \\ \lambda_c > 1.5 & P_{ne} = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2}\right) P_y \end{cases} \quad (7)$$

(5)

其中 $\lambda_c = \sqrt{\frac{P_y}{P_{cre}}}$, $P_y = Af_y$, P_{cre} 为试件弯曲屈曲荷载、扭转屈曲荷载和弯扭屈曲荷载中的最小值; A 为试件毛截面面积。

(6)

$$\begin{cases} \lambda_1 \leq 0.776 & P_{nl} = P_{ne} \\ \lambda_1 > 0.776 & P_{nl} = \left[1 - 0.15 \left(\frac{P_{cr1}}{P_{ne}}\right)^{0.4}\right] \left(\frac{P_{cr1}}{P_{ne}}\right)^{0.4} P_{ne} \end{cases} \quad (8)$$

其中: b 为板件宽度; b_e 为板件有效宽度; t 为板件厚度; b_c 为板件受压区宽度; α 为计算系数, $\alpha = 1.15 - 0.15\psi$, 当 $\psi < 0$ 时, 取 $\alpha = 1.15$, ψ 为压应力分布不均匀系数; ρ 为计算系数, $\rho = \sqrt{\frac{205k_1k}{\sigma_1}}$, $\sigma_1 = \varphi f_y$; k_1 为板组约束系数; k 为板件受压稳定系数。为与试验结果进行对比分析, 取 $\rho = \sqrt{\frac{235k_1k}{\sigma_1}}$ 。

其中 $\lambda_1 = \sqrt{\frac{P_{ne}}{P_{cr1}}}$, $P_{cr1} = Af_{cr1}$, P_{cr1} 为试件弹性局部屈曲荷载, f_{cr1} 为弹性局部屈曲临界应力。

2.2 北美 AISI 规范“直接强度法”

直接强度法由 Schafer B M 和 Peköz T 教授提出, 其相关计算公式早已列入北美规范 AISI-2006^[15] 中。

$$\begin{cases} \lambda_d \leq 0.561 P_{nd} = P_{ne} \\ \lambda_d > 0.561 P_{nd} = \left[1 - 0.25 \left(\frac{P_{crd}}{P_{ne}}\right)^{0.6}\right] \left(\frac{P_{crd}}{P_{ne}}\right)^{0.6} P_{ne} \end{cases} \quad (9)$$

轴压构件的最大荷载 P_n^D 为整体屈曲荷载 P_{ne} 、局部屈曲荷载 P_{nl} 和畸变屈曲荷载 P_{nd} 的最小值。即 $P_n^D = \min(P_{ne}, P_{nl}, P_{nd})$, 其中, P_{ne} 、 P_{nl} 、 P_{nd} 分别按

其中 $\lambda_d = \sqrt{\frac{P_y}{P_{crd}}}$, $P_{crd} = Af_{crd}$, P_{crd} 为试件弹性畸变屈曲荷载, f_{crd} 为弹性畸变屈曲临界应力。 f_{cr1} 和 f_{crd} 分别采用有限条程序(CUFMS)计算。

“有效宽厚比法”、“有效截面法”和“直接强度法”计算最大承载力与试验最大承载力对比分析见表 1, 各试

件最大承载力随长细比变化曲线对比分析见图 11。

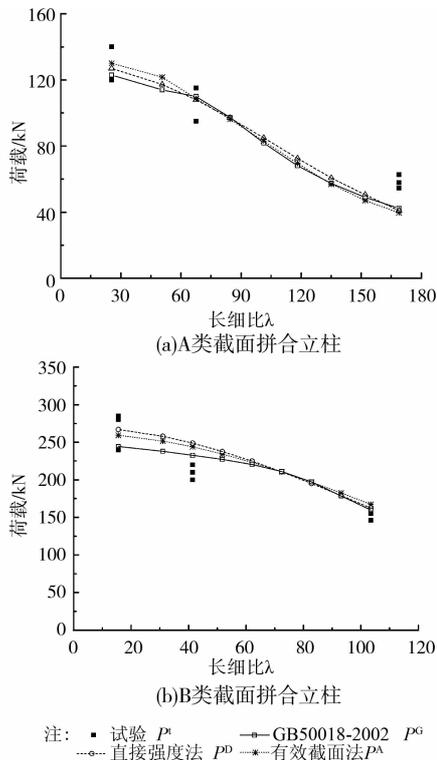


图 11 各试件最大承载力随长细比变化曲线

由表 1 和图 11 试件最大承载力对比分析可知:

1)规范 GB 50018 有效宽厚比法、北美规范有效截面法和直接强度法分别计算得到的立柱轴压最大承载力(P^G 、 P^A 和 P^D),三者相差较小。

2)A 类截面立柱:对于 LC 系列试件,试验最大承载力 P^t 分别大于 GB 50018 计算值 P^G 、有效截面法计算值 P^A 和直接强度法计算值 P^D 27%~46%、38%~59% 和 33%~53%,公式计算结果过于保守。对于 MC 和 SC 系列试件,试验最大承载力与 GB 50018 计算值 P^G 、有效截面法计算值 P^A 和直接强度法计算值 P^D 比较吻合,相差在 -14%~14% 之间。

3)B 类截面立柱:对于 LC 和 MC 系列试件,试验最大承载力 P^t 均小于直接强度法计算最大承载力 P^D 和有效截面法计算最大承载力(P^A 和 P^G),相差在 -20%~-3% 之间,中国规范 GB 50018 和北美规范公式计算最大承载力均偏于不安全;对于 SC 系列试件,除 SC-B2 试件试验最大承载力偏低外,其余 2 个试件试验最大承载力均大于两国规范公式计算值(P^D 、 P^A 和 P^G)8%~17%,即有效截面法和直接强度法计算 B 类截面立柱最大承载力偏于安全。

表 1 试件编号及试验结果对比分析

试件编号	l/mm	GB 50018-2002			北美 AISI 规范			P^t/kN	P^t/P^G	P^t/P^A	P^t/P^D	破坏模式
		A_e/mm^2	λ	φ	P^G/kN	P_A/kN	P_D/kN					
LC-A1	3 000	667.43	168.88	0.193	42.92	39.56	40.97	62.8	1.46	1.59	1.53	绕弱轴弯曲屈曲
LC-A2	3 000	667.43	168.88	0.193	42.92	39.56	40.97	57.8	1.36	1.46	1.41	
LC-A3	3 000	667.43	168.88	0.193	42.92	39.56	40.97	54.5	1.27	1.38	1.33	
MC-A1	1 200	446.96	67.55	0.737	110.01	108.73	107.93	110	1.00	1.01	1.02	绕弱轴弯曲屈曲
MC-A2	1 200	446.96	67.55	0.737	110.01	108.73	107.93	95	0.86	0.87	0.88	
MC-A3	1 200	446.96	67.55	0.737	110.01	108.73	107.93	115	1.05	1.06	1.07	
SC-A1	450	390.70	25.34	0.921	122.91	130.13	126.98	120	0.98	0.92	0.95	板件局部屈曲端部承压破坏
SC-A2	450	390.70	25.34	0.921	122.91	130.13	126.98	140	1.14	1.08	1.10	
SC-A3	450	390.70	25.34	0.921	122.91	130.13	126.98	120	0.98	0.92	0.95	
LC-B1	3 000	1038.37	103.52	0.467	159.73	162.45	167.38	155	0.97	0.95	0.93	绕弱轴弯曲屈曲
LC-B2	3 000	1038.37	103.52	0.467	159.73	162.45	167.38	146	0.91	0.90	0.87	
MC-B1	1 200	809.52	41.41	0.863	232.53	248.84	243.95	200	0.86	0.80	0.82	绕弱轴弯曲屈曲
MC-B2	1 200	809.52	41.41	0.863	232.53	248.84	243.95	220	0.95	0.88	0.90	
MC-B3	1 200	809.52	41.41	0.863	232.53	248.84	243.95	210	0.90	0.84	0.86	
SC-B1	450	767.85	15.53	0.952	244.39	266.83	259.26	285	1.17	1.07	1.10	板件局部屈曲端部承压破坏
SC-B2	450	767.85	15.53	0.952	244.39	266.83	259.26	240	0.987	0.90	0.93	
SC-B3	450	767.85	15.53	0.952	244.39	266.83	259.26	280	1.15	1.05	1.08	

注: l 为试件长度; A_e 为有效截面面积; λ 为试件绕弱轴的长细比,由试件的整体截面特性并按其两端铰接计算; φ 为轴心受压构件的稳定系数; P^G 为 GB 50018 计算最大承载力; P^D 为 AISI“直接强度法”计算最大承载力; P^A 为 AISI“有效截面法”计算最大承载力; P^t 为试验最大承载力。

3 结 论

通过对 2 种截面类型的冷弯薄壁型钢拼合箱形截面构件进行轴压试验研究,分析该类截面构件的轴压性能,并将试验与中、美两国相关规范公式计算结果进行比较,可以得出以下结论:

1)拼合箱形截面立柱,由于其截面板件宽厚比较大,在受压过程中,腹板均发生局部屈曲。LC 和 MC 系列立柱的破坏模式为整体弯曲屈曲,SC 系列立柱则为局部屈曲和端部承压破坏。

2)试验中 B 类截面试件是由 2 个 A 类截面试件通过自攻自钻螺钉连接而成,B 类试件的最大承载力大于 A 类截面试件的最大承载力的 2 倍,即有“1+1>2”的拼合效应。

3)对于 A 类截面 LC 系列试件,试验最大承载力大于中国规范 GB 50018 和北美规范公式计算值 27%~59%,公式计算结果过于保守;对于 A 类截面 MC 和 SC 系列试件,试验最大承载力与公式计算值比较吻合。

4)对于 B 类截面 LC 和 MC 系列试件,试验最大承载力 P^t 均小于中国规范 GB 50018 和北美规范公式计算最大承载力 -20%~-3%,公式计算结果偏于不安全;对于 B 类截面 SC 系列试件,公式计算最大承载力偏于安全。

参考文献:

- [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 Xuhong, SHI Yu, ZHOU Tianhua, et al. 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 Inc, 2000.
- [3] Peters G K. An investigation of the effects of fastener spacing in built-up cold-formed steel compression members [D]. Halifax: University of Dalhousie, 2003.
- [4] Young B, Asce M, Chen J. Design of cold-formed steel built-up closed sections with intermediate stiffeners [J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(5): 727-737.
- [5] AS/NZS. AS/NZS 4600 Cold-formed steel structures, Australian and New Zealand standards [S]. Sydney, 2005.
- [6] American Iron and Steel Institute (AISI). North American specification for the design of cold-formed steel structural members [S]. Washington, DC: American Iron and Steel Institute, 2007.
- [7] Stone T A, Laboube R A. Behavior of cold-formed steel built-up I-sections [J]. Thin-Walled Structures 2005, 43(12):1805-1817.
- [8] Whittle J, Ramseyer C. Buckling capacities of axially loaded, cold-formed, built-up C-channels [J]. Thin-Walled Structures, 2009(47):190-201.
- [9] Wilson R, Andrés G. Evaluation of the slenderness ratio in built-up cold-formed box sections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(6):1805-1817.
- [10] 武胜, 张素梅. 冷弯新型箱形组合截面受压构件性能研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(2):196-202.
WU Sheng, ZHANG Sumei. Behaviors of two new kinds of cold-formed box composite section members under axial compression [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(2):196-202.
- [11] 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 Yanlin, ZHANG Enuo. Load-carrying capacity of lipped H-section members under axial load [J]. Industrial Construction, 2009, 39(9):7-14.
- [12] 周天华, 何保康, 周绪红, 等. 高强冷弯薄壁型钢轴压短柱受力性能试验研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(3):36-44.
ZHOU Tianhua, HE Baokang, ZHOU Xuhong, et al. Experimental research on bearing capacity of high-strength cold-formed steel stub columns [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(3):36-44.
- [13] 周天华, 何保康, 周绪红, 等. 高强冷弯薄壁型钢轴压长柱受力性能试验研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(4):65-71.
ZHOU Tianhua, HE Baokang, ZHOU Xuhong, et al. Experimental research on bearing capacity of high-strength cold-formed steel long columns [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(4):65-71.
- [14] GB 50018—2002 冷弯薄壁型钢结构技术规范[S]. 北京: 中华人民共和国建设部, 2002.
- [15] American Iron and Steel Institute. Direct Strength Method(DSM) Design Guide [S]. Washington D C, 2006.

(编辑 王秀玲)