

高强冷弯薄壁型钢卷边槽形截面偏压构件 试验研究及承载力分析

李元齐¹, 刘翔¹, 沈祖炎¹, 姚行友¹, 秦雅菲²

(1. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092; 2. 博思格蓝瑾建筑钢结构(上海)有限公司, 上海 201613)

摘要:进行了 48 根屈服强度 550MPa 高强冷弯薄壁型钢卷边槽形截面偏心受压构件试验,考虑了不同截面形式、厚度、长细比和荷载偏心方式的影响,研究了这类偏心受压构件的破坏模式、承载力影响因素以及构件承载力计算方法。结果表明:高强冷弯薄壁型钢偏压构件由于材料强度高,截面宽厚比较大,局部屈曲和畸变屈曲的影响较大,我国规范仅考虑了局部屈曲的影响而没有全面考虑畸变屈曲的影响,这使得部分发生畸变屈曲的试件计算结果偏于不安全,但又对不发生畸变屈曲的长细比较大的构件偏于保守。最后,在试验和现有规范方法比较分析的基础上,提出了一种适用于高强冷弯薄壁型钢偏压构件极限承载力的建议计算方法。该建议方法计算所得结果与试验结果吻合较好,且安全可靠,可供设计参考。

关键词:高强冷弯薄壁型钢; 卷边槽形截面; 偏压构件; 中间加劲板件; 畸变屈曲

中国分类号:TU392.1 TU317.1 文献标志码:A

Experimental study and load-carrying capacity analysis of eccentrically-compressed high-strength cold-formed thin-walled steel lipped channel columns

LI Yuanqi¹, LIU Xiang¹, SHEN Zuyan¹, YAO Xingyou¹, QIN Yafei²

(1. Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. BlueScope Steel (Shanghai) Co., Ltd, Shanghai 201613, China)

Abstract: In this paper, ultimate load-carrying capacities of 48 specimens of eccentrically-compressed cold-formed thin-walled lipped channel columns made of 550MPa yield strength steel with different sectional dimensions, wall-thickness, slenderness ratios, and bending axis, have been tested in order to investigate the buckling modes, effects of different factors, and the suitable method for estimating the load-carrying capacity of these members. It is shown that, local buckling and distortional buckling have important effects on high-strength cold-formed thin-walled steel eccentrically-compressed columns due to its high-strength in material and large width to thickness ratio in section, the estimated loading capacities based on ‘Technical code of cold-formed thin-walled steel structures’ (GB 50018—2002) may be unsafe for members with distortional buckling failures, while conservative for members with large slenderness ratios but without distortional buckling failures, since the local buckling effect has been carefully considered in the code, but no enough consideration for distortional buckling effect. Finally, based on the

基金项目:国家科技支撑计划项目(2008BAJ08B11), 教育部博士点基金项目(200802470026)。

作者简介:李元齐(1971—),男,湖北云梦人,工学博士,教授。E-mail:liyq@tongji.edu.cn

收稿日期:2010年1月

0 引言

近年来,高强冷弯薄壁型钢结构在国外低多层冷弯薄壁型钢住宅和冷弯型钢门式刚架体系中开始应用^[1],并取得了一定的工程经验。但是,与传统的 Q235、Q345 冷弯薄壁型钢结构相比,高强冷弯薄壁型钢的钢材强度高、延性差、厚度薄^[2]。我国现行标准 GB 50018—2002《冷弯薄壁型钢结构技术规范》^[3]主要是针对 Q235 及 Q345 钢材,而对于高强冷弯薄壁型钢,还没有相应的规定。因此,为加速推广高强冷弯薄壁型钢在我国的应用,有必要对高强冷弯薄壁型钢构件的受力性能进行理论和试验研究。

目前国内外学者对于高强冷弯薄壁型钢构件的受力性能研究主要集中在轴压构件,文献 [4-11] 均对高强冷弯薄壁型钢轴压构件的受力性能进行了试验研究,文献 [12-15] 也对厚度 2.00mm 以下屈服强度达 550MPa 的冷弯薄壁型钢轴压构件的相关屈曲性能进行了试验与理论分析研究。而对于高强超薄

类型,10 表示近似长细比,EC 表示偏压构件,Y 表示失稳方向(绕 y 轴失稳),1 表示重复试件编号,其余试件类似。

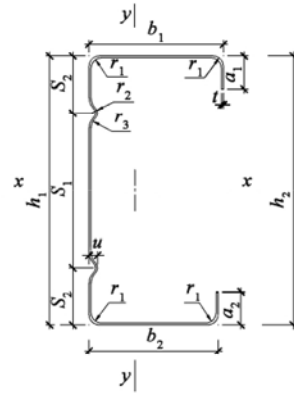


图 1 试件截面

Fig. 1 Section of specimens

试件材料为澳大利亚标准 AS1397 的 G550 高强镀锌锌板材,名义屈服强度为 550MPa。本文采用的

的适用性,并提出适用我国高强冷弯薄壁型钢偏压构件的建议计算方法。

1 试验概况

1.1 试件设计

试件采用高强冷度薄壁卷边槽形截面,包括两种厚度分别为 1.00mm、0.75mm,三个截面类型分别为 SS7510、SS1010、SS1075 (SS 代表单根槽形截面构件,前两位数字 75 和 10 分别代表构件高度 75mm、100mm,后两位数字 10 和 75 分别代表板材厚度 1.00mm、0.75mm),试件截面形式如图 1 所示,试件实测截面尺寸如表 1 所示,表中 h_1 为腹板高度, h_2 为卷边处试件高度。SS7510、SS1010 截面类型为常用截面形式。采用绕弱轴失稳(分别考虑荷载偏向腹板和荷载偏向卷边两种情况)和绕强轴失稳不同偏心加载方式,偏心大小均为 0.5*i*。需指出的是,SS1075 截面类型为非常规类型,其宽厚比已经超过了相关规范的限值,本文为验证宽厚比限值对高强冷弯薄壁型钢偏压构件承载力的影响,特别制作了这种截面构件并对其进行试验研究。试件编号以 SS1010-10-EC-Y-1 为例说明,其中 SS1010 表示截面

图 2 所示,不用液压千斤顶和反力架施加竖向荷载。对于绕强轴失稳的试件,设置平面外支撑,支撑采用脚手架搭设。



(a) 上支座

(b) 下支座

图 2 上、下支座装置图

Fig. 2 Top and bottom pin supports

1.3 测点布置及数据采集

应变片和侧向位移计均布置在试件的中央高度截面上,绕弱轴弯曲的三种截面试件位移计和应变片布置位置相同,如图 3a、3b 所示,绕强轴弯曲的三种截面试件位移计和应变片布置如图 3c、3d 所示。同时在支座上、下端板各布置 4 个竖向位移计以测量支座的位移和转角。位移和应变采用动态电阻应变仪和数据采集仪自动控制 and 记录。各试件安装就位后即进行对中,对中主要采用几何对中,并辅以应变对中。

表 1 试件实测截面尺寸
 Tabel 1 Section sizes of specimens

加载方式	试件编号	设计长度 /mm	实测长度 /mm	腹板		翼缘		卷边	
				h_1 /mm	h_2 /mm	b_1 /mm	b_2 /mm	a_1 /mm	a_2 /mm
绕弱轴 失稳 (偏心 偏向 腹板)	SS7510-50-EC-Y-1	700	701.0	75.83	73.81	39.87	37.39	9.80	9.15
	SS7510-50-EC-Y-2	700	701.0	75.91	73.06	40.01	37.50	9.86	9.63
	SS7510-420-EC-Y-1	1800	1798.0	75.73	72.98	39.87	37.43	9.95	9.33
	SS7510-420-EC-Y-2	1800	1799.0	75.70	73.00	39.83	37.53	9.77	9.72
	SS1010-50-EC-Y-1	1000	998.0	99.85	97.12	53.41	49.43	12.85	11.88
	SS1010-50-EC-Y-2	1000	998.0	100.51	103.26	53.54	50.00	12.06	11.60
	SS1010-400-EC-Y-1	1800	1800.0	100.85	100.54	52.74	49.41	11.87	13.21
	SS1010-400-EC-Y-2	1800	1806.0	100.88	101.32	52.70	49.63	12.30	13.19
	SS1010-450-EC-Y-1	2800	2799.8	100.88	100.55	52.61	49.55	12.37	13.45
	SS1010-450-EC-Y-2	2800	2800.5	100.94	100.23	52.75	49.55	12.26	13.47
	SS1075-50-EC-Y-1	1000	998.0	100.63	103.72	53.28	50.18	12.19	11.23
	SS1075-50-EC-Y-2	1000	998.0	99.82	98.20	53.78	49.35	13.22	11.89
	SS1075-420-EC-Y-1	2200	2200.0	100.48	104.90	52.03	49.24	10.87	12.93
	SS1075-420-EC-Y-2	2200	2200.0	99.66	101.53	51.96	49.53	11.00	13.12
绕弱轴 失稳 (偏心 偏向 卷边)	SS7510-50-EC-Y-3	700	700.0	75.19	75.47	41.19	37.90	8.11	11.07
	SS7510-50-EC-Y-4	700	698.0	75.14	74.97	41.19	37.85	7.95	11.10
	SS7510-420-EC-Y-3	1800	1800.0	75.19	75.16	41.71	37.88	8.37	11.14
	SS7510-420-EC-Y-4	1800	1800.0	75.07	75.26	40.86	37.88	8.27	11.11
	SS1010-50-EC-Y-3	1000	998.0	99.80	97.21	53.27	49.18	12.84	11.89
	SS1010-50-EC-Y-4	1000	998.0	99.83	97.34	53.36	49.17	13.01	11.76
	SS1010-50-EC-Y-5	1000	998.0	99.75	98.67	53.07	49.46	12.83	11.92
	SS1010-400-EC-Y-3	1800	1798.0	99.68	96.87	53.36	49.34	13.11	11.83
	SS1010-400-EC-Y-4	1800	1798.0	99.73	97.32	53.46	49.29	12.76	11.78
	SS1010-450-EC-Y-3	2800	2800.0	99.96	96.32	53.32	49.34	12.95	11.84
	SS1010-450-EC-Y-4	2800	2800.0	100.05	97.73	53.46	49.35	13.19	11.76
	SS1075-50-EC-Y-3	1000	998.0	100.20	102.33	53.39	49.99	12.01	11.41
	SS1075-50-EC-Y-4	1000	998.0	99.67	101.46	53.52	49.61	12.20	11.23
	SS1075-50-EC-Y-5	1000	998.0	99.48	101.18	51.93	49.31	11.73	12.79
	SS1075-420-EC-Y-3	2200	2200.0	99.65	100.66	53.23	49.77	12.42	11.21
	SS1075-420-EC-Y-4	2200	2200.0	99.68	100.84	53.14	50.26	12.13	11.45
SS7510-25-EC-X-1	SS7510-25-EC-X-1	700	701.0	75.82	72.93	39.84	37.39	9.96	9.24
	SS7510-25-EC-X-2	700	701.0	75.86	73.75	39.84	37.55	9.97	9.86
	SS7510-60-EC-X-1	1800	1798.0	75.55	73.80	39.84	37.40	9.80	9.54
SS1010-45-EC-X-1	SS1010-45-EC-X-1	1800	1801.5	100.51	100.10	52.70	49.52	12.55	13.14
	SS1010-45-EC-X-2	1800	1801.0	100.86	101.50	52.75	49.43	12.15	13.23
	SS1010-70-EC-X-1	2800	2800.0	100.84	99.79	52.90	49.18	11.67	13.32
	SS1010-70-EC-X-2	2800	2800.0	100.79	100.03	52.28	49.48	11.80	13.11
	SS1075-25-EC-X-1	1000	999.0	99.33	99.41	52.78	49.08	12.33	12.77
	SS1075-25-EC-X-2	1000	999.5	99.40	98.86	52.39	49.26	12.57	12.35
	SS1075-50-EC-X-1	2200	2200.0	99.42	101.12	51.80	49.51	11.49	12.90
	SS1075-50-EC-X-2	2200	2199.0	99.43	101.08	52.08	49.38	11.74	12.81

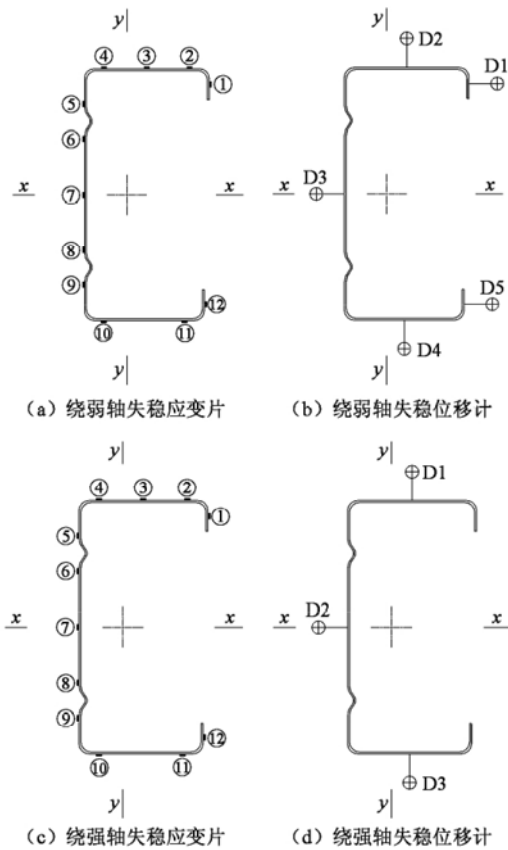


图3 测点布置图

Fig. 3 Gauges arrangement

2 试验结果分析

2.1 试验现象描述

所有试件的试验承载力及破坏模式如表2所示,其中L、D、B分别表示局部屈曲、畸变屈曲和整体弯曲屈曲。试验现象及破坏特征可归结如下:

(1) 大部分试件在整体失稳之前都发生了板件局部屈曲现象。宽厚比越大的试件 ($b/t = 80$),局部屈曲现象出现得越早且越明显,局部屈曲对试件整体屈曲的相关影响较大。

(2) 对于卷边槽形截面构件绕弱轴失稳,且荷载偏向卷边和绕强轴失稳的试件,当长细比较小时,均为畸变屈曲破坏,见图4a和4b。长细比较大时,部分试件有畸变屈曲现象,最终破坏为畸变屈曲、整体屈曲的相关作用,见图4c和4d。

(3) 对于卷边槽形截面绕弱轴失稳,且荷载偏向腹板的试件,当长细比较小时,腹板局部屈曲现象明显,见图4e。当长细比较大时,最终破坏主要是由于局部屈曲和整体屈曲相关作用引起的,见图4f和4g。

2.2 试验主要结果分析

图5、6、7分别给出了三种不同失稳方向的试件SS1010-50-EC-Y-1、SS1010-50-EC-Y-3、SS7510-60-EC-

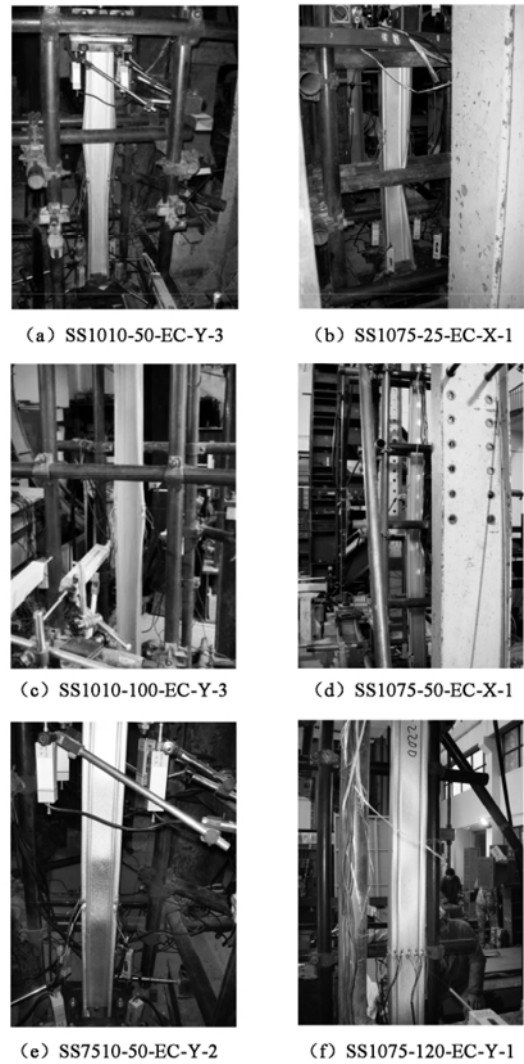
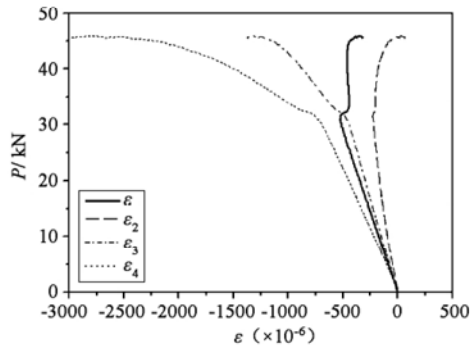


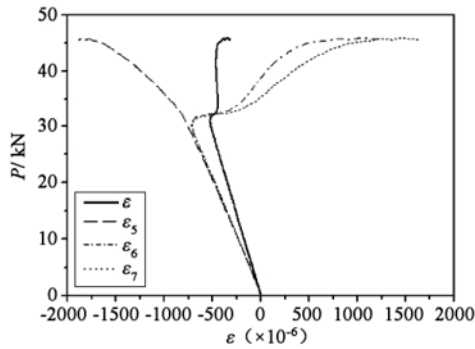
图4 部分试件失稳破坏照片

Fig. 4 Buckling modes of some specimens

X-2的荷载-应变曲线。其中 ε 为全截面平均应变, $\varepsilon_2 \sim \varepsilon_7$ 分别为图3中测点②~⑦的应变。可以看出:在加载初期,随着荷载的增加,翼缘各应变均基本呈线性增加,但荷载偏心一侧的压应变增加速度较快,而荷载偏心另一侧的压应变增加速度较慢。在图5、7中,随着荷载的增大,荷载偏心另一侧的压应变反而随着压力的增加而减小,图5中更转变为拉应变,这表明此时弯矩在边缘纤维上所引起



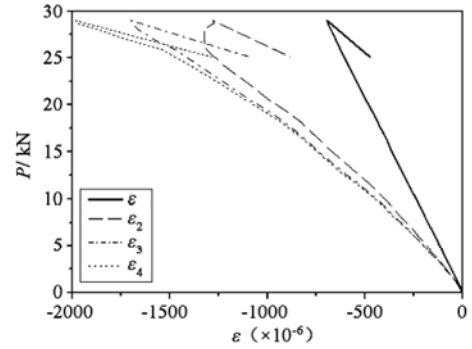
(a) 翼缘



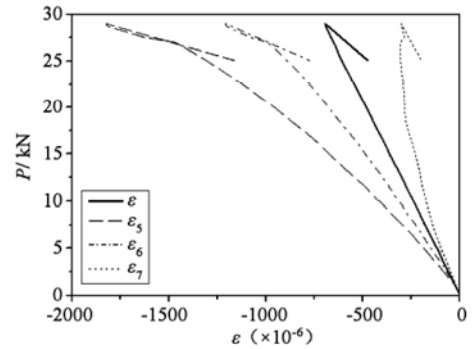
(b) 腹板

图5 试件 SS1010-50-EC-Y-1 荷载-应变曲线

Fig. 5 Load-strain curves of specimen SS1010-50-EC-Y-1



(a) 翼缘



(b) 腹板

图7 试件 SS7510-60-EC-X-2 荷载-应变曲线

Fig. 7 Load-strain curves of specimen SS7510-60-EC-X-2

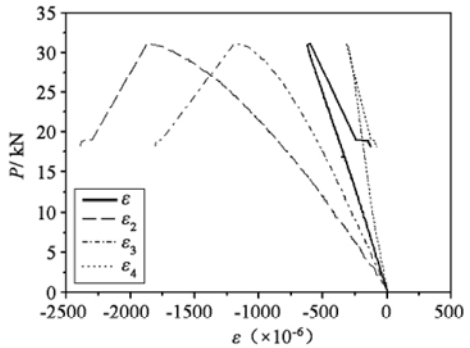
由图5可知对于绕弱轴弯曲且加载点偏向腹板的试件,腹板的荷载-应变曲线在上升过程中出现突变(荷载不增加但应变增大),突变时所对应的荷载为该试件腹板的局部屈曲临界荷载,荷载继续增大是利用了板件的屈曲后强度。

由图6可知对于绕弱轴弯曲且加载点偏向卷边的试件,腹板没有发生如图5的局部屈曲现象,这是因为宽厚比较大的腹板压应力很小,试件在腹板还未达到局部屈曲应力时就已经破坏。

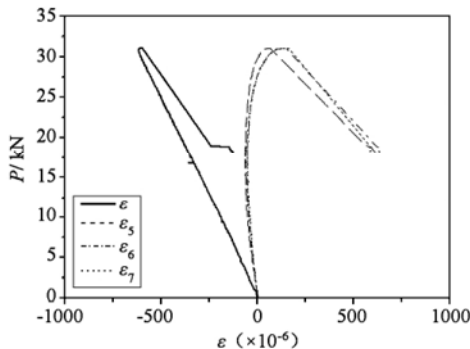
由图7可知对于绕强轴失稳的试件,翼缘应变出现突变,说明试件发生畸变屈曲。

3 试验承载力与计算结果的比较

表2和图8给出了试验结果、规范计算结果同ANSYS计算结果的对比情况。表中, P_u 为构件的极限承载力实测值, P_{ANS} 为有限元软件计算得到的构件极限承载力, P_{Cr} 为按中国规范^[3]考虑板组约束作用计算的构件极限承载力, P_{Cu} 为按中国规范^[3]不考虑板组约束作用计算的构件极限承载力, P_{AU-1} 为按澳洲规范^[17]不考虑畸变屈曲计算的构件极限承载力, P_{AU-2} 为按澳洲规范^[17]考虑畸变屈曲计算的构件极限承载力,采用有限条法CUFSM^[18]按受弯构件计算弯曲畸变屈曲应力。备注一栏中的畸变是指按澳



(a) 翼缘



(b) 腹板

图6 试件 SS1010-50-EC-Y-3 荷载-应变曲线

Fig. 6 Load-strain curves of specimen SS1010-50-EC-Y-3

变已经大于压力所引起的应变。荷载继续增加,当荷载达到极值时,构件突然破坏。

表2 偏压卷边槽形截面试件的实测极限承载力与计算值对比

Table 2 Comparison of ultimate load-carrying capacities between tests and calculated values

试件编号	计算长度 L_0 /mm	偏心方向	P_u /kN	P_{ANS} /kN	P_{Cu} /kN	P_{Cr} /kN	P_{AU-1} /kN	P_{AU-2} /kN	破坏模式	备注
SS7510-50-EC-Y-1	791.0	弱轴(偏向腹板)	40.7	34.4	40.0	40.9	36.5	36.5	L+B	—
SS7510-50-EC-Y-2	791.0	弱轴(偏向腹板)	41.0	34.4	40.0	40.9	36.6	36.6	L+B	—
SS7510-120-EC-Y-1	1888.0	弱轴(偏向腹板)	17.9	15.6	12.4	12.9	12.9	12.9	B	—
SS7510-120-EC-Y-2	1889.0	弱轴(偏向腹板)	18.0	15.6	12.4	12.9	12.9	12.9	B	—
SS1010-50-EC-Y-1	1088.0	弱轴(偏向腹板)	45.9	38.5	44.8	45.4	40.9	40.9	B	—
SS1010-50-EC-Y-2	1088.0	弱轴(偏向腹板)	45.5	38.5	44.9	45.4	40.3	40.3	B	—
SS1010-100-EC-Y-1	1890.0	弱轴(偏向腹板)	26.3	23.0	22.4	22.9	24.3	24.3	B	—
SS1010-100-EC-Y-2	1896.0	弱轴(偏向腹板)	26.8	23.0	22.4	22.8	24.3	24.3	B	—
SS1010-150-EC-Y-1	2889.8	弱轴(偏向腹板)	16.4	14.7	10.8	11.0	12.7	12.7	B	—
SS1010-150-EC-Y-2	2890.5	弱轴(偏向腹板)	16.1	14.7	10.8	11.0	12.7	12.7	B	—
SS1075-50-EC-Y-1	1088.0	弱轴(偏向腹板)	29.7	26.3	29.7	29.3	28.6	28.6	L+B	—
SS1075-50-EC-Y-2	1088.0	弱轴(偏向腹板)	30.3	26.3	29.7	29.4	28.8	28.8	L+B	—
SS1075-120-EC-Y-1	2290.0	弱轴(偏向腹板)	15.3	12.6	10.2	10.3	12.6	12.6	B	—
SS1075-120-EC-Y-2	2290.0	弱轴(偏向腹板)	15.0	12.6	10.2	10.3	12.7	12.7	B	—
SS7510-50-EC-Y-3	790.0	弱轴(偏向卷边)	23.5	24.4	29.8	32.0	30.4	26.7	D	畸变
SS7510-50-EC-Y-4	788.0	弱轴(偏向卷边)	24.4	24.4	29.8	32.1	30.4	26.7	D	畸变
SS7510-120-EC-Y-3	1890.0	弱轴(偏向卷边)	13.1	16.0	10.3	11.2	11.3	10.7	D+B	畸变
SS7510-120-EC-Y-4	1890.0	弱轴(偏向卷边)	13.6	16.0	10.3	11.2	11.3	10.7	D+B	畸变
SS1010-50-EC-Y-3	1088.0	弱轴(偏向卷边)	31.1	29.7	33.8	36.8	35.8	29.9	D	畸变
SS1010-50-EC-Y-4	1088.0	弱轴(偏向卷边)	26.8	29.7	33.8	36.8	35.8	29.9	D	畸变
SS1010-50-EC-Y-5	1088.0	弱轴(偏向卷边)	28.8	29.7	33.8	36.8	35.8	29.9	D	畸变
SS1010-100-EC-Y-3	1888.0	弱轴(偏向卷边)	21.5	19.8	18.1	19.9	21.6	18.9	D	畸变
SS1010-100-EC-Y-4	1888.0	弱轴(偏向卷边)	20.1	19.8	18.0	19.8	21.4	18.8	D	畸变
SS1010-150-EC-Y-3	2890.0	弱轴(偏向卷边)	14.3	15.4	9.0	9.9	11.4	10.7	B	畸变
SS1010-150-EC-Y-4	2890.0	弱轴(偏向卷边)	14.6	15.4	9.0	9.9	11.4	10.7	B	畸变
SS1075-50-EC-Y-3	1088.0	弱轴(偏向卷边)	20.1	19.8	23.6	24.7	25.8	20.4	D	畸变
SS1075-50-EC-Y-4	1088.0	弱轴(偏向卷边)	15.0	19.8	23.5	24.7	25.8	20.4	D	畸变
SS1075-50-EC-Y-5	1088.0	弱轴(偏向卷边)	16.1	19.8	23.6	24.7	25.8	20.4	D	畸变
SS1075-120-EC-Y-3	2290.0	弱轴(偏向卷边)	12.3	10.3	8.9	9.3	11.5	10.1	D	畸变
SS1075-120-EC-Y-4	2290.0	弱轴(偏向卷边)	12.0	10.3	8.9	9.3	11.4	10.1	D	畸变
SS7510-25-EC-X-1	791.0	强轴	40.2	40.5	40.5	43.6	40.2	33.7	D	畸变
SS7510-25-EC-X-2	791.0	强轴	45.0	40.5	40.6	43.8	40.4	34.3	D	畸变
SS7510-60-EC-X-1	1888.0	强轴	31.9	33.5	29.4	31.6	29.7	28.8	B	畸变
SS7510-60-EC-X-2	1888.0	强轴	29.0	33.5	29.4	31.6	29.7	28.9	B	畸变
SS7510-60-EC-X-3	1887.5	强轴	36.1	33.5	29.5	31.6	29.9	29.0	D	畸变
SS1010-15-EC-X-1	688.9	强轴	53.0	50.2	50.2	52.2	49.9	41.0	D+L	畸变
SS1010-15-EC-X-2	687.1	强轴	51.1	50.2	50.1	52.2	49.8	40.8	D+L	畸变
SS1010-25-EC-X-1	1089.5	强轴	46.5	47.6	47.5	49.5	47.9	40.2	D	畸变
SS1010-25-EC-X-2	1089.8	强轴	45.1	47.6	47.5	49.4	47.7	40.1	D	畸变
SS1010-25-EC-X-3	1089.5	强轴	47.4	47.6	47.5	49.4	47.8	40.3	D	畸变
SS1010-45-EC-X-1	1891.5	强轴	43.2	39.3	41.6	43.4	42.5	38.4	L+B	畸变
SS1010-45-EC-X-2	1891.0	强轴	42.7	39.3	41.6	43.2	42.3	38.4	L+B	畸变
SS1010-70-EC-X-1	2890.0	强轴	38.3	32.2	30.9	32.1	33.1	31.4	B	畸变
SS1010-70-EC-X-2	2890.0	强轴	37.0	32.2	30.9	32.2	33.1	31.3	B	畸变
SS1075-25-EC-X-1	1089.0	强轴	26.5	29.1	32.3	33.4	34.5	27.4	D+L	畸变
SS1075-25-EC-X-2	1089.5	强轴	26.6	29.1	32.3	33.4	34.4	27.1	D	畸变
SS1075-50-EC-X-1	2290.0	强轴	22.4	23.6	25.2	26.1	27.6	25.1	D+L	畸变
SS1075-50-EC-X-2	2189.0	强轴	23.4	23.6	25.2	26.1	27.6	25.1	D+L	畸变

洲规范^[17]计算畸变屈曲对承载力有影响的试件。

从各试件的实测数据中可以看出,上、下翼缘宽度并不相同,至少有2~3mm的差别,应属于非对称截面。但考虑到上、下翼缘宽度相差并不多,与容许

公差相差不多,因此在用各规范计算其承载力时仍按单轴对称截面计算。

通过对48根高强冷弯薄壁型钢偏心受压构件的试验结果与计算结果的对比,得到如下结论:

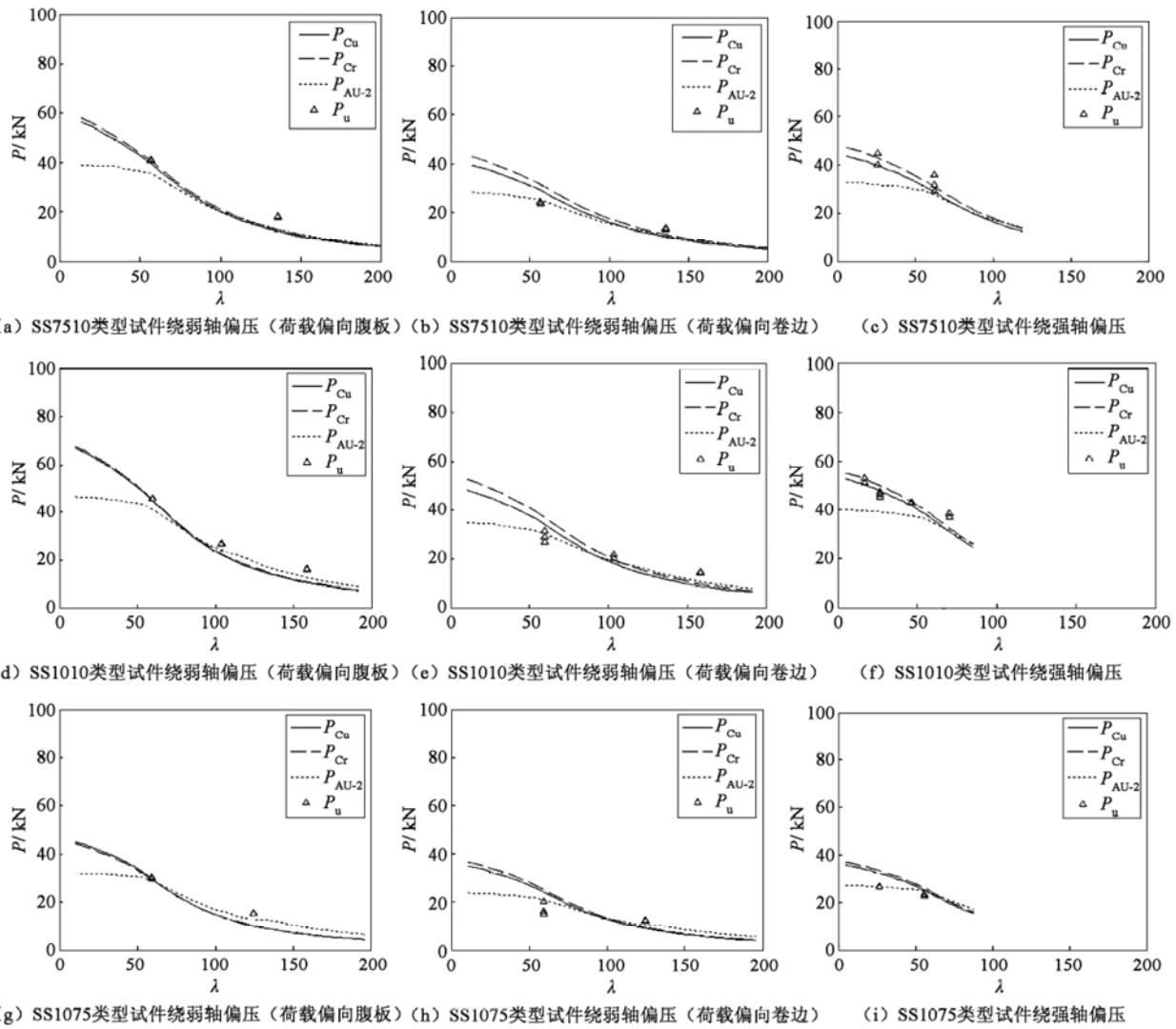


图8 卷边槽形截面类型偏压承载力对比

Fig.8 Comparison of ultimate load-carrying capacities between tests and calculated values

(1) 对于绕弱轴失稳的试件,试件的极限承载力与偏心加载的方式有关,荷载偏向腹板的试件承载力高于荷载偏向卷边的试件。

(2) 高强冷弯薄壁型钢偏压构件由于材料强度高,截面过于展开且壁厚很薄,因此,局部屈曲和畸变屈曲的影响很大,规范^[3]仅考虑了局部屈曲的影响而没有考虑畸变屈曲的影响,这使得部分发生畸变屈曲的试件计算结果偏于不安全。

(3) 从规范^[3]计算结果和试验结果的比较中可以看到,对于长细比较大的构件,规范^[3]计算结果偏小,偏于保守。

4 建议计算方法

高强冷弯薄壁型钢单轴对称截面的偏压构件,根据构件端部约束条件、截面形式和尺寸、构件长度的不同,除了发生常见的屈曲模式如局部屈曲、整体

屈曲外,还容易发生畸变屈曲。而关于畸变屈曲的问题,我国现行规范 GB 50018—2002《冷弯薄壁型钢结构技术规范》^[3]中还没有给出明确的相关规定。

对试验结果与规范计算结果进行比较分析,并结合中国规范^[3]和澳洲规范^[17]的部分规定,提出适用高强冷弯薄壁型钢偏压构件的建议计算方法^[19]为:

$$\frac{N}{N_j} + \frac{\beta_m M}{M_j} \leq 1.0 \quad (1)$$

$$N_j = \min(N_c, N_A) \quad (2)$$

$$M_j = \min(M_c, M_A) \quad (3)$$

式中: N_c 为整体失稳时轴压承载力设计值,按式(4)计算; M_c 为考虑轴力影响的整体失稳受弯承载力设计值,按式(5)计算; N_A 为畸变屈曲时轴压承载力设计值,按式(6)计算,当构件长度小于构件畸变屈曲半波长 L_A 时可不考虑畸变屈曲的影响,即 $N_j = N_c$, 畸变屈曲半波长 L_A 按文献 [19] 的有关公式计算; M_A 为考虑轴力影响的畸变屈曲受弯承载力设计值,按

式(8)计算,当构件长度小于构件畸变屈曲半波长 L_A 时可不考虑畸变屈曲的影响,即 $M_j = M_c$,畸变屈曲半波长 L_A 按文献[19]的有关公式计算; β_m 为等效弯矩系数,按现行国家标准GB 50018—2002《冷弯薄壁型钢结构技术规范》^[3]确定。

$$N_c = \varphi A_e f \quad (4)$$

式中: φ 为轴心受压构件的稳定系数; A_e 为有效截面面积,对中间加劲板件按《低层冷弯薄壁型钢结构房屋建筑技术规程》(报批稿)^[19]计算,且对卷边槽形截面构件绕强轴弯曲时,翼缘屈曲稳定系数取3; f 为构件钢材强度设计值。

$$M_c = (1 - \frac{N}{N_E} \varphi) W_e f \quad (5)$$

式中: N_E 为系数, $N_E = \frac{\pi^2 EA}{1.165 \lambda^2}$; W_e 为有效截面模量,对中间加劲板件按文献[19]计算,且对卷边槽形截面构件绕强轴弯曲时,翼缘屈曲稳定系数取3。

$$N_A = A_{cd} f \quad (6)$$

式中, A_{cd} 为畸变屈曲时有效截面面积,按式(7)计算。

当 $\lambda_{cd} < 1.414$ 时,

$$A_{cd} = A(1 - \lambda_{cd}^2/4) \quad (7a)$$

当 $1.414 \leq \lambda_{cd} \leq 3.600$ 时,

$$A_{cd} = A [0.055 (\lambda_{cd} - 3.6)^2 + 0.237] \quad (7b)$$

其中: λ_{cd} 为确定 A_{cd} 的无量纲长细比, $\lambda_{cd} = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cd}}}$, σ_{cd} 为轴压畸变屈曲应力; A 为构件全截面面积。

$$M_A = (1 - \frac{N}{N_E} \varphi) M_d \quad (8)$$

式中, M_d 为畸变屈曲受弯承载力设计值。

当 $\lambda_{md} \leq 0.673$ 时,

$$M_d = W f \quad (9a)$$

当 $\lambda_{md} > 0.673$ 时,

$$M_d = \frac{W f}{\lambda_{md}} \left(1 - \frac{0.22}{\lambda_{md}}\right) \quad (9b)$$

式中: λ_{md} 为确定 M_d 的无量纲长细比, $\lambda_{md} = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{md}}}$, σ_{md} 为受弯时的畸变屈曲应力,按下列规定计算:对于绕强轴弯曲时,按文献[19]计算,对于绕弱轴弯曲时,采用CUFSM^[18]程序计算, f_y 为材料屈服强度; f 为材料强度设计值; W 为截面抗弯模量。

在式(1)中,令 $N = P$, $M = P e_0$,可求得偏心距 e_0 ,相应偏压构件的极限承载力 P 为:

$$P = \frac{N_j M_j}{M_j + \beta_m e_0 N_j} \quad (10)$$

图9和表3给出了所有卷边槽形截面试件试验结果和建议计算方法计算结果的对比情况。其中: e 为名义偏心距, λ 、 $\bar{\lambda}$ 为试件长细比和相对长细比;

P_u 、 M_u 为实测极限承载力和极限弯矩, P_{cr} 为按中国规范^[3]计算出的偏压构件极限承载力, P 为建议计算方法计算出的构件极限承载力。

由图9和表3可以看出,建议计算方法较好地考虑了畸变屈曲对构件极限承载力的影响,与试验结果吻合较好。对特别制作的宽厚比较大的SS1075截面系列的构件,试验结果相对较低,说明宽厚比过大时,若超过60^[17],失稳形式将更为复杂,现有的承载力计算方法可能偏于不安全。

5 结论

本文共进行了48根偏心受压构件(包括不同截面形式、不同厚度、不同长细比和不同偏心方式)试验,通过对试验结果与各种计算结果进行对比分析研究,可以得到如下结论:

(1) 高强冷弯薄壁型钢偏压构件由于材料强度高,截面宽厚比较大,局部屈曲和畸变屈曲的影响较大,我国规范仅考虑了局部屈曲的影响而没有全面考虑畸变屈曲的影响,这使得部分发生畸变屈曲的试件计算结果偏于不安全,对不发生畸变屈曲的长细比较大的构件偏于保守。

(2) 对于绕弱轴失稳的试件,试件的极限承载力与偏心加载的方式有关。荷载偏向腹板的试件承载力高于荷载偏向卷边的试件。

(3) 通过对试验结果同相关规范计算结果进行比较分析,并结合中国规范^[3]和澳洲规范^[17]的部分规定,提出了适用于高强冷弯薄壁型钢偏压构件考虑畸变屈曲的建议计算方法。

(4) 建议方法计算结果与试验结果比较可知,对板件宽厚比不超过一定限值的高强冷弯薄壁型钢卷边槽形截面偏压构件,建议计算方法较好地考虑了畸变屈曲对试件极限承载力的影响,可供设计、修订规程参考。

参 考 文 献

- [1] 王彦敏,王海峰,陈新豪. G550 高强钢在钢结构住宅中的应用研究 [C] // 第五届全国现代结构工程学术研讨会. 天津:天津大学, 2005:851-855.
- [2] 周天华,何保康,周绪红,等. G550 级高强薄板钢材的材性及应用 [J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22 (2): 43-46. (ZHOU Tianhua, HE Baokang, ZHOU Xuhong, et al. Application and material properties of grade G550 high strength steel thin-plate [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22 (2): 43-46. (in Chinese))
- [3] GB 50018—2002 冷弯薄壁型钢结构技术规范 [S]. (GB 50018—2002 Technical code of cold-formed thin-wall steel structures [S]. (in Chinese))

表3 偏压试件试验结果与中国规范和建议计算方法的比较

Table 3 Comparison between tests and calculated values by China code and suggested method

试件编号	e / mm	λ	$\bar{\lambda}$	P_u / kN	P_{Cr} / kN	$M_u / \text{kN} \cdot \text{m}$	N_j / kN	$M_j / \text{kN} \cdot \text{m}$	P / kN	P_u / P
SS7510-50-EC-Y-1	6.96	56.8	0.9899	40.70	40.90	0.28	51.96	1.08	38.91	1.05
SS7510-50-EC-Y-2	6.96	56.8	0.9899	41.00	40.90	0.29	51.96	1.08	38.91	1.05
SS7510-120-EC-Y-1	6.96	135.6	2.3628	17.90	12.90	0.12	14.98	1.33	13.89	1.29
SS7510-120-EC-Y-2	6.96	135.7	2.3640	18.00	12.90	0.13	14.96	1.33	13.87	1.30
SS1010-50-EC-Y-1	9.13	59.6	1.0380	45.90	45.40	0.42	55.09	1.97	43.89	1.05
SS1010-50-EC-Y-2	9.13	59.6	1.0380	45.50	45.40	0.42	55.09	1.97	43.89	1.04
SS1010-100-EC-Y-1	9.13	103.5	1.8031	26.30	22.90	0.24	29.45	2.18	26.22	1.00
SS1010-100-EC-Y-2	9.13	103.8	1.8088	26.80	22.80	0.24	29.31	2.18	26.11	1.03
SS1010-150-EC-Y-1	9.13	158.3	2.7569	16.40	11.00	0.15	14.34	2.43	13.61	1.21
SS1010-150-EC-Y-2	9.13	158.3	2.7576	16.10	11.00	0.15	14.34	2.43	13.61	1.18
SS1075-50-EC-Y-1	9.18	59.2	1.0728	29.70	29.30	0.27	36.24	1.68	30.24	0.98
SS1075-50-EC-Y-2	9.18	59.2	1.0728	30.30	29.40	0.28	36.24	1.68	30.24	1.00
SS1075-120-EC-Y-1	9.18	124.7	2.2579	15.30	10.30	0.14	15.07	1.93	14.06	1.09
SS1075-120-EC-Y-2	9.18	124.7	2.2579	15.00	10.30	0.14	15.07	1.93	14.06	1.07
SS7510-50-EC-Y-3	6.96	56.8	0.9887	23.50	32.00	0.16	47.04	0.43	26.78	0.88
SS7510-50-EC-Y-4	6.96	56.6	0.9862	24.40	32.10	0.17	47.04	0.43	26.79	0.91
SS7510-120-EC-Y-3	6.96	135.8	2.3653	13.10	11.20	0.09	14.18	0.48	11.75	1.11
SS7510-120-EC-Y-4	6.96	135.8	2.3653	13.60	11.20	0.09	14.18	0.48	11.75	1.16
SS1010-50-EC-Y-3	9.13	59.6	1.0380	31.10	36.80	0.28	57.82	0.73	33.62	0.93
SS1010-50-EC-Y-4	9.13	59.6	1.0380	26.80	36.80	0.24	57.82	0.73	33.62	0.80
SS1010-50-EC-Y-5	9.13	59.6	1.0380	28.80	36.80	0.26	57.82	0.73	33.62	0.86
SS1010-100-EC-Y-3	9.13	103.4	1.8012	21.50	19.90	0.20	28.33	0.77	21.22	1.01
SS1010-100-EC-Y-4	9.13	103.4	1.8012	20.10	19.80	0.18	28.33	0.77	21.22	0.95
SS1010-150-EC-Y-3	9.13	158.3	2.7571	14.30	9.90	0.13	13.76	0.83	11.95	1.20
SS1010-150-EC-Y-4	9.13	158.3	2.7571	14.60	9.90	0.13	13.76	0.83	11.95	1.22
SS1075-50-EC-Y-3	9.18	59.2	1.0728	20.10	24.70	0.18	39.23	0.53	23.36	0.86
SS1075-50-EC-Y-4	9.18	59.2	1.0728	15.00	24.70	0.14	39.23	0.53	23.36	0.64
SS1075-50-EC-Y-5	9.18	59.2	1.0728	16.10	24.70	0.15	39.23	0.53	23.36	0.69
SS1075-120-EC-Y-3	9.18	124.7	2.2579	12.30	9.30	0.11	14.49	0.57	11.75	1.05
SS1075-120-EC-Y-4	9.18	124.7	2.2579	12.00	9.30	0.11	14.49	0.57	11.75	1.02
SS7510-25-EC-X-1	15.15	26.1	0.4549	40.20	43.60	0.61	47.04	1.48	31.72	1.27
SS7510-25-EC-X-2	15.15	26.1	0.4549	45.00	43.80	0.68	47.04	1.48	31.72	1.42
SS7510-60-EC-X-1	15.15	62.3	1.0858	31.90	31.60	0.48	47.04	1.21	29.60	1.08
SS7510-60-EC-X-2	15.15	62.3	1.0858	29.00	31.60	0.44	47.04	1.21	29.60	0.98
SS7510-60-EC-X-3	15.15	62.3	1.0855	36.10	31.60	0.55	47.04	1.21	29.60	1.22
SS1010-15-EC-X-1	20.50	16.8	0.2926	53.00	52.20	1.09	57.82	2.64	39.90	1.33
SS1010-15-EC-X-2	20.50	16.8	0.2919	51.10	52.20	1.05	57.82	2.64	39.90	1.28
SS1010-25-EC-X-1	20.50	26.6	0.4628	46.50	49.50	0.95	57.82	2.54	39.42	1.18
SS1010-25-EC-X-2	20.50	26.6	0.4629	45.10	49.40	0.92	57.82	2.54	39.42	1.14
SS1010-25-EC-X-3	20.50	26.6	0.4628	47.40	49.40	0.97	57.82	2.54	39.42	1.20
SS1010-45-EC-X-1	20.50	46.1	0.8035	43.20	43.40	0.89	57.82	2.28	38.04	1.14
SS1010-45-EC-X-2	20.50	46.1	0.8033	42.70	43.20	0.88	57.82	2.28	38.04	1.12
SS1010-70-EC-X-1	20.50	70.5	1.2276	38.30	32.10	0.79	49.94	2.13	33.72	1.14
SS1010-70-EC-X-2	20.50	70.5	1.2276	37.00	32.20	0.76	49.94	2.13	33.72	1.10
SS1075-25-EC-X-1	20.56	26.5	0.4796	26.50	33.40	0.54	39.23	1.78	27.01	0.98
SS1075-25-EC-X-2	20.56	26.5	0.4798	26.60	33.40	0.55	39.23	1.78	27.01	0.98
SS1075-50-EC-X-1	20.56	55.7	1.0085	22.40	26.10	0.46	39.23	1.56	25.83	0.87
SS1075-50-EC-X-2	20.56	55.7	1.0080	23.40	26.10	0.48	39.23	1.56	25.83	0.91
计算模式不定性均值										1.06
计算模式不定性标准差										0.16
计算模式不定性变异系数										0.15

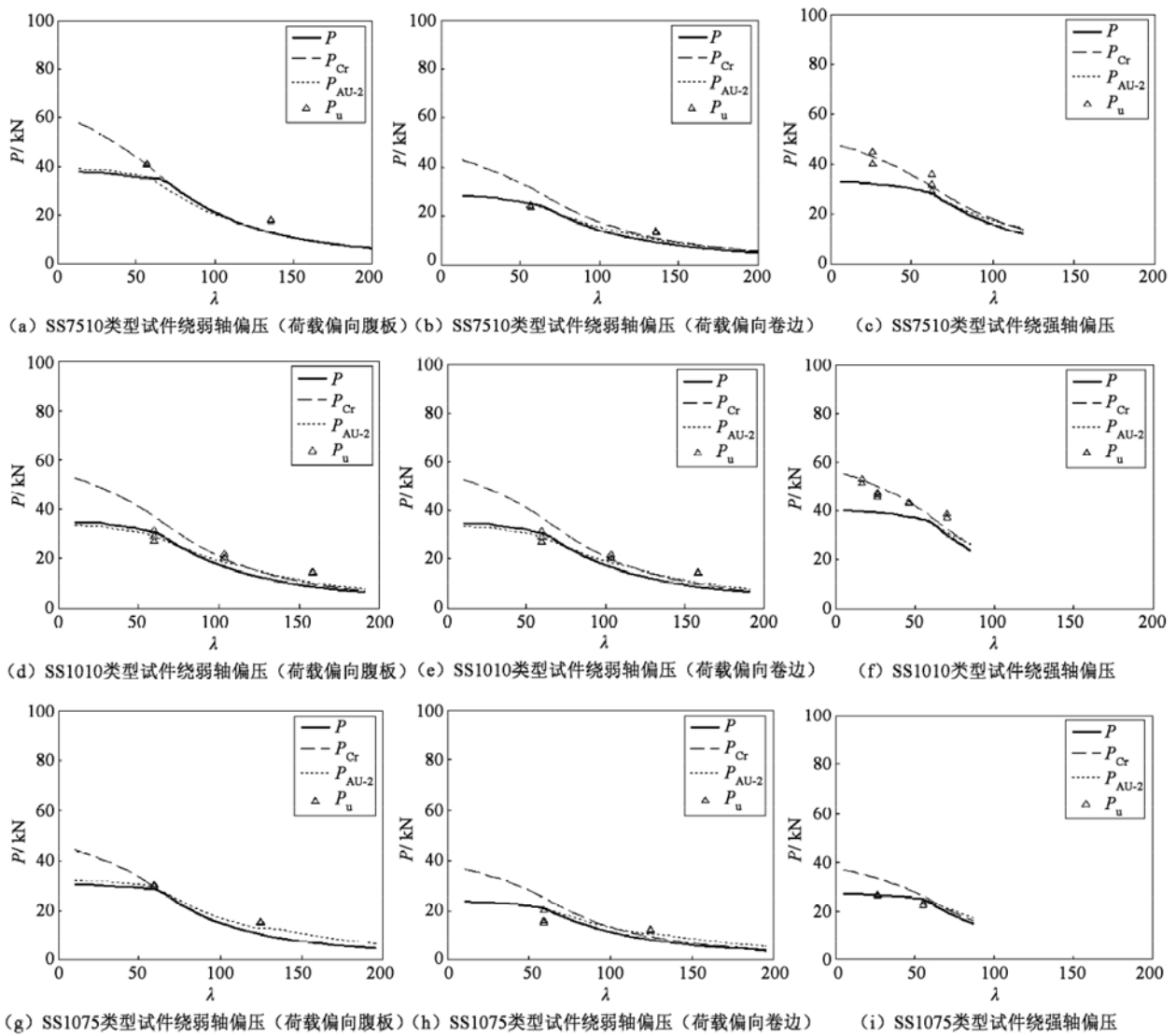


图9 试验承载力与计算结果的比较

Fig.9 Comparison between tests and calculated values of load-carrying capacity

[4] Yang Demao, Hancock G J. Compression tests of high strength steel channel columns with interaction between local and distortional buckling [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130 (12) :1954-1963.

[5] Kwon Y B, Kim B S, Hancock G J. Compression tests of high strength cold-formed steel channels with buckling interaction [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65 (2) :278-289.

[6] Young B, Hancock G J. Compression tests of channels with inclined simple edge stiffener [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129 (10) :1403-1411.

[7] Young B, Rasmussen K J R. Tests of fixed-ended plain channel columns [J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124 (2) :131-139.

[8] Young B, Yan J. Channel columns undergoing local, distortional and overall buckling [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128 (6) :728-736.

[9] Young B. Design of channel columns with inclined edge stiffeners [J]. Journal of Construction Steel Research, 2004, 60 (2) :183-197.

[10] Yan J, Young B. Column tests of cold-formed steel channels with complex stiffeners [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128 (6) :737-745.

[11] Schafer B W. Local, distortional, and Euler buckling of thin-walled columns [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128 (3) :289-299.

[12] 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) : 66-71. (ZHOU Tianhua, HE Baokang, ZHOU Xuhong. Experimental research on bearing capacity of high-strength cold-formed steel long columns [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22 (4) :66-71. (in Chinese))

(下转第 44 页)

- 报批稿 [R]. 北京: 中国建筑标准设计研究院, 2010.
- [11] AS/NZS 4600: 1996 Cold-formed steel structures [S].
- [12] 牟再明, 陈雪庭, 尹德钰, 等. 薄壁型钢结构可靠度分析 [R]. 太原: 太原工学院, 1987. (Mou Zaiming, Chen Xueting, Yin Deyu, et al. Reliability analysis of thin-walled section steel structures [R]. Taiyuan: Taiyuan Polytechnical College, 1987. (in Chinese))
- [13] 李明顺, 胡德炳, 史志华, 等. 建筑结构安全度水准修订评估 [R]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2001.
- [14] GB 50068—2001 建筑结构可靠度设计统一标准 [S]. (GB 50068—2001 Unified standard of reliability design for building structures [S]. (in Chinese))
- [15] GB 50017—2003 钢结构设计规范 [S]. (GB 50017—2003 Code for design of steel structures [S]. (in Chinese))

(上接第 35 页)

- [13] 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 (2): 36-44. (in Chinese))
- [14] 李元齐, 沈祖炎, 王磊, 等. 屈服强度 550MPa 高强冷弯薄壁型钢结构轴压构件承载力计算模型研究 [J]. 建筑结构学报, 2006, 27 (3): 18-25. (LI Yuanqi, SHEN Zuyan, WANG Lei, et al. Analysis method for load-carrying capacity of 550MPa high-strength cold-formed thin-walled steel columns subjected to axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2006, 27 (3): 18-25. (in Chinese))
- [15] 李元齐, 沈祖炎, 王磊, 等. 屈服强度 550MPa 高强冷弯薄壁型钢结构轴心受压构件可靠度分析 [J]. 建筑结构学报, 2006, 27 (3): 26-33. (LI Yuanqi, SHEN Zuyan, WANG Lei, et al. Reliability analysis of 550MPa high-strength cold-formed thin-walled steel structures [J]. Journal of Building Structures, 2006, 27 (3): 26-33. (in Chinese))
- [16] 沈祖炎, 李元齐, 王彦敏, 等. 轴压构件承载力试验研究: 高强冷弯薄壁型钢成套技术研究报告 [R]. No. 1. 上海: 同济大学, 博思格建筑系统住宅部, 2007.
- [17] AS/NZS 4600: 2005 Cold-formed steel structures [S].
- [18] Schafer B W. Elastic buckling analysis of thin-walled members by finite strip analysis [CP]. CUFSM v2. 6. St. Baltimore: Johns Hopkins University, 2007.
- [19] 中国建筑标准设计研究院, 西安建筑科技大学, 同济大学, 等. 低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程: 报批稿 [R]. 北京: 中国建筑标准设计研究院, 2010.