

帽形加劲复杂卷边槽钢柱偏压性能试验研究

宋波¹, 王连广¹, 王春刚²

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘 要: 对共计 18 个简支试件进行偏心受压试验, 分析并研究了未加劲、腹板中央帽形加劲、腹板和翼缘中央帽形加劲 3 种截面复杂卷边槽钢的极限承载力、失稳模式及变形特征等特性。结果表明: 有效形心移动对偏心承压构件的承载能力有很大影响。在板件中央设置帽形加劲可以适当减小板件的宽厚比, 显著提升受压构件的极限承载力及钢材利用率, 但畸变屈曲在构件失稳模式中起控制作用。在同等条件下, 板件中央帽形加劲偏压构件的承载效率提升了 15% ~ 70%。

关 键 词: 复杂卷边槽钢; 帽形加劲; 极限承载力; 失稳模式; 有效形心移动

中图分类号: TU 392.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2018)02-0272-06

Experimental Investigation on Channel Columns with Complex Edge Stiffeners and Cap Shaped Stiffeners Under Eccentric Compression

SONG Bo¹, WANG Lian-guang¹, WANG Chun-gang²

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Civil Engineering College, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China. Corresponding author: SONG Bo, E-mail: songbo4171@126.com)

Abstract: Eighteen simply supported eccentric compression specimens were tested to investigate the ultimate bearing capacity, instability mode, and deformation of three types of complex edge stiffened channels, including no stiffeners, intermediate cap shaped stiffeners in the web, intermediate cap shaped stiffeners in the web and the flanges. Results show that offset of the effective centroid has a significant effect on the bearing capacity of eccentric compressed members. Cap shaped stiffeners can effectively reduce the width-to-thickness ratio of the element and obviously increase the ultimate load bearing capacity as well as the steel utilization ratio of elements, but distortional buckling can become the dominate failure mode. Under the same conditions, the load bearing efficiency of plate with intermediate cap shaped stiffeners is improved by 15% ~ 70%.

Key words: channel with complex edge stiffener; cap shaped stiffener; ultimate bearing capacity; instability mode; shift of effective centroid

冷弯薄壁型钢具有轻质高强、截面多变的优点, 在各类建筑中被大量使用^[1]。常用的截面形式有 Z 形、V 形加劲。改变截面形式能够改善截面的受力性能, 可使构件的失稳模式表现为畸变屈曲^[2]。目前, 关于复杂卷边槽钢柱的试验研究和理论分析较多, 但往往是针对普通截面槽钢的

轴压构件^[3-6], 而对板件中部设置帽形加劲肋的构件, 对其施加偏心荷载的试验并不多见。因此, 有必要基于多种截面类型的复杂卷边槽钢偏压柱开展性能研究。

本文对板件中间帽形加劲的复杂卷边槽钢开展偏心受压试验, 与未加劲的复杂卷边槽钢对比

并分析其承载力、失稳模式及变形特征,采用有限元软件模拟试验,为不同截面构件的工程应用提供依据.

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

试验共设计了 18 根试件,长度 $L = 1\,350\text{ mm}$,有三种截面形式,每种截面包括正偏心受压、负偏心受压、轴心受压各 2 根试件.试件采用 Q345 钢材,板件厚度 $t = 3.0\text{ mm}$,截面几何尺寸均按试件外轮廓线测定,截面尺寸详见图 1.试件的腹板高度 $H = 220\text{ mm}$,其中加劲腹板高度 $H_1 = 100\text{ mm}$,帽形加劲肋高度 $h = 20\text{ mm}$.C1,C2 截面翼缘宽度 $B = 90\text{ mm}$,C3 截面 $B_1 = 180\text{ mm}$, $B_2 = 80\text{ mm}$.第一次卷边长度 $d = 25\text{ mm}$,第二次卷边长度 $a = 15\text{ mm}$.偏心距 $e = \pm 10\text{ mm}$,规定朝向卷边为正,朝向腹板为负.为便于试验,在试件首尾焊接 8 mm 厚的钢板,钢板对应 C1 和 C2 截面试件的尺寸为 $240\text{ mm} \times 110\text{ mm}$,对应 C3 为 $240\text{ mm} \times 200\text{ mm}$.端部钢板外加载点处焊接长度为 20 mm 的凸榫,与刀铰嵌套以方便试件就位,并防止试件破坏时弹出.所有试件的实际尺寸见表 1.试件编号中的 C1,C2,C3 表示截面形式,正负号表示偏心的方向,“+”表示正向偏心,“-”表示负向偏心,没有符号表示轴压,最后的字母 a 和 b 用以区分相同的 2 个试件.

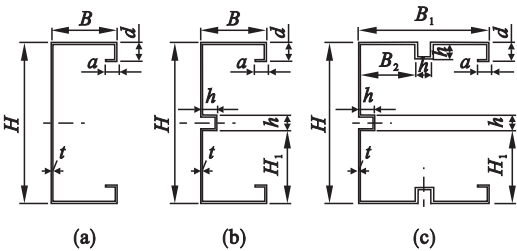


图 1 试件尺寸

Fig. 1 Size of specimens

(a)—C1;(b)—C2;(c)—C3.

1.2 试件初始缺陷

初始缺陷的大小关系到冷弯薄壁受压构件的静力性能,故首先对试件进行整体、局部和畸变三种缺陷的量测.整体缺陷包含强轴(Δ_x)、弱轴(Δ_y),局部缺陷包括腹板(Δ_w)、翼缘(左 Δ_{lf} 、右 Δ_{rf})、翼缘和卷边交线(左 Δ_{lf} 、右 Δ_{rf}).试件初始缺陷的符号定为试件向外凸起为正,向内凹陷为负.

整体缺陷的测量取自试件腹板与翼缘的交线,全部试件的最大初始缺陷绝对值列于表 2,

Δ_f^{\max} 为 Δ_{lf} 和 Δ_{rf} 两者中的最大值, Δ_{fl}^{\max} 为 Δ_{lf} 和 Δ_{rf} 两者中的最大值.由表 2 可得: Δ_x^{\max}/L 介于 $1/1\,623 \sim 1/617$ 之间; Δ_y^{\max}/L 介于 $1/2\,552 \sim 1/476$ 之间.

表 1 试件的实测尺寸

Table 1 Measured size of specimens mm							
试件编号	t	H	B	B_1	d	a	L
C1a	3	223	90	—	25.7	14.9	1 350.6
C1b	3	220	91	—	25.6	15.64	1 349.6
C1 + a	3	220	91	—	25.2	15.36	1351.6
C1 + b	3	222	91	—	25.8	14.5	1 350.6
C1 - a	3	219	90	—	24.5	15.2	1 351.6
C1 - b	3	223	91	—	25.3	15.14	1 350.6
C2a	3	221	90	—	25.1	15.4	1 350.6
C2b	3	221	90	—	25.3	15	1 350.6
C2 + a	3	222	90	—	24.9	15.9	1 350.6
C2 + b	3	221	90	—	25	15.6	1 351.6
C2 - a	3	221	90	—	25.2	15.6	1 351.6
C2 - b	3	224	90	—	25.5	15.22	1 349.6
C3a	3	220	—	181	25.8	15.9	1 351.6
C3b	3	220	—	180	25.92	15.17	1 349.6
C3 + a	3	222	—	180	25.58	15.44	1 350.6
C3 + b	3	220	—	180	25.88	15.52	1 349.6
C3 - a	3	219.5	—	180	26	15.66	1 349.6
C3 - b	3	218.5	—	180	26.13	15.62	1 354.6

表 2 初始缺陷最大值

Table 2 Maximum size of the initial defect mm					
试件编号	Δ_w^{\max}	Δ_f^{\max}	Δ_{fl}^{\max}	Δ_x^{\max}	Δ_y^{\max}
C1a	0.035	0.460	0.304	1.034	1.473
C1b	0.790	0.471	0.004	0.909	0.529
C1 + a	0.324	0.389	0.834	1.573	2.067
C1 + b	0.378	0.450	0.822	1.191	1.397
C1 - a	0.466	0.478	1.380	0.832	1.239
C1 - b	0.582	0.365	1.686	1.273	1.588
C2a	1.209	0.473	0.821	1.839	0.966
C2b	0.714	0.486	0.887	2.189	1.095
C2 + a	0.470	0.495	0.652	2.167	1.665
C2 + b	0.432	0.503	0.302	0.847	1.077
C2 - a	0.421	0.464	0.591	1.703	2.184
C2 - b	0.421	0.490	0.280	1.987	2.834
C3a	0.548	0.532	1.724	1.638	1.372
C3b	0.516	0.481	1.618	1.815	1.493
C3 + a	0.688	1.484	1.702	2.038	1.483
C3 + b	0.625	1.578	1.653	2.382	1.793
C3 - a	0.587	1.704	1.597	2.186	1.684
C3 - b	0.648	1.638	1.734	1.967	1.823

1.3 材性试验

依据《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》(GB/T228.1—2010)^[7]确定材性试验标准件尺寸、加工精度和加载类型. 试件数 12,材性试验结果为:屈服强度 $f_y = 340\text{ MPa}$, 抗拉强度 $f_u = 465\text{ MPa}$,弹性模量 $E = 1.986\ 40 \times 10^5\text{ MPa}$,泊松比 $\nu = 0.30$,伸长率 $\delta = 26.32\%$.

1.4 试验装置与加载方案

试验采用 100 t 油压千斤顶施加荷载,利用反力架、组合钢梁和地锚使装置稳固. 试验加载装置见图 2. 安装试件时,用钢板和钢梁把下刀铰固定在地面上,用钢绞线绕过钢梁吊起上刀铰安装. 要求上下刀铰的预留孔洞分别契合于试件两端封板上的凸榫,并且严格进行试件与刀铰的对中就位,使千斤顶和刀铰上顶板的中心重合. 为确保试件按规定的偏心距承受荷载,依次采取几何对中和物理对中.

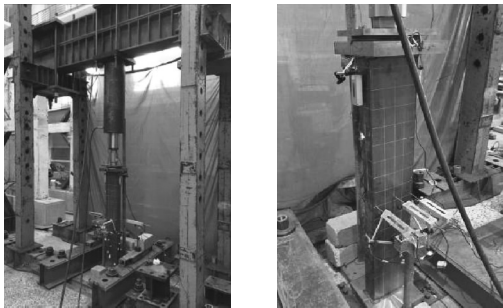


图 2 试验装置与试件安装
Fig. 2 Testing apparatus and specimen installation

加载开始时,预加 1kN 的荷载. 然后分级加载,每级荷载施加试件所能承受预测最大荷载的 5%,并且持载 1~2 min. 试验中当试件最终局部失稳或荷载为预测最大值的 80% 时,则递减荷载增量. 当荷载达到峰值点时,则认为该点值为极限承载力. 在荷载下降段,继续采集部分卸荷的数据后结束试验.

1.5 测点布置

通常冷弯薄壁受压构件的破坏位置位于二分之一总高度处,故在此位置均匀布置应变片和位移计测量点. 此外,为了确定加载时荷载与轴向位移的关系,在上刀铰底面两侧分别布置轴向位移计,同时保证两个位移计测点的连线经过加载中心点. 应变片在同一位置内外两侧布置,按逆时针方向编号,先编试件内侧,后编试件外侧,测点布置见图 3.

1.6 反算荷载偏心距

由于试件加载时的初始偏心不可避免,对受

压构件的承载力影响显著,故有必要通过应变值反算荷载偏心距^[8]. 对比几何测量的偏心距,分析确定最终的荷载偏心距. 偏心距误差的来源有很多:试件尺寸的实测误差导致计算的形心有偏差,封头板上的凸榫焊接位置误差及焊接精度,加载装置自身的系统误差等.

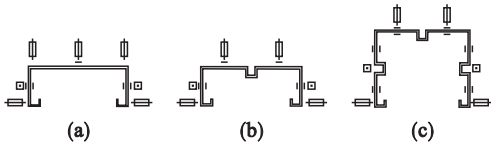


图 3 测点布置
Fig. 3 Arrangement of test points
(a)—C1; (b)—C2; (c)—C3.

2 试验结果及其分析

2.1 试件破坏模式及应变分析

从试验现象得出,试件的屈曲类型有三种:局部与整体的屈曲破坏,畸变与整体的屈曲破坏,局部、畸变及整体间的屈曲破坏. 部分试件的破坏情况见图 4.

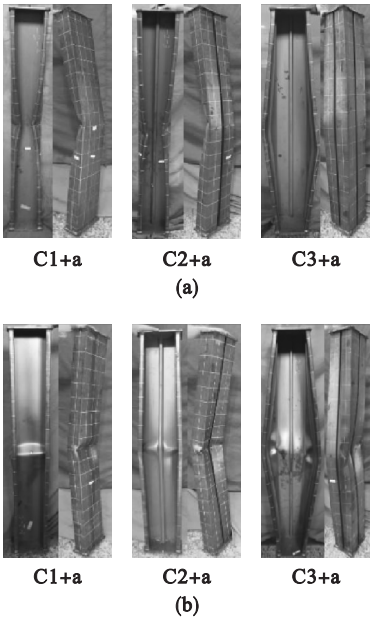


图 4 典型试件破坏情况
Fig. 4 Failure of typical specimens
(a)—正偏心受压试件; (b)—负偏心受压中长柱.

从图 4 可以发现,最大形变量都发生在接近构件中央高度的位置. 对于正偏心受压中长柱, C1 类型试件的破坏类型为局部、畸变以及整体三类破坏之间的一种相互关系;而 C2, C3 类型试件出现畸变屈曲和整体弯曲的共存模式. 原因是 C2, C3 类型试件的腹板均加劲,腹板的承载能力增强,而 C1 截面试件的腹板较弱,先发生局部屈

曲. 三种截面试件加载时,作用点偏向卷边,使卷边一侧承受截面最大压应力,而腹板承受的压应力相对较小;随荷载递增,翼缘和卷边的一侧先于腹板失稳,发生畸变屈曲,最终整体弯曲破坏.

对于负偏心受压中长柱,腹板一侧承受截面最大压应力,三种截面试件均在腹板处先失去稳定,从而导致 C1 类型试件呈现出局部和整体的并行破坏,C2,C3 类型试件呈现出局部、畸变和整体三类破坏形式的相关屈曲.

部分试件的荷载 - 应变曲线见图 5,刚加载时,腹板中央内外两侧的应变值均匀增大.当试件发生局部屈曲时,腹板一侧受拉,另一侧受压,应变在对立的两个方向上增长.随着荷载增大,腹板的变形有所增大,腹板两侧的应变值逐渐产生分离,直到呈现正负两个方向.

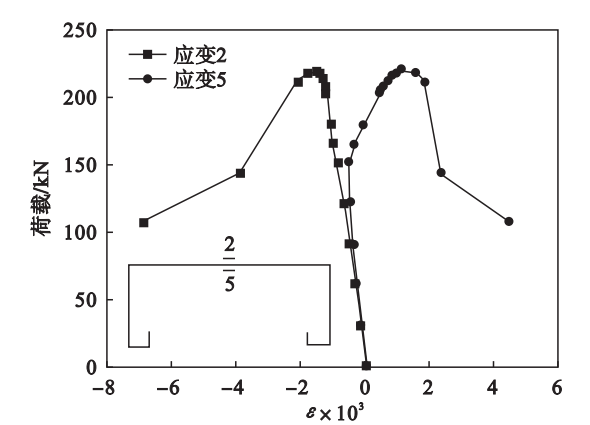


图 5 试件 C1 - a 的荷载 - 应变曲线
Fig. 5 Load-strain curve of C1-a specimen

2.2 试验结果分析

试验与数值模拟的结果比较见表 3,部分试件的荷载 - 位移曲线见图 6. 根据图中曲线的趋势可知,随荷载递增,试件的形变量均匀增加,当试件达到极限承载力后,荷载迅速下降,变形显著增加. 相对于 C2,C3 类型试件,C1 类型试件的曲线较为平滑,原因是 C1 类型试件腹板较弱,局部屈曲现象显著,C2,C3 类型试件腹板加劲,破

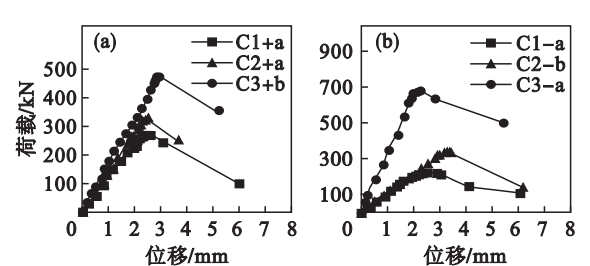


图 6 典型试件的荷载 - 位移曲线
Fig. 6 Load-displacement curves of typical specimens
(a) — 正向偏心受压试件; (b) — 负向偏心受压试件.

坏发生得更加突然,在翼缘和卷边共同受力一侧畸变破坏明显.局部和整体的共存关系相对于畸变和整体来说,试件屈曲后性能更加优越.

表 3 试验与数值模拟结果的比较
Table 3 Comparison on test and simulation results

试件 编号	偏心距 实测值 e/mm	试验结果		有限元计算结果		$P_{\text{uf}}/P_{\text{ut}}$
		破坏 模式	极限 荷载 P_{uf}/kN	破坏 模式	极限 荷载 P_{uf}/kN	
C1a	-0.36	L+F	294.84	L+F	295.93	1.004
C1b	0.75	L+F	291.48	L+F	304.47	1.045
C1+a	10.14	L+D+F	266.77	L+D+F	286.77	1.075
C1+b	11.54	L+D+F	271.29	L+D+F	289.65	1.068
C1 - a	-9.21	L+F	219.68	L+F	239.54	1.090
C1 - b	-12.62	L+F	217.42	L+F	234.62	1.079
C2a	-1.24	L+D+F	446.00	L+D+F	461	1.034
C2b	0.86	L+D+F	443.87	L+D+F	459.51	1.035
C2+a	10.19	D+F	291.00	D+F	307.68	1.057
C2+b	11.61	D+F	320.32	D+F	325.3	1.016
C2 - a	-10.93	L+D+F	329.00	L+D+F	357.41	1.086
C2 - b	-10.57	L+D+F	333.23	L+D+F	362.57	1.088
C3a	1.85	L+D+F	678.60	L+D+F	701.6	1.034
C3b	1.38	L+D+F	682.31	L+D+F	694.51	1.018
C3+a	9.52	D+F	478.39	D+F	503.75	1.053
C3+b	10.67	D+F	493.50	D+F	514.23	1.042
C3 - a	-11.57	L+D+F	678.45	L+D+F	660	0.973
C3 - b	-9.87	L+D+F	669.79	L+D+F	648.21	0.968

注:破坏模式中 L 表示局部屈曲,D 表示畸变屈曲,F 表示整体屈曲.表中 $P_{\text{uf}}/P_{\text{ut}}$ 的平均值为 1.043;标准差为 0.037.

依据偏心距实测值得到试件承载力与偏心距的相关曲线,如图 7 所示.一旦板件出现屈曲,有效受力的截面有所变化,有效截面的形心也发生移动^[9].所以,对于三种截面的冷弯薄壁型钢受压构件,其极限承载力最大值是在较小偏心的某个特定位置取得的,而不是在轴心受压状态下,并且对于不同的截面形状和几何尺寸,其具体位置也有所差别.对于 C1 类型试件,其腹板具有较大的宽厚比,最早产生局部屈曲,从而使有效形心位置移向带有卷边的方向,原轴压构件实际转变为承受负偏心荷载,故在较小正偏心距处取得承载力最大值.对于 C2 类型试件,由于腹板采用帽形加劲,令卷边和翼缘一侧的承载能力相对较弱,因此卷边和翼缘部分首先出现破坏,进而令有效截面形心稍移向腹板的方向,因此原来设计的轴心受压构件实际为正偏心受压构件;从图 7 中可以看出,C2 类型试件在较小负偏心受压时取得最大承载力.对于 C3 类型试件,同时在腹板和翼缘上

加劲,二者几乎同时发生屈曲,截面有效形心偏移效果不明显,轴心承受荷载的构件在接近横截面几何形心的位置有极限承载力.

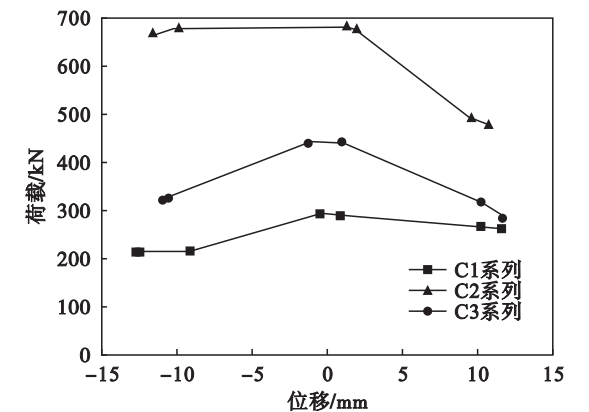


图 7 试件承载力与偏心距的关系曲线
Fig. 7 Relationship between bearing capacity and eccentricity of test specimens

图 7 中三种截面试件的承载力关系表明,C2 类型试件在正偏心和负偏心荷载作用下,极限承载力基本相同. C1 类型试件正偏心承压的承载力略高. C3 类型试件负偏心承压的承载能力较强. 总体来看,C1, C2, C3 类型试件的承载能力依次加强,且 C3 类型试件的承载力增长显著. 由此可知,有效形心的移动与偏心受压构件的承载力有一定关系,而且板件中间帽形加劲可以改变横截面有效形心移动的方向和距离.

3 有限元分析与试验结果的比较

通过 ANSYS12.0 有限元模拟,修改了建模时实际尺寸和材料的双重非线性及初始缺陷. 选取 SHELL 181 单元建立板件模型,采用刚性面建立试件两端封板模型. 计算长度取试件两端刀铰和刃口的距离,集中力荷载作用在试件加载点上.

有限元分析结果的极限荷载已在表 3 中列出. 典型试件荷载 - 位移曲线的有限元模拟与试验比较见图8. 有限元结果与试件的破坏模式比

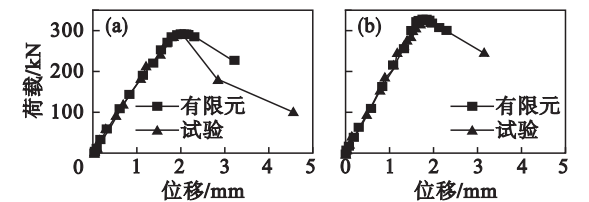


图 8 有限元模拟和试验的荷载 - 位移曲线
Fig. 8 Load - displacement curves of FEA and experimental results
(a) — 试件 C1a; (b) — 试件 C2 + b.

较见图 9. 经过对比,模型和试件的破坏位置都在板件中央高度处,表现为显著的局部(畸变)屈曲,试件破坏形态也很类似. 从整体屈曲来看,对应的模型和试件均朝向同一方向,而且破坏模式也较为一致. 由此,说明本文建立的有限元模型能够较好地模拟帽形加劲复杂卷边槽钢偏心受压构件的屈曲过程及屈曲后行为,可以开展相关参数的进一步研究.

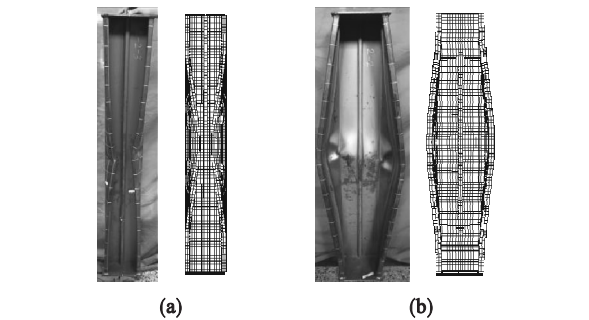


图 9 有限元模拟与试验破坏模式对比
Fig. 9 Failure mode comparison between numerical and test results
(a) — 试件 C2 + a; (b) — 试件 C3 - b.

为了确保截面形式为唯一变量,按设计尺寸和统一的初始缺陷模拟所有试件,以消除尺寸及缺陷差异对不同截面承载力的影响. 将模拟所得极限承载力与构件全截面屈服荷载之比定义为承载效率^[10],与多种截面类型柱的钢材利用率对比,结果见表 4.

表 4 试件的承载效率				
Table 4 Bearing efficiency of specimens				
试件编号	破坏模式	截面积 mm ²	极限承载力 P_{ult} /kN	承载效率 η
C1	L + F	1 386	305. 49	0. 648
C1 +	L + D + F	1 386	280. 12	0. 594
C1 -	L + F	1 386	246. 09	0. 522
C2	L + D + F	1 488	461. 70	0. 913
C2 +	D + F	1 488	350. 89	0. 694
C2 -	L + D + F	1 488	362. 57	0. 717
C3	L + D + F	2 232	701. 60	0. 925
C3 +	D + F	2 232	517. 75	0. 682
C3 -	L + D + F	2 232	679. 23	0. 895

注:破坏模式中整体屈曲为 F,局部屈曲为 L,畸变屈曲为 D.

通过对比发现:对于正偏心受压构件,相比 C1 类型试件,C2 和 C3 类型试件承载效率分别增长 17% 和 15%,主要是由于腹板承受大部分压力,板件加劲可以显著增强整体的局部屈曲承载力. 因此,与普通截面类型的构件相比,加劲后的构件强度增加显著. 对于负偏心受压构件,相比

C1 类型试件,C2 和 C3 类型试件的承载效率分别增长37% 和 71% . 因此,冷弯薄壁受压柱在腹板或翼缘加劲,即使用钢量稍有增多,但显著提升了构件的强度和钢材使用效率. 在承受负偏心压力时,构件强度的提升效果更好.

4 结 论

1) 有效形心移动对偏心受压柱的承载能力影响显著,而且板件中间帽形加劲可以改变有效截面形心移动的方向和距离.

2) 腹板中央采用加劲处理大幅降低了宽厚比,提升了构件的承载能力及钢材使用效率,但构件更容易发生畸变破坏.

3) 试验结果与有限元模拟结果吻合良好,下一步可以继续用有限元模拟开展静力性能参数的分析研究.

4) 相比于同条件下的正偏心复杂卷边槽钢,腹板加劲或腹板和翼缘同时加劲的复杂卷边槽钢承载效率提高 15% ~ 17% ;相比于同条件下的负偏心复杂卷边槽钢,腹板加劲使承载效率增长 37% ,腹板和翼缘同时加劲承载效率增长 71% . 板件中间帽形加劲能显著提高构件的承载效率,且在负偏压状态下的提高效果更显著.

参考文献:

[1] Yu W W. Cold-formed steel design [M]. 3rd ed. New York: John Wiley and Sons,2000:1 – 15.

[2] Narayanan S,Mahendran M. Ultimate capacity of innovative cold-formed steel columns [J]. *Journal of Constructional Steel Research*,2003 ,59 (4) :489 – 508.

[3] 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.

[4] Young B, Yan J. Design of cold-formed steel channel columns with complex edge stiffeners by direct strength method [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130 (11) :1756 – 1763.

[5] Yan J T, Young B. Numerical investigation of channel columns with complex stiffeners—part I: test verification [J]. *Thin-Walled Structures*, 2004 ,42 (6) :883 – 893.

[6] Schafer B W, Sarawit A, Pekoz T. Complex edge stiffeners for thin-walled members [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2006, 132 (2) :212 – 226.

[7] 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室 温 试 验 方 法: GB/T228. 1—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011. (Metallic materials—tensile testing at ambient temperature: GB/T228. 1—2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.)

[8] Zhang Y C, Wang C G, Zhang Z N. Tests and finite element analysis of pin-ended channel columns with inclined simple edge stiffeners [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2007 ,63 (3) :383 – 395.

[9] Rasmussen K J R. Design of slender angle section beam-columns by the direct strength method [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2006, 132 (2) :204 – 211.

[10] 王春刚, 张壮南, 张耀春. 中间加劲复杂卷边槽钢轴心受压构件承载力试验研究 [J]. *工程力学*, 2013, 30 (1) :221 – 228, 254. (Wang Chun-gang, Zhang Zhuang-nan, Zhang Yao-chun. Experimental investigation on channel columns with complex edge stiffeners and intermediate stiffeners under axial compression [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30 (1) : 221 – 228, 254.)