

帽形加劲复杂卷边槽钢柱的稳定性能

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: 为进一步了解帽形加劲复杂卷边槽钢柱的受力性能, 利用 ANSYS 有限元分析软件对帽形加劲复杂卷边槽钢柱在轴压和偏压状态下的稳定性能进行分析. 研究了立柱长度、板件宽厚比、截面类型以及偏心距对帽形加劲复杂卷边槽钢柱的稳定承载力、破坏模式及变形等性能的影响. 研究表明: 在板件厚度不变时, C2 截面构件的承载效率相比 C1 截面构件提高了 10% ~ 20%, C3 截面构件相比 C1 截面构件提高了 40% ~ 50%. 腹板帽形加劲复杂卷边槽钢柱的承载力最大发生在负偏心一侧, 而腹板及翼缘帽形加劲复杂卷边槽钢柱在正偏心处承载力最大.

关 键 词: 复杂卷边槽钢; 板件帽形加劲; 有限元分析; 偏心距; 稳定性能

中图分类号: TU 392 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2018)01-0143-05

Stability Behavior of Channel Columns with Complex Edge Stiffeners and Cap Shaped Stiffeners

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

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

Abstract: In order to further understand the mechanical behavior of the channel columns with complex edge stiffeners and cap shaped stiffeners, the stability of channel columns under axial and eccentric compressive loading was studied by the finite element program called ANSYS. Effects of specimen length, the width to thickness ratio of plate, section types and the eccentric distance on stability, buckling mode and deflection behavior of channel columns with complex edge stiffeners and cap shaped stiffeners were investigated. The results show that under the same condition, the bearing capacity of members with section C2 is 10% ~ 20% larger than that of C1, and the bearing capacity of members with section C3 is 40% ~ 50% larger than that of C1. When it comes to the maximum load, the channel column with cap shaped stiffener on web takes on negative eccentricity, while the channel column with cap shaped stiffener on both web and flange takes on positive eccentricity.

Key words: channel with complex edge stiffeners; element with cap shaped stiffeners; finite element analysis; eccentricity; stability behavior

目前冷弯薄壁型钢柱作为主要的承重骨架已经在国内外实际的结构中得到了广泛的应用. 然而由于薄壁的影响, 板件宽厚比较大, 在受压情况下易发生局部屈曲失稳. 为了提高构件的局部屈曲承载力, 可以在板件上布置加劲肋, 起到减小板件宽厚比的作用. 国内外针对加劲肋的研究主要

是以腹板 V 形或者是 Σ 形加劲为研究对象^[1-3], 而关于中间帽形加劲复杂卷边槽钢构件的研究还比较少见. 因此有必要对中间帽形加劲复杂卷边槽钢受压构件的稳定性能展开进一步研究, 明确腹板及翼缘帽形加劲对复杂卷边槽钢受压稳定性的提高作用, 为今后该新型截面槽钢在实际工程

中的应用打基础.

本文在文献[4] 试验研究的基础上,利用 ANSYS 程序对帽形加劲复杂卷边槽钢轴压及偏压构件的稳定性进行研究.通过变化各参数,研究其宽厚比、立柱长度、截面类型以及偏心距对帽形加劲复杂卷边槽钢柱的承载力、破坏模式及变形等性能的影响.

1 参数选取及构件编号说明

构件截面的几何参数定义见图 1.选取了两种腹板高度($H=220,160\text{ mm}$),其中: $H=160\text{ mm}$ 对应有三种翼缘宽度($B=90$ (除 C3 截面), $120,160\text{ mm}$); $H=220\text{ mm}$ 对应三种翼缘宽度($B=120$ (除 C3 截面), $160,220\text{ mm}$).板厚 t 取 $1.0,1.5,2.0,2.5\text{ mm}$,构件长度 $L=700,1\ 800,3\ 000\text{ mm}$,以及简支和固支两种边界条件,简支构件包括轴压和偏压($e=\pm 2,\pm 4,\pm 6,\pm 8,\pm 10\text{ mm}$)两种加载方式, e 为正,是向卷边一侧偏心; e 为负,是向腹板一侧偏心.一次卷边和二次卷边外廓尺寸分别取 $d=25\text{ mm},a=15\text{ mm}$;加劲肋宽度 $h=20\text{ mm}$;弹性模量 E 取 $2.06\times 10^5\text{ MPa}$,泊松比 ν 取 0.3 ,屈服强度 f_y 取 345 MPa .构件的编号说明如图 2 所示.

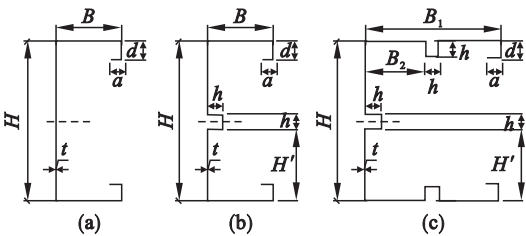


图 1 构件截面形式和尺寸

Fig. 1 Cross section and size of the test specimen

(a)—C1; (b)—C2; (c)—C3.

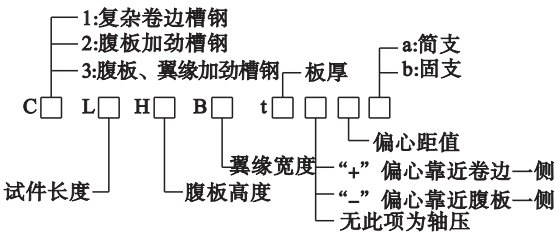


图 2 试件编号说明

Fig. 2 Numbering rule of the specimen

2 分析方法及有效性验证

本文采用的分析方法与文献[4]所用到的方

法一致.采用相同的建模分网及计算方法,以集中力加载到刚性面上的形式模拟端部截面的均布荷载,利用约束上下截面平动及转动自由度的方法模拟简支和固支的边界条件,分析中同时考虑几何与材料非线性,忽略残余应力的影响^[5].考虑到构件的几何初始缺陷对构件受力性能影响巨大,有必要对初始缺陷进行量化^[6-7].通过对文献[4]中试验试件初始缺陷测量结果的详细分析并参考文献[8]中相关取值,在有限元参数分析过程中局部初始缺陷取 $0.0025w$ (w 指构件截面最宽直板件的宽度),畸变初始缺陷取 $0.9t$ (t 为构件的截面厚度),整体初始缺陷取 $0.001L$ (L 为构件的计算长度).非线性屈曲分析中材料属性选用线性强化应力应变曲线,切线模量取弹性模量 E 的 2% .采用弧长法进行求解,通过时间后处理可以得到轴向的位移-荷载曲线.

在利用有限元软件对构件受力性能进行分析之前必须先对该分析方法的正确性进行验证.文献[4]利用有限元分析软件较为精确地对帽形加劲复杂卷边槽钢简支柱的各受力性能进行模拟,所得结果与试验结果基本吻合,证明了在简支边界条件下有限元分析方法模拟帽形加劲复杂卷边槽钢柱轴压性能的正确性.针对固支边界条件下有限元分析方法有效性的验证,由于没有固支条件下帽形加劲槽钢柱的相关试验,本文选用文献[8]中腹板 V 形加劲卷边槽钢两端固支轴压试验进行模拟,其模拟结果见表 1.结果表明在固支边界条件下采用文献[4]的有限元分析方法仍然有效.

表 1 固支试验结果与模拟结果的比较

Table 1 Comparison on test results and simulated results under clamped supporting

试件 编号	试验结果		ANSYS 计算结果		P_{uf}/P_u
	破坏 模式	极限荷载 P_{ut}/kN	破坏 模式	极限荷载 P_{uf}/kN	
L700H190WK1	D	387.8	D	390.44	1.006
L700H190WK2	D	393.9	D	394.82	1.002
L700H230WK1	D	373.7	D	386.50	1.034
L700H230WK2	D	420.2	D	430.78	1.025
L1400H190WK1	D + F	344.5	D + F	353.90	1.027
L1400H190WK2	D + F	360.2	D + F	349.50	0.970
L1400H230WK1	D + F	351.1	D + F	345.84	0.985
L1400H230WK2	D + F	359.6	D + F	346.30	0.963

注:D 表示畸变屈曲;F 表示弯曲屈曲; P_{uf}/P_{ut} 的平均值为 1.002;标准差为 0.027.

3 结果分析

3.1 构件计算长度对承载力和失稳模式的影响

表 2 中所列是不同边界条件下帽形加劲复杂卷边槽钢柱的有限元分析结果. 图 3 为极限荷载随构件绕弱轴计算长度变化的曲线, 以及构件相应的破坏模式. 图中 L 表示局部屈曲, D 表示畸变屈曲, F 表示弯曲屈曲. 从图 3 中可知, 随着构件计算长度的增大构件的极限承载力呈下降趋势, 短柱的破坏模式都以局部屈曲为主, 随着计算长度的增大, 构件多以局部屈曲和整体弯曲屈曲为主要破坏模式. 对比简支和固支两种边界条件, 固支能够显著提高构件的承载能力, 但是固支柱相比简支柱更容易出现畸变屈曲.

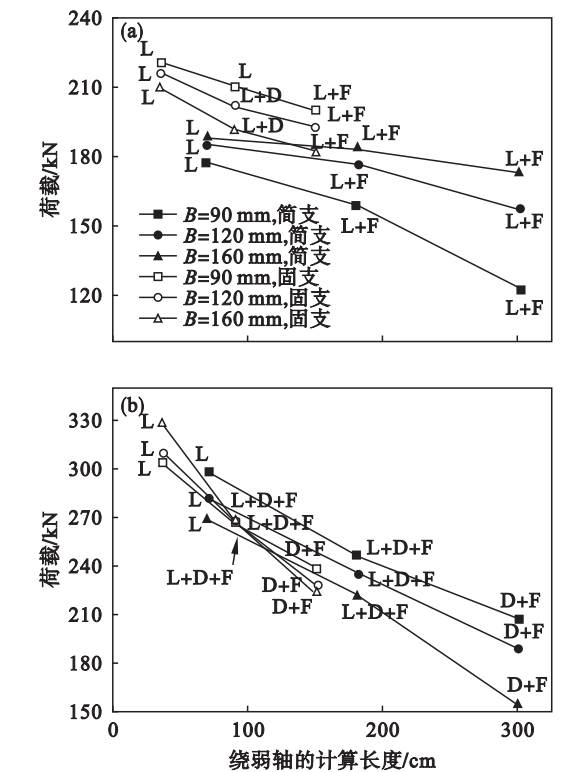


图 3 帽形加劲复杂卷边槽钢柱的荷载 - 计算长度曲线
Fig. 3 Curves for the load and calculated length of columns
(a)—C1, $H=160$ mm; (b)—C2, $H=220$ mm.

构件长度的增大使得整体稳定逐渐起控制作用, 整体稳定承载力随长度增大而显著降低, 从而导致立柱的极限承载力下降较快. 由于帽形加劲肋的设置, 随着计算长度的增加, 构件的极限承载力下降趋势更加明显, 畸变屈曲显著增多. 这是由于加劲肋提高了局部屈曲临界应力, 立柱破坏主要由畸变与整体相关屈曲起控制作用. 中长柱的

破坏主要以局部、畸变及整体三者相关屈曲为主, 而长柱局部屈曲不再明显, 主要以畸变和整体相关屈曲为主要破坏模式.

3.2 截面类型以及板件宽厚比对承载力的影响

图 4 是在简支的边界条件下, 长度为 1 800 mm 不同截面类型的构件在不同板件厚度时其承载力的变化情况, 纵坐标 (P_u/P_y) 为极限承载力与全截面屈服荷载的比值, 即承载效率^[9]. 从图中可以看出, 在板件厚度不变时, 不同截面类型的构件的承载力提高明显, C2 截面构件的承载效率相比 C1 截面构件提高了 10% ~ 20%, C3 截面构件相比 C1 截面构件提高了 40% ~ 50%, 极大地提高了钢材利用率.

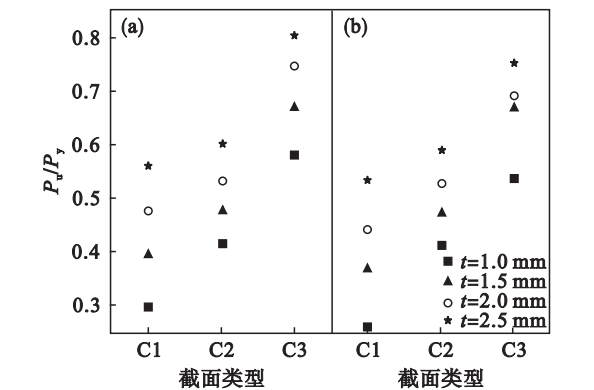


图 4 承载力与截面类型的关系
Fig. 4 Relation between strength and cross section
(a)—H220B160; (b)—H220B220.

此外同一截面类型构件的 P_u/P_y 值随着板件厚度的增大也显著增大. 这是由于随着板件厚度的增大, 板件的宽厚比减小从而提高了局部稳定承载力, 使构件的承载效率也获得极大的提高.

3.3 偏心距对承载力和失稳模式的影响

表 3 为偏心受压构件的有限元分析中 H220B160t1a 的结果, 其中 L, D 和 F 分别代表局部屈曲、畸变屈曲以及整体弯曲屈曲的失稳模式. 图 5 为 L1800H220B160t1a 系列槽钢柱的荷载与偏心距的关系曲线, 并标明了不同偏心距下构件的失稳模式.

从图中可以看到不同截面的构件其承载力最大时并不是在轴心受压位置处. 这主要是由于受截面有效形心偏移的影响^[10-11], 在受到轴向压力作用时, 截面的一侧会最先失稳, 从而导致截面的有效受力面积变小, 其形心向另一侧偏移, 使得构件在略微偏心时获得最大的承载力.

C1 截面的构件最大承载力发生在正偏心 2 mm 处. 在 $e \leq 2$ mm 时, 构件均发生局部与整体相关屈曲, 且随着向腹板方向偏心距的变化构件

承载力逐渐降低,在 $e > 2\text{ mm}$ 时,构件开始发生畸变屈曲,承载力随偏心距增大也逐渐变小. 由于 C1 截面的腹板先于复杂卷边一侧失稳,发生局部屈曲,因此构件在正偏心时获得最大承载力,在正偏心距继续增大时,翼缘与复杂卷边一侧发生失稳,出现畸变屈曲.

表 2 轴压构件有限元分析结果的比较				
Table 2 Comparison of simulated results under two different boundary conditions				
构件编号	简支		固支	
	破坏模式	极限荷载 P_u/kN	破坏模式	极限荷载 P_u/kN
C1L700H160B120t2	L	184. 974	L	216. 15
C1L700H160B160t2	L	187. 864	L	203. 605
C1L700H160B90t2	L	177. 766	L	196. 89
C1L700H220B120t2	L	190. 34	L	226. 5
C1L3000H160B120t2	L+F	157. 758	L+F	208. 932
C1L3000H160B160t2	L+F	172. 556	L+F	191. 764
C1L3000H160B90t2	L+F	122. 534	L+F	181. 608
C1L3000H220B120t2	L+F	162. 328	L+F	223. 572
C1L3000H220B160t2	L+F	179. 148	L+F	214. 768
C1L3000H220B220t2	L+F	192. 548	L+F	205. 208
C2L700H160B120t2	L	242. 22	L	309. 576
C2L700H160B160t2	L	243. 748	L	269. 184
C2L700H160B90t2	L	271. 955	L	228. 87
C2L700H220B120t2	L	298. 9	L	327. 708
C2L1800H160B160t2	L + D + F	217. 048	L+D+F	280. 542
C2L1800H160B90t2	L+D+F	265. 385	L+D+F	227. 784
C2L1800H220B120t2	L+D+F	247. 4	L+D+F	287. 832
C2L1800H220B160t2	L+D+F	236. 22	L+D+F	250. 26
C2L1800H220B220t2	L+D+F	222. 084	L+D+F	235. 422
C2L3000H160B160t2	D + F	201. 912	D + F	251. 466
C2L3000H160B90t2	D + F	188. 32	D + F	230. 262
C2L3000H220B120t2	D + F	208. 675	D + F	305. 154
C2L3000H220B160t2	D + F	189. 955	D + F	265. 818
C2L3000H220B220t2	D + F	155. 54	D + F	238. 932
C3L700H160B120t2	L	383. 898	L	344. 344
C3L700H160B160t2	L	413. 718	L	505. 719
C3L700H220B160t2	L	422. 03	L	375. 075
C3L700H220B220t2	L	451. 626	L	341. 82
C3L1800H160B120t2	L+D+F	349. 734	L+D+F	397. 096
C3L1800H160B160t2	L+D+F	357. 502	L+D+F	352. 394
C3L1800H220B160t2	L+D+F	348. 691	L+D+F	294. 511
C3L1800H220B220t2	L+D+F	345. 522	L+D+F	440. 256
C3L3000H160B120t2	D+F	251. 61	D+F	358. 72
C3L3000H160B160t2	D + F	281. 628	D + F	321. 64
C3L3000H220B160t2	D + F	287. 966	D + F	462. 168
C3L3000H220B220t2	D + F	228. 618	D + F	367. 08

注:L表示局部屈曲,D表示畸变屈曲,F表示弯曲屈曲.

表 3 偏心受压构件有限元分析结果		
Table 3 Results of channel columns under eccentric compression		
构件编号	失稳模式	P_u/kN
C1L1800H220B160t1 - 10a	L + F	50. 24
C1L1800H220B160t1 - 8a	L + F	51. 70
C1L1800H220B160t1 - 6a	L + F	52. 31
C1L1800H220B160t1 - 4a	L + F	53. 39
C1L1800H220B160t1 - 2a	L + F	55. 03
C1L1800H220B160t1 a	L + F	55. 60
C1L1800H220B160t1 + 2a	L + F	56. 85
C1L1800H220B160t1 + 4a	D + F	52. 19
C1L1800H220B160t1 + 6a	D + F	50. 03
C1L1800H220B160t1 + 8a	D + F	48. 24
C1L1800H220B160t1 + 10a	D + F	46. 88
C2L1800H220B160t1 - 10a	L + D + F	90. 68
C2L1800H220B160t1 - 8a	L + D + F	92. 81
C2L1800H220B160t1 - 6a	L + D + F	95. 09
C2L1800H220B160t1 - 4a	L + D + F	97. 50
C2L1800H220B160t1 - 2a	L + D + F	100. 69
C2L1800H220B160t1 a	D + F	94. 20
C2L1800H220B160t1 + 2a	D + F	90. 07
C2L1800H220B160t1 + 4a	D + F	86. 53
C2L1800H220B160t1 + 6a	D + F	83. 41
C2L1800H220B160t1 + 8a	D + F	80. 68
C2L1800H220B160t1 + 10a	D + F	78. 28
C3L1800H220B160t1 - 10a	L + D + F	116. 65
C3L1800H220B160t1 - 8a	L + D + F	120. 64
C3L1800H220B160t1 - 6a	L + D + F	123. 98
C3L1800H220B160t1 - 4a	L + D + F	128. 17
C3L1800H220B160t1 - 2a	L + D + F	132. 15
C3L1800H220B160t1 a	L + D + F	136. 71
C3L1800H220B160t1 + 2a	L + D + F	141. 46
C3L1800H220B160t1 + 4a	L + D + F	146. 78
C3L1800H220B160t1 + 6a	L + D + F	151. 39
C3L1800H220B160t1 + 8a	D + F	151. 15
C3L1800H220B160t1 + 10a	D + F	147. 43

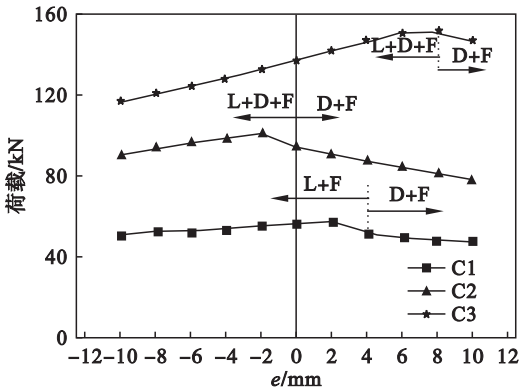


图 5 荷载 - 偏心距曲线
Fig. 5 Load-eccentricity curves

C2 截面构件的最大承载力在负偏心 2 mm 处. 这是由于 C2 截面腹板处加设了帽形加劲肋,

极大地提高了腹板一侧的局部屈曲承载力,因此翼缘和复杂卷边一侧最先屈曲,有效形心偏向腹板一侧,轴心受压构件相当于内在的正偏心构件. C3 截面的最大承载力在正偏心 6 mm 处,翼缘上设的加劲肋使翼缘和卷边一侧的刚度明显提高,轴压构件的腹板最先发生局部屈曲,且在正偏心为 6 mm 处仍然能够发生局部屈曲.

4 结 论

- 1) 随着立柱长度的增大,立柱的极限承载力显著降低. 由于加劲肋提高了局部屈曲临界应力,帽形加劲复杂卷边槽钢柱出现畸变屈曲变形,发生破坏主要由畸变与整体相关屈曲起控制作用. 而普通复杂卷边槽钢主要由局部和整体相关屈曲为主要破坏模式.
- 2) 在板件厚度不变时,不同截面类型的构件的承载力提高明显. C2 截面构件的承载效率相比 C1 截面构件提高了 10% ~ 20% ,C3 截面构件相比 C1 截面构件提高了 40% ~ 50% ,极大地提高了钢材利用率.
- 3) 同一截面类型构件的承载效率随着板件厚度的增大也显著增大. 这是由于随着板件厚度的增大,板件的宽厚比减小从而提高了局部稳定承载力,使构件的承载效率也获得极大的提高.
- 4) 不同截面的构件其承载力最大时并不是在轴心受压位置处. 腹板帽形加劲复杂卷边槽钢柱的承载力最大发生在负偏心一侧,而腹板及翼缘帽形加劲复杂卷边槽钢柱在正偏心处承载力最大.

参考文献:

[1] 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.
[2] Yang D,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.
[3] Yap D C Y,Hancock G J. Experimental study of high strength cold-formed stiffened web steel sections[J]. *Journal of Structural Engineering*,2011,137(2):162 – 172.
[4] 宋波,王连广,王春刚. 帽形加劲复杂卷边槽钢柱轴压性能试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版),2016,37(12):1172 – 1177.
(Song Bo, Wang Lian-guang, Wang Chun-gang. Experimental investigation on axial compression behavior of channel columns with complex edge stiffeners and cap shaped stiffeners [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*. 2016,37(12):1172 – 1177.)
[5] Dubina D,Ungureany V. Effect of imperfections on numerical simulation of instability behaviour of cold formed steel members [J]. *Thin-Walled Structures*, 2002, 40 (3): 239 – 262.
[6] Lechner B,Pircher M. Analysis of imperfection measurement of structural members[J]. *Thin-Walled Structures*,2005,43(3):351 – 374.
[7] Young B,Yan J. Finite element analysis and design of fixed-ended plain channel columns[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*,2002,38(6):549 – 566.
[8] 姚永红. 腹板 V 形加劲冷弯薄壁卷边槽钢轴压柱稳定性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012:24 – 47.
(Yao Yong-hong. Study on stability behavior of cold-formed thin-walled steel lipped channel columns with web V-shaped stiffener under axial loads [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2012:24 – 47.)
[9] 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.)
[10] Young B,Rasmussen K J R. Shift of effective centroid of channel columns [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2002,128(3):289 – 299.
[11] Rusch A,Lindner J. Remarks to the direct strength method [J]. *Thin-Walled Structures*,2001,39(9):807 – 820.