

# 开口冷弯厚壁型钢组合截面轴压构件抗震性能研究

付小超<sup>1</sup>, 温东辉<sup>2</sup>, 张文莹<sup>3</sup>

(1. 上海城建职业学院 数字建造学院, 上海 200438; 2. 太原学院 建筑与环境工程系, 山西 太原 030032;  
3. 北京工业大学 城市建设学部, 北京 100124)

**摘要:** 为研究开口冷弯厚壁型钢组合截面构件在轴向滞回荷载作用下的抗震性能, 选取了 3 根由壁厚  $t=3\text{ mm}$ 、 $8\text{ mm}$  冷弯单槽钢组合而成的工字形组合截面构件, 对其进行轴向滞回加载试验. 分析不同试验现象及破坏模式, 初步讨论了长细比、宽厚比对构件抗震性能影响, 并与单截构件性能对比. 在与试验结果对比吻合度较好的基础上, 建立精确的 ANSYS 有限元模型, 选取不同腹板宽厚比 ( $h/t=20\sim50$ )、不同长细比 ( $\lambda_y=30\sim90$ ) 的构件进行参数化分析. 研究结果表明: 组合截面构件延性较单截面构件要好, 失稳破坏延后; 宽厚比、长细比是影响冷弯型钢抗震性能的两个主要因素, 宽厚比 ( $h/t$ ) 越大抗震性能越差, 长细比 ( $\lambda_y$ ) 越大抗震性能同样也越差, 设计时应尽量避免选择长细比和宽厚比均较大的构件.

**关键词:** 冷弯厚壁型钢; 组合截面; 滞回; 宽厚比; 长细比

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)06-0810-09

## Study on the seismic behaviors of opening cold-formed thick-walled steel built-up sections under the axial cyclic loading

FU Xiaochao<sup>1</sup>, WEN Donghui<sup>2</sup>, ZHANG Wenyong<sup>3</sup>

(1. Digital Construction Institute, Shanghai Urban Construction Vocational College, Shanghai 200438, China;

2. Department of Architecture and Environmental Engineering, Taiyuan University, Taiyuan 030032, China;

3. Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** In order to investigate the hysteretic behaviors of opening cold-formed thick-walled steel built-up sections under the axial cyclic loading, three cold-formed steel columns were tested which the thickness of the web is 3 mm and 8 mm. On the basis of compared with the test results, a finite element method (FEM) in ANSYS was established. The influence of width-thickness ratio ( $h/t$ ) rang from 20 to 50 for web and slenderness ratio about the weak axis  $y$  ( $\lambda_y$ ) rang from 30 to 90 of such members were investigated by FEM. Analysis results indicated that the ductility of built-up sections member is better than single section member, and the width-thickness ratio and the slenderness ratio about the weak axis  $y$  are the most important factors to affect the hysteretic behaviors. So, the cold-formed steels which with great width-thickness ratio ( $h/t$ ) and great slenderness ratio ( $\lambda_y$ ) should be avoided in designing, because they will lead to poor seismic performance.

**Key words:** cold-formed thick-walled steel; built-up sections; hysteretic; width-thickness ratio; slenderness ratio

冷弯型钢具有成型精度高、断面均匀、加工速度快、工业化程度高、力学性能优异、连接便捷、施工迅速等优点, 广泛应用于建筑工程、机械制造、交通运输、造船和电力等行业. 其中, 建筑业是冷弯型钢使用最广的行业, 发达国家建

筑业所用冷弯型钢已占其建筑结构用钢的 40%~70%<sup>[1]</sup>. 冷弯截面型钢截面丰富, 按单一截面的形状可分为开口截面和闭口截面, 如开口截面有冷弯槽钢(C 形、U 形)、角钢、Z 形钢、帽形钢等, 闭口截面有方管、矩形管、圆管等; 同时, 各种

收稿日期: 2022-06-30 修回日期: 2022-09-14

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(52008008); 上海城建职业学院校级科研项目(cjky202317); 2023 年上海高校青年教师培养资助计划入选项目

第一作者: 付小超(1983—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为冷弯厚壁型钢结构. E-mail: fxc-nc@163.com

单一截面可两两或多个相互拼合, 如两个槽钢背靠背拼成工字形、卷边靠卷边或翼缘抱合拼成箱形, 多个型钢拼成一字形(如带卷边槽钢拼成带空腔的双层钢板剪力墙)、异形截面(如多个槽钢或方钢管拼成墙体转角处柱)等, 可组成更为丰富的各类截面<sup>[2]</sup>。

对于冷弯型钢研究, 国内外学者研究较多, 并取得丰硕成果, 各国制定了相应规范, 如我国的《冷弯薄壁型钢结构技术规范》GB 50018—2002<sup>[3]</sup>, 但该规范只给出了单一截面的冷弯薄壁型钢(习惯上把壁厚不超过 6 mm 的型钢称为冷弯薄壁型钢<sup>[4]</sup>)相关设计规定, 对组合截面、厚壁型钢尚无规定; 而国外规范<sup>[5~7]</sup>对壁厚大于 25 mm 冷弯型钢及组合截面均有相关规定。

近年来, 随着冷弯薄壁型钢低层和多层住宅的快速发展, 结构形式和受力条件愈发复杂, 单一构件常难以满足设计、使用要求<sup>[8]</sup>, 故近年也有学者对组合截面进行研究, 但主要是薄壁冷弯型钢<sup>[9-12]</sup>, 而冷弯厚壁型钢研究只限于单一截面<sup>[13-14, 19]</sup>, 未见冷弯厚壁组合截面的研究。主要原因可能是: 冷弯型钢广泛应用于轻钢龙骨体系、轻钢模块体系和冷弯型钢门式刚架体系, 而对冷弯型钢框架结构体系研究较少<sup>[15]</sup>; 受试验装置加载能力影响, 具体原因见下文叙述。

为探究冷弯厚壁组合截面轴心受力构件的抗震性能, 本文通过试验和数值模拟方法, 对冷弯厚壁内卷边槽钢背靠背组合工字形截面进行轴向滞回荷载作用下抗震性能研究, 主要研究构件在不同宽厚比、长细比, 不同截面形式对该类构件滞回曲线、骨架曲线影响, 综合评价冷弯厚壁型钢组合截面轴向受力构件的抗震性能。

1 试验概述

1.1 试件选择

本文选用的试件截面形式如图 1 所示, 其中图

1(b)为双槽钢背靠背组合工字形截面, 是由两个图 1(a)截面的腹板处螺栓直接栓接而成。

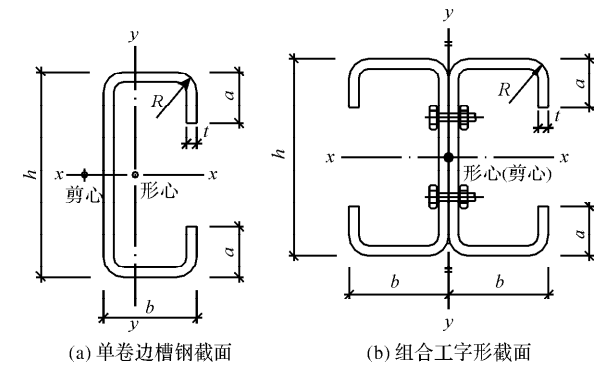


图 1 试验用截面形式

Fig. 1 Section form for test

试件参数选择时, 应考虑板件宽厚比、整体长细比、材料强度等影响因素, 还需考虑试验设备的试验能力, 如试验设备的加载能力、允许空间、作动器的有效行程等。试验是在同济大学建筑工程系建筑结构试验室进行, 采用 1 000 t 大型多功能静液压伺服试验装置, 该设备限定为: 试验机轴向最大压力 1 000 t(实际只允许 900 t)、最大拉力 300 t(实际只允许 270 t); 试件加支座总长度不超过 3 m。

考虑以上因素, 组合截面试件只选用了材料强度 Q235, 壁厚 3 mm、8 mm 两类截面, 对于强度更高、管壁更厚的组合截面, 将会超过试验机最大加载能力(主要是拉力), 故不予考虑。

试验所选用试件参数见表 1。表中, 截面规格符号见图 1 所示; “试件编号”各符号表示: 截面编号-加载方式-长细比  $\lambda$ -腹板宽厚比。其中, 截面类型 C 表示单槽钢截面, CC 表示组合工字形截面; 加载方式 AC 表示轴向拉-压滞回加载; 长细比指绕截面弱轴  $y$  的长细比。

由于实际加工会存在误差, 所以试验前必须仔细测量出每个试件的实际尺寸, 试件实测尺寸见表 2。

表 1 轴向滞回试验试件选用表

Tab. 1 Selection table of axial hysteresis test specimens

序号	试件编号	截面规格 ( $h \times b \times a \times t$ )/mm	$h/t$	$\lambda_y$	备注
1	C2-AC-L50-35	250×80×50×8	31	50	单槽钢, Q235B
2	CC1-AC-L95-70	200×70×20×3	67	100	组合工字形, Q235B
3	CC2-AC-L50-35	250×80×50×8	31	50	组合工字形, Q235B
4	CC2-AC-L70-35	250×80×50×8	31	80	组合工字形, Q235B

表 2 试件实测参数

Tab. 2 Measured parameters of specimens

序号	试件编号	截面规格 $h \times b \times a \times t / \text{mm}$	腹板高 $h / \text{mm}$	翼缘宽 $b / \text{mm}$	卷边宽 $a / \text{mm}$	壁厚 $t / \text{mm}$	构件长度 $L / \text{mm}$	抗拉强度 $f_y / \text{MPa}$
1	C2-AC-L50-35	$250 \times 80 \times 50 \times 8$	250.4	80.3	49.3	7.43	2 021	270.3
2	CC1-AC-L95-70	$200 \times 70 \times 20 \times 3$	199.6	70.0	19.2	2.85	3 168	290.0
3	CC2-AC-L50-35	$250 \times 80 \times 50 \times 8$	250.4	80.1	49.7	7.43	2 026	270.3
4	CC2-AC-L70-35	$250 \times 80 \times 50 \times 8$	251.6	80.1	49.5	7.43	2 900	270.3

注：(1)表中尺寸误差满足《通用冷弯开口型钢尺寸、外形、重量及允许偏差》(GB/T 6723—2008)<sup>[16]</sup>要求，证明试件加工精度高；

(2)为表述方便，组合截面宽厚比  $h/t$  仍然采用单截面腹板的表示，后文表达方法均同；

(3)组合截面连接的螺栓根据壁厚不同，采用 M6 和 M10；螺栓间距参考我国《低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程》(JGJ 227—2011)<sup>[17]</sup>和北美 AISI S100<sup>[5]</sup>规定，取为 100~150 mm。

## 1.2 试验装置

本试验装置如图 2 所示。图 2(a)中，上、下支座均为铰接，通过销铰支座连接实现；试验时，将竖向反复拉、压荷载作用于试件截面形心，试件可绕其弱轴  $y$  转动；加载时，水平千斤顶的水平位移保持不变，但竖向会随动于竖向千斤顶，避免产生附加荷载，可实现较真实的铰接，并在试验加载过程中防止意外侧翻，保证试验安全。

## 1.3 加载制度

参考文献[18]制定本试验的加载制度：以位移控制为主，也即通过控制作动器竖向位移量进行加载；加载控制分弹性、屈服两个阶段，具体加载制度如下：

(1)屈服前分 3 级，每级位移加载值为  $\pm 0.25\delta_y$ 、 $\pm 0.5\delta_y$ 、 $\pm 0.75\delta_y$ ，每级循环 1 圈；

(2)屈服后每级位移加载值为  $\pm \delta_y$ 、 $\pm 1.5\delta_y$ 、 $\pm 2\delta_y$ 、 $\pm 3\delta_y \dots$ ，每级循环 3 圈，直至试件破坏或严重变形，结束加载。

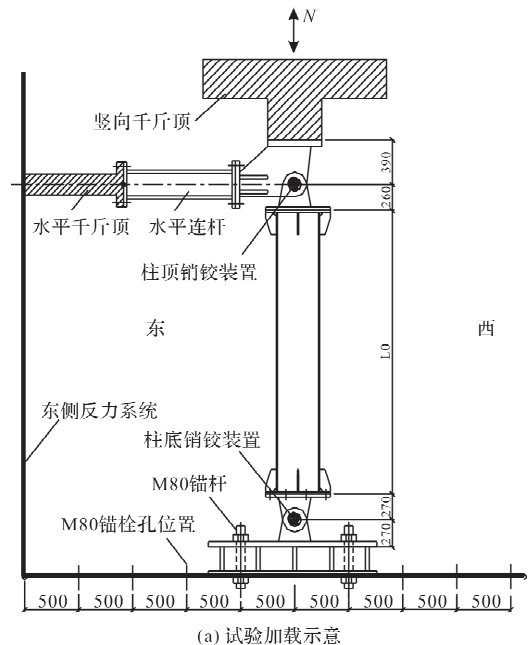
$\delta_y$  为冷弯型钢全截面屈服位移，具体可参见文献[13, 20]。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 试验过程

试验大致分以下步骤：构件安装就位→几何对中→测点检查→物理对中→正式加载→现象观察与记录→数据存储。

试验过程未出现端板、加劲肋等焊缝撕裂，组合截面的螺栓断裂、滑移等现象，试验顺利。试件最终破坏时，未出现被拉断现象，只是表层氧化皮脱落严重，尤其是壁厚 8 mm 者；用手触摸变形最大位置处，能明显感觉到发热，且管壁越厚发热越大，说明反复拉、压所做的功很大一部



(a) 试验加载示意



(b) 试验装置全景

图 2 试验整体加载装置

Fig. 2 The whole test setup

分转化为热量消耗。

### 2.2 试验现象

各试件试验破坏现象汇总见表 3，具体破坏模

式见图 3~图 6, 由以下图、表结果可知:

- (1)破坏位置集中分布于距离下销铰  $0.5L \sim 0.8L$  高度范围内, 接近于构件跨中位置, 说明上、下销铰转动效果比较理想;
- (2)破坏位置出现在构件中间或略偏上位置, 未出现在跨中偏下的情况(单截面槽钢也未出现, 可参考文献[20]), 可能是因为试验机上部水平拉杆随动不完全理想, 上端板处未实现理想的固

- 定铰接, 从而导致上销铰约束较弱, 破坏位置上移;
- (3)试件最终破坏时弯向东、西两侧, 且两个方向约各占一半, 说明试件失稳破坏弯向是随机的;
- (4)试件破坏模式有整体失稳、局部失稳、局部-整体相关失稳三种模式, 与其长细比、宽厚比相关。

表 3 试验破坏现象汇总  
Tab. 3 Summary of test failure phenomena

序号	试件编号	相对破坏位置	试件最终弯向	开口处变形	破坏模式
1	C2-AC-L50-35	$0.7L$	东侧	外张	整体失稳
2	CC1-AC-L95-70	$0.8L$	东侧	内聚	整体失稳
3	CC2-AC-L50-35	$0.6L$	西侧	内聚	局部失稳
4	CC2-AC-L70-35	$0.5L$	西侧	内聚	局部-整体失稳

注: (1)相对破坏位置: 试件最大破坏处距下销轴中心的距离与试件整体长度  $L$  的比值;  
(2)试件最终弯向: 东侧、西侧请看图 2(a)示意;  
(3)开口处变形: 参见图 1 截面形式图, 内聚、外张均指试件最终弯向破坏时的截面开口相对位移形态。

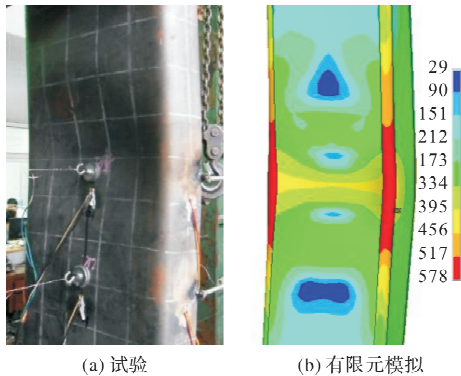


图 3 C2-AC-L50-35 破坏模式  
Fig. 3 Failure mode of the C2-AC-L50-35

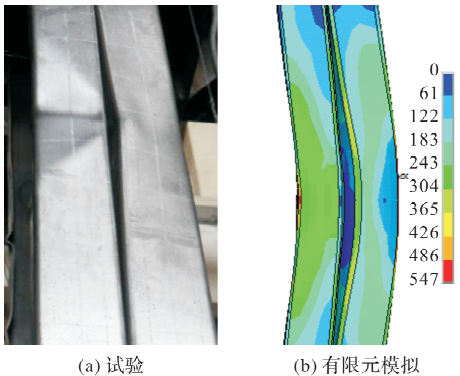


图 4 CC1-AC-L95-70 破坏模式  
Fig. 4 Failure mode of the CC1-AC-L95-70

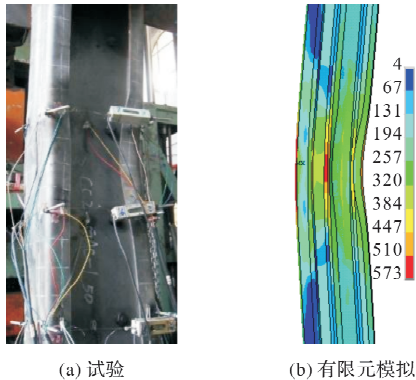


图 5 CC2-AC-L50-35 破坏模式  
Fig. 5 Failure mode of the CC2-AC-L50-35

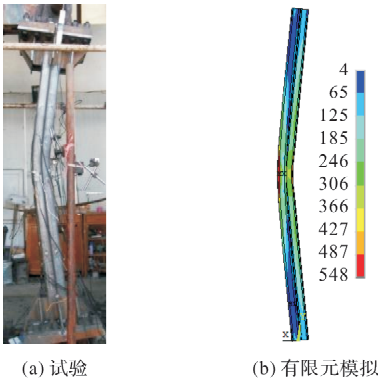


图 6 CC2-AC-L70-35 破坏模式  
Fig. 6 Failure mode of the CC2-AC-L70-35

2.3 应力-应变曲线

滞回曲线是分析试件抗震性能最主要的方法, 从曲线中可以提取骨架曲线进行抗震性能分析. 试件竖向荷载-位移( $N-\delta$ )滞回曲线见图 7. 图中,

横坐标为构件顶部竖向反复位移  $\delta$ , mm, 是上下两个销轴处竖向位移计的位移值; 纵坐标为试验机竖向千斤顶施加的荷载  $N$ , kN, 并约定以压力为正, 拉力为负. 由图 7 的滞回曲线可得到以下

结论:

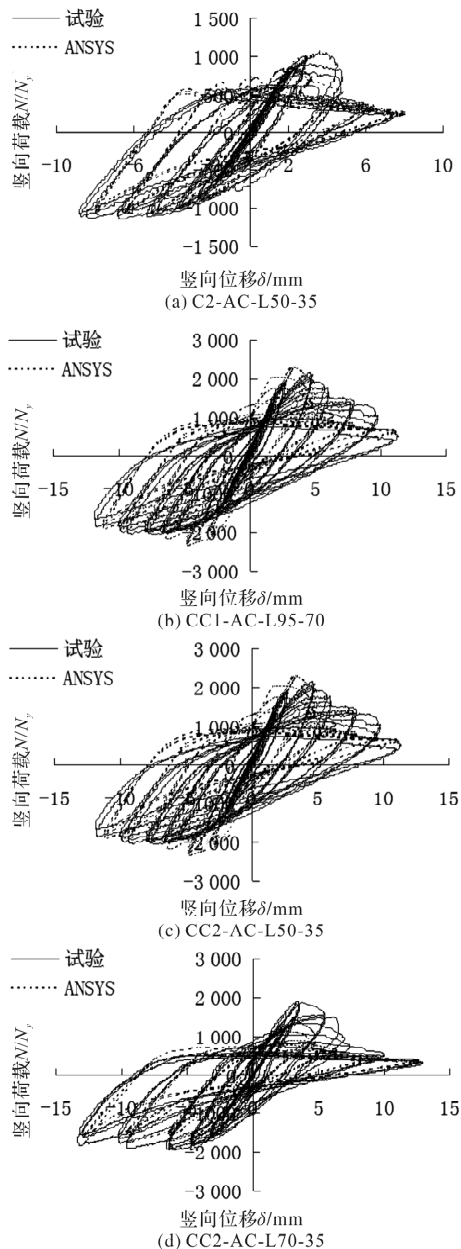


图7 试验及有限元滞回曲线

Fig. 7 Cyclic load-deformation curve for test and FEM

(1)滞回曲线是非对称的,受压阶段的承载能力、延性、刚度退化都明显低于受拉阶段;对于壁厚  $t=8\text{ mm}$  的 CC2 组合截面,受压阶段峰值与受拉阶段接近,而对于单截面 C1 构件,两者差距较大,从而说明组合效应的作用,延缓了构件屈曲;

(2)比较不同宽厚比构件的滞回曲线,发现腹板宽厚比  $h/t$  数值较大和长细比  $\lambda_y$  较大的构件承载力退化严重,如构件 CC1-AC-L95-70;反之则退化较轻;

(3)当宽厚比相同时,长细大的构件(CC2-AC-L70-35)不如长细小的构件(CC2-AC-L50-35)滞

回曲线饱满,耗能能力明显降低;

(4)单槽钢 C2-AC-L50-35 与组合截面 CC2-AC-L50-35 比较,组合截面滞回曲线明显饱满,强度下降缓慢,耗能性能优越,综合抗震性能优于单截面构件.

## 2.4 试验结果分析

### (1)组合截面效应

骨架曲线是由滞回曲线各加载级第一循环的峰值点所连成的包络线.提取构件 C2-AC-L50-35 和 CC2-AC-L50-35 骨架曲线,如图 8 所示.图中纵坐标为千斤顶竖向荷载  $N$  与全截面屈服荷载  $N_y$  比值,横坐标为竖向位移  $\delta$  与全截面屈服位移  $\delta_y$  比值.

由于 C2-AC-L50-35 和 CC2-AC-L50-35 两个构件的长细比相同,只是单截面与组合截面区别,故分析两者骨架曲线可得出组合截面对构件抗震性能影响如下:

1)在受压阶段组合截面相对峰值略高于单截面,是因为组合截面腹板处相互协同工作,延缓了单个腹板屈曲,使承载力提高,实现了  $1+1>2$  的组合效应;

2)在受压阶段峰值点过后,组合截面相对强度下降速度慢于单截面,证明了腹板间存在相互协同工作,延缓了承载力的下降,增强了耗能,组合效应明显.

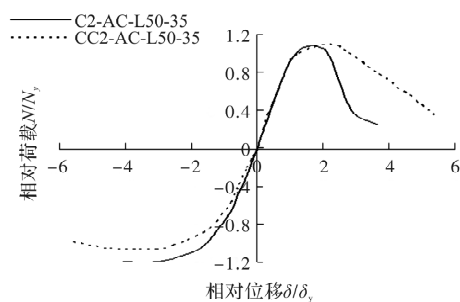


图8 组合截面影响

Fig. 8 Influence of the built-up section

### (2)截面参数影响

鉴于试验样本数量不足,对影响构件抗震性能较大参数,如长细比、宽厚比,此处不做分析,将在下面有限元部分分析.

## 3 ANSYS 有限元模拟分析

由于受试验设备加载能力限制,组合截面试件截面无法选择过多、过大,一定程度限制了试验的参数化分析,故本节采用 ANSYS 有限元软件模拟计算(FEM)进行参数化分析.

3.1 有限元模型建立

本文采用 ANSYS 有限元建模, 选取 SHELL181 单元模拟槽钢构件. 钢材选用 Q235, 屈服强度取名义屈服值  $f_y=235$  MPa; 选用双线性随动强化模型(BKIN), 翼缘、腹板、卷边的平板部位和弯角部位材性分别定义: 统一取弹性模量  $E=2.06\times 10^5$  MPa, 取平板部位切线模量  $E_1=0.001E$ , 取弯角部位切线模量  $E_1=0.005E$ ; 泊松比  $\nu=0.3$ .

由于实际冷弯型钢构件并非理想完善杆件<sup>[3, 20]</sup>, 本文建模时考虑了整体和局部两类初始缺陷: 假设构件的整体初始变形曲线为正弦半波, 整体初始缺陷幅值取构件长度的  $L/750$ ; 对于局部初始缺陷, 取构件一阶屈曲模态作为初始缺陷, 其峰值可取  $h/150$ ( $h$  为腹板高度).

为尽量模拟真实试验, 在模型两端添加端板和加劲肋; 组合截面之间通过粘结单元将其固结以模拟螺栓连接.

采用自由网格划分, 网格划分尺寸为  $6\sim 12$  mm之间, 具体依据构件截面尺寸而定. 有限元的其余建模和分析过程可参见文献[19, 20], 此处不再赘述.

3.2 有限元模型验证

为验证本文所建有限元模型的准确性, 将模拟所得破坏模式和滞回曲线与试验结果对比.

3.2.1 破坏模式对比

将有限元模拟得到的破坏模式与试验结果对比, 如有限元与试验所得的破坏模式、位置基本一致, 说明本文采用的有限元模型能较精确地模拟试件真实的破坏模式.

3.2.2 滞回曲线对比

为进一步验证本文所建有限元模型的准确性, 将有限元模拟与试验所得的荷载-位移滞回曲线进行对比, 两者拟合程度较高.

以上对比说明, 无论是破坏模式还是滞回曲线, 本文采用的有限元模拟方法能较准确模拟试验, 可以作为进一步参数化分析的数值模拟方法.

3.3 参数化试件选择

为进一步研究宽厚比( $h/t$ )、长细比( $\lambda$ )参数对轴心受力构件抗震性能的影响, 选取常用的参数构件进行参数化分析, 具体为: 宽厚比  $h/t=20、30、40、50$  四个值; 长细比  $\lambda_y=30、50、70、90$  四个值. 按照宽厚比变化的需求, 型钢截面尺寸选择时保持厚度  $t$  不变, 统一取  $t=10$  mm, 变化截面腹板高度  $h$  值, 取  $h=200$  mm,  $300$  mm,  $400$  mm,  $500$  mm, 从而得到宽厚比变化. 所选模拟用组合截面构件共 16 个, 详见表 4, 表中构件编号意义与表 1 类似, 只是 C1~C4 对应的是此处 4 种不同高度  $h$  截面, 其余不再赘述.

表 4 有限元参数化分析构件选用表  
Tab. 4 Component selection table for finite element parametric analysis

序号	构件编号	$h/\text{mm}$	$b/\text{mm}$	$a/\text{mm}$	$t/\text{mm}$	$L/\text{mm}$	$h/t$	$\lambda_y$	$f_y/\text{MPa}$
1	CC1-AC-L30-20	200	67	40	10	1 020	20	30	235
2	CC1-AC-L50-20	200	67	40	10	1 701	20	50	235
3	CC1-AC-L70-20	200	67	40	10	2 381	20	70	235
4	CC1-AC-L90-20	200	67	40	10	3 061	20	90	235
5	CC2-AC-L30-30	300	100	45	10	1 459	30	30	235
6	CC2-AC-L50-30	300	100	45	10	2 432	30	50	235
7	CC2-AC-L70-30	300	100	45	10	3 404	30	70	235
8	CC2-AC-L90-30	300	100	45	10	4 377	30	90	235
9	CC3-AC-L30-40	400	133	55	10	1 930	40	30	235
10	CC3-AC-L50-40	400	133	55	10	3 217	40	50	235
11	CC3-AC-L70-40	400	133	55	10	4 503	40	70	235
12	CC3-AC-L90-40	400	133	55	10	5 790	40	90	235
13	CC4-AC-L30-50	500	167	65	10	2 417	50	30	235
14	CC4-AC-L50-50	500	167	65	10	4 028	50	50	235
15	CC4-AC-L70-50	500	167	65	10	5 639	50	70	235
16	CC4-AC-L90-50	500	167	65	10	7 250	50	90	235

### 3.4 影响构件抗震性能的参数分析

#### 3.4.1 长细比影响

图9为宽厚比相同,但长细比不同的组合截面构件相对承载力骨架曲线比较,由图分析可知:

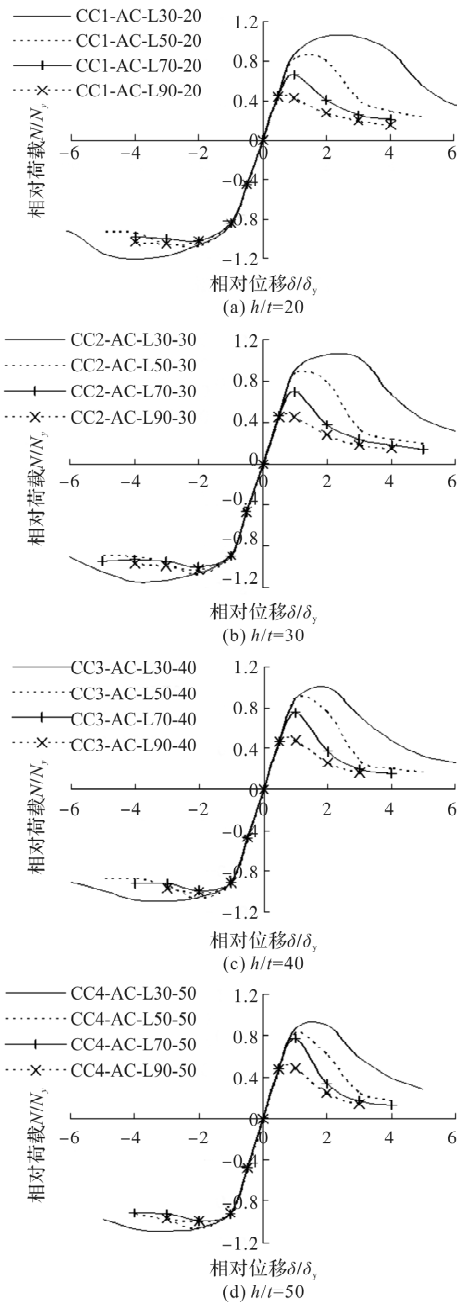


图9 骨架曲线长细比影响

Fig. 9 Influence of slenderness ratio of skeleton curves

(1)在受压阶段,相同截面不同长细比构件,其初始刚度相近;当试件宽厚比较小时,如图9(a)中 $h/t=20$ ,屈服之后,长细比小的试件相对承载力比长细比大的试件下降慢很多,延性更好,曲线间下降趋势相差较大;如图9(a)、(d)比较,大宽厚比时长细比变化对承载力影响不如小宽厚比时影响大,曲线间下降趋势的差距随宽厚比变大而在减小,但整体下降更快;

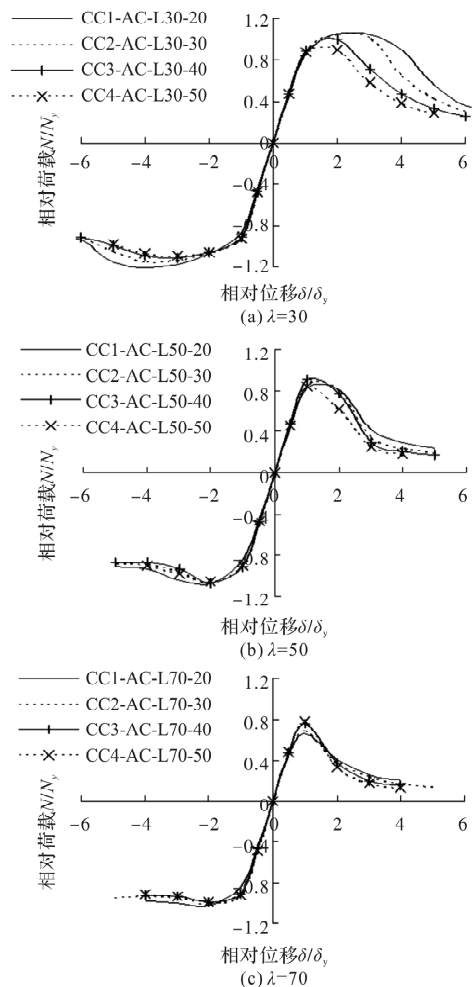
(2)长细比大的构件在受压阶段峰值相对荷载小于长细比小的构件(如 $\lambda_y=90$ 构件约为0.5),峰值点过后曲线下降速度快,说明长细比大的构件存在整体失稳现象;而长细比小(如 $\lambda_y=30$ )的构件,相对荷载值为0.9~1.1之间,骨架曲线下降缓慢,证明部分轴压比小的构件可进入全面屈服阶段,抗震性能好;

(3)受拉阶段峰值荷载大小受长细比影响不大,但峰值点后长细比大者曲线下降速度略快,说明长细比大时反复加载更容易失稳,提前造成了损伤累积,导致受拉后期承载力也随之提前下降;但宽厚比小的构件受拉承载力受到影响更小,证明局部屈曲的较早出现也会影响受拉承载力。

以上分析表明,长细比对构件抗震性能影响较大,特别是对受压阶段峰值较大,对受拉阶段峰值点基本无影响;但无论受拉还是受压,长细比大者曲线下降均较快,延性降低,耗能能力减弱。

#### 3.4.2 宽厚比影响

图10为长细比相同,但宽厚比不同时构件相对承载力骨架曲线比较,由图可看出:





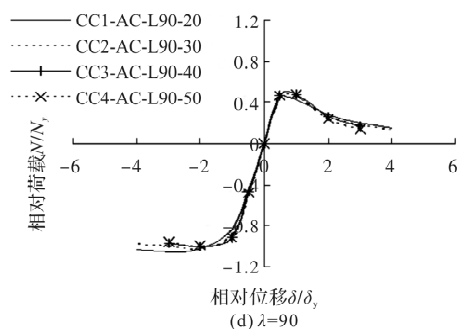


图10 骨架曲线宽厚比影响

Fig. 10 Influence of width-thickness ratio of skeleton curves

(1)在受压阶段,不同宽厚比构件,其初始刚度相同;当长细比相同时,随着宽厚比增加,骨架曲线下降逐步加快;

(2)在受压阶段,宽厚比大的构件相对峰值荷载小于宽厚比小的构件,并且相对承载力小,峰值点过后曲线下降速度快,说明宽厚比大的构件存在局部失稳现象,但影响程度不如长细比的影响大。

## 4 结论

通过以上试验和有限元模拟分析,最终得出以下结论:

(1)通过试验研究发现,组合截面的组合效应明显,对腹板局部屈曲、构件整体失稳均表现出较强的协同工作能力,可实现 $1+1>2$ 的组合效果,滞回曲线饱满,抗震性能优于单截面;

(2)宽厚比 $h/t$ 、长细比 $\lambda$ 是影响试件抗震性能的两个主要参数,其值越大,试件的承载力、延性、耗能越差,设计时应尽量避免选择长细比和宽厚比较大的构件;

(3)滞回曲线拉、压阶段形状不对称,但是当长细比、宽厚比均较小时,拉、压的荷载峰值接近,滞回曲线饱满,证明厚壁组合构件在满足一定条件下,受压阶段也可进入全截面屈服变形,耗能较好,可考虑应用于工程实践。

## 参考文献 References

[1] 南晶晶,凌利改,田国平.冷弯型钢在国内外的应用[J].水利与建筑工程学报,2009,7(2):117-119  
NAN Jingjing, LING Ligai, TIAN Guoping. Development of cold bending steel at home and abroad and its application in construction[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2009, 7(2): 117-119.

[2] 李元齐,徐厚军.我国冷弯型钢结构发展现状及展望[J].建筑结构,2019,49(19):91-101.  
LI Yuanqi, XU Houjun. Research and development of cold-formed steel structures in China [J]. Building Structure, 2019, 49(19): 91-101.

[3] 湖北省发展计划委员会.冷弯薄壁型钢结构技术规范:GB 50018—2002 [S].北京:中国计划出版社,2002.  
Hubei Provincial Development Planning Commission. Technical code of cold-formed thin-wall steel structures: GB 50018—2002 [S]. Beijing, China Plan Publishing Company, 2002.

[4] 陈雪庭,张中权.冷弯薄壁型钢结构构件[M].北京:中国铁道出版社,1990:5-7.  
CHEN Xueting, ZHANG Zhongquan. Cold-formed thin-walled steel structures [M]. Beijing:China Railway Publishing House, 1990: 5-7.

[5] American Iron and Steel Institute. North American specifications for the design of cold-formed steel structural members: AISI S100—2018 [S]. Washington D. C.: American Iron and Steel Institute, 2018.

[6] Council of Standards Australia, Council of Standards New Zealand. Cold-formed steel structures: AS/NZS4600: 2005 [S]. Sydney: Council of Standards Australia, 2005.

[7] Britain Standard Institute. BS EN 1993-1-6: 2006 Eurocode 3: Design of steel structures [S]. London: Britain Standards Institute, 2006.

[8] 赵一婕,张其林.冷弯薄壁型钢组合截面构件研究现状[J].施工技术,2013,42(15):1-8.  
ZHAO Yijie, ZHANG Qilin. State of the cold-formed thin-walled built-up section members [J]. Construction Technology, 2013, 42(15): 1-8.

[9] 郑娟,王征明,李振存.冷弯薄壁型钢组合截面柱轴心受压承载力研究[J].结构工程师,2020,36(5):135-144.  
ZHENG Juan, WANG Zhengming, LI Zhencun. Study on axial compression bearing capacity of cold-formed thin-walled steel composite section column[J]. Structural Engineer, 2020, 36(5): 135-144.

[10] 冉红东,梁文龙.双槽钢组合截面悬臂构件在往复弯曲下滞回性能研究[J].建筑结构,2016,46(7):56-63.  
RAN Hongdong, LIANG Wenlong. Hysteretic behavior study of cantilever member with double-channel steel composite section under reversed cyclic bending [J]. Building Structure, 2016, 46(7): 56-63.

[11] YOUNG B, CHEN J. Design of cold-formed steel built-up closed sections with intermediate stiffeners [J]. Journal of Structural Engineering: ASCE, 2008,



- 134(5): 727-737.
- [12] WHITTLE J, RAMSEYER c. Buckling capacities of axially loaded cold-formed built-up C-channels [J]. *Thin Walled Structures*, 2009, 47(2): 190-201.
- [13] 付小超, 李元齐, 沈祖炎. 开口冷弯厚壁型钢轴压构件抗震性能研究 [J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2016, 33(3): 1-7.  
FU Xiaochao, LI Yuanqi, SHEN Zuyan. Research on the seismic behaviors of opening cold-formed thick-walled steel under the axial cyclic loading [J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2016, 33(3): 1-7.
- [14] LI Gongwen, LI Yuanqi. Investigation on the hysteretic behavior of axially loaded cold-formed thick-walled steel members [J]. *Structures*, 2022, 38: 1411-1425.
- [15] 李元齐, 吴雨杭. 冷弯型钢轻钢集成体系建筑工业化建造技术发展现状与展望 [J]. *四川建筑科学研究*, 2021, 47(3): 1-19.  
LI Yuanqi, WU Yuhang. State-of-the-arts on industrialized construction technology of light-weight steel integrated buildings using cold-formed steels [J]. *Sichuan Building Science*, 2021, 47(3): 1-19.
- [16] 中国钢铁工业协会. 通用冷弯开口型钢尺寸、外形、重量及允许偏差:GB/T 6723—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.  
China Iron & Steel Association. Cold forming sectional steel-Open sectional steel for general structure-Dimensions, shape weight and permissible tolerances; GB/T 6723—2008 [S]. Beijing, Standards Press of China, 2008.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程:JGJ 227—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for low-rise cold-formed thin-walled steel buildings:JGJ 227—2011 [S]. Beijing, China Architecture & Building Press, 2011.
- [18] European Convention for Constructional Steelwork. Recommended testing procedure for assessing the behavior of structural steel elements under cyclic loads: ECCS-45[S]. Brussels:European Convention for Constructional Steelwork,1986.
- [19] FU Xiaochao, LI Yuanqi. Research on the hysteretic behaviors of cold-formed thick-walled steel columns under the axial cyclic loading [C]//8th STESSA International Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas. Shanghai: Tongji University, 2015: 441-448.
- [20] 付小超. 开口冷弯厚壁型钢结构抗震性能研究: [D]. 上海:同济大学,2017.  
FU Xiaochao. Research on seismic performance of open-section cold-formed thick-walled steel members [D]. Shanghai: Tongji University, 2017.

(编辑 吴海西)