

开口冷弯厚壁型钢轴压构件抗震性能研究

付小超,李元齐,沈祖炎

(同济大学 土木工程学院,上海 200092)

摘要:为研究开口冷弯厚壁型钢构件在轴向滞回荷载作用下的抗震性能,首先选取了3根壁厚 $t > 6$ mm的冷弯内卷边槽钢进行轴向滞回试验,然后建立相关的ANSYS有限元模型进行模拟计算,在与试验结果对比的基础上,选取了不同的腹板宽厚比($h/t = 25 \sim 90$)、绕弱轴长细比($\lambda_y = 30 \sim 90$)的构件进行参数化分析计算。研究表明: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(λ_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;滞回;抗震性能;宽厚比;长细比

中图分类号:TU392.1

文献标识码:A

Research on the seismic behaviors of opening cold - formed thick - walled steel under the axial cyclic loading

FU Xiaochao, LI Yuanqi, SHEN Zuyan

(Department of Structural Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092)

Abstract: In order to investigate the hysteretic behaviors of opening cold - formed thick - walled steel members under the axial cyclic loading, three cold - formed steel columns were tested. 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 25 to 90 for web and slenderness ratio about the weak axis y (λ_y) rang from 30 to 90 of such members were investigated by FEM. Analysis results indicated that 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 (λ_y) should be avoided in designing, because they will lead to poor seismic performance.

Key words: cold - formed thick - walled steel; hysteretic; seismic performance; width - thickness ratio; slenderness ratio

建筑业是冷弯型钢最主要的用户,国外发达国家建筑业用冷弯型钢已占其建筑用钢的40%~70%^[1]。当前,关于冷弯型钢的研究侧重的是冷弯薄壁型钢(习惯上把壁厚不超过6 mm的冷弯型钢称为冷弯薄壁型钢^[2]),并取得了非常丰富的研究成果,很多国家制定了相关设计规范及标准。然而,随着科技的发展,生产力水平的提高,冷弯厚壁(壁厚 $t > 6$ mm)型钢的生产及应用也慢慢开始广泛。目前,我国新的国家标准《冷弯型钢结构

技术规范》修订工作正在进行,明确了新规范适用于0.6~25 mm厚的冷弯型钢,并且确定需要增加冷弯型钢关于抗震性能的相关内容进入新规范。这些对冷弯厚壁型钢的研究都提出了新的要求和挑战。目前关于冷弯厚壁型钢的研究,主要停留在冷弯强化效应、残余应力分布及相应短柱轴压试验上^[3-5],而冷弯厚壁类构件的抗震性能研究未见报道,只有少量关于薄壁型钢的抗震性能研究^[6-9]。冷弯薄壁型钢抗震性能的研究主要是轴

表 1 试件设计参数

Tab. 1 Test section parameters

试件编号	截面规格 $h \times b \times a \times t / \text{mm}$	长度 L / mm	宽厚比 h/t	长细比 λ_y	屈服强度 f_{ym} / MPa	屈服位移 Δ_y / mm
C2-t8-L50-T	250.4 × 80.3 × 49.3 × 7.43	1 521	30	50	270.3	1.58
C4-t12-L30-T	360.2 × 139.9 × 79.8 × 11.33	1 616	30	30	274.6	2.12
C4-t12-L50-T	365.2 × 140.3 × 81.0 × 11.33	2 704	30	50	274.6	3.71

向滞回^[6]、压弯滞回^[7-8]和受弯构件滞回^[9]的研究。由于研究对象均是薄壁型钢,宽厚比较大,容易发生局部屈曲甚至畸变屈曲^[6],所以其表现出来的抗震性能不是很理想,研究表明:宽厚比、长细比、轴压比是影响其抗震性能的主要因素。然而,厚壁型钢力学性能与薄壁型钢存在诸多差异,关于其抗震性能的研究尚未见报道,因此本文选取了3根壁厚 $t > 6 \text{ mm}$ 的冷弯内卷边槽钢(C形钢)进行轴向滞回试验,然后建立相关的ANSYS有限元模型进行计算,在与试验结果对比、验证模型准确性的基础上,选取不同宽厚比、长细比值进行参数化分析,以研究冷弯厚壁型钢的抗震性能。

1 试验概况

1.1 试件选择

综合考虑现有试验设备加载能力、试验装置空间限制、试验成本等因素,本文选取了3根冷弯内卷边槽钢进行轴向滞回试验,其截面形式及符号标注如图1所示。

如表1所示,本试验选择表中3种规格的冷弯型钢进行试验研究,表中数据均为实测值。其中, λ_y 为截面绕弱轴 y 的长细比, λ_{ym} 为实测母材屈服强度,其余符号意义见图1。

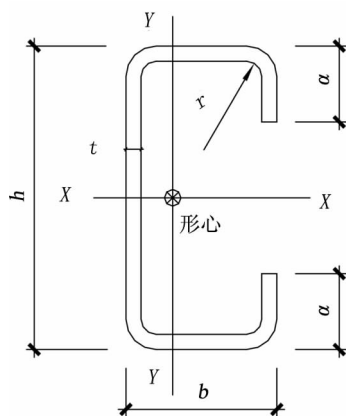


图1 截面形式及符号标注

Fig. 1 Test section and symbols

1.2 试验装置

本试验在同济大学建筑工程系结构试验室进行,采用10 000 kN大型多功能静液压伺服试验装置(MTS),竖向压10 000 kN、竖向拉3 000 kN,有效行程 $\pm 300 \text{ mm}$ 。上、下支座铰接是通过销铰支座连接实现;轴向反复拉、压荷载通过竖直千斤顶施加于试件截面的形心;加载时,水平千斤顶的水平位移保持不变,但其竖向位移跟动于竖向千斤顶,以模拟真实的铰接,并防止试件侧翻,保证安全。

1.3 加载制度

参考文献[10]建议的加载制度,本试验以位移控制为主,通过控制作动器竖向位移进行加载,加载控制分弹性、屈服两个阶段。具体采用如下加载制度:

(1) 屈服前分3级,每级为 $\pm 0.25\Delta_y$ 、 $\pm 0.5\Delta_y$ 、 $\pm 0.75\Delta_y$,每级位移循环1圈;

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

Δ_y 为全截面屈服位移,见表1。

2 试验结果及分析

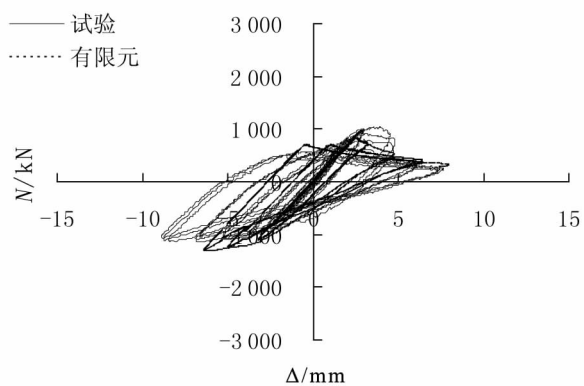
2.1 试验现象

试验过程中,柱高中部变形最大,约加载到 $1\Delta_y \sim 1.5\Delta_y$ 时,柱中约1.5倍腹板高度范围内的板件开始出现表层氧化铁皮脱落现象,但各板件基本保持不变形,证明截面整体被压缩进入屈服,这不同于薄壁构件试验^[6]的板件会在整体屈服之前局部屈曲、鼓曲,表面仍然光滑;查看此时的应变片读数,柱高中部应变基本进入了塑性应变。约加载至 $2\Delta_y$ 之后,卷边、腹板开始出现轻微变形,随着位移继续增加,其承载力开始下降,试件开始变形加剧,主要是整体弯向开口方向,卷边方向受压变形最厉害;到最终破坏时,卷边处的自由

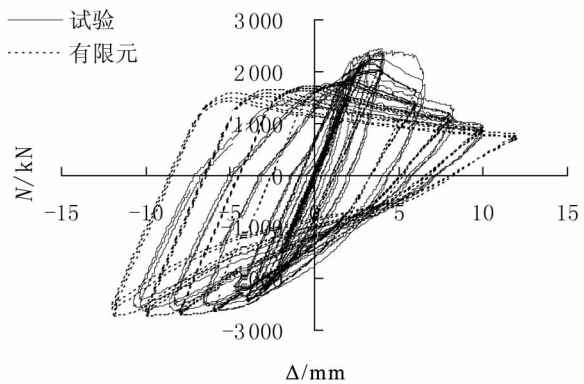
边凹进,翼缘略有外鼓,腹板由于受拉,未见明显鼓曲。由于试件均是厚壁型钢,宽厚比较小,不容易发生局部屈曲,所以试件在破坏过程中未见到明显局部屈曲现象。

2.2 试验滞回曲线

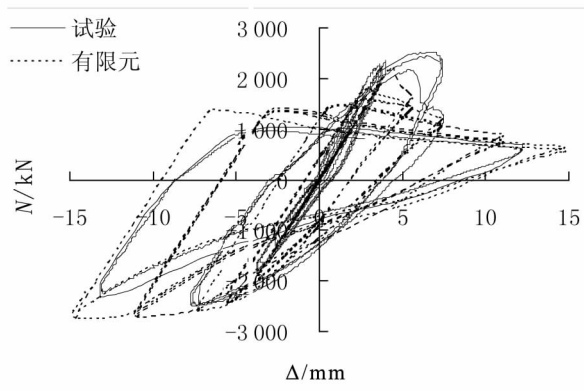
将竖向往复荷载 N 和往复位移 Δ 记录的数据绘制成荷载-位移滞回曲线,见图2。由图可看出,



(a) C2-t8-L50-T



(b) C4-t12-L30-T



(c) C4-t12-L50-T

图2 试验及有限元滞回曲线

Fig.2 Cyclic load-deformation curve for test and FEM

三者滞回曲线均比较饱满,荷载下降缓慢。对比文献[6]试验结果以及后文中有限元模拟的结果,发现冷弯厚壁型钢轴向滞回曲线要饱满的多,说明厚壁型钢滞回性能优越。

对比试件 C4-t12-L30-T 和 C4-t12-L50-T,两者截面相同,只是长细比不同,长细比小的 C4-t12-L30-T 曲线饱满程度大于长细比大的 C4-t12-L50-T,耗能更好;且峰值荷载之后,长细比小的每级滞回圈下降的也慢,延性更好。总之,相同截面,长细比小的抗震性能更好。此处试件 C4-t12-L50-T 的滞回曲线滞回圈数过少,显的不够饱满,主要原因是此试件是第一个做的试验,对试验机滞回加载掌控不足,导致其中有两级位移加载过头,超过控制位移。

对比试件 C2-t8-L50-T 和 C4-t12-L50-T,两者截面不同,但长细比、宽厚比均相同,可是 C2-t8-L50-T 包络的面积远小于 C4-t12-L50-T 的,主要是后者管壁更厚,承载力更高,所以耗能能力更强。

3 有限元模拟

3.1 模型的建立

本文采用 ANSYS 有限元软件进行参数化分析。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),弹性模量 $E = 2.06 \times 10^5$ MPa,切线模量 $E_t = 0.001E$;泊松比 $\nu = 0.3$ 。在构件模型两端添加端板和加劲肋,尽量模拟真实试验情况。采用自由网格划分,网格划分尺寸为 $6 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$ 。

3.2 模型准确性验证

有限元模型的正确性影响后续参数化分析的结果,是必要的前期工作,显得尤为重要。先用本有限元模型对上文中3个试验构件进行模拟计算比较,发现无论是破坏模式还是滞回曲线,均与试验结果吻合较好,说明该模型建立的比较合理、准确,可以用于后续参数化分析。

另外,由有限元的 von Mises 应力分布图可看出,构件中部应力最大,达到了钢材屈服值 $f_y = 235$ MPa,证明构件全截面进入屈服状态,充分发挥了厚壁型钢材料的力学性能。

3.3 参数化分析模型选择

在以上有限元计算模型准确基础上,此处选择2、4、8、12、16 mm的五种壁厚的冷弯型钢用于参数化分析,具体尺寸规格见表2。表中, L 为试件长度; $\Delta_y (= N_y \cdot L/EA)$ 为全截面屈服位移; λ_y 为截面绕弱轴 y 的长细比,其余符号见图1。

4 有限元结果分析

4.1 滞回曲线

滞回曲线是分析试件抗震性能最主要的途径,从曲线中可以提取骨架曲线、刚度退化、耗能系数、延性系数等非常多的参数进行抗震性能分析。通过 ANSYS 有限元模拟所得典型滞回曲线如图3-图5所示,其中第一象限为受压区,第三

象限为受拉区。限于篇幅,此处只给出C1-t2、C3-t8、C5-t16三系列构件曲线图。

由图3-图5明显可看出滞回曲线是非对称的,是由于构件拉、压性能不一样,导致荷载不对称。还发现,宽厚比影响滞回曲线的饱满程度,如图3中,腹板宽厚比 $h/t=90$,属于薄壁构件,发生了局部屈曲现象,受压区提前失稳破坏,较受拉区荷载值小的多;图5试件为小宽厚比($h/t=25$),未发生局部屈曲,其滞回曲线比图3的要显得饱满多,抗震性能最优越;而宽厚比值相对居中的图4构件($h/t=37.5$),滞回曲线饱满程度介于上述两者之间。长细比也是影响滞回曲线饱满程度的一个主要因素,同一截面构件,长细比越大,越容易发生整体失稳,其滞回曲线越不饱满,如构件C5-t16-L30与构件C5-t16-L90,虽然均未发生局部屈曲现象,但由于C5-t16-L90长细比较大,

表2 模型规格尺寸

Tab.2 Model dimensions

试件编号	$h \times b \times a \times t/\text{mm}$	h/t	L/mm	λ_y	Δ_y/mm
C1-t2-L30	180×60×15×2	90	641	30	0.73
C1-t2-L60	180×60×15×2	90	1 282	60	1.46
C1-t2-L90	180×60×15×2	90	1 923	90	2.19
C2-t4-L30	250×80×20×4	63	832	30	0.95
C2-t4-L60	250×80×20×4	63	1 664	60	1.90
C2-t4-L90	250×80×20×4	63	2 495	90	2.85
C3-t8-L30	300×100×30×8	38	1 034	30	1.18
C3-t8-L60	300×100×30×8	38	2 067	60	2.36
C3-t8-L90	300×100×30×8	38	3 101	90	3.54
C4-t12-L30	360×120×40×12	30	1 229	30	1.40
C4-t12-L60	360×120×40×12	30	2 459	60	2.80
C4-t12-L90	360×120×40×12	30	3 688	90	4.21
C5-t16-L30	400×140×50×16	25	1 433	30	1.63
C5-t16-L60	400×140×50×16	25	2 866	60	3.27
C5-t16-L90	400×140×50×16	25	4 299	90	4.90

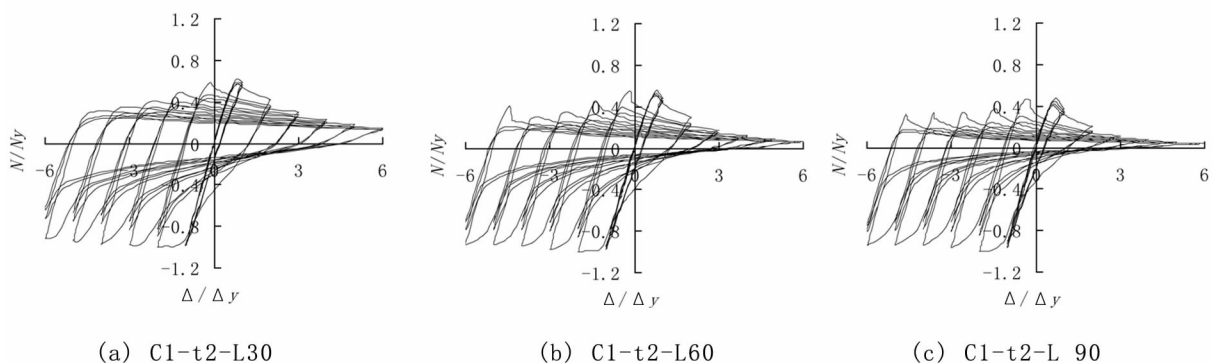


图3 构件C1-t2系列荷载-位移滞回曲线

Fig.3 Cyclic load-deformation curve of series C1-t2

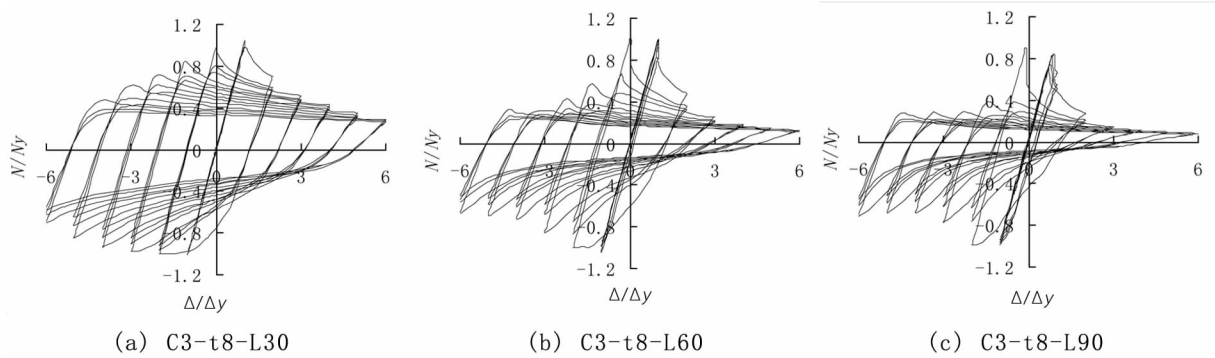


图4 构件C3-t8系列荷载-位移滞回曲线

Fig.4 Cyclic load-deformation curve of series C3-t8

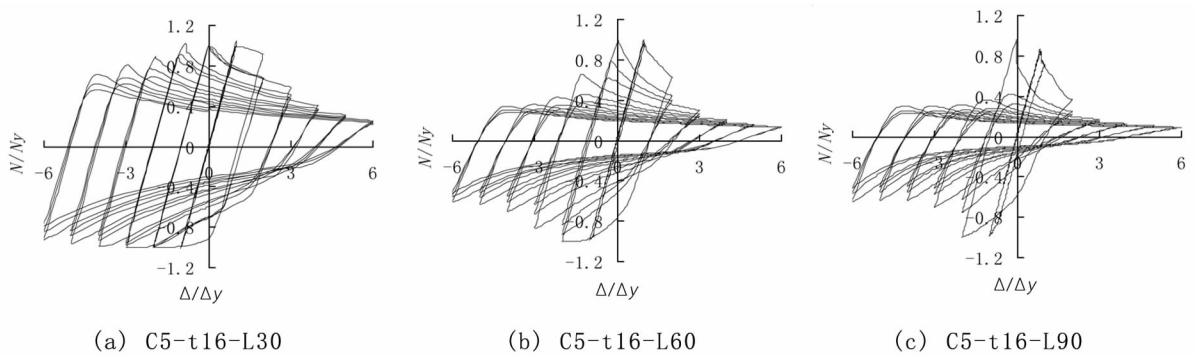


图5 构件C5-t16系列荷载-位移滞回曲线

Fig.5 Cyclic load-deformation curve of series C5-t16

属于长柱,较长细比小的短柱仍显得不够饱满,抗震性能要差。

4.2 骨架曲线

骨架曲线为滞回曲线,是各加载级第一循环的峰值点所连成的包络线。将所有表2中构件有限元模拟所得滞回曲线提取骨架曲线,结果如图6-图7所示。为便于不同截面比较,图中骨架曲线坐标值均采用相对值,其中 N 、 N_y 分别为轴向荷载、全截面屈服荷载, Δ 、 Δ_y 分别为轴向位移、屈服位移。

(1)长细比影响

图6为宽厚比相同,但长细比不同情况下的骨架曲线。从图6可看出长细比对构件抗震性能影响:相同截面不同长细比构件,其初始刚度相近;受压区(第一象限)峰值荷载长细比大的构件小于长细比小的构件,并且峰值点后曲线下落速度略快,说明长细比大的构件存在整体失稳现象;受拉区(第三象限)峰值荷载大小与长细比无关,但峰值点后长细比大者曲线下落速度略快,说明往复的构件失稳破坏造成了构件损伤累积,受拉

后期承载力也随之降低。以上分析可看出,长细比对构件抗震性能影响较大,特别是对受压区峰值较大,对受拉区峰值点基本无影响,但无论受拉还是受压,长细比大者曲线下落均较快,延性降低,耗能能力减弱。

(2)宽厚比影响

图7为长细比相同,但腹板宽厚比不同情况下的骨架曲线。从图7可看出宽厚比对构件抗震性能影响:在相同长细比情况下,随着宽厚比增加,骨架曲线的峰值点逐渐降低,特别是大宽厚比的构件,如C1-t2-90,峰值达不到屈服荷载,说明出现了局部屈曲,构件提前进入屈曲,承载力较低;而小宽厚比的构件,如C5-t16-30,峰值略微超过屈服荷载 N_y ,说明无局部屈曲现象,截面能够进入塑性。

4.3 刚度退化

刚度退化性能反应构件在地震荷载作用下后期抵抗变形的能力,本文采用同级变形下的环线刚度来描述试件的刚度退化,环线刚度的计算公式为:

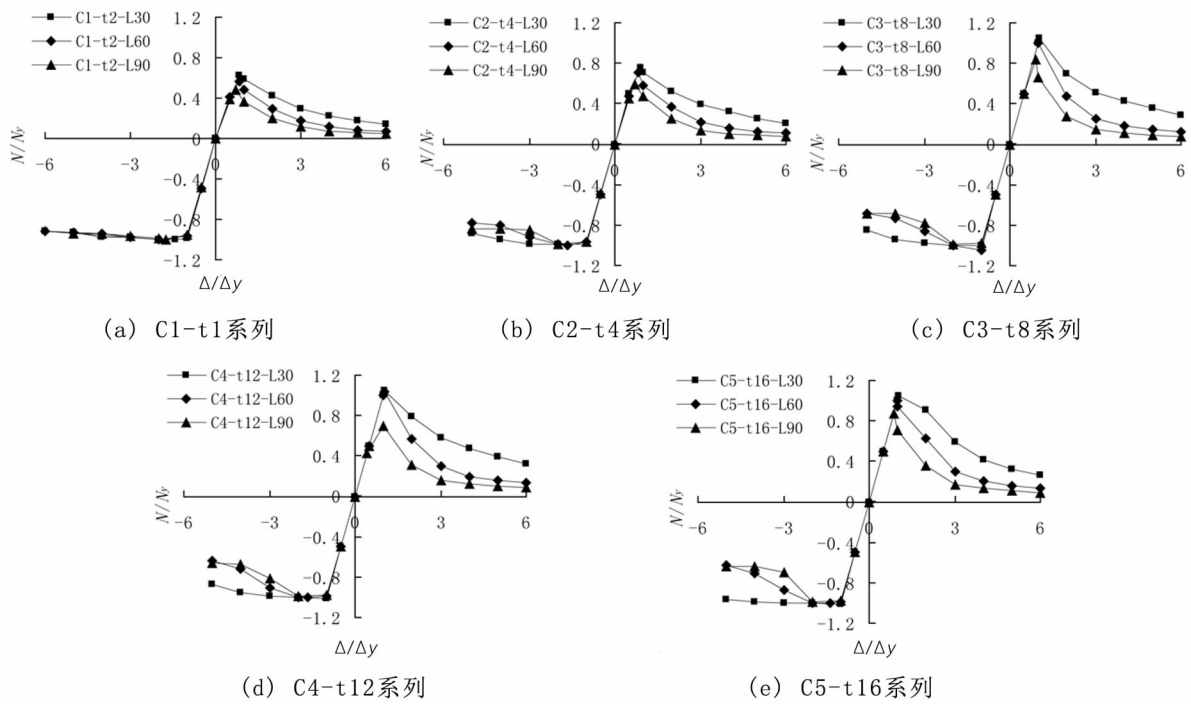


图6 不同长细比下的骨架曲线

Fig.6 Hysteretic envelope for different slenderness ratio

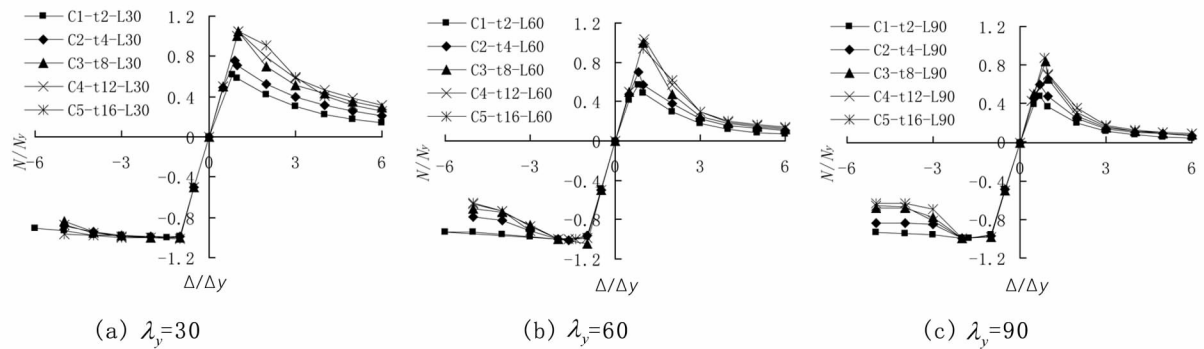


图7 不同宽厚比下的骨架曲线

Fig.7 Hysteretic envelope for different width-thickness ratio

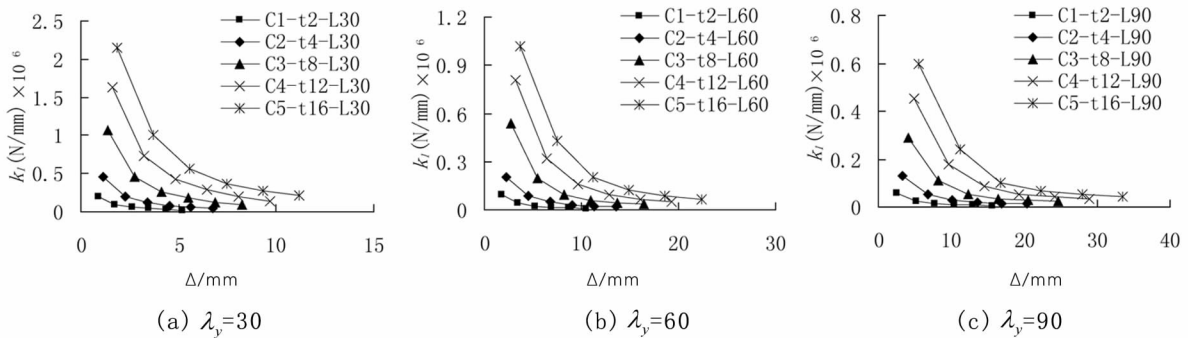


图8 刚度退化情况

Fig.8 Stiffness degradation

$$K_j = \frac{\sum_{i=1}^n N_j^i}{\sum_{i=1}^n \Delta_j^i}$$

式中: N_j^i 为加载位移 $\Delta/\Delta_y=j$ 时第*i*次加载循环的峰值点荷载值; Δ_j^i 为加载位移 $\Delta/\Delta_y=j$ 时,第*i*次加载循环的峰值点的变形值; n 为位移加载循环次数,此处取每级循环下的第一圈进行考察。

图8为长细比相同,但腹板宽厚比不同情况下的刚度退化曲线。由图8可看出,随着每级荷载位移的增加,切线刚度逐渐下降,其中前1~3级下降最快,之后趋于平缓,从图6-图8的滞回曲线上也看出该下降趋势; $\lambda_y=30$ 构件的切线刚度大于 $\lambda_y=60,90$ 的,说明长细比越大的构件越容易失稳破坏,构件刚度后期下降迅速,抵抗变形能力减弱;在相同长细比前提下,如构件C1-t2-L30与C5-t16-L30,宽厚比越大的构件,其切线刚度越小,说明冷弯薄壁型钢抵抗变形能力差,而厚壁型钢好,不容易变形。

5 结论

1)通过3根开口冷弯厚壁型钢的轴向滞回试验证明了该类试验的可行性,并且本文建立的有限元模型能较好模拟该类构件的滞回性能试验。

2)宽厚比、长细比是影响冷弯型钢抗震性能的两个主要因素,宽厚比越大越容易发生局部屈曲,抵抗变形能力减弱,滞回曲线不饱满,总体抗震性能越差;长细比越大越容易发生整体失稳,抗震性能同样越差;工程应用中,尽量避免选用宽厚比、长细比均较大的构件。

3)厚壁冷弯型钢总体抗震性能优越,全截面能进入屈服,滞回曲线饱满,强度下降缓慢,延性

好,抵抗变形能力强,可以考虑推广到地震区使用。

参考文献:

- [1]何保康,李峰,丁国良.冷弯型钢在房屋建筑中的应用和发展[J].焊管,2002,25(5):8-11.
- [2]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.
- [3]李黎明,姜忻良,陈志华,等.冷弯厚壁型钢管冷作硬化效应[J].天津大学学报,2008,41(1):85-91.
- [4]温东辉.冷弯厚壁钢管压弯构件抗震性能研究[D].上海:同济大学,2014.
- [5]李元齐,李功文,沈祖炎,等.冷弯厚壁型钢考虑冷弯效应的屈服强度计算方法研究[J].建筑结构学报,2015,36(5):1-7.
- [6]PADILLA-LLANO C D,MOEN M EATHERTON, et al. Compression-tension hysteretic response of cold-formed steel C-section framing members[C]//Proceedings of the 21st International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, 2012:118-137.
- [7]董军,陆曦,王士奇.冷成型薄壁C型钢构件压弯滞回性能的数值分析[J].防灾减灾工程学报,2006,26(4):419-424.
- [8]杨娜,彭雄,杨庆山.冷弯薄壁型钢C型构件滞回性能[J].土木建筑与环境工程,2012,34(2):69-76.
- [9]谢兆平,宗周红,林晓.冷弯薄壁型钢梁的滞回性能研究[J].河北工程大学学报:自然科学版,2009,26(3):26-30.
- [10]ECCS. Recommended testing procedure for assessing the behavior of structural steel elements under cyclic loads, 1st ed [S]. Brussels, 1986.

(责任编辑 李军)