

文章编号:1673-2049(2019)02-0030-09

## 带斜撑冷弯薄壁型钢墙体抗震性能试验

王宇航<sup>1,2</sup>, 邓锐<sup>1,2</sup>, 姚欣梅<sup>3</sup>, 邹昱瑄<sup>3</sup>, 石宇<sup>1,2</sup>

(1. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045;  
3. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

**摘要:**为了研究带斜撑冷弯薄壁型钢墙体的抗震性能,对4面冷弯薄壁型钢墙体足尺模型进行水平低周反复加载试验,考察斜撑、螺钉间距、端柱承载力对组合墙体抗震性能的影响,总结了各试件的破坏过程和主要破坏特征,分析了墙体的滞回曲线、骨架曲线、刚度退化和耗能等抗震性能指标。结果表明:增加斜撑能够有效提高冷弯薄壁型钢墙体承载力、刚度和耗能能力,但是斜撑和横撑连接节点比较薄弱,连接处横撑翼缘较早发生屈曲,使得斜撑对墙体抗侧性能的提高有限,如果能加强节点区构造,则墙体的抗侧性能能够进一步提升;墙面板周边螺钉间距50 mm的墙体相对于螺钉间距100 mm的墙体承载力、刚度和耗能能力提高较大,但延性有所下降;在墙面板周边螺钉间距50 mm的情况下,对端柱进行了加强,延性和耗能能力却下降明显,说明墙面板的整体性对墙体抗侧性能影响较大;在减小螺钉间距的同时,需要对面板拼接处进行加强或改变拼接方式,防止面板相互挤压而导致脆性破坏。

**关键词:**冷弯薄壁型钢墙体;斜撑;抗震性能;螺钉间距;延性;耗能

**中图分类号:**TU392.1 **文献标志码:**A

## Experiment on Seismic Behavior of Cold-formed Thin-walled Steel Walls with Diagonal Braces

WANG Yu-hang<sup>1,2</sup>, DENG Rui<sup>1,2</sup>, YAO Xin-mei<sup>3</sup>, ZOU Yu-xuan<sup>3</sup>, SHI Yu<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to study the seismic behavior of cold-formed thin-walled steel walls with diagonal braces, horizontal low cyclic loading tests for four full scale models of cold-formed thin-walled steel walls were conducted. The effects of diagonal bracing, screw spacing and chord stud bearing capacity on the seismic performance of the walls were investigated. The failure process and main failure characteristics of all specimens were described, and the hysteresis curves, skeleton curves, lateral stiffness degradation and energy dissipation capacity were discussed. The results show that the arrangement of diagonal bracings result in an effective improvement of the load bearing capacity, stiffness, and energy dissipation capacity of walls. However, the diagonal braces increase the lateral performance limitedly, because the connection between the diagonal brace and the transverse brace is weak and the buckling of transverse braces occurs early. As a results, strengthening the joint construction can improve the lateral performance of wall

收稿日期:2018-11-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0701201);国家自然科学基金项目(51678060)

作者简介:王宇航(1985-),男,重庆市人,教授,博士研究生导师,工学博士,博士后,E-mail:wangyuhang@cqu.edu.cn。

furtherly. For the wall panel with a peripheral screw spacing of 50 mm compared with that of 100 mm, the load-bearing capacity, stiffness and energy dissipation of the wall are improved obviously, but the ductility is decreased. In the case that the wall panel with a peripheral screw spacing of 50 mm and the chord stud is strengthened, the ductility and energy dissipation decrease significantly. The integrity of the wall panel has a great impact on the lateral performance of the wall. In order to prevent the brittle failure, it is necessary to strengthen or change the splicing manner of the panel splicing while reducing the screw spacing.

**Key words:** cold-formed thin-walled steel wall; diagonal brace; seismic performance; screw spacing; ductility; energy dissipation

0 引 言

冷弯薄壁型钢结构主要源于木结构低层住宅,该结构一般适用于三层及以下别墅类房屋,在澳大利亚、北美、日本等地区已经得到了广泛应用<sup>[1-3]</sup>,在中国自 2000 年推广以来,也建成了一大批低层别墅<sup>[4-5]</sup>。近年来,这种结构逐渐被运用到多层建筑领域,加拿大、美国等已有一些多层冷弯薄壁型钢建筑实例,其中最高一栋高达 9 层<sup>[6]</sup>。由此可见,多层冷弯薄壁型钢房屋是目前国际冷弯薄壁型钢领域的重要研究和发展方向。另外,中国人口密度大,土地资源逐渐减少,发展多层冷弯薄壁型钢住宅更加符合中国国情<sup>[7-9]</sup>。

然而,随着冷弯薄壁型钢房屋向多层发展,地震作用和风荷载也不断增大,因此需要进一步提高房屋的水平抗侧能力。冷弯薄壁型钢墙体是冷弯薄壁型钢结构体系的主要抗侧力构件,目前国内外学者对常规的冷弯薄壁型钢抗剪墙在水平低周反复荷载作用下的受力性能进行了一系列试验研究和理论分析<sup>[10-19]</sup>,得到了墙面板类型、高宽比、螺钉间距、交叉钢拉带、龙骨、开洞口等构造对墙体承载力的影响。斜撑能够有效提高墙体的抗侧能力,目前国内外对此研究较少,王春刚等<sup>[20]</sup>采用有限元软件分析了刚性斜撑对冷弯薄壁型钢结构体系抗震性能的影响,Tian 等<sup>[21]</sup>对带桁架支撑波形钢板覆面的墙体进行了试验研究。本文对 1 面不带斜撑冷弯薄壁型钢墙

体和 3 面带斜撑冷弯薄壁型钢墙体进行低周反复加载试验,分析了斜撑、螺钉间距、端柱承载力对墙体承载力、刚度、延性和耗能能力等抗震性能指标的影响。对带斜撑冷弯薄壁型钢墙体的抗震性能进行试验研究及理论分析,对于进一步提高中国冷弯薄壁型钢结构住宅的研究水平具有重要的理论意义和实用价值。

1 试验方案

1.1 试验设计

本文对 4 面墙体试件进行了拟静力试验,试件构造及端柱截面形式见表 1。典型试件的详细构造如图 1 所示,所有试件高度为 3.25 m,宽度为 2.4 m,钢骨架采用 C 形冷弯薄壁型钢 C140×40×11×1.2 和 U 形冷弯薄壁型钢 U140×35×1.2,构件之间通过 ST4.8 型自攻自钻螺钉连接。

W-1 试件端柱采用 2 根 C 型钢背靠背连接(通过双排水平间距 80 mm、竖向间距 100 mm 的自攻螺钉连接腹板)和 1 根 U 型钢拼合而成(通过单排竖向间距 100 mm 的自攻螺钉连接翼缘),中柱采用 2 根 C 型钢背靠背连接(通过双排水平间距 80 mm、竖向间距 300 mm 的自攻螺钉连接腹板),上下导轨采用 U 型钢;墙面板采用 12 mm 厚定向刨花板(OSB 板),单面覆板通过自攻螺钉与骨架连接,螺钉间距在板中间为 300 mm,板周边为 100 mm,由于 OSB 板只有 1 220 mm×2 440 mm 的规格,故设

表 1 试件参数  
Tab. 1 Parameters of Specimens

试件编号	高/mm	宽/mm	是否设置斜撑	螺钉间距/mm		端柱截面尺寸	端柱截面形式
				板周边	板中间		
W-1	3 250	2 400	否	100	300	2C140×40×11×1.2,U140×35×1.2	
W-2	3 250	2 400	是	100	300	2C140×40×11×1.2,U140×35×1.2	
W-3	3 250	2 400	是	50	300	2C140×40×11×1.2,U140×35×1.2	
W-4	3 250	2 400	是	50	300	3C140×40×11×1.2,U140×35×1.2	

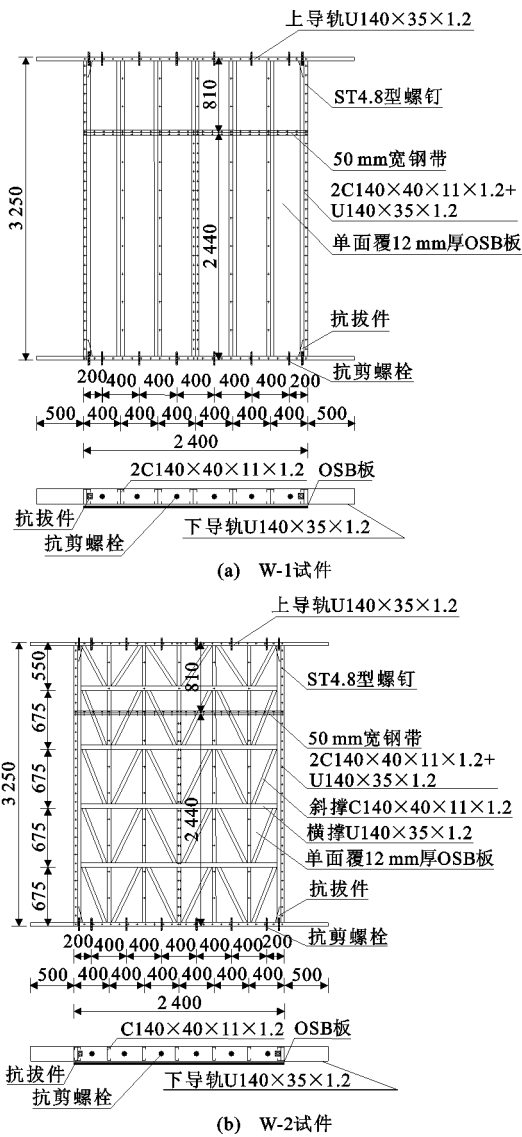


图 1 试件详细构造(单位:mm)

Fig. 1 Configurations of Specimens (Unit:mm)

置 50 mm×1.2 mm 的扁钢带便于墙板的拼接。

W-2 试件在 W-1 试件的基础上设置横撑和斜撑,横撑采用 U 型钢,斜撑采用 C 型钢,横撑与斜撑在节点连接处每侧通过 1 颗自攻螺钉连接翼缘,横撑腹板在中柱和斜撑穿过的位置开有 50 mm 宽洞口;中柱采用单根 C 型钢。W-3 试件的型钢骨架与 W-2 试件相同,仅改变墙面板螺钉间距。W-4 试件的端柱采用 3 根 C 型钢和 1 根 U 型钢拼合而成,其余构造与 W-3 相同。

在试件的底部和顶部四角设置抗拔件并通过 M20 抗拔螺栓与顶加载梁和底梁连接。试件的上下导轨通过间距 400 mm 的 M16 抗剪螺栓与顶加载梁和底梁连接。

1.2 材料属性

试验所用钢材为冷弯薄壁型钢镀锌钢板,钢板厚度为 1.2 mm。根据《金属材料拉伸试验:第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)<sup>[22]</sup> 的有关规定进行材性试验,测得钢材屈服强度为 344.3 MPa,拉伸强度为 462.1 MPa,弹性模量为  $1.788 \times 10^5$  MPa,伸长率为 33.05%。

试验所用 OSB 板厚度为 12 mm,静曲强度垂直方向为 20 MPa,平行方向为 10 MPa;弯曲弹性模量垂直方向为 3 500 MPa,平行方向为 1 400 MPa。

1.3 加载装置与加载制度

试验加载装置如图 2 所示,试验设备采用电液伺服程控结构试验机系统,液压伺服作动器一端与顶加载梁端部连接,另一端支承在反力架上,为了防止试验过程中试件发生平面外失稳,在试件顶加载梁两侧安装 4 个侧向滚轮支撑。

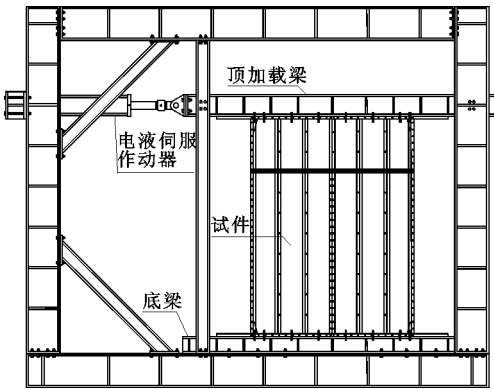


图 2 试验加载装置

Fig. 2 Experimental Loading Set-up

试验采用位移增量控制加载:以预估的屈服荷载为参考,试件屈服前,以 4 mm 为位移增量,每级循环 1 次;屈服后,按屈服位移的 50%作为增量,每级循环 3 次;直至荷载下降到峰值荷载的 85%时停止加载。

1.4 测点布置

为了测试墙体试件在试验中的变形值,按图 3 所示布置了位移计,D1 测试顶加载梁的水平方向位移;D2 测试墙体顶部的水平方向位移;D3,D4 用于测试墙体底部相对基础的水平方向滑移;D5,D6 用于测试墙体底部两端相对底梁的竖向位移;D7,D8 用于测试底梁相对于基础的竖向位移。

试验过程中墙体顶部实测得到的位移  $\delta_0$  是由墙体转动时的顶部位移  $\delta_\varphi$ 、墙体与台座相对滑动位移  $\delta_1$  以及墙体的实际剪切变形  $\delta$  三部分组成,如图 4 所示。

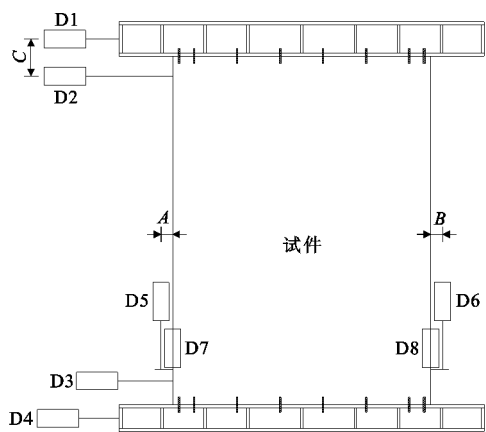


图 3 试件位移计布置

Fig. 3 Arrangement of Displacement Meters

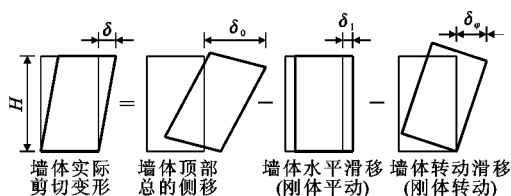


图 4 试件实际剪切变形

Fig. 4 Actual Shear Deformation of Specimen

故墙体试件的实际剪切变形为

$$\delta = \delta_0 - \delta_1 - \delta_\varphi \quad (1)$$

式中:墙体顶部的实际侧移  $\delta_0 = \frac{1}{2}(\frac{HD_2}{H-C} + D_1)$ ,  $H$  为组合体高度,  $D_1 \sim D_8$  为位移计 D1~D8 量测的位移值;墙体的水平滑移(位移计 D3 和 D4 量测的位移差值)  $\delta_1 = D_3 - D_4$ ;墙体转动  $\alpha$  角时引起顶部位移  $\delta_\varphi$  按图 5 所示计算,  $\delta_\varphi = \frac{H}{L+A+B}\delta_\alpha$ ,  $\delta_\alpha = D_6 - D_8 - (D_5 - D_7)$ ,  $L$  为墙体宽度,  $A, B$  分别为位移计 D3, D4 距墙体端部的距离。

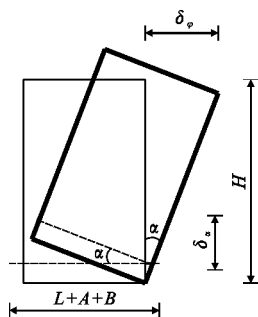


图 5 试件转动变形

Fig. 5 Rotating Deformation of Wall

利用计算出的位移  $\Delta$  与对应的水平荷载值  $P$ , 即可画出各试件的荷载-位移( $P-\Delta$ )曲线。

## 2 试件破坏特征

试件破坏特征见图 6。由图 6 可知:

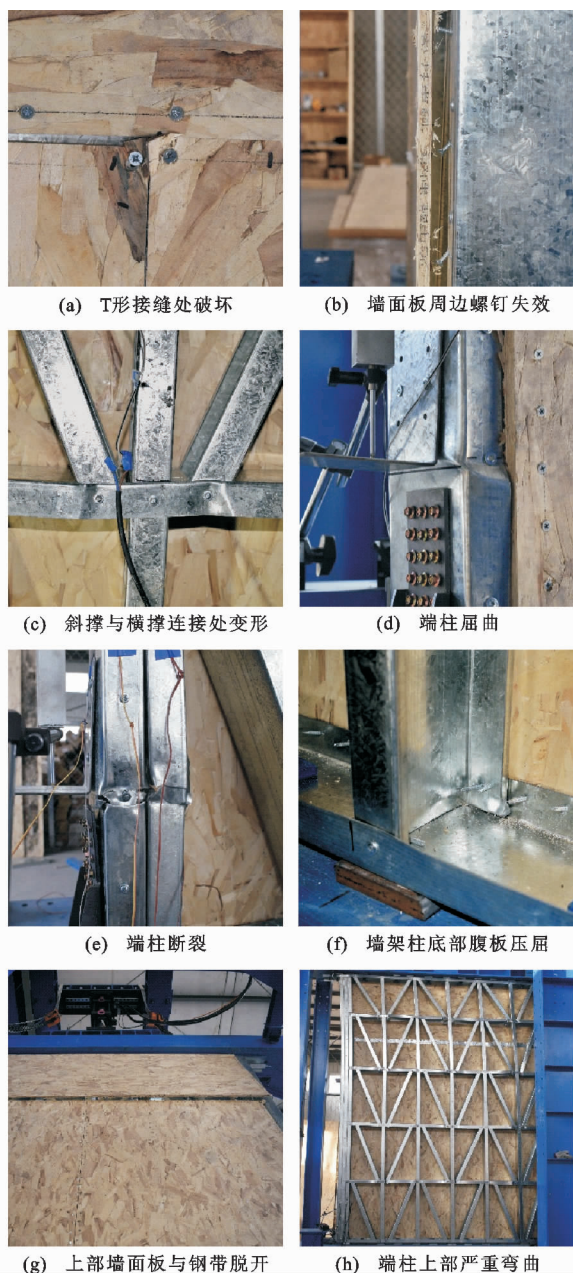


图 6 试件破坏特征

Fig. 6 Failure Modes of Specimens

W-1 试件位移达到 20 mm 时,连接墙面板水平接缝的钢带处螺钉倾斜;试件位移达到 40 mm 时,墙面板竖向边部的螺钉出现倾斜;位移达到 60 mm 时,墙面板的 T 形接缝处挤压,墙面板角部发生破坏[图 6(a)];位移达到 70 mm 时,墙面板周边部分螺钉陷入面板,螺钉连接失效;位移达到 90 mm 时,墙面板周边大部分螺钉陷入面板或脱离面板,连接失效[图 6(b)],试件破坏。

W-2 试件位移达到 40 mm 时,部分横撑与斜撑连接处屈曲,墙面板周边螺钉开始倾斜;位移达到 60 mm 时,横撑与斜撑连接处的变形加剧;位移达

到 70 mm 时, T 形接缝处挤压, 墙面板角部破坏; 位移达到 80 mm 时, 部分螺钉陷入面板内; 位移达到 100 mm 时, 墙面板周边大部分螺钉连接失效, 横撑与斜撑连接处变形严重[图 6(c)], 试件破坏。

W-3 试件位移达到 30 mm 时, 部分中柱底部腹板压屈, 墙面板周边螺钉开始倾斜; 位移达到 60 mm 时, T 形接缝处挤压, 墙面板角部破坏; 位移达到 70 mm 时, 端柱底部被压屈[图 6(d)], 横撑与斜撑连接处变形加剧; 位移达到 90 mm 时, 端柱在拉压荷载作用下反复折曲, 最终断裂[图 6(e)], 承载力突然下降, 试件破坏。

W-4 试件位移达到 30 mm 时, 部分中柱底部腹板压屈[图 6(f)], 墙面板周边螺钉开始倾斜; 位移达到 60 mm 时, 墙面板 T 形接缝处错缝严重; 位移达到 70 mm 时, 横撑与斜撑连接处变形加剧, 墙面板 T 形接缝处发出挤裂的声音, 水平接缝处螺钉孔挤压破坏, 上部墙面板与钢带脱开[图 6(g)]; 位移达到 90 mm 时, 由于钢带连接处破坏, 墙面板不再传递剪力, 端柱上部严重弯曲[图 6(h)], 试件破坏。

由于型钢骨架抗侧刚度较小, OSB 板面内刚度很大, 水平荷载大部分通过面板的蒙皮效应来抵抗, 连接骨架和面板的自攻螺钉在水平荷载的作用下受到很大剪力, 在滞回荷载作用下螺钉来回倾斜使 OSB 板上螺钉孔受到挤压而产生损伤, 螺钉孔逐渐扩大, 最终面板周边螺钉大部分陷入面板或脱离面板, 螺钉连接失效, 水平承载力下降。W-1 试件最终因墙面板周边大部分螺钉连接失效, 墙体无法抵抗剪力而破坏; W-2 试件横撑和斜撑连接节点相对薄弱, 横撑翼缘在斜撑的拉压滞回荷载作用下发生屈曲, 最终破坏时面板周边大部分螺钉连接失效; 在水平荷载作用下, 墙体一侧端柱受压, 另一侧端柱受拉, W-3 试件由于端柱承载力不足, 在压力的作用下发生屈曲, 并在拉压滞回荷载作用下不断折曲, 最终发生断裂, 破坏时墙面板与骨架螺钉连接未完全失效; 在水平荷载作用下, 面板和骨架之间会发生相对错动, 在接缝处相互挤压, W-4 试件因墙面板 T 形接缝处受到严重挤压, 导致上部墙面板与钢带脱落, 水平剪力无法通过墙面板传递而破坏。

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 滞回曲线

在水平低周反复荷载作用下, 4 个试件的滞回曲线如图 7 所示。由图 7 可知: 滞回曲线均表现出明显的捏拢现象, 当荷载很小时, 其滞回环呈梭形,

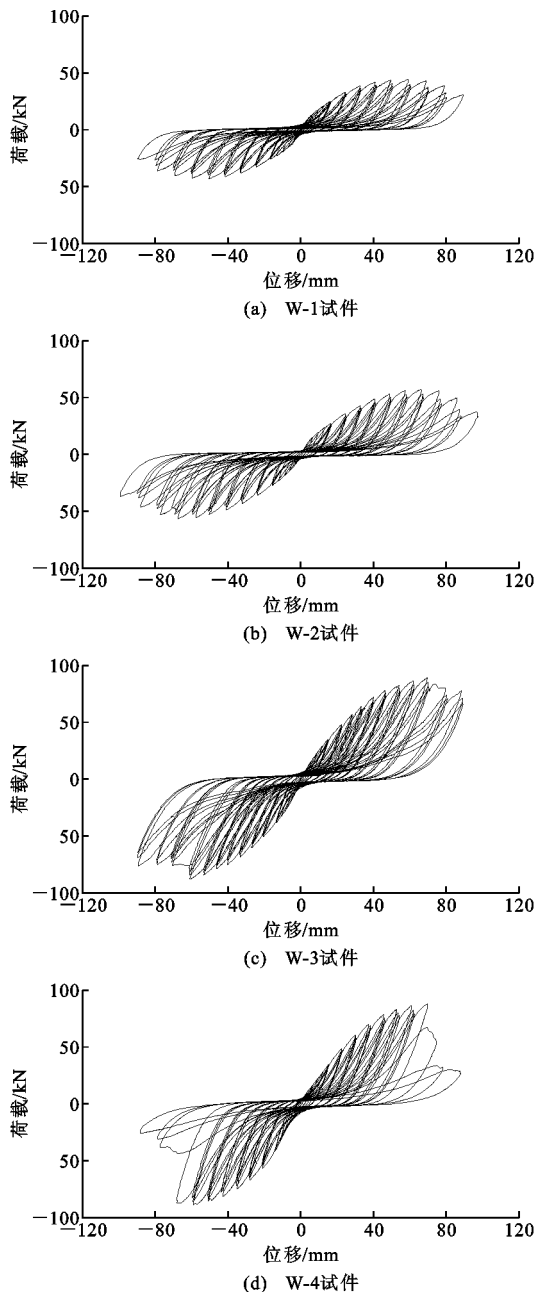


图 7 试件的滞回曲线

Fig. 7 Hysteresis Curves of Specimens

墙体卸载后的残余变形很小; 随着荷载的增加, 墙面板周边螺钉孔受到挤压而产生损伤, 横撑和斜撑连接处开始发生屈曲变形, 墙体刚度出现退化, 滞回曲线出现一定的滑移现象, 呈现反 S 形; 荷载继续增加, 螺钉孔因反复挤压、损伤而很快扩大, 产生较大的“旷动量”而出现“空载滑移”, 横撑和斜撑连接处严重屈曲, 墙体滞回曲线出现捏拢现象, 滞回曲线逐渐向 Z 形过渡, 墙体强度与刚度明显退化。

由图 7 还可知, W-2 试件承载力大于 W-1 试件, 斜撑对于墙体抗剪承载力和刚度的提高发挥了作用, 但是随着螺钉连接受到损伤, 墙面板蒙皮作用



减弱,墙体抗剪承载力也很快下降。试件斜撑通过 2 颗自攻螺钉与横撑连接,而且连接处横撑翼缘很早就开始屈曲,连接节点较弱,使得斜撑对承载力和刚度的提高有限,如果能加强节点区构造,带斜撑冷弯薄壁型钢墙体的抗侧性能能够进一步提高。W-3 试件由于端柱承载力不足发生断裂,W-4 试件由于 OSB 板 T 形接缝处相互挤压破坏,承载力下降突然,均属于脆性破坏。

### 3.2 骨架曲线

在试件滞回曲线的基础上,将同方向各次加载的峰值点依次相连得到其骨架曲线,如图 8 所示,分别比较斜撑、螺钉间距和端柱对墙体承载力和刚度的影响。

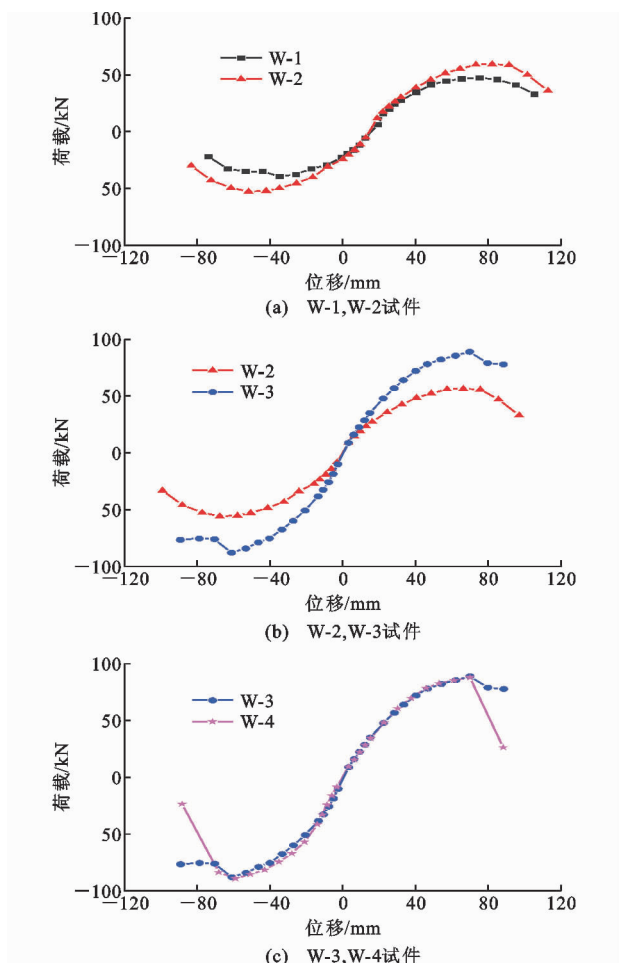


图 8 试件的骨架曲线

Fig. 8 Skeleton Curves of Specimens

由试验数据所得到的骨架曲线没有明显屈服点,借鉴现行行业标准《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015)<sup>[23]</sup>的规定,试件峰值荷载  $P_{\max}$  和相应的峰值位移  $\Delta_{\max}$  取试件骨架曲线上的荷载最大值和相应的侧移;破坏荷载  $P_u$  和相应侧移  $\Delta_u$  取试件在峰值荷载出现后,荷载降至峰值荷载 85% 时的相应荷

载和相应侧移;屈服荷载  $P_y$  按能量等效面积法确定,相应的侧移  $\Delta_y$  为屈服点位移;试件的位移延性系数  $\mu$  为结构破坏位移  $\Delta_u$  与屈服位移  $\Delta_y$  的比值;根据《低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程》(JGJ 227—2011)<sup>[24]</sup>规定,将位移为  $H/300$  的割线刚度作为墙体的抗侧刚度  $K_{300}$ 。

各试件的骨架曲线特征值见表 2。W-2 试件与 W-1 试件相比,其屈服荷载和峰值荷载分别提高 24.6% 和 27.4%,刚度提高 11.7%,表明斜撑能有效提高墙体抗侧承载力和刚度,但延性有所下降。W-3 试件与 W-2 试件相比,由于墙面板周边螺钉间距减小,其屈服荷载和峰值荷载分别提高 61.3% 和 57.6%,刚度提高 27.2%;由于 W-3 端柱承载力不足,W-4 试件在 W-3 试件基础上将端柱由 3 肢换为 4 肢,由于 T 形接缝处挤压破坏,峰值荷载却有所下降,延性下降明显,表明墙面板的整体性对墙体抗侧能力影响很大。

### 3.3 刚度退化

根据《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015)<sup>[23]</sup>中规定的割线刚度对试件的刚度  $K_i$  进行评价,公式如下

$$K_i = \frac{|+F_i| + |-F_i|}{|+X_i| + |-X_i|} \quad (2)$$

式中:  $+F_i$ ,  $-F_i$  分别为试件在同一滞回环顶点的正负水平荷载;  $+X_i$ ,  $-X_i$  分别为  $+F_i$  和  $-F_i$  对应的位移,取每级循环荷载的第 1 次循环计算。

试件刚度退化曲线(以各级峰值刚度和墙体位移为变量)如图 9 所示。从图 9 可以看出,所有试件均呈现前期刚度退化快,后期刚度退化速率逐渐变缓的趋势。W-2 试件比 W-1 试件刚度大,退化速率均匀、连续,没有突变点。W-3 试件和 W-4 试件前期刚度退化曲线趋势基本一致,W-3 试件后期端柱断裂,W-4 试件墙面板 T 形接缝处挤压破坏,刚度出现明显突变,不利于结构抗震。

### 3.4 强度退化

试件的强度退化用强度退化系数  $\lambda$  表示,即同一位移幅下,后一圈循环与前一圈循环最大荷载的比值<sup>[23]</sup>,图 10(a)为试件第 2 圈循环与第 1 圈循环的峰值荷载比值  $\lambda_2$  与位移的关系曲线,图 10(b)为试件第 3 圈循环与第 2 圈循环的峰值荷载比值  $\lambda_3$  与位移的关系曲线。总体上所有试件的强度退化系数随着位移增大逐渐减小。W-1, W-2, W-3 试件的强度退化系数均在 0.75~1.05 之间,退化不明显,受剪承载力比较稳定。W-4 试件在位移达到 70

表 2 骨架曲线特征值

Tab. 2 Characteristic Values of Skeleton Curves

试件 编号	屈服点		峰值点		破坏点		变形 $H/300$		延性系数 $\mu$	受剪承载力	
	$P_y/\text{kN}$	$\Delta_y/\text{mm}$	$P_{\max}/\text{kN}$	$\Delta_{\max}/\text{mm}$	$P_u/\text{kN}$	$\Delta_u/\text{mm}$	$P_{300}/\text{kN}$	$\Delta_{300}/\text{mm}$		$S_{\text{wk}}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	$S_{\text{Ehk}}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$
W-1	39.16	34.93	44.35	59.44	37.70	79.829	18.51	10.83	2.285	9.24	7.39
W-2	48.80	41.17	56.49	66.39	48.02	84.831	20.67	10.83	2.061	11.77	9.42
W-3	78.71	47.57	89.02	69.83	75.67	88.448	26.29	10.83	1.859	18.55	14.84
W-4	78.97	46.19	87.92	69.93	74.73	73.851	25.39	10.83	1.599	18.32	14.65

注： $P_{300}$ 、 $\Delta_{300}$ 分别为层间位移角为 1/300 时对应的荷载和位移； $S_{\text{wk}}$ 为风荷载作用下墙体的受剪承载力标准值； $S_{\text{Ehk}}$ 为水平地震作用下墙体的受剪承载力设计值。

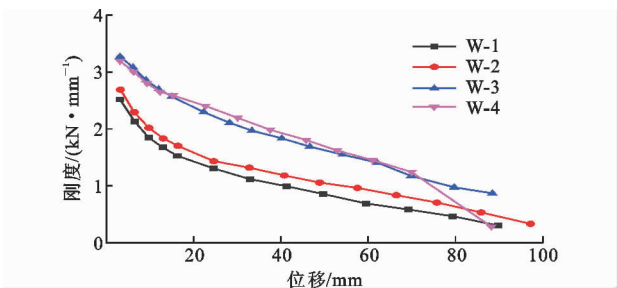


图 9 试件刚度退化曲线

Fig. 9 Stiffness Degradation Curves of Specimens

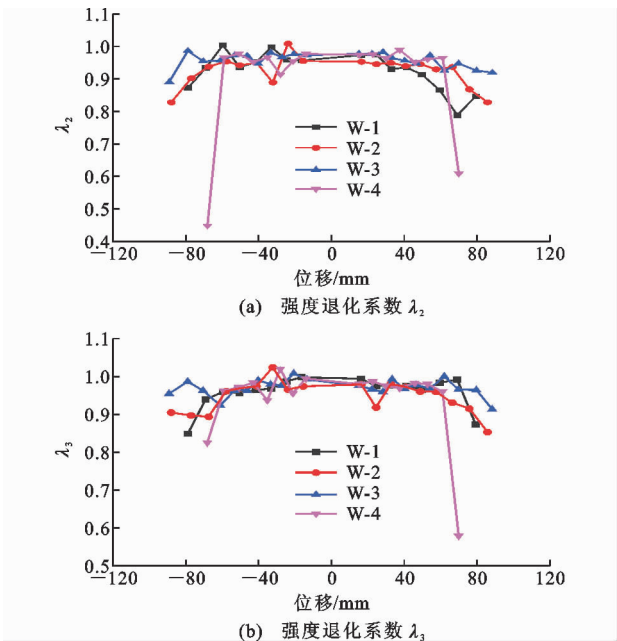


图 10 试件强度退化曲线

Fig. 10 Strength Degradation Curves of Specimens

mm 时,OSB 板 T 形接缝处挤压破坏,强度退化系数突然下降到 0.6 以下,试件呈现出明显的脆性破坏特征。

3.5 耗能能力

试件的耗能能力是以滞回曲线所包含的面积来表示的,滞回曲线包围面积越大,耗能性能越好。累

计耗能是指荷载从 0 开始一直到破坏位移  $\Delta_u$  对应的滞回环截止点所累计的滞回环包围面积。

所有试件的耗能如表 3 所示。W-2 试件比 W-1 试件累计耗能增加了 41.0%,表明斜撑改善了墙体的受力性能,进而提高了其耗能能力。W-3 试件比 W-2 试件累计耗能增加了 65.5%,表明减小墙面板周边螺钉间距能够提高墙体承载力,进而提高墙体耗能能力。W-4 试件比 W-3 试件累计耗能降低 30.8%,W-3 试件和 W-4 试件破坏模式不同,W-4 试件由于 T 形接缝处过早挤压破坏,未能充分发挥墙体耗能能力。

表 3 试件耗能

Tab. 3 Energy Dissipation of Specimens

试件编号	加载环数 $n$	破坏位移 $\Delta_u/\text{mm}$	累计耗能 $W/(\text{kN}\cdot\text{m})$
W-1	29	79.829	20 614.05
W-2	32	84.831	29 075.41
W-3	37	88.448	48 118.62
W-4	29	73.851	33 285.24

3.6 受剪承载力设计值

高宛成<sup>[25]</sup>根据大量试验数据对比分析了 5 种计算墙体承载力的理论方法,发现不同方法具有很大的局限性。为促进带斜撑冷弯薄壁型钢墙体的推广使用,根据中国《低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程》(JGJ 227—2011)<sup>[24]</sup>,参考美国和日本规范容许应力法的安全系数,采用“等安全系数”原理计算得出受剪承载力设计值。

根据 AISI S213 规范<sup>[26]</sup>,风荷载作用下,墙体容许应力的设计表达式为

$$S \leq \frac{P_{\text{nom}}}{K}$$

(3)

式中： $S$ 为风荷载或水平地震作用下墙体的受剪承载力设计值； $P_{\text{nom}}$ 为墙体的名义受剪强度,取试件的峰值荷载  $P_{\max}$ ； $K$ 为安全系数,风荷载作用时取 2.0,地震作用时取 2.5。

## 4 结 语

(1)带斜撑冷弯薄壁型钢墙体的主要破坏模式为 OSB 板与钢骨架的自攻螺钉连接破坏和横撑与斜撑连接处横撑翼缘屈曲;OSB 板上自攻螺钉连接孔壁因反复挤压、损伤,最终连接失效;横撑翼缘因反复屈曲刚度逐渐下降。

(2)增加斜撑能够有效提高冷弯薄壁型钢墙体的承载力、刚度和耗能能力,但是斜撑和横撑连接节点比较薄弱,连接处横撑翼缘很早就开始屈曲,使得斜撑对墙体抗侧能力的提高有限,如果能加强节点区构造,墙体的抗侧性能能够进一步提升。

(3)墙面板周边螺钉间距 50 mm 的墙体相对于螺钉间距 100 mm 的墙体承载力、刚度和耗能能力提高较大,但延性有所下降。

(4)在墙面板周边螺钉间距 50 mm 的情况下,对端柱进行了加强,但延性和耗能能力却下降明显,这表明墙面板的整体性对墙体抗侧性能影响较大,在减小螺钉间距的同时,需要对面板拼接处进行加强或改变拼接方式,防止面板相互挤压破坏,导致脆性破坏。

## 参考文献:

## References:

- [1] 刘毅,秦国鹏,陈水荣.冷弯型钢建筑体系的发展与应用现状[J].钢结构,2013,28(9):1-3,59.  
LIU Yi,QIN Guo-peng,CHEN Shui-rong. The Development and Application of Cold-formed Steel Building System[J]. Steel Construction,2013,28(9):1-3,59.
- [2] 李悦,吴玉生,周孝军,等.轻钢住宅体系的国内外发展与应用现状[J].建筑技术,2009,40(3):204-207.  
LI Yue,WU Yu-sheng,ZHOU Xiao-jun,et al. Development and Using Actuality of Lightweight Steel Housing[J]. Architecture Technology,2009,40(3):204-207.
- [3] 何保康,周天华.美国冷弯型钢结构的应用与研究情况[J].建筑结构,2001,31(8):58-59,68.  
HE Bao-kang,ZHOU Tian-hua. Application and Research of Cold-formed Steel Structures in the United States[J]. Building Structure,2001,31(8):58-59,68.
- [4] 陈腾.北京地区轻钢装配式农宅户型标准化与多样化研究[D].北京:北京工业大学,2016.  
CHEN Teng. Layout Standardized Design and Diversity Application Research of Light Steel Prefabricated Rural House[D]. Beijing:Beijing University of Tech-

nology,2016.

- [5] 刘亚林.低层冷弯薄壁轻钢结构体系在灾后重建中的实践与应用[D].西安:西安建筑科技大学,2011.  
LIU Ya-lin. The Practice and Application of the Low-rise Cold-formed Thin-walled Steel Structure in Post-disaster Reconstruction[D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology,2011.
- [6] 王星星.多层冷成型钢组合墙体抗侧试验及简化计算方法研究[D].南京:东南大学,2017.  
WANG Xing-xing. Experimental and Simplified Calculation Method Research on the Lateral Performance of Mid-rise Cold-formed Steel Shear Walls[D]. Nanjing:Southeast University,2017.
- [7] 彭林林.多层冷弯薄壁型钢结构住宅抗震性能研究[D].北京:清华大学,2010.  
PENG Lin-lin. Study on Seismic Performance in Mid-rise Cold-formed Steel Structure Residence[D]. Beijing:Tsinghua University,2010.
- [8] 董建军.多层冷弯薄壁型钢结构住宅的研究[D].杭州:浙江大学,2007.  
DONG Jian-jun. Study of Cold-formed Thin-wall Steel Structures in Multi-floor Residential Buildings[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2007.
- [9] 管宇,周绪红,石宇,等.多层冷弯薄壁型钢住宅体系动力时程分析[J].建筑科学与工程学报,2018,35(5):142-151.  
GUAN Yu,ZHOU Xu-hong,SHI Yu,et al. Dynamic Time History Analysis for Mid-rise Cold-formed Thin-walled Steel Residential Building System[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2018,35(5):142-151.
- [10] SERRETTE R,OGUNFUNMI K. Shear Resistance of Gypsum-sheathed Light-gauge Steel Stud Walls[J]. Journal of Structural Engineering,1996,122(4):383-389.
- [11] YU C. Shear Resistance of Cold-formed Steel Framed Shear Walls with 0.686 mm,0.762 mm, and 0.838 mm Steel Sheet Sheathing[J]. Engineering Structures,2010,32(6):1522-1529.
- [12] XU L,MARTINEZ J. Strength and Stiffness Determination of Shear Wall Panels in Cold-formed Steel Framing[J]. Thin-walled Structures,2006,44(10):1084-1095.
- [13] VELCHEV K,COMEAU G,BALH N,et al. Evaluation of the AISI S213 Seismic Design Procedures Through Testing of Strap Braced Cold-formed Steel Walls[J]. Thin-walled Structures,2010,48(10/11):846-856.



- [14] MOGHIMI H, RONAGH H R. Performance of Light-gauge Cold-formed Steel Strap-braced Stud Walls Subjected to Cyclic Loading[J]. Engineering Structures, 2009, 31(1): 69-83.
- [15] 周绪红, 石 宇, 周天华, 等. 冷弯薄壁型钢组合墙体抗剪性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(5): 38-44.  
ZHOU Xu-hong, SHI Yu, ZHOU Tian-hua, et al. Experimental Study of the Shear Resistance of Cold-formed Steel Stud Walls[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(5): 38-44.
- [16] 郝际平, 刘 斌, 邵大余, 等. 交叉钢带支撑冷弯薄壁型钢骨架-喷涂轻质砂浆组合墙体受剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(12): 20-28.  
HAO Ji-ping, LIU Bin, SHAO Da-yu, et al. Test on Shear Resistance of Cold-formed Thin-walled X-shaped Steel Strap-braced Framing Walls with Sprayed Lightweight Mortar[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(12): 20-28.
- [17] 陈 伟, 叶继红, 许 阳. 夹芯墙板覆面冷弯薄壁型钢承重复合墙体受剪试验[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(7): 85-92.  
CHEN Wei, YE Ji-hong, XU Yang. Shear Experiments of Load-bearing Cold-formed Thin-walled Steel Wall System Lined with Sandwich Panels[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(7): 85-92.
- [18] 聂少锋, 周天华, 熊智刚, 等. 冷弯薄壁型钢开洞组合墙体抗剪性能研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2012, 29(1): 101-109.  
NIE Shao-feng, ZHOU Tian-hua, XIONG Zhi-gang, et al. Research on Shear Resistance Behavior of Cold-formed Thin-walled Steel Composite Walls with Opening[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2012, 29(1): 101-109.
- [19] LIU P, PETERMAN K D, SCHAFFER B W. Impact of Constructional Details on OSB-sheathed Cold-formed Steel Framed Shear Walls[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 101: 114-123.
- [20] 王春刚, 李 宁, 张壮南. 刚性斜撑对冷弯薄壁型钢结构住宅体系抗震性能的影响研究[J]. 钢结构, 2017, 32(12): 45-51.  
WANG Chun-gang, LI Ning, ZHANG Zhuang-nan. Research on Seismic Behavior of Cold-formed Thin-walled Steel Residential Structures with Different Rigid Bracings[J]. Steel Construction, 2017, 32(12): 45-51.
- [21] TIAN H W, LI Y Q, YU C. Testing of Steel Sheathed Cold-formed Steel Trussed Shear Walls [J]. Thin-walled Structures, 2015, 94: 280-292.
- [22] GB/T 228. 1—2010, 金属材料拉伸试验: 第 1 部分: 室温试验方法[S].  
GB/T 228. 1—2010, Metallic Materials — Tensile Testing — Part 1: Method of Test at Room Temperature[S].
- [23] JGJ/T 101—2015, 建筑抗震试验规程[S].  
JGJ/T 101—2015, Specification for Seismic Test of Building[S].
- [24] JGJ 227—2011, 低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规范[S].  
JGJ 227—2011, Technical Specification for Low-rise Cold-formed Thin-walled Steel Buildings[S].
- [25] 高宛成. 冷弯薄壁型钢竹胶合板组合墙体抗震性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.  
GAO Wan-cheng. Research on Seismic Performance of Cold-formed Thin-walled Steel Composite Walls with Ply-bamboo Sheathing Panels[D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [26] AISI S213-07, North American Standard for Cold-formed Steel Framing: Lateral Design[S].