

# 覆竹木碳纤维板冷弯薄壁型钢墙体抗震性能试验研究

江忠画<sup>1</sup>, 张 铮<sup>1</sup>, 陈笃海<sup>1</sup>, 胡凤翔<sup>2</sup>

(1. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118; 2. 福州同方集成住宅建设有限公司, 福建 福州 350008)

**摘要:** 对两榀带刚性支撑的冷弯薄壁型钢墙体足尺试件进行水平低周往复加载试验, 研究竹木碳纤维板对冷弯薄壁型钢墙体抗震性能的影响, 揭示该类新型墙体的破坏模式, 对试件的滞回性能、承载能力、延性、耗能能力、抗侧刚度、强度退化及刚度退化等抗震性能指标进行分析。试验结果表明, 覆竹木碳纤维板冷弯薄壁型钢墙体的主要破坏模式包括: 墙面板承压破坏, 各部件连接螺钉剪切破坏, 立柱、刚性斜撑弯扭屈曲, 下导轨、刚性横撑局部屈曲等。与无覆板的冷弯薄壁型钢骨架墙体相比, 由于竹木碳纤维板的支撑作用显著, 覆板冷弯薄壁型钢墙体的承载能力、抗侧刚度和耗能能力明显提升, 抗震性能良好。

**关键词:** 冷弯薄壁型钢墙体; 竹木碳纤维板; 刚性支撑; 破坏模式; 抗震性能

中图分类号: TU392.5

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)04-0552-09

## Experimental study on seismic performance of cold-formed thin-walled steel wall with bamboo wood carbon fiber board

JIANG Zhonghua<sup>1</sup>, ZHANG Zheng<sup>1</sup>, CHEN Duhai<sup>1</sup>, HU Fengxiang<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Fuzhou Tongfang Integrated Housing Construction Co., Ltd, Fuzhou 350008, China)

**Abstract:** Through the experiment of two full-scale specimens of cold-formed thin-walled steel wall with rigid brace under low-cycle lateral loading, the influence of bamboo wood carbon fiber board on the seismic performance of the wall is investigated to reveal the wrecking mode, and the seismic performance indices, such as hysteresis performance, bearing capacity, ductility, lateral stiffness, strength degradation and stiffness degradation are studied. The experiment results indicate that the main wrecking modes of cold-formed thin-walled steel wall with bamboo wood carbon fiber board include: bearing failure of board, shear failure of the connecting screw of each component, bending and torsional buckling of column and rigid diagonal brace, local buckling of bottom track and rigid transverse brace, etc. Compared with cold-formed thin-walled steel skeleton wall, the bearing capacity, lateral stiffness and energy dissipation capacity of cold-formed thin-walled steel wall with bamboo wood carbon fiber board are significantly improved due to the support of bamboo wood carbon fiber board to skeleton, and the seismic performance is good.

**Key words:** cold-formed thin-walled steel wall; bamboo wood carbon fiber board; rigid brace; wrecking mode; seismic performance

作为冷弯薄壁型钢结构体系的关键受力构件, 冷弯薄壁型钢墙体结构主要由冷弯薄壁型钢骨架与 OSB 板或波纹钢板等墙面板通过自攻螺钉连接而成, 承担由楼面、屋面传递的竖向荷载以及风荷载或地震作用产生的水平荷载<sup>[1-2]</sup>。由于该类墙体杆件及连接数量繁多、受力复杂, 且影响其抗震性能的因素众多, 如螺钉数量及位置、墙面板类型、杆件布置及截面、材料力学性能、墙体高

宽比及开洞情况等, 计算其承载能力尤为困难<sup>[3-7]</sup>, 国内外相关规范对其抗剪承载力的计算也多是借鉴足尺试验数据。因此, 开展冷弯薄壁型钢墙体抗震性能的试验研究, 对该结构体系的推广应用是至关重要的。

国内众多学者对冷弯薄壁型钢墙体进行足尺试验研究, 论证了墙面板类型与墙体抗震性能的相关关系。郭鹏(2008)对带肋钢板墙体展开研究,

收稿日期: 2020-10-27

修改稿日期: 2021-06-30

基金项目: 福州市科技计划项目(2018-G-56); 福建工程学院科研发展基金项目(GY-Z17159)

第一作者: 江忠画(1997—), 男, 硕士生, 主要研究钢与轻钢结构。E-mail: utopia1218@163.com

结果表明该类墙体抗剪强度高,但易发生局部剪切屈曲,平面外变形明显<sup>[8]</sup>。周绪红(2010)提出一种新型CSB板,该类墙体的抗剪承载力高,但延性和耗能能力较差<sup>[9]</sup>。研究结果还表明,双面覆板墙体的抗震性能要优于单面覆板墙体,且一榀双面覆板墙体的承载力约等于两榀单面覆板墙体的承载力之和<sup>[10]</sup>。

出于冷弯薄壁型钢墙体现有种类的墙面覆板存在的环保、受力、造价等问题的考虑,近年来国内企业自主研发新型板材作为替代。竹木碳纤维板是一种多功能装配式结构墙板,强度高、韧性好,甲醛排放量为零,集保温、隔音、防火、抗震等性能于一身,在实际工程中具有良好的应用前景,如南平市农业学校宿舍楼。对冷弯薄壁型钢骨架墙体以及双面覆竹木碳纤维板冷弯薄壁型钢墙体在水平方向上进行低周往复加载试验,以期揭示该类墙体的主要破坏模式,探明竹木碳纤维板对冷弯薄壁型钢墙体抗震性能的影响。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

试验设计了两个足尺墙体试件,长度和高度分别为3.66 m和2.76 m,具体构造见图1。骨架试件SW为带刚性支撑的冷弯薄壁型钢骨架墙体,覆板试件CW为带刚性支撑的双面覆竹木碳纤维板冷弯薄壁型钢墙体。刚性支撑在墙体抗震时承受往复拉压作用,协同立柱抵抗水平荷载和竖向荷载,可以提高墙体的抗剪承载力、抗侧刚度和耗能能力<sup>[11-13]</sup>,故试验墙体均采用满布刚性支撑的布置方式。

两个试件中的冷弯薄壁型钢骨架完全一致,均由立柱、上下导轨、刚性横撑和刚性斜撑通过自攻螺钉连接而成,如图1所示。立柱间距为610 mm。在立柱中部设两道刚性横撑,横撑腹板在立柱穿过的位置开设洞口,使立柱通长贯穿。在骨架每个区格内均设刚性斜撑,呈米字型分布。各杆件之间通过ST5.5自攻螺钉连接,刚性斜撑与上下导轨通过2颗自攻螺钉连接,刚性斜撑与立柱、刚性横撑采用节点板通过自攻螺钉连接。钢材采用Q235B钢,立柱与刚性斜撑规格为C97×38×12×1.2 mm,上下导轨与刚性横撑为U100×42×1.2 mm。中间立柱为单根C型立柱,边立柱为两根背靠背C型立柱通过间距为200 mm的双排ST5.5自攻螺钉连接形成工字形截面。覆板采用单面6块规格为2440×1220×9 mm的竹木碳纤维

维板进行拼接,墙面板与冷弯薄壁型钢骨架间通过间距为250 mm的ST4.8自攻螺钉连接。墙体底部设置抗拔件,抗拔件下端与底座通过2颗ST5.5自攻螺钉锁紧,上端与立柱腹板通过6颗ST4.8自攻螺钉连接。

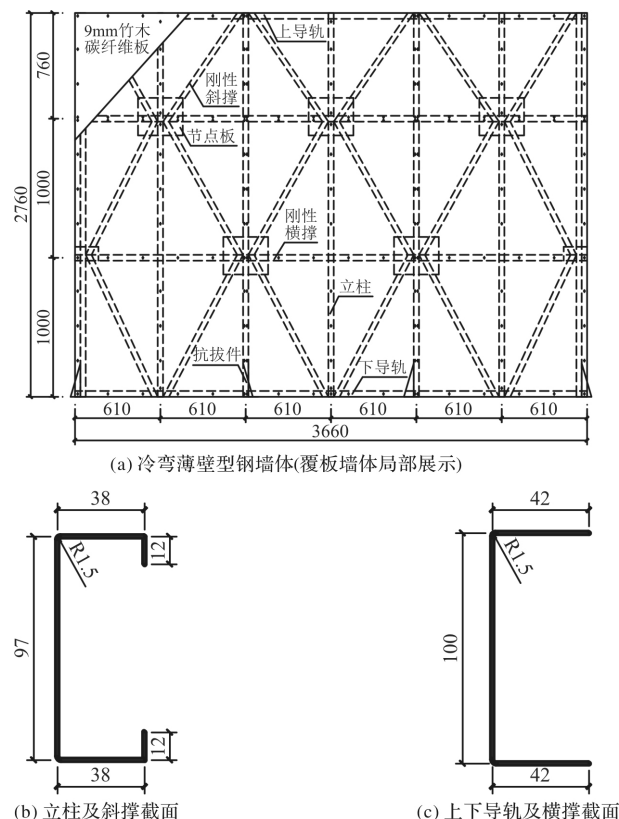


图1 冷弯薄壁型钢墙体构造

Fig. 1 Structure of cold-formed thin-walled steel wall

### 1.2 加载装置

试验采用水平低周往复加载方式,全程采用位移控制进行加载,加载装置如图2所示。竖向荷载一次加满并全程保持不变,随即施加水平荷载。骨架试件SW施加50 kN竖向荷载,覆板试件CW施加100 kN竖向荷载。竖向荷载经分配梁通过20 mm厚钢垫块传递给加载梁,钢垫块按照4等分点原则布置。反力梁与千斤顶之间安装可随墙体水平移动的滑动导轨,使得墙体在试验过程中其竖向荷载作用位置始终不变。在加载梁腹板两侧设置滚动轮式侧向支撑,防止墙体发生平面外倾覆。墙体与加载梁和底座通过间距为100 mm的双排ST5.5自攻螺钉锁紧。底座与地面通过地锚螺栓紧固连接,且底座两端设有千斤顶,以保证试验中底座不发生滑动。

### 1.3 测点布置

为测试试件和加载装置的位移和变形,共布置9个位移计,如图3所示。为掌握试件的受力情况,在立柱、横撑、斜撑以及竹木碳纤维板表面上均设



表 2 竹木碳纤维板材性特征

Tab. 2 Properties of bamboo wood carbon fiber board

方向	静曲强度 $\sigma_b$ /MPa	抗拉强度 $f_u$ /MPa	弹性模量 $E_s$ /MPa	泊松比 $\nu$
纵向	10.06	4.76	5 368	0.13
横向	9.82	3.90	4 424	0.13

由表 2 可得, 竹木碳纤维板纵向与横向的力学性能相差很小, 属于各向同性板材。

## 2 试验现象

### 2.1 骨架试件 SW

水平位移加载至 12 mm 时, 墙体发出轻微的“啞啞”声, 下部斜撑与下导轨、横撑连接处螺钉开始松动、倾斜。水平位移加载至 24 mm 时, 下导轨翼缘观察到局部屈曲, 在下导轨与斜撑连接处屈曲尤为明显, 下部节点板产生局部屈曲, 边立柱发生较明显的弯折, 12、15 区格内斜撑出现局部屈曲。水平位移加载至 32 mm 时, 12、15 区格内斜撑与下导轨连接处螺钉发生剪切破坏。水平位移加载至 40 mm 时, 墙体发出剧烈的“蹦蹦”声, 下部斜撑与下导轨连接处螺钉陆续失效。骨架试件 SW 试验现象见图 6。

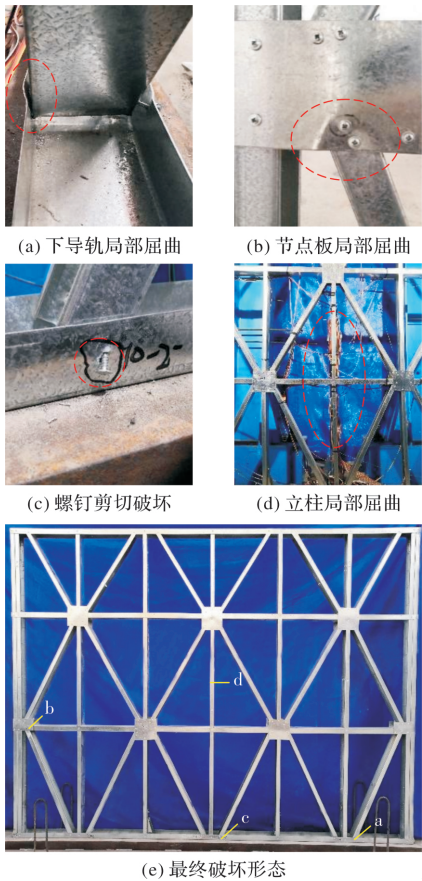


图 6 骨架试件 SW 试验现象

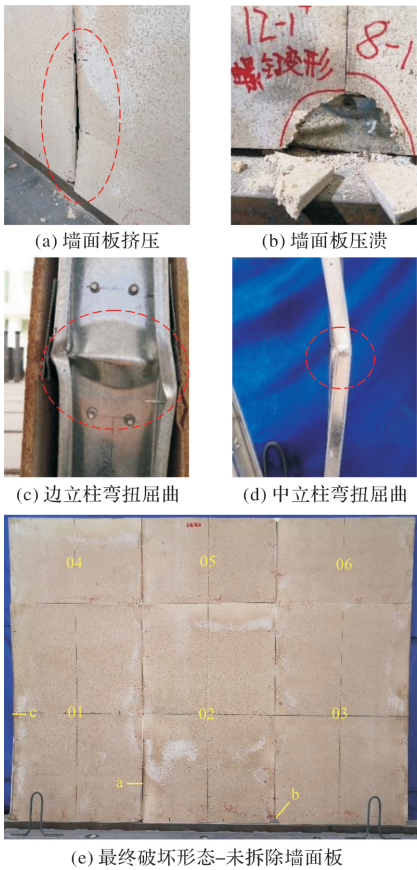
Fig. 6 Main deformation of skeleton specimen SW

### 2.2 覆板试件 CW

水平位移加载至 8 mm 时, 骨架内各杆件间产生摩擦, 墙体发出轻微的“啞啞”声。水平位移加载至 16 mm 时, 01、03 墙面板角部螺钉开始松动, 周边螺钉逐渐陷入墙面板内, 螺钉孔壁周围相继出现裂缝并持续发展, 直至墙面板压溃脱落。水平位移加载至 24 mm 时, 01、02、03 墙面板底部向面外鼓出, 相邻墙面板间挤压发生明显错动。水平位移加载至 32 mm, 墙面板周边大部分螺钉连接失效, 中部螺钉变形小, 墙面板未发生整体脱落。水平位移加载至 40 mm, 墙体发出“蹦蹦”响声, 推断为骨架内部螺钉发生剪切破坏。水平位移加载至 68 mm, 边立柱发生弯扭屈曲, 腹板鼓出, 翼缘屈曲。水平位移加载至 116 mm, 边立柱中部腹板严重屈曲。

试验结束后拆除竹木碳纤维板, 对内部骨架进行观察。立柱产生弯扭屈曲, 底部和中部屈曲尤其严重。12~15 区格内斜撑弯扭屈曲显著, 与下导轨连接处螺钉被剪断。下导轨、横撑发生局部屈曲, 节点板发生局部屈曲。覆板试件 CW 试验现象见图 7。

与骨架试件 SW 相比, 覆板试件 CW 内部冷弯薄壁型钢杆件变形更加显著, 材料力学性能发挥更加充分。





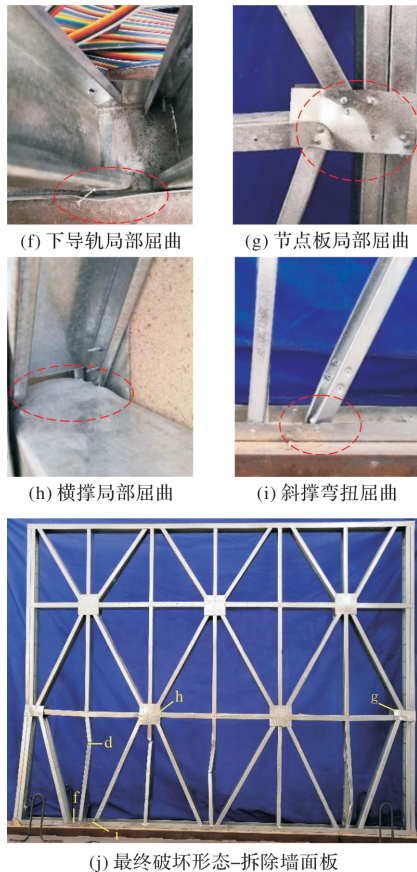


图 7 覆板试件 CW 试验现象

Fig. 7 Main deformation of panel specimen CW

### 3 试验结果分析

#### 3.1 滞回曲线

在循环荷载作用下, 骨架试件 SW 和覆板试件 CW 的滞回曲线如图 8 所示。

对于骨架试件 SW, 加载初期就表现出较为明显的非线性特征, 各连接节点处自攻螺钉开始变形, 螺钉与骨架间相互挤压产生孔壁张合导致“捏拢”现象出现, 卸载到零时出现残余变形, 滞回曲线呈反 S 形。随着加载位移的增大, 螺钉由于反复挤压造成累积损伤, 刚性斜撑、下导轨和立柱均发生较为明显的局部屈曲, 滞回曲线向 Z 形发展, 滑移现象明显(在自攻螺钉与骨架产生的孔壁张合中, 螺钉与骨架连接缝隙出现受力滞后), 各连接节点的螺钉持续变形, 直至螺钉被剪断, 螺钉破坏集中于刚性斜撑与下导轨连接处。

对于覆板试件 CW, 当加载位移较小时, 试件处于弹性阶段, 整体性能良好。随着加载位移的增大, 试件进入弹塑性阶段, 滞回曲线逐渐呈弓形, 由于墙面板的变形和螺钉周边裂缝的产生, 卸载到零时出现残余变形, 自攻螺钉与墙面板、

骨架间挤压产生孔壁张合以及墙面板接缝的张合导致滞回曲线出现“捏拢”现象。伴随着螺钉的变形和墙面板上裂缝的发展, 滞回曲线逐渐向反 S 形过渡。由于墙面板周边螺钉及内部骨架螺钉的累积损伤, 下导轨与刚性横撑的局部屈曲, 立柱、刚性斜撑的弯扭屈曲, 试件进入塑性阶段, 滞回曲线向 Z 形发展, 滑移现象明显。

二者的滞回曲线均呈现出明显的 Z 形, 滑移现象显著, 归结原因为: (1) 各冷弯薄壁型钢杆件均是通过自攻螺钉完成连接, 节点连接处较为薄弱, 在循环荷载作用下, 各杆件之间持续发生摩擦, 螺钉累积损伤, 螺钉孔逐渐变大, 在自攻螺钉与骨架产生的孔壁张合中, 螺钉与骨架连接缝隙出现明显的受力滞后现象; (2) 伴随着墙面板与骨架的连接螺钉逐渐嵌入墙面板并陆续发生剪切破坏, 导致墙面板发生局部承压破坏, 并且在循环荷载作用下与骨架之间产生相对滑动; (3) 在刚性斜撑与下导轨、刚性横撑连接处螺钉陆续发生剪切破坏, 属于脆性破坏, 导致试件在达到峰值荷载后, 承载力和刚度发生大幅度下降。

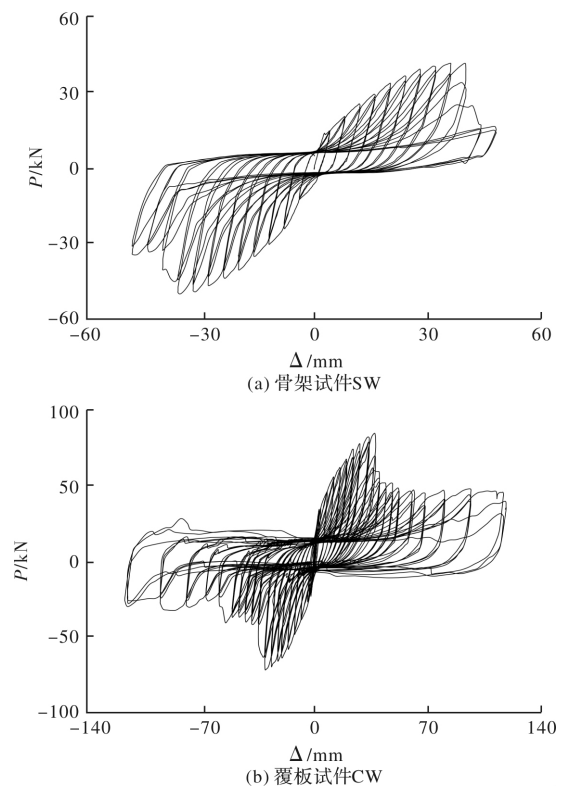


图 8 试件滞回曲线

Fig. 8 Hysteretic curve of specimen

#### 3.2 骨架曲线

根据滞回曲线每一加载级第一循环圈的峰值点所连成的包络线<sup>[16]</sup>, 即得到试件的  $P-\Delta$  骨架曲

线, 如图 9 所示. 在加载试验初期, 冷弯薄壁型钢墙体骨架曲线就表现出鲜明的非线性特征, 无显著屈服点, 根据《建筑抗震试验方法规程》规定, 可通过能量等效面积法确定屈服荷载  $P_y$  及屈服位移  $\Delta_y$ <sup>[16]</sup>. 破坏荷载  $P_u$  及相应位移  $\Delta_u$  取自峰值荷载出现后, 荷载下降至 85% 时对应的荷载与位移. 将峰值荷载  $P_{max}$  除以墙体长度  $L$  得到抗剪强度  $P_s$ , 国内外规范多以此作为设计依据, 墙体承载力特征值见表 3.

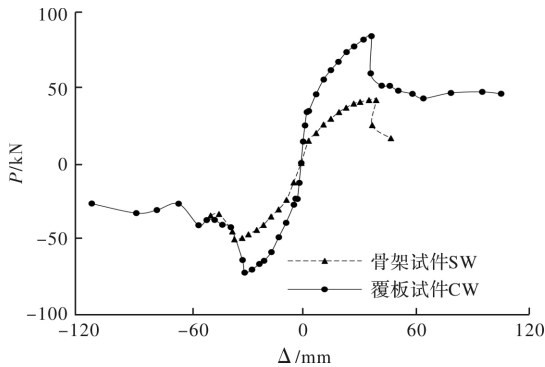


图 9 试件骨架曲线  
Fig. 9 Skeleton curve of specimen

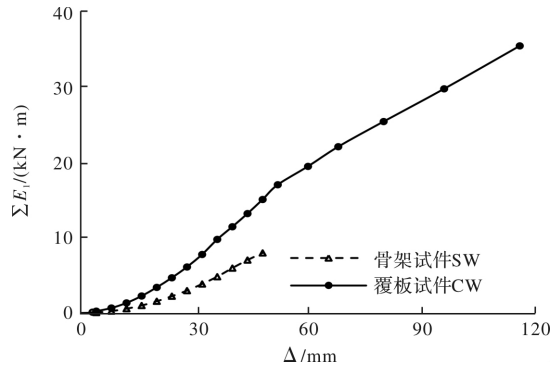


图 10 累计耗能对比  
Fig. 10 Comparison of cumulative energy consumption

由图 9 可见, 在试件达到峰值荷载后, 骨架曲线发生突变. 这是由于刚性斜撑与下导轨翼缘仅通过 2 颗自攻螺钉连接, 该处连接薄弱, 当荷载达到峰值时, 该处连接螺钉骤然崩裂, 此时斜撑上端锁紧, 而下端失去约束, 无法继续承受如此大的荷载, 加上该处受力较大, 致使荷载急剧下降, 该处的破坏也导致了变形的增大. 循环加载造成的螺钉累积损伤使得竹木碳纤维板产生开裂、相互挤压等局部承压破坏, 墙体发生内力重分配.

表 3 主要试验结果  
Tab. 3 Main test results

墙体类型	试件编号	竖向 荷载 /kN	屈服点		峰值点		破坏点		$\mu$	$P_s$ /kN · m <sup>-1</sup>	$K_e$ /kN · m <sup>-1</sup>	$E$
			$\Delta_y$ /mm	$P_y$ /kN	$\Delta_{max}$ /mm	$P_{max}$ /kN	$\Delta_u$ /mm	$P_u$ /kN				
刚性支撑冷弯型钢骨架	SW	50	22.19	39.02	35.65	45.85	37.23	38.98	1.68	12.53	2 650	0.59
交叉支撑冷弯型 钢骨架 <sup>[1]</sup>	WB-75-2 <sup>[8]</sup>	45	19.66	18.61	25.48	21.61	35.86	18.37	1.82	9.00	1 219	—
	WHL-XB-1 <sup>[17]</sup>	30	20.30	24.08	26.88	26.94	29.12	22.90	1.43	11.23	—	—
双面覆竹木碳纤维板	CW	100	19.43	65.13	33.60	77.85	35.54	66.18	1.83	21.27	4 986	0.79
石膏板+带肋钢板 <sup>[8]</sup>	WD75-3	80	14.87	29.29	26.72	35.79	32.36	30.42	2.18	14.91	2 523	—
	WD100-3	80	15.60	28.53	25.68	32.63	61.8	23.76	2.14	13.60	2 233	—
石膏板+OSB 板 <sup>[2]</sup>	BX-7	80	9.50	25.40	27.45	30.52	38.1	25.94	4.01	12.72	—	0.82

注: 交叉钢带支撑冷弯型钢骨架与双面覆板(石膏板+带肋钢板、石膏板+OSB 板)墙体长度为 2.4 m, 高度为 3.0 m.

由表 3 数据可得, 刚性支撑冷弯薄壁型钢骨架墙体与交叉支撑冷弯薄壁型钢骨架墙体相比, 屈服强度提升了 62% 到 110%, 抗剪强度提升了 12% 到 39%, 抗侧刚度提升了 117%. 刚性支撑的设置增强了墙体的抗侧刚度和抗剪性能. 覆竹木碳纤维板墙体与覆石膏板+带肋钢板墙体及覆石膏板+OSB 板墙体相比, 屈服强度增加了 122% 到 156%, 抗剪强度增加了 43% 到 67%, 抗侧刚度增加了 98% 到 123%.

与骨架试件 SW 相比, 覆板试件 CW 的各项抗震性能指标得到显著增强, 抗剪强度提高 70%, 抗侧刚度提高 88%. 尽管竹木碳纤维板周边多数螺钉连接失效, 但内部螺钉仍然维持着竹木碳纤

维板与骨架的紧密连接, 竹木碳纤维板对骨架一直发挥着支撑作用, 有效限制了骨架的平面外变形, 墙体的整体性加强.

3.3 延性及耗能性能

位移延性系数  $\mu$  为墙体极限位移  $\Delta_u$  与屈服位移  $\Delta_y$  的比值<sup>[16]</sup>. 由表 3 可得, 骨架试件 SW 延性系数为 1.68, 覆板试件 CW 延性系数为 1.83, 延性性能一般.

能量耗散系数和累计耗能是衡量构件耗能性能优劣的重要指标. 取荷载达到峰值时的滞回环, 由公式  $E = \text{滞回环 } S_{(ABC+ CDA)} / \text{三角形 } S_{(OBE+ ODF)}$  计算得到能量耗散系数  $E$ <sup>[16]</sup>, 具体数值见表 3. 试件的累计耗能为依次累加每级第一圈滞回环面积计算

所得, 用  $\Sigma E_1$  表示, 滞回曲线包络的面积越大, 试件能量的耗散越多. 冷弯薄壁型钢墙体通过各部件之间的摩擦变形来进行能量耗散. 图 10 给出了骨架试件 SW 与覆板试件 CW 的累计耗能对比, 随着加载位移的增加, 试件的累计耗能逐渐增加. 在同级位移 48 mm 下, 骨架试件 SW 累计耗能为  $\Sigma E_1$  为  $8.01 \text{ kN} \cdot \text{m}$ , 覆板试件 CW 累计耗能为  $15.13 \text{ kN} \cdot \text{m}$ , 覆板试件 CW 累计耗能能力约比骨架试件 SW 提升 89%. 从最终累计耗能来看, 覆板试件 CW 达到  $35.59 \text{ kN} \cdot \text{m}$ , 约比骨架试件 SW 提升 344%. 竹木碳纤维板为内部骨架提供了有利的支撑, 防止其过早屈曲, 覆板试件 CW 的承载能力和变形能力都要明显优于骨架试件 SW. 与骨架试件 SW 相比, 覆板试件 CW 延性和耗能能力都得到提高, 其中延性系数提高 9%, 能量耗散系数提高 34%, 覆竹木碳纤维板冷弯薄壁型钢墙体适合应用于抗震工程中.

### 3.4 刚度退化

抗侧刚度  $K$ . 取骨架曲线上 1/300 侧移角处的割线刚度, 具体数值见表 3. 试件的刚度退化曲线以墙体位移角  $\theta$  为自变量, 割线刚度  $K$  为因变量. 由图 11 可得, 试件刚度退化总体上较为稳定, 未见刚度异常突变. 对于骨架试件 SW, 刚度退化速率均匀, 在加载后期, 由于刚性斜撑与下导轨处的连接螺钉多数被剪断, 刚性斜撑与下导轨出现滑移, 试件刚度急剧下降. 对于覆板试件 CW, 在加载初期, 竹木碳纤维板底部开始慢慢向外鼓出, 周边多数螺钉内陷于板内, 墙面板上出现数条裂缝并持续开展, 竹木碳纤维板对骨架的支撑作用逐渐减弱, 致使试件刚度退化速率较快, 表明墙体在加载初期结构非线性特征表现明显. 加载至 40 mm 时, 竹木碳纤维板周边多数螺钉已失效, 墙面板间相互挤压, 并发出剧烈“蹦蹦”声, 推断是骨架内刚性斜撑与下导轨连接螺钉断裂, 导致试件刚度大幅下降. 尽管墙面板周边多数螺钉连接失效, 但由于内部的螺钉变形较小, 墙面板未发生整体脱落, 整体性一直维持较好, 对内部骨架仍然保持较强的支撑作用, 刚度退化保持平缓.

### 3.5 强度退化

试件的强度退化用强度退化系数  $\lambda$  表示, 即同一级位移加载下第二次循环与第一次循环峰值荷载的比值<sup>[16]</sup>. 如图 12 所示, 取墙体侧移角  $\theta$  为自变量, 骨架试件 SW 与覆板试件 CW 的强度退化系数  $\lambda$  均在 0.6 ~ 1.1 之间波动, 其中绝大多数时候处于 0.8 ~ 1.1 之间, 强度退化较稳定, 由于

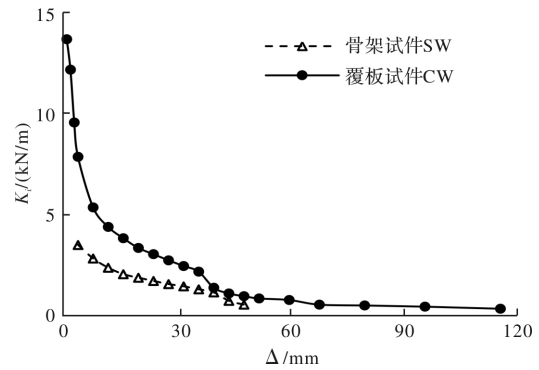


图 11 刚度退化曲线

Fig. 12 Stiffness degradation curve

刚性斜撑与下导轨连接螺钉被剪断, 部分强度退化系数降至 0.8 以下.

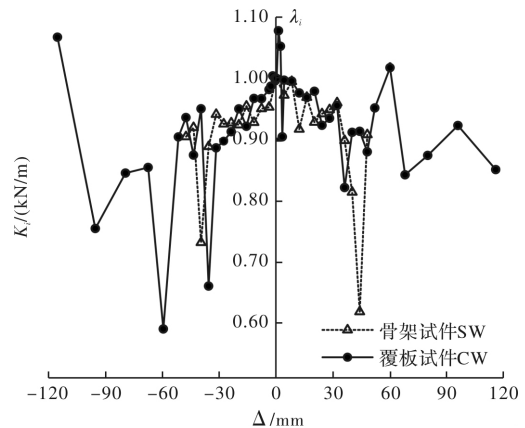


图 12 强度退化曲线

Fig. 13 Strength degradation curve

### 3.6 应变分析

由图 13、图 14 的应变数据可知, 刚性斜撑的应变反应较大, 刚性横撑次之, 立柱最小. 刚性横撑与刚性斜撑的设置, 减小了立柱的变形, 优化了结构受力, 竖向荷载由立柱与刚性斜撑承担, 水平荷载由刚性横撑、刚性斜撑与立柱共同承担, 显著增强了墙体的抗侧刚度和抗剪承载力.

由于竹木碳纤维板的支撑, 覆板试件 CW 内部骨架的应变反应明显大于骨架试件 SW, 说明竹木碳纤维板的支撑增强了冷弯薄壁型钢骨架内各杆件的变形能力, 材料得到了充分利用. 竹木碳纤维板的应变反应较大, 表明竹木碳纤维板在试验中通过相互挤压等变形承担了部分水平荷载, 对于墙体抗剪承载力的增大有显著帮助.

试件底部应变较大, 顶部应变较小, 下导轨往往产生较大的局部屈曲. 边立柱应变较大, 中间立柱应变较小, 边立柱往往发生较大的弯扭变形. 建议通过加大截面尺寸、加大钢材厚度等措施, 以防止下导轨和边立柱等受力较大的部位过早屈曲, 并充分发挥材料性能.

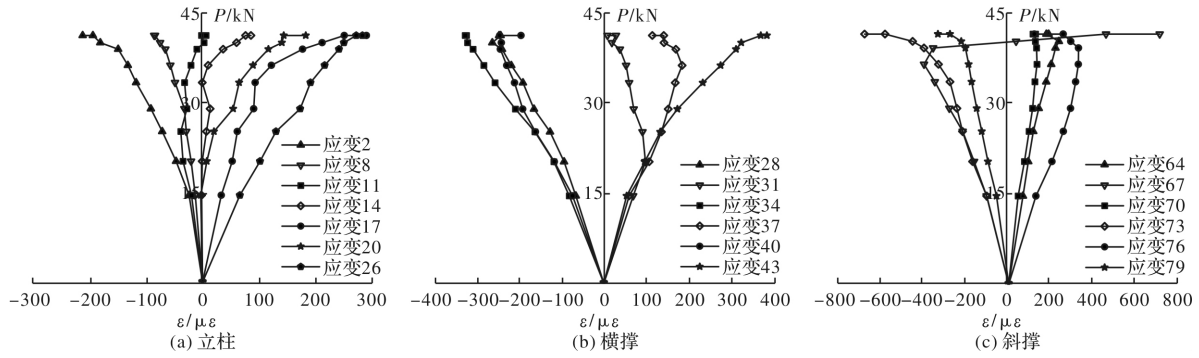


图 13 骨架试件 SW 荷载-应变曲线

Fig. 10 Load-strain curve of skeleton specimen SW

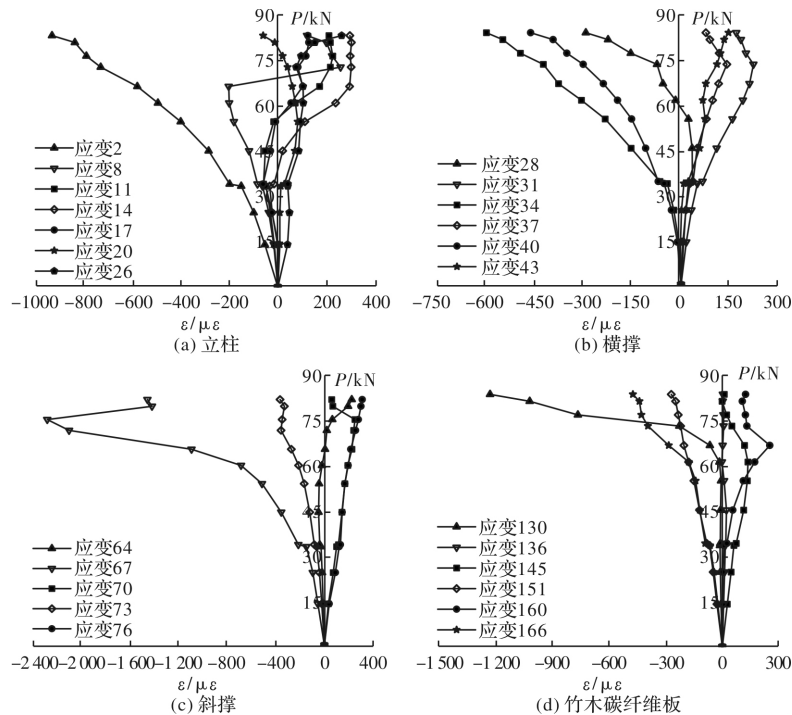


图 14 覆板试件 CW 荷载-应变曲线

Fig. 11 Load-strain curve of panel specimen CW

## 4 结论

通过对冷弯薄壁型钢骨架墙体和覆竹木碳纤维板冷弯薄壁型钢墙体在低周往复加载作用下的试验研究,得到以下几点结论:

(1)冷弯薄壁型钢骨架墙体的主要破坏模式为下部刚性斜撑与下导轨连接螺钉剪切破坏,下导轨、边立柱翼缘局部屈曲。覆竹木碳纤维板冷弯薄壁型钢墙体的主要破坏模式为墙面板承压破坏,墙面板与骨架连接螺钉剪切破坏,立柱、刚性斜撑弯扭屈曲,下导轨、刚性横撑局部屈曲。

(2)竹木碳纤维板增强了骨架的变形能力,并通过相互挤压等变形来分担受力,提高了墙体的抗震性能,其中抗剪强度越比骨架墙体提高 72%,抗侧刚度提高 128%,耗能能力提高 344%,在结构设计中应当考虑墙面板对骨架的支撑加强作用。

但墙面板接缝处是冷弯薄壁型钢墙体抗震性能的一个薄弱环节,建议对接缝密封处理的施工工艺展开研究。

(3)刚性斜撑的应变反应较大,刚性横撑次之,立柱较小。刚性支撑的设置可减小立柱变形,优化结构受力,提高墙体整体性,增强抗侧刚度、承载能力和耗能能力。现有工程中刚性斜撑与下导轨、刚性横撑连接处较薄弱,下导轨与刚性横撑两侧翼缘发生屈曲较早,建议在该类连接处采取有效方法加强连接。

## 参考文献 References

- [1] 周绪红,石宇,周天华,等. 低层冷弯薄壁型钢结构住宅体系[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(2): 1-14.  
ZHOU Xuhong, SHI Yu, ZHOU Tianhua, et al. Cold-formed steel framing system of low-rise residen-



- tial building[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(2): 1-14.
- [2] 石宇. 低层冷弯薄壁型钢结构住宅组合墙体抗剪承载力研究[D]. 西安: 长安大学, 2005.
- SHI Yu. Study on shear resistance of cold-formed steel stud walls in low-rise residential structures[D]. Xi'an: Chang'an University, 2005.
- [3] 李元齐, 刘飞, 沈祖炎, 等. S350 冷弯薄壁型钢龙骨式复合墙体抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(12): 83-90.
- LI Yuanqi, LIU Fei, SHEN Zuyan, et al. Experimental investigation on seismic behavior of S350 light-gauge composite framing walls[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(12): 83-90.
- [4] 苏明周, 黄智光, 孙健, 等. 冷弯薄壁型钢组合墙体循环荷载下抗剪性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(8): 42-51.
- SU Mingzhou, HUANG Zhiguang, SUN Jian, et al. Experimental study of the shearing behavior of cold-formed steel wall panels under cyclic load[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(8): 42-51.
- [5] TIAN Y S, WANG J, LU T J. Racking strength and stiffness of cold-formed steel wall frames[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60(7): 1069-1093.
- [6] LIN Shinhua, Pan Chiling, HSU Weiting. Monotonic and cyclic loading tests for cold-formed steel wall frames sheathed with calcium silicate board[J]. Thin-Walled Structures, 2014, 74: 49-58.
- [7] 周天华, 石宇, 何保康, 等. 冷弯型钢组合墙体抗剪承载力试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2006, 38(1): 83-88.
- ZHOU Tianhua, SHI Yu, HE Baokang, et al. Experimental research on shear resistance of cold-formed steel stud composite wall[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2006, 38(1): 83-88.
- [8] 郭鹏. 冷弯型钢骨架墙体抗剪性能试验与理论研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
- GUO Peng. Experimental and theoretical study on shear performance of cold-formed steel framing walls[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2008.
- [9] 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 Xuhong, SHI Yu, ZHOU Tianhua, et al. Experimental study of the shear resistance of cold-formed steel stud walls[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(5): 38-44.
- [10] 何保康, 郭鹏, 王彦敏, 等. 高强冷弯型钢骨架墙体抗剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(2): 72-78.
- HE Baokang, GUO Peng, WANG Yanmin, et al. Experimental study on shear resistance of high strength cold-formed steel framing walls[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(2): 72-78.
- [11] 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, 12(32): 45-51.
- WANG Chungang, LI Ning, ZHANG Zhuangnan. Research on seismic behavior of cold-formed thin-walled steel residential structures with different rigid bracings[J]. Steel Construction, 2017, 32(12): 45-51.
- [12] 王宇航, 邓锐, 姚欣梅, 等. 带斜撑冷弯薄壁型钢墙体抗震性能试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2019, 36(2): 30-38.
- WANG Yuhang, DENG Rui, YAO Xinmei, et al. Experiment on seismic behavior of cold-formed thin-walled steel walls with diagonal braces[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2019, 36(2): 30-38.
- [13] 胡健翔. 加斜撑冷弯薄壁型钢组合墙体抗震性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- HU Jianxiang. Study on seismic behavior of cold-formed and thin-walled steel composite wall with diagonal bracing[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [14] 国家质量监督检验检疫总局. 金属材料 拉伸试验 第1部分 室温试验方法: GB/T 228.1-2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- ISCCC. Metallic materials-tensile testing-part 1 method of test at room temperature: GB/T 228.1-2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [15] 国家质量监督检验检疫总局. 人造板及饰面人造板理化性能试验方法: GB/T 17657-2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- ISCCC. Test methods of evaluating the properties of wood-based panels and surface decorated wood-based panels: GB/T 17657-2013 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.
- [16] 住房和城乡建设部. 建筑抗震试验方法规程: JGJ/T 101-2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- MOHURD. Specification for seismic test of buildings: JGJ/T 101-2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [17] 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 Jiping, LIU Bin, SHAO Dayu, 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.