

# FCP 复合墙板在循环荷载下抗剪性能试验

周 博<sup>1</sup>, 刘 明<sup>1,2</sup>, 王春刚<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁 大连 116024; 2. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

**摘 要** 目的 研究纤维水泥压力复合外墙板在低周往复荷载下的抗剪力学性能, 为在实际工程中应用提供合理的设计依据. 方法 通过对3面足尺的FCP复合外墙板进行低周往复试验研究, 得到各试件的荷载-转角曲线, 承载力骨架曲线, 极限承载力, 转角延性系数, 能量耗散系数, 抗剪刚度. 结果 FCP复合外墙板试件的破坏模式主要表现为: FCP覆面板角部位置破坏, 冷弯薄壁型钢龙骨与自攻螺钉连接失效, 两侧边框龙骨节点位置冷弯型钢龙骨连接位置破坏. 试件延性系数在1.98~6.56, 能量耗散系数在0.56~0.71, 并得到了试件在层间位移角达到1/300时, 对应的抗剪刚度. 结论 FCP复合墙板满足正常使用状态下承载力要求. 整个加载过程中, 墙板试件没有从主体结构脱落. 钢龙骨间距对试件侧向抗剪承载力影响不大, 窗洞口削弱了试件的侧向抗剪承载力.

**关键词** 复合墙板; 龙骨; 循环荷载; 抗剪性能; 抗震性能

中图分类号 TU395

文献标志码 A

## Experimental Study on Shearing Behavior of Fiber Cement Pressure Composite External Wall Board under Cyclic Loads

ZHOU Bo<sup>1</sup>, LIU Ming<sup>1,2</sup>, WANG Chungang<sup>2</sup>

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, China, 116024; 2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** In order to study the mechanical properties of fiber cement pressure composite exterior wall board (referred to as FCP composite exterior wall board) under cyclic loading, full scale model test was carried out for 3 pieces of FCP composite exterior wall board under cyclic horizontal load. The size of specimen was 2 800 mm × 2 400 mm, and the stud spacing and window hole were set as the main parameters in this research. From the test, load-rotation curves, skeleton curves, bearing capacity, ductility factor of rotation, energy dissipation coefficient and shearing rigidity were got. The test results showed that: the failure mode of FCP composite exterior wall board mainly involved the destruction of FCP board at the corner position, the failure of connection

收稿日期: 2016-11-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408373); 国家重点研发技术课题(2016YFC0701402)

作者简介: 周博(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事结构工程研究.

between cold-formed steel stud and self-tapping screws, and the local damage of steel studs at the position of the connections on both sides. The ductility coefficient of the specimen was  $1.98 \sim 6.56$ , the energy dissipation coefficient was  $0.56 \sim 0.71$ , and the shear rigidity of the specimen according to the story drift of  $1/300$  was also obtained. Finally, the influence factors analysis was carried out, and the results showed that: steel stud spacing has little effect on the lateral shear capacity of the specimen, but the window opening weakened the lateral shear capacity of the specimen.

**Key words:** composite wall board; studs; cyclic loading; shear resistance; seismic performance

随着建筑产业化的不断发展,复合外墙板在国内开始生产和使用.大部分复合外墙板以冷弯薄壁型钢作为龙骨,覆面结构板材通常采用石膏板、OSB板等<sup>[1]</sup>.外墙体系处在建筑室内外交界位置,极易受到周围环境的影响,尤其在北方严寒地区,要考虑到其保温性能和耐候性能.同时也要满足抵御平面外风荷载作用,且在平面内也应具有一定的侧向刚度和承载力.

国内外已有学者对复合墙板进行了相关研究,李元齐教授<sup>[2]</sup>对冷弯薄壁型钢龙骨复合墙体进行了试验研究,结果表明复合墙板的破坏主要表现为覆面板与龙骨之间的自攻螺钉失效;周绪红教授<sup>[3]</sup>对不同自攻螺钉间距的复合墙板试件进行了低周往复荷载试验研究,结果表明自攻螺钉间距对试件承载力影响很大;苏明周、Tian Y S、Fulop L A等<sup>[4-12]</sup>相继对开展了复合墙体低周往复荷载试验研究,研究结果表明冷弯薄壁龙骨复合墙板的耗能主要是依靠龙骨和覆面板之间的相对变形等,同时不同覆面板材对复合墙体承载力和侧向刚度均有一定影响.以上大部分研究针对承受竖向荷载的墙板,然而对于外围护结构而言,很少有考虑利用复合外挂墙板的侧向承载力及刚度,通常采用柔性连接或滑槽式插接的构造措施来保证外挂墙板随主体结构移动而不承受侧向力.显然如果合理的利用复合外挂墙板的侧向承载力,将对主体结构抗震有利.

笔者结合国内外已有研究成果,提出了一种以纤维水泥压力板(Fiber Cement Pres-

sure, FCP板)为覆面结构板材<sup>[13]</sup>,冷弯薄壁型钢作为龙骨框架,高密度岩棉板做内保温的新型外围护复合外挂墙板.通过分析3面不同参数的FCP复合外挂墙板自身的侧向刚度和承载能力特征值,得到了FCP复合外墙板的各项抗震性能指标,为此类复合墙板围护结构体系节点构造设计和对主体结构抗侧刚度影响提供一定数据支持.

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

试件内部构造、龙骨框架布置、节点连接、边框龙骨、窗框龙骨及中间龙骨截面如图1所示.钢龙骨壁厚 $1.38\text{ mm}$ ,切 $45^\circ$ 角后氩弧焊对接.试件完成长 $\times$ 宽 $\times$ 高为 $2\,800\text{ mm}\times 2\,400\text{ mm}\times 140\text{ mm}$ .两侧通过间距 $300\text{ mm}$ 的自攻螺钉将 $10\text{ mm}$ 厚的FCP覆面板与钢龙骨连接.试件上、下两端均布置螺母连接件与钢龙骨内壁焊接,通过M8螺栓及连接件与主体结构相连接.

### 1.2 基本参数

根据《建筑幕墙规范》(GB/T21086—2007)及《住宅设计规范》(GB50096—1999)中的规定,建筑外围护结构要留有一定面积的窗洞口以满足通风和采光的要求,故以窗洞口为试验参数具有实际意义.FCP复合外挂墙板主要依靠竖向龙骨抵御风荷载作用,故研究不同的龙骨间距对试件抗震性能的影响就十分必要.本次实验以龙骨间距和窗洞口为主要参数见表1.试件相邻龙骨间距分别为 $600\text{ mm}$ 、 $800\text{ mm}$ ;带窗洞口的试件,洞

口尺寸为1 200 mm×1 500 mm. 试件的 FCP 板两侧均为 10 mm 厚,通过 ST3.5 自攻螺钉

与试件钢龙骨相连,每个自攻螺钉间距为 300 mm.

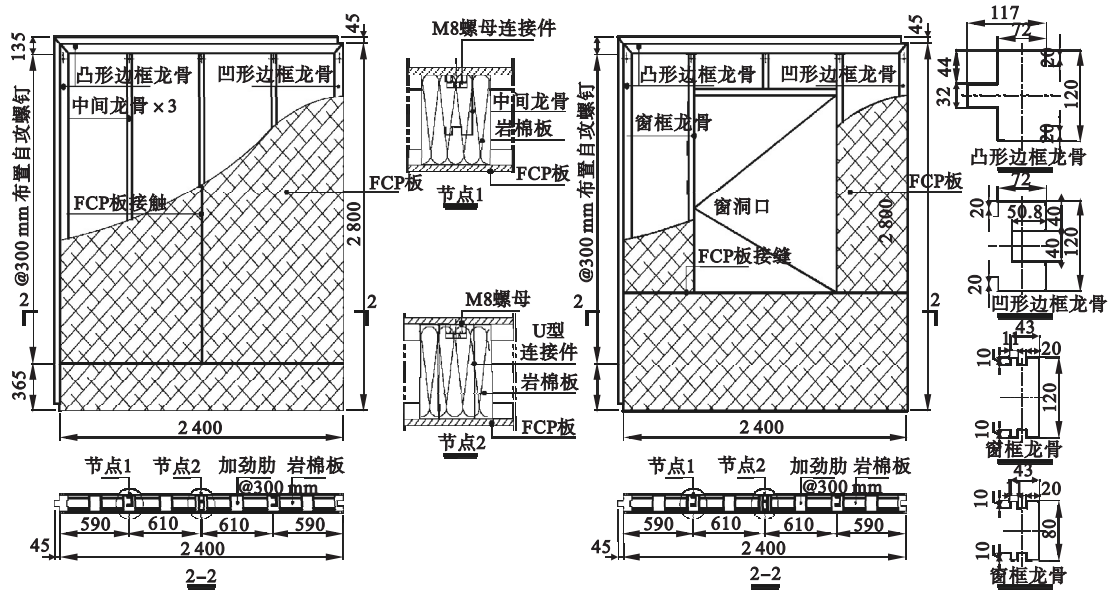


图1 钢龙骨布置图及截面尺寸

Fig.1 The distribution and section of the steel studs

表1 试件试验参数表

编号	龙骨间距/mm	连接方式	荷载类型
SW-F1	600	上、下点式	平面内低周往复
SW-F2	800	上、下点式	平面内低周往复
SW-H1	窗洞口	上、下点式	平面内低周往复

1.3 钢材材性

墙体试件钢龙骨采用 S350,1.38 mm 厚钢板冷弯制成. 材料力学性能测试试件与 FCP 复合外墙板内的钢龙骨为同一批钢材,材性试验试件取样根据文献[14]选取,加工时取样均平行于龙骨轧制方向,得到材料力学性能试验结果见表 2.

表2 钢材材料力学性能

屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%	泊松比	弹性模量/ 10 <sup>5</sup> MPa
289.8	369.5	21	0.3	2.06

1.4 试验装置

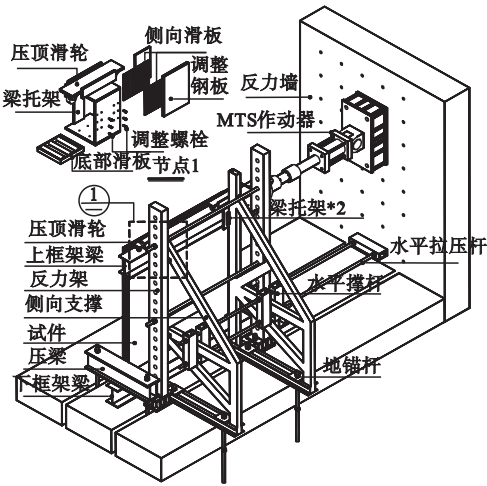
试验装置见图 2. 首先将反力架通过地锚杆固定于实验室地面,将箱形梁托架通过

螺栓固定在反力架指定位置(见图 2(a)). 将上部 H 型钢梁放入箱型托架内,上部 H 型钢梁下翼缘与托架内设滑板,一侧预先焊好连接板通过高强螺栓与 MTS 作动器相连,另一侧水平方向可自由滑动. H 型钢与托架重合位置上,下翼缘上焊有 20 mm 钢板提供接触面,在此钢板与托架之间设置水平滑板及调整垫板. 通过托架的两侧攻丝通孔,校紧调整螺栓,带动调整垫板,直至滑板与 H 型钢梁之间仅有细微间隙为止. 定位后,在试件顶部安装压顶滑轮,压在 H 型钢梁上翼缘. 这样通过将上部 H 型钢梁限制在平面内,将试件限位,又不会造成滑板与 H 型钢梁间产生过大的摩擦力以影响试验精度.

通过螺栓,将试件固定在上部 H 型钢梁的 U 型连接件上,U 型连接件采用 20 mm 厚钢板,与 H 型钢梁焊接. 下部 H 型钢梁也设有 U 型连接件,且两侧伸出试件宽度方向,通过压梁及地锚杆固定于地面,防止在施加水平荷载时试件整体“转动”;在下部 H 型钢梁靠近反力墙一侧焊接有 20mm 厚开孔带肋

连接板,通过水平锚杆与反力墙上孔洞锚固,以防止施加水平往复荷载时试件整体的滑

移,试件安装完成见图 2(b).



(a) 试验装置示意图



(b) 试验装置完成

图 2 试验装置

Fig. 2 Test device

1.5 加载制度

水平低周往复荷载由 MTS 作动器施加,由于试件屈服荷载不易确定,同时,由于加载制度对试验结果几乎没有影响<sup>[9]</sup>,故采用全程位移控制加载(见图 3).利用有限元软件近似计算试件的屈服位移  $\Delta_y$ ,按照  $0.25\Delta_y$ 、 $0.5\Delta_y$ 、 $0.75\Delta_y$ 、 $1\Delta_y$  每级荷载循环一圈,过  $\Delta_y$  后,按照  $1.25\Delta_y$ 、 $1.5\Delta_y$ 、 $1.75\Delta_y$ 、 $2\Delta_y$ 、 $3\Delta_y$  等依次加载,每级荷载反复 3 次,直到试件承载力下降到其极限荷载的 85% 以下停止加载.加载制度见图 3.

1.6 测点布置及数据采集

布置位移计测量试件关键点位移,及加载过程中支座位置可能产生的刚体转动,可能产生的水平滑移;图 4 分别给出了不带窗洞口和带窗洞口试件的位移计及应变片布置.试验荷载通过 MTS 作动器自动采集,位移和应变通过 IMP 采集系统采集(见图 5).

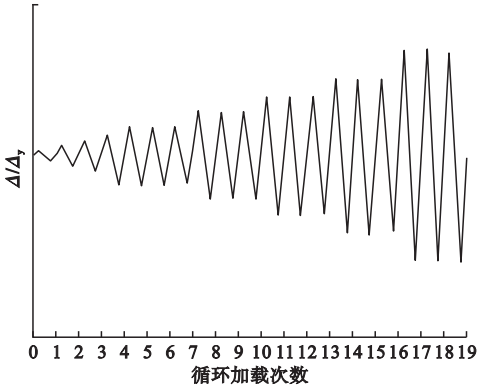
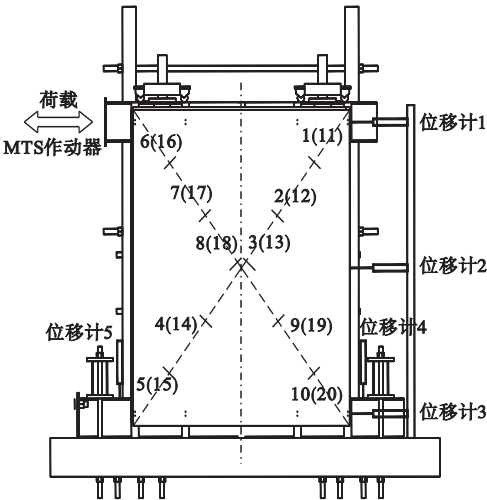


图 3 加载制度

Fig. 3 The loading regime



(a) 不带窗洞口试件



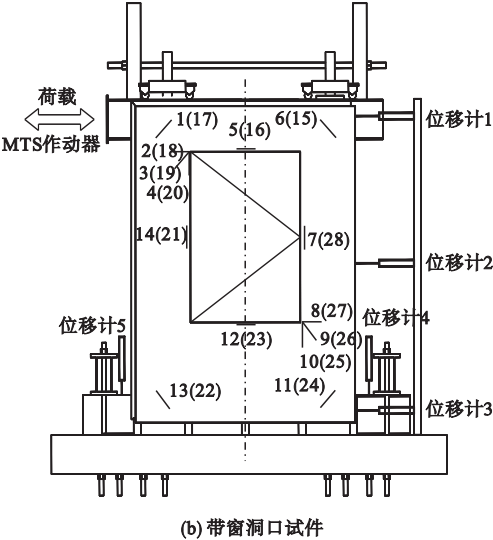


图4 位移计及应变片布置

Fig. 4 Layout of LVDT and strain gauges



图5 IMP数据采集装置

Fig. 5 IMP Data acquisition device

2 试验现象

2.1 试件 SW - F1

在加载初期,试件表面无明显现象,层间位移角达到  $1/250$  时,SW - F1 墙体试件无破坏、开裂. 当位移为  $1.5\Delta_y$  第3圈时,出现轻微脆响,自攻螺钉周围 FCP 板出现粉末;加载至  $1.75\Delta_y$  第1圈时,试件角部位置出现斜裂缝,部分自攻螺钉发生较大剪切变形(见图6(a)). 加载至  $1.75\Delta_y$  第2圈时,上部连接件位置出现斜裂缝(见图6(b));试验结束后,将试件取下,除去 FCP 板发现试件两侧边框龙骨螺母连接件已经破坏,钢龙骨被撕开(见图6(c)),中间龙骨节点位置 FCP 板虽已开裂,但节点位置没有明显破坏,试件始终未脱落.

2.2 试件 SW - F2

加载初期,试件表面无明显现象,层间位移角达到  $1/250$  时,SW - F2 墙体试件无破坏、开裂. 当位移为  $1\Delta_y$  第3圈时,FCP 板碎裂,自攻螺钉与钢龙骨挤压的轻微脆响,自攻螺钉周围 FCP 板变大,并出现粉末;当位移为  $1.75\Delta_y$  第1圈时,在 FCP 复合外挂墙板室内侧,角部位置出现斜裂缝,部分自攻螺钉发生较大剪切变形,钉孔变大,粉末增多. 加载至  $4\Delta_y$  第2圈时,转角位置有少量 FCP 板碎裂. 试验结束后,将试件取下,剖开后,发现



(a) 自攻螺钉位置破坏



(b) 角部位置出现斜裂缝



(c) 连接位置钢龙骨剪坏

图6 试件 SW - F1 破坏模式

Fig. 6 The failure mode of specimen SW - F1

试件中间龙骨节点无明显破坏(见图7(a)),两侧边框龙骨节点位置龙骨壁破坏

(见图7(b)),但试件始终未与主体结构脱落.

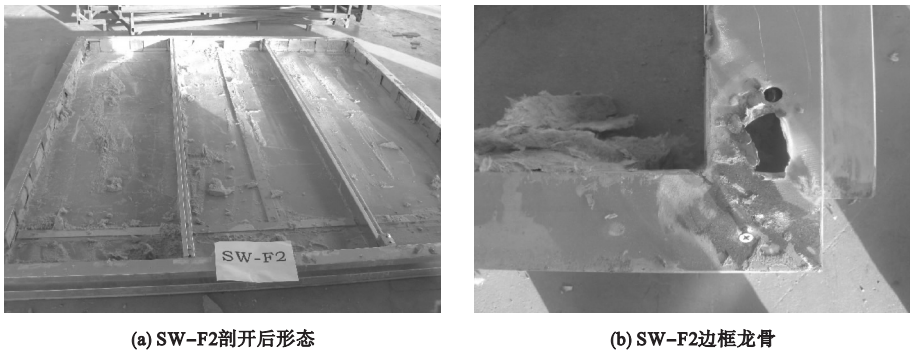


图7 试件 SW - F2 破坏模式

Fig. 7 The failure mode of specimen SW - F2

2.3 试件 SW - H1

加载初期,试件表面无明显现象,层间位移角达到  $1/250$  时,SW - H1 墙体试件无破坏、开裂.当位移为  $1\Delta_y$  第 1 圈时,出现 FCP 板碎裂的响声,试件在窗洞口转角位置出现第一道斜裂缝,约  $45^\circ$  (见图 8(a));当位移为  $1\Delta_y$  第 2 圈时,与第一道裂缝关于墙板中线对称位置出现第二道斜裂缝,周围自攻螺钉已被剪坏;当位移为  $1.5\Delta_y$  第 2 圈时,窗洞口转角位置,自攻螺钉周围少量 FCP 板碎裂

(见图 8(b)),沿窗洞口转角向下出现一道斜裂缝,宽度约为  $2\text{ mm}$  (见图 8(c)),试件室内侧,FCP 板与钢龙骨剥离 (见图 8(d));当位移为  $2\Delta_y$  第 1 圈时裂缝宽度逐渐变宽,板间接缝位置已破坏;随着自攻螺钉被剪坏,伴随着少量 FCP 板碎片脱落,且与钢龙骨之间间隙变大,试件内部岩棉板可见;加载过程中,虽然 FCP 板表面破损严重,但由于自攻螺钉的连接,始终没有出现大面积的 FCP 板脱落,试件始终未脱落.

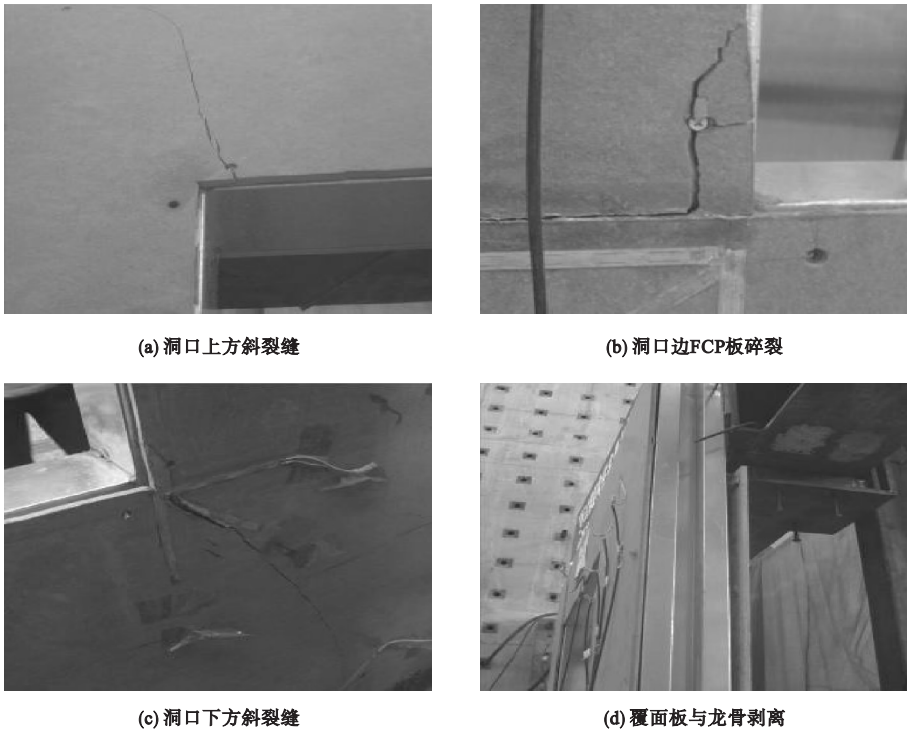


图8 试件 SW - H1 破坏模式

Fig. 8 The failure mode of specimen SW - H1

3 结果分析

3.1 数据处理

3.1.1 摩擦力处理

试件侧向承载力较小,若忽略掉摩擦力作用,会造成较大的相对误差.故在每个试件试验结束后,松开下部螺栓,通过MTS作动器对试件进行往复推拉,同步采集荷载数据,即可近似得到水平方向摩擦力.在数据处理时,去掉此部分摩擦力<sup>[15-16]</sup>.

3.1.2 位移计处理

试验过程中,FCP复合外墙板顶部实测到的位移 $\delta_0$ 是由试件水平滑移 $\delta_1$ (由水平拉杆伸长及装置间缝隙产生),试件转动时顶部产生的位移 $\delta_2$ (加载时,下部钢梁翘起产生),以及墙体的实际剪切变形 $\delta$ 三部分组成(见图9).墙体的剪切变形 $\delta$ 包括覆面板及钢龙骨的剪切变形.试件实际的剪切变形为 $\delta = \delta_0 - \delta_1 - \delta_2$ ,由转动而产生的位移 $\delta_2$ 和位移计测量值的关系如图10所示,具体可参考文献[4].

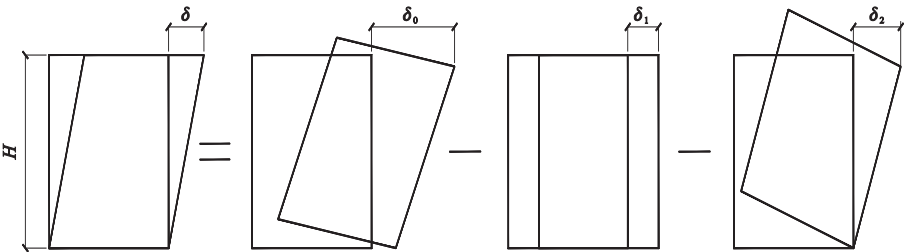


图9 试件剪切变形

Fig. 9 Shearing deformation of the specimen

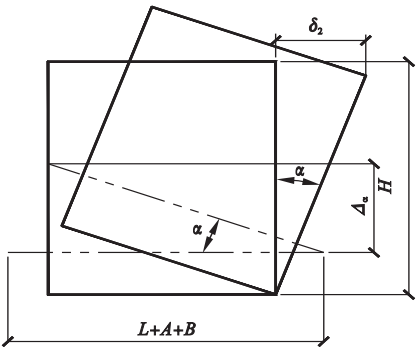


图10 刚性转动

Fig. 10 Rigid rotation

3.2 荷载-转角曲线

图11为三个试件的荷载-转角曲线.加载初期,滞回曲线接近梭形,卸载至零时残余变形较小;随着荷载增加,滞回曲线向反S形发展,出现一定的“捏缩”现象;接近屈服荷载时,试件“捏缩”现象进一步明显,继续加载,出现承载力降低,表现出明显的刚度退化现象;接近破坏时,试件滞回曲线已非常接近Z形.试验中“捏缩”现象是由于以下几个原因造成:①节点位置螺栓将钢龙骨剪坏,孔

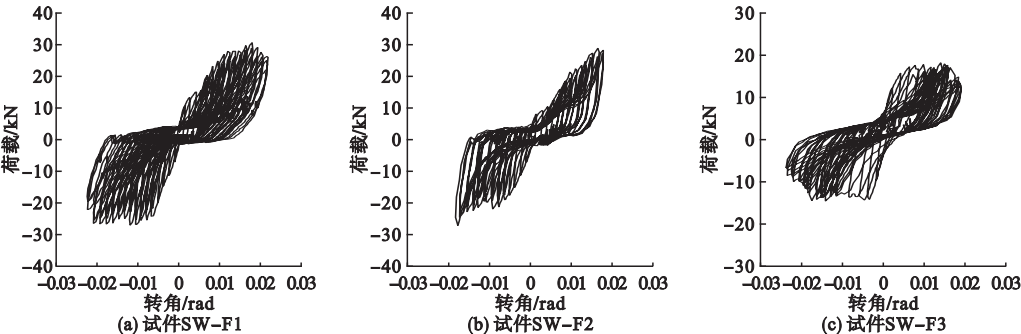


图11 试件荷载-转角滞回曲线

Fig. 11 Load-rotation hysteresis curves of specimen

壁破坏;②低周往复加载过程中,自攻螺钉挤压 FCP 覆面板而造成的孔壁破坏;③FCP 覆面板裂缝与板间接缝的张合引起。

3.3 荷载、转角、延性系数及能量耗散系数

按照文献[17]规定,采用荷载-位移骨架曲线的能量等效面积法确定屈服荷载  $P_y$ 、屈服位移  $\Delta_y$ ,具体方法见图 12,各试件的骨架曲线见图 13。

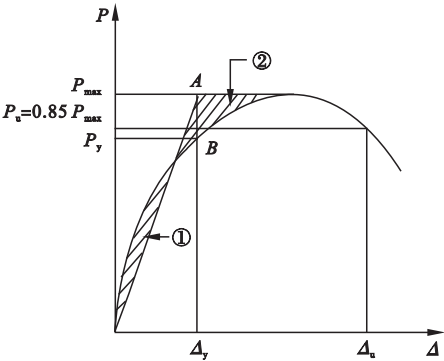


图 12 承载力特征值

Fig. 12 Characteristic values of bearing capacity

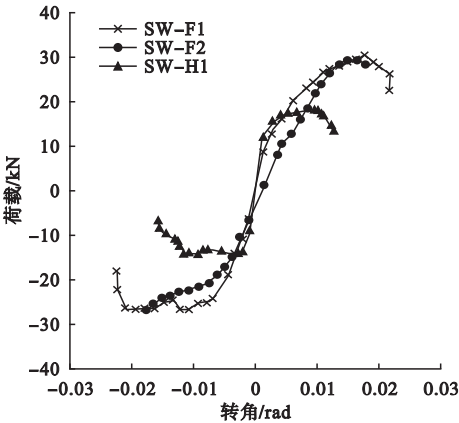


图 13 试件骨架曲线

Fig. 13 The skeleton curves of specimen

延性是指结构或构件破坏之前,在其承载力无显著降低的条件下经受非弹性变形的

能力,通常用位移延性系数和转角延性系数来表示.笔者采用转角延性系数来反映试件的延性.节点的层间位移角  $\theta$  由式(1)、式(2)计算得到:

$$\theta = \arctg(\Delta/H) \quad , \tag{1}$$

$$\mu_{\theta} = \theta_d/\theta_y. \tag{2}$$

式中: $\mu_{\theta}$  为结构的转角延性系数; $\theta_d$  为荷载下降段相应于破坏荷载的转角; $\theta_y$  为相应于屈服荷载的转角。

以能量耗散系数  $E$  来衡量试件的能量耗散能力,具体算法参照式(3)及图 14。

$$E = \frac{\text{滞回曲线包络线 } S_{\Delta ABC + \Delta CDA}}{\text{三角形面积}_{\Delta OBE + \Delta ODF}} \quad . \tag{3}$$

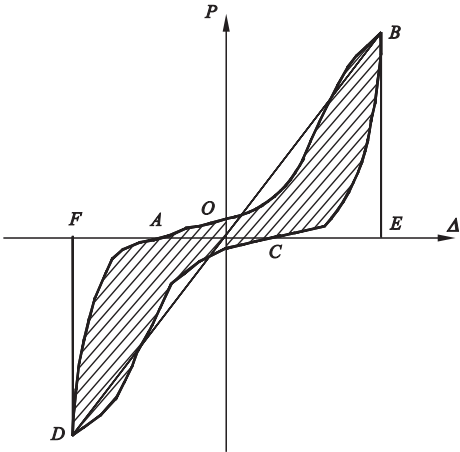


图 14 能量耗散系数计算

Fig. 14 Analysis of energy dissipation coefficient

在整个低周往复试验中有多个滞回环,本次试验的能量耗散系数  $E$ ,选取极限荷载  $P_{max}$  所在滞回环进行计算. FCP 复合外挂墙板耗能主要是通过钢龙骨与覆面板之间的相对变形。

根据上述内容,得到 FCP 复合外挂墙板各特征值结果见表 3。

表 3 试验结果  
Table 3 Test results

编号	屈服		极限		破坏		转角延性系数 $\mu_{\theta}$	能量耗散系数 $E$
	荷载 $P_y/\text{kN}$	转角 $\theta_y/\text{rad}$	荷载 $P_{max}/\text{kN}$	转角 $\theta_{max}/\text{rad}$	荷载 $P_u/\text{kN}$	转角 $\theta_u/\text{rad}$		
SW-F1	16.26	0.004 1	30.1	0.017 5	25.5	0.021 3	5.19	0.597
SW-F2	15.12	0.009 1	28.9	0.016 2	24.8	0.018 0	1.98	0.562
SW-H1	12.74	0.001 8	17.8	0.008 2	15.13	0.011 8	6.56	0.711



由表 3 可以看出:

(1)试件 SW - F1 比试件 SW - F2 屈服荷载高 7.5%,极限荷载高 4.2%,破坏荷载高 3%;二者的转角延性系数分别为 5.19 和 1.98,二者承载力指标接近,试件展示了较好的延性.

(2)SW - F1 的屈服荷载比 SW - H1 屈服荷载高 27.6%,极限荷载高 69.1%,破坏荷载高 68.5%;SW - F2 试件屈服荷载比 SW - H1 的屈服荷载高 18.6%,极限荷载高 62.4%,破坏荷载高 63.9%;SW - H1 的转角延性系数为 6.56,延性较好.

由以上对比分析可知,竖龙骨间距对试件承载力影响不大;窗洞口削弱了试件的侧向抗剪承载力.这是由于此类墙体的平面内抗剪承载力主要取决于 FCP 板与龙骨框架间自攻螺钉连接后产生的蒙皮效应.试验中设置 1 500 mm × 1 200 mm 的窗洞口,无 FCP 板承担侧向承载力,同时也削弱了 FCP 板对钢龙骨的蒙皮效应,因此其抗剪承载力较低.

3.4 抗剪刚度

在骨架曲线中,在位移不断增大的情况下,刚度不断减小,出现刚度退化现象.根据文献[18]规定,笔者将多遇地震作用下墙体的水平侧向弹性变形限值取为 1/300 层高,抗剪刚度为  $K_0 = \tan\theta = P_{300}/(1/300)$ ,各试件抗剪刚度结算结果见表 4.

表 4 各试件的抗剪刚度

Table 4 Shearing rigidity of wall panels

编号	$P_{300}/\text{kN}$	$\theta/\text{rad}$	抗剪刚度 $K_0$
SW - F1	14.7	0.003 33	4 414
SW - F2	8.07	0.003 33	2 423
SW - H1	16.4	0.003 33	4 925

4 结 论

(1)FCP 复合外墙板在层间位移角达到 1/250 时,墙体试件无破坏、开裂.在层间位移角达到 1/250 时,墙体与主体结构连接部

位完好;层间位移角达到 1/50 时,边框龙骨节点位置破坏,FCP 复合墙板试件没有从主体结构脱落.

(2)FCP 复合外墙板试件主要破坏模式:FCP 覆面板角部位置破坏,出现斜裂缝;覆面板与自攻螺钉连接失效,钉孔位置出现 FCP 板粉末,自攻螺钉被剪坏.两侧边框龙骨壁,在螺栓节点位置破坏,带窗洞口的试件沿洞口转角位置出现约 45°斜裂缝. FCP 覆面板或自攻螺钉的破坏都会导致覆面板对龙骨框架的蒙皮效应减弱,导致试件承载力降低.

(3)龙骨间距不同的试件各项荷载特征值接近.带窗洞口的试件承载力较小.由此可见,龙骨间距对试件侧向抗剪承载力影响不大;窗洞口尺寸直接削弱了试件的承载力.

(4)试件延性系数在 1.98 ~ 6.56,能量耗散系数在 0.56 ~ 0.71,并得到了试件的抗剪刚度,满足抗震使用要求.

(5)目前,由于 FCP 板生产工艺所限,FCP 板幅不能超过 2 500 mm × 1 250 mm,因此在复合墙体制作时,难免产生拼缝.纵向拼缝是复合墙体抗剪承载力的薄弱环节,建议不留或少设板间接缝.

参考文献

[ 1 ] RAFFAELE L. Shear behavior of connections between cold-formed steel profile sand wood or gypsum-based panels; an experimental investigation[ C]. St. Louis Missouri: American Society of Civil Engineers, 2006.

[ 2 ] 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 Zhuyan, et al. Experimental investigation on seismic behavior of S350 light-gauge composite framing walls [ J]. China civil engineering journal, 2012, 45(12): 83 - 90. )

[ 3 ] 周绪红,石宇,周天华,等. 冷弯薄壁型钢结构住宅组合墙体受剪性能研究[ J]. 建筑结构学报, 2006, 27(3): 42 - 47.

(ZHOU Xuhong, SHI Yu, ZHOU Tianhua, et al. Study on shear resistance of cold-formed steel stud walls in residential structures [ J].

- Journal of building structures, 2006, 27 (3): 42-47. )
- [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] DEMELIO G, GENOVESE K, PAPPALETERE C. An experimental investigation of static and fatigue behaviour of sandwich composite panels joined by fasteners [J]. Composites; part B engineering,2001,32 (4):299-308.
- [6] FULOP L A, DUBINA D. Performance of wall stud cold-formed shear panels under monotonic and cyclic loading Part I:experimental research [J]. Thin-walled structures, 2004, 42 (2): 321-338.
- [7] FULOP L A, DUBINA D. Performance of wall stud cold-formed shear panels under monotonic and cyclic loading Part II:numerical modeling and performance analysis [J]. Thin-walled structures,2004,42(2):339-349.
- [8] ZEYNALIAN M, RONAGH H R. Seismic performance of cold formed steel walls sheathed by fiber-cement board panels [J]. Journal of constructional steel research,2015,107:1-11.
- [9] GARA F, RAGNI L, ROIA D, et al. Experimental tests and numerical modelling of wall sandwich panels [J]. Engineering structures, 2012,37:193-204.
- [10] PAVESE A, BOURNAS D A. Experimental assessment of the seismic performance of a pre-fabricated concrete structural wall system [J]. Engineering structures,2011,33:2049-2062.
- [11] SERRETTE R L, ENCALADA J M. Static racking behavior of plywood OSB, gypsum and fiberboard walls with metal framing [J]. Journal of structural engineering, 1997, 123 (8): 1079-1086.
- [12] SERRETTE R L, LAM I, QI H. Cold-formed steel frame shear walls utilizing structural adhesives [J]. Journal of structural engineering, 2006,132 (4):591-599.
- [13] 孙晓林,苏幼坡,丁峰.纤维增强多层水泥板结构性能研究的试验方法[J].河北联合大学学报(自然科学版)2013,35(2):134-139.  
(SUN Xiaolin, SU Youpo, DING Feng. Fiber reinforced cement board structure properties of multilayer test method [J]. Journal of Hebei united university (natural science edition) 2013,35(2):134-139. )
- [14] 中国钢铁工业协会.金属材料-室温拉伸试验方法:GB/T 228—2002 [S].北京:中国标准出版社,2002.  
(China Iron and Steel Association. Metallic materials-tensile testing at ambient temperature:GB/T 228—2002 [S]. Beijing:Standards Press of China,2002. )
- [15] 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 University of Architecture and Technology,2008. )
- [16] KIM T W, WILCOSKI J, FOUTCH D A, et al. Shakable tests of a cold-formed steel shear panel [J]. Engineering structures,2006, 28(10):1462-1470.
- [17] 中国建筑科学研究院.建筑抗震试验方法规程:JGJ 101—1996 [S].北京:中国建筑工业出版社,1996.  
(China Academy of Building Research. Specification of testing methods for earthquake resistant building:JGJ 101—1996 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,1996. )
- [18] 中国建筑科学研究院.建筑抗震设计规范:GB50011—2001 [S].北京:中国建筑工业出版社,2001.  
(China Academy of Building Research. Code for seismic design of buildings:GB50011—2001 [S]. Beijing:China Architecture & Building Press,2001. )