

基于锁铆连接的冷弯薄壁型钢开洞组合墙体 抗震性能试验研究

闫维明, 赵锦成, 谢志强, 宋林琳

(北京工业大学工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京 100124)

摘要: 为研究基于锁铆连接的冷弯薄壁型钢开洞组合墙体的抗震性能, 对8面2.7 m×2.4 m(高×宽)足尺冷弯薄壁型钢组合墙体进行水平单调和低周往复加载试验, 分析加载方式、墙体开洞尺寸等因素对组合墙体的破坏特征以及抗剪承载力、刚度、延性、耗能等性能指标的影响规律。研究表明: 基于锁铆连接的开洞组合墙体在单调加载下的抗剪承载力高于低周往复加载的抗剪承载力, 但随着开洞尺寸的增大, 加载方式对抗剪承载力的影响减弱; 墙体的破坏主要发生在试件的角部以及开洞口两侧; 墙体的延性系数为1.67~3.36; 耗能系数为0.60~0.73; 随着墙体洞口尺寸的增加, 延性增加, 墙体刚度和承载力降低。

关键词: 锁铆连接; 冷弯薄壁型钢; 开洞组合墙体; 抗震性能

中图分类号: TU 392.1

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2019)08-0754-09

doi: 10.11936/bjutxb2018020013

Experimental Study of Seismic Behavior of Cold-formed Thin-walled Steel Shear Walls Using Self-piercing Rivets With Openings

YAN Weiming, ZHAO Jincheng, XIE Zhiqiang, SONG Linlin

(Beijing Key Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing University of Technology, Beijing 100024, China)

Abstract: To study the seismic behavior of the cold-formed thin-walled steel shear walls of using self-piercing rivets with openings, 8 full scale of 3 m×2.4 m (height by width) specimens were tested under monotonic loading and cyclic loading, respectively. Factors that influence the seismic behavior of cold-formed steel stud walls including loading pattern and opening ratio were studied, and the failure mechanism bearing capacity stiffness ductility and energy dissipation coefficient of specimens were obtained. Results show the shear resistance of the cold-formed thin-walled steel shear walls of using self-piercing rivets with openings under monotonic loading is higher than that of the low-cycle reciprocating loading. However, with increasing the size of the hole, the influence of the loading method of the shear resistance is weakened. The damage of the wall specimen mainly occurs at the corner of the wall and both sides of the opening. The ductility coefficient of the wall is between 1.67 and 3.36; the coefficient of energy dissipation is between 0.60-0.73. With increasing the wall hole size, the ductility increases, and the wall lateral stiffness and the bearing capacity decrease.

Key words: self-piercing rivet connection; cold-formed thin-walled steel; composite wall with openings; seismic behavior

收稿日期: 2018-02-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678008)

作者简介: 闫维明(1960—), 男, 教授, 主要从事结构抗震和防灾减灾方面的研究, E-mail: yanwm@bjut.edu.cn

冷弯薄壁型钢结构具有轻质高强、工业化程度高、综合技术经济指标好等优点,“十三五”期间,国家明确提出建筑产业化,大力发展装配式建筑^[1]。

谢志强等^[2]、闫维明等^[3]首次将锁铆连接技术引入到冷弯薄壁型钢结构体系,利用锁铆技术实现组合墙体的模块化、工业化、机械化生产。刘斌等^[4]通过抗震性能试验分析墙体的受力过程和破坏形态,研究表明连续喷涂保温材料可以提高墙体的整体性。赵洋等^[5]研究面板开孔以及开孔方式对墙体破坏形式和性能的影响,研究发现开孔可以提高墙体的延性但是降低墙体承载力。贾蓬春等^[6]研究重力荷载下组合墙的抗震性能,研究表明在重力荷载下,墙体抗剪强度并未降低,立柱更容易出现屈曲破坏。石宇等^[7]通过试验研究得出墙体承载力从高到低为 CSB 板、OSB 板、GWB 板。苏明周等^[8]对冷弯薄壁型钢组合墙体进行低周往复加载试验,研究表明组合墙体具有较好的耗能能力,双柱墙体的承载力明显高于单柱墙体。关于承载力计算方法,美国规范 AISI S400-15-C^[9]采用 Sugiyama 等^[10]给出的公式计算开洞组合墙体的承载力。袁朝庆等^[11]将钢管约束混凝土柱的理论引用于开洞双钢板组合剪力墙,分析得出约束型墙体能提高墙体的耗能能力。

目前国内部分规范、规程对冷弯型钢结构的设计及施工做了一定的标准要求,但我国的轻钢结构技术水平比较低级^[1]。相关研究大多采用自攻螺钉和自攻自钻螺钉作为型钢构件的连接方式,连接方式单一且操作过程复杂,不利于实现模块化、流水线生产。为此在谢志强等^[2]研究基础上,本文进一步研究锁铆连接技术在开洞组合墙体中的应用可行

性,对 8 面足尺锁铆连接冷弯薄壁型钢开洞墙体进行试验研究,从承载力、刚度、延性和耗能等指标分析墙体的抗震性能,以期为我国轻钢结构的发展提供一定的理论依据。

1 试验概况

1.1 试件设计

为了研究锁铆连接冷弯薄壁型钢开洞组合墙体的抗震性能,本次试验设计 4 类墙体,共 8 个试件,分为 4 组。墙体按构造方式不同,分为不开洞组合墙体和开洞组合墙体。按照试验加载方式不同分为水平单调加载组合墙体和低周往复加载组合墙体。墙体分组及编号见表 1,编号中 O 表示墙体不开洞, H 表示墙体开洞, P 表示墙体附平钢板, S 表示锁铆连接, M 表示水平单调加载方式, C 表示低周往复加载方式,“150”表示墙体四周铆钉间距为 150 mm,“-1”“-2”表示墙体序号。所有墙体试件尺寸为 2.7 m × 2.4 m (高 × 宽),所有墙体试件的墙架立柱选用规格为 C140 mm × 40 mm × 12 mm × 1.5 mm 的 C 型冷弯薄壁型钢,间距 600 mm;顶梁、底梁由 2 根锁铆连接的背靠背 U 型冷弯薄壁型钢组成,规格为 U143 mm × 42 mm × 1.5 mm,铆钉间距为 300 mm。墙体框架均采用锁铆连接。墙面板选用厚度为 0.80 mm 的平钢板,覆盖宽度 1 200 mm。通过锁铆连接,将墙面板与墙体边立柱、上导轨、下导轨相连。连接墙面板和墙体龙骨的铆钉在墙体周边的间距为 150 mm,内部间距为 300 mm。墙体龙骨间采用长度 $h = 6$ mm 的铆钉连接,墙面板与墙体龙骨间采用长度 $h = 4.5$ mm 的铆钉连接,所有的铆钉直径 $d = 5.3$ mm,钉头宽 $b = 7.6$ mm。墙体的下端角部设有抗拔连接

表 1 组合墙体试件参数

Table 1 Parameteres of composite wall

序号	试件分组	试件编号	开洞尺寸/mm	加载方式
WA1	第 1 组	OPS-M150	不开洞	单调加载
WA2		OPS-C150	不开洞	低周往复加载
WB1	第 2 组	HPS-M150	600 mm × 600 mm	单调加载
WB2		HPS-C150	600 mm × 600 mm	低周往复加载
WC1	第 3 组	HPS-M150-1	1 200 mm × 1 200 mm	单调加载
WC2		HPS-C150-1	1 200 mm × 1 200 mm	低周往复加载
WD1	第 4 组	HPS-M150-2	1 200 mm × 2 100 mm	单调加载
WD2		HPS-C150-2	1 200 mm × 2 100 mm	低周往复加载

件,用 M16 抗拔螺栓连接,顶梁和底梁与试验装置间采用 M12 的固定螺栓。墙体的详细构造和尺寸见图 1~4。经材性试验确定面板屈服强度 $f_y = 287$ MPa,弹性模量 $E = 167$ GPa,抗拉强度 $f_u = 356$ MPa,伸长率 $\delta = 31.37\%$;立柱屈服强度 $f_y = 328$ MPa,弹性模量 $E = 162$ GPa,抗拉强度 $f_u = 356$ MPa,伸长率 $\delta = 14.53\%$ 。

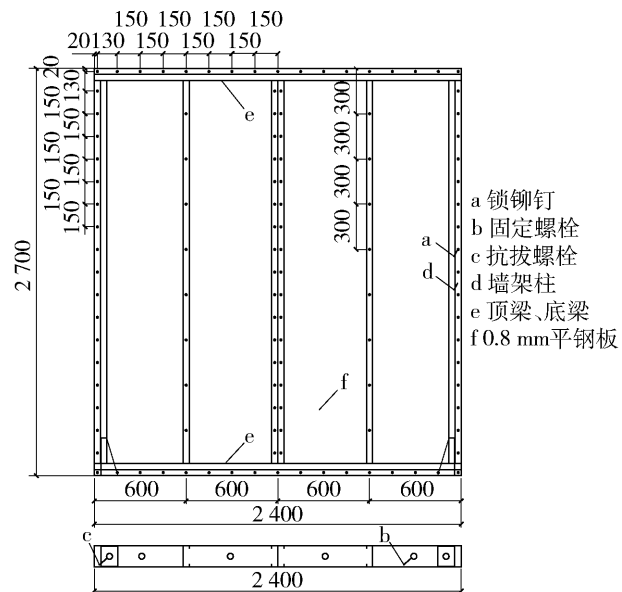


图1 WA1、WA2 试件构造

Fig. 1 Configuration of specimens WA1 and WA2

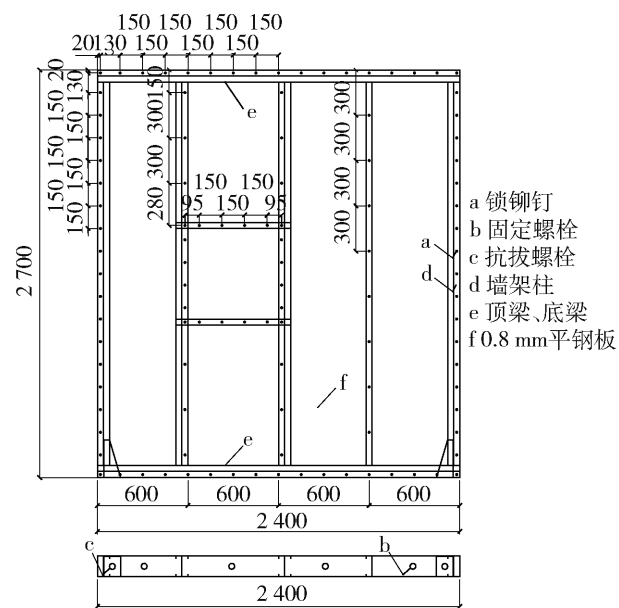


图2 WB1、WB2 试件构造

Fig. 2 Configuration of specimens WB1 and WB2

1.2 试验装置及加载制度

所有墙体试验均先施加恒定竖向荷载,待稳

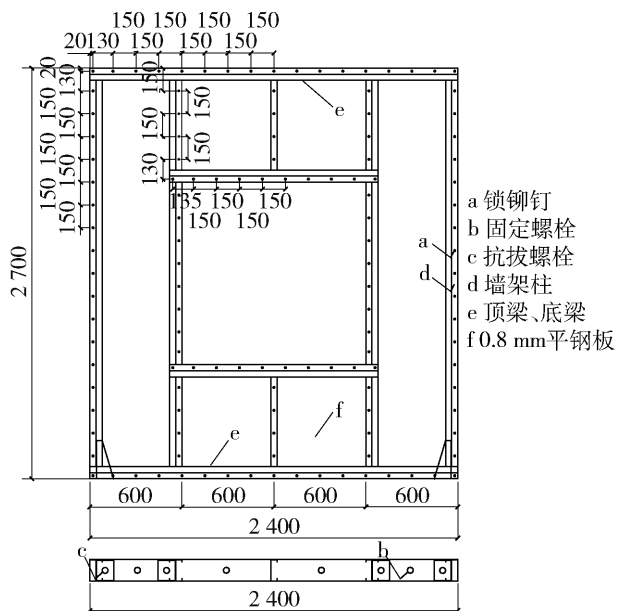


图3 WC1、WC2 试件构造

Fig. 3 Configuration of specimens WC1 and WC2

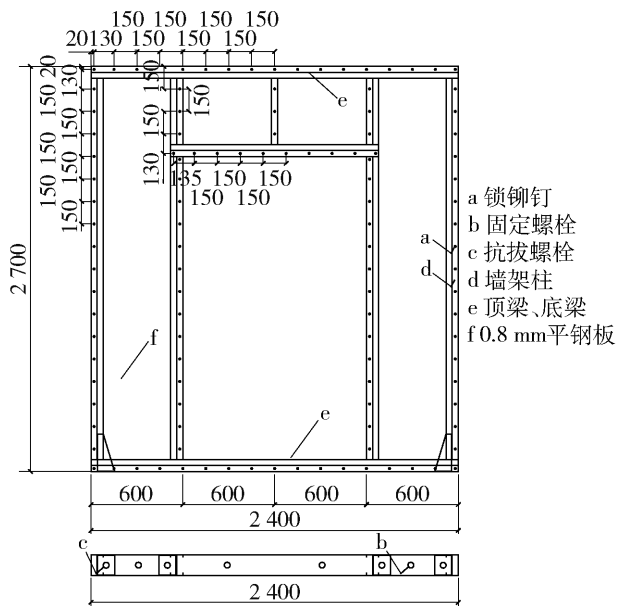


图4 WD1、WD2 试件构造

Fig. 4 Configuration of specimens WD1 and WD2

定后施加水平荷载,竖向力大小如表 1 所示。对于水平单调加载试件,以每级 1 kN 的荷载级差递增加载,前 20 kN 每级持续 1 min,之后每级荷载持续约 2 min,直至墙体破坏。根据单调加载试验结果,近似确定低周往复加载试件的屈服位移 Δ_y 。在墙体屈服前采用荷载控制加载,分 4 级单循环加载至屈服荷载 P_y ;墙体屈服后以每级 4 mm 级差递增循环 2 周加载,直至墙体破坏,试验

装置见图 5.

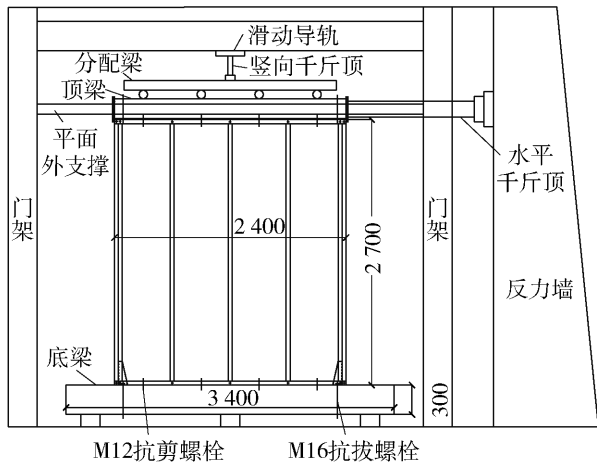


图 5 试验加载装置

Fig. 5 Test set-up

1.3 测点布置

为了测试到组合墙体试件的净剪切变形值,共布置 8 个位移计. 其中 D_1 、 D_2 布置在试件左上角,分别测试加载顶梁和试件顶部的位移值, D_1 固定在顶梁端部, D_2 固定在边立柱顶部; D_3 、 D_4 分别测试水平方向试件与加载底座间的滑动位移值, D_3 固定在边立柱下部, 距下导轨约 10 cm, D_4 固定在底梁端部; D_5 、 D_6 分别测试垂直方向试件相对底座的位移值, D_7 、 D_8 分别测试垂直方向底梁相对地面的位移值, D_5 、 D_6 距底导轨约 25 cm, D_7 、 D_8 距底导轨约 20 cm. 此外, 在组合墙体上还布置 5 个电阻应变片, 其中 2 个布置在墙体两侧边立柱中部腹板上, 以测试边立柱的拉压力变化情况和面板的受力情况, 测点布置详见图 6.

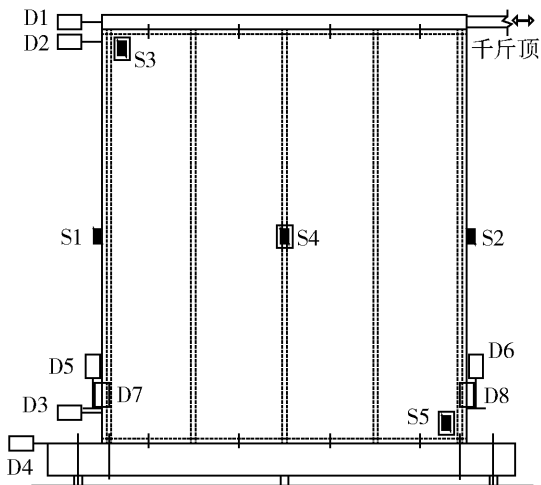


图 6 位移计和应变片布置

Fig. 6 Arrangement of displacement meters and strain gauges

2 试验现象及破坏模式

本次试验中, 墙体试件的破坏模式主要有以下 2 种: 1) 锁铆连接的破坏. 2) 面板屈曲破坏. 破坏机理为加载过程中铆钉头挤压撕裂钉孔, 锁铆连接的内锁机构抗拉剪能力大于面板孔壁承压能力时, 铆钉头脱离面板. 面板的平面外刚度较小, 加载过程中出现屈曲波纹, 沿墙体对角方向形成受拉带, 为墙体提供抗剪力.

4 组不同类型试件的受力特性和破坏特征分述如下:

1) 不开洞墙体 WA1、WA2

当水平位移加载至 8 mm (接近屈服位移) 时, 面板孔壁处承压开始发生较小的塑性变形, 面板出现 5 条屈曲波纹, 主屈曲波纹沿墙体对角线方向; 当水平位移加载至 24 mm (接近峰值位移) 时, 墙体角部边缘的锁铆连接发生局部铆钉头拉脱面板的承压破坏; 当水平位移加载至 36 mm (接近破坏位移) 时, 墙体下端角部的锁铆连接失效, 具体表现为铆钉头拉出面板. 面板接缝处和上、下导轨处的锁铆连接也发生严重的承压破坏. 不开洞墙体试件 WA1 与 WA2 的总体破坏特征基本相同. 循环荷载作用下, WA2 墙体破坏特征更加明显, WA1 试件仅受拉侧墙体底部的锁铆连接失效.

2) 开洞墙体 WB1、WB2

加载过程中, 面板出现鼓曲, 随着往复加载的交替进行, 鼓曲波纹沿 2 对角线交替转换. 当水平位移加载至 10 mm (接近屈服位移) 时, 墙体面板主要呈现 5 条主屈曲波纹, 墙体对角沿线处铆钉挤压钉孔, 发生较小塑性变形; 当水平位移加载至 26 mm (接近峰值位移) 时, 墙体角部和洞口四周发生较大承压破坏, 其中洞口角部主波纹沿线的铆钉头即将拉脱面板; 当水平位移加载至 34 mm (接近破坏荷载) 时, 墙体两侧角部和中间接缝处下部锁铆连接失效, 开洞口处大部分锁铆钉头拉脱面板, 墙体右侧立柱和洞口两侧立柱屈曲变形. 墙体 WB1 与 WB2 的总体破坏特征基本相同. WB2 受循环荷载作用破坏特征更加明显, WB1 破坏主要表现为墙体斜对角主鼓曲波纹沿线锁铆连接的失效.

3) 开洞墙体 WC1、WC2

墙体加载过程中, 鼓曲主要出现在对角沿线, 分布在开洞口两侧, 随着往复加载的进行, 波纹呈现中心对称. 当水平位移加载至 16 mm (接近屈服位移) 时, 墙体洞口角部和两侧铆钉受力较大, 面板孔壁受

铆钉头的挤压开始发生较小塑性变形;当水平位移加载至 26 mm(接近峰值位移)时,墙体角部铆钉孔受钉头挤压扩张;当水平位移加载至 45 mm(接近破坏位移)时,墙体角部、洞口角部以及洞口两侧的锁铆连接失效,具体表现为铆钉头拉脱面板;洞口两侧立柱屈曲变形. 循环荷载作用下,WC2 墙体破坏特征更加明显,WC1 破坏主要表现为墙体斜对角主鼓曲波纹沿线锁铆连接的失效,墙体试件 WC1 与 WC2 的总体破坏特征基本相同.

4) 开洞墙体 WD1、WD2

开洞 1 200 mm × 2 100 mm 试件 WD1 与 WD2 由于洞口尺寸较大,试件的承载力和刚度较无洞墙体下降幅度较大,加载过程中产生较大位移. 墙体破坏主要表现在开门洞口两侧、墙体两侧的下部以及

面板与底导轨连接处,洞口上部面板受力不明显. 加载过程中,洞口两侧面板出现 2 条主鼓曲波纹,当水平位移加载至 14 mm(接近屈服位移)时,墙体右下角和洞口两侧铆钉发生轻微塑性变形;当水平位移加载至 26 mm(接近峰值位移)时,洞口两侧的锁铆连接发生承压破坏,铆钉头即将被拉脱面板,洞口上部两角处尤为严重;当水平位移加载至 35 mm(接近破坏位移)时,墙体两侧下部、洞口两侧以及面板与底导轨连接处锁铆连接破坏严重,大部分铆钉头被拉脱面板,立柱受力变形. 单调加载的试件 WD1 与试件 WD2 相比,破坏主要表现在洞口左侧、墙体右侧中下部以及面板与底导轨连接处. 试件典型的破坏照片见图 7.

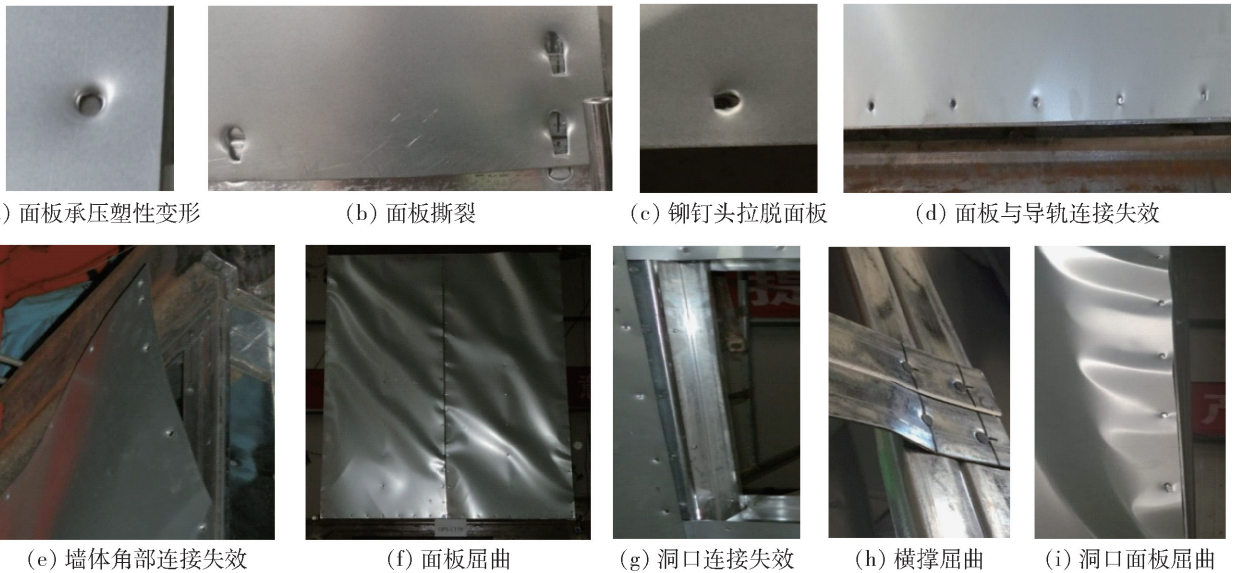


图 7 试件典型破坏照片

Fig. 7 Typical failure mode

3 试验结果

3.1 组合墙体的荷载-位移($P-\Delta$)曲线

试验加载过程中,墙体相对加载装置产生的滑移以及自身平面内发生转动均会产生额外的水平位移,所以在计算墙体实际位移时要扣除这 2 项干扰,见图 8. 因此墙体的实际剪切变形为

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

式中: δ_0 为 d_1 、 d_2 的平均值, $\delta_0 = (H \times d_2 / (H - A) + d_1) / 2$, H 表示墙体高度, A 表示位移计 D_1 、 D_2 间的垂直距离; δ_1 为试件与底座间的相对滑动位移值,即 d_3 和 d_4 的差值; δ_φ 为墙体转动引起的顶部位移,见图

9, $\delta_\varphi = H \times \delta_\alpha / (L + B + C)$, L 为墙体宽度, B 、 C 分别代表位移计 D_5 、 D_6 距墙体端部的距离, $\delta_\alpha = (d_6 - d_8) - (d_5 - d_7)$. 其中 d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 、 d_5 、 d_6 、 d_7 、 d_8 分别表示 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 、 D_5 、 D_6 、 D_7 、 D_8 测得的位移.

根据式(1)得出墙体实际剪切变形值 Δ ,从而得出单调加载下墙体荷载-位移曲线,见图 10,低周往复加载下墙体荷载-位移曲线见图 11,骨架曲线见图 12.

从图 11 试件的滞回曲线看出:加载初期试件处于弹性阶段,加载与卸载曲线基本重合;随着荷载增大,试件逐步进入弹塑性阶段,滞回曲线呈梭形,卸载至零时出现残余变形,刚度退化;随着荷载进一步

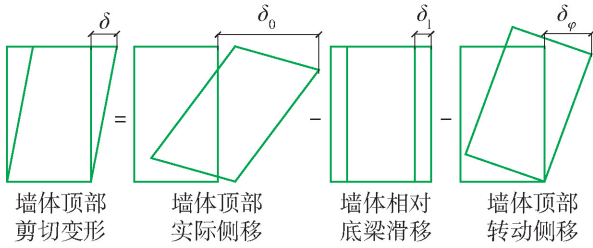


图 8 试件实际剪切变形

Fig. 8 Actual shear deformation of specimens

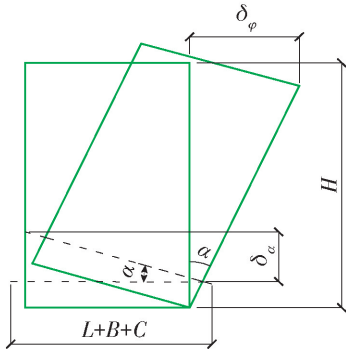


图 9 试件转动位移

Fig. 9 Rigid body rotation

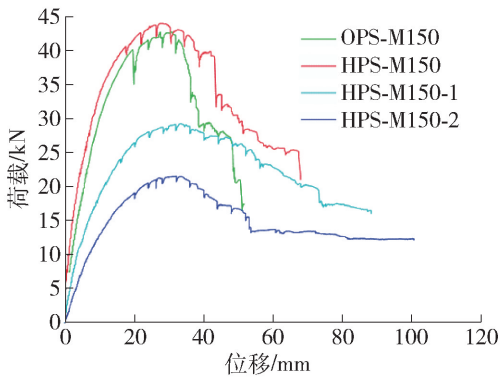
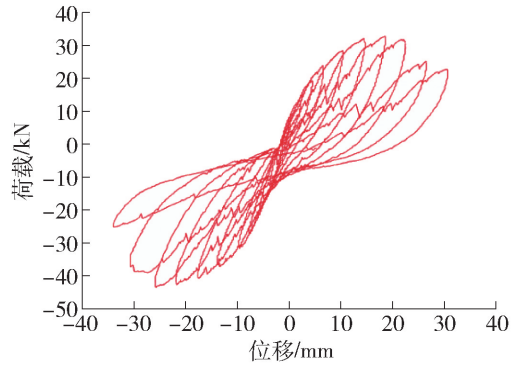


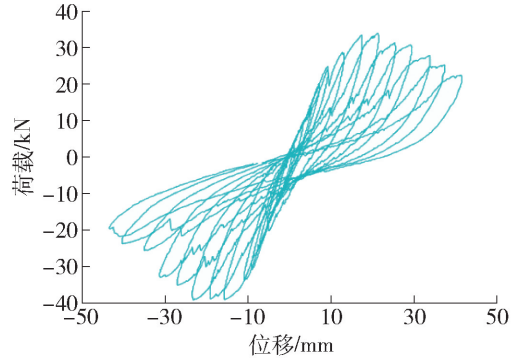
图 10 单调加载下墙体试件的荷载-位移曲线

Fig. 10 Load-deformation curves of monotonic loading tests

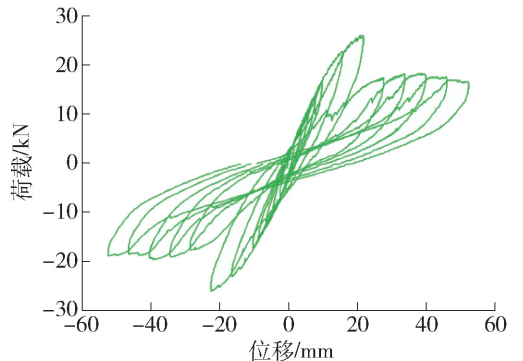
增大, 滞回曲线向弓形发展, 滞回环面积增大, 曲线出现“捏拢”现象; 试件屈服后, 滞回环面积更加饱满, 滞回曲线由弓形向反 S 形发展, 此时由于铆钉的倾斜以及撕裂面板产生的滑移, 曲线“捏拢”现象更加明显; 达到最大荷载后, 滞回曲线由反 S 形向 Z 形发展, 试件的刚度和强度退化明显. 在同级加载位移下, 随着加载循环次数的增加, 承载力降低, 滞回环面积减小.



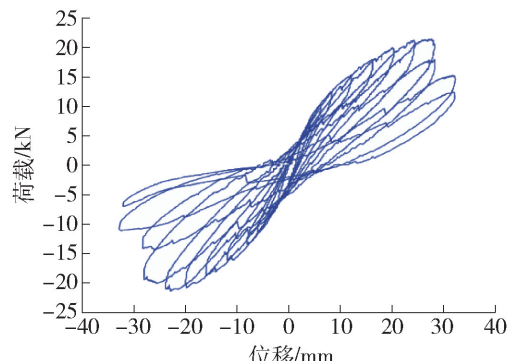
(a) WA2墙体



(b) WB2墙体



(c) WC2墙体



(d) WD2墙体

图 11 试件的荷载-位移滞回曲线

Fig. 11 Load-deformation hysteresis curves

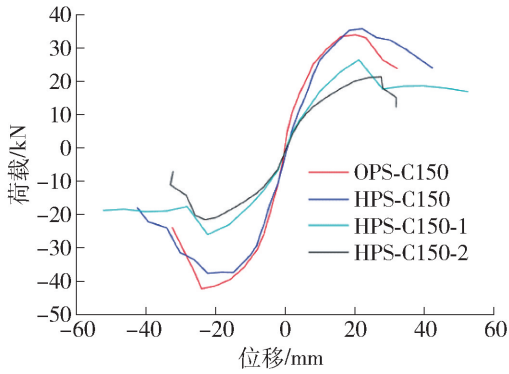


图 12 墙体试件的骨架曲线

Fig. 12 Skeleton curves of specimens

3.2 试验结果

根据《建筑抗震试验规程》^[12]的建议方法,按照等效面积法求出试件的屈服荷载 P_y 和屈服位移 Δ_y ; 将荷载-位移 ($P-\Delta$) 曲线上的荷载最大值和相应位移作为最大荷载 P_m 及变形 Δ_m ; 随位移增加而荷载降至最大荷载的 80% 时的荷载和相应位移作为破坏荷载 P_u 和破坏位移 Δ_u . 根据 GB50011—2001《建筑抗震设计规范》规定, 钢结构最大弹性层间变形角限值为 $1/300$ rad, 本文整理了墙体剪切变形为 $H/300$ (Δ_{300}) 时对应的水平荷载 P_{300} 以及破坏荷载处层间位移角 γ_c , 单位长度墙体的抗剪刚度 $K_0 = P_{300}/(1/300)$, 各试件主要试验结果见表 2.

表 2 组合墙体试件试验结果

Table 2 Test results of specimens

试件 编号	P_y / kN	Δ_y / mm	P_m / kN	Δ_m / mm	P_u / kN	Δ_u / mm	延性 系数	P_{300} / kN	γ_c / rad	抗剪承载力/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	抗剪刚度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	耗能 系数
WA1	35.42	13.95	42.82	30.98	34.29	36.34	2.61	12.07	0.013	17.84	3 620	
WA2	27.93	10.51	33.99	20.25	27.19	27.36	2.60	10.91	0.011	14.16	3 271	0.6
WB1	37.02	12.94	44.08	29.19	35.26	43.44	3.36	13.31	0.016	18.37	3 994	
WB2	29.46	12.8	35.8	22.25	28.64	35.45	2.77	10.55	0.013	14.92	3 164	0.69
WC1	25.38	17.92	29.29	33.79	23.43	56.38	3.15	7.41	0.021	12.21	2 221	
WC2	22.15	15.26	26.47	21.28	21.18	25.41	1.67	6.41	0.009	11.03	1 921	0.73
WD1	18.45	18.4	21.64	32.22	17.31	46.56	2.53	5.06	0.017	9.02	1 518	
WD2	17.56	15.6	21.39	27.68	17.11	29.34	1.88	5.18	0.011	8.91	1 551	0.72

3.3 有限元模拟和试验结果对比分析

通过 ABAQUS 软件对试件进行模拟分析, 得到试件荷载-位移 ($P-\Delta$) 曲线, 与试验曲线对比分析见图 13. 模拟和试验曲线的初始刚度和下降段部分吻合较好, 峰值荷载的差值为 4.15% ~ 8.64%, 表明试验和有限元分析结果准确、可信.

3.4 主要试验结果对比分析

1) 分析上述数据得出, 基于锁铆连接的不同构造组合墙体的屈服荷载、最大荷载以及破坏荷载受加载方式影响的程度非常接近. WA 组试件的屈服荷载、最大荷载以及破坏荷载在低周往复加载下相比单调加载均降低 26% 左右, WB 组试件降低 23%, WC 组试件降低 11%, WD 组试件降低 2%.

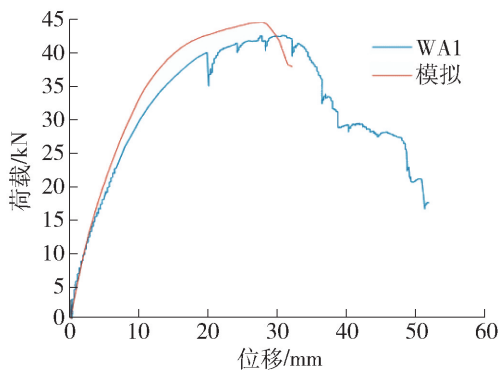
2) 墙体 WB1、WC1、WD1 的开洞率分别为 5.55%、22.20%、38.90%. 相比不开洞墙体 WA1, WB1 墙体的抗剪承载力提高 2.90%, WC1 墙体的抗剪承载力降低 31.56%, WD1 墙体的抗剪承载力

降低 49.44%. 随着开洞尺寸的增大, 墙体的抗剪承载力总体呈下降趋势. 对于 WB1 墙体, 其抗剪承载力比不开洞墙体略微提高是因为 WB1 墙体开洞尺寸较小, 墙体龙骨构造中相比 WA1 墙体增加了横撑和一根背靠背立柱, 双柱相比单柱能显著提高墙体的抗剪承载力^[8].

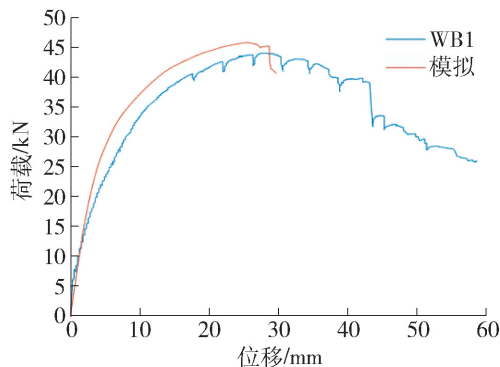
3) 随洞口尺寸的增大, 墙体的延性先增大后减小, 抗剪刚度逐渐降低. 相比单调加载, 在低周往复加载下, 试件的延性和抗剪刚度均降低.

4) 与高宛成等^[13]、李元齐等^[14]、熊智刚等^[15]研究结果对比分析得出: 基于锁铆连接的组合墙体相比自攻螺钉连接, 墙体的屈服荷载、峰值荷载和破坏荷载均有所提升, 墙体的延性略微降低, 但非常接近.

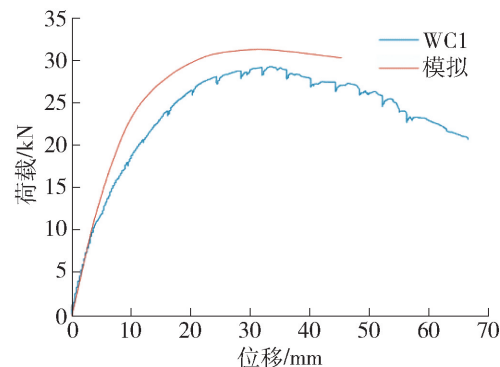
综上所述, 加载方式和开洞尺寸对锁铆连接冷弯薄壁型钢组合墙的抗震性能有显著的影响. 相比于单调加载, 低周往复加载后组合墙的承载力、刚度



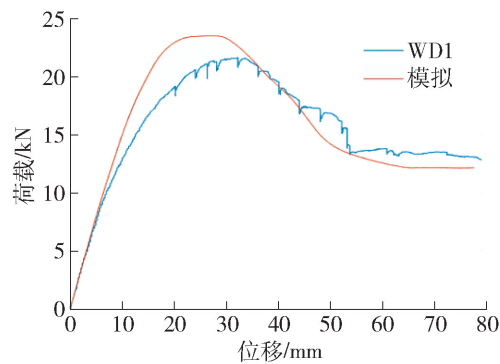
(a) WA1试件模拟和试验曲线对比



(b) WB1试件模拟和试验曲线对比



(c) WC1试件模拟和试验曲线对比



(d) WD1试件模拟和试验曲线对比

图13 试件的荷载-位移($P-\Delta$)曲线

Fig. 13 Load-deformation curves of test piece

4 结论

1) 墙体开洞尺寸对锁铆连接冷型钢组合墙的抗震性能有较大的影响,随开洞率的增大,组合墙抗剪刚度逐渐下降,承载力和延性先增加后降低。

2) 冷弯薄壁型钢组合墙的承载能力主要来自面板和龙骨的蒙皮效应,随着锁铆连接的失效,蒙皮效应减弱,墙体承载能力迅速下降。

3) 不同的加载方式影响组合墙体的抗剪承载力。单调加载下组合墙体的抗剪承载力高于低周往复加载下墙体的抗剪承载力,但随着开洞尺寸的增大,加载方式产生的影响减弱。

4) 开洞能够提高墙体的耗能能力,但随开洞尺寸的增大,耗能能力呈现降低趋势。

5) 冷弯薄壁型钢组合墙的破坏主要表现为墙体的角部、洞口两侧和面板接缝处锁铆连接失效。建议在实际工程应用中减少面板接缝并加强主要破坏部位的连接。

参考文献:

- [1] 张兴师, 田雨泽. 轻钢结构的发展现状[J]. 江西建材, 2016(15): 15.
ZHANG X S, TIAN Y Z. The development of light steel structure[J]. Jiangxi Building Materials, 2016(15): 15. (in Chinese)
- [2] 谢志强, 闫维明, 慕婷婷, 等. 锁铆连接在模块化装配式冷弯薄壁型钢结构中应用可行性研究[J]. 北京工业大学学报, 2017, 44(1): 104-111.
XIE Z Q, YAN W M, MU T T, et al. Feasibility research on self-piercing rivet connections used in structure prefabricated modularly with cold-formed thin-walled steel [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 44(1): 104-111. (in Chinese)
- [3] 闫维明, 谢志强, 宋林琳, 等. 冷弯薄壁型钢结构多颗锁铆连接受剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(10): 131-138.
YAN W M, XIE Z Q, SONG L L, et al. Experimental investigation on shear behavior of multiple self-piercing rivet connections for cold-formed thin-walled steel structures[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(10): 131-138. (in Chinese)
- [4] 刘斌, 郝际平, 钟炜辉, 等. 喷涂保温材料冷弯薄壁型钢组合墙体抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(1): 85-92.
LIU B, HAO J P, ZHONG W H, et al. Experimental research on seismic behavior of cold-formed thin-wall steel

及延性均下降;随开洞率的增大,墙体的抗剪承载力、延性先增大后减小,刚度则不断下降。

- framing walls with sprayed thermal insulation material[J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 35(1): 85-92. (in Chinese)
- [5] 赵洋, 闫维明, 虞诚. 压型钢面板的冷弯薄壁型钢开孔组合墙抗剪性能试验研究[J]. *工程抗震与加固改造*, 2012, 34(6): 87-92.
ZHAO Y, YAN W M, YU C. Experimental study on shear resistance of cold-formed steel framed shear wall assemblies with tapping corrugated sheet steel sheathing [J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2012, 34(6): 87-92. (in Chinese)
- [6] 贾蓬春, 闫维明, 虞诚. 考虑重力荷载的冷弯薄壁型钢组合墙抗震性能研究[J]. *工业建筑*, 2017, 47(5): 137-143.
JIA P C, YAN W M, YU C. Research on the seismic behavior of cold-formed steel shear wall subjected to gravity loading[J]. *Industrial Construction*, 2017, 47(5): 137-143. (in Chinese)
- [7] 石宇, 周绪红, 聂少锋, 等. 冷弯薄壁型钢组合墙体的抗震性能研究[J]. *土木工程学报*, 2010, 43(增刊1): 124-129.
SHI Y, ZHOU X H, NIE S F, et al. Research on the seismic performance of cold -formed steel stud wall[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43 (Suppl 1): 124-129. (in Chinese)
- [8] 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 M Z, HUANG Z G, SUN J, 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. (in Chinese)
- [9] American Iron and Steel Institute. AISI S400-15-C North American standard for seismic design of cold-formed steel structural systems [S]. Washington DC: American Iron and Steel Institute, 2015.
- [10] SUGIYAMA H, MATSUMOTO T. Empirical equations for the estimation of racking strength of a plywood-sheathed shear wall with openings [C] // *Summaries of Technical Papers of the Annual Meeting*. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 1994.
- [11] 袁朝庆, 王义荧, 郝旭东, 等. 约束型开洞双钢板混凝土组合剪力墙的滞回性能[J]. *黑龙江科技大学学报*, 2017, 27(5): 520-525.
YUAN C Q, WANG Y Y, HAO X D, et al. Analysis on hysteretic behavior of tubed concrete-filled double skin composite shear wall with opening [J]. *Journal of Heilongjiang University of Science & Technology*, 2017, 27(5): 520-525. (in Chinese)
- [12] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 16-18.
- [13] 高宛成, 肖岩. 冷弯薄壁型钢组合墙体受剪性能研究综述[J]. *建筑结构学报*, 2014, 35(4): 30-40.
GAO W C, XIAO Y. Literature review of shear performance of cold-formed thin-walled steel composite walls[J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 35(4): 30-40. (in Chinese)
- [14] 李元齐, 马荣奎, 何慧文. 冷弯薄壁型钢与覆面钢板自攻螺钉连接性能试验研究[J]. *建筑钢结构进展*, 2017, 19(6): 60-64.
LI Y Q, MA R K, HE H W. Experimental study on behavior of screw connections for cold-formed thin-walled steel studs and steel sheathings [J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2017, 19(6): 60-64. (in Chinese)
- [15] 熊智刚. 冷弯薄壁型钢结构住宅开洞组合墙体抗剪性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2008: 19-24.
XIONG Z G. Study on the behavior of cold-formed steel framing shear walls with openings in residential structures [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008: 19-24. (in Chinese)

(责任编辑 郑筱梅)