

严寒地区开孔龙骨复合墙体受弯性能试验

李健辉^{1,2},王英豪²,魏顺利¹,敖 斌³,杨志坚¹

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 国网内蒙古东部电力有限公司,内蒙古 呼和浩特 001020;3. 安徽华电工程咨询设计有限公司,安徽 合肥 230022)

摘要 目的 研究龙骨腹板开孔对龙骨复合墙体在风荷载作用下抗弯性能的影响,为其在我国严寒地区使用时提供设计参考。方法 以龙骨厚度、龙骨腹板高度、龙骨腹板开孔排数及开孔长度为参数设计了8个试件,采用多点重物加载法对其进行抗弯性能试验,分析墙体的承载能力及破坏形态。结果 分析得到各试件极限承载力,荷载-挠度曲线及典型试件的变形曲线。在研究范围内,增加开孔排数及开孔长度对开孔龙骨复合墙体承载力最大降低达35%、28.31%;增加龙骨厚度及龙骨腹板高度对其极限承载力最大提高达141%、52.45%。结论 在正常使用荷载下,笔者设计墙体可以满足在我国严寒地区使用要求。

关键词 开孔龙骨复合墙体;堆载法;抗弯性能;破坏形态;极限承载力

中图分类号 TU352.59 文献标志码 A

Experiment on Bending Behavior of Slotted Light Steel-Framed Composite Wall in Cold Areas

LI Jianhui^{1,2}, WNAG Yinghao², WEI Shunli¹, AO Bin³, YANG Zhijian¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. State Grid East Inner Mongolia Electric Power Supply Co. Ltd., Hohhot, China, 010020; 3. Anhui Huadian Engineering Consultation & Design Co. Ltd., Hefei, China, 230022)

Abstract: In order to study the influence of the web-perforated on the flexural performance of slotted light steel-framed composite wall under wind load, so as to provide a design reference for its use in cold regions of China. Eight specimens are designed with parameters of stud metal thickness, web height, rows of slots, and the length of slots. and the flexural performance test is carried out on the multi-point weight loading method to analyze the bearing capacity and failure mode of the wall. The ultimate bearing capacity of each specimen is obtained by analysis force, load-deflection curve and deformation curve of typical specimens. In the research range, increasing the rows of slots, and the length of slots will weaken the bearing capacity by 35% and 28.31%. Increasing the stud metal thickness and web height will increase the bearing capacity by 141% and

收稿日期:2020-03-20

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0703807)

作者简介:李健辉(1981—),男,高级工程师,主要从事电网工程设计管理等方面研究。

52.45% at the maximum. Under normal using load defined in this article, the author designed walls can meet the requirements for using in cold area of China.

Key words: slotted light steel-framed composite wall; heap loading method; bending behavior; failure mode; ultimate bearing capacity

随着建筑工业化技术的发展,新一代智能变电站主张采用模块化建设理念,即标准化设计、模块化组合等提高变电站的建设效率。建设过程中多采用装配式围墙、装配式防火墙作为外围护结构。开孔龙骨复合墙体因其具有装配化程度高、节能环保及保温材料无机化等优点被广泛应用于北欧、美国等发达国家地区^[1]。作为外围护结构,不承受建筑物竖向荷载,轻钢龙骨主要以受弯为主,因此对力学性能要求不高,可将其应用于变电站建设中。在我国严寒地区推广使用开孔龙骨复合墙体,不仅可以提高建筑物的装配化程度,又能达到节能环保的要求。

近年来,国内外学者对腹板开孔型轻钢龙骨墙体的受弯性能展开了一系列研究。A. Simaan 等^[2]对覆以石膏板的轻钢龙骨构件进行了压弯性能研究。Y. S. Tian 等^[3]对 C 形龙骨在无墙板、单侧或两侧附有墙板三种情况下组合墙体进行了试验,对墙体类型、螺钉间距对承载力的影响进行了分析。G. J. Hancock 等^[4-6]对 C 形轻钢龙骨的畸变屈曲问题进行研究,并完成了计算公式的推导。T. Sharaf 等^[7-8]对预制外挂墙板的受弯性能进行试验研究,结果表明保温芯材密度对墙板抗弯性能具有影响。耿悦等^[9]对两片足尺腹板开孔轻钢龙骨墙体抗弯性能进行了试验,并结合有限元模型与试验对比验证。杨晓杰等^[10-12]通过有限元软件对腹板开孔轻钢龙骨墙体在均布荷载作用下进行建模分析,研究了腹板开孔排数、腹板高度、窗洞口所占比例等因素下墙体的破坏形式及抗弯性能。周博^[13]通过对 9 个纤维水泥压力板复合外挂墙板进行抗弯性能试验,分析了龙骨间距、室内外堆载等对墙体受弯性能的影响。

刘振岐^[14]改龙骨截面形状 C 型为 S 型,采用试验与有限元结合对装配式 S 型轻钢龙骨保温复合墙板进行保温及抗弯性能研究。谈成龙^[15]对轻钢龙骨复合外挂墙板在开洞条件下的抗弯性能研究,提出了不同条件下的墙板规格参数。

通过阅读相关文献发现,已有研究多集中在覆面板材采用石膏板的轻钢龙骨复合墙体,而对以新型板材-纤维水泥压力板(FCP 板)为覆面板的开孔龙骨复合墙体标准单元体抗弯性能研究有限。基于此,笔者通过多点重物加载法模拟均布风荷载法对 8 片覆面板采用 FCP 板的开孔龙骨复合墙体进行试验研究,分析腹板开孔参数、龙骨厚度及龙骨腹板高度对其抗弯性能的影响,从而确定合理的设计参数,为实际工程提供设计参考。

1 试 验

1.1 试件设计

试验共设计了 8 个试件,参数见表 1。

表 1 试件参数

Table 1 Specimen parameters

试件 编号	龙骨腹板 高度/mm	龙骨厚 度/mm	开孔 排数	开孔长 度/mm
BFCP-1	150	2.0	7	70
BFCP-2	150	1.0	7	70
BFCP-3	100	1.0	5	70
BFCP-4	200	1.0	9	70
BFCP-5	150	1.0	5	70
BFCP-6	150	1.0	不开孔	—
BFCP-7	150	1.0	7	50
BFCP-8	150	1.0	7	90

墙体高×宽为 3 000 mm×1 200 mm。试件由两根面对面放置的竖龙骨、两端的天地龙骨和两侧 FCP 板组成,为方便观察竖龙

骨腹板试验现象,且考虑岩棉对墙体力学性能影响较小,故只在两竖龙骨间填充岩棉,试件设计如图 1 所示。试件中各腹板开孔龙骨开孔宽度均取 2 mm、开孔纵向间距均取 20 mm、开孔横向间距均取 8 mm。为减小开孔端部应力集中,在端部作倒圆角处理。天地龙骨与竖龙骨腹板开孔参数相同,且与其等厚。

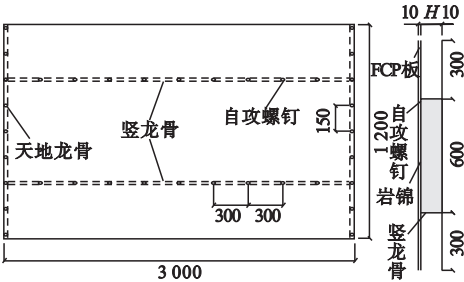


图 1 试件设计示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test piece design

1.2 材性试验

对试验所用厚度 1 mm 和 2 mm 钢板进行材性试验,用于材性试验的拉伸试件与墙体轻钢龙骨为同一批次钢材,材性试验根据《金属材料拉伸试验:第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228. 1—2010)中的相关规定进行^[16],结果见表 2。

表 2 轻钢龙骨材性试验结果

Table 2 Light-gague steel studs test results

钢材厚度/mm	试件编号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa	泊松比
1	S-1-1	253. 45	341. 27	194 542. 63	0. 30
	S-1-2	257. 33	344. 87	195 043. 72	0. 29
2	S-2-1	249. 48	335. 67	194 977. 42	0. 29
	S-2-2	252. 36	339. 46	193 685. 97	0. 31

注:试件编号的第一个字母 S 表示钢材,第二个数字表示钢材厚度,第三个数字表示重复试件的编号。

最终测得钢材屈服强度为 253. 16 MPa,抗拉强度为 340. 32 MPa,弹性模量为 194 562. 44 MPa,泊松比为 0. 3。FCP 板材性试验根据《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》(GB/T 17657—2013)中相关规定进行^[17],测得其极限荷载为 0. 233 kN,静曲强

度为 17. 41 MPa,弹性模量为 15 730 MPa。

1.3 加载方案

试验于沈阳建筑大学结构工程试验室进行,采用多点重物加载进行,以此模拟风荷载的均布面荷载。采用等质量铁块与沙袋进行多点加载,试验装置如图 2 所示。铁块质量为 10 kg、20 kg,沙袋质量为 2. 5 kg、5 kg 及 10 kg。试验中铁块均匀地布置于竖龙骨上翼缘中心线上,以避免无填充岩棉处纤维水泥压力板先于墙板破坏前板被压碎。在加载过程中,由多人实现同步加载,避免因荷载不均匀,局部荷载过大而导致试件局部破坏。



图 2 试验加载装置

Fig. 2 Test loading layout

加载时采用分级对称分布加载。将墙板分为 10 个加载区域,相邻加载区域间隔 150 mm,距端部天地龙骨 100 mm,各加载区域中铁块间隔为 50 mm,防止重物间距过近产生自拱效应。加载时,加载块由外及内中心对称分布放置。加载初期采用铁块进行加载,当竖龙骨产生明显变形或跨中挠度过大时,改用沙袋进行加载,荷载增量减小,持载时间也随之减少,采用沙袋加载直至试件破坏,以得到较为准确的墙体承载力。采用静态电阻应变仪对测点数据进行采集。

1.4 测试内容

试验测量内容包括:每级荷载值、关键点挠度、支座沉降值、龙骨和覆面板测点应变。竖龙骨应变片布置见图 3,在竖龙骨跨中及四分点处腹板、翼缘均贴有应变片。在 FCP

板受压侧、受拉侧均贴有电阻应变片。受拉侧应变片布置于跨中及四分点处,受压侧仅布置于跨中处(见图 4)。在试件两端、跨中及跨中位置共布置有 7 个竖向位移计。

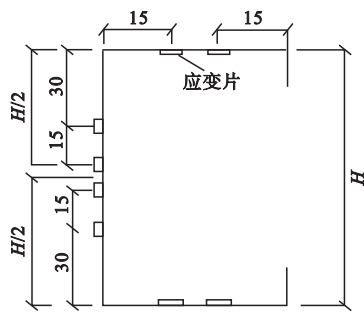


图 3 龙骨应变片布置图

Fig. 3 Layout of steel stud strain gauges

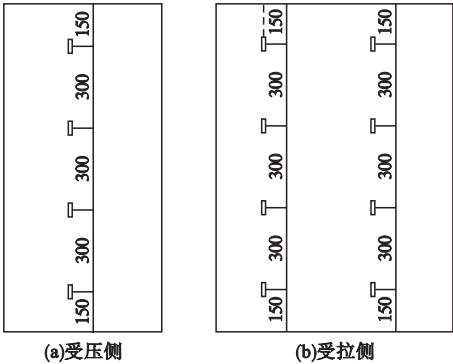


图 4 覆面板应变片布置图

Fig. 4 Layout of FCP strain gauges

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

各试件极限承载力及破坏形态见表 3,其中试件 BFCP-5 由于加载过程中沙袋堆积较高发生倒塌,未测得最终极限承载力。通过试验结果可知,各试件破坏形态有所不同,但墙体轻钢龙骨均未发生整体屈曲破坏,表明 FCP 板可有效限制轻钢龙骨的整体屈曲变形。根据《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012),风荷载计算按我国严寒地区 C 区中辽宁地区工况进行计算^[18],地面粗糙类型取为 B 型,100 m 高层建筑外围护结构考虑,基本风压取为 0.6 kPa,计算得到墙体正常使用荷载标准值为 1.8 kPa。试验中所

有试件极限承载力均大于正常使用荷载标准值,可满足使用要求。

表 3 试验结果

Table 3 Test results

试件编号	极限承载力/kPa	破坏形态
BFCP-1	11.04	S + L + D
BFCP-2	4.58	S + L + D
BFCP-3	3.68	S + L + D
BFCP-4	5.61	S + L + D
BFCP-5	—	S
BFCP-6	7.08	L + D
BFCP-7	6.11	S
BFCP-8	4.38	S + L + D

注:S 表示剪切屈曲,L 表示局部屈曲,D 表示畸变屈曲。

试件破坏形态如图 5 所示。从图中可以看出,试件 BFCP-1 在均布荷载作用下,竖龙骨支座附近形成剪切屈曲波,随着荷载增加,端部变形向龙骨中部逐渐延伸,在墙板跨中附近出现明显的局部屈曲及畸变屈曲变形。最终在施加 11.11 kPa 级荷载过程中,试件挠度迅速增大,两翼 FCP 板被压碎,试件发生破坏。试件 BFCP-2 在支座附近形成剪切屈曲波,由竖龙骨两端向中间延伸相交形成贯通鼓曲波。在跨中位置处出现局部屈曲、畸变屈曲。试件 BFCP-3、BFCP-8 与 BFCP-2 破坏形态大致相同,试件 BFCP-4 与 BFCP-1 破坏形态相似。试件 BFCP-5 在加载过程中,堆积沙袋过高发生倒塌,竖龙骨支座附近已出现明显塑性变形,跨中位置尚未发生明显破坏,试验停止。试件 BFCP-6 在竖龙骨跨中位置出现畸变屈曲,支座附近无屈曲变形。试件 BFCP-7 竖龙骨由两端的剪切屈曲波延伸成贯通的鼓曲波。

2.2 典型试件分析

以标准件 BFCP-2 为例,对开孔龙骨复合墙体在均布荷载作用下的破坏过程进行分析。该试件荷载共分 13 级施加,试件在前 5 级荷载作用下处于弹性工作状态,无明显变

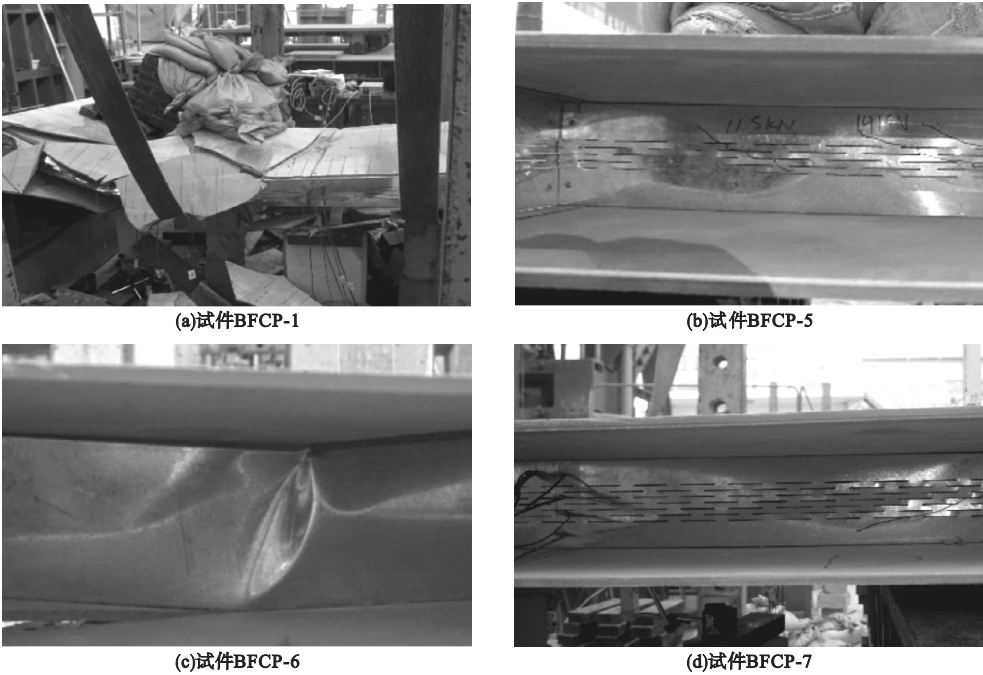


图 5 试件破坏形态

Fig. 5 Failure modes of specimens

化;第 6 级荷载施加后,两侧竖龙骨端部出现剪切屈曲变形(见图 6),此时跨中位移为 11.34 mm;加载至第 9 级荷载后,跨中位移达到 17.77 mm,竖龙骨与天地龙骨连接处,竖龙骨开孔处发生明显翘曲,端部竖龙骨变形加剧并向墙体跨中延伸相交形成贯通鼓曲波;加载至第 12 级荷载后,龙骨发出连续响声,施加第 13 级荷载后,覆面板材产生明显裂缝(见图 7),受压侧覆面板板跨中自攻钉被拔出,试件发生破坏。试件破坏时跨中位移为 28.06 mm,极限承载力为 4.58 kPa。

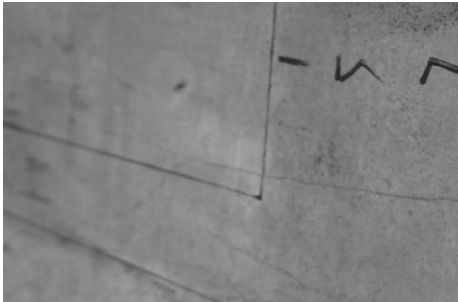


图 7 覆面板产生裂缝

Fig. 7 Cracks in the cladding panel

BFCP-2 竖龙骨跨中及四分点处荷载 - 应变曲线见图 8。从图中可以看出,加载初期,龙骨应变与荷载呈线性增长关系,在加载至 4.03 kPa 时,斜率开始逐渐减小,龙骨进入屈服阶段,竖龙骨腹板处产生局部屈曲变形。在施加至 4.72 kPa 时,轻钢龙骨应变增量减小,试件发生破坏。受拉侧 FCP 板跨中及四分点处荷载 - 应变曲线见图 9。从图中可以看出,在荷载施加至 4.03 kPa 前,两条曲线大致走势相同,基本呈线性增长关系。由于 FCP 板跨中变形较大,在腹板中部产生裂缝,跨中处应变不再增加,而四分点处 FCP

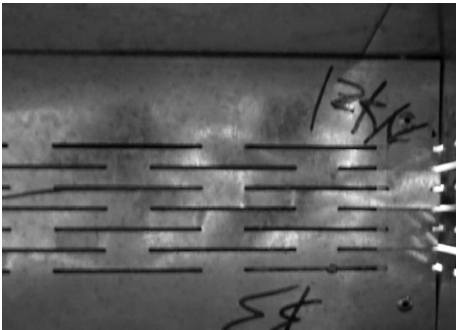


图 6 竖龙骨端部剪切屈曲

Fig. 6 Shear buckling at the end of the steel stud

板未发生破坏,其应变继续呈线性增长。

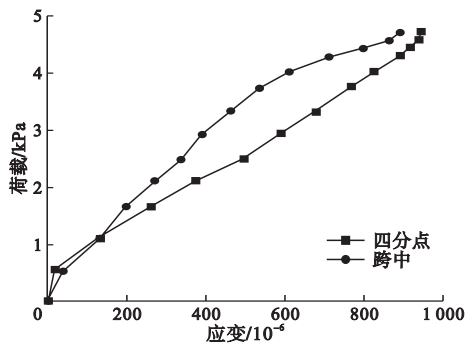


图 8 龙骨荷载-应变曲线

Fig. 8 Load-strain curves of steel stud

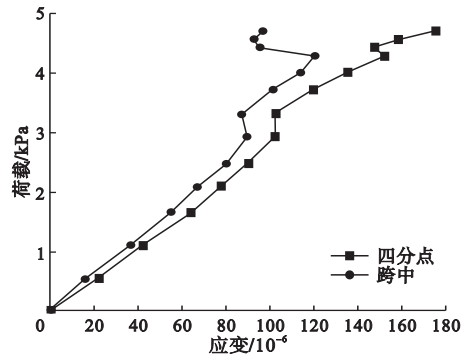


图 9 FCP 板荷载-应变曲线

Fig. 9 Load-strain curves of FCP

2.3 试件变形曲线

试件 BFCP-2、BFCP-6 加载阶段变形曲线见图 10,各位移由沿试件长度方向布置的位移计测量后得到。从图中可以看出,试件两侧位移对称分布,呈正弦半波曲线,挠度最大值位于试件跨中位置。

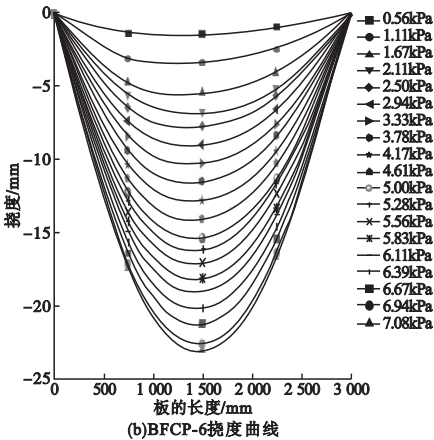
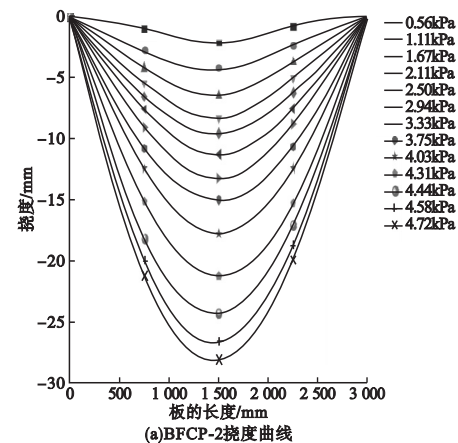


图 10 典型试件挠度曲线

Fig. 10 Deflection curve of typical test piece

3 参数分析

3.1 龙骨厚度

不同龙骨厚度下墙体荷载-挠度曲线对比见图 11。从图中可以看出,随着龙骨厚度的增加,墙体抗弯承载力和抗弯刚度明显提高。龙骨厚度由 1 mm 增加至 2 mm,抗弯刚度提高了 137%,承载力提高了 141%。由此可见,龙骨厚度对墙体抗弯性能影响很大。

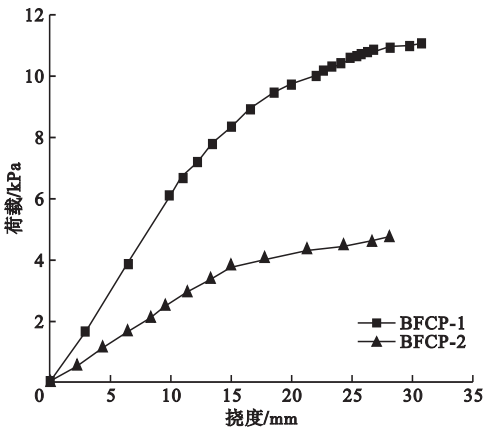


图 11 不同龙骨厚度墙体荷载-挠度曲线

Fig. 11 Load-deflection curves of walls with different stud metal thickness

3.2 龙骨腹板高度

比较试件 BFCP-2、BFCP-3 及 BFCP-4 可知龙骨腹板高度对试件抗弯承载力的影响,3 个试件具有相同的开孔比例(分别为 41.3%、42% 及 41%)。不同龙骨腹板高度

下墙体荷载 - 挠度曲线对比见图 12。从图中可以看出,随着龙骨腹板高度增加,墙体抗弯刚度与抗弯承载力均提高。与腹板高度 100 mm 试件相比,腹板高度为 150 mm 与 200 mm 的试件抗弯刚度分别提高了 76.86% 和 241.69%,抗弯承载力分别提高了 24.45% 和 52.45%。由此可知,龙骨腹板高度对墙体抗弯性能也有较大影响。

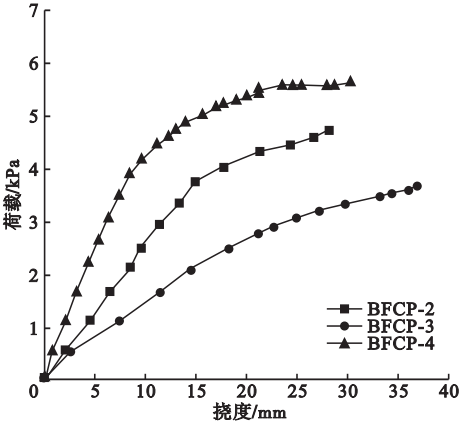


图 12 不同龙骨腹板高度墙体荷载 - 挠度曲线
Fig. 12 Load-deflection curves of walls with different web heights

3.3 龙骨腹板开孔排数

比较试件 BFCP-2、BFCP-5 及 BFCP-6 可知龙开孔排数对试件抗弯承载力的影响,龙骨腹板开孔排数不同时墙体荷载 - 挠度曲线见图 13。

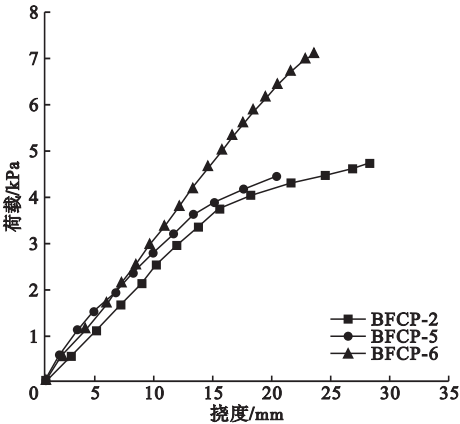


图 13 不同开孔排数墙体荷载 - 挠度曲线
Fig. 13 Load-deflection curves of walls with different rows of slots

由图可知,随着开孔排数的增加,墙体抗弯刚度与抗弯承载力减小。与未开孔试件相比,开设 7 排孔与 5 排孔的试件抗弯刚度分别降低了 20.72% 和 16.75%,龙骨腹板开 7 排孔时与未开孔试件相比其承载力降低了 35%,试件延性有所提高。

3.4 开孔长度

比较试件 BFCP-2、BFCP-7 及 BFCP-8 可知龙开孔长度对试件抗弯承载力的影响,龙骨腹板开孔长度不同时墙体荷载 - 挠度曲线对比见图 14。由图可知,随开孔长度增加,墙体抗弯承载力不断减小。与开孔长度 50 mm 相比,开孔长度 90 mm 与 70 mm 的试件抗弯刚度分别降低了 33.89%、28.13%,抗弯承载力分别降低了 25.04%、28.31%。

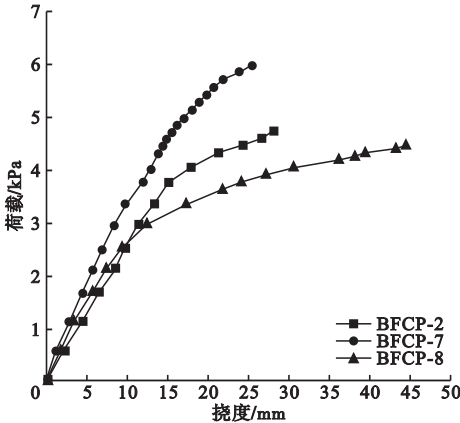


图 14 不同开孔长度墙体荷载 - 挠度曲线
Fig. 14 Load-deflection curves of walls with different the length of slots

4 结 论

- (1) 龙骨腹板开孔削弱了墙体抗弯性能,但削弱程度较小。开孔长度增加,使开孔区域增加,墙体抗弯承载力减小,开孔长度 90 mm 试件相比于 50 mm 试件,承载力降低了 28.31%。
- (2) 龙骨厚度对墙体的抗弯性能影响很大,龙骨厚度越大,极限承载力越高,龙骨厚度 2 mm 试件相比于 1 mm 试件,承载力提高了 141%。
- (3) 选取相同开孔比例研究龙骨腹板高

度对墙体抗弯性能的影响,墙体抗弯承载力随龙骨腹板高度增加而增加,腹板高度200 mm试件相比于100 mm试件,承载力提高了52.45%。

参考文献

- [1] 洪强. 钢结构住宅的优势及综合效益分析[J]. 安徽建筑, 2006, 33(4): 110-112.
(HONG Qiang. Analysis of the advantages and comprehensive benefits of steel structure housing [J]. Anhui architecture, 2006, 33(4): 110-112.)
- [2] SIMAAN A, PEKOZ T. Diaphragm braced members and design of wall studs[J]. Journal of the structural division, 1976, 102(1): 77-92.
- [3] TIAN Y S, WANG J, LU T J, et al. An experimental study on the axial behaviour of cold-formed steel wall studs and panels[J]. Thin-walled structures, 2004, 42(4): 557-573.
- [4] HANCOCK G J. Design for distortional buckling of flexural members[J]. Thin-walled structures, 1997, 27(1): 3-12.
- [5] SILVESTRE N, CAMOTIM D. Distortional buckling formulae for cold-formed steel C and Z-section members: Part I—derivation[J]. Thin-walled structures, 2004, 42(11): 1567-1597.
- [6] SILVESTRE N, CAMOTIM D. Distortional buckling formulae for cold-formed steel C and Z-section members: Part II—validation and application[J]. Thin-walled structures, 2004, 42(11): 1599-1629.
- [7] SHARAF T, SHAWKAT W, FAM A. Structural performance of sandwich wall panels with different foam core densities in one-way bending[J]. Journal of composite materials, 2010, 44(19): 2249-2263.
- [8] MOSTAFA A, SHANKAR K, MOROZOV E V. Behaviour of PU-foam/glass-fiber composite sandwich panels under flexural static load[J]. Materials & structures, 2015, 48(5): 1545-1559.
- [9] 耿悦, 王玉银, 林敬木. 均布荷载作用下保温龙骨足尺墙体的抗弯性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(8): 16-20.
(GENG Yue, WANG Yuyin, LIN Jingmu. Bending behaviour of full-scale walls with light-gauge slotted steel studs subjected to distributed loading [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2014, 46(8): 16-20.)
- [10] 杨晓杰, 马迪, 孙建运, 等. 开孔龙骨墙体标准单元抗弯性能分析[J]. 低温建筑技术, 2015, 37(5): 40-43.
(YANG Xiaojie, MA Di, SUN Jianyun, et al. Analysis of bending performance of standard element of light-gauge slotted steel studs composite wall [J]. Low temperature building technology, 2015, 37(5): 40-43.)
- [11] 石敬斌, 张磊, 王玉银, 等. 开窗的保温龙骨墙体抗弯性能有限元分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2014, 39(1): 7-13.
(SHI Jingbin, ZHANG Lei, WANG Yuyin, et al. Finite element analysis on bending behaviour of thermal stud enclosing wall with window holes in the wall [J]. Journal of Guangxi university (natural science), 2014, 39(1): 7-13.)
- [12] 石敬斌, 董晓晨, 杨晓杰, 等. 腹板开孔轻钢龙骨在均布荷载作用下的抗弯性能有限元分析[J]. 建筑钢结构进展, 2013, 15(4): 1-7.
(SHI Jingbin, DONG Xiaochen, YANG Xiaojie, et al. Finite element analysis on the bending behavior of light-gauge slotted steel studs subjected to uniformly loading [J]. Progress in steel structures, 2013, 15(4): 1-7.)
- [13] 周博, 刘明, 王春刚. 纤维水泥压力复合外挂墙板受弯性能试验研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(1): 84-89, 99.
(ZHOU Bo, LIU Ming, WANG Chungang. An experimental study on the bending behavior of FCP exterior wall board [J]. Industrial construction, 2016, 46(1): 84-89, 99.)
- [14] 刘振岐. 装配式S型轻钢龙骨保温复合墙板性能研究[D]. 长春: 长春工程学院, 2020.
(LIU Zhenqi. Research on the performance of assembled S-type light steel keel thermal insulation composite wall panel [D]. Changchun: Changchun Institute of Engineering, 2020.)
- [15] 谈成龙, 完海鹰, 陈安英. 轻钢龙骨夹芯复合外挂墙板抗弯性能参数化数值分析[J]. 太原理工大学学报, 2020, 51(1): 19-25.
(TAN Chenglong, WAN Haiying, CHEN Anying. Parametric numerical analysis of bending performance of light steel keel sandwich composite external wall panel [J]. Journal of Taiyuan university of technology, 2020, 51(1): 19-25.)
- [16] 中华人民共和国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, 2011.
(Metallic Materials of the General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Tensile test-Part 1: Test methods for room temperature GB/T 228.1—2010 [S]. Beijing: China Standard Press, 2011.)
- [17] 中华人民共和国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, 2014.
(General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Test methods for physical and chemical properties of wood-based panels and facing wood-based panels: GB/T 17657—2013 [S]. Beijing: China Standard Press, 2014.)
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB50009—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Load regulations for building structures: GB50009—2012 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2012.)

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)