

均布荷载作用下保温龙骨足尺墙体的抗弯性能

耿 悦^{1,2}, 王玉银^{1,2}, 林敬木¹

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨; 2. 哈尔滨工业大学 结构工程灾变与控制教育部重点实验室, 150090 哈尔滨)

摘 要: 为研究腹板开孔的轻钢龙骨墙体在均布荷载作用下的抗弯性能, 考虑腹板高度的影响, 进行 3.0 m×3.0 m 足尺试件试验研究. 分析了不同腹板高度的墙体在均布荷载作用下的破坏模式及腹板高度对墙体抗弯性能的影响. 在此基础上, 采用 ABAQUS 建立墙体的有限元模型, 与试验结果进行对比分析, 验证了有限元模型的可靠性. 分析结果表明: 石膏板可很好地限制竖龙骨的整体屈曲, 当龙骨腹板高度为 150 mm 时, 墙体竖龙骨在支座附近发生腹板剪切屈曲, 同时在跨中位置发生畸变与局部屈曲的相关屈曲破坏; 当龙骨腹板高度为 100 mm 时, 墙体竖龙骨在跨中位置发生畸变与局部屈曲的相关屈曲破坏; 当不考虑窗洞口影响时, 腹板高度为 100 mm 的保温龙骨外围护墙体可满足我国全部地区建筑高度不超过 50 m 的城市建筑外围护墙体的抗风要求.

关键词: 腹板开孔轻钢龙骨; 抗弯; 足尺; 试验研究; ABAQUS

中图分类号: TU392

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2014)08-0016-05

Bending behaviour of full-scale walls with light-gauge slotted steel studs subjected to distributed loading

GENG Yue^{1,2}, WANG Yuyin^{1,2}, LIN Jingmu¹

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China; 2. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control, Ministry of Education, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

Abstract: Full-scale experiments were carried out to investigate the static responses of light-gauge slotted steel stud walls with different web heights subjected to uniformly distributed transverse loading. The failure modes for the walls were depicted. The influence of the web height on the static behaviour of this new kind of light-gauge steel stud walls was analyzed. By means of ABAQUS, finite element model was built to numerically investigate the bending behaviour of the full-scale light-gauge slotted steel stud walls. The analysis results were benchmarked against the experimental ones. It was concluded that the gypsum board can prevent the studs from overall buckling. The stud wall with web height of 150 mm failed in shear mode at the support and buckled in both the local and distortional mode at the mid span, while the stud wall with web height of 100 mm only failed with local and distortional buckling at the mid span. When there is no window hole, the slotted steel stud wall with a web height of 100 mm can resist the wind loading in China for the building with the height lower than 50 m.

Keywords: light-gauge slotted steel studs; bending resistance; full scale; experimental investigation; ABAQUS

轻钢龙骨墙体质量轻、施工装配化程度高. 但是, 轻钢龙骨外围护墙体热桥效应较为严重, 在严寒地区甚至难以满足建筑保温要求. 为改善轻钢

龙骨的热桥效应, 可在龙骨腹板上开设细长孔洞以增加传热路径^[1], 称为保温龙骨, 如图 1 所示. 目前保温龙骨的应用主要集中在北欧地区, 且主要用于承重墙体, 开孔排数有限^[2-4]. 外围护墙体不承受建筑结构竖向荷载, 因此对龙骨力学性能的要求不高, 在外围护墙体中采用保温龙骨可增加开孔排数, 对墙体保温性能的改善效果更好. 此外, 外围护墙体中的轻钢龙骨以受弯为主, 将细长

收稿日期: 2013-11-15.

基金项目: 哈尔滨市科技创新人才研究专项资金项目(2012RFLXG025).

作者简介: 耿 悦(1983—), 女, 博士, 讲师;

王玉银(1975—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 王玉银, wangyuyin@hit.edu.cn.

孔洞开设在龙骨腹板中和轴附近对其抗弯性能的影响较小.在建筑结构中采用保温龙骨外围护墙体既提高了建筑的工业化程度,又有利于实现我国“绿色建筑和建筑节能”的总体目标,具有广阔的应用前景.

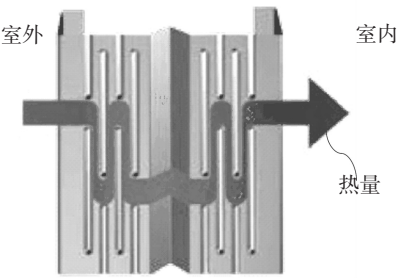


图 1 保温龙骨

目前国内外学者已对保温龙骨的轴压^[4]、抗弯^[3]、抗剪^[2]及抗火^[5]性能展开了系列研究.同时,北欧国家的学者对采用不同龙骨截面形式及墙体覆面形式的保温龙骨墙体标准单元在轴压、偏压及压弯作用下的受力性能进行了系统的试验研究^[1,6-8].但是,目前针对保温龙骨外围护墙体抗弯性能的试验研究较少.1992 年,丹麦学者 Frederiksen 等^[7]对 5 组 12 片两侧覆石膏板的保温龙骨外围护墙体标准单元进行了抗弯试验,考虑参数包括:龙骨腹板高度(150 mm、200 mm)、腹板厚度(1 mm、1.5 mm).1997 年,Borglund 等^[8]对 1 组 2 片两侧覆石膏板的保温龙骨外围护墙体标准单元在均布荷载作用下的抗弯性能进行了试验研究,试件龙骨腹板高为 150 mm,厚 1.0 mm.目前,关于保温龙骨外围护墙体抗弯性能的试验研究仅针对腹板高度在 150 mm 以上的墙体,且均为墙体标准单元.

本文对 2 片腹板开孔的轻钢龙骨墙体足尺试件进行均布荷载作用下的抗弯性能试验研究.龙骨腹板高度分别为 100 mm 与 150 mm.分析墙体的破坏模式及龙骨腹板高度对墙体抗弯性能的影响,验证该类墙体用于建筑外围护墙体的可靠性.同时,采用 ABAQUS 建立腹板开孔的轻钢龙骨墙体足尺试件的有限元模型,分析其在均布荷载作用下的抗弯性能.将分析结果与试验结果进行对比,验证有限元模型的可靠性,为后续参数分析及设计公式的提出奠定基础.

2 材性试验

2.1 轻钢龙骨材性试验

所有用于材性试验的标准拉伸试件均取自制作 C 形截面龙骨的同批钢板.拉伸试件取样依据《钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制

备》(GBT2975—1998)中的相关规定进行.材性试验在 WDW-100D 微机控制电子式万能试验机上进行.具体材性试验结果见表 1.

表 1 龙骨材性试验结果

编号	屈服强度 f_y /MPa	抗拉强度 f_u /MPa	弹性模量 E_s /MPa	泊松比 γ	伸长率/%
S-1	251.8	330.4	169 998	0.30	31.8
S-2	257.3	343.9	189 912	0.27	33.6
均值	254.6	337.1	180 000	0.28	32.7

2.2 石膏板材性试验

按照《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》中的相关规定,石膏板材性试验的试件尺寸为 290 mm×50 mm.采用标准三点弯曲试验方法,测定石膏板的弹性模量及静曲强度.将试件安置于间距 $l = 240$ mm 的支座上(支座间距为石膏板厚度的 20 倍),在试件中部作用一向下的集中荷载,测定试件中部处荷载和挠度的关系,从而确定石膏板的弹性模量和静曲强度,见表 2,其中静曲

$$\text{强度 } \sigma_b = \frac{3 \times N_u \times l}{2 \times B_g \times l^2}.$$

表 2 石膏板材性试验结果

编号	试件宽度 B_g /mm	试件厚度 t_g /mm	极限承载力 N_u /kN	静曲强度 σ_b /MPa	弹性模量 E_g /MPa
G-1	50	12	0.099	4.94	1 010
G-2	50	12	0.103	5.15	782
G-3	50	12	0.106	5.27	698
均值	50	12	0.105	5.21	740

3 足尺试验

3.1 试件参数

墙体足尺试件尺寸为 3 000 mm×3 000 mm,见图 2.设 6 根 C 形卷边冷弯薄壁型钢竖龙骨,龙骨间距取 600 mm.竖龙骨两端插入长 3 000 mm 的天地龙骨中.龙骨均采用 1.0 mm 厚 Q235 级冷轧钢板卷制而成.竖龙骨与天地龙骨腹板均通长开设细长孔洞^[9],采用文献[10]所确定的龙骨开孔形式,见图 3.选取腹板高度(h)为 100 mm、150 mm 的竖龙骨拼制足尺墙体,根据保温试验分析结果^[11],腹板分别开 5 排、7 排孔.龙骨两侧覆 12 mm 厚的纸质石膏板,内填岩棉.竖龙骨与天地龙骨翼缘间通过拉铆钉联接,腹板间通过联接角钢联接.石膏板与龙骨间采用自攻螺钉联接.石膏板与天地龙骨间自攻螺钉间距 150 mm,石膏板与竖龙骨间自攻螺钉间距 300 mm.试件具体参数见表 3.

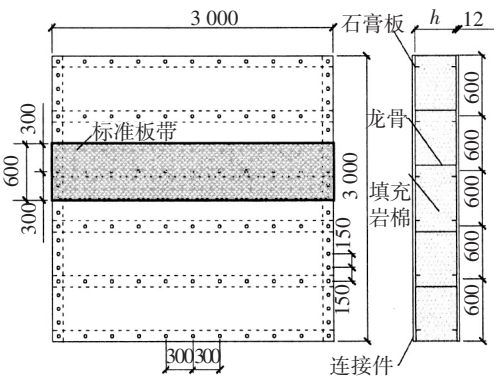


图 2 腹板开孔轻钢龙骨墙体试件 (mm)

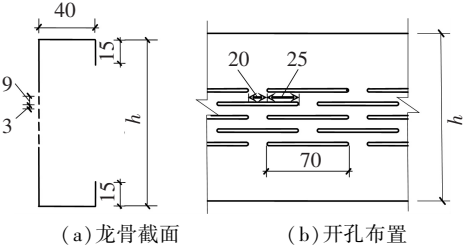


图 3 轻钢龙骨开孔形式 (mm)

表 3 试件参数

编号	试件尺寸/ mm	竖龙骨腹 板高度/mm	钢板厚度/ mm	开孔 排数	试件破坏 模式
ZC-100-5	3 000×3 000	100	1.0	5	L+D ²
ZC-150-7	3 000×3 000	150	1.0	7	S+L+D

注:1. ZC-100-5 表示竖龙骨腹板高 100 mm,腹板开 5 排孔的足尺墙体;2. L 表示局部屈曲,D 表示畸变屈曲,S 表示剪切屈曲。

3.2 试验方案

采用直接重力加载法对两端铰接的墙体试件施加均布荷载,研究其抗弯性能.加载块采用铸铁块,所有铸铁块堆积于竖龙骨上,加载块中心线与龙骨翼缘中心线对齐.试件中部 4 根竖龙骨上使用尺寸为 300 mm×150 mm×60 mm 的铸铁块作加载块,每块铸铁块重 20 kg;试件边缘竖龙骨由于只承担一半荷载,因而采用尺寸为 300 mm×150 mm×30 mm 的 10 kg 重铸铁块.铸铁块间净距为 20 mm,有效避免了试验加载后期,加载块因堆积过密而形成自拱效应.每级荷载采用 4 块或 5 块加载块进行施加,加载块沿试件跨度方向均匀布置,从而保证所施加的荷载满足均布荷载要求.施加荷载并持荷 1 min 后,采集数据.根据试件承载力的不同,荷载分 6~8 级施加.试件两端的边界条件为铰接(图 4).试件计算跨度为 2 800 mm.以不影响试件挠曲为前提,在试件下方设置保护墩,以保证试验安全.采用 9 个 LVDT 位移计测量试件跨中、1/4 跨及支座处竖向位移及支座处水平位移.测点包括:试件中部跨中、1/4 跨位置,试件边缘竖龙骨跨中、1/4 跨及试件支座处沿试件宽度方向中心位置,具体见图 5.

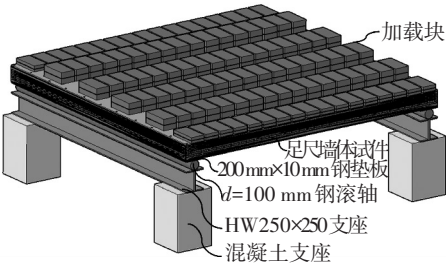


图 4 墙体足尺试件抗弯性能试验加载方案

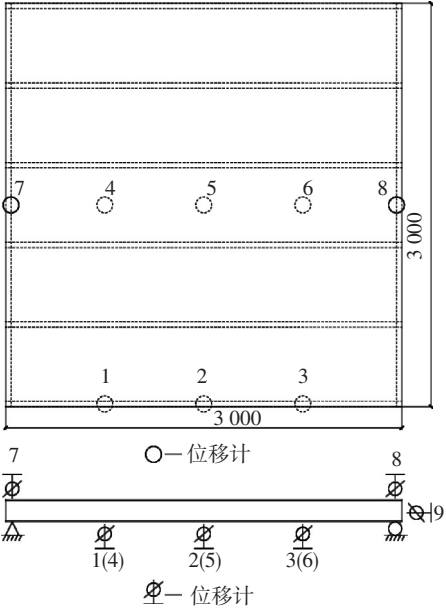


图 5 位移计布置 (mm)

3.3 试验结果

3.3.1 试件破坏现象

墙体试件在整个试验过程中均未发生自攻钉滑移或拔出或滑移现象.石膏板与竖龙骨协同工作状态良好.各试件破坏后,将石膏板覆面拆除,发现龙骨均未发生整体屈曲,说明石膏板可以有效限制龙骨的整体屈曲变形.两试件的边缘竖龙骨均未发生破坏,但中部四根竖龙骨在均布荷载作用下均发生了局部屈曲.腹板高度不同的两片墙体试件所发生的局部屈曲模态不同.ZC-150-7 试件在支座附近剪力较大处形成腹板剪切屈曲波,同时跨中出现局部屈曲与畸变屈曲耦合的相关屈曲波(图 6).ZC-100-5 试件则仅表现为跨中龙骨的局部屈曲与畸变屈曲的耦合破坏(图 7).

3.3.2 试件荷载-位移曲线

图 8 所示为不同腹板高度的两片墙体足尺试件的荷载-位移曲线对比结果, p 为作用于单根轻钢龙骨上的线荷载, u 为危墙体跨中挠度.可以看出,随着龙骨腹板高度的增加,墙体刚度与承载力均有提高.与腹板高 100 mm 的试件相比,腹板高 150 mm 的试件极限承载力提高 55%,刚度提高 131%.对于腹板高度为 100 mm 的试件,当墙体位移达到《建筑幕墙》(GBT 21086—2007)规定的正

常使用阶段挠度允许值 $l/250$ (l 为墙体跨度, 本墙体允许值为 12 mm) 时, 墙体能承受的均布荷载为 5.9 kN/m^2 , 根据《建筑幕墙》的规定, 该墙体的抗风压性能等级为 9 级, 可满足中国建筑高度不超过 50 m 的城市建筑外围护墙体的抗风要求^[12].

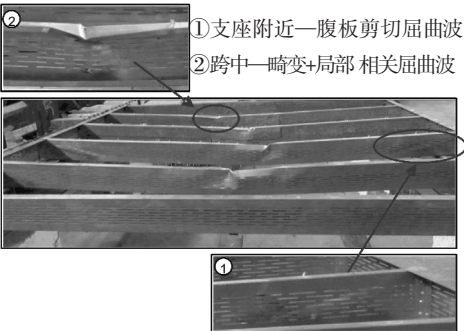


图 6 ZC-150-7 试件的 S+L+D 破坏模式

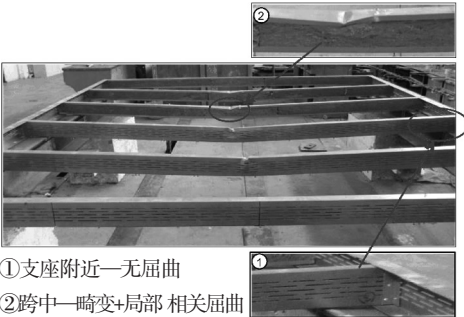


图 7 ZC-100-5 试件的 L+D 破坏模式

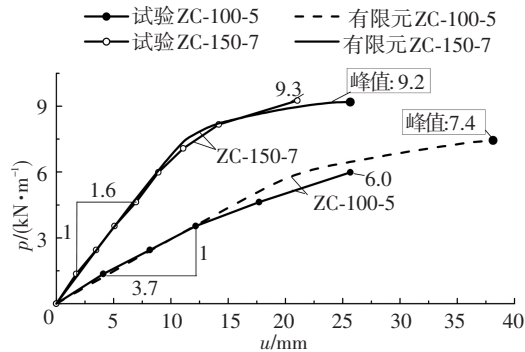


图 8 不同龙骨腹板高度墙体荷载-位移曲线

4 有限元分析

4.1 有限元建模

采用 ABAQUS 分析足尺墙体试件在均布荷载作用下的抗弯性能.为提高计算效率,取足尺墙体中的一个标准板带(图 2)建立有限元模型,见图 9.分析时不考虑岩棉对墙体抗弯性能的贡献.轻钢龙骨及石膏板采用 S4R 壳单元进行模拟,厚度方向设 5 个积分点.S4R 壳单元有 4 个节点,每个节点有 6 个自由度.该种单元可考虑大应变、大挠度、大转动的几何非线性及材料弹塑性.经试算,最终确定轻钢龙骨模型的网格尺寸为 $10\text{ mm}\times$

10 mm (腹板高度 100 mm 或 150 mm),石膏板网格划分见图 9.

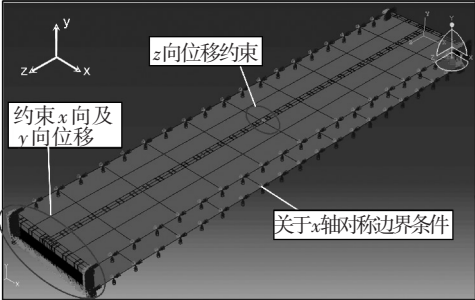


图 9 墙体有限元模型

通过对竖龙骨与天地龙骨(石膏板)在拉铆钉(自攻螺钉)联接位置进行节点耦合,模拟拉铆钉(自攻螺钉)的联接作用.竖龙骨与天地龙骨腹板的角钢联接则通过将竖龙骨腹板与天地龙骨腹板在交线处节点耦合实现.标准墙体单元两侧采用关于 X 轴对称的边界条件,即 $U_x = UR_y = UR_z = 0$.天地龙骨下翼缘与腹板交界处约束 X 向及 Y 向位移,在墙体跨中位置约束 Z 向位移,以实现简支边界条件的模拟.具体边界条件的模拟见图 9.

分析时考虑几何非线性与材料非线性.初始几何缺陷以构件的一阶模态形式施加,幅值根据美国轻钢规范(AISI S100—2007)^[13]的相关规定取龙骨截面高度的 $1/200$.材料材性定义各参数按材性试验结果取值.其中,石膏板为各向异性板,但分析发现按照各项异性材料定义与按照各项同性材料定义分析所得墙体的弹性刚度与极限承载力分别仅相差 1.2% 与 2.2%.因此,为简化分析模型,石膏板按各向同性材料模拟.

4.2 有限元模型验证

采用有限元模型对各试件的抗弯性能进行分析,将分析所得不同腹板高度的墙体标准单元试件荷载-位移曲线与试验结果进行对比,见图 8.分析曲线与试验曲线吻合较好,具体见表 4.

表 4 试件极限承载力与抗弯刚度验证

编号	极限承载力 $p/(kN \cdot m^{-1})$			弹性阶段刚度 $k/10^6(N \cdot m^{-2})$		
	试验	有限元	差别/%	试验	有限元	差别/%
ZC-100-5	6.0	7.4	18.9	3.7	3.4	6.8
ZC-150-7	9.3	9.2	1.1	1.6	1.4	17.7

5 结 论

- 1) 在试验过程中,石膏板可有效限制龙骨的整体失稳,且与龙骨间不发生相对滑移.
- 2) 当龙骨腹板高度为 150 mm 时,墙体龙骨在支座附近发生剪切屈曲而破坏,同时在跨中位置发生畸变与局部屈曲的相关屈曲.

3) 当龙骨腹板高度为 100 mm 时,墙体龙骨在跨中位置发生畸变与局部屈曲的相关屈曲,在支座处腹板不发生剪切屈曲。

4) 与腹板高 100 mm 的试件相比,腹板高 150 mm 的试件极限承载力提高 55%,刚度提高 131%。

5) 采用本文建立的有限元模型进行腹板开孔轻钢龙骨墙体在均布荷载作用下的抗弯性能分析,其分析结果与试验结果吻合较好。

6) 当不考虑窗洞口影响时,腹板高度为 100 mm 的保温龙骨外围护墙体的抗风压等级为 9 级,可满足中国全部地区建筑高度不超过 50 m 的城市建筑外围护墙体的抗风要求。

参考文献

- [1] IFE L W. The performance on cold-formed steel products in housing [C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Cold-Formed Steel Design and Construction. Louis: Missouri, 1975: 621-667.
- [2] THÖYRÄ T. Strength of slotted steel studs [D]. Sweden: Royal Institute of Technology, 2001.
- [3] HÖGLUND T, BURSTRAND H. Slotted steel studs to reduce thermal bridges in insulated walls [J]. Thin-Walled Structures, 1998, 32(1/2/3): 81-109.
- [4] KESTI J, MÄKELÄINEN P. Design of gypsum-sheathed perforated steel wall studs [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1998, 46(1/2/3): 215-216.
- [5] SALHAB B, WANG Y C. A study of the thermal performance of cold-formed thin-walled perforated steel studs (Thermal Studs) in fire [C]//Proceedings of the Ninth Biennial ASCE Aerospace Division International Conference on Engineering, Construction, and Operations in Challenging Environments. Houston: [s.n.], 2004: 688-695.
- [6] SALMI P. Design of web-perforated steel wall studs [C]//4th Finnish Steel Structures R&D Days. Lappeenranta, Finland: [s.n.], 1998.
- [7] FREDERIKSEN J O, SPANGE H. Danogips stålbyggesystem [R]. Denmark: Undersøgelse af bæreevnen af lette ydervægge, Byggeteknisk Institut, 1992.
- [8] BORGLUND J, JONSSON J. Bärförmåga för slitsade stålreglar [D]. Denmark: Examensarbete 84, Institutionen för Byggekonstruktion, 1997.
- [9] 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.
- [10] 殷大伟. 轻钢龙骨墙体传热与受弯性能分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [11] 颜於腾. 腹板开孔轻钢龙骨围护墙体保温性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [12] 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, 2014, 39(1): 7-13.
- [13] AISI Code. North American specification for the design of cold-formed steel structural members [S]. Washington DC: American Iron and Steel Institute, 2007.

(编辑 赵丽莹)