

腹板开孔标准轻钢龙骨力学性能比较研究

左宏亮*, 武 胜

(东北林业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: 腹板开孔轻钢龙骨作为一种有效的节能构件而被广泛应用于寒冷地区的轻钢龙骨复合住宅体系中. 采用 ANSYS 非线性有限元方法系统分析了在轴压、弯矩、压弯基本荷载作用下, 腹板开孔对标准轻钢龙骨的屈曲模式、变形、截面应力、承载力等方面力学性能的影响规律, 给出龙骨腹板孔洞的合理取值范围. 结果表明, 常用孔洞参数范围内腹板开孔对龙骨承载力的降低幅度可以控制在 10% 以内; 腹板开孔后龙骨整体变形能力降低, 峰值应变相应减小, 使龙骨的初始刚度略微增大. 腹板孔洞长度是影响龙骨力学性能的重要参数, 随孔洞长度增加, 龙骨承载力下降, 延性变差.

关键词: 腹板开孔; 标准轻钢龙骨; 力学性能; 有限元分析

中图分类号: TU392 **文献标志码:** A

0 引言

轻钢龙骨住宅体系是具有广阔发展前景的钢结构建筑体系之一, 主要应用于低层与多层住宅中. 它不仅具有强度高、重量轻、塑性和韧性好等优点, 而且增加了建筑使用面积, 节约了大量黏土资源, 是一种节能、环保和施工效率高的结构形式, 体现了发展循环经济、构建资源节约型和环境友好型社会的绿色建筑理念^[1~3].

轻钢龙骨复合墙体主要由轻钢龙骨、内外墙板、岩棉等夹芯层材料复合组成. 轻钢龙骨与岩棉构成的墙体内夹芯层的材质是非均质的, 导致建筑材料热特性高度非连续, 使围护结构各部位的保温不平衡, 钢构件部位保温性能较弱, 热流率大大增加. 不仅增加了建筑能耗, 而且使围护结构内表面的温度场分布很不均匀, 在钢龙骨处及其附近温度很低, 形成具有明显多维传热特性的热桥. 北欧和北美等寒冷地区国家, 对轻钢龙骨住宅体系进行了系统的研究, 挪威的 Engebretsen 和 Ramstad 在 1978 年设计的建筑中首先应用了腹板开孔 C 形轻钢龙骨^[4], 实践证明该做法可以明显增长结构的导热路径, 显著降低轻钢龙骨复合

墙体的局部热桥效应^[5]. 本文研究腹板开孔做法对我国相关规范规定的标准轻钢龙骨构件力学性能的影响程度, 以期该法能够早日应用到我国寒冷地区轻钢龙骨住宅体系的复合墙体中, 发挥其良好的隔热性能.

1 标准轻钢龙骨介绍

《低层轻型钢结构装配式住宅技术要求》(JG/T 182—2005)(以下简称《技术要求》)中对用做体系承重构件龙骨立柱的几何尺寸进行了明确的限定^[6]. 轻钢龙骨住宅体系的基本骨架构件主要有 C 形和 U 形两种截面形式, C 形截面一般用做梁柱龙骨承重构件, U 形截面一般套在 C 形截面的端头, 用做顶梁、底梁或边梁等非承重构件.

根据《技术要求》的规定, 为了便于工业化生产, 将轻钢龙骨住宅体系常用龙骨的规格定型为 13 种, 其中 8 种标准 U 形龙骨用做顶梁、底梁、边梁等非承重构件, 其余 5 种标准 C 形龙骨用做梁柱龙骨承重构件, 这 5 种标准轻钢龙骨的尺寸见表 1. 钢材采用 Q235 或 Q345 钢, 标准轻钢龙骨的厚度范围在 0.85~2.50 mm.

表 1 标准轻钢龙骨型号及尺寸
Tab.1 The type and size of standard steel stud

龙骨规格	腹板高度/mm	翼缘宽度/mm
S0(S1)-90Ct	90	40
S0(S1)-140Ct	140	40
S0(S1)-205Ct	205	40
S0(S1)-255Ct	255	40
S0(S1)-305Ct	305	40

本文选择以上 5 种标准轻钢龙骨进行基本力学性能分析,并在龙骨常用厚度范围内选择 6 种厚度:0.9、1.2、1.5、1.8、2.1、2.4 mm,龙骨长度取为 3.0 m.文中龙骨规格表示为 S_x-hCt ,其中 S_x 为龙骨类型;S0 代表腹板不开孔标准轻钢龙骨,S1 代表腹板开孔标准轻钢龙骨. hCt 为标准轻钢龙骨截面参数,其中 h 为龙骨腹板高度, t 为龙骨厚度.

龙骨的开孔方式及开孔参数如图 1 所示,孔洞参数有 4 个,孔洞长度、孔洞宽度、孔洞横向间距、孔洞纵向间距分别用 u 、 v 、 a 、 b 表示.

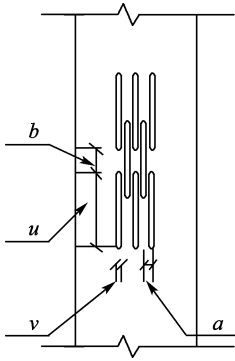


图 1 腹板孔洞参数示意图
Fig.1 Web slot parameters

2 建立有限元模型

(1)单元类型

采用大型有限元通用程序 ANSYS 进行分析.选用 shell181 平板壳元模拟轻钢龙骨,每个 shell181 单元有 4 个节点,每个节点有 3 个位移和 3 个转动自由度,该单元包括塑性、应力强化、大变形和大应变特性.

(2)网格尺寸

文献[7]同样应用 ANSYS 软件对 C 形龙骨进行了有限元分析,根据其建议,将模型的整体网格尺寸控制为 $0.025\text{ mm}\times[\text{龙骨表面积}]^{1/2}\text{ mm}$.

(3)基本假设

①不计残余应力和冷弯效应的影响.由于冷

弯薄钢自身成型的原因,其残余应力呈“弯曲型”,数值相对较小且主要集中在构件的角部,同时构件角部由于冷加工效应屈服强度会有所提高,以上两种效应基本相抵.② 不计截面弯角的影响.经试算对比认为可以忽略 C 形龙骨弯角的影响.

(4)边界条件

经过细致的龙骨全模型、半模型力学性能对比后,作者认为半模型不受全模型端部约束的影响,能更好反映龙骨的力学性能,所以取一半建模.模型的约束条件为龙骨一端约束除轴向外的两个平动位移;对称端限制轴向平动和另两个方向的转动.

(5)几何缺陷

首先进行 ANSYS 特征值屈曲分析,得到龙骨最易发生的变形模态,然后提取 $0.001L$ (L 为龙骨长度)的初挠度来模拟构件的初始几何缺陷,进行非线性屈曲分析,并采用弧长法追踪曲线的下降段.

3 标准轻钢龙骨力学性能比较

3.1 轴压标准轻钢龙骨力学性能比较

3.1.1 典型龙骨比较分析 选取 205C1.2 典型龙骨进行腹板不开孔、腹板开孔轴压龙骨的力学性能对比分析,定性、定量掌握孔洞对龙骨力学性能的影响规律.图 2 为 S0-205C1.2、S1-205C1.2 龙骨屈曲模式比较.对比可知,腹板不开孔时局部波曲变形,腹板开孔后构件腹板的局部波曲半波增大,并且翼缘与卷边交线的变位幅度也相应增大,即龙骨呈畸变变形.这是由于腹板开孔后整个龙骨近似由 3 部分组成,即腹板中部孔带,翼缘、卷边和部分腹板形成的两个“Γ”形构件,从而龙骨的整体变形能力减弱而使局部变形不能形成,而变形半波增长,龙骨不能再像不开孔之前一样,形成多波变形,使构件近似呈畸变变形.

图 3 为 S0-205C1.2、S1-205C1.2 龙骨的应力分布比较图.如图(a)所示,腹板不开孔龙骨的腹板上应力形成交错的增大区和减小区,跨中附近的应力明显高于跨端,为局部变形与整体变形叠加的应力分布;如图(b)所示,半模型中腹板开孔龙骨的腹板上应力较大区只有一处,也说明腹板上形成了大波长变形.对比两者的最大应力分布可见,腹板不开孔龙骨的最大应力出现在腹板、翼缘交接处,而腹板开孔后最大应力出现在孔洞与孔洞边缘,说明开孔处有局部应力集中现象.

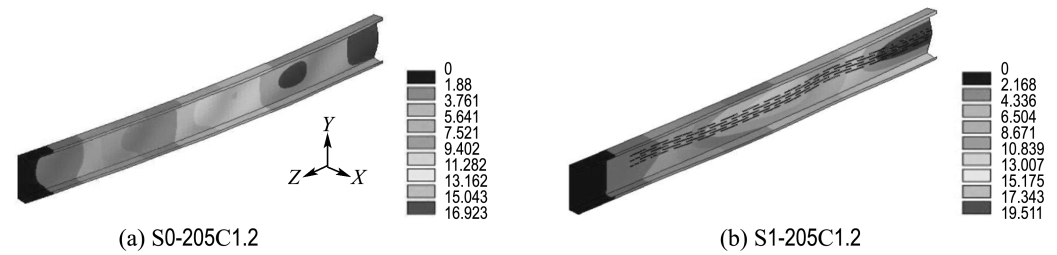


图 2 轴压标准轻钢龙骨屈曲模式比较

Fig. 2 The deformation modes comparisons of axial-compression standard studs

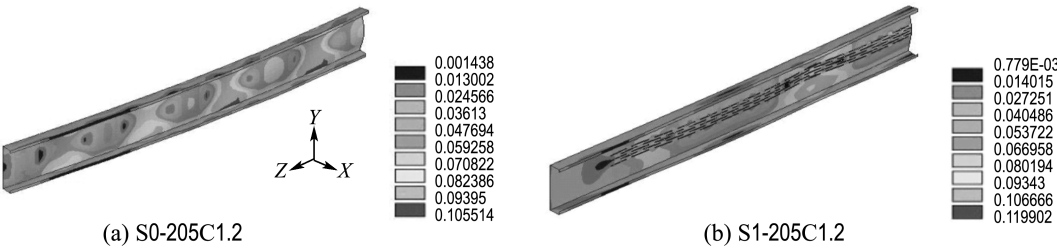


图 3 轴压标准轻钢龙骨应力分布比较

Fig. 3 The stress distribution comparisons of axial-compression standard studs

图 4 为 S0-205C1. 2、S1-205C1. 2 龙骨的轴力-位移曲线比较. 图(a)取轴向位移、图(b)取跨中横向位移. 经计算, S0-205C1. 2 构件的承载力为 11. 7 kN, 而 S1-205C1. 2 构件的承载力为 10. 4 kN, 为前者的 88. 9%. 但是, 如图所示, 开孔后龙骨计算的初始刚度反而比不开孔龙骨略高, 这是因为腹板开孔条带与两个“Γ”形构件所组成的龙骨整体变形能力较弱, 协调变形比较困难.

3. 1. 2 腹板孔洞参数分析 图 5 为 S1-205C1. 2 龙骨随孔洞参数变化的轴力-位移关系曲线. 如图(c)、(d)所示, 随孔洞横向间距和纵向间距的变化, 龙骨的曲线几乎重合, 说明它们对龙骨性能几乎没有影响; 如图(b)所示, 孔洞宽度会对龙骨的刚度有小幅影响, 但对其他性能影响不大; 如图(a)所示, 孔洞长度对龙骨性能影响较大, 由计算

分析可知, 取 70 mm 孔洞长度龙骨的承载力为 100%, 那么, 30、50、90、110 mm 孔洞长度龙骨的承载力分别相差 15. 4%、12. 5%、- 1. 9%、- 2. 9%. 可见, 孔洞长度对承载力影响较为明显, 孔洞长度大于 70 mm 龙骨的承载力降低幅度明显减小. 孔洞长度除对承载力影响较为明显以外, 对龙骨的刚度、变形、延性等都有不同程度的影响.

综上分析可知, 腹板开孔后轴压龙骨的屈曲模式由局部屈曲变为畸变屈曲, 从而导致了龙骨其余各方面力学性能的变化: 由于龙骨的整体变形能力降低, 龙骨加载后的变形减小, 初始刚度增加, 从而开孔后龙骨承载力反而有所增高. 从孔洞参数对龙骨力学性能影响分析可知, 除孔洞长度对龙骨的承载力、变形等方面有较明显的影响外, 其余孔洞参数对龙骨力学性能的影响都不大.

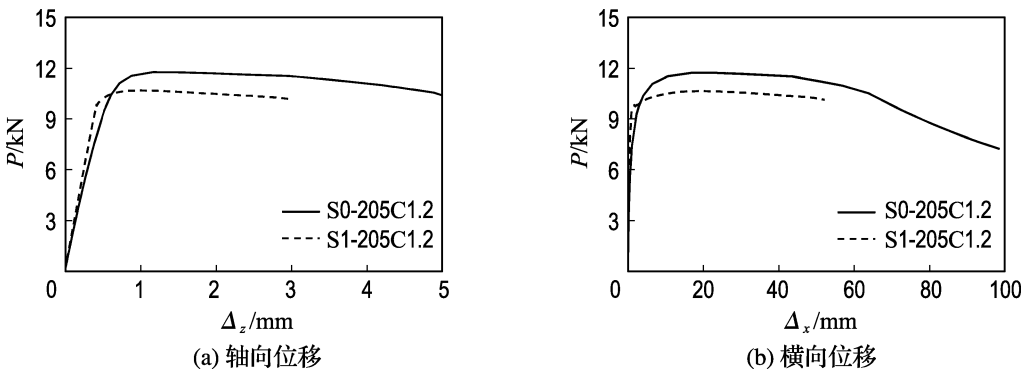


图 4 轴力-位移曲线比较

Fig. 4 The axial compression-displacement curves comparisons

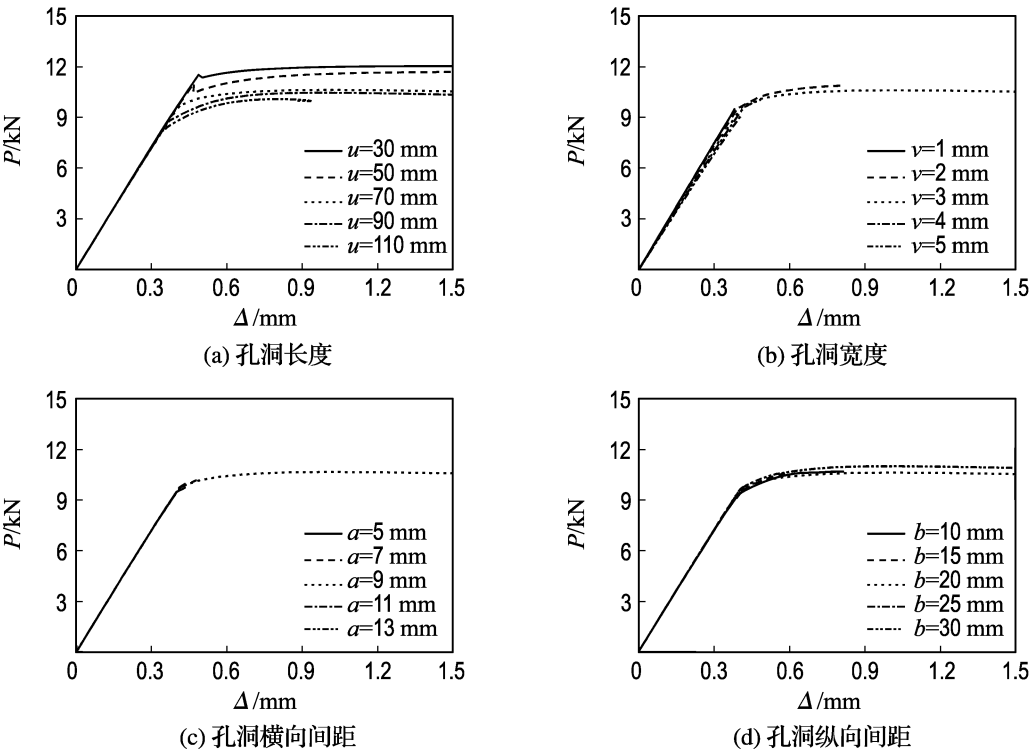


图 5 随孔洞参数变化的轴力-位移关系曲线

Fig. 5 The axial compression-displacement relationship curves with cave parameters

3.2 受弯标准轻钢龙骨力学性能比较

3.2.1 典型龙骨比较分析 由前文分析可知,腹板开孔后轴压龙骨的整体变形能力减弱,所以龙骨的屈曲模式发生了变化、变形幅度也减小.同轴压龙骨规律相似,对于受弯龙骨而言,腹板孔洞同样会使龙骨的整体变形能力减弱,从而导致达到极限弯矩时龙骨的变形量有明显减小,如图 6 所示,两图跨中受压翼缘最大挠曲变形分别为 42.2 mm 和 19.8 mm,相差 1 倍有余;但腹板开孔后受弯构件的屈曲模式并无变化,仍为侧向整体屈曲.

腹板开孔后,受弯构件的应力分布规律大体不变,但如图 7(a)所示,腹板不开孔构件的腹板,受压翼缘应力近似呈波状分布,并且未形成明显的中和轴,而是在腹板上形成了局部应力极小区,应力分

布较复杂;而如图(b)所示,腹板开孔龙骨的应力分布更加规则,在孔洞区域形成应力较小区,近似可以视为构件的中和轴.对比两图可知,两构件的最大应力值和分布区域都相差较大,腹板不开孔、腹板开孔龙骨的最大应力分别为 234 MPa 和 124 MPa,分别分布在跨中受压侧卷边处和孔洞边缘,表明腹板开孔后孔洞边缘会出现应力集中区.

图 8 给出 S0-205C1.2、S1-205C1.2 龙骨的弯矩与曲率、跨中挠度的关系比较曲线.两曲线规律一致,可知龙骨的初始刚度不随腹板开孔而发生变化,但 S0-205C1.2 龙骨的承载力峰值变形要远大于 S1-205C1.2 龙骨.两龙骨的抗弯承载力分别为 1 629.1 N·m 和 1 581.3 N·m,腹板开孔后承载力降低为原来的 97%,降低幅度并不大.

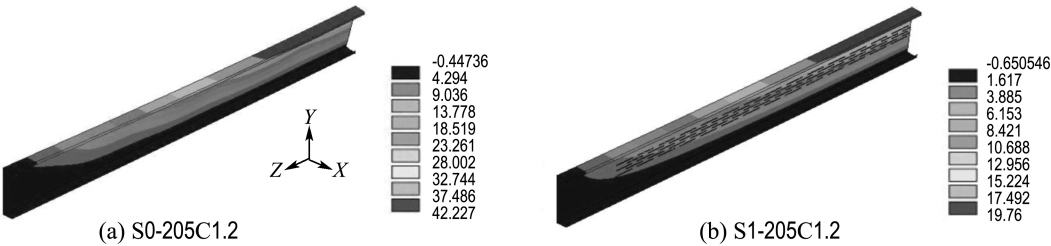


图 6 受弯标准轻钢龙骨屈曲模式比较

Fig. 6 The deformation modes comparisons of bending standard studs

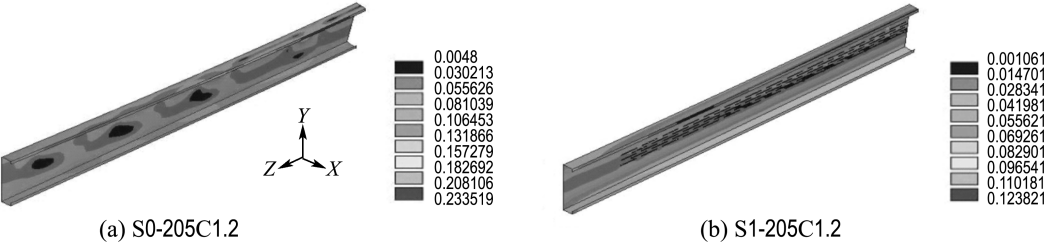


图 7 受弯标准轻钢龙骨应力分布比较
Fig. 7 The stress distribution comparisons of bending standard studs

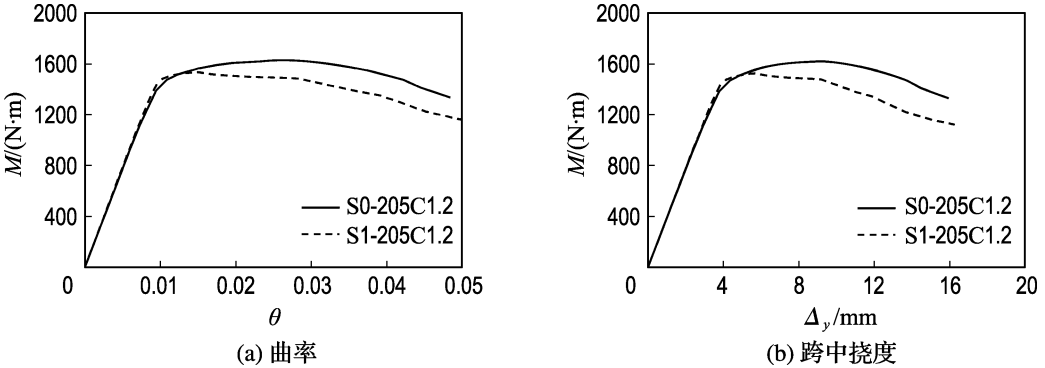


图 8 弯矩和曲率、跨中挠度曲线比较
Fig. 8 Moment-curvature and span deformation relationship curves

3.2.2 腹板孔洞参数分析 图 9 为 S1-205C1.2 龙骨随孔洞参数变化的弯矩-曲率关系曲线。由图 (b)、(c)、(d) 可见,孔洞宽度、孔洞横向间距、孔洞纵向间距对龙骨的力学性能影响不大,例如,当孔洞纵向间距为 10 mm 时的承载力变化相对最大,

但比 20 mm 时也只降低了 4%,可以近似忽略 v 、 a 、 b 对龙骨力学性能的影响。如图 (a) 所示,对构件性能影响最大的孔洞参数仍是孔洞长度,并且当 u 较大时,曲线出现了下降段,说明孔洞长度对龙骨延性有明显影响,孔长增大,延性变差。

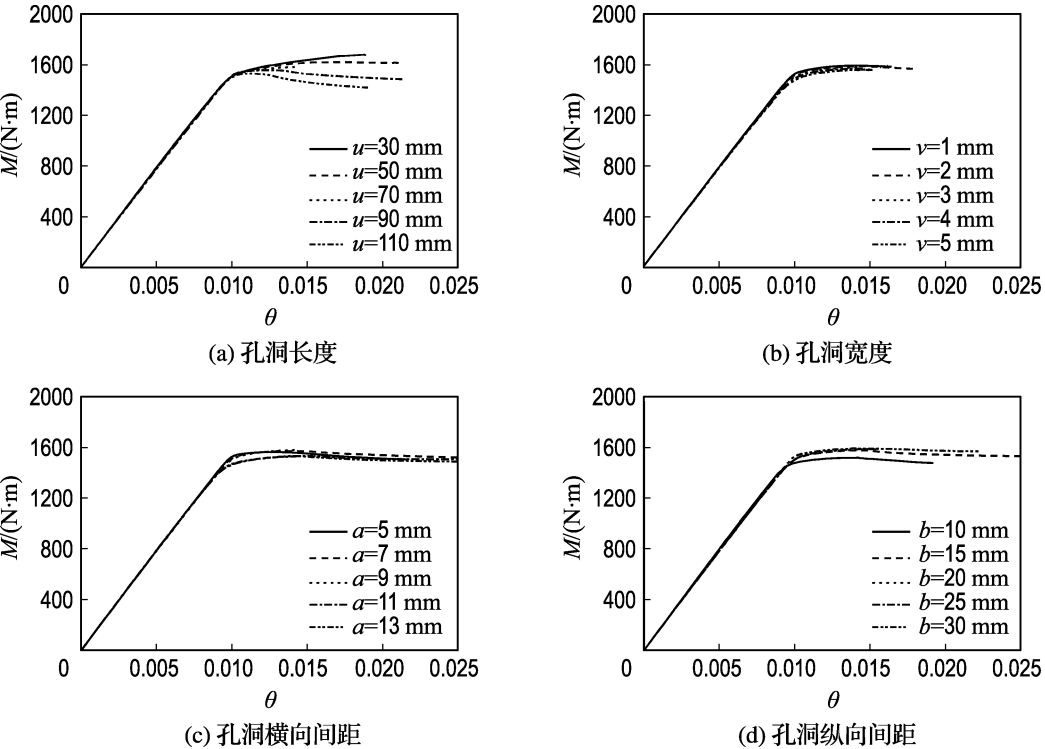


图 9 S1-205C1.2 弯矩-曲率关系曲线
Fig. 9 Moment-curvature relationship curves of S1-205C1.2

3.3 压弯标准轻钢龙骨力学性能比较

3.3.1 典型龙骨比较分析 图 10 选择 90C1.2、140C1.2、205C1.2、255C1.2 四种标准龙骨不同轴压比条件下的构件力学性能,给出龙骨的轴压比-弯矩比($n-m$)相关曲线.如图所示,龙骨腹板高度对相关曲线的影响很明显,对于 90C1.2 龙骨而言,曲线较扁,甚至当轴压比较高时会出现塌缩现象,表明该龙骨不适合用做承受压弯荷载;而对于 205C1.2、255C1.2 龙骨而言,曲线饱满,而且随轴压比增大曲线也越饱满,表明该龙骨适合用来承受压弯荷载.即随龙骨腹板高度增大,曲线逐渐饱满.

图 11 给出 4 种标准龙骨随轴压比变化的弯矩-曲率关系曲线.轴压比对开孔龙骨的影响规律是随轴压比增大,构件极限弯矩降低,达到极限弯

矩时的曲率减小,曲线初始斜率减小.如图(d)所示,由 255 mm 龙骨的弯矩-曲率曲线可见,构件呈明显的脆性破坏特征.

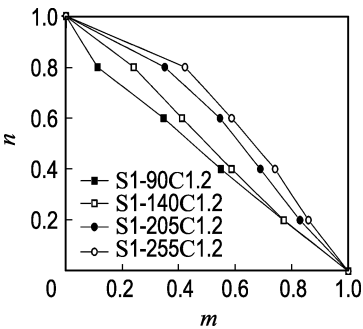


图 10 轴压比-弯矩比相关曲线
Fig. 10 $n-m$ relationship curves

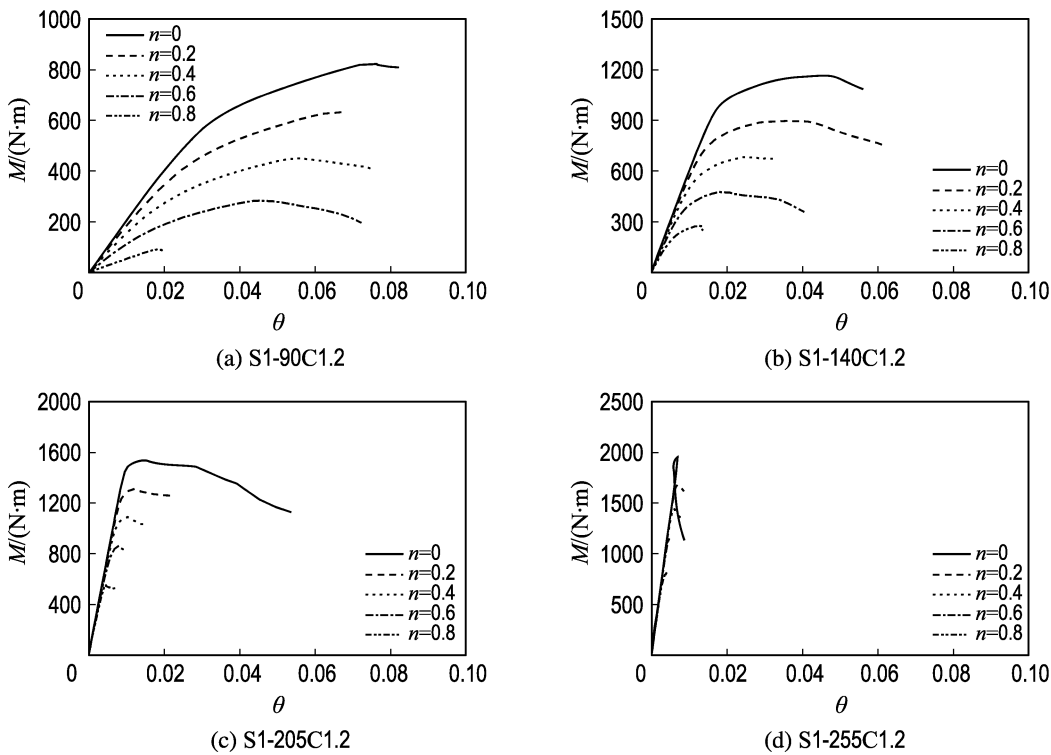


图 11 不同轴压比下弯矩-曲率相关曲线
Fig. 11 Moment-curvature relationship curves under different axial compression ratios

结合对腹板开孔龙骨的相关曲线和弯矩-曲率曲线分析可知,腹板高度较小(90 mm)龙骨的相关曲线出现塌缩,不宜承受压弯荷载;而腹板高度较大(255 mm)龙骨呈明显的脆性破坏特征,也不宜承受压弯荷载;140、205 mm 龙骨有较好的承载能力和变形性能,推荐使用.

3.3.2 腹板孔洞参数分析 图 12、13 分别给出不同孔洞长度和孔洞纵向间距 205C1.2 龙骨的 $n-m$ 相关曲线和弯矩-曲率曲线.图 13(a)、(b)中

$v=3\text{ mm}$, $a=9\text{ mm}$, $b=20\text{ mm}$;图 13(c)、(d)中 $u=30\text{ mm}$, $v=3\text{ mm}$, $a=9\text{ mm}$.由 $n-m$ 相关曲线可见,孔洞长度和孔洞纵向间距对腹板开孔龙骨的抗压弯承载力影响不大.由弯矩-曲率曲线可见,轴压比的变化对不同孔洞参数的龙骨影响规律相似,随轴压比增大,抗弯承载力降低、峰值曲率减小.

现将上述所分析的轴压、弯矩作用下腹板开孔对龙骨的承载力影响规律列于表 2 中.

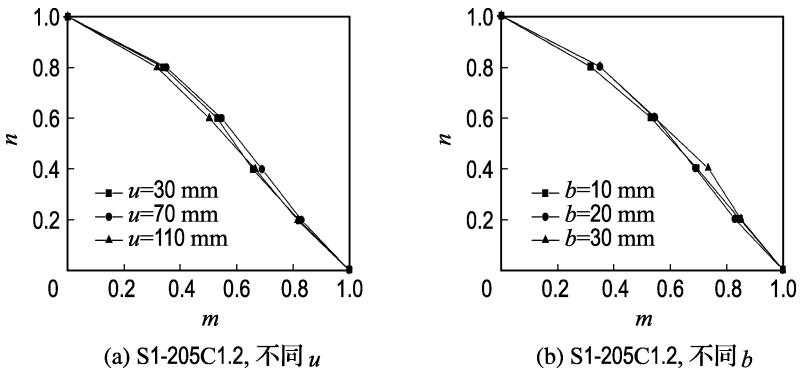


图 12 不同 u 和 b 下轴压比-弯矩比相关曲线
Fig. 12 n - m relationship curves at different u and b

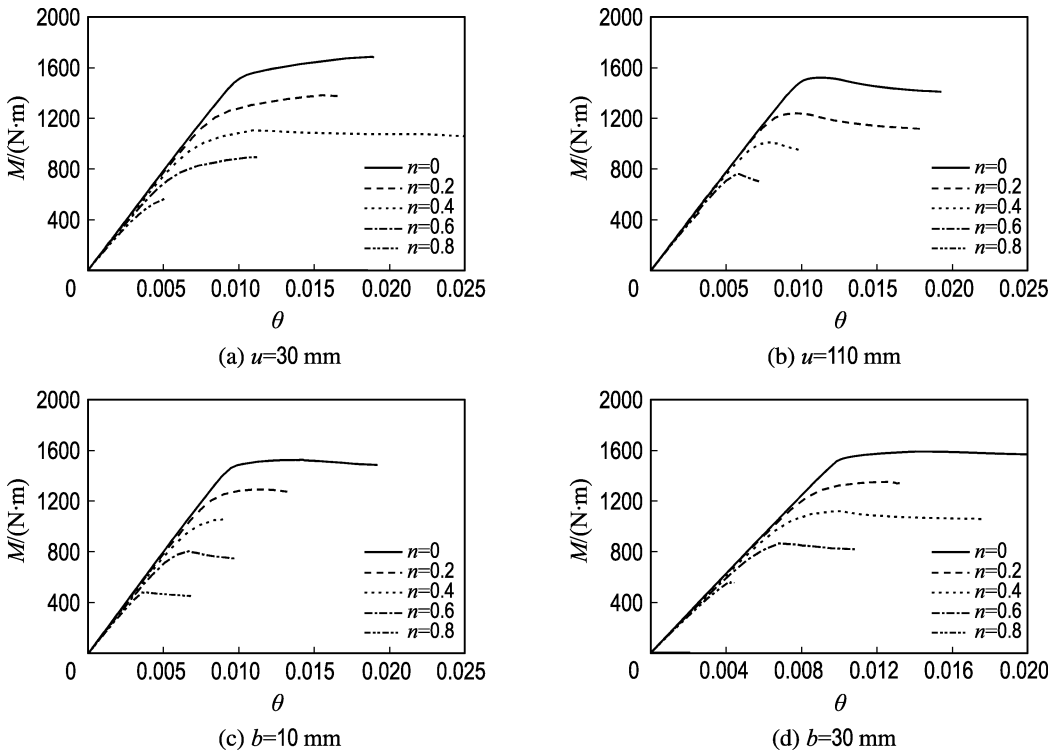


图 13 不同 u 和 b 下弯矩-曲率关系曲线
Fig. 13 Moment-curvature relationship curves at different u and b

表 2 轴压、受弯标准龙骨承载力比较

Tab. 2 Load carrying capacity comparisons of compression and bending standard studs

龙骨规格	轴压承载力			抗弯承载力		
	P_{S0}/kN	P_{S1}/kN	P_{S1}/P_{S0}	$M_{S0}/(\text{N} \cdot \text{m})$	$M_{S1}/(\text{N} \cdot \text{m})$	M_{S1}/M_{S0}
90C1.2	9.6	10.8	112.5	560.3	823.3	146.9
140C1.2	12.6	12.0	95.2	1 254.1	1 167.9	93.1
205C1.2	11.7	10.4	88.9	1 629.1	1 581.3	97.1
255C1.2	11.5	8.7	75.7	1 919.5	1 955.8	101.9
305C1.2	11.3	12.2	108.0	2 280.9	2 301.0	100.9
205C0.9	7.7	5.4	70.1	999.9	1 049.8	105.0
205C1.2	11.7	10.4	88.9	1 629.1	1 581.3	97.1
205C1.5	17.0	17.0	100.0	2 366.6	2 208.8	93.3
205C1.8	21.1	23.1	109.5	3 216.4	3 034.2	94.3
205C2.1	25.0	29.0	116.0	4 057.3	3 658.6	90.2
205C2.4	28.9	35.3	122.1	4 995.6	4 535.2	90.8

4 结 论

(1)由表 2 可知,对于常用做轻钢龙骨外墙立柱的 140、205 系列钢龙骨而言,腹板开孔后龙骨轴压、抗弯承载力分别为不开孔龙骨的 95.2%、93.1%、88.9%、97.1%,影响幅度基本在 10%以内.

(2)由于腹板开孔后,龙骨的整体变形能力降低,龙骨的变形幅度减小,峰值应变相应减小,使龙骨的初始刚度略微增大.

(3)腹板孔洞长度是影响龙骨受力、变形性能的重要参数,随孔洞长度增加,龙骨的承载力下降,延性变差,工程应用应给予重视.

(4)结合对腹板开孔压弯龙骨的相关曲线和弯矩-曲率曲线分析可知,140、205 mm 龙骨有较好的承载能力和变形性能,推荐工程中应用.

参考文献：

[1] 王元清,石永久,陈 宏,等. 现代轻钢结构建筑及其

在我国的应用[J]. 建筑结构学报, 2002, **23**(1):1-8

[2] 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): 1-13

[3] 刘 佳. 冷弯薄壁住宅钢结构的潜在市场及相关设计理论研究[D]. 重庆:重庆大学, 2002

[4] KOSNY J, CHERSTIAN J E. Thermal evaluation of several configurations of insulation and structural materials for some metal stud walls [J]. **Energy and Buildings**, 1995, **22**(3):157-163

[5] HOGLUND T, BURSTRAND H. Slotted steel studs to reduce thermal bridges in insulated walls [J]. **Thin-walled Structures**, 1998, **32**(2):81-109

[6] 中国建筑科学研究院. JG/T 182—2005 低层轻钢结构装配式住宅技术要求[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2005

[7] CHOU S M, CHAI G B, LING L. Finite element technique for design of stub columns [J]. **Thin-walled Structures**, 2000, **37**(5):97-112

Comparative research on mechanical behaviors
of slotted standard steel studs in web plate

ZUO Hong-liang*, WU Sheng

(College of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: As an effective energy saving member, the slotted steel studs in web plate have been widely used in the light gauge steel framing assembly housing systems of cold area. By using the ANSYS nonlinear finite element analysis program, the mechanical behavior rules including the buckling modes,deformation,section stress and bearing capacity of the slotted studs were analyzed systematically under compression, bending or compression-bending loads. The reasonable web slot parameter value is proposed. The analysis indicates that the influence on the decrease of the load carrying capacity for the slotted studs can be controlled within about 10%. The web slots cause the members deformation to reduce, the peak value strain reduces correspondingly, and there is a little increase to the member initial stiffness. The length of the slots is an important parameter that affects the mechanical and deformation behaviors of the slotted standard studs. Both the bearing capacity and ductility decrease when the slot length increases.

Key words: slot in web plate; standard steel studs; mechanical behaviors; finite element analysis (FEA)