

腹板开孔新型冷弯薄壁构件受弯性能研究

武 胜,魏 源

(东北林业大学土木工程学院,黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要 目的 分析经腹板开孔处理的受弯构件静力性能变化,以及各参数值变化后对构件的影响规律. 方法 采用 ANSYS 有限元分析方法,以两种新型构件(HF1、HF2)的截面参数、孔洞参数作为变化量. 对比分析两种新型构件腹板开孔、不开孔的屈曲模式、应力分布、挠度和承载力等. 结果 在常用孔洞参数范围内,构件开孔后性能降幅一般不高于10%,但构件延性会降低;截面高度对构件的抗弯能力起控制性作用;孔洞长度越长,构件的性能损失就越大. 结论 两种新型构件在腹板开孔后抗弯性能损失较小,各类参数取值不同能够影响构件的抗弯承载力.

关键词 冷弯薄壁型钢;腹板开孔;有限元分析;静力性能

中图分类号 TU392

文献标志码 A

Bending Behavior of New Cold-Formed Thin-Walled Members with Web Slotting

WU Sheng, WEI Yuan

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

Abstract: The static performance change of flexural members after web opening treatment and the influence law of each parameter value change on the members are analyzed by ANSYS finite element analysis method. The section parameters and hole parameters of web opening and non-opening members was taken as variables to analyse the buckling mode, stress distribution, deflection and bearing capacity. Within the range of commonly used hole parameters, the performance of members decreases by less than 10% after opening, but the ductility of members decreases; the section height plays a controlling role in the flexural capacity of members; the longer the hole length, the greater the performance loss of members. The flexural performance loss of two new types of members is smaller after web opening, and the different values of various parameters can affect the flexural capacity of members.

Key words: cold-formed thin-walled steel; web with holes; finite element analysis; static performance

收稿日期:2018-10-23

基金项目:国家自然科学基金项目(51008054);教育部中央高校基本科研业务专项基金项目(DL13CB10)

作者简介:武胜(1976—),男,副教授,博士,主要从事钢结构方面研究.

冷弯薄壁型钢常被用作轻钢结构体系建筑的承重或维护构件^[1-4]. 冷弯薄壁型钢结构构件有着极其丰富的截面形式, 常见的截面形式有 C 形、U 形或多肢组合等. 构件腹板开孔是一种用于寒冷地区建筑外墙的节能方法. 目前常用的是在轻钢龙骨墙体中填充岩棉等保温材料的方法, 由于龙骨的存在导致墙体内夹层为非均质情况, 钢构件部位通常保温性能很弱且表面易发生结露、腐蚀等现象. 经腹板沿纵向交错开孔后, 冷空气传递路线拉长, 增强了薄钢构件的热阻, 可以降低龙骨的热损失. 如辅以外贴保温材料的传统外墙保温方法, 将会达到更优的保温能力^[5-7]. 姚行友等^[8]对多组腹板开孔和未开孔冷弯薄壁型钢截面轴压构件进行了畸变屈曲承载力试验研究, 分析了构件的屈曲模式和极限承载力. 腹板开孔对构件畸变屈曲稳定承载力有一定的降低作用. W. B. Yuan 等^[9]用数值方法研究了腹板开有圆形孔洞的受弯构件静力性能, 主要考察了其开孔对极限应力和屈曲模式等方面的性能影响. 采用系统旋转约束模型以说明开孔产生的效应. 当孔径增大时该开孔梁的极限承载力降低, 其半波长相应增大. S. Mehdi 等^[10]研究了工字形受弯构件在均布弯矩作用下的相互作用屈曲模式, 对大量有限元模型进行了广泛的参数化研究, 识别了不同的失稳模式, 包括局部屈曲、侧扭屈曲和剪切屈曲模式, 并提出了基于细长度的弯曲构件屈曲模态分类方法. B. Claudio 等^[11]对带有孔洞的冷弯型钢

货架柱进行了系统研究, 对构件的孔洞形状类型、约束条件等变量变化后的情况进行分析, 强调了材料充分利用的重要性. 笔者采用 ANSYS 有限元分析方法, 以 HF1、HF2 截面受弯构件为研究对象, 对其进行腹板开孔处理, 通过对构件极限弯矩、屈曲模式、应力分布、弯矩-曲率曲线等方面分析, 给出两种受弯构件在开孔前后的静力性能变化, 以及各类参数的影响规律.

1 腹板开孔新型冷弯薄壁型钢梁介绍

图 1 为 HF1、HF2 截面与孔洞参数. HF1 和 HF2 是冷弯薄壁型钢可采用的两种新型截面^[12](见图 1(a)、图 1(b)), 该截面翼缘为封闭形状, 呈相对于强轴对称的布局, 开展的截面形式使其具有更好地抗弯强度. 两种构件尤其适用于轻钢体系的龙骨小梁、钢檩条等抗弯构件, 在较大跨度的前提下, 也可获得较高的抗弯承载力. 笔者基于 HF1、HF2 构件具有强于传统 C 型钢抗弯性能的特点, 结合轻钢龙骨腹板开孔节能方法, 提出了腹板开孔 HF1、HF2 构件(见图 1(c)). h 为截面高度, b 为宽度, 构件长度 l 和板件厚度 t . 构件孔洞参数分别为: 孔洞长度 l_u 、孔洞宽度 l_v 、孔洞横向间距 d_u 、孔洞纵向间距 d_v ^[13-14]. 翼缘被冷弯成空翼缘的形式, 翼缘或腹板的形状比例由横竖向加劲参数控制, 分别是 b_1/b 和 h_1/h . 在构件端部、翼缘与腹板交界

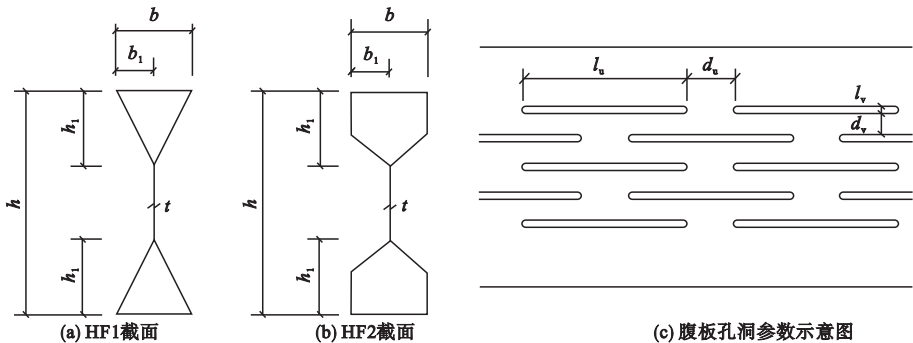


图 1 HF1、HF2 截面与孔洞参数

Fig. 1 HF1, HF2 cross sections and void parameters

处设置预留板段^[15].

2 建立 HF1、HF2 开孔构件有限元模型

2.1 单元选取与网格划分

采用大型有限元通用程序 ANSYS 进行分析.单元类型使用 shell181 平板壳元来模拟薄壁型钢.构件采用整体网格尺寸为 20 mm 的映射方式划分^[16],对于腹板处适当加密,其单元尺寸应考虑腹板开孔造成的应力集中.

2.2 模型假设

建立有限元模型时采用了以下两种假设:①不计冷弯效应和残余应力的影响.由于冷弯薄钢自身成型的原因,其残余应力呈“弯曲线”,数值相对较小且主要集中在构件的角部.而构件角部又由于冷加工效应致使屈服强度有所提高.冷弯效应和残余应力的影响相互中和,所以建立有限元模型时既没有考虑冷弯效应的有利影响,也没有考虑残余应力的有害作用^[17].②不考虑截面弯角的影响.经有限元模型试算后对比可知 HF1、HF2 的弯角效应影响很小,可以忽略不计^[18].

2.3 支座条件与荷载施加

笔者以半模型方式进行建模.在半模型一端即原模型的跨中部设置对称端约束,约束轴向的平动位移和另两个方向的转动.另一端为荷载施加端,采用约束除轴向外的两个平动位移的方式.模拟试验的荷载类型是弯矩,在有限元模型的荷载施加端作用梯度分布力,以有效地模拟端弯矩作用(见图 2).将特征值屈曲分析得到的第一阶屈曲模态各节点的位移特征向量按千分之一比例缩小,作为梁模型的初始几何缺陷,以形成带有极值点的失稳模式^[19].



图 2 构件受弯计算简图

Fig. 2 Calculation sketch of bending members

3 HF1、HF2 开孔标准构件受弯性能分析

3.1 标准构件的变形模式比较

HF1、HF2 受弯标准构件截面参数取值如表 1 所示.图 3 为 HF1、HF2 标准构件在极限荷载下的位移云图.

表 1 HF1、HF2 受弯标准构件截面参数取值

Table 1 Sectional parameters of HF1 and HF2 bending elements

l/mm	h/mm	b/mm	t/mm	l_u/mm	l_v/mm	d_v/mm	d_u/mm	b_1/b	h_1/h
1 500	150	50	1.1	70	2	7	20	1/3	1/4

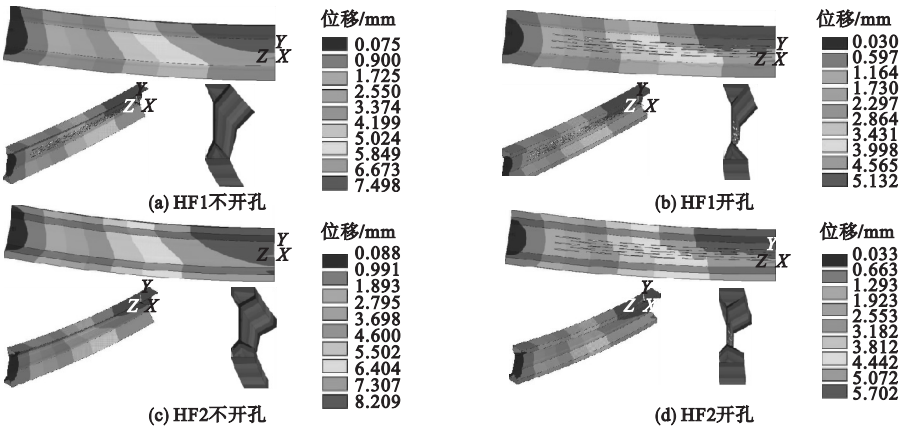


图 3 标准构件在极限荷载下的位移云图

Fig. 3 Displacement nephogram of standard member under ultimate load

图3正视图表达构件的挠曲幅度,侧视图用以判断构件的屈曲模式.两种标准构件都为双轴弯曲的屈曲模式,表现为构件在绕强轴方向整体弯曲的同时,从端部向对称端逐渐倾斜,即发生了侧向失稳.因腹板高度适中,板件高厚比适当,所以腹板没有出现明显的局部屈曲现象.不开孔标准构件同样发生了双轴弯曲的屈曲模式,从图3中可以看出其挠度大小和侧倾弯曲幅度均较对应开孔构件要大.构件在开孔之后位移量会减小,这是由于孔洞的存在限制了构件的变形能力,而且部分构件在开孔后会发生跨中截面高度降低等变形模式,这对构件延性发展也有限制作用.

3.2 标准构件的应力分布比较

图4为构件在极限荷载下的应力分布.

HF1、HF2 构件开孔前后的应力分布规律大体相同,均表现出截面中部应力较小,翼缘及翼缘附近应力较大.不开孔构件能在中轴线附近形成应力极小区(见图4(a)),即近似为中和轴.可以看到构件开孔之后腹板应力分布出现波动,这是由于开孔后构件余留截面不连续,造成了应力集中现象,构件各截面受力情况不均所致.形成了腹板沿纵向断续的点状分布,即开孔构件的中和轴处不能形成连续的应力极小区,但整体应力分布差异不大. HF1 构件开孔前后的最大应力在上翼缘跨中截面附近取得,分别为 237.6 MPa 和 236.3 MPa,最大应力值几乎无变化.所以腹板开孔不改变构件应力的整体分布和最大值,仅影响孔洞附近的应力分布.

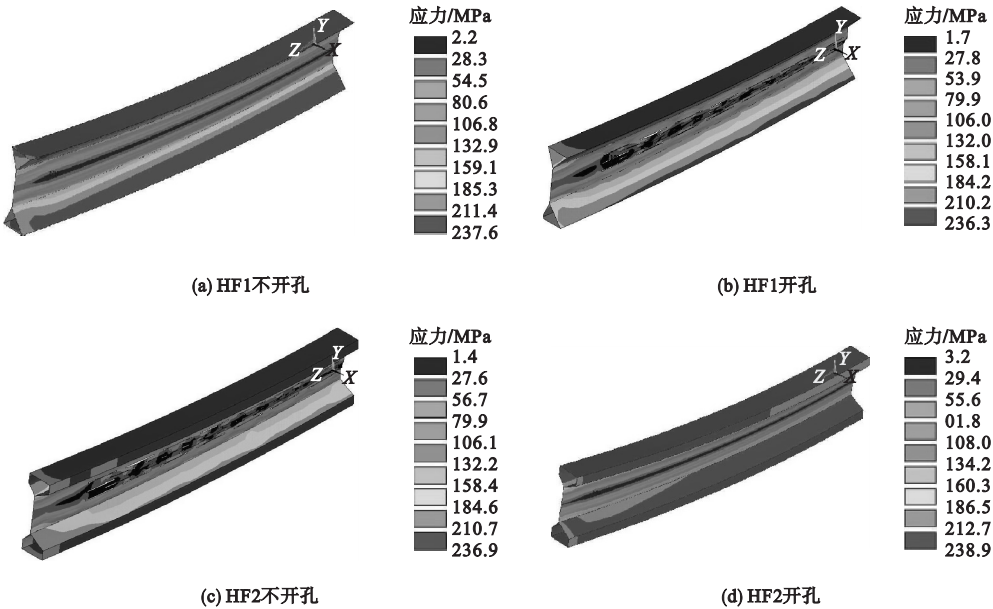


图4 受弯标准构件应力分布比较

Fig. 4 Comparison of stress distribution of standard components under bending

3.3 标准构件的弯矩 - 曲率曲线比较

图5为两种标准构件的弯矩 - 曲率关系曲线,其横坐标曲率 θ 为构件在该时刻杆端截面角点的转角值与半模型杆件长度大小($l/2$)的比值,即对应荷载条件下构件的平均曲率值.在达到比例极限之前,两种构件在开孔前后的曲线斜率近乎相同,说明开孔并

不影响构件的初始刚度.在逐步施加荷载的过程中,开孔构件率先达到极限弯矩,而不开孔构件的强度还能够继续增长. HF1 构件开孔前后的极限弯矩分别为:4 937.6 N·m 和 4 549.7 N·m,相差 8.5%. HF2 构件情况相似,分别为 5 354.2 N·m 和 4 960.1 N·m,相差 7.9%. 两种开孔构件跨中转角幅度都不

大,可以明显看到开孔构件的变形过程较短,即延性降低.

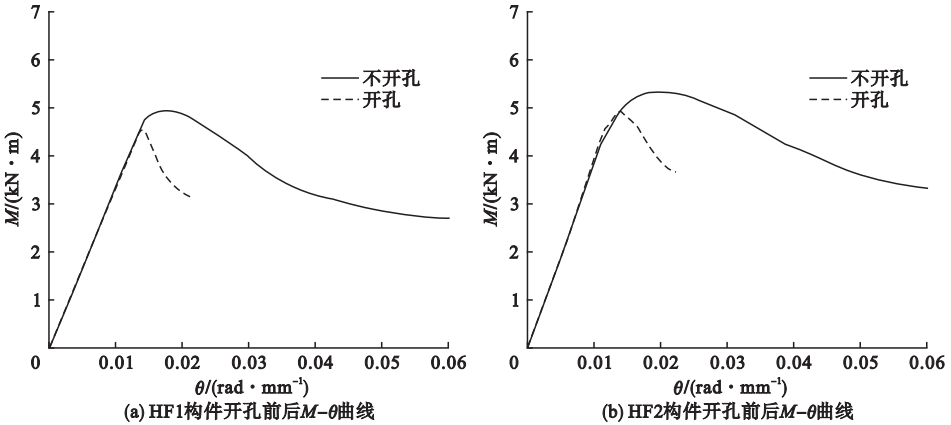


图 5 受弯标准构件弯矩 - 曲率关系比较

Fig. 5 Comparison of moment curvature relations of standard bending members

4 HF1、HF2 开孔构件截面参数分析

4.1 抗弯承载力分析

截面参数的取值不同会对构件的性能产生影响. 表 2 中为 HF1、HF2 受弯构件静力性能的截面参数分析. $b_1/b = 1/2$ 时, 分别变化各项截面参数值, 表中 DF 为双轴弯曲屈曲变形模式; SF 为单轴弯曲屈曲变形模式;

DB 为整体弯曲伴有截面畸变屈曲的变形模式; L 为局部屈曲变形模式^[20]. 相对挠度为构件在达到极限弯矩时所产生的跨中挠度与构件长度的比值. 材料属性 $f_y = 235 \text{ MPa}$ 、 $E = 2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$ 、 $E_s = 2\% E$, M_{\max} 为构件的极限弯矩. 构件命名约定如下: 标准构件仅改变 h 值为 50 mm, 其他参数值不变时, 该构件命名为 $h50$.

表 2 HF1、HF2 受弯构件静力性能的截面参数分析

Table 2 Sectional parameters analysis of static behavior of HF1 and HF2 flexural members

构件名称	腹板开孔 HF1 截面			腹板开孔 HF2 截面		
	$M_{\max}/(\text{N}\cdot\text{m})$	相对挠度	变形模式	$M_{\max}/(\text{N}\cdot\text{m})$	相对挠度	变形模式
$h50$	806.1	1/146	SF	773.6	1/144	SF
$h100$	2 639.6	1/243	SF	2 756.8	1/220	SF
$h150$	4 763.6	1/341	DB	5 475.5	1/182	DF
$h200$	6 882.7	1/441	SF/L	7 789.7	1/405	SF/L
$h250$	9 346.1	1/625	SF/L	1 0678.1	1/543	DF
$b50$	4 763.6	1/341	DB	5 475.5	1/182	DF
$b75$	5 506.7	1/349	DF	6 219.9	1/368	SF
$b100$	5 382.9	1/421	SF/L	6 294.0	1/449	SF/L
$b125$	5 282.8	1/521	SF/L	6 146.3	1/683	SF/L
$b150$	5 278.1	1/572	SF/L	5 997.1	1/696	SF/L
$l1\ 000$	5 537.3	1/177	SF	5 548.3	1/272	DB
$l1\ 500$	4 763.6	1/341	DB	5475.5	1/182	DF
$l2\ 000$	4 315.3	1/283	DF	4 831.0	1/231	DF
$l2\ 500$	4 268.6	1/220	DF	4734.2	1/199	DF
$l3\ 000$	4 193.2	1/189	DF	4 690.4	1/166	DF

从表2可以看出,截面高度为50 mm的HF2腹板开孔构件,在保持其他参数恒定时,仅改变其截面高度为250 mm,则极限弯矩为原来的13.8倍.大截面尺寸的构件一般刚度较大,其相对挠度较低,如表2中h250和b150构件相对挠度值是最低的,产生SF/L模式,构件近似脆性破坏,材料利用率较低.构件在开孔后延性会下降,并且注意到变形能力越小的构件,在开孔后越易发生变形模式改变.以不开孔构件HF1 h150 $b_1/b=1/2$ 为例,其相对挠度在同参数构件中相对较小,为1/288的DF模式.而构件开孔后随即发生屈曲模式的改变,变为SF模式.

当截面宽度 $b \leq 75$ mm时,构件各板件比例适当,故发生整体屈曲.而 $b \geq 100$ mm时,腹板横向板件会发生局部屈曲,从而形成SF/L屈曲模式.当 $b \geq 100$ mm时,构件刚度较大,

产生的相对位移量很小,其受压翼缘会发生较大屈曲,但腹板几乎不出现明显波曲. $l \geq 2\,000$ mm构件的屈曲模式一般为典型的DF模式,其 $M-\theta$ 曲线走势一般带有尖角即弹性极限近似为其极限弯矩,且只有一个拐点.构件相对挠度大,变形良好.从表2中可以看到,HF2构件的相对挠度普遍比HF1要大,尤其在发生DF模式的构件中更为明显,主要是得益于HF2多边形截面具有更好的抵抗侧倾变形的能力,使其在极限状态下能够维持良好的受力形态,所以构件充分变形,挠度较大.另外腹板孔洞的存在会促进腹板拉裂而扩大DF变形的侧移开展幅度.

4.2 弯矩-曲率曲线分析

图6为两种构件对截面参数变化的弯矩-曲率曲线.

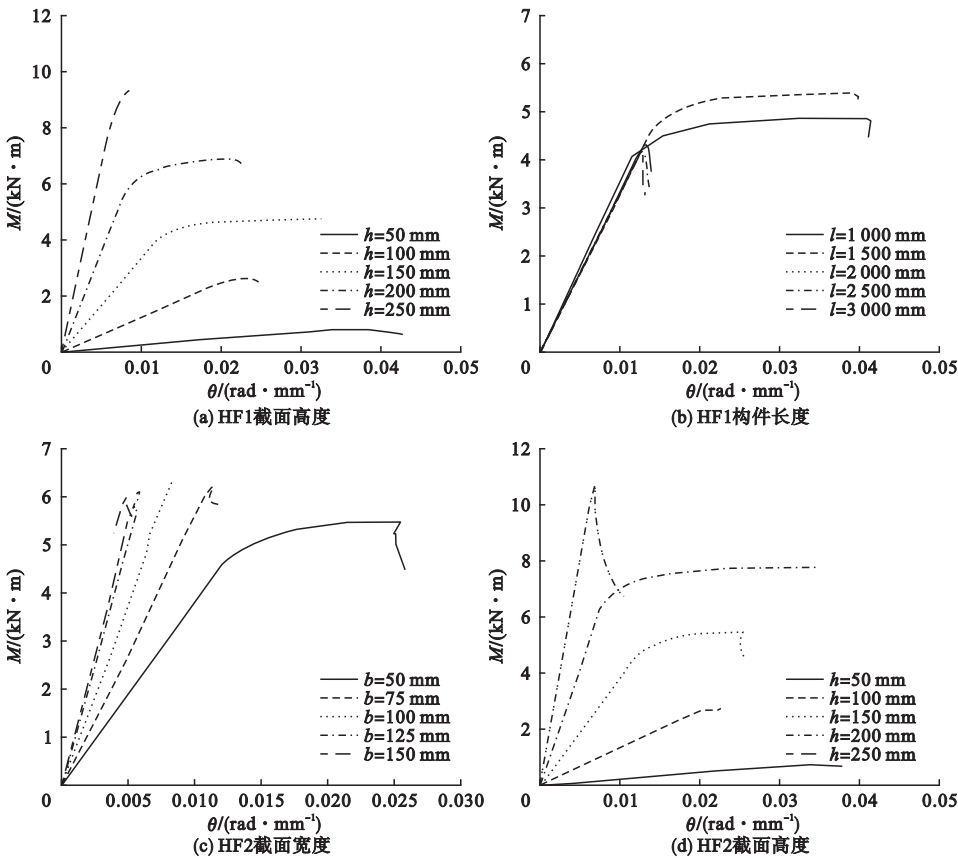


图6 截面参数的弯矩-曲率关系曲线

Fig. 6 Moment Curvature relation curve of section parameters

曲线的峰值代表了该情形的极限弯矩, 曲线上升段的斜率则代表构件的初始刚度, 屈曲后阶段的延伸长度为构件的延性体现. 图中可以明显看到增大截面高度可以同时有效地提高构件的极限弯矩和刚度. 而且图 6 (a) 各曲线斜率分布均匀, 即截面高度与构件刚度成正相关. 截面宽度的增大, 对刚度和抗弯能力的影响较小. 构件长度的变化不改变构件的刚度, 当构件长度 $l \geq 2\,000\text{ mm}$ 时, 图 6(b) 可知构件的延性损失较大, 这是由于构件过长, 侧向稳定性不足而变形幅度过大, 导致构件较早地失去承载力. 当构件各参数取值适中时一般存在多种变形模式叠加的情形, 即多种变形方式共同释放内部应力, 可能形成整体伴有畸变、侧倾伴有局部屈曲等变形模式, 此时的构件的相对挠度较大且 $M-\theta$ 曲线屈曲后延伸较长, 如图 6(c) 中 HF2 $h\,150$ 构件的屈曲后阶段延性较好, 变形充分. 而且该构件在曲线末端产生了下降段, 主要是因为其破坏之前变形过大而产生应力重分布, 由原有的 SF 模式变为侧倾变形方式. 所以构件在承受荷载过程中其屈曲模式可能发生改变. 前面提到 h 值较大构件一般因其各板件高厚比过大而发生 SF/L 屈曲模式, 但也可能因过高的腹板导致侧向失稳而发生 DF 模式, 如图 6(d) HF2 $h\,250$ 构件曲线产生了典型的 DF 走势.

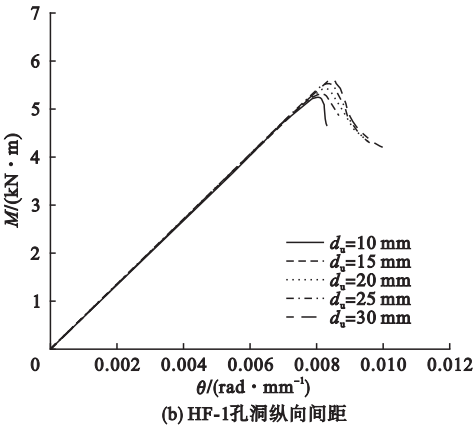
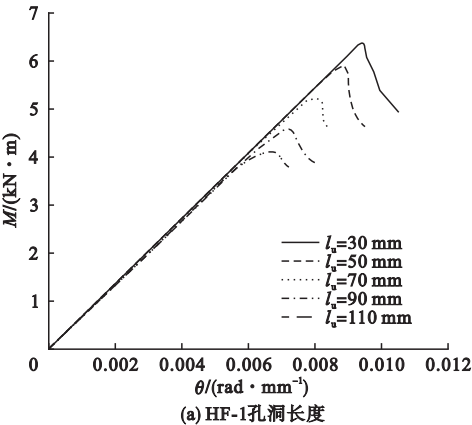
图 6 中有些曲线无法追踪到曲线的下降段, 如 HF1 $h\,150\text{ mm}$ 曲线. 还有些曲线下

降得很急促, 如 HF1 构件的 $l=2\,500\text{ mm}$ 曲线, 甚至出现了反向曲率, 如 HF2 构件的 $b=150\text{ mm}$ 曲线. 这些是由于构件发生了明显的局部屈曲现象. 如 $b=150\text{ mm}$ 情形, 翼缘的水平板件宽厚比过大, 致使板件波形鼓曲.

5 HF1、HF2 开孔构件孔洞参数分析

图 7 为两种构件在不同孔洞参数影响下的弯矩 - 曲率曲线. 可以看到各曲线的直线段部分斜率都是基本一致的, 说明腹板孔洞参数不影响构件的初始刚度. 其中孔洞长度参数对构件的极限弯矩影响较大, 而其他 3 种参数的影响很小.

孔洞长度越长, 构件的抗弯强度越低. 以 HF1 构件为例, 当孔洞长度分别取 30 mm 和 110 mm 时, 两者的极限弯矩相差 55.2% . 孔洞纵向间距越大, 构件的强度越高, 但增长幅度不明显, 当纵向间距分别为 10 mm 和 30 mm 时相差仅 8% . 腹板孔洞宽度参数对构件的影响规律也较强, 随着孔洞宽度的增大, 强度降低, 但降幅不大. HF1 和 HF2 的变化规律近似一致, 只有孔洞横向间距影响的差别较大. HF1 构件在 $d_v=11\text{ mm}$ 时出现了初始刚度小幅增大的现象, 而 HF2 构件 $d_v=13\text{ mm}$ 时, 在极限弯矩附近出现了类似的现象. 总体来说, 在 HF1 和 HF2 构件当中, 孔洞长度是孔洞参数当中的控制性参数.



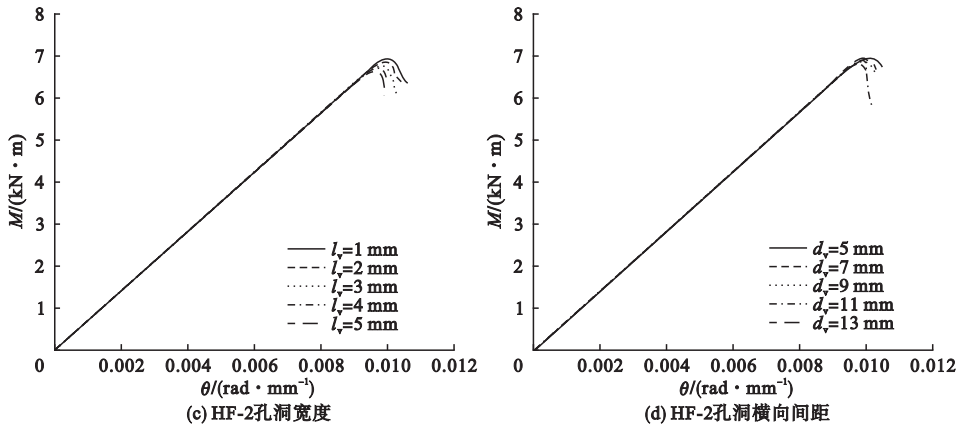


图 7 孔洞参数的弯矩 - 曲率关系曲线

Fig. 7 Moment Curvature relation curves of void parameters

6 结 论

(1)经有限元分析后得知,HF1 和 HF2 构件经腹板开孔后几乎不影响其初始刚度,其承载力降幅在 10% 以内,且保留了足够的构件延性.但开孔后腹板截面削弱,开孔附近存在应力集中.

(2)截面高度是截面参数中的控制性参数,当截面高度增大一倍时,构件承载力平均可达到原来的 2.6 倍.少量增大截面宽度可以提高构件的强度.当截面高宽比低于 3:2 后,构件的翼缘板件宽厚比较大,局部屈曲现象较为显著,其抗弯性能会逐步降低.构件长度 l 增大,强度降低. HF1、HF2 开孔构件在常用 l 参数取值范围内均能够保持较高抗弯性能.

(3)孔洞长度是孔洞参数中的控制性参数,孔洞长度越长,构件的强度越低.孔洞长度每增加 20 mm,HF1 构件抗弯承载力降幅一般超过 10%;HF2 构件降幅低于 8%,但屈曲后延性较差.

参考文献

[1] 许金勇,贾润萍,徐家跃. 装配式冷弯薄壁型轻钢建筑材料发展动态[J]. 应用技术学报, 2017,17(4):289-294.
(XU Jinyong, JIA Runding, XU Jiayue. Research progress of fabricated light-gauge steel residential material[J]. Journal of technology,

2017,17(4):289-294.)
[2] 周波. 现代轻钢结构建筑及其应用分析[J]. 低碳世界,2018(9):209-210.
(ZHOU Bo. Modern light steel structure building and its application analysis [J]. Low carbon world,2018(9):209-210.)
[3] 张枫. 金鑫钢构公司中长期战略研究[D]. 广州:华南理工大学,2011.
(ZHANG Feng. The long-term strategic planning of jinxin company [D]. Guangzhou: South China University of Technology,2011.)
[4] 刘珊珊,徐树成,李宏斌,等. 国内冷弯型钢发展综述[J]. 河南科技,2013(23):53-54.
(LIU Shanshan, XU Shucheng, LI Hongbin, et al. Summary of development of cold-formed steel in China [J]. Journal of Henan science and technology,2013(23):53-54.)
[5] 武胜,张素梅,杨华. 腹板开孔轻钢龙骨复合墙体传热性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2010(4):550-555.
(WU Sheng, ZHANG Sumei, YANG Hua. Experimental research on thermal behavior of light gauge steel-framed composite walls with slotted studs[J]. Journal of Harbin institute of technology, 2010(4):550-555.)
[6] 崔永旗. 严寒地区应用腹板开孔轻钢龙骨复合墙体的热工性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
(CUI Yongqi. Study on hygrothermal performance of the slotted light steel-framed composite walls in cold area [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2006.)
[7] 武胜,张素梅,杨华,等. 轻钢龙骨外墙节能设计方案研究[J]. 工业建筑,2010,40(6):60-67.
(WU Sheng, ZHANG Sumei, YANG Hua, et al. Research on the energy-saving design schemes of light gauge steel-framed composite walls of residential construction [J]. Industrial construction,2010,40(6):60-67.)

- [8] 姚行友,郭彦利. 腹板开圆孔冷弯卷边槽钢轴压构件畸变屈曲承载力试验及计算方法[J]. 工业建筑,2016,46(4):135-141.
(YAO Xingyou, GUO Yanli. Distortional buckling test and calculation method of load-carrying capacity of cold-formed thin-walled steel lipped channel columns with circle holes in web under axial compression[J]. Industrial construction, 2016, 46(4):135-141.)
- [9] YUAN W B, YU N T, LI L Y. Distortional buckling of perforated cold-formed steel channel-section beams with circular holes in web[J]. International journal of mechanical sciences, 2017, 126:255-260.
- [10] MEHDI S, SHI Y J, MONIQUE H. Interactive buckling failure modes of hybrid steel flexural members[J]. Engineering structures, 2016, 125:153-166.
- [11] CLAUDIO B, FABRIZIO M. European alternatives to design perforated thin-walled cold-formed beam-columns for steel storage systems[J]. Journal of constructional steel research, 2015, 110:121-136.
- [12] 武胜,张素梅. 冷弯翼缘闭合新型截面受弯构件性能研究[J]. 工业建筑,2007(5):88-93.
(WU Sheng, ZHANG Sumei. Behavior research of two new kinds of cold-formed flange-closed section bend members[J]. Industrial construction, 2007(5):88-93.)
- [13] 左宏亮,武胜. 腹板开孔标准轻钢龙骨力学性能比较研究[J]. 大连理工大学学报,2009,49(6):876-883.
(ZUO Hongliang, WU Sheng. Comparative research on mechanical behaviors of slotted standard steel studs in web plate[J]. Journal of Dalian university of technology, 2009, 49(6):876-883.)
- [14] 石丽辉,刘明明,韩庆. 梁腹板开孔型梁柱节点滞回性能分析[J]. 钢结构,2017,32(12):26-32.
(SHI Lihui, LIU Mingming, HAN Qing. Hysteretic behavior analysis of beam-to-column connections with perforations on beam web[J]. Steel construction, 2017, 32(12):26-32.)
- [15] 金晓飞,杨华,李明,等. 腹板开孔轻钢墙体传热性能关键参数[J]. 低温建筑技术,2014(10):134-136.
(JIN Xiaofei, YANG Hua, LI Ming, et al. Key parameters of heat transfer performance of light steel wall with web openings[J]. Low temperature architecture technology, 2014(10):134-136.)
- [16] CHOU S M, CHAI G B, LING L. Finite element technique for design of stub columns[J]. Thin-walled structures, 2000, 37(2):97-112.
- [17] 贺晗,余绍锋. 冷弯型钢轴心受压构件在初始缺陷影响下的整体稳定性分析[J]. 钢结构,2011,26(9):7-11.
(HE Han, YU Shaofeng. Research on the overall stability of axial compressed cold-formed steel structure in the effect of initial imperfection[J]. Steel construction, 2011, 26(9):7-11.)
- [18] 徐宏艳. 冷弯薄壁腹板开孔 C 形钢梁稳定承载性能研究[D]. 北京:清华大学,2011.
(XU Hongyan. Study on stability bearing capacity of the web opening C-shaped cold-formed steel beam[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.)
- [19] 陈骥. 钢结构稳定理论与设计[M]. 北京:科学出版社,2011.
(CHEN Ji. Stability theory and design of steel structures[M]. Beijing: Science Press, 2011.)
- [20] 章阳. 冷弯薄壁 C 形钢受弯构件畸变屈曲和局部屈曲性能研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.
(ZHANG Yang. Performance research on local buckling and distortional buckling of cold-formed thin-wall C-section steel flexural members[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.)
- (责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)