

文章编号: 1000-4750(2015)04-0145-08

圆角多边孔蜂窝梁孔间腹板屈曲承载力研究

王培军, 王旭东, 马 宁

(山东大学土建与水利学院, 山东, 济南 250061)

摘 要: 提出一种圆角多边形孔蜂窝梁孔间腹板受剪屈曲承载力的分析方法。该孔型蜂窝梁具有与圆孔蜂窝梁相同的良好受力性能, 但制作工艺简易且不损失扩展比。采用有限元方法研究了跨中集中力作用下蜂窝梁孔间腹板的屈曲模式和屈曲承载力。有限元分析考虑的参数包括孔间距与孔高之比和孔高与腹板厚之比等。并提出了改进的斜压柱理论模型以用于圆角多边形孔蜂窝梁孔间腹板的屈曲承载力计算。

关键词: 结构工程; 蜂窝梁; 圆角多边形孔; 孔间腹板; 局部屈曲; 屈曲承载力; 斜压柱理论

中图分类号: TU391 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.10.0978

WEB-POST BUCKLING OF CASTELLATED STEEL BEAM WITH FILLET CORNER WEB OPENINGS

WANG Pei-jun, WANG Xu-dong, MA Ning

(Civil engineering College of Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China)

Abstract: An analytical method is presented for predicting the buckling strength of the web-post in a castellated steel beam with the newly proposed fillet corner openings. Castellated steel beams with the proposed opening shape have the same good structural performance as those having circular openings. However, they are simple and economical to manufacture and there is no loss in the expansion ratio. The buckling modes and buckling strength of the web-post were studied using the finite element method. The parameters studied included the ratio of the opening distance to the opening height, and the ratio of the opening height to the web thickness. A strut model is proposed to predicate the buckling strength of the web-post in a castellated steel beam with the new fillet corner openings.

Key words: structural engineering; castellated steel beam; fillet corner web opening; web-post; local buckling; buckling strength; strut model

蜂窝梁由实腹 H 型钢沿腹板曲线切割、错位焊接而成, 不仅提高了原梁的抗弯刚度和承载力, 而且方便设备管线布置, 降低楼层高度, 如图 1 所示。除可能发生与实腹钢梁相同的强度破坏、整体弯扭屈曲破坏, 翼缘或腹板局部失稳等破坏之外, 蜂窝钢梁还可能发生三种新的破坏形式^[1]: 1) 孔间腹板水平焊缝受剪破坏; 2) 孔洞处剪力次弯矩导致的上下 T 形截面塑性强度破坏(费氏剪力塑性铰破坏); 3) 孔间腹板屈曲破坏等。当剪力与弯矩比值较大,

或跨高比较小时, 孔间腹板可能在剪力产生的斜向压力作用下发生屈曲破坏^[2]。

国内外已对圆形或多边形孔蜂窝梁孔间腹板的局部屈曲进行了研究。Aglan 等^[3]采用有限元方法分析了六边形孔蜂窝梁孔间距和屈曲临界弯矩间的关系; Redwood 等^[2]针对六边形孔提出关于孔间距和腹板厚的屈曲系数 k ; Demirdjian^[4]在此基础上修改有限元模型, 分别提出修正的剪力屈曲系数 k_v 和弯矩屈曲系数 k_b ; Olander^[5]基于 Osgood 的楔

收稿日期: 2013-10-21; 修改日期: 2014-05-16

通讯作者: 王培军(1976—), 男, 济南人, 副教授, 博士, 从事钢结构抗火性能和设计理论研究(E-mail: tjwangpj@gmail.com).

作者简介: 王旭东(1988—), 男, 青岛人, 硕士生, 从事钢结构稳定性研究(E-mail: wangxudong@sdu.edu.cn);

马 宁(1989—), 女, 济南人, 硕士生, 从事钢结构抗火性能研究(E-mail: maning890923sd@163.com).

体理论给出了计算孔间腹板最大压应力的计算式；Lawson 等^[6]对圆孔蜂窝梁计算孔间腹板的最大压应力进行理论修正；Tsavdaridis 等^[7]基于英国规范中的斜压短柱理论研究了异型孔的孔间腹板屈曲性能，并利用有限元方法对孔尺寸进行了优化^[8]；Ellobody^[9]模拟了蜂窝梁发生弯扭屈曲和腹板局部屈曲的组合破坏方式，分析结果小于规范计算值；Abindin 等^[10]利用无网格伽辽金法分析了多种孔型的局部屈曲响应，确定了该方法的有效性。Erdal 等^[11]试验研究了加载位置和侧向约束对蜂窝梁破坏的影响，得到局部压屈、腹板屈曲和塑性强度的耦合破坏承载力；Durif 等^[12]通过试验研究了正弦孔蜂窝梁孔间腹板屈曲性能。Panedpojanmand 等^[13]基于 Tsavdaridis 试验^[7]，进行了系统的异型孔参数分析。国内对蜂窝梁腹板屈曲问题的研究，主要是将腹板分成孔洞处的上下 T 形截面和孔间腹板三部分，并按照现有的薄板稳定理论^[14]分别进行验算，该方法复杂且在不同孔形下板件区域的划分存在歧义^[15]。

蜂窝钢梁常用孔型包括圆孔、矩形孔和六边形孔。其中圆孔减少了孔角处应力集中，蜂窝梁承载力可提高 10%~15%^[16]。本文提出一种新型圆角多边形孔蜂窝梁，如图 2 所示。与六边形孔蜂窝梁相比，孔角修圆可减少应力集中；与圆孔蜂窝梁相比，不仅切割次数少，而且不损失扩展比。利用有限元方法对新型孔蜂窝梁的孔间腹板屈曲性能进行研究，并提出计算新型孔蜂窝梁屈曲承载力的斜压柱模型。



图 1 蜂窝梁

Fig.1 Castellated Steel Beam (CSB)

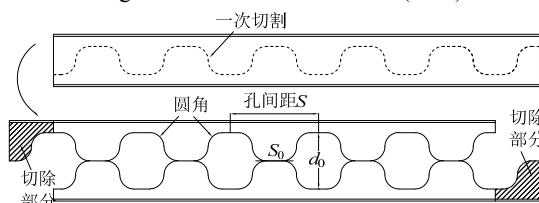


图 2 圆角多边形孔蜂窝梁

Fig.2 CSB with fillet corner openings

1 有限元模型及验证

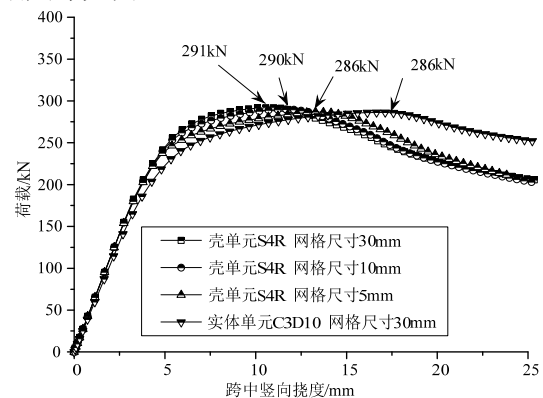
1.1 有限元模型

拟研究蜂窝钢梁截面采用 Tsavdaridis 试验梁 UB457×152×52(梁高 449.8mm，翼缘宽 152.4mm，翼缘厚 10.9mm，腹板厚 5.0mm)^[7]。支座和跨中位置分别设置加劲肋，以防止集中荷载作用下钢梁腹板局部压屈^[17]，支座处加劲肋厚 10.9mm，跨中劲肋厚 20mm。利用有限元软件 ABAQUS 进行蜂窝梁孔间腹板屈曲性能分析，单元类型为 4 节点减缩积分壳单元 S4R，网格尺寸 30mm 并在孔角处加密。钢材采用理想弹-塑性模型，屈服强度取 Tsavdaridis 试验实测强度 375.3MPa^[7]。为方便分析，参数分析时取强度 355MPa，弹性模量取 200GPa，泊松比取 0.3。

初始缺陷形式依据最小势能原理^[18]，采用腹板一阶屈曲模态，最大出平面外位移根据 Redwood 试验^[2]实测的蜂窝梁腹板缺陷，取值 1mm。采用 ABAQUS 中的 Riks 方法求解，获得荷载位移曲线，并将曲线顶点作为蜂窝梁的极限承载力。

网格尺寸和单元类型敏感性分析结果见图 3。单元类型及网格收敛分析结果表明，壳单元 S4R 的三种网格尺寸得到的位移-荷载曲线基本一致，网格尺寸 30mm 的极限荷载相比网格尺寸 5mm 的极限荷载低于 2%。虽然实体单元 C3D10 相比壳单元结果在峰值处对应的挠度稍大，但极限荷载误差低于 2%，本模型主要目的是得到屈曲破坏的极限荷载，因此壳单元 S4R-30mm 的单元满足模拟的基本条件，且计算效率高。

有限元模拟分成两组，第一组比较圆孔、六边形孔和圆角多边形孔蜂窝梁的孔间腹板屈曲性能，取梁跨度 2000mm；第二组比较拉长圆孔和圆角多边形孔的孔间腹板屈曲性能，取梁跨度 2520mm。详细尺寸见图 4。



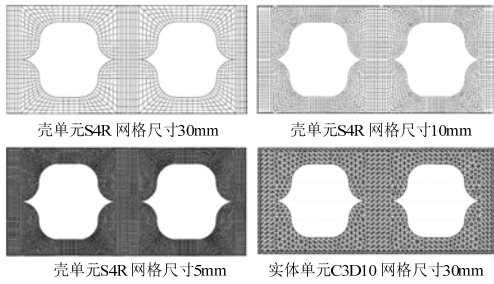


图3 单元类型及网格尺寸收敛分析

Fig.3 Convergence analysis of element type and mesh size

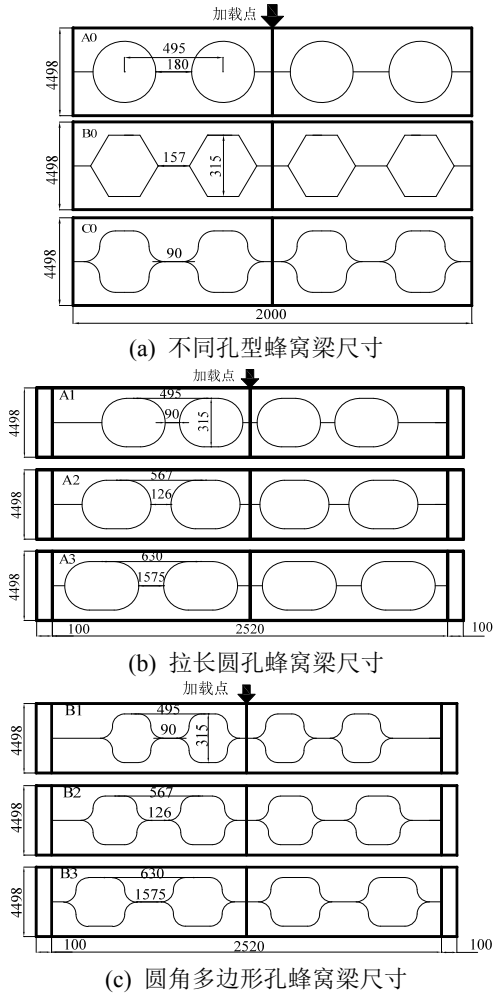


图4 模型尺寸

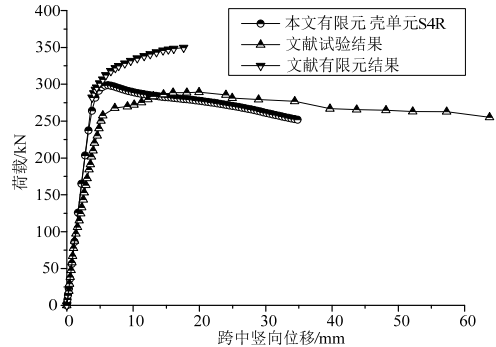
Fig.4 Model dimension

1.2 模型验证

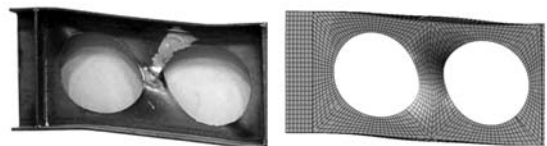
采用 Tsavdaridis^[7]关于圆孔蜂窝梁的试验结果,验证有限元模型中单元类型、网格尺寸、材料模型、边界条件、加载方式和求解方法等对分析结果的影响。有限元模型所得曲线的上升段与文献^[7]的有限元结果和试验结果基本吻合,如图 5(a)所示;且本文的位移-荷载曲线有明显的下降段,揭示了蜂窝梁孔间腹板的屈曲后性能,蜂窝梁承载力开始下降,与试验结果更接近。而 Tsavdaridis^[7]未能给出

位移-荷载曲线的下降段,与试验结果差距较大。

孔间腹板初始缺陷取 1mm 时,蜂窝梁极限承载力为 298.3kN,与试验结果 288.7kN 相差仅 3.4%。相比 $t_w/200$ 缺陷^[7],本文模型分析结果更接近试验值。孔间腹板屈曲破坏模式方面,有限元结果与试验结果基本吻合,如图 5(b)所示。下文参数分析中,偏于安全取初始缺陷大小 1mm。



(a) 位移-荷载曲线比较



(b) 孔间腹板屈曲模式比较

图5 圆孔蜂窝梁试验结果与有限元结果比较

Fig.5 Comparison of test and FE results on CSB's with circular openings

2 不同孔型蜂窝梁孔间腹板屈曲破坏比较

2.1 圆角多边形孔蜂窝梁孔间腹板屈曲

蜂窝梁 C_0 受剪力作用发生孔间腹板屈曲破坏,屈曲模式沿梁高方向呈“S”型,破坏时最大侧移位于孔间腹板的受压区域,分别为 +11mm 和 -11.3mm。图 6 为不同荷载比时孔间腹板的应力分布。在整体弯矩与竖向剪力引起的二次弯矩共同作用下^[19],荷载比为 0.5 时,孔角处就出现屈服,并向翼缘扩展;荷载比为 0.8 时,水平剪力导致孔间腹板的圆角尖端出现应力集中;荷载比到达 0.9 时,下 T 形截面受压区域腹板基本屈服;破坏时上 T 形截面受压区域腹板也基本屈服,但翼缘没有形成塑性铰。图 7(b)给出梁 C_0 的跨中位移-荷载曲线,加载初期梁的刚度基本不变,梁处于抗弯的弹性阶段;加载至约 178kN(荷载比 0.8)后刚度开始下降,梁进入弹塑性阶段;加载至 223kN 时,孔间腹板发生屈曲并导致蜂窝梁迅速失去承载力。

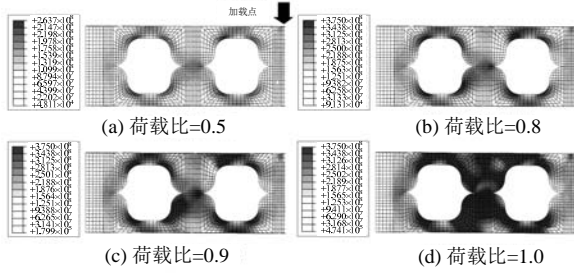
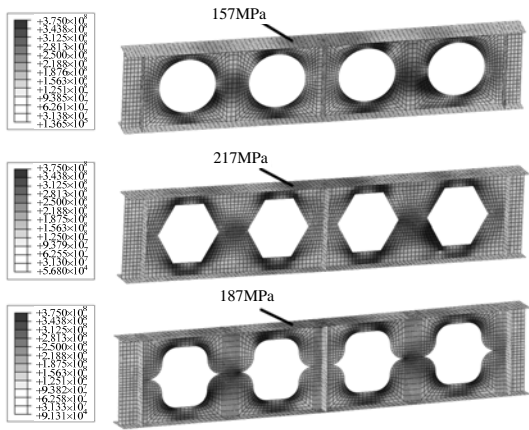


图6 圆角多边形孔蜂窝梁有限元结果

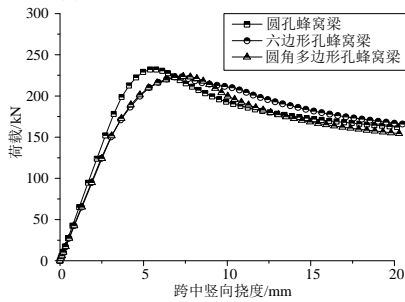
Fig.6 The FE results of CSB's with fillet corner openings

2.2 不同孔形蜂窝梁的孔间腹板屈曲性能比较

圆孔、六边形孔及孔角修圆多边形孔蜂窝梁具有相同的截面高度、跨度、孔高和孔间距。图 7(a) 分别给出各蜂窝梁荷载比为 0.8 时的应力分布和跨中位移-荷载曲线。圆角多边形孔蜂窝梁和六边形孔蜂窝梁的位移-荷载曲线基本重合，圆孔梁的整体刚度略高于前两者，见图 7(b)。三种梁的应力发展趋势相同，首先在孔洞周边出现应力集中，然后应力由孔角向翼缘发展。图 7(a)可以看出相比于六边形孔，圆角多边形孔由于孔角修圆，增加了孔洞处 T 形截面的高度，翼缘的应力较小。相比圆孔蜂窝梁，圆角多边形孔梁的极限承载力仅低 4%，但较圆孔蜂窝梁制作简单。



(a) 破坏时蜂窝梁的应力分布



(b) 跨中位移-荷载曲线

图7 圆孔、六边形孔和圆角多边形孔蜂窝梁结果比较

Fig.7 Comparison of results of CSB's with circular, hexagonal, and fillet corner openings

2.3 拉长圆孔蜂窝梁和圆角多边形孔蜂窝梁的孔间腹板屈曲性能比较

图 8 表示拉长圆孔蜂窝梁和圆角多边形孔蜂窝梁的切割工艺。分别取孔间距/孔高度为 1.57、1.8 和 2.0，比较孔间距对腹板屈曲性能的影响。孔间距增大使剪力次弯矩增大，蜂窝梁可能发生费氏剪力塑性铰破坏。

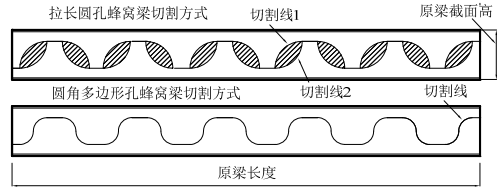
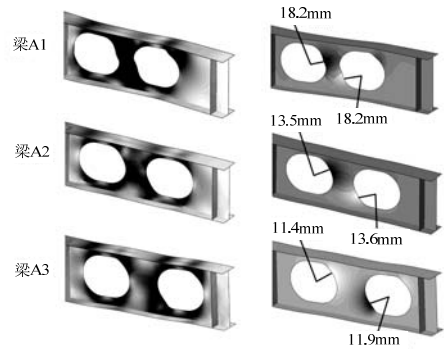


图8 拉长圆孔和新孔型蜂窝梁的切割方法比较

Fig.8 Comparison of the manufacture of CSB's with elongated circular and fillet corner openings

图 9(a)为拉长圆孔蜂窝梁 A₁、A₂、A₃ 的有限元分析结果，梁 A₁、A₂、A₃ 均为孔间腹板屈曲破坏。破坏时腹板的应力分布表明， $S/d_0=1.57$ 时的应力分布更均匀，随着孔间距增大，应力集中到 T 形截面的受压区域。同时，孔间距的变化对屈曲的位置和程度造成影响，图中梁 A₁ 的最大侧移为 18.2mm，位置靠近沿截面高的中部；梁 A₂ 相比梁 A₁ 屈曲位置更靠近翼缘，最大侧移达到 13.6mm；梁 A₃ 的屈曲位置靠近孔角，侧向位移达到 11.9mm。

图 9(b)为圆角多边形孔蜂窝梁 B₁、B₂、B₃ 的有限元分析结果，梁 B₁ 发生孔间腹板屈曲破坏，破坏时孔角和 T 形截面受压区域腹板均屈服，最大侧移为 13.7mm。梁 B₂ 加载初期时孔角局部压屈，靠近加载点的上 T 形腹板表现为“S”型屈曲特征，随后靠近支座的孔洞孔角处产生 4 个塑性铰形成转动机构导致梁的整体破坏，局部压屈引起的侧移达到 10.5mm。梁 B₃ 在加载过程中孔角的局部压屈更加明显，多个塑性铰形成转动机构导致梁发生费氏剪力塑性铰破坏，转角处侧移最大，为 11.4mm。



(a) 拉长圆孔蜂窝梁破坏结果

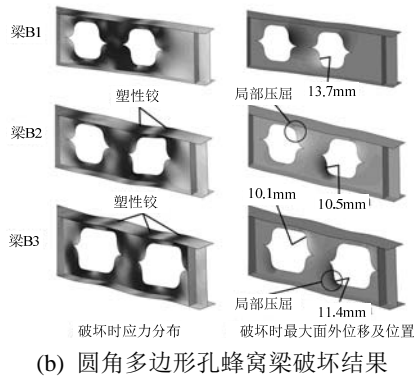


图9 拉长圆孔和圆角多边形孔蜂窝梁有限元结果比较
Fig.9 Comparison of FE results of CSB's with elongated circular and fillet corner openings

表 1 对两种孔型蜂窝梁的有限元结果进行综合比较, 主要包括开孔面积、极限荷载、破坏方式和切割方法等。与拉长圆孔蜂窝梁相比, 由于圆角多边形孔蜂窝梁制作过程中不浪费钢材, 因此当两者具备相同的孔间距时, 后者的孔间腹板宽度更大, 承载力提高。从表 1 可以看出, 孔间距在 1.57、1.8 和 2.0 时, 新孔型蜂窝梁相比前者的承载力提高率分别为 66%、65%和 29%。不仅如此, 相比前者的 2 次切割制作, 新孔切割成本节省一倍。

表 1 拉长圆孔和新孔型蜂窝梁计算结果对比
Table 1 Comparison of results of CSB's with elongated circular and fillet corner openings

模型	孔间距/ 孔高度 S/d_0	开孔面积 比值	极限 荷载/kN	极限荷 载比值	破坏方式	切割 次数
梁 A ₁	1.57	1.285	129.19	0.60	孔间腹板屈曲	2
梁 B ₁	1.57		214.69		孔间腹板屈曲	1
梁 A ₂	1.8		136.80		孔间腹板屈曲	2
梁 B ₂	1.8	1.285	225.05	0.61	强度破坏和 腹板屈曲	1
梁 A ₃	2.0		141.95		孔间腹板屈曲	2
梁 B ₃	2.0	1.285	182.87	0.78	强度破坏	1

3 圆角多边形孔蜂窝梁孔间腹板屈曲承载力计算方法

蜂窝梁孔间腹板宽度、孔间腹板高度及腹板厚度是影响新孔型蜂窝梁承载力和破坏方式的主要因素。本节通过有限元参数分析揭示各参数对孔间腹板屈曲性能的影响, 并提出了用于新孔型蜂窝梁孔间腹板屈曲承载力计算的斜压柱模型。

3.1 圆角多边形孔蜂窝梁孔间腹板屈曲性能参数分析

蜂窝梁截面采用 UB457×152×52, 孔高 d_0 取

315mm。孔间距与孔高度比值分别取为 1.57、1.7、1.8、1.9、2.0、2.1 和 2.2; 孔高与腹板厚的比值分别取 41.4、52.5、63.0 和 80.7。

图 10 所示为屈曲承载力的有限元分析结果, 图中对给定的 d_0/t_w , 曲线上从左到右分别表示 S/d_0 为 1.57、1.7、1.8、1.9、2.0、2.1 和 2.2。带阴影的算例表示构件发生费氏剪力塑性铰破坏。结果表明较厚的腹板不仅减缓了孔间腹板发生屈曲, 而且明显提高梁的抗剪承载力; 参数 S/d_0 增大对承载力的提高率不到 10%, 较大的 S/d_0 易使圆角多边形蜂窝梁破坏方式转变为塑性强度破坏。

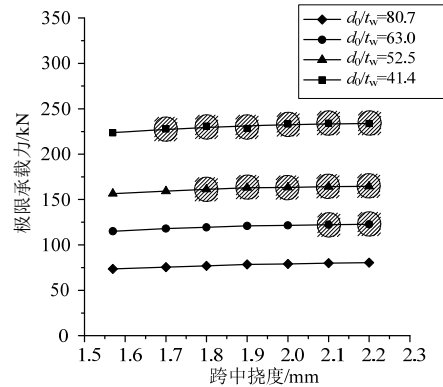


图 10 圆角多边形蜂窝梁屈曲承载力
Fig.10 Buckling strengths of CSB's with fillet corner openings

3.2 圆角多边形孔蜂窝梁孔间腹板局部屈曲承载力计算

3.2.1 圆孔蜂窝梁孔间腹板屈曲承载力计算的斜压柱理论

如图 11 所示, 腹板开圆孔后, 由于剪力在孔间腹板的传递, 所形成的斜向压力使孔间腹板类似斜向受压短柱, 呈“S”型屈曲特征^[20]。国外学者基于受压柱理论, 建立了孔间腹板屈曲承载力的计算方法^[21]。斜压柱的有效压力取作用于上 T 形截面的剪力计算, 有效宽度 b_e 简化取 $S_0/2$, 得到孔间腹板屈曲承载力的计算式:

$$\frac{V_v}{2} = \sigma_c b_e t_w = \sigma_c \frac{S_0}{2} t_w \quad (1)$$

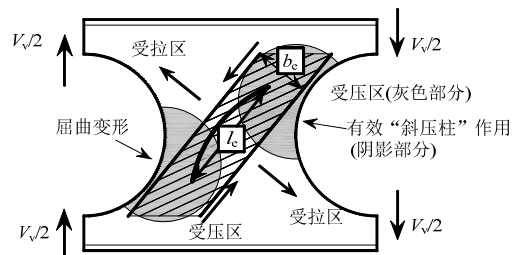


图 11 孔间腹板屈曲性能及斜压柱模型
Fig.11 Web-post buckling behavior and 'strut' model

式中： S_0 为孔间腹板的宽度； t_w 为腹板厚度； σ_c 为板件屈曲强度。根据 BS5950-1 的屈曲曲线 c 查得，同时与斜压柱长细比 λ 相关， $\lambda = l_e \sqrt{12} / t_w$ 。对于圆孔斜压柱的有效长度 $l_e = 0.5 \sqrt{S_0^2 + d_0^2} \leq 0.7 d_0$ ，其中 d_0 为开孔高度。

3.2.2 圆角多边形孔蜂窝梁孔间腹板屈曲承载力计算

圆角多边形孔蜂窝梁孔间腹板处的有效压力、有效长度 l_e 和有效宽度 b_e 均与圆孔蜂窝不同，因此需对斜压柱模型进行修正。修正模型如图 12 所示，有效压力受斜压柱倾角 θ 影响取 $V_\theta = V_v / 2 \cdot \cos \theta$ ；考虑腹板中性轴处的尖角对腹板承载力的削弱，斜压柱有效宽度取 $b_e = 0.8 S_0$ ；且有效长度 l_e 取为 $0.5 \sqrt{S'^2 + d_0^2}$ ，当 $S' / d_0 \geq 2.0$ 时，取 $l_e = 0.5 \sqrt{d_0^2 + d_0^2} = 0.5 \sqrt{2} d_0 \approx 0.7 d_0$ 。

受圆角多边形孔蜂窝梁焊缝长度限制，沿中和轴的水平剪应力须依据焊缝截面受剪屈服进行验算^[23]。水平剪力上限值 V_{hp} 计算式为：

$$V_{hp} = 0.55 S_0 t_w p_y \tag{2}$$

式中， p_y 为钢材屈服强度，取 355MPa。

文献[3]给出了水平剪力 V_h 和竖向剪力 V_v 的关系式，据此可换算得到竖向剪力的上限值 V_{vp} ：

$$\frac{V_h}{V_v} = \frac{S}{d_g - 2y_t} \tag{3}$$

式中： d_g 为蜂窝梁截面高度； y_t 为上 T 形截面质心到上翼缘上底边的距离。

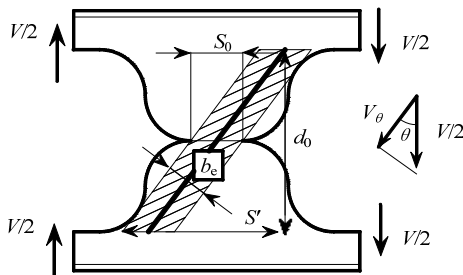


图 12 修正后的斜压柱模型
Fig.12 The modified 'strut' model

对圆孔蜂窝梁孔间腹板的屈曲承载力，斜压柱模型计算结果与 Tsavdaridis 试验结果比较见表 2。传统斜压柱模型得到的屈曲承载力较为保守；修正的斜压柱模型给出的结果更接近试验值。但对于孔间腹板很窄的蜂窝梁(如梁 B1)，即使修正的斜压柱模型，结果仍过于保守。因缺乏试验资料，该

修正斜压柱模型对圆角多边形孔及其他孔型的蜂窝梁的适用性，尚需进一步的验证。

表 2 斜压柱模型与试验结果比较

Table 2 Comparison of the buckling strength from 'strut' and test

试验梁	试验结果	传统斜压柱模型	修正斜压柱模型	Δ_1 (%)	Δ_2 (%)
	F_t /kN	A_c /kN	A_m /kN		
A1	288.7	266.9	290.1	7.6	1.4
B1	255	182.5	205.5	28.4	19.4

$\Delta_1 = \frac{|A_c - F_t|}{F_t} \times 100\%$ $\Delta_2 = \frac{|A_m - F_t|}{F_t} \times 100\%$

3.2.3 圆角多边形孔蜂窝梁孔间腹板屈曲承载力理论公式与有限元方法计算结果比较

表 3 给出了根据修正后的斜压柱模型计算结果与有限元结果的比值，阴影部分表示孔间腹板发生塑性强度破坏。当孔间距较小且腹板厚度较小时，构件发生孔间腹板屈曲破坏，理论计算结果较为保守，这是由于受压区腹板发生“S”型局部屈曲时，翼缘和中心孔间腹板提供了一定的扭转约束和侧向约束^[23-24]，见图 13。随着孔间距增大，中心腹板的约束作用削弱，理论值接近有限元结果。当比值大于 1.0 时，理论值偏大，对于计算屈曲承载力不再适用，同有限元分析结果中梁发生塑性强度破坏的结果相符合。

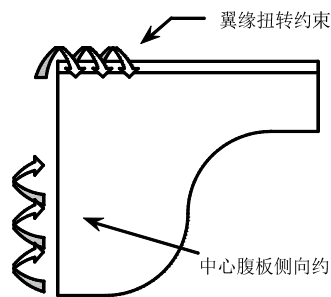


图 13 翼缘和中心腹板的约束作用

Fig.13 Constraints provided by flanges and central webs

表 3 孔间腹板屈曲承载力理论值与有限元结果比较

Table 3 Comparison of the web-post buckling strengths from the analytical model and FE analysis

S/d_0	3.9mm	5.0mm	6.0mm	7.6mm
1.57	0.33	0.53	0.68	0.90
1.7	0.40	0.66	0.86	1.17
1.8	0.45	0.75	1.00	1.39
1.9	0.52	0.88	1.17	1.67
2	0.56	0.95	1.29	1.86
2.1	0.64	1.09	1.49	2.18
2.2	0.73	1.24	1.70	2.52

3.2.4 孔间腹板屈曲的上限

根据有限元结果,当蜂窝梁发生费氏剪力塑性铰破坏时,可将圆形孔等效为矩形孔(见图 14),根据孔角位置 T 形截面形成塑性铰确定极限弯矩 M_{pt} ,作为该破坏方式下的极限承载力^[7]。对圆角多边形孔蜂窝梁,修正后的等效矩形孔如图 14(a)所示。等效开孔宽度 $c=c'+S_0/2$,式中附加宽度 c' 根据孔高/腹板厚,由式(5)计算:

$$\frac{V_v}{2} = \frac{M_{pt}}{\text{有效开孔宽度}c} \quad (4)$$

$$c' = C_1 \cdot \left(\frac{d_0}{t_w}\right) + C_2 \cdot \left(\frac{d_0}{t_w}\right)^2 \quad (5)$$

其中:系数 C_1 和 C_2 通过数值拟合确定分别为 0.007 和 -0.154; 塑性极限弯矩 M_{pt} 根据 EC3 规范计算,公式如下:

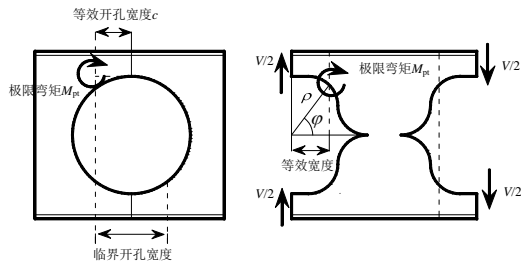
$$M_{pt} = p_y \cdot A_1 \cdot y_1 + p_y \cdot A_2 \cdot y_2 \quad (6)$$

$$A = b_f \cdot t_f + d_T \cdot t_w \quad (7)$$

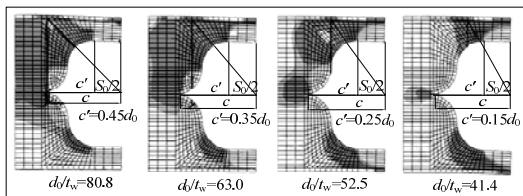
$$A_1 = A_2 = \frac{1}{2} A \quad (8)$$

其中: A 为孔洞处 T 形截面面积; y_1 、 y_2 为等面积轴到上下 T 截面形心的距离。

表 4 给出了孔间腹板屈曲抗剪承载力和有效计算截面全塑性抗剪承载力的比值。该比值准确地反映了不同孔况受剪的破坏方式。当比值小于 1 时,剪力承载力受屈曲破坏控制;当比值大于 1 时,则由塑性强度破坏控制剪力承载力。首先根据表 4 判断构件发生破坏的控制条件,然后根据式(1)或式(4)计算孔间腹板的抗剪承载力,结果如图 15 所示。



(a) 等效开孔宽度



(b) 等效开孔宽度的附加值

图 14 等效矩形孔有效宽度

Fig.14 Equivalent width of equivalent rectangular opening

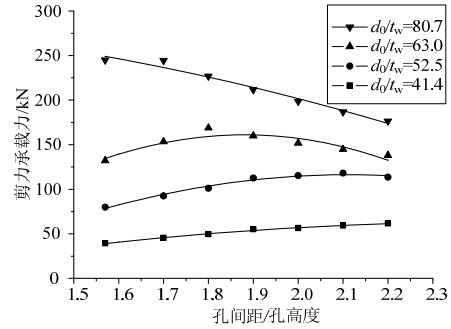


图 15 考虑不同破坏方式的孔间腹板抗剪承载力

Fig.15 Shear capacities of web-posts considering different failure modes

表 4 孔间腹板屈曲抗剪承载力与截面塑性抗剪承载力的比值

Table 4 Ratio of web post shear buckling capacity to plastic shear capacity

S/d_0	3.9mm	5.0mm	6.0mm	7.6mm
1.57	0.54	0.69	0.84	1.10
1.7	0.60	0.78	0.96	1.26
1.8	0.65	0.85	1.04	1.36
1.9	0.70	0.93	1.15	1.55
2	0.73	0.97	1.20	1.59
2.1	0.79	1.06	1.31	1.74
2.2	0.86	1.15	1.43	1.90

4 结论

通过有限元方法对新型圆角多边形孔蜂窝梁的孔间腹板屈曲进行研究。比较了圆角多边形孔蜂窝梁与六边形孔、圆孔蜂窝梁及加长圆孔蜂窝梁孔间腹板屈曲性能,并提出了用于圆角多边形孔蜂窝梁孔间腹板屈曲承载力计算的斜压柱理论:

(1) 分析结果表明新型圆角多边形孔蜂窝梁孔间腹板在破坏方式、应力发展、极限承载力、出平面位移等方面均与圆孔蜂窝梁接近;与拉长圆孔蜂窝梁相比,在开孔宽度较大的情况下,圆角多边形孔蜂窝梁的孔间腹板在强度和稳定两方面都具有优势,但孔宽过大会增加剪力二次弯矩的作用,导致强度破坏。

(2) 提出了用于圆角多边形孔蜂窝梁孔间腹板屈曲承载力计算的斜压柱理论,给出了斜压柱有效压力、有效长度和有效宽度的计算公式;并且给出了孔间腹板屈曲承载力的上限值。

参考文献:

[1] Demirdjian S. Stability of Castellated Beam Webs [R]. Montreal, Canada: bMcGill University, 1999.
 [2] Redwood R G, Demirdjian S. Castellated beam web buckling in shear [J]. Journal of Structural Engineering,

- American Society of Civil Engineers, 1998, 124(8): 1202—1207.
- [3] Aglan A A, Redwood R G. Web buckling in castellated beams [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1974, 57(2): 307—320.
- [4] Demirdjian S. Stability of Castellated Beam Webs [R]. Ottawa, Canada: National Library of Canada, 1999.
- [5] Blodgett O W. Design of Welded Structures [M]. The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, 1963: 461—503.
- [6] Lawson R M, Limb J, Hicks S J, Simms W I. Design of composite asymmetric cellular beams and beams with large web openings [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62(6): 614—629.
- [7] Tsavdaridis K D, Mello C D. Web buckling study of the behaviour and strength of perforated steel beams with different novel web opening shapes [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(10): 1605—1620.
- [8] Tsavdaridis K D, Mello C D. Optimisation of novel elliptically-based web opening shapes of perforated steel beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 76(1): 39—53.
- [9] Ellobody E. Nonlinear analysis of cellular steel beams under combined buckling modes [J]. Thin-Walled Structures, 2012, 52(1): 66—79.
- [10] Abidin A R Zainal, Izzuddin B A. Meshless local buckling analysis of steel beams with irregular web openings [J]. Engineering Structures, 2013, 50(1): 197—206.
- [11] Erdal F, Saka M P. Ultimate load carrying capacity of optimally designed steel cellular beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 80(1): 355—368.
- [12] Durif S, Bouchaïr A, Vassart O. Experimental tests and numerical modeling of cellular beams with sinusoidal openings [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 82(1): 72—87.
- [13] Panedpojaman P, Thepchatri T, Limkatanyu S. Novel design equations for shear strength of local web-post buckling in cellular beams [J]. Thin-Walled Structures, 2014, 76(1): 92—104.
- [14] 徐国林, 盛冬发, 张庆文, 柏亚双, 阳高. 带孔洞损伤弹性矩形板的屈曲[J]. 工程力学, 2014, 31(1): 154—159.
Xu Guolin, Sheng Dongfa, Zhang Qingwen, Bo Yashuang, Yang Gao. The buckling of a damaged rectangular plate [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(1): 154—159. (in Chinese)
- [15] 王庆利, 曹周平. 纯弯状态下蜂窝梁腹板稳定问题研究[J]. 结构分析与计算, 2001, 16(2): 42—44.
Wang Qingli, Cao Zhouping. Study on web stability of castellated beams under pure bending condition [J]. Structure Analysis and Calculation, 2001, 16(2): 42—44. (in Chinese)
- [16] 李霞. 卧式似椭圆孔蜂窝梁的制作与设计[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
Li Xia. Fabrication and design of castellated beam with horizontal elliptical web openings. Master Dissertation of Zhongnan University [D]. Changsha: Central South University, 2007. (in Chinese)
- [17] Kerdel D, Nethercot D A. Failure modes for castellated beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1984, 4(4): 295—315.
- [18] 彭林欣, 杨绿峰. 基于一阶剪切变形理论和移动最小二乘近似的加筋板屈曲临界荷载求解[J]. 工程力学, 2012, 29(7): 42—49.
Peng Linxin, Yang Lufeng. Critical buckling load calculation of ribbed plates by the first-order shear deformation theory and the moving-least square approximation [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(7): 42—49. (in Chinese)
- [19] Chung K F, Liu T C H, Ko A C H. Investigation on Vierendeel mechanism in steel beams with circular web openings [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2001, 57(5): 467—490.
- [20] 张益凡. 蜂窝梁的整体和局部稳定性分析[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
Zhang Yifan. Study on global stability and local stability of castellated beams. Master Dissertation of Zhongnan University [D]. Changsha: Central South University, 2008. (in Chinese)
- [21] BS5950-1: 2000, Structural use of steelworks in building [S]. UK: British Standard Institution, 2000.
- [22] Husain M U, Speirs W G. Failure of castellated beams due to rupture of welded joints [J]. Acier-Stahl-Steel, 1971, 1(2): 12—25.
- [23] Durif S, Bouchaïr A. Behavior of cellular beams with sinusoidal openings [J]. Procedia Engineering, 2012, 40(1): 108—113.
- [24] 贾连光, 李庆文, 刘永方. 蜂窝梁抗剪性能分析与计算[J]. 工程力学, 2012, 29(2): 23—56.
Jia Lianguang, Li Qingwen, Liu Yongfang. Performance analysis and calculation of shear force resistance for cellular beam [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(2): 23—56. (in Chinese)