

蜂窝梁破坏模式研究新进展

廖利航¹, 耿凯^{1*}, 周洋², 杨康¹

¹辽宁科技学院资源与土木工程学院, 辽宁 本溪

²启迪设计集团股份有限公司, 江苏 苏州

收稿日期: 2023年5月25日; 录用日期: 2023年6月15日; 发布日期: 2023年6月27日

摘要

蜂窝梁是在H型钢梁的腹板上进行切割、错位焊接而形成的, 具有自重轻、抗弯刚度大、造型美观、便于穿越建筑管线、降低层高等特点。开孔导致了梁截面的削弱, 使得蜂窝梁的破坏模式趋于复杂。通过文献调研法, 总结了蜂窝梁的五种破坏模式以及残余应力对蜂窝梁性能的影响, 分析了已有设计计算方法的适用性与局限性, 展望了蜂窝梁进一步的研究方向。

关键词

蜂窝梁, 破坏模式, 残余应力

New Progress in the Study of Failure Modes of Castellated Beams

Lihang Liao¹, Kai Geng^{1*}, Yang Zhou², Kang Yang¹

¹School of Resources and Civil Engineering, Liaoning Institute of Science and Technology, Benxi Liaoning

²Tus-Design Group Co., Ltd., Suzhou Jiangsu

Received: May 25th, 2023; accepted: Jun. 15th, 2023; published: Jun. 27th, 2023

Abstract

Castellated beam is formed by cutting and dislocation welding on the web of an H-shaped steel beam, which has the characteristics of light weight, high bending stiffness, beautiful shape, easy to cross-building pipelines and low story height. Opening holes lead to the weakening of beam section, which makes the failure mode of castellated beam more complicated. Through literature investigation, this paper summarizes five failure modes of castellated beams and the influence of residual stress on the performance of castellated beams, analyzes the applicability and limitations of

*通讯作者。

文章引用: 廖利航, 耿凯, 周洋, 杨康. 蜂窝梁破坏模式研究新进展[J]. 土木工程, 2023, 12(6): 784-792.

DOI: 10.12677/hjce.2023.126089

existing design and calculation methods, and looks forward to the further research direction of castellated beams.

Keywords

Castellated Beams, Failure Modes, Residual Stress

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

20 世纪 90 年代, 随着自动化切割与焊接技术的提升, 蜂窝式构件开始在高层建筑物中加以推广。蜂窝梁是在普通工字型钢梁或 H 型钢梁的腹板上按一定的折线进行切割后错位焊接组合而形成的, 如图 1 所示。按蜂窝孔洞形状不同, 分为正六边形孔、矩形孔、圆形孔、椭圆形孔以及正弦形孔, 其中正六边形孔和矩形孔通过一次切割后即可错位焊接形成蜂窝梁, 但在孔角处会存在明显的应力集中。圆形孔、椭圆形孔在加工时需经过两次切割, 但可以明显改善孔角处的应力集中, 可显著提高 10%~15% 的承载能力[1]。正弦形开孔是在圆孔的基础上提出的一种新型开孔方式, 相比于圆孔, 既减少了切割次数, 也不会造成材料的浪费[2]。蜂窝梁与原实腹梁相比, 具有自重轻、抗弯刚度大、造型美观、便于穿越建筑管线、降低层高等特点。在承载力基本相同的情况下, 蜂窝梁可节约钢材 25%~50%, 减轻结构自重, 节省防护与运输安装费用 1/3~1/6 [3]。

蜂窝梁的诸多优点引起了国内外学者的广泛关注, 然而值得注意的是, 蜂窝梁的腹板高度与原实腹梁相比有较大提高, 再加上开孔对腹板截面的削弱, 使得蜂窝梁受力后易发生局部屈曲破坏。此外, 蜂窝梁在制作过程中的切割与焊接会导致残余应力的存在, 残余应力的数值大小和分布范围将导致蜂窝梁截面刚度的降低, 提前进入屈服状态, 因此, 蜂窝梁的破坏模式与实腹梁有较大不同[4]。



Figure 1. The manufacturing process of castellated beams

图 1. 蜂窝梁的制作加工过程

已有研究表明, 蜂窝梁的主要破坏模式包括费氏塑性铰破坏(Vierendeel mechanism, 简称 VM 机制)、孔间腹板屈曲(web post buckling, 简称 WPB)也称墩板屈曲、整体弯扭失稳(Lateral torsional buckling, 简称 LTB)、畸变屈曲破坏(Lateral distortion buckling, 简称 LDB)以及腹板水平焊缝的断裂破坏[5]。其中, 焊缝的断裂破坏是脆性破坏, 应通过合理的设计予以避免。值得注意的是, 蜂窝梁的破坏往往不是由于

单一破坏模式导致的，而是上述破坏中的某几种模式同时发生。

2. 费氏塑性铰破坏

孔洞的存在改变了蜂窝梁剪力的传递路径，剪力在开孔截面处产生次生弯矩 M_v ，次生弯矩和整体弯矩以及剪力的共同作用将导致梁桥处产生塑性铰，将这种空腹弯矩破坏称之为费氏塑性铰破坏，如图 2 所示。美国钢结构学会出版的蜂窝梁及其组合梁设计指南[6]建立了塑性铰破坏下蜂窝梁桥板处轴力与弯矩的线性关系，从而评估出蜂窝梁的极限承载能力。Chung 等人[7]通过建立广泛的有限元模型，详细分析论述了上述设计方法，其研究将蜂窝孔两侧分为高弯矩区和低弯矩区，结果表明当塑性铰在高弯矩区形成时，该设计方法趋于保守，其预测的承载力低于研究成果 10~15%，当塑性铰在低弯矩区形成时，该设计方法预测的承载力高于研究成果 5~10%。同时，基于数值分析结果，利用弯剪耦合曲线，评估了中大型圆形孔蜂窝梁的承载能力。Tsavdaridis 等人[8]重点对圆形孔和新型孔(包括椭圆形、细长形等)蜂窝梁进行了有限元研究工作，研究结果表明，VM 机制的形成同时受到开孔尺寸和开孔形状的影响，通过参数化分析，给出了腹板开孔的临界长度和高度，改进了已有的蜂窝梁承载能力的评估方法。Erdal 等人[9]对圆孔形蜂窝梁进行了单点单调加载试验，当加载点位于开孔截面上部翼缘时，试件同时观察到了孔间腹板屈曲和空腹弯曲现象，如图 3、图 4 所示。王培军等人[10]提出了一种新型的带圆角的多边形孔蜂窝梁，与传统的圆孔形蜂窝梁相比，该孔型在加工时只需切割一次，且不会造成材料的损耗与浪费。在相同的开口高度下，圆角多边形孔蜂窝梁的承载能力高于正六边形和矩形蜂窝梁，略低于圆孔形蜂窝梁。在 VM 机制破坏下，给出了计算圆角开孔形蜂窝梁承载能力的弯矩剪力耦合曲线。Panedpojaman 等人[11]通过预测发生塑性铰破坏的截面位置和临界角度，对整体弯矩、剪力和空腹弯矩进行归一化处理，提出了一种计算 VM 机制下圆孔形蜂窝梁承载力的简化设计方法，基于相关文献中的 20 组试验数据，充分验证了该设计方法的准确性。表 1 给出了费氏塑性铰破坏模式下蜂窝梁的研究汇总。

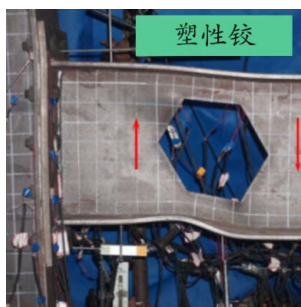


Figure 2. Vierendeel mechanism

图 2. 费氏塑性铰破坏



Figure 3. Web post buckling of castellated beams [9]

图 3. 蜂窝梁腹板屈曲[9]

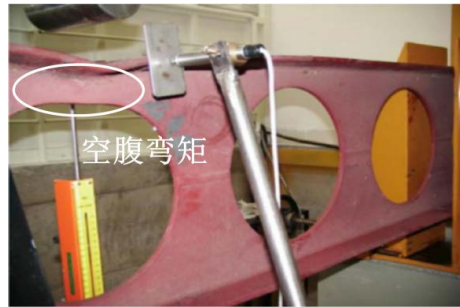


Figure 4. Vierendeel mechanism of castellated beams [9]
图 4. 蜂窝梁空腹弯矩破坏[9]

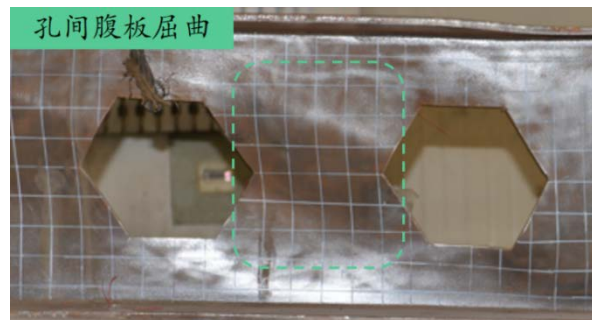


Figure 5. Web post buckling
图 5. 孔间腹板屈曲

Table 1. Summary of research on castellated beams on vierendeel mechanism
表 1. 费氏塑性铰破坏模式下蜂窝梁的研究汇总

研究方法	参考文献	亮点
试验	Erdal [9]	对三组不同截面尺寸的蜂窝梁进行了试验加载，当加载点位于开孔截面时，出现费氏塑性铰破坏。
数值模拟	Chung [7]	利用弯剪耦合曲线，评估了中大型圆形孔蜂窝梁的承载能力。
	Tsavdaridis [8]	研究了椭圆形孔与细长形开孔蜂窝梁的力学性能。
	王培军[10]	研究了圆角多边形开孔蜂窝梁的力学性能。
	Panedpojaman [11]	提出了 VM 机制下圆形孔蜂窝梁承载力的简化设计方法

3. 孔间腹板屈曲

蜂窝梁承受剪力作用时，由于孔洞的存在，导致孔间腹板承受对角线方向的拉力和压力，在斜向压力的作用下，孔间腹板易发生类似受压长柱的失稳破坏，称为孔间腹板屈曲，如图 5 所示。Tsavdaridis 等[12]对两组包含不同孔型的 7 个蜂窝梁试件进行了三点单调加载试验研究，两组试件分别保持孔中心距恒定和孔间腹板最小宽度恒定，由于设计的开孔率较大，6 个试件在加载过程中出现了孔间腹板屈曲破坏。利用 ANSYS 有限元软件建立了 14 个通过试验验证的有限元模型，进行了 220 个参数化分析，研究了孔间距、腹板厚度和开孔高度对孔间腹板屈曲的影响，建立了蜂窝梁孔间腹板屈曲承载力计算公式。对于孔间腹板宽度不小于开孔高度的蜂窝梁，该公式可准确计算特定孔型如圆形孔、椭圆孔以及正弦形开孔蜂窝梁的抗剪承载力。Panedpojaman 等[13]基于有限元软件建立了 390 个参数化模型对蜂窝梁的孔间腹板屈曲进行分析，研究了截面尺寸、开孔高度、孔间距、梁桥高度等几何参数对于屈曲强度和屈曲

机理的影响, 研究表明, 梁桥高度是区分屈曲和弯曲破坏模式的关键参数, 孔间腹板的几何参数时影响屈曲抗剪强度的主要因素。提出了一种蜂窝梁孔间腹板屈曲抗剪强度的设计公式, 尽管该公式与已有计算模型相比可更为准确的预测蜂窝梁的腹板抗剪能力, 但对于开孔率较低的蜂窝梁计算仍较为保守, 且过高的评估了长细比较小的蜂窝梁的强度。王培军等人[2]通过有限元方法对圆角多边形孔蜂窝梁的孔间腹板屈曲进行了研究, 提出了用于该孔型的蜂窝梁孔间腹板屈曲承载力计算的斜压柱理论, 重点推导了斜压柱有效压力、有效长度和有效宽度的计算公式。贾连光等人[14]为研究蜂窝构件腹板局部屈曲造成的结构失效问题, 对设置横向加劲肋的正六边形孔蜂窝钢梁进行研究, 与已有研究大多关注蜂窝梁的静力性能不同, 贾连光等人重点关注了蜂窝梁的抗震性能, 研究表明, 蜂窝梁具有良好的延性和耗能能力, 横向加劲肋位置不同, 蜂窝梁的破坏形态将发生改变。合理的加劲肋布置位置可有效提高蜂窝钢梁的滞回性能。考虑到已有的孔间腹板屈曲破坏下蜂窝梁的抗剪承载力计算公式具有较强的局限性, 对于不同的边界条件、开孔形式等计算误差较大, Grilo [15]等在试验和数值模拟的基础上, 提出了一种具有较强适用性的计算腹板屈曲破坏下蜂窝梁抗剪承载力的计算公式, 在不同的几何条件下对该公式进行了充分验证。Ferreira 等[16]对椭圆形孔蜂窝梁的孔间腹板屈曲承载力进行研究, 利用 Python 编程对 Abaqus 进行二次开发, 可实现参数化分析数据的快速自动化处理, 对 5400 个几何模型进行分析, 提取了 4344 个具有孔间腹板屈曲失效特征的模型, 利用计算结果提出了一种受压柱模型预测腹板屈曲承载力的设计方法, 该设计方法综合考虑了椭圆孔高度、椭圆孔宽度、椭圆孔尖端半径以及梁桥尺寸等参数的影响。

蜂窝梁孔间腹板屈曲是许多学者关注研究的课题, 但各理论计算模型均以独立的孔间腹板作为研究对象, 对其边界约束效应有待进一步研究, 其中罗烈和于合勇[17]的研究考虑了受压翼缘对开孔腹板边缘转动的约束作用, 分析了纯弯、纯剪等不同荷载作用下, 蜂窝梁腹板的屈曲特征值。各研究学者蜂窝梁抗剪承载力的设计方法也没有达成共识, 尤其当蜂窝梁的几何参数偏离常用的参数时, 现有的设计方法计算得到的结果离散性较大。表 2 给出了孔间腹板屈曲破坏模式下蜂窝梁的研究汇总。

Table 2. Summary of research on castellated beams on web post buckling

表 2. 孔间腹板屈曲破坏模式下蜂窝梁的研究汇总

研究方法	参考文献	亮点
试验	Tsavidaridis [12]	研究了孔间腹板宽度和开孔间距对蜂窝梁破坏的影响。
	贾连光[14]	研究了蜂窝梁构件的抗震性能。
	Grilo [15]	研究了边界条件对于蜂窝梁承载力的影响。
数值模拟	Panedpojaman [13]	提出梁桥高度是区分屈曲和弯曲破坏模式的关键参数。
	Ferreira [16]	提出了新型椭圆孔的设计方法。

4. 整体弯扭失稳



Figure 6. Lateral torsional buckling of castellated beams under a bending moment [19]

图 6. 弯矩作用下蜂窝梁的整体弯扭失稳屈曲[19]

实腹梁承受的荷载逐渐增大时, 钢梁在平面内弯曲的同时, 将突然发生侧向弯曲或扭转变形而破坏, 称之为整体弯扭失稳, 如图 6 所示。蜂窝梁整体弯扭失稳机理与实腹梁一致, 但由于蜂窝梁的平面内惯性矩与侧向惯性矩比值提高的同时, 腹板开孔降低了梁的抗扭刚度, 导致蜂窝梁更易发生失稳破坏[18]。

目前的设计规范中通过整体稳定纯弯系数 C_b 将工字型钢梁的整体扭转屈曲名义弯矩 M_n 与均匀弯矩下对应的临界屈曲弯矩 M_{ocr} 联系起来, 如公式(1)所示, 各国规范中建议的 C_b 值见表 3, 该值仅与加载方式有关。Mohebkhah [20]、Kazemi [21]、Sweedan [22] 等人的研究表明, 蜂窝梁的整体稳定纯弯系数 C_b 与构件的长细比、开孔形式均有较大关联, 规范中建议的 C_b 值趋于不安全, 应依据构件的长细比分段给出 C_b 的数值。

$$M_n = C_b M_{ocr} \quad (1)$$

Table 3. The overall stable pure bending coefficient C_b values recommended by national regulations

表 3. 各国规范建议的整体稳定纯弯系数 C_b 值

加载方式	美国规范 AISC	欧洲规范 EC3	澳大利亚规范 AS4100
跨中集中荷载	1.35	1.365	1.32
均布荷载	1.14	1.132	1.13

Boissonnade [23] 等人通过三个全尺寸模型试验和广泛的有限元分析对蜂窝梁的整体弯扭失稳进行了研究, 提出了更为精准的蜂窝梁整体弯扭失稳抗力的计算方法, 其研究结果对蜂窝梁孔间腹板受压柱的受压曲线进行了有利的修正, 可作为已有规范的重要补充。Sweedan [22] 等研究了加载工况、腹板高厚比、开孔率、孔间腹板宽度等因素对蜂窝梁的刚度和破坏模式的影响, 在此基础上提出了计算蜂窝梁弹性整体弯扭失稳弯矩承载力的修正系数公式, 修正系数综合考虑了翼缘宽度和厚度、开孔间距、腹板高度和荷载类型等因素的影响。表 4 给出了整体弯扭失稳破坏模式下蜂窝梁的研究汇总。

Table 4. Summary of research on castellated beams on lateral torsional buckling

表 4. 整体弯扭失稳破坏模式下蜂窝梁的研究汇总

研究方法	参考文献	亮点
试验	Boissonnade [23]	对孔间腹板受压柱曲线提出了修正建议。
数值模拟	Mohebkhah [20]	提出了适用于蜂窝梁的整体稳定纯弯系数 C_b 的计算方法。
	Sweedan [22]	提出了考虑多参数的计算蜂窝梁弹性整体弯扭失稳弯矩承载力的修正系数公式。

5. 畸变屈曲

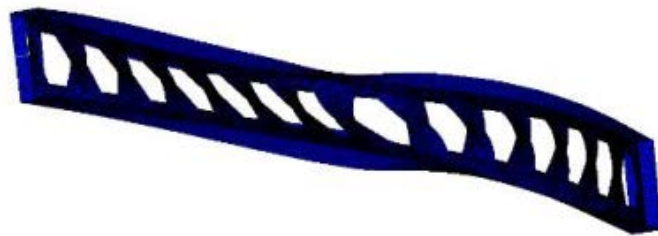


Figure 7. Lateral distortion buckling of castellated beams [25]

图 7. 蜂窝梁的畸变屈曲[25]

蜂窝梁发生整体弯扭失稳的同时局部腹板也发生了扭曲,称之为畸变屈曲破坏,如图7所示。发生畸变屈曲时,可以观察到腹板发生出平面的变形,不再是一个平面,区别于腹板的局部屈曲,此时是腹板与翼缘的交线将不再是一条直线。畸变屈曲可能与整体弯扭屈曲或者腹板的局部屈曲同时出现,呈现相关作用[24]。

Ellobody [25] [26]采用数值方法研究了普通和高强度蜂窝钢梁的畸变屈曲性能,对96根六边形孔和圆形孔蜂窝梁进行参数化分析并与已发表的试验结果进行了比较。研究表明,对于细长蜂窝钢梁,腹板的扭曲降低了蜂窝梁的屈曲临界荷载,对于非细长蜂窝钢梁,使用高强度钢材可以提升蜂窝梁的屈曲临界荷载。研究还表明,对于腹板畸变屈曲破坏的蜂窝钢梁,澳大利亚规范(AS4100)计算的结果是不安全的。Mahmoud [27]等人对简支蜂窝梁在畸变屈曲作用下的弯矩承载力进行了数值研究,主要考虑了截面几何尺寸、蜂窝梁长度和钢材强度等参数的影响,基于人工神经网络模型建立了具有较好精度的计算公式。表5给出了畸变屈曲破坏模式下蜂窝梁的研究汇总。

Table 5. Summary of research on castellated beams on lateral distortion buckling

表 5. 畸变屈曲破坏模式下蜂窝梁的研究汇总

研究方法	参考文献	亮点
数值模拟	Ellobody [25] [26]	研究了高强度钢梁的力学性能。
	Mahmoud [27]	基于人工神经网络提出了畸变屈曲破坏模式下蜂窝梁的计算方法。

6. 残余应力的影响

蜂窝梁在制作过程中需要进行切割和焊接,温度的升高和冷却过程中会在梁内部产生自相平衡的残余应力场,残余应力的存在对蜂窝梁的稳定性能有较大影响,且其分布模型与实腹梁有较大区别,因此,相关学者陆续开展了蜂窝梁的残余应力研究。

周绪红[28]和李井超[29]等对比分析了蜂窝梁和原实腹式梁中的残余应力的分布情况,对蜂窝梁在切割和焊接过程中产生的温度场和应力场进行了数值模拟,并通过文献中的试验结果对有限元模型进行了验证,通过验证模型,分析了截面参数对残余应力分布规律的影响,提出了考虑残余应力影响的蜂窝梁局部屈曲计算方法,同时补充了考虑残余应力影响的蜂窝梁畸变屈曲性能的试验和有限元研究。Snock [30]等通过试验测量了标准生产工艺制作的蜂窝梁中残余应力的分布,分析了生产工艺对残余应力的影响,并通过试验和数值分析研究了残余应力对蜂窝梁整体稳定性的影响。借助有限元模型,进行了参数化分析,提出了基于欧洲规范工字梁弯扭失稳屈曲计算准则的初步设计方法,对截面特性和屈曲曲线进行了修正。Ferreira F [31]等通过数值方法模拟了蜂窝梁中残余应力的分布规律,并借助ABAQUS软件综合考虑了几何缺陷、材料缺陷和残余应力对蜂窝梁整体弯扭失稳的影响。陈向荣[32]等根据蜂窝梁残余应力试验测量结果编写了描述残余应力分布的ANSYS初始文件,并在非线性分析中以此来考虑残余应力对蜂窝梁侧扭屈曲的影响。分析结果表明:残余应力对蜂窝梁弹塑性侧扭失稳的影响很大,其中翼缘两侧残余应力峰值对蜂窝梁侧扭失稳的影响最为显著。贾连光[4]等通过盲孔法对7根蜂窝式钢构件开孔截面焊接残余应力进行检测,对比六边形和圆形两种典型孔型下,不同开孔率、开孔方式对蜂窝构件开孔处截面纵向焊接残余应力分布情况,提出了腹板直接开孔和切割错位焊接两种不同生产加工工艺下蜂窝梁残余应力的分布模型和计算方法。

7. 结论与展望

- 1) 蜂窝梁的破坏模式主要包括费氏塑性铰破坏、孔间腹板屈曲、整体弯扭失稳、畸变屈曲破坏以及

腹板水平焊缝的断裂破坏,其几何尺寸、荷载形式对于蜂窝梁的破坏模式有较大影响。

2) 对于不同破坏模式的蜂窝梁,承载能力和计算方法大不相同,因此,在进行蜂窝梁的设计时,应对蜂窝梁的破坏模式进行预判。

3) 蜂窝梁由于加工工艺的特点,存在不可忽略的残余应力,目前只有较少的研究考虑了残余应力对蜂窝梁破坏的影响,因此,在后续研究中,应重点关注残余应力的分布模式及影响规律。

基金项目

辽宁科技学院大学生创新创业计划资助项目,项目名称:新型装配式 RCS 混合框架节点受力性能及施工技术研究与应用,项目编号:202311430070。

参考文献

- [1] 李霞. 卧式似椭圆孔蜂窝梁的制作与设计计算方法[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2007.
- [2] 王培军, 王旭东, 马丁. 圆角多边形蜂窝梁孔间腹板屈曲承载力研究[J]. 工程力学, 2015, 32(4): 145-152.
- [3] 黄炳生, 黄泰杰, 王维川, 桑伟. 蜂窝梁等效抗弯刚度计算方法及其影响因素分析[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(S2): 121-127.
- [4] 贾连光, 杨建华, 秦晨光. 蜂窝构件开孔截面焊接残余应力分布研究[J]. 工程力学, 2015, 32(Z1): 304-309.
- [5] Geng, K., Jia, L., Xu, F. and Li, Q. (2023) Experimental Study on the Mechanical Behaviour of Castellated Composite Beams under a Negative Bending Moment. *Structures*, **47**, 953-965. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.11.074>
- [6] Ward, J.K. (1990) Design of Composite and Non-Composite Cellular Beams. Steel Construction Institute, 100.
- [7] Chung, K.F., Liu, T.C.H. and Ko, A.C.H. (2001) Investigation on Vierendeel Mechanism in Steel Beams with Circular Web Openings. *Journal of Constructional Steel Research*, **57**, 467-490. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(00\)00035-3](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(00)00035-3)
- [8] Tsavdaridis, K.D., ASCE, A.M. and D'Mello, C. (2012) Vierendeel Bending Study of Perforated Steel Beams with Various Novel Web Opening Shapes through Nonlinear Finite-Element Analyses. *Journal of Structural Engineering*, **138**, 1214-1230. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000562](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000562)
- [9] Erdal, F. and Saka, M.P. (2013) Ultimate Load Carrying Capacity of Optimally Designed Steel Cellular Beams. *Journal of Constructional Steel Research*, **80**, 355-368. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.10.007>
- [10] Wang, P., Ma, Q. and Wang, X. (2014) Investigation on Vierendeel Mechanism Failure of Castellated Steel Beams with Fillet Corner Web Openings. *Engineering Structures*, **74**, 44-51. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.05.008>
- [11] Panedpojaman, P., Thepchatri, T. and Limkatanyu, S. (2015) Novel Simplified Equations for Vierendeel Design of Beams with (elongated) Circular Openings. *Journal of Constructional Steel Research*, **112**, 10-21. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.04.007>
- [12] Tsavdaridis, K.D. and D'Mello, C. (2011) Web Buckling Study of the Behaviour and Strength of Perforated Steel Beams with Different Novel Web Opening Shapes. *Journal of Constructional Steel Research*, **67**, 1605-1620. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.04.004>
- [13] Panedpojaman, P., Thepchatri, T. and Limkatanyu, S. (2014) Novel Design Equations for Shear Strength of Local Web-Post Buckling in Cellular Beams. *Thin-Walled Structures*, **76**, 92-104. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.11.007>
- [14] Jia, L.G., Bi, R., Lang, Y.X. and Li, X.F. (2020) Experimental Study and Theoretical Analysis on Seismic Performance of Castellated Beam with Hexagonal Holes. *Advanced Steel Construction*, **16**, 233-245.
- [15] Grilo, L.F., Fakury, R.H., de Castro e Sliva, A.L.R. and de Souza Veríssim, G. (2018) Design Procedure for the Web-Post Buckling of Steel Cellular Beams, **148**, 525-541. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.06.020>
- [16] Ferreira, F.P.V., Shamass, R., Santos, L.F., Limbachiya, V. and Tsavdaridis, K.D. (2022) EC3 Design of Web-Post Buckling Resistance for Perforated Steel Beams with Elliptically-Based Web Openings. *Thin-Walled Structure*, **175**, Article ID: 109196. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109196>
- [17] 罗烈, 于合勇. 六边形孔蜂窝梁腹板的屈曲性能分析[J]. 建筑钢结构进展, 2010, 12(6): 46-53.
- [18] 周绪红, 李井超, 贺拥军, 何子奇. 蜂窝梁的稳定性能研究进展[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(3): 21-32.
- [19] Sonck, D. and Belis, J. (2015) Lateral-Torsional Buckling Resistance of Cellular Beams. *Journal of Constructional*

- Steel Research*, **105**, 119-128. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.11.003>
- [20] Mohebkah, A. (2004) The Moment-Gradient Factor in Lateral-Torsional Buckling on Inelastic Castellated Beams. *Journal of Constructional Steel Research*, **60**, 1481-1494. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2004.02.002>
- [21] Kazemi, N.K.H.R., Kabir, M.Z. and Molanaei, S. (2010) Lateral-Torsional Buckling of Castellated Beams under End Moments. *International Journal of Recent Trends in Engineering and Technology*, **3**, 16-19.
- [22] Sweedan, A.M.I. (2011) Elastic Lateral Stability of I-Shaped Cellular steel Beams. *Journal of Constructional Steel Research*, **67**, 151-163. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.08.009>
- [23] Boissonnade, N., Nseir, J., Lo, M. and Somja, H. (2014) Design of Cellular Beams against Lateral Torsional Buckling. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, **167**, 436-444. <https://doi.org/10.1680/stbu.12.00049>
- [24] 陈鹏. 考虑残余应力的蜂窝梁畸变屈曲性能及承载力计算公式研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [25] Ellobody, E. (2012) Nonlinear Analysis of Cellular Steel Beams under Combined Buckling Modes. *Thin-Walled Structures*, **52**, 66-79. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2011.12.009>
- [26] Ellobody, E. (2011) Interaction of Buckling Modes in Castellated Steel Beams. *Journal of Constructional Steel Research*, **67**, 814-825. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.12.012>
- [27] Hosseinpour, M., Sharifi, Y. and Sharifi, H. (2020) Neural Network Application for Distortional Buckling Capacity Assessment of Castellated Steel Beams. *Structures*, **27**, 1174-1183. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.07.027>
- [28] Zhou, X.H., Li, J.C., He, Y.J., He, Z. and Li, Z. (2018) Finite Element Analysis of Thermal Residual Stresses in Castellated Beams. *Journal of Constructional Steel Research*, **148**, 741-755. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.06.026>
- [29] 李井超. 残余应力对蜂窝梁稳定性能的影响研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [30] Sonck, D., Impe, R.V. and Belis, J. (2014) Experimental Investigation of Residual Stresses in Steel Cellular and Castellated Members. *Construction and Building Materials*, **54**, 5112-519. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.045>
- [31] Ferreira, F.P.V., Rossi, A. and Martins, C.H. (2019) Lateral-Torsional Buckling of Cellular Beams According to the Possible Updating of EC3. *Journal of Constructional Steel Research*, **153**, 222-242. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.10.011>
- [32] 陈向荣, 吴刚, 冉红东. 焊接残余应力对蜂窝梁整体稳定性能的影响[J]. *建筑结构*, 2015, 45(21): 35-40.