

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2026.01.008

引用格式:李井超,周绪红,何子奇.蜂窝梁畸变屈曲性能研究[J].重庆大学学报,2026,49(1):82-93.



蜂窝梁畸变屈曲性能研究

李井超¹,周绪红²,何子奇²

(1. 湖南城市学院 土木工程学院,湖南 益阳 410082; 2. 重庆大学 土木工程学院,重庆 400045)

摘要:为研究蜂窝梁的畸变屈曲特性,开展了6个蜂窝梁试件的跨中静力加载试验。得到了各试件的破坏模式、荷载-竖向位移曲线及腹板变形曲线。研究表明,所有6个试件均呈现出畸变屈曲的破坏模式。具体表现为整个试件的受压翼缘在构件失效时呈S形曲线,同时,跨中荷载作用处的梁腹板出现平面外鼓出变形;随着蜂窝梁长度增加,荷载-竖向位移曲线前期刚度减小,畸变屈曲临界承载力降低;对AS4100规范、AISC规范以及Nethercot和Trahair建议方法进行修正,以便计算各蜂窝梁试件的畸变屈曲临界荷载,结果表明,AS4100规范以及Nethercot和Trahair方法的计算结果与试验吻合较好。

关键词:蜂窝梁;局部屈曲;畸变屈曲;临界荷载

中图分类号:TU391

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2026)01-082-12

Research on distortional buckling performance of castellated beams

LI Jingchao¹, ZHOU Xuhong², HE Ziqi²

(1. School of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang, Hunan 410082, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: To investigate the distortional buckling performance of castellated beams, six castellated beam specimens were subjected to static load at the mid-span. The corresponding failure modes, load-vertical displacement responses, and web deformed shape curves of specimens were obtained. The results indicate that all six specimens failed in a distortional buckling mode. Specifically, the compressive flange of the entire specimens exhibited an S-shaped curve upon failure. Meanwhile, out-of-plane bulging deformation occurred in the web post section at the mid-span loading location. With the increase of castellated beam length, both the initial stiffness of the load-vertical displacement curve and the critical distortional buckling capacity reduced. Results of the distortional buckling strengths obtained from the experiments were further compared with the predications calculated using the modified method suggested by AS4100, AISC, and Nethercot and Trahair. The comparison results show that the predications of the AS4100 method and the Nethercot and Trahair approach are in good

收稿日期:2025-03-12

基金项目:湖南省教育厅科学研究项目(24C0443);益阳市科技创新计划项目(2025YR02);湖南省普通本科高校教学改革研究项目(202502001257)。

Supported by the Research Foundation of Education Bureau of Hunan Province (24C0443), the Science and Technology Innovation Program of Yiyang City (2025YR02), and the Undergraduate Teaching Reform Research Project of Hunan Province (202502001257).

作者简介:李井超(1984—),男,博士,主要从事钢结构稳定性能研究,(E-mail)jingchao1028@163.com。

agreement with the test results.

Keywords: castellated beams; local buckling; distortional buckling; critical load

蜂窝梁一般采用切割与错位焊接技术进行加工,相较于传统的实腹梁,其平面刚度得到显著改善。此外,腹板的孔洞设计不仅便于管线的布置,还在一定程度上优化了建筑结构的空間,提升了空間利用率。由于梁腹板高度的增加以及孔洞的出现,腹板更易发生屈曲破坏。周绪红等^[1]对蜂窝梁的典型破坏模式进行了深入研究,发现蜂窝梁的失稳破坏主要表现为3种形式:梁墩屈曲、整体弯扭失稳和畸变屈曲。研究表明,较长的梁通常会出现整体弯扭失稳,而较短的梁则更容易发生局部屈曲。对于腹板高厚比大的适中长度梁,易发生畸变屈曲^[2]。畸变屈曲通常可分为侧倾畸变屈曲和约束畸变屈曲2种类型,如图1(a)所示,侧倾畸变屈曲多出现在缺乏侧向约束或侧向约束较弱的蜂窝梁中,表现为发生整体弯扭失稳的同时腹板出现局部屈曲。另外,在组合梁的混凝土板或支座施加约束时,蜂窝梁容易出现约束畸变屈曲现象,如图1(b)和(c)所示。

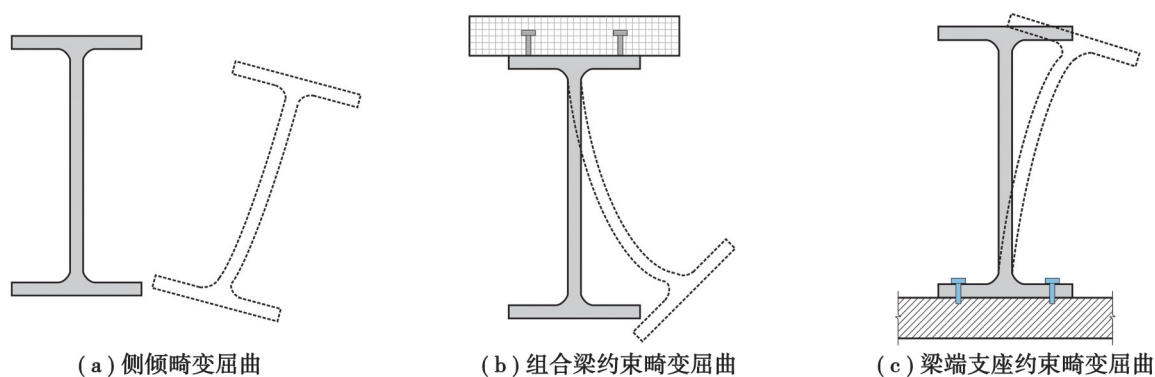


图1 蜂窝梁的畸变屈曲

Fig. 1 Distortional buckling of castellated beams

目前,国内外学者对蜂窝梁整体失稳和局部屈曲性能进行了大量研究,也对蜂窝梁截面残余应力的分布进行了探讨。Nethercot等^[3]对以往试验中蜂窝梁发生整体弯扭失稳破坏的试件进行汇总和分析,针对蜂窝梁的弯扭失稳特性进行研究,得到蜂窝梁破坏机制与实腹梁相似的结论。Sevak^[4]对蜂窝梁各失效模式的试验和理论成果进行综述,重点研究了腹板局部屈曲性能。Zaarour等^[5]和Redwood等^[6]研究了蜂窝梁腹板的局部屈曲行为,发现数值分析与实验结果相符;通过处理参数化分析数据,推导出梁墩几何特性与剪切失稳系数的关系曲线,通过该曲线精确预测临界剪力的失稳点。有学者对蜂窝梁孔间腹板局部屈曲特性进行了系统总结,采用有限元法分析了角部修圆六边形孔与常规六边形孔蜂窝梁梁墩腹板的剪切屈曲行为,提出了一种适用于六边形孔蜂窝梁梁墩的弹性剪切屈曲设计方法^[7-9]。Sonck等^[10-11]研究了蜂窝梁制造过程中截面残余应力的分布,提出了蜂窝梁翼缘残余应力的分布模式,探讨了残余应力对蜂窝梁整体稳定性的影响。贾连光等^[12]通过盲孔法实测了7根蜂窝梁试件腹板开孔区域的纵向残余应力,分析了各因素对该部位残余应力分布的影响,提出了在不同工艺条件下,蜂窝梁开孔截面(梁桥截面)的残余应力分布模型。但该研究未考虑开孔对翼缘残余应力分布的影响,也未给出梁墩截面的残余应力分布。陈向荣等^[13]在残余应力分布数据基础上,编制了初应力文件,研究了残余应力对蜂窝梁整体稳定性特性的影响。结果表明,翼缘边缘的残余应力峰值对蜂窝梁的整体稳定承载能力具有显著影响。Zhou等^[14]对有限元模型进行验证,考虑翼缘厚度、翼缘宽度和腹板厚度等因素的影响,分析了蜂窝梁加工过程中切割、焊接对截面残余应力分布的影响。

梁的畸变屈曲特性研究起步较晚,国内外有关蜂窝梁的研究更少,研究成果集中在普通工字钢梁^[15-18]。Zirakian等^[19]通过实验研究了6根蜂窝梁的侧倾畸变屈曲和约束畸变屈曲特性,得到的临界屈曲荷载与通过非弹性方法计算的理论值接近。Ellobody^[20-21]通过数值分析研究了圆孔和六边形孔蜂窝梁的畸变屈曲特性,所用分析模型考虑了几何非线性和材料非线性,并对相关影响因素进行参数化研究。此外,还对比了数值分析结果与AS4100^[22]规范方法的结果。在六边形孔蜂窝梁的研究中,并未考虑截面残余应力的影响;对于圆孔梁,残余应力的分布模型仍然采用了普通工字钢梁的分布形式。

综上所述,现有研究主要集中在蜂窝梁的整体屈曲、剪切屈曲和局部屈曲等方面,对于畸变屈曲这一特定形式的深入探讨较少。当前的设计规范中尚未针对蜂窝梁的畸变屈曲提出明确的指导性建议,这给工程应用中的蜂窝梁设计和优化带来了局限性。文中以截面尺寸和构件长度为主要参数,对6个蜂窝梁试件进行了跨中静力加载试验,研究了各试件破坏模式和承载能力;对已有的承载力计算方法进行修正,探讨了蜂窝梁畸变屈曲临界承载力计算模型。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

试验共设计了6个蜂窝梁试件,其横截面有A类截面(HN198×99×4.5×7)和B类截面(HN248×124×5×8)2种,每类截面各选取3种长度,试件长度与孔洞数量对应。试件具体参数如表1所示,其中 L_0 为试件测试段长度; N 为孔洞数量; H 和 B 分别为蜂窝梁高度和宽度; t_w 为翼缘厚度; t_f 为腹板厚度; h 为原型梁高度。其中,首字母(A或B)代表横截面类别,数字为孔洞数量(16、18或20)。表1中括号内数字为实测数据。

表 1 残余应力测试试件的几何参数
Table 1 Geometric parameters of specimens for residual stress measurement

试件编号	N /个	L_0 /mm	B /mm	H /mm	t_w /mm	t_f /mm	h /mm
A16	16	4 752	99(98)	297(296)	4.5(4.9)	7(6)	
A18	18	5 346	99(101)	297(295)	4.5(4.8)	7(6)	198
A20	20	5 940	99(101)	297(295)	4.5(4.8)	7(6.2)	
B16	16	5 952	124(125)	372(370)	5(5.3)	8(6.9)	
B18	18	6 696	124(125)	372(372)	5(5.0)	8(6.9)	248
B20	20	7 440	124(124)	372(372)	5(5.3)	8(6.9)	

蜂窝梁制作过程主要包括钢梁切割和焊接两步。如图2所示,将原型实腹梁按照预定折线切割,再将切割后的两部分钢梁错位焊接,即可得到蜂窝梁试件。

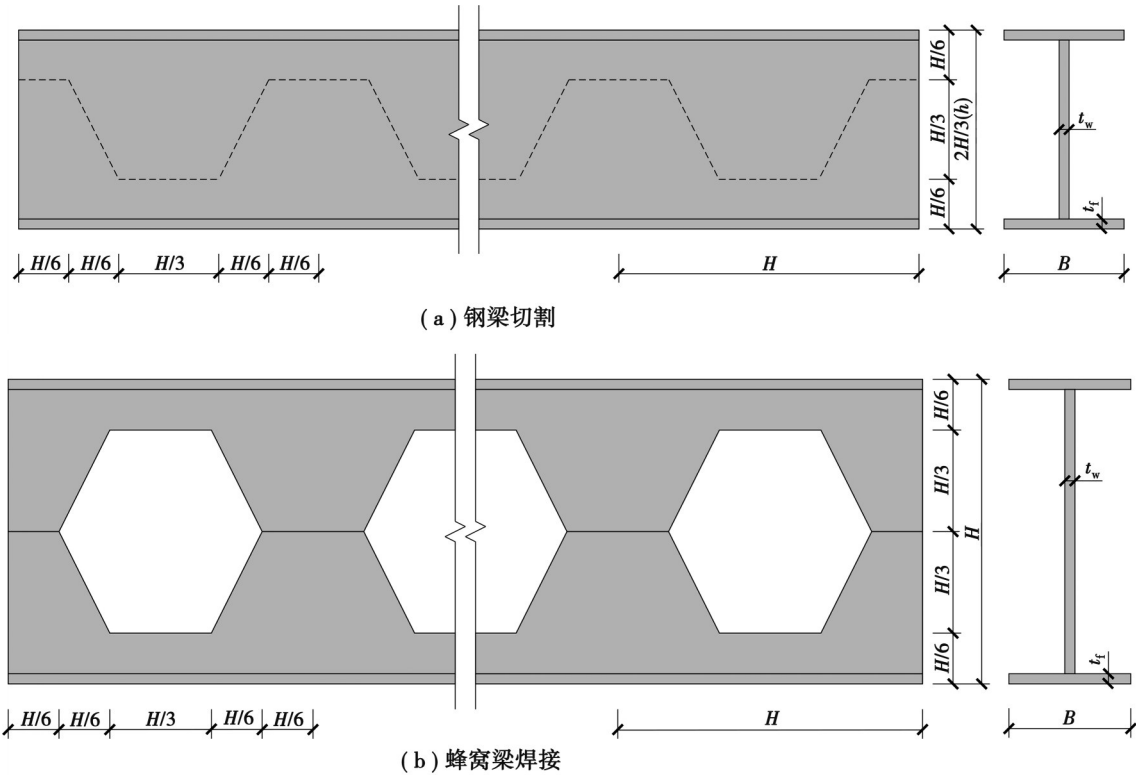


图 2 蜂窝梁加工过程

Fig. 2 Fabrication of a castellated beam

1.2 试件材性

试件均使用 Q235 级钢材制造,钢板材性指标依据《金属材料—室温拉伸试验方法》(GB/T 228.1—2010)^[23]进行测试。材性试验结果如表 2 所示,A 和 B 分别代表 A 类截面和 B 类截面,F 和 W 分别代表翼缘和腹板。

表 2 钢材材性指标
Table 2 Properties of steel materials

试件编号	弹性模量/GPa	板件厚度/mm	极限强度/MPa	屈服强度/MPa
AF	203.2	6.0	433	269
AW	201.7	4.9	438	300
BF	202.1	6.9	403	267
BW	201.4	5.2	431	302

1.3 加载及测量方案

试验加载装置如图 3 所示,所有试件均采用跨中梁墩截面处单点加载,蜂窝梁两端约束形式为简支。为防止试件在支座处集中力作用下发生局部屈曲,在支座处设置竖向加劲肋;为约束蜂窝梁在支座处的侧向位移和扭转,在支座上、下翼缘处设置 4 个水平向轴承作为侧向支撑,如图 3(b)所示;在试件跨中加载处设置 4 个螺栓作为侧向支撑,以限制试件上翼缘的侧向位移,如图 3(c)所示。为降低试件加载过程中偏心的影响,试验采用对称布置的 2 个传感器测量竖向荷载。

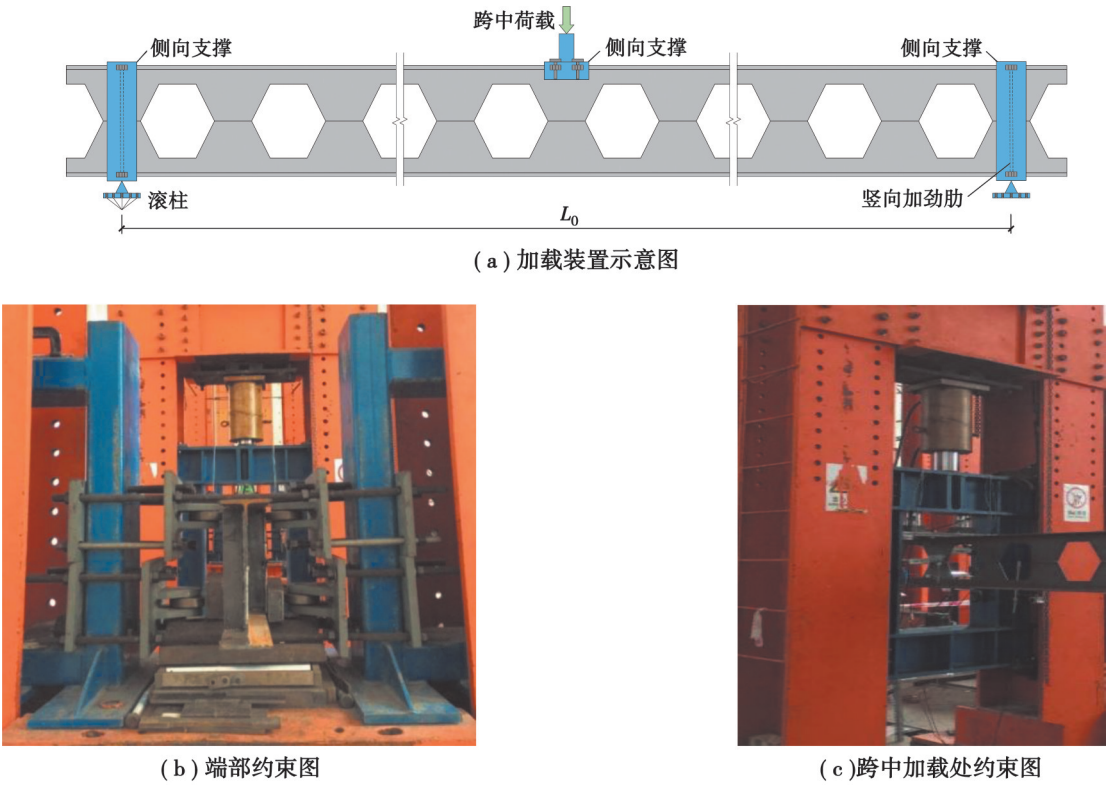


图 3 试验加载装置
Fig. 3 Test setup

如图 4 所示,在试件 1/4 跨度截面和 1/2 跨度截面沿梁高均匀布置 5 个水平位移计以测量梁的侧向位移。对于 1/2 跨度截面,由于上翼缘设置有侧向支撑,仅设置 4 个水平位移计;对于 1/4 跨度截面,为消除蜂窝梁竖向位移对侧向位移测试结果的影响,采用拉线式位移计进行测量,即采用 5 根 3 m 长的漆包线连接位移计伸

缩头与黏贴于钢梁上的螺帽。为测量蜂窝梁竖向挠度,在1/4跨度截面和1/2跨度截面处均设置竖向位移计。此外,在这2个截面处中部各设置1对竖向应变片。需要注意的是,位移计和应变片布置应避开蜂窝梁梁墩中部焊缝。

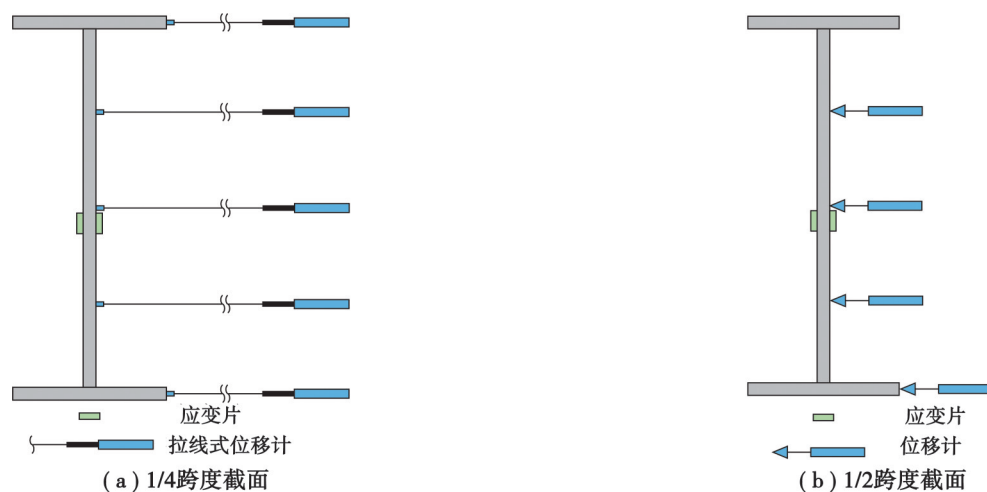


图4 位移计和应变片布置

Fig. 4 Layout of LVDTs and strain gauges

2 试验结果及分析

2.1 试验现象和破坏模式

在加载初期,试件的竖向位移随着荷载的增加呈现出线性增长,同时试件发生了平面内的弯曲变形。随着荷载继续增大,变形速度加快,跨中荷载-挠度曲线的斜率逐步减小,最终试件开始出现整体的弯扭变形,受压翼缘呈现S形曲线,变形幅度较小。当加载达到畸变屈曲临界荷载时,试件的变形迅速扩大,跨中截面下翼缘的侧向位移急剧增大;此后,试件的荷载迅速下降,竖向挠度急剧增加。图5所示为典型试件破坏模式,试验中所有试件均发生了明显的畸变屈曲,试件受压翼缘变形呈S形曲线,腹板发生局部屈曲。



图5 典型试件破坏模式

Fig. 5 Typical failure modes of specimens

2.2 荷载-应变曲线

典型试件1/4跨度截面和1/2跨度截面荷载-应变曲线如图6所示。对于1/4跨度截面,由于没有侧向支撑,蜂窝梁腹板加载初期一侧即处于受拉状态,另一侧为受压状态,随着荷载增加,应变逐渐增加,接近畸变屈曲临界荷载时,由于腹板出现局部屈曲,应变出现了突变。相比于1/4跨度截面,1/2跨度截面上翼缘设置有侧向支撑,因此加载初期,腹板两侧均为压应变,随着荷载增加,钢板开始出现局部屈曲,一侧的压应变持续增加,另一侧逐渐转变为拉应变。

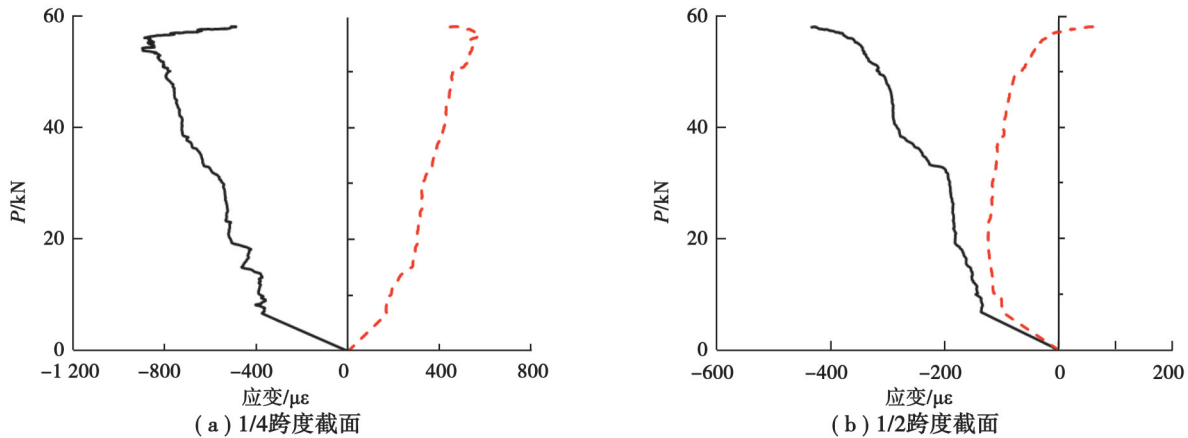
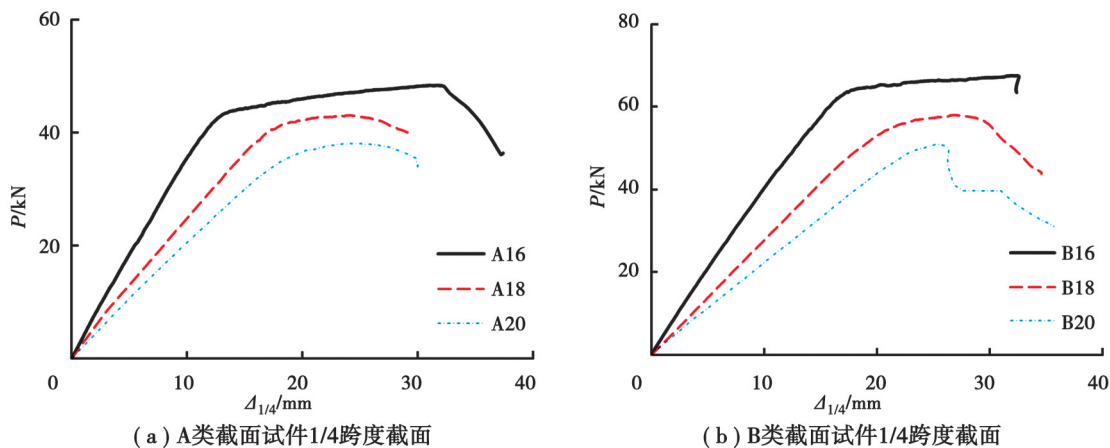


图6 典型试件荷载-应变曲线

Fig. 6 Load-strain curves of typical specimens

2.3 荷载-竖向位移曲线

图7为试件荷载(P)-位移(Δ)曲线,其中图7(a)和图7(b)为1/4跨度截面位移,图7(c)和图7(d)为1/2跨度截面位移。由图可知,所有试件荷载随竖向位移变化规律相似,加载初期,荷载随位移线性增长;当荷载增加至接近畸变屈曲临界荷载时,竖向位移急剧增大。随着试件长度(孔洞数量)增加,试件荷载-竖向位移曲线弹性段刚度减小,非线性段部分逐渐减少,畸变屈曲临界承载力降低,在A类和B类截面试件中,孔洞数量每增加2个,畸变屈曲的临界荷载分别降低5.15 kN和8.36 kN。



(a) A类截面试件1/4跨度截面

(b) B类截面试件1/4跨度截面

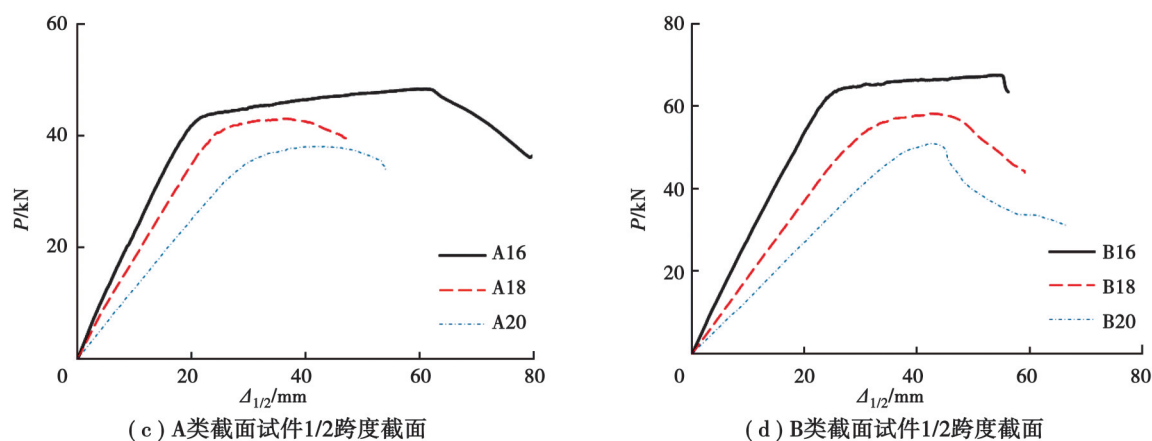
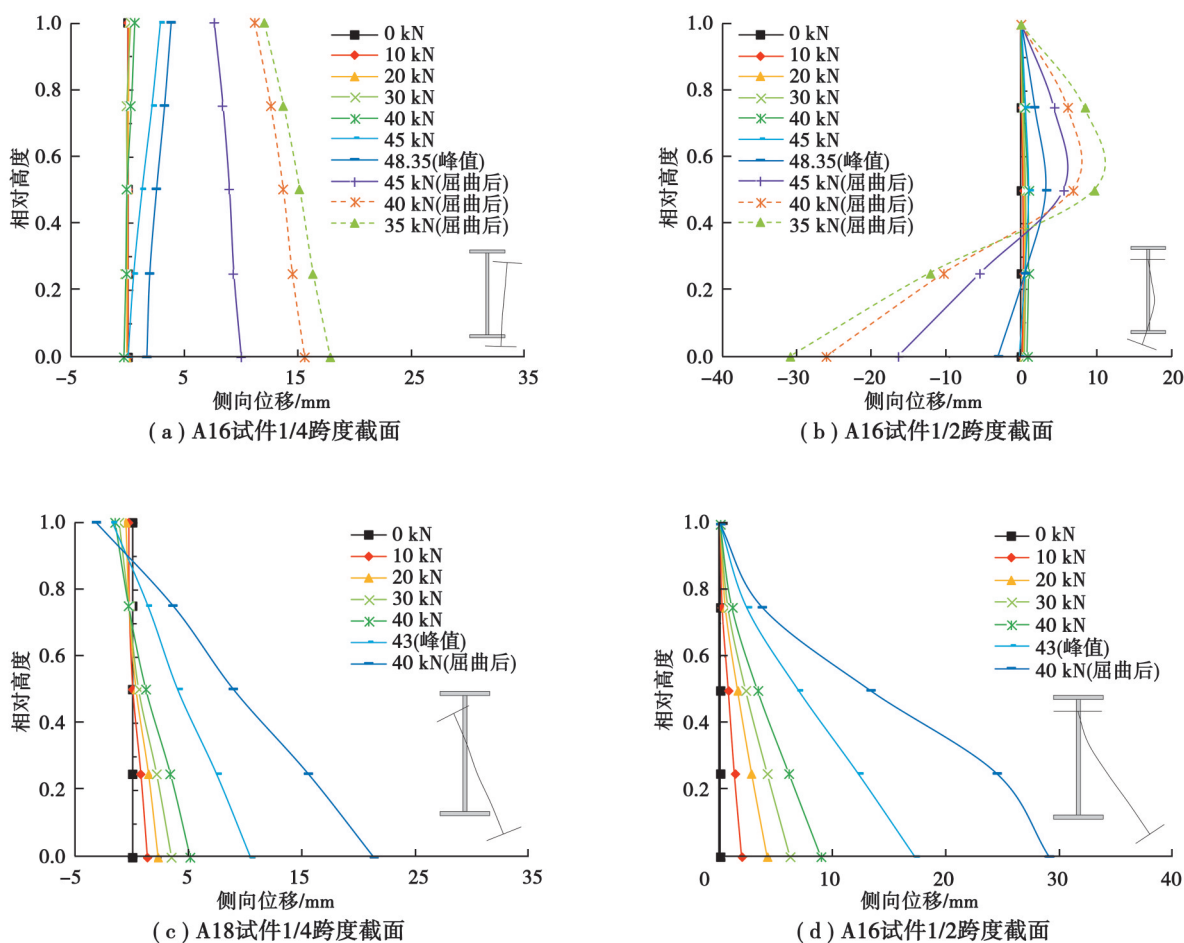


图7 荷载-竖向位移曲线

Fig. 7 Load-vertical displacement curves

2.4 侧向变形曲线

试件侧向变形曲线如图8所示,其中相对高度为蜂窝梁侧向位移测点距下翼缘底部距离与蜂窝梁高度的比值,图中还示出了畸变屈曲临界荷载时蜂窝梁变形图。对于初始缺陷明显的试件A18和试件B18,加载初期即存在明显的侧向位移,对于初始缺陷不明显的试件A16和试件A20,加载初期侧向变形极小,直至接近畸变屈曲临界荷载时侧向变形快速增大。由图可知,在1/4跨度截面处,未施加侧向约束的梁腹板发生了整体侧向位移,除试件A18外,其余试件均表现出明显的扭曲变形;在1/2跨度截面,尽管上翼缘已设侧向支撑,腹板依旧出现了明显的局部屈曲,由于腹板的扭曲,受拉下翼缘发生了明显的侧向位移。



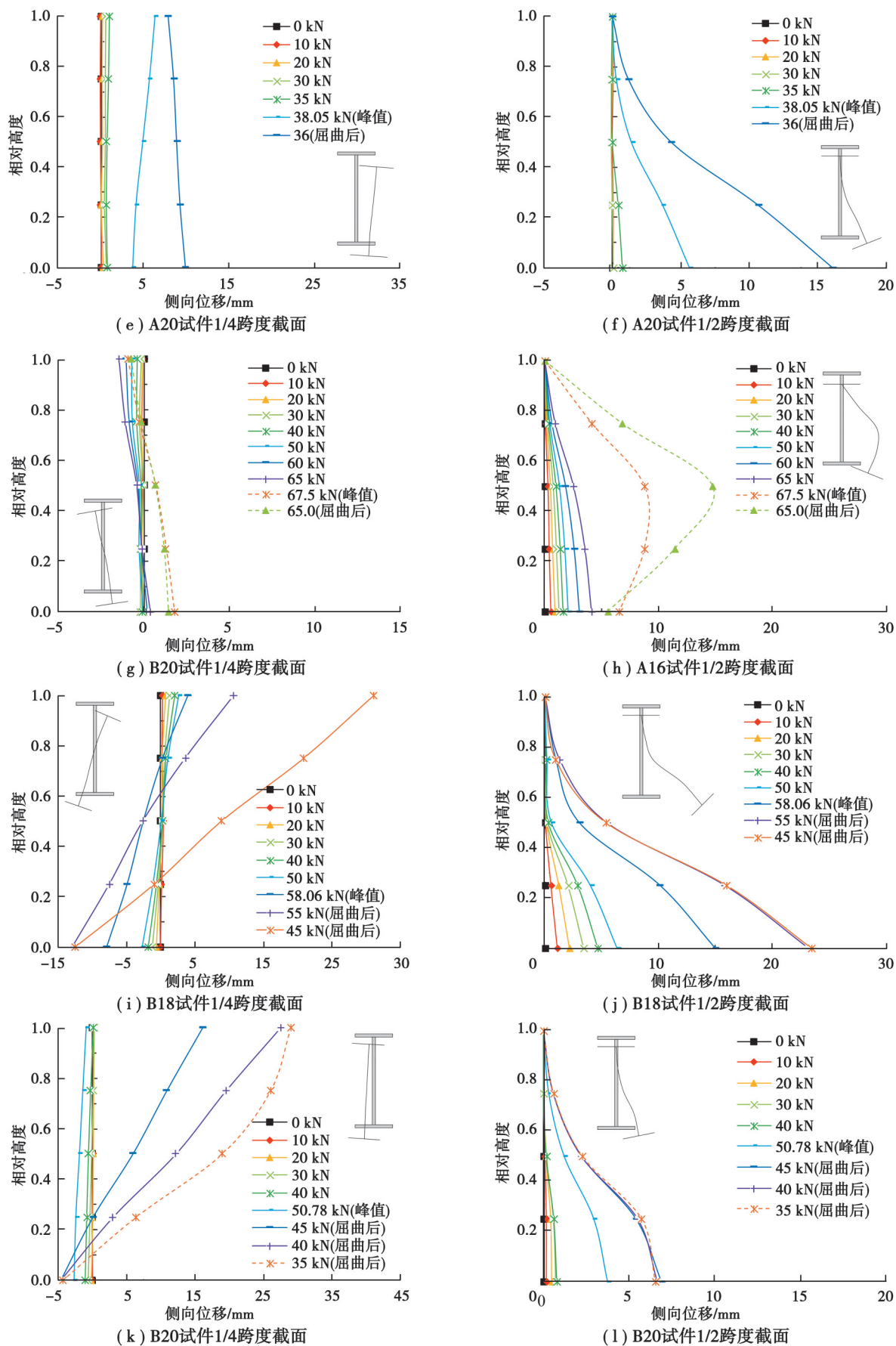


图8 试件沿高度侧向变形曲线

Fig. 8 Lateral deformed shapes along the height of specimens

3 蜂窝梁畸变屈曲临界荷载分析

目前,各国规范尚未提出蜂窝梁畸变屈曲临界承载力的计算方法。Nethercot等^[3]指出蜂窝梁整体弯扭失稳临界荷载可采用普通工字钢计算方法进行计算,但需根据蜂窝梁开孔部位截面计算截面参数。蜂窝梁截面抗扭惯性矩(I_t)可按式(1)计算。Pi等^[15]以及Kalkan等^[2]将截面有效惯性矩和一般惯性矩的比值作为折减系数以考虑腹板局部屈曲对工字钢梁畸变屈曲临界承载力的影响。假定,蜂窝梁在畸变屈曲时,其截面惯性矩折减系数与普通工字钢梁相同,可以推导出蜂窝梁畸变屈曲临界承载力的有效惯性矩。蜂窝梁有效抗扭惯性矩 I_{te} 可按式(2)~式(4)计算。蜂窝梁有效翘曲惯性矩 I_{wc} 可按式(5)~式(7)计算。

$$I_t = \frac{NS_{eq}}{L_0} I_{t,0} + \left(1 - \frac{NS_{eq}}{L_0}\right) I_{t,2T}, \quad (1)$$

式中: S_{eq} 为等效孔洞间距^[11]; $I_{t,0}$ 为梁墩截面处扭转常数; $I_{t,2T}$ 为等效后孔洞截面的扭转常数。

$$I_{te} = K_t I_t, \quad (2)$$

式中: K_t 为扭转惯性矩折减系数。

$$K_t = \frac{1}{I_{t,0}} \frac{(2I_{tf}) \left(\frac{12D_w L_0^2}{\pi^2 (H - t_f)} \right)}{(2GI_{tf}) + \left(\frac{12D_w L_0^2}{\pi^2 (H - t_f)} \right)}, \quad (3)$$

式中: I_{tf} 为翼缘扭转惯性矩; G 为剪切模量。

$$D_w = \frac{Et_w^3}{12(1 - \nu^2)}, \quad (4)$$

式中: E 为钢材弹性模量; ν 为钢材泊松比。

$$I_{wc} = K_w I_w, \quad (5)$$

式中: K_w 为翘曲惯性矩折减系数; I_w 为蜂窝梁弱轴的翘曲惯性矩。

$$K_w = \frac{1}{1 + r_{fw}^3 \left(\frac{H - t_f}{12L_0} \right) \left(1 + \frac{B}{H - t_f} \right)}, \quad (6)$$

$$r_{fw} = \min(t_f/t_w, 2), \quad (7)$$

式中: r_{fw} 为计算系数。

考虑畸变屈曲时腹板扭曲变形的影响,采用有效抗扭刚度和有效翘曲刚度对AS4100规范^[22]、AISC规范^[24]以及Nethercot等^[25]提出的蜂窝梁整体弯扭失稳临界荷载计算公式进行修正,进而计算蜂窝梁畸变屈曲临界荷载,并将3种计算方法的结果进行对比。

3.1 AS4100规范方法

基于AS4100规范^[22]修正提出的蜂窝梁畸变屈曲临界荷载 P_{AS4100} ,可根据下式确定:

$$P_{AS4100} = 4M_b/L_0, \quad (8)$$

$$M_b = \alpha_m \alpha_s M_{px} \leq M_{px}, \quad (9)$$

$$M_{px} = f_y w_{px}, \quad (10)$$

$$\alpha_s = 0.6 \left[\sqrt{\left(\frac{M_{px}}{M_{yz}} \right)^2 + 3} - \frac{M_{px}}{M_{yz}} \right], \quad (11)$$

$$M_{yz} = \frac{\pi}{L_0} \sqrt{EI_y GI_{te} (1 + W^2)}, \quad (12)$$

$$W = \frac{\pi}{L_0} \sqrt{\frac{EI_{wc}}{GI_{te}}}, \quad (13)$$

式中, M_b 为蜂窝梁畸变屈曲临界弯矩; α_m 为弯矩修正系数,当两端简支且跨中施加集中荷载时,取该系数 α_m

为 1.75; α_s 表示考虑残余应力、初始弯曲等因素影响后的长细比折减系数, 计算时可使用式 (11); M_{px} 代表塑性弯矩; f_y 表示钢材的屈服强度; w_{px} 为蜂窝梁开孔部位的截面塑性模量; M_{yz} 为简支梁在纯弯矩作用下的弹性弯扭屈曲临界荷载; I_y 为弱轴的抗弯惯性矩。

3.2 AISC 规范方法

文中所有试件均满足 AISC 规范^[24]紧凑截面要求, 蜂窝梁畸变屈曲临界弯矩 M_b 可按式 (14) 确定。

$$M_b = \begin{cases} C_b \left[M_{px} - (M_{px} - 0.7f_y S_x) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_{px}, & L_p < L_b \leq L_r, \\ F_{cr} S_x \leq M_{px}, & L_b > L_r; \end{cases} \quad (14)$$

$$L_p = 1.76 r_y \sqrt{\frac{E}{f_y}}, \quad (15)$$

$$L_r = 1.95 r_{ts} \frac{E}{0.7f_y} \sqrt{\frac{I_{tc} C}{S_x (H - t_f)}} + \sqrt{\left[\frac{I_{tc} C}{S_x (H - t_f)} \right]^2 + 6.67 \left(\frac{0.7f_y}{E} \right)^2}, \quad (16)$$

$$r_{ts}^2 = \frac{\sqrt{I_y I_{wc}}}{S_x}, \quad (17)$$

$$F_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E}{(L_0/r_{ts})^2} \sqrt{1 + 0.078 \frac{I_{tc} C}{S_x (H - t_f)} \left(\frac{L_0}{r_{ts}} \right)^2}, \quad (18)$$

式中: L_b 为侧向支撑的间距; S_x 为弹性截面模量; C_b 为等效弯矩系数; L_p 和 L_r 为侧向支撑间距限值; r_y 为截面关于 y 轴的回转半径; C 为计算系数, 取为 1。

3.3 Nethercot 和 Trahair 方法

采用有效抗扭刚度和有效翘曲刚度对 Nethercot 等^[25]的建议方法进行修正, 用式 (19) 和式 (20) 计算蜂窝梁畸变屈曲临界弯矩。

$$M_b = M_{px} \left[0.7 + \frac{0.3(1 - 0.7M_{px}/(\alpha_m M_{od}))}{0.61 - 0.3\beta_m + 0.07\beta_m^2} \right] \leq \min(\alpha_m M_{od}, M_{px}), \quad (19)$$

$$M_{od} = \frac{2\pi}{L_0} \sqrt{EI_y G I_{tc} (1 + W_c^2)}, \quad (20)$$

式中: β_m 表示侧向约束段间梁段端弯矩的比值, 文中为 0。

3.4 蜂窝梁畸变屈曲承载力计算结果对比

采用修正的 AS4100 规范^[22](P_{AS4100})、AISC 规范^[24](P_{AISC})以及 Nethercot 等^[25](P_{NT})法计算得到的蜂窝梁畸变屈曲临界承载力与试验结果对比如表 3 所示。可以看出, 试验中较短的试件, AS4100 规范的计算结果高于试验值; 对于较长的试件, 计算结果则较为保守; AISC 规范的计算结果普遍高于试验值, 且偏向保守。

表 3 蜂窝梁畸变屈曲承载力计算结果对比

试件编号	P_{test}/kN	P_{AS4100}/kN	P_{AISC}/kN	P_{NT}/kN	P_{AS4100}/P_{test}	P_{AISC}/P_{test}	P_{NT}/P_{test}
A16	48.35	51.54	53.17	50.61	1.07	1.10	1.05
A18	43.01	42.61	47.94	43.76	0.99	1.11	1.02
A20	38.05	32.09	44.65	37.90	0.84	1.17	1.00
B16	67.50	75.67	76.74	73.80	1.12	1.14	1.09
B18	58.01	59.15	67.83	61.55	1.02	1.17	1.06
B20	50.78	46.40	57.73	51.31	0.91	1.14	1.01
均值					0.99	1.14	1.04
变异系数					0.10	0.03	0.04

Nethercot 和 Trahair 方法的计算结果略大于试验结果。总体而言,AS4100 规范以及 Nethercot 和 Trahair 方法的计算结果与试验结果吻合较好,但 AS4100 规范计算结果离散性更大。

4 结 论

1) 文中研究参数范围内,蜂窝梁试件均发生畸变屈曲破坏,构件受压翼缘在结构失效时呈 S 形曲线,腹板发生局部屈曲。

2) 加载初期,试件 1/4 跨度截面腹板中部一侧处于受拉状态,另一侧为受压状态,接近畸变屈曲临界荷载时出现突变;1/2 跨度截面上翼缘处设置有侧向支撑,加载初期腹板中部两侧均处于受压状态,随荷载增加,腹板一侧逐渐转变为受拉状态。

3) 蜂窝梁加载初期,荷载随竖向位移增加近似线性增加,接近畸变屈曲临界荷载时竖向位移急剧增大;随构件长度增加,荷载-竖向位移曲线前期刚度减小,非线性段部分逐渐减少,畸变屈曲临界承载力降低。

4) 初始缺陷明显的蜂窝梁加载初期即存在明显侧移,初始缺陷不明显的蜂窝梁加载初期变形较小,接近畸变屈曲临界荷载时侧向变形快速增大;蜂窝梁 1/4 跨度截面腹板均发生了整体侧移,且构件出现明显扭曲变形;1/2 跨度截面处腹板出现明显局部屈曲,下翼缘发生明显侧移。

5) 采用修正的 AS4100 规范、AISC 规范以及 Nethercot 和 Trahair 计算方法对试验中各蜂窝梁试件的畸变屈曲临界荷载进行分析,发现 AS4100 规范以及 Nethercot 和 Trahair 方法的计算结果与试验结果吻合较好,但 AS4100 规范计算结果离散性较大。

参考文献

- [1] 周绪红,李井超,贺拥军,等.蜂窝梁的稳定性能研究进展[J].建筑结构学报,2019,40(3):21-32.
Zhou X H, Li J C, He Y J, et al. Advances on stability performance of castellated beams [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(3): 21-32. (in Chinese)
- [2] Kalkan I, Buyukkaragoz A. A numerical and analytical study on distortional buckling of doubly-symmetric steel I-beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 70: 289-297.
- [3] Nethercot D A, Kerdal D. Lateral-torsional buckling of castellated beams [J]. The Structural Engineer, 1982, 60(3): 53-61.
- [4] Sevak D. Stability of castellated beam webs [D]. Montreal: McGill University, 1999.
- [5] Zaarour W, Redwood R. Web buckling in thin webbed castellated beams [J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(8): 860-866.
- [6] Redwood R, Demirdjian S. Castellated beam web buckling in shear [J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(10): 1202-1207.
- [7] 王旭东,王培军.蜂窝钢梁孔间腹板屈曲性能研究进展[J].建筑钢结构进展,2014,16(6):1-13.
Wang X D, Wang P J. Advances on buckling of behavior of web-posts in castellated steel beams [J]. Progress in Steel Building Structures, 2014, 16(6): 1-13. (in Chinese)
- [8] Wang P J, Wang X D, Ma N. Vertical shear buckling capacity of web-posts in castellated steel beams with fillet corner hexagonal web openings [J]. Engineering Structures, 2014, 75: 315-326.
- [9] Wang P J, Guo K R, Liu M, et al. Shear buckling strengths of web-posts in a castellated steel beam with hexagonal web openings [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 121: 173-184.
- [10] Sonck D, Impe R V, Belis J. Experimental investigation of residual stresses in steel cellular and castellated members[J]. Construction and Building Materials, 2014. 54: 512-519.
- [11] Sonck D. Global buckling of castellated and cellular steel beams and columns [D]. Belgium: Ghent University, 2014.
- [12] 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(增刊):304-309.
Jia L G, Yang J H, Qin C G. Experimental study on residual stress distribution along open hole sections of cellular steel components [J]. Engineering Mechanics, 2015, 33(Suppl): 304-309. (in Chinese)

- [13] 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.
Chen X R, Wu G, Ran H D. Effects of welding residual stresses on overall stability of castellated beams [J]. Building Structure, 2015, 45(21): 35-40. (in Chinese)
- [14] Zhou X H, Li J C, He Y J, et al. Finite element analysis of thermal residual stresses in castellated beams[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 148: 741-755.
- [15] Pi Y L, Trahair N S. Distortion and warping at beam supports [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2000, 126(11): 1279-1287.
- [16] Zirakian T. Lateral-distortional buckling of I-beams and the extrapolation techniques [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(1): 1-11.
- [17] 叶继红, 陈伟. 工字钢—混凝土组合梁弹性约束畸变屈曲研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(6): 82-91.
Ye J H, Chen W. Elastic restrained distortional buckling of I-steel-concrete composite beams [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(6): 82-91. (in Chinese)
- [18] 陈伟, 叶继红. 基于势能原理的双轴对称工字梁弹性侧向屈曲研究 [J]. 工程力学, 2012, 29(3): 95-102.
Chen W, Ye J H. Elastic lateral buckling of doubly symmetric I-beams based on potential energy method [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(3): 95-102. (in Chinese)
- [19] Zirakian T, Showkati H. Distortional buckling of castellated beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62(9): 863-871.
- [20] Ellobody E. Nonlinear analysis of cellular steel beams under combined buckling modes [J]. Thin-Walled Structures, 2012, 52: 66-79.
- [21] Ellobody E. Interaction of buckling modes in castellated steel beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(5): 814-825.
- [22] Standards Association of Australia. Steel structures: AS 4100-1998[S]. Sydney: Standards Australia Limited, 1998.
- [23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 金属材料拉伸试验第 1 部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic materials-Tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228.1—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011. (in Chinese)
- [24] American Institute of Steel Construction (AISC). Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings: ANSI/AISC 360-99 [S]. Chicago: AISC, 1999.
- [25] Nethercot D A, Trahair N S. Inelastic lateral buckling of determinate beams [J]. Journal of the Structural Division, 1976, 102(4): 701-717.

(编辑 陈移峰)