

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2023.05.005

考虑残余应力影响的蜂窝梁畸变屈曲性能研究

林 炬¹, 任志勇¹, 刘 城¹, 郑 灿¹, 李井超²

(1. 湖南教建集团有限公司, 湖南 长沙 410013; 2. 湖南城市学院 土木工程学院, 湖南 益阳 413000)

摘 要: 基于蜂窝梁残余应力的试验研究成果和普通工字钢梁的残余应力分布研究成果, 给出了蜂窝梁的残余应力分布模型, 并与已有试验研究成果对比, 以验证该模型的正确性。通过分析梁的长度、翼缘厚度和宽度等对蜂窝梁畸变屈曲临界荷载的影响规律, 进一步探索了残余应力对蜂窝梁畸变屈曲荷载的影响程度及简化考虑残余应力影响的计算方法。研究结果表明: 翼缘宽度和厚度对蜂窝梁畸变屈曲临界荷载影响较大, 而腹板厚度对蜂窝梁畸变屈曲临界荷载影响较小; 提高钢材强度可在一定程度上提高蜂窝梁畸变屈曲临界荷载, 但残余应力的影响程度会相应增大; 提出采用折减系数 $K_d=0.85$ 来计算蜂窝梁畸变屈曲荷载中的残余应力影响, 该方法安全且简便, 便于实际工程应用。

关键词: 蜂窝梁; 畸变屈曲; 残余应力分布; 数值分析; 简化计算方法

中图分类号: TU391; TU312⁺.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2023)05-0037-07

引文格式: 林 炬, 任志勇, 刘 城, 等. 考虑残余应力影响的蜂窝梁畸变屈曲性能研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2023, 37(5): 37-43.

Research on Distortional Buckling of Castellated Beams with Residual Stress Effects Taken into Consideration

LIN Ju¹, REN Zhiyong¹, LIU Cheng¹, ZHENG Can¹, LI Jingchao²

(1. Hunan Jiaojian Group Co., Ltd., Changsha 410013, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang Hunan 413000, China)

Abstract: Based on the experimental research results of the residual stresses of the castellated beams and the related research results of the residual stresses distribution in I-shaped beams, a residual stresses distribution model has thus been proposed for castellated beams, with its validity verified by comparing it with existing experimental results. An investigation is made on the influence of such key factors as the length, the thickness and width of the flange on the distortional buckling load of castellated beams, to be followed by a further exploration conducted on the influence of residual stress on the distortional buckling load of castellated beams as well as the means to simplify the calculation method with the residual stress effects taken into consideration. The results show that the width and thickness of flanges have great influences on the distortional buckling load of castellated beams, while the effects exerted by web thickness is relatively small. An increase in steel strength helps to improve the distortional buckling load to a certain degree, but with a corresponding increase in residual stress effects. The proposed method, which adopts a reduction coefficient $K_d=0.85$ to calculate the residual stress effects, is good in security performance and easy to handle, which is convenient

收稿日期: 2022-12-18

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (2020JJ5020); 湖南省教育厅科研基金资助项目 (19C0364)

作者简介: 林 炬 (1980-), 男, 湖南长沙人, 湖南教建集团有限公司高级工程师, 硕士, 主要研究方向为结构工程技术,
E-mail: 524392947@qq.com

通信作者: 任志勇 (1986-), 男, 湖南长沙人, 湖南教建集团有限公司高级工程师, 硕士, 主要研究方向为工程施工技术,
E-mail: renzhiyong563@126.com

for practical engineering application.

Keywords: castellated beam; distortional buckling; residual stress distribution; numerical analysis; simplified calculation method

1 研究背景

蜂窝梁凭借其轻质高强、节省材料、造型美观等特点, 已经在高层建筑、大跨空间结构和桥梁等结构体系中得到了广泛的应用。相关的学者们从理论分析、数值分析和试验研究等方面, 对蜂窝梁的特性进行了系统的研究。已有研究表明, 蜂窝梁的失稳模式主要分为整体弯扭失稳、局部屈曲、畸变屈曲^[1]。其中, 畸变屈曲失稳模式又可以分为侧倾畸变屈曲和约束畸变屈曲两类。图 1 所示为蜂窝梁各失稳模式示意图。

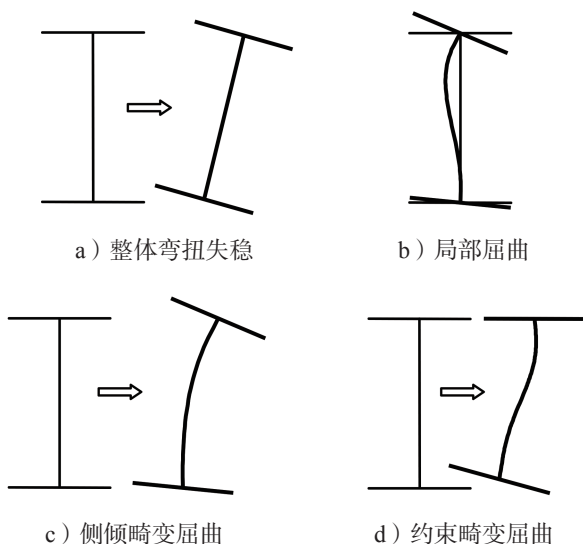


图 1 蜂窝梁失稳模式示意图

Fig. 1 Failure modes of castellated beams

蜂窝梁的侧倾畸变屈曲失稳模式, 多发生在长度适中、腹板高度和厚度之比较大的梁。当蜂窝梁跨中没有侧向约束时, 在荷载作用下, 可能在发生整体弯扭失稳时出现腹板局部屈曲, 称为侧倾畸变屈曲。而当蜂窝梁上翼缘受到板件侧向约束时, 可能发生约束畸变屈曲。

目前, 国内外学者们对于蜂窝梁的整体失稳和局部屈曲模式进行了大量研究。D. A. Nethercot 等人^[2]对以往试验研究中蜂窝梁发生整体弯扭失稳破坏的试件进行了汇总和分析, 并借鉴分析成果制作了蜂窝梁试件, 且针对蜂窝梁的弯扭失稳特性进行了试验, 得到了蜂窝梁的破坏机制与实腹梁破坏机制相似

的结论。D. Sonck 等人^[3]对蜂窝梁制作中的残余应力进行了试验测定, 给出了蜂窝梁翼缘残余应力分布模式; 并研究了残余应力对蜂窝梁整体稳定性能的影响。Zhou Xuhong 等人^[4]采用数值法研究了蜂窝梁加工制作过程中残余应力的变化情况, 分析了蜂窝梁的截面几何特性对其残余应力的影响规律。贾连光等人^[5]采用盲孔法, 实测了 7 根蜂窝梁试件腹板开孔处截面的纵向残余应力, 分析了各因素的影响规律, 提出了不同工艺下蜂窝梁开孔截面(梁桥截面)残余应力分布模型, 但其未考虑开孔对翼缘残余应力分布的影响。陈鹏^[6]采用切条法, 选用两种规格蜂窝梁, 试验研究其加工过程中的残余应力变化, 探讨了蜂窝梁残余应力变化规律。陈向荣等人^[7]依据文献[3]中蜂窝梁残余应力试验结果和简化分布模型, 编制了 ANSYS 初应力文件, 分析了残余应力对蜂窝梁侧扭屈曲的影响, 完善了蜂窝梁的整体稳定性能研究。其发现, 残余应力对蜂窝梁弹塑性侧扭失稳的影响较大, 且翼缘两侧边缘处残余应力峰值对梁整体稳定承载力影响较大。S. Demirdjian^[8]对蜂窝梁各失效模式的试验、理论研究成果进行了综述, 且重点研究了蜂窝梁腹板的局部屈曲性能。R. Redwood 等人^[9]对蜂窝梁腹板的局部稳定性能进行了系统研究, 且数值分析得到的屈曲荷载结果与试验值较好吻合。他们通过参数化分析, 得到了梁墩几何特性与剪切失稳系数关系曲线, 借助该曲线可预测蜂窝梁失稳时临界剪力。

关于梁的畸变屈曲特性研究, 起步相对较晚, 且研究成果多集中在普通工字钢梁的畸变屈曲特性方面, 而有关蜂窝梁畸变屈曲特性研究相对较少。T. Zirakian 等人^[10]选用 6 根蜂窝梁, 试验研究了其屈曲特性及梁的侧倾畸变屈曲和约束畸变屈曲性能, 试验得到的临界屈曲荷载与采用非弹性法得到的理论值较为接近。李井超等人^[11-12]对 6 根蜂窝梁试件的畸变屈曲性能进行了试验研究, 探讨了蜂窝梁畸变屈曲计算方法。E. Ellobody^[13-14]采用数值法研究了圆孔、六边形孔蜂窝梁的畸变屈曲特性, 并利用建立的分析模型, 对各影响因素进行了参数化分析, 对比了数值法与 AS4100^[15]规范法获得的结果。需要指出的是, E. Ellobody 对六边形孔蜂窝梁研究中, 未考虑截面残余

应力影响;对圆孔梁的分析中虽计及残余应力,但其分布模型直接采用普通工字钢梁分布模型。而文献[3]的研究结果表明:在蜂窝梁制作过程中,腹板切割时会使得焊缝区域温度急剧升高,这会导致塑性压缩,而冷却过程中会因周边区域约束,产生内部自相平衡的残余应力场,其峰值达到或超过材料的屈服应力。显然,蜂窝梁的残余应力分布与普通工字钢梁的残余应力分布不同。

如上所述,学者们虽然对蜂窝梁已经进行了大量研究,但对于蜂窝梁畸变屈曲性能的研究较少,且相关规范中也未发现针对蜂窝梁畸变屈曲的设计建议。已有研究表明,蜂窝梁制作中的切割、焊接过程中,存在着较强的热输入,其会使得蜂窝梁的残余应力分布模式不同于传统工字钢梁,而残余应力对蜂窝梁整体稳定性影响较大。

为了完善蜂窝梁稳定性研究成果,本文拟对已有的相关研究成果进行归纳与总结,基于此提出一个蜂窝梁残余应力的分布模型,再以此为基础编制ANSYS初应力文件。之所以采用ANSYS软件,是因为其充分考虑了材料非线性、几何非线性以及残余应力分布等因素。利用ANSYS有限元分析软件建立了蜂窝梁的三维分析模型,并且通过将仿真结果与文献[10]中获得的试验值进行对比,验证了模型的可靠性。最后,进行模型参数化分析,探讨各因素对蜂窝梁畸变屈曲性能的影响规律,以及残余应力对蜂窝梁畸变屈曲性能的影响程度,并进一步探讨了如何简化考虑残余应力影响的蜂窝梁畸变屈曲荷载计算方法,以期对蜂窝梁畸变屈曲设计提供参考。

2 有限元分析模型

本文采用ANSYS软件建立蜂窝梁三维有限元分析模型,并充分考虑其几何非线性、材料非线性和残余应力等对蜂窝梁稳定性的影响。为验证分析的可靠性,依据T. Zirakian等人^[10]经试验研究得到的蜂窝梁畸变屈曲临界荷载,对本文数值建模及分析方法进行验证。

2.1 单元类型及网格划分

本研究中,参照文献[10]中的试验描述,对蜂窝梁的端部和跨中上翼缘处设置侧向约束的模型,施加跨中集中荷载,并根据对称性原则建立有限元分析模型。本模型采用4节点Shell181壳单元。腹板和翼缘处采用映射法划分网格,网格的尺寸相同,其长和宽分别为15,10 mm,具体的网格划分如图2所示。通过试算,得知给出的模型网格划分满足精度要求。

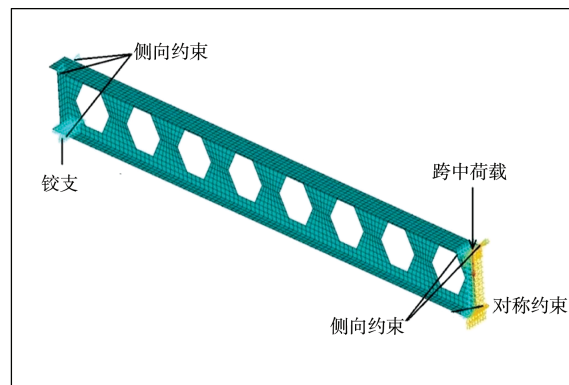


图2 模型网格划分

Fig. 2 Model mesh partition

2.2 几何缺陷和材料特性

在具体的制作过程中,蜂窝梁会存在几何缺陷。本研究中,蜂窝梁初始几何缺陷按一阶屈曲模态施加,如图3所示,峰值取梁有效长度(有效支撑点间距离)的1/1 000。

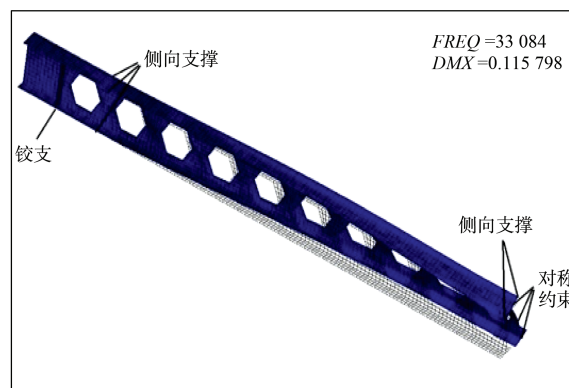


图3 分析模型的一阶屈曲模态

Fig. 3 First-order buckling mode of the numerical model

蜂窝梁计算模型中,材料本构关系用双线性等向强化模型,曲线初始斜率取材料弹性模量 E ,应力达屈服强度时,切线模量取 $0.015E$ 。钢材的屈服和极限强度取实测值的平均值,且材料弹性模量 $E=200$ GPa,泊松比 $\mu=0.3$ 。

2.3 残余应力分布模型

文献[3]中试验研究结果表明,蜂窝梁的加工制作过程会导致梁桥(开孔截面)和梁墩(实腹截面)部位的翼缘处产生残余压应力,相对原型工字钢梁的对应值,实测的梁墩、梁桥部位的翼缘两侧残余压应力均增加了50 MPa(即 $0.15f_y$,其中 f_y 为钢材的屈服强度),中部的压应力分别增加了40,55 MPa;梁墩腹板截面的残余应力的分布相对普通工字钢梁也发生了改变。基于翼缘中部的残余应力峰值对梁的整体稳定性影响较小,而边缘处的残余应力峰值对蜂窝

梁的整体稳定性影响较大^[7], 本研究中翼缘中部和翼缘边缘的热残余压应力统一取 $0.15f_y$ 。

文献[16]对各种截面形式工字钢梁的残余应力分布进行了系统的归纳与总结, 并以此为基础, 结合文献[3, 5]的试验研究成果, 假设翼缘和腹板残余应力分别自相平衡, 提出了由焊接工字钢梁经切割、焊接得到的蜂窝梁桥截面的残余应力分布规律。由于蜂窝梁的残余应力呈对称分布, 故此处仅给出上半截面梁的残余应力分布, 如图4所示, 其中翼缘中部的残余拉应力分布长度取 $2t_w$, t_w 为腹板厚度。根据工字钢梁的残余应力分布图, 针对蜂窝梁的截面特性, 可方便地得到其残余应力分布公式, 编制 ANSYS 初应力文件。

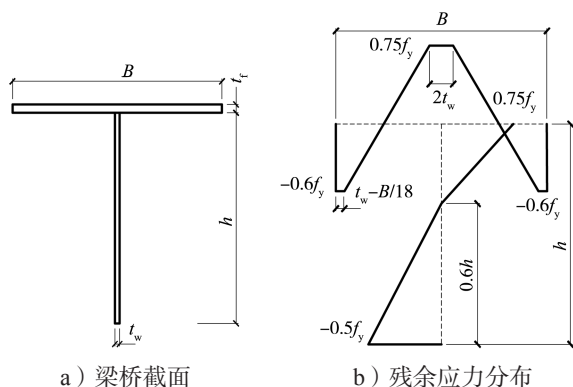


图4 梁桥截面及残余应力分布示意图

Fig. 4 Residual stress distribution in beam bridge section

为便于分析, 本研究中假设沿蜂窝梁长度方向各截面的残余应力分布保持不变, 故残余应力分布模型中近似取梁桥部位残余应力分布。分析模型中残余应力的实际分布如图5所示, 可见其分布模式大致与图4相同。

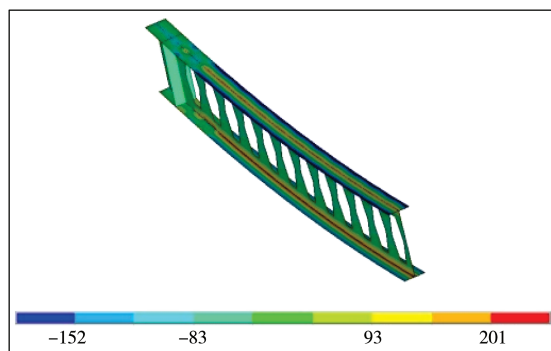


图5 分析模型残余应力分布图

Fig. 5 Residual stress distribution of the numerical model

2.4 残余应力分布模型验证

对上文建立的有限元分析模型进行分析, 并将其破坏形态和屈曲荷载分析结果与文献[10]中的试验结果进行对比, 所得结果如图6、图7以及表1所

示。其中, 图6为文献[10]中试件 C180-3600 的屈曲形态试验结果和本文模拟结果对比, 图7为文献[10]中试件 C210-4400 的屈曲形态试验结果和本文模拟结果对比, 表1为各试件屈曲荷载的试验值与有限元分析结果对比。

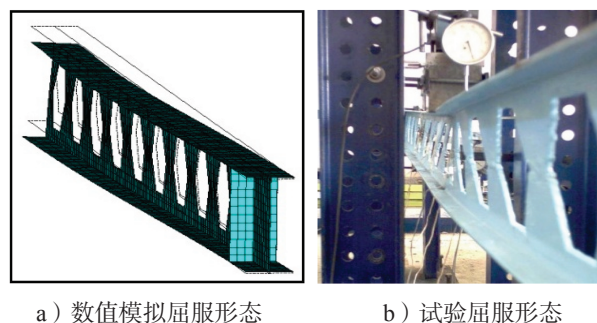


图6 试件 C180-3600 的破坏形态对比

Fig. 6 Comparison of numerical and experimental buckled shapes at failure for specimen C180-3600

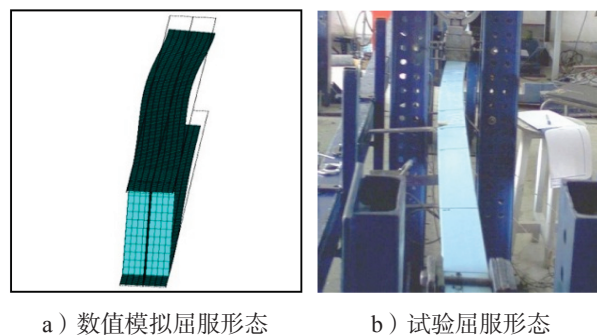


图7 试件 C210-4400 的破坏形态对比

Fig. 7 Comparison of failure buckling mode of specimen C210-4400

由图6和图7可以看出, 当试件被破坏时, 由于跨中存在上翼缘侧向约束, 在跨中集中力作用下, 腹板局部扭曲, 而下翼缘产生侧向移动, 均发生了约束畸变屈曲, 且有限元分析中相应试件屈曲与试验对比形态吻合较好。

表1 试验与有限元分析结果对比

Table 1 Comparison between experimental and finite element analysis results

试件编号 ^[14]	破坏类型	试验值 F_1 / kN	有限元分析值 F_2 / kN	F_2/F_1
C180-3600	畸变屈曲	21.58	22.56	1.045
C180-4400	畸变屈曲	15.63	16.07	1.028
C210-3600	畸变屈曲	37.22	37.60	1.010
C210-4400	畸变屈曲	28.91*	29.92	1.035
C210-5200	畸变屈曲	24.90	23.70	0.952
均值				1.014
变异系数				0.032 5

注: * 表示试验数值有明显问题, 参考文献[10]中采用的为理论值。

表1中的数值对比结果进一步表明: 1) 试件的

破坏方式均为畸变屈曲, 本模型能较好预测试件破坏类型; 2) 屈服荷载的有限元分析结果与试验值接近, 变异系数为 0.032 5, 进一步验证了所用有限元模型和分析方法的可靠性。

3 参数化分析

3.1 参数取值

本节将进一步分析构件关键几何参数和材料强

度取值对蜂窝梁在是否考虑残余应力两种情况下的畸变屈曲临界荷载的影响规律。其中, 构件的约束条件和加载条件与文献 [10] 中试验设置相同。蜂窝梁构件的几何参数如图 8 所示, 关键参数包括翼缘宽度及厚度、构件长度、腹板厚度、材料强度, 各参数及取值见表 2。表中 B 为翼缘宽度, t_f 为翼缘厚度, h_w 为腹板高度, t_w 为腹板厚度, L 为构件长度, f_y 为材料屈服强度。

表 2 分析模型的参数及取值
Table 2 Parameter values of analysis models

模型分组	模型编号	B/mm	t_f/mm	h_w/mm	t_w/mm	L/mm	f_y/MPa
G1	S1	300	10	580	6	4 800	235
	S2	250	10	580	6	4 800	235
	S3	200	10	580	6	4 800	235
	S4	150	10	580	6	4 800	235
G2	S5	200	12	574	6	4 800	235
	S6	200	10	580	6	4 800	235
	S7	200	8	584	6	4 800	235
	S8	200	6	588	6	4 800	235
G3	S9	300	10	580	6	6 000	235
	S10	250	10	580	6	6 000	235
	S11	200	10	580	6	6 000	235
	S12	150	10	580	6	6 000	235
G4	S13	200	12	574	6	6 000	235
	S14	200	10	580	6	6 000	235
	S15	200	8	584	6	6 000	235
	S16	200	6	588	6	6 000	235
G5	S17	300	10	580	6	7 200	235
	S18	250	10	580	6	7 200	235
	S19	200	10	580	6	7 200	235
	S20	150	10	580	6	7 200	235
G6	S21	200	12	574	6	7 200	235
	S22	200	10	580	6	7 200	235
	S23	200	8	584	6	7 200	235
	S24	200	6	588	6	7 200	235
模型分组	模型编号	B/mm	t_f/mm	h_w/mm	t_w/mm	L/mm	f_y/MPa
G7	S25	300	10	580	6	8 400	235
	S26	250	10	580	6	8 400	235
	S27	200	10	580	6	8 400	235
	S28	150	10	580	6	8 400	235
G8	S29	200	12	574	6	8 400	235
	S30	200	10	580	6	8 400	235
	S31	200	8	584	6	8 400	235
	S32	200	6	588	6	8 400	235
G9	S33	200	10	580	6	4 800	460
	S34	200	10	580	6	6 000	460
	S35	200	10	580	6	7 200	460
	S36	200	10	580	6	8 400	460
G10	S37	200	10	580	6	4 800	690
	S38	200	10	580	6	6 000	690
	S39	200	10	580	6	7 200	690
	S40	200	10	580	6	8 400	690
G11	S41	200	10	580	5	4 800	235
	S42	200	10	580	5	6 000	235
	S43	200	10	580	5	7 200	235
	S44	200	10	580	5	8 400	235
G12	S45	200	10	580	7	4 800	235
	S46	200	10	580	7	6 000	235
	S47	200	10	580	7	7 200	235
	S48	200	10	580	7	8 400	235

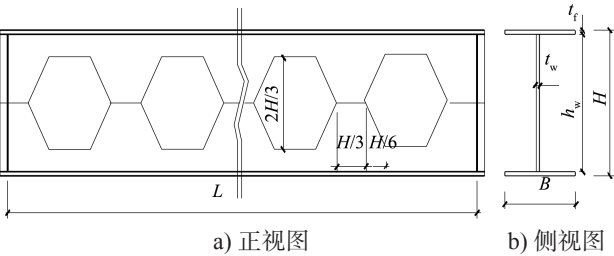


图 8 蜂窝梁构件几何参数

Fig. 8 Geometric parameters of castellated beams

此处需要注意的是, 依据文献 [14] 的研究成果, 当蜂窝梁截面 $H/t_w \geq 85$ 时, 易发生腹板的局部屈曲破坏, 为了便于参数化分析, 本研究中蜂窝梁的高度统一设置为 600 mm, 而变化其他参数进行研究。分析表 2 中的数据, 可以得知表 2 中给出的各模型均满足 $H/t_w \leq 85$ 。

3.2 不同参数影响规律

各参数对蜂窝梁畸变屈曲临界荷载的影响规律如图 9 和 10 所示。

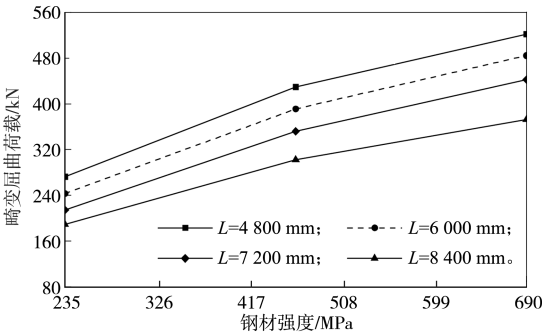


图 9 材料强度对畸变屈曲荷载的影响

Fig. 9 Influence of the steel strength on the distortional buckling load of castellated beams

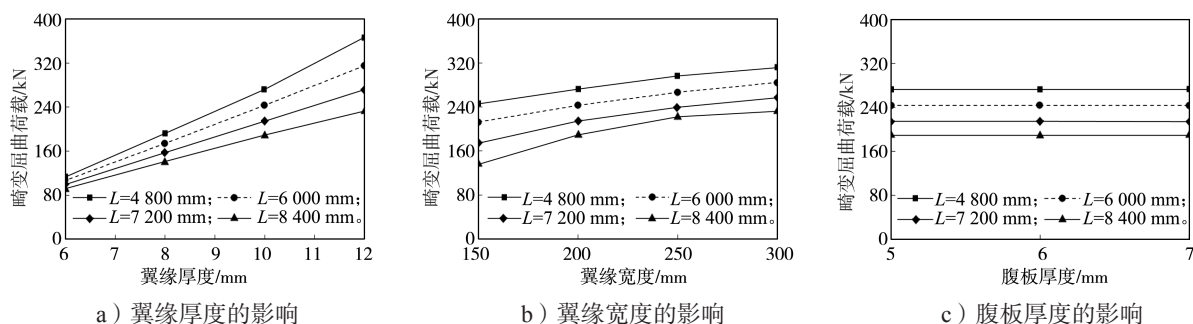


图 10 截面几何特性对畸变屈曲荷载的影响

Fig. 10 Influence of geometrical properties of cross-section on the distortional buckling load of castellated beams

由图 9 和 10 中可以看出：对不同长度 L 的构件，蜂窝梁的畸变屈曲荷载随各影响因数的变化规律基本一致。在蜂窝梁几何参数中，翼缘宽度和厚度对其畸变屈曲荷载的影响较为明显，均随着翼缘宽度（或厚度）的增加而明显增大，且构件长度 L 越小，其增大趋势越明显。而腹板厚度对蜂窝梁畸变屈曲荷载的影响较小，蜂窝梁畸变屈曲荷载基本保持不变。出现这一结果，主要是因为翼缘宽度和厚度对蜂窝梁惯性矩影响较大，而腹板厚度对其影响较小。

从图 9 中还可以看出，蜂窝梁的畸变屈曲荷载对钢材强度的变化十分敏感，随着钢材强度提高，蜂窝梁畸变屈曲荷载明显提高。因此，实际工程中可以选用较高强度钢材，在一定程度上提高蜂窝梁畸变屈曲临界荷载。

4 考虑残余应力的蜂窝梁畸变屈曲荷载简化计算方法

4.1 残余应力影响程度

为进一步分析残余应力对蜂窝梁畸变屈曲荷载的影响程度，对上述 12 组不同参数取值的有限元分析模型，在不考虑残余应力和考虑残余应力两种情况下的畸变屈曲临界荷载进行了分析，所得结果如图 11 所示。

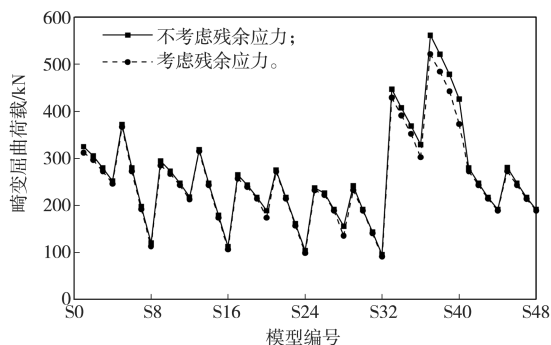


图 11 残余应力对畸变屈曲荷载的影响

Fig. 11 Influence of the residual stress distribution on the distortional buckling load of castellated beams

从图 11 中可以看出，考虑和不考虑残余应力两种情况下，不同参数取值模型的畸变屈曲临界荷载变化规律基本一致，且考虑残余应力的影响后，畸变屈曲临界荷载呈不同程度下降，最大降低率约为 13%，可见残余应力的影响不可忽视。同时也发现，当蜂窝梁的材料强度较高时，如编号 S33~S40 模型中，材料强度为 460 MPa 和 660 MPa 时，残余应力的影响程度相对较大。因此，在实际工程中需要考虑残余应力对蜂窝梁畸变屈曲承载力的影响。

4.2 残余应力影响简化计算方法

从上述分析中可以得出，残余应力的影响不可忽略，但目前相关规范中尚未有针对蜂窝梁畸变屈曲的计算方法。因此，蜂窝梁畸变屈曲荷载主要通过有限元分析方法进行计算。同时，从上述分析过程中也可以得出，在蜂窝梁的畸变屈曲有限元分析中，考虑残余应力的影响过程十分复杂且费时。因此，接下来进一步探讨在蜂窝梁的畸变屈曲荷载计算中如何在考虑残余应力影响下简化残余应力计算。

以不考虑残余应力影响模型的计算结果为参照值，得到的上述 12 组考虑残余应力影响模型的畸变屈曲临界荷载降低率分布散点图，如图 12 所示。

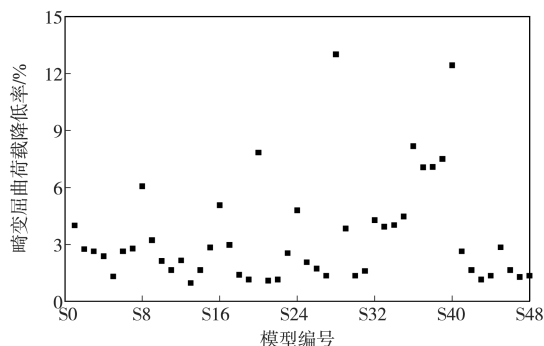


图 12 畸变屈曲荷载降低率散点图

Fig. 12 Scatter diagram of distortion buckling load reduction rates

从图 12 中可以看出，考虑残余应力影响后，各模型的畸变屈曲荷载降低率大部分在 10% 以内，最

大降低率为 13%。因此, 实际工程中计算蜂窝梁畸变屈曲荷载时, 可采用不考虑残余应力影响的蜂窝梁理想模型进行计算, 然后偏于安全, 将其乘以折减系数 $K_d=0.85$, 以简化考虑残余应力的影响。

5 结论

本文通过数值模拟, 研究了两端简支、端部和跨中施加侧向约束的蜂窝梁, 在跨中荷载作用下考虑残余应力影响的畸变屈曲性能, 得到以下结论:

1) 基于相关学者对蜂窝梁残余应力的试验研究和普通工字钢梁残余应力分布规律, 提出了蜂窝梁残余应力分布适用模型, 并通过与相关文献的试验结果对比, 验证了所给模型的合理性。

2) 翼缘宽度和厚度对蜂窝梁屈曲临界荷载的影响相对较大, 而腹板厚度的改变对蜂窝梁屈曲临界荷载的影响较小。提高钢材的强度可在一定程度上提高蜂窝梁畸变屈曲荷载, 但残余应力的影响程度也会相应增大, 因此实际工程中可适当提高蜂窝梁钢材强度以提高畸变屈曲荷载。

3) 残余应力会使蜂窝梁畸变屈曲荷载不同程度降低, 最大降低率达 13%, 实际工程中不能忽视其影响。建议采用折减系数 $K_d=0.85$ 来考虑蜂窝梁畸变屈曲荷载计算中残余应力的影响, 该方法设计安全且计算简便, 便于实际工程操作。

参考文献:

- [1] 周绪红, 李井超, 贺拥军, 等. 蜂窝梁的稳定性研究进展 [J]. 建筑结构学报, 2019, 40(3): 21-32.
ZHOU Xuhong, LI Jingchao, HE Yongjun, et al. Advances on Stability Performance of Castellated Beams[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(3): 21-32.
- [2] NETHERCOT D A, KERDAL D. Lateral-Torsional Buckling of Castellated Beams[J]. The Structural Engineer, 1982, 60(3): 53-61.
- [3] 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.
- [4] ZHOU Xuhong, LI Jingchao, HE Yongjun, et al. Finite Element Analysis of Thermal Residual Stresses in Castellated Beams[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 148: 741-755.
- [5] 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 1): 304-309.
JIA Lianguang, YANG Jianhua, QIN Chenguang.

- Experimental Study on Residual Stress Distribution Along Open Hole Sections of Cellular Steel Components[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(S1): 304-309.
- [6] 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]. 重庆: 重庆大学, 2020.
CHEN Peng. Performance and Design Calculation Formula of Castellated Beams Experiencing Distortional Buckling Behavior Considering Residual Stress[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [7] 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 Xiangrong, WU Gang, RAN Hongdong. Effects of Welding Residual Stresses on Overall Stability of Castellated Beams[J]. Building Structure, 2015, 45(21): 35-40.
- [8] DEMIRDJIAN S. Stability of Castellated Beam Webs[D]. Montreal: McGill University, 1999.
- [9] REDWOOD R, DEMIRDJIAN S. Castellated Beam Web Buckling in Shear[J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(10): 1202-1207.
- [10] ZIRAKIAN T, SHOWKATI H. Distortional Buckling of Castellated Beams[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62(9): 863-871.
- [11] 李井超. 残余应力对蜂窝梁稳定性能的影响研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
LI Jingchao. Research on the Influence of Residual Stresses on the Stability of Castellated Beams[D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [12] ZHOU Xuhong, HE Ziqi, CHEN Peng, et al. Distortional Buckling Behavior and Design Consideration of Castellated Beams Considering Residual Stresses[C]// Structural Stability Research Council Annual Stability Conference. St. Louis, MO: Structural Stability Research Council, 2019: 1-14.
- [13] ELLOBODY E. Nonlinear Analysis of Cellular Steel Beams Under Combined Buckling Modes[J]. Thin-Walled Structures, 2012, 52: 66-79.
- [14] ELLOBODY E. Interaction of Buckling Modes in Castellated Steel Beams[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(5): 814-825.
- [15] Australian Building Codes Board. Australian Standards: Steel Structures: AS 4100[S]. Sydney: Standards Australia, 1998: 12-23.
- [16] 陈 骥. 钢结构稳定理论与设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 150-175.
CHEN Ji. Stability of Steel Structures Theory and Design[M]. Beijing: China Science Press, 2001: 150-175.

(责任编辑: 廖友媛)