

纯弯作用下双排圆孔蜂窝梁应力分析及截面应力计算方法

贾连光¹,王妍霓¹,张丽²,王春刚¹

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 沈阳城市建设学院土木工程学院,辽宁 沈阳 110167)

摘要 为了充分发挥大梁高的蜂窝梁腹板优异特性,提出一种腹板双排开孔的新型蜂窝钢梁构件,给出截面正应力计算方法,为双排孔蜂窝梁的工程应用和后续研究提供参考。**方法** 应用 ABAQUS 软件建立双排孔蜂窝梁数值模型,在此基础上分析开孔率、中间梁桥高度对蜂窝梁横截面正应力分布、孔周周向应力分布的影响规律,将有限元模拟结果进行数值拟合得到正应力修正系数,并基于费式桁架法提出横截面正应力简化计算方法。**结果** 梁桥中心截面上腹板的最大正应力出现在翼缘与腹板连接处或靠近翼缘的开孔边缘处;墩板中心截面中性轴附近区域存在近零应力区段,其余部分的正应力接近于线性分布;孔周周向应力的最大值出现在梁桥中心截面上,在 φ 约为 30° 、 150° 、 210° 、 330° 处发生变号。**结论** 双排孔蜂窝梁的开孔率应不大于 60%;双排孔蜂窝梁中间梁桥高度与梁高的比值应该控制在 $1/12 \sim 1/6$,所提出的正应力简化计算方法在上述范围内具有良好的精度。

关键词 双排孔蜂窝梁;正应力;周向应力;应力集中系数;有限元;强度计算

中图分类号 TU398.1

文献标志码 A

Stress Analysis and a Method of Calculating the Normal Stress for Double-row Circular Web Opening Castelled Beam under Pure Bending

JIA Lianguang¹, WANG Yanni¹, ZHANG Li², WANG Chungang¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Civil Engineering, Shenyang Urban Construction University, Shenyang China, 110167)

Abstract: In order to fully use the exceptional qualities of the web of the high castelled beam, a new castelled steel beam member with double-row holes is proposed and the section normal stress calculation method is provided for serving as a guide for engineering applications and related studies of castelled beams with double-row holes. The numerical model of a double-row opening

收稿日期:2022-07-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51978422)

作者简介:贾连光(1961—),男,教授,博士研究生导师,主要从事钢结构设计与计算理论等方面研究。

castellated beam was built and validated using the finite element program ABAQUS. The effect of opening rate and intermediate girder bridge height on the the normal stress distribution of the cross-section and the circumferential stress distribution around the hole of the castellated beam is investigated. The positive stress concentration coefficients are obtained by numerically fitting the finite element simulation results, and a simplified calculation method of positive stresses in the cross-section is proposed based on the ferrous truss method. On the central cross-section of the girder bridge, the largest positive stresses in the web occur at the connection between the flange and the web or at the edge of the opening near the flange. A near-zero stress region occur near the neutral axis of the central section of the pier, and the normal stress of the rest is close to linear distribution. The maximum circumferential stress of the hole appears on the central section of the girder bridge, and the sign changes at φ of approximately 30° , 150° , 210° , and 330° . The opening rate of double-row opening castellated beams should not exceed 60%, and the ratio of bridge height to beam height in the middle of the double-row opening castellated beams should be kept between 1/12 and 1/6. In the above given range, the proposed simplified calculation approach for positive stresses has good accuracy.

Key words: double-row opening castellated beam; normal stress; circumferential stress; stress concentration factor; finite element; strength calculation

蜂窝钢梁凭借抗弯刚度高、节省钢材、造型美观、便于管道穿越等优点在钢结构建筑中被广泛采用。在较大梁高的蜂窝梁腹板开较大单孔(开孔率 50% ~ 70%)后,梁纵向截面内的残余应力在一定范围内会随着梁高增加而增大,这将降低孔间腹板的承载能力和稳定性,还会加剧孔角处的应力集中,蜂窝梁翼缘将承担更多的剪力次生弯矩,进而过早进入屈服阶段,蜂窝梁优异的承载性能得不到完全发挥^[1-4]。因此,如何开孔才能充分发挥较大梁高的蜂窝梁腹板优异特性,是目前亟需解决的问题。

S. Yanuar^[5]提出了椭圆形孔蜂窝梁有限元建模方法并进行了验证;R. Deephal^[6]研究了开口角处圆角半径与加劲肋对蜂窝梁承载力的影响;M. J. Amol^[7]评估了六边形孔蜂窝梁和矩形孔蜂窝梁跨中截面的极限承载力和挠度。李鹏飞^[8]以空腹桁架理论为基础,推导均布荷载作用下蜂窝梁应力的计算公式,黄炳生等^[9-10]采用 Simpson 公式,推导了蜂窝梁的等效抗弯刚度计算方法;陈录如等^[1,11-13]对蜂窝梁的应力分布规律、强度计算等进行了研究,提出的计算公式均具

有较高的准确性;贾连光等^[14-17]对蜂窝梁和蜂窝组合梁的抗弯、剪性能,腹板局部屈曲等进行了大量研究。杜嘉慧等^[18]给出了正六边形孔蜂窝梁正应力及剪应力计算公式。为了高效便捷地在大跨结构中运用蜂窝钢梁,笔者将在现有研究的基础上,提出一种在腹板上横向开设两排有规律孔洞的新型蜂窝梁,将其称为双排孔蜂窝梁。双排孔蜂窝梁可减小构件自重、增大刚度,同时有效减小腹板所受横向阻力。笔者将费式桁架法应用于双排孔蜂窝梁正应力分析,提出一种双排孔蜂窝梁截面正应力的简化计算方法,为双排孔蜂窝梁的后续研究提供参考。

1 有限元模型的验证

1.1 试验概况

1.1.1 试件及实验装置

本次试验设计了 1 根开孔率为 60% 的正六边形孔蜂窝梁,开孔形式为腹板直接开孔,试件具体尺寸见表 1。试件所使用的钢材为 Q355,材料属性见表 2。本次试验研究蜂窝梁在纯弯作用下的力学性能,采用四分点加载,试件的支座为一边滚轴,一边刀铰,

以此来实现简支边界;设立侧向支撑防止平面外失稳;由顶部助动器施加荷载至分配梁上,分配梁通过铰接支座及垫板传递至试件

表 1 蜂窝梁主要尺寸

Table 1 The main design parameters of castellated beams mm

试件编号	梁高×翼缘宽×翼缘厚	纯弯段外腹板厚度	内腹板厚度	梁长
FWL-1	500×250×14	10	5	3 428

表 2 材料属性

Table 2 Material properties

名称	板厚/mm	E/GPa	f_y /MPa	f_u /MPa	ε_s /‰	ε_{st} /‰	ε_u /‰	泊松比
内腹板	5	204	333	550	0. 13	0. 14	1. 37	0. 29
外腹板	10	202	452	619	0. 15	0. 20	1. 25	0. 31
翼缘	14	200	389	544	0. 15	0. 17	1. 04	0. 33

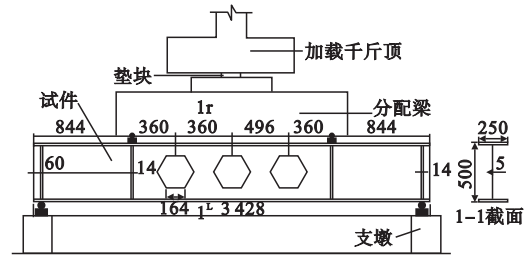


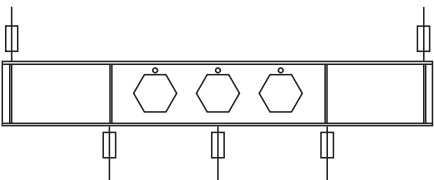
图 1 试件设计及试验装置

Fig. 1 Design of test pieces and the test device

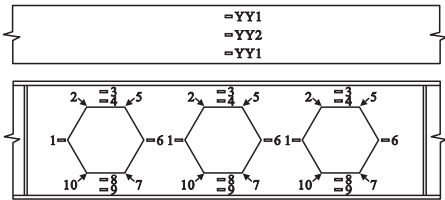
上,在试件相应位置布置加劲肋,防止局部破坏,试件设计及加载装置见图 1。

1. 1. 2 加载制度及测量装置

加载制度选择荷载 – 位移双控制加载,试件屈服前采用荷载控制,以 200 kN 为一级施加荷载,达到屈服荷载后改为位移控制加载,加载的速率为 1 mm/min,直到试件承载力下降至极限荷载的 85%。试件的位移计设置如图 2(a)所示,应变片布置如图 2(b)所示。



(a)位移计布置



(b)应变片布置

图 2 测量装置

Fig. 2 Measuring devices

1. 1. 3 破坏模式

试件 FWL-1 的屈服荷载为 1 532. 5 kN, 极限荷载为 1 844 kN。当荷载到达屈服荷载时,a,b 孔角开始出现屈曲现象,b 孔处的桥板出现了鼓曲。当荷载到达 1 835 kN 时,a 孔孔角 2 发生明显的平面外屈曲。当荷载达到 1 840 kN 时,c 孔的桥板部分发生了明显的鼓曲,破坏形式如图 3 所示。

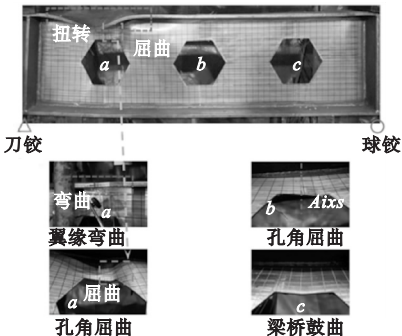


图 3 破坏模式

Fig. 3 Forms of destruction

1.2 有限元模型建立与验证

根据试件尺寸建立如图4所示的有限元模型,单元类型为C3D8R,网格尺寸为15 mm,腹板开孔处网格加密;在试件四分点处以位移控制加载,通过限制位移与转角模拟实际边界;模型的钢材本构关系采用双折线模型。试验与有限元得到的荷载-跨中位移曲线、跨中截面应变发展及破坏形式的对比如图5(a)、(b)和(c)所示,可以看出模拟的精度较好。

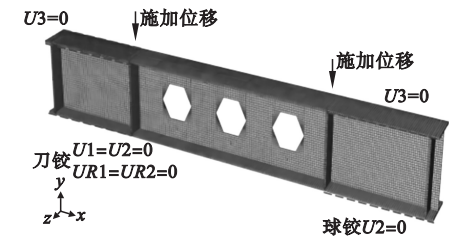


图4 有限元模型
Fig. 4 Finite element model

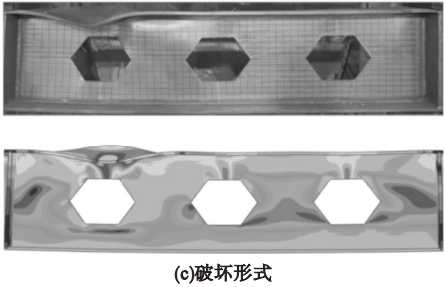
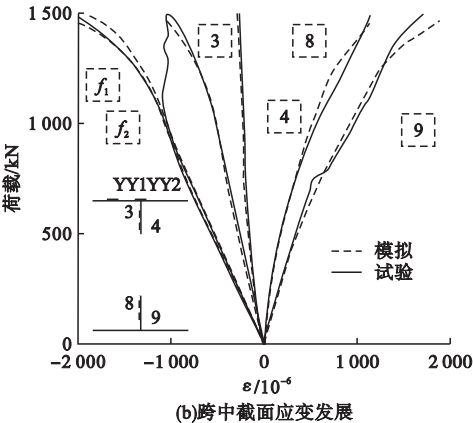
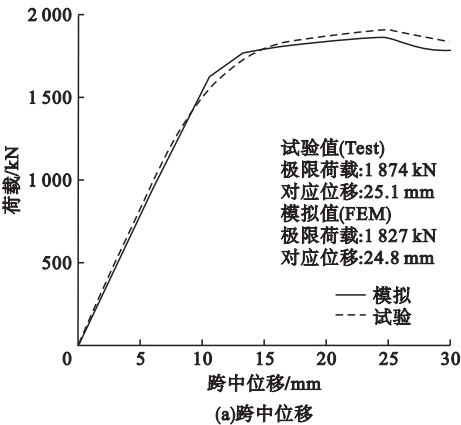


图5 有限元与试验结果对比
Fig. 5 Comparison of finite element results with experimental results

采用相同建模技术建立截面尺寸H1 200 mm×300 mm×10 mm×20 mm,梁长L=12 m的双排孔蜂窝梁有限元模型,在梁的四分点上翼缘处施加集中荷载F=500 kN,模型的详细参数及构造细节见图6,有限元模型见图7。

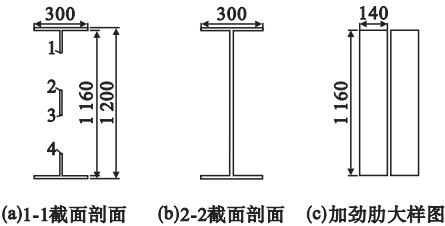


图6 构件尺寸
Fig. 6 Component sizes

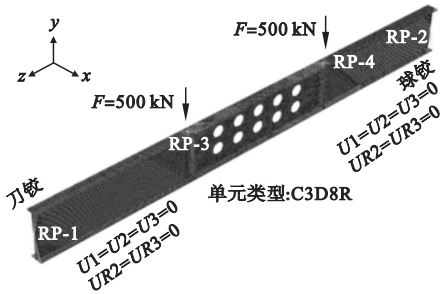


图7 有限元模型
Fig. 7 Finite element model

将双排孔蜂窝梁的腹板按受力状态的不同划分为梁桥和墩板两个部分。在对位排列的双排孔蜂窝梁中,过一系列孔洞中心点的截面称为梁桥中心截面(见图8)。

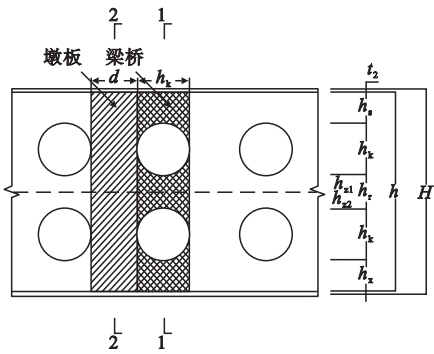


图 8 双排孔蜂窝梁分区示意

Fig. 8 Partition of double-row opening castellated beams

2 梁桥中心截面正应力计算

2.1 参数分析

定义双排孔蜂窝梁一列孔洞高度之和 $h_{k1} + h_{k2}$ 与梁高 H 的比值为双排孔蜂窝梁的开孔率 K 。为了分析开孔率 K 、中间梁桥高度 h_z 对梁桥中心截面正应力分布规律的影响,建立 23 个不同参数条件的有限元分析模型,具体参数值见表 3,其中 SPK-1 ~ SPK-10 相邻编号模型之间的开孔率相差 10%,SPK-11 ~ SPK-19 相邻编号模型之间的开孔率相差 5%,SPK-20 ~ SPK-23 相邻编号模型之间的中间梁桥高度相差 20 mm。

为简化下文描述,对梁桥中心截面上各点作如下定义:将上排开孔靠近上翼缘的孔边缘位置称为点 1,靠近中性轴的孔边缘位置称为点 2;下排开孔靠近中性轴的孔边缘位置称为点 3,靠近下翼缘的孔边缘位置称为点 4。

表 3 双排孔蜂窝梁的参数

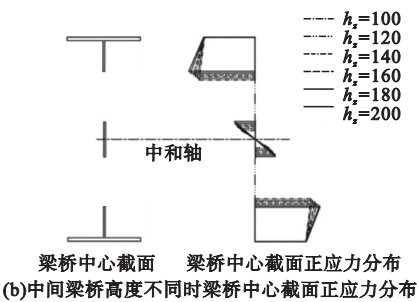
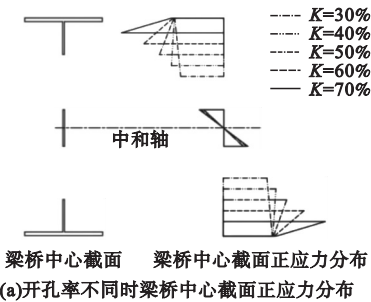
Table 3 Parameters of double-row hole castellated beams

编号	开孔率 $K/\%$	中间梁桥高度 h_z/mm
SPK-1 ~ SPK-5	30 ~ 70	100
SPK-6 ~ SPK-10	30 ~ 70	150
SPK-11 ~ SPK-19	30 ~ 70	200
SPK-20 ~ SPK-23	50	120 ~ 180

2.1.1 参数对横截面正应力分布的影响

在纯弯作用下梁桥中心截面的正应力分布可近似看作由上下梁桥对应的梯形部分和中间梁桥对应的两个三角形部分组成。从图 9(a)看出,当开孔率小于 50% 时,最大正应力出现在腹板与翼缘的连接处;当开孔率大于 50% 时,最大正应力出现在靠近翼缘的开孔边缘。从图 9(b)看出,当中间梁桥高度增大时,梁桥中心截面上开孔边缘位置的正应力增大,上下梁桥对应部分的梯形斜边斜率和中间梁桥对应部分的三角形斜边斜率均变大。

在纯弯作用下墩板截面的正应力分布不满足线性关系,正应力呈现以横截面形心为中心的对称分布。该点的正应力为零,在其中性轴上下形成了一个应力很小的区段,称为近零应力区段;在近零应力区段以外的上下两个区段上,正应力接近于线性分布。从图 9(c)看出,随着开孔率的增大,近零应力区段的高度增加,线性分布区段的直线斜率逐渐减小,截面最大正应力逐渐增大。从图 9(d)看出,随着中间梁桥高度增加,墩板中心截面上近零应力区段的高度增加,线性分布部分的直线斜率也增加。



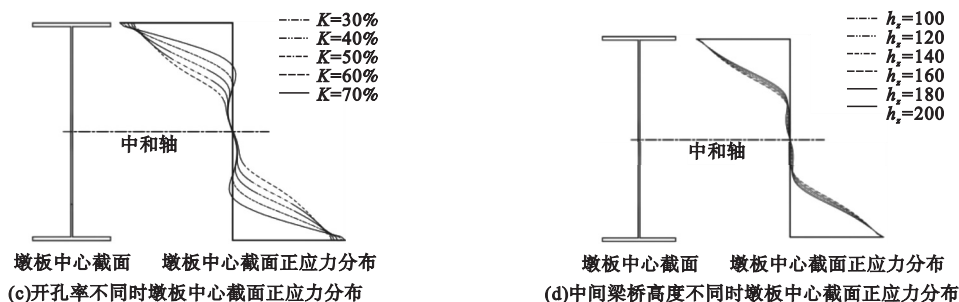


图9 截面正应力分布

Fig. 9 Normal stress distribution of cross section

2.1.2 参数对孔周周向应力分布的影响

称孔周上一点与梁长方向之间夹角为角 φ ,在纯弯作用下,孔周周向应力随角 φ 的变化发生改变。在 φ 约为 30° 、 150° 、 210° 和 330° 处孔周周向应力发生变号;在 $\varphi = 90^\circ$ 时,上排开孔的最大周向应力出现在点1;在

$\varphi = 270^\circ$ 时,下排开孔的最大周向应力出现在点4。从图10(a)看出,随着开孔率逐渐增大,最大周向应力点的应力集中程度逐渐提高。从图10(b)看出,随着中间梁桥高度与梁高的比值增大,点1、4处孔周周向应力集中程度逐渐增加。

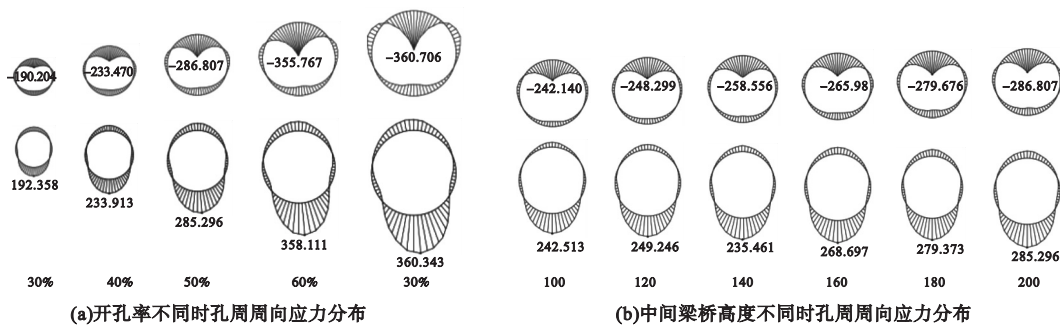


图10 孔周周向应力分布

Fig. 10 Circumferential stress distribution around the hole

2.2 正应力修正系数计算

在计算单排开孔的蜂窝梁内力时,常将蜂窝梁简化看作刚结点桁架,将梁桥中心截面和墩板中心截面视作反弯点,将超静定结构简化为静定结构^[4,11]。通过对双排孔蜂窝梁进行有限元分析,结果表明,在计算双排孔蜂窝梁的内力时,也可以将梁桥中心截面视作反弯点。笔者假设在纯弯荷载作用下梁桥中心截面的正应力仅由弯矩产生,截面各部分的正应力分布均看作直线;腹板与上下翼缘连接处的正应力仍可按实腹截面计算,在实腹截面正应力计算公式的基础上对孔边正应力进行修正。

在弹性力学中,由于板件开孔造成的孔

口附近的应力远大于无孔时的应力,也远大于距孔口较远处的应力,这种现象称为孔口应力集中。反应局部应力增加程度的参数称为应力集中系数 K , K 恒大于1,且与荷载大小无关^[19-20]。

对应力集中系数 K 有如下定义:

$$K = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{nom}}} \quad (1)$$

式中: σ_{\max} 为孔周最大应力,MPa; σ_{nom} 为净截面平均应力,MPa。

将通过有限元分析所得梁桥中心截面开孔处正应力与按实腹截面计算所得该点正应力的比值记为该点的应力集中系数。分别定义 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 为梁桥中心截面上点1、2、

3、4 的正应力集中系数。对开孔率小于 60% 的 19 根双排孔蜂窝梁的正应力集中系数进行计算,计算所得结果见表 4。

表 4 不同孔洞参数下 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 值
Table 4 Values of K_1 , K_2 , K_3 and K_4 under different porosity conditions

编号	K_1	K_2	K_3	K_4
SPK-1	1. 828	1. 821	1. 825	1. 821
SPK-2	1. 799	1. 806	1. 803	1. 806
SPK-3	1. 806	1. 799	1. 803	1. 799
SPK-4	1. 810	1. 805	1. 808	1. 805
SPK-6	1. 832	1. 843	1. 838	1. 843
SPK-7	1. 785	1. 786	1. 786	1. 786
SPK-8	1. 792	1. 790	1. 791	1. 790
SPK-9	1. 823	1. 823	1. 823	1. 823
SPK-11	1. 827	1. 851	1. 839	1. 851
SPK-12	1. 817	1. 824	1. 821	1. 824
SPK-13	1. 793	1. 797	1. 795	1. 797
SPK-14	1. 814	1. 817	1. 816	1. 817
SPK-15	1. 812	1. 780	1. 796	1. 780
SPK-16	1. 834	1. 852	1. 843	1. 852
SPK-17	1. 870	1. 882	1. 876	1. 882
SPK-20	1. 782	2. 829	2. 796	1. 789
SPK-21	1. 797	2. 840	2. 840	1. 807
SPK-22	1. 790	2. 593	2. 563	1. 809
SPK-23	1. 824	2. 512	2. 485	1. 822

2.3 梁桥中心截面的正应力简化计算方法

对表 4 中的正应力集中系数进行分析,可以发现, K_1 和 K_4 、 K_2 和 K_3 的数值基本相近。定义 K_1 和 K_4 的平均值为点 1、4 的正应力修正系数 α_1 , K_2 和 K_3 的平均值为点 2、3 的正应力集中系数 α_2 。

通过数值拟合分析,得出 α_1 与无量纲参数 $\beta_1 = k \frac{h_s}{H}$ 成线性关系,给出了 α_1 的近似计算式(见图 11)。

$$\alpha_1 = -1.577\beta_1 + 1.958 = -1.577k \frac{h_s}{H} + 1.958.$$

(2)

α_2 与无量纲参数 $\beta_2 = \frac{h_z}{h_k}$ 成线性关系,给出了 α_2 的近似计算式(见图 12)。

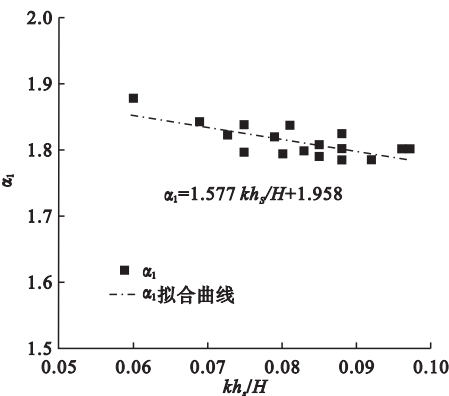


图 11 α_1 拟合曲线
Fig. 11 Fitting curve of α_1

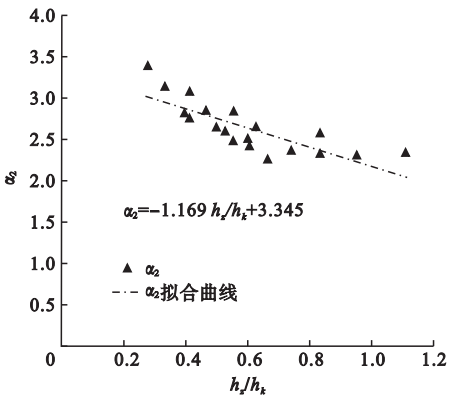


图 12 α_2 拟合曲线
Fig. 12 Fitting curve of α_2

$$\alpha_2 = -1.169\beta_2 + 3.345 = -1.169 \frac{h_z}{h_k} + 3.345.$$

(3)

故在纯弯作用下的梁桥中心截面正应力表达式分别为式(4)、式(5)和式(6)。

梁桥中心截面翼缘与腹板连接处,

$$\delta_0 = \pm \frac{My}{I_x}.$$

(4)

孔洞靠近翼缘处的孔边缘,

$$\delta_1 = \pm \alpha_1 \frac{My}{I_x}.$$

(5)

孔洞靠近腹板中线处的孔边缘,

$$\delta_2 = \pm \alpha_2 \frac{My}{I_x}.$$

(6)

式中: I_x 为梁桥中心截面对中性轴的截面惯性矩, m^4 ; y 为计算点到中性轴的距离, m 。
 α_1 、 α_2 分别按式(2)和式(3)计算,截面其余

位置的正应力按线性内插值计算。该算法可以用于开孔率 K 不大于 60%, 中间梁桥高度 h_z 与梁高 H 的比值在 $1/12 \sim 1/6$ 的双排孔蜂窝梁的梁桥中心截面正应力计算。

3 算例验证

为了验证笔者提出的双排孔蜂窝梁截面正应力计算公式的精度, 分别计算了四组纯弯作用时简支双排孔蜂窝梁梁桥中心截面的正应力, 算例采用截面尺寸 $H800\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的双排孔蜂窝梁模型, 其余参数及加载方式均与上文相同, 集中力 $F=200\text{ kN}$ 。孔洞参数见表 5, 有限元结果与笔者提出的公式之间的误差见表 6。

表 5 算例孔洞参数

Table 5 Pore parameters of the calculation example		
编号	开孔率 $K/\%$	中间梁桥高度 h_z/mm
E-1	40	100
E-2	50	100
E-3	50	80
E-4	50	200

表 6 有限元与计算结果比较

Table 6 Comparison between finite element results and calculation results

算例	位置	有限元结果	计算结果	误差/%
		σ/MPa	σ'/MPa	
E-1	1	-201.372	-201.334	0
	2	-72.399	-68.710	5
	3	73.448	68.710	6
	4	202.894	201.334	1
E-2	1	-248.843	-247.355	1
	2	-78.271	-74.631	5
	3	77.578	74.631	4
	4	254.396	247.360	3
E-3	1	-231.665	-234.345	1
	2	-61.120	-61.749	1
	3	61.399	61.749	1
	4	235.140	234.345	0
E-4	1	-272.431	-269.834	1
	2	-90.078	-93.646	4
	3	91.522	93.646	2
	4	274.219	269.834	2

由表 6 可见, 公式计算结果与有限元计算结果的误差均在 10% 以内, 这表明该计算公式适用于在纯弯作用下不同梁高和开孔参数的简支双排圆孔蜂窝梁梁桥中心截面正应力的计算。

4 结 论

(1) 梁桥中心截面上腹板的最大正应力出现在翼缘与腹板连接处或靠近翼缘的开孔边缘处; 墩板中心截面中性轴附近区域存在近零应力区段, 其余部分的应力接近于线性分布; 孔周周向应力的最大值出现在梁桥中心截面上, 在 φ 约为 30° 、 150° 、 210° 、 330° 处发生变号。

(2) 合理取值范围: 双排孔蜂窝梁的开孔率应该不大于 60%; 双排孔蜂窝梁中间梁桥高度与梁高的比值应该控制在 $1/12 \sim 1/6$ 。

(3) 笔者提出了在纯弯作用下梁桥中心截面上开孔位置正应力修正系数 α_1 和 α_2 , 推导出双排孔蜂窝梁梁桥中心截面的正应力简化计算方法, 该方法对笔者研究范围内的双排圆孔蜂窝梁具有较好的精度, 能够满足工程对计算精度的要求。

参考文献

[1] 陈录如. 蜂窝梁的简化计算与试验研究[J]. 工业建筑, 1985(5): 31-38.
(CHEN Luru. Simplified calculation and experimental study of castellated beams [J]. Industrial construction, 1985(5): 31-38.)

[2] 罗烈, 罗晓霖. 蜂窝梁设计规范的比较研究[J]. 建筑钢结构进展, 2005, 7(2): 43-47.
(LUO Lie, LUO Xiaolin. Comparative research of the design specifications for castellated beam [J]. Progress in steel building structures, 2005, 7(2): 43-47.)

[3] 苏益声. 蜂窝钢梁应用研究[D]. 南宁: 广西大学, 2005.
(SU Yisheng. Study on the application of steel castellated beams [D]. Nanning: Guangxi University, 2005.)

[4] 贾连光, 金路. 蜂窝式钢结构的力学性能[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
(JIA Lianguang, JIN Lu. Mechanical properties of cellular steel structures [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2016.)

- [5] YANUAR S, AY L H, BUNTARA S G, et al. Numerical analysis of castellated beams with oval openings [J]. MATEC web of conferences, 2018, 195: 1–9.
- [6] DEEPHA R, JAYALEKSHMI S. Finite element analysis on shear strength of a castellated beam with hexagonal web opening [J]. IOP conference series: materials science and engineering, 2020, 1006(1): 1–10.
- [7] AMOL J M, RAJASHEKHAR S, TALIKOT I. Prediction of ultimate load carrying capacity of castellated beams by experimental and analytical investigation [J]. International journal of structural engineering, 2021, 11(2): 107–126.
- [8] 李鹏飞, 许宏伟, 李义强. 蜂窝梁应力的简化计算[J]. 四川建筑, 2008, 28(4): 122–124.
(LI Pengfei, XU Hongwei, LI Yiqiang. Simplified calculation of stresses in castellated beams [J]. Sichuan architecture, 2008, 28(4): 122–124.)
- [9] 黄炳生, 黄泰杰, 王维川, 等. 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(增刊2): 121–127.
(HUANG Bingsheng, HUANG Taijie, WANG Weichuan, et al. Calculation method of equivalent bending stiffness of castellated beams and analysis of its influence factors [J]. Journal of building structures, 2018, 39(S2): 121–127.)
- [10] 黄泰杰, 王维川, 黄炳生. 蜂窝梁极限承载力及弯–剪相互作用研究[J]. 土木工程与管理学报, 2019, 36(5): 200–206.
(HUANG Taijie, WANG Weichuan, HUANG Bingsheng. Investigation on ultimate load-carrying capacity and moment-shear interaction of castellated beams [J]. Journal of civil engineering and management, 2019, 36(5): 200–206.)
- [11] 倪富生, 胡泰祥, 胡嗣元, 等. 蜂窝梁的应力分布及设计计算探讨[J]. 工业建筑, 1984(8): 27–35.
(NI Fusheng, HU Taixiang, HU Siyuan, et al. Stress distribution and design calculation of castellated beams [J]. Industrial construction, 1984(8): 27–35.)
- [12] 苏益声, 邹锦华, 张喜德. 圆形孔蜂窝钢梁试验研究[J]. 建筑结构, 2006, 36(8): 28–30.
(SU Yisheng, ZOU Jinhua, ZHANG Xide. Experiment of the circular hole-honeycombed steel beams [J]. Building structure, 2006, 36(8): 28–30.)
- [13] 罗烈, 蔡剑男, 张和平. 简支蜂窝钢梁桥区截面正应力改进算法[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(S1): 342–348.
(LUO Lie, CAI Jiannan, ZHANG Heping. Improved calculation for normal stress in T-section of simply supported castellated steel beams [J]. Journal of building structures, 2016, 37(S1): 342–348.)
- [14] 贾连光, 徐晓霞, 康小柱. 蜂窝梁抗弯承载力的有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2005, 21(3): 196–199.
(JIA Lianguang, XU Xiaoxia, KANG Xiaozhu. Finite element analysis of castellated beam maximum moment capacity [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2005, 21(3): 196–199.)
- [15] 贾连光, 谢国辉, 侯祥林. 基于 Mathematica 的蜂窝梁孔口应力集中问题的复分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2014, 30(3): 414–421.
(JIA Lianguang, XIE Guohui, HOU Xianglin. Complex analysis of stress concentrations in cellular beam with a hole based on the mathematica [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2014, 30(3): 414–421.)
- [16] 贾连光, 张丽, 李娜. 纯弯曲蜂窝梁弯扭屈曲的有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2006, 22(1): 49–52.
(JIA Lianguang, ZHANG Li, LI Na. Finite element analysis of torsional-flexural castellated beams buckling under pure bending [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2006, 22(1): 49–52.)
- [17] 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(增刊2): 23–30.
(JIA Lianguang, LI Qingwen, LIU Yongfang. Performance analysis and calculation of shear force resistance for cellular beam [J]. Engineering mechanics, 2012, 29(S2): 23–30.)
- [18] 杜嘉慧, 毕然, 贾连光. 正六边形蜂窝梁应力计算方法研究[C]. 中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会第17届(ISSF-2021)学术交流会议暨教学研讨会论文集. 北京: 工业建筑杂志社, 2021: 197–201.
(DU Jiahui, BI Ran, JIA Lianguang. Study on the stress calculation method of hexagonal castellated beams [C]. Proceedings of the 17th ISSF-2021 Academic Exchange and Teaching Seminar of Structural Stability and Fatigue Branch of China Steel Structure Association, Beijing: Journal of Industrial Architecture, 2021: 197–201.)
- [19] 徐芝纶. 弹性力学简明教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2018.
(XU Zhilun. A concise tutorial on elastic mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2018.)
- [20] 彼德森. 应力集中系数[M]. 杨乐民, 叶道益, 译. 北京: 国防工业出版社, 1988.
(PETERSON R. E. Stress concentration factor [M]. Translated by YANG Leming, YE Daoyi. Beijing: National Defense Industry Press, 1988.)
(责任编辑: 王国业 英文审校: 唐玉兰)