

文章编号:1673-2049(2008)01-0102-05

# 蜂窝梁等效抗弯刚度的确定方法

周朝阳,周云峰

(中南大学 土木建筑学院,湖南 长沙 410075)

**摘要:**通过分析不同开孔的蜂窝梁,提出了确定蜂窝梁等效抗弯刚度的方法。该方法根据纯弯蜂窝梁有限元分析(FEA)结果,按照经典力学中挠度-刚度或弯矩-曲率关系式反算刚度,具有简捷、准确、经济、高效等优点。提出了蜂窝梁等效抗弯刚度的合理表达式,并以常用的六边形孔和圆孔为例,通过大量有限元分析,得到了腹板刚度折减系数表,然后进一步给出了该系数的半理论半经验计算公式。结果表明,采用该公式可快速求得蜂窝梁的等效抗弯刚度。

**关键词:**蜂窝梁;等效抗弯刚度;刚度算法;刚度公式;六边形孔;圆孔

**中图分类号:**TU392

**文献标志码:**A

## Confirm Method of Equivalent Bending Rigidity of Castellated Beams

ZHOU Chao-yang, ZHOU Yun-feng

(School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China)

**Abstract:** Through analyzing the different opening castellated beams, a method was put forward to determine the equivalent bending stiffness of castellated beams, which was reversely derived from the results of finite element analysis (FEA) for castellated beams under pure bending and the relationships both between deflection and stiffness and between moment and curvature in classical mechanics. It was simple, accurate, economical, and high efficient. A rational formulation was presented to express the equivalent bending stiffness, in which the reduction factor of stiffness for web with openings was obtained by finite element analysis and the method above-mentioned. Furthermore, semi-theory and semi-empirical computing equations were proposed to calculate the factor for castellated beams with hexagonal perforation and circular holes, common shapes in practice. The equivalent bending stiffness of castellated beams can be readily reckoned by using the formula.

**Key words:** castellated beam; equivalent bending rigidity; algorithm of rigidity; expression of rigidity; hexagonal perforation; circular hole

## 0 引言

蜂窝梁是一种工字形截面空腹钢梁,其腹板上开有一系列相同形状、大小和间距的侧穿孔洞,孔形主要是六边形或圆形。与实腹工形截面梁相比,蜂窝梁能够节省材料,便于敷设管道,并且通透美观,

故在工程实践中具有推广应用价值,但目前中国尚未制定相应的技术标准。

蜂窝梁不是经典梁,其变形不符合平截面假定<sup>[1-4]</sup>。早先计算蜂窝梁挠度时,采用的是与实腹梁同样的方法,即只考虑弯矩产生的挠度,抗弯刚度按最弱空腹截面取值<sup>[5]</sup>。之后,人们通过试验发现这

收稿日期:2007-11-05

基金项目:湖南省建设科技计划项目(2004-25);湖南省科技计划项目(2007SK3061)

作者简介:周朝阳(1964-),男,湖南衡阳人,教授,博士生导师,工学博士,E-mail:joezycn@163.com。

种方法对挠度估计过低,原因是腹板开孔使剪切变形大幅度增加。于是,Allftlish 等把蜂窝梁比拟为费氏空腹桁架,提供了一个很好的概念模型和理论方法,并已成为许多国家制定其相应规范的基础。该方法的挠度表达式由弯曲挠度、剪切挠度和剪力次弯矩引起的挠度组成,其中蜂窝梁弯曲挠度是由相应实腹梁弯曲挠度乘以扩大系数而得,与剪切挠度算法类似<sup>[6-9]</sup>。空腹桁架比拟法没有明确地提出等效抗弯刚度或抗剪刚度的概念,并且其扩大系数取值是否合适,必须基于对等效刚度的把握做出判断。所谓等效刚度,就是把截面呈规律性反复变化的蜂窝梁看成长度、荷载和支承条件相同的等截面经典梁,当该经典梁发生与蜂窝梁相同的宏观变形(挠度)时其相应的刚度。有了等效刚度,就可以直接采用既有的材料力学公式计算蜂窝梁相应的变形,因此,确定蜂窝梁的等效刚度,是评价和改进既有挠度算法的基础;但是,迄今为止人们并未找到蜂窝梁等效刚度的真实值,只是通过零星的试验间接涉及到这个问题,认识还不够深入。笔者将对不同开孔情况(孔洞形状、大小和间距)的蜂窝梁进行系统的分析,解决等效抗弯刚度取值的问题,为今后的工程应用提供方便。

## 1 研究思路

### 1.1 概述

确定非经典受弯构件的等效抗弯刚度,传统的研究手段是通过试验。对蜂窝梁而言,由于剪力产生的挠度不可忽略且无精确算法,试验时必须消除剪切的影响。为此建议采用纯弯试验方法,常规的两点对称加载简支梁中部有一纯弯段,而且试验方便,可把纯弯段按蜂窝梁开孔,但要求该段有足够的长度。不过,虽然剪切效应可以在试验中排除,但焊接质量、材料质量不均匀性等试验过程中无法回避的因素影响却难以剔除,误差在所难免,不做大量的试验不易得到准确的试验结果来确定刚度。鉴于多参数试验研究工作量大、耗钱费力还未必准确,本文中采用数值方法进行研究。就弹性分析而言,若能经试算找到足够精度、切实可行的单元模型和网格方案,这样确定蜂窝梁拉弯刚度的方法是最为有效的。本文中笔者取纯弯蜂窝梁进行有限元分析,得到其挠度后,根据经典力学方法反算确定蜂窝梁的等效抗弯刚度。

### 1.2 纯弯悬臂蜂窝梁的有限元分析

一悬臂蜂窝梁如图 1 所示,在悬臂端施加弯矩

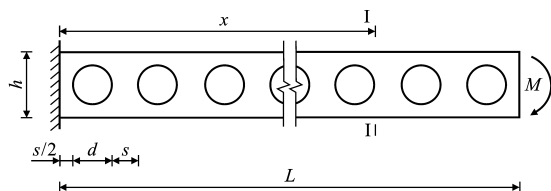


图 1 纯弯悬臂蜂窝梁

Fig. 1 Cantilever Castellated Beam Under Pure Bending

$M$ ,为了得到该弯矩作用下梁的挠度,笔者应用大型有限元软件 ANSYS 进行了数值计算。取工形截面尺寸  $b=200\text{ mm}$ ,  $h=400\text{ mm}$ ,  $t_w=t=20\text{ mm}$ ,  $M=64.8\text{ kN}\cdot\text{m}$ (图 2),采用 Solid45 块体单元,材料参数按钢材取:弹性模量  $E=2.1\times 10^{11}\text{ Pa}$ ,泊松比  $\nu=0.3$ ,剪切模量  $G=E/(2+2\nu)$ 。孔洞形状考虑六边形和圆形 2 种。对同一孔形,逐一改变孔洞大小和间距,分别进行有限元分析。把孔洞高度  $d$  与截面高度  $h$  之比称为孔高比,孔洞净距  $s$  与截面高度  $h$  之比称为孔距比,并以孔况 0802 表示  $d/h=0.8$ 、 $s/h=0.2$ ;其余类推。同一孔况下,还研究了悬臂梁长度和开孔数量对蜂窝梁的影响。

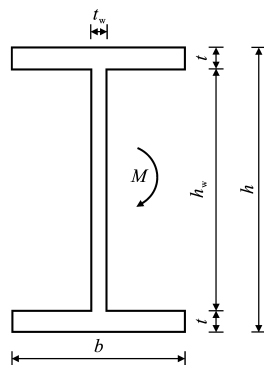


图 2 工形截面

Fig. 2 I-section

1.3 等效抗弯刚度的反推

本文中设蜂窝梁的等效抗弯刚度为  $B$ 。把蜂窝梁等效为刚度相同的经典梁,按照材料力学的单位荷载法或结构力学的图乘法,图 1 中距离固定端  $x$  处截面 I-I 的挠度  $f_x$  与等效抗弯刚度  $B$  有如下关系式

$$B = \frac{Mx^2}{2f_x} \quad (1)$$

这样,应用有限元软件 ANSYS 计算出  $f_x$  后,就可以通过式(1)求得蜂窝梁的等效抗弯刚度  $B$ 。计算截面 I-I 一般不取在梁端,为的是避免有限元建模时梁端弯矩施加方式可能产生的局部影响。此外,基于弯矩-曲率关系式计算刚度的方法,也可得到等效抗弯刚度值  $B=M/\varphi=Mxh/(u_u-u_b)$ ,  $u_u$ 、 $u_b$  为距固定端  $x$  处截面的上、下边缘水平位移。

六边形和圆形孔蜂窝梁的计算结果表明:当相应实腹工形截面尺寸相同且孔况(孔洞形状、大小和间距)也相同时,反推所得蜂窝梁等效抗弯刚度不随

蜂窝梁的长度和开孔数量而改变;只要计算截面离固定端不是太近,反算所得刚度几乎保持恒定;挠度-刚度关系式和弯矩-曲率关系式的计算结果非常

接近。这说明利用上述方法所得结果是稳定可信的。当然,微小的计算误差在所难免,可取用平均值,六边形孔蜂窝梁的部分计算结果见表 1。

表 1 工形截面六边形孔蜂窝梁抗弯刚度的计算结果比较

Tab. 1 Comparisons Between Calculated Results of Bending Stiffnesses for I-section Hexagon-castellated Beam

孔况	有限元分析结果		方案 I		方案 II	
	按曲率计算的刚度/MPa	按挠度计算的刚度/MPa	等效抗弯刚度/MPa	相对误差/%	等效抗弯刚度/MPa	相对误差/%
0802	70 885 000	70 916 000	70 644 000	-0.36	70 604 000	-0.42
0703	73 285 000	73 235 000	73 081 000	-0.24	73 019 000	-0.33
0604	75 012 000	74 890 000	74 752 000	-0.27	74 757 000	-0.26
0505	76 142 000	75 972 000	75 884 000	-0.23	75 898 000	-0.21
0406	76 800 000	76 610 000	76 539 000	-0.22	76 560 000	-0.19

注:相对误差指该方案计算的等效抗弯刚度相对 2 种反算法所得抗弯刚度平均值的误差。

2 抗弯刚度的表达式

对图 2 所示的普通实腹工形梁截面,其抗弯刚度  $B_s$  为翼缘抗弯刚度  $B_f$  和腹板抗弯刚度  $B_w$  两部分之和; $B_s=B_f+B_w$ ,即  $I_s=I_f+I_w$ ,称之为翼腹刚度组合表达式。截面面积划分方案为 2 种:①方案 I,矩形  $2(b-t_w)t+t_w h$ ;②方案 II,矩形  $2bt+t_w \cdot (h-2t)$ 。相应地, $I_f、I_w$  计算式有所不同:

方案 I

$$\left. \begin{aligned} I_f &= 2(b-t_w)t\left(\frac{h-t}{2}\right)^2 + \frac{(b-t_w)t^3}{6} \\ I_w &= \frac{t_w h^3}{12} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

方案 II

$$\left. \begin{aligned} I_f &= 2bt\left(\frac{h_w+t}{2}\right)^2 + \frac{bt^3}{6} = 2bt\left(\frac{h-t}{2}\right)^2 + \frac{bt^3}{6} \\ I_w &= \frac{t_w h_w^3}{12} = \frac{t_w (h-2t)^3}{12} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

蜂窝梁是腹板开孔的工形钢梁,其等效抗弯刚度  $B$  肯定低于相应实腹梁的抗弯刚度  $B_s$ ,如果简单地将二者比值  $B/B_s$  定义为抗弯刚度折减系数,则该系数不仅与开孔孔况有关,还取决于相应实腹工形截面尺寸。逐一针对不同孔况和翼板、腹板截面尺寸的相对变化按照第 1 节中所述方法来确定刚度折减系数,计算工作量太大,也很难通过数据拟合找到一个好的经验公式来全面反映这些参数的影响。借鉴普通工形钢梁的做法,将蜂窝梁抗弯刚度和惯性矩按翼腹刚度组合形式表达: $B=B_f+B_{w_0}, I_s=I_f+I_{w_0}, B_{w_0}、I_{w_0}$  分别为开孔腹板的等效抗弯刚度和惯性矩。进一步把  $B_{w_0}、I_{w_0}$  表示为相应实心腹板的抗弯刚度  $B_w$  和惯性矩  $I_w$  乘以抗弯刚度折减系数  $k$ ,则有

$$\left. \begin{aligned} B &= B_f + k B_w \\ I_s &= I_f + k I_w \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

开孔腹板实为一矩形截面蜂窝梁,其抗弯刚度折减系数  $k$  只与孔高比和孔距比有关,与翼板和腹板的尺寸比例无关,所以,如果式(4)可行,蜂窝梁抗弯刚度的表达问题将得以简化。文献[3]中给出了一些矩形截面圆孔蜂窝梁的抗弯刚度折减系数,将其代入式(4)进行计算,并把试算刚度值与根据工形截面圆孔蜂窝梁挠度数值解反算所得刚度值进行对比分析,结果发现,不同方法的计算值几乎没有差别。对六边形孔蜂窝梁进行试算,也能得到同样的结论(表 1),因此,翼腹刚度组合表达式对蜂窝梁完全适用。

3 腹板抗弯刚度折减系数

3.1 六边形孔蜂窝梁腹板

既然蜂窝梁的等效抗弯刚度可用式(4)表示,余下的问题就可归结为开孔腹板抗弯刚度折减系数的取值。开孔腹板作为矩形截面蜂窝梁,也不是经典梁,其等效抗弯刚度同样可按第 1.3 节中所述方法求得,只要改工形截面为矩形截面即可。由于腹板很薄,即矩形截面宽度很小,数值分析建模时可采用简单的平面单元。开孔腹板沿孔心连线方向(横孔轴方向)的等效抗弯刚度与实心腹板的抗弯刚度之比即为腹板抗弯刚度折减系数,通过计算可得六边形孔腹板抗弯刚度折减系数,见表 2。

由表 2 可以看出:当孔洞尺寸很小、间距较大时,抗弯刚度折减系数  $k$  接近于 1,即蜂窝梁抗弯刚度趋近于实腹梁截面刚度;随着孔洞的扩大、加密,刚度折减渐趋明显;孔洞尺寸对刚度影响较大,刚度随孔洞扩大而加速降低;孔间净距对刚度影响相对

表 2 六边形孔腹板抗弯刚度折减系数

Tab. 2 Reduction Coefficients of Bending Rigidities for Hexagon-castellated Web

$D \cdot h^{-1}$	不同孔距比的抗弯刚度折减系数								
	0. 10	0. 15	0. 20	0. 25	0. 30	0. 35	0. 40	0. 45	0. 50
0. 80	0. 702 6	0. 709 3	0. 714 8	0. 720 5	0. 726 6	0. 731 7	0. 739 1	0. 745 3	0. 751 9
0. 75	0. 756 0	0. 762 1	0. 767 0	0. 772 1	0. 777 4	0. 782 1	0. 788 5	0. 794 4	0. 800 0
0. 70	0. 803 3	0. 807 5	0. 811 2	0. 816 6	0. 820 7	0. 825 6	0. 830 5	0. 836 1	0. 840 5
0. 65	0. 843 3	0. 845 8	0. 849 6	0. 854 1	0. 858 2	0. 862 4	0. 867 0	0. 871 3	0. 875 5
0. 60	0. 875 4	0. 879 3	0. 882 9	0. 886 2	0. 890 0	0. 893 8	0. 897 5	0. 901 2	0. 904 8
0. 55	0. 903 1	0. 905 7	0. 909 2	0. 912 7	0. 916 1	0. 919 3	0. 922 5	0. 925 7	0. 928 7
0. 50	0. 924 8	0. 927 3	0. 931 0	0. 933 9	0. 937 1	0. 940 4	0. 943 2	0. 945 4	0. 948 1
0. 45	0. 942 6	0. 945 0	0. 947 9	0. 950 8	0. 953 6	0. 956 2	0. 958 5	0. 960 7	0. 962 9
0. 40	0. 955 2	0. 957 7	0. 960 7	0. 963 7	0. 966 4	0. 968 4	0. 970 4	0. 972 4	0. 974 2
0. 35	0. 964 6	0. 967 0	0. 969 9	0. 972 6	0. 975 1	0. 977 2	0. 979 0	0. 980 8	0. 982 1
0. 30	0. 969 4	0. 972 2	0. 975 5	0. 978 4	0. 981 0	0. 983 0	0. 984 7	0. 986 3	0. 987 6
0. 25	0. 970 4	0. 973 6	0. 977 7	0. 981 2	0. 984 2	0. 986 3	0. 988 0	0. 989 6	0. 990 7
0. 20	0. 965 1	0. 970 4	0. 976 8	0. 981 4	0. 984 8	0. 987 4	0. 989 4	0. 990 9	0. 992 1

注: $D$ 为正六边形孔对角距离即外接圆直径,下文同。

较小,刚度随孔洞靠近而逐渐减小。

按式(4)计算六边形孔蜂窝梁的惯性矩  $I$  或等效抗弯刚度  $B$  时,可直接从表 2 查用抗弯刚度折减系数,也可采用式(4)计算这些系数。为此,可先写出六边形孔腹板与腹板平面垂直方向(顺孔轴方向)单位宽度上的抗弯刚度表达式,得出其相对于未开孔矩形截面刚度的折减系数为

将表 2 中的  $k$  分别除以  $k_a$ ,得到矩形截面六边形孔构件横孔与顺孔两向抗弯刚度比,见表 3。从表 3 可以看出,孔距比对六边形孔蜂窝梁两向刚度比影响很小。若忽略此影响,通过拟合发现六边形孔两向刚度比可以简单地表达为  $1-0.264(D/h)^3$ ,于是,表 2 中抗弯刚度折减系数的半理论半经验公式为

$$k_a=1-\frac{15\sqrt{3}}{64}\frac{(D/h)^3}{1+s/D}\approx 1-0.406\frac{(D/h)^3}{1+s/D}\tag{5}$$

$$k=[1-0.264(\frac{D}{h})^3][1-0.406\frac{(D/h)^3}{1+s/D}]\tag{6}$$

表 3 矩形截面六边形孔构件两向抗弯刚度折减系数

Tab. 3 Reduction Coefficients of Bending Rigidities in Two Directions of Member with Rectangular Section and Hexagonal Perforation

$D \cdot h^{-1}$	不同孔距比的抗弯刚度折减系数								
	0. 10	0. 15	0. 20	0. 25	0. 30	0. 35	0. 40	0. 45	0. 50
0. 80	0. 861 8	0. 859 79	0. 857 36	0. 856 07	0. 856 0	0. 855 4	0. 857 99	0. 859 7	0. 862 2
0. 75	0. 890 6	0. 888 97	0. 886 92	0. 885 89	0. 885 8	0. 885 5	0. 887 64	0. 889 6	0. 891 6
0. 70	0. 914 7	0. 912 09	0. 909 72	0. 909 96	0. 909 3	0. 910 1	0. 911 24	0. 913 5	0. 914 8
0. 65	0. 933 5	0. 930 04	0. 928 78	0. 928 89	0. 929 1	0. 929 8	0. 931 27	0. 932 7	0. 934 4
0. 60	0. 946 5	0. 945 63	0. 945 05	0. 944 67	0. 945 3	0. 946 2	0. 947 34	0. 948 7	0. 950 2
0. 55	0. 957 8	0. 956 46	0. 956 58	0. 957 14	0. 958 0	0. 958 9	0. 960 04	0. 961 4	0. 962 8
0. 50	0. 965 6	0. 964 97	0. 966 01	0. 966 60	0. 967 8	0. 969 3	0. 970 56	0. 971 3	0. 972 8
0. 45	0. 972 0	0. 971 97	0. 972 81	0. 973 96	0. 975 2	0. 976 5	0. 977 65	0. 978 8	0. 980 1
0. 40	0. 975 5	0. 976 14	0. 977 63	0. 979 36	0. 981 0	0. 982 0	0. 983 17	0. 984 4	0. 985 6
0. 35	0. 977 8	0. 978 93	0. 980 76	0. 982 58	0. 984 3	0. 985 8	0. 987 02	0. 988 3	0. 989 2
0. 30	0. 977 4	0. 979 36	0. 981 96	0. 984 28	0. 986 4	0. 988 0	0. 989 35	0. 990 6	0. 991 7
0. 25	0. 974 8	0. 977 48	0. 981 16	0. 984 32	0. 987 0	0. 988 9	0. 990 42	0. 991 8	0. 992 8
0. 20	0. 967 2	0. 972 20	0. 978 39	0. 982 82	0. 986 1	0. 988 6	0. 990 47	0. 991 9	0. 993 0

式中: $d=0.866D$ 。

式(6)相对于表 2 中的抗弯刚度折减系数的计算误差非常小,见表 4。从表 4 可以看出,在 $0.35\leq D/h\leq 0.80$ 、 $0.1\leq s/h\leq 0.5$ 这个大大覆盖实用范围

的区间,只有极个别情形(4/90)时相对误差超过 1%,最大相对误差仅为 1.1%。当把式(6)代入式(4)计算工形截面蜂窝梁的抗弯刚度时,精度还会更高,相对误差接近于 0%。

表 4 抗弯刚度折减系数的计算相对误差

Tab. 4 Calculation Relative Errors of Reduction Coefficients of Bending Rigidities										
$D\cdot h^{-1}$	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
相对误差/%	1.11	0.35	-0.59	-0.74	-0.76	-0.69	-0.59	-0.42	0.78	1.11

3.2 圆孔蜂窝梁腹板

把六边形孔改为圆孔,通过上述类似的计算,可得到圆孔腹板的抗弯刚度折减系数值(表 5)。该计算结果同样表明,虽然孔间净距对横孔轴方向抗弯刚度有一定的影响,但横孔与顺孔两向抗弯刚度比却对孔间净距的变化很不敏感。根据这一规律,单用孔高比  $d/h$  反映两向刚度比,得到圆孔腹板抗弯刚度折减系数  $k$  为

$$k=[1-0.528(\frac{d}{h})^4][1-\frac{3\pi(d/h)^3}{161+s/d}]=$$
$$[1-0.528(\frac{d}{h})^4][1-0.589\frac{(d/h)^3}{1+s/d}] \quad (7)$$

表 5 圆孔腹板抗弯刚度折减系数

$D\cdot h^{-1}$	不同孔距比的抗弯刚度折减系数								
	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
0.80	0.581 5	0.586 4	0.590 9	0.598 4	0.604 6	0.611 8	0.618 5	0.625 6	0.633 1
0.75	0.662 0	0.667 3	0.671 2	0.677 4	0.681 9	0.688 9	0.694 9	0.703 1	0.708 1
0.70	0.731 1	0.735 6	0.738 6	0.743 1	0.748 4	0.753 5	0.759 3	0.765 4	0.771 7
0.65	0.788 6	0.793 0	0.796 1	0.800 6	0.804 6	0.810 1	0.813 8	0.819 2	0.823 8
0.60	0.836 9	0.840 0	0.842 9	0.847 0	0.850 7	0.854 7	0.859 2	0.863 1	0.867 5
0.55	0.876 3	0.880 4	0.882 6	0.885 9	0.889 0	0.892 4	0.896 0	0.899 6	0.902 7
0.50	0.908 7	0.911 9	0.914 4	0.917 3	0.920 1	0.923 0	0.925 1	0.927 9	0.931 0
0.45	0.935 1	0.937 0	0.939 3	0.942 2	0.944 4	0.946 2	0.948 5	0.950 5	0.952 8
0.40	0.955 1	0.957 0	0.958 9	0.960 9	0.962 9	0.964 6	0.966 3	0.967 8	0.969 4
0.30	0.982 1	0.983 3	0.984 5	0.985 5	0.986 6	0.987 6	0.988 5	0.989 2	0.989 8
0.20	0.995 7	0.996 2	0.996 6	0.997 1	0.997 4	0.997 8	0.998 1	0.998 3	0.998 5

4 结 语

- (1)提出了根据纯弯蜂窝梁数值分析结果反算确定其等效抗弯刚度的方法,该方法具有快捷、准确、经济、高效等优点。
- (2)提出了翼腹刚度组合表达的蜂窝梁等效抗弯刚度公式,并验证了其适用性。
- (3)给出了常用的六边形孔和圆孔蜂窝梁的腹板刚度折减系数表及其半理论半经验计算公式。

式(7)为 2 个式子的乘积:等号右边第 1 个中括号内为两向抗弯刚度比,系拟合而来;第 2 个中括号内为顺孔方向抗弯刚度相对于实心截面抗弯刚度的降低系数,可推导得出。式(7)对表 2 的相对误差一般小于 1%,用于式(4)计算工形截面蜂窝梁的刚度,相对误差基本为 0%。

需要说明的是,按式(4)计算圆孔或六边形孔蜂窝梁的抗弯刚度时,对工形截面进行划分的 2 种方案都是可行的,可以任意选择,但抗弯刚度折减系数  $k$  是不同的,如果采用方案Ⅱ,式(6)、(7)和表 2、5 中的  $h$  都要改取为  $h_w$  或  $h-2t$ 。

参考文献:  
References:

[1] 刘 鑫,周朝阳,贺学军. 六边形孔蜂窝梁墩心截面纵向应力分析与计算[J]. 铁道科学与工程学报,2005,2(5):50-55.

LIU Xin, ZHOU Chao-yang, HE Xue-jun. FEA and Simplified Calculation for Normal Stresses at Mid-pier Sections of Hexagon - castellated Beams [ J ]. Journal of

(下转第 115 页)

况,即所要求的“态”。这样膜结构找形分析就很好地将“形”与“态”结合起来,也达到了找形的目的<sup>[6]</sup>。

### 3 结 语

(1)采用形态结合的找形方法,对郑州大学新校区综合体育场膜结构进行了找形分析,实现了使“形”与“态”结合起来,达到了找形的目的;解决了敞篷式体育场膜结构找形分析时遇到的问题,提高了膜结构的找形效率,验证了笔者所提方法的有效性。

(2)敞篷式体育场支撑体系类型很多,对应的膜边界情况不同,故不同的边界处理,对最后膜的形状有一定的影响。

(3)膜面的预张力对骨架膜结构的形状影响不大,挑篷骨架及其上的钢拱(刚性边界)对骨架膜结构的形状起决定性作用。影响边索(柔性边界)形状的因素比较复杂,有待进一步的研究。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 张其林. 索和膜结构[M]. 上海:同济大学出版社, 2002.  
ZHANG Qi-lin. Cable and Membrane Structure[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2002.

(上接第 106 页)

- Railway Science and Engineering, 2005, 2(5): 50-55.
- [2] 阮祥炬,周朝阳. 圆孔蜂窝梁墩心截面正应力有限元分析与简化计算[J]. 长沙交通学院学报, 2005, 21(4): 42-46.  
RUAN Xiang-ju, ZHOU Chao-yang. FEA and Simplified Calculation for Normal Stresses at Mid-pier Sections of Circle-castellated Beams[J]. Journal of Changsha Communications University, 2005, 21(4): 42-46.
- [3] 周朝阳,郑坤龙,李 明. 成排侧开圆孔受弯构件的应力简化与刚度等效[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2005, 36(6): 1 089-1 093.  
ZHOU Chao-yang, ZHENG Kun-long, LI Ming. Longitudinal Stresses at Mid-pier Sections in Flexural Members with Lateral Circle Perforations [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2005, 36(6): 1 089-1 093.
- [4] 周朝阳. 平行圆管空心双向板抗弯刚度的确定[J]. 计算力学学报, 2007, 24(5): 15-19.  
ZHOU Chao-yang. Determination of Flexural Stiffness for Voided Plates with Paralleled Circle-tubes[J]. Journal of Computational Mechanics, 2007, 24(5): 15-19.

- [2] AGRGYRIS J H. A General Method for the Shape Finding of Lightweight Tension Structures[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1973, 3(1): 135-149.
- [3] 王 辉. 膜结构的非线性有限元分析[D]. 天津: 天津大学, 2002.  
WANG Hui. Nonlinear Finite Element Analysis for Membrane Structure[D]. Tianjin: Tianjin University, 2002.
- [4] CECS 158: 2004, 膜结构技术规程[S].  
CECS 158: 2004, Technical Specification for Membrane Structure[S].
- [5] 陈务军. 膜结构工程设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.  
CHEN Wu-jun. Design of Membrane Structure[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004.
- [6] 陈务军,唐雅芳,任小强,等. ETFE 气囊膜形态、结构特性与材料性能试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2007, 24(3): 13-18.  
CHEN Wu-jun, TANG Ya-fang, REN Xiao-qiang, et al. ETFE Air Cushion Membrane Configurations, Structural Performances and Material Properties Experiments[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(3): 13-18.
- [5] KNOWLES P R. Castellated Beams[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1991, 90(1): 521-536.
- [6] 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, 14(8): 27-35.  
NI Fu-sheng, HU Tai-xiang, HU Si-yuan, et al. Stress Distribution and Calculation of Castellated Beams[J]. Industrial Constructions, 1984, 14(8): 27-35.
- [7] 陈录如. 蜂窝梁的简化计算与试验研究[J]. 工业建筑, 1985, 15(5): 31-38.  
CHEN Lu-ru. Simplified Calculation and Experimental Study of Castellated Beams[J]. Industrial Constructions, 1985, 15(5): 31-38.
- [8] 罗 烈,罗晓森. 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 Xiao-sen. Comparative Research of the Design Specifications for Castellated Beams[J]. Progress in Steel Building Structures, 2005, 7(2): 43-47.
- [9] ZOU Jin-hua. Reduced Calculation and Its Experimental Comparison for Castellated Beams[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science, 2005, 33(1): 47-51.