

六边形孔蜂窝组合梁的等效抗剪刚度研究

贾连光,李鹏宇,焦禹铭

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究六边形孔蜂窝组合梁等效抗剪刚度,提出可行的等效抗剪刚度计算公式,为蜂窝组合梁设计提供依据.方法 将试验结果与有限元模拟进行对比,证明有限元模型的可靠性.建立不同径高比与距高比的6个有限元模型,将笔者计算公式结果与有限元模拟结果以及估算法结果进行比较.同时利用笔者公式对不同径高比与距高比的24个试件进行计算,分析等效抗剪刚度的影响因素.结果 相比其他计算方法,文中公式计算结果误差较小,与有限元模拟结果相比误差均不超过9%.利用折减系数计算结果与有限元模拟结果误差不超过7.5%.结论 研究表明,径高比是影响蜂窝组合梁等效抗剪刚度的主要因素,笔者提出的公式计算蜂窝组合梁等效抗剪刚度精度较高.

关键词 蜂窝组合梁;等效抗剪刚度;径高比;组合截面

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Study on Equivalent Shear Stiffness of Hexagonal Cellular Composite Beams

JIA Lianguang, LI Pengyu, JIAO Yuming

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In order to propose a feasible formula for calculating the equivalent shear stiffness of hexagonal honeycomb composite beams, which provides a basis for the design of cellular composite beams, their equivalent shear stiffness were studied in this paper. Compare the test results with ones of finite element simulation to prove the reliability of the finite element model. Establish six finite element models with different ratio of diameter to height and ratio of distance to height. Compare the results of the author's calculation formula with the finite element simulation results and estimation methods. At the same time, use the author's formula to calculate 24 specimens with different diameter-height ratio and pitch-height ratio, and analyze the influencing factors of equivalent shear stiffness. Compared with other calculation methods, the error of the calculation results of the formula in this paper is smaller, and the error is less than 9% compared with the finite element simulation results. The error of the calculation results using the reduction

收稿日期:2019-08-04

基金项目:国家自然科学基金项目(51578436)

作者简介:贾连光(1961—),男,教授,主要从事钢结构设计与计算理论方面研究.

factor is less than 7.5% compared with the finite element simulation results. The research shows that the diameter-to-height ratio is the main factor affecting the equivalent shear stiffness of the cellular composite beams. The formula proposed by the author has high accuracy in calculating the equivalent shear stiffness of the cellular composite beams.

Key words: cellular composite beam; equivalent shear stiffness; diameter-to-height ratio; combined section

蜂窝组合梁兼具蜂窝梁与组合梁的双重优点,绿色节能符合我国可持续发展的国情,并在一些超高层建筑中应用广泛^[1-2].在实际工程应用中发现,由于蜂窝组合梁的腹板被削弱,导致腹板的抗剪承载力下降,混凝土楼板的抗剪贡献相应增大.但在实际工程设计中,混凝土楼板的抗剪作用只作为安全储备. C. Clawson^[3]等总结得到矩形孔蜂窝组合梁的计算方法,该方法认为楼板和钢梁承受弯矩,楼板对抗剪忽略不计,因此计算结果与试验结果存在一定的误差. R. G. Redwood^[4]等对腹板开孔的组合梁进行试验,研究表明混凝土楼板对抗剪能力有一定贡献. J. W. Park^[5]等通过对9根蜂窝组合梁进行弯-剪试验,根据试验结果提出组合梁在弯-剪作用下相关计算公式. 王鹏等^[6]提出了一种腹板开洞组合梁极限承载力的计算方法,该方法考虑混凝土楼板的抗剪作用,计算结果与实验结果相比误差较小. 目前,蜂窝组合梁的研究仍将楼板的抗剪作用忽略不计,导致计算结果与实际存在一定误差. 基于此,笔者考虑混凝土楼板的抗剪作用,基于费式空腹桁架理论与组合梁等效截面的假定,考虑径高比与距高比的差异,进而推导出蜂窝组合梁等效抗剪刚度的计算公式,将试验结果与 ABAQUS 模型结果进行对比,验证蜂窝组合梁的等效抗剪刚度计算公式的可靠性.

1 试验概况

1.1 试件设计

试验对一根编号为 FZL 的六边形孔的蜂窝组合梁进行抗剪试验,试件参数见图 1. 图中, D 为蜂窝孔洞高度, S 为两个蜂窝孔的

距离, h 为工字钢梁截面高度.

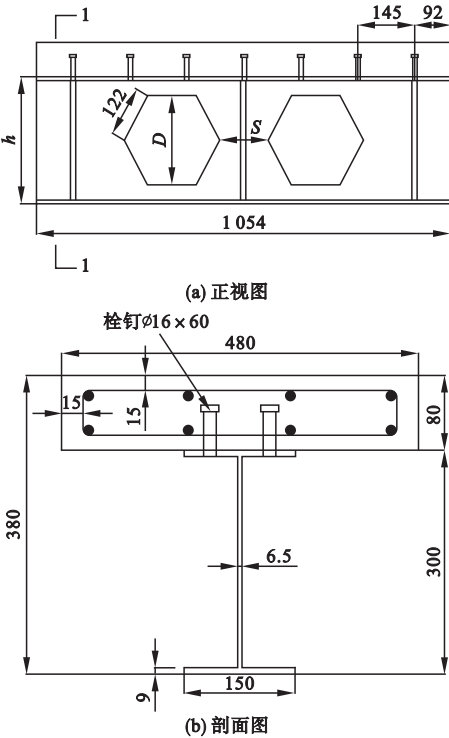


图 1 试件参数

Fig. 1 Specimen parameters

采用 1 000 kN 的油压千斤顶进行静力加载,加载制度采用荷载-位移控制单调加载. 为避免试件在试验中发生失稳破坏导致试验失败^[7],试件中 H 型钢梁规格为 H300 mm × 150 mm × 6.5 mm × 9 mm,钢材为 Q345B. 蜂窝孔况为 0704,表示径高比 $D/h = 0.7$,距高比 $S/h = 0.4$. 为了防止试件发生局部受压破坏,在加载点处以及支座处布置加劲肋. 栓钉材质为 45 号钢,栓钉型号为 M16 mm × 60 mm^[8],按纵向间距 145 mm、横向间距 80 mm 双排布置. 混凝土楼板选用 C30,长宽高为 1 054 mm × 480 mm × 80 mm^[9],混凝土保护层厚度为

15 mm. 楼板内纵向受力钢筋为 HRB335, 布置方式为 $\Phi 12 @ 150$. 横向箍筋采用 HRB235, 布置方式为 $\Phi 6 @ 150$, 无腹筋. 材料力学性能按文献[10-11]测试, 结果见表 1.

表 1 材料性能

Table 1 Material properties			
材 料	弹性模量 E/MPa	屈服强度 f_y/MPa	极限强度 f_u/MPa
6.5 mm 厚钢板	$2.016 2 \times 10^5$	345.90	546.75
9 mm 厚钢板	$1.921 8 \times 10^5$	343.20	537.13
C30 混凝土	$3.092 4 \times 10^4$	33.57	22.45
栓钉	—	365.00	480.00
$\Phi 6$ 钢筋	$1.970 6 \times 10^5$	287.63	460.78
$\Phi 12$ 钢筋	$1.965 2 \times 10^5$	384.56	553.38

根据试验目的确定需要采集的数据包括:①试验加载过程中的变形过程;②试验中的荷载值以及钢梁梁端的剪力值;③试件裂缝出现的全过程;④跨中挠度值. 试验过程中采用 imp 数据采集系统自动采集荷载和位移. 位移通过布置在蜂窝组合梁混凝土楼板翼缘上表面支座处以及钢梁下翼缘跨中及四分点位移计测出. 加载装置以及位移计布置见图 2.

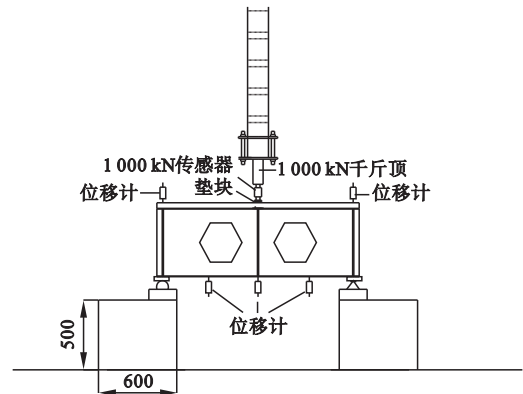


图 2 加载装置

Fig. 2 Loading device diagram

1.2 试验现象与结果分析

加载初期,组合梁各部分均处于弹性阶段,变形微小. 当荷载加到 175 kN 时,混凝土楼板的顶面出现细小斜裂缝,并随着荷载的增加不断向板边缘延伸,此时跨中挠度达

到 1.72 mm. 当荷载达到 271.6 kN 时,混凝土楼板底面出现了横向裂缝,但发展极其缓慢,跨中挠度为 2.19 mm. 当荷载达到 362.6 kN 时,跨中挠度为 3.52 mm,混凝土楼板的侧面出现了第一条剪切斜裂缝,新的剪切斜裂缝随着加载过程不断出现,一条主裂缝发展迅速且不断延伸. 当荷载达到 387.6 kN 时,试件屈服(进入塑性),剪力-挠度曲线出现拐点,跨中挠度为 4.01 mm. 当荷载增加到 416.2 kN,混凝土板被压碎,随后试件发生完全剪切破坏,此时跨中挠度达到 5.42 mm. 测得极限荷载为 420.5 kN. 当卸载到 380 kN 附近时,下面蜂窝梁的孔角被撕裂,跨中挠度达到最大为 12.4 mm. 试件破坏现象见图 3.



图 3 试件 FZL 破坏现象

Fig. 3 Damage phenomenon of specimen FZL

整理试验数据,绘制剪力-挠度曲线如图 4 所示.

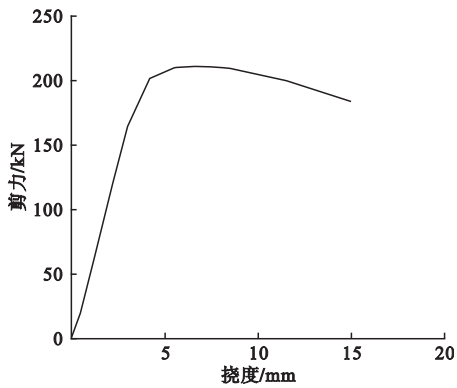


图 4 剪力-挠度曲线

Fig. 4 Load-deformation curve

从图中可知,蜂窝组合梁达到极限荷载时,其抗剪承载力为 210.25 kN,在文献[12]中,相同试验相同尺寸的蜂窝梁达到极限荷载时的抗剪承载力为 196.65 kN,二者相比蜂窝组合梁的抗剪承载增加了 6.9%,说明混凝土楼板对抗剪性能的贡献能力不能忽略.

2 有限元模拟方法验证

2.1 建立模型

对试件 FZL 进行 ABAQUS 建模,混凝土楼板模型采用实体单元 C3D8R,钢梁模型采用四节点完全积分格式的薄壳单元 S4R. 纵向钢筋和箍筋均采用桁架单元 T3D2,采用分离式模型. 模型中考虑材料和几何非线性. 混凝土本构模型采用 ABAQUS 中的损伤塑性模型^[13]. 钢梁采用二折线模型,第二段折线斜率为第一段斜率的 0.01 倍. 纵向钢筋、箍筋以及栓钉采用理想弹塑性模型^[14].

首先将栓钉与蜂窝梁采用布尔运算合并为一个整体. 在接触作用的主从面选择上,将选择网格粗糙的混凝土楼板作为主面,网格划分比较细的钢梁作为从面. 楼板与钢梁表面接触的滑移公式选择小滑移. 相互作用中切向作用采用“罚”,摩擦系数为 0.2,法向作用定义为“硬接触”. 钢筋及螺栓通过内嵌与混凝土楼板相连.

2.2 模拟结果验证

为验证有限元模拟方法的准确性,将 FZL 的模拟曲线与试验曲线进行对比,结果见图 5. 从图中可以看出,模拟曲线与试验曲线吻合较好,起初都呈线性发展,在达到屈服点后,曲线出现拐点,曲线曲率降低. 模拟结果与试验结果较接近,屈服荷载相差 4%,最大位移相差 8.5%. 将模拟应力云图(见图 6)与试验结果作对比可以看出,试件都是孔口处的 Mises 应力最大,这与试验结果中的孔角撕裂是一致的. 蜂窝组合梁各部件应力云图见图 7. 图中显示钢梁、混凝土楼板与钢

筋均表现为跨中应力最大. 从模拟结果看,无论是整个试件还是各部件的应力云图和破坏形态都与试验结果拟合较好.

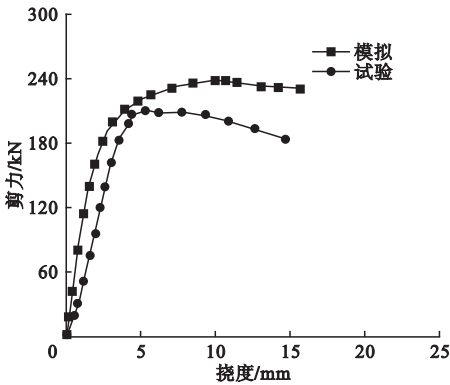


图 5 剪力-挠度曲线对比

Fig. 5 Comparison shear-deflection curves

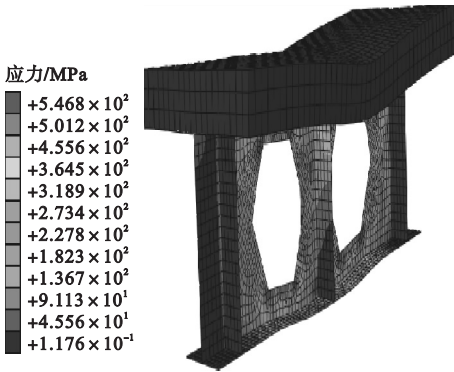
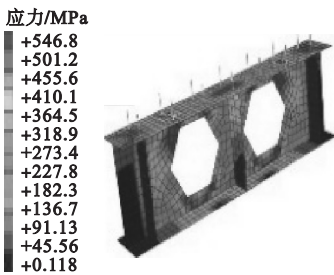
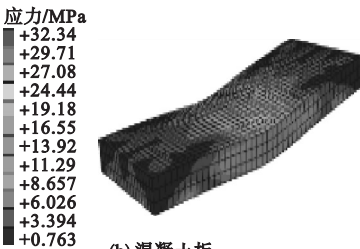


图 6 蜂窝组合梁应力云图

Fig. 6 Stress contour plot of honeycomb composite beam



(a) 钢梁和栓钉



(b) 混凝土板

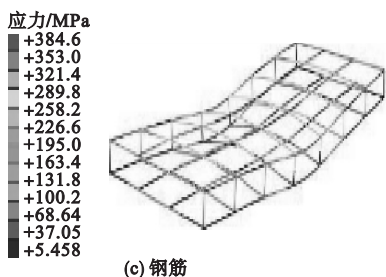


图7 蜂窝组合梁各部件应力分布图

Fig. 7 Each component destruction stress distribution of composite cellular beam

3 等效抗剪刚度计算方法

等效抗剪刚度是指荷载、约束条件、构件尺寸完全相等的等截面实腹组合梁等代截面呈规律性变化的蜂窝组合梁,当该实腹组合梁与蜂窝组合梁发生相同宏观变形时相应的刚度^[15].计算蜂窝梁挠度常用的方法主要有估算法^[16]、费氏桁架法^[17]和有限元分析法.将计算出的挠度带入经典材料力学公式中反算出等效抗剪刚度.对于蜂窝组合梁等效抗剪刚度的计算也按照这个思路进行.

对于两端简支受集中荷载的蜂窝组合梁,挠度计算拆分成钢梁与混凝土板两个部分,总挠度为

$$f = f_s + f_c. \quad (1)$$

式中: f_s 为蜂窝梁的挠度; f_c 为混凝土的挠度.对于蜂窝梁部分采用费氏桁架算法,以及考虑滑移效应后组合梁截面的折减刚度 B ,对于混凝土部分采用图乘法计算.

3.1 组合梁折减刚度计算

组合梁在计算挠度时,由于钢与混凝土是两种弹性模量不同的材料组成的截面,所以在计算时采用换算截面的方法.将混凝土截面等效成钢截面(高度不变,宽度减小),然后计算等效后截面的惯性矩,最后求组合截面的刚度 B ^[18]:

$$B = \frac{EI_{eq}}{1 + \xi}. \quad (2)$$

式中: I_{eq} 为组合截面惯性矩; E 为钢材弹性模量; ξ 为刚度折减系数.

3.2 蜂窝梁挠度计算

费氏法计算蜂窝梁挠度的公式为

$$f_s = f_m + f_v + f_{vi}. \quad (3)$$

式中: f_m 为弯曲挠度; f_v 为剪切挠度; f_{vi} 为次弯矩引起的剪切挠度.

弯曲挠度 f_m 计算如下:

$$f_m = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{I_s}{I_0} \right) \frac{Pl^3}{48B}. \quad (4)$$

式中: I_s 为墩处实腹截面的惯性矩; I_0 为桥区最弱空腹截面的惯性矩.

剪切挠度 f_v 计算如下:

$$f_v = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{A_w}{A_T} \right) \frac{kPl}{4G_s A_s}. \quad (5)$$

式中: A_w 为墩处实腹截面的腹板面积; A_T 为桥区最弱空腹截面的腹板面积; A_s 为钢梁实腹截面的截面面积; k 为截面形状系数,对于工字梁来说 k 等于截面面积比腹板面积.其中 $E = G_s(2 + 2\nu)$, G_s 为钢梁的剪切模量, ν 为泊松比, $\nu = 0.3$.

次弯矩引起的剪切挠度 f_{vi} 计算如下:

$$f_{vi} = \frac{1}{12E} \left(\frac{l_0^3}{2l_T} + \frac{hs_0^2}{I_p} \right) \frac{Pn}{4}. \quad (6)$$

式中: l_0 为桥跨长度; s_0 为孔心间距; I_T 为桥截面的惯性矩; I_p 为带趾变宽墩的水平截面等效惯性矩, $I_p = \frac{1}{12} k_0 t_w s^3$,文中均采用西德标准孔, $k_0 = 5.17$ ^[19].

3.3 混凝土挠度及总挠度计算

对于混凝土楼板挠度分为弯曲挠度和剪切挠度两项,采用图乘法计算结果为

$$f_c = \frac{Pl^3}{48B} + \frac{kPl}{G_c A_c}. \quad (7)$$

式中: G_c 为混凝土的剪切模量; A_c 为混凝土的截面面积; k 为截面形状系数,矩形截面的 $k = 6/5$.

蜂窝组合梁总挠度计算如下:

$$f = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{I_s}{I_0} \right) \frac{Pl^3}{48B} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{A_w}{A_T} \right) \frac{kPl}{4G_s A_s} + \frac{1}{12E} \left(\frac{l_0^3}{2l_T} + \frac{hs_0^2}{I_p} \right) \frac{Pn}{4} + \frac{Pl^3}{48B} + \frac{kPl}{G_c A_c}. \quad (8)$$

剪切挠度为 $f_{\text{剪}}=f-f_{\text{弯}}$,由经典材料力学公式可知 $f_{\text{剪}}=\frac{kPl}{4GA}$,将计算出的挠度代入式中即可反算出蜂窝组合梁的等效抗剪刚度:

$$\frac{GA}{k}=\frac{Pl}{4f_{\text{剪}}}.$$

(9)

3.4 公式准确性检验及修正

试件挠度计算时取基准参数:集中力

$P=300\text{ kN}$,钢材弹性模量 $E_s=2.06\times10^5\text{ MPa}$,混凝土弹性模量 $E_c=3.0\times10^4\text{ MPa}$,代入式(8)计算得挠度为 2.46 mm ,与有限元模拟挠度(2.35 mm)相比误差较小,为 4.6% ,证明公式具有较高的精度.为验证公式的普遍性,笔者建立6个不同径高比与距高比的蜂窝组合梁有限元模型,模型参数见表2.

表2 模型参数

Table 2 Section size of models

孔 况	钢梁截面尺寸/mm	梁长/ mm	孔高/ mm	径高/ mm
0804	480×80×300×150×6.5×9	1 054	240	120
0704	480×80×300×150×6.5×9	1 054	210	120
0604	480×80×300×150×6.5×9	1 054	180	120
0504	480×80×300×150×6.5×9	1 054	150	120
0703	480×80×300×150×6.5×9	1 054	210	90
0702	480×80×300×150×6.5×9	1 054	210	60

现有计算挠度的方法大部分以估算法为主,按照日本标准是将与蜂窝组合梁尺寸相同的实腹组合梁产生的挠度放大 $1.2\sim1.25$ 倍.对于文中相同截面尺寸的实腹组合梁在相同工况下挠度为 1.78 mm ,抗剪刚度为 $59\,173\,720\text{ N}$.将笔者总结的等效法与有限元模拟结果和估算法计算结果进行比较,结果见表3.从表中可以看出,采用日本估算法由于扩大系数固定,局限性太大,针对文中构件最大误差达到 29.8% ,并且并没有考虑蜂窝梁孔高比及径高比等因素.而文中等效法所计算的挠度误差相对较小,均在 6% 以内,证明公式具有较高精度.将计算挠度代入式(9)计算得到反算刚度与有限元模拟挠度的反算刚度比较,结果见表4.计算表明通过反算抗剪刚度误差均在 9% 以内,证明了反算抗剪刚度的可行性.

表3 不同计算方法挠度对比结果

Table 3 Deflection comparison results of different calculation methods

孔 况	挠度/mm			等效法与 估算法与	
	有限元法	等效法	估算法	有限元法误差/%	有限元法误差/%
0804	3.06	3.22	2.14	4.9	29.8
0704	2.35	2.46	2.14	4.6	9.0
0604	2.31	2.16	2.14	6.0	7.4
0504	2.17	2.04	2.14	5.9	1.8
0703	2.33	2.46	2.14	5.1	8.9
0702	2.33	2.45	2.14	5.0	8.8

表4 计算刚度与模拟刚度对比

Table 4 Comparison between the calculated stiffness and the simulated stiffness

孔 况	模拟刚度/N	计算刚度/N	误差/%
0804	30 219 079	28 443 029	6.2
0704	41 444 425	39 185 385	5.7
0604	42 366 730	46 007 492	7.9
0504	45 803 923	49 477 924	7.4
0703	41 872 503	39 247 565	6.8
0702	41 917 427	39 303 073	8.8

3.5 等效抗剪刚度影响因素分析

分析开孔参数对蜂窝组合梁等效抗剪刚度的影响,采用控制变量的方法分析不同孔径与孔距的影响.通过笔者提出的公式计算不同径高比与距高比共 24 个构件的挠度与反算刚度,得到等效抗剪刚度变化曲线如图 8 所示.

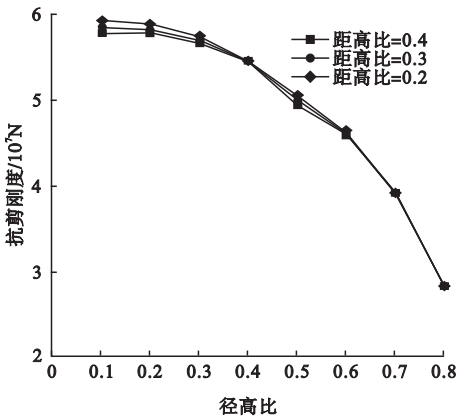


图 8 等效抗剪刚度随径高比变化曲线
Fig. 8 Variation diagram of equivalent shear stiffness with diameter to height ratio

从图 8 可以看出:①当径高比相同时,等效抗剪刚度随距高比的增加而减小,但影响程度较小.当径高比为 0.7、0.8 时,几乎没有影响.②当距高比相同时,蜂窝组合梁的等效抗剪刚度随径高比的增大而明显减小.可以看出腹板的削弱程度直接影响蜂窝组合梁的抗剪刚度.

3.6 刚度折减系数计算

将蜂窝组合梁的抗剪刚度与实腹组合梁的抗剪刚度比值 k_r 作为刚度的折减系数.不同试件折减系数 k_r 计算结果见表 5.从表中可知,抗剪刚度的折减系数与径高比和距高比均有关,当距高比分别为 0.4、0.3、0.2 时,折减系数的变化幅度(径高比 0.1~0.8)分别为 50.8%、51.3%、51.8%,发现当距高比一定时,折减系数随径高比的变化幅度较大.当径高比分别为 0.8、0.7、0.6、0.5、0.4、0.3、0.2、0.1 时,折减系数的变化幅度(距高比 0.2~0.4)分别为 0.1%、0.3%、0.8%、

2.24%、0.9%、1.3%、1.8%、2.3%.发现径高一定时,折减系数随距高比的变化幅度几乎不变.综上可以发现对折减系数的影响径高比远大于距高比.

表 5 折减系数计算结果

Table 5 Reduction coefficient calculation table			
径高比	k_r		
	距高比 = 0.4	距高比 = 0.3	距高比 = 0.2
0.8	0.480 7	0.481 0	0.481 2
0.7	0.662 2	0.663 3	0.664 2
0.6	0.777 4	0.787 4	0.783 7
0.5	0.836 1	0.846 0	0.854 9
0.4	0.921 1	0.925 1	0.929 4
0.3	0.958 1	0.963 9	0.970 4
0.2	0.976 7	0.984 9	0.994 3
0.1	0.976 2	0.987 8	0.998 8

另外,当折减系数趋近于 1 时,径高比逐渐趋近于 0,表示蜂窝组合梁的腹板接近于实腹板,证明了腹板在实际应用中的抗剪作用.同时由于距高比对折减系数的影响作用不大,所以认为径高比对折减系数起主要影响作用,将同一径高比下的不同距高比的折减系数取均值后与径高比拟合,得到如下关系式:

$$k_r = 0.988\ 65 - 0.970\ 26(D/h)^{2.959} \quad (10)$$

为验证折减系数的准确性,将折减系数所计算的抗剪刚度与有限元模拟结果进行对比,结果见表 6.从表可知,通过折减系数直接计算的抗剪刚度与模拟刚度误差较小,均在 7.5% 以内,证明了折减系数的准确性.

表 6 等效刚度与模拟刚度对比

Table 6 Comparison between the equivalent stiffness and the simulated stiffness			
距高比	等效刚度/N	模拟刚度/N	误差/%
0.8	28 836 339	30 219 079	4.6
0.7	39 108 059	41 444 425	6.7
0.6	45 244 856	42 366 730	6.8
0.5	49 114 187	45 803 923	7.2

4 结 论

(1)当径高比相同时,蜂窝组合梁的等效抗剪刚度随距高比的减小而减小;当距高比相同时,蜂窝组合梁的等效抗剪刚度随径

高比的减小而减小。

(2) 笔者方法计算得到的蜂窝组合梁挠度误差较小,具有较高的精确性。

(3) 折减系数计算等效抗剪刚度的误差较小,并且计算方便。

参考文献

- [1] 肖祖霖. 钢—混凝土蜂窝组合梁受力性能试验研究[D]. 南宁:广西大学,2014.
(XIAO Zulin. Study on mechanical behavior of steel-concrete sastellated composite beams [D]. Nanning:Guangxi University,2014.)
- [2] 马奇杰. 蜂窝组合梁抗火性能研究[D]. 济南:山东大学,2014.
(MA Qijie. Investigation on the fire resistance of composite cellular beams [D]. Ji'nan: Shandong University,2014.)
- [3] CLAWSON C, DARWIN D. Strength of composite beams at web openings [J]. Structural division,1982,108(3):623-641.
- [4] REDWOOD R G,POUMBOURAS G. Tests of composite beams with web holes[J]. Canadian journal of civil engineering, 1983, 10(4): 713-721
- [5] PARK J W, KIM C H, YANG S C. Ultimate strength of ribbed slab composite beams with web openings [J]. Journal of structural engineering,2003,129(6):810-817.
- [6] 王鹏,周东华,王永慧,等. 带加劲肋腹板开洞组合梁极限承载力理论研究[J]. 工程力学, 2013,30(5):138-146.
(WANG Peng,ZHOU Donghua,WANG Yonghui, et al. Theoretical study on ultimate bearing capacity of composite beams with reinforced web opening [J]. Engineering mechanics, 2013,30(5):138-146.)
- [7] 贾连光,李庆文,张曰果. 钢—混凝土蜂窝组合梁抗剪性能分析[J]. 工业建筑,2012,42(9):150-156.
(JIA Lianguang, LI Qingwen, ZHANG Yueguo. Analysis of shear behavior of steel-concrete cellular composite beam[J]. Industrial construction,2012,42(9):150-156.)
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 组合结构设计规范:JGJ138—2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the PRC. Code for design of composite structures: JGJ138—2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2016.)
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准:GB50017—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the PRC. Standard for design of steel structures:GB50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2017.)
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 金属材料—室温拉伸试验方法:GB/T 32498—2016[S]. 北京:中国标准出版社,2016.
(General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC. Metallic materials-tensile testing-Part1: method of test at room temperature;GB/T 32498—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2016.)
- [11] 中华人民共和国建设部. 普通混凝土力学性能试验方法:GB5001—2002[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
(Ministry of Construction of the PRC. Standard for test method mechanical properties on ordinary concrete: GB5001—2002 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2002.)
- [12] 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.)
- [13] 贾连光,杜明坎,回锋,等. 六边形孔蜂窝梁和蜂窝组合梁抗剪性能分析[J]. 工程力学, 2016,33(1):81-87.
(JIA Lianguang, DU Mingkan, HUI Feng, et al. Analysis of shear behavior of hexagon hole cellular beam and cellular composite beam[J]. Engineering mechanics,2016,33(1):81-87.)
- [14] 顾强. 钢结构滞回性能及抗震设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
(GU Qiang. Hysteretic performance and seismic design of steel structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press,2009.)
- [15] 蒋上. 正八边形孔蜂窝梁的挠度计算研究[D]. 长沙:湖南大学,2011.
(JIANG Shang. Research of the calculation of the deflection of octagonal hole castellated beam [D]. Changsha:Hu'nan University,2011.)
- [16] 严辛. 正六边形孔蜂窝梁整体稳定及挠度分析[D]. 昆明:昆明理工大学,2015.
(YAN Xin. A study on overall stability and deflection of castellated beams with hexagonal openings [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2015.)
- [17] ALTIFILLISCH M D, COOKE B R, TOPRAC A A. An investigation of welded open-web expanded beams [J]. Welding research supplment,1957,22:77-88.
- [18] 陈世鸣. 钢—混凝土组合结构[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
(CHEN Shiming. Steel-concrete composite structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press,2013.)
- [19] 王亚云. 工字形截面圆孔蜂窝梁的承载能力及挠度分析[D]. 咸阳:西北农林科技大学,2017.
(WANG Yayun. Analysis of bearing capacity and deflection of circular-castellated beams with shaped cross section [D]. Xianyang: Northwest A & F University. 2017.)
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)