

文章编号:1673-2049(2017)01-0009-06

# 连续开孔实腹梁整体稳定性计算方法

冯 然<sup>1,2</sup>, 孟尚伟<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 哈尔滨工业大学(深圳) 土木与环境工程学院, 广东 深圳 518055)

**摘要:**为研究腹板开孔 H 型钢梁在纯弯荷载作用下的整体稳定性,采用翼缘和腹板刚度分离的方法,从理论上推导出带有连续正方形孔洞的 H 型钢梁的抗侧刚度、自由扭转刚度和翘曲刚度计算方法,得到其弯扭屈曲临界弯矩表达式。利用有限元软件 ABAQUS 对相同截面不同跨度的 H 型钢实腹梁在纯弯荷载作用下的弯扭屈曲临界弯矩进行分析,并将有限元模拟结果和规范计算结果进行对比。采用经验证的有限元模型对带有连续正方形孔洞的 H 型钢梁进行分析,并将有限元模拟结果与推导公式的计算结果进行对比。以现有规范为基础,推导出带有连续正方形孔洞的 H 型钢梁的弯扭屈曲临界弯矩实用计算公式。结果表明:连续开孔梁实用计算公式具有较高的精确度。

**关键词:**开孔实腹梁;整体稳定性;弯扭屈曲;临界弯矩;有限元分析

**中图分类号:**TU375

**文献标志码:**A

## Calculation Method for Overall Stability of Solid-web Girder with Multiple Holes

FENG Ran<sup>1,2</sup>, MENG Shang-wei<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 2. School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, Guangdong, China)

**Abstract:** In order to study the overall stability of H-shaped steel girder with multiple holes under pure bending load, the rigidities of flange and web were investigated separately. The design rules for lateral stiffness, warping stiffness and torsional stiffness of H-shaped steel girder with multiple square holes were derived theoretically to obtain the critical moments of flexural-torsional buckling. Furthermore, the critical moments of flexural-torsional buckling of H-shaped steel girder with same cross-section dimensions and different spans under pure bending load were analyzed by using the finite element software ABAQUS. The results by finite element model were compared with the results by current design code. The H-shaped steel girder with multiple square holes were analyzed by verified finite element model, and the results by finite element model were compared with the results by the derived formulae. The formulae for the critical moments of flexural-torsional buckling of H-shaped steel girder with multiple square holes were proposed based on the current design code. The results show that the practical calculation formula of steel girder with multiple square holes has high accuracy.

**Key words:** solid-web girder with hole; overall stability; flexural-torsional buckling; critical moment; finite element analysis

收稿日期:2016-06-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51528803)

作者简介:冯 然(1978-),男,湖北武汉人,教授,工学博士,E-mail:r. feng@hfut. edu. cn。

## 0 引言

高层建筑中的管道通常是让其从梁下通过,这样无疑占据了大量的空间,导致楼层的高度增加。从结构设计来讲,风荷载作用下楼层高度增加 10%,侧移将增加 46.4%。因此,降低层高对高层建筑的设计具有极其重要的意义。腹板开孔梁可以很好地解决这个问题,并在实际工程中得到了广泛应用。目前广泛应用的开孔梁制作方法基本上分为两大类。第 1 类是将工字钢或 H 型钢的腹板按照一定的曲线切割,再经错位后焊接而成的加工方法,常见的有六边形孔、圆孔、矩形孔等<sup>[1]</sup>。这种方法加工而成的开孔梁截面高度有较大的提高(一般为原高度的 1.4 倍~1.6 倍),因而具有较高的承载力和抗弯刚度<sup>[2]</sup>,同时可以节约钢材 25%~30%,具有较好的经济价值<sup>[3]</sup>。然而,采用这种加工方法,其孔洞的大小和间距受到一定的限制,灵活性较差;同时,焊缝处存在较大的残余应力。第 2 类方法是在工字钢或 H 型钢的腹板上直接开孔,这种方法可以根据实际需要任意调节孔洞的形状和间距,较为灵活。因此,本文主要研究第 2 类方法加工而成的开孔梁。目前,各国学者仅对开孔梁的应力分布和承载力进行了一定研究,对其整体稳定性方面的研究较少。本文以带有连续正方形孔洞的 H 型钢梁为研究对象,通过理论分析和有限元数值模拟,提出其整体稳定性的实用计算方法。

## 1 理论分析

对于两端简支的理想弹性钢梁,如果其侧向刚度较差,且没有足够的侧向支撑,当承受平面内弯矩作用时,在弯矩  $M$  达到某一限值之前,在钢梁的侧向施加很小的扰动,钢梁就会产生侧向弯曲,同时伴随扭转。当扰动消除后,钢梁还能恢复到原来的平衡状态。当弯矩  $M$  增大到弯扭屈曲临界弯矩  $M_{cr}$  时,即使不施加侧向扰动,钢梁仍会产生侧向弯曲并伴随扭转,且不能恢复到原来的平衡状态,此时钢梁丧失整体稳定性。文献<sup>[4]</sup>中按照小变形理论得到平衡方程,确定纯弯简支梁的弯扭屈曲临界弯矩,即

$$M_{cr} = \frac{\pi^2 EI_y}{l^2} [\beta_y + \sqrt{\beta_y^2 + \frac{I_w}{I_y} (1 + \frac{GI_t - \bar{R}}{\pi^2 EI_w} l^2)}] \quad (1)$$

式中: $\beta_y$  为截面不对称系数; $\bar{R}$  为截面中残余应力部分的 Wagner 效应系数; $EI_y$  为抗侧刚度, $E$  为弹性模量, $I_y$  为绕  $y$  轴方向的惯性矩; $GI_t$  为自由扭转刚度, $G$  为剪切模量, $I_t$  为极惯性矩; $EI_w$  为翘曲刚度,

$I_w$  为翘曲惯性矩; $l$  为梁长。

由于本文研究的是双轴对称截面梁,且不考虑残余应力,因此公式(1)可以简化为

$$M_{cr} = \frac{\pi^2 EI_y}{l^2} \sqrt{\frac{I_w}{I_y} (1 + \frac{GI_t}{\pi^2 EI_w} l^2)} \quad (2)$$

从公式(2)中可以看出,弯扭屈曲临界弯矩主要与抗侧刚度  $EI_y$ 、自由扭转刚度  $GI_t$  和翘曲刚度  $EI_w$  三个变量有关,而开孔梁由于孔洞的存在必然导致这 3 个变量发生改变,因此分别对这 3 个变量进行理论推导,得出带有连续正方形孔洞的 H 型钢梁弯扭屈曲临界弯矩的计算公式。

### 1.1 抗侧刚度

文献<sup>[5]</sup>提出开孔梁的抗侧刚度可以由翼缘和腹板两部分组成,开孔梁与相应的实腹梁相比,翼缘部分没有发生改变,腹板部分由于孔洞的存在使其抗侧刚度有一定的削弱。现规定开孔梁的腹板抗侧刚度为  $EI_{yw}$ ,翼缘抗侧刚度为  $EI_{yf}$ ,相应实腹梁的腹板抗侧刚度为  $EI_{syw}$ 。由于孔洞的存在,开孔梁腹板的抗侧刚度并不是一个定值,为简化计算,采用平均值代替,后续的结果也证明采用平均值的计算方法是可行的。实腹梁孔单元示意图如图 1 所示(图 1 中, $S$  为开孔间距, $D$  为开孔高度, $h_w$  为腹板高度, $t_w$  为腹板厚度, $t_f$  为翼缘厚度),取带有连续正方形孔洞的 H 型钢梁的一个孔单元,并将其分成两部分,将腹板抗侧刚度在这两部分分段积分并取加权平均值,最终得到开孔梁腹板抗侧刚度的表达式,即

$$EI_{yw} = \frac{E}{S/2 + D/2} (\frac{S}{2} \int_{S_1} x^2 dA + \frac{D}{2} \int_{S_2} x^2 dA) = [1 - \frac{D^2}{(S+D)h_w}] \frac{E}{12} h_w t_w^3 \quad (3)$$

式中: $S_1, S_2$  均为积分区域; $A$  为积分区域处腹板横截面面积。

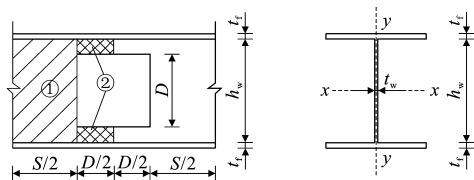


图 1 实腹梁孔单元示意

Fig. 1 Sketch of Hole Element in Solid-web Girder

定义开孔梁腹板抗侧刚度折减系数为  $k_y$ , 则  $k_y$  的表达式为

$$k_y = \frac{EI_{yw}}{EI_{syw}} = E [1 - \frac{D^2}{(S+D)h_w}] \frac{1}{12} h_w t_w^3 / (E \frac{1}{12} h_w t_w^3) = 1 - \frac{D^2}{(S+D)h_w} \quad (4)$$

带有连续正方形孔洞的 H 型钢梁的抗侧刚度表达式为

$$EI_y=EI_{yf}+k_yEI_{syw} \tag{5}$$

由材料力学理论可以知道,腹板对抗侧刚度的贡献较小,表 1 列出了常见 H 型钢截面绕 y 轴的惯性矩。从表 1 可以看出,实腹梁腹板绕 y 轴的惯性

矩占总惯性矩的比例很小,因此,可以忽略腹板对抗侧刚度的贡献,连续开孔梁抗侧刚度的表达式可以简化为

$$EI_y=EI_{yf}+EI_{yw}\approx EI_{yf}=\frac{Eb^3t_f}{6} \tag{6}$$

式中: $b$  为翼缘宽度。

表 1 常见 H 型钢截面绕 y 轴的惯性矩

Tab. 1 Inertia Moment About y-axis for Common H-shaped Steel Section

H 型钢截面型号	$I_{yw}/\text{mm}^4$	$I_{yf}/\text{mm}^4$	$I_a/\text{mm}^4$	$I_{yw}I_a^{-1}/\%$	$I_{yf}I_a^{-1}/\%$
HW300×300×10×15	$2.25\times10^4$	$6.750\times10^7$	$6.752\times10^7$	0.03	99.97
HW400×400×13×21	$6.55\times10^4$	$2.240\times10^8$	$2.241\times10^8$	0.03	99.97
HM294×200×8×12	$1.15\times10^4$	$1.600\times10^7$	$1.601\times10^7$	0.07	99.93
HM390×300×10×16	$2.98\times10^4$	$7.200\times10^7$	$7.203\times10^7$	0.04	99.96
HN300×150×6.5×9	$6.45\times10^3$	$5.062\times10^6$	$5.068\times10^6$	0.13	99.87
HN350×175×7×11	$9.38\times10^3$	$9.825\times10^6$	$9.834\times10^6$	0.09	99.91

注: $I_a$  为构件总的惯性矩。

1.2 自由扭转刚度

对于宽度为  $b$ ,厚度为  $t$  的狭长矩形截面,抗扭惯性矩  $I_t$  可近似表达为: $I_t=\frac{1}{3}bt^3$ ,H 型钢实腹梁由 3 块狭长的矩形板组成,其抗扭刚度可表达为

$$GI_t=G(\frac{2bt^3}{3}+\frac{h_wt_w^3}{3})=\frac{G}{3}(2bt^3+h_wt_w^3)=\frac{4G}{E}(\frac{1}{6}Ebt^3+\frac{1}{12}Eh_wt_w^3)=\frac{4G}{E}(\frac{1}{6}Ebt^3+EI_{syw}) \tag{7}$$

对于开孔梁,由于孔洞的影响, $EI_{syw}$  需乘以折减系数  $k_y$ ,因此带有连续正方形孔洞的 H 型钢梁的自由扭转刚度可表达为

$$GI_t=\frac{1}{3}G(2bt^3+k_yh_wt_w^3) \tag{8}$$

1.3 翘曲刚度

双轴对称实腹截面梁翘曲刚度  $EI_w=\frac{1}{4}EI_yh_w^2$ ,将其代入公式(6)便得到带有连续正方形孔洞的 H 型钢梁的翘曲刚度,即

$$EI_w=\frac{Eb^3t(h_w+t)^2}{24} \tag{9}$$

将式(6),(8),(9)代入公式(1)中,便得到带有连续正方形孔洞的 H 型钢梁的弯扭屈曲临界弯矩表达式,即

$$M_{cr}=\frac{\pi^2Eb^3t(h-t)}{12l^2} \cdot$$

$$\sqrt{1+\frac{8G}{\pi^2E}(\frac{l}{h-t})^2[2(\frac{t}{b})^2+k_y\frac{h_wt_w^3}{tb^3}]} \tag{10}$$

2 数值模拟

2.1 有限元模型

本文采用 ABAQUS 软件自带的四边形壳单元(S4R)模拟开孔梁,该单元每个节点有 6 个自由度,适用于大应变、大挠度、线性和非线性问题,具有较高的精度<sup>[6]</sup>。建模时忽略焊缝及残余应力的影响,按照特征值法求解弹性弯扭屈曲临界弯矩<sup>[7]</sup>。钢材为 Q235 钢,采用理想弹塑性模型,弹性模量取 206 GPa,泊松比取 0.3。边界条件符合简支约束,一端为固定铰支座,限制  $x,y,z$  轴方向的线位移,另一端为滑动铰支座,限制  $x,y$  轴方向的线位移,同时,两端截面均限制绕  $z$  轴方向的转动以符合简支的边界条件<sup>[8-11]</sup>。

2.2 有限元模型的验证

为验证有限元模型的准确性,现以 H 型钢实腹梁作为验证对象,截面型号为 HN300×180×8×10,考虑 3 种跨度。在纯弯荷载作用下,实腹梁的弯扭屈曲变形如图 2 所示,将规范计算结果与数值模拟结果进行对比,如表 2 所示。从表 2 中可以看出,相对误差均在 1%以内,说明有限元模拟 H 型钢实腹梁弹性弯扭屈曲临界弯矩具有较高的精确度。

2.3 带有连续正方形孔洞的 H 型钢梁数值模拟

孔洞的存在降低了腹板的抗侧刚度,当孔洞的大小和间距不同时,其对腹板抗侧刚度的削弱程度也不同,现用孔洞的高度  $D$  与梁截面高度  $h$  的比值(孔高比  $D/h$ )和孔洞的间距  $S$  与梁截面高度  $h$  的比值(距高比  $S/h$ )来表征开孔特征,由于开孔高度和开孔间距的相关性,本文假定  $D+S=h$ 。现以截

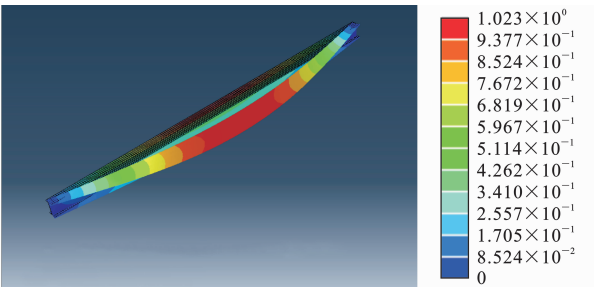


图 2 实腹梁弯扭屈曲变形(单位:mm)

面  $\text{HN}300\times180\times8\times10$  为研究对象,考虑 6 种工程中常见的跨高比,每种跨高比考虑 5 种开孔特征,连续开孔梁临界弯矩计算结果见表 3。从表 3 可以看出,公式(10)得到的弯扭屈曲临界弯矩和有限元数值模拟结果的相对误差均在 5% 以内,证明了推导公式(10)的准确性和可靠性。

3 带有连续正方形孔洞的 H 型钢梁整体稳定性实用计算公式

第 1 节已推导出带有连续正方形孔洞的 H 型

Fig. 2 Deformations of Solid-web Girder Subjected to Flexural-torsional Buckling (Unit:mm)

表 2 实腹梁弯扭屈曲临界弯矩计算结果与有限元模拟结果对比

Tab. 2 Comparisons Between Calculation Results and Finite Element Simulation Results of Flexural-torsional Buckling

Critical Moments for Solid-web Girders			
跨度/m	5.5	7.5	12.0
弯扭屈曲临界弯矩规范解/(N·mm)	$1.353\times10^8$	$8.682\times10^7$	$4.78\times10^7$
弯扭屈曲临界弯矩 ABAQUS 解/(N·mm)	$1.357\times10^8$	$8.737\times10^7$	$4.79\times10^7$
相对误差/%	0.2	0.6	0.2

表 3 连续开孔梁临界弯矩计算结果

Tab. 3 Calculation Results of Critical Moments for Solid-web Girders with Multiple Holes

跨高比	参数	$D/S=7/3$	$D/S=6/4$	$D/S=5/5$	$D/S=4/6$	$D/S=3/7$
8	$M_{cr}/(10^8\text{ N}\cdot\text{mm})$	5.345	5.362	5.376	5.388	5.397
	$M'_{cr}/(10^8\text{ N}\cdot\text{mm})$	5.306	5.333	5.353	5.379	5.384
	$M_{scr}/(10^8\text{ N}\cdot\text{mm})$	5.388	5.388	5.388	5.388	5.388
	相对误差/%	0.7	0.5	0.4	0.1	0.2
10	$M_{cr}/(10^8\text{ N}\cdot\text{mm})$	3.549	3.565	3.579	3.590	3.590
	$M'_{cr}/(10^8\text{ N}\cdot\text{mm})$	3.566	3.589	3.608	3.633	3.641
	$M_{scr}/(10^8\text{ N}\cdot\text{mm})$	3.650	3.650	3.650	3.650	3.650
	相对误差/%	-0.5	-0.6	-0.8	-1.2	1.1
15	$M_{cr}/(10^8\text{ N}\cdot\text{mm})$	1.760	1.775	1.787	1.797	1.805
	$M'_{cr}/(10^8\text{ N}\cdot\text{mm})$	1.708	1.732	1.752	1.773	1.784
	$M_{scr}/(10^8\text{ N}\cdot\text{mm})$	1.799	1.799	1.799	1.799	1.799
	相对误差/%	2.9	2.4	2.0	1.3	1.1
20	$M_{cr}/(10^8\text{ N}\cdot\text{mm})$	1.119	1.132	1.143	1.151	1.158
	$M'_{cr}/(10^8\text{ N}\cdot\text{mm})$	1.103	1.129	1.135	1.152	1.160
	$M_{scr}/(10^8\text{ N}\cdot\text{mm})$	1.171	1.171	1.171	1.171	1.171
	相对误差/%	1.4	0.9	0.6	-0.2	-0.1
25	$M_{cr}/(10^7\text{ N}\cdot\text{mm})$	8.098	8.211	8.306	8.383	8.443
	$M'_{cr}/(10^7\text{ N}\cdot\text{mm})$	8.315	8.434	8.546	8.657	8.722
	$M_{scr}/(10^7\text{ N}\cdot\text{mm})$	8.815	8.815	8.815	8.815	8.815
	相对误差/%	2.6	2.7	2.8	3.2	3.3
30	$M_{cr}/(10^7\text{ N}\cdot\text{mm})$	6.328	6.428	6.513	6.581	6.634
	$M'_{cr}/(10^7\text{ N}\cdot\text{mm})$	6.488	6.593	6.695	6.781	6.839
	$M_{scr}/(10^7\text{ N}\cdot\text{mm})$	6.921	6.921	6.921	6.921	6.921
	相对误差/%	2.5	2.5	2.7	3.0	3.0

注: $M_{cr}$ 为公式(10)计算的开孔梁临界弯矩; $M'_{cr}$ 为有限元模拟的开孔梁临界弯矩; $M_{scr}$ 为有限元模拟的实腹梁临界弯矩。

钢梁的弯扭屈曲临界弯矩精确计算公式,但这种方法计算较为繁琐,不利于实际工程中的应用,而且为了与《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)<sup>[12]</sup>中实腹梁的整体稳定性计算公式统一,现定义带有连续正方形孔洞的 H 型钢梁的弯扭屈曲临界弯矩折减系数  $\Psi$  的表达式如下

$$\Psi=\frac{M_{cr}'}{M_{scr}}\tag{11}$$

从上述分析可知,  $\Psi$  与跨高比、孔高比和距高比 3 个因素有关,根据表 3 结果计算出  $\Psi$  的值,结果见表 4。为了得到  $\Psi$  的表达式,对表 4 的计算结果进行非线性拟合,建立以  $l/h$  和  $D/S$  为自变量,以  $\Psi$  为因变量的二元函数,最终得到带有连续正方形孔洞的 H 型钢梁弯扭屈曲临界弯矩折减系数的表达式,即

$$\Psi=0.97+\frac{0.32}{l/h}-0.017\frac{D}{S}\tag{12}$$

结合《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)<sup>[12]</sup>中关于 H 型钢实腹梁整体稳定性的计算公式,考虑连续开孔后临界弯矩的折减系数,便得到带有连续正方形孔洞的 H 型钢梁整体稳定性的计算公式,即

$$\frac{M_x}{\Psi\varphi_bW_x}\leqslant f\tag{13}$$

表 5 公式(13)计算结果与有限元模拟结果对比

Tab. 5 Comparisons Between Calculation Results from Eq. (13) and Finite Element Simulation Results						
跨高比	参数	$D/S=7/3$	$D/S=6/4$	$D/S=5/5$	$D/S=4/6$	$D/S=3/7$
8	$M_{cr}'/(10^8\text{ N}\cdot\text{mm})$	5.306	5.333	5.353	5.379	5.384
	$M_{cr13}/(10^8\text{ N}\cdot\text{mm})$	5.074	5.100	5.118	5.144	5.149
	相对误差/%	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3
10	$M_{cr}'/(10^8\text{ N}\cdot\text{mm})$	3.566	3.589	3.608	3.633	3.641
	$M_{cr13}/(10^8\text{ N}\cdot\text{mm})$	3.395	3.412	3.425	3.442	3.445
	相对误差/%	4.7	4.9	5.0	5.6	5.6
15	$M_{cr}'/(10^8\text{ N}\cdot\text{mm})$	1.708	1.732	1.752	1.773	1.784
	$M_{cr13}/(10^8\text{ N}\cdot\text{mm})$	1.718	1.726	1.732	1.741	1.743
	相对误差/%	-0.5	0.3	1.0	1.8	2.3
20	$M_{cr}'/(10^8\text{ N}\cdot\text{mm})$	1.103	1.129	1.135	1.152	1.160
	$M_{cr13}/(10^8\text{ N}\cdot\text{mm})$	1.110	1.115	1.119	1.125	1.126
	相对误差/%	-0.7	1.1	1.4	2.2	2.9
25	$M_{cr}'/(10^7\text{ N}\cdot\text{mm})$	8.315	8.434	8.546	8.657	8.722
	$M_{cr13}/(10^7\text{ N}\cdot\text{mm})$	8.136	8.176	8.206	8.247	8.255
	相对误差/%	2.1	3.0	3.9	4.7	5.3
30	$M_{cr}'/(10^7\text{ N}\cdot\text{mm})$	6.488	6.593	6.695	6.781	6.839
	$M_{cr13}/(10^7\text{ N}\cdot\text{mm})$	6.417	6.449	6.473	6.505	6.511
	相对误差/%	1.0	2.1	3.3	4.0	4.7

注:  $M_{cr13}$  为公式(13)计算的开孔梁临界弯矩。

表 4 连续开孔实腹梁临界弯矩折减系数

Tab. 4 Reduction Coefficients of Critical Moments for Solid-web Girders with Multiple Holes

$l/h$	$D/S=7/3$	$D/S=6/4$	$D/S=5/5$	$D/S=4/6$	$D/S=3/7$
8	0.984	0.989	0.993	0.998	0.999
10	0.976	0.983	0.988	0.995	0.997
15	0.949	0.962	0.973	0.985	0.991
20	0.941	0.956	0.969	0.982	0.989
25	0.943	0.956	0.969	0.982	0.989
30	0.937	0.952	0.967	0.979	0.988

式中:  $M_x$  为绕强轴作用的最大弯矩;  $W_x$  为按受压纤维确定的相应实腹梁毛截面模量;  $\varphi_b$  为相应实腹梁的整体稳定系数,按《钢结构设计规范》附录 B 取值;  $f$  为钢材抗弯强度设计值;  $\Psi$  按公式(12)计算。

为验证公式(13)的准确性,现将公式(13)计算结果与有限元模拟结果进行对比,对比结果见表 5。由表 5 可以看出,公式(13)计算结果与有限元模拟结果的相对误差均在 5% 以内,且大部分相对误差在 3% 左右,从而验证了简化公式的准确性。

4 结 语

(1)从理论上推导出带有连续正方形孔洞的 H 型钢梁抗侧刚度  $EI_y$ 、自由扭转刚度  $GI_t$  和翘曲刚

度  $EI_w$ , 并在小变形理论推导出的实腹梁弯扭屈曲临界弯矩计算公式的基础上, 推导出带有连续正方形孔洞的 H 型钢梁临界弯矩的精确表达式。

(2) 采用大型通用有限元软件 ABAQUS 模拟 H 型钢梁在纯弯荷载作用下的弯扭屈曲临界弯矩, 并与规范解对比, 验证有限元模型的准确性。应用经验证的有限元模型对连续开孔梁的弯扭屈曲临界弯矩进行分析, 从而验证了推导公式的准确性。

(3) 根据数值模拟结果, 在考虑跨高比、孔高比和距高比 3 个影响因素的前提下, 推导出带有连续正方形孔洞的 H 型钢梁临界弯矩折减系数。

(4) 以现有规范中实腹梁的整体稳定性计算公式为基础, 推导出连续开孔梁的实用计算公式, 并与有限元模拟结果进行对比。结果表明, 连续开孔梁实用计算公式具有较高的精确度。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 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, 10(8): 27-35.  
NI Fu-sheng, HU Tai-xiang, HU Si-yuan, et al. Stress Distribution and Calculation of Castellated Beams[J]. Industrial Construction, 1984, 10(8): 27-35.
- [2] 刘文如, 朱聘儒, 张培卿. 蜂窝梁檩条的试验研究[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1993, 26(1): 101-105.  
LIU Wen-ru, ZHU Pin-ru, ZHANG Pei-qing. Experimental Research of Castellated Beam Purlins[J]. Journal of Harbin Architecture & Civil Engineering Institute, 1993, 26(1): 101-105.
- [3] 邹锦华, 魏德敏, 苏益声, 等. 蜂窝梁的简化计算及其试验对比[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2005, 33(1): 47-51.  
ZOU Jin-hua, WEI De-min, SU Yi-sheng, et al. Reduced Calculation and Its Experimental Comparison for Castellated Beams[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2005, 33(1): 47-51.
- [4] 陈冀. 钢结构稳定: 理论与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.  
CHEN Ji. Stability of Steel Structures: Theory and

Design[M]. Beijing: Science Press, 2001.

- [5] 周朝阳, 周云峰. 蜂窝梁等效抗弯刚度的确定方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2008, 25(1): 102-106, 115.  
ZHOU Chao-yang, ZHOU Yun-feng. Confirm Method of Equivalent Bending Rigidity of Castellated Beams[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25(1): 102-106, 115.
- [6] 庄茁, 由小川, 廖剑晖, 等. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.  
ZHUANG Zhuo, YOU Xiao-chuan, LIAO Jian-hui, et al. Finite Element Analysis and Application Based on ABAQUS[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [7] 朱俞江. 箱形截面梁和梁柱的弹塑性稳定极限承载力分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.  
ZHU Yu-jiang. Ultimate Load Carrying Capacity Analysis of Box Section Beams and Beam-columns[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [8] REDWOOD R, DEMIRDJIAN S. Castellated Beam Web Buckling in Shear[J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(10): 1202-1207.
- [9] ZAAROUR W J, REDWOOD R. Web Buckling in Thin Webbed Castellated Beams[J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(8): 860-866.
- [10] 王立福, 杨佑发, 石诚. 基于 ANSYS 的蜂窝梁受力性能分析[J]. 重庆建筑大学学报, 2004, 26(2): 72-75, 87.  
WANG Li-fu, YANG You-fa, SHI Cheng. Load Characteristics Analysis of Castellated Beam Based on ANSYS[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2004, 26(2): 72-75, 87.
- [11] 白凤军, 马克俭. 蜂窝梁的静力分析[J]. 贵州工业大学学报: 自然科学版, 2002, 31(6): 32-35.  
BAI Feng-jun, MA Ke-jian. Alveolus Beam Analysis[J]. Journal of Guizhou University of Technology: Natural Science Edition, 2002, 31(6): 32-35.
- [12] GB 50017—2003, 钢结构设计规范[S].  
GB 20017—2003, Code for Design of Steel Structures[S].