

文章编号:1673-9469(2015)02-0028-03

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2015.02.007

## 波纹腹板 H 型钢梁顶底角钢半刚性节点研究

杨万斌,张燕,任玉卓

(河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038)

**摘要:**运用有限元软件 ANSYS 对波纹腹板 H 型钢梁顶底角钢半刚性节点进行静力荷载下的数值模拟,分析不同角钢厚度和梁高对半刚性节点受力性能的影响。结果表明:增加角钢的厚度,节点的初始转动刚度和抗弯承载力呈增长的趋势,但随着进入塑性变形阶段其增幅逐渐减小,当角钢的厚度增加到一定的程度时,对节点的初始转动刚度和抗弯承载力影响不大;增加角钢的厚度,节点的延性会降低;增加梁截面高度可以有效的提高节点的初始转动刚度及抗弯承载能力。

**关键词:**波纹腹板 H 型钢梁;半刚性节点;顶底角钢连接

**中图分类号:**TU391

**文献标识码:**A

### Study of semi-rigid angle connections of H-beams with corrugated webs

YANG Wan-bin, ZHANG Yan, REN Yu-zhuo

(College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China)

**Abstract:** In order to study the mechanical performance of semi-rigid angle connections of H-beams with corrugated webs, semi-rigid angle connections were simulated under the static loading with the finite element software ANSYS. With different angle thickness and different height of the H-beams with corrugated web, we can obtain the moment-rotation curve and stress cloud pictures, then analyze the influence of the angle thickness and the height of the H-beams with corrugated web to the behaviors of the connections. Results show that increasing the thickness of the angle, the initial rotational stiffness and bending capacity of connections have a growing trend, but the growth rate decreases, When the thickness of the angle increases to a certain extent, the influence is little; Increasing the thickness of the angle, the ductility of the connection will reduce; Increase of beam section height can effectively improve the connection initial rotational stiffness and bending capacity.

**Key words:** H-beams with corrugated webs; semi-rigid connection; angle steel connection

梁柱节点连接是钢结构抗震设计中的重点。传统设计将节点连接假定为完全刚接或完全铰接,但在实际工程中采用的全部连接形式所具有的刚度,都处在完全刚性和理想铰接的两种极端情况之间,即节点都具有有限的刚性<sup>[1-2]</sup>,应作为半刚性连接考虑。波纹腹板钢梁的腹板采用波纹钢板,在厚度较小的情况下,不使用加劲肋就能够具有较高的平面外刚度和屈服强度<sup>[3-4]</sup>,从而节约钢材,提高经济效益,因此,波纹腹板钢梁在钢结构领域具有较好的应用前景<sup>[5-6]</sup>。目前我国对波纹腹板 H 型钢梁半刚性节点的研究较少。

本文利用有限元软件 ANSYS 对波纹腹板 H 型钢梁顶底角钢半刚性节点进行模拟,通过调整角钢厚度和梁高,得到弯矩-转角曲线,从而分析这两个因素对节点性能的影响。

### 1 连接节点的设计

平腹板 H 型钢柱的截面尺寸为 400 mm × 400 mm × 10 mm × 14 mm,柱高 2 m;根据《波纹腹板钢结构技术规程》(CECS 291:2011)<sup>[7]</sup>,选取波纹腹板 H 型钢型号为 CWA550-300-12,即梁翼缘宽 300 mm、厚 12 mm,梁腹板高 550 mm、厚 2 mm。

收稿日期:2014-11-30

作者简介:杨万斌(1963-),男,河北张家口人,教授,从事岩体方面的研究。

波形参数如图 1 所示,梁的悬臂段长 2 m;螺栓采用 10.9 级 M20 摩擦型高强螺栓;角钢采用 L160 × 10。连接节点模型示意图见图 2。螺栓排列见图 3。

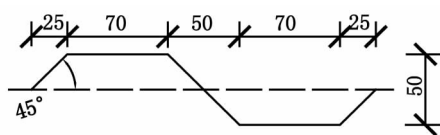


图1 腹板一波段波形参数

Fig. 1 A band waveform parameters

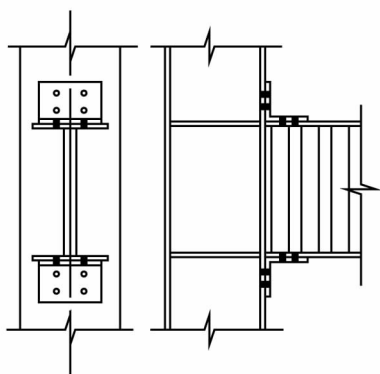


图2 半刚性节点连接示意图

Fig. 2 Semi-rigid nodes connection sketch map

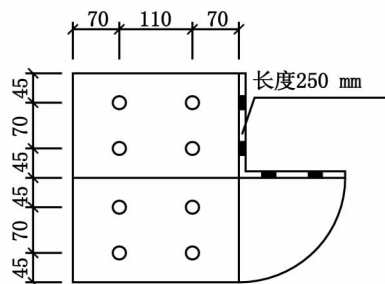


图3 螺栓排列

Fig. 3 The arranged of bolt

## 2 有限元建模

### 2.1 本构模型的选取

为了使有限元模拟更加接近真实效果,半刚性连接节点的材料属性采用实际钢材的材料属性,所有钢材均采用 Q235 材质,  $E = 2.06 \times 10^5$  MPa,泊松比  $\nu = 0.3$ ,钢材的本构关系采用典型的双线性模型,屈服准则服从 Mises 屈服准则。

### 2.2 模型建立及网格划分

采用有限元软件 ANSYS 进行数值模拟,根据分析特点,柱子、波纹腹板 H 型钢梁、螺栓、角钢采用三维实体单元 SOLID95 单元来模拟,用

TARGE170 和 CONTA174 单元来模拟柱翼缘与角钢间的接触,摩擦系数为 0.4。螺栓采用摩擦型高强螺栓。

ANSYS 定义网格划分:远离节点的柱子采用扫略网格划分,其他部分采用自由划分。节点网格划分结果如图 4 所示。

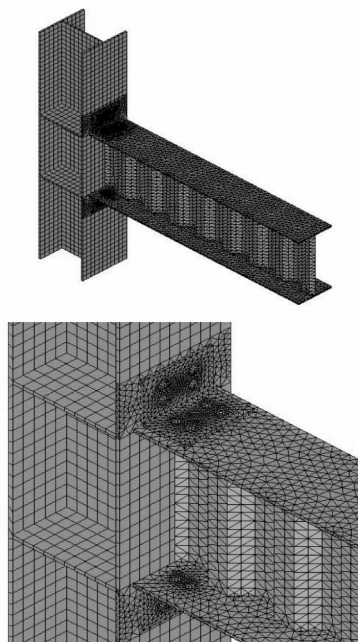


图4网格划分结果

Fig. 4 The meshing results

### 2.3 边界条件及加载方式

边界条件:对柱子下端节点约束其六个方向的自由度;柱子上端约束 X 和 Z 方向的平动自由度;波纹腹板 H 型钢梁的悬臂端处端截面所有节点施加竖向约束。

加载方式:先施加螺栓预紧力,再在梁悬臂端处端截面施加竖向位移。

## 3 节点性能影响因素

弯矩—转角关系是半刚性节点的主要力学性能,一般采用  $M = f(\theta)$  函数来描述,式中,  $M$  表示作用于节点的弯矩,  $\theta$  表示梁柱之间的相对角位移。从  $M - \theta$  曲线中可得到节点的刚度、强度和转动能力。

连接的初始转动刚度是指连接在梁端弯矩作用下,其变形仍处于线弹性范围内时连接所具有的转动刚度。在数学上,连接的初始转动刚度可用连接  $M - \theta$  关系曲线表达式在原点处的一阶导数表示。

$$K_I = \left. \frac{dM}{d\theta} \right|_{\theta=0} \quad (1)$$

### 3.1 角钢厚度的影响

为了研究角钢厚度对节点性能的影响,在保证其他参数不变的情况下仅改变角钢厚度,角钢厚度分别取 8 mm, 10 mm, 12 mm, 14 mm, 得到不同角钢厚度下的弯矩—转角曲线如图 5 所示。

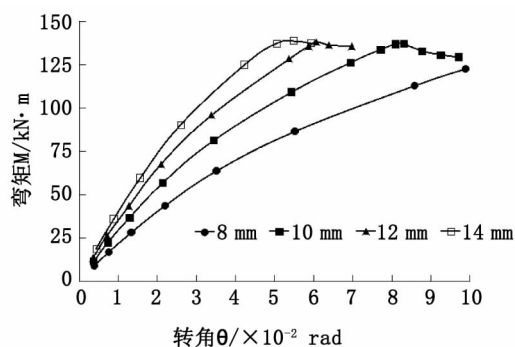


图5 不同角钢厚度的弯矩—转角曲线图

Fig.5 The  $M-\theta$  graph of different angle iron thickness

从图 5 可以看出,每条曲线的变化趋势:加载初期,弯矩—转角曲线呈线性变化,随着弯矩的增加,曲线斜率降低,弯矩—转角曲线表现为明显的非线性,弯矩的增幅逐渐减小,当弯矩增加到一定值时,弯矩—转角曲线出现下坡段,弯矩随转角的增加而减小,此时节点已破坏。

角钢厚度由 8 mm 增加到 10 mm 时,弯矩—转角曲线的斜率增幅较大,即节点初始转动刚度和抗弯承载力都有较大的增长,角钢厚度由 10 mm 增加到 12 mm 时,弯矩—转角曲线的斜率增幅相对减小,角钢厚度由 12 mm 增加到 14 mm 时,斜率增幅更小。说明当角钢厚度较小时,增加角钢的厚度,节点的初始转动刚度和抗弯承载力呈增长的趋势,但增幅逐渐减小,当角钢厚度增加到一定的程度时对节点的初始转动刚度和抗弯承载力影响不明显。出现这种现象的原因是当角钢的厚度较小时,节点破坏是由角钢屈服造成的,增加角钢的厚度,节点的初始转动刚度和抗弯承载力都相应提高;当厚度增加到一定程度时,角钢的变形很小,此时角钢的厚度对节点刚度和抗弯承载力的影响已不是控制因素,节点破坏是由螺栓破坏决定的。

从图中也可以看出,随着角钢厚度的增加,节点破坏时的转角减小,说明增加角钢的厚度,节点的延性会降低,这是因为角钢厚度较小时,螺栓还

未屈服,角钢已经发生较大塑性变形,节点延性好。

### 3.2 梁高的影响

在保证其他参数不变的情况下只改变波纹腹板 H 型钢梁的高度,分别取 550 mm, 600 mm, 650 mm, 700 mm, 750 mm, 得到不同梁高下的弯矩—转角曲线如图 6 所示。

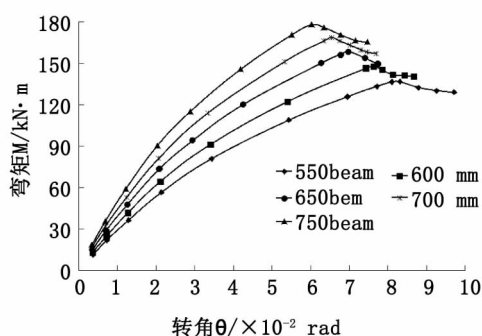


图6 不同梁高的弯矩—转角曲线

Fig.6 The  $M-\theta$  graph of different beam height

从图 6 可以看出,梁高由 550 mm 增加到 750 mm 时,节点的初始转动刚度及抗弯承载力均随之增加,说明梁高对节点初始转动刚度及抗弯承载力的影响很大,这是因为梁截面高度越大,相同弯矩条件下水平力就越小,则顶角钢竖肢承受的弯矩越小,螺栓承受的拉力就会减小,同时角钢水平肢承受拉力也越小,使接触面不会过早的产生滑移,避免螺栓承受水平剪力对梁翼缘螺孔壁造成挤压,使螺孔壁屈服。节点区的梁端弯矩最大,增加梁的截面高度,截面的抗弯刚度会增大,梁端翼缘不易屈服,也会提高节点的承载能力和刚度。因此增加梁截面高度可以有效的提高节点的初始转动刚度及抗弯承载力。

## 4 结论

1) 加载初期,弯矩—转角曲线呈线性变化;随着荷载的增加,曲线斜率降低,弯矩—转角曲线表现为明显的非线性;当弯矩增加到节点的极限承载力时,弯矩—转角曲线出现下坡段,弯矩随转角的增加而减小。

2) 当角钢厚度较小时,增加角钢的厚度,节点的初始转动刚度和抗弯承载力呈增长的趋势,但增幅逐渐减小,当角钢厚度增加到一定的程度时,对节点的初始转动刚度和抗弯承载力影响不明显。

3) 增加角钢的厚度,节点的延(下转第 35 页)

我们知道,位移边界的不同是不会引起温度场变化的,那么在各种计算相同,换热边界条件相同的情况下,常物性2D-FGM平面区域的温度场分布在不同位移约束条件下应当是保持一致的。并且根据热弹性力学理论,若FGM平面区域的左右两个边界是自由边界,那么边界上的热应力 $\sigma_x=0$ 。

分析图4可知:冷却情况下,位移边界条件对常物性2D-FGM平面区域冷却瞬态热应力分布影响颇大。

观察图4(a)和4(b)可知,在简支情况下,平面区域的左右两个边界都是自由边界,在一端固定情况下,平面区域的右边界是自由边界,因此,这些边界上的热应力 $\sigma_x=0$ ;从图4(a)变化到图4(b),即将左边界设置为固定约束后,在平面的左边界上形成了上中下三个应力聚集,但应力值几乎没有发生变化,整个区域既存在压应力又存在拉应力。

图4(c)中,将左右边界均设置为固定约束后,其右边界不仅也产生了相同现象,而且区域内部应力分布形状与数值都发生了巨大变化:平面中部应力分布曲线更加不平行于 $x$ 坐标方向,区域内部应力值全部成为拉应力,且数值增长幅度颇为显著;将四周均设置呈固定约束后,如图4(d)所示,平面四角上的应力聚集消失,热应力数值增长幅度较两端固定情况时更为明显。

## 5 结论

冷却过程中,位移边界条件对常物性2D-FGM平面区域冷却瞬态热应力分布影响颇大,将四周均设置呈固定约束后,平面四角上的应力聚集消失,应力凸起位置移动到平面右上部位,热应

力数值增长幅度较两端固定情况时更为明显。

## 参考文献:

- [1]李信,刘海昌. 功能梯度材料的研究现状及展望[J]. 材料导报,2012,26(19):370-372.
- [2]马涛,赵忠民,刘良祥,等. 功能梯度材料的研究进展及应用前景[J]. 化工科技,2012,20(1):71-75.
- [3]WUXIANG LIU, ZHENG ZHONG. Three-dimensional thermoelastic analysis of functionally graded plate[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2011,24(3):241-249.
- [4]许杨健,涂代惠,马士进. 加热、冷却下变物性梯度功能材料板瞬态热应力[J]. 机械强度,2005,27(4):510-517.
- [5]M R GOLBAHAR HAGHIGHI, P MALEKZADEH, H RAHIDEH, et al. Inverse Transient heat conduction problems of a multilayered functionally graded cylinder[J]. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications. 2012(9):717-733.
- [6]许杨健,王飞,杜海洋. 初始和边界恒温时二维梯度板瞬态温度场[J]. 固体力学学报,2014(2):3-6.
- [7]许杨健,王飞,杜海洋,等. 边界不同恒温时功能梯度板平面稳态温度场[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2013,30(2):4-8.
- [8]OBATA Y, NODA N. Unsteady thermal stresses in a functionally gradient material plate (Analysis of one-dimensional unsteady heat transfer problem)[J]. Trans. JSME, 1993,59(560):1090-1096.
- [9]王洪纲. 热弹性力学概论[M]. 北京:清华大学出版社,1989.
- [10]严宗达,王洪礼. 热应力[M]. 北京:高等教育出版社,1993.

(责任编辑 刘存英)

(上接第30页)性会降低。因此在保证延性设计的要求下,角钢厚度满足节点承载力即可。

4)梁高对节点初始转动刚度及抗弯承载能力的影响很大,节点的初始转动刚度及抗弯承载能力均随梁高的增加而增大,因此增加梁截面高度可以有效的提高节点的初始转动刚度及抗弯承载能力。

## 参考文献:

- [1]陈雨,雷敏. 节点域对无横向加劲助节点延性影响[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2014,31(2):4-8.
- [2]王燕. 钢结构半刚性连接设计理论及其工程应用

- [M]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [3]李国强,范昕,孙飞飞,等. 波纹腹板H型钢梁柱铰接节点静力性能试验研究及有限元分析[J]. 建筑结构学报,2013(4):107-114.
- [4]罗振亮. 波纹腹板H型钢梁柱刚性连接节点域的性能研究[D]. 邯郸:河北工程大学,2014.
- [5]张哲. 波纹腹板H型钢及组合梁力学性能理论与试验研究[D]. 上海:同济大学,2009.
- [6]张春玉,沈岩,赵延林,等. 六边形孔蜂窝梁挠度实验与有限元分析[J]. 黑龙江科技大学学报,2014,4(3):312-316.
- [7]CECS 291,2011 波纹腹板钢结构技术规程[S].

(责任编辑 刘存英)