

文章编号:1671-6833(2005)01-0016-04

平面钢屋架节点刚性次应力影响分析

李 天, 李月华, 刘海涛, 赵东杰

(郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450002)

摘 要:应用有限元分析软件,对两种跨度下典型平面钢屋架节点刚性所产生的次应力进行了分析计算.对典型平面钢屋架采用了平面铰接模型、平面刚接模型Ⅰ以及平面刚接模型Ⅱ.分析了在普通荷载作用下钢屋架次应力的大小、分布规律以及影响次内力大小的主要因素,并初步探讨了次应力对钢屋架计算方法的影响.结果表明,钢屋架杆件的次内力随着杆件线刚度的增大而增大,随着屋架跨度的增大,次应力的影响也愈大,且次应力的影响不可忽略.该结论可为考虑次应力的钢屋架的设计提供参考.

关键词:钢屋架;节点刚性;次应力;次内力

中图分类号:TU 323.1

文献标识码:A

0 引言

在钢结构建筑中,桁架结构是一种比较普遍的结构形式.由于理论和实际的原因,为了简化计算,经常采用理想桁架模型,也就是假定所有的杆件均为二力杆,所有节点均为理想铰,且仅有作用于节点的荷载.然而实际桁架结构中,弦杆均为连续杆,而且各个节点处均采用焊接连接,这样由于节点板连接的刚性影响等原因,使得桁架杆件在节点板范围内有很大的嵌固作用,这就使得桁架杆件,即使在节点荷载作用下不仅有轴力,还有弯矩和剪力,即所谓的次内力.由次内力产生的应力称为次应力,同时把按理想桁架计算所得的杆件轴向应力称为主应力.

理想桁架与实际桁架之间节点构造差别所造成的次内力影响有多大,目前看法并不统一.一般认为当采用角钢作为桁架杆件时,可以不考虑次内力的影响;也有观点认为当主桁架杆件截面高度与节长之比在连续桁架中超过 1/15,简支桁架中超过 1/10 时,应计算由于节点刚性引起的次应力.国外的某些研究认为对采用间隙接头的桁架,由于接头处的柔度较大,铰接分析会低估整体桁架的变形,应考虑次应力;也有研究认为在静荷载情况下,桁架的节点应按铰接计算,但对于疲劳设计来说,连接处的次应力应予以考虑,其方法是在

设计中将轴向应力乘于一定的放大系数等等^[1].笔者将对国内普遍采用的钢屋架进行较精确的有限元模拟,以分析这类结构次内力的影响.

1 有限元模型建立

笔者以国家标准图集《梯形钢屋架》97G511 中平面钢屋架为计算对象,作为典型分析,笔者只对 18 m 和 30 m 跨度的钢屋架进行次应力影响分析.钢屋架两端简支,只受节点荷载,同时不考虑节点的偏心连接.计算中,屋面恒载设计值均取为 4.5 kN/m^2 ,屋架及支撑自重按计算公式 $P_w = 0.12 + 0.01L$ (L 为屋架跨度) 计算^[2];活荷载或雪荷载的标准值一律取为 0.7 kN/m^2 ;屋面采用 $1.5 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ 预应力混凝土屋面板,坡度 1/10,无天窗.为了对比,对钢屋架按三种受力模型进行分析计算,其节点形式如图 1 所示.在模型尺寸方面,2 种跨度的钢屋架主要杆件所采用的角钢型号见表 1、表 2.其它杆件的角钢型号由《梯形钢屋架》97G511 上查得^[3].图 1(c) 中杆件变截面段的几何特性,按节点板尺寸等效计算得到.从钢屋架标准图所选的全部杆件,其截面高度与节间长度之比均小于 1/10.

笔者采用通用有限元软件 ANSYS 进行计算分析.对于每一种跨度的钢屋架分别采用了图 1 的 3 种模型进行计算.两种跨度采用相同的模型

收稿日期:2004-10-10;修订日期:2004-12-28

基金项目:国家“十五”科技攻关项目(2002BA806B-4-3)

作者简介:李 天(1960-),男,浙江省宁波市人,郑州大学教授,博士,主要从事钢结构分析设计与研究.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

计算.图 1(a) 所示的理想平面铰接模型,所有节点均为理想铰接;而图 1 中(b) 、(c) 所示计算模型,所有节点均为刚性连接.在平面铰接模型中,钢屋架各杆件均采用 I I N K 1 单元,该单元为二维杆单元,只承受轴向的拉力及压力而不考虑弯矩,每个节点具有 X 和 Y 位移方向的两个自由度.在平面刚接模型中,钢屋架各杆件均采用 BEAM 3 单元,该单元为二维梁单元,可以承受拉力、压力及力矩,每个节点具有 X 和 Y 位移方向及 Z 轴转角位移 3 个自由度^[4].图 1(b) 中的平面刚接模型 I 并未考虑到节点板的作用,而图 1(c) 中的平面刚接模型 II 考虑了节点板对节点附近杆件的影响,将各个杆件端部在节点板范围内取为具有较大刚度的杆段.该段变截面的刚度,根据标准图中实际节点板的大小将其等效成杆件得到.

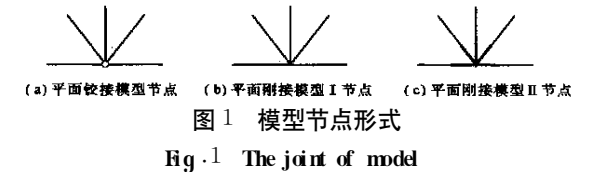


图 1 模型节点形式

Fig.1 The joint of model

屋架结构在竖向节点荷载作用下的简图如图 2、图 3 所示.由于结构与荷载均对称,则取其半边结构,杆件编号也一并标于其上.对于图 1(c) 所

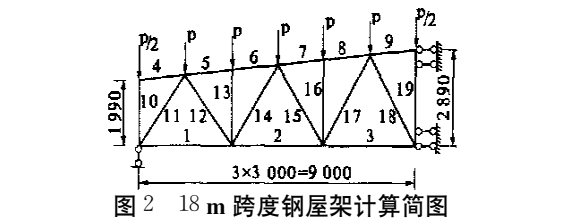


Fig.2 Calculation diagram of 18 mspan steel frame

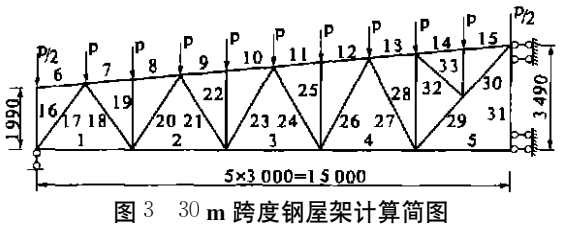


Fig.3 Calculation diagram of 30 mspan steel frame

示的模型,计算中的杆件编号需考虑杆端部分,这里为了对比,不再一一标出.

2 计算结果及分析

表 1、表 2 分别列出对于 18 m、30 m 两种跨度钢屋架在平面铰接模型和平面刚接模型 I、模型 II 下的主要杆件的轴力、弯矩、次应力和正次应力比等结果(未列杆件具有类似特点).表 1、表 2 中的弯矩为杆件各截面弯矩的最大值.图 4~图 7 中

表 1 18 m 跨度钢屋架杆件次应力计算表								
Tab.1 The secondary stress calculation table of 18 mspan steel frame								
杆件编号	杆件截面	弯矩 I / (kN·m)	弯矩 II / (kN·m)	轴力/kN		次应力 /MPa	线刚度/ (kN·m)	次正应 力比/%
				铰接	刚接			
下弦	1	2100×80×7	0.499	0.620	169	170	17.68	20.40
	3	2100×80×7	0.281	0.318	421	421	9.08	5.04
上弦	5	2120×80×7	0.800	0.832	−289	−289	22.37	17.90
	7	2120×80×7	0.658	0.661	−409	−409	17.78	10.90
腹杆	10	263×5	0.226	0.274	−22	−22	18.62	50.00
	11	2100×80×7	0.574	0.632	−295	−294	12.85	9.70
	12	263×5	0.171	0.228	206	205	15.46	8.50
	14	275×5	0.155	0.271	−147	−147	12.70	11.30

说明:1. 线刚度为平面刚接模型 I 中杆件的计算值. 2. 弯矩 I 为平面刚接模型 I 的计算内力值. 3. 弯矩 II、刚接轴力、次应力以及次正应力比为平面刚接模型 II 的计算值.

表 2 30 m 跨度钢屋架杆件次应力计算表								
Tab.2 The secondary stress calculation table of 30 mspan steel frame								
杆件编号	杆件截面	弯矩 I / (kN·m)	弯矩 II / (kN·m)	轴力/kN		次应力 /MPa	线刚度/ (kN·m)	次正应 力比/%
				铰接	刚接			
下弦	1	2180×110×12	1.659	2.392	302	303	20.24	31.06
	2	2180×110×12	1.369	1.772	711	712	15.00	12.43
	5	2180×110×12	1.652	1.630	975	979	13.80	8.67
上弦	7	2200×125×12	3.113	2.948	−537	−536	16.46	21.24
	9	2200×125×12	4.539	4.323	−844	−843	27.97	20.10
	14	2200×125×12	6.704	7.096	−1050	−1040	45.91	25.06
	15	2200×125×12	9.394	9.689	−1029	−1028	62.69	31.04
腹杆	17	2140×90×8	1.981	2.200	−526	−523	21.04	12.64
	18	2100×7	1.124	1.526	406	400	28.90	16.66
	20	2100×7	1.000	1.219	−337	−339	23.09	15.80

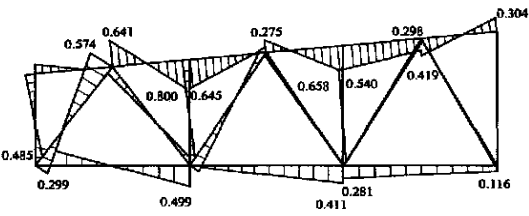


图 4 18 m 跨度钢屋架平面刚接模型 I 弯矩图(kN·m)
Fig. 4 Mbent figure of 18 mspan steel frame under planar rigid connected model I

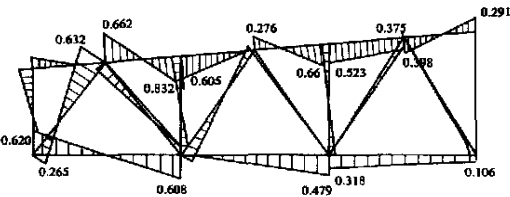


图 5 18 m 跨度钢屋架平面刚接模型 II 弯矩图(kN·m)
Fig. 5 Mbent figure of 18 mspan steel frame under planar rigid connected model II

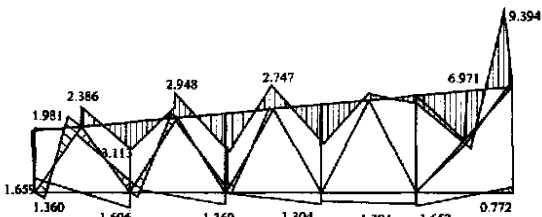


图 6 30 m 跨度钢屋架平面刚接模型 I 弯矩图(kN·m)
Fig. 6 Mbent figure of 30 mspan steel frame under planar rigid connected model I

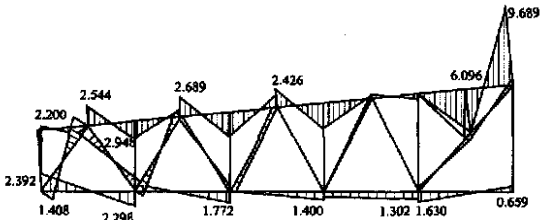


图 7 30 m 跨度钢屋架平面刚接模型 II 弯矩图(kN·m)
Fig. 7 Mbent figure of 30 mspan steel frame under planar rigid connected model II

分别给出了 18 m、30 m 两类跨度下两种平面刚接模型的杆件弯矩图,其中平面刚接模型 II 弯矩图中未标出节点板范围内杆件的弯矩。

从平面铰接模型及平面刚接模型在竖向节点荷载作用下的计算内力,以及所得到的平面刚接模型下的弯矩图(图 4~图 7),我们可以清楚地

看出:

(1) 两种平面刚接模型的计算轴力基本无差别,平面铰接模型与平面刚接模型的计算轴力相差也不大.对于弦杆,理想桁架与考虑节点刚性的桁架上、下弦杆的轴力差别非常微小,其差值均在 1%以内.腹杆轴力的差别,对于 18 m 跨度屋架最大差值仅为 3.7%;而 30 m 跨度屋架,除个别直腹杆和再分式腹杆差别较大,差值最大可达到 44.5%(32 号杆)外,其它杆件差别不大,一般杆件轴力差值均在 5%以内。

(2) 理想桁架杆件内力无弯矩,而考虑节点刚性连接时所有杆件都存在弯矩.从图 4~图 7 中可以看出,上、下弦各杆件的弯矩值均较大,而腹杆在靠近支座处的弯矩值也较大,但靠近跨中位置处的腹杆弯矩值较小。

(3) 虽然考虑节点刚性连接的桁架杆件存在剪力,但剪力的大小均很小,一般可以忽略不计。

(4) 由弯矩引起的次应力在弦杆及部分腹杆中还是比较大的.从表 1、表 2 中可以看出,在平面刚接模型 II 中许多杆件的次正应力比超过 20%,这一现象对于直腹杆、靠近支座及跨中的杆件尤为明显.而且随着屋架跨度的增大,次正应力比值增大.在 18 m 跨度钢屋架中,次正应力比一般都在 20%以内;而在 30 m 跨度钢屋架中,部分杆件的次正应力比超过了 31%。

(5) 在两种平面刚接模型中,由于节点处各杆件的刚度的不同,这两种模型的次弯矩的大小还是有一定差别的.在两个跨度的钢屋架平面刚接模型中,除在上、下弦的个别杆件的刚接模型 I 的弯矩比刚接模型 II 的弯矩大些,其它杆件刚接模型 I 的弯矩基本上均比刚接模型 II 的弯矩小.18 m 跨度钢屋架中,杆件 3,6,8,9 的弯矩 I 比弯矩 II 的数值大,最大差值可达到 10.1%(3 号杆),其余杆件则与此结论相反,其弯矩 I 比弯矩 II 的数值小,最大差值可达到 25.0%(10 号杆).30 m 跨度钢屋架中,杆件 5,8~13 的弯矩 I 比弯矩 II 的数值大,最大差值可达到 28.2%(13 号杆),其余杆件则与此结论相反,其弯矩 I 比弯矩 II 的数值小,最大差值可达到 31.6%(16 号杆).平面刚接模型 II 中弦杆与腹杆交接点处的弯矩均大于平面刚接模型 I 的弯矩.在实际应用中,角钢屋架节点处应用节点板连接的情况是较常见的,由此可见,平面刚接模型 II 能更好符合角钢屋架的实际情况.如果不考虑节点刚性,则刚接模型 II 所产生的最大次应力会更大。

(6) 钢屋架杆件次弯矩受杆件的线刚度影响很大.从杆件的转角位移方程 $M_{AB}=4i\theta_A+2i\theta_B-6i\Delta/l$ (其中 $i=EI/l$, 为杆件的线刚度) 可知,端弯矩 M_{AB} 的影响因素除 A, B 端转角 θ_A, θ_B 以及弦转角 Δ/l 之外,另外就是杆件的线刚度^[3].从计算结果可见各杆件所对应的次弯矩与所对应的杆件线刚度有很大的相关性,这是一个普遍规律.

(7) 钢屋架的跨度愈大,次应力的影响也愈大.这是因为跨度愈大钢屋架杆件内力分布愈不均匀,节点相对位移值愈大,节点转角愈大,从而引起的次弯矩也愈大.

由以上的分析,可以得到实际钢屋架在计算设计时忽略杆件次应力的做法是不甚精确的.在有限元分析中得到许多杆件次正应力比超过 20%,钢屋架的上、下弦杆及部分腹杆特别是靠近支座处的腹杆的次内力均较大,因此在结构设计中应充分考虑到次应力的影响,在截面选择上要留有一定的余地.但也应当看到,当前结构设计都是按弹性设计,当考虑结构的弹塑性影响时,次弯矩的影响可能会有所降低.

3 结论

根据钢屋架结构的杆件特点,采用有限元法

对国家标准图集中两种跨度下的钢屋架分别采用平面铰接模型和平面刚接模型进行计算分析,从而得出节点刚性对杆件受力情况的影响.通过对比计算表明:平面铰接模型与平面刚接模型的计算轴力相差不大;实际钢屋架杆件内存在较大的弯矩,因屋架节点刚性所产生的次应力是不应该被忽略的;钢屋架杆件的次内力随着杆件线刚度的增大而增大,且随着屋架跨度的增大,次应力的影响也愈大.由此,在实际钢屋架结构的设计中,应当充分考虑到次应力的不利影响.

参考文献:

[1] PACKERJ A.HENDERSONJ E. 空心管结构连接设计指南 [M] .曹俊杰,译.北京:科学出版社,1997.69.
[2] 郑州工学院. 钢结构 [M] . 郑州:河南科学技术出版社,1992.239~242.
[3] 97G511, 梯形钢屋架 [S] .
[4] 陈精一,蔡国中. 电脑辅助工程设计 ANSYS 使用指南 [M] . 北京:中国铁道出版社,2001.
[5] 龙驭球,包世华. 结构力学教程(上册)[M] . 北京:高等教育出版社,2000.238~239.

Analysis of the Secondary Stress of Hanar Steel Frames

LI Tian , LI Yue -hua , LIU Hai -tao , ZHAO Dong -jie

(1School of Civil Engineering , Zhengzhou University , Zhengzhou 450002, China)

Abstract : The secondary stresses of typical planar steel frames due to the rigidity of panel points are calculated by the finite element analysis program .For comparison three kinds of analytic models of typical planar steel frames are established : planar pin connected model , planar rigid connected model one and planar rigid connected model two .The level and distribution of the secondary stresses in the steel frames under common load is analysed and the major factor influencing the secondary stresses is also analysed .The influence of the secondary stresses on the steel frames calculation method is discussed .Some conclusions are drawn that the secondary stresses of steel frame are increased with the increase of linear stiffness that the influence of secondary stress is also increased with the increase of frame span and that the influence of secondary stress can not be neglected .Some references are provided for the design of the steel frames considering the secondary stresses .

Key words : steel frame ;rigidity of panel points ;secondary stress ;secondary internal force