

# 考虑节点柔度的空心圆钢管桁架的简化分析模型

王 皓<sup>1</sup>, 邵永波<sup>2</sup>

(1. 烟台大学土木工程学院, 山东 烟台 264005; 2. 西南石油大学机电工程学院, 成都 610500)

**摘 要:**焊接圆钢管桁架在节点部位存在明显的局部柔度现象,在进行有限元分析时要精确模拟这种节点局部柔度就需要采用 3D 实体或壳单元模拟整个管桁架结构,这导致有限元分析的计算量大、效率低,不利于在工程设计中采用。为了简化计算过程,通常使用常规梁单元模拟钢管构件,并将管节点部位模拟成刚接形式。这种简化方法虽然提高了计算效率,但是却无法模拟出节点局部柔度导致的变形。为了解决这个问题,在常规梁单元模型基础上,在节点部位引入一个虚拟梁单元(Fictitious Beam Element, FBE)模拟节点的局部变形。虚拟梁单元的刚度可通过以往对管节点柔度研究所提出的参数公式进行等效。为了验证这种简化模型的准确性,对由 T 型管节点和 Y 型管节点组成的管桁架进行参数分析,共计算了 12 个管桁架模型,对这些管桁架模型分别采用 3D 有限元模型、常规刚接梁单元模型以及所提出的虚拟梁单元模型进行分析。研究表明:常规刚接梁单元模型会过低估计管桁架的变形,而采用虚拟梁单元模型则可以高精度地计算出管桁架的变形。

**关键词:**管节点局部柔度;虚拟梁单元;管桁架;简化模型

**中图分类号:**TU391

**文献标志码:**A

## 引 言

焊接管结构通常被用在海洋石油平台导管架结构、大跨桥梁及高耸建筑中,在对焊接管结构进行结构分析时通常将其简化为平面或者三维刚架,此时节点是完全刚接的,然而因其节点处主管径向刚度小于支管轴向刚度,在受载情况下主管壁将发生局部变形,具有局部柔度,因此这种计算方法存在较大的误差。为了解决这个问题,通过在梁单元模型中引入虚拟梁单元(Fictitious Beam Element, FBE),提出了一种简化模型。

Fessler 等(1981)<sup>[1-2]</sup>发表了塑料模型试验研究的报告,并根据试验结果导出了 T 型和 Y 型管节点在轴力及面内弯矩作用下局部柔度的参数公式;Fessler 等(1986)<sup>[3-4]</sup>又在 27 个单支管模型和 6 个多支管模型试

验的基础上,改进了 T 型和 Y 型管节点局部柔度参数公式以及多支管管节点局部柔度矩阵中元素的参数公式;DNV 规范(1977)<sup>[5]</sup>给出了 T 型管节点在面内和面外弯矩作用下局部柔度的参数公式;Ueda(1990)<sup>[6]</sup>用有限元法对 11 个 T 型管节点进行了计算,并据此提出了 T 型和 Y 型管节点“局部刚度”的参数公式;胡毓仁等(1992)<sup>[7]</sup>建立了一种在海洋平台导管架有限元分析中代表管节点局部柔度的等效单元,可有效地反映管节点在轴力和弯矩作用下的局部变形性质,并导出了 T 型、Y 型以及 K 型管节点的局部柔度等效单元的刚度矩阵。

徐汉涛等(1995)<sup>[8]</sup>用半解析方法计算了 TY 型管节点的局部柔度,并用回归方法得出了计算 TY 型管节点局部柔度矩阵中各元素的参数公式。他们进行了一组 TY 型管节点 PVC 塑料模型的局部柔度模型试验,发

收稿日期:2016-03-21

作者简介:王 皓(1991-),男,山东滕州人,硕士生,主要从事钢结构方面的研究,(E-mail)13018252050@163.com;

邵永波(1973-),男,山东海阳人,教授,博士,四川省千人计划特聘专家,主要从事工程结构安全评估方面的研究,(E-mail)yb-shao@swpu.edu.cn

现参数公式是基本可靠的。Alanjari 等(2011)<sup>[9]</sup>在柔度方程和节点上轴力和面内弯矩相互作用的基础上提出了一种新的非线性二维管节点单元,并与实验数据和复杂的多轴有限元节点模型对比验证,发现所提出的非线性节点模型所产生的结果有一定的准确性。Gao 等(2014)<sup>[10]</sup>提出了计算在叠合支管面内弯曲情况下的完全叠合管节点的局部节点柔度的参数方程。

通过 Fessler 参数公式、Fessler 改进参数公式和 Ueda 参数公式所计算出的轴向柔度值和弯曲柔度值可以等效出简化模型中 FBE 的轴向刚度和抗弯刚度。其过程为:首先使用 ABAQUS 软件计算不同参数的 T 节点或 Y 节点管桁架模型的荷载作用下的精确位移数据,然后使用 FORTRAN 软件自编刚架程序计算对应参数管桁架模型的刚架模型和简化模型的荷载作用下位移数据,通过对所得的数据进行分析对比来评价简化单元计算的准确性。

## 1 管节点局部柔度的定义及计算规定

管节点在外荷载作用下主管壁将发生局部变形,从而具有局部柔性现象,称为管节点的局部柔度。管节点的局部柔度(Local Joint Flexibility, LJF)被定义为单位外荷载作用下的局部变形。对于单支管的 T 型和 Y 型节点,有

$$LJF_{AX} = \frac{\delta}{P}, LJF_B = \frac{\varphi}{M} \quad (1)$$

式中,下标 AX 和 B 分别表示轴力和弯矩作用的情况, $\delta$  为轴力  $P$  作用下主管管壁在与支管相交处沿垂直于主管轴线方向的局部线位移, $\varphi$  为在弯矩  $M$  作用下该处的局部转角。

## 2 简化模型

### 2.1 模型简化

将 3D 管节点中的管件简化为梁单元,梁单元表示的是管件的轴线位置,由于普通的梁单元模型节点为刚性,没有考虑节点柔度的影响,计算结果的误差比较大,故在此基础上提出简化模型,在梁单元模型中引入 FBE,支管连接在主管表面上,它到主管轴线的距离为  $D/2$ ,所以 FBE 的长度为  $D/2$ ,如图 1 所示。

### 2.2 FBE 的轴向刚度和抗弯刚度计算

FBE 的弹性模量  $E$  与主体结构取相同值,故求 FBE 的轴向刚度和抗侧刚度即为求 FBE 的截面积  $A$  和截面惯性矩  $I$ 。结合上文关于  $LJF$  的计算,利用结构力学知识易求出 FBE 的截面积  $A$  和截面惯性矩  $I$

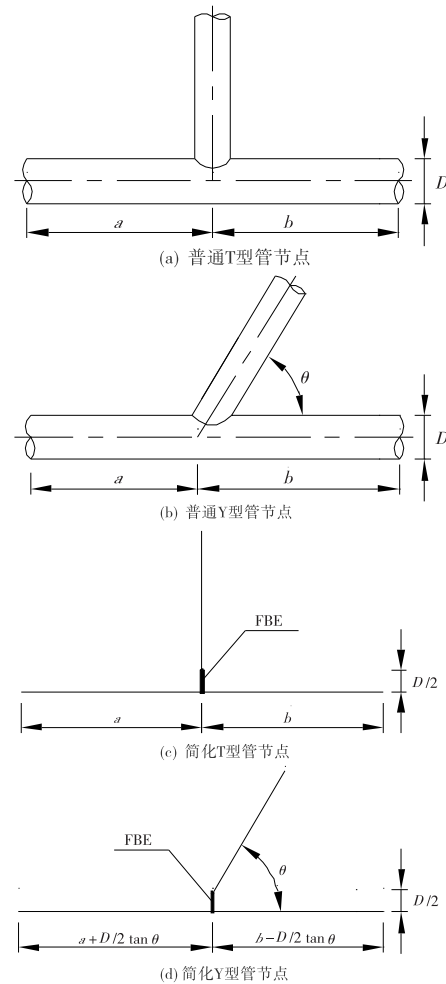


图 1 T/Y 管节点及简化模型

$$A = \frac{D \sin \theta}{2E \cdot LJF_{AX}}, I = \frac{D}{2E \cdot LJF_B} \quad (2)$$

### 2.3 LJF 参数计算公式

管节点局部柔度经过多年研究,国内外专家提出很多参数公式,其中应用较广泛的是 Fessler 和 Ueda 提出的 T/Y 管节点局部柔度参数公式。

#### 2.3.1 轴向柔度参数计算公式

Fessler 等(1981)提出的计算 T/Y 管节点轴向柔度的参数公式:

$$LJF_{AX}^{T,Y} = \frac{2.3\gamma^{2.3} e^{-3.3\theta} \sin \theta}{ED} \quad (3)$$

Fessler 等(1986)提出的计算 T/Y 管节点轴向柔度的改进参数公式:

$$LJF_{AX}^{T,Y} = \frac{1.95\gamma^{2.15} (1 - \beta^{1.3} \sin^{2.19} \theta)}{ED} \quad (4)$$

Ueda(1990)提出的计算 T/Y 管节点轴向柔度的参数公式:

$$LJF_{AX}^{T,Y} = \frac{0.313\gamma^{2.3} \beta^{-1.2} \sin^2 \theta}{ED} \quad (5)$$

式中,  $\gamma = D/2T, \beta = d/D, E$  为弹性模量,  $\theta$  为支管与主管轴线间的夹角,  $D$  为主管直径,  $d$  为支管直径,  $T$  为主管壁厚。

2.3.2 弯曲柔度参数计算公式

Fessler 等(1981)提出的计算 T/Y 管节点弯曲柔度的参数公式:

$$LJF_B^{T,Y} = \frac{171\gamma^{1.65} e^{-4.6\beta} \sin^{2.7}\theta}{ED^3} \quad (6)$$

Fessler 等(1986)提出的计算 T/Y 管节点弯曲柔度的改进参数公式:

$$LJF_B^{T,Y} = \frac{134\gamma^{1.73} e^{-4.52\beta} \sin^{1.22}\theta}{ED^3} \quad (7)$$

Ueda(1990)提出的计算 T/Y 管节点弯曲柔度的参数公式:

$$LJF_B^{T,Y} = \frac{4.22\gamma^{1.7}\beta^{-2.2}\sin\theta}{ED^3} \quad (8)$$

式中,  $\gamma = D/2T, \beta = d/D, E$  为弹性模量,  $\theta$  为支管与主管轴线间的夹角,  $D$  为主管直径,  $d$  为支管直径,  $T$  为主管壁厚。

3 模型计算分析

3.1 T 型节点管桁架

T 型节点管桁架各模型的具体参数及其对应的  $LJF$  值计算见表 1, 其中  $D$  为主管直径,  $d$  为支管直径,  $T$  为主管壁厚,  $t$  为支管壁厚。T-S 刚架模型的结构尺寸和荷载情况如图 2 所示, 其他模型的结构尺寸和荷载情况与模型 T-S 一致。弹性模量  $E = 206 \text{ kN/mm}^2$ , 通过各参数公式计算出的  $LJF$  值等效出的 FBE 的截面积  $A$  和

截面惯性矩  $I$  见表 2。模型 T-S 的简化模型结构尺寸如图 3 所示, 其他模型的简化模型结构尺寸与模型 T-S 一致。图 4 和图 5 分别为利用 ABAQUS 软件计算的模型 T-S 的 3D 模型图和变形图, 桁架端部的刚性端板在 ABAQUS 软件中通过耦合命令实现。

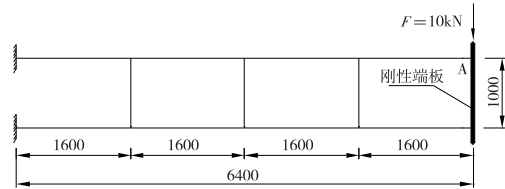


图 2 T-S 刚架模型示意图

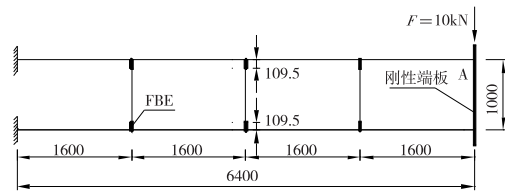


图 3 T-S 简化模型示意图(考虑节点柔度)



图 4 T-S 3D 模型图

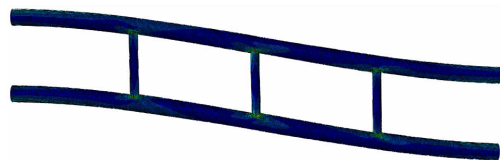


图 5 T-S 3D 模型变形图

表 1 T 型节点管桁架模型参数及其  $LJF$  计算

模型编号	变化参数	$D/\text{mm}$	$d/\text{mm}$	$T/\text{mm}$	$t/\text{mm}$	$\gamma$	$\beta$	Fessler		Fessler(改进)		Ueda	
								$LJF_{AX}$	$LJF_B$	$LJF_{AX}$	$LJF_B$	$LJF_{AX}$	$LJF_B$
T-S		219	119	6	6	18.25	0.543	6.754E-06	7.822E-10	8.033E-06	8.077E-10	1.148E-05	1.040E-09
T-A-1	$\gamma = D/2T$	219	119	10	6	10.95	0.543	2.086E-06	3.367E-10	2.678E-06	3.338E-10	3.546E-06	4.364E-10
T-A-2		219	119	14	6	7.82	0.543	9.621E-07	1.933E-10	1.299E-06	1.865E-10	1.636E-06	2.463E-10
T-B-1	$\beta = d/D$	219	90	6	6	18.25	0.411	1.046E-05	1.438E-09	1.118E-05	1.470E-09	1.605E-05	1.923E-09
T-B-2		219	150	6	6	18.25	0.685	4.233E-06	4.079E-10	4.959E-06	4.260E-10	8.697E-06	6.249E-10

表 2 T 型节点管桁架模型 FBE 的截面参数计算计算

模型编号	Fessler		Fessler(改进)		Ueda	
	FBE 段 $A/\text{mm}^2$	FBE 段 $I/\text{mm}^4$	FBE 段 $A/\text{mm}^2$	FBE 段 $I/\text{mm}^4$	FBE 段 $A/\text{mm}^2$	FBE 段 $I/\text{mm}^4$
T-S	78.70	679523.56	66.17	658136.35	46.29	511108.85
T-A-1	254.82	1578537.68	198.45	1592627.52	149.89	1218025.20
T-A-2	552.49	2750212.25	409.11	2850465.03	325.00	2158111.77
T-B-1	50.84	369540.18	47.52	361721.04	33.11	276467.19
T-B-2	125.56	1303141.87	107.20	1247915.06	61.12	850571.55

使用 ABAQUS 软件计算 T 型管节点桁架模型的 3D 模型的端部(如图 2 中的 A 点)竖向位移, 同时用 FOR-

TRAN 软件自编刚架程序计算对应参数下 T 型管节点桁架模型的刚架模型和简化模型的端部竖向位移, 以

ABAQUS 计算的 3D 模型的端部位移数据作为精确值来计算刚架模型和简化模型的误差,其中端部位移数据误差分析见表 3。从表 3 中可以看出,用常规的刚架模型计算出的端部位移数据会产生很大的误差,最高达到 40% 以上,而引入了 FBE 的简化模型可以比较准确地计算 T 型节点管桁架的变形,其中 Fessler 参数公式和 Fessler 改进

参数公式所等效出的 FBE 对应的简化模型具有更高的精确性,其对应的所有模型误差均在 4% 以内,同时随着  $\gamma$  的减小,刚架模型的误差会随之减小。分析可知,由于随着  $\gamma$  的减小,主管的相对壁厚随之增加,节点的柔度效应减弱,因此,未考虑节点柔度的刚架模型的误差随之减小,而且随着  $\beta$  的增大,刚架模型的误差会随之增大。

表 3 T 型节点管桁架模型端部位移数据误差分析计算

模型编号	3D 模型 /mm	刚架模型 /mm	误差	简化模型					
				Fessler/mm	误差	Fessler(改进)/mm	误差	Ueda/mm	误差
T-S	15.16	9.61	-36.62%	15.32	1.05%	15.46	1.98%	16.59	9.42%
T-A-1	9.11	7.42	-18.57%	9.00	-1.28%	8.98	-1.51%	9.63	5.70%
T-A-2	6.77	6.27	-7.36%	6.57	-2.93%	6.52	-3.70%	6.95	2.62%
T-B-1	18.75	14.01	-25.29%	18.55	-1.09%	18.62	-0.67%	19.56	4.29%
T-B-2	11.90	6.97	-41.38%	11.84	-0.48%	12.03	1.10%	13.80	15.98%

### 3.2 Y 型节点管桁架

Y 型节点管桁架各模型的具体参数及其对应的  $LJF$  值计算见表 4,其中  $D$  为主管直径, $d$  为支管直径, $T$  为主管壁厚, $t$  为支管壁厚, $\theta$  为支管与主管轴线间的夹角。Y-S 刚架模型的结构尺寸和荷载情况如图 6 所示,模型 Y-A-1、Y-A-2、Y-B-1、Y-B-2 的结构尺寸和荷载情况与模型 Y-S 一致,其中 Y-C-1 刚架模型的结构尺寸和荷载情况如图 7 所示,Y-C-2 刚架模型的结构尺寸和荷载情况如图 8 所示。弹性模量  $E = 206 \text{ kN/mm}^2$ ,通过各参数公式计算出的  $LJF$  值等效出的 FBE 的截面积  $A$  和截面惯性矩  $I$  见表 5。模型 Y-S 的简化模型结构尺寸如图 9 所示,模型 Y-A-1、Y-A-2、Y-B-1、Y-B-2 的简化模型结构尺寸与模型 Y-S 的简化模型一致,模型 Y-C-1 和 Y-C-2 的简化模型图可以参照图 9,在此不再赘述。图 10 和图 11 分别为利用 ABAQUS 软件计算的模型 Y-S 的 3D 模型图和变形图,桁架端部的刚性端板在 ABAQUS 软件中通过耦合命令实现。

使用 ABAQUS 软件计算 Y 型管节点桁架模型的 3D 模型的端部(如图 6~图 8 中的 A 点)竖向位移,同时用 FORTRAN 软件自编刚架程序计算对应参数 Y 型管节点桁架模型的刚架模型和简化模型的端部竖向位移,以 ABAQUS 计算的 3D 模型的端部位移数据作为精确值来计算刚架模型和简化模型的误差,其中端部位移数据误差分析见表 6。从表 6 中可以看出,用常规的刚架模型计算出的端部位移数据会产生很大的误差,最高达到 30% 以上,而引入了 FBE 的简化模型可以比较准确的计算 Y 型节点管桁架的变形,其中 Fessler 参数公式和 Fessler 改进参数公式所等效出的 FBE 对应的简化模型具有更高的精确性,其对应的所

有模型误差均在 4% 以内。同时随着  $\gamma$  的减小,刚架模型的误差会随之减小。这是由于随着  $\gamma$  的减小,主管的相对壁厚随之增加,节点的柔度效应减弱,因此未考虑节点柔度的刚架模型的误差随之减小,而且随着支管与主管轴线间的夹角  $\theta$  的增大,刚架模型的误差会随之增大。

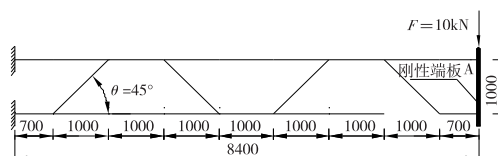


图 6 Y-S 刚架模型示意图

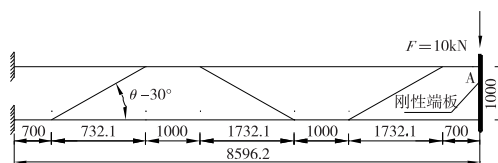


图 7 Y-C-1 刚架模型示意图

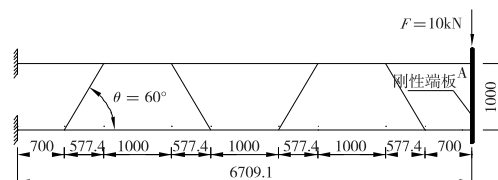


图 8 Y-C-2 刚架模型示意图

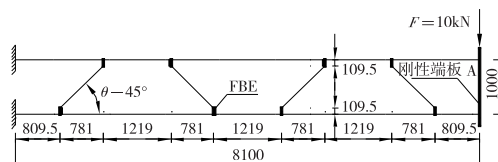


图 9 Y-S 简化模型示意图(考虑节点柔性)

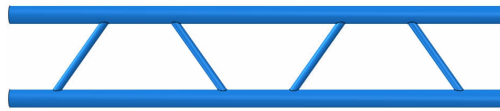


图 10 Y-S 3D 模型图



图 11 Y-S 3D 模型变形图

表 4 Y 型节点管桁架模型参数及其 LJJ 计算

模型编号	变化参数	D/mm	d/mm	T/mm	t/mm	$\gamma$	$\beta$	$\theta$	Fessler		Fessler(改进)		Ueda	
									LJJ <sub>AX</sub>	LJJ <sub>B</sub>	LJJ <sub>AX</sub>	LJJ <sub>B</sub>	LJJ <sub>AX</sub>	LJJ <sub>B</sub>
Y-S		219	119	6	6	18.25	0.543	45°	4.776E-06	3.760E-06	5.741E-06	3.069E-10	5.292E-10	7.354E-10
Y-A-1	$\gamma = D/2T$	219	119	10	6	10.95	0.543	45°	1.475E-06	1.254E-06	1.773E-06	1.321E-10	2.187E-10	3.086E-10
Y-A-2		219	119	14	6	7.82	0.543	45°	6.803E-07	6.083E-07	8.178E-07	7.582E-11	1.222E-10	1.742E-10
Y-B-1	$\beta = d/D$	219	90	6	6	18.25	0.411	45°	7.393E-06	5.236E-06	8.027E-06	5.643E-10	9.628E-10	1.360E-09
Y-B-2		219	150	6	6	18.25	0.685	45°	2.994E-06	2.321E-06	4.348E-06	1.600E-10	2.791E-10	4.419E-10
Y-C-1	$\theta$	219	119	6	6	18.25	0.543	30°	3.377E-06	1.760E-06	2.870E-06	1.204E-10	3.467E-10	5.200E-10
Y-C-2		219	119	6	6	18.25	0.543	60°	5.849E-06	5.862E-06	8.611E-06	5.305E-10	6.777E-10	9.007E-10

表 5 Y 型节点管桁架模型 FBE 的截面参数计算

模型编号	Fessler		Fessler(改进)		Ueda	
	FBE 段 A/mm <sup>2</sup>	FBE 段 I/mm <sup>4</sup>	FBE 段 A/mm <sup>2</sup>	FBE 段 I/mm <sup>4</sup>	FBE 段 A/mm <sup>2</sup>	FBE 段 I/mm <sup>4</sup>
Y-S	78.70	1732187.94	99.95	1004486.67	65.47	722817.06
Y-A-1	254.82	4023883.95	299.76	2430762.42	211.98	1722547.75
Y-A-2	552.49	7010624.50	617.94	4350548.51	459.62	3052030.93
Y-B-1	50.84	942002.73	71.78	552080.07	46.83	390983.65
Y-B-2	125.56	3321866.65	161.92	1904641.85	86.44	1202889.82
Y-C-1	78.70	4415557.10	150.98	1533107.03	92.59	1022217.69
Y-C-2	78.70	1002009.44	78.53	784383.61	53.46	590177.66

表 6 Y 型节点管桁架模型端部位移数据误差分析

模型编号	3D 模型/mm	刚架模型/mm	误差	简化模型					
				Fessler/mm	误差	Fessler(改进)/mm	误差	Ueda/mm	误差
Y-S	10.86	8.43	-22.33%	10.67	-1.72%	11.17	2.94%	12.14	11.84%
Y-A-1	6.52	5.77	-11.48%	6.39	-1.99%	6.64	1.83%	7.01	7.55%
Y-A-2	4.88	4.57	-6.34%	4.76	-2.48%	4.90	0.39%	5.10	4.51%
Y-B-1	12.57	9.47	-24.66%	12.51	-0.50%	12.66	0.75%	13.89	10.53%
Y-B-2	9.41	7.54	-19.85%	9.14	-2.88%	9.71	3.17%	10.82	14.96%
Y-C-1	9.77	8.51	-12.91%	9.53	-2.43%	9.98	2.18%	10.60	8.47%
Y-C-2	8.79	5.83	-33.68%	8.71	-0.90%	9.11	3.54%	10.10	14.86%

#### 4 结论

为了解决空心圆钢管桁架结构在刚架模型计算过程中忽略了节点柔度的问题,通过在刚架模型中引入虚拟梁单元(FBE)提出了一种简化模型,FBE 段的轴向刚度和抗弯刚度可通过 Fessler 参数公式、Fessler 改进参数公式和 Ueda 参数公式所计算出的轴向柔度值和弯曲柔度值等效得出。借助 ABAQUS 软件和 FORTRAN 软件验证了上述简化模型的准确性,得出以下结论:

(1) T/Y 型节点管桁架随着参数  $\gamma$  的减小,刚架模型的误差会随之减小,Y 型节点管桁架随着支管与主管轴线间的夹角  $\theta$  的增大,刚架模型的误差会随之增大。用常规的刚架模型计算 T/Y 型节点管桁架的变形会产生很大的误差,最高达到 40% 以上,过低地估计了管桁架变形。

(2) 引入了 FBE 的简化模型可以比较准确地计算 T/Y 型节点管桁架的变形,其中 Fessler 参数公式和 Fessler 改进参数公式所等效出的 FBE 对应的简化模型具有更高的精确度,其对应的所有模型误差均在 4% 以内,这种简化模型可以在实际工程设计中采用。

#### 参考文献:

- [1] FESSLER H, SPOONER H. Experimental determination of stiffness of tubular joints[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Integrity of Off-shore Structure.London: Appl Science Publishers,1981: 493-511.
- [2] UNDERWATER ENGINEERING GROUP(UEG).Design of tubular joints for offshore structure[S].
- [3] MOCKFORD P B,FESSLER H,WEBSTER J J.Par-

- metric equations for the flexibility matrices of single brace tubular joints in offshore structures[J].Proceedings of The Institution of Civil Engineers Part 2-Research and Theory,1986,81(4):659-673.
- [4] WEBSTER J J, FESSLER H, MOCKFORD P B. Parametric equations for the flexibility matrices of multi-brace tubular joint in offshore structure [J]. Ice Proceedings,1986,81(4):675-696.
- [5] DET NORSKE VERITAS. Rules for the design, construction and inspection of offshore structures[S].
- [6] UEDA Y, RASHED S M. H, NAKACHO K. An improved joint model and equations for flexibility of tubular joints[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering,1990,112(2):157-168.
- [7] 胡毓仁,陈伯真,马建平.海洋平台导管架结构中管节点局部柔度的等效单元[J].计算结构力学及其应用,1992,9(3):284-300.
- [8] 徐汉涛,潘皓,陈伯真,等.TY型管节点局部柔度的参数分析及试验研究[J].海洋工程,1995,13(3):9-18.
- [9] ALANJARI P, ASGARIAN B, KIA M. Nonlinear joint flexibility element for the modeling of jacket-type offshore platforms[J]. Applied Ocean Research,2011, 33(2):147-157.
- [10] GAO F, HU B, ZHU H P. Local joint flexibility of completely overlapped tubular joints under in-plane bending[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014,99:1-9.
- [11] 邱国志,赵金城.X型圆钢管相贯节点刚度试验[J].上海交通大学学报,2008,42(6):966-970.
- [12] QIU G Z, ZHAO J C. Analysis and calculation of axial stiffness of tubular X-joints under compression on braces[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: English Edition,2009,14(4):410-417.
- [13] QIU G Z, GONG J H, ZHAO J C. Parametric formula for axial stiffness of CHS X-joints subjected to Brace Axial Tension[J]. Journal of Zhejiang University-Science A: Applied Physics & Engineering,2011, 12(2):121-130.
- [14] JIA L J, CHEN Y Y. Evaluation of elastic in-plane flexural rigidity of unstiffened multiplanar CHS X-joints[J]. International Journal of Steel Structures, 2014,14(1):23-30.
- [15] GAO F, HU B. Local joint flexibility of completely overlapped tubular joints under out-of-plane bending[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015,115:121-130.
- [16] MIRTAHERI M, ZAKERI H A, ALANJARI P, et al. Effect of joint flexibility on overall behavior of jacket type offshore platform[J]. American Journal of Engineering and Applied Sciences,2009,2(1):25-30.

## A Simplified Model for Analyzing Hollow Tubular Truss by Considering Local Joint Flexibility

WANG Hao<sup>1</sup>, SHAO Yongbo<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Yantai University, Yantai 264005, China; 2. School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

**Abstract:** Local flexibility exists at the tubular joints in a welding tubular truss structure. Solid or shell elements are necessary to simulate accurately such local joint flexibility (LJF) in the tubular truss when finite element analysis is carried out. Using solid or shell elements to simulate a tubular truss causes a huge amount of calculation and the efficiency of the numerical method is very low, which is not feasible in engineering design. Conventional beam element is used commonly to simulate the tube members in a tubular truss to simplify the calculation process. The connection between the tube members is simulated to be a rigid joint. Although the computational efficiency is improved greatly by this simplified method, it is unable to simulate the deformation induced by local joint flexibility. To solve this problem, fictitious beam element (FBE) is introduced to simulate the local deformation at the joint based on conventional beam element. The equivalent stiffness of the FBE can be derived from the reported parametric equations for calculating the stiffness of the tubular joints. Twelve tubular truss models, which are consisted of T-joints or Y-joints respectively, are analyzed in a parametric study. 3D finite element model consisted of shell elements, conventional beam element model with rigid connection and the presented fictitious beam element model with LJF are all used to analyze the deformation of these tubular truss models. The results show that conventional beam element model with rigid connection underestimates the deformation, while the fictitious beam element model with LJF can produce accurate estimation for the deformation.

**Key words:** local joint flexibility; fictitious beam element; tubular truss; simplified model