

圆钢管相贯节点刚度的两种获取方法及其比较

赵必大¹, 赵滇生¹, 梁 佟²

(1. 浙江工业大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310014; 2. 温州新城建筑设计院, 浙江 温州 325000)

摘 要:圆钢管相贯节点是钢管结构中常见和广泛应用的节点形式,也是一种典型的半刚性连接节点. 首先介绍了关于圆钢管相贯节点刚度定义两种方法:直接法与间接法. 在此基础上,以最常见、形式最简单的Y型与X型圆钢管相贯节点为研究对象,详细阐述试验或者有限元分析中分别采用直接法、间接法获得节点的轴向与抗弯刚度的测点布置与方法及注意事项;利用已有试验数据并结合有限元分析对两种方法所得刚度值进行对比,结果表明两种方法所得结果非常接近,可根据获得测点数据的便利性而选用一种方法,如试验采用间接法、有限元采用直接法.

关键词:圆钢管相贯节点;节点刚度;直接法;间接法

中图分类号: TU317

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2013)01-0043-08

圆钢管截面构件具有回转半径大、建筑视觉效果美观等众多优点,被广泛应用于各种建筑结构. 圆钢管结构构件间的连接节点类型有:焊接或螺栓球节点、法兰节点、钢板节点、相贯节点等. 近些年多轴数控切割技术的日益成熟,再加上施工便利、视觉效果流畅美观、构造用钢量省等优点,使得相贯连接节点在圆钢管结构中越来越多地取代了其它形式的节点.

传统的结构分析与设计大多将杆件间的连接简化为理想刚接或理想铰接;现行有关钢管结构设计的规范亦如此,如将海工结构中的相贯节点(通常弦、腹杆截面几何尺寸相差较小而导致端部约束较大)近似为刚接节点,而将大跨度管桁架建筑结构中的相贯节点(通常杆件细长使得节点处次弯矩较小)近似为铰接节点. 为此,《钢结构设计规范》(GB50017-2003)^[1]第10.1.4条、《钢管结构技术规程》(CECS280:2010)^[2]第5.1.4条等都对管桁架结构都规定,如满足下面条件可将节点视为铰接:①符合各类节点相应的几何参数的适用范围,②在桁架平面内杆件的节间长度与截面高度(或直径)之比不小于12(弦杆、亦称主管)和24(腹杆、亦称支管);如果不满足上述要求,《钢管结构技术规程》^[2]建议按刚接节点模型计算桁架内力. 由此,规范将问题简化,其计算公式仅限于考虑节点强度问题、没有考虑刚度问题;因此在实际工程设计中,只能将节点视为完全铰接或完全刚接. 然而,不设置加劲件的构造特点使得钢管相贯节点在大多数情况下是一种典型的半刚性连接节点. 半刚性连接不仅改变被连接构件之间的内力分布,而且还可能影响整体结构的变形、屈曲承载力等. 此外,某些结构如空腹桁架、单层网壳结构体系,其相贯节点必须实现半刚性或刚性节点(铰接无法满足结构的几何不变条件);如仅仅为了能近似为刚性连接节点,而加设加劲件、增加管壁厚度或两者皆有,则不仅会造成材料浪费和施工不便,而且还可能会丧失部分原来半刚性连接所具有的相对良好的抗震性能. 工程设计人员进行半刚性连接结构体系分析和计算之前,需要知道节点连接的特性,其中最基本的参变量就是节点连接初始刚度.

迄今为止,已有学者对圆钢管相贯节点的初始刚度进行了一些研究^[3-4]. 这些研究针对具体问题,提出各自获取节点刚度的测试和计算方法;但在确定刚度方法方面缺乏深入的研究,如方法分类、不同方法的优缺点、注意事项、及相互间的比较等. 本文以工程实际中最常见、几何形式较简单的Y(常见用于桁架结构,T型可视为其特殊情况)、X(常见用于单层网壳结构)型圆钢管相贯节点为例,结合两类节点在工程结构中的受力特点,从试验和有限元分析两个方面来详细阐述圆钢管相贯节点轴向、平面外(内)

收稿日期:2012-09-29 修改稿日期:2013-01-08

基金项目:浙江省教育厅基金资助项目(Y201225770)

作者简介:赵必大(1976-),男,浙江瑞安人,博士,主要从事钢结构与组合结构方面的研究.

抗弯初始刚度获得方法及注意事项.

1 圆钢管相贯节点刚度的两种定义

连接节点的刚度是指引起节点区域单位局部变形所需要的力,初始连接刚度是指节点的广义力-广义局部变形曲线在变形为零时的斜率.然而,无论是通过试验还是有限元数值分析方法得到节点的广义力-广义局部变形曲线都是由一系列有限的散点(一个加载步获得一个数据点)构成的近似光滑曲线,采用切线法获得初始刚度不仅本身就存在误差(曲线是近似光滑曲线)、且计算工作量大.因此,通常取节点的力-变形曲线上的第一加载步的力与变形的比值、或取曲线中接近直线的前几步(如前3步)加载步的力与变形比值的平均值近似为节点初始刚度.

此外,刚度是根据局部变形计算得到的,因此局部变形的定义不同,将会导致刚度的不同;根据节点域局部变形的不同获取方法,可以将相贯节点的刚度定义分为两种:直接法和间接法.文献[3]将支管全部视为杆件、而将相贯线附近的主管管壁视为节点域,认为节点局部变形(或转角)完全由相贯线附近主管管壁的变形引起;这种定义比较直观,直接在相贯线附近主管管壁设立测点即可获得相关的变形,可称为直接法.文献[4]则认为,当主支管直径接近或者主管壁相对较厚时,在相贯线鞍点外侧区域的支管尖角部分(图1所示的阴影区)也有一定的变形,塑性程度发展较大时尤为明显,在结构的整体杆系模型分析中,将这部分变形归入节点变形比归入支管(杆系)变形更加合适;此时在支管端设置测点,测得总变形,再扣除支管作为杆件受力而产生的变形,即得节点变形,此法称为间接法.

2 Y型节点的轴向、平面内抗弯初始刚度

早期钢管相贯节点在建筑结构中多应用于受轴力为主、可以简化为铰接节点的桁架结构;故对相贯节点的研究更多集中在承载力方面.但对于有些桁架结构,如空腹桁架结构,无法简化成铰接节点;此外,对整体结构进行精确分析时需要将节点视为半刚性连接节点.桁架结构中的相贯节点主要承受轴力、平面内弯矩;因此,进行半刚性连接杆系结构分析时,通常考虑节点这两方面的半刚性.

2.1 节点轴向、平面内抗弯刚度的获取方法

通常采用节点试验、板壳或实体有限元分析获得Y型节点的轴向、平面内抗弯刚度.而无论是试验还是有限元为手段,按照前文的不同定义,均有间接、直接两种方法获得节点的刚度.

试验是获得节点刚度最基本、有效的手段,根据不同的刚度定义(直接法和间接法),试验时采取不同的位移计布置方式以获取节点局部变形、进而计算得刚度.采用间接法求节点轴向局部变形、平面内转角时,试验中位移计布置分别如图2a、2b所示.图2a中位移计D1、D2测试支管加载端沿着支管轴线方向的位移,D3、D4测试支座沿着支管轴线方向的位移;最后节点轴向局部变形 δ_N 按下式计算:

$$\delta_N = (\Delta_1 + \Delta_2)/2 - (\Delta_3 + \Delta_4)/2 - \Delta_{bN} - \Delta_{cM} \quad (1)$$

式中: $\Delta_1 \sim \Delta_4$ 为位移计D1~D4测得位移, Δ_{bN} 、 Δ_{cM} 分别为支管的轴向变形、主管作为梁弯曲时沿着支管轴向方向的挠度,两者都可以通过弹性杆系理论算的.图2b中位移计D1测试支管加载端位移,D2、D3测试支座位移,则平面内弯矩引起的节点转角 ϕ_i 计算如下:

$$\phi_i = [\Delta_1 - (\Delta_2 - \Delta_3)l/L - \Delta_g]/l \quad (2)$$

式中: $\Delta_1 \sim \Delta_3$ 为位移计D1~D3测得位移; Δ_g 为节点作为杆系结构受弯时支管加载端的位移.

采用直接法求节点轴向局部变形、平面内转角时,试验中位移计布置分别如图3a、3b所示.根据文献[3],节点的轴向局部变形定义为相贯线鞍点(图3a的3、4点)和冠点(图3a的1、2点)局部变形(扣除主管作为梁受弯的挠度)的平均值.试验时,在每个冠点附近焊接一根短钢筋棒,每根棒的两端各布置一个位移计,所得平均值即为冠点位移,如位移计D1~D4即测量冠点1、2沿着支管轴线方向的位移;在每个鞍点附近焊接一个螺帽,在螺帽上连接位移计D5、D6测量鞍点沿着支管轴向方向位移;在与支、

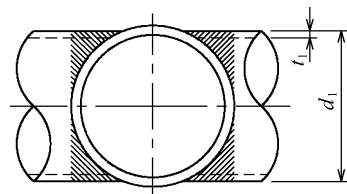


图1 鞍点外侧的节点区域
(支管尖角区域)

Fig.1 Joint zone outside
of saddle point

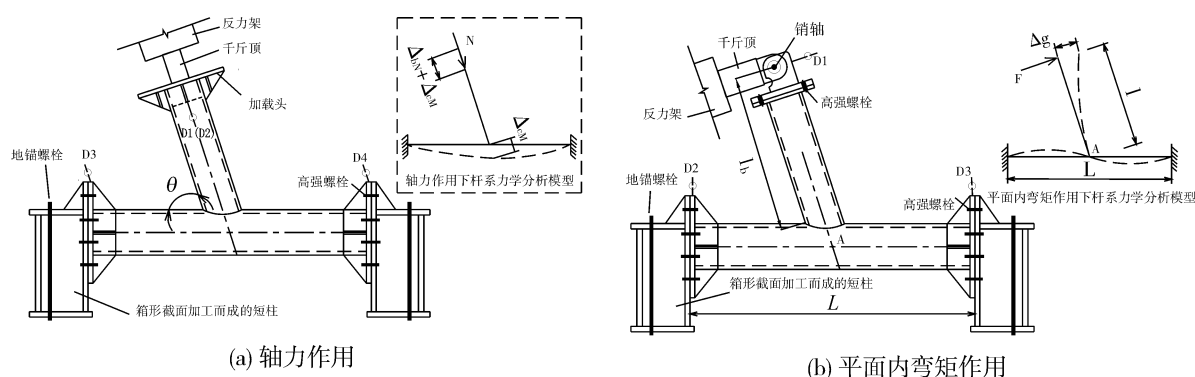


图 2 间接法求节点轴向、平面内抗弯刚度的位移计布置

Fig. 2 Location of displacement sensors for indirect method

主管轴线相交点 A 的同一水平位置的主管管壁两侧各焊接一个螺帽,在螺帽上连接位移计 D7、D8 测量弦杆(主管)作为梁受弯引起沿着支管轴向方向的位移, D7 与 D8 测得位移的平均值近似反映了弦杆的弯曲挠度;最后,位移计 D9、D10 测试支座沿着支管轴线方向的位移. 因此,节点轴向局部变形 δ_N 按下式计算:

$$\delta_N = [(\Delta_1 + \Delta_2)/2 + (\Delta_3 + \Delta_4)/2 + \Delta_5 + \Delta_6]/4 - (\Delta_7 + \Delta_8)/2 - (\Delta_9 + \Delta_{10})/2 \quad (3)$$

式中, $\Delta_1 \sim \Delta_{10}$ 为位移计 D1~D10 测得位移.

根据文献[3],节点的平面内转角定义为相贯线冠点(图 3b 的 1、2 点)局部变形(扣除主管作为梁受弯的挠度)差值与冠点间距的比值. 试验时,冠点处的位移计的布置位置及方法同测轴向局部变形;在冠点(图 3b 中的 1、2 点)对应弦杆轴线所在水平位置的管壁两侧位置 3(4)、5(6)各焊接一个螺帽,再在螺帽上连接相应的位移计 D5(D6)、D7(D8), D5~D8 测得位移近似反映弦杆弯曲的挠度;位移计 D9、D10 测试支座沿着支管轴线方向的位移. 由此,平面内弯矩引起的节点转角计算如下 ϕ_i :

$$\phi_i = \frac{\left(\frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2} - \frac{\Delta_5 + \Delta_6}{2}\right) - \left(\frac{\Delta_3 + \Delta_4}{2} - \frac{\Delta_7 + \Delta_8}{2}\right)}{d} - \frac{\Delta_9 - \Delta_{10}}{L} \quad (4)$$

式中, $\Delta_1 \sim \Delta_{10}$ 为位移计 D1~D10 测得位移, d 为支管直径.

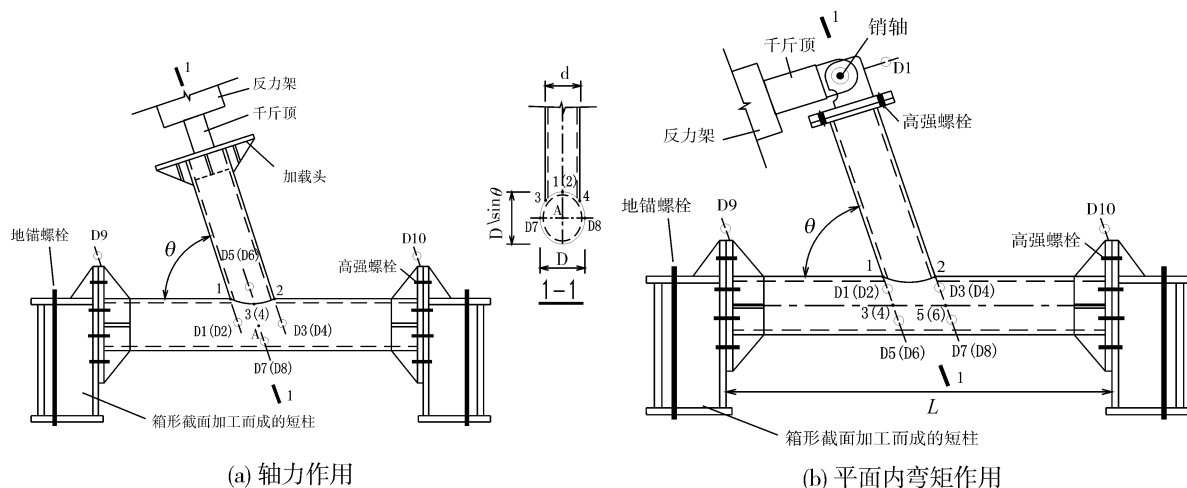


图 3 直接法求节点轴向、平面内抗弯刚度的位移计布置

Fig. 3 Location of displacement sensors for direct method

由于试验存在成本较高、支座条件难以达到理想边界条件等缺点;有限元已经成为研究节点刚度的最主要手段. 采用有限元为分析时,无论是直接法还是间接法,为了获得 Y 型相贯节点的刚度,有限元后处理需要输出有限元模型中某些节点的位移,而这些节点所在的位置同试验布置位移计的位置.

需要注意的是,当以试验为手段时,直接法的优点是可通过位移计直接测出节点域的局部变形、而

无需考虑支管是否弹塑性受力(加载后期经常出现),缺点是测点布置较多导致试验时有些测点布置比较困难(需考虑支管变形后可能碰触测点处的位移计),故试验多用间接法;但间接法也有缺陷:支管进入弹塑性受力后无法用简单的弹性杆系理论求出相应变形,需要通过对支管建立弹塑性板壳或实体有限元分析获得近似的变形;对于以节点初始刚度为主要研究对象时,最初几步加载下支管基本上处于弹性受力,完全可以采用间接法.当以有限元分析为手段时,无论直接法还是间接法,不存在试验为手段时的缺点.此外,求节点平面内抗弯刚度时,节点弯矩 M_i 采用加载端荷载 F 在支管根部节点相贯面上的冠点处产生的弯矩值.

2.2 直接法与间接法所得结果的比较

图4给Y型钢圆管相贯节点的轴向、平面内抗弯初始刚度分别按照直接法、间接法所得的误差,限于篇幅仅给出了2组.采用非线性有限元软件 ABAQUS^[5] 分析计算获得节点轴向、平面内抗弯初始刚度,有限元模型采用 S4R 壳单元(计算刚度时式(4)中的 d 改为 $d-t$, d 、 t 分别为支管直径、壁厚);图中 β 、 γ 、 θ 分别为支主管直径比、主管半径与壁厚比、支主管平面内夹角;图中Y型节点的其它几何参数为:主管直径 $D=245$ mm、支主管壁厚比 $\tau=0.8$,图中的误差为间接法与直接法所得值之差的绝对值除以直接法所得值.从图中可以看出,两种方法所得结果的差别在10%以内.

为了进一步对比,表1、表2分别给出文献[3]试验所得T型节点轴向、平面内抗弯刚度(采用直接法获得)与有限元所得结果的比较.表中轴向受力试件A1、A3、A4的支(主)管截面尺寸分别为 $\Phi 121 \times 6$ ($\Phi 245 \times 8$)、 $\Phi 121 \times 8$ ($\Phi 245 \times 12$)、 $\Phi 194 \times 6$ ($\Phi 245 \times 8$),平面内受弯试件B1、B3、B4截面尺寸分别同A1、A3、A4.表中下标N、 M_i 分别表示承受轴力、平面内弯矩;上标test、FEA1和FEA2分别表示试验、有限元直接法和间接法所得结果,误差1、误差2分别表示FEA1、FEA2所得值与test所得值之间的相对误差.需要注意的是文献[3]是反复加载试验,节点受拉与受压刚度值有所不同,由于试验先受拉,故均采用受拉初始刚度(有限元为单调受拉加载)进行对比.从表中对比可知,直接法和间接法所得刚度值很接近,两种方法所得有限元结果与直接法所得试验结果均较接近.

表1 节点轴向刚度试验结果与有限元的比较

Tab.1 Axial rigidity comparison between test and FEA

试件	K_{Ntest} /kN · mm ⁻¹	K_{NFEA1} /kN · mm ⁻¹	K_{NFEA2} /kN · mm ⁻¹	误差1 /%	误差2 /%
A1	109.3	102.6	99.6	6.1	8.7
A3	226.3	207.8	198.8	8.3	11.9
A4	258.6	246.7	235.7	4.7	8.8

表2 节点平面内抗弯刚度试验结果与有限元的比较

Tab.2 In-plane moment flexural rigidity comparison between test and FEA

试件	K_{Mitest} /kN · m ⁻¹	K_{MiFEA1} kN · m ⁻¹	K_{MiFEA2} kN · m ⁻¹	误差1 /%	误差2 /%
B1	1 602.6	1 565.7	1 579.3	2.5	1.3
B3	3 398.9	3 568.9	3 257.2	5.0	4.2
B4	4 835.1	4 619.3	4 391.6	4.5	9.2

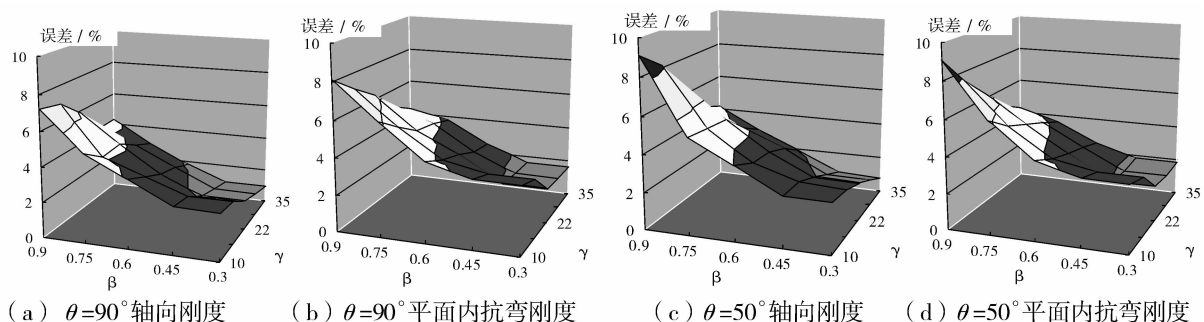


图4 直接法与间接法所得Y型节点轴向、平面内抗弯初始刚度的相对误差

Fig.4 Relative error between initial axial stiffness, in-plane flexural rigidity for CHS Y-joints

3 X型节点的轴向、平面外抗弯、平面内抗弯初始刚度

X型钢圆管相贯节点是大跨度单层网壳空间结构中最简单、常用的一种节点型式.此类节点主要受

到轴力、平面外弯矩作用,也受到一定的平面内弯矩作用;因此,进行半刚性连接杆系结构分析时,通常考虑节点这三方面的半刚性。

3.1 节点轴向、抗弯刚度的获取方法

类同 Y 型节点, X 型节点亦有间接、直接两种方法获得节点的广义局部变形,进而计算得到刚度. X 型节点的特点是两侧各一根支管,整体杆系结构分析中考虑节点半刚性效应时,将主管假定为连通杆件,将主管范围的节点区假定为一根刚性杆,两侧各通过一个能反映节点半刚性的弹簧或连接单元(如 ABAQUS 中 connector 单元^[5]),如图 5 所示. 由于 2 根支管,故当两侧支管的受力方向不同(图 6 所示的同向受力与反向受力)、受力大小不同、截面几何参数与材性不同时,都有可能导致节点刚度不同;为了简化问题,本文仅研究工程实际中最常见的情况——即两侧支管受力相同、且截面几何参数与材性相同。

采用间接法求节点轴向局部变形、平面内转角、平面外转角时,试验中位移计布置分别如图 7a、7b、7c 所示,两支管端部千斤顶进行同步加载. 图 7a 中位移计 D1~D4 测试支管加载端沿着支管轴线方向的位移,节点轴向局部变形 δ_N 按下式计算:

$$\delta_N = (\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4)/4 - \Delta_{bN} \quad (5)$$

式中, $\Delta_1 \sim \Delta_4$ 为位移计 D1~D4 测得位移,两侧支管位移计取平均值可以抵消加载不平衡(两侧千斤顶可能不完全同步加载、或加载过程中一侧先破坏)导致的主管作为杆件弯曲变形引起的位移, Δ_{bN} 为支管的轴向变形,通过弹性杆系理论算的. 图 7b 中位移计 D1、D2 分别测试两支管加载端位移, D3~D6 用来测求节点在出现加载不平衡所产生支管加载端的刚体位移 Δ_g (由不平衡力在节点中心产生力偶引起,图 7b 所示);支管加载端位移由三部分组成: Δ_g 、支管作为杆件弯曲变形引起的位移 Δ_{bMi} (通过弹性杆系理论算出)、节点平面内转角 ϕ_i 引起的位移 $\Delta_{joint-i}$. 因此,平面内弯矩引起的节点转角 ϕ_i 计算如下(以支管 1 为例、支管 2 类同):

$$\phi_i = (\Delta_1 - \Delta_g - \Delta_{bMi})/l_b \quad (6a)$$

$$\Delta_g = l[(\Delta_3 - \Delta_5) + (\Delta_4 - \Delta_6)]/(2l_1) \quad (6b)$$

式中, Δ_1 、 $\Delta_3 \sim \Delta_6$ 分别为位移计 D1、D3~D6 测得

位移, l 、 l_b 分别为支管自主支管轴向相交点、冠点伸出的长度. 图 7c 中位移计 D1、D2 测试两支管加载端平面外位移, D3、D4 测试在平面外荷载作用下节点区中心的位移, D5~D8 测试节点在出现加载不平衡时(两侧千斤顶可能不完全同步加载、或加载过程中一侧先破坏)绕主管的转动, D9、D10 用来测试支座处可能的位移(文献[4]采用图 7c 装置进行试验,结果表明支座位移非常小可以忽略);支管加载端平面外位移由四部分组成:主支管轴线相交中心的变形引起的刚体平移 Δ_c 、主管的扭转引起的支管端部刚体位移 Δ_{ROT} 、支管作为杆件弯曲变形引起的位移 Δ_{bMo} (通过弹性杆系理论算出)、节点平面外转角 ϕ_o 引起的位移 $\Delta_{joint-o}$, 后两者构成了支管端相对于主管的平面外位移. 因此,平面外弯矩引起的节点转角 ϕ_o 计算如下(以支管 1 为例、支管 2 类同):

$$\phi_o = (\Delta_1 - \Delta_c - \Delta_{ROT} - \Delta_{bMo})/l_b \quad (7a)$$

$$\Delta_c = (\Delta_3 + \Delta_4)/2 \quad (7b)$$

$$\Delta_{ROT} = L(\Delta_5 - \Delta_7 + \Delta_6 - \Delta_8)/2/(\delta/\sin\theta + 2\delta) \quad (7c)$$

式中, Δ_1 、 $\Delta_3 \sim \Delta_8$ 分别为位移计 D1、D3~D8 测得位移, δ 为位移计 D5~D8 的布置离开主管表面的距离(沿支管轴向方向), l_b 为支管自冠点伸出的长度(即图 7c 中的 $l_1 + l_2 + l_3$).

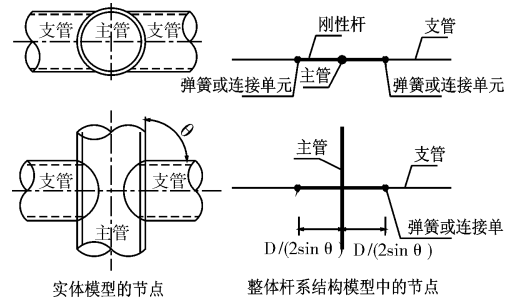


图 5 整体结构分析中的节点模型

Fig. 5 The joint model in integral structure analysis

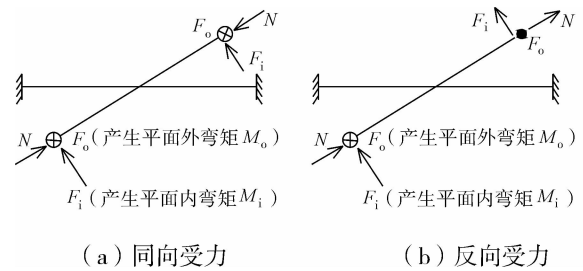


图 6 X 型节点同向、反向受力示意图

Fig. 6 Different loading condition for X-joint

对比 Y 型节点, X 具有两根支管, 如果采用直接法, 位移计布置将更多, 在试验中难以实现(支管变形后可能碰到测点处的位移计), 故试验大多采用间接法. 对于有限元分析, 则不存在这些问题, 鉴于直接法可通过测点直接测出节点域的局部变形、而无需考虑支管是否弹塑性受力, 故有限元分析中多采用直接法; 此外, 有限元分析完全可以实现两侧支管同步加载和支座达到理想约束, 故就不存在试验中因力不平衡、支座移动而产生的刚体位移. 采用直接法求 X 型节点轴向局部变形、平面内转角、平面外转角时, 测点布置分别如图 8a、8b、8c 所示. 有限元分析(壳单元 S4R)时, 采用直接法所得节点轴向变形 δ_N 、平面内转角 ϕ_i 、平面外转角 ϕ_o 分别计算如下:

$$\delta_N = (\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4)/4 \quad (8)$$

$$\phi_i = (\Delta_1 - \Delta_2)/(d - t) \quad (9)$$

$$\phi_o = (\Delta_3 - \Delta_4)/(d - t) \quad (10)$$

式中, $\Delta_1 \sim \Delta_4$ 为测点 1~4 测得沿支管轴向方向的位移, d 、 t 分别为支管直径、壁厚.

3.2 直接法与间接法的比较

经过一系列对比, 发现直接法和间接法计算所得初始刚度差距很小; 限于篇幅, 图 8 仅给出其中一组 X 型圆钢管相贯节点的轴向、平面内抗弯、平面外抗弯初始刚度(求刚度时节点弯矩取支管根部节点相贯面上的冠点处的弯矩值)分别按照直接法、间接法所得差距. 有限元软件及单元同 2.2 节, 图中 β 、 γ 意义同前, 图中 X 型节点的其它几何参数为: 主管直径 $D=245$ mm、支主管平面内夹角 $\theta=65^\circ$ 、支管平面外抬起角 $\psi=0^\circ$ 、支主管壁厚比 $\tau=0.8$, 图中的误差为间接法与直接法所得值之差的绝对值除以直接法所得值. 从图中可以看出, 两种方法所得初始刚度值差距在 10% 以内; 而其他的对比数据也表明, 两种方法所得值得误差大多都在 10% 以内. 值得注意的是, 图中节点轴向刚度为轴压力作用下的刚度, 文献[6]对 X 型节点分别在轴拉力、轴压力作用下的节点刚度进行了对比, 结果发现前者仅略大于后者, 因此, 工程实际中完全可以用轴压刚度来表示节点的轴向刚度.

为了进一步对比, 表 3 给出文献[7]试验所得 X 型节点轴向刚度与有限元结果的比较, 表 4 给出文献[3](试件 SXN3)及文献[7](试件 XM18)试验所得节点平面内抗弯刚度与有限元结果的比较, 表 5 给出文献[4](试件 XBH1、XBH2、XBH3)及文献[8](试件 B1-1、B2-1、B3-1)试验所得节点平面外抗弯刚度与有限元结果的比较. 表 3~5 中试件的截面几何参数见表 6, 表中 D 为主管直径、 φ 为支主管平面外夹角, 其余参数意义同前. 表中下标 N、 M_i 、 M_o 分别表示承受轴力、平面内弯矩、平面外弯矩; 上标 test、FEA1、FEA2 分别表示试验、有限元直接法、有限元间接法所得结果, 误差 1、误差 2 分别表示 FEA1、FEA2 所得值与 test 所得值之间的相对误差. 需要注意: 文献[4]是反复加载试验, 试验取正负向弯矩所得刚度值的平均值, 文献[8]原文是将主支管轴线交点处弯矩定义为节点弯矩进而得出节点刚度, 表 5

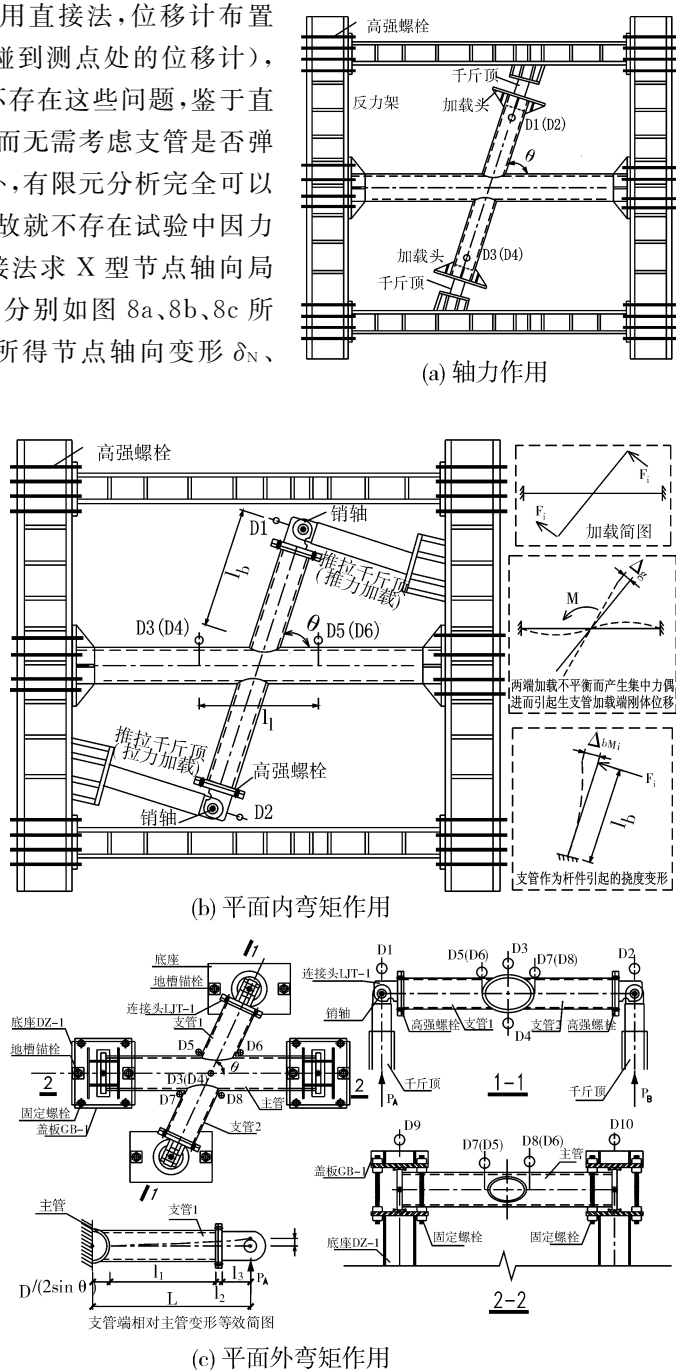


图 7 间接法求 X 型节点轴向、抗弯刚度的位移计布置

Fig. 7 Location of displacement sensors for indirect method

中有关文献[8]的节点刚度值是将节点弯矩修正为支管根部相贯面上的冠点处的弯矩值(与本文节点弯矩定义相对应)后计算所得.表中对比进一步表明直接法和间接法所得刚度值很接近,且两种方法所得有限元结果与试验结果均较接近.

表 3 节点轴向刚度试验结果与有限元的比较

Tab. 3 Axial rigidity comparison between test and FEA

试件	K_{Ntest} /kN·m ⁻¹	K_{NFEA1} /kN·m ⁻¹	K_{NFEA2} /kN·m ⁻¹	误差 1 /%	误差 2 /%
XC67	16.2	16.6	15.9	2.5	2.0
XC74	152.0	166.3	160.9	9.2	5.9
XC77	774.7	857.2	835.7	10	8.0

表 5 节点平面外抗弯刚度试验结果与有限元的比较

Tab. 5 Out-of-plane moment flexural rigidity comparison between test and FEA

试件	$K_{M otest}$ /kN·m ⁻¹	$K_{M oFEA1}$ /kN·m ⁻¹	$K_{M oFEA2}$ /kN·m ⁻¹	误差 1 /%	误差 2 /%
B1-1	78 190	76 015	75 781	2.8	3.1
B2-1	89 235	95 990	92 013	7.6	3.2
B3-1	22 969	21 501	20 552	6.4	10.5
XBH1	50 996	55 074	53 845	8	5.6
XBH2	16 323	15 280	14 891	6.4	9
XBH3	58 303	62 384	61 181	7.0	5

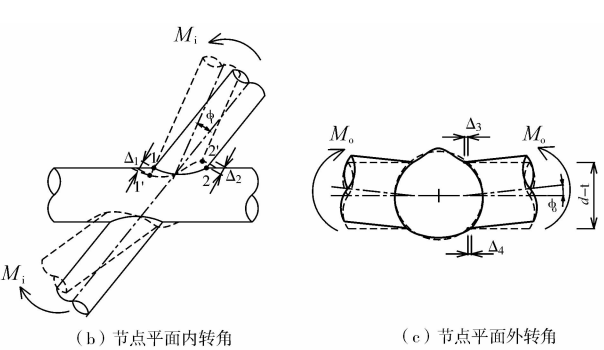


图 8 直接法求 X 型节点轴向、抗弯刚度的测点布置

Fig. 8 Location of measure points by direct method

表 4 节点平面内抗弯刚度试验结果与有限元的比较

Tab. 4 In-plane moment flexural rigidity comparison between test and FEA

试件	K_{Mitest} /kN·m ⁻¹	K_{MiFEA1} /kN·m ⁻¹	K_{MiFEA2} /kN·m ⁻¹	误差 1 /%	误差 2 /%
XM18	7 519	6 997	6 887	7	9.2
SXN3	5 288	4 952	4 699	6.4	11

表 6 试件的几何特征

Tab. 6 Size of specimens

试件 编号	D /mm	β (d/D)	γ ($D/2T$)	τ (t/T)	θ	φ
XC67	318.5	0.52	36.1	1	90°	0°
XC74	140	0.36	7.78	1	90°	0°
XC77	165	1.0	19.3	1	90°	0°
XM18	408	0.6	20.4	1	90°	0°
SXN3	168	0.76	7	0.67	90°	0°
B1-1	273	0.90	8.53	0.75	89°	6.5°
B2-1	273	0.90	8.53	0.75	78°	0°
B3-1	351	0.70	10.97	0.75	86°	12°
XBH-1	273	0.90	8.53	0.75	90°	0°
XBH-2	273	0.71	8.53	0.75	90°	0°
XBH-3	273	0.90	8.53	0.44	90°	0°

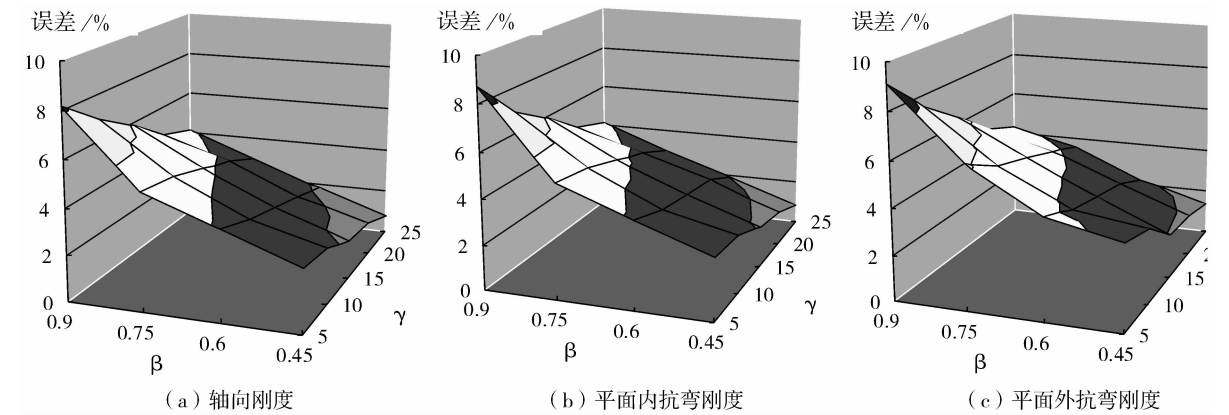


图 9 直接法与间接法所得 X 型节点轴向、平面外(内)抗弯初始刚度的相对误差

Fig. 9 Relative error between initial axial stiffness, out-of-plane (in-plane) flexural rigidity for CHS X-joints

4 结 论

(1)根据获取节点局部变形的不同方法,圆钢管相贯节点刚度定义的方法可分为直接法、间接法两种,

阐述两者的不同、各自优缺点。(2)详细阐述用直接法、间接法获取 Y 型节点轴向、平面内抗弯初始刚度的测点布置与方法;通过有限元分析计算及已有试验数据的比较,表明这两种方法所得结果很接近,可以根据实际操作的便利采取任何一种方法。(3)详细阐述用直接法、间接法获取 X 型节点轴向、平面内抗弯、平面外初始刚度的测点布置与方法;通过有限元分析计算及已有试验数据的比较,表明这两种方法所得结果很接近,可以根据实际操作的便利采取任何一种方法,如试验采用间接法、而有限元分析采用直接法。

参考文献 References

- [1] 中华人民共和国国家标准. GB50017-2003 钢结构设计规范及条文说明[S]. 北京:中国计划出版社,2003.
(GB50017-2003)The people's Republic of China National Standard, Code for design of steel structure[S]. Beijing: China Planning Press, 2003.
- [2] 中国工程建设协会标准. CECS280:2010 钢管结构技术规程[S]. 北京:中国计划出版社,2011.
(CECS280:2010)China Association for Engineering Construction Standardization, Technical specification for structure with steel hollow sections[S]. Beijing: China Planning Press, 2011.
- [3] 王 伟. 圆钢管相贯节点非刚性性能及对结构整体行为的影响效应[D]. 上海:同济大学建筑工程系,2005.
WANG Wei. Non-rigid Behavior of Unstiffened Circular Tubular Joints and their Effects on Global Performance of Steel Tubular Structures [D]. Shanghai: Tongji University, 2005.
- [4] 孟宪德. X 型圆钢管相贯节点平面外受弯滞回性能研究[D]. 上海:同济大学建筑工程系,2010.
MENG Xian-de. Research on Hysteretic Behaviour of Unstiffened CHS-X-joints Under Out-of-plane Bending [D]. Shanghai: Tongji University, 2010.
- [5] ABAQUS Documentation. ABAQUS Analysis User's Manual[OL].
- [6] 贾良玖. 单层网壳节点分类标准[D]. 上海:同济大学建筑工程系,2010.
JIA Liang-jiu. Connection Classification System for Single-layered Reticulated Shells[D]. Shanghai: Tongji University, 2010.
- [7] Makino Y, Kurobane Y, Ochi K, et al. Database of Test and Numerical Analysis Results for Unstiffened Tubular Joints, II W Doc. XV-E-96-220, Hungary, 1996.
- [8] 杜纯领. X 型圆钢管相贯节点平面外抗弯性能研究[D]. 上海:同济大学,2007.
DU Chun-ling. Study on out-of-Plane Bending Properties of Unstiffened X-type Tubular Joint [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.

Two methods to acquire stiffness of unstiffened CHS-joints and the comparison between different methods

ZHAO Bi-da¹, ZHAO Dian-sheng¹, LIANG Tong²

(1. College of Building Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

2. Wenzhou Xincheng Architecture Design Institute, Wenzhou 325000, China)

Abstract: Unstiffened CHS-joints is one of the common and widely used configurations for the connection of steel tubular structural members, and the joint also is a typical semi-rigid connection. The two different methods (namely direct method and indirect method) for the stiffness definition of unstiffened CHS-joints are introduced in this paper. Then, it takes two simple and common configuration of unstiffened CHS-joints (namely Y-joint, X-joint) as the object of study. The location of measure points (or displacement sensors), concrete step and matters need attention from the two methods with the tool of FEA (or test) in order to obtain axial stiffness and flexural rigidity of the two type CHS-joints elaborated in the paper. By means of test data and FEA, it show that there is little difference between the result from direct method and indirect method for the axial stiffness and flexural rigidity of the joints. Hence, one of the methods is selected according to the convenience of measured data obtained, for instance, indirect method and direct method are selected by experiment and FEA individually.

Key words: unstiffened CHS-joints; joint stiffness; direct method; indirect method