

本文为WORD版转换，仅作参考，不做商业用途，请查看原版文章

X形圆钢管相贯节点平面外受弯滞回模型研究

孟宪德²，陈以一^{1,2}，王伟^{1,2}

(1. 土木工程防灾国家重点实验室，上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院，上海 200092.)

摘要：本文采用数值分析方法对 X 形圆钢管相贯节点的平面外受弯滞回模型进行研究。针对影响节点性能的主要几何参数，建立 206 个已校验的有限元模型进行参数分析，通过多元回归技术得出基于 Menegotto-Pinto 方程的节点平面外弯矩-转角曲线方程，以及平面外受弯滞回模型，经比较，与数值分析结果吻合较好。通过一个单层网壳结构算例，验证了滞回模型的准确性和有效性。

关键词：圆钢管相贯节点；滞回模型；平面外受弯；数值分析。

中图分类号：*** ** 文献标识码：A

文章编号：*****

Research on Hysteretic Model of Unstiffened CHS X-joints under Out-of-plane Bending

Meng Xiande², Chen Yiyi^{1,2}, Wang Wei^{1,2}

第45卷第8期
2012年8月

土木工程学报
CHINA CIVIL ENGINEERING JOURNAL

Vol. 45 No. 8
Aug. 2012

Abstract: Hysteretic model of unstiffened tubular X-joints under out-of-plane bending is researched by the numerical analysis method in the paper. Finite element analyses are conducted on 206 X-joints of various parameters influencing non-rigid behavior of tubular joints. Based on the result of the parametric study, the parametric equation of $M-\phi$ relationship of tubular X-joint is established for predicting nonlinear behavior of connections in the global analysis of tubular lattice grid. Based on the equation of $M-\phi$ relationship and the finite element analysis result, the hysteretic relationship is established. Finally an numerical example of one reticulated shell validate the accuracy and validity of the proposed hysteretic model.

Keywords: unstiffened CHS joint; hysteretic model; out-of-plane bending; numerical analysis.

E-mail: mxd13816871099@126.com

引言

X形圆钢管相贯节点（简称 X 形节点）是钢管结构中的基本节点型式之一。在曲率半径很大的空间结构、接近交叉梁系的类平板网格结构中，杆件承受很大的弯矩作用，在地震作用下平面外往复弯矩作用可能在节点破坏和耗能过程中起到关键作用。本文主要研究这类结构中的 X 形节点。

对框架结构中的柱梁节点，工程研究在积累了大量试验数据的基础上，已提出了适合不同型式节点的滞回模型。但对直接焊接圆钢管节点，则还少有关于滞回性能的系统研究^[1, 2]。国内外为数不多的试验研

究，主要集中在钢管承受轴力的桁架或单层网壳结构的节点方面^[3-8]，至于滞回模型成果，还未见诸于研究文献，而这恰恰是抗震研究所需解决的基础问题之一。

本文采用数值分析方法对影响 X 形节点承载力和非线性变形的主要几何参数进行研究，采用经过校验的有限元模型^[2]进行了 206 个节点的分析，通过多元回归技术得到 X 形节点平面外受弯的弯矩-转角曲线方程。基于钢结构的滞回特性，给出 X 形节点平面外受弯的滞回关系。

本文给出的 X 形节点平面外受弯的弯矩 M -转角 ϕ 曲线方程是全过程非线性模型，也可应用于钢管结构的整体静力非线性分析。弯矩-转角曲线方程和滞回模型主要考察几何参数的影响。

1 弯矩-转角曲线方程

基金项目：科技部国家重点实验室基金（SLDRCE08-A-04），国家自然科学基金项目（50578117）

作者简介：孟宪德，博士，工程师。

收稿日期：2011-05-01

请阅读正版刊物，勿用于商业用途

X 形节点采用以下几何参数进行描述：主管外径 d ，支主管径比 $\beta = d_1 / d$ ，主管径厚比 $\gamma = d / (2t)$ ，支主管壁厚比 $\tau = t_1 / t$ ，以及支主管在平面内（支管轴线与主管轴线形成的平面）的夹角 θ_1 ，支主管平面夹角的一半 ψ （曲面投影平面），如图 1 所示（基于研究对象是曲率半径很大的曲线结构的节点，图中将杆件轴线曲面的投影面作为“平面”来表示）。

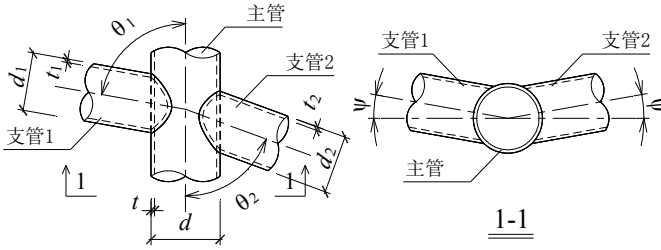


图 1 X 形圆钢管相贯节点

Fig. 1 Unstiffened CHS X-joints

根据相贯节点受弯的变形形态和变形机理^[2]，本文采用图 2 所示的节点模型：将主管范围内沿支管连线方向的节点区的变形特征集中赋给一个转动弹簧，通过此弹簧与外围的支管相连；该范围的主管节点区则简化为刚性域。

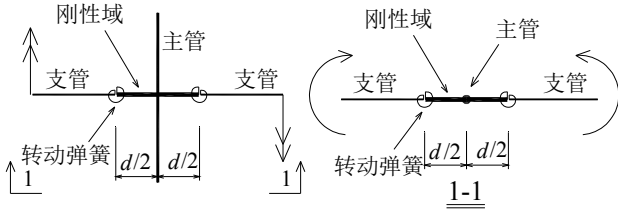


图 2 节点模型

Fig. 2 The joint model

采用 Menegotto-Pinto 四参数经典方程^[9]来描述节点的平面外弯矩 M -转角 ϕ 关系：

$$\frac{M}{M_0} = b \frac{\phi}{\phi_0} + c = b \frac{\phi}{\phi_0} + \frac{(1-b) \frac{\phi}{\phi_0}}{[1 + (\frac{\phi}{\phi_0})^n]^{1/n}} \quad (1)$$

其中， M_0 、 ϕ_0 为进行曲线无量纲化而设定的参照弯矩和参照转角，分别为初始切线刚度直线和极限切线刚度直线交点的纵横坐标， b 为极限切线刚度与初始刚度的比值， c 的定义如图 3 所示，为 M - ϕ 曲线任一点纵坐标减去过原点的极限切线刚度直线对应点的纵坐标之差值。

根据工程中常用的 β 、 γ 、 τ 、 θ 、 ψ 取值范围，建

立 206 个节点模型进行平面外受弯的参数分析，各参数取值基本均匀分布，得到 Menegotto-Pinto 方程四个参数的拟合公式如下：

$$M_0 = e^{-4.06+3.3\beta-0.819\ln\gamma-0.163(\ln\gamma)^2} \frac{(\cos\psi)^{12\beta^6}}{(\sin\theta)^{1.6}} d^3 f_y \quad (2a)$$

$$\phi_0 = (-0.272+1.36\beta+1.7\gamma+0.366\beta^2-0.0034\gamma^2-1.7\beta\gamma)$$

$$\cdot \tau^{-0.13} \frac{(\sin\theta)^{(0.8-\beta)^{0.2}}}{(\cos\psi)^{22\beta^3}} \frac{f_y}{E} \quad (2b)$$

$$b = 0.02 + 0.023\beta - 0.036\beta^2 \quad (2c)$$

$$n = 1.8 \quad (2d)$$

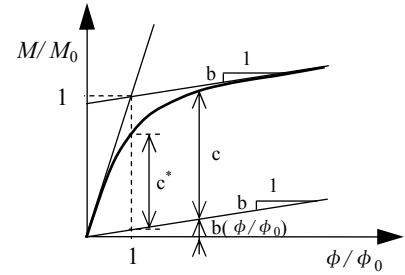


图 3 Menegotto-Pinto 方程

Fig. 3 Menegotto-Pinto equation

其中 f_y 和 E 分别为钢材的屈服强度和弹性模量。上述 X 形节点的平面外弯矩-转角曲线方程的适用范围为： $0.5 \leq \beta \leq 0.9$ ， $5 \leq \gamma \leq 25$ ， $0.4 \leq \tau \leq 1$ ， $60^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ， $0^\circ \leq \psi \leq 10^\circ$ ，已能够覆盖这类节点的常用几何参数。式(2)给出的基于 Menegotto-Pinto 方程的节点模型与 X 形节点平面外受弯的弯矩-转角有限元曲线拟合较好，部分参数的拟合结果如图 4 所示，

2 滞回关系

节点的滞回试验和有限元分析结果^[1]表明：(a) X 形节点平面外 M - ϕ 曲线的卸载刚度可视为与初始加载的弹性刚度相同；(b) 第 m 次加载和第 $m+2$ 次加载（ $m+1$ 次为反向加载）时的曲线渐近线相同，即与骨架曲线的渐近线相同；(c) 随着转角的加大和滞回环数的增多，曲线愈来愈扁。根据以上特点，采用如下的滞回模型来描述节点的滞回关系。

第 m 次(正向)：

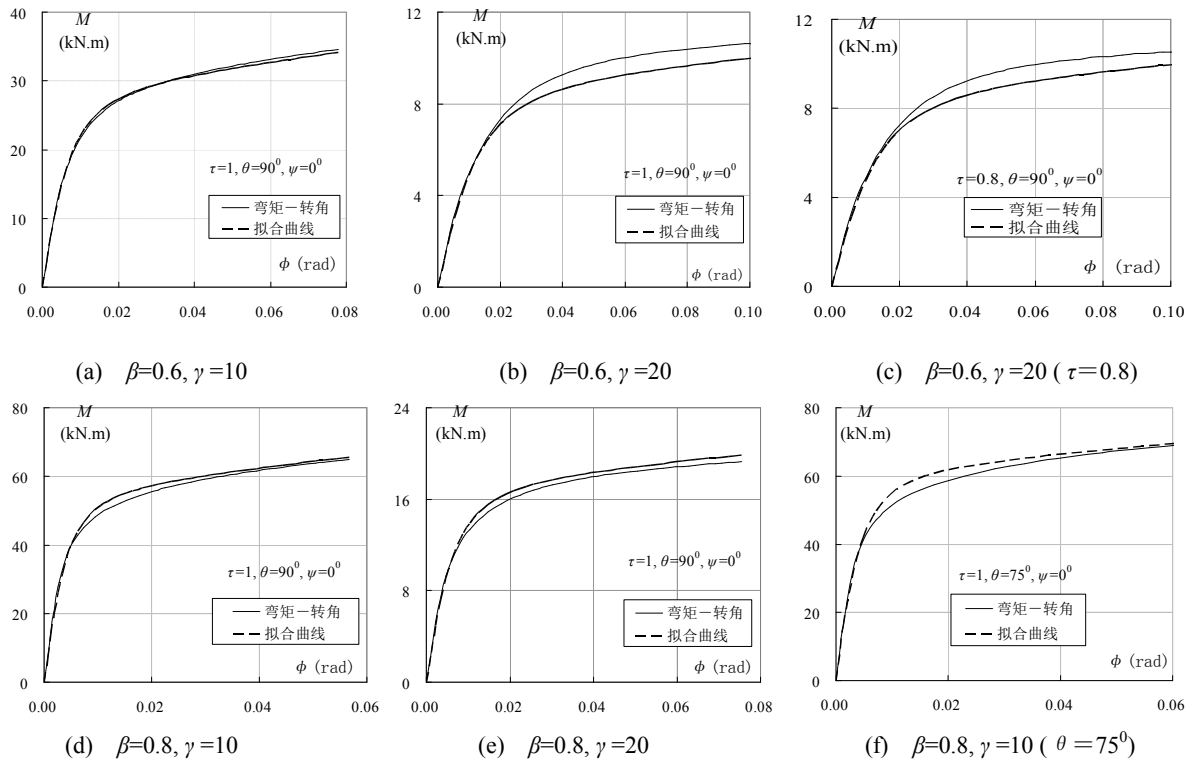


图 4 参数拟合结果

Fig. 4 Fitting curves

$$\text{加载: } M = f_m(\phi) = \left(b \frac{\phi - \phi_{b,m-1}}{\phi_0} + \frac{(1-b) \frac{\phi - \phi_{b,m-1}}{\phi_0}}{\left[1 + \left(\frac{\phi - \phi_{b,m-1}}{\phi_0} \right)^n \right]^{1/n}} \right) M_0 + M_{b,m-1} \quad (3a)$$

$$\text{卸载: } M = k_e(\phi - \phi_{un,m}) + M_{un,m} \quad (3b)$$

第 m+1 次（负向）:

$$\text{加载: } M = f_{m+1}(\phi) = - \left(b \frac{-(\phi - \phi_{b,m})}{\phi_0} + \frac{(1-b) \frac{-(\phi - \phi_{b,m})}{\phi_0}}{\left[1 + \left(\frac{-(\phi - \phi_{b,m})}{\phi_0} \right)^n \right]^{1/n}} \right) M_0 + M_{b,m} \quad (3c)$$

$$\text{卸载: } M = k_e(\phi - \phi_{un,m+1}) + M_{un,m+1} \quad (3d)$$

其中 $(M_{b,m-1}, \phi_{b,m-1})$ 、 $(M_{b,m}, \phi_{b,m})$ 分别为 m、m+1 次加载的起点，亦是 m-1、m 次卸载曲线的终点，为卸载曲线与 $M = k_b\phi$ 的交点，并且：

$$M_{b,0}=0 \quad (3e)$$

$$\phi_{b,0}=0 \quad (3f)$$

其中， k_e 、 k_b 为曲线的初始刚度和极限切线刚度（图 5），记为下式：

$$k_e = \frac{M_0}{\phi_0} \quad (3g)$$

$$k_b = b \frac{M_0}{\phi_0} \quad (3h)$$

以上的滞回关系如图 5 所示。根据此滞回关系得到部分参数节点的滞回曲线如图 6 所示。由图可知，滞回模型的曲线与有限元分析得到的曲线吻合较好，在程序中也较易实现。

但由图 6 可知，随着滞回环的增大，滞回曲线越来越扁平，拟合可进一步改进。本文采用调整 Menegotto-Pinto 方程系数 n 的方法对 Q235 钢材进行滞回模型改进，使滞回模型的滞回曲线与有限元的滞回曲线拟合程度更好。

参照相关文献^[10]，将节点区受拉塑性应变 ε_p 限值定为 0.08，表 1 给出参数分析时 Q235 钢材在此限值时对应的节点转角 ϕ_{lim} 。根据表 1 的数据，结合 Yura 准则（ $\phi_{lim}=80f_y/E$ ）^{[10]-[12]}，拟合出用于 Q235 钢材的 X 形相贯节点平面外受弯滞回模型的第 $m+1$ 次加载的系数 n 的表达式如下：

$$n = 1.8 - 1.1 \frac{|\phi_{b,m}|}{0.002\gamma + 0.04} \tag{4}$$

其中 $|\phi_{b,m}|$ 为卸载曲线与直线 $M = k_b\phi$ 的交点。
图 7 给出图 6 所示参数的改进滞回曲线。由图 7 的曲线可知，改进后滞回曲线较改进前的曲线拟合程度好，也即式(4)是有效并合适的。式(4)仅适用 Q235 钢，对于其他强度的钢材还有待进一步研究。

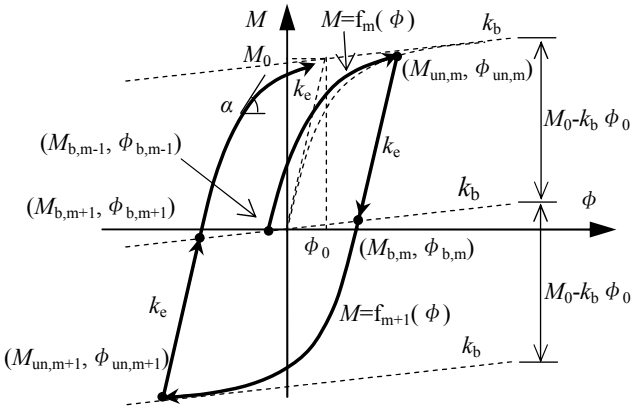


图 5 滞回模型

Fig. 5 Hysteretic model

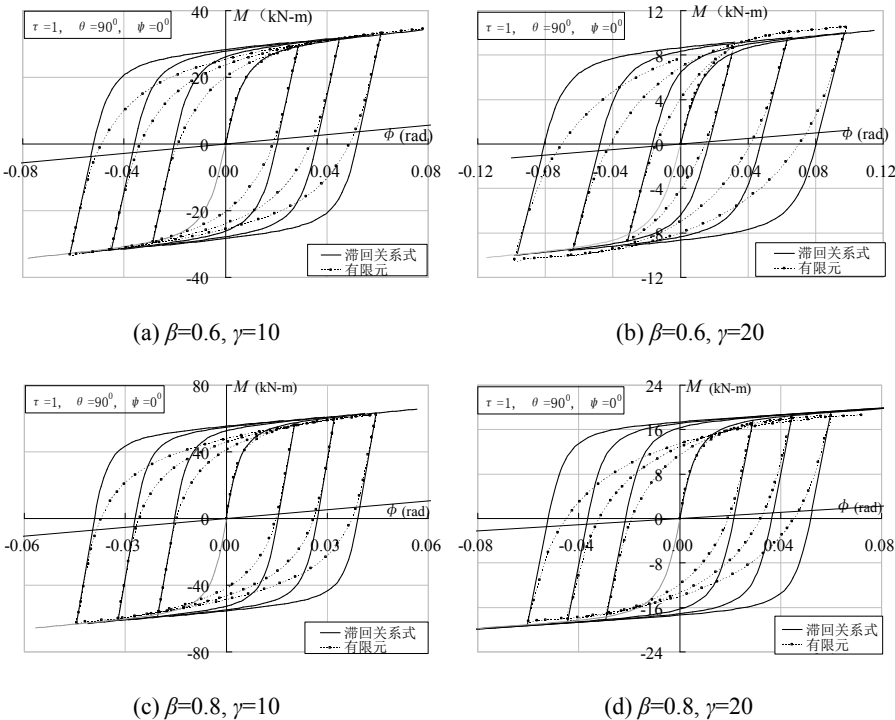


图 6 滞回曲线

Fig. 6 Hysteretic curve

表 1 节点转角 ϕ_{lim}

Table 1. Rotation limits of joints

$\phi_{lim}(\text{rad})$	$\gamma=5$	$\gamma=10$	$\gamma=15$	$\gamma=20$	$\gamma=25$
$\beta=0.5$	0.048	0.063	0.087	0.12	0.13

$\phi_{\text{lim}}(\text{rad})$	$\gamma=5$	$\gamma=10$	$\gamma=15$	$\gamma=20$	$\gamma=25$
$\beta=0.6$	0.036	0.05	0.069	0.089	0.11
$\beta=0.7$	0.032	0.04	0.052	0.066	0.084
$\beta=0.8$	0.041	0.044	0.052	0.073	0.09
$\beta=0.9$	0.052	0.053	0.071	0.078	0.078

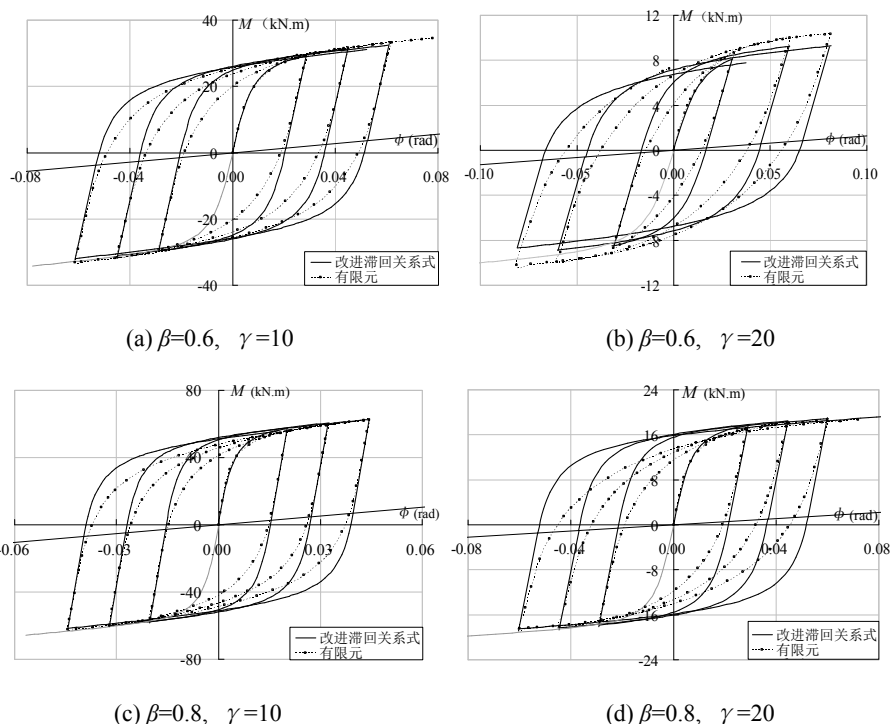


图 7 滞回曲线

Fig. 7 Hysteretic curve

3 算例比较

本节通过一个具体算例来验证节点平面外受弯滞回模型的精确性，并考察节点滞回模型对空间结构静动力响应的影响。

算例：圆形扁平网格结构，主管与支管正交布置，并设置外围环梁，周边简支，承受均布面荷载 q 。平面直径为 45m，平面正交的主支管间距皆为 5m，结构布置如 8 所示。构件截面如图所示，跨中区域： $\beta=0.89$ ， $\gamma=23.3$ ， $\tau=0.75$ ， θ_1 约为 90° ， ψ 约为 0° 。钢材屈服强度 f_y 为 235N/mm^2 ，弹性模量 E 为 $2.05 \times 10^5\text{N/mm}^2$ ，采用双折线模型考虑材料的非线性效应，屈服后的折线模量 E_t 取为 $1/100E$ 。结构的静动力分析考虑几何非线性。在本例中，结构的静动力响应都以平面外受弯为主，节点性能对结构整体性能的影响主要体现在平面外抗弯性能方面。

首先，进行节点平面外弯矩-转角滞回模型的验

证。取出如图 9 所示的局部结构进行验证，建立如下两种结构模型：壳单元模型；采用本文节点模型的杆系单元模型。假定壳单元模型的结果为精确结果，为验证依据。图 10 给出局部结构模型跨中点的荷载 F -位移 δ 曲线。由图可知，考虑节点模型的杆系单元模型较好的模拟了结构的滞回特性，弯矩-转角曲线方程式较精确。

其次，考察节点模型对结构静力性能的影响。建立三种结构模型：采用本文节点模型的杆系模型 A、节点为刚性的杆系模型 B、仅考虑节点弹性刚度(取节点模型的初始弹性刚度)的杆系模型 C，其中图 11 给出整体结构跨中点的荷载 q -位移 δ 曲线。由图 11 可知在进行结构的弹性分析时可仅考虑节点的弹性刚度，在进行结构的弹塑性变形分析时，需考虑节点的全过程模型，否则将低估结构的变形并高估结构的极限承载力，考虑节点模型后杆件的内力分布亦不同。

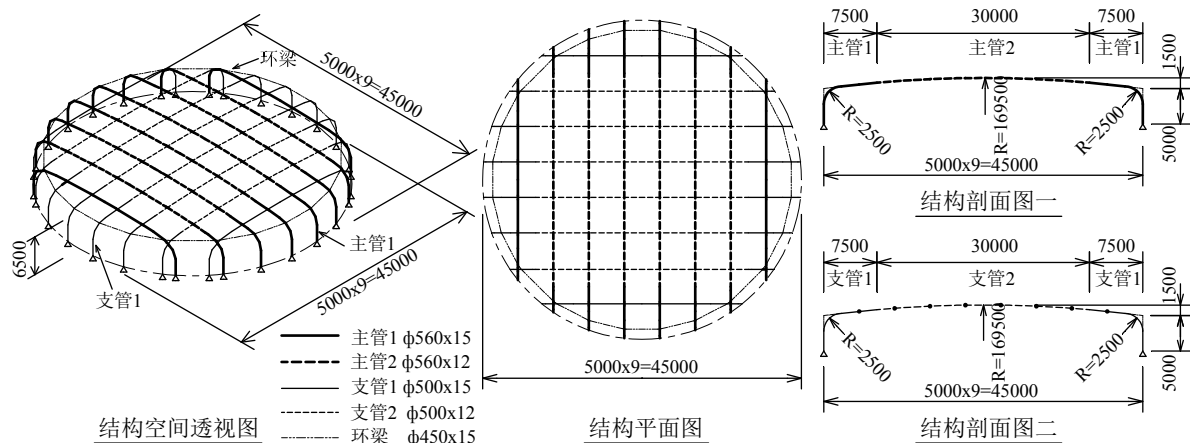


图 8 算例结构

Fig. 8 Structure for case study

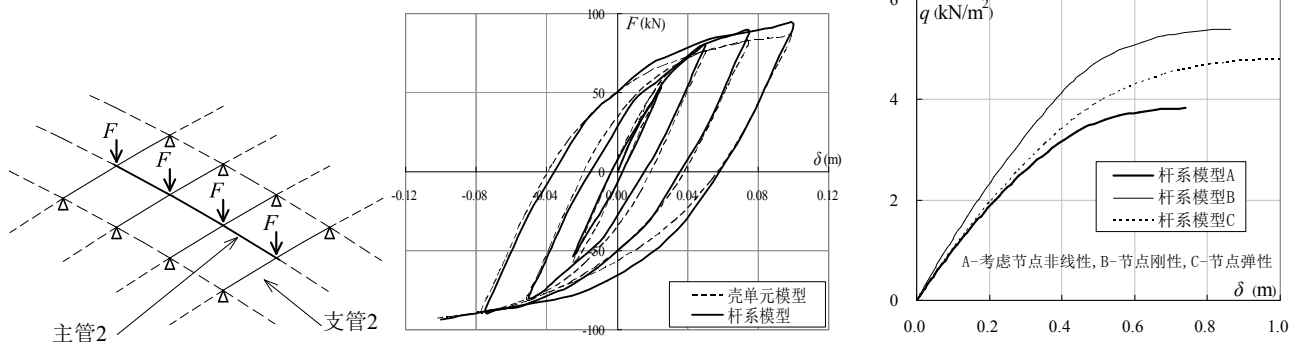


图 9 局部结构模型

图 10 跨中点的荷载 F -位移 δ 曲线

图 11. 跨中点的荷载 q -位移 δ 曲线

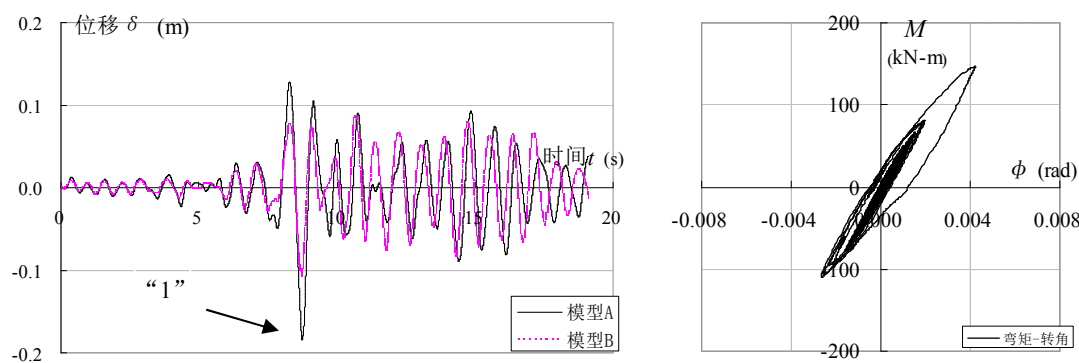
Fig. 9 Partial structural model

Fig. 10 The result of partial structure

Fig. 11 The result of static analysis of global structure

再次，进行结构的弹塑性时程分析。采用前述模型 A 和模型 B 进行研究。图 12 给出考虑结构大变形的弹塑性时程分析分析结果，输入地震波为天津竖向波，地震波输入方向为竖向，地震波的加速度峰值放大为 9 度罕遇地震的加速度峰值，采用均布面荷载 $q=3\text{kN/m}^2$ 的等效质量，在分析中未考虑重力（静力）

作用。表 3 给出了图 12 中时刻“1”的跨中变形最大节点弯矩值，其中 M_y 、 M_p 分别为截面边缘屈服弯矩承载力计算值、全截面塑性弯矩承载力计算值， M_{op}^{CID} 为 CIDECT 规范^[13]给出的节点承载力计算值(已将规范计算值换算为标准值)。



(a) 跨中点的时间 t -竖向位移 δ 曲线

(b) 模型 A 节点的弯矩 M -转角 ϕ 曲线

图 12 弹塑性时程分析结果

Fig. 12 The result of elastic-plastic time history analysis

表 3 时刻 “1” 节点弯矩值 (kN-m)

Table 3. The bending moment at the point “1”

变形最大点的弯矩 M				M_y		M_p		M_{op}^{CID}
模型 A		模型 B		主管	支管	主管 2	支管	节点
主管	支管	主管	支管	主管	支管	主管 2	支管	节点
353	144	315	225	651	515	827	654	192

由图 12 可知：(1)模型 A 的动力响应较模型 B 的动力响应在竖向位移上增大较多。(2)两种模型分析得到的结构内力明显不同。(3) 采用节点模型 A 的分析表明，结构从一开始就非完全线性，但因主支管弯矩远小于主支管的截面边缘屈服弯矩计算值 M_y ，也小于节点抗弯强度 M_{op}^{CID} ，非线性并不明显。

上述分析表明：首先，本文给出的节点模型较精确的拟合了节点的弯矩-转角曲线。其次，对于本文提供的算例结构，采用本文节点模型后结构的静动力响应与不采用该节点模型的结构响应差别较大，位移显著增大，主管承担的内力显著增大。本算例中节点几何参数的一个显著特点是 γ 较大，并且节点以受平面外弯矩为主，因此对于节点以受平面外弯矩为主的空间结构，当几何参数 γ 较大时，在结构的静动力分析时，推荐采用本文建立的节点模型。

参考文献：

[1] 孟宪德, 王伟, 陈以一等. X 形厚壁圆钢管相贯节点平面外受弯抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(5): 126-131. (Xiande Meng, Wei Wang, Yiyi Chen, et al. Research on seismic behavior of unstiffened thick-walled tubular X-joints under out-of-plane bending[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(5): 126-131. (in Chinese))

[2] 孟宪德. X 形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.

[3] 陈以一, 沈祖炎, 翟红, 陈扬骥等. 圆钢管相贯节点滞回特性的实验研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(6): 57-62. (Yiyi Chen, Zuyan Shen, Hong Zhai, et al. Experimental research on hysteretic property of unstiffened space tubular joints [J]. Journal of Building Structures, 2003, 24 (6): 57-62. (in Chinese))

[4] F. Qin, T.C. Fung, C.K. Soh. Hysteretic behavior of completely overlap tubular joints[J]. Journal of Constructional Steel Research 2001(57): 811-829

[5] Wang W, Chen Y Y. Hysteretic behaviour of tubular joints under cyclic loading[J]. Journal of Constructional Steel Research. 2007(63): 1384-1395.

5 结论

(1) 通过参数分析，给出 X 形相贯节点平面外受弯的基于 Menegotto-Pinto 方程的弯矩-转角曲线方程的各参数，经与试验结果校验过的有限元分析结果比较表明具有较好的精度。

(2) 根据建立的弯矩-转角曲线方程和有限元分析结果，提出了 X 形相贯节点平面外受弯的弯矩-转角的滞回模型。经与试验结果校准的有限元分析结果比较表明，其较好的模拟了节点的滞回曲线，可以应用于工程分析。

(3) 由本文的算例可知，对于节点以受平面外弯矩为主的空间结构，特别是当几何参数 γ 较大时，在结构的静动力分析时，宜采用考虑节点非线性的计算模型。

[6] Chen Y Y, Zhao X Z. Experimental Study on Hysteretic Behavior of CHS Overlap K-joints and Gap KK-joints[C]. Proceedings of the 5th International Conference on Advances in Steel Structures, Singapore, 2007.12, Vol.II: 207-217

[7] Yin Y, Han Q H, L.J. Bai L J, et al. Experimental Study on hysteretic behaviour of tubular N-joints[J]. Journal of Constructional Steel Research. 2009, 65 (2): 326-334

[8] 朱世哲, 罗尧治, 娄荣. 双拱结构 X 形钢管相贯节点试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(1): 99-104. (Shizhe Zhu, Yaozhi Luo, Rong Lou. Experimental investigation of X-joint in double—arch structur[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2008, 42(1): 99-104. (in Chinese))

[9] Bruneau M, Chia-Ming Uang C M, Andrew. Ductile Design of Steel Structures[M]. McGraw-Hill 1998

[10] Pecknold D, Marshall P, Bucknell J. New API RP2A tubular joint strength design provisions[J]. Journal of Energy Resources Technology. 2007, 129: 177-189.

[11] Yura J A, Zettlemoyer N, Edwards I F. Ultimate capacity equations for tubular joints[C]. Proc. Offshore Technology Conference, Houston, Texas, Vol. 1, Paper No. 3690, 1980.

[12] Yura J A, Zettlemoyer N, Edwards I F. Ultimate Capacity of Circular Tubular Joints[J]. Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 107, No. ST10, Proc. Paper 16600, Oct., 1981: 1965-1983.

[13] Wardenier J, Kurobane Y, Packer J A, Dutta D, Yoemans N. Design guide for circular hollow section (CHS) joints under predominantly static loading[M]. CIDEC series: Construction with hollow steel sections, TÜV-Verlag GmbH, Köln, Germany 1991.

孟宪德（1976-），男，博士，工程师。主要从事结构设计

陈以一（1955-），男，博士，教授。主要从事钢结构节点性能、轻型钢结构、稳定与抗震等方面的研究。

王伟（1977-），男，博士，副教授。主要从事钢结构节点性能、轻型钢结构、稳定与抗震等方面的研究。