

X 型方钢管节点平面内受弯性能研究

陈栋芬, 陈誉

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为考察 X 型方钢管节点在平面内弯矩作用下的静力性能, 通过 ABAQUS 进行建模及非线性有限元计算, 结合验证性试验, 对节点的破坏模式、应变强度发展过程、极限承载力进行研究, 并讨论轴力和平面内弯矩联合作用对节点极限承载力的影响。结果表明: 节点在平面内弯矩作用下, 发生弦杆受拉侧鼓凸, 受压侧凹陷, 腹杆受拉侧焊缝被拉开; 节点弦杆最先进入塑性, 最终由于塑性变形过大而导致试件破坏; 试件极限承载力随着 β 值的增大而增大; 在轴力和平面内弯矩联合作用下, 节点的受弯极限承载力下降。

关键词: X 型方钢管节点; 平面内受弯性能; 有限元分析

中图分类号: TU392.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.2095-476X.2013.06.014

Study on in-plane bending property of SHS X-joints

CHEN Dong-fen, CHEN Yu

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to investigate the static behavior of SHS (square hollow section) X-joints under in-plane bending, geometry model and non-linear finite element analysis were carried out using ABAQUS software. Combining with verifying experiment, the failure mode, deformation process and ultimate capacity of SHS X-joints were investigated, the effect of joint action between axial force and bending moment on the ultimate bearing capacity was also discussed. The results showed that, under in-plane bending, tension side of chord protruded, compression side sunk, and the welds in tension side of brace failed. Node chord entered a plastic phase and finally the sample failed due to large plastic deformation. The ultimate capacity increased remarkably as β value increased. Under the joint action between axial force and bending moment, the ultimate bearing capacity decreased.

Key words: SHS (square hollow section) X-joints; in-plane bending property; finite element analysis

0 引言

近年来, 方钢管节点以其质量轻, 外形美观, 传力明确, 抗压、弯、扭性能良好, 易于加工, 有利于快速施工等特点而广泛运用于土木工程中。在受力方面, 弯矩作用常被作为次要受力情况而得不到足够的重视。在国内的规范中^[1], 钢管相贯节点大多被

当做平面的或空间铰接杆件体系考虑, 这虽然能满足工程精度要求, 但是现实中, 往往出现需要考虑节点抗弯性能的情况。目前国内外已对钢管相贯节点的平面内抗弯问题进行了大量的研究^[2-5]。武振宇等^[6]根据节点抗弯的塑性铰线模型, 得出了节点承载力公式。王伟等^[7]从节点抗弯刚度和承载力 2 个方面进行参数分析并论述了计算公式建立的理

收稿日期: 2013 - 08 - 07

基金项目: 福建省自然科学基金面上项目(2012J01219)

作者简介: 陈栋芬(1989—), 男, 福建省泉州市人, 华侨大学硕士研究生, 主要研究方向为钢结构。

论基础. 吴颖等^[8]则对方支管与 H 型钢主管连接节点的轴压性能进行数值分析. 相比平面节点, 空间相贯节点构造复杂, 空间组合形式多样, 刚度特征、极限承载力、极限破坏模式等均展现出复杂的三维非线性特征. 这使得相贯节点的刚度研究方面仍有许多工作要做.

本文拟采用 ABAQUS 有限元分析方法, 从节点破坏模式、应变强度发展过程、极限承载力等方面对方钢管节点平面内受弯性能进行研究, 并简要讨论轴力和平面内弯矩联合作用对节点受弯极限承载力的影响. 将分析结果与试验结果进行对比, 以验证有限元分析方法的可行性.

1 有限元分析概况

1.1 有限元模型

有限元模型如图 1 所示, 为了便于与试验结果比较, 消除端部加载条件对节点区域的影响, 模型尺寸与试验试件一致. 图 2 为模型与试件的尺寸示意图. 模型与试件尺寸见表 1.

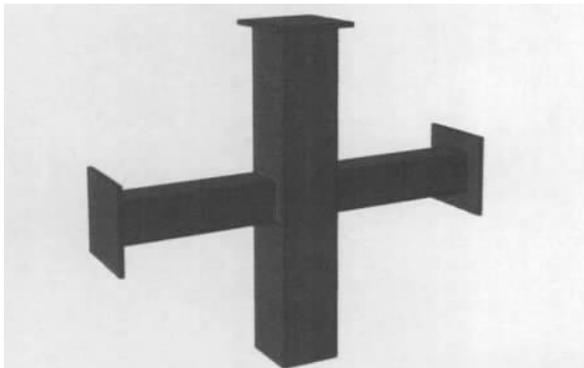


图 1 有限元模型

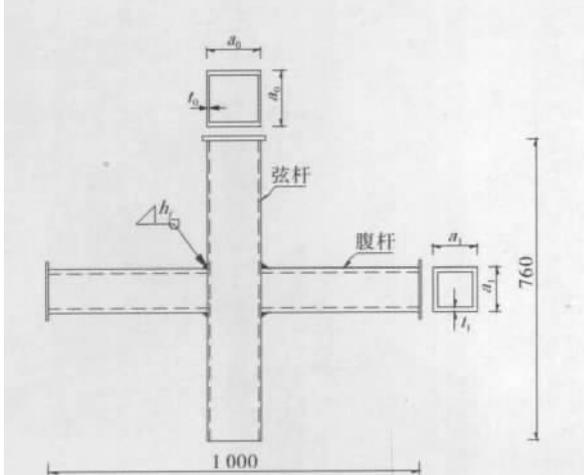


图 2 模型与试件尺寸示意图/mm

表 1 模型与试件尺寸表

试件编号	a_0 /mm	t_0 /mm	a_1 /mm	t_1 /mm	β	τ
IPN08	150	6	80	5	0.533	0.83
IPN10	150	6	100	5	0.667	0.83
IPN12	150	6	120	5	0.800	0.83

注: $\beta = a_1/a_0$; $\tau = t_1/t_0$.

本文有限元实用性分析在建立实体有限元分析模型时考虑了实际焊缝的存在, 对节点的连接焊缝进行了模拟, 建立了实体角焊缝模型, 焊缝高度同实际测量结果, 焊缝强度同母材. 同时本文还考虑了残余应力的影响: 横向残余应力在钢管相贯线处呈周期性拉压间分布; 纵向残余应力除了在焊缝端部有较小的压应力外, 其余均为拉应力; 等效残余应力沿焊缝相贯线分布呈周期变化, 应力最大值出现在每一焊缝段的中心.

1.2 材性试验

采用 ABAQUS 建模时, 材料特性由标准拉伸试验确定, 测试方法依据《金属材料室温拉伸试验方法》(GB/T 228—2002)^[9]的有关规定进行, 材性试验试件示意图见图 3, 测得荷载位移曲线见图 4. 屈服强度 f_y 和抗拉强度 f_u 见表 2, 弹性模量 E 与泊松比取经验值.

1.3 试验加载装置

试验装置如图 5 所示, 装置为自平衡体系, 千斤顶对弦杆端部施加竖向推力, 在节点区产生平面内弯矩.

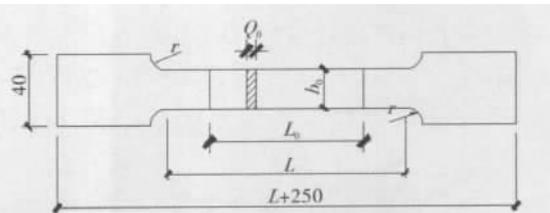


图 3 材性试验试件示意图/mm

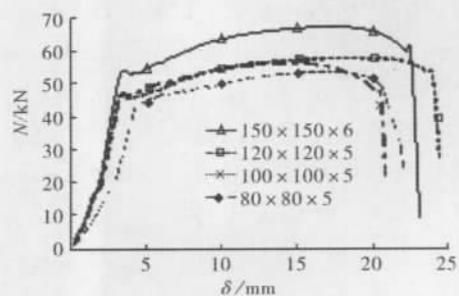


图 4 材性试验荷载位移曲线

表2 钢材材料特性一览表

方钢管尺寸/ (mm × mm × mm)	屈服强度 f_y /MPa	抗拉强度 f_u /MPa	弹性模量 E /MPa	泊松比
150 × 150 × 6	327	418		
120 × 120 × 5	334	426	2.06×10^5	0.3
100 × 100 × 5	350	421		
80 × 80 × 5	402	489		

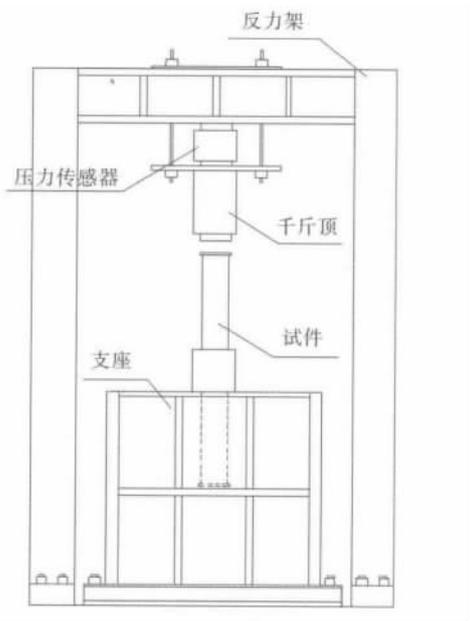


图5 试验加载装置

图6为试验设备整体照片及试验流程示意图。整个试验系统包括:试验加载及测试系统、数据采集系统和监控系统。其框图和主要设备规格如下:主要设备及测试仪器型号:DH3816 数据采集系统;BF-120-2A 电阻应变计;YHD-50型、YHD-30型、YHD-100型位移传感器;YQ-320 液压千斤顶、YQ-500 液压千斤顶、YQ-100 液压千斤顶。试验中位移传感器用万向磁性支架固定在不动体上。YHD-50型和YHD-100型电子位移传感器灵敏度为 $200 \mu\epsilon/\text{mm}$,最大量程为50 mm和100 mm 精度达到 $1 \mu\epsilon$ 。YHD-30型电子位移传感器灵敏度为 $300 \mu\epsilon/\text{mm}$,最大量程为30 mm 精度达到 $1 \mu\epsilon$ 。

1.4 网格划分

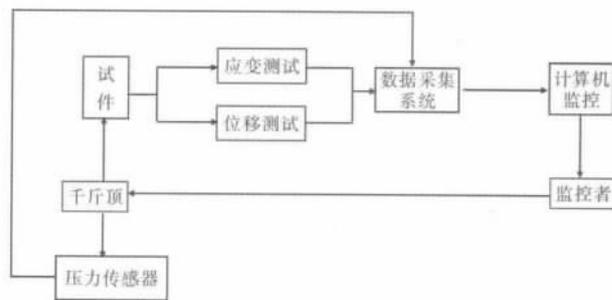
在进行管节点的有限元模拟时,单元类型采用八节点线性六面体非协调单元(C3D8I),非协调单元的计算精度与二次单元十分接近,对位移求解的结果也较为精确,且有利于观察节点应力发展^[10-11]。

网格划分采用结构化网格划分技术。网格密度的控制非常重要,经验表明,采用不同精度的网格

划分方式,有限元的计算精度和计算时间也大不相同。当采用较稀疏的网格时,能够大大减少计算的时间,但是同时会使计算精度降低。故网格划分时,为得到较理想的计算精度并尽量节约时间,对网格部分加密。在进行网格划分时,相贯区域的主管和支管的网格划分较密,对于节点的其余部分网格划分较稀疏,这样可以在保证结果精度的情况下大大降低计算成本。采用此网格划分方法得到的节点如图7所示,单元总数为14 584个。



a) 试验设备照片



b) 试验流程示意图

图6 试验系统

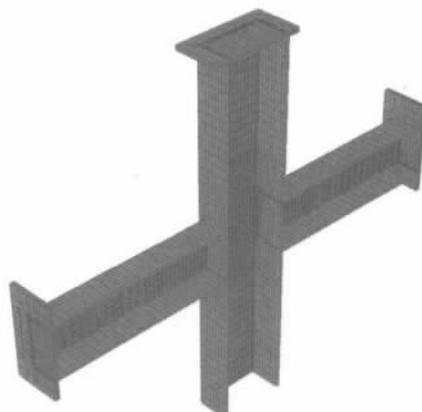


图7 节点有限元网格

2 有限元结果及试验验证

2.1 破坏模式分析

通过 ABAQUS 的模拟得出 3 个试件的破坏现象均相同,如图 8 所示. X 型方钢管节点在平面内弯矩作用下,主要发生弦杆受拉侧鼓凸,受压侧凹陷. 通过与文献 [12] 中的试验现象比对,可以发现有限元模拟与试件实际破坏现象较为吻合. 试验在加载末期均是由于腹杆根部焊缝开裂导致终止加载,因为腹杆根部焊缝位于节点区,因此可以认为焊缝破坏即该节点的破坏. 从试件破坏模式上看,本次试验并未发生翘曲破坏,主要原因在于:翘曲破坏主要发生在受弯构件两端有比较强的约束情况(如梁柱节点中),而本文试件主管径向刚度较小,破坏部位主要为主管表面. 由于焊缝开裂的成因众多,且基于 ABAQUS 的连续介质分析,本文未对焊缝开裂情况进行模拟.

2.2 试件应力分布

图 9 为试件破坏阶段应力云图,由图 9 可以看出:腹杆远离相贯处的区域,应力较小且分布均匀,腹杆根部应力较大;弦杆靠近相贯处及支座部位,

应力较大. 弦杆的应力比腹杆大,应力最大值也发生在弦杆,故试件的破坏模式以弦杆破坏为主.

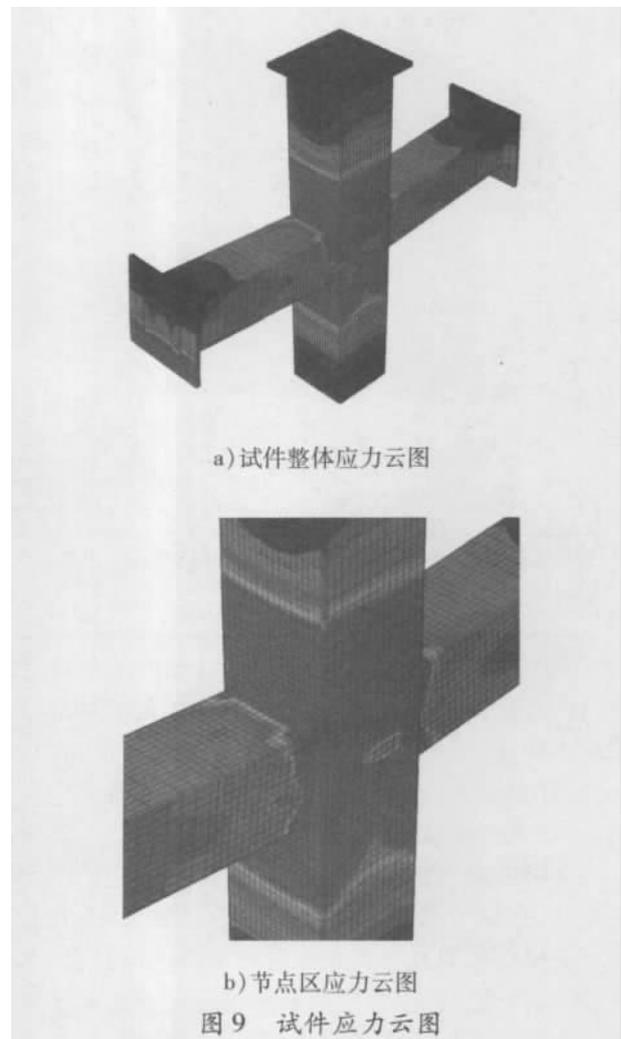
2.3 荷载应变曲线

通过分析测点应变的数据,可以了解腹杆根部截面、弦杆相贯区的应变强度变化和分布规律,用来研究节点域在平面内弯曲荷载作用下的塑性发展及破坏机理.

由图 10 测点的应变曲线可知:最先进入塑性的测点总是出现在弦杆受压一侧的测点中,而破坏时应变最大的位置出现在弦杆受拉侧,腹杆进入塑性的测点较少,在进入塑性的测点中,多出现在受拉侧. 可以认为试件进入屈服的顺序及塑性发展如下:首先在弦杆相贯区受压侧出现屈服,随着荷载的增加弦杆受拉区也出现屈服并进入塑性.

2.4 承载力比较

将模拟值和试验值与 Eurocode3^[13] 以及 IIW^[14] 中 X 型方钢管受平面内弯矩作用承载力设计计算公式进行比对,比对结果见表 3.



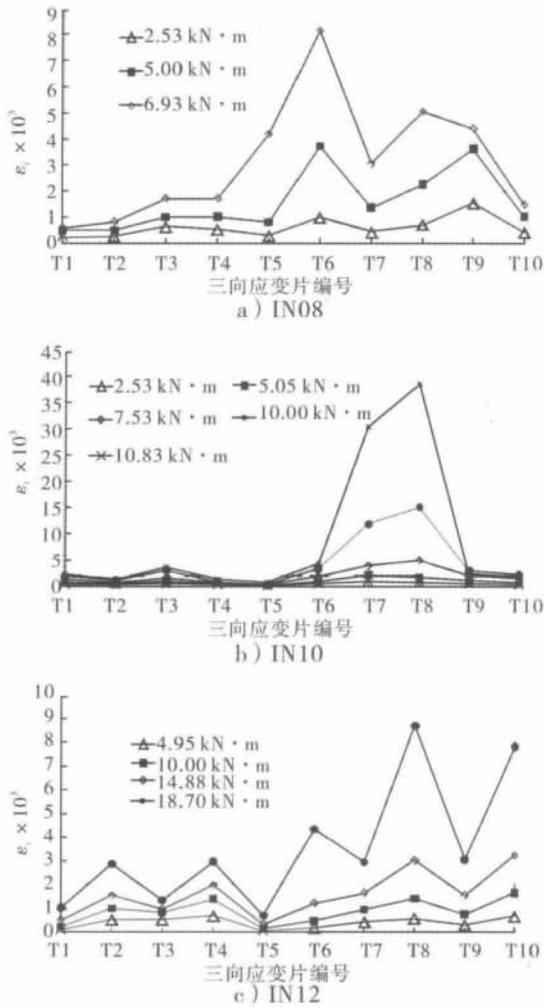


图 10 测点应变强度曲线

表 3 试件极限承载力计算值与模拟值对比表

试件名称	Eurocode3 计算值	IIW 计算值	极限承载力模拟值	极限承载力试验值
IN08	2.65	4.82	6.81	6.93
IN10	5.23	7.47	10.33	10.83
IN12	10.50	13.13	18.69	18.70

通过试件极限承载力模拟值与规范承载力计算值的对比,可以看出模拟值与 IIW 规范的计算结果最为接近; Eurocode3 规范计算值较为保守,并且与模拟值相差较大.从表 3 还可以看出随着 β 值的增大,试件的极限承载力增大.

实际工程中出现的受力情况并非单一的平面内受弯,往往由几种不同的受力情况联合作用,导致试验极限承载力与实际工程相差很大的情况.对此,本文将通过有限元模拟简要的讨论轴力和平面内受弯联合作用对 X 型方钢管节点受弯极限承载

力的影响.

加载方式如图 11,通过 F_1 施加平面内弯矩, F_2 施加腹杆轴力.轴力和平面内弯矩共同作用下的荷载位移曲线如图 12 所示.由图可以看出,随着所施加在腹杆的轴力变大,节点的受弯极限承载力变小.这是因为在加载过程中,随着弦杆变形,施加在腹杆的轴力将对节点产生附加弯矩,使节点提前进入破坏,降低了节点的受弯极限承载力.

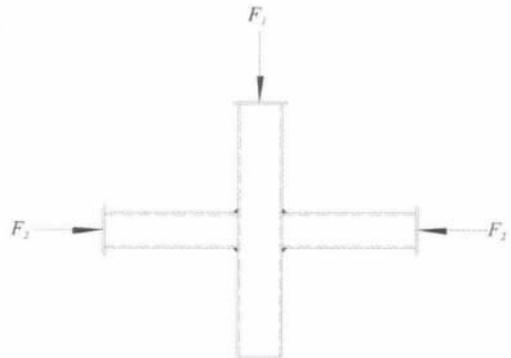


图 11 联合作用加载示意图

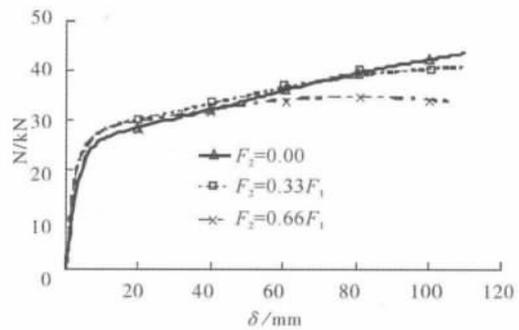


图 12 联合作用荷载位移曲线

3 结论

本文运用有限元软件 ABAQUS 对 X 型方钢管节点平面内受弯进行建模和计算,并与相应的试验结果进行对比,讨论了轴力和平面内受弯联合作用对 X 型方钢管节点极限承载力的影响,得到了以下结论:

- 1) 试件在平面内弯矩作用下,破坏模式为:弦杆受拉侧鼓凸,受压侧凹陷,破坏发生在弦杆相贯部位,腹杆无明显破坏现象.
- 2) 试件从屈服到破坏的全过程,弦杆相贯区受压侧首先出现屈服,随着荷载的增加弦杆受拉区也出现屈服并进入塑性,最终由于塑性变形过大而导致试件破坏.

(下转第 76 页)

便地预测水灰比、减水剂含量、粉煤灰含量、纤维含量对聚丙烯纤维混凝土强度冻融损失率的影响。

表1 损失率的计算值与试验值比对

编号	试验值	计算值	残差	相对误差
1	0.069 93	0.069 9	0.000 0	0.000 0
2	0.069 72	0.055 8	0.013 9	0.198 9
3	0.067 59	0.065 6	0.002 0	0.029 7
4	0.069 82	0.060 3	0.009 5	0.136 8
5	0.069 65	0.067 8	0.001 8	0.026 5
6	0.055 85	0.064 1	-0.008 2	0.146 9
7	0.069 25	0.069 7	-0.000 5	0.007 0
8	0.069 06	0.068 0	0.001 0	0.015 2
9	0.068 01	0.074 3	-0.006 3	0.092 6

3 结论

1) 基于已有的试验数据,对聚丙烯纤维混凝土强度冻融损失率进行灰色关联度分析,得出影响聚丙烯纤维混凝土强度冻融损失率因素的关联度关系为:水灰比 > 减水剂含量 > 粉煤灰含量 > 纤维含量。

2) 利用 GM(1,5) 模型建立聚丙烯纤维混凝土强度冻融损失率的预测方程,模型具有较好的预测精度,其预测结果具有一定的参考价值,为聚丙烯纤维混凝土冻融损失率的预测提供了一种有效的

方法。

参考文献:

[1] 程红强,高丹盈.聚丙烯纤维混凝土冻融损伤试验研究[J].东南大学学报:自然科学版,2010,40(S II):197.

[2] 阎利,万朝均,王绍东.聚丙烯纤维增强混凝土概述[J].化学建材,2003(1):52.

[3] 姚武.纤维混凝土的低温性能和冻融损伤机理研究[J].冰川冻土,2005,27(4):545.

[4] 霍俊芳,申向东,曹喜.聚丙烯纤维混凝土正交试验研究[C]//纤维混凝土的技术进展与工程应用——第十一届全国纤维混凝土学术会议论文集,大连:[s. n.]2006.

[5] 刘思峰,党耀国,方志耕,等.灰色系统理论及其应用[M].北京:科学出版社,2010.

[6] 王学萌,张继忠,王荣,等.灰色系统分析及其实用计算程序[M].武汉:华中科技大学出版社,2001.

[7] 商怀帅,宋玉普.灰色系统理论的优化方法及其在结构寿命预测中的应用[J].混凝土,2004(10):25.

[8] 路晓峰,贾小林,崔先强.灰色系统理论的优化方法及其在卫星钟差短期预报中的应用[J].测绘工程,2006,15(6):12.

[9] 陈举华,史岩彬.GM预测模型的模糊-灰色优化方法[J].农业机械学报,2003,34(2):129.

(上接第62页)

3) 节点极限承载力随着β值的增大而增大,极限承载力的模拟结果与IIW规范最为接近。

4) 节点在腹杆轴力和平面内弯矩共同作用下,受弯极限承载力下降。

5) 通过与试验结果比对,可知该试件在极限承载力、破坏模式等方面与试验值均吻合良好,可以作为参数分析的基础。

参考文献:

[1] GB 50017—2003,钢结构设计规范及条文说明[S].

[2] 陈以一,陈扬骥.钢管结构相贯节点的研究现状[J].建筑结构,2002,32(7):52.

[3] Packer J A, Henderson J 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.

[4] Wardenier J. Hollow sections in structural applications [M]. Netherlands: Bouwen Met Staal, 2002.

[5] 刘飞飞,陈誉.不同受力状态下N型圆钢管完全搭接节点力学性能研究[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2012,27(1):37.

[6] 武振宇,谭慧光.不等宽T型方钢管节点初始抗弯刚度计算[J].哈尔滨工业大学学报,2008,40(10):1517.

[7] 王伟,陈以一.圆钢管相贯节点的非刚性能与计算公式[J].工业建筑,2005,11(35):5.

[8] 吴颖,陈誉.方支管-H型钢主管T型节点轴压性能数值分析[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2013,28(2):15.

[9] GB/T 228—2002, Metallic materials—Tensile testing at ambient temperature [S].

[10] 石亦平,周玉蓉.ABAQUS有限元分析实例详解[M].北京:机械工业出版社,2006.

[11] 曹金凤,石亦平.ABAQUS有限元分析常见问题解答[M].北京:机械工业出版社,2009.

[12] 陈栋芬.X型方钢管节点平面内受弯性能试验报告[R].厦门:华侨大学,2012.

[13] EN1993—1—8 Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1—8: Design of Joint [S].

[14] XV—E—07—378. International institute of welding (IIW). Static design procedure for welded hollow section joints—recommendations (IIW Doc) [S].