

内隐藏焊缝对 N 形方圆钢管节点受力性能影响

袁智深¹, 舒兴平^{2†}, 胡习兵¹

(1.中南林业科技大学 土木工程学院, 湖南长沙 410004; 2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南长沙 410082)

摘要:为研究 N 形方圆钢管搭接节点中被搭接管内隐藏部分和主管间焊接与否对节点受力性能的影响, 设计制作了 4 个 N 形方主管圆支管搭接节点足尺试件进行极限承载力试验. 试验结果表明: 被搭接管受拉时, 其内隐藏部分和主管间不焊将降低节点承载力, 且搭接率越大, 降低幅度越大. 此外, 内隐藏部分未焊接的节点均发生了焊缝断裂破坏. 以试验为基础, 建立了非线性有限元分析模型, 对 324 个不同几何参数、支管不同轴力性质下内隐藏部分焊接与不焊接的 N 形方圆钢管搭接节点进行了有限元分析, 研究表明: 内隐藏部分未焊接对被搭接管受压的节点承载力影响较小, 但对被搭接管受拉的节点极限承载力影响较大. 针对实际工程中钢管桁架均为先组装再焊接导致内隐藏部分难以施焊的情况, 给出了设计建议.

关键词: N 形方圆钢管搭接节点; 内隐藏焊缝; 受力性能; 试验; 有限元分析

中图分类号: TU392.3

文献标志码: A

Influence of Hidden Weld on Mechanical Properties of Overlapped CHS-to-SHS N-joints

YUAN Zhishen¹, SHU Xingping^{2†}, HU Xibing¹

(1. College of Civil Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: To study the influence of hidden weld between the overlapped brace and chord on mechanical properties of overlapped CHS-to-SHS N-joints, two partially overlapped specimens with hidden seam weld and two without hidden weld were tested under monotonic loading. The test results showed that when the overlapped brace was in tension, the absence of hidden weld reduced the bearing capacity of joints, and the increased overlapped ratio decreased the joint bearing capacity obviously. Furthermore, weld crack appeared for all specimens without the hidden weld. Based on the experimental results, a finite element model was generated and validated. Using this model, the effects of loading hierarchy reversal of the braces and the hidden seam weld were studied on the response of totally 324 overlapped CHS-to-SHS N-joints with different geometric parameters. It revealed that the absence of hidden weld had less influence on the bearing capacity of the through-brace-in-compression joints than that of through-brace-in-tension joint. In view of the fact that the steel hollow section truss was assembled first and then

* 收稿日期: 2017-12-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51608544), National Natural Science Foundation of China(51608544); 湖南省教育厅优秀青年基金(14B187), Excellent Youth Foundation of Education Department of Hunan Province(14B187); 中南林业科技大学引进高层次人才科研启动基金(2013RJ013), Research Foundation for Advanced Talents of Central South University of Forestry and Technology(2013RJ013)

作者简介: 袁智深(1982—), 男, 湖南邵阳人, 中南林业科技大学讲师, 博士

† 通讯联系人, Email: shuxingping@sina.com

welded, design suggestions were given.

Key words: overlapped CHS-to-SHS N-joint; hidden weld; mechanical properties; test; finite element analysis (FEA)

随着社会经济的发展,钢管生产技术不断成熟,多维数控切割技术水平不断提高,加上钢管作为结构构件的独特优势,使钢管结构近年来在世界范围内都得到了迅猛发展,包括大型展览馆、体育馆、机场候机厅和高铁站等在内的多种屋盖结构,几乎都采用钢管结构。这些钢管结构因为跨度大、构造复杂,通常不在工厂进行整体拼装,而是把杆件运至工地,在工地设置胎架进行点焊定位后再连续施焊。为了避免杆件内力偏心,常把杆件相交处的节点设计成搭接节点。由于工地条件、施工进度等的限制,要将被搭接支管与主管的相贯部位尤其是被搭接支管隐藏在搭接支管下面的部分(即内隐藏部分)焊满,除了设计中特别交代且现场焊接监督到位之外,往往难以做到。然而,国内外现行规范和设计指南中普遍按照搭接节点中被搭接管上内隐藏部分与主管间焊接的假定进行结构设计^[1-4]。这样一来,现场施工的实际情况与节点理论计算假定不一致的矛盾凸显出来,就有可能造成结构存在安全隐患。

内隐藏部分焊接与否对相贯节点的影响主要集中在K形和KK形圆管搭接节点上^[5-7]。文献[5]对6个K形圆钢管搭接节点进行了静力试验研究,结果表明内隐藏部分焊接与否在单调静力加载下的极限承载力相差不超过10%,但对节点内力传递路线和破坏模式影响较大;文献[6]对106个内隐藏部分焊与不焊的K形圆管搭接节点进行了非线性有限元对比分析,认为内隐藏部分不焊对K形搭接节点承载力的影响不宜忽视,且随着搭接率的增加,内隐藏焊缝不焊带来的不利影响更严重;文献[7]对内隐藏部分焊与不焊KK形圆管搭接节点进行了非线性有限元分析,结果表明,搭接节点的隐藏焊缝焊与不焊对节点最终破坏模式影响不大,对节点承载能力的影响也不是十分显著,隐藏焊缝不焊接节点的滞回性能优于隐藏焊缝焊接的节点,但该结论尚需要进一步的试验验证。

主管为方管支管为圆管的相贯节点(简称方圆钢管相贯节点)因加工简单、抗疲劳性能良好而在实际工程中应用广泛,但对于搭接的方圆钢管节点,同

样存在内隐藏部分是否焊接以及由此给节点受力性能带来何种影响的问题。国内外学者对方圆钢管相贯节点的静力及疲劳性能进行了较多研究^[8-13],但对方圆钢管搭接节点内隐藏部分焊接与否对节点性能的影响几无涉及。

为了深入了解内隐藏部分焊接与否对方圆钢管搭接节点性能的影响,本文对4个N形方圆钢管搭接节点进行静力试验研究,分析节点的受力性能和破坏模式。在此基础上,建立精确的有限元分析模型,对该类型节点进行参数分析,全面了解内隐藏部分焊接与否对节点受力性能的影响,为该节点的设计施工提供科学依据。

1 试验概况

1.1 节点试件

试验共设计制作了4个N形方主管圆支管搭接节点试件,包括支管相对较弱且搭接率较小的试件NJ-1、NJ-2和支管相对较强且搭接率较大的试件NJ-5、NJ-6,节点的几何参数如图1所示。结合工程实际,且为了简化起见,所有试件的斜支管与主管间的夹角 θ 均为 45° ,两支管管径和厚度完全相同,且斜支管均为被搭接管,各试件主管长度均为1.8 m,支管长度均为0.65 m(轴线长)。节点的其他几何参数取值见表1。需要说明的是,节点类型TN表示被搭接支管受拉且内隐藏部分未焊接,TW表示被搭接支管受拉且内隐藏部分焊接。节点试件支管端部相贯线切割均采用专业数控切割设备完成。TN类节点先将节点杆件组装到位,然后一次性完成节点连接焊缝施焊,但TW类节点先将被搭接支管与主管间内隐藏部分焊接好(见图2),再组装好搭接管,最后再将其他焊缝焊满。根据规范^[14]的要求,主管和支管间采用对接焊缝,支管间采用角焊缝,且焊脚尺寸取为支管壁厚的1.5倍。为了保证焊缝质量的稳定性,所有节点焊缝均为同一焊工在工厂采用E43型焊条手工焊接。

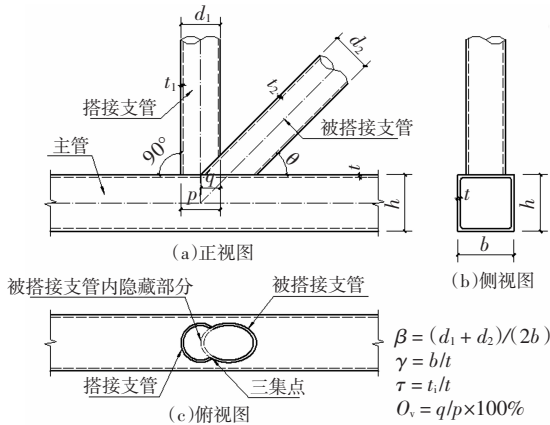


图1 N形方圆钢管搭接节点
Fig.1 Overlapped CHS-to-SHS N-joint

表1 节点试件参数表
Tab.1 Parameters of specimens

试件编号	主管	支管	β	γ	τ	O_v /%	节点类型
NJ-1	□200×10	φ114×4	0.570	20	0.4	33.0	TN
NJ-2	□200×10	φ114×4	0.570	20	0.4	33.0	TW
NJ-5	□200×10	φ159×10	0.795	20	1.0	57.8	TN
NJ-6	□200×10	φ159×10	0.795	20	1.0	57.8	TW

注: β 为两支管直径平均值与主管截面宽度之比; γ 为主管截面宽度与壁厚之比; τ 为支管壁厚与主管壁厚之比; O_v 为支管搭接率, $O_v = qp \times 100\%$ (p, q 见图1)。

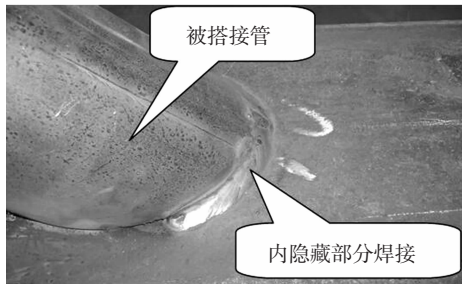


图2 被搭接支管内隐藏部分焊接示意
Fig.2 Overlapped brace with hidden seam welded

1.2 材性试验

试件钢管均采用材质为Q235B的直缝管,对同批钢管取样得到的材料力学性能实测值如表2所示。

表2 钢材材料力学性能
Tab.2 Material properties of steel

钢管规格	弹性模量 $E/(N \cdot mm^{-2})$	屈服强度 $f_y/(N \cdot mm^{-2})$	抗拉强度 $f_u/(N \cdot mm^{-2})$	屈强比	延伸率 $\delta/\%$
φ114×4	2.27×10 ⁵	336.40	432.80	0.78	24.90
φ159×10	2.15×10 ⁵	327.57	518.95	0.63	24.40
□200×10	2.05×10 ⁵	324.18	462.06	0.70	25.90

1.3 试验装置及加载制度

试验加载装置如图3所示.该门式反力框架通过地锚与实验室地槽牢固连接,竖支管轴向力通过固定在反力框架横梁下方的1000 kN电液伺服作动器施加.为了尽可能模拟节点的实际受力状态,主管右端通过间距很小的4个高强螺栓与反力框架立柱相连,斜支管和固定在反力框架立柱上的拉耳通过插销相连.加载通过电液伺服作动器对竖支管施加竖向轴压力,从而使斜支管内产生轴向拉力。

试验前按照规范公式^[1]对各试件承载力进行了预估,以此作为试验过程中的参考加载值.加载过程采用力控制,整个加载分两个阶段:预加载和正式加载.预加载分3级进行,每一级荷载均取预估荷载值的10%,然后再分级卸载,此阶段主要使试件各部分接触良好并检查量测仪器工作的可靠性.正式加载阶段,每级施加预估荷载值的10%,当加载至预估荷载的80%、试件出现明显的塑性变形或焊缝开裂时,即将每级增加的荷载值减半,直到荷载不能继续增加为止。

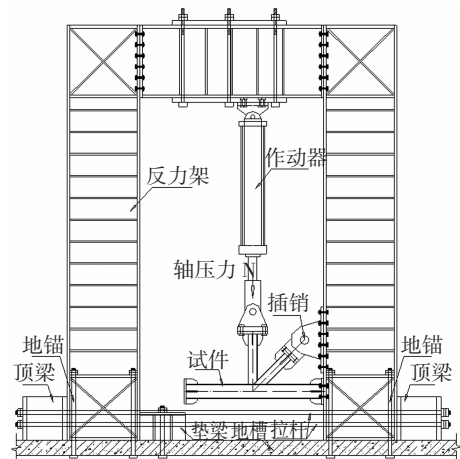


图3 试验加载装置
Fig.3 Test set-up

1.4 测试内容

试验过程中主要量测了:1)支管与主管交汇区域管壁上的应变分布.该区域应变通过布置应变花测取,应变花布置如图4所示.由于节点仅受面内荷载,在试件背面仅设置了数个应变花(图4中括号内所示)以检验节点受力是否对称;2)主管、支管内力.由布置于每根支管中部截面圆周上的4个单向应变片及主管中部截面每一壁板中央的单向应变片测取;3)支管与主管壁相对变形.在每一支管管壁上对称布置2个位移计,如图5的D1~D4.支管与主管壁相对变形可由位移计读数减去支管弹性变形得到;

4)节点平面内竖向变形和平面外变形.通过在主管下壁和垂直两侧壁方向布置位移计测得,主要用于监控加载是否出现异常,如图 5 的 D5~D7.

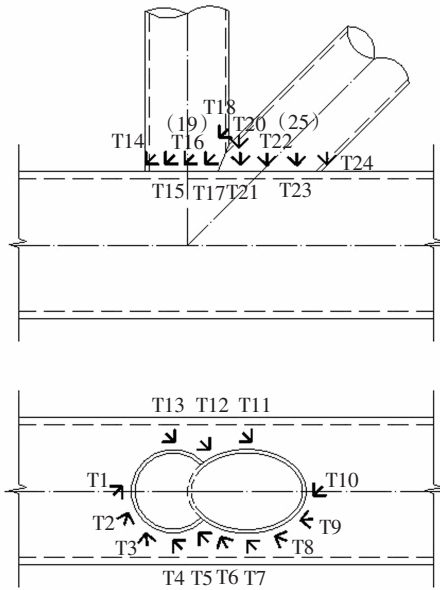


图 4 三向应变片布置图(NJ-5、NJ-6 无 T6)

Fig.4 Strain rosette locations on specimens

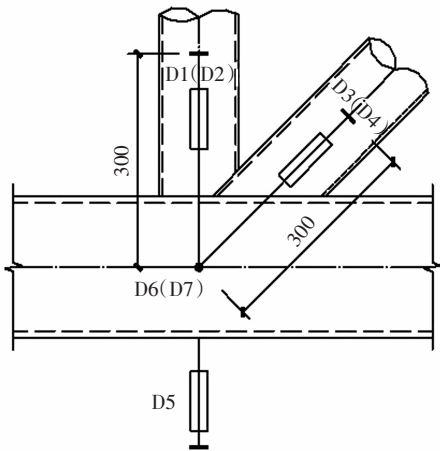


图 5 位移计布置图

Fig.5 Displacement meter locations of specimens

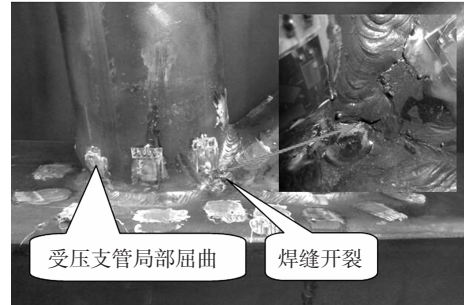
2 试验结果与有限元分析

2.1 节点破坏现象与结果分析

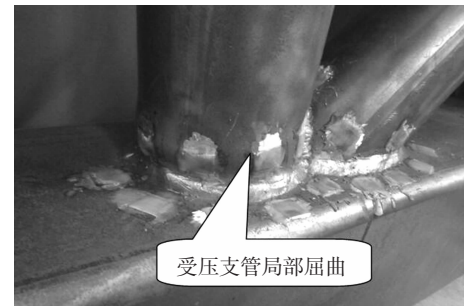
由于试件几何参数、节点构造的不同,节点试件出现了受压支管局部屈曲、节点处主管上壁局部屈曲以及两支管间连接焊缝断裂等破坏现象.

试件 NJ-1 的支管相对主管较弱,节点破坏时受压支管在轴压力作用下出现了局部屈曲现象.由于试件 NJ-1 被搭接支管内隐藏部分与主管间未焊接,在被搭接支管、搭接支管与主管的交汇点(三集

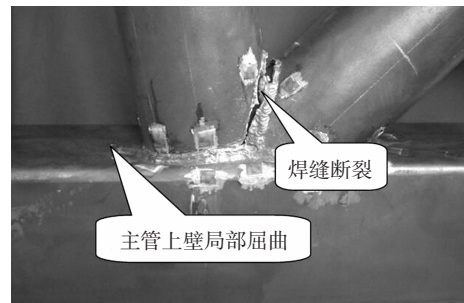
点)附近的连接焊缝还出现了开裂现象,如图 6(a)所示.值得注意的是,焊缝开裂先于受压支管局部屈曲发生.试件 NJ-2 破坏时,受压支管也发生了局部屈曲,但因其内隐藏部分焊接,节点破坏时并未出现焊缝开裂现象,如图 6(b)所示.节点试件 NJ-5、NJ-6 的支管相对较强,试件破坏时主管上壁均发生了局部屈曲现象,如图 6(c)(d)所示.与节点试件 NJ-1 类似,节点试件 NJ-5 内隐藏部分未焊接,搭接支管和被搭接支管间的连接焊缝同样出现了断裂破坏.



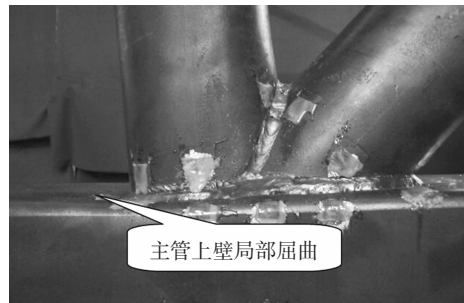
(a)试件 NJ-1



(b)试件 NJ-2



(c)试件 NJ-5

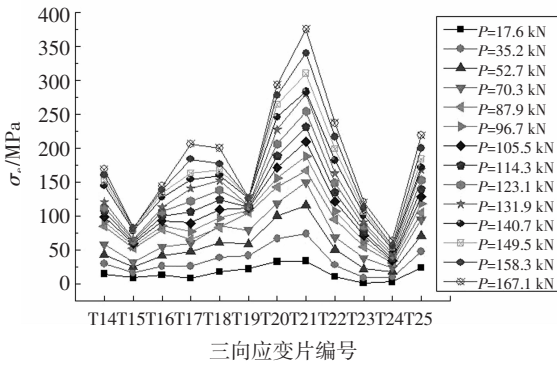


(d)试件 NJ-6

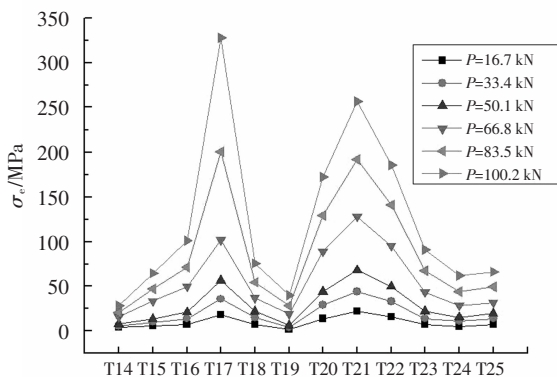
图 6 试件破坏形态

Fig.6 Failure diagrams of specimens

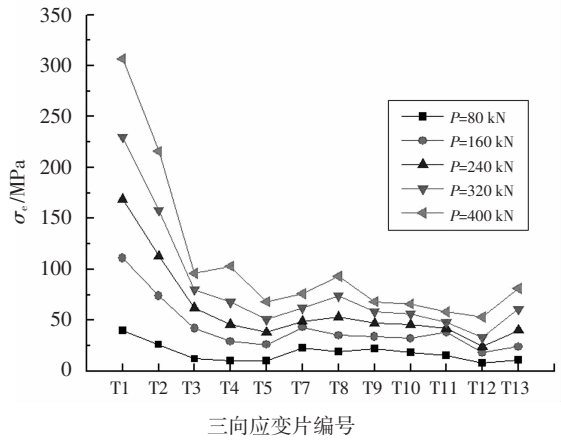
为了解节点试件管壁上的应力分布状态及应力发展情况,根据测点的应变值以及材性试验所得的屈服强度、弹性模量,在弹性范围内将测点的复杂应力状况转换为 Von Mises 等效应力 σ_e ^[14].因支管相对较弱的节点试件 NJ-1、NJ-2 发生了支管局部屈曲破坏,支管相对较强的节点试件 NJ-5、NJ-6 发生了主管上壁局部屈曲破坏,因此,对于 NJ-1 和 NJ-2,本文仅给出了节点主管交汇区域支管管壁上的等效应力分布曲线,对于 NJ-5、NJ-6 本文仅给出了节点主管交汇区域主管管壁上的等效应力分布曲线,如图 7 所示.从图中可以看出,对于三集点附近主管连接焊缝出现开裂现象的节点试件 NJ-1,其被搭接管上靠近三集点的应变测点 T20、T21 的等效应力明显大于周边其他测点,说明在被搭接管受拉且其内隐藏部分未焊接情况下,被搭接管中的拉力尚不能均匀传递给下方主管壁,造成了被搭接管上内隐藏部分未焊接部位附近应力的集中,最后导致三集点处焊缝的开裂.对于内隐藏部分焊接的节点试件 NJ-2,测点 T17、T21 的等效应力较大,说明内隐藏部分焊接使支管轴力得到了很好地传递,使三集点及支管间焊缝两侧的应力水平相当.对于发生主管上壁局部屈曲的试件 NJ-5、NJ-6,主管壁上的最大等效应力均发生在受压支管与主管相交部位附近的 T1 测点处,这与试验现象相吻合.



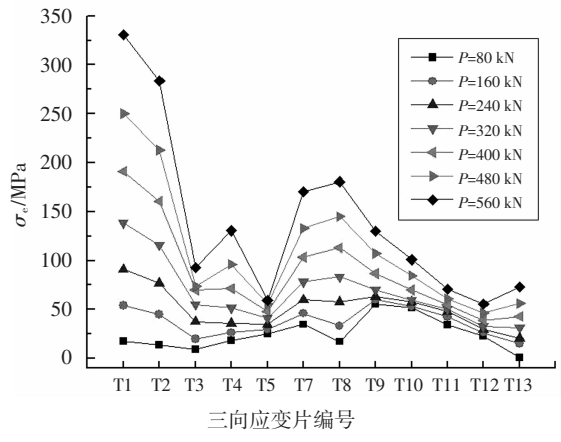
(a) 试件 NJ-1



(b) 试件 NJ-2



(c) 试件 NJ-5



(d) 试件 NJ-6

图 7 主管壁等效应力分布曲线

Fig.7 Equivalent stress distribution on tubewall of chord

2.2 试验节点有限元分析

采用有限元软件 ANSYS 对 N 形方圆钢管搭接节点试件进行了有限元分析.采用 SOLID95 弹塑性实体单元对钢管及焊缝进行了模拟,该单元有 20 个节点,每个节点有 3 个自由度,具有塑性、蠕变、应力刚化、大变形以及大应变的能力,能够适应不规则形状且精度没有损失.钢管材料采用双线性等向强化模型,屈服点、弹性模量取材性试验实测值,泊松比取 0.3,材料屈服遵循 Von Mises 屈服准则及相关流动法则.

模型中考虑了实际焊缝的存在,以考虑焊缝对节点刚度的贡献及对节点承载力的影响^[15].所有焊缝均按角焊缝近似模拟,焊脚尺寸取支管壁厚的 1.5 倍,焊缝材性同母材.模型中未考虑初始缺陷和残余应力的影响.

对被搭接支管内隐藏部分的模拟方法如下:当被搭接支管的内隐藏部分与主管壁焊接时,焊缝以实体单元模拟且焊缝单元与相邻主管、支管单元的

结点是连续的,见图 8(a);当未焊接时,被搭接支管与主管单元结点不连续,见图 8(b)。

利用试件节点及荷载的对称性,仅按实际节点的一半建立模型,并在对称面上设置了对称约束。模型的边界条件和加载方式与试验相同,主管右端和斜支管(被搭接支管)端部均为铰接,未考虑各杆件端部端板及加劲板的影响^[6],荷载直接施加在竖支管端面的节点上。节点的整体网格划分见图 8(c)所示,为了模拟弯曲应力,在管壁厚度方向,均设置了两层单元。为了更好地模拟焊缝周边区域受力情况,对主、支管相交部位的网格进行了加密。

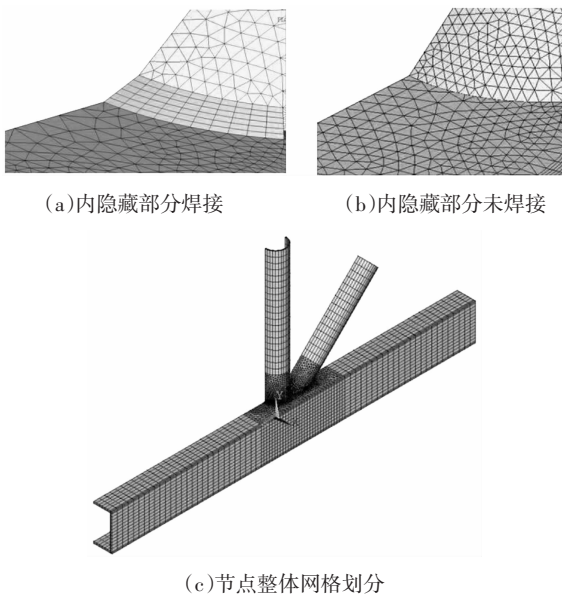


图 8 内隐藏部分模拟及节点网格划分

Fig.8 Simulation of hidden weld presence/absence and grid division of joint

2.3 有限元结果与试验结果对比

图 9 给出了节点试件 NJ-1、NJ-5 在极限荷载作用下有限元分析的破坏形态 (NJ-2、NJ-6 的破坏形态分别与 NJ-1、NJ-5 类似,故未列出)。从图中可以看出,对于支管相对较弱的节点 NJ-1,其受压支管根部发生了局部屈曲。对于支管相对较强的节点 NJ-5,节点破坏时出现了受压支管根部附近主管上壁局部屈曲。与图 6 试验结果对比可知,有限元计算除了不能直观模拟焊缝的开裂,其余的破坏现象与试验结果吻合较好。

图 10 给出了各试件的试验与有限元计算的竖支管荷载-支管与主管壁相对变形曲线。图中横坐标为沿支管轴线方向的两支管外壁上固定点与主管壁

相对变形(测点见图 5),并扣除了支管自身在轴力作用下的弹性变形,以主管壁内凹为正,外凸为负,即变形为正时对应支管受压,变形为负时对应支管受拉;纵坐标为竖支管荷载,以受压为正,受拉为负。比较试验曲线和有限元计算曲线可知,有限元计算得到的位移值普遍大于试验值,但极限荷载相差不大。产生偏差的主要原因有:1)有限元分析采用了双线性材料模型,与钢材实际材性有一定差别;2)有限元分析时未模拟焊缝缺陷,也未考虑焊接热影响区残余应力对节点性能的影响;3)为了提高计算效率,有限元分析未模拟节点试件端部的板件、拉耳及插销等部件。

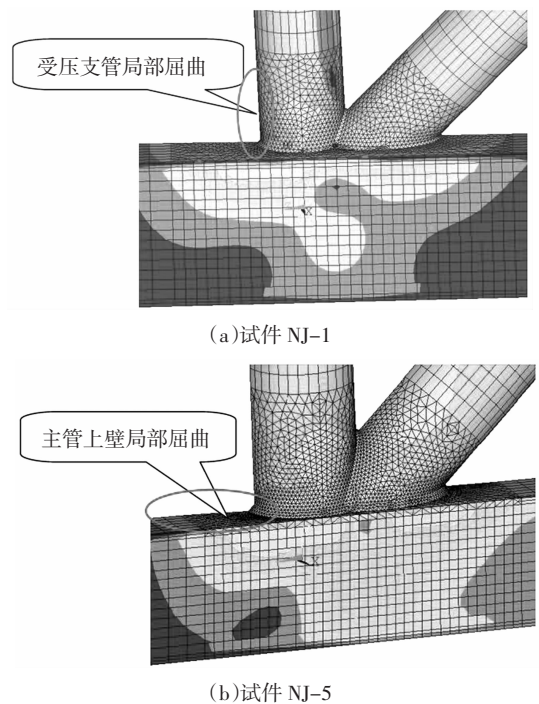
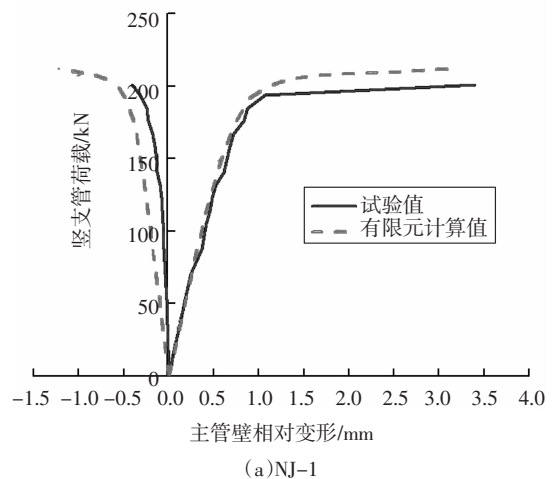


图 9 节点试件有限元分析的破坏形态

Fig.9 Failure modes of specimens by FEA



(a)NJ-1

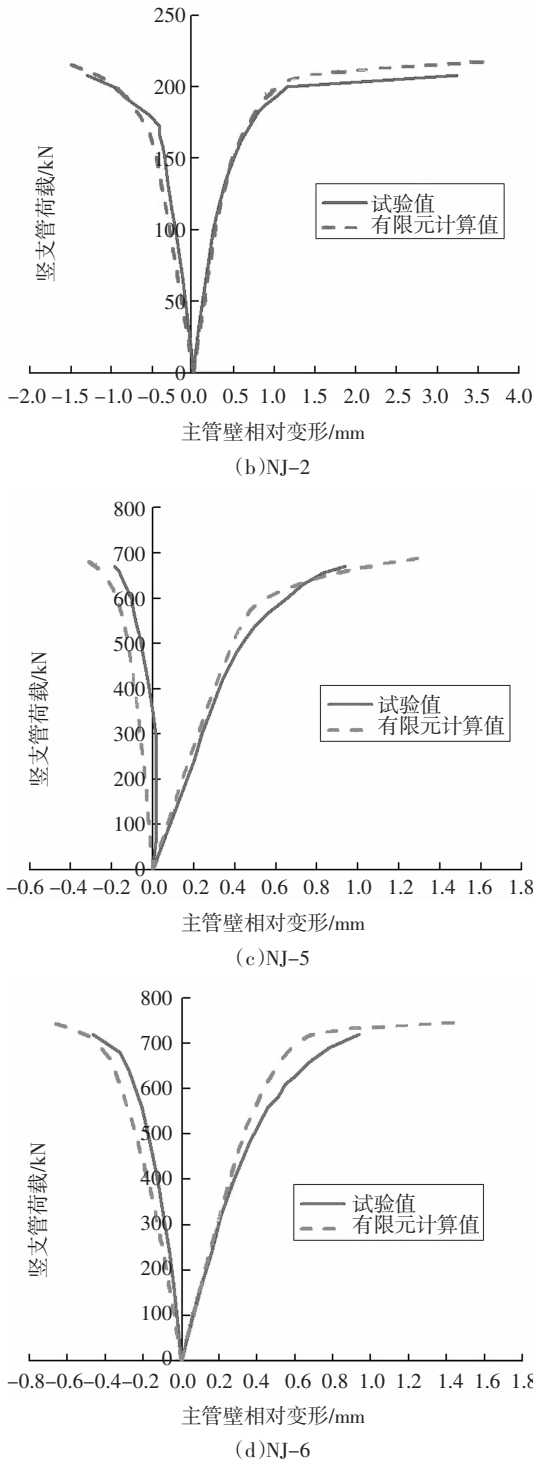


图 10 竖支管荷载-支管与主管壁相对变形曲线
Fig.10 Curves of vertical brace axial force versus relative deformation of tube wall of chord along brace

杆件承受轴力为主的钢管相贯节点的破坏准则有多种^[17-18],但普遍认同的准则为以下两种^[5]:1)极限强度准则:作用在支管上的轴力出现极值点;2)极限变形准则:主管管壁沿支管轴向变形达到某一限值(主管直径或边长的 0.03 倍).通常将节点承载力

取为极限强度准则和极限变形准则二者中的较小值.因本文的节点试件在破坏时,主管管壁相对变形较小,因此节点承载力根据极限强度准则来确定.

有限元分析得到的节点极限承载力与试验结果的对比见表 3,其中有限元计算结果为有限元计算终止后,依据上述极限承载力判别准则确定的竖支管轴向荷载值.从表中可以看出,有限元分析结果均略大于试验值,但最大未超过 6%,说明本文建立的有限元模型能很好地模拟 N 形方圆钢管搭接节点的极限承载力.

表 3 有限元计算结果与试验结果的对比

Tab.3 Bearing capacities by FEA and test

试件编号	节点类型	承载力试验值 N_e/kN	承载力计算值 N_c/kN	N_c/N_e
NJ-1	TN	201	212	1.055
NJ-2	TW	208	218	1.048
NJ-5	TN	670	689	1.028
NJ-6	TW	720	747	1.038

3 节点几何参数分析

考虑到工程实际,管桁架中除了存在被搭接支管受拉且内隐藏部分焊接节点(TW 类)和被搭接支管受拉且内隐藏部分未焊接节点(TN 类),也存在被搭接支管受压且内隐藏部分焊接节点(CW 类)及被搭接支管受压且内隐藏部分未焊接节点(CN 类).因此,本文对这 4 类 N 形方圆钢管搭接节点进行了参数分析,重点考察内隐藏部分焊接与否对搭接节点性能的影响.节点边界条件和加载方式如图 11 所示.

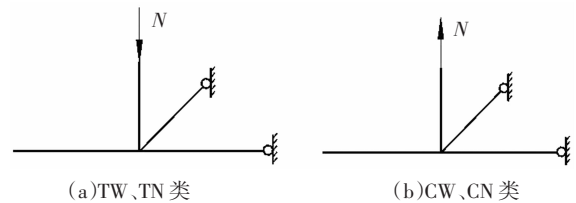


图 11 节点边界条件和加载方式
Fig.11 Boundary and load conditions of the joints

3.1 计算参数

由于相贯节点的几何参数数量很多,为便于对比分析,在选取节点模型的几何参数时,主管截面宽度和高度均取为 200 mm,主管的长度均取 1 200 mm,支管的轴线长度取 600 mm,斜支管与主管的夹角 θ 取为 45° . 变化无量纲几何参数 β, γ, τ 和 O , 共组合成不同几何参数的 81 个搭接节点,几何参数取值见表 4.下面对这 81 个节点分别在被搭接管受拉、受压情况下,考虑内隐藏部分焊接与否共 324 个模

图 12 列出了 N_{TN}/N_{TW} 、 N_{CN}/N_{CW} 与无量纲几何参数 β 、 γ 、 τ 和 O_v 的关系。从图 12(b)、12(d)、12(f) 中可以看出,对于被搭接管受压的节点,无论 β 、 γ 、 τ 取何值,内隐藏部分未焊接对节点承载力的降低不明显。主要原因在于被搭接管受压时,在轴压力作用下被搭接管端部内隐藏部分与主管上表面仍可以通过接触传力。从图 12(a)、12(c) 中可以看出,对于被搭接管受拉的节点,内隐藏部分未焊接时, β 、 γ 的取值对节点承载力降低程度有显著影响,尤其当 β 大于 0.4 时,承载力降低愈发明显。随着 β 的增大,支管相对越来越强,内隐藏部分未焊接使被搭接管在受拉状态下与主管间脱离的趋势增强。随着 γ 的增大,主管壁厚越来越薄,与之对应的被搭接管与主管间的焊缝焊脚尺寸减小,被搭接管内隐藏部分未焊接必然会导致节点的提前破坏。然而,对于被搭接管受拉的节点,当 τ 增大时,内隐藏部分未焊接的承载力与焊接的承载力之比,下降的幅度减小,如图 12(e) 所示,原因在 τ 于较大时,支管壁厚增大,与之对应的焊缝焊脚尺寸增大,内隐藏部分即使不焊,实存的连接焊缝也能减缓节点承载力的降低。此外,随着搭接率的增大,内隐藏部分所占的比例增大,不论被搭接管受拉还是受压,内隐藏部分未焊接节点承载力与内隐藏部分焊接节点承载力之比,不断减小,如图 12(g)、12(h) 所示,但被搭接管受拉的节点降低幅度明显大于被搭接管受压的节点。从图 12(h) 还可以看出,当搭接率不超过 60% 时,对于被搭接管受压的节点,内隐藏部分不焊接对承载力的影响很小,因此在此情况下,可考虑不焊。

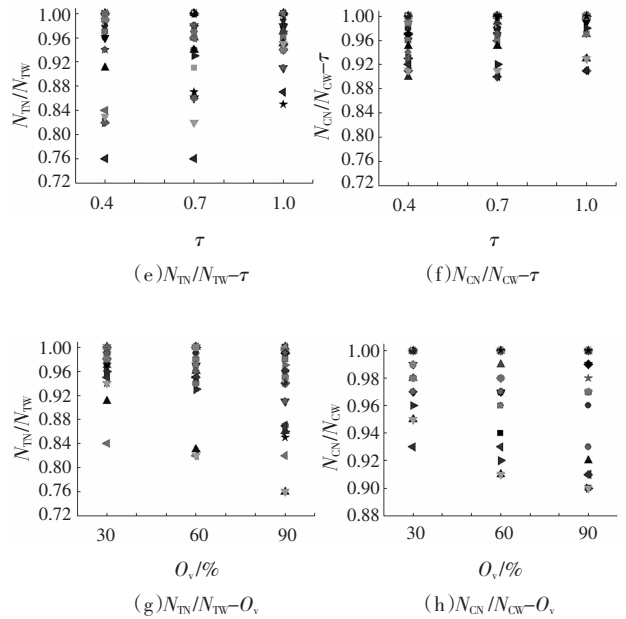
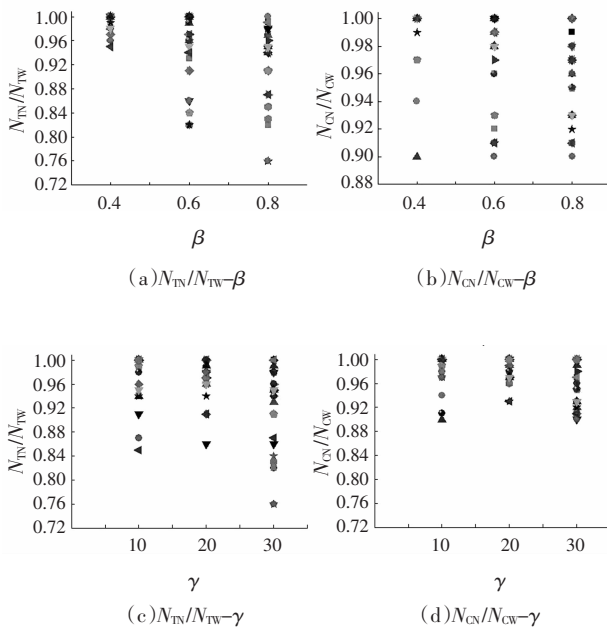


图 12 内隐藏部分焊接与否对节点承载力的影响

Fig.12 Effects of hidden weld absence or not on bearing capacity of joints

4 结 论

本文对 4 个 N 形方圆钢管搭接节点进行了试验研究和节点参数分析,得到如下结论:

1) 对支管较弱的节点试件 NJ-1、NJ-2,破坏时均发生了受压支管局部屈曲;对支管较强的节点试件 NJ-5、NJ-6,破坏时主管上壁均发生了局部屈曲。对于内隐藏部分未焊接的节点试件 NJ-1、NJ-5,还发生了两支管间连接焊缝的断裂破坏。

2) 内隐藏部分未焊接节点的承载力均小于或等于相同受力条件下内隐藏部分焊接节点的承载力,且被搭接管受拉的节点,其承载力较被搭接管受压的节点降低幅度要明显。

3) 对于被搭接管受压的节点,当搭接率不超过 60% 时,内隐藏部分不焊接对节点承载力影响较小,实际工程中可以考虑不焊;对于被搭接管受拉的节点,当支管直径与主管宽度比超过 0.4 时,内隐藏部分不焊接使节点承载力降低较多,此时建议对内隐藏部分焊接。

参考文献

[1] GB 50017—2003 钢结构设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,

- 2003: 105—115.
- GB 50017—2003 Code for design of steel structures[S]. Beijing: China Planning Press, 2003: 105—115. (In Chinese)
- [2] BS EN 1993-1-8:2005 Eurocode3: design of steel structures: part 1-8: design of joints[S]. London: BSI, 2005:101—132.
- [3] ANSI/AISC 360-10 Specification for structural steel buildings[S]. Chicago:AISC, 2010:140—154.
- [4] PACKER J A, WARDENIER J, ZHAO X L, *et al.* Design guide for rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading[M]. 2nd ed. Dortmund:LSS Verlag, 2009:16—73.
- [5] 赵宪忠, 陈誉, 陈以一, 等. 平面K型圆钢管搭接节点静力性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(4):23—29.
- ZHAO X Z, CHEN Y, CHEN Y Y, *et al.* Experimental study on static behavior of unstiffened overlapped CHS K-joints[J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(4):23—29. (In Chinese)
- [6] 吴捷, 戴雅萍, 赵宏康. 内隐藏焊缝不焊的K形搭接节点承载力[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2008, 41(2): 226—232.
- WU J, DAI Y P, ZHAO H K. Bearing capacity of overlap K joints with hidden weld absence [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2008, 41(2): 226—232. (In Chinese)
- [7] 杨文伟, 王秀丽, 虞磊峰. 圆钢管KK型搭接节点内隐藏焊缝焊接与否有限元分析[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2010, 31(1): 61—65.
- YANG W W, WANG X L, TUO L F. Finite element analysis for unstiffened overlapped CHS KK joints hidden welded and non welded [J]. Journal of Ningxia University (Natural Science Edition), 2010, 31(1): 61—65. (In Chinese)
- [8] GANDHI P, BERGE S. Fatigue behavior of T-joints: square chords and circular braces [J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(4): 399—404.
- [9] BIAN L C, LIM J K. Fatigue strength and stress concentration factors of CHS-to-RHS T-joints [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2003, 59(2):627—639.
- [10] MASHIRI F R, ZHAO X L, GRUNDY P. Stress concentration factors and fatigue behavior of welded thin-walled CHS-SHS T-joints under in-plane bending[J]. Engineering Structures, 2004, 26(13): 1861—1875.
- [11] PACKER J A, MASHIRI F R, ZHAO X L, *et al.* Static and fatigue design of CHS-to-RHS welded connections using a branch conversion method [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(1): 82—95.
- [12] 舒兴平, 朱正荣, 王元清. N型方圆钢管相贯节点足尺试验研究[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(1):66—70.
- SHU X P, ZHU Z R, WANG Y Q. Full-scale experimental research on tubular N-joints of square chords with circular braces[J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(1):66—70. (In Chinese)
- [13] 朱正荣, 舒兴平. 搭接N型方圆钢管节点极限承载力研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2008, 35(1):11—15.
- ZHU Z R, SHU X P. Study on the ultimate bearing capacity of overlapped N-joints of square chords with circular braces[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2008, 35(1):11—15. (In Chinese)
- [14] 舒兴平. 高等钢结构分析与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 253—255.
- SHU X P. Advanced analysis and design of steel structure [M]. Beijing: Science Press, 2006: 253—255. (In Chinese)
- [15] 袁智深. N形方主管圆支管相贯节点受力性能与设计方法研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2012:37—39.
- YUAN Z S. Research on mechanic behavior and design method of CHS-to-SHS N-joints [D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2012: 37—39. (In Chinese)
- [16] 胡浩, 李正良, 刘红军, 等. 空间复杂多支管柱节点受力性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(7): 49—58.
- HU H, LI Z L, LIU H J, *et al.* Research on mechanical properties of spatial complex multi-planar column joints[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(1):49—58. (In Chinese)
- [17] DEXTER E M, LEE M M K. Static strength of axially loaded tubular K-joints: I: behavior [J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(2):194—201.
- [18] WARDENIER J. Hollow sections in structural applications [M]. Zoetermeer: Bouwen Met Staal, 2002:72—73.