

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.031



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 加劲肋对异形钢管树形柱盖板过渡节点 受力性能的影响试验研究

徐金猛<sup>1</sup>, 熊刚<sup>1</sup>, 谢强<sup>1</sup>, 石宇<sup>1</sup>, 李双来<sup>2</sup>, 江志远<sup>2</sup>

(1. 重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点试验室; 土木工程学院, 重庆 400045;

2. 中铁建设集团有限公司, 北京 100040)

**摘要:**异形钢管树形柱节点构造复杂,采用盖板将树干和树枝进行连接,可以大幅降低施工难度,了解盖板加劲肋对此类节点力学性能的影响,对类似项目具有重要意义。以重庆东站异形钢管树形柱节点构造为例,分别对是否设置加劲肋的两个节点进行缩尺试验,研究加劲肋对异形钢管树形柱节点区的传力机理、应力分布及水平、节点区破坏模式、节点承载力等关键指标的影响。结果表明:加劲肋的引入显著提升了节点区的刚度,在相同荷载作用下,设置加劲肋的节点树枝竖向位移和盖板凹陷值明显减小,节点区应力分布更为均匀,峰值应力降低;未设置加劲肋的节点在加载过程中表现为盖板凹陷、树枝根部鼓曲以及节点区树干外鼓的复合破坏模式,而设置加劲肋的节点则主要表现为树枝根部局部失稳的单一破坏模式;加劲肋优化了荷载传递路径,使盖板及节点区树干的应力分布趋于平缓,减少了局部应力集中现象,树枝根部的应力水平略有增加,但整体仍处于弹性范围内;此外,设置加劲肋后,盖板及节点区树干的局部鼓曲程度大幅减小,节点的极限承载力从462kN提升至589kN,增幅达27%,显著提高了节点的安全性和可靠性。

**关键词:**异形钢管树形柱;盖板过渡节点;加劲肋;受力性能;试验研究

中图分类号:TU392.5 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(XXXX)XX-0001-10

## Experimental study on influence of stiffeners on the stress performance of transition nodes of tree shaped column cover plates with irregular steel pipes

XU Jinmeng<sup>1</sup>, XIONG Gang<sup>1</sup>, XIE Qiang<sup>1</sup>, SHI Yu<sup>1</sup>, LI Shuanglai<sup>2</sup>,  
JIANG Zhiyuan<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area; School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. China Railway Construction Group Co., Ltd., Beijing 100040, P. R. China)

**Abstract:** The construction of irregular steel pipe tree shaped column nodes is complex, and the use of cover

收稿日期:2024-12-04

基金项目:重庆市自然科学基金(2024NSCQ-MSX1077);重庆市技术创新与应用发展专项(CSTB2022TIAD-KPX0138)

作者简介:徐金猛(1998-),男,主要从事结构工程研究,E-mail:jimmeng\_xu@163.com。

谢强(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:xieqiang@163.com。

Received: 2024-12-04

**Foundation items:** Natural Science Foundation of Chongqing (No. 2024NSCQ-MSX1077); Chongqing Technology Innovation and Application Development Project (No. CSTB2022TIAD-KPX0138)

**Author brief:** XU Jinmeng (1998-), main research interest: structural engineering, E-mail: jimmeng\_xu@163.com.

XIE Qiang (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: xieqiang@163.com.

plates to connect the trunk and branches can greatly reduce the difficulty of construction. Understanding the influence of cover plate stiffeners on the mechanical properties of such nodes is of great significance for guiding the design of similar projects. This article takes the construction of special-shaped steel pipe tree column at Chongqing East Station as an example, and conducts scaled tests on two nodes with or without stiffeners to study the influence of stiffeners on key indicators such as force transmission mechanism, stress distribution and level, node failure mode, and node bearing capacity in the node area of the special-shaped steel pipe tree column. The research results indicate that the introduction of stiffeners significantly enhances the stiffness of the joint area, markedly reducing vertical branch displacement and cover plate deflection under identical loading conditions while improving stress distribution uniformity and lowering peak stresses. In contrast to non-stiffened joints that exhibit complex failure modes involving cover plate deflection, branch root buckling, and trunk bulging, stiffened joints demonstrate a simpler failure mechanism primarily characterized by local instability at branch roots. The stiffeners optimize load transfer paths, creating more gradual stress distributions in both cover plates and joint trunks while mitigating localized stress concentrations - though branch root stresses increase slightly, they remain within elastic limits. Furthermore, stiffeners substantially reduce local buckling in cover plates and joint trunks, boosting ultimate bearing capacity by 27% from 462 kN to 589 kN, thereby significantly improving joint safety and reliability.

**Keywords:** irregular shaped steel pipe tree; transition node of cover plate; stiffener; stress performance; experimental study

近年来,随着各种超大型机场、火车站以及展厅的加速建设,大跨结构不断完善并走向成熟,展现出规模庞大、功能复杂、造型新奇等众多特点。为满足力学及美学要求,钢结构树形支撑体系渐渐取代了传统梁柱体系,树形柱的树状造型美观、力流明确、可减小结构的实际跨度、经济性好,采用异形截面树干或树枝,还能收到优良的建筑效果。树干和树枝的可靠连接,是确保树形柱正常工作的关键,常用的节点有相贯焊接节点、铸钢节点、球节点等。对树形柱节点性能的研究,是钢结构领域的热点之一。

学者们对铸钢节点开展了大量研究。Haldimann-Sturm等<sup>[1]</sup>研究了铸钢节点疲劳性能,提出了确定铸造缺陷的允许初始尺寸方法。郭琪等<sup>[2]</sup>对铸钢节点进行疲劳试验研究发现,改进的有效缺口应力法能有效预测铸钢节点疲劳寿命变化趋势。Peng等<sup>[3]</sup>研究发现,由铸钢节点制成的管状结构的疲劳强度通常由铸钢节点和热轧管中短枝之间的环焊疲劳强度决定。Li等<sup>[4]</sup>通过试验和有限元分析,研究了三叉铸钢节点的载荷特性。Chen等<sup>[5]</sup>研究了各种载荷下的铸钢节点的破坏模式,包括节点核心区的破坏、偏心荷载作用下主管受压侧破坏和不均匀荷载作用下支管根部受压侧的破坏。吴卫华等<sup>[6]</sup>基于有限元分析发现,主管径厚比对二分叉铸钢节点抗弯极限承载力有显著影响。杜文凤等<sup>[7]</sup>通过研究总结了铸钢分叉节点的主要破坏模式。郑志远<sup>[8]</sup>研究发现,偏心荷载下三分叉铸钢节点易

在主、分管相交处发生局部屈曲及变形。王振喜<sup>[9]</sup>对四分叉铸钢节点进行有限元分析,计算节点在轴力、弯矩、剪力复合作用下的复杂应力、变形分布以及应力集中现象,并建议在实际应用中应尽量使四分叉铸钢节点受力以轴力为主,以提高结构可靠性。

也有学者开展了对树形柱焊接节点的相关研究。Kim等<sup>[10]</sup>研究了冷弯高强度钢焊接K形节点的破坏模式,结果表明,管焊接此类节点可能发生节点塑性破坏或支管断裂。常鸿飞等<sup>[11]</sup>研究发现,传统的梁柱焊接节点和梁拼接节点的设计方法无法满足树形柱节点抗震设计的要求,并强调了对树形柱进行整体设计的必要性。陈志江等<sup>[12]</sup>以广州宏城广场天幕工程为例,研究了“树状形态”仿生柱树杈焊接节点的制作技术,包括中频热弯、相贯线切割等工艺。萨鹏程<sup>[13]</sup>对相贯焊接节点进行了数值分析,揭示了节点受力全过程及几何参数对极限承载力的影响。

还有学者对树形柱开展了其他相关研究。Gan等<sup>[14]</sup>研究了低周往复作用下树形柱的受力性能,结果表明:随着轴向荷载水平的增加,树形柱的承载力和变形能力降低。Du等<sup>[15]</sup>研究了树状结构的机器学习找形方法,结果表明,机器学习找形方法不仅能解决非均匀荷载或者超静定荷载作用下不规则屋面的树状结构找形设计无法解决的问题,而且该方法效率更高。Md Rian<sup>[16]</sup>等探讨了树木的生物学功能和树木的力学性质及其形状,并研究了建筑

学中树状结构的演化与进展。

目前对铸钢节点和焊接节点的研究成果颇多,但对盖板过渡的树形柱焊接节点研究略显不足,对异形钢管树形柱盖板过渡节点的研究更是鲜见报道。笔者以重庆东站树形柱为基础,研究加劲肋对异形钢管树形柱盖板过渡节点性能的影响,揭示此类节点的传力机理和破坏模式。

1 试验概述

1.1 缩尺试件设计及制作

重庆东站树形柱效果图如图 1 所示,树干为异形钢管混凝土,节点区灌注 C40 混凝土,节点构造见图 2,节点过渡区高 1 500 mm,树干过渡区为台型,顶部设盖板,厚度为 50 mm,节点区内设 5 块加劲肋,见图 2。3 个树枝中的 2 个为方管,截面为 850

的材质为 Q390。各树枝与树干轴线角度均为 35°,圆管与方管之间的平面角度为 130°,两根方管之间的平面角度为 100°。

为研究加劲肋对节点区力学性能的影响,考虑现有的试验条件,结合有限元分析结果,采用 1:5 的缩尺比例制作两个节点试验试件,分别为有加劲肋和无加劲肋试件。树干主体壁厚 10 mm,圆钢管树枝为 φ152 mm×6 mm,方钢管树枝为 150 mm×100 mm×6 mm,树形柱盖板厚 10 mm,加劲肋厚 7 mm,布局及形状与实际工程相同,钢材材性为 Q235,未灌注混凝土。

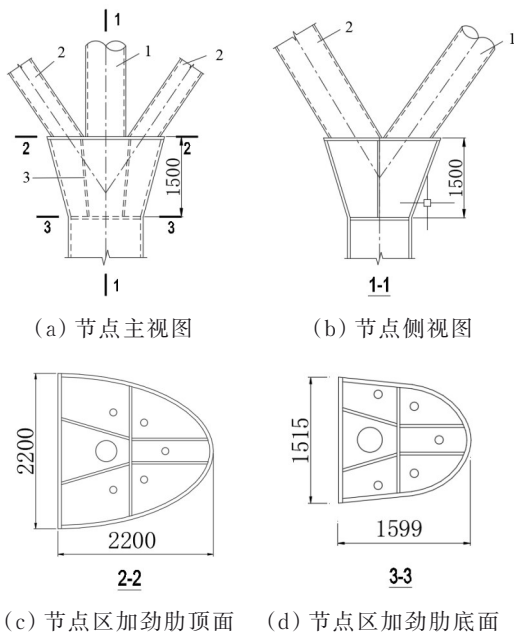
有加劲肋的缩尺试件见图 3,无加劲肋缩尺试件尺寸与有加劲肋的缩尺试件尺寸相同,不同之处在于节点过渡区未设置加劲肋。加工完成后试件如图 4。



图 1 重庆东站树形柱效果图

Fig.1 Renderings of tree shaped columns at Chongqing East Station

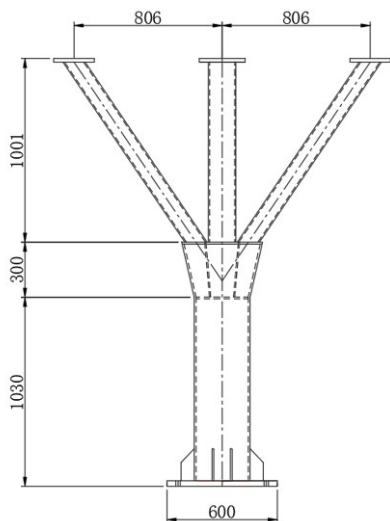
mm×500 mm×35 mm,1 个为圆管,截面为 φ750 mm×35 mm,树枝通过焊缝与盖板连接。所有钢材



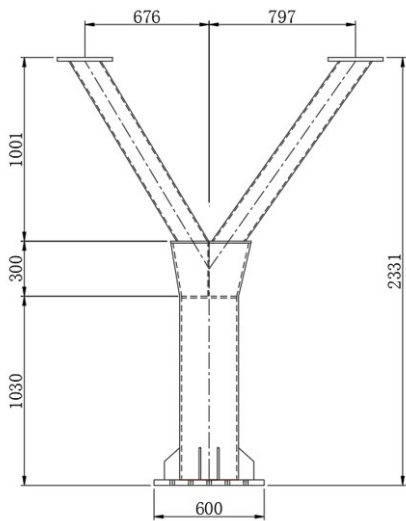
注:1.圆管树枝,2.方管树枝,3.加劲肋。

图 2 重庆东站树形柱节点图

Fig.2 Tree like column node diagram of Chongqing East Station



(a) 有加劲肋缩尺试件主视图



(b) 有加劲肋缩尺试件侧视图

图 3 有加劲肋缩尺试件图

Fig.3 Diagram of scaled specimens with stiffeners

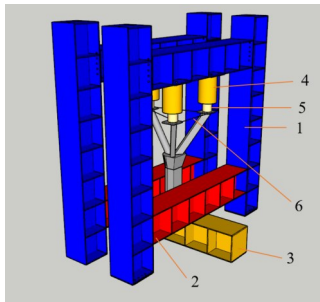


图4 缩尺试验构件照片

Fig.4 Photos of scaled down test components

### 1.2 加载装置设计

试验方案如图5所示,试件通过高强螺栓与地梁刚接连接,通过千斤顶在三个树枝顶部按等比例施加竖向荷载,为限制三个树枝的水平位移,在树枝之间设置拉杆,试件的装配如图6所示。



注:1.反力柱;2.纵梁;3.钢梁;4.千斤顶;5.传感器;6.拉杆。

图5 加载装置示意图

Fig.5 Schematic diagram of loading device



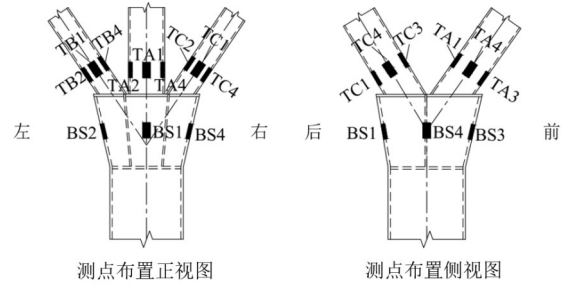
图6 现场试验装置图

Fig.6 On site testing device diagram

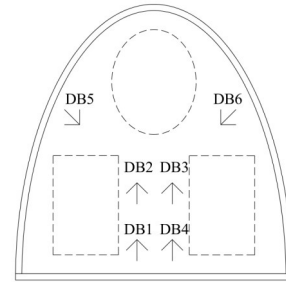
### 1.3 测点布置

为测试节点区树干、盖板及树枝根部的应变,在树干的变截面处设4个应变片,标记为BS1~BS4,在圆管树枝的根部设置4个应变片,标记为TA1~TA4,两个方管的根部分别设置4个应变片,左侧方管标记为TB1~TB4,右侧方管标记为TC1~TC4,在盖板顶部设6个应变花,分别标记为DB1~DB6。应变片和应变花的位置及关于前后、左右的定义见图7。

为测试树枝的变形,在3个树枝顶部布置3个位移计,在盖板上面布置1个位移计。



(a) 位移计与应变片布置



(b) 应变花布置

图7 测点布

Fig.7 Measuring point layout

### 1.4 加载制度

试验采用单调加载。对有加劲肋的节点,方管与圆管的荷载比值定为1:1.5,加载制度为:方钢管荷载0~260 kN内,每级加载为20 kN,对应圆钢管荷载0~390 kN内,每级加载为30 kN,方钢管260 kN以后,每级加载为10 kN,对应圆钢管390 kN以后,每级加载为15 kN,直至破坏。对无加劲肋的节点,为减小树干底部的弯矩,方管荷载与圆管荷载比值调整为1:1.7,加载制度为:方钢管荷载0~140 kN内,每级加载为20 kN,对应圆钢管0~238 kN内,每级加载为34 kN,方钢管140 kN以后,每级加载为10 kN,对应圆钢管238 kN以后,每级加载为17 kN,直至破坏。每级荷载加载完成之后持荷2 min,观察并记录试验现象。

## 2 试验现象及结果分析

### 2.1 无加劲肋树形柱试验现象与试验结果分析

#### 2.1.1 试验过程及现象

在方管加载到180 kN之前,试件无明显现象。当方管荷载加载到180 kN(对应圆管荷载加载到306 kN)时,树形柱盖板中部发生轻微凹陷,凹陷值为4.30 mm。当方管荷载加载到240 kN(对应圆管荷载为408 kN)持荷时,圆管荷载下降,下降值约为6 kN,圆管根部靠外侧发生鼓曲(图8(a)),盖板凹陷10.15 mm。方管荷载250 kN(对应圆管荷载为425 kN)持荷时,方管荷载下降6 kN,圆管荷载下降

11 kN, 盖板凹陷达 15 mm, 圆管外侧鼓曲加剧(图 8(b)、(c)), 台型过渡区树干靠盖板区域发生轻微外鼓, 可能是由于盖板变形带动, 两个方管根部无明显变形。此后继续加载, 当方管加载到 270 kN(对应圆管 459 kN)持荷时, 方管荷载下降 5 kN, 圆管荷载下降 20 kN, 以上变形进一步加剧, 盖板中部凹陷达 35 mm 左右, 发现两个方管根部也发生局部屈曲, 左侧方管变形位置发生在左、后两侧, 右侧方管变形位置发生在右、后侧(图 8(d)、(e)), 节点过渡区树干向外鼓起明显, 如图 8(f) 所示。荷载加至

462 kN 后, 变形持续增加, 必须减小荷载才能维持平衡, 试验结束。整个过程焊缝表面无明显损伤。

综上, 无加劲肋试件的变形顺序为: 盖板凹陷→圆钢管树枝根部鼓曲→节点过渡区树干外鼓→方钢管树枝根部鼓曲。

现象分析: 盖板的凹陷主要是因为无加劲肋盖板刚度过小, 在面外压力和弯矩联合作用下的弯曲变形导致; 节点过渡区树干外鼓是树干受力过大及盖板弯曲导致; 圆管和方管树枝根部的鼓曲是树枝在弯矩和轴力作用下发生的局部失稳导致。

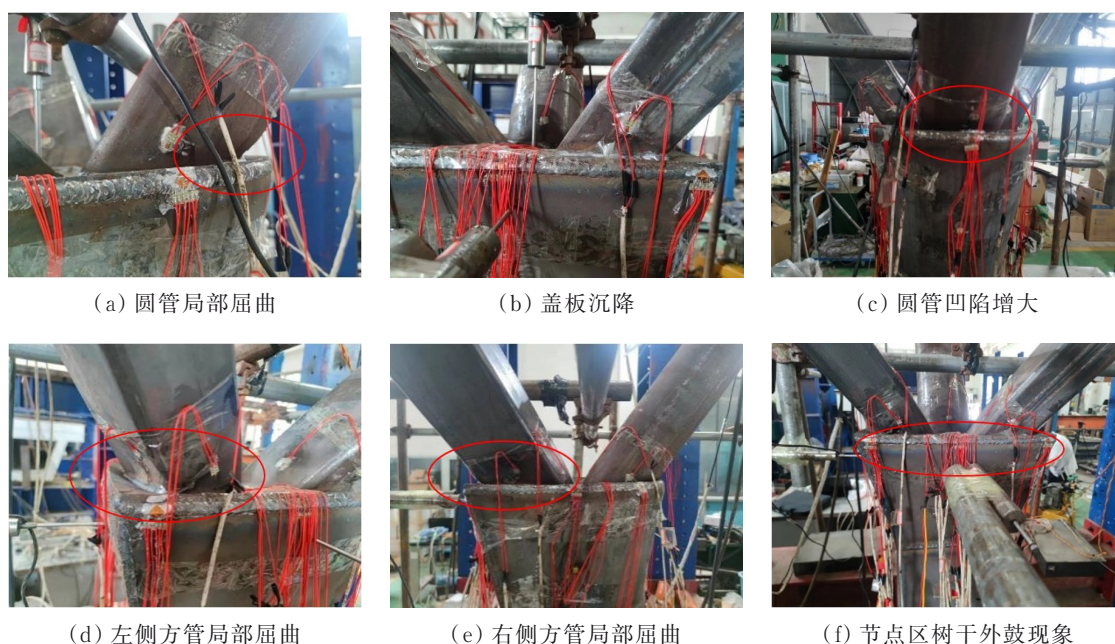


图 8 无加劲肋树形柱节点破坏现象

Fig.8 Failure phenomenon of tree shaped column nodes without stiffeners

### 2.1.2 荷载-位移曲线

各树枝上的荷载与对应竖向变形见图 9。圆管荷载在 300 kN 之前, 圆管的荷载和位移有较好的线性关系, 超出 300 kN 后, 刚度有所退化, 这与观察到圆管根部的鼓曲现象有关, 荷载达 360 kN 时, 刚度退化明显, 荷载达 400 kN 之后, 刚度基本消失, 接近进入塑性阶段。左右两侧方管在荷载达到 250 kN 之前, 方管荷载和位移有较好的线性关系, 且刚度相差不大, 左侧方管位移略大于右侧方管, 可能是加工和安装误差导致, 荷载超过 250 kN 后, 两侧方管的刚度迅速下降, 这也是方管根部的局部失稳及钢材屈服导致。

### 2.1.3 应变分析

节点过渡区树干应变发展过程以总荷载(施加于圆管和两侧方管竖向荷载综合)-应变曲线呈现, 见图 10。由图 10 可见: 初期, 所有应变均为压应变, 总荷载与应变保持较好的线性关系, 说明此区域钢材处于弹性状态。当总荷载达 690 kN(对应圆管荷

载约 300 kN)之后, BS1、BS2、BS4 三处的压应变继续增长, 相反 BS3 处的压应变开始减小。说明后续荷载使得 BS3 处出现拉应力, 结合观察到的现象分析, 这可能是圆管根部局部鼓曲, BS3 正好处于圆管鼓曲处的正下方, 同时此处的盖板鼓曲带动树干外鼓, 导致 BS3 出现拉应力, 当接近峰值荷载时, 鼓曲导致 BS3 的拉应力接近甚至超过由于压力产生的压应力, BS3 总体表现为拉应力, 与之一致的 BS1、BS2、BS4, 由于对应位置的鼓曲不明显, 故拉应力较小, 应力依然为压应力, 可见, 节点区的应力分布与盖板的刚度高度相关。

圆管树枝的应力发展过程以施加于圆管树枝的荷载-应变曲线呈现, 见图 11。从图 11 可以看出, TA1、TA2 和 TA4 位置均产生拉应变, TA3 位置产生压应变, 此种现象并不奇怪, 圆管根部的应力分布相当复杂, 受此处的圆管内力及盖板的刚度等因素影响。圆管根部并非轴心受压, 尚存在较大弯矩, 位于弯矩作用中和轴附近的 TA2 和 TA4 由于

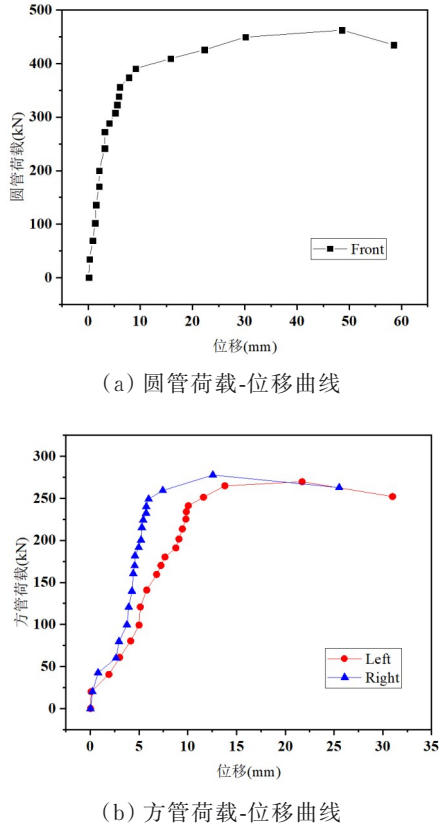


图9 无加劲肋荷载-位移曲线

Fig.9 Load-displacement curves without stiffeners

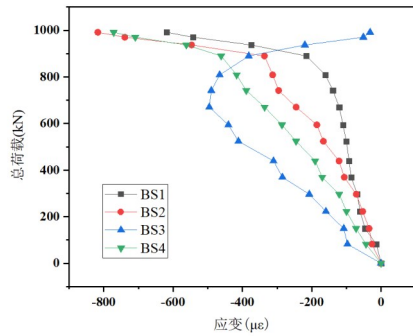


图10 无加劲肋节点区树干总荷载-应变曲线

Fig.10 Total load-strain curves of tree trunk in the node area without stiffeners

弯矩产生的应力不大,主要由轴心压力产生的压应力;当荷载较大时,盖板凹陷也会影响应力的分布,盖板靠中部的凹陷带动圆管根部的变形,使得靠近中部区域的圆管纤维伸长,产生拉应力,越靠近中部伸长量越大,拉应力越大,故TA2和TA4增长较小。TA1由于弯矩产生的拉应力与由轴心压力产生的压应力相当,故应力较小;当荷载较大时,TA1侧圆管纤维伸长量较大,故TA1的拉应力增长较快。TA3处弯矩产生的压应力与轴力产生的压应力叠加,压应力明显较大;当荷载较大时,虽然盖板发生凹陷,但TA3接近盖板的边缘,受盖板凹陷

的影响较小,仍然以压应力为主,后期由于局部屈曲的原因,TA3附近的应力分布更为复杂,当位于局部屈曲的凹面时,压应力增加,位于凸起时,也可能出现拉应力。

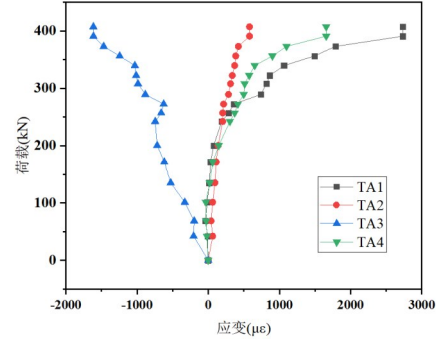


图11 无加劲肋圆管荷载-应变曲线

Fig.11 Load-strain curves of circular tube without stiffeners

两侧方管的应力发展过程以施加于方管树枝的荷载-应变曲线呈现,以右侧方管为例加以说明,见图12。方管根部为双向压弯构件,弯矩以绕TC1和TC3连线的轴线为主,对应的弯矩称为主弯矩,另外一个方向的弯矩称为次弯矩。TC1和TC3接近于主弯矩作用的中和轴,故其应力主要由轴力产生的压应力。两者数值上略有差异,是因为次弯矩的原因导致的,弯矩使TC2处受拉,TC4处受压,综合表现为TC2为拉应力,TC4为压应力。当荷载超过220 kN时,受压侧出现局部屈曲,TC4位于鼓曲的内侧,压应力增长迅速。相较圆管根部,由于方管根部附近盖板凹陷相对较小,盖板对方管根部的应力影响减弱。

盖板顶部各区域应变以总荷载(施加于圆管和两侧方管竖向荷载综合)-主应变曲线呈现,主应变由应变花测得的为 $\epsilon_0^\circ$ 、 $\epsilon_{45^\circ}$ 、 $\epsilon_{90^\circ}$ 通过坐标变换计算得

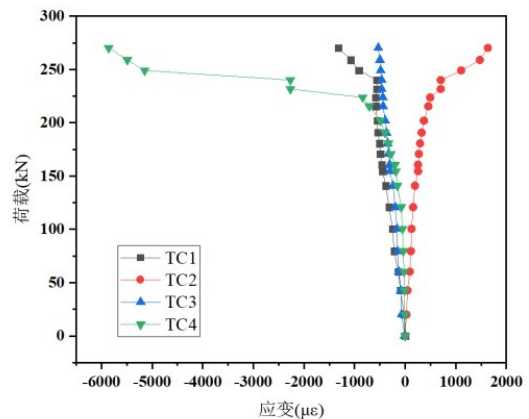


图12 无加劲肋右侧方管荷载-应变曲线

Fig.12 Load-strain curves of right square tube without stiffeners

到,各测点主应变方向见图 13。

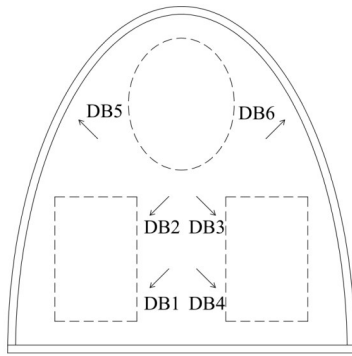


图 13 无加劲肋时盖板主应力方向图

Fig.13 Diagram of principal stress direction of cover plate without stiffeners

盖板各测点总荷载-主应变值曲线见图 14。盖板的应力分布也是相当复杂,盖板似于支撑在树干上的板,周边的约束刚度、树枝的形状及大小都会影响盖板的应力分布,盖板的中央位置产生正弯矩,使得盖板上表面受压,如 DB2 和 DB3。盖板的周边,由于树干的嵌固作用,产生负弯矩,使得表面盖板上表面受拉,如 DB1、DB4、DB5 和 DB6,试验缺少对盖板中央变形最大处应力的检测,稍显不足。

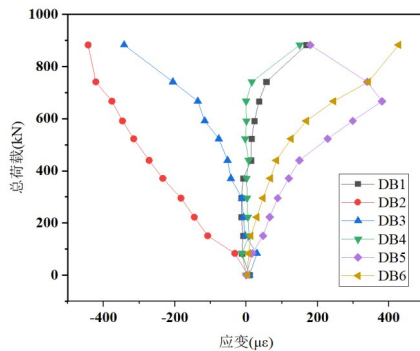


图 14 无加劲肋盖板总荷载-应变曲线

Fig.14 Total load-strain curves of cover plate without stiffeners

## 2.2 有加劲肋树形柱试验现象与试验结果分析

### 2.2.1 试验过程及现象

在方管加载到 260 kN 之前,试件无明显变形。当方管荷载加载 360 kN(对应圆管荷载为 540 kN)持荷时,方管荷载下降值约为 5 kN,圆管荷载下降值约为 15 kN,圆管稍向后侧弯曲(图 15(a))和左侧弯曲(图 15(b))。当方管从 390 kN 加至 400 kN(对应圆管由 585 kN 加至 600 kN)过程中,圆管根部靠外侧发生鼓曲(图 15(c)),同时圆管向左侧和后侧两个方向的弯曲幅度增大(图 15(d)、(e)),方管上部出现轻微扭转,荷载下降才能维持平衡,方管荷载下降至 380 kN,圆形钢管荷载下降到 511 kN,试验结束。整个过程树干盖板无明显变形,焊缝表面无明显损伤。

由此可见,有加劲肋试件的变形顺序为:圆钢管外侧根部鼓曲→圆钢管向左侧和后侧弯曲→方管轻微扭转。

现象分析:圆管外侧根部弯曲是压力和弯矩共同作用导致变形;圆管向左侧弯曲主要是左右方管荷载不一致导致,圆管向后侧弯曲主要是方管荷载之和与圆管荷载不一致导致;方管扭转主要是因为加载过程中左右方管荷载加载速率存在一定差异。

### 2.2.2 荷载-位移曲线

各树枝上的荷载与对应的竖向变形见图 16。圆管在 560 kN 之前,荷载与位移保持较好线性关系,当荷载达到 589 kN 以后,刚度有所退化,这与观察到圆管根部的鼓曲现象有关,之后刚度迅速减小,至峰值荷载后,刚度基本消失。由于方钢管未出现鼓曲现象,左右两侧方管在整个加载过程中荷载和位移有较好的线性关系,未有明显的刚度退化现象。

### 2.2.3 应变分析

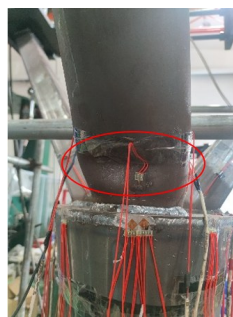
节点过渡区树干应变发展过程以总荷载(施加于圆管和两侧方管竖向荷载综合)-应变曲线呈现,见图 17。由图 17 可见:所有应变均为压应变,总荷



(a) 圆管稍向后弯



(b) 圆管稍向左弯



(c) 圆管局部屈曲



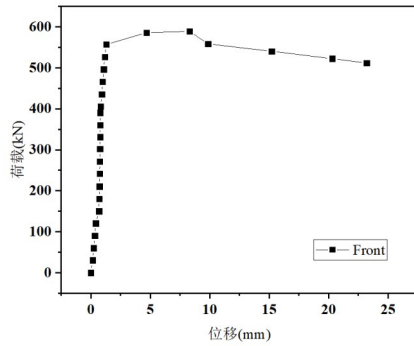
(d) 圆管向后弯曲幅度增大



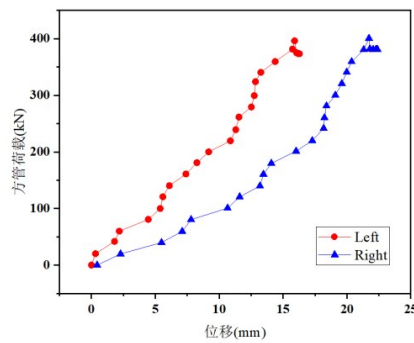
(e) 圆管向左弯曲幅度增大

图 15 有加劲肋树形柱节点破坏现象

Fig.15 Damage phenomenon of tree shaped column nodes with stiffeners



(a) 圆管荷载-位移曲线



(b) 方管荷载-位移曲线

图 16 有加劲肋荷载-位移曲线

Fig.16 Load-displacement curves with stiffeners

载与应变保持较好的线性关系,测点处钢材处于弹性状态。总体来讲,BS1处的压应变小于BS2、BS3、BS4处的压应变,主要原因是,设置加劲肋后,竖向荷载主要通过加劲肋传递给树干,BS2、BS3、BS4均位于加劲肋所在位置,刚度较大,而BS1位于两个加劲肋之间,刚度相对较小。

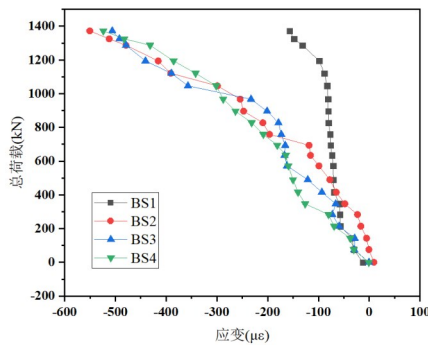


图 17 有加劲肋节点区树干总荷载-应变曲线

Fig.17 Total load-strain curves of node area trunk with stiffeners

圆管树枝的应力发展过程以施加于圆管树枝的荷载-应变曲线呈现,见图 18。从图 18 可以看出,TA1、TA3和TA4位置均产生压应变,TA2位置产生拉应变,主要是因为圆管向左侧发生弯曲,圆管根部左侧受拉,右侧受压,所以TA2产生拉应变,

TA4产生压应变。TA3处弯矩产生的压应力与轴力产生的压应力叠加,压应力明显较大;当荷载较大时,节点区刚度较大,盖板变形较小,TA3处发生局部屈曲,应变较大。TA1在荷载达到400 kN之前,主要是弯矩以及轴力产生的压应力,400 kN之后,圆管向后侧发生弯曲,圆管根部由于盖板的约束,TA1侧相当于受拉侧,所以产生一定的拉应力,故图中TA1应变发生回弹趋势。

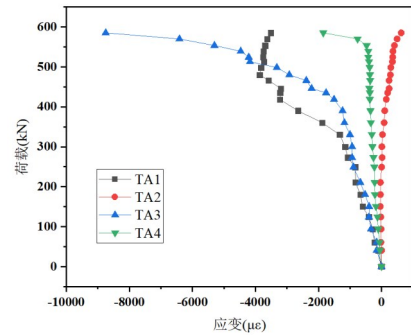


图 18 有加劲肋圆管荷载-应变曲线

Fig.18 Load-strain curves of circular tube with stiffeners

两侧方管的应力发展过程以施加于方管树枝的荷载-应变曲线呈现,以左侧方管为例加以说明,见图 19。方管根部为双向压弯构件,弯矩以绕TB1和TB3连线的轴线为主,对应的弯矩称为主弯矩,另外一个方向的弯矩称为次弯矩,TB1和TB3接近于主弯矩作用的中和轴,其应力主要由轴力产生的压应力,两者数值上略有差异,是次弯矩的原因导致的。而主弯矩作用下,TB1处压应力较大,TB3处压应力较小。

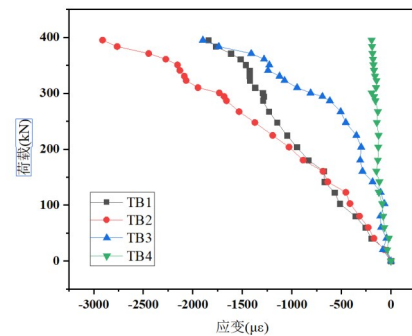


图 19 有加劲肋左侧方管荷载-应变曲线

Fig.19 Load-strain curves of left square tube with stiffeners

有加劲肋盖板顶部区域各测点的主应变与无加劲肋盖板顶部区域测点主应变方向变化甚小,不再展示相关主应变方向图。

盖板各测点总荷载-主应变曲线见图 20。由于加劲肋的存在,整体保持较好的线性关系。DB1、

DB4 处于对称位置其应变为拉应变,由于 DB1、DB4 下侧加劲肋较为集中,两者拉应变较小。DB2 和 DB3 处于盖板中间,其压应变较大,主要是该位置处是加劲肋相交位置,刚度较大,盖板上应力在此容易发生应力集中,加载过程中,盖板发生凹陷,导致 DB2 和 DB3 压应变较大。DB5 和 DB6 处于盖板的边缘处,由于盖板的周边,由于树干的嵌固约束,产生负弯矩,使得表面盖板上表面受拉,所以 DB5 和 DB6 产生的拉应变较大。

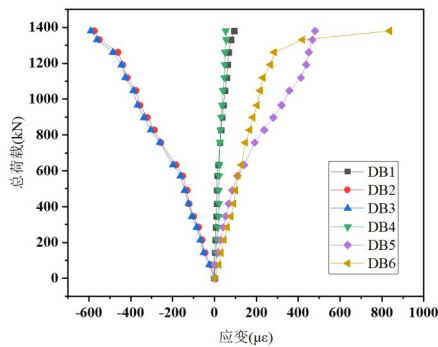


图 20 有加劲肋盖板总荷载-应变曲线

Fig.20 Total load-strain curves of cover plate with stiffeners

### 3 试验结果对比分析

#### 3.1 荷载-位移曲线对比

通过对两个试验的荷载-位移曲线对比可见,同一荷载级下有加劲肋树形柱圆管分支位移均小于无加劲肋树形柱圆管分支位移,主要是因为树形柱中树枝与树干相连,共同受力,上部树枝位移很大,节点区域布置加劲肋,对盖板提供支撑,提升了节点区域的刚度,相当于对树形柱节点进行了约束,在一定程度上限制了节点的位移,两者分支产生的位移一致,故设置加劲肋能减小分支位移。未设置加劲肋的树形柱,盖板无支撑点,其节点区域刚度较低,节点区域盖板下陷严重,分支的位移受盖板下陷影响较大,当盖板下陷同时牵连分支产生位移。相同荷载下有加劲肋树形柱方管分支位移大于无加劲肋方管分支位移主要是因为有加劲肋树形柱加载为偏压加载,方管侧荷载大于圆管侧荷载,所以方管侧位移较大。

#### 3.2 节点区树干总荷载-应变曲线对比

无加劲肋树形柱节点区树干整体外鼓,左右两侧以及后侧压应变趋势基本上保持一致,前侧(BS3)则加载到 700 kN 时应变趋势出现变化,主要是由于节点区域变截面树干钢管形状相较于其他 3 个位置较为尖锐,且节点区域无约束,节点区域发生外鼓,外鼓波峰未处于同一水平面上。有加劲肋

树形柱节点区树干整体处于受压状态,其中后侧(BS1)应变较小,其余 3 处应变增长趋势一致。由于节点区域设置了加劲肋,加劲肋对节点区域树干具有一定的约束作用;其次,设置加劲肋能够分担盖板部分荷载,使得盖板上部分荷载通过加劲肋直接传递到下部树干,节点区应变整体较小。

### 3.3 分支荷载-应变曲线

#### 3.3.1 圆管荷载-应变曲线

同一荷载下,无加劲肋树形柱 TA3 处应变大于有加劲肋树形柱的应变,主要是因为无加劲肋,节点区刚度较小,TA3 处的局部屈曲受盖板下陷影响较大,而有加劲肋的树形柱,节点约束较强,盖板变形较小,其 TA3 处的局部屈曲则以钢管本身的局部屈曲为主,所以有加劲肋的应变较小。无加劲肋树形柱 TA1 从加载开始,节点区刚度较小,盖板与树干之间相当于铰接,节点约束弱,所以从始至终均为拉应变;然而有加劲肋的树形柱 TA1 则始终全程为压应变,当圆管向后侧发生弯曲,TA1 位置处应变趋势反向变化。

#### 3.3.2 方管荷载-应变曲线

有加劲肋树形柱方管并未发生局部屈曲,两个试件里面方管的主弯矩都是 TB(C)1 和 TB(C)3 的连线上,在荷载达 200 kN 前,同一荷载下无加劲肋树形柱方管应变小于有加劲肋树形柱方管应变,但荷载达 200 kN 以后,无加劲肋树形柱分支应变急剧增加,钢材屈服;而有加劲肋树形柱则在 300 kN 以后钢材才开始屈服。

### 3.4 盖板总荷载-应变曲线

同一荷载下,无加劲肋的树形柱盖板应变大于有加劲肋的树形柱盖板的应变,无加劲肋树形柱盖板刚度较小,其总荷载-应变线性关系较差;有加劲肋的树形柱盖板总荷载-应变线性关系较好。原因是节点区内有加劲肋,盖板上的荷载可以通过加劲肋和节点区树干传递到下侧树干,而且加劲肋布置形式较为合理,荷载传递路径多,使得盖板上应力分布比较均匀。此外,二者应变增长趋势相同,相同位置处应变的主方向基本上一致,且都处于弹性范围内。

## 4 结论

通过对是否设置加劲肋的树形柱节点对比缩尺试验研究,得到以下结论:

1) 加劲肋可提高节点及树形柱的刚度。相同荷载作用下,设置加劲肋树形柱树枝的竖向位移和节点盖板的凹陷值较未设置加劲肋的对应值减小。

2) 加劲肋影响节点区的应力分布及水平。设

置加劲肋后,节点区树干及盖板的应力小于未设置加劲肋时的值,且应力分布更趋于平缓,树枝根部的应力却较未设置加劲肋时略有增加。

3)加劲肋影响节点的破坏模式。未设置加劲肋的试件,盖板在压力作用下发生明显的下陷,同时在树枝端部弯矩作用下发生弯曲,进而引起节点区树干外鼓,之后树枝在根部发生局部失稳破坏,此类节点属于典型的复合破坏模式;设置加劲肋的试件,盖板和节点区树干变形不明显,主要表现为树枝在根部发生局部失稳破坏的单一破坏模式。

4)设置加劲肋可以明显提高节点的承载能力。对比研究表明,设置加劲肋试件的极限承载力为 589 kN,较未设置加劲肋试件的极限承载力为 462 kN,提高约 27%。

## 参考文献

- [1] HALDIMANN-STURM S C, NUSSBAUMER A. Fatigue design of cast steel nodes in tubular bridge structures [J]. *International Journal of Fatigue*, 2008, 30 (3): 528-537.
- [2] 郭琪, 黄欣, 韩庆华, 等. 铸钢节点对接焊缝有效缺口应力分析[J]. *土木建筑与环境工程*, 2018, 40(3): 23-30. GUO Q, HUANG X, HAN Q H, et al. Effective Notch stress analysis of butt weld on cast steel joint [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2018, 40(3): 23-30. (in Chinese)
- [3] PENG Y, ZHU X L. Fatigue strength estimation of butt-welded joints between cast-steel and hot-rolled-steel plates [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2024, 214: 108493.
- [4] LI Z H, ZHANG Y Z, DU W F, et al. Experimental investigation and simulation analysis of cast-steel joints under vertical pressure [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 11276.
- [5] CHEN F, SUN Y, SUN S X, et al. Study on failure modes and calculation method of the cast steel joint with branches in treelike structure [J]. *Archives of Civil Engineering*, 2024: 589-604.
- [6] 吴卫华, 董正方, 杜文凤. 树状结构二分叉铸钢节点抗弯极限承载力的几何影响因素及计算方法研究[J]. *钢结构*, 2016, 31(8): 18-21, 32. WU W H, DONG Z F, DU W F. Study of geometrical factors and computing method for the ultimate flexural capacity of cast-steel joint with two branches in tree-like structure [J]. *Steel Construction*, 2016, 31(8): 18-21, 32. (in Chinese)
- [7] 杜文凤, 孙云, 刘琦. 树状柱中铸钢分叉节点的典型破坏模式研究[C]//第十七届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 天津, 2017: 834-840.
- DU W F, SUN Y, LIU Q. Study on typical broken speech mode of cast steel bifurcation joint in dendritic column [C]//*Proceedings of the 17th National Symposium on Modern Structural Engineering*. Tianjin, 2017: 834-840. (in Chinese)
- [8] 郑志远. 树状形三分叉铸钢节点在偏心荷载下的力学性能研究[J]. *钢结构*, 2018, 33(11): 102-106. ZHENG Z Y. Research on mechanical properties of tree-shaped trifurcated cast steel joints under eccentric loads [J]. *Steel Construction*, 2018, 33(11): 102-106. (in Chinese)
- [9] 王振喜. 树状结构四分叉铸钢节点受力性能分析[J]. *钢结构*, 2016, 31(10): 55-60. WANG Z X. Finite element analysis on the bearing capacity of a cast-steel joint with four branches in tree-like structure [J]. *Steel Construction*, 2016, 31(10): 55-60. (in Chinese)
- [10] KIM S, LEE C. Experimental investigation of cold-formed high strength steel K joints [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2023, 149(9): 04023125.
- [11] 常鸿飞, 夏军武, 吴渭, 等. 钢框架树状柱节点整体设计研究[J]. *建筑钢结构进展*, 2005, 7(3): 49-51, 40. CHANG H F, XIA J W, WU W, et al. A study on the design of steel column-tree joint [J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2005, 7(3): 49-51, 40. (in Chinese)
- [12] 陈志江, 柳跃强, 陈辉, 等. “树状形态”仿生柱树杈焊接节点制作技术[J]. *施工技术*, 2016, 45(3): 5-8. CHEN Z J, LIU Y Q, CHEN H, et al. Production technology of welding joints of dendriform bionic columns [J]. *Construction Technology*, 2016, 45(3): 5-8. (in Chinese)
- [13] 萨鹏程. 树状结构空间节点性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009. SA P C. The property analysis of dendriform structure space joint [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009. (in Chinese)
- [14] GAN D, HE Z H, HUANG H H. Investigation of cyclic behavior of full-scale tree-like hollow structural section columns with infilled concrete [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2022, 194: 107339.
- [15] DU W F, ZHAO Y N, WANG Y Q, et al. Novel machine learning approach for shape-finding design of tree-like structures [J]. *Computers & Structures*, 2022, 261: 106731.
- [16] RIAN IMD, SASSONE M. Tree-inspired dendriforms and fractal-like branching structures in architecture: A brief historical overview [J]. *Frontiers of Architectural Research*, 2014, 3(3): 298-323.