

# Q690 高强钢加强型相贯节点抗弯刚度试验研究

杨俊芬<sup>1</sup>, 张 涛<sup>2</sup>, 彭奕亮<sup>3</sup>

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 赛鼎工程有限公司, 山西 太原 030032; 3. 河南省电力勘测设计院, 河南 郑州 450007)

**摘要:** 在钢管塔结构的设计中, 节点刚度是重要参数, 随着高强钢在变电构架中的应用, 对高强钢相贯节点抗弯刚度的研究日趋重要。本文对 Q690 高强钢管相贯节点采用瓦形板加强、内隔环加强和内套筒加强的三种加强方式进行了试验研究, 得出不同加强方式对节点刚度的影响, 并以欧洲规范中节点初始刚度的判断准则分析了节点的刚度性能, 得出对于采用 Q690 高强钢的人字柱加强型相贯节点不能按照刚性节点进行设计, 而应作为半刚性节点进行设计; 最后对瓦形板及内隔环对节点的作用机理进行了分析说明。

**关键词:** Q690 高强钢; 加强型相贯节点; 抗弯刚度; 半刚性; 变电构架

**中图分类号:** TU392.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2015)01-0039-07

## Experimental study on flexural rigidity of Q690 high strength steel enhanced tubular joints

YANG Junfen<sup>1</sup>, ZHANG Tao<sup>2</sup>, PENG Yiliang<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Sedin Engineering Co. Ltd., Taiyuan 030032, China; 3. Henan Electric Power Survey and Design Institute, Zhengzhou 450007, China)

**Abstract:** The joint stiffness is an important parameter in the design of steel tower structures. With the application of high strength steel in the substation frame structures, research on the flexural rigidity of the tubular joints that are made of high strength steel has become increasingly important. In this paper, an experiment study was conducted on three types of tubular joints which were enhanced by tile shaped plate, inner annular plate, and inner sleeve respectively, in order to get the influence of different reinforcement on the joint stiffness. By analyzing the different parameters of each enhanced method, the influence of various parameters on the joint stiffness was obtained. The stiffness performances of each joint were analyzed by the joint initial stiffness criterion specified in the European specification. The results show that the Q690 high strength steel enhanced tubular joints should not be taken as rigid joints in engineering design, but as semi-rigid joints. The action mechanism of tile shaped plate and inner annular plate on the tubular joint was explained at last.

**Key words:** Q690 high strength steel; enhanced tubular joints; flexural rigidity; semi-rigid; substation truss

随着我国输变电工程的飞速发展, 全钢结构构架已逐步成为我国变电站构架的主流。其中, 人字柱构架是变电构架常用的结构形式之一。人字柱构架由“A”型钢管柱和三角形桁架梁组成, 构架梁和构架柱采用铰接, 构架纵向设置端撑形成抗侧力体系, 这类构架的典型结构布置图见图 1。构架柱通常采用直焊缝钢管, 在构架柱中部一般设置 1~2 道

横撑, 横撑通常与构架柱截面相同, 相贯节点作为圆管结构中最普遍的节点形式在人字形变电构架结构中广泛使用。

在钢管塔结构的设计中, 对节点刚度的研究极为重要, 其主要表现在以下方面。首先, 节点的刚度和转动能力对稳定设计中构件计算长度的确定很重要; 其次, 节点刚度对结构的自振频率和动力性能都有影响, 进而影响结构的抗震性能; 再次, 节点刚度对疲劳验算和结构抗火验算很重要; 最后, 对一些需严格控制变形的结构, 需要知道节点刚度后才能控制结构位移<sup>[1]</sup>。当节点的刚度不能达到整体结构对节点刚度的要求时, 则要对节点采取加强措施。目前国内外的规范中很少涉及加强节点的设计公式。另外由于高强钢强度高, 在相同设计荷载下可以减小构件截面, 从而节省材料, 有较高的经济效益, 所以, 对 Q690 相贯节点加强后受力性能

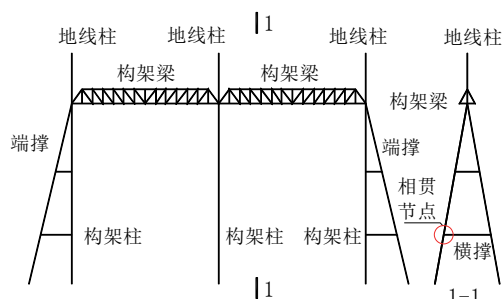


图1 人字柱构架正立面、侧立面图

Fig.1 Facade and side elevations of herringbone column framework

收稿日期: 2014-04-04

修改稿日期: 2015-02-01

基金项目: 住房和城乡建设部 2014 年科学技术项目 (2014-K2-011); 陕西省自然科学基金面上项目 (2014JM7244); 陕西省教育厅专项科研计划项目 (2013JK0977)

作者简介: 杨俊芬(1979-), 女, 副教授, 博士, 从事钢结构工程的研究和教学工作。E-mail: yangjfgm@xauat.edu.cn

的研究有着很重要的理论和现实意义. 本文采用工程中常用的加强方式<sup>[2]</sup>对相贯节点进行加强, 无加强和采用三种加强方式的节点示意图见图 2. 此相贯节点与管桁架结构中的相贯节点在结构形式和受力形式上都有差异, 因此不能直接按照《钢结构设计规范》(GB50017-2003)<sup>[3]</sup>中第 10.1.4 条的规定将节点视为铰接.

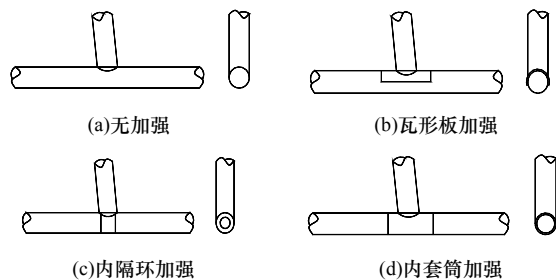


图 2 相贯节点及其加强方案示意图

Fig.2 Diagram of tubular joints and enhanced method

目前国内外关于圆钢管相贯节点的研究较为普遍, 陈以一等<sup>[4]</sup>对多种型式的圆钢管相贯节点的抗弯刚度进行了研究, 结果表明在一定的几何参数条件下, 相贯节点在直至相连腹杆达到屈服强度之前, 可以作为全刚接节点对待. 王伟<sup>[5]</sup>对 2 个 X 型和 2 个 KK 型节点的弹性刚度和承载力进行了测试, 发现轴力性质, 轴力大小及相邻杆件的受力状态对节点抗弯刚度具有一定影响, 而主管弯矩对节点抗弯刚度影响不大. 邱志国, 赵金城<sup>[6]</sup>对 X 型相贯节点的轴向刚度和抗弯刚度进行了试验研究. 结果表明, 当支管与主管直径相差较多时, 节点轴向刚度和抗弯刚度均较弱, 节点的半刚性性能对结构的受力性能尤其是稳定性能的影响不容忽视; 当主管与支管直径接近时, 节点的轴向刚度和抗弯刚度均较大, 基本能满足节点刚度的要求.

但上述研究主要针对普通强度等级的钢材制作的相贯节点, 且钢管直径相对较小. 对于高强钢, 大直径相贯节点的刚度研究还未见报道. 本文对采用 Q690 高强钢制作的无加强和采用三种加强方式的相贯节点的抗弯刚度进行试验研究, 考察三种加强方式及各参数对节点转动刚度的影响, 为此类节点的工程应用提供参考.

## 1 相贯节点的变形机理及刚度测定

### 1.1 相贯节点的变形机理

以人字柱与横撑相贯节点为例说明节点的变形机理, 当支管端部受竖向力时, 支管与主管均发生转动变形, 如图 3 所示, 节点转角即为主支管的

转角差值, 需要扣除支管弹性变形及支管的剪切变形对于节点转角的影响. 已有的研究<sup>[7]</sup>指出与转动变形相比, 剪切变形很小, 所以一般只需考虑连接的转动变形, 主要为节点域主管的凹陷变形所引起的节点转动变形. 本文忽略剪切变形对节点局部变形的影响.

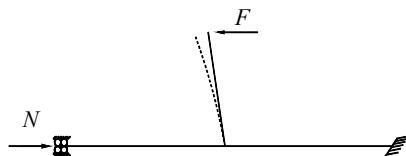


图 3 相贯节点的变形示意图

Fig.3 Deformation schematic diagram of tubular joints

李玉成等<sup>[8]</sup>通过梁的挠曲方程计算梁的挠度, 以此扣除梁变形对测量节点转角的影响. 虽然该方法可得到符合力学假定的梁轴线在弯矩作用下的转角, 但是由挠曲方程计算的值是在完全弹性前提下, 当梁进入塑性阶段以后就不能用该方法计算节点的转角值.

节点的转动刚度可以定义为节点发生单位转角时所需要的弯矩大小, 如式 1 所示, 弯矩取力  $F$  与加载点到主支管相贯边缘的力臂的乘积.

$$K_{\omega} = \frac{M_{\omega}}{\varphi_{\omega}} \quad (1)$$

式中:  $K_{\omega}$  表示节点的抗弯刚度(平面内);  $M_{\omega}$  表示节点所受的弯矩;  $\varphi_{\omega}$  为节点主支管的相对转角.

### 1.2 相贯节点的刚度定义

欧洲规范<sup>[9]</sup>规定, 节点的初始弹性刚度  $S_j$  不小于下列规定值时, 节点为刚性节点: 无支撑结构为, 有支撑结构为, 其中  $EI_b$  为梁刚度,  $L_b$  为梁长度,  $EI_b/L_b$  为梁的线刚度系数; 当节点初始刚度时, 节点为铰接节点; 在刚接和铰接之间的部分属于半刚性节点. 节点初始刚度为弯矩—转角曲线原点处切线的斜率. 图 4 给出了节点初始刚度的计算方法.

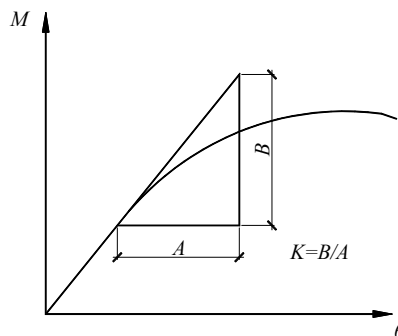


图 4 初始刚度的计算方法

Fig.4 Calculation method of the initial stiffness

2 试验概况

2.1 试件设计

以某电力勘测设计院设计的人字柱构架为依据, 设计试件如下: 主管与横撑截面规格均为  $\Phi 300 \times 8$ , 主管长度为 3 000 mm, 横撑长度为 900 mm, 主管与横撑之间均采用相贯节点连接, 材质均为 Q690C. 八个试件加强板/环的规格见表 1.

表1 相贯节点试件规格表  
Tab.1 Specimens for tubular joints

试件 编号	加强 型式	加强板/环/管			
		规格	长度(mm)	数量	材性
SJ-1	未加强	/	/	/	/
SJ-2		/	/	/	/
SJ-3	瓦形板	-8×450×531	225	1	Q345B
SJ-4		-8×540×531	270	1	Q345B
SJ-5	内隔环	-8× $\Phi 284/\Phi 220$	/	2	Q345B
SJ-6		-8× $\Phi 284/\Phi 156$	/	2	Q345B
SJ-7	内套筒	8× $\Phi 284$	225	1	Q345B
SJ-8		8× $\Phi 284$	270	1	Q345B

2.2 试验装置

试验装置布置见图 5. 试件柱脚与钢底座刚性连接, 底座截面尺寸为  $H600 \times 890(800) \times 22 \times 28$ , 钢材强度等级 Q345B, 底座通过放置于其上表面压梁两端的锚栓固定于试验台面. 主管竖向荷载通过放置在两边加载横梁上的两个液压千斤顶(千斤顶 1)对称作用于加载横梁上. 两个千斤顶的量程均为 100 t, 并联于同一套稳压装置的油路, 以保证两个千斤顶上作用的荷载大小相同. 支管竖向荷载由一个固定在台座上的液压千斤顶(千斤顶 2, 附带力传感器). 施加竖向荷载通过放置在两边加载横梁上的液压千斤顶对称作用于加载头上. 两个千斤顶的量程均为 100 t, 并联于同一套稳压装置的油路, 以保证两个千斤顶上作用的荷载大小相同. 试验装置布置见图 5.

2.3 加载方案

首先进行千斤顶施加竖向轴力的预加载, 逐步施加主管轴力至 694 kN, 检查测量主管轴向应变的应变片读数是否基本一致, 以考察加载是否偏心; 检查各部分的连接情况(位移计, 百分表的支座等); 检查各仪器设备的工作状况(位移计, 百分表是否正常读数等); 检查螺栓是否有松动; 紧固顶着地梁的支座, 减小地梁的水平位移.

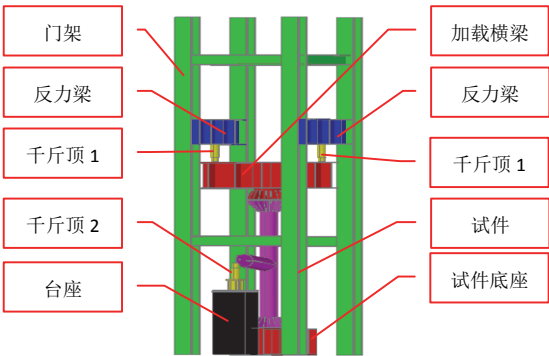
正式加载时, 单独施加主管轴力到  $N=2\,024$  kN(轴压比 0.4), 停歇 10 min, 保持竖向荷载不变, 逐步施加支管端部的集中荷载, 直至试件破坏, 利

用传感器来测量支管端部集中荷载的大小.

2.4 测试方案

测量方案中, 最重要的即为主支管相对转角值的测量. 位移计布置见图 6.

试验中采用位移计记录试件的水平和竖向位移, 其中 WYJ-1、WYJ-2、WYJ-5 记录主管平面内侧移量; WYJ-3 记录支管竖向位移量; WYJ-4 记录支管平面外侧移量; WYJ-6 记录主管平面外侧移量; WYJ-7、WYJ-8 记录相贯处主支管相对转动的位移量. 其中: WYJ-1 表示 1 号位移计, 依此类推.



(a) 试验装置布置三维图



(b) 试件安装

图5 试验装置布置图

Fig.5 Test device layout

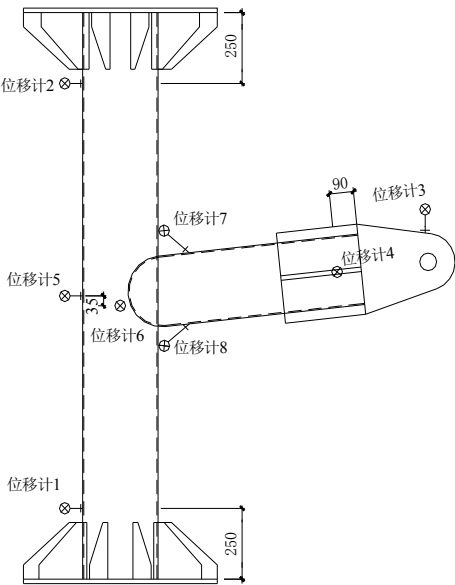


图 6 位移计布置图

Fig.6 Displacement meter layout

以 WYJ-7、WYJ-8 的测量结果计算主支管的相对转角值,其几何原理见图 7. 对于 WYJ-7, 安装位移计时保证  $AC$  长度为 260 mm,  $\angle CAB$  为  $45^\circ$ ,  $\angle BCA$  为主支管的夹角, 在加载过程中  $AC$  和  $\angle CAB$  均保持不变, 主支管的变形引起  $B$  向  $B'$  移动. 因此, 通过计算  $\angle BCB'$  可得主支管夹角的变化. 试验中可直接读出  $BB'$  的值, 计算详式如下.

$$\angle BCD = 39^\circ, B'D = BD - BB', CD = AC\sqrt{2}/2$$

$$\tan B'CD = B'D / CD = (BD - BB')\sqrt{2}/AC$$

$$= \tan BCD - BB'\sqrt{2}/260 = \tan 39^\circ - BB'\sqrt{2}/260$$

则  $\angle BCB' = 39^\circ - \arctan B'CD$ .

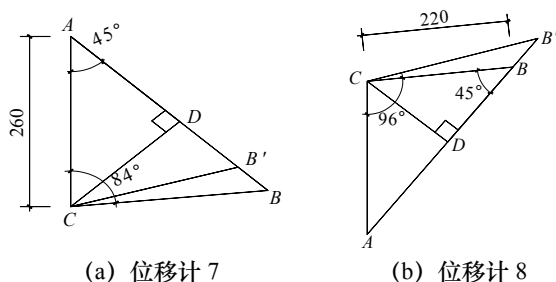


图 7 转角测量原理图

Fig.7 Measure principle diagram of rotation

对于 WYJ-8, 安装位移计时保证  $BC$  长度为 220 mm,  $\angle CAD$  为  $39^\circ$ ,  $\angle BCA$  为主支管的夹角, 在加载过程中  $BC$  和  $\angle CAD$  均保持不变, 主支管的变形引起  $B$  向  $B'$  移动. 因此, 通过计算  $\angle BCB'$  可得主支管夹角的变化. 试验中可直接读出  $BB'$  的值, 计算详式如下.

$$\angle CAD = 39^\circ B'D = BD + BB'$$

$$BD = CD = BC/\sqrt{2} = 220/\sqrt{2}$$

$$\tan B'CD = B'D / CD = (BD + BB')/CD = 1 + BB'\sqrt{2}/220$$

则  $\angle BCB' = \arctan B'CD - 45^\circ$ .

### 3 试验结果及节点初始节点刚度

#### 3.1 转角测试方法对比

为进一步验证上述通过 WYJ-7、WYJ-8 的测量结果计算主支管的相对转角值的准确性, 对 SJ-1 同时还采用摄影测量的方法进行主支管相对转角值的测试. 摄影测量<sup>[10]</sup>是利用光学摄影机获取的像片, 经过处理以获取被摄物体的形状、大小、位置、特性及其相互关系的一门学科.

经 SJ-1 试验结果对比发现摄影测量与上述位移计测量结果差异很小, 在 5% 到 8% 之间. 结合本试验的实际情况, 最终采用传统的位移计测量节点转角. 两种方法测量的加载过程中, 主支管之间的夹角大小结果对比见表 2.

表 2 摄影测量与位移计测量结果对比

Tab.2 Contrast between the results of phototopography and displacement meter

加载步	摄影测量 拟合结果/ $^\circ$	位移计测量 计算结果/ $^\circ$	两种方法 测量结果差值
1	84.48	84.00	初始差值(0.48)
2	84.35	83.88	7.0%
3	84.15	83.68	5.0%
4	83.76	83.31	7.6%
5	83.27	82.82	6.1%

#### 3.2 节点转角测试结果的对比

根据试验数据作出 8 个试件的弯矩-转角曲线 (即  $M-\theta$  曲线) 图, 见图 8.

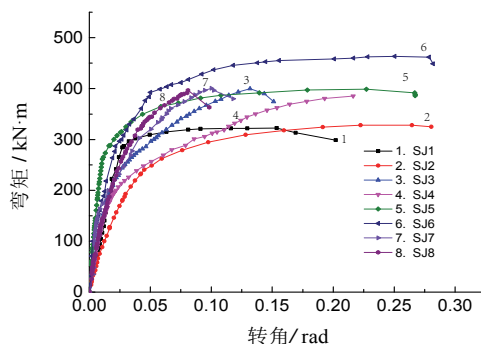


图 8 弯矩-转角曲线图

Fig.8 Moment-rotation  $M-\theta$  curve

依据  $M-\theta$  曲线计算加载初始阶段的曲线斜率, 计算结果见表 3.

表 3 节点初始刚度及刚性判断

Tab.3 Initial stiffness of the joints and its judgment

试件 编号	初始刚度 $S_j$ (N·mm/rad)	$8EI_b/L_b$	$0.5EI_b/L_b$	节点刚度 判断
SJ-1	7.812E+09	7.373E+10	4.608E+09	半刚性
SJ-2	1.055E+10	7.373E+10	4.608E+09	半刚性
SJ-3	1.063E+10	7.373E+10	4.608E+09	半刚性
SJ-4	1.443E+10	7.373E+10	4.608E+09	半刚性
SJ-5	3.299E+10	7.373E+10	4.608E+09	半刚性
SJ-6	3.785E+10	7.373E+10	4.608E+09	半刚性
SJ-7	1.098 E+10	7.373E+10	4.608E+09	半刚性
SJ-8	1.347 E+10	7.373E+10	4.608E+09	半刚性

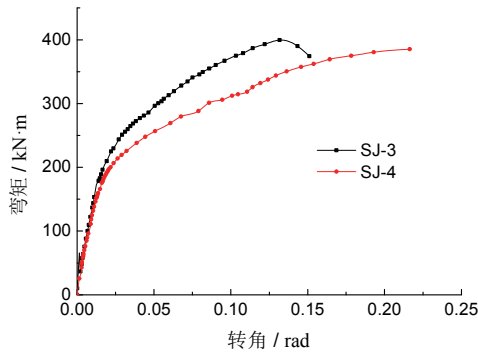
### 4 节点刚度对比

#### 4.1 相同加强型式相贯节点刚度比较

##### (1) 瓦形板加强型(SJ-3 和 SJ-4)

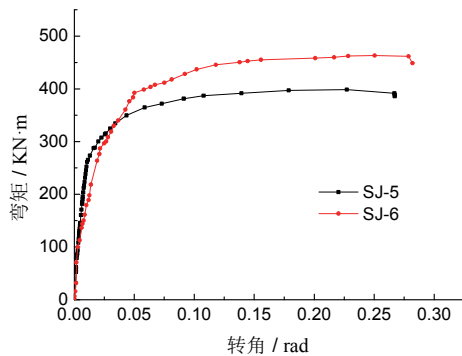
SJ-3、SJ-4 相比较, SJ-4 瓦形板的长度较 SJ-3 的大, 其它参数相同. 由图 9 可看出, 在初始阶段两者的刚度值相当, 随后, SJ-4 的刚度值较 SJ-3 有明显的下降; SJ-4 的极限转角为 0.22 rad 左右, SJ-3 的极限转角为 0.14 rad 左右.



图9 瓦形板加强型节点 $M-\theta$  曲线对比Fig.9  $M-\theta$  curve contrast between the joints enhanced by tile shaped plate

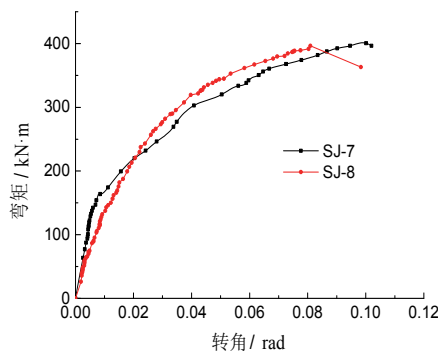
## (2) 内隔环加强型(SJ-5 和 SJ-6)

SJ-5、SJ-6 相比较, SJ-6 内隔环的宽度较 SJ-5 的大, 其它参数相同. 由图 10 可看出, 在初始阶段两者的刚度值相当, 随后, SJ-5 的刚度值下降较大, 两曲线均近似水平, 刚度相当; SJ-6 的极限转角为 0.27 rad 左右, SJ-5 的极限转角为 0.26 rad 左右.

图10 内隔环加强型节点 $M-\theta$  曲线对比Fig.10  $M-\theta$  curve contrast between the joints enhanced by inner annular plate

## (3) 内套筒加强型(SJ-7 和 SJ-8)

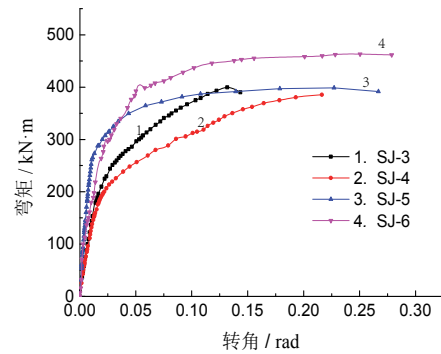
SJ-7、SJ-8 相比较, SJ-8 内套筒的长度较 SJ-7 的大, 其它参数相同. 由图 11 可看出 SJ-7 与 SJ-8 在整个加载历程中的  $M-\theta$  关系曲线比较接近; SJ-8 的极限转角为 0.10 rad 左右, SJ-7 的极限转角为 0.08 rad 左右.

图11 内套筒加强型节点 $M-\theta$  曲线对比Fig.11  $M-\theta$  curve contrast between the joints enhanced by inner sleeve

## 4.2 不同加强型式之间刚度比较

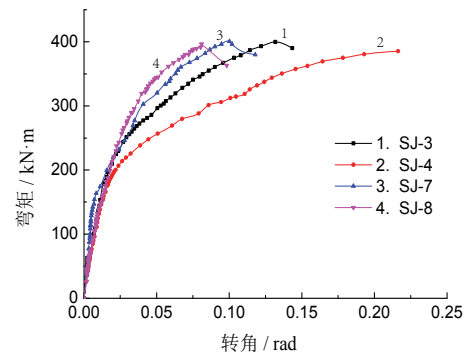
(1) 瓦形板加强型与内隔环加强型(SJ-3、SJ-4 和 SJ-5、SJ-6)

SJ-3、SJ-4 与 SJ-5、SJ-6 相比较, 由图 12 可看出 SJ-5 与 SJ-6 在整个加载历程中的  $M-\theta$  关系曲线在 SJ-3、SJ-4 曲线的左上方, 也即相对于瓦形板型加强节点, 内隔环加强型节点在整个加载历程中的转动刚度值均较大. 从对比可以得出, 相对于瓦形板加强型式, 内隔环加强型式会提高节点的初始刚度, 使得节点在整个加载历程中的转动刚度得以提高.

图12 瓦形板加强型与内隔环加强型 $M-\theta$  曲线对比Fig.12  $M-\theta$  curve contrast between the joints enhanced by tile shaped plate and inner annular plate

(2) 瓦形板加强型与内套筒加强型(SJ-3、SJ-4 和 SJ-7、SJ-8)

SJ-3、SJ-4 与 SJ-7、SJ-8 相比较, 由图 13 可看出 SJ-7 与 SJ-8 在整个加载历程中的  $M-\theta$  关系曲线在 SJ-3、SJ-4 曲线的左上方, 也即相对于瓦形板型加强节点, 内套筒加强型节点在整个加载历程中的转动刚度值均较大. 可以得出以下结论, 相对于瓦形板加强型式, 内套筒加强型式会提高节点的初始刚度, 使得节点在整个加载历程中的转动刚度得以提高.

图13 瓦形板加强型与内套筒加强型 $M-\theta$  曲线对比Fig.13  $M-\theta$  curve contrast between the joints enhanced by tile shaped plate and inner sleeve

(3) 内隔环加强型与内套筒加强型(SJ-5、SJ-6 和 SJ-7、SJ-8)

SJ-5、SJ-6 与 SJ-7、SJ-8 相比较,由图 14 可看出 SJ-5 与 SJ-6 在整个加载历程中的  $M-\theta$  关系曲线在 SJ-7、SJ-8 曲线的左上方,说明相对于内套筒加强节点,内隔环加强型节点在整个加载历程中的转动刚度值均较大.从对比可以得出,相对于内套筒加强型式,内隔环加强型式会提高节点的初始刚度,使得节点在整个加载历程中的转动刚度得以提高.

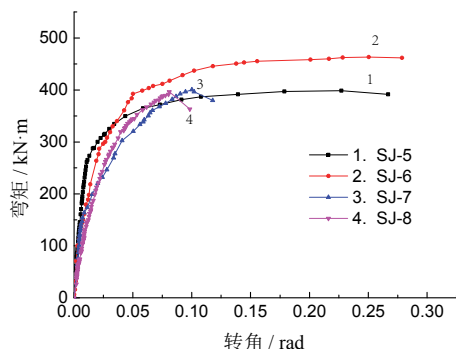


图14 内隔环加强型与内套筒加强型  $M-\theta$  曲线对比  
Fig.14  $M-\theta$  curve contrast between the joints enhanced by inner annular plate and inner sleeve

#### 4.3 不同加强方式对节点的作用机理

当节点受弯矩作用时,传至节点域主管管壁处的受力可以简化为图 15(a)所示,由材料力学的知识可知,支管端部的竖向荷载传递到相贯面的弯矩可以用一组力偶来表示,这组力偶中的最大值应为图中所示上下鞍点处,在相贯面的上下鞍点处形成轴向拉压力  $N$ ,由前文所述剪切力对节点刚度的影响较小,考虑到分析的可行性,此处暂不考虑剪切力对刚度的作用机理.

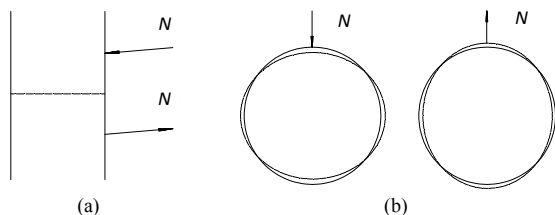


图15 节点域受力简化示意图

Fig.15 Simplified schematic diagram of panel zone under loading

上下鞍点处主管截面分别受压力和拉力,其变形如图 15(b)所示,可以看出  $N$  力使得主管管壁发生凹陷或者凸起变形,而节点域的变形主要取决于相贯面周围主管管壁的弯曲刚度,壳在单位宽度的弯曲刚度为:

$$D_s = \frac{Et_s^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2)$$

其中:  $D_s$  为单位宽度壳的弯曲刚度;  $t_s$  为壳体的厚度;  $\nu$  为泊松比;  $E$  为弹性模量.

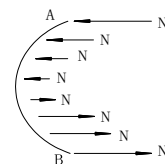


图16 相贯线处受力示意图

Fig.16 Schematic diagram of intersection line area under loading

对于瓦形板和内套筒加强型,其受力机理基本一致,相当于对主管管壁进行了局部加厚处理,直接提高了单位宽度壳的抗弯刚度.而瓦形板、内套筒的长度和弧度,只是改变主管管壁在变形时候的约束效应,当把瓦形板弧度增加到整圈时就和内套筒一样了,试验分析的结果也表明在同样厚度及长度情况下,内套筒加强型的刚度要高于瓦形板加强型的,这是因为,内套筒的“套箍作用”要强于瓦形板,能够更好的约束主管管壁的变形.

对于内隔环加强型节点,相当于在主管管壁内侧设置了两道加劲肋,参考前述分析,支管端部集中力在相贯线处形成了大小不等的拉压力,如图 16 所示,上下鞍点  $A$ 、 $B$  处的  $N$  力最大,越靠近  $A$ 、 $B$  两点,刚度增强的效果越明显,已有的研究成果也支持这一假说<sup>[11]</sup>.同样,内隔环板作为加劲肋,其板宽越大越不易屈曲,对主管管壁的支撑作用越明显.

## 5 结论

通过对本文的试验结果进行分析,可以得出以下结论:

(1) 与其它两种加强方式比较,内隔环加强型节点的刚度和延性性能最好,但考虑到内隔环加强型节点的加工制作相对复杂,因此实际工程中不推荐采用.

(2) 对于瓦形板和内套筒加强型相贯节点,增加瓦形板或内套筒的厚度是提高节点抗弯刚度的有效办法.两者比较,内套筒加强型节点的延性较差,其破坏属于脆性破坏,而瓦型板加强型节点加工制作相对简单,故实际工程中推荐瓦形板型加强方式.

(3) Q690 高强钢人字柱与横撑加强型相贯节点均应按照半刚性节点进行设计.

## 参考文献 References

- [1] 邱志国. 圆钢管 X 型相贯节点刚度及其对结构整体性能的影响[D]. 上海: 上海交通大学, 2008: 4-13.  
QIU Guozhi. Rigidity of unstiffened circular tubular X-joints and its effects on steel tubular structures[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008: 4-13.
- [2] 丁芸孙, 刘罗静. 网架网壳设计与施工[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 215-222.

- DING Yunsun, LIU Luoqing. The design and construction of the grid shell network[M]. Beijing: china building industry press, 2006: 215-222.
- [3] 中华人民共和国国家标准. GB50017-2003 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003: 97-98.  
National Standard of the People's Republic of China. GB 50017-2003 Code for steel structures[S]. Beijing: China Planning Press, 2003: 97-98.
- [4] 陈以一, 王伟, 赵宪忠. 圆钢管相贯节点抗弯刚度和承载力试验[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(6): 25-30.  
CHEN Yiyi, WANG Wei, ZHAO Xianzhong. Experiments on Bending Rigidity and Resistance of Unstiffened Tubular Joints[J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(6): 25-30.
- [5] 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, 2005: 11-22.  
Wang Wei. Non-rigid performance of tubular joints of steel tube and its impacts on the overall behavior of the structure[D]. Shanghai: Tongji University, 2005.: 11-22.
- [6] 邱志国, 赵金城. X型圆钢管相贯节点刚度试验[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(6): 966-970.  
QIU Zhiguo, ZHAO Jinchen. Experimental Research on Rigidity of Circular Tubular X-Joints[J]. Journal Shanghai Jiaotong University, 2008, 42(6): 966-970.
- [7] 施刚, 袁锋, 霍达, 等. 钢框架梁柱节点转角理论模型和测量计算方法[J]. 工程力学, 2012, 29(2): 52-59.
- SHI Gang, YUAN Feng, HUO Da, et al. The theoretical model and measuring calculation method of beam-to-column joint rotation in steel frames[J]. Engineering mechanical, 2012, 29(2): 52-59.
- [8] 李玉成, 郭耀杰, 李美东. 钢框架节点刚度测试方法研究[J]. 工业建筑, 2005, 35(5): 98-100.  
LI Yuchen, GUO Yaojie, LI Meidong. Reaserch on test method for joint stiffness of steel frameworks[J]. industrial construction, 2005, 35(5): 98-100.
- [9] The Institution of Structural Engineers, The Institution of Civil Engineers. Manual for the design of steelwork building structures to EC3[S]. London: SETO, 2000.
- [10] 李德仁. 摄影测量与遥感的现状及发展趋势[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(1): 1-5.  
LI Deren. Towards Photogrammetry and Remote Sensing Status and Future Development[J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 2000, 25(1): 1-5.
- [11] 梅倩, 龚景海, 庞丹丹. 内加劲环间距对 X 型圆钢管相贯节点性能的影响[J]. 钢结构, 2011, 26(5): 11-16.  
MEI Qian, GONG Jinghai, PANG Dandan. Effects of internal ring-stiffened spacing on behavior for X-joints[J]. Steel structure, 2011, 26(5): 11-16.
- (本文编辑 桂智刚)

(上接第8页)

## 参考文献 References

- [1] 高天宝, 杨树标, 吴斌. 混凝土植筋设计的两种剪切模型[J]. 煤炭工程, 2006(5): 75-78.  
GAO Tianbao, YANG Shubiao, WU Bin. Two kinds of shear model of bonded rebar design [J]. Coal Engineering, 2006(5): 75-78.
- [2] 欧阳坚. 混凝土加层框架节点抗震及建筑结构胶植筋的试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2001.  
OUYANG Jian. Experimental study on reinforced concrete frame node seismic and bonded rebar [D]. Nanjing: Southeast University, 2001.
- [3] 周新刚. 混凝土植筋锚固性能分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1169-1173.  
ZHOU Xingang. Anchorage behavior of post-embedded bars in concrete subjected to tension [J]. Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1169-1173.
- [4] 黄维民. 温度作用下植筋锚固试件拉拔试验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.  
HUANG Weimin. The drawing experimental study of bonded rebar under temperature [D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [5] RONALD A Cook, JACOB Kunz, WERNER Fuchs, et al. Behavior and Design of Single Adhesive Anchors under Tensile Load in Uncracked Concrete [J]. ACI Structural Journal, 1998, 95( 1): 9-25.
- [6] 刘向华. 植筋粘接锚固性能的试验研究及可靠度分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2004.
- LIU Xianghua. The Experiment Study on Bonded Anchor Behavior of Planted Bar and Reliability Analysis[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2004.
- [7] 姜常玖. 无机胶植筋式后锚固连接的抗火性能研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2013.  
JIANG Changjiu. Experimental study on fire behavior of the inorganically post-installed rebar connection [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2010.
- [8] 高天宝. 混凝土结构无机料植筋拉拔试验研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2005.  
GAO Tianbao. The research on planting bars with inorganic material in concrete [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2005.
- [9] 赵更岐. 植筋粘接锚固性能的试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2001.  
ZHAO Gengqi. Experimental study on the anchorage performance of bonded rebar [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2001.
- [10] 赵国藩, 曹居易, 张宽权. 工程结构可靠度[M]. 北京: 科学出版社, 2011.  
ZHAO Guofan, CAO Juyi, ZHANG Kuanquan. Reliability of engineering structure [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [11] 邵卓民, 沈文都, 徐有邻. 钢筋砼的锚固可靠度及锚固设计[J]. 建筑结构学报, 1986(6): 36-49.  
SHAO Zhuomin, SHEN Wendu, XU Youling. The Reliability and Design for Anchorage of Reinforcing Bars[J]. Journal of Building Structures, 1986(6): 36-49.

(本文编辑 吴海西)