

# 输电线路钢管-插板节点面外抗弯性能试验研究

陈志辉<sup>1</sup>, 付诗禧<sup>1</sup>, 黄雄辉<sup>1</sup>, 徐彬<sup>2</sup>, 冯衡<sup>2</sup>, 刘红军<sup>3\*</sup>

(1. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司, 广州 510700; 2. 中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司, 武汉 430071; 3. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

**摘要:** 为研究特高压输电钢管塔中C型插板连接典型节点的面外抗弯性能, 文中对10个足尺K形节点进行了面外抗弯承载力试验, 研究了插板厚度、节点板厚度与螺栓个数对节点面外抗弯性能的影响。在此基础上, 还建立了节点的有限元有效模型并对其进行了参数分析, 考察了插板与节点板厚度、螺栓个数与螺栓直径、主管径厚比、斜管径厚比以及钢材强度对节点面外抗弯刚度的影响, 提出了此类节点面外抗弯刚度的建议计算公式。研究表明: 在所有试验工况中, 插板与节点板厚度的变化, 使节点初始转动刚度较基准工况的最大增幅达40.28%; 螺栓个数的变化使该刚度的最大增幅为34.30%; 钢材强度对节点初始转动刚度的影响趋势为先线性增加后趋于平缓, 主管径厚比对节点初始转动刚度的影响甚微, 而斜管径厚比与节点板宽厚比对节点面外抗弯刚度的影响较为显著; 基于试验和有限元模拟结果提出的节点面外抗弯刚度计算公式具有较好的适用性, 可为实际工程提供参考。

**关键词:** 钢管塔; K形节点; 足尺试验; 抗弯性能; 参数分析; 初始转动刚度

**中图分类号:** TM75, TU392.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-9379(2025)09-0052-12

**DOI:** 10.13969/j.jzgjz.20240410001

## Experimental Study on Out-of-Plane Flexural Behavior of Steel Tube-Plug Joints for Transmission Lines

CHEN Zhihui<sup>1</sup>, FU Shixi<sup>1</sup>, HUANG Xionghui<sup>1</sup>, XU Bin<sup>2</sup>, FENG Heng<sup>2</sup>, LIU Hongjun<sup>3\*</sup>

(1. EHV Power Transmission Company of China Southern Power Grid, Guangzhou 510700, China; 2. Central Southern China Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Wuhan 430071, China; 3. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

\*Corresponding author: Lhj20040308@126.com

**Abstract:** In order to study the out-of-plane flexural behavior performance of typical joints of C-type gusset plate connection of UHV transmission steel pipe tower, 10 full-scale K-type joints were tested in this paper. The effects of gusset plate thickness, joint plate thickness and bolt number on the out-of-plane flexural behavior performance of joints were studied. On this basis, the finite element model of the joint was established and the parametric analysis was carried out. The effects of the thickness of the gusset plate and the joint plate, the number and the diameter of bolts, the diameter-thickness ratio of the main pipe, the diameter-thickness ratio of the inclined pipe and the steel strength on the out-of-plane flexural behavior of the joint were investigated. The formula for calculating the out-

收稿日期: 2024-04-10

基金项目: 中国南方电网有限责任公司2023年第一批定向科技项目(CGYKJXM20220236)

作者简介:

陈志辉(1983—), 男, 学士, 工程师, 主要从事特高压直流工程建设管理及技术方面的研究。E-mail: gpecczh@163.com。

付诗禧(1973—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事特高压直流工程建设管理及技术研究方面的工作。

通信作者:

刘红军(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事钢结构和高耸结构方面的研究。E-mail: Lhj20040308@126.com。

of-plane flexural behavior of such joints was proposed. The results show that: In all test conditions, the maximum increase in the initial rotational stiffness of the joints caused by the thickness of the gusset plate and the joint plate is 40.28%, and the maximum increase in the initial rotational stiffness of the joints caused by the number of bolts is 34.30%. The influence of steel strength on the initial rotational stiffness of the joint increases linearly first and then tends to be gentle. The diameter-thickness ratio of the main pipe has little effect on the initial rotational stiffness of the joint, while the diameter-thickness ratio of the inclined pipe and the width-thickness ratio of the joint plate have a significant effect on the out-of-plane flexural behavior of the joint. Based on the experimental and finite element simulation results, the calculation formula of out-of-plane flexural behavior of joints has good applicability, which can provide reference for practical engineering.

**Keywords:** steel pipe tower; K-joint; full-scale test; flexural behavior performance; parametric analysis; initial rotational stiffness

近年来,钢管塔凭借其良好的受力性能及较低的用钢量在输电线路中得到了广泛应用。特高压输电线路中钢管塔的主管与斜管之间往往会采用C型插板连接,在设计时通常会将其简化为铰接节点,而实际使用中此类节点可以承受一定弯矩并具有一定转动能力,是属于铰接与刚接之间的半刚性节点。若将该节点粗略假定为铰接或刚接进行设计计算,不仅违背实际情况,还会影响输电塔的整体安全与工程的经济效益。

国内外已有学者在钢管塔及半刚性节点等方面做了部分研究分析,段军等<sup>[1]</sup>进行了钢管塔内外法兰节点的偏压承载力试验研究,研究表明:在小偏压作用下中和轴位于合力作用点的另一侧,而在大偏压作用下该轴则位于合力作用点同侧。刘春城等<sup>[2]</sup>对大跨越钢管塔中常见的K形节点进行了拟静力试验和参数分析,得到了增加支管径厚比会引发节点局部提前破坏的分析结果。杨卫忠<sup>[3]</sup>通过导出半刚性节点单调受弯时的损伤本构关系模型,分析得出了该节点的弯矩-转角关系式仅与节点的初始刚度、极限弯矩及相应的转角有关。GIRAO等<sup>[4]</sup>采用等效T型件法计算梁柱端板连接节点中端板和柱子翼缘的刚度,进而可以将其等效成梁模型来计算节点的初始转动刚度。苏志刚等<sup>[5]</sup>提出了K形节点承载力公式的优化方法,该方法通过采用最大承载力和最大变形的双重控制方法来确定其承载力。李晓露等<sup>[6]</sup>提出以圆环-母线梁模型为基础,运用虚功原理,研究了无环板和四分之一环板节点极限承载力的计算方法,并给出了节点极限承载力的建议公式。曹正罡等<sup>[7]</sup>重点针对K形纵板加劲圆管相贯节点开展系统弹塑性极限承载力研究,提出纵板加劲节点的承载力修正方法。吴海洋等<sup>[8]</sup>通过对不同径厚比、不同长细比的钢管构件进行承载力试验发现,现行钢管构件轴压承载力计算方法偏于保守。李茂华等<sup>[9]</sup>通过研究发现,针对夹角小于18°的K形节点及轴线偏心连接的K形节点,采用现行设计计算方法计算的结果是不安全的,建议对输电线路钢管塔设计时,应尽量满足主管与支管之间夹角不小于20°的要求。

李正良等<sup>[10]</sup>提出了半刚性连接K形节点弯矩-转角建议计算方法,量化了主角钢肢宽、肢厚、螺栓直径及节点板厚度对转动刚度的影响。赵楠<sup>[11]</sup>推导出了考虑节点连接刚度的薄壁杆件单元的刚度矩阵。并将节点的弯矩-转角关系引入输电塔结构中,考察节点半刚性对结构受力性能的影响。丁洁民等<sup>[12]</sup>对半刚接的梁柱节点提出了强化双线性节点模型,能方便将其应用于半刚性节点钢结构的弹性和弹塑性分析中。熊川等<sup>[13]</sup>研究发现:增加柱翼缘厚度或增设节点域加劲肋,均能显著提高节点的极限承载能力;适当减小螺栓边距能有效提高节点的初始转动刚度和抗弯承载力。安利强等<sup>[14]</sup>采用一种刚度可调的半刚性节点单元来模拟特高压钢管塔节点的连接,还建立了考虑节点半刚性的特高压钢管塔有限元模型,并分析了节点半刚性对特高压钢管塔静力特性的影响。

从上述研究可知,对于输电线路中钢管连接节点的试验研究较少,且缺少对于此类节点的面外抗弯刚度分析。因此,本文在已有研究的基础上进行了C型插板连接的K形节点面外抗弯试验,研究此类连接节点的受力机理及破坏形态,并量化几何参数对节点面外抗弯刚度的影响。在此基础上,还提出了K形节点工程设计的建议公式,为实际工程中的设计提供了一定参考。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计及加载方案

为考察插板厚度、节点板厚度及螺栓个数对K形节点面外抗弯性能的影响,以潍坊-石家庄1 000 kV高压交流输电工程SZC27103J直线塔作为典型塔,选取塔身主斜管K形节点作为研究对象。为研究节点的面外抗弯性能,以插板厚度、节点板厚度及螺栓个数作为变量设计5组试验,每组含2个节点,例如试件M1-1、M1-2代表插板厚度为8 mm、节点板厚度为10 mm、其节点采用6个M20螺栓连接且两个完全相同试件。所有试件的加载过程均完全一致,以此规避由于试验操作差异导致的偶然误差,保障试验数据的可靠性,试件示意图如图1所示。每组试验试件是由1根主管钢管和两根斜管钢管组

成的,钢管及节点板钢材为Q355钢,螺栓为M20的8.8级高强螺栓。试件编号和尺寸如表1所示,在斜管两端均焊接有厚20 mm的端板,端板上均匀布置孔径24 mm的螺栓孔,通过螺栓与加载框架相连,以维持试验装置的稳定性;并在斜管端部焊接若干片加劲肋,用以增强加载端刚度,防止局部屈曲的现象发生。

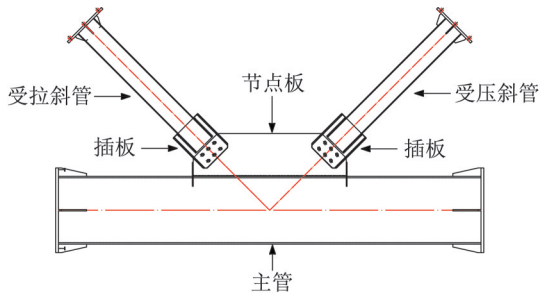


图1 试件示意

Fig. 1 Diagram of specimen

表1 试件规格

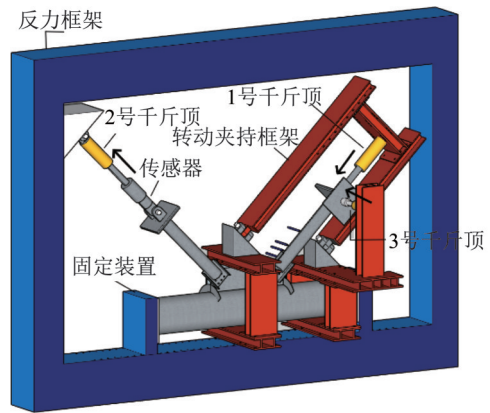
Table 1 Specimen specification

试件组号	试件编号	主管规格/ mm	斜管规格/ mm	插板、节点 板厚/mm	螺栓个数 与规格
M1	M1-1	Φ480×10	Φ159×5	8、10	6M20
	M1-2				
M2	M2-1	Φ480×10	Φ159×5	12、14	6M20
	M2-2				
M3	M3-1	Φ480×10	Φ159×5	6、8	6M20
	M3-2				
M4	M4-1	Φ480×10	Φ159×5	8、10	9M20
	M4-2				
M5	M5-1	Φ480×10	Φ159×5	8、10	3M20
	M5-2				

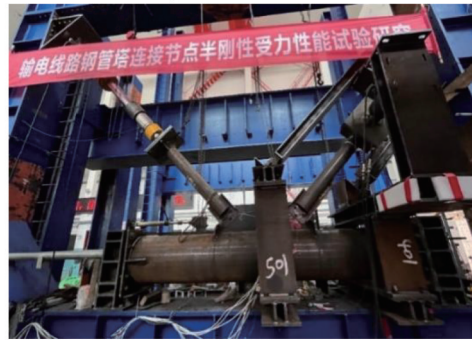
试验装置示意图及现场装置图如图2所示,其中对1、2号千斤顶施加沿斜管轴向方向的轴力,对3号千斤顶施加垂直于受压斜管面外方向的剪力(力的方向与图中箭头指向一致),试验装置应精准复刻该节点在实际工程中的端部约束条件。将试验试件固定于反力架的固定装置处,并将1号千斤顶放置于转动夹持框架中,从而保证加载端约束不影响节点的面外弯矩。

通过施加垂直于斜管面外方向的剪力,使节点受到面外弯矩的作用。经过前期分析,本文以该剪力对节点区域螺栓群形心处的弯矩作为节点的面外弯矩。

正式加载前,需对已装配完成的试验装置进行预加载处理,以消除装置与试件间的装配孔隙,降低装配误差



a) 试验装置示意



b) 现场装置



c) 框架机构



d) 铰支座

图2 试验装置

Fig. 2 Test setup

对试验结果的影响。试验加载方案为:(1)先由1号千斤顶对受压斜管施加轴向压力,每级加载1 kN,直至压力值达到50 kN后保持恒定;(2)再由2号千斤顶对受拉斜管施加轴向拉力,每级加载1 kN,直至拉力值达到100 kN后保持恒定;(3)最后由3号千斤顶对受压斜管施加面外剪力,每级加载0.1 kN,持续加载至监测到试件出现位移突增、应变急剧增大或装置无法保持荷载稳定、出现自动卸荷现象时,立即停止加载。其中各千斤顶的加载方向与图2a)中箭头的指向一致。

1.2 测量内容

试验测量内容有:千斤顶施加的荷载、受压斜管不同位置处的位移、环板的相对变形及螺栓群形心的面外位

移,全部数据均通过计算机软件实时获取。

测量装置中共布置了8个位移计以获得相关测点位移,其中1、2号位移计用于测量节点板螺栓群形心的面外位移;3号位移计用于测量两环板之间的相对位移;4~8号位移计用于测量受压斜管面外方向的位移。其中4~8号位移计距斜管下边缘距离分别为50 mm、150 mm、240 mm、340 mm、590 mm,位移计具体布置情况如图3所示。

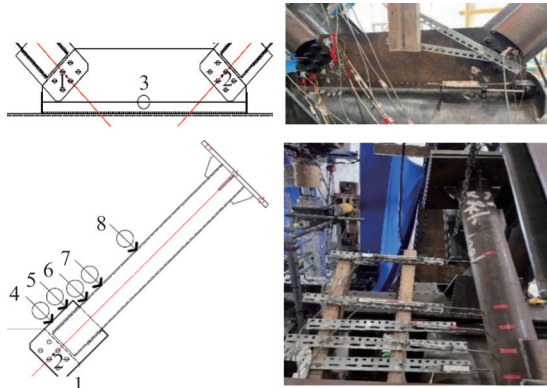


图3 位移计布置

Fig. 3 Arrangement of displacement meters

通过假设螺栓群形心为节点受剪肢的转动中心,可通过利用测点位移等效计算斜管的面外转角:

$$\theta_1 = \frac{w_5 - w_4}{d_1} \quad (1)$$

$$\theta_2 = \frac{w_7 - w_6}{d_2} \quad (2)$$

$$\theta_3 = \frac{w_8 - w_7}{d_3} \quad (3)$$

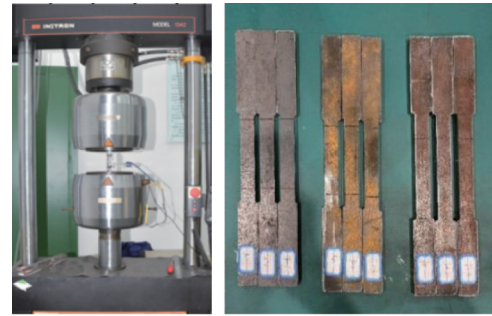
$$M = Fl \quad (4)$$

式中: $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 为受剪肢3个不同位置的转角; $w_4$ 、 $w_5$ 、 $w_6$ 、 $w_7$ 、 $w_8$ 为受剪肢上5个点沿剪力方向上产生的位移; $F$ 为剪力; $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ 分别为 $w_4$ 与 $w_5$ 、 $w_6$ 与 $w_7$ 及 $w_7$ 与 $w_8$ 间的距离; $M$ 为节点所受弯矩大小; $l$ 为螺栓群形心即节点受剪肢的转动中心到剪力作用点之间的距离。试验结果中初始转动刚度均为 $M-\theta_1$ 曲线线性段的斜率。

### 1.3 材性试验

按照《钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备》(GB/T 2975—2018)<sup>[15]</sup>中的要求,需在插板与节点板母材规定位置处截取标准试件进行材性试验。每种不同厚度插板与节点板,均从母材上取制3根标准材性试件,并取3根试件的平均值,作为该厚度钢材的最终材性试验值。试验机器及试件如图4所示。

通过材性试验获取的力学性能指标主要有:弹性模量、屈服强度、抗拉强度及伸长率,对材性试验数据进行



a) 材性试验装置 b) 材性试件

图4 材性试验装置及试件

Fig. 4 Material property test equipment and specimens

整理可得到各个试验组的钢材性能值,如表2所示。其中CB-6、CB-8、CB-12代表插板厚度为6 mm、8 mm、12 mm的插板位置试件,JDB-8、JDB-10、JDB-14分别代表节点板厚度为8 mm、10 mm、14 mm的节点板位置试件。

表2 钢材材料性能

Table 2 Mechanical properties of steel

试件编号	弹性模量 $E/\text{MPa}$	屈服强度 $f_y/\text{MPa}$	抗拉强度 $f_u/\text{MPa}$	伸长率 $\delta$
CB-6	193 268	371.29	493.97	0.32
CB-8	177 244	414.87	533.85	0.36
CB-12	188 075	409.19	569.61	0.30
JDB-8	161 134	421.40	552.00	0.31
JDB-10	190 228	430.17	542.84	0.27
JDB-14	189 852	436.69	573.51	0.33

注:屈服强度按《金属材料室温拉伸试验方法》(GB/T 228.1—2021)<sup>[16]</sup>规定方法确定。

## 2 试验结果

### 2.1 插板及节点板厚度

为探究插板及节点板厚度对输电钢管塔连接节点半刚性受力性能的影响,取试件组M1、M2和M3三组节点进行对比分析,三组节点试件的螺栓个数及主管和斜管规格均保持一致,插板/节点板厚度分别为:8 mm/10 mm、12 mm/14 mm和6 mm/8 mm。

将每个试件组所测的弯矩和位移进行均值处理,绘制三组试件节点的弯矩-位移曲线如图5所示,由图5可知:在荷载的作用下,节点板上螺栓群形心的面外位移较小(对应1~2号位移计),主管两环板间的相对位移也较小(对应3号位移计),且随着荷载的增大,受压斜管面外位移增长速率逐渐增大(对应4~8号位移计)。

将每个试件组所测的弯矩和转角进行均值处理,绘制试件三组节点的弯矩-转角曲线如图6所示。

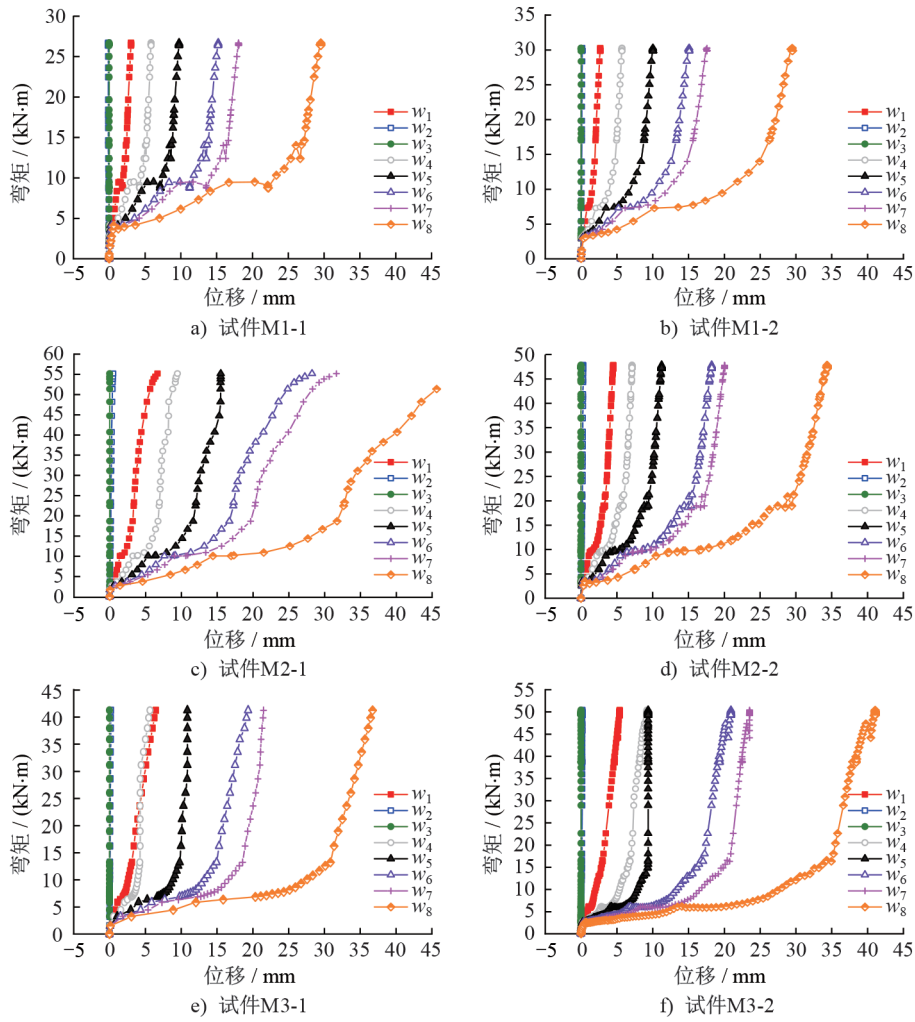


图5 试件组 M1、M2、M3 弯矩-位移曲线

Fig. 5 Bending moment-displacement curves of specimen group M1, M2, M3

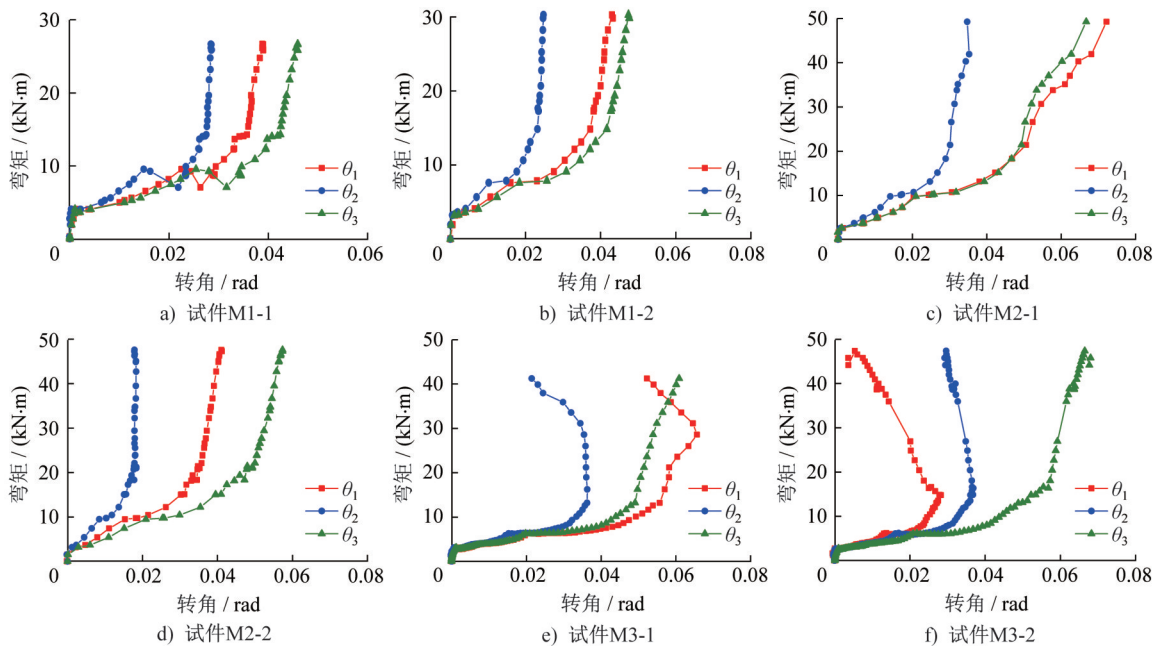


图6 试件组 M1、M2、M3 弯矩-转角曲线

Fig. 6 Bending moment-rotation curves of specimen group M1, M2, M3

由图可知:在节点加载初期,由于插板节点板间空隙及框架铰支座摩擦力等影响,曲线初始段的斜率较大,之后便近似呈线性增长的趋势,且节点刚度趋于稳定,试件 M1-1、M1-2 节点面外初始转动刚度约分别为  $250 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ 、 $259 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ ; 试件 M2-1、M2-2 节点面外的初始转动刚度约分别为  $317 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ 、 $397 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ ; 试件 M3-1、M3-2 节点的初始转动刚度约分别为  $216 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ 、 $244 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ 。插板/节点板厚度为  $8 \text{ mm}/10 \text{ mm}$  的节点面外初始抗弯刚度较插板/节点板厚度为  $6 \text{ mm}/8 \text{ mm}$  的节点面外初始抗弯刚度提高了  $10.65\%$ ; 插板/节点板厚度为  $12 \text{ mm}/14 \text{ mm}$  的节点面外初始刚度较插板/节点板厚度为  $8 \text{ mm}/10 \text{ mm}$  的节点面外

初始刚度提高了  $40.28\%$ 。试验结果表明:节点面外初始刚度随着插板和节点板厚度的增加而线性增大。

如图 7 所示,三组试件节点的破坏模态较为相似。根据各阶段节点的变形可知:在加载初期,当荷载逐步克服插板与节点板间的装配空隙及框架铰支座的静摩擦力后,节点进入弹性工作阶段,且节点呈转动状态;随着荷载的增大,受压斜管面外位移增长迅速。试验现象表明:主要有斜管、C 型插板、节点板产生面外位移,且节点板的面外位移小于斜管和 C 型插板的面外位移。由于面外位移从图片无法清晰看出,因此,研究人员在框架右上角支撑装置处粘贴一红色标签,红色标签处为框架的初始位置,能更直观展示面外位移的产生过程。

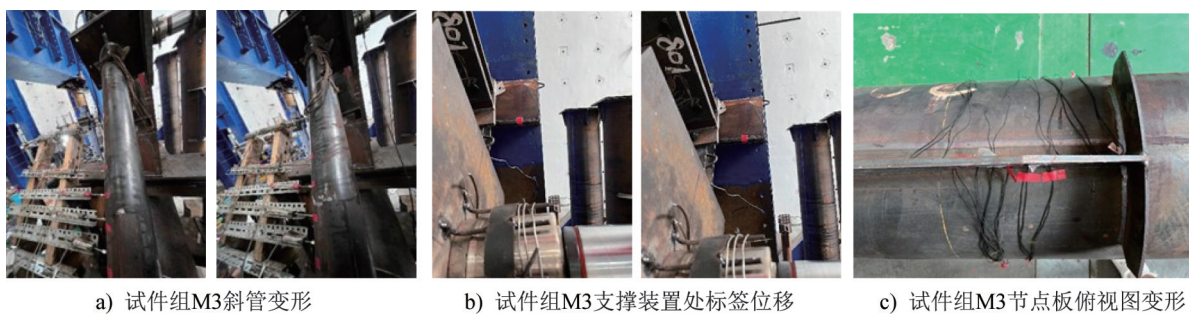


图 7 试件组 M3 破坏形态

Fig. 7 The failure modes of specimen group M3

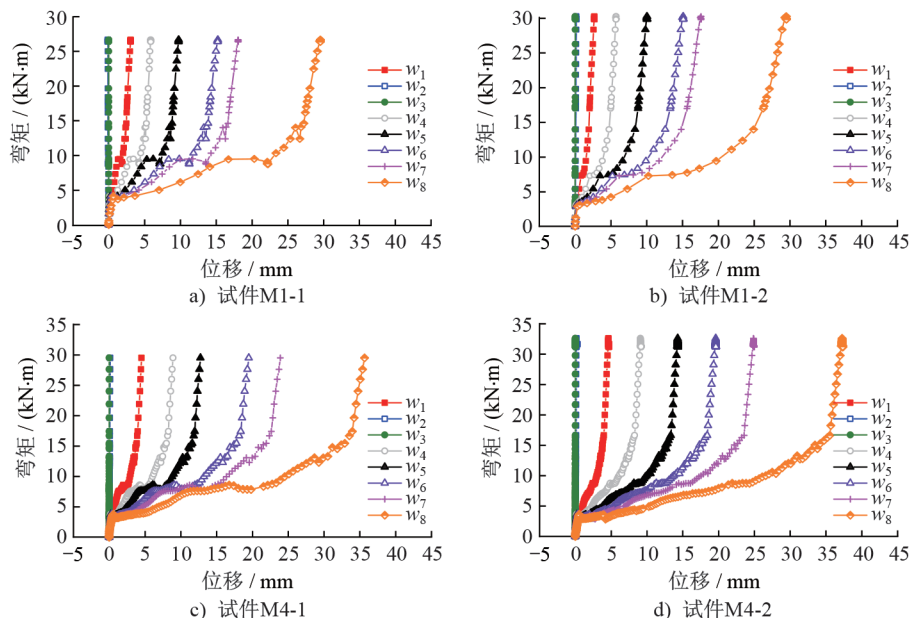
## 2.2 螺栓规格

为探究螺栓规格对输电钢管塔连接 K 形节点半刚性受力性能的影响,取试件组 M1、M4 和 M5 三组节点进行对比分析,三组节点插板/节点板厚度及主管与斜管规格均保持一致,螺栓个数分别为 6 个、9 个和 3 个。

将每个试件组所测的弯矩和位移进行均值处理,绘

制三组试件节点的弯矩-位移曲线,如图 8 所示。在荷载的作用下,节点板螺栓群形心的面外位移较小,主管两环板间产生的相对位移也较小,而受压斜管加载端产生的面外位移最大。

将三组试件所测的弯矩和转角进行均值处理,绘制三组试件节点的弯矩-转角曲线,如图 9 所示。



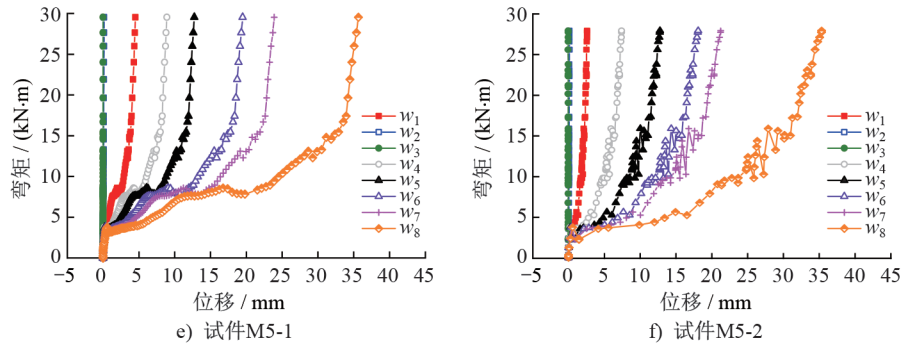


图8 试件组 M1、M4、M5 弯矩-位移曲线

Fig. 8 Bending moment-displacement curves of specimen group M1, M4, M5

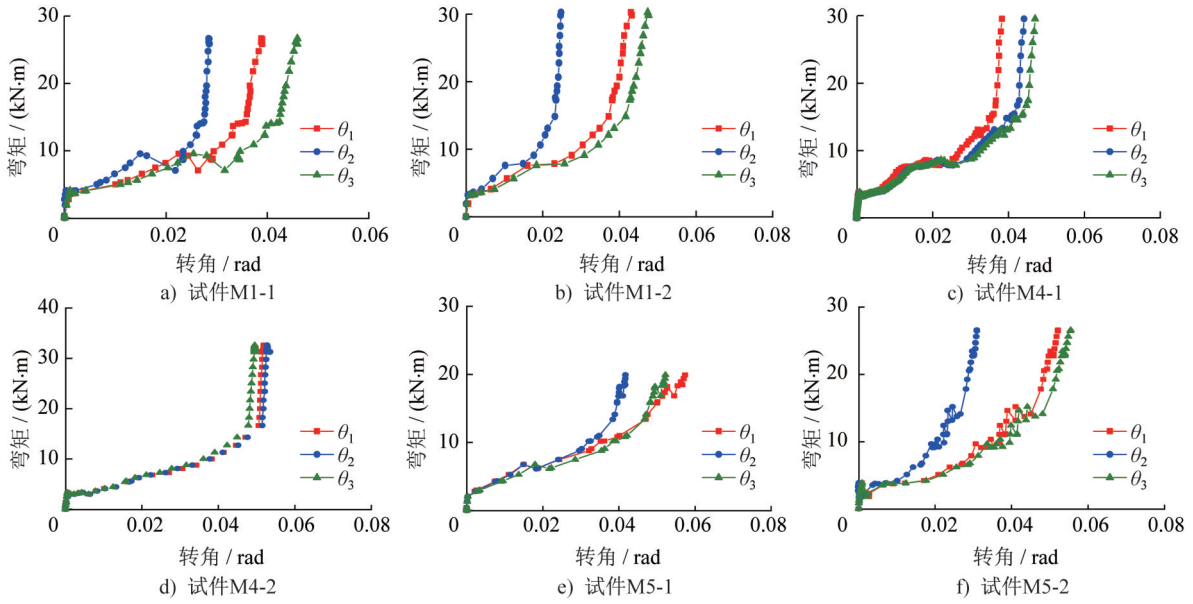


图9 试件组 M1、M4、M5 弯矩-转角曲线

Fig. 9 Bending moment-rotation curves of specimen group M1, M4, M5

试件 M1-1、M1-2、M4-1、M4-2、M5-1、M5-2 节点的面外初始转动刚度约分别为  $250 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ 、 $259 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ 、 $274 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ 、 $242 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ 、 $194 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ 、 $185 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ 。当螺栓个数为 6 个时节点的初始转动刚度较螺栓个数为 3 个时节点的初始转动刚度提高了 34.3%，但螺栓个数为 9 个与螺栓个数为 6 个时节点的面外初始刚度几乎保持不变。试验表明：在其它几何尺寸一定的情况下，螺栓个数达到一定数量后，其不再对节点面外抗弯承载力产生明显影响。

义，具备容许不规则形状的特性，同时能确保复杂结构有限元模型的几何表征准确性与计算精度，具体模型如图 10 所示。

### 3 有限元模拟及参数分析

#### 3.1 有限元模型的建立

采用有限元软件 ANSYS 进行模型的建立及分析，根据插板及主斜管组成的空间边界条件试验模型的特点，选用能够精确反映其真实情况的 SOLID95 单元进行建模分析，SOLID95 是 ANSYS 中典型的 3D 20 节点结构实体单元，属于高阶实体单元。该单元由 20 个节点定

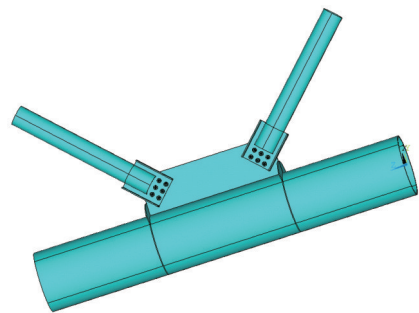


图10 有限元模型

Fig. 10 Finite element model

材料的本构属性均直接采用材性试验的实测值，并且利用 CONTA174 接触单元模拟以还原真实螺栓的连接接触关系。为提升计算效率，进行网格划分时采用分

区划分策略,分为加密区及非加密区,将插板及节点板连接节点等区域设置为网格加密区,其余部分设为不加密区。

### 3.2 试验与有限元模拟结果比较

将试验与有限元模拟得到的弯矩-转角曲线进行对比。可将弯矩-转角曲线前期线性段的斜率视为节点的初始转动刚度,试验的初始刚度取每组中两个试件的初始刚度平均值。得到的刚度对比表及弯矩-转角曲线对比图如表3及图11所示。由此可看出:有限元模拟结果与试验结果吻合良好,在进行试验时,会存在以下误差:难以稳定维持预设的逐级加载;现场试验框架自身重力导致的微小静变形;装配缺陷难以完全消除。但总体来说均在允许范围内且有因可循,从而验证了有限元模型的准确性和可靠性,可用于后续参数分析。

### 3.3 参数分析

#### 3.3.1 插板/节点板厚度

图12展示了在节点板厚度不同的情况下,插板厚度对节点面外初始转动刚度的影响曲线,从图中可知:插板厚度对节点面外初始转动刚度的影响呈显著正相关,当插板厚度由6 mm增加至12 mm时,节点面外初始转动刚度增加了约30%。

图13展示了在插板厚度不同的情况下,节点板厚度

表3 试验与有限元模拟刚度对比

Table 3 Comparison of stiffness between test and finite element simulation

试件组编号	$K_s$	$K_i$	$K_s/K_i/\%$
M1	255.0	215	118.60
M2	357.0	328	108.84
M3	230.0	205	112.20
M4	260.5	235	110.85
M5	189.5	186	101.88
平均值	—	—	110.47
标准差	—	—	5.40
变异系数	—	—	4.89

注: $K_s$ 为试验平均刚度值; $K_i$ 为有限元模拟刚度模拟值;计算节点初始刚度时,试验与有限元模拟结果弯矩-转角曲线中转角均取 $\theta_1$ (更靠近节点域)。刚度单位均为 $\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ 。

对面外初始转动刚度的影响曲线。相比于插板厚度而言,节点板厚度对节点面外初始转动刚度的影响相对较小,只有当插板厚度达到12 mm以后,节点板厚度对节点初始转动刚度的影响才较显著。

#### 3.3.2 螺栓个数与螺栓直径

图14展示了在螺栓直径不同的情况下,螺栓个数对节点初始转动刚度的影响曲线。从图14中可以看出:螺

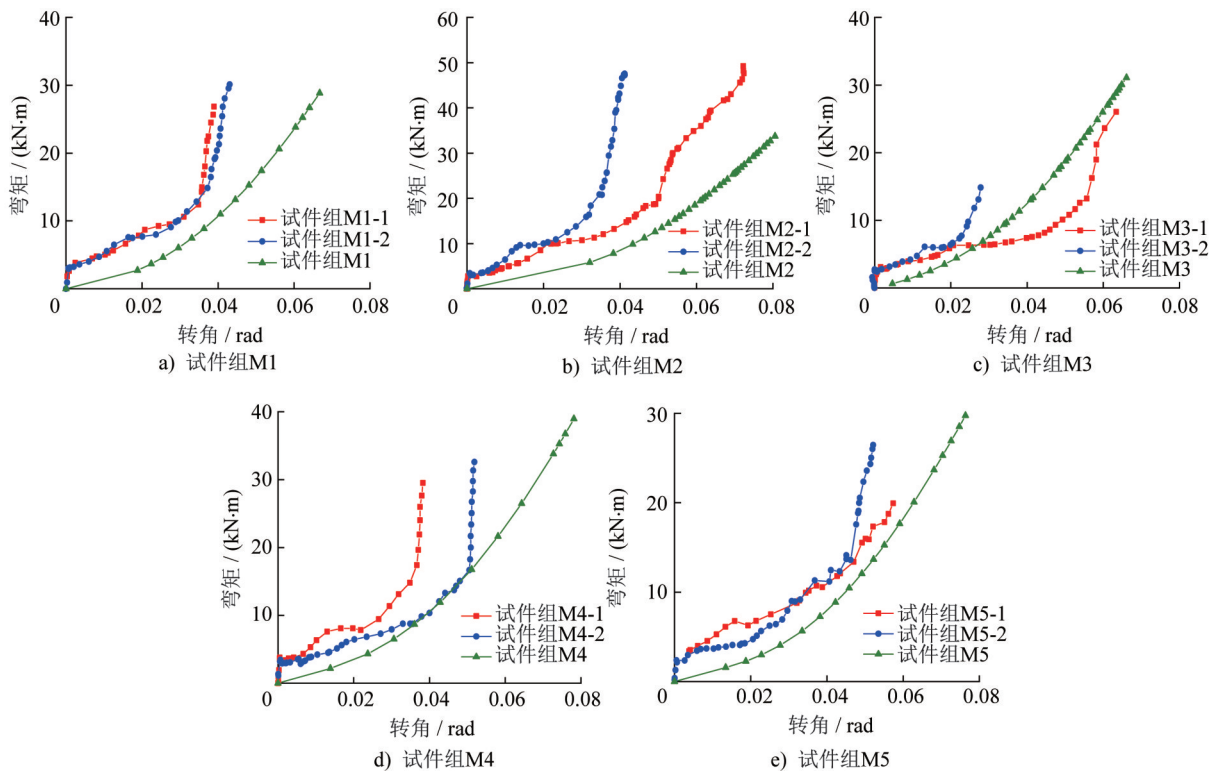


图11 试验与有限元模拟弯矩-转角曲线对比

Fig. 11 Comparison of bending moment-rotation curves between test and finite element simulation

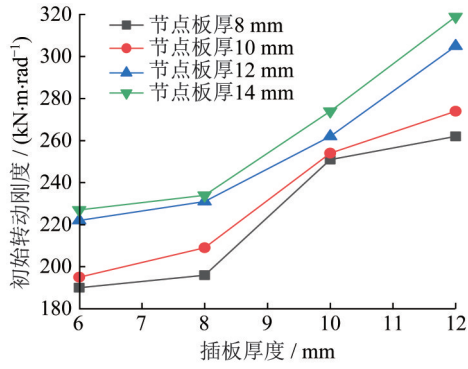


图 12 初始转动刚度-插板厚度关系曲线

Fig. 12 Initial rotational stiffness-plug thickness relationship curves

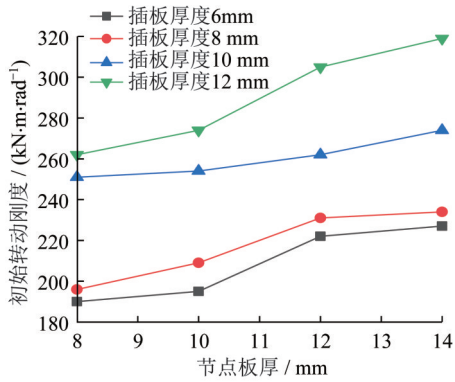
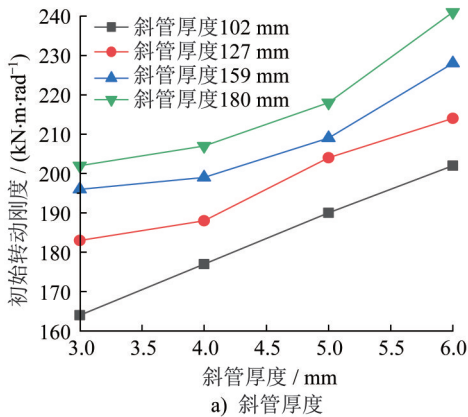
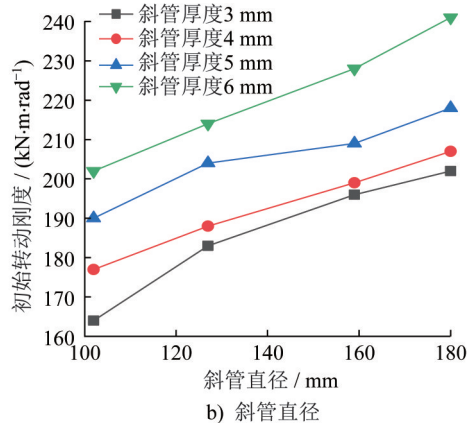


图 13 初始转动刚度-节点板厚关系曲线

Fig. 13 Initial rotational stiffness-gusset plate thickness relationship curves



a) 斜管厚度



b) 斜管直径

图 15 斜管几何参数对节点面外初始转动刚度影响曲线

Fig. 15 The effect of thickness and diameter of the diagonal pipe on the initial stiffness

3.3.4 主管径厚比

图 16 为在主管厚度不同的情况下,主管直径对节点初始转动刚度的影响曲线。从图 16 可知:主管几何参数对节点面外初始刚度的影响较小,故在后续拟合节点面外初始转动刚度的建议计算公式时,可忽略主管几何参数对其的影响。

栓直径对节点面外初始刚度的影响较小,随着螺栓个数的增加,节点面外初始转动刚度逐渐增大。当螺栓个数从 3 个增加至 6 个时,节点面外初始转动刚度增大了 28.73%;当螺栓个数从 6 个增加至 9 个时,对节点面外初始转动刚度影响甚微。

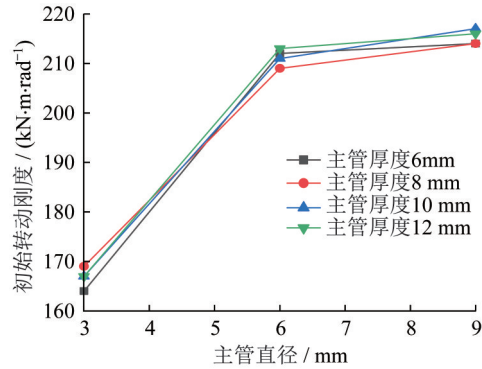


图 14 初始转动刚度-螺栓个数关系曲线

Fig. 14 Initial rotational stiffness-number of bolts relationship curves

3.3.3 斜管径厚比

图 15 展示了斜管厚度和直径对节点面外初始转动刚度的影响曲线。从图 15 中可知:当斜管厚度固定为 6 mm 时,斜管直径为 102 mm 与直径为 180 mm 的节点面外初始转动刚度相差 19.31%;当斜管直径为 102 mm 时,斜管厚度为 3 mm 与斜管厚度为 6 mm 的节点初始转动刚度相差 23.17%。

3.3.5 钢材强度

通过拓扑有限元模型中钢材的屈服强度,获取不同钢材强度下节点的初始转动刚度,如图 17 所示。钢材屈服强度分别取 235 MPa、355 MPa、420 MPa、460 MPa,与之对应的节点面外初始转动刚度分别为 192 kN·m·rad<sup>-1</sup>、209 kN·m·rad<sup>-1</sup>、210 kN·m·rad<sup>-1</sup>、209 kN·m·rad<sup>-1</sup>。由图

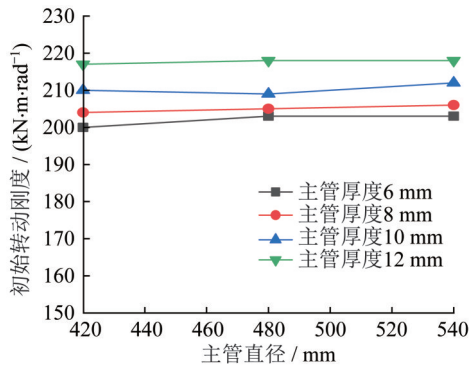


图 16 节点面外初始转动刚度-主管直径关系曲线

Fig. 16 Initial rotational stiffness-main pipe diameter relationship curves

17可知:钢材强度对节点面外初始转动刚度的影响曲线基本呈水平趋势。

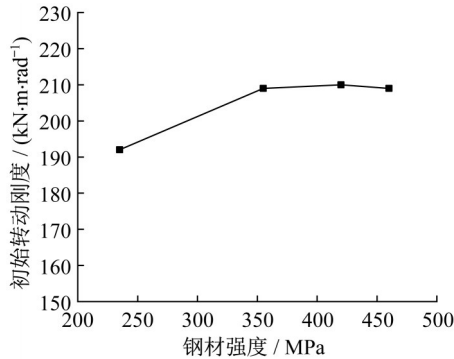


图 17 节点初始转动刚度-钢材强度关系曲线

Fig. 17 Initial rotational stiffness-steel strength relationship curve

### 3.4 节点面外初始转动刚度建议计算方法

由于目前针对输电钢管塔半刚性连接节点的试验研究较少,进而无法全面准确地预测几何参数对节点面外抗弯承载力的影响。因此,本文通过有限元模型进行了节点参数分析,确定了节点面外初始转动刚度影响关键性参数,并且将影响程度进行量化,提出具体拟合公式。

$$K_g = h^{x_1} d^{x_2} n^{x_3} r^{x_4} c^{x_5} j^{x_6} f_y^{x_7} \quad (5)$$

式中:系数  $x_1 \sim x_7$  为待定系数; $K_g$  为建议公式的节点刚度值; $f_y$  为材料屈服强度; $h$  为斜管厚度; $d$  为斜管直径; $n$  为螺栓个数; $r$  为螺栓直径; $c$  为插板厚度; $j$  为节点板厚度。有限元模型选择如表 4 所示,因篇幅原因仅列出部分具有代表性的参数工况。

根据数值分析结果得到拟合系数  $x_1 \sim x_7$  的取值,结果公式如下式所示:

$$K_g = h^{0.24} d^{0.29} n^{0.24} r^{-0.085} c^{0.6} j^{0.39} f_y^{0.2} \quad (6)$$

将建议计算公式所计算的节点初始转动刚度值和试验刚度值的对比拟于表 5 中,从表中可以看出二者的结

表 4 有限元参数

Table 4 Finite element parameters

序号	斜管尺寸	插板厚/mm	节点板厚/mm	螺栓个数与规格	钢材牌号
1	Φ102×3	8	10	6M20	Q355
2	Φ102×4	8	10	6M20	Q355
5	Φ127×3	8	10	6M20	Q355
6	Φ127×4	8	10	6M20	Q355
9	Φ159×3	8	10	6M20	Q355
10	Φ159×4	8	10	6M20	Q355
11	Φ180×3	8	10	6M20	Q355
12	Φ180×4	8	10	6M20	Q355
13	Φ159×5	8	10	3M18	Q355
14	Φ159×5	8	10	3M22	Q355
15	Φ159×5	8	10	6M22	Q355
16	Φ159×5	8	10	9M20	Q420
17	Φ159×5	6	8	6M20	Q460
18	Φ159×5	10	10	6M20	Q355
19	Φ159×5	12	10	3M18	Q355
20	Φ159×5	8	14	3M22	Q355
21	Φ159×5	10	14	6M22	Q355
22	Φ159×5	12	14	9M20	Q355
23	Φ159×5	8	10	6M20	Q235
24	Φ159×5	8	10	6M20	Q460

果较为相近,说明建议公式在保留一定安全裕度的同时具有较高的准确性。

表 5 试验刚度值与建议刚度值对比

Table 5 Comparison of stiffness values between test and recommended

试件组编号	试验平均刚度值/(kN·m·rad <sup>-1</sup> )	建议刚度值/(kN·m·rad <sup>-1</sup> )	试验平均刚度值/建议刚度值/%
M1	255	213.35	119.52
M2	357	312.58	114.21
M3	230	163.71	140.49
M4	260.5	234.84	110.93
M5	189.5	181.07	104.66

## 4 结论

本文开展了输电钢管塔 K 形节点面外抗弯受力性能试验研究和有限元分析,提出了此类节点面外初始转动刚度建议计算方法,并得出以下结论:

(1) 当荷载消除插板与节点板间的装配空隙及克服框架铰支座的静摩擦力(对应荷载 $\leq 5$  kN)后,节点正式进入弹性工作阶段,同时开始发生弹性转动。随着荷载的增大,受压斜管及插板快速转动,面外位移增长迅速。破坏模式主要为斜管、C型插板和节点板产生较大的面外位移,且节点板面外位移均小于受压斜管和C型插板的面外位移。

(2) 节点板和插板厚度对节点面外抗弯刚度的影响基本呈线性关系。螺栓数量的增加会增强节点约束,螺栓数量达到6个以上时,其对节点面外抗弯刚度的影响趋于平缓。

(3) 通过有限元分析可知,主管几何参数对K形节点面外抗弯刚度影响较小,而斜管几何参数、插板厚度和节点板厚度对节点面外抗弯刚度的影响较为显著。

(4) 基于试验和有限元模拟结果,提出的钢管塔K形节点面外抗弯刚度计算公式具有较好的适用性,可为实际工程设计提供参考。

## 参考文献:

- [1] 段军,张黎军,孙传琦,等.大跨越钢管塔内外法兰节点偏压承载力特性试验研究[J].钢结构,2018,33(4):7-12.DOI:10.13206/j.gjg201804002.  
DUAN Jun, ZHANG Lijun, SUN Chuanqi, et al. Experimental research on bearing capacity characteristics of inner-outer double layered flange of long-span steel pipe tower under eccentric compression[J]. Steel Construction, 2018, 33(4): 7-12. DOI: 10.13206/j.gjg201804002. (in Chinese)
- [2] 刘春城,李国强,樊晓玲,等.大跨越钢管塔K型节点滞回性能分析[J].东北电力大学学报,2017,37(6):79-85.DOI:10.19718/j.issn.1005-2992.2017.06.013.  
LIU Chuncheng, LI Guoqiang, FAN Xiaoling, et al. The analyses on hysteretic performance of K-type node in large span steel tubular tower [J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2017, 37(6): 79-85. DOI: 10.19718/j.issn.1005-2992.2017.06.013. (in Chinese)
- [3] 杨卫忠,王茜.钢结构半刚性连接弯矩-转角关系模型研究[J].郑州大学学报(理学版),2015,47(1):115-118,124.DOI:10.3969/j.issn.1671-6841.2015.01.025.  
YANG Weizhong, WANG Qian. Constitutive equation model for semi-rigid connection of steel structure [J]. Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition), 2015, 47(1): 115-118, 124. DOI: 10.3969/j.issn.1671-6841.2015.01.025. (in Chinese)
- [4] GIRAÓ COELHO A M, BIJLAARD F S K, SIMÕES DA SILVA L. Experimental assessment of the ductility of extended end plate connections [J]. Engineering Structures, 2004, 26(9): 1185-1206. DOI: 10.1016/j.engstruct.2000.09.001.
- [5] 苏志钢,刘海锋,朱彬荣,等.钢管输电塔K节点承载力算法的优化研究[J].浙江工业大学学报,2021,49(4):397-402. DOI:10.3969/j.issn.1006-4303.2021.04.006.  
SU Zhigang, LIU Haifeng, ZHU Binrong, et al. Optimization of K-joint bearing capacity algorithm for steel tube transmission tower [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2021, 49(4): 397-402. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4303.2021.04.006. (in Chinese)
- [6] 李晓露,吕宝华,陈泽群,等.输电钢管塔环板节点极限承载力的理论研究[J].应用力学学报,2013,30(1):86-91,149.  
LI Xiaolu, LYU Baohua, CHEN Zequn, et al. Theoretical research of ultimate bearing capacity of steel tubular transmission tower's joints with annular plane [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2013, 30(1): 86-91, 149. (in Chinese)
- [7] 曹正罡,王佳龙,王志成,等.输电塔K型纵板加劲相贯节点抗压承载力研究[J].哈尔滨工业大学学报,2020,52(10):28-35.DOI:10.11918/201905052.  
CAO Zhenggang, WANG Jialong, WANG Zhicheng, et al. Study on compressive bearing capacity of K-type longitudinal plate stiffened tubular joints of transmission towers [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(10): 28-35. DOI: 10.11918/201905052. (in Chinese)
- [8] 吴海洋,包永忠,郭念.输电铁塔钢管构件轴压承载力研究[J].电力科学与工程,2014,30(11):47-51,56.DOI:10.3969/j.issn.1672-0792.2014.11.010.  
WU Haiyang, BAO Yongzhong, GUO Nian. Research on the axial compressive bearing capacity of steel-tube element of power transmission tower [J]. Electric Power Science and Engineering, 2014, 30(11): 47-51, 56. DOI: 10.3969/j.issn.1672-0792.2014.11.010. (in Chinese)
- [9] 李茂华,邢海军,胡晓光,等.输电线路钢管塔小角度K形节点承载力研究[J].建筑结构,2013,43(5):48-53.DOI:10.19701/j.jzjg.2013.05.010.  
LI Maohua, XING Haijun, HU Xiaoguang, et al. Research on load-carrying capacity of smaller angle K-joints for power transmission steel tubular tower [J]. Building Structure, 2013, 43(5): 48-53. DOI: 10.19701/j.jzjg.2013.05.010. (in Chinese)
- [10] 焦安亮,李正良,刘红军,等.特高压输电塔半刚性连接K形节点受力性能研究[J].建筑结构学报,2014,35(7):53-60. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2014.07.007.  
JIAO Anliang, LI Zhengliang, LIU Hongjun, et al. Study on ultimate strength of semi-rigid K-type joints in UHV transmission tower [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(7): 53-60. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2014.07.007. (in Chinese)
- [11] 赵楠.特高压输电塔半刚性连接节点受力性能及结构非线性分析研究[D].重庆:重庆大学,2014.  
ZHAO Nan. Study on load-bearing performances of semi-rigid joints and structure nonlinear analysis of UHV transmission tower [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)
- [12] 丁洁民,沈祖炎.一种半刚性节点的实用计算模型[J].工业建筑,1992,22(11):29-32.  
DING Jiemin, SHEN Zuyan. A practical calculating model for

- semi-rigid connections [J]. Industrial Construction, 1992, 22(11):29-32.(in Chinese)
- [13] 熊川,郭耀杰,李旋.梁柱齐平端板半刚性节点力学性能研究[J].中国科技论文,2019,14(10):1066-1071.DOI:10.3969/j.issn.2095-2783.2019.10.005.  
XIONG Chuan, GUO Yaojie, LI Xuan. Research on mechanical properties of flush end plate semi-rigid beam-column joints[J]. China Sciencepaper, 2019, 14(10):1066-1071.DOI:10.3969/j.issn.2095-2783.2019.10.005.(in Chinese)
- [14] 安利强,朱登杰,武文玲,等.节点半刚性对特高压钢管塔静力特性的影响[J].应用力学学报,2015,32(6):1019-1024,1105.DOI:10.11776/cjam.32.06.B140.  
AN Liqiang, ZHU Dengjie, WU Wenling, et al. Influence of joint semi-rigidity on the static characteristic for UHV transmission steel tubular tower[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2015, 32(6):1019-1024, 1105. DOI:10.11776/cjam.32.06.B140. (in Chinese)
- [15] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备:GB/T 2975—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.  
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Steel and Steel Products—Location and Preparation of Samples and Test Pieces for Mechanical Testing: GB/T 2975—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.(in Chinese)
- [16] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.金属材料拉伸试验 第1部分:室温试验方法:GB/T 228.1—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.  
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Metallic Materials—Tensile Testing: Part 1: Method of Test at Room Temperature: GB/T 228.1—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.(in Chinese)
- .....
- (上接第14页)
- [16] 王先铁,周清汉,马尤苏夫,等.方钢管混凝土框架-十字加劲薄钢板剪力墙抗震性能试验研究[J].土木工程学报,2016,49(2):11-21.DOI:10.15951/j.tmgcxb.2016.02.002.  
WANG Xiantie, ZHOU Qinghan, MA Yousufu, et al. Experimental study on seismic behavior of concrete-filled square steel tubular frame-thin steel plate shear walls with cross stiffeners[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(2):11-21. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2016.02.002.(in Chinese)
- [17] 于金光,党晨,郝际平,等.半刚性部分组合框架-钢板剪力墙抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2019,40(7):109-118.DOI:10.14006/j.jzjgxb.2018.0127.  
YU Jinguang, DANG Chen, HAO Jiping, et al. Experimental research on seismic performance of semi-rigid partially encased composite frame-steel plate shear wall[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(7):109-118. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2018.0127.(in Chinese)
- [18] 聂建国,朱力,樊健生,等.钢板剪力墙抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2013,34(1):61-69.DOI:10.14006/j.jzjgxb.2013.01.010.  
NIE Jianguo, ZHU Li, FAN Jiansheng, et al. Experimental research on seismic behavior of steel plate shear walls [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(1):61-69. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2013.01.010.(in Chinese)
- [19] QU B. Seismic behavior and design of boundary frame members in steel plate shear walls[D]. Buffalo: State University of New York, 2008.
- [20] 于金光,郝际平.半刚性连接钢框架-非加劲钢板剪力墙结构性能研究[J].土木工程学报,2012,45(8):74-82.DOI:10.15951/j.tmgcxb.2012.08.015.  
YU Jinguang, HAO Jiping. Study on the behavior of semi-rigid connection steel frames with unstiffened steel plate shear wall structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(8):74-82. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2012.08.015.(in Chinese)
- [21] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.金属材料拉伸试验 第1部分:室温试验方法:GB/T 228.1—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.  
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic Materials—Tensile Testing: Part 1: Method of Test at Room Temperature: GB/T 228.1—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.(in Chinese)
- [22] FEMA. Interim testing protocols for determining the seismic performance characteristics of structural and nonstructural components: FEMA 461[S] Washington DC: FEMA, 2007.
- [23] 冯鹏,强翰霖,叶列平.材料、构件、结构的“屈服点”定义与讨论[J].工程力学,2017,34(3):36-46. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2016.03.0192.  
FENG Peng, QIANG Hanlin, YE Lieping. Discussion and definition on yield points of materials, members and structures[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(3):36-46. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2016.03.0192.(in Chinese)