

整段拼装式输电塔对接节点承载力试验研究

陈锡祥¹, 张金锋¹, 罗义华¹, 张树林², 李涛³, 张佳伦^{4*}, 刘红军⁴

(1. 国网安徽省电力有限公司, 合肥 230022; 2. 中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司, 合肥 230031; 3. 国网安徽省电力有限公司经济技术研究院, 合肥 230022; 4. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 文中针对角钢铁塔, 设计出一种上下两端完全分开、形成独立段的结构, 各段间采用圆形座板式对接。该结构可减少主材接头处螺栓群的数量, 既有利于优化现有施工组塔方式, 提高组塔效率与施工安全性, 也为机器人登塔作业提供便利条件。其中, 对接节点是保障整塔稳定的关键部件, 为明确其承载机制、破坏模式及极限承载力, 文中开展了10个足尺节点抗拉承载力试验研究, 考察了底板厚度、底板直径、孔位直径及螺栓孔径对节点荷载-位移曲线及承载力的影响。同时建立了合理的对接节点有限元模型, 进一步研究了节点底板尺寸、螺孔尺寸、钢材强度等因素对节点极限承载力的影响。综合考虑上述研究结果, 提出了此类节点的承载力计算公式。结果表明: 加载前期试件整体变形尚不明显; 随着荷载增大, 主材两端与底板的焊接位置率先出现翘曲; 继续加载至塑性阶段, 主材在偏心力作用下弯曲, 螺栓则因螺孔挤压产生变形; 最终底板翘曲加剧, 且卸载后产生无法复原的残余变形; 底板厚度、钢材强度、底板直径及孔位直径对节点承载力影响显著, 而螺栓孔径对节点承载力影响相对较小。

关键词: 输电线路; 拼装式; 对接节点; 抗拉试验; 承载力; 有限元分析

中图分类号: TM75, TU312

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)11-0057-09

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20241020001

Experimental Study on Bearing Capacity of Butt Joint Connection of Whole Section Assembled Transmission Tower

CHEN Xixiang¹, ZHANG Jinfeng¹, LUO Yihua¹, ZHANG Shulin²,
LI Tao³, ZHANG Jialun^{4*}, LIU Hongjun⁴

(1. State Grid Anhui Electric Power Company, Hefei 230022, China; 2. China Energy Engineering Group Anhui Electric Power Design Institute Co., Ltd., Hefei 230031, China; 3. Economic and Technical Research Institute of State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230022, China; 4. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

*Corresponding author: 13592265228@163.com

Abstract: This paper presents a design for angle steel towers with a structure where the top and bottom ends are completely separated, forming independent sections. These sections are connected by circular base plates, reducing the

收稿日期: 2024-10-20

基金项目: 国网安徽省电力有限公司科技项目(B31209230004)

作者简介:

陈锡祥(1970—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事电气工程方面的研究。E-mail: 18795853050@163.com。

张金锋(1980—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事电网建设技术方面的研究。

通信作者:

张佳伦(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事输电线路方面的研究。E-mail: 13592265228@163.com。

number of bolt groups at the main material joints. This design improves the existing tower assembly method, enhances assembly efficiency, and increases construction safety. Additionally, it facilitates robotic operations for tower assembly. The connection joints are crucial for ensuring the overall stability of the tower. To understand the load-bearing mechanism, failure modes, and ultimate load capacity of the connection joints, this study conducted tensile load tests on 10 full-scale joint specimens. The effects of base plate thickness, base plate diameter, hole position diameter, and bolt hole diameter on the load-displacement curves and load capacity of the joints were examined. A finite element model for the connection joint was also established to further investigate the influence of base plate dimensions, hole sizes, and material strength on the ultimate load capacity. Based on the experimental and numerical results, a load capacity calculation formula for this type of joint is proposed. The results indicate that, at the early stage of loading, the specimen's directional deformation is not significant. As the load increases, warping first occurs at the welding positions between the main material and the base plate. Continuing to load into the plastic stage, the main material bends under eccentric forces, and bolts deform under the compressive force from the bolt holes. Eventually, the base plate exhibits significant warping and irrecoverable residual deformation after unloading. The base plate thickness, material strength, base plate diameter, and hole position diameter have a significant impact on the joint's load capacity, while the bolt hole diameter has a relatively minor effect.

Keywords: transmission line; assembly; butt joint; tensile test; bearing capacity; finite element analysis

社会经济快速发展背景下,一线施工人员愈发紧缺,人工成本持续攀升,劳动密集型施工方式已难以为继,而单纯依赖“人海战术”提升施工建设能力,会进一步增加施工中的安全、质量风险。在此背景下,通过加强设计创新与技术装备革新,推广“机械为主、人力为辅”的全过程机械化施工新模式,可有效推动输电线路施工由劳动密集型向装备密集型转变,降低现场人员劳动强度、提升施工效率与质量水平,进而解决施工人力短缺、劳务成本上涨等问题。

因此,亟需改变传统设计思路,研发出新型整段拼装式角钢塔,其具体结构如图1所示。铁塔主材采用圆形底座板对接,单段结构自成一整体且整体稳定,便于地面分段组装、整段吊装。这一设计可提高组塔施工效率,大幅减少人员高空作业量、缩短高空作业时间,进而降低施工风险。

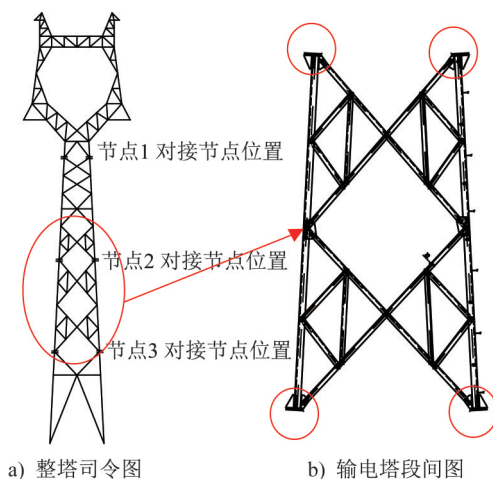


图1 整段拼装式输电塔

Fig. 1 Assembled transmission tower

拼装式输电塔对接节点是连接各塔身段的关键结构,也是工程设计中的重要一环。目前国内外学者对结构关键节点设计已有大量的研究。左林涛等^[1]设计了全栓接钢结构梁柱节点对接微调装置,并据此形成了该类节点对接的创新施工技术;该创新施工技术的应用,改变了采用撬棍或倒链调整钢梁的传统安装方法,转而采用起重机械进行调整,同时解决了全栓接钢结构施工中对高强螺栓安装精度要求高的难题。徐再根等^[2]分析了单变双角钢过渡节点的力学特性与受力情况,对弹性及破坏加载工况下该节点关键部位的应变变化与应力分布进行数值模拟,并将模拟结果与加载试验结果对比。白强等^[3]通过理论分析、数值模拟、真型试验等方式,对八地脚螺栓柔性塔座板的承载力进行了研究,发现受拉状态下底板应力呈非均匀分布状态,还提出了全新的计算方法。黄海滨^[4]对八地脚螺栓塔座底板开展了足尺试验,结果表明:刚性塔座底板加劲肋高度与其抗拉刚度呈正相关,底板破坏时易出现变形过大但材料未屈服的情况,尤其是底板与靴板交接处的应变较大,容易出现屈曲破坏。袁红丽^[5]进行了26个试件的足尺试验,包含10个四地脚螺栓塔座板试件,16个八地脚螺栓塔座板试件,分析了塔座板的破坏形态及各参数对塔座板承载力的影响,并明确了该结构承载力的确定方法。过浩川等^[6]采用梁与杆的刚度等效方法及能量法,先给出了单腿水平位移作用下4个塔腿承受弯矩的比例关系,再推导出主材在第一横格面处的最大弯矩,最后通过简化模型,推导出该位移作用下铁塔各塔腿主材的最大轴力表达式。KORIGA等^[7]研究了高地震区钢结构刚性和半刚性连接的动力响应,提出并讨论了非线性动力学分析模型。LIU等^[8]对26根不等边角钢进行偏心受压试验,发现角

钢会绕不同轴发生失稳破坏,且不同破坏模式下,试件承载力对偏心距的敏感程度存在差异,同时偏心距对承载力的影响会随着长细比的增大而减弱。翁兰溪等^[9]通过试验与理论分析,研究了八地脚螺栓塔脚板加劲肋对底板承载力的影响,针对现行规范中座板计算公式未充分考虑加劲肋有利作用的问题,提出了修正方法。杨攀等^[10]则基于单角钢八地脚螺栓塔座板的受力状态与传力机制,提出了塔座板厚度的设计表达式。

从上述研究结果来看,因为拼装塔为新型角钢塔,所以目前对其的指向性研究较少。为此,本文在已有研究基础上,针对拼装式输电塔对接节点开展了承载力试验,分析此类节点的承载性能及破坏形态。通过对各尺寸参数进行定量分析得出了节点承载力计算方法,为实际输电线路工程设计此类节点提供参考。

1 节点试验设计

1.1 对接节点设计

根据《架空输电线路杆塔结构设计技术规程》(DL/T 5486—2020)^[11]中的构造要求设计对接节点:节点构造包括圆形底板、靴板及主材,其中圆形底板沿圆周方向均匀布置 4 个螺栓孔,螺栓孔径可取螺栓直径的 1.3 倍~1.5 倍左右。同时为避免铁塔受力后对接节点出现侧移,进而导致部分构件产生次应力,螺栓与螺孔间的空隙位置处宜将垫板与底板焊接固定。其次需控制对接节点的底板厚度,不应使其超过 40 mm,原因是对接节点是沿厚度方向受力的构件,厚度过大会导致其板材沿轧制带状组织晶间产生层状撕裂。靴板沿圆形底板的两个相互垂直对称轴固定布置,同时靴板端头预留机器人转动行走所需空间。各塔段间主材通过焊接与靴板、圆形底板固定连接,斜材则通过单颗螺栓固定于靴板;节点具体类型如图 2 所示。节点不布置加劲肋以方便后续工程机器人登塔作业。

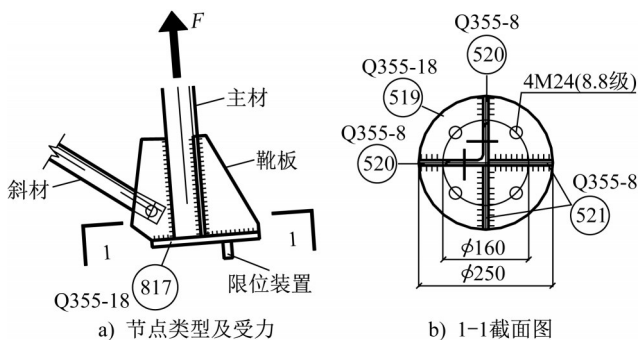


图 2 对接节点类型

Fig. 2 Connection joint type

1.2 试件参数设计

本试验以对接节点承载力为研究对象。对接节点受

压时,由于靴板的竖向刚度较大,而底板的竖向刚度相对较小,底板内部的压力并非均匀分布,而是主要集中在靴板附近,这使得底板承受的弯矩相对较小,故底板的设计厚度通常不由受压工况控制。因此本试验主要考虑节点受拉工况,同时根据 Smart Tower 软件导出的塔身荷载可以得到,节点斜材承受荷载仅为主材所承受荷载的 10%。因此后续试验不再布置斜材,以便简化试验工况,对接节点试件设计如图 3 所示。

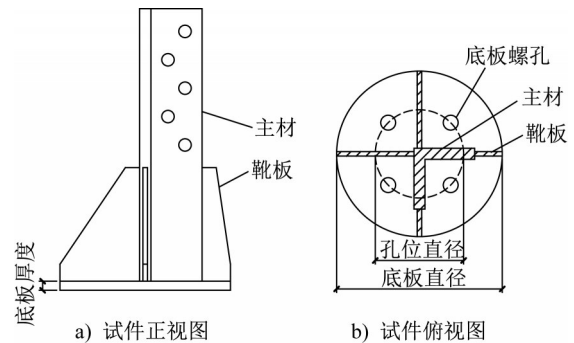


图 3 对接节点试件设计

Fig. 3 Design of the connection joint specimen

受实验室工作条件限制,试验通常难以覆盖对接节点的全部参数。为使试验结果对比更显著,基于正交试验原理,结合前期调研与参数敏感度分析,选取底板直径、孔位直径、底板板厚、螺栓孔径四个关键参数,并重点研究不同尺寸参数对节点承载力的影响规律。试件具体尺寸参数设计如表 1 所示。

表 1 试验参数设置

Table 1 Test parameters of specimens

试件编号	底板板厚 t/mm	底板直径 D/mm	孔位直径 D_L/mm	螺栓孔径 D_1/mm	参数改变
T1	16	250	160	27	底板直径
T2	16	300	180	27	孔位直径
T3	16	300	160	27	孔位直径
T4	16	300	160	36	螺栓孔径
T5	18	300	160	36	底板板厚
T6	20	300	160	36	底板板厚
T7	14	300	160	36	底板板厚
T8	16	350	190	36	底板直径
T9	16	400	220	36	底板直径
T10	16	300	160	30	螺栓孔径

1.3 材性试验

本试验试件采用名义屈服强度为 355 MPa 的钢种,选用该钢种可使试验结果更真实可靠,需依照标准《钢及

钢产品力学性能试验取样位置及试样制备》(GB/T 2975—2018)规定要求,对试件板材加工切取标准试件进行材性试验。并选取 INSTRON 1342 动静态材性试验机,如图4a)所示,部分材性试件如图4b)所示。

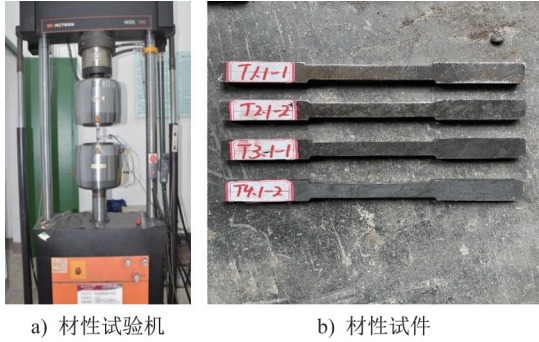


图4 材性试验

Fig. 4 Material property test

通过材性试验可得到试件真实弹性模量 E , 屈服强度 f_y 和抗拉强度 f_u 。具体各材性试件参数测量结果如表2所示,表中 La1-La10 为分别对应试件组 T1-T10 的材性拉伸试件。

表2 材性试验数据

Table 2 Material property test data MPa

试件	f_y	f_u	E
La1	417.10	555.88	195 962.55
La2	361.09	534.26	195 521.66
La3	394.63	546.63	191 051.05
La4	494.01	617.26	209 226.33
La5	373.12	539.73	201 479.66
La6	360.03	513.56	202 950.92
La7	380.77	524.48	184 720.99
La8	464.63	588.28	207 331.73
La9	465.57	584.16	207 202.51
La10	467.99	585.58	205 264.79

1.4 加载装置

试验采用竖向加载方式,将试件及各试验辅件置于大刚度箱梁首尾拼接的反力框架中,以此形成自平衡体系。试验加载装置图如5所示。

受实验室仪器限制,单个炮筒式千斤顶仅能施加 100 t 拉力。为得到节点的弹塑性演变过程及破坏机理,试验采用双炮筒式千斤顶同时施加拉力。采用一拖二分接管,一端连接油泵,另一端分接两组炮筒式千斤顶,以确保加载过程中两千斤顶油压保持一致。在使用 ZB4-500 液压油泵前,需检查压力表和安全阀的工作状

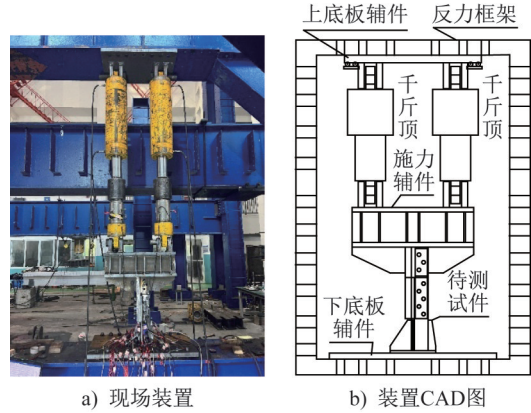


图5 加载装置

Fig. 5 Loading setup

态,并保证其灵敏可靠。除布置待测试件外,还需布置上底板辅件、下底板辅件及施力辅件,其中上底板辅件下平面设置双铰头,侧边预留两排 M28 螺栓孔,用于连接双炮筒千斤顶与反力框架;下底板辅件中心处开设不同孔径的螺栓孔,用于适配不同尺寸的节点;施力辅件顶部设双铰头,中部按箱形梁设计以保证自身刚度,底部设双排 M22 螺栓孔与待测试件连接。

1.5 测点布置

为获取节点传力途径、弹塑性演变过程及破坏机理,对试件关键测点应变及位移变化进行测量记录。其中应变测点布置如图6所示,底板应变测点主要布置在应力较大的螺孔附近及底板靴板交接位置处;靴板应变测点布置在靴板与主材焊接接触位置。每个应变测点处均粘贴两组应变片同时检测测点横向及纵向应变变化,为便于后续数据处理,将纵向应变片以单数命名,横向应变片以双数命名。

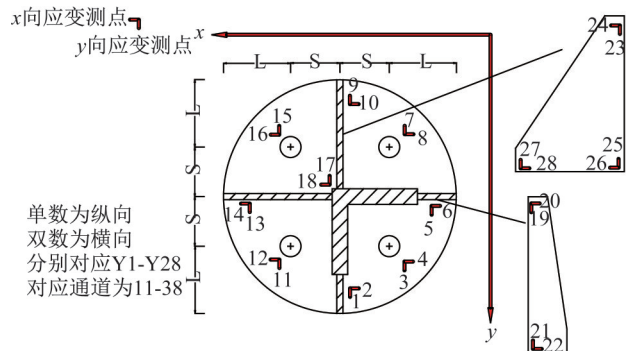


图6 应变测点布置

Fig. 6 Arrangement of strain gauge points

根据试验前试件的有限元模拟结果,选取其中位移值较大的测点,并在这些测点处布置东华测试的 5G105 与 5G106 型直线式位移计。具体位移测点布置如图7所示。

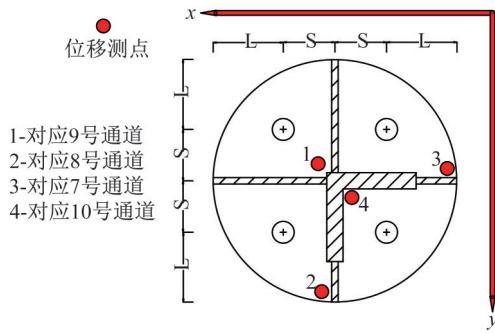


图 7 位移测点布置

Fig. 7 Arrangement of displacement points

2 试验结果及分析

2.1 试验现象

试验开始前,先通过预加载消除螺栓位置处的间隙,待施力辅件两端炮筒千斤顶油压相等且稳定后,再缓慢增加荷载,荷载通过施力辅件传递至与主材连接的螺栓孔处,进而传递至试件的靴板及底板。加载前期试件处于弹性阶段,此阶段节点沿荷载方向的变形尚不明显;随着荷载增大,主材两端与底板焊接位置处出现翘曲,该过程伴随有螺栓挤压的声响,且荷载-位移曲线斜率逐渐变小,标志着试件开始进入塑性阶段;继续加载,主材在偏心力作用下产生弯曲,螺栓在螺孔挤压作用下产生变形,其中主材内侧的底板螺栓变形最大,同时底板出现明显翘曲,并产生卸载后无法复原的残余变形。限于篇幅,本文不再逐一列举每组试件的试验现象,其中试件组 T7 因板厚最薄,其破坏过程伴随局部焊缝破坏,具体试验现象如图 8 所示。

2.2 试验数值曲线

取典型试件组 T7 试验结果进行均值处理,绘制试验过程荷载-应变曲线、荷载-位移曲线如图 9 所示。试件组 T7 最终加载至 1 300 kN,底板产生 7.9 mm 翘曲变形,其荷载-位移曲线具有明显屈服段,可划分为屈服弹性及塑性阶段。

由试件的荷载-应变曲线可知:加载初期,各测点应变呈线性增长趋势,表明此时试件仍处于弹性阶段;随着荷载持续增加,各测点应变向各自增大方向发展,直至试件出现明显变形,此时应变增长速率急剧提升,这表明试件开始进入塑性发展阶段。其中底板与主材焊接位置处及底板螺孔处应力较大,应变增长也更加显著。主材内侧底板沿靴板方向的测点,因受压产生负的应变;垂直靴板方向的测点,因受拉产生正的拉应变。进入卸载阶段后,试件应变不再增加,至此本次加载过程完成。

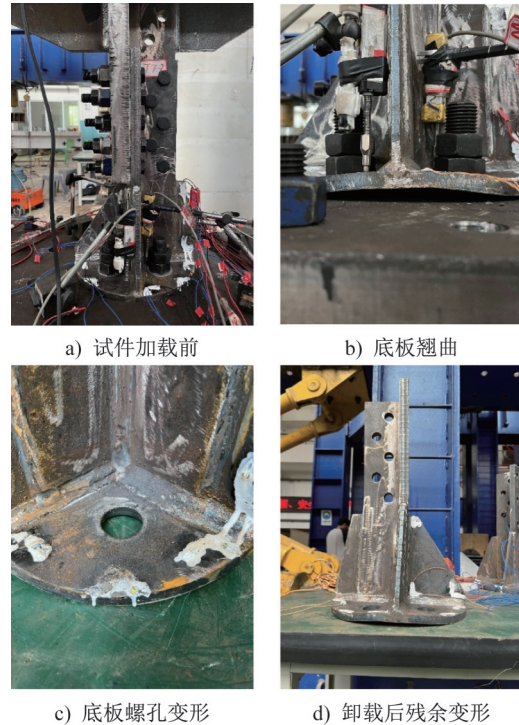


图 8 试件组 T7 试验现象

Fig. 8 Test phenomena of specimen group T7

2.3 承载力确定准则及试验结果分析

试件采用 Q355 钢材,该钢材具有较好的延展性,因此试验过程中不会发生突然断裂,而是随荷载增加逐渐产生塑性变形。

根据输电线验收相关标准,为避免应力角度过大,规定输电线路两侧的相对高差不应大于 5 mm,即可满足要求;对接节点底板绘制曲线分析后可知,当对接节点最大挠度超过 1.5 mm 时,应力曲线呈非线性,因此控制输电塔塔底座中心位移时,将挠度控制在 1.5 mm 以内即可。

取底板挠度-承载力关系曲线中线性段与屈服段的切线交点,将该点对应的荷载值视为对接节点切线承载力;另参照规范要求,取挠度达到 1.5 mm 时对应的荷载值作为对接节点挠度承载力,相关图示如图 10 所示。最后取切线承载力与挠度承载力中的较小值,作为对接节点承载力标准值。

结合承载力确定准则,即可确定各工况试验承载力结果如图 11 所示。对比试件组 T1、T4、T8、T9 的试验结果可以得到改变底板直径对节点承载力的影响,其中试件组 T1 的试验承载力为 1 077 kN,试件组 T4 的底板直径相较试件组 T1 的底板直径增加了 20%,承载力增加了 18.8%;但随着试件组 T8、T9 的底板直径继续增大,承载力出现了降低趋势,试件组 T9 相较于 T8 其底板直径增加了 15%,而承载力降低了 16.6%。说明对接节点承载

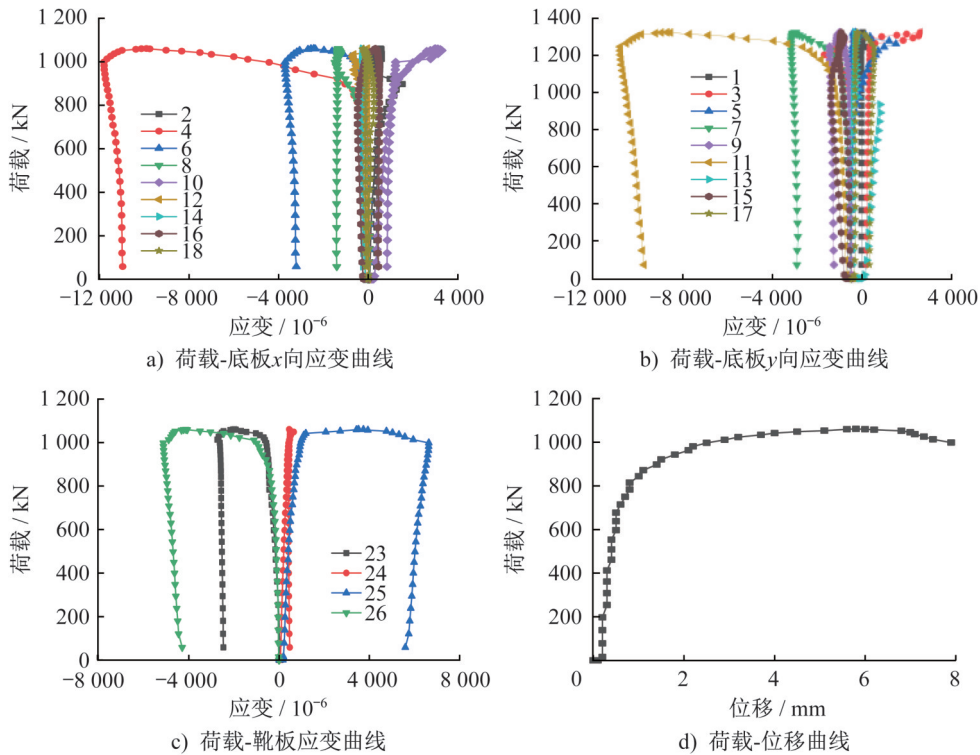


图9 试件组T7结果曲线

Fig. 9 Result curves of specimen group T7

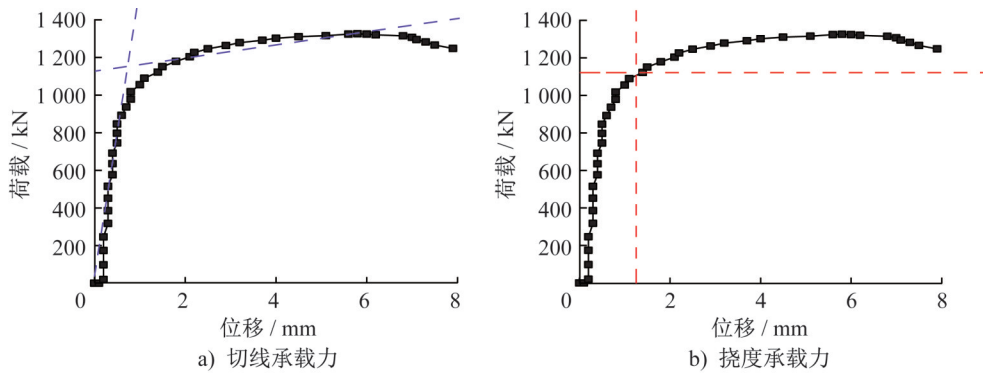


图10 试件承载力确定准则

Fig. 10 Guidelines for determining the load carrying capacity of specimens

力与底板直径并非呈线性关系,底板尺寸过大反而会影响节点承载能力。

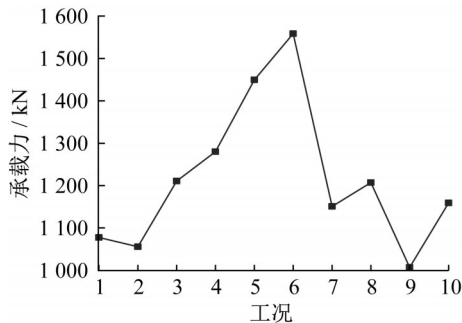


图11 试验承载力结果

Fig. 11 Results of test bearing capacity

对比试件组T4~T7,可明确底板厚度对节点承载力的影响,结果显示:相较于其他尺寸参数,底板厚度对承载力的影响更显著,且节点承载力随底板厚度增加而逐步提升,其中试件组T5较T7底板厚度增加28.6%,承载力对应提高了26%。对比其余试件组的承载力结果可知:底板螺栓孔布置越靠近底板中心,节点承载力越高;而螺栓孔径变化对节点承载力有轻微影响,但其影响程度远小于其他尺寸参数。

3 有限元分析

3.1 有限元模型建立

采用有限元软件 ANSYS 对试件进行建模分析。为

精确模拟对接节点的钢材力学特性,本节采用 Solid95 实体单元,对主材、靴板、底板及螺栓进行有限元模拟。Solid95 是三维 20 节点结构实体单元,属于高阶单元实体单元。这种单元可处理不规则形状的结构并保持高精度,尤其适用于边界为曲线的模型,形状兼容性良好。该单元由 20 个节点定义,每个节点具有 3 个自由度,即沿节点坐标系的 x 、 y 、 z 方向的平动位移。该单元在空间中可任意定向,具备塑性、蠕变、辐射膨胀、应力刚度、大变形及大应变特性,还能输出多种计算结果。

对接节点中存在以下接触关系:底板螺杆与底板螺栓孔壁间的接触,螺母与底板上下面间的接触,在 ANSYS 接触设置中,需先将接触面分别定义为接触面与目标面,其中接触面选用 Contal74 单元模拟,目标面选用 Targe170 单元模拟。

根据试验边界条件,先通过限制底板螺栓底部螺母的各个自由度,以契合底板经螺栓固定在反力框架中的实际试验场景;再对主材螺孔壁施加与试验荷载相等的纵向分布荷载,模拟节点实际受力情况。网格划分阶段,对螺孔处、底板与主材交接处、底板与靴板交接处等易产生应力集中的区域,进行网格加密处理,具体有限元模型及网格划分如图 12 所示。

进行有限元分析前,需先根据材料试验数据确定钢材的应力-应变关系,泊松比取 0.3,同时采用 von Mises 屈服准则判断钢材的屈服状态,具体试件钢材本构曲线如图 13a) 所示。螺栓本构曲线如图 13b) 所示,取 8.8 级高强螺栓屈服强度 $f_y=640$ MPa,极限强度 $f_u=830$ MPa,同时规定螺栓的极限变形 $\zeta_u=1.10\%$ 。

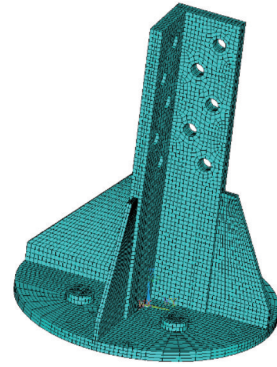


图 12 有限元模型

Fig. 12 Finite element model

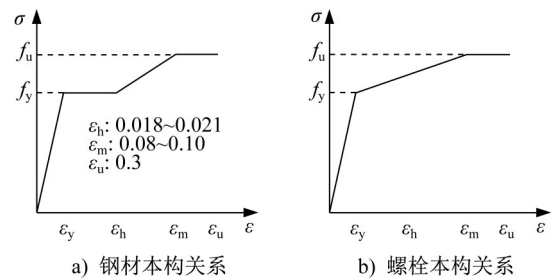
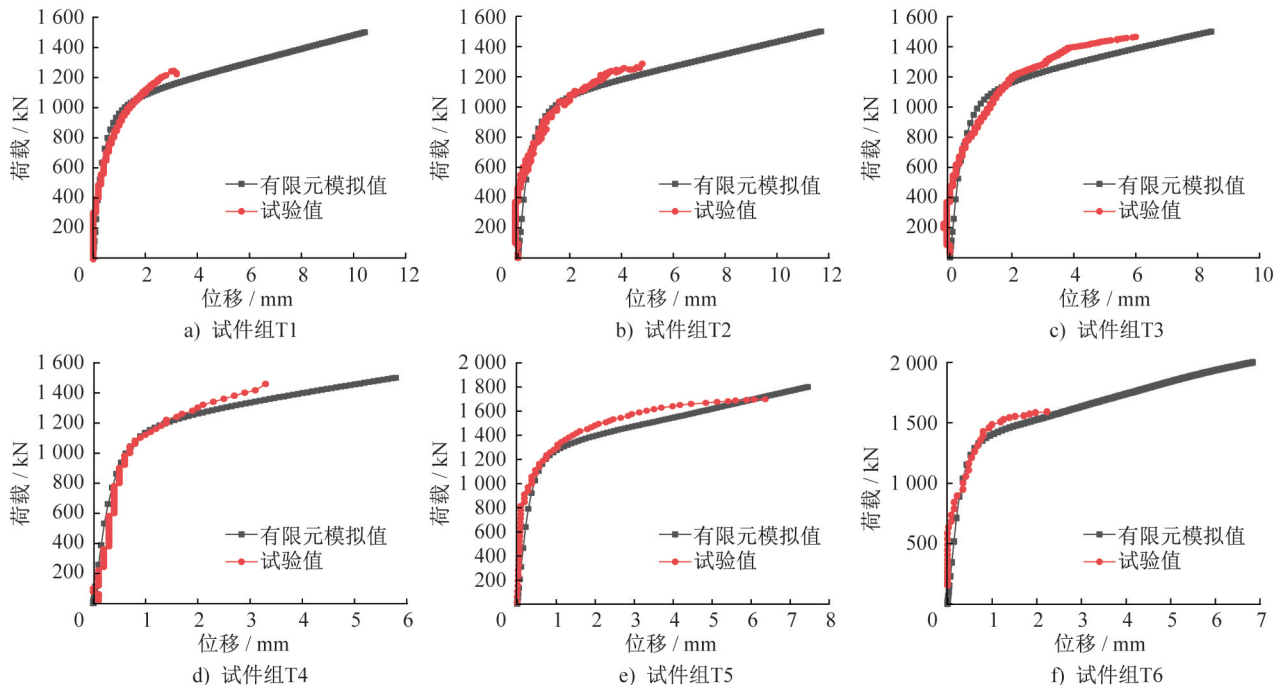


图 13 本构关系

Fig. 13 Constitutive relationship

3.2 试验与有限元结果对比

图 14 为各组试件有限元模拟与试验承载力的对比曲线,可以看出有限元模拟值与试验值吻合良好,直接验证了有限元模型的准确性。尽管受实际试验现场条件干扰、焊缝难以精准模拟等因素影响,模拟与试验曲线未能完全重合,但总体上二者结果基本一致;各组具体结果如表 3 所示,表明该有限元模型可用于后续参数分析。



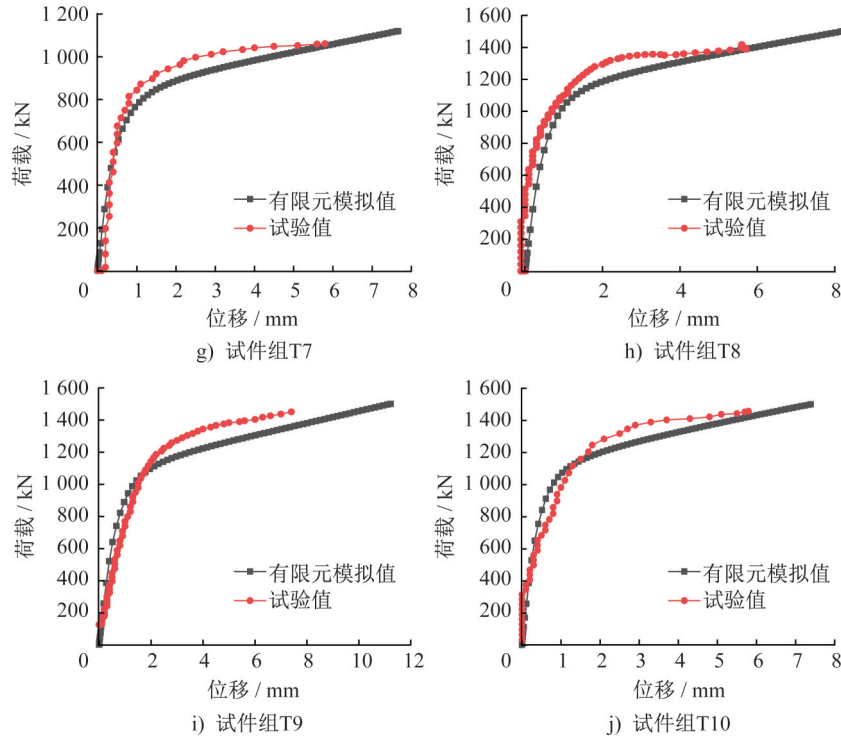


图14 试验与有限元模拟承载力曲线对比

Fig. 14 Comparison of load-bearing capacity curves between test and finite element simulation

3.3 参数分析及承载力计算公式

对接节点构造形式独特,影响其承载力性能的因素较多,如底板厚度、底板直径、孔位直径、螺栓孔径、钢材材料等。由于试验样本量有限,无法对各因素展开充分研究,因此借助有限元软件开展更多工况分析十分必要。

参数分析时增设的工况包括:板厚为22、24、26、28 mm;底板尺寸为450、500、550 mm;孔位直径为200、250、300 mm;螺栓孔径为30、36、40 mm;钢材种类为Q235, Q420, Q460钢。共计27个典型节点模型,以综合分析上述各因素对对接节点承载力的影响。

根据有限元分析结果,确定影响对接节点承载力的主要参数,对节点承载力进行拟合,拟合公式如式(1):

$$F = f_y t^{x_1} d_1^{x_2} \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^{x_3} b^{x_4} \quad (1)$$

式中: F 为拟合目标即节点承载力;系数 x_1 、 x_2 、 x_3 为待定系数。拟合结果式如式(2):

$$F = f_y t^{1.32} d_1^{-0.333} \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^{-0.622} b^{-0.271} \quad (2)$$

式中: f_y 为材料屈服强度; t 为对接节点底板厚度; d_1 为节点底板直径; d_2 为孔位直径; b 为底板螺栓孔径。

拟合公式所计算得到的节点承载力、有限元模拟节点承载力结果以及试验承载力结果对比表如表4所示,表中: F_e 为节点试验承载力; F_M 为有限元模拟承载力; F_D 为拟合公式承载力。可以看出建议计算式与有限元模拟

表3 有限元参数分析模型

Table 3 Finite element parametric analysis models

序号	t/mm	D/mm	D_1/mm	D_2/mm	f_y/MPa
1	22	300	160	36	355
2	24	300	160	36	355
3	26	300	160	36	355
4	28	400	220	36	355
5	22	400	220	36	355
6	24	400	220	36	355
7	26	400	220	36	355
8	28	400	220	36	355
9	16	450	200	36	355
10	16	500	200	36	355
11	16	500	250	36	355
12	16	550	250	40	355
13	16	550	300	40	355
14	16	300	160	30	355
15	16	300	160	36	235
16	16	300	160	36	420
17	16	300	160	36	460

值及试验值三者吻合较好,表明建议计算公式具有实际工程指导价值。

表4 节点承载力结果对比
Table 4 Comparison of joint load capacity

试件组	F_e/kN	F_M/kN	F_D/kN	F_e/F_M	F_e/F_D
T1	1 077.60	1 040	1 185.248	103.62%	90.92%
T2	1 055.78	1 013	1 161.116	104.22%	90.93%
T3	1 210.78	1 111	1 249.374	108.98%	96.91%
T4	1 280.00	1 212	1 155.671	105.61%	110.76%
T5	1 449.60	1 345	1 350.068	107.78%	107.37%
T6	1 558.30	1 472	1 551.513	105.86%	100.44%
T7	1 151.00	1 059	968.913	108.69%	118.79%
T8	1 207.00	1 130	1 085.825	106.81%	111.16%
T9	1 007.20	1 035	1 030.190	97.31%	97.77%
T10	1 159.34	1 149	1 214.206	100.90%	95.48%

4 结论

本文通过对拼装式输电塔对接节点进行单调加载试验研究及分析,得到以下主要结论:

(1) 加载初期,对接节点处于弹性阶段,节点沿拉力方向产生弹性变形;随着荷载增大,主材两端与底板焊接位置处出现翘曲;继续加载,主材在偏心力作用下产生弯曲,同时底板翘曲明显并产生卸载后无法复原的残余变形。加载过程中,对接节点各部分均未发生突然破坏,这表明该对接节点结构具有良好的承载性能与合理的破坏机制。

(2) 对接节点中,底板厚度对节点承载力的影响最显著,适当增加底板厚度可显著提升节点承载力;但在实际工程设计中,需综合考虑运输便携性、经济性等因素,据此优化底板厚度设计。

(3) 钢材强度与节点承载力呈线性关系,节点承载力随钢材强度的提升而提升;底板直径与节点承载力间并非严格的线性关系,在一定范围内底板直径的增加有利于节点承载力的提升,底板直径过大反而会降低承载力;底板螺栓孔越靠近于底板中心,节点承载力越高。

(4) 借助有限元分析,可获取该类型对接节点在更多工况下的承载力特性,所提出的承载力计算公式可为实际输电线路工程的节点承载力计算提供参考。

参考文献:

[1] 左林涛,李立波,李文军,等.全栓接钢结构梁柱节点对接创新施工技术研究与应[J].建筑技术,2023,54(8):960-962.DOI:10.3969/j.issn.1000-4726.2023.08.016.
ZUO Lintao, LI Libo, LI Wenjun, et al. Research and application of innovative construction technology for butt joint of fully bolted steel beam-column joints [J]. Architecture Technology, 2023, 54(8):960-962. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4726.2023.08.016. (in Chinese)

[2] 徐再根,郑为东,刘俊才,等.输电塔单变双角钢过渡节点试验研究与计算方法[J].建筑科学与工程学报,2022,39(2):69-77.DOI:10.19815/j.jace.2021.04016.
XU Zaigen, ZHENG Weidong, LIU Juncai, et al. Experimental study and calculation method of single-double angle steel transition joint of transmission tower [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(2):69-77. DOI: 10.19815/j.jace.2021.04016. (in Chinese)

[3] 白强,吴海洋,叶爱民.八地脚螺栓柔性塔座板承载力研究[J].南方能源建设,2019,6(4):123-130.DOI:10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.020.
BAI Qiang, WU Haiyang, YE Aimin. Bearing capacity study of flexible tower base plate with eight anchor bolts [J]. Southern Energy Construction, 2019, 6(4):123-130. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.020. (in Chinese)

[4] 黄海斌.特高压输电塔典型塔脚板受力性能及承载力研究[D].重庆:重庆大学,2019.
HUANG Haibin. Analysis for the ultimate bearing capacity on typical base plate of UHV transmission tower [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019. (in Chinese)

[5] 袁红丽.特高压输电塔塔座板承载力研究及地震响应分析[D].西安:西安建筑科技大学,2019.
YUAN Hongli. Study of bearing capacity and seismic response analysis of tower base plate of extra-high voltage transmission tower [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019. (in Chinese)

[6] 过浩川,吴松,吴昊,等.输电铁塔主材内力与基础水平位移关系式的研究[J].南昌大学学报(理科版),2024,48(3):231-240.DOI:10.13764/j.cnki.ncdl.2024.03.005.
GUO Haochuan, WU Song, WU Hao, et al. On relationship between internal force of the main materials of transmission towers and horizontal displacement of foundations [J]. Journal of Nanchang University (Natural Science), 2024, 48(3):231-240. DOI: 10.13764/j.cnki.ncdl.2024.03.005. (in Chinese)

[7] KORIGA S, IHADDOUDENE A N T, SAIDANI M. Numerical model for the non-linear dynamic analysis of multi-storey structures with semi-rigid joints with specific reference to the Algerian code [J]. Structures, 2019, 19: 184-192. DOI: 10.1016/j.istruc.2019.01.008.

[8] LIU Y, CHANTEL S. Experimental study of steel single unequal-leg angles under eccentric compression [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(6): 919-928. DOI: 10.1016/j.jcsr.2011.02.005.

[9] 翁兰溪,周晶晶.输电铁塔塔脚底板加劲肋影响分析[J].福建电力与电工,2008,28(1):38-41.DOI:10.3969/j.issn.1674-6104.2008.01.010.
WENG Lanxi, ZHOU Jingjing. The analysis on effect of base plate with stiffening rib in transmission towers [J]. Fujian Electric Power and Electrical Engineering, 2008, 28(1): 38-41. DOI: 10.3969/j.issn.1674-6104.2008.01.010. (in Chinese)