

角钢塔典型节点受力性能有限元分析

陈伏彬¹, 范翔¹, 张轩浪¹, 翁兰溪²

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114;
2. 中国电建集团福建省电力勘测设计院有限公司, 福建 福州 350000)

摘要:【目的】研究角钢塔主斜材典型节点的受力特征。【方法】对角钢塔典型节点在有无辅材角钢及不同辅材角钢厚度、连接板厚度、螺栓间距等参数下的受力性能进行有限元分析, 研究当紧固力矩为 $300\text{ N}\cdot\text{m}$ 时角钢塔节点在拉剪作用下的应力分布云图、极限承载力和破坏形态, 并将典型工况的模拟结果与试验结果进行有效对比, 验证有限元方法的有效性。【结果】有限元模拟结果与试验结果吻合良好, 模拟得到的极限承载力和破坏形态与试验结果相近。【结论】增加连接板厚度可提高节点的极限承载力; 增大辅材角钢厚度对提高节点承载力的作用不大, 但有利于增强节点的初始刚度; 螺栓间距对节点承载力有显著的影响, 过小的螺栓间距易造成应力集中并降低极限承载力, 建议最小螺栓间距应不小于 3 倍螺栓直径。

关键词: 角钢塔节点; 有限元分析; 极限承载力; 破坏形态; 参数化

中图分类号: TU391

文献标志码: A

Mechanical performance of typical joints of angle steel tower based on finite element analysis

CHEN Fu-bin¹, FAN Xiang¹, ZHANG Xuan-lang¹, WENG Lan-xi²

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2. Power China Fujian Electric Power Engineering Co., Ltd., Fuzhou 350000, China)

Abstract: [Purposes] The paper aims to study the mechanical performance of typical joints of main inclined materials of angle steel tower. [Methods] The finite element analysis of mechanical performance of typical joints of angle steel tower under different parameters such as the presence or absence of auxiliary angle steel, thickness of auxiliary angle steel, thickness of connecting plate and bolt spacing was carried out. The stress distribution nephogram, ultimate bearing capacity and failure mode of joints of angle steel tower under tension and shear were studied when the tightening torque was $300\text{ N}\cdot\text{m}$, and then the simulation results of typical working conditions were effectively compared with the test results to verify the effectiveness of the finite element method. [Findings] The finite element simulation results are in good agreement with the test results, and the ultimate bearing capacity and failure mode obtained by simulation are close to test results. [Conclusions] Increasing the thickness of the connecting plate can enhance the ultimate bearing capacity of the joint. Increasing the thickness of auxiliary angle steel has little effect on the bearing capacity of

收稿日期: 2021-09-09

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(17JS064)

通信作者: 陈伏彬(1981—), 男, 教授, 主要从事工程结构抗风方面的研究。E-mail: fbchen88@126.com

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxzbzk/home>

the joint, but it is beneficial to enhance the initial stiffness of the joint. The bolt spacing has a significant impact on the bearing capacity of the joint. Too small bolt spacing is easy to cause stress concentration and reduce the ultimate bearing capacity. It is suggested that the minimum bolt spacing should not be less than 3 bolt diameters.

Key words: joint of angle steel tower; finite element analysis; ultimate bearing capacity; failure mode; parameterization

自改革开放以来,我国输电技术发展迅速,短短几十年,输电线路已经覆盖全国绝大多数地区,电力行业已然成为关乎国计民生的支柱产业,是实现可再生能源大规模利用及战略性能源储备必不可少的一部分。为此,国家不断增加对电网的投入,不断建设电力基础设施,因而出现了大量超高压、特高压等大型复杂的输电线路。其中,输电塔作为输电线路重要的组成部分,关系到整个电网的安全^[1-2]。角钢塔作为输电塔的主要形式之一,在桁架节点构件连接上与其他输电塔存在差异。角钢塔节点板与角钢杆件之间多为单角钢螺栓连接,而一般桁架节点多为焊缝连接,由此导致这两种连接方式的传力特征也存在差异。除此之外,角钢塔还具有结构简单、加工方便、便于安装和运输等优点,因而被广泛应用。

目前,国内外学者开展了不少有关输电塔角钢节点的试验研究。CHENG 等^[3-4]通过原型试验研究了节点板的受力性能,对节点板宽度、厚度、杆件的边界条件、杆件伸入连接板的长度等进行参数化分析,研究其对节点承载力的影响。SHENG 等^[5]在前人的研究基础上进行参数化建模,利用有限元模型研究了节点板形状、连接杆刚度和长度、节点板和连接杆拼接方式等对节点板受压极限承载力的影响。HUNS 等^[6]对 6 个节点板进行受拉作用下的试验研究,考察了螺栓间距、端距、排列形式对受拉破坏形式的影响。程睿等^[7-10]通过对某特高压输电塔的单角钢进行足尺试验,考察了单角钢节点板在受拉剪、受压作用下的工作性能、破坏形态、极限承载力,通过参数化分析研究了几何参数、竖腹杆荷载比例、偏心作用对节点板承载力的影响。鞠彦忠等^[11]通过建立 K 形钢管一节点板的有限元模型,将模型计算结果与试验结果进行对比,验证了模型的有效性;研究了不同几何参数如加劲板厚度、主管轴向应力比、径厚比等对节点承载力的影响规律,并推导出了

节点极限承载力的计算公式。陈勇等^[12]对多组 K 形相贯节点进行足尺试验,研究连接板、鞍板、加劲环向等不同形式节点的受力特性,将有限元分析结果与试验结果进行比较,发现对相贯节点进行加劲构造能显著提升节点承载力,并在参数化分析后认为增加节点板长度、主管厚度、主管之间的直径比可提高节点承载力。杨俊芬等^[13]对 3 个足尺的角钢塔子结构主斜材的连接节点进行试验,研究了不同紧固力矩(100、300 和 500 N·m)对节点受力性能的影响,结果表明弹性范围和极限范围内的紧固力矩对节点的影响整体不大,但是对节点滑移的影响较显著。

综上所述,国内外对输电塔节点的研究虽然不少,但主要集中在对节点板的研究上,而对角钢塔主斜材节点的研究相对较少。文献[13]研究了大小不同的紧固力矩对角钢塔典型节点的影响,但是未考虑其他因素对承载力的影响。本研究将对 300 N·m 紧固力矩下的 SJ-2 试件进行研究,通过 ANSYS 软件进行有限元建模,并与文献[13]的试验结果进行对比,分析所建模型的有效性。在此基础上,通过参数化分析,考察连接板厚度、有无辅材角钢及辅材角钢厚度、主要受力构件上的螺栓间距对节点受力性能的影响,为输电塔角钢节点的设计和施工提供参考。

1 试验介绍

文献[13]中的试验包含 3 组足尺的试验构件,这些试验构件均位于角钢塔的典型节点上,主要由角钢肢(肢 1~6)、连接板及 6.8 级 M20 普通螺栓组成。由于该试验考察的是不同紧固力矩对节点受力性能的影响,故 3 组构件的尺寸完全一样。本研究主要对 300 N·m 紧固力矩下的试件 SJ-2 进行考察,并建立相应的有限元模型。试件的具体尺寸及细部构造如图 1 所示。

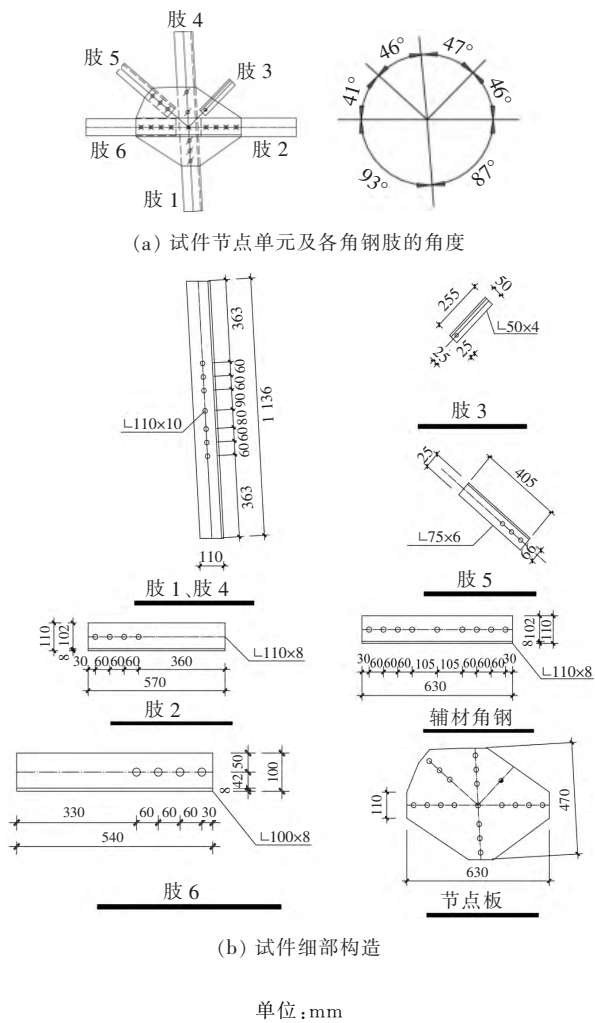


图 1 试件尺寸

Fig. 1 Size of specimens

文献[13]进行了 15 个标准试样的拉伸试验(共 5 组),得到了节点板和各角钢肢的屈服强度、极限强度、弹性模量等材料特性(表 1)以及节点的极限承载力、极限位移(表 2)。

表 1 节点各部位的材料特性

Table 1 Material properties of each part of the joint				
构件	屈服应力 f_y/MPa	极限应力 f_u/MPa	弹性模量 E_s/GPa	强屈比 f_u/f_y
肢 1 和肢 4	436	553	201	1.27
肢 2 和肢 6	402	596	200	1.48
肢 3	302	452	197	1.50
肢 5	416	621	203	1.49
连接板	392	550	200	1.40

表 2 节点极限承载力和极限位移
Table 2 Ultimate bearing capacity and ultimate displacement of the joint

角钢	极限承载力/kN	极限位移/mm
肢 2	533	15.5
肢 5	245	10.5

2 有限元模型的建立

2.1 单元类型的选取及网格划分

ANSYS 软件有很多单元类别,包括梁单元、壳单元、实体单元等形式,本研究选用实体单元进行建模。模型中角钢单元的形状具有一定的不规则性,故选用四面体网格 Solid187 单元对其进行拟合。Solid187 单元为 10 节点实体单元,每个节点有 3 个平动自由度,非常适合不规则形状网格的划分,且其具有较好的收敛性^[14]。对于连接板和螺栓这种形状比较规则的结构,可以采用 20 节点的六面体 Solid186 单元进行网格划分,其特性和 Solid187 单元接近,且这两种单元都具有弹性和塑性,以及大变形、大应变的能力。采用 20 mm 的网格尺寸对角钢单元进行划分,10 mm 的网格尺寸对连接板和螺栓进行划分。为提高计算结果的精度,沿厚度方向将连接板和角钢划分为 2 层网格。有限元模型的接触形式主要包括绑定接触、粗糙接触、摩擦接触、无摩擦接触等。对于角钢与连接板之间的接触,采用摩擦系数为 0.2 的摩擦接触,螺栓与角钢、连接板孔壁之间的接触则采用绑定接触的形式。

2.2 材料本构关系

由表 1 可知,肢 2 的屈服应力 $f_{y2}=402\text{ MPa}$,肢 5 的屈服应力 $f_{y5}=416\text{ MPa}$ 。螺栓采用极限强度为 1 040 MPa 的 M20 普通螺栓。以上材料的泊松比 $\mu=0.3$,弹性模量 $E_s=200\text{ GPa}$,密度 $\rho=7\,850\text{ kg/m}^3$ 。采用各向同性的双线性强化弹塑性模型^[15]。进入屈服阶段后的螺栓、角钢和连接板的切线模量均取弹性模量的 1/100,即 2 000 MPa,其本构关系如图 2 所示。

本构关系的具体表达式为:

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \sigma_s, & 0 < \epsilon_s < \epsilon_y \\ f_y + 0.01 E_s (\epsilon_s - \epsilon_y), & \epsilon_s > \epsilon_y \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_s 为构件的应力; E_s 为弹性模量; f_y 为屈服应力; ϵ_s 为构件的应变; ϵ_y 为构件的屈服应变。

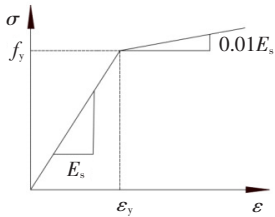


图 2 钢材的本构关系

Fig. 2 Constitutive relation of the steel

2.3 边界条件及加载方式

由试件 SJ-2 可知,节点的边界约束条件均为销轴的铰支座固定连接。约束边界处角钢 x 、 y 、 z 方向的平动及对绕 y 、 z 轴的转动限制使节点只能绕 x 轴转动,以此来模拟铰支座的边界条件。

加载过程分为两步:首先根据相关公式^[16]计算出施加在螺栓上的预紧力,为 75 kN;然后在肢 2、肢 5 角钢边界的几何中心位置按力的大小施加荷载,有限元模型及边界加载条件如图 3 所示。其中,图 3(b)中的字母 D、E、F、L、M、G 代表螺栓的预紧力,黄色箭头表示施加的拉力,J、K、H、I 代表边界处的约束条件。

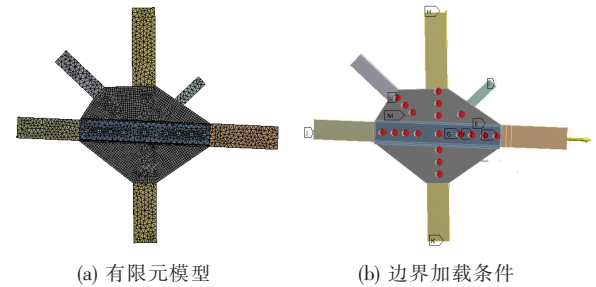


图 3 有限元模型及边界加载条件

Fig. 3 Finite element model and boundary loading conditions

3 有限元模型验证

文献[13]中,在试验加载的中后期,试件 SJ-2 的角钢肢 2 和肢 5 靠近连接板一侧的自由肢出现了较大的变形。受力角钢的螺栓与孔壁的挤压作用使螺栓孔的变形增大,螺栓端距减小,进而使肢 2、肢 5 处的螺栓受到的剪切作用不断增强,螺栓

进入塑性变形阶段。此外,肢 5 因偏心作用出现了轻微的扭转变形。当节点即将发生破坏时(约为预估承载力的 90%),肢 2、肢 5 螺栓孔因过大的挤压变形而变成椭圆形,随着荷载的不断增大,肢 2 角钢最终发生冲剪破坏,其螺栓被剪断。

试件的实际破坏形态与其有限元应力云图的比较如图 4 所示。

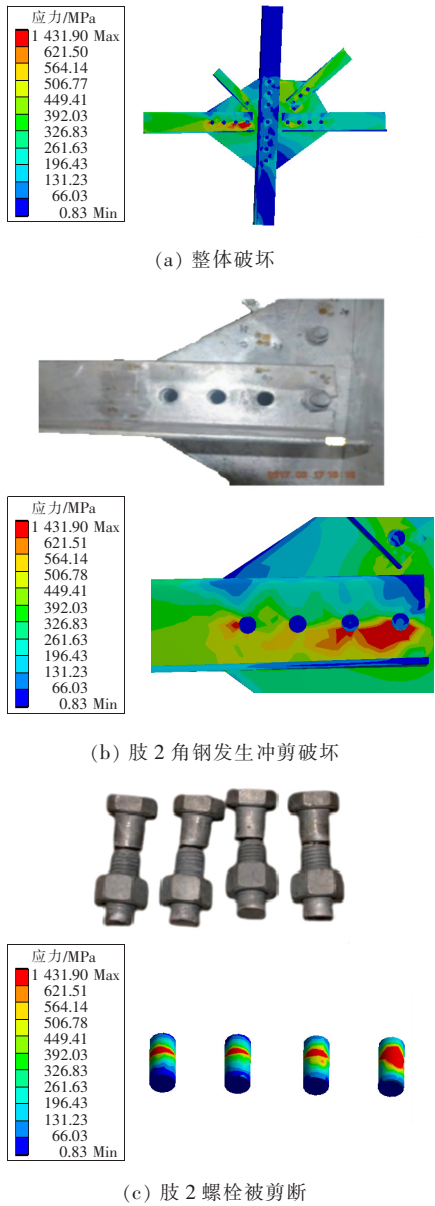
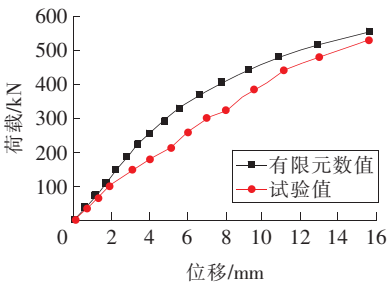


图 4 试件的实际破坏形态与其有限元应力云图的比较
Fig. 4 Comparison between actual failure patterns of specimens and their finite element stress nephograms

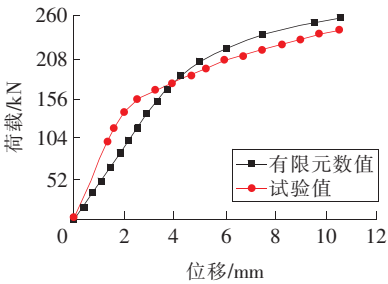
由图 4 可以看出,随着荷载的不断增大,肢 2 角钢靠近连接板位置处出现了比较明显的应力集中的现象,这和试验结果中肢 2 角钢发生冲剪破

坏的位置基本一致。当荷载增加到最大值时,肢 2 的最大应力远超其极限强度,构件发生冲剪破坏,此时,肢 2 处的螺栓被剪断,肢 5 处的螺栓发生轻微变形。总体来说,有限元模型得到的应力云图与试件的实际破坏形态基本吻合。

肢 2 角钢和肢 5 角钢的荷载—位移曲线的对比如图 5 所示。其中,横坐标为肢 2 和肢 5 角钢在平面 yOz 内的位移^[17],纵坐标为沿角钢方向作用的荷载。由图 5 可知,有限元模拟的荷载—位移曲线和试验实测的结果总体上变化趋势一致。随着荷载的增加,相同荷载作用下有限元模拟的位移小于试验测得的结果,即有限元模拟的极限承载力普遍略大于试验测得的结果,其主要原因是有限元分析中经简化的钢结构本构关系与实际构件不完全一致,且试验试件自身也存在一定的初始缺陷,试验装置加载的位置未与角钢的形心完全重合,存在一定的偏心作用。通过试验实测得到肢 2、肢 5 的极限承载力分别为 533 和 245 kN,而有限元模拟得到的结果分别为 556 和 260 kN,误差仅为 4.3% 和 6.1%,均在误差的允许范围内。



(a) 肢 2 角钢



(b) 肢 5 角钢

图 5 荷载—位移曲线的对比

此外,由图 5 还能看出,通过试验实测得到肢 2 的屈服荷载和对应的位移分别为 106.8 kN、

1.95 mm,有限元模拟得到的分别为 185.3 kN、2.74 mm;通过试验实测得到肢 5 的屈服荷载和对应的位移分别为 138.8 kN、2.01 mm,有限元模拟得到的分别为 170 kN、3.71 mm。由此发现,在加载初期由有限元模拟得到的试件初始刚度和屈服荷载与试验结果相比存在一定的偏差,这是由于在试验加载初期,螺栓和螺栓孔间的空隙致使产生了附加位移。且在试验加载初期,各试验装置之间未能充分接触,而有限元分析时各试验装置之间的接触为理想的接触状态。

4 有限元参数分析

由上述分析可知,有限元的破坏形态和荷载—位移曲线与试验结果基本一致,说明有限元模拟具有一定的有效性。本研究的主要目的是分析在 300 N·m 紧固力矩作用下其他因素对角钢塔典型节点承载力的影响,以及连接板厚度、有无辅材角钢及辅材角钢厚度、主要受力杆件的螺栓间距对节点受力性能的影响。有限元模型试件的具体尺寸见表 3。除了表 3 所列举的尺寸外,有限元模型试件的其他尺寸和试验所用试件的尺寸一致。

表 3 有限元模型试件的尺寸
Table 3 Specimen size of the finite element model

试件	连接板厚度	辅材角钢		螺栓间距
		肢长	肢厚	
JG-1	10	110	8	60
JG-2	12	110	8	60
JG-3	14	110	8	60
JG-4	16	110	8	60
JG-5	10	—	—	60
JG-6	10	110	10	60
JG-7	10	110	12	60
JG-8	10	110	8	55
JG-9	10	110	8	50

4.1 连接板厚度的影响

有限元模型试件 JG-1~JG-4 只连接板的厚度有所不同,其他参数均相同,其荷载—位移曲线如图 6 所示。由图 6 可以看出,随着连接板厚度的增加,节点的极限承载力的增幅不大。对于肢 2

角钢,在板厚小于 12 mm 时,增加板厚对承载力几乎没有影响;但当连接板厚度为 16 mm 时,节点的极限承载力比连接板厚度为 10 mm 时提升了 2.8%。对于肢 5 角钢,在连接板厚度为 12 mm 时,节点的极限承载力达到峰值,较连接板厚度为 10 mm 时提升了 3%,之后增加板厚反而使节点的极限承载力有所降低,这可能是因为板厚的增加使平面外的位移有所减小,肢 5 螺栓受到的平面内的剪切作用有所增强,致使节点的承载能力有所降低。但随着连接板厚度的增加,肢 2 角钢和肢 5 角钢的初始刚度几乎没有变化。由此可见,连接板厚度应根据实际工程的需要进行确定,不宜过大或过小。

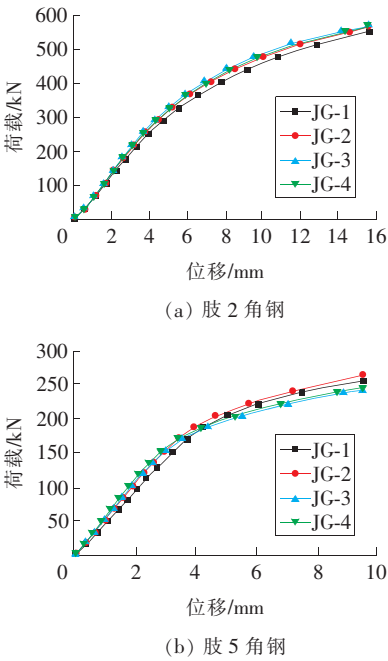


图 6 不同连接板厚度试件的荷载—位移曲线
Fig. 6 Load-displacement curves of specimens with different joint plate thickness

4.2 辅材角钢的影响

有限元模型试件 JG-1、JG-6、JG-7 只辅材角钢的厚度有所不同,JG-5 没使用辅材角钢,各试件的其他参数均相同,其荷载—位移曲线如图 7 所示。由图 7 可以看出,随着辅材角钢厚度的增加,节点的极限承载力和初始刚度几乎没有增大;在未使用辅材角钢时,节点的极限承载力略有下降,且降幅小于 1%,但初始刚度下降得十分明显,肢 2 角钢和肢 5 角钢的初始刚度分别下降了 77.9%

和 47.6%,这对结构的受力很不利。由此可见,辅材角钢可以起到加固连接板、提高节点初始刚度的作用,避免节点在加载初期就产生过大的位移而发生平面外的失稳破坏。综上所述,从承载力、经济、实用等角度考虑,辅材角钢的厚度宜确定为 8 mm。

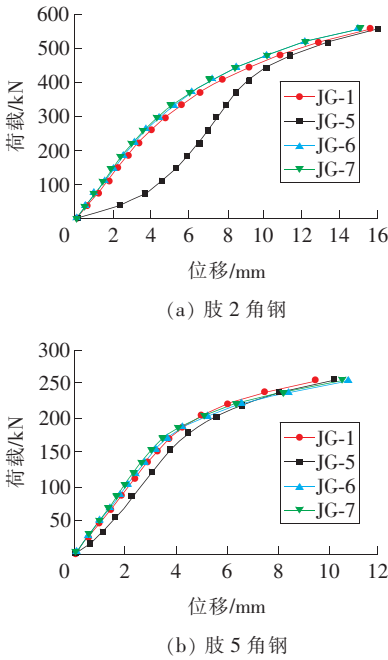


图 7 使用不同辅材角钢试件的荷载—位移曲线
Fig. 7 Load-displacement curves of specimens with different auxiliary angle steel

4.3 螺栓间距的影响

有限元模型试件 JG-1、JG-8、JG-9 只螺栓间距有所不同,其他参数均相同,其荷载—位移曲线如图 8 所示。

由图 8 可以看出,随着螺栓间距的不断减小,节点的极限承载力下降得较明显。当螺栓间距由 60 mm 下降至 50 mm 时,肢 2 角钢和肢 5 角钢的极限承载力分别下降了 4.3%和 5.5%,但其初始刚度几乎没有变化。这主要是因为对于受拉剪作用的构件,较小的螺栓间距会使螺栓周围出现应力集中现象,螺栓之间的相互影响变大,对角钢截面也会产生一定的削弱作用,致使截面承载力有所降低。针对过小的螺栓间距造成的应力集中现象,可以参考《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[18]中的相应构造措施予以解决,即限制螺栓之间的容许距离不小于 3d₀(d₀为螺栓直径)。

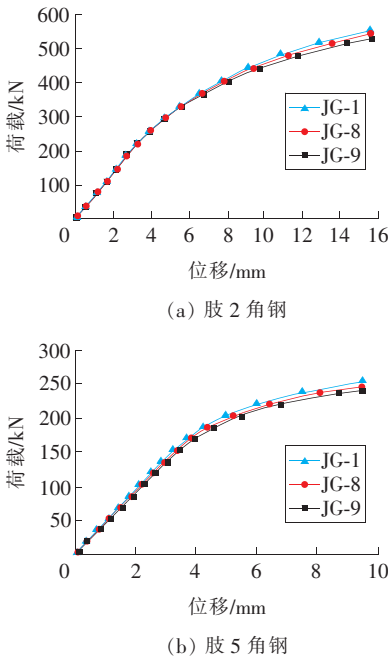


图 8 不同螺栓间距试件的荷载—位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curves of specimens with different bolt spacing

5 结论

本研究通过 ANSYS 软件进行有限元建模,将文献[13]的试验结果与有限元模拟结果进行了对比分析;分别分析了连接板厚度、有无辅材角钢及辅材角钢厚度、螺栓间距对节点受力性能的影响。得到的结论如下:

- 1) 有限元模拟结果与试验结果吻合较好,两者节点的极限承载力、试件的破坏模式基本一致,说明有限元模型能够较好地模拟角钢塔节点的受力性能,其模拟结果可作为参数化分析的依据。
- 2) 连接板厚度的增加能在一定程度上提高节点的极限承载力,但是厚度过大反而会降低节点的极限承载力;厚度的增加对初始刚度几乎没有影响。因此,连接板厚度应根据实际工程的需要进行确定,不宜过大或过小,建议连接板的厚度为 12 mm。
- 3) 辅材角钢的厚度对节点承载力的影响很小,但是不使用辅材角钢会大大降低节点的初始刚度,极限承载力也略微有所降低。因此,在实际工程中建议使用辅材角钢,其厚度宜为 8 mm。
- 4) 螺栓间距对节点初始刚度的影响可忽略不

计,但对节点承载力的影响比较大。螺栓间距越小,螺栓周围应力集中的现象越明显,对截面的削弱越强,最终造成节点承载力有所降低。螺栓间距的确定可参考《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)中的相应构造措施,即限制螺栓之间的容许距离不小于 3 倍螺栓直径。

〔参考文献〕

- [1] 刘振亚. 创新与超越:“十一五”电网建设[M]. 北京:中国电力出版社,2011.
LIU Zhen-ya. Innovation and transcendence: power grid construction in “The Eleventh Five-Year Plan” [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
- [2] 翁兰溪,赵金飞,林锐,等. 福建沿海台风风速分布特性及对输电线路的影响研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2020,17(3):95-101.
WEN Lan-xi, ZHAO Jin-fei, LIN Rui, et al. Investigation of distribution characteristics of typhoon in Fujian coastal area and its influence on transmission lines[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science), 2020, 17(3): 95-101.
- [3] CHENG J J R. Compressive behavior of gusset plate connections [R]. Canada: University of Alberta, 1987.
- [4] CHENG J J R, YAM M C H, HU S Z. Elastic buckling strength of gusset plate connections[J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(2): 538-559.
- [5] SHENG N, YAM C H, IU V P. Analytical investigation and the design of the compressive strength of steel gusset plate connections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2002, 58: 1 473-1 493.
- [6] HUNS B B S, GRONDIN G, DRIVER R G. Block shear behavior of bolted gusset plates[R]. Canada: University of Alberta, 2002.
- [7] 程睿,孙必祥,杨溥,等. 单角钢螺栓连接节点板受压性能及极限承载力研究[J]. 建筑结构, 2009, 39(7): 33-36.
CHENG Rui, SUN Bi-xiang, YANG Pu, et al. Compressive behavior and ultimate strength of gusset plate contacted with single angle[J]. Building Structure, 2009, 39(7): 33-36.
- [8] 程睿,黄宗明,孙必祥,等. 单角钢连接节点板受压性能试验研究与承载力计算方法[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(4): 61-68.
CHENG Rui, HUANG Zong-ming, SUN Bi-xiang, et

- al. Experimental study and design of compressive behavior of gusset plates connected with single angle members[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(4): 61-68.
- [9] 程睿, 何井运, 黄宗明, 等. 单角钢螺栓连接节点板拉剪性能研究[J]. 深圳大学学报(理工版), 2009, 26(4): 382-388.
- CHENG Rui, HE Jing-yun, HUANG Zong-ming, et al. Study on tension and block shear behavior of bolted single angle-gusset plates[J]. Journal of Shenzhen University(Science and Engineering), 2009, 26(4): 382-388.
- [10] 程睿. 高耸输电塔钢桁架节点静力性能及设计方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- CHENG Rui. Study and design of the static behavior of steel truss joints of transmission towers[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [11] 鞠彦忠, 李佳洋, 王德弘, 等. K形钢管一板节点的极限承载力研究[J]. 东北电力大学学报, 2018, 38(1): 73-81.
- JU Yan-zhong, LI Jia-yang, WANG De-hong, et al. A study of ultimate load capacity of K-type tube-gusset plate connections[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2018, 38(1): 73-81.
- [12] 陈勇, 刘青松, 沈国辉, 等. 鞍板和环板加劲 K 形相贯节点承载力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(9): 165-177.
- CHEN Yong, LIU Qing-song, SHEN Guo-hui, et al. Experimental study on bearing capacity of tubular K-joints stiffened with saddle plates and ring stiffeners[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(9): 165-177.
- [13] 杨俊芬, 战宇皓, 胡锋涛, 等. 角钢塔子结构连接节点受力性能研究[J]. 建筑钢结构进展, 2019, 21(4): 103-114.
- YANG Jun-fen, ZHAN Yu-hao, HU Feng-tao, et al. A study on the mechanical performance of connected joints of angle steel tower substructures[J]. Progress in Steel Building Structure, 2019, 21(4): 103-114.
- [14] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- WANG Xin-min. Numerical analysis of engineering structure with ANSYS[M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [15] 苏子威. 输电塔主材夹具加固构件的受力性能研究及输电塔抗风分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- SU Zi-wei. Study on mechanical behavior of reinforcement of transmission tower leg with fixture and wind resistance analysis of transmission tower [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [16] 陈绍蕃. 钢结构设计原理[M]. 第 3 版. 北京: 科学出版社, 2005: 335.
- CHEN Shao-fan. Principle of steel structure design [M]. 3rd edition. Beijing: Science Press, 2005: 335.
- [17] 韩时琳, 翟信秀, 黄筱云, 等. 考虑材料非线性的船舶与单墩碰撞有限元数值模拟[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2019, 16(2): 49-56.
- HAN Shi-lin, ZHAI Xin-xiu, HUANG Xiao-yun, et al. Nonlinear finite element analysis of barge collision with a single pier[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science), 2019, 16(2): 49-56.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of steel structures: GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.

(编辑 石月珍)