

引用本文: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.
XU Zai-gen, ZHENG Wei-dong, LIU Jun-cai, 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

输电塔单变双角钢过渡节点试验研究与计算方法

徐再根¹, 郑为东¹, 刘俊才², 刘文棚², 田利²

(1. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013; 2. 山东大学 土建与水利学院, 山东 济南 250061)

摘要:选取3个单变双角钢过渡节点作为研究对象,制作8个过渡节点模型,将其中6个足尺试验模型分别在受拉和受压工况下进行弹性加载试验,2个缩尺试验模型分别在受拉和受压工况下进行破坏加载试验,结合有限元模拟,分析单变双角钢过渡节点的力学特性和受力情况。数值模拟了弹性和破坏加载工况下单变双角钢过渡节点关键部位的应变变化和应力分布,并与加载试验进行对比。考虑上、下靴板之间的偏心距对单变双角钢过渡节点水平板上水平应力不均匀分布的影响,基于有限元模拟和加载试验,对现有的不同单变双角钢过渡节点水平板厚度计算方法进行比较与评估,通过与水平板设计厚度进行对比,分析不同计算方法的优化效果和安全裕度。结果表明:上、下靴板与水平板连接焊缝的偏心距是影响水平板受力的主要因素,水平板上对应上、下靴板的十字交汇处水平应力最大,并向四周扩散且逐渐减小;有限元模拟结果与试验结果吻合良好,研究结果可为单双角钢过渡节点的结构设计提供指导。

关键词:单变双角钢过渡节点;加载试验;力学特性;偏心距

中图分类号:TU347

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2022)02-0069-09

Experimental Study and Calculation Method of Single-double Angle Steel Transition Joint of Transmission Tower

XU Zai-gen¹, ZHENG Wei-dong¹, LIU Jun-cai², LIU Wen-peng², TIAN Li²

(1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Corp., Ltd., Jinan 250013, Shandong, China;

2. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China)

Abstract: Three single-double angle steel transition joints were selected as the research objects, eight transition joint models were fabricated. The elastic loading tests on six full-scale test models were carried out under tension and compression conditions respectively. The failure loading tests on two scale test models were carried out under tension and compression conditions respectively. Combined with finite element simulation, the mechanical properties and stress of single-double angle steel transition joint were analyzed. The strain variation and stress distribution of the key parts of the single-double angle steel transition joint under elastic and failure loading conditions were numerically simulated and compared with the loading test. Considering the influence of the eccentricity between the upper and lower shoe plates on the uneven distribution of horizontal stress on the horizontal plate of single-double angle steel transition joint, based on finite element

收稿日期:2021-04-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51778347);山东大学青年学者未来计划项目(2017WLJH33)

作者简介:徐再根(1980-),男,山东莱州人,高级工程师,工学硕士,E-mail:xuzai-gen@sdepcei.com。

simulation and loading test, the existing calculation methods of horizontal plate thickness of different single-double angle transition joints were compared and evaluated. By comparing with the design thickness of horizontal plate, the optimization effect and safety margin of different calculation methods were analyzed. The results show that the eccentricity of the connecting weld between the upper and lower shoe plates and the horizontal plate is the main factor affecting the stress of the horizontal plate. The horizontal stress at the intersection of the corresponding upper and lower shoe plates on the horizontal plate is the largest, and it diffuses around and gradually decreases. The finite element simulation is in good agreement with the experimental results, and the research results can provide guidance for the structural design of single-double angle steel transition joints.

Key words: single-double angle steel transition joint; loading test; mechanical property; eccentricity

0 引言

“特高压”是中国重点发展的新型基础设施建设项目之一,是未来一段时间内电力行业重点关注的课题。特高压输电线路具有空间跨度长、输电容量大和架设塔体高等特点,在外界环境荷载(大风荷载、覆冰跳跃、地震作用、断线冲击等)下的非线性振动响应尤为显著,传统的单角钢截面主材已无法满足输电塔的强度设计要求。在特高压输电塔实际工程中,为了满足承载要求并提高板件利用率,通常将输电塔受力较大的底部主材更换为组合双角钢截面。由于单变双角钢过渡节点中连接水平板的上、下靴板中心线不重合且存在不可忽略的偏心距离,导致从单角钢主材向双角钢主材的传力路径复杂且不清晰。由于《架空输电线路杆塔结构设计技术规定》^[1]和《110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范》^[2]中未给出统一的计算方法进行指导,目前在过渡节点的结构设计中,通常根据设计经验增大水平连接板件的厚度,导致浪费大量的耗材成本和加工成本。因此,研究过渡节点的受力特点和承载性能对过渡节点的结构设计和优化具有重要意义。

单变双角钢过渡节点是满足角钢塔更高承载要求的一种新型节点形式,目前仅有少量学者对过渡节点的受力特性开展研究。黄宗明^[3]以单角钢连接节点板为研究对象开展了足尺试验,并通过有限元模拟方法研究了节点板的破坏机理及破坏模式。程睿等^[4]开展了单角钢连接节点板的足尺试验,提出了节点板受压承载力的计算方法。李光照^[5]通过电测技术研究了 10 种不同构造形式,共 24 个常用双角钢杆件桁架外加式焊接节点板的原型试验,得到了节点板破坏机理并提出相应的设计原则。杨利容

等^[6]分析了过渡节点的受力情况,并验证连接板件满足安全要求。鞠彦忠等^[7-8]研究了钢管-角钢过渡节点的极限承载力,并与现行规范进行对比,分析了不同参数对极限承载力的影响程度。陈旭阳^[9]基于近似平面假定理论推导了过渡节点水平连接板厚度的计算方法,并通过数值模拟和真型试验验证了计算方法的正确性。朱昌建等^[10]建立不同尺度的过渡节点模型,研究了不同参数对过渡节点力学特性的影响规律。杨垂玮等^[11]通过研究过渡节点的传力机理,明确影响水平连接板受力情况的控制因素。Yam 等^[12]发现当水平板上的荷载增大到一定程度后,水平板出现屈服且内力发生重新分布。Sheng 等^[13]提出了一种非弹性受压性能和强度的研究方法,参数化分析了水平板承载力的变化情况。薛晓敏等^[14]通过仿真计算探究了节点在拉压荷载作用下的受力机理和破坏模式,并基于屈服线法理论提出单变双角钢关键节点整体承载力设计推荐公式。开展单变双角钢过渡节点加载试验是研究其承载性能最可靠的方法,然而目前的相关研究主要基于数值模拟和理论分析,鲜少涉及过渡节点加载试验。

基于上述的研究背景与现状,本文依托某特高压输电线路实际工程,选取 3 个典型的单变双角钢过渡节点为研究对象,开展过渡节点数值模拟和加载试验,研究其在受拉和受压工况下的承载性能和受力情况,为过渡节点的结构设计提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

基于特高压输电线路实际工程,选取 3 个单变双角钢过渡节点为研究对象,共制作 8 个过渡节点试验模型,其中 6 个足尺试验模型分别在受拉和受

压工况下进行弹性加载试验,2个缩尺试验模型分别在受拉和受压工况下进行破坏加载试验,过渡节点试验模型如图1所示。根据缩尺理论将过渡节点的几何尺寸按照缩尺比例1:2进行设计,其他相关参数按照量纲分析法进行确定。鉴于本文的研究重点为单变双角钢过渡节点连接板件的强度和稳定问题,为了防止角钢构件先于连接板件发生破坏,适当增大了缩尺试验模型中单、双角钢构件的厚度,过渡节点试验模型的尺寸参数如表1所示。各过渡节点的角钢构件、5E3-SJC4节点的水平板和靴板采用Q420钢材,其余构件采用Q355钢材,角钢与靴板之间采用8.8级的高强螺栓进行连接,且足尺与缩

尺模型螺栓型号分别为M24和M12。由于输电塔主材沿塔身高度存在倾角,在加工试验模型中,单角钢与水平板的夹角为 $87^\circ(93^\circ)$,双角钢与水平板的夹角为 $93^\circ(87^\circ)$ 。节点试验模型与加载装置及反力架的组装如图2所示。

1.2 加载制度及测点布置

本次试验采用MTS液压伺服加载系统进行加载。试验采用分级加载^[15]形式进行,荷载控制方式采用力控制,加载速率为 $1\text{ kN}\cdot\text{s}^{-1}$,每级加载保持5 min。受限于试验条件和仪器吨位等因素,弹性和破坏试验的受拉工况设计荷载为640 kN,受压工况设计荷载为940 kN。弹性试验的加载级别为设计



图1 足尺与缩尺过渡节点试验模型

Fig. 1 Full-scale and Scale Transition Joint Test Models

表1 试件尺寸及加载工况

Table 1 Specimen Dimensions and Loading Conditions

试件编号	水平板厚度/ mm	水平板长度/ mm	水平板宽度/ mm	上靴板厚度/ mm	下靴板厚度/ mm	单角钢型号	双角钢型号	螺栓数量/个	加载工况
5E5-SJK2A-1	30	1 350	970	26	26	L250×26	2L220×20	70	受拉/弹性
5E5-SJK2A-2	30	1 350	970	26	26	L250×26	2L220×20	70	受拉/弹性
5E3-SJC4-1	24	850	850	20	20	L200×20	2L180×16	46	受拉/弹性
5E3-SJC4-2	24	850	850	20	20	L200×20	2L180×16	46	受压/弹性
5E5-SJ4A-1	30	1 350	970	28	24	L250×28	2L220×22	72	受拉/弹性
5E5-SJ4A-2	30	1 350	970	28	24	L250×28	2L220×22	72	受压/弹性
5E3-SJC4-SC1	12	425	425	10	10	L100×20	2L90×16	46	受拉/破坏
5E3-SJC4-SC2	12	425	425	10	10	L100×20	2L90×16	46	受压/破坏



图2 节点组装

Fig. 2 Joint Assembly

荷载的0%、30%、50%、75%、100%;破坏试验的加载级别为设计荷载的0%、30%、50%、75%、90%、95%、100%,加载方式如图3所示。此外,在进行正式加载之前,对过渡节点试验模型均进行预加载,预加载分2级进行施加,每级加载值为设计荷载的10%,加载速率和保持时间同正式加载,加载完毕后以 $10\text{ kN}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速率进行卸载,预加载用以保证试验模型安装的合理性和加载系统的稳定性。

由于上、下靴板与水平板的连接焊缝存在不可

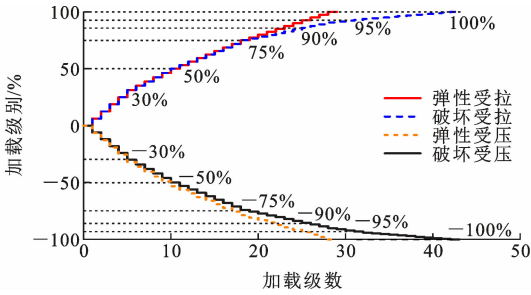


图3 试验加载制度
Fig. 3 Test Loading System

忽略的偏心距离,当荷载从上靴板传至下靴板时,在水平板上产生较大的偏心力矩,该偏心力矩是影响水平板受力的主要因素^[9]。为了记录不同加载级别下过渡节点试验模型的受力情况,在上、下靴板与水平板的相交区域附近布置数个应变片和应变花,过渡节点试验模型的应变测点布置如图4所示,其中H代表应变花,P代表应变片。

1.3 材性试验

过渡节点试验模型加工过程中,按照《钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备》(GB/T

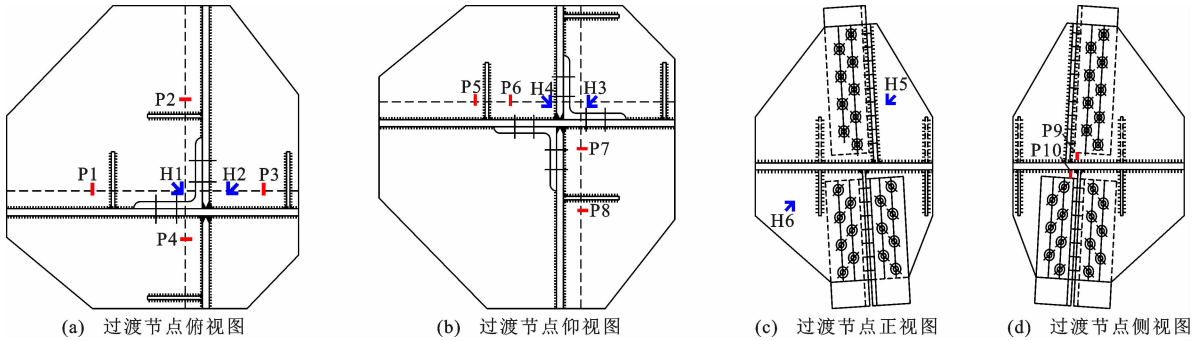


图4 应变测点布置

Fig. 4 Layout of Strain Measuring Points

2975—2018)的相关要求,在上、下靴板和水平板母材上预留样坯,根据《金属材料室温拉伸试验方法》(GB/T 228—2002)^[16]对样坯加工成形并进行单向拉伸试验。材性试样共分为8组,每组加工3个试件,图5给出了材性试验尺寸信息,试样长度分为A、B两类,图6为材性试样实物。材性试验主要测定项目包括钢材的屈服强度、极限强度和伸长率等,每组结果取3个试件的平均值并列于表2。

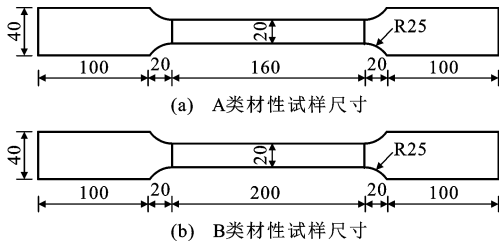


图5 材性试样尺寸(单位:mm)

Fig. 5 Dimensions of Material Property Samples (Unit:mm)



图6 材性试样照片

Fig. 6 Picture of Material Property Samples

表2 材性试验结果

Table 2 Results of Material Property Test

钢材型号	厚度/mm	屈服强度 σ_y /MPa	极限强度 σ_u /MPa	强屈比 σ_u/σ_y	伸长率 $\delta/\%$
Q420	10	417	540	1.29	27
	12	443	557	1.26	30
	20	439	565	1.29	24
	24	425	552	1.30	27
Q355	24	422	568	1.35	29
	26	441	591	1.34	28
	28	353	530	1.50	25
	30	359	516	1.44	31

2 有限元模型验证与试验结果分析

2.1 有限元分析模型

在ABAQUS有限元软件中采用C3D8R实体单元建立单双角钢过渡节点精细化模型,由于缩尺试验模型(5E3-SJC4-SC)是基于足尺试验模型

(5E3-SJC4)按照 1:2 的缩尺比例进行设计,图 7 仅给出了编号为 5E3-SJC4、5E5-SJK2A 和 5E5-SJ4A 的过渡节点有限元模型。材料本构采用理想弹塑性模型,构件材料参数采用表 2 中材性试验的测定结果。水平板与加劲板、靴板的连接焊缝采用“Tie”模拟,螺栓与连接板件的相互作用采用硬接触和摩擦接触,其摩擦因数取 0.15。在对过渡节点加载之前,先在螺栓杆中施加螺栓预紧力^[17-18],共设置 3 个

分析步,第一分析步对螺栓截面沿轴向施加较小的螺栓荷载,使模型完成初始接触,便于计算收敛;第二分析步施加预紧力实际值;第三分析步修改荷载施加方式为固定在当前长度。将上端板的上表面设置为耦合面,面中心点为耦合点,单角钢主材的形心轴垂直于上端板且通过其形心,进而设置第四分析步,根据图 2 的加载制度在上端板耦合点上施加垂直于角钢轴向的集中力,且在下端板底部设置固定

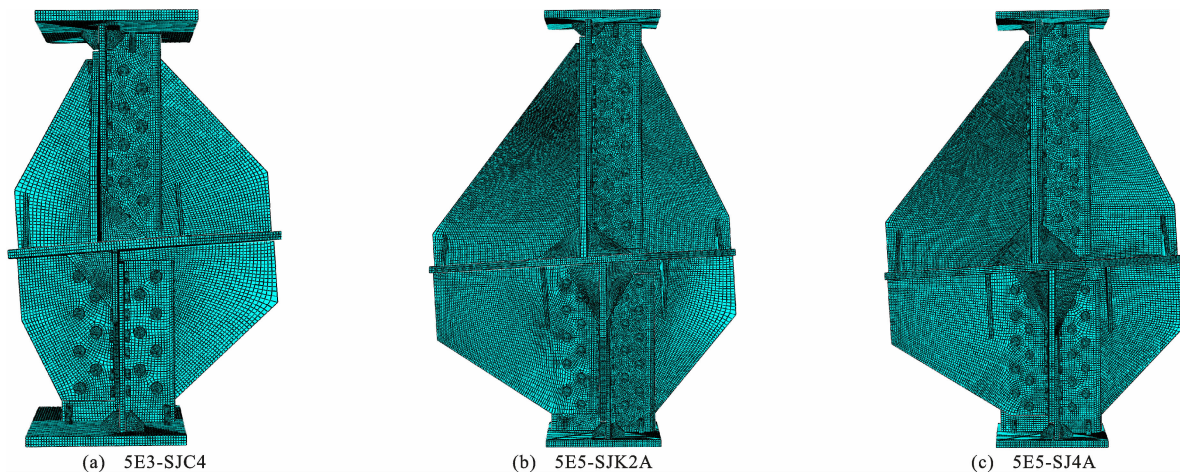


图 7 过渡节点有限元模型

Fig. 7 Finite Element Models of Transition Joints

边界条件。

2.2 有限元模型验证与试验结果分析

对 6 个足尺过渡节点试验模型分别在受拉和受压工况下进行弹性加载试验。本节仅给出了不同加载级别下 P1、H1、H2、P3 四个测点的应变数据,如图 8 所示。可以看出,随着荷载增加,各测点记录的应变值逐渐线性增大。与其他测点相比,测点 H2 呈现出较大的应变值,表明水平板上对应上、下靴板的十字交汇处水平应力最大,并向四周扩散且逐渐减小。同时,由足尺试验得到的荷载-应变曲线与数值模拟吻合较好,验证了有限元模型的正确性。

对 2 个缩尺过渡节点试验模型分别在受拉和受压工况下进行破坏加载试验。表 3 给出了不同加载级别下 P1、H1、H2、P3 四个测点的应变数据。通过对比加载试验和数值模拟得到的不同加载级别下各测点的应变值,验证了建立的有限元模型能够准确地预测过渡节点的受力情况。通过表 3 可以看出,随着荷载增加,各测点的应变逐渐线性增大。与弹性加载试验得到的应变分布规律相同,位于靴板与水平板相交区域的测点 H2 应变最大,表明靴板与水平板的相对位置对水平板的受力有很大的影响。

当荷载达到 940 kN 时,过渡节点的连接板件

发生明显的弯曲变形,此时终止加载试验。图 9 给出了破坏试验中过渡节点的变形模式,并与数值模拟进行对比。由于上、下靴板与水平板的连接焊缝存在偏心距离,当荷载传至水平板时,偏心弯矩较大而导致水平板发生弯曲变形,如图 9(a)、(b)所示。发生弯曲变形的水平板通过焊缝影响了上、下靴板的受力情况,进而导致上、下靴板出现明显变形,如图 9(c)、(d)所示。通过图 9 可以看出,由破坏试验得到的过渡节点变形模式与数值模拟吻合较好,进一步验证了有限元模型的正确性,为后续的单变双角钢过渡节点模拟分析奠定基础。

3 单变双角钢过渡节点计算方法比较

由于上、下靴板与水平板连接焊缝存在较大的偏心距离,当荷载从上靴板经过水平板传至下靴板时,在水平板上产生的偏心力矩是影响其受力的主要因素。基于单变双角钢过渡节点理论分析与数值模拟,文献[19]分析了上、下靴板与水平板连接焊缝的偏心距对水平板受力的影响规律,对水平板上的不均匀应力进行等效,通过引入弯矩调整系数和弯矩强化系数,提出了一种确定过渡节点水平板厚度 t 的计算方法,即

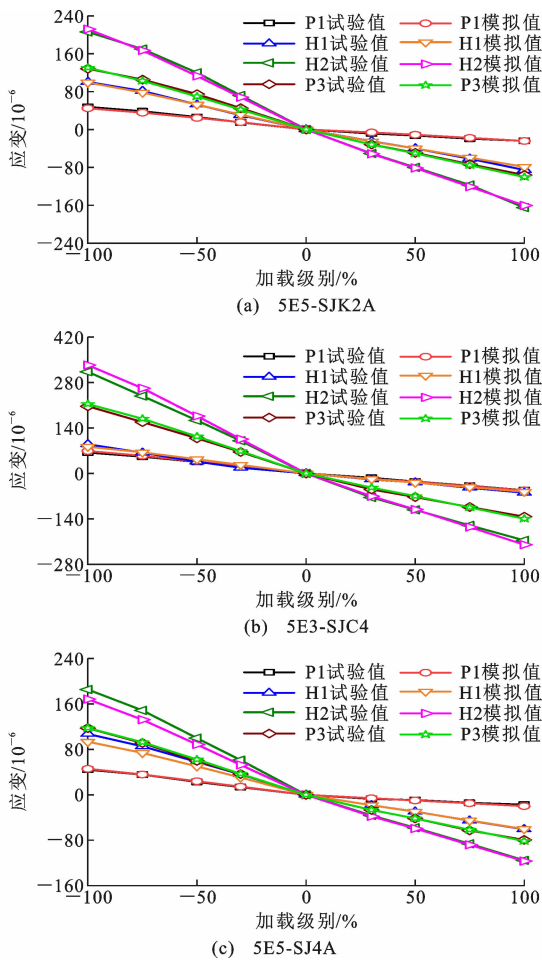


图8 弹性加载试验的应变曲线

Fig. 8 Strain Curves of Elastic Loading Tests

$$t \geq \sqrt{\frac{6Fe\beta}{\alpha(L_h + L_w)f}} \quad (1)$$

表3 破坏加载试验的应变值

Table 3 Strain Values of Failure Loading Tests

加载工况	加载级别/%	测点 P1 应变/ 10^{-6}		测点 H1 应变/ 10^{-6}		测点 H2 应变/ 10^{-6}		测点 P3 应变/ 10^{-6}	
		试验值	模拟值	试验值	模拟值	试验值	模拟值	试验值	模拟值
受拉	30	-56.6	-63.5	-136.9	-121.3	-289.6	-316.0	-176.7	-197.8
	50	-105.9	-101.2	-198.5	-194.1	-520.6	-504.9	-316.5	-317.2
	75	-161.1	-151.9	-290.8	-291.1	-800.9	-757.6	-487.5	-477.3
	90	-192.9	-183.7	-349.2	-351.4	-967.3	-915.9	-589.5	-578.3
	95	-197.4	-190.0	-360.5	-363.2	-1 001.8	-948.0	-612.7	-598.7
	100	-208.5	-202.5	-375.0	-386.9	-1 068.9	-1 013.3	-648.0	-640.1
受压	-30	92.6	89.8	197.0	192.9	430.3	458.5	347.7	381.1
	-50	160.9	149.7	343.7	320.9	815.8	766.0	671.8	636.3
	-75	250.2	223.8	518.5	476.6	1 218.5	1 149.0	1 031.7	953.6
	-90	300.7	278.6	653.9	600.5	1 469.8	1 468.4	1 251.4	1 214.1
	-95	311.5	293.1	690.7	634.9	1 536.3	1 563.5	1 306.6	1 289.7
	-100	324.9	316.4	732.4	690.8	1 638.4	1 722.9	1 368.4	1 418.4

$$\beta = \frac{L_w}{1.535L_z} \quad (2)$$

式中： α 为弯矩调整系数； β 为弯矩强化系数； L_h 为水平板长度； L_w 为水平板宽度； F 为施加荷载； e 为上、下靴板的偏心距； L_z 为上角钢肢宽； f 为水平板强度设计值。

根据不同偏心距下单变双角钢过渡节点的弯矩调整系数 α 散点分布规律,为了保证水平板的计算厚度满足过渡节点的受力要求,将弯矩调整系数 α 采用双线性模型进行包络处理,如图10所示。

如前所述,目前关于单变双角钢过渡节点水平板厚度的规范没有给出相应的计算公式,导致在节点设计中存在较大的盲目性和主观性。为了评估文献[19]中水平板厚度计算方法的合理性,进一步对比了已提出的水平板厚度设计方法和上述试验结果。

文献[9]考虑水平板上弯矩分布的不均匀性,将弯曲应力作为水平板承载力的主要控制因素,提出了水平板弯矩比值与惯性矩的关系,推导了水平板厚度计算方法,即

$$t \geq \sqrt{\frac{64(7.04\kappa + 0.022)M_p}{f}} \quad (3)$$

式中： κ 为力传递系数； M_p 单位长度弯矩。

文献[20]通过分析单变双角钢过渡节点的受力机制和破坏模式,明确上、下靴板的几何交汇处出现明显的应力集中现象,提出了应力扩散长度将水平板中的不均匀应力进行等效,进而推导了水平板厚度计算方法,即

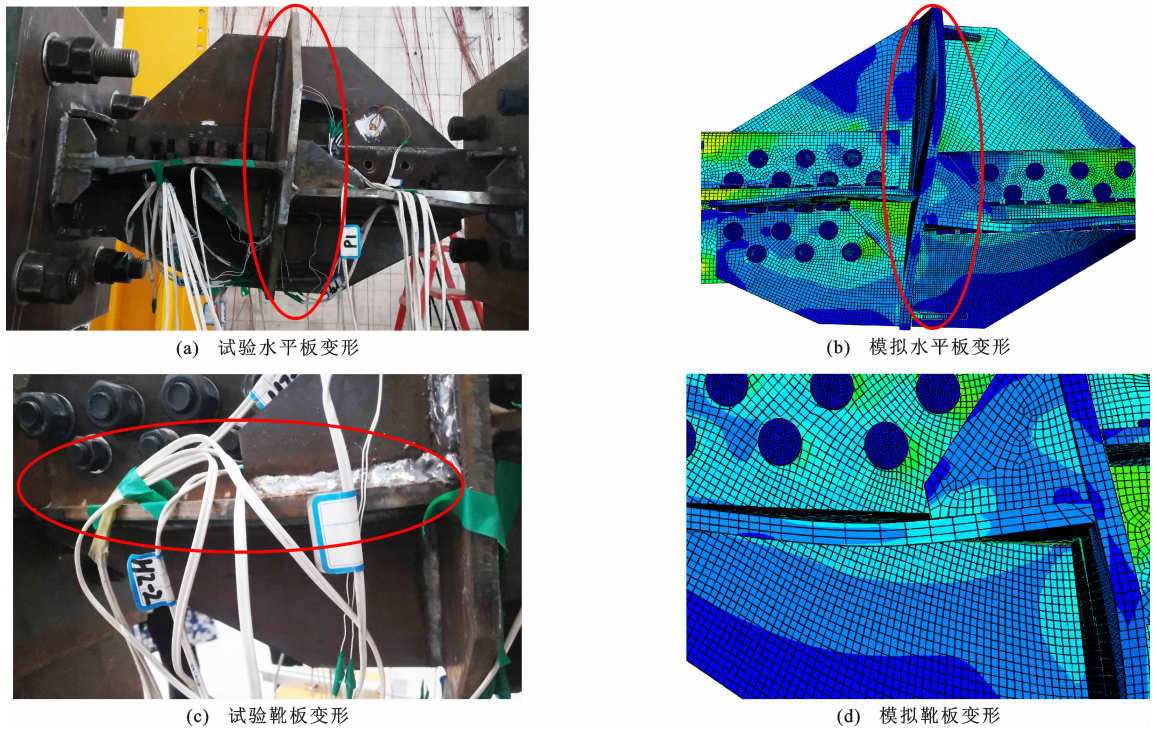


图 9 试验与数值模拟变形对比

Fig. 9 Comparison of Deformation Between Test and Numerical Simulation

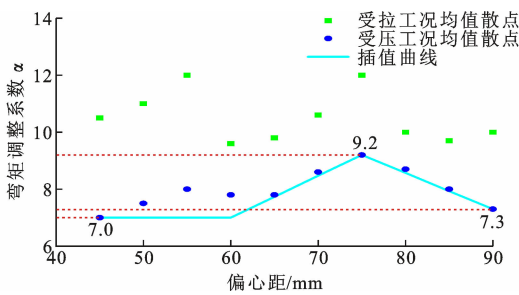


图 10 偏心距与 α 关系

Fig. 10 Relationship Between Eccentricity and α

$$t \geq \sqrt{\frac{6\alpha qL}{f}} \quad (4)$$

式中: α' 为内力系数; L 为应力传递强化长度; q 为等效均布线荷载。

采用上述计算方法计算了编号 5E5-SJK2A、5E3-SJC4 和 5E5-SJ4A 的过渡节点水平板厚度,结果如表 4 所示。可以看出,对不同单变双角钢过渡节点采用文献[9]与文献[20]计算的水平板厚度均比设计(试验)厚度大,表明这 2 种设计方法偏于保守;文献[19]计算的水平板厚度均比节点设计(试验)厚度小,表明这种方法对节点水平板厚度实现了进一步优化,其中 5E5-SJK2A 过渡节点的厚度优化效果最好,优化率达 14.1%。

为了验证计算方法的合理性,以编号为 5E5-

表 4 不同水平板厚度计算方法对比

Table 4 Comparison of Calculation Methods for Different Horizontal Plate Thickness

过渡节点编号	设计(试验)厚度/mm	计算厚度/mm		
		文献[19]	文献[9]	文献[20]
5E5-SJK2A	30	25.78	38.95	36.62
5E3-SJC4	24	22.02	27.47	26.25
5E5-SJ4A	30	26.64	40.81	37.60

SJK2A-2 的过渡节点为例进行数值模拟分析。该过渡节点的设计偏心距为 76 mm,将表 1 中的尺寸参数代入公式(3)、(4)中,得到水平板计算板厚为 26 mm,并与水平板设计(试验)板厚 30 mm 进行对比,如图 11 所示。可以看出:受压工况中,厚度优化前后的水平板均未达到屈服,厚度为 30 mm 和 26 mm 的水平板最大应力分别为 288 MPa 和 325 MPa,且优化后的水平板材料利用率明显提升;受拉工况中,厚度为 30 mm 的水平板最大应力为 278 MPa,厚度为 26 mm 的水平板最大应力为 327 MPa,均未达到屈服,表明优化后的水平板满足过渡节点的设计要求。

综上所述,文献[19]通过考虑上、下靴板偏心距对水平板受力的影响规律,明确了过渡节点的力学特性,并对水平板上的不均匀水平应力进行包络强化。通过与过渡节点设计厚度进行对比,验证了该

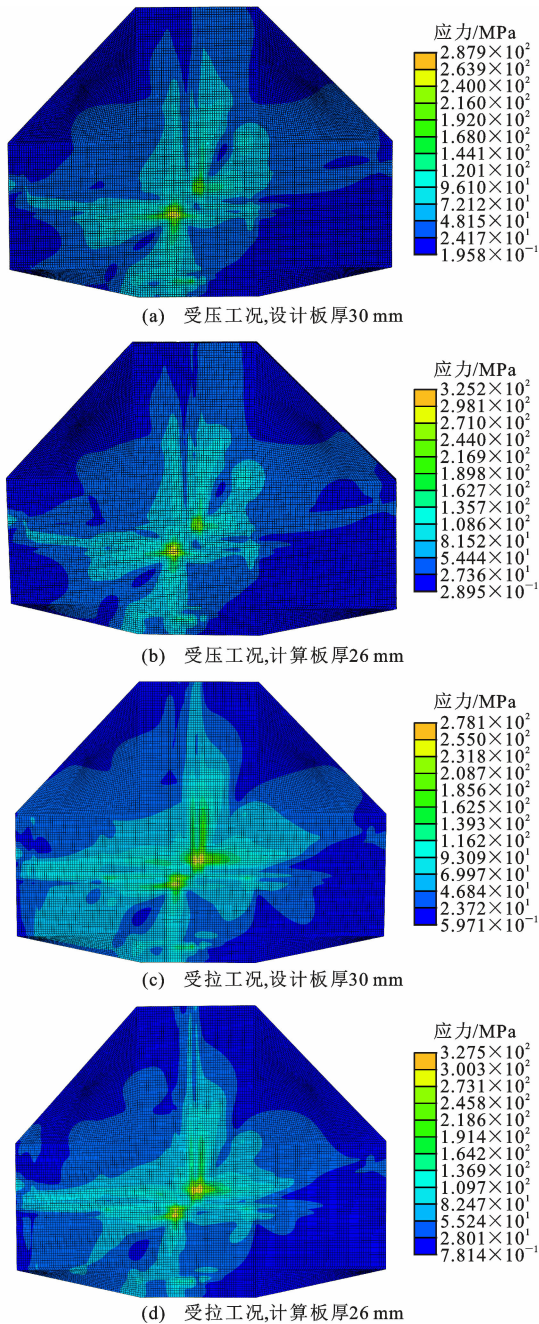


图 11 5E5-SJK2A 过渡节点设计板厚与计算板厚的应力云图对比

Fig. 11 Comparison of Stress Nephogram Between Design Plate Thickness and Calculated Plate Thickness of Transition Joint 5E5-SJK2A

方法不仅具有良好的水平板厚度优化效果,也能够满足水平板承载力要求。将提出的方法应用于实际工程中能够节约过渡节点的耗材成本,为过渡节点的结构设计提供指导。

4 结 语

(1)通过开展单变双角钢过渡节点真型试验,研

究了弹性工况和破坏工况下过渡节点的受力特性,确定了过渡节点的极限承载能力,且有限元模拟与试验结果吻合良好,验证了有限元模型的合理性。

(2)单变双角钢过渡节点真型试验和数值模拟结果表明,水平板上对应上、下靴板的十字交汇处水平应力最大,并向四周扩散且逐渐减小,明确了偏心距是影响过渡节点受力的主要因素。

(3)通过与水平板设计(试验)厚度进行对比,对现有的过渡节点水平板厚度计算方法合理性进行了评估,分析了不同计算方法的厚度优化效果和安全裕度,为单变双角钢过渡节点的结构设计提供指导。

参考文献:

References:

- [1] 架空输电线路杆塔结构设计技术规定:DL/T 5154—2012[S]. 北京:中国电力出版社,2013.
Technical Code for the Design of Tower and Pole Structures of Overhead Transmission Line; DL/T 5154—2012[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [2] 110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范:GB 50545—2010[S]. 北京:中国计划出版社,2010.
Code for Design of 110 kV-750 kV Overhead Transmission Line; GB 50545—2010 [S]. Beijing: China Planning Press, 2010.
- [3] 黄宗明. 大跨越塔节点研究报告[R]. 重庆:重庆大学,2008.
HUANG Zong-ming, Research Report on the Node of the Great Span Tower [R]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [4] 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.
- [5] 李光照. 桁架节点板弹塑性工作过程及破坏机理试验研究[J]. 建筑结构学报, 1987, 8(2): 10-22.
LI Guang-zhao, Research on the Test of Elastoplasticity and Failure Mechanism of Gusset Plate on Panel Points of Steel Truss [J]. Journal of Building Structures, 1987, 8(2): 10-22.
- [6] 杨利容,郑勇. 单角钢变双角钢节点试验研究分析[J]. 四川建筑科学研究, 2010, 36(1): 40-43.
YANG Li-rong, ZHENG Yong. Experimental Re-

- search on the Joint Connecting Single-angle to Double Angle[J]. Sichuan Building Science, 2010, 36(1): 40-43.
- [7] 鞠彦忠,王海超,张楚楚,等. 钢管角钢组合塔变坡节点承载力研究[J]. 中国电力, 2016, 49(8): 31-35.
JU Yan-zhong, WANG Hai-chao, ZHANG Chu-chu, et al. Study of Joint Bearing Capacity with Slope Change on Tower Consist of Steel Tubes and Angles [J]. Electric Power, 2016, 49(8): 31-35.
- [8] 鞠彦忠,雷俊方,王德弘,等. 钢管角钢组合塔节点极限承载力影响因素分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(8): 2781-2786.
JU Yan-zhong, LEI Jun-fang, WANG De-hong, et al. Parametric Study on Ultimate Strength of Tube-angle Combo Tower Joints [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(8): 2781-2786.
- [9] 陈旭阳. 特高压输电铁塔单双角钢变换关键节点承载能力研究[D]. 南昌:南昌大学, 2016.
CHEN Xu-yang. Load-bearing Capacity of the Key Conversion Nodes of Single- and Dual-angle Steel for Ultra-high-voltage Power Transmission Tower [D]. Nanchang: Nanchang University, 2016.
- [10] 朱昌建,张大长,韩军科. 单、双角钢过渡节点轴压承载力特性的研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(8): 16-20.
ZHU Chang-jian, ZHANG Da-chang, HAN Jun-ke. Analysis of Compressive Strength of Transitional Joints of Single and Double Angle[J]. Industrial Construction, 2016, 46(8): 16-20.
- [11] 杨垂玮,孟宪乔,兰志文,等. 输电铁塔单双角钢变换节点试验研究与承载力计算方法[J]. 钢结构, 2017, 32(6): 59-65.
YANG Chui-wei, MENG Xian-qiao, LAN Zhi-wen, et al. Bearing Capacity Calculation Method and Experimental Study of the Key Conversion Joints of Single-angle and Dual-angle Steel for Power Transmission Tower[J]. Steel Construction, 2017, 32(6): 59-65.
- [12] YAM M C H, CHENG J J R. Experimental Investigation of the Compressive Behavior of Gusset Plate Connections[R]. Edmonton: University of Alberta, 1993.
- [13] 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(11): 1473-1493.
- [14] 薛晓敏,袁红丽,饶翼,等. 输电铁塔单变双拼角钢转换节点承载力研究[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(8): 11-19.
XUE Xiao-min, YUAN Hong-li, RAO Yi, et al. Bearing Capacity of Conversion Joints Between Single-angle and Dual-angle Steels in Steel Pylon[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(8): 11-19.
- [15] TIAN L, LIU J C, CHEN C, et al. Experimental and Numerical Analysis of a Novel Tubular Joint for Transmission Tower [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 164: 105780.
- [16] 金属材料 室温拉伸试验方法: GB/T 228—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
Metallic Materials — Tensile Testing at Ambient Temperature: GB/T 228—2002[S]. Beijing: Standards Press of China, 2002.
- [17] LIU X P, BRADFORD M A, LEE M S S. Behavior of High-strength Friction-grip Bolted Shear Connectors in Sustainable Composite Beams[J]. Journal of Structural Engineering, 2014, 141(6): 04014149.
- [18] MAXIMOV J T, DUNCHEVA G V, GANEV N. Enhancement of Fatigue Life of Net Section in Fitted Bolt Connections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 74: 37-48.
- [19] 徐再根,刘正伟,刘文棚,等. 输电塔单双角钢过渡节点计算方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2021, 51(1): 87-93.
XU Zai-gen, LIU Zheng-wei, LIU Wen-peng, et al. Calculation Method of the Single-double Angle Joints in Transmission Towers [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2021, 51(1): 87-93.
- [20] 余亮,王作民,吴森坤,等. 架空输电线路角钢塔单双角钢连接节点设计研究[J]. 钢结构, 2018, 33(3): 63-67.
YU Liang, WANG Zuo-min, WU Sen-kun, et al. Design and Research on Single and Double Angle Joints of Angle-steel Tower of Overhead Transmission Line Tower[J]. Steel Construction, 2018, 33(3): 63-67.