

DOI: 10.7652/xjtuxb202003021

八地脚塔脚板受拉承载力及其设计参数影响分析

王学明¹, 薛晓敏², 文凡¹, 袁红丽³, 饶翼³, 周将武²

(1. 中国电力工程顾问集团公司西北电力设计院, 710075, 西安; 2. 西安交通大学
土木工程系, 710049, 西安; 3. 西安建筑科技大学理学院, 710075, 西安)

摘要: 针对我国输电铁塔基础结构中八地脚螺栓塔脚板的相关设计理论研究不成熟,尤其是现行设计规程关于其受拉承载力的计算公式还存在明显不合理的问题,对八地脚螺栓塔脚板开展了受拉承载力试验和仿真研究。设计并搭建塔脚板轴心受拉承载力试验测试系统,对 16 组塔脚板试件进行单调静力加载,通过试验现象观察和测试数据分析,获得塔脚板在加载进程中的受力机理和破坏模式,为仿真研究提供重要验证依据;基于试验结果,研究八地脚螺栓塔脚板有限元建模方法,通过大量仿真计算结果进一步探讨塔脚板受力机理和破坏模式,探究符合设计安全有效的塔脚板受拉承载力确定方法,并分析底板宽厚比、螺孔位置和加劲肋等塔脚板重要设计参数对其受拉承载能力的影响规律。以上研究将为八地脚螺栓塔脚板受拉承载力计算以及塔脚板参数优化设计提供一定的基础理论和设计参考。

关键词: 输电铁塔;塔脚板;受拉承载力;八地脚螺栓;有限元仿真

中图分类号: TU392.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2020)03-0169-10

Research on Tensile Capacity of Eight-Bolted Baseplate of Electricity Pylon and the Influence Parameters

WANG Xueming¹, XUE Xiaomin², WEN Fan¹, YUAN Hongli³, RAO Yi³, ZHOU Jiangwu²

(1. Northwest Electric Power Design Institute Co. Ltd., China Power Engineering Consulting Group, Xi'an 710075, China;
2. Department of Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. College of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Test and simulation studies on tensile capacity of the eight-bolted baseplate in foundation structure of an electricity pylon were conducted to deal with the problems that the existing design theory relating to the baseplate is still insufficient, particularly the formulas for calculating the tensile bearing capacity in current design codes are unreasonable. A full-scale test system of joint structure with eight-bolted baseplate was designed and set up for measuring the static tensile capacity. Sixteen specimens were tested, and their force bearing mechanism and failure modes were obtained via test data analysis and test phenomenon observation to provide verification basis for subsequent simulation. A modeling method of the baseplate was proposed by using the software ANSYS to further investigate the force bearing mechanism and failure modes through simulations. Furthermore, the influences of some major design parameters, such as the ratio of width to thickness, the location of bolt hole, and the stiffening plate, on the tensile capacity of the baseplate were analyzed. This research may provide a certain basic theory for

calculating tensile capacity of an eight-bolted baseplate, and provide reference for its parameter optimization design.

Keywords: transmission steel tower; baseplate; tensile bearing capability; eight-bolted baseplate; finite element simulation

随着我国经济的发展,电力供应需求越来越高,输电线路的遍布传输需要铁塔支撑,其中铁塔塔脚基础对于稳固铁塔起着至关重要的作用^[1-2]。另外,为了适应输电线路大容量、高电压等级的迅速发展,塔脚结构将承受更严峻的荷载环境^[3]。因此,在实际工程应用中塔脚板也由一开始的无加劲肋发展到有加劲肋的形式,而且受力性能稳定的塔脚板基础连接形式也由四地脚螺栓发展到具有更高承载力的八地脚螺栓^[4]。八地脚螺栓塔脚板可分为柔性和刚性两种形式:柔性板构造简单、焊缝少;刚性板刚度更大,变形较小,应力分布更为均匀^[5-6]。

相较于我国,国外电压等级和输电容量不高,具有较高承载力的八地脚螺栓塔脚板的应用非常有限^[7-8],因此相关设计规范对此类塔脚板并未涉及。我国现行规范^[9]给出了四地脚螺栓塔脚板底板厚度计算方法:受拉承载力采用区格法进行计算;对于八地脚螺栓的塔脚板则仅对 I 型(无加劲肋柔性)塔脚板和 II 型(刚性)塔脚板给出区格法计算建议,但是并未对这两种方法的适用性和等价性做进一步对比分析,缺乏基础理论支撑^[10]。可见,八地脚螺栓塔脚板在我国输电铁塔工程虽然得到广泛运用,但其相关设计基础理论还很不完善^[11]。

我国学者开展输电铁塔塔脚板连接的相关研究,并取得一些进展。俞登科等对《架空输电线路杆塔结构设计技术规定》的八地脚螺栓 I 型塔脚板的两种计算方法进行评价,得出其不等价的结论,并认为采用区格法更为有效^[10]。杨攀、殷黎明等应用有限元分析软件对八地脚螺栓塔脚板进行有限元数值计算分析,得出《架空输电线路杆塔结构设计技术规定》的塔脚板厚度计算公式过于保守的结论,并分别给出若干设计建议^[11-12]。翁兰溪等利用有限元软件分析了八地脚螺栓塔脚板受力过程,讨论了破坏机理,并介绍了加劲肋厚度、长度参数变化对其承载力的影响^[4]。

以上研究成果对八地脚螺栓座板的受拉承载力均进行了分析,并提出相关理论计算公式,但理论研究和仿真计算的正确性有待试验验证。另外,研究内容仍存在一些需要解决的问题,例如:①塔脚板的底板厚度对承载力影响规律缺乏细致的规律总结;

②塔脚板螺栓孔位置的设置考虑并不适当;③塔脚板的受拉破坏模式缺乏全面分析总结^[13]。

实际上,从本文开展的八地脚螺栓塔脚板抗拉承载力试验中发现,以上 3 种情况对塔脚板极限承载力具有重要影响。鉴于此,本文对八地脚螺栓塔脚板的承载力进行了深入研究,通过试验和仿真研究探讨塔脚板受力机理和破坏模式,分析塔脚板重要设计参数对其受拉承载力的影响规律,期望为现行设计规范的完善提供一定的理论基础和设计参考。

1 八地脚螺栓塔脚板受拉承载力试验

开展八地脚螺栓塔脚板抗拉承载力试验,旨在获取该类型塔脚板不同构型(板厚、螺栓位置、有无加劲肋及其几何尺寸等)下的受力特性,并得到实际抗拉承载力,为验证有限元模型仿真计算方法的正确性提供重要支持。

1.1 材料力学性能试验

材料力学性能试验制作的试样均来自塔脚板承载力试验试件,其钢材名义屈服强度为 345 MPa。试件尺寸和试验过程按 GB/T 228—2002《金属材料室温拉伸试验方法》^[14]执行。图 1 所示为试验用的微机控制电子万能试验机(WDW-100D),作为材料性试验的加载设备,试验结果见表 1。

表 1 材料力学性能试验结果

试件 编号	弹性模量 E / MPa	屈服强度 f_y / MPa	屈服应变 ϵ / 10^{-6}
1	175 440	373. 3	3 733
2	201 260	346. 7	3 014
3	203 630	353. 4	3 038
4	191 080	359. 4	2 583
5	218 021	340. 6	3 477
6	193 332	366. 7	3 055
7	221 232	389. 3	2 739
8	198 410	388. 8	2 908
9	206 610	335. 2	3 498

1.2 塔脚板受拉承载力试验

塔脚板受拉承载力试验装置如图 2 所示。试验装置包括被测试件、连接装置、加载装置和反力装



图 1 材料力学性能试验设备

置。试验过程中,压力千斤顶在加载装置和反力装置作用下,共同实现了被测试件的水平拉力的加载。其中:压力千斤顶为微机全自动液压式压力试验机(UTC-9000),额定荷载为 6×10^5 kg;连接装置和加载装置均为自制,采用 Q345 钢材。

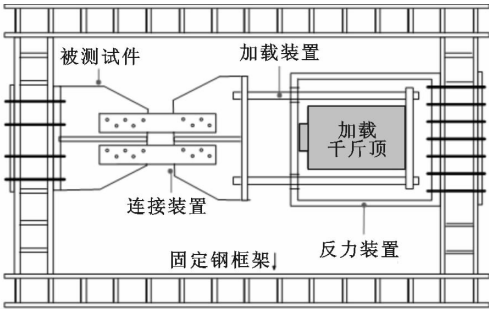


图 2 塔脚板受拉承载力试验装置示意图

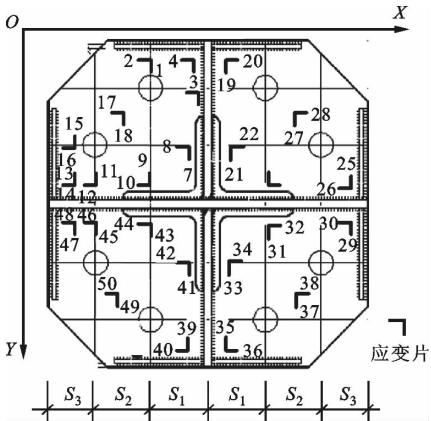
此次选取两种构型的塔脚板节点,分别为柔性和刚性两类,如图 3 所示。其中柔性塔脚板通过靴板和加劲肋将其分隔为 4 个区格,刚性塔脚板则被分隔为 16 个区格。试验设计共计 16 个试件,考虑了塔脚板底板厚度、螺孔位置、有无加劲肋设置及其是否尺寸加长增高变化因素,见表 2。试件 15 和 16 为刚性塔脚板,其他均为柔性塔脚板。

为了获得塔脚板在受拉试验过程中的实际受力情况,在塔脚板的单面布置了测点。根据前期有限元仿真,应变片和位移计测点布置位置在应变和变形较大处^[15-17],并在适当位置设置参照测点。应变片和位移计位置分别如图 3、图 4 所示。

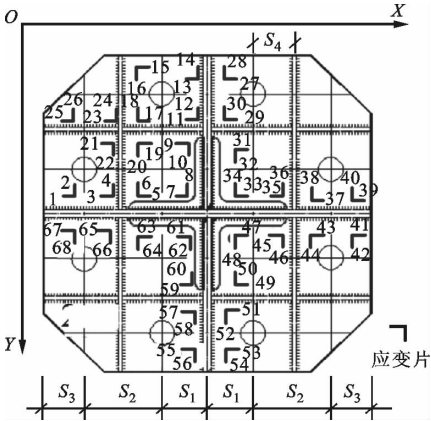
本试验为单调静力分级加载,分 3 个步骤:

- 步骤 1 按仿真承载力估值的 5% 分级加载,总共加载 10 级;
- 步骤 2 按仿真承载力估值的 3% 分级加载,直至加载到仿真承载力估值的 85%;
- 步骤 3 每级 20 kN 加载,直至加载进程中出现试件位移和应变数据急剧增大,无法稳定持续加载时停止加载。

加载前需调试装置和测试仪器的正常运行,检



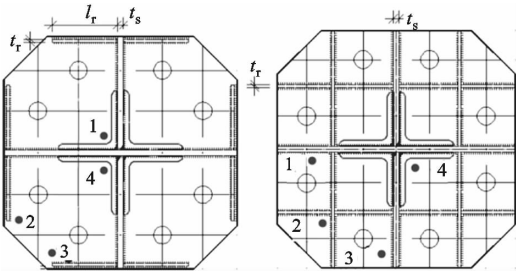
(a) 柔性



(b) 刚性

1~50—应变测点编号; S_1 、 S_3 —塔脚板底板螺栓边距; S_2 —螺栓孔孔距。

图 3 螺栓塔脚板底板应变片位置



(a) 柔性板

(b) 刚性板

1~4—位移测点编号; t_r 、 t_s —加劲肋的厚度和宽度; t_s —靴板或连接板的厚度。

图 4 塔脚板底板位移计位置

查试件与加载部件连接的有效接触。每级加载需稳定至少 30 s,即时记录荷载、应变和位移数据。

1.3 受拉承载力试验结果分析

在加载初期,塔脚板的变形处于弹性阶段,塔脚板底板、加劲肋和靴板上的应变均随着荷载增加而线性增加;当荷载继续增加,各测点的应变发展加快,

表 2 八地脚螺栓塔脚板的 16 个试件参数

试件编号	t/mm	S_1/mm	S_2/mm	S_3/mm	t_r/mm	l_r/mm	h_r/mm	D/mm	区格宽厚比
1	24	90	95	90	10	130	160	45	11.5
2	20	90	95	90	10	130	160	36	13.8
3	16	90	95	90	10	130	160	36	17.2
4	20	100	95	80	10	130	160	36	13.8
5	20	80	95	100	10	130	160	36	13.8
6	20	90	95	90	10	170	170	36	13.8
7	20	90	95	90	10	130	160	36	13.8
8	30	100	105	100	12	150	180	50	10.2
9	24	100	105	100	12	150	180	42	12.7
10	18	100	105	100	12	150	180	42	16.9
11	24	110	105	90	12	150	180	42	12.7
12	24	90	105	110	12	150	180	42	12.7
13	24	100	105	100	12	190	190	42	12.7
14	24	100	105	100	12	150	180	42	12.7
15	20	90	170	60	10	130	160	36	8.0
16	24	100	185	70	12	143	180	42	7.4

注： t 为底板厚度； h_r 为加劲肋的高度； D 为螺孔直径；区格宽厚比为区格边长与底板厚度的比值。试件 15、16 为刚性塔脚板，其余均为柔性塔脚板。

直至出现拐点，此时塔脚板迅速变形，如荷载再持续增加，底板变形加剧，最终达到塔脚板受拉承载力。试件变形最大处基本都发生在位移测点 4 附近，如图 4 所示。

图 5a 给出了试件 8 加载完成后的状态，可看到底板与连接件产生约 3 mm 的间隙；图 5b 给出了试件 10 加载完成后的状态，可看到底板发生较大的翘曲变形，其间隙更为明显，约为 8 mm。参考表 1，试件 8 区格宽厚比为 10.2，试件 10 区格宽厚比为 16.9，显然，宽厚比大的试件变形更为显著。

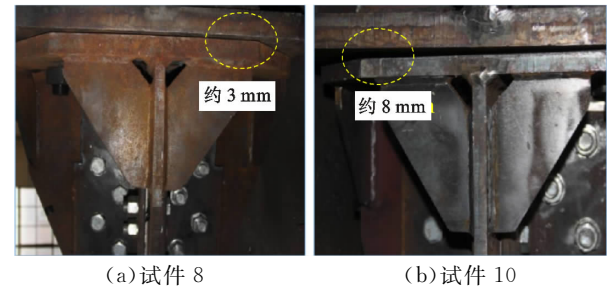
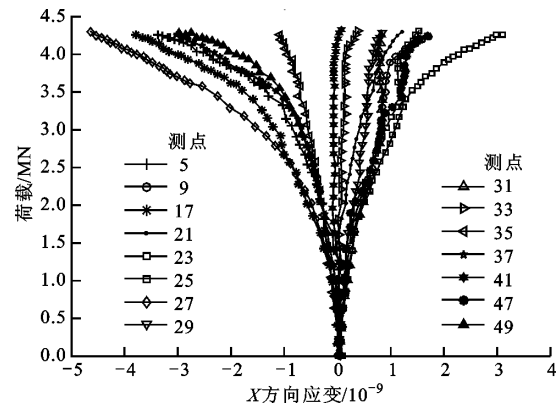
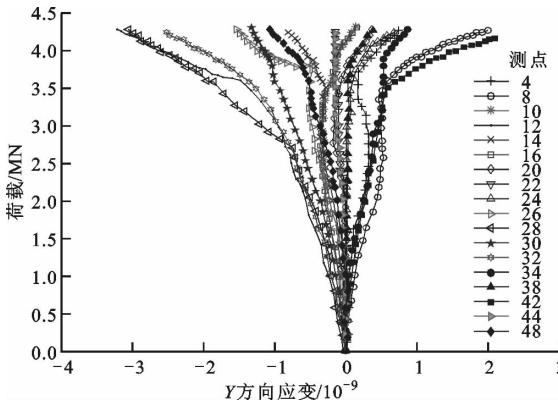


图 5 典型试件卸载后变形对比

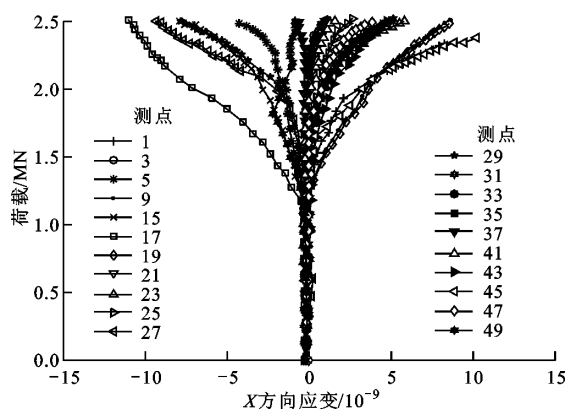
图 6 为典型试件底板的应变测试结果。图 6a 为试件 1 底板 X 方向应变测试结果，可见最大应变发生在 23 测点处(靴板与底板交接)，在加载初期应变随荷载呈线性增长，荷载超过 3 550 kN 后应变增加速度加快，最终达到最大值 $3\,096\times10^{-6}$ ；类似地，



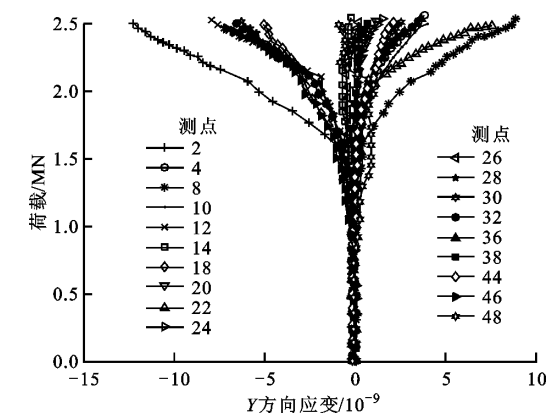
(a) 试件 1 底板 X 方向应变



(b) 试件 1 底板 Y 方向应变



(c) 试件 10 底板 X 方向应变



(d) 试件 10 底板 Y 方向应变

图 6 典型试件底板应变测试结果

图 6b 为试件 1 底板 Y 方向应变测试结果,可见最大应变在 42 测点(连接板与底板交界处),最大值为 $2\,290\times10^{-6}$ 。试件 1 的宽厚比较小(11.5),除了个别测点,基本所有测点的应变均低于 $3\,116\times10^{-6}$ (平均屈服应变),底板材料基本未达到屈服,未被充分利用。

图 6c 为试件 10 底板 X 方向应变测试结果,可见最大值发生在 45 测点(螺栓孔处),当荷载超过 2 080 kN 后应变增长趋势加快,最终达到最大应变 $10\,118\times10^{-6}$;类似地,图 6d 为试件 10 的 Y 方向应变测试结果,可见最大值在 8 测点处,最终达到最大值为 $8\,812\times10^{-6}$ 。总体来看,试件 10 的宽厚比较大(16.9),大部分测点的应变均高于平均屈服应变,甚至较多测点已达到极限应变,这说明底板材料已经达到屈服强度甚至极限强度,已过度利用。

2 八地脚螺栓塔脚板受拉承载力仿真

通过 Ansys 有限元软件建模,可以获得更多关于塔脚板的应力、变形和承载力等相关数据,有助于深入分析塔脚板的受力机理和破坏模式。

由于参数分析中所有底板的厚度均小于中面的最小尺寸的 1/8,属于薄板,故采用 SHELL181 壳单元进行建模。SHELL181 单元适用于薄到中等厚度的壳结构,该单元有 4 个节点,单元每个节点有 6 个自由度,分别为沿节点 X、Y、Z 方向的平动及绕节点 X、Y、Z 轴的转动,退化的三角形选项用于网格生成的过渡单元。SHELL181 单元具有应力刚化及大变形功能,该单元有强大的非线性功能,并有截面数据定义、分析、可视化等功能,还能定义复合材料多层壳。图 7 为该单元的几何形状、节点位置和坐标系。

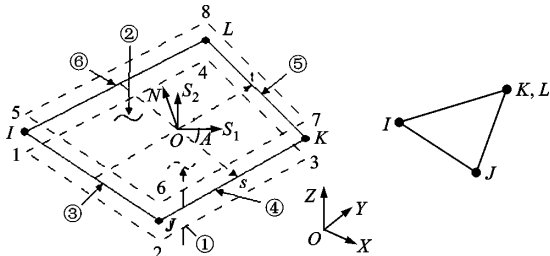
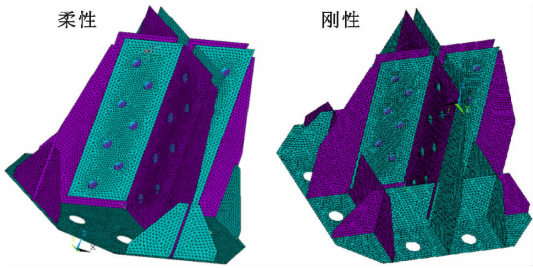


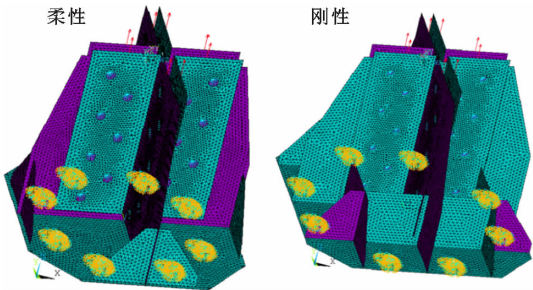
图 7 SHELL181 单元示意图

2.1 有限元模型

八地脚螺栓塔脚板有限元模型如图 8 所示。模型采用 SHELL181 单元,材料选用屈服强度为 345 MPa 的理想弹塑性本构模型,模型各部件包括底板、加劲肋和靴板均通过 GLUE 命令粘接在一起,角钢主材和靴板通过 MPC184 刚性单元连接。底板的关键项命令设定为 Keyopt,1,3,0,靴板和加劲



(a) 模型及网格划分



(b) 模型加载和约束

图 8 八地脚螺栓塔脚板有限元模型

肋的关键项命令设定为 Keyopt,4,3,2。加载时,将底板螺孔上各节点各方向自由度约束,继而在主材角钢上端施加拉力,参见图 8b。

2.2 承载力确定

与试验测试结果相同,仿真计算结果显示底板中心(位移计测点 4)变形最大。通过图 9 荷载-位移曲线来看,加载初始阶段的荷载与底板中心挠度符合线性关系,而中后期的底板变形速度则迅速加大,直至产生过大变形,并伴随材料屈服最终塔脚板承载失效。仿真结果可以直接获得塔座板的最大承载

力,然而以此作为塔脚板承载力显然过于危险。考虑到合理安全储备的要求,本文预采用双切线法以确定塔脚板的承载力。

定义 k_i 为第 i 数据点和第 $i+1$ 数据点的连线斜率, $\delta(i) = (k_{i+1} - k_i) / k_i$ 为第 i 数据点的斜率变化率。双切线的选取原则为当 $\delta(i) < 3\%$ 时, k_i 即为该曲线段的名义切线斜率。然后,根据此原则可以分别获得荷载-位移曲线中的弹性阶段和弹塑性阶段对应的两条切线。例如,图 9a 为试件 2 根据双切线原则的承载力取值,其承载力为 2 774 kN;图 9b 为试件 11 根据双切线原则的承载力取值,其承载力为 3 937 kN。通过所有算例仿真计算结果的统计,采用双切线原则获得的承载力可以至少保证 20% 以上的安全储备,具有较好的实用性。

2.3 仿真结果分析

有限元仿真计算和试验所测得的八地脚螺栓底板中荷载-位移曲线对比如图 9 所示。两者吻合较好,说明有限元模型能够较准确地反映八地脚塔脚板的受力特征。

为了验证仿真模型的正确性,本文还将其应变结果与试验应变测试结果进行了对比。表 3 为典型试件的有限元计算和试验测试结果在不同荷载步数下对应的塔脚板特征测点的应变对比。结果显示有限元应变结果与试验应变测量数据比较吻合。综合所有试件的模型误差,其误差基本均可保持在 5% 以内,说明该模型方法计算获得应力、应变情况能真实地反映实际情况。

表 3 中误差的计算公式如下

$$E = \frac{(1/n) \left(\sum_{j=1}^n (\epsilon_{\text{exp},j} - \epsilon_{\text{sim},j})^2 \right)^{1/2}}{\max(\epsilon_{\text{exp}})} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\epsilon_{\text{sim},j}$ 和 $\epsilon_{\text{exp},j}$ 分别代表仿真和试验中第 j 荷载步对应的应变值; n 为荷载步总数。

图 9 试验和仿真荷载-位移曲线对比

表 3 典型试件的试验与仿真应变误差分析

荷载 步数	试件 1					试件 10				
	荷载 /kN	应变/ 10^{-6}				荷载 /kN	应变/ 10^{-6}			
		测点 23		测点 42			测点 45		测点 8	
		试验	仿真	试验	仿真		试验	仿真	试验	仿真
1	852	110	129	109	120	501	54	220	102	210
2	1 704	239	260	220	254	1 002	207	340	320	332
3	2 556	629	535	440	520	1 503	432	938	503	830
4	3 408	1 312	1 360	820	1 102	2 004	4 380	4 435	3 803	4 085
5	4 260	3 096	2 807	2 290	2 307	2 505	10 118	10 020	8 812	9 500
误差/%		3.00		3.70		2.00		3.20		

有限元计算的八地脚塔脚板的应变和位移结果均与试验测得结果基本一致,其中典型试件的应力云图和位移云图可参见图 10。综合试验和仿真结果,八地脚螺栓柔性塔脚板在最可能发生强度破坏的地方有以下 3 处。①底板与靴板交接处。一般先

在两螺孔圆心连线中点出现屈服,接着随着荷载的增大塑性区沿着底板靴板交线方向逐渐扩大。②底板螺孔。螺孔是塔脚板施加约束的地方,在外荷载作用下螺孔周围应力相对集中,塑性区逐渐向外发展。③加劲肋与靴板交接处。一般先在加劲肋与靴板衔接处出现屈服,随着荷载的增大塑性区逐渐向肋的中部发展。

图 10b 为刚性塔脚板试件 15 在达到承载力时的底板应力云图。与柔性塔脚板类似,底板发生破坏的地方主要在底板与靴板交接处以及螺孔位置。图 10c 为试件 1 达到最大承载力时的塔脚板整体应力云图,塔脚板底板以及加劲肋均发生了大面积的屈服,此时表示该试件已经承载失效。此外,图 10d 为试件 1 达到最大承载力时的整体变形云图,最大变形出现在底板中心,这与试验测试结果一致。

总体来看,Ansys 仿真计算获得的塔脚板应力云图、变形云图、底板中心位移-荷载曲线以及底板不同荷载步数下的应力均与对应的试验结果吻合较好,综合验证了模型仿真计算方法的正确性。

3 八地脚螺栓塔脚板设计参数分析

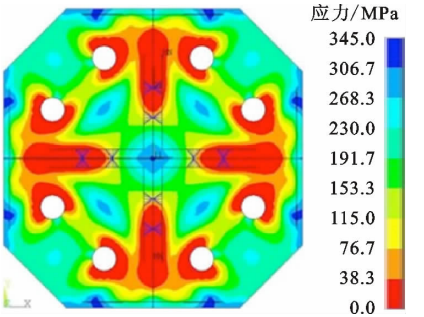
为了观测八地脚塔脚板参数的变化关系,本文增补了大量仿真算例(见表 4),对宽厚比、加劲肋、螺栓位置等参数变化对承载力的影响进行分析。

取塔脚板底板厚度和尺度及加劲肋厚度相同,仅加劲肋宽度和高度有所变化的对照组进行分析。

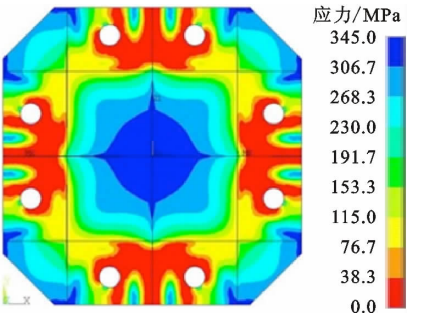
第 1 组为试件 6、7。试件 6 加劲肋长度和高度设置为 170 mm 时,承载力为 2 900 kN,试件 7 加劲肋长度和高度分别降低了 23.5% 和 6%,而承载力降低了 4%;第 2 组为试件 13、14。试件 13 加劲肋长度和高度设置为 190 mm 时,承载力为 4 114.1 kN,而试件 14 加劲肋长度和高度分别降低了 21% 和 5%,承载力降低了 3.6%。由此可见,适当加大加劲肋长度和高度对塔脚板承载力提高有利,但十分有限,建议设计加劲肋时,其长度和厚度比 $l_r/t_r \geq 15$,其长度 $l_r \geq 1.5S_1$,且加劲肋厚度与靴板厚度尽量接近,其厚度比靴板不能大于 4 mm。

以试件 9、11、12 为例,它们的间距 S_1 和边距 S_3 略有变化,其他参数不变。一致的规律为当螺孔对称尽可能靠近靴板时(S_1 尽量小),其承载力相对最大,因此建议在保证有效宽度的基础上尽可能让螺孔位置靠近靴板。

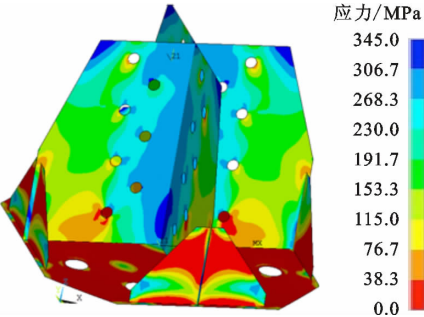
为了便于观察宽厚比对承载力影响规律,柔性板分了 6 个对照组,刚性板分了 3 个组,见表 5。



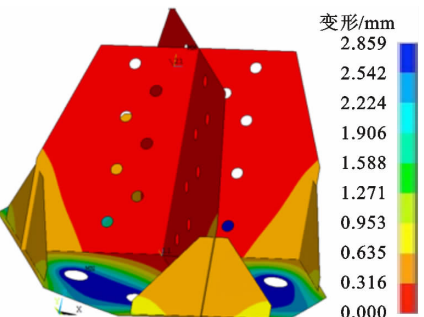
(a)试件 1 承载力塔脚板底板应力云图



(b)试件 15 承载力塔脚板底板应力云图



(c)试件 1 最大承载力塔脚板整体应力云图



(d)试件 1 最大承载力塔脚板整体变形云图

图 10 有限元仿真计算结果

表 4 八地脚螺栓塔脚板增补算例的试件参数

试件编号	t/mm	S_1/mm	S_2/mm	S_3/mm	t_r/mm	l_r/mm	h_r/mm	D/mm	区格宽厚比
2A	20	68	72	68	8	100	120	30	10.4
2B	20	106	116	106	12	155	190	36	16.4
8A	30	82	86	82	10	120	145	42	8.33
8B	30	125	120	125	14	180	220	42	12.3
8C	30	160	170	160	16	240	290	42	16.3
9A	24	82	86	82	10	125	150	42	10.4
9B	24	130	134	130	14	200	240	42	16.4
15A	20	130	255	90	14	201	240	36	23.8
15B	20	60	110	60	10	100	100	36	11.5
16A	24	150	295	105	16	234	270	42	22.9
16B	24	70	130	70	12	118	130	42	11.2
17A	40	110	106	110	10	160	195	54	8.15
17B	40	138	132	138	14	200	240	54	10.2
17C	40	165	160	165	16	240	290	54	12.2
17D	40	220	212	220	20	320	390	54	16.3
18A	30	135	250	95	16	194	240	42	8.0
18B	30	195	375	135	16	299	130	42	11.8

注:试件 15A、15B、16A、16B、18A 和 18B 为刚性塔脚板,其余均为柔性塔脚板。

表 5 区格宽厚比分析组别

塔脚板类型	组别	试件编号	变参数
柔性板	1	1~3,7	t
	2	8~10,14	t
	3	2,2A,2B	$S_1 \sim S_3$
	4	8,8A~8C	$S_1 \sim S_3$
	5	9,9A,9B	$S_1 \sim S_3$
	6	17A~17D	$S_1 \sim S_3$
刚性板	7	15,15A,15B	$S_1 \sim S_3$
	8	16,16A,16B	$S_1 \sim S_3$
	9	18A,18B	$S_1 \sim S_3$

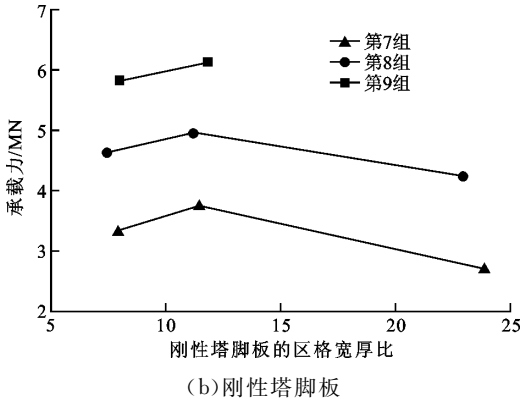
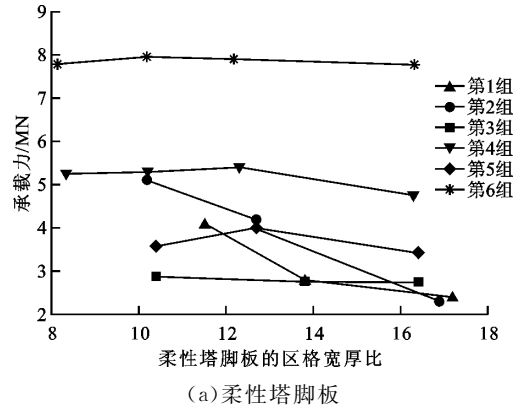


图 11 区格宽厚比对受拉承载力的影响规律

图 11 给出了塔脚板区格宽厚比对受拉承载力的影响。图 11a 为柔性塔脚板区格宽厚比对受拉承载力的影响,分析可知:当区格宽厚比大于 12.7 时,随着宽厚比的加大,塔脚板承载力均呈现降低的趋势;然而,第 4 和第 5 组在宽厚比小于 12.3 时,第 6 组宽厚比小于 10.2 时,规律则相反,即随着宽厚比的加大塔脚板承载力却呈现增加的趋势。这是因为塔脚板底板厚度还需要和地脚螺栓、靴板、加劲肋等构件相匹配,否则一味减小宽厚比,未必能达到提高承载力的目的。可见,对于八地脚螺栓塔脚板,并非宽厚比越小承载力越大,适当的宽厚比对承载力提

高才有效,总体建议选用区格宽厚比为10~14的八地脚塔脚板较为合理。

图11b为刚性塔脚板区格宽厚比对受拉承载力的影响,分析可知:当区格宽厚比大于11.5时,随着宽厚比的提高,塔脚板承载力均呈现降低的趋势;当区格宽厚比小于11.2时,随着宽厚比的提高塔脚板承载力却呈现增加的趋势。可见,对于八地脚刚性螺栓塔脚板,也并非宽厚比越小承载力越大,适当宽厚比对承载力提高最为有效,建议选用区格宽厚比为11~12左右的八地脚塔脚板较为合理。

定义相对挠度为底板变形最大值与底板区格的比值。当相对挠度大于0.1%时,从仿真应力和变形云图来看,底板挠曲变形较为明显,可视为变形控制的破坏模式;当相对挠度小于0.1%时,从仿真应力和变形云图来看底板钢材屈服较为明显,可视为强度屈服控制的破坏模式;此外,如螺栓相对于底板较弱,为螺栓拉断的破坏模式。此次试件显示破坏以强度屈服为主的失效模式,其次是底板变形模式,未见底板螺栓屈服模式。八地脚塔脚板由于地脚螺栓、靴板和加劲肋设置较多,节点刚度较大,因此底板强度屈服失效模式为其主导破坏模式,能获得更高的承载力。根据这些破坏准则,发现当区格宽厚比小于12时,可较好保证塔脚板是以强度屈服为主的破坏模式。因此,结合宽厚比与失效模式的分析,建议八地脚塔脚板区格宽厚比设计在10~12范围之内,比较合理。

4 结 论

本文开展八地脚螺栓塔脚板受拉承载力试验和仿真研究,得出以下结论。

(1)设计并搭建了塔脚板轴心受拉承载力试验测试系统,观测了塔脚板试件在拉力加载条件下的受力机理和破坏模式;通过各试件对比,分析了不同板厚、螺栓位置以及有、无加劲肋等参数变化对塔脚板承载力的影响。

(2)提出了八地脚螺栓塔脚板有限元建模方法,其计算获得的底板应力、变形以及位移-荷载曲线均与试验结果对比吻合良好;特征测点应变对比分析显示仿真误差低于5%。这些结果充分证明了建模方法的可靠性和精确性。

(3)基于有限元方法,提出了采用双切线法以确定八地脚塔脚板的受拉承载力。采用该方法获得的承载力可以保证20%以上的安全储备,具有较好的实用性。

(4)基于试验和仿真研究综合分析结果,获得了塔脚板重要设计参数(底板宽厚比、螺孔位置和加劲肋)对其受拉承载能力的影响规律。

本文研究为八地脚螺栓塔脚板受拉承载力的预估提供了准确可靠的仿真计算方法,也可为现行相关设计理论的改进和完善提供一定的参考。

参考文献:

- [1] 郭绍宗. 国内外输电线铁塔的发展及展望 [J]. 特种结构, 1998, 15(3): 43-46.
GUO Shaozong. The development and prospects of steel transmission tower at home and abroad [J]. Special Construction, 1998, 15(3): 43-46.
- [2] 朱天浩, 徐建国, 叶尹, 等. 输电线路特大跨越设计中的关键技术 [J]. 电力建设, 2010, 31(4): 25-31.
ZHU Tianhao, XUE Jianguo, YE Yin, et al. Key techniques in transmission line extra long-crossing tower design [J]. Electric Power Construction, 2010, 31(4): 25-31.
- [3] 孔贝贝. 输电塔及塔线体系的静动力特性分析 [D]. 济南: 山东大学, 2012: 5-8.
- [4] 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): 42-45.
WONG Lanxi, ZHOU Jingjing. The analysis on effect of base plate with stiffening rib transmission towers [J]. Fujian Dianli yu Diangong, 2008, 28(1): 42-45.
- [5] 白强, 王学群, 沈聪, 等. 大荷载塔座板承载力有限元和理论分析 [J]. 电力勘测设计, 2015(S2): 640-646.
BAI Qiang, WANG Xuequn, SHEN Cong, et al. Finite element and theory analysis of bearing capacity of big load tower base plate [J]. Electric Power Survey & Design, 2015(S2): 640-646.
- [6] 白强, 杨景胜, 吴海洋, 等. 输电铁塔用八地脚螺栓刚性塔座板规格计算方法: 105117577A [P]. 2015-07-13.
- [7] 彭立才, 程永峰, 高玉峰. 插入式基础真型抗拔试验研究 [J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 2037-2040.
PENG Licai, CHENG Yongfeng, GAO Yufeng. Pull-out ture experiment on the inserted foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(12): 2037-2040.
- [8] 张帆, 邓锦光. 插入角钢式预制基础在输电线路中的应用 [J]. 电力建设, 2008, 29(5): 46-48.
ZHANG Fan, DENG Jinguang. Application of inserted angled steel type prefabricated foundation in transmission lines [J]. Electric Power Construction, 2008, 29(5): 46-48.

- [9] 国家能源局. 架空输电线路杆塔结构设计技术规定: DL/T5154—2012 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2012: 45-47.
- [10] 俞登科, 任吉华, 段松涛, 等. 基于区格法的输电塔有劲塔脚板强度分析 [J]. 电力勘测设计, 2017(2): 42-45.
YU Dengke, REN Jihua, DUAN Songtao, et al. Strength analysis of tower footing plate with stiffening in transmission tower based on lattice method [J]. Electric Power Survey & Design, 2017(2): 42-45.
- [11] 杨攀, 张雷, 孟宪乔, 等. 单角钢八地脚螺栓的受力分析及其塔脚板厚度设计 [J]. 南昌大学学报(工科版), 2016, 38(3): 240-244.
YANG Pan, ZHANG Lei, MENG Xianqiao, et al. Stress analysis of single eight foundation bolts and its design of bottom plate thickness [J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 2016, 38(3): 240-244.
- [12] 殷黎明, 邓锦辉. 输电铁塔塔脚板厚度有限元分析 [J]. 河南电力技术, 2016(10): 57-59.
YIN Liming, DENG Jinhui. Finite element analysis of thickness for base plate in steel transmission tower [J]. Henan Power Technology, 2016(10): 57-59.
- [13] 刘俊卿, 袁红丽, 文凡, 等. 输电塔结构八地脚螺栓塔座板的抗拉承载力试验与计算方法研究 [J]. 土木工程学报, 2019, 52(7): 48-56.
LIU Junqing, YUAN Hongli, WEN Fan, et al. Experimental research and calculation method for tensile bearing capacity of the base plate with eight bolts in transmission tower structure [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(7): 1-9.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 金属材料 拉伸试验: 第1部分 室温试验方法: GB/T 228.1—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010: 1-19.
- [15] BOUZID A H. Comparative study of bolt spacing formulas used in bolted joint designs [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2014, 120/121: 47-54.
- [16] 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: 128-139.
- [17] CAO J J, PACKER J A, YANG G J. Yield line analysis of RHS connections with axial loads [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1998, 48(1): 1-25.

(编辑 武红江)

(上接第 118 页)

- [32] WONGSAGONSUP R, DEEYAI P, CHAIWAT W, et al. Modification of tapioca starch by non-chemical route using jet atmospheric argon plasma [J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 102: 790-798.
- [33] LIH C, LIAO C, STOBINSKI L, TOMASIK P. Behaviour of granular starches in low-pressure glow plasma [J]. Carbohydrate Polymers, 2002, 49(4): 499-507.
- [34] CHEN Huahan, CHANG H C, CHEN Yukuo, et al. An improved process for high nutrition of germinated brown rice production: low-pressure plasma [J]. Food Chemistry, 2016, 191: 120-127.
- [35] SARANGAPANI C, THIRUMDAS R, DEVI Y, et al. Effect of low-pressure plasma on physico-chemical and functional properties of parboiled rice flour [J]. LWT: Food Science and Technology, 2016, 69: 482-489.
- [36] 中国储备粮管理总公司成都粮食储藏科学研究所. 玉米储存品质判定规则: GB/T 20570—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015: 1-16.

(编辑 武红江)

(上接第 168 页)

- [19] IOFFE S, SZEGEDY C. Batch normalization: accelerating deep network training by reducing internal covariate shift [C]//Proceedings of the 32nd International Conference on Machine Learning (ICML). Princeton, NJ, USA: International Machine Learning Society (IMLS), 2015: 448-456.
- [20] LIN M, CHEN Q, YAN S. Network in network [C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Learning Representations (ICLR). London, UK: ICLR, 2014: 1-10.
- [21] KINGMA D, BA J. Adam: a method for stochastic optimization [C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Learning Representations (ICLR). London, UK: ICLR, 2015: 1-15.

(编辑 陶晴)