

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.020

八地脚螺栓柔性塔座板承载力研究

白强, 吴海洋, 叶爱民

(中南电力设计院有限公司, 武汉 430071)

摘要: [目的]随着输电线路的荷载越来越大, 为了满足受力要求, 铁塔与基础的连接型式广泛采用八地脚螺栓柔性塔座板, 现有规范体系对该型式塔座板的相关计算方法尚无规定, 故需对承载力进行研究。[方法]通过理论分析、数值模拟和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。[结果]研究表明: 受拉状态下底板应力呈非均匀分布状态。[结论]提出了全新的计算方法, 对工程设计具有一定的借鉴意义。

关键词: 八地脚螺栓; 柔性塔座板; 等效计算宽度; 等效计算力臂; 底板厚度

中图分类号: TM7; TM753

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)04-0123-08

Bearing Capacity Study of Flexible Tower Base Plate with Eight Anchor Bolts

BAI Qiang, WU Haiyang, YE Aimin

(Central Southern China Electric Power Design Institute, Wuhan 430071, China)

Abstract: [Introduction] The transmission line load which applied on tower become lager and lager. In order to bearing the reaction, the flexible tower base plate with eight anchor bolts which used to connect the tower leg and foundation had been adopted commonly. But there isn't any method to design this member in relative specification, so it is necessary to study the bearing capacity of base plate. [Method] This paper analyzed the bearing capacity by classical mechanics theory, finite element and full size experiment. [Result] Studies have shown that the stress of the base plate is unevenly distributed under tension force. [Conclusion] A new formula has been proposed. This formula has the reference value when design in project.

Key words: eight anchor bolts; flexible tower base plate; equivalent calculating width; equivalent calculating arm of force; thickness of base plate

随着近年来电力输送容量的不断增加, 特高压和同塔多回路输电线路发展迅速, 荷载的不断增大对铁塔与基础之间的连接承载力要求也更高, 工程中使用最为普遍的八地脚螺栓塔座板形式如图1所示, 本文定义为八地脚螺栓柔性塔座板。它的主要特点是每两颗地脚螺栓共用一个区格, 由塔腿靴板和加劲板组成区格的四边支撑, 并且为了节约材料, 采用四边切角。该塔座板型式由于具有加劲板较少, 焊接工作量少, 方便安装等优点, 在实际工程中很受欢迎。

通过查阅国内外相关文献和设计相关规程规范, 目前八地脚螺栓柔性塔座板的计算规定和研究

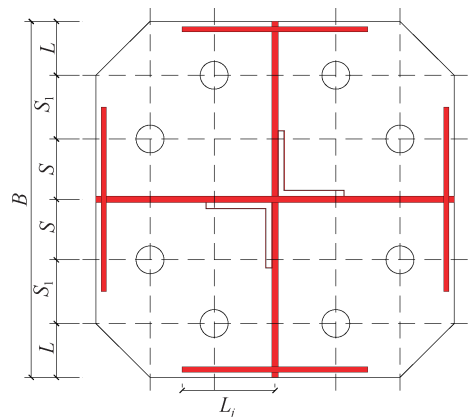


图1 八地脚螺栓柔性塔座板示意图

Fig. 1 Schematic diagram of flexible tower base plate with eight anchor bolts

成果尚属空白。作为上部结构和基础的连接部件, 其重要性不言而喻, 因此研究八地脚螺栓柔性塔座板的承载力和计算方法显得尤为重要^[1-3]。

收稿日期: 2018-06-14 修回日期: 2019-05-08

基金项目: 中南电力设计院科技项目“特高压输电线路塔座板承载力研究”(40-1A-KY201319-T02)

1 真型试验

1.1 试验方案

为了研究底板的极限承载力和破坏机理，主要针对底板的厚度和几何尺寸进行系列试验。试验方案共设计了9组不同塔座板试件进行试验研究，如表1所示。试验加载装置如图2所示。

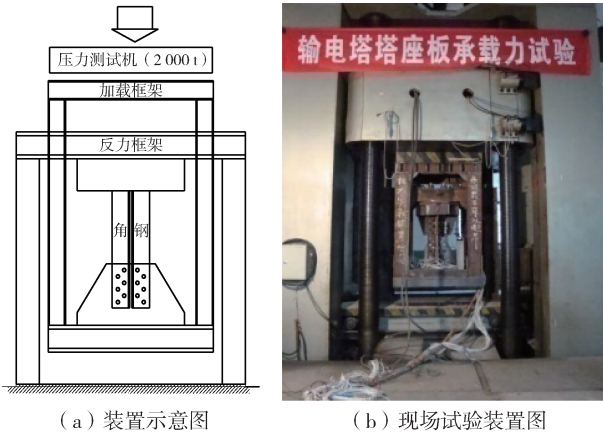


图2 加载装置
Fig. 2 Loading device

1.2 材性试验

本次试验采用Q345板材制作试件，钢材名义屈服强度为345 MPa。拉伸试样来自制作试件的母材，每根母材制作1个拉伸试样进行材性试验。材性试验结果如表2所示。

表2 材性试验结果

Tab. 2 Result of material characteristic test

构件编号	试件编号	E /GPa	f_y /MPa	f_u /MPa	ϵ /%
R1, R6, R8	8	216.816 13	352.10	566.49	0.34
	R2	217.170 51	357.12	564.55	0.35
R3, R7	12	214.619 93	358.38	587.37	0.34
	R4	221.059 75	333.13	547.85	0.34
R5, R9	14	214.043 52	336.85	558.28	0.33

1.3 加载方案

试验加载方案采用单调静力加载，通过初步的数值模拟预估极限承载力，预加载大小取预估极限荷载的10%。加载的具体方案如图3所示：

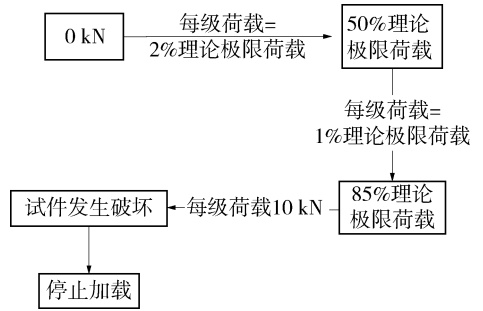


图3 加载方案
Fig. 3 Loading scheme

八地脚螺栓柔性塔座板底板应变片布置如图4(a)所示。底板变形用位移计来量测，布置如图4(b)所示。

表1 八地脚螺栓柔性塔座板试件列表

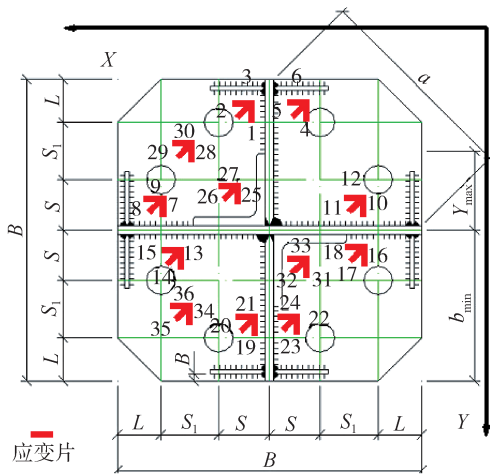
Tab. 1 Test list of flexible tower base plate with eight anchor bolts

序号	厚度 t /mm	S /mm	S_1 /mm	L /mm	座板 总宽度 /mm	地脚螺 栓直径 /mm	靴板厚 /mm	靴板高 /mm	加劲板厚 /mm	加劲板高 /mm
R1	28	80	100	95	550	36	12	250	8	140
R2	22	80	160	95	670	42	12	250	8	140
R3	20	80	160	95	670	42	14	250	8	140
R4	36	100	120	115	670	42	14	250	8	140
R5	32	100	120	115	670	36	14	250	8	140
R6	28	100	120	115	670	42	14	250	8	140
R7	40	100	120	115	670	42	14	250	8	140
R8	28	120	140	135	790	42	12	250	8	140
R9	32	120	140	135	790	42	14	250	8	140

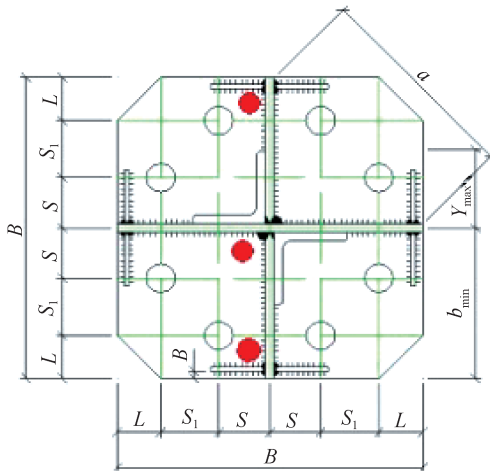
合计：R₂、R₃各1个，其余每组3个试件，共23个试件。

注：1) 地脚螺栓材质采用42CrMo。

2) 底板、靴板和加劲板的材质采用Q345B。



(a) 应变片布置图



(b) 位移计布置图

图4 八地脚螺栓柔性塔座板应变片及位移计布置

Fig. 4 Strain gage placement of flexible tower base plate with eight anchor bolts

1.4 试验结果

试验现象和应变-荷载曲线图如图5和图6所示,由图可知,底板的最大位移发生在构件中心;当构件的区格宽度与厚度比值较大时,底板刚度相对较小,此种情况下底板发生了挠曲现象。

另外,通过应变-荷载曲线图可知,底板的应力分布主要集中在螺栓孔和加劲板(或靴板)附近,底板应力分布不均匀。

本次试验的承载力确定方法如下^[4]:承载力为位移-荷载曲线中(如图7所示)屈服阶段的水平切线与弹性阶段的切线交点。当交点所对应的板中心挠度大于或等于1.5 mm时,承载力取1.5 mm所对应的荷载值,由此确定的试验承载力如表3所示。由表3可知,试验所得的极限承载力普遍比采

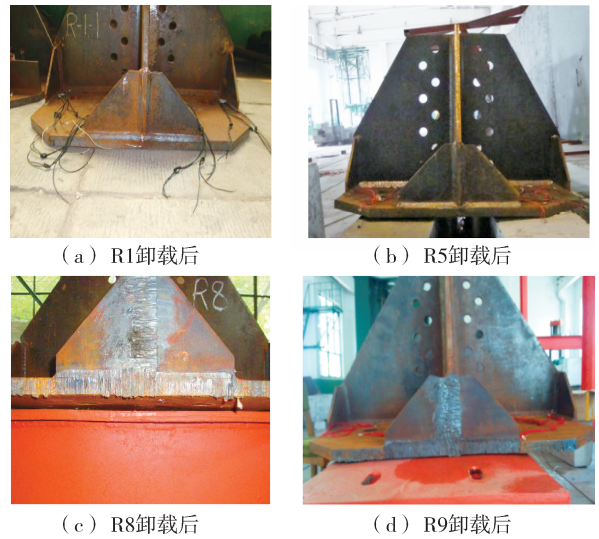


图5 试验试件破坏图

Fig. 5 The destroy picture of test specimen

用《技术规定》(2012)中的7.5.2-3公式的计算值要高,差值最高达到5.2倍。主要原因在于《技术规定》中的公式主要针对两边支撑的情况,因此计算结果偏于保守。

表3 塔座板承载力试验值与《技术规定》(2012)值比较

Tab. 3 Bearing capacity compare between experiment and DLT

序号	试验值 极限承载力 P_e /kN	《技术规定》 (2012) 计算值 P_a /kN	P_e/P_a	序号	试验值 极限承载力 P_e /kN	《技术规定》 (2012) 计算值 P_a /kN	P_e/P_a
R1	>3 350	1 144	>2.93	R6	3 000	1 129	2.66
R2	>2 850	6 48	>4.40	R7	>3 100	2 106	>1.47
R3	2 800	5 37	5.21	R8	2 207	1 118	1.97
R4	3 020	1 586	1.90	R9	2 600	1 397	1.86
R5	>3 080	1 411	>2.18	—	—	—	—

注:(1)《架空送电线路杆塔结构设计技术规定》DL/T 5154—2012简称“《技术规定》(2012)”;(2) P_a ——按两边支撑并参考《技术规定》(2012)公式(7.5.2-3)计算得到的承载力; P_e ——极限承载力试验值;“>”是指实际加载已经超过规范计算承载力2倍以上,由于加载装置的最大加载能力为理论计算值2倍,因此未能继续加载,试验构件的实际承载力比所测数据要高。

2 有限元分析

由于试验样本有限,为了进一步探究八地脚螺栓塔座板的破坏机理,建立了大量的有限模型进行分析。模型采用采用SHELL 181壳单元,材料本构关系采用多线性随动强化模型,屈服强度和抗拉极限值依据材性试验值取用。

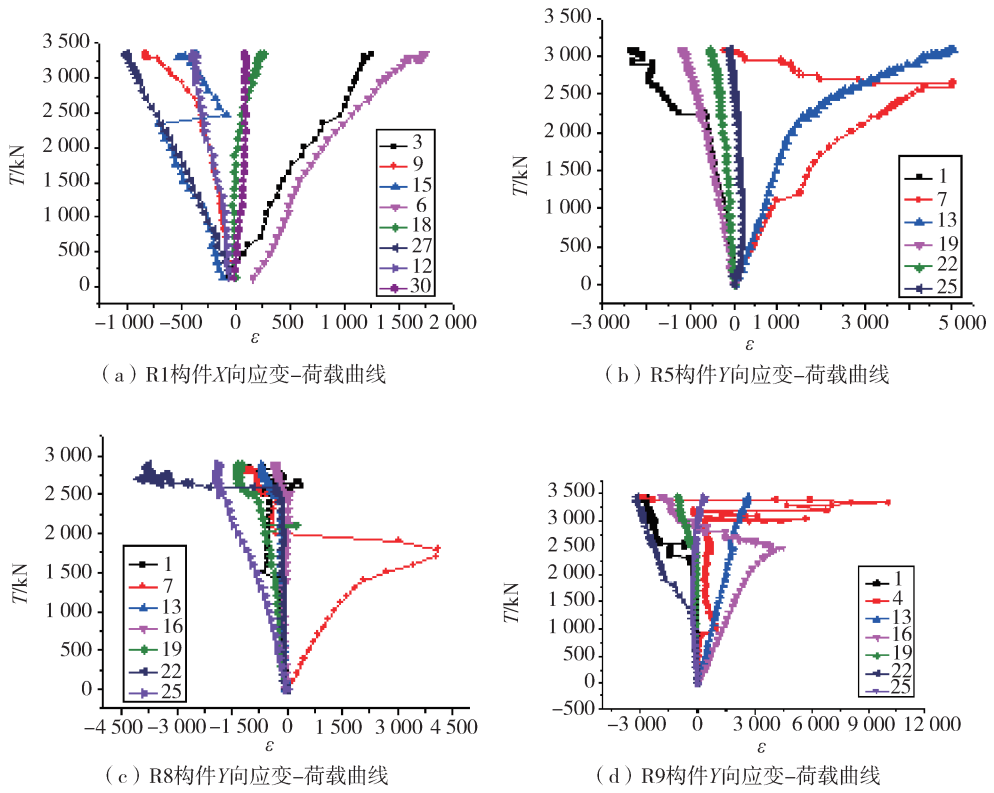


图6 试件应变-荷载曲线图

Fig. 6 The strain and load diagram of specimen

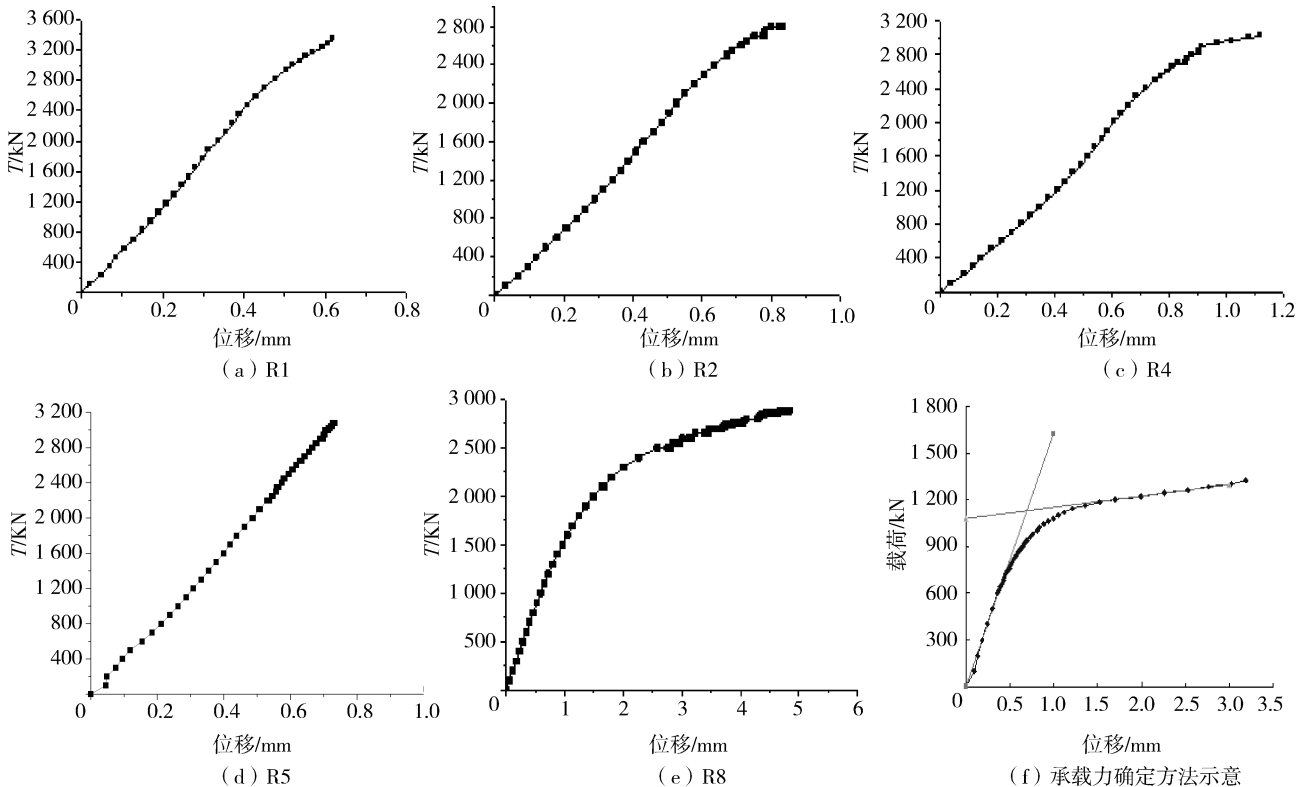


图7 典型的荷载-位移曲线

Fig. 7 Typical displacement-load curve

数值分析得到的 Von mises 应力图和底板中心位移 - 荷载曲线图如图 8 和图 9 所示。

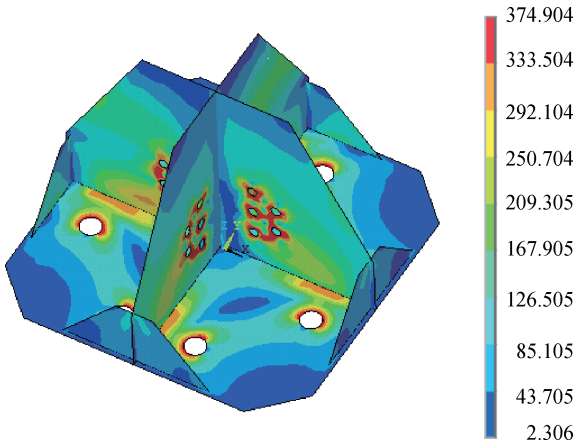


图 8 Von Mises 应力图

Fig. 8 Von mises stress diagram

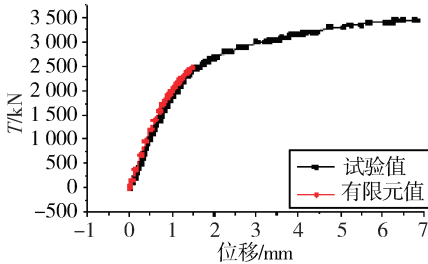


图 9 R9 底板中心位移 - 荷载曲线对比

Fig. 9 The displacement-load curve compare between experiment and finite element analysis of R9

由图 8 可知, 底板应力主要集中在螺孔附近, 以及相邻两颗螺栓连线与加劲板或靴板交界处, 这与试验所得结果比较吻合。通过对比试验和数值模拟的位移 - 荷载曲线, 二者吻合较好, 充分证明了有限元模拟结果的正确性。

为了研究塔座板布置形式和各部件尺寸对其承载力的影响, 采用有限元进行参数化分析^[5-7], 分析结果如图 10 ~ 图 14 所示。

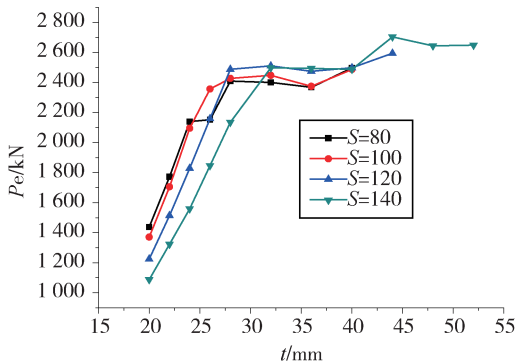


图 10 底板厚度 t 对承载力的影响

Fig. 10 The influence of base plate thickness on bearing capacity

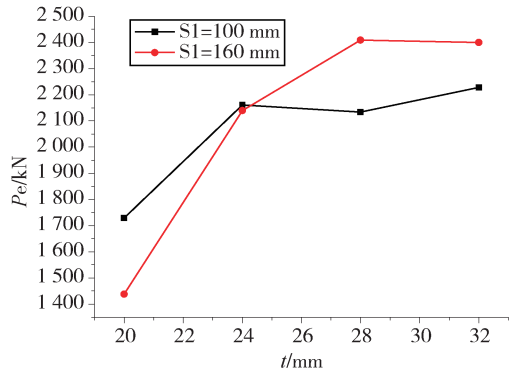


图 11 S_1 对承载力的影响 ($S=80$ mm)

Fig. 11 The influence of S_1 on bearing capacity ($S=80$ mm)

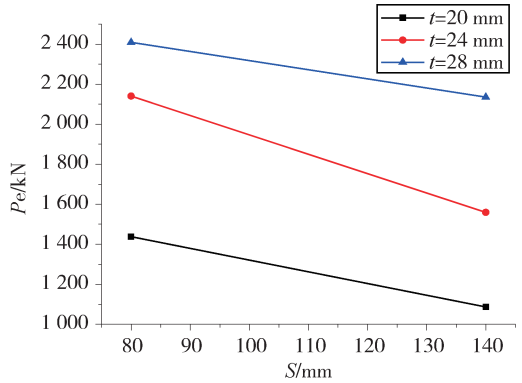


图 12 S 对承载力的影响 ($S_1=160$ mm)

Fig. 12 The influence of S on bearing capacity ($S_1=160$ mm)

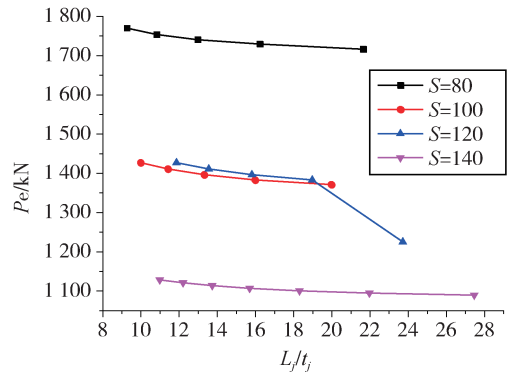


图 13 加劲板厚度对承载力的影响

Fig. 13 The influence of stiffening plate thickness on bearing capacity

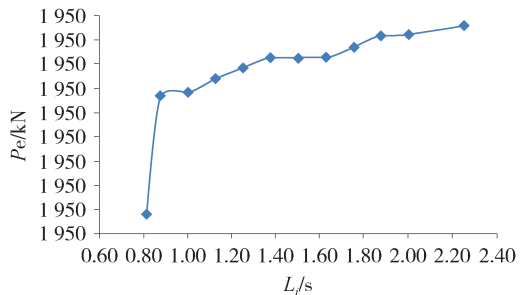


图 14 加劲板长度对承载力的影响

Fig. 14 The influence of stiffening plate length on bearing capacity

由图10~图14可知,不同参数对底板承载力的影响规律如下:

1)承载力随底板厚度 t 的增大而增大,当厚度增大到一定程度后,承载力的增加不再明显,这时以局部破坏为主。

2)承载力随着 $S1$ 的变化成抛物线变化规律,即 $S1$ 过小或者过大均会降低承载力,通常螺栓垫板的边长为螺栓孔径的2.5倍,为了避免螺栓垫板相碰,要求 $S1 > 2.5d + 10$ mm,式中 d 为螺孔直径,单位mm。

3)承载力随 S 增大而减小。

4)承载力受加劲板厚度变化的影响较小,随着加劲板长度的增大而增大,当加劲板长度增大到等于 S 后,承载力的增加幅度开始变缓。

3 底板厚度推荐计算方法

由上述分析可知,当底板宽度 B 与厚度 t 的比值较大时,底板相对较柔,底板中心位移达到破坏标准时构件强度尚未达到屈服;反之,当 B/t 较小时,底板刚度较刚,当荷载加载到一定程度时,底板材料发生局部屈服,底板中心位移较小。上述两种破坏模式简称为位移控制和强度控制两种破坏模式。不同 B/t 情况下八地脚螺栓柔性塔座板的极限荷载对应的位移如表4所示,从表中可以看出,当 $B/t < 33$ 时,极限荷载下的底板最大位移不超过1.5 mm,承载力由强度控制。

表4 不同 B/t 对应的极限荷载位移

Tab. 4 The displacement under ultimate load of different B/t

极限荷载所对应的位移/mm	B/t	极限荷载所对应的位移/mm	B/t
1.17	30.5	1.54	33.5
1.24	30.6	1.66	34.4
1.08	32.5	3.40	35.9
1.49	32.9	1.74	37.9

试验极限承载力与有限元模拟的极限承载力值对比如表5所示,由表可知试验值远高于有限元模拟值,且试验极限承载力的对应中心位移最大为1.5 mm,主要由于加劲板对座板承载力的贡献,以及座板自身发挥其薄膜效应导致构件的过载能力很强。故本文以有限元极限承载力和试验极限承载力为基础数据进行建议公式的推导。

表5 试验极限承载力和有限元模拟极限承载力

Tab. 5 The finite element analysis and experiment bearing capacity

序号	承载力试验值 P_e/kN	有限元极限承载力模拟值 P_u/kN
R1	>3 350	2 814
R2	>2 850	1 999
R3	2 800	1 310
R4	3 020	1 988
R5	>3 080	2 510
R6	3 000	2 199
R7	2 207	2 090
R8	2 600	2 248

注:表中 P_e —极限承载力试验值(当极限荷载所对应的中心位移大于或等于1.5 mm时,取1.5 mm所对应的荷载);“>”是指实际加载已经超过规范计算承载力2倍以上,由于加载装置的最大加荷能力为理论计算值2倍,因此未能继续加载,试验构件的实际承载力比所测数据要高。 P_u —有限元模拟的极限承载力。

同文献4的原理一样,在区格几何宽度内只有部分进入了屈服状态,等效计算宽度 D_i 定义如下:

$$D_i = \gamma \frac{B}{2} \quad (1)$$

式中: γ —宽度折减系数; B 为塔座板宽度, $B=2(S+S1+L)$ 。根据有限元计算结果,可推导出具体的折减系数如下:

$$D_i = (45.8 \times \left(\frac{B}{2}\right)^{-0.8} + 0.16) \frac{B}{2} \quad (2)$$

根据经典力学理论^[9]:

$$t = \sqrt{\frac{6M}{f_u D_i}} = \sqrt{\frac{6T \cdot L}{f_u D_i}} \quad (3)$$

式中: T 为底板上作用的单个螺栓拉力,N; D_i 为第 i 个区格等效计算宽度,为三边等效计算宽度总和,mm; L 为计算弯矩的力臂,mm。

根据相关文献^[8-11]和材性试验结果可知: $\frac{f_u}{f} > 1.5$,其中 f_u 为钢材极限强度, f 为钢材设计值,考虑材料的离散性,取 $f_u = \lambda f$,式中 λ 为:

$t \leq 16$ mm时, $\lambda = 1.4$;

16 mm $< t \leq 35$ mm时, $\lambda = 1.45$;

35 mm $< t \leq 50$ mm时, $\lambda = 1.6$;

$t > 50$ mm时, $\lambda = 1.7$ 。

根据有限元结果可以积分得到 M_u ,推算出计算力臂 $L=0.65 Y$,其中 Y_i 为地脚螺栓中心至最近靴板的垂直距离。

综上,推荐8地螺柔性塔座板底板厚度计算公

式如下:

$$t = \sqrt{\frac{6T \cdot 0.65 Y_i}{1.23 \times \lambda \cdot f \cdot D_i}} = 1.78 \sqrt{\frac{T \cdot Y_i}{\lambda \cdot f \cdot D_i}} \quad (4)$$

4 各计算方法对比

《技术规定》(2012)没有给出关于8地螺柔性塔座板的计算公式, 暂按照两边支撑参照其中的7.5.2-3式得到承载力计算值, 并与极限承载力试验值、有限元模拟值、和推荐方法计算值进行对比, 如表6所示。

表6 柔性塔座板承载力比较

Tab. 6 The bearing capacity compare of flexible tower base plate under different method

序号	承载力试验值 P_{i2}/kN	有限元模拟值 P_u/kN	《技术规定》(2012)计算值 P_a/kN	推荐公式计算值 P_{j2}/kN
R1	>3 350	2 814	1 144	1 997
R2	>2 850	1 999	648	1 354
R3	2 800	1 310	537	1 123
R4	3 020	1 988	1 586	2 681
R5	>3 080	2 510	1 411	2 161
R6	3 000	2 199	1 129	1 729
R7	2 207	2 090	1 118	1 546
R8	2 600	2 248	1 397	1 931

注: “>”是指由于加载装置承载力有限, 未能继续加载到极限承载力。

通过比较发现, 采用《技术规定》(2012)中的7.5.2-3公式计算过于保守, 主要原因为: 规范中未规定八地脚螺栓柔性塔座板的承载力计算公式, 表中所述《技术规定》(2012)计算结果 P_a 是按两边支撑计算得到的承载力, 由于柔性塔座板的实际构造有别于规范所述的两边支承, 即其余两边无法满足自由边的边界条件, 导致实际承载力比两边支撑计算结果提高较多。本文推荐公式计算结果与试验值或有限元值更加接近, 但仍然有较大的安全裕度。相比《技术规定》(2012), 本文推荐公式可使八地脚螺栓柔性塔座板受拉承载力提高40%~100%, 具有显著的经济效益。

5 结论

结合经典力学理论、试验结果和有限元分析提出了一种全新的八地脚螺栓柔性塔座板抗拉承载力计公式。主要结论如下:

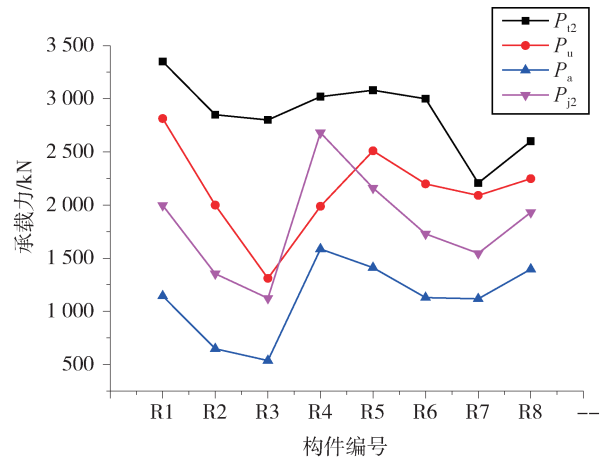


图15 八地脚螺栓柔性塔座板不同计算方法承载力对比
Fig. 15 The bearing capacity under different calculating method

1) 受拉承载力随底板厚度 t 的增大而增大, 当厚度增大到一定程度后, 对承载力的增加不再明显, 这时以局部破坏为主。

2) 受拉承载力随 S 增大而减小, 随 S_1 的变化成抛物线变化规律, 因此在满足构造要求的前提下, 应尽量布置紧凑。

3) 受拉承载力受加劲板厚度变化的影响较小, 随着加劲板长度的增大而大幅度增大, 但当加劲板长度增大到等于 S 后, 承载力的增加幅度开始变缓, 因此要求加劲板长度不小于 S 。

4) 本文提出的公式计算值与试验值或者有限元值更为接近, 但仍然有较大的安全裕度。相比《技术规定》(2012), 本公式可使八地脚螺栓柔性塔座板受拉承载力提高40%~100%, 具有显著的经济效益。

参考文献:

[1] 翁山溪, 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.
WENG L X, ZHOU J J. The analysis on effect of base plate with stiffening rib in transmission towers [J]. Fujian Power and Electrical Engineering, 2008, 28(1): 38-41.

[2] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 架空送电线路杆塔结构设计技术规定: DL/T 5154—2002 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
National Economic and Trade Commission of the People's republic. Technical regulation of design for tower and pole structures of overhead transmission line: DL/T 5154—2002 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.

[3] 国家能源局. 架空送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, 2012.
- National Energy Board. Technical regulation of design for tower and pole structures of overhead transmission line; DL/T 5154—2012 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.
- [4] 白强, 杨景胜, 郭念, 等. 八地脚螺栓刚性塔座板的承载力 [J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(3): 99-106.
BAI Q, YANG J S, GUO N, et al. Bearing capacity study of rigid tower base plate with eight anchor bolts [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2017, 39(3): 99-106.
- [5] 王国强. 实用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2000.
WANG G Q. Practical engineering numerical simulation technology and its practice in ANSYS [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnic University Press, 2000.
- [6] 王勖成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
WANG X C, SHAO M. Basic principle and numerical method of finite element method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.
- [7] 蔡毅, 邢岩, 胡丹. 敏感性分析综述 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2008, 44(1): 9-16.
CAI Y, XING Y, HU D. On sensitivity analysis [J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2008, 44(1): 9-16.
- [8] 刘鸿文. 材料力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
LIU H W. Material mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [9] 中国国家标准化管理委员会, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 碳素结构钢: GB/T 700—2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, General Administration of Quality Supervision Inspection and Quarantine, Standardization Administration of China. Carbon structural steels; GB/T 700—2006 [S]. Beijing: China Standards Press, 2006.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 低合金高强度结构钢: GB/T 1591—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, General Administration of Quality Supervision Inspection and Quarantine, Standardization Administration of China. High strength low alloy structural steel; GB/T 1591—2008 [S]. Beijing: China Standard Press, 2008.
- [11] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 钢结构设计规范: GB 50017—2003 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
Ministry of Construction, Ministry of Construction of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, General Administration of Quality Supervision Inspection and Quarantine. Code for design of steel structures; GB 50017—2003 [S]. Beijing: China Planning Press, 2003.

作者简介:



BAI Q

白强(通信作者)

1983-, 男, 四川南江人, 中南电力设计院有限公司送电土建室主任/高级工程师, 结构工程硕士, 主要从事输电线路设计研究工作 (e-mail) baiqiang@csepedi.com。

吴海洋

1981-, 男, 湖北随州人, 中南电力设计院有限公司电网工程公司副总经理/高级工程师, 结构工程博士, 主要从事输电线路设计研究工作 (e-mail) wuhaiyang@csepedi.com。

叶爱民

1973-, 男, 湖北仙桃人, 中南电力设计院有限公司电网工程公司副总经理高级工程师, 结构工程学士, 主要从事输电线路设计研究工作 (e-mail) yeaimin@csepedi.com。

(责任编辑 李辉)

