

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.03.013



八地脚螺栓刚性塔座板的承载力

白强¹, 杨景胜¹, 郭念¹, 李正良²

(1. 中南电力设计院有限公司, 武汉 430071; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400044)

摘要:随着中国电网技术的发展,杆塔负荷越来越大,八地脚螺栓塔座板应用越趋普遍。但现有计算理论与实际情况不符,为了使八地脚螺栓塔座板的计算方法合理、可靠,通过试验对八地脚螺栓刚性塔座板承载力进行了研究,同时借助有限元对构件进行了参数化分析。结合经典力学理论、试验及有限元数据,提出了全新的计算方法,引入了等效计算宽度和有效力臂的概念,充分考虑了底板刚度,屈曲后强度和垫板对承载力的影响,对工程设计具有指导意义。

关键词:八地脚螺栓; 刚性塔座板; 等效计算宽度; 等效计算力臂; 有限元; 承载力

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1674-4764(2017)03-0099-08

Bearing capacity of rigid tower base plate with eight anchor bolts

Bai Qiang¹, Yang Jingsheng¹, Guo Nian¹, Li Zhengliang²

(1. Central Southern China Electric Power Design Institute, Wuhan 430071, P. R. China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: With the Chinese power grid technology developed rapidly and the load applied on tower is going larger and larger, the tower base plate with eight anchor bolts has been used more commonly. Whilst the calculate theory is not comply with the actual condition. In order to make the calculate method more reasonable and reliable, The bearing capacity of Rigid tower base plate with eight anchor bolts is investigated through experiment and analytical parametric study was conducted to investigate the tower base plate by finite element method. Based on the result of experiment and finite element as well as classical mechanics theory, a new formula has been proposed which include the Equivalent calculating width and Equivalent calculating arm of force. This formula considered plate stiffness, post-buckling strength and subplate which influence the bearing capacity of tower base plate in this formula, thus the proposal formula is reasonable and effective, It is helpful in project design.

Keywords: Rigid tower base plate with eight anchor bolts; equivalent calculating width; equivalent calculating arm of force; finite element method; bearing capacity.

随着国家大力推进能源结构的调整,鼓励跨区输电项目,发展远距离大容量输电技术,优化资源配置,特高压输电工程得到迅猛发展。同时,为了节约

土地资源,很多线路采用多回路共杆的送电模式。特高压和同塔多回路输电线路铁塔的基础作用力比普通线路铁塔增大较多,工程中常见的四地脚螺栓

收稿日期: 2017-01-10

基金项目: 中南电力设计院有限公司科技项目(40-1A-KY201319-T02)。

作者简介: 白强(1983-),男,高级工程师,主要从事输电线路设计,(E-mail) baiqiang@csepedi.com。

Received: 2017-01-10

Foundation item: The Science and Technology Program of CSEPD(No. 40-1A-KY201319-T02)

Author brief: Bai Qiang(1983-), senior engineer, main research interest: transmission line design, (E-mail) baiqiang@csepedi.com.

塔座板已经不能满足上述线路工程的需要,在工程中更多的使用了八地脚螺栓塔座板型式^[1-2]。

由于国外输电线路大多采用插入式角钢,八地脚螺栓塔座板在国外工程中很少应用,因此在国外相关文献中未对八地脚螺栓塔座板进行论述。部分中国学者和行业标准对八地脚螺栓塔座板进行了探讨和规定。翁兰溪等^[3]研究了八地脚螺栓塔座板加劲肋对底板承载力的影响,在四地脚螺栓塔座板的计算公式上进行了系数修正^[4];《架空输电线路杆塔结构设计技术规定》(DL/T 5154—2012)(以下简称“技术规定”)^[5]规定了八地脚螺栓塔座板计算公式。上述研究成果和计算规定尚存在如下亟待解决的问题:1)现有文献均未考虑底板刚度的影响,塔座板承载力只与座板厚度和材料强度有关,而与区格(相邻加劲肋或靴板之间的区域)大小无关,这是明显不合理的;2)《技术规定》中的算法 1(按照三边固定一边自由计算),假定塔座板均匀受力,然而塔座板在塔腿上拔情况下受到螺栓传递的集中拉力,与均布受力有明显的差异。因此,八地脚螺栓塔座板受拉时承载力计算假定与实际情况不符。文中根据试验和有限元分析,对八地脚螺栓刚性塔座板的承载力进行了分析和研究,系统提出了全新的建议计算公式。

1 八地脚螺栓刚性塔座板定义

八地脚螺栓刚性塔座板主要特征包括两点:1)塔座板带有八颗地脚螺栓;2)在每颗地脚螺栓的三个边均设置有加劲板或靴板。八地脚螺栓刚性塔座板的构造如图 1 所示,此类塔座板的优点是刚度大,受上拔力时,变形较小;缺点是构造复杂,焊缝较多,且对于较短腿和大坡度铁塔需注意主材和加劲板相碰的问题。此类塔座板在实际工程中得到了广泛应用。

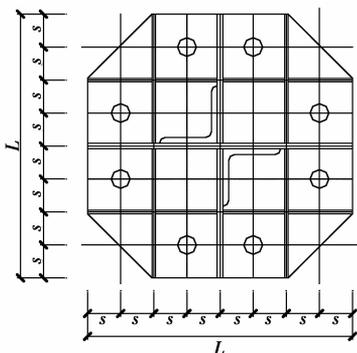


图 1 八地脚螺栓刚性塔座板示意图
Fig. 1 Schematic diagram of Rigid tower base plate with eight anchor bolts

2 试验过程

2.1 试验试件及加载装置

为了研究塔座板底板厚度和区格宽度对承载力的影响,选取 6 组(每组 3 个试件)不同规格的试件进行试验研究,试验试件列表如表 1 所示。试验采用重庆大学结构试验室的 2 000 T 压力试验机给塔座底板分级施加拉力,加载装置如图 2 所示。

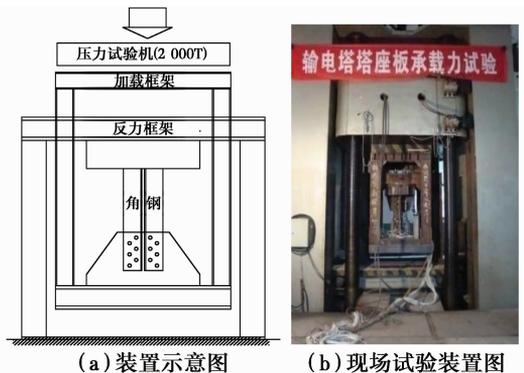


图 2 加载装置

Fig. 2 Loading device

表 1 八地脚螺栓刚性塔座板试件列表

Table 1 Test list of Rigid tower base plate with eight anchor bolts

序号	厚度 <i>t</i> / mm	宽度 <i>S</i> / mm	地脚螺 栓直径/ (42crmo)	靴板厚/ mm	靴板高 度/mm	加劲板 厚/mm	加劲板 高/mm
G1	20	80	42	12	300	10	150
G2	20	120	42	12	300	10	150
G3	24	80	42	12	300	8	80
G4	28	120	56	14	460	12	170
G5	24	120	52	12	400	12	170
G6	32	120	60	14	400	12	150

注:钢材强度等级为 Q345,地脚螺栓材质为 42crmo。

2.2 加载方案

该试验为单调加载静力试验,先预加载后分级加载。预加载大小取理论极限荷载的 10%。试验前 25 级荷载,每级加载量为理论极限荷载的 2%,每级加载稳定 1 min 后记录相应荷载的应变;之后每级加载量为理论极限荷载的 1%,每级加载稳定 1 min 后记录相应荷载的应变,达到理论极限荷载 85%;以后按照每级加载 10 kN,直至加载时出现试件中点位移和应变片应变急剧增大、无法稳定或自动卸荷的情况时停止加载。

2.3 应变片和位移计布置

八地脚螺栓刚性塔座板底板应变片布置如图 3 所示。底板整体及局部变形用位移计来量测挠度,位移计布置见图 4。

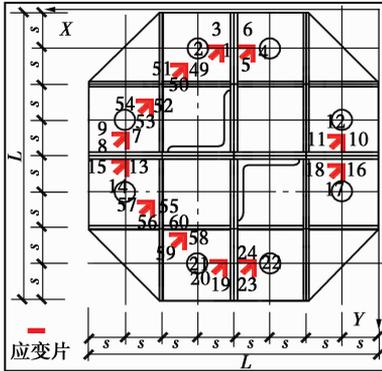
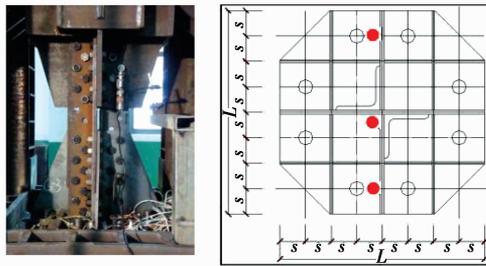


图 3 八地脚螺栓刚性塔座板应变片位置
Fig. 3 strainage placement of Rigid tower base plate with eight anchor bolts



(a) 位移计现场布置图 (b) 位移计布置示意图

图 4 八地脚螺栓刚性塔座板位移计布置
Fig. 4 Displacementmeter placement of rigid tower base plate with eight anchor bolts

2.4 材性试验

试验构件的材质采用 Q345B 钢材,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。试件尺寸和试验过程按《金属材料室温拉伸试验方法》(GB/T 228—2002) 执行,试验设备为 INSTRON 1342 动静态材料试验机。每个板材对应的母材编号见表 2,试验结果见表 3。

表 2 试件编号与拉伸试验编号的对应关系

Table 2 The relationship between test components No. and stretching test No.

试件编号	塔座板编号	加劲板编号	试件编号	塔座板编号	加劲板编号
G1	1	2	G4	5	6
G2	1	2	G5	3	6
G3	3	4	G6	7	6

表 3 材性试验结果

Table 3 The result of Material properties test

编号	E / MPa	f_y / MPa	f_u / MPa	$\epsilon / \%$
01#	202 181.68	356.76	563.22	0.31
02#	211 057.04	375.18	576.07	0.34
03#	207 649.71	352.04	540.11	0.33
04#	204 562.24	363.47	581.66	0.33
05#	194 716.73	345.47	528.96	0.33
06#	187 397.23	366.24	538.74	0.4
07#	204 209.48	330.94	540.15	0.35

3 试验结果

根据每组 3 个试件的试验结果确定构件试验承载力的原则如下:当 3 个试件中存在偏差较大的数据时,应予以剔除,对有效数据取平均值。

从破坏时的挠曲变形观察可知,当区格宽度较大时,底板挠曲变形较大,如图 5(b)~5(c)所示;当区格宽度较小时,底板变形不明显,如图 5(a),5(d)所示。

由试验构件的应变-荷载曲线图(图 6)可知,八地脚螺栓刚性塔座板底板的应力呈非均匀分布,主要分布在螺栓孔和加劲板或靴板附近。座板中心位移-荷载曲线见图 7。

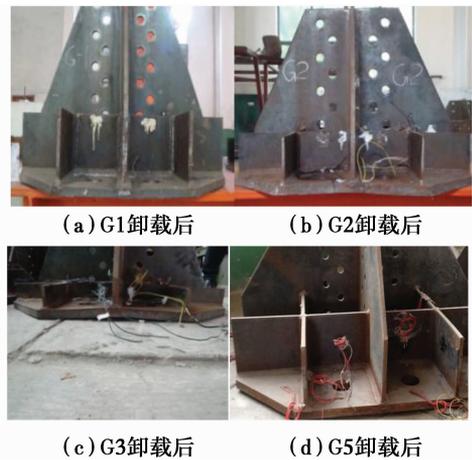


图 5 试验试件破坏图

Fig. 5 The destroy picture of test specimen

试件的破坏不是突然性的脆性破坏,随荷载的增加,塔座板变形越来越大,最终塔座板被明显拉弯或破裂,此时的荷载在工程运用中不能作为塔座板承载力。

意大利 SAE 公司曾做过力学试验验证(详见文献[4]),在设计荷载下,底板的变形小于 1.0 mm,在极限荷载下,底板变形小于 1.5 mm。通过本次的真

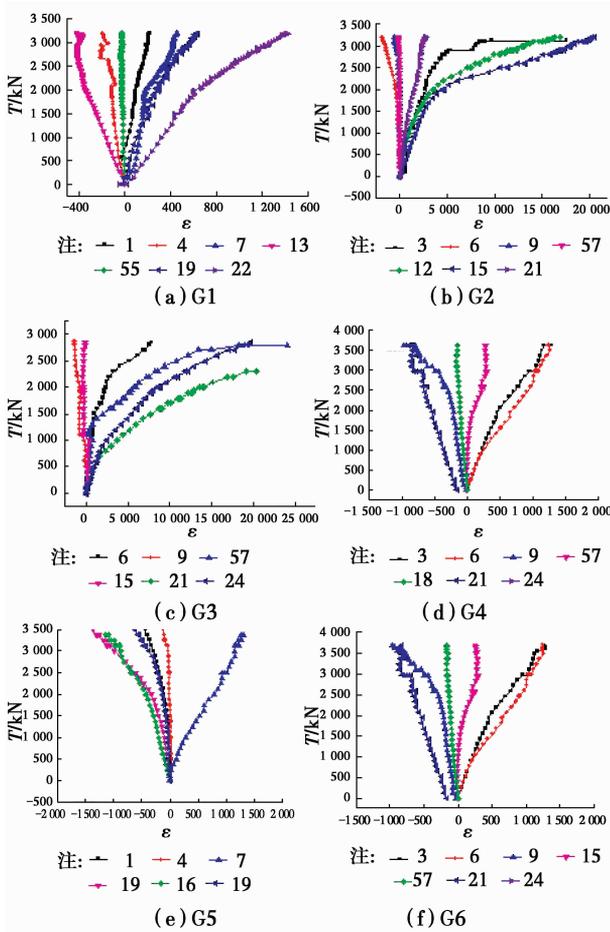


图 6 试件应变-荷载曲线图

Fig. 6 The strain and load diagram of specimen

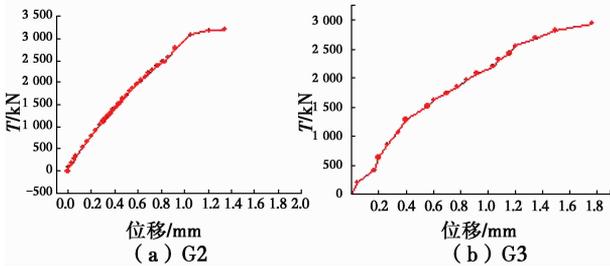


图 7 中心位移-荷载曲线图

Fig. 7 The center displacement and load diagram of specimen

型试验可知,当中心位移达到 1.5 mm 时,绝大部分试件还处于线弹性状态,少部分试件进入屈服平台阶段(图 7)。塔座板是连接基础和铁塔的重要部件,是整个铁塔乃至线路安全的保障,为了使塔座板材料处于线弹性阶段,结合文献[4]和试验数据,确定塔座板的中心位移破坏限值为 1.5 mm。

初步规定本次试验的承载力确定方法:取板中心挠度与承载力关系曲线中两切线的交点所对应的荷载值作为其试验承载力,当无明显的屈服平台或

当两切线的交点所对应的板中心挠度大于或等于 1.5 mm 时,试验承载力取 1.5 mm 所对应的荷载值。试验承载力同《技术规定》(2012)的比较如表 4 所示。

表 4 塔座板承载力试验值与《技术规定》(2012)值比较

Table 4 The bearing capacity compare between experiment and DLT

序号	试验值 承载力 P_{t2} /kN	《技术规定》 (2012)计算值 P_{a1} (P_{a2})/kN	P_{t2} / P_{a1} (P_{t2} / P_{a2})
G1	>3 210	2 929(976)	>1.10(>3.29)
G2	3 200	2 929(976)	1.09(3.28)
G3	2 825	4 161(1387)	0.68(2.04)
G4	3 650	5 558(1853)	0.66(1.97)
G5	>3 500	4 161(1387)	>0.84(>2.52)
G6	>3 720	6 954(2318)	>0.53(>1.60)

注: P_{a1} 为《技术规定》(2012)算法 1 计算值(按照三边固定一边自由计算); P_{a2} 为《技术规定》(2012)算法 2 计算值(按照《技术规定》公式 7.5.1-7~公式 7.5.1-9 进行计算); P_{t2} 为试验承载力;“>”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。

由表 4 可知,算法 1 的《技术规定》计算值部分构件高于试验值,因此算法 1 的计算结果偏于不安全。算法 2 的计算值普遍远低于试验值,因此算法 2 相对保守。

4 有限元分析

4.1 有限元模型和材料本构关系

为了更加全面的反映八地脚螺栓刚性塔座板受拉情况下的应力分布情况,采用有限元软件进行数值模拟。有限元模型见图 8,构件单元采用 SHELL 181 壳单元,材料特性采用多线性随动强化模型,屈服强度和抗拉极限与材性试验值相同。

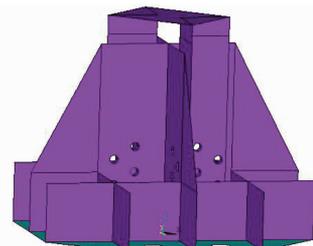


图 8 有限元模型图

Fig. 8 The finite element model

4.2 有限元分析结果

有限元计算结果显示,底板应力主要分布在靴板或加劲板以及螺孔附近,这与试验所得结果比较吻合,如图 9 所示。试验及有限元分析的荷载-位移曲线和荷载-应变曲线对比如图 10 和图 11 所示,二者吻合较好,充分证明有限元模拟结果的正确性。按照此方法对所有试验构件进行有限元模拟,并将模拟结果汇总如表 5 所示。

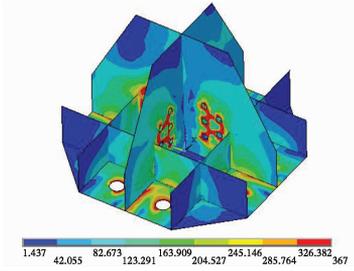
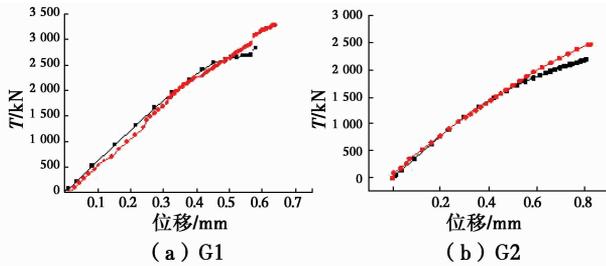


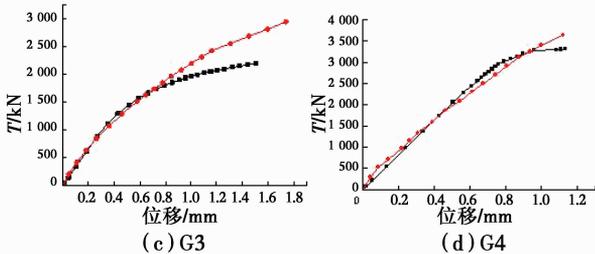
图 9 八地脚螺栓塔座板 Von Mises 应力图

Fig. 9 Von mises stress diagram of rigid tower base plate with eight anchor bolts



(a) G1

(b) G2



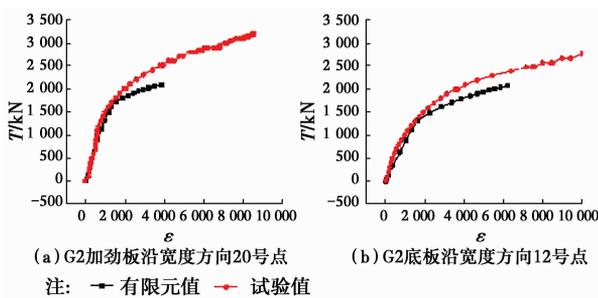
(c) G3

(d) G4

注: —有限元值 —试验值

图 10 塔座板中心位移-荷载曲线对比

Fig. 10 The displacement-load curve compare at tower base plate center



(a) G2加劲板沿宽度方向20号点

(b) G2底板沿宽度方向12号点

注: —有限元值 —试验值

图 11 塔座板应变-荷载曲线对比

Fig. 11 The strain-load curve compare of towerbase plate

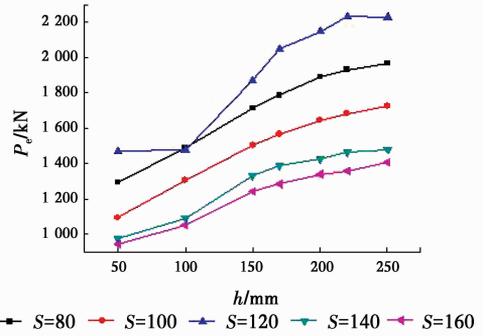
表 5 有限元分析结果

Table 5 The result of finite element analysis

序号	厚度 t/mm	宽度 S/mm	有限元极限 承载力 P_u/kN	试验值极限 承载力 P_t/kN
G1	20	80	2 908	>3 210
G2	20	120	2 744	3 200
G3	24	80	2 488	2 825
G4	28	120	3 364	3 650
G5	24	120	2 685	>3 500
G6	32	120	3 812	>3 720

4.3 有限元参数化分析

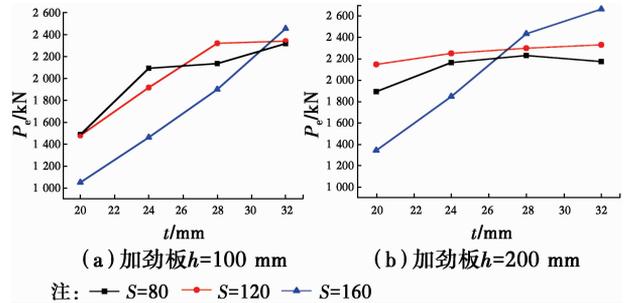
为了研究底板厚度和区格宽度对承载力的影响,进行了参数化分析,分析结果如图 12 和 13 所示。



注: — S=80 — S=100 — S=120 — S=140 — S=160

图 12 S 对承载力的影响

Fig. 12 The curve of S and bearing capacity



注: — S=80 — S=120 — S=160

图 13 底板厚度 t 的影响

Fig. 13 The curve of tower base plate thickness t and bearing capacity

由图 12 可知,加劲板高度相同时,塔座板承载力总体上随着 S 的增大而减小。以加劲板高度 $h=200\text{ mm}$ 、加劲板厚度 $t_j=8\text{ mm}$ 、底板厚度 $t=20\text{ mm}$ 的构件为例, $S=120\text{ mm}$ 较 $S=160\text{ mm}$,承载力共提高了 60%,可见 S 对承载力的影响较大。值得注意的是 $S=120\text{ mm}$ 时刚性塔座板的承载力比 $S=80\text{ mm}$ 时要大,可见区格宽度过小时,由于螺孔

所占比例太大,反而会不利于塔座板材料强度的发挥,从而降低了承载力。

由图 13 可知,对于 $h = 100 \text{ mm}$, S 分别为 80、120、160 mm 时,底板厚度 t 从 20 mm 增加到 32 mm,塔座板承载力分别增大 55.7%, 58.1%, 133.6%。对于 $h = 200 \text{ mm}$, S 分别为 80、120、160 mm 时,底板厚度 t 从 20 mm 增加到 32 mm,塔座板承载力分别增大 14.8%, 8.5%, 98.6%。可以看出,当 $S(R)$ 较大时,底板厚度对承载力影响也较大。

5 八地脚螺栓刚性塔座板底板厚度建议计算方法

通过试验和有限元分析可知,八地脚螺栓刚性塔座板有强度控制和位移控制两种破坏模式,而且区隔宽度与板厚比值 S/t 是决定破坏模式的主要因素,实际工程为了节约材料,通常采取强度控制的设计原则。通过对不同 S/t 情况下八地脚螺栓刚性塔座板进行受拉承载力分析,结果汇总如表 6 所示,从表中可以看出,当 $S/t < 5$ 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。因此本文提出八地脚螺栓刚性塔座板的区格构造要求,即 $S/t < 5$,保证八地脚螺栓刚性塔座板的破坏模式为强度控制。

表 6 不同底板宽厚比对应的极限荷载位移

Table 6 The displacement under ultimate load of different S/t

极限荷载所			极限荷载所		
序号	对应的底板	S/t	序号	对应的底板	S/t
	最大位移			最大位移	
1	1.57	6	5	1.52	5
2	1.52	5	6	1.5	4.84
3	1.44	4.7	7	1.53	5
4	1.98	6	8	1.43	5

结合理论、试验和有限元分析可知,随着板宽逐渐增大,塔座板达到极限承载力时,最大应力为极限应力 f_u ,但在区隔几何宽度内应力并非均匀布满,故提出了对应于极限应力 f_u 的等效计算宽度 D_i 的概念,定义 D_i 如

$$D_i = 6\gamma S \tag{1}$$

式中: γ 为宽度折减系数; S 为螺孔中心到邻近靴板的垂距。

根据有限元计算结果,可推导出具体的折减系数为

$$D_i = \begin{cases} (10.3S^{-1} + 0.8)6S & 50 \text{ mm} \leq S \leq 110 \text{ mm} \\ (15.3S^{-0.05} + 11.2)6S & 110 \text{ mm} \leq S \leq 300 \text{ mm} \end{cases} \tag{2}$$

根据经典力学理论可推导出八地脚螺栓刚性塔座板受拉承载力计算公式如下^[12]

$$t = 6 \sqrt{\frac{M_u}{f_u D_i}} \tag{3}$$

式中: T 为底板上作用的单个螺栓拉力,单位 N; D_i 为第 i 个区隔等效计算宽度,为三边等效计算宽度总和,mm; $M_u = P_u \cdot L = T \cdot L$, L 为计算弯矩的力臂,mm;

根据相关文献[14-15]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: $t \leq 16 \text{ mm}$ 时, $\lambda = 1.4$; $16 \text{ mm} < t < 35 \text{ mm}$ 时, $\lambda = 1.45$; $35 \text{ mm} < t < 50 \text{ mm}$ 时, $\lambda = 1.6$; $t > 50 \text{ mm}$ 时, $\lambda = 1.7$ 。

塔座板与螺杆连接时通常采用垫板。在外荷载作用下,垫板对区隔边界处所产生的弯矩会有直接的影响。根据有限元结果可以积分得到 M_u ,根据 $L = \frac{M_u}{P_u} = \frac{M_u}{T}$ 可以计算出 8 地螺刚性塔座板的单个螺栓的计算力臂 L 。假定地脚螺栓中心至最近靴板的垂直距离用 Y_i 表示。将计算得到的 L 与 Y_i 的关系曲线绘制如图 14 所示,即为计算力臂和几何力臂的对应关系。从图 14 中可以看出: L 与 Y_i 近似线性关系,从设计安全角度考虑,采用包络法取 $L = 0.7Y_i$ 。

综上,可得出八地脚螺栓刚性塔座板计算公式为

$$t = \sqrt{\frac{6T \cdot 0.7Y_i}{\lambda f D_i}} = 2.0 \sqrt{\frac{T \cdot Y_i}{\lambda \cdot f \cdot D_i}} \tag{4}$$

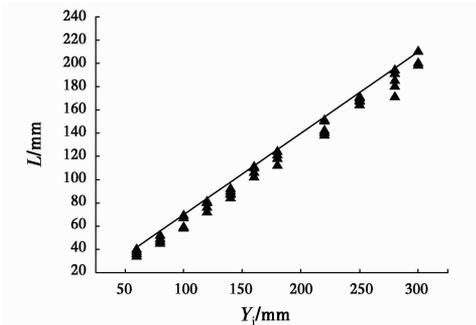


图 14 L 与 Y_i 关系曲线

Fig. 14 The relation curve between L and Y_i

6 各计算方法对比

采用本文提出的八地脚螺栓刚性塔座板建议计算公式对试验塔座板试件进行计算,并将各种方法计算结果比较如图15所示。

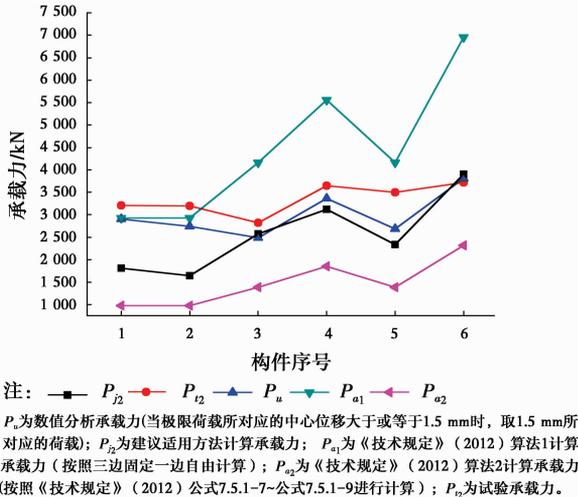


图15 各计算方法承载力

Fig. 15 The bearing capacity under different calculating method

由图15可知,通过比较发现《技术规定》(2012)算法1(P_{a1})的计算结果远大于试验值(P_{12})或者有限元值(P_u),主要原因在于其采用与受压计算一样的假定,即底板应力均匀分布的三边支承理论,导致承载力计算值比实际情况要高很多,按此设计偏于危险;而《技术规定》算法2(P_{a2})的计算结果远小于试验值或者有限元值,主要原因在于其未考虑板屈曲后强度和求解弯矩时力臂的折减,导致承载力计算值比实际情况低很多,这两种算法均不可取;建议公式与试验值(P_{12})或者有限元值(P_u)最为接近,并且略小于试验值,说明本建议公式安全、经济,并且建议计算公式考虑了板的后屈曲强度和区隔宽度对受拉承载力的影响,所提出的等效计算宽度和计算力臂物理意义较明确。

7 结论

通过对八地脚螺栓刚性塔座板进行受拉承载力试验和有限元模拟,分析了塔座板的破坏机理和破坏模式,得出塔座板各主要参数对其抗拉承载力的影响,并且结合经典力学理论提出了一种全新的八地脚螺栓刚性塔座板抗拉承载力计公式。

1)八地脚螺栓刚性塔座板受拉时,底板应力呈非均匀分布,主要分布在螺栓孔和加劲板或靴板

附近。

2)当 $S/t < 5$ 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,此时承载力基本上随着 S 的增大而减小。

3)底板厚度对塔座板承载力影响也较大,厚度越大,承载力越高,当 S 较大时,底板厚度对承载力影响更为明显。

4)全新的八地脚螺栓刚性塔座板抗拉承载力计公式考虑了板的后屈曲强度和区隔几何尺寸对其承载力的影响,通过与《技术规定》所述方法比较,本公式计算值与试验值或者有限元值更为接近,并且略小于试验值,具有极强的安全经济性。

参考文献:

- [1] 赵有鸿. 钢管塔基础八支地脚螺栓的精确定位[J]. 青海电力, 2008(Sup1):62-64.
ZHAO Y H. Precise positioning of steel-pipe-tower basis'8 anchoring bolts [J]. Qinghai Electric Power, 2008(Sup1):62-64. (in Chinese)
- [2] 洪晓辉. 刚性柱脚螺栓计算分析和应用[J]. 福建建材, 2012(11):20-22.
HONG X H. The analysis and application of bolts for rigid column base [J]. Fujian Building Materials, 2012(11):20-22. (in Chinese)
- [3] 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.
WENG L X, ZHOU J J. The analysis on effect of base plate with stiffening rib in transmission towers [J]. Fujian Dianli Yu Diangong, 2008,28(1):38-41.
- [4] 架空送电线路杆塔结构设计技术规定:DL/T 5154—2002[S]. 中华人民共和国国家经济贸易委员会,2002.
Technical regulation of design for tower and pole structures of overhead transmission line: DL/T 5154-2002 [S]. State Economic and Trade Commission of the People's Republic of China, 2002. (in Chinese)
- [5] 架空送电线路杆塔结构设计技术规定:DL/T 5154—2012[S]. 国家能源局,2012.
Technical regulation of design for tower and pole structures of overhead transmission line: DL/T 5154-2012 [S]. National Energy Administration, 2012. (in Chinese)
- [6] 邢春雷,杨庆生. 板壳结构非线性动态随机响应的模态降阶分析[J]. 强度与环境, 2013,40(12):12-21.
XING C L, YANG Q S. Review of reduced-order analysis technique for andom dynamic response of plate/shell structures [J]. Structure & Environment Engineering, 2013,40(12):12-21. (in Chinese)

- [7] 殷如峰. 加劲板有限元分析方法探究[J]. 城市建设理论研究, 2013,33:40-45.
YIN R F, study of stiffened plates by element analysis method [J]. ChengShi Jianshe LiLun Yan Jiu, 2013, 33:40-45. (in Chinese)
- [8] 李玉庆,俞先林. 基于板壳单元的箱梁桥空间应力分析[J]. 世界桥梁, 2013,41(4):62-65.
LI Y Q, YU X L. Spatial stress analysis of box beam bridge based on shell element [J]. World Bridges, 2013,41(4):62-65. (in Chinese)
- [9] 文颖,曾庆元. 四节点二十四自由度平板壳单元几何刚度矩阵显式解析式的推演算法研究[J], 计算力学学报, 2013(6):796-801.
WEN Y, ZENG Q Y. Algorithm for deriving explicitly the analytical expression of geometric stiffness matrix of the 4-node,24 degrees of freedom flat shell element [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2013(6):796-801. (in Chinese)
- [10] KIM K D, LOMBOY G R. A co-rotational quasi-conforming 4-node resultant shell element for large deformation elasto-plastic analysis [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2006, 44(47):89-94.
- [11] SHI G, VOYIADJIS G Z. Geometrically nonlinear analysis of plates by assumed strain element with explicit tan-gent stiffness matrix[J]. Computers & Structures, 1991,41(4):35-40.
- [12] MURRAY D W. Large deflection analysis of plates [Research Report No. 67-44][R]. Structural Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley, California, USA, 1967.
- [13] 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):9-15.
CAI Y, XING Y, HU D. On sensitivity analysis[J]. Beijing Normal University (Natural Science), 2008,44(1):9-15. (in Chinese)
- [14] 曾晓辉,柳春图,冯玮. 有初挠度简支矩形板的后屈曲特性[J]. 机械强度, 2001,23(3):263-267.
ZENG X H, LIU C T, FENG W. Post buckling behavior of simply supported rectangular plate with initial deflection [J]. Journal of Mechanical Strength, 2001,23(3):263-267. (in Chinese)
- [15] 低合金高强度结构钢:GB/T 1591—2008[S]. 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,2008.
The General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China and the Standardization Administration of China, High strength low alloy structural steels;GB/T 1591-2008[S]. 2008. (in Chinese)

(编辑 胡玲)