

特高压线路板式中型桩复合基础计算与设计*

张生亮**

(山西财经大学应用数学学院,太原 030006)

摘要:将板式基础与桩基础的优点相结合,给出一种新型的板式中型桩复合基础。在计算基础的抗拔承载力时,既考虑基础及板上土重,又计算桩的摩擦力。在线路荷载较大时,基础上拔、下压承载力随着桩的埋深加长而增加,保证能选出适应多回路、特高压铁塔的基础。内力分析部分采用有限元分析方法,给出了刚度矩阵、位移和荷载向量之间的方程。与传统板式基础相比,本方法大幅减少了土石方开挖量和混凝土耗量,是一种环保、经济的基础。

关键词:特高压线路;灌注桩基础;板桩基础;原状土;抗拔基础;有限元分析

中图分类号:TU 473.1 **文献标识码:**B **doi:**10.16507/j.issn.1006-6055.2015.02.004

Researches on Medium-sized Pile Cap Foundation in UHV Line*

ZHANG Shengliang**

(School of Applied Mathematics, Shanxi University of Finance & Economics, Taiyuan 030006)

Abstract: Combining the advantages of slab foundation and piles base, a new slab composite with medium-sized piles foundation is presented. When calculating the pull bearing capacity, the foundation and soil weight, and the friction force of piles are all taken into consideration. Dealing with the large line load, the capacity of bearing of pulling and pressing expand with the increasing length of the piles. Its feature ensures the selection of UHV tower foundation which adapts multi-loop. Furthermore, With the finite element method, the section of Internal Force Analysis of the foundation provides a matrix equation which include stiff matrix, displacement and load vectors. Compared with the traditional slab foundation, the amount of earthwork excavation and concrete consumption is significantly reduced, so it is a base for an environmentally friendly and economical.

Key words: UHV Transmission line; pile foundation; slab & pile foundation; undisturbed soil; resistant drawing foundation; finite element analysis

1 引言

近年来,随着大导线、多回路、超高压/特高压铁塔^[1,2]的出现,铁塔基础作用力越来越大。如果仍然采用常规基础,建造单个塔基础的混凝土耗量和开挖基坑的土石方量已经大于 100 立方。为了降低基础耗量和基坑土石方,并遵循环保要求的设计理念,开发新式基础已势在必行。当前各个电力设计院提出的新式基础方案主要有:直/斜掏挖基础^[3]、刚性扩底短桩^[4]、微型桩^[5]、锚杆基础^[6]等。掏挖基础用剪切法^[7]计算,可以发挥原状土力学性能,一般用于能够掏挖的土,土层质量较差不能掏挖成型时不适合使用。掏挖基础计算受上拔临界深度

h_c 的影响较大,一般合理的深度为圆板直径的 3~4 倍,埋深不宜太深。锚杆基础一般是在岩石中使用,如果地质条件适合,是最经济的基础。刚性扩底短桩及人工挖孔桩基础一般直径较大,对现在 800~1 000 千伏的线路,有时达 2.5 m 以上,相比直径较小的承台群桩,基础受力结构不是很合理。微型桩基础近年来有一定发展,一般会有若干斜桩,而有关斜桩的计算在相关规程规范^[7,8]中还没有明确的计算公式,计算依据和正确性还有待进一步研究。

参考文献[9]提出并设计实施了板式基础和桩基础组合,体现深、浅基础优点的板式中型桩复合基础,形状如图 1 所示。按照桩基础分类,该基础属于低承台(不出地面)、中等直径桩($300 \leq d \leq 800$ mm)基础。

2 板式中型桩复合基础的特点

1) 承载力高。板式中型桩复合基础由桩与板

2014-11-07 收稿,2014-12-06 接受

* 2010 年国家电网公司依托工程基建新技术研究(JXYM-2010-A-X-02),山西教育厅项目(20091120)资助

** 通讯作者,E-mail:ZSL-1964@126.com

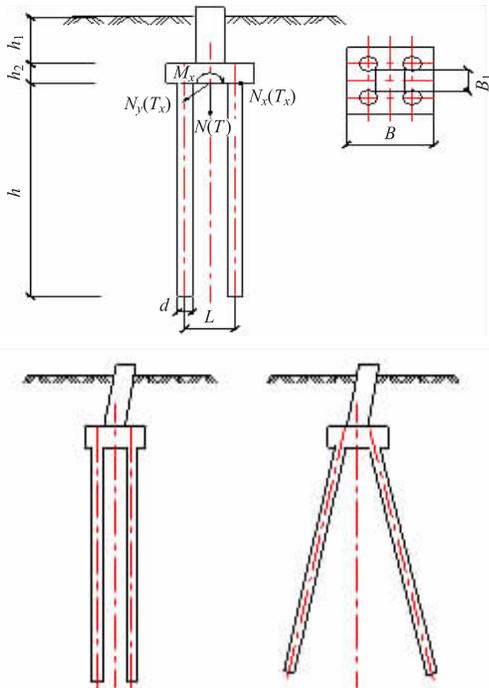


图1 板式中型桩复合基础^[9]

式基础共同承担上部传来的荷载。铁塔承受的下压荷载由桩侧的摩擦力、桩底的桩端承载力、板底的土抗力组成；铁塔承受的上拔荷载由基础自重、桩侧的摩擦力、板上的土重组成。桩的埋深越大，承载力越高，同样，桩径越大，承载力也越高，即使是1 000 kV的线路塔，在基础计算中也能找到满足要求的解。

2) 操作简便^[9]。项目的真型实验在晋北的黄土层中施工，当地无地下水，用机械洛阳铲成孔。

3) 节约土地资源^[9]。从受力机理和本文的实验可知，本基础节约了土地资源，新型环保。

4) 经济性好^[9]。与典型铁塔基础计算相比，板式中型桩基础的混凝土耗量比板式基础、掏挖基础、人工挖孔桩基础这三种基础型式都小，能够节约30%~40%左右。

5) 适用范围广。板式中型桩复合基础基桩长径较大，仅需要简单的施工设备和动力设备，可应用于厚度较大的粘性土、粉土等普通土基平丘地段，对于有地下水或无地下水均适用，只是在成孔工艺上有所区别，但稳定和强度计算基本相同。

3 板式中型桩复合基础的内力分析

板式中型桩复合基础在进行内力分析时，应将承台上立柱顶部的荷载变换到承台板的底面。除考

虑基础自重外，在上拔工况时，应考虑板上土重。公式^[7]如下：

$$V_i = h_i(B^2 + 2Bh_i \tan \alpha + \frac{4}{3}h_i^2 \tan^2 \alpha)$$

式中， V_i 为土体和基础的体积； h_i 为地表到板底的深度； B 为承台板的宽度； α 为土体的上拔角。

内力分析采用有限单元法^[10-12]计算。坐标 X 为横担方向， Y 轴垂直向下， Z 轴为线路方向。坐标原点 O 取为承台板的底面中心。每个桩的桩顶坐标为 $(X_i, 0, Z_i)$ 。

设桩数为 n ，一般取 $n = 4$ 。单个桩的单元刚度矩阵用 A_i 表示，总刚度矩阵用 G 表示。 G 对应结构整体的刚度矩阵，意义与单元刚度矩阵中的元素类似(参看文献[7]的附录表 F)。

$$A_i = \begin{bmatrix} \rho_{HH} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\rho_{MH} \\ 0 & \rho_{NN} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho_{HH} & \rho_{MH} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho_{MH} & \rho_{MM} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{0.8EJ}{h} & 0 \\ -\rho_{MH} & 0 & 0 & 0 & 0 & \rho_{MM} \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} \gamma_{UU} & \gamma_{UV} & 0 & 0 & 0 & \gamma_{U\beta} \\ 0 & \gamma_{VV} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{UV} & \gamma_{UU} & \gamma_{U\beta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_{U\beta} & \gamma_{\beta\beta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_{\beta\beta} & 0 \\ \gamma_{U\beta} & 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_{\beta\beta} \end{bmatrix}$$

式中， ρ_{HH} 表示在桩顶发生单位水平位移时桩顶对应的内力， ρ_{NN} 表示桩顶发生轴向位移时桩顶对应的内力， ρ_{MH} 表示桩顶发生单位转角时对应桩顶的弯矩值， ρ_{MM} 表示单桩发送绕 X, Z 轴旋转单位角时的抗扭刚度， $0.8 EJ/h$ 表示单桩发生绕 Y 轴旋转时的抗扭刚度。

桩与承台板的连接按固接方式考虑，根据单元刚度^[10,11]对整体结构的贡献叠加到整体刚度矩阵中，再考虑承台板侧面土层对总刚度矩阵的影响，形成整体刚度方程，对方程组求解算出位移，进而求解各个桩顶的内力。

设在某工况下变换到承台底面的荷载向量为 $F_{6 \times 1}$ ，位移向量为 $W_{6 \times 1}$ 。整体求解的线性方程为 $G \times W = F$ ，即

$$\begin{bmatrix} \gamma_{UU} & 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_{U\beta} \\ 0 & \gamma_{VV} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_{UU} & \gamma_{U\beta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_{U\beta} & \gamma_{\beta\beta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_{\beta\beta} & 0 \\ \gamma_{U\beta} & 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_{\beta\beta} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U \\ V \\ Z \\ \beta_x \\ \beta_y \\ \beta_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_x \\ N \\ H_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix}$$

式中, U 、 V 、 Z 分别为 X 向、轴向和 Z 方向的位移; β_x 、 β_y 、 β_z 表示这三个方向的转角。 H_x 、 H_z 表示 X 轴、Z 轴方向的水平力, N 为变换到承台底面的轴向力; M_x 、 M_y 、 M_z 表示三个方向荷载变换到承台底面后产生的弯矩。一般不考虑扭转, $M_y = 0$, 所以得出 $\beta_y = 0$ 。

求每根桩的桩顶内力的计算公式如下, 右端为第 i 号桩的桩顶内力分量。

$$\begin{bmatrix} \rho_{HH} & 0 & 0 & 0 & \rho_{HH} \cdot Z_i & -\rho_{MH} \\ 0 & \rho_{NN} & 0 & -\rho_{NN} \cdot Z_i & 0 & \rho_{NN} \cdot X_i \\ 0 & 0 & \rho_{HH} & \rho_{MH} & \rho_{HH} \cdot X_i & 0 \\ 0 & 0 & \rho_{MH} & \rho_{MM} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{0.8EJ}{h} & 0 \\ -\rho_{MH} & 0 & 0 & 0 & 0 & \rho_{MM} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U \\ V \\ Z \\ \beta_x \\ 0 \\ \beta_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{HH}U - \rho_{MH}\beta_z \\ \rho_{NN}V - \rho_{NN}\beta_x Z_i + \rho_{NN}\beta_z X_i \\ \rho_{HH}Z + \rho_{MH}\beta_x \\ \rho_{MH}Z + \rho_{MM}\beta_x \\ 0 \\ -\rho_{MH}U + \rho_{MM}\beta_z \end{bmatrix}$$

本文给出的是整体分析的矩阵方法, 容易理解, 也不易出错。技术规定[7]附录表 F3 给出的是只有一个水平力的情况, 如果有两个水平力, 应将轴向力的一半分别与两个水平力组合, 进行两次计算, 结果再进行合成。(技术规定[7]表 F3 第 6 步的求承台变位的转角公式有错, 中间应为 + 号, 可参考文献[8]中的公式; 表 F3 中的第 7 步基桩轴向力的公式 N_{oi} 只适合于单个水平力的情况, 需特别注意。用本文的矩阵分析不存在这些问题。)

4 板式中型桩复合基础稳定与强度计算

由内力计算得到的结果, 上拔稳定、下压稳定以及侧向稳定遵照《架空送电线路基础设计技术规

定》[7] 中的规定进行计算即可。

桩偏心受压强度计算: 按混凝土规范[13] 圆形断面偏心受压强度公式计算。

桩偏心受拉强度计算: 对比混凝土规范圆形断面偏心受拉强度公式和送电线路杆塔基础技术[3] 规定的圆形断面偏心受拉强度公式的计算结果发现, 线路基技规推荐公式计算结果略大, 且计算迭代容易收敛, 建议采用。

桩斜截面强度计算: 对应桩箍筋的计算。按混凝土规范[13] 中 6.3.15 圆形断面的偏心受压、受拉构件条文计算, 并满足桩基规范[8] 的构造要求。本文采用的等效矩形截面公式为, 矩形宽度 $b = 1.76r$, 矩形高度 $h_0 = 1.6r$, 再由矩形截面公式计算箍筋的配筋面积。

底板的抗冲切、抗剪、抗弯强度计算: 参照桩基规范[8]、建筑桩基技术规范理解和应用[14] 中的承台计算部分。

立柱强度计算: 受拉工况遵照线路基技规[7] 的 9.1.2 计算; 受压工况按混凝土规范[13] 计算。

5 板式中型桩复合基础经济技术比较

选取典型黄土地区的地质参数(表 1), 用典型基础形式对 ± 800 kV 电压等级典型直线塔 ZC27101A 和转角塔 JC27102A[15] 进行技经指标分析。板式基础和掏挖基础采用 TFOD2006 软件进行计算, 板桩复合基础用自编程序计算, 对比各基础的优缺点如表 2~4 所示。表 3 中本基础与同等设计条件的板式基础相比, 减少基坑土方开挖量达 70% 以上, 尤其在植被极易破坏、水土流失严重, 急需注意环保的高原地区具有广泛的应用前景。

表 1 地质条件(典型黄土地区)

土层名称	层厚 m	极限侧阻力 q_{sik} (kPa)	极限端阻力 q_{pk} (kPa)	粘聚力 c (kPa)	摩擦角 Φ (°)	计算重度 kN/m^3	计算上拔角 α (°)
黄土	20	45 ~ 50	1400	10 ~ 30	8 ~ 20	16	20

表 2 基础作用力(kN)

塔型	轴向压力 T	Tx	Ty	轴向拉力 N	Nx	Ny
ZC27101A	1184.9	-161.8	-156.9	-1548.1	-212.7	-179.7
JC27102A	3100.4	-591.1	-521	-4150.4	-770.2	-644.5

表 3 基础材料耗量

	混凝土 (m ³)	钢材 (kg)	基坑土方开方量(m ³)	基础造价 (万元)
ZC27101A				
板桩复合基础	30.54	5582.1	44.91	4.56
板式基础	52.31	4961.6	198	6.49
掏挖基础	48.53	2160.3	47.76	4.74
人工挖孔桩	54.78	3292.41	54.01	6.49

表4 基础材料耗量

JC27102A	混凝土 (m ³)	钢材 (kg)	基坑土方开 方量(m ³)	基础造价 (万元)
板桩复合基础	127.9	31352.4	158.9	12.9
板式基础	166.15	17186.5	819.2	23.6
掏挖基础	173.14	8020.8	172.37	15.44
人工挖孔桩	178.25	9745.51	161	20.69

板式中型桩基础的综合造价与板式基础、掏挖基础、人工挖孔桩相比最低,第二种作用力大的耐张塔效益更明显一些。分析 ZC27101A 直线塔可知,板式中型桩基础造价为板式基础的 70%,为掏挖基础的 96%,为人工挖孔桩基础的 70%;分析 JC27102A 耐张塔可知,板式中型桩基础造价为板式基础的 55%,为掏挖基础的 84%,为人工挖孔桩基础的 62%。

6 结束语

板式中型桩复合基础是浅基础、低承台桩相结合的基础,发挥了两种基础的优点,考虑了板上土重对抗拔的有利影响。从本文的例子可以看出,在典型黄土地基中选用板式中型桩基础,混凝土耗量最低,当然,钢筋用量会有所增加;但其基坑土方开挖量最少,符合绿色环保的理念;综合来看,经济指标最优。在基础作用力越大的情况下,经济优势越明显,具有显著的经济效益和社会效益。从全寿命周期管理理念出发,应优先采用板式中型桩复合基础。此外,用洛阳铲的半机械化施工,操作简便,易于运输,安全可靠,环保经济。

致谢:感谢山西电力勘测设计院李晋珍、张孟奇

高工在资料收集中提供的便利,以及在板式基础和掏挖基础计算对比方面所给予的帮助。

参考文献

- [1] DL/T5154-2012. 架空送电线路杆塔结构设计技术规定[s]. 北京:国家能源局,2013.
- [2] 国家电力公司东北电力设计院. 电力工程高压送电线路设计手册[M]. 2版. 北京:水利电力出版社,2002.
- [3] 贾宁. 黄土区特高压输电线路杆塔全掏挖基础抗拔分析[J]. 工程勘察,2009,(2):24-27.
- [4] 肖洪伟,肖兵. 输电线路大直径人工挖孔扩底桩基础的承载力试验研究[J]. 电力建设,2004,25(8):45-50.
- [5] 张晓红,龚健. 微型桩原型试验及其在输电线路中的应用[J]. 浙江建筑,2008,25(12):35-37.
- [6] 秦庆芝,毛彤宇,刘学军. 华北地区岩石锚杆基础设计及试验研究[J]. 电力建设,2007,28(4):22-24.
- [7] DL/T 5219-2005, 架空送电线路基础设计技术规定[S]. 北京:中国发展与改革委员会,2005.
- [8] JGJ94-2008, 建筑桩基技术规范[s]. 北京:中国住房和城乡建设部,2008.
- [9] 张生亮,张孟奇,李晋珍. 特高压输电线路灌注桩基础的发展趋势[J]. 世界科技发展与研究,2012,34(6):961-963.
- [10] 横山幸满(日). 桩结构物的计算方法和计算实例[M]. 北京:中国铁道出版社,1984.
- [11] 丁科,陈月顺. 有限单元法[M]. 北京:北京大学出版社,2006.
- [12] 王元汉,李丽娟,李银平. 有限元法基础与程序设计[M]. 广州:华南理工大学出版社,2001.
- [13] GB 50010-2010, 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国住房和城乡建设部,2011.
- [14] 刘金波. 建筑桩基技术规范理解与应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [15] 山西省电力公司. 输电线路塔型手册[M]. 北京:中国电力出版社,2009.

作者简介

张生亮(1964-),男,博士,副教授,主要研究方向:数值分析与计算方法、CAD 软件工程。