

水平荷载作用下输电线路塔基斜桩 承载特性数值分析

樊文甫¹, 许银雀²

(1. 西安隆基清洁能源有限公司, 陕西 西安 710017; 2. 陕西建工发展集团有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 为研究塔基斜群桩水平承载特性, 建立三维有限元模型模拟了水平荷载作用下斜群桩基础的承载性状, 分析了不同桩身倾角对斜群桩基础桩顶及桩身水平位移、桩身弯矩的影响, 并分析了斜群桩各桩的桩-土接触压力。结果表明: 斜群桩的水平承载力要比直群桩的水平承载力大, 桩身倾角越大, 斜群桩水平承载力越大; 随着桩身倾角增大, 桩身弯矩及剪力减小; 斜群桩基础桩顶下的连梁对于桩身弯矩及剪力值均有影响; 斜群桩中各桩桩-土接触压力不仅受桩身倾角影响, 还与水平荷载作用方向和斜桩倾斜方向的相对关系有关; 前排斜桩浅土层桩前桩-土接触压力最大值随着桩身倾角的增大而增大, 且均大于直桩, 桩后浅土层桩-土接触压力最大值随着桩身倾角的增大而减小。

关键词: 塔基; 斜群桩; 水平承载特性; 桩身倾角; 桩土作用; 数值分析

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)06-0492-06

Numerical analysis of the bearing behavior of the batter pile of the transmission tower subject to horizontal load

FAN Wen-fu¹, XU Yin-que²

(1. Xi'an Longji Clean Energy Co., Ltd., Xi'an 710017, Shaanxi, China;

2. Shaanxi Construction Engineering Development Group Co., Ltd., Xi'an 710077, Shaanxi, China)

Abstract: To investigate the horizontal bearing characteristics of the batter pile group within transmission tower foundation, a three-dimensional finite element model was established to simulate the bearing behavior of the batter pile group under horizontal load. And the influence of different pile inclination angles on the horizontal displacement and bending moment of the batter pile group foundation pile top and pile body was analyzed. Additionally, the pile-soil contact pressure of the batter pile group was analyzed. The findings indicate that batter pile groups possess a higher horizontal bearing capacity compared to groups of straight piles. Furthermore, as the pile inclination angle increases, the horizontal bearing capacity of the batter pile group also increases. Notably, the higher the inclination of the pile body, the lower the bending moment and shear force exerted on the pile. It's worth noting that the coupling beam under the top of the batter pile group foundation affects the bending moment and shear force. Furthermore, the pile-soil contact pressure for each pile in the batter pile group is influenced not only by the inclination angle of pile body but also by the relative orientation between the direction of the horizontal load and the inclination of the batter pile. Specifically, the maximum contact pressure between the front batter pile and the soil in the shallow soil layer before the pile increases as the inclination angle of pile body increases, surpassing that of straight piles. In contrast, the maximum contact pressure between the pile and the soil in the shallow soil layer behind the pile diminishes with increasing pile inclination angles.

Key words: transmission tower foundation; batter pile group; horizontal bearing behavior; inclination angle of pile body; pile-soil interaction; numerical analysis

0 引言

斜桩基础常用于港口、码头、海上风电、海上

钻井平台及输电线路等建(构)筑物的基础中^[1]。输电线路由于距离长、跨度大, 面临的地质条件更加复杂、多变, 单一的基础形式难以满足, 常用的

基础形式有掏挖式基础、人工挖孔桩基础、台阶式基础及钻孔灌注桩基础等。输电线路塔基承受水平荷载往往较大,斜桩基础由于能承受较大水平荷载也得到了越来越广泛的应用。

目前针对斜桩基础的研究主要以模型试验及数值模拟分析为主。王云岗等^[1]通过有限元软件 Plaxis 分析了斜桩基础的侧向和轴向承载特性以及群桩中不同位置桩基础的荷载分担情况。杨征宇等^[2]通过将斜桩基础理想化为梁单元,桩周土体离散化为弹簧单元,基于试验所得的斜桩土抗力分布曲线,采用 $p-y$ 曲线分析了塔基斜桩,并对比分析了斜桩的水平承载力。李颖等^[3]采用有限元软件 ABAQUS 分析了不同地震波下直群桩与斜群桩的承载特性,对斜桩基础抗震中的特性进行了分析。吕凡任等^[4]采用广义弹性理论法研究了任意荷载作用下斜桩的响应。杨剑等^[5]采用三维有限元法分析了受侧向土体位移下的斜桩特性,分析了桩的柔度、侧向土体位移的大小、桩顶约束条件、土体位移形状和土体移动层厚度等对斜桩的影响,基于直桩的 Winkler 地基反力法对斜桩进行简化计算分析。曹卫平等^[6]通过模型试验分析了在上拔力-水平力-扭矩组合荷载作用下斜桩的承载特性。周德泉等^[7]通过模型试验研究了斜桩的水平受拉响应特征。对于软土地区输电线路塔基斜桩基础的承载特性研究目前还非常有限,在此背景下,本文选用软土地区土层参数,对输电线路塔基斜群桩水平承载特性进行了研究,通过有限元分析软件 ABAQUS 建立数值模型,分析了不同倾角下输电线路塔基斜桩基础的桩身弯矩、桩身剪力及桩顶水平位移的承载特性,并与直桩基础进行了对比。

1 有限元模拟分析

1.1 模型建立

输电线路塔基模型选用的桩顶间距为 $6\text{ m} \times 6\text{ m}$,斜桩桩长为 15 m ,相应的直桩桩长为 15 m ,桩身直径为 0.5 m ,在桩顶下 1 m 处采用 4 个连梁连接,连梁截面尺寸为 $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m}$ 。塔基基础如图 1 所示。斜桩及直桩模型桩周土体长 \times 宽为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$,桩端以下土体厚为 15 m ,数值模型如图 2 所示。分别在输电线路塔基每个基础桩顶施加 X 向与 Y 向水平荷载,分 10 个分析步施加,其中每级 X 向施加 25 kN 、Y 向施加 50 kN 。

桩体、连梁采用弹性模型^[8],其中密度均取 $2\,500\text{ kg/m}^3$,泊松比均为 0.17 ,弹性模量均为

20 GPa 。土体采用 Drucker-Prager 弹塑性模型,土层剖面如图 3 所示^[9],其中有限元模型中②淤泥质黏土采用的弹性模量为 7.4 MPa ,③粉土弹性模量取 37.65 MPa ,泊松比均取 0.3 。

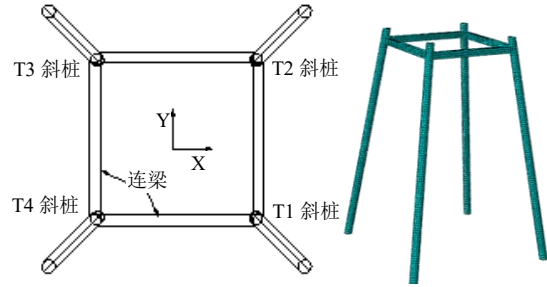


图 1 塔基基础示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tower foundation

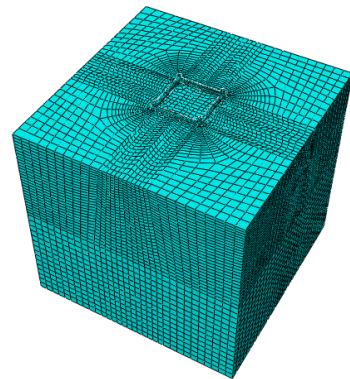


图 2 数值模型示意图

Fig. 2 Finite element model

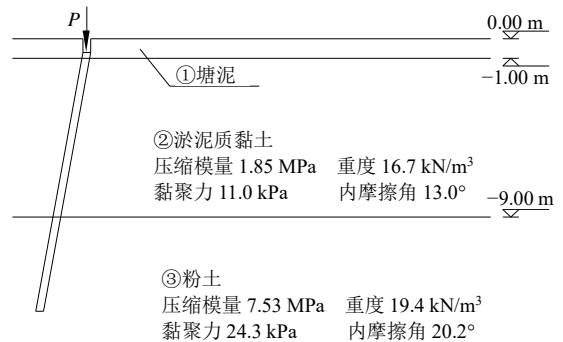


图 3 土层剖面图

Fig. 3 Profile of soil

桩土界面接触采用接触对模拟,采用库伦摩擦模型,界面综合摩擦系数取 0.35 。桩、土体及连梁采用三维实体缩减单元 C3D8R。限制模型中土体侧向边界在两个水平方向上的位移及土体底边界在竖向和两个水平方向上的位移^[8]。

1.2 有限元模型验证

吕凡任^[10]开展了砂土地基中水平受荷斜桩模型试验。模型试验中桩为铝管桩,模型试验参数如表 1 所示,有限元模型参数如表 2 及表 3 所示。为了保证有限元计算收敛,将砂土的黏聚力取一很小值 0.1 kPa ^[11]。

表1 模型试验参数

Table 1 Model test parameters

桩长/m	桩外径/mm	桩身倾角/(°)
0.9	32	15

表2 有限元模型桩体参数

Table 2 Numerical model pile parameters

弹性模量/GPa	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比
71.1	2 700	0.17

表3 有限元模型土体参数

Table 3 Numerical model soil parameters

重度/(kN·m ⁻³)	内摩擦角/(°)	泊松比	弹性模量/MPa
18	20	0.3	10

图4为模型试验及有限元模拟计算水平荷载作用下的桩顶水平位移的对比。可以看出，在桩顶水平荷载加载到0.4 kN时，桩顶水平位移的计算值与实测值相差不大；当桩顶水平荷载大于0.4 kN时，随着水平荷载的增加，桩顶水平位移的有限元计算值比模型试验略大，但总体上看，有限元计算结果与模型试验结果的荷载-位移曲线发展趋势一致，说明通过有限元模型计算分析斜桩承载变形特性是可行的。

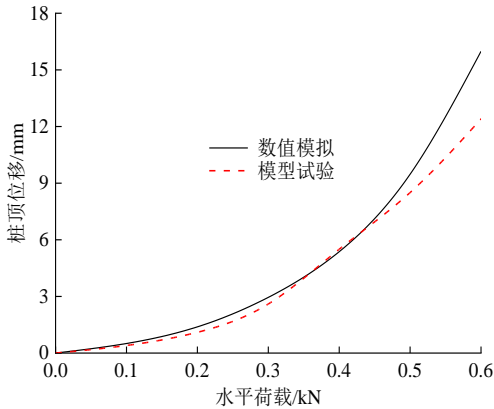


图4 模型试验与数值模拟结果的对比

Fig. 4 Comparison of model test and numerical simulation results

1.3 计算结果

(1) 不同倾角桩身水平位移分析

在本次模型中斜(直)群桩桩顶下1 m处采用连梁连接，各斜桩相互协调变形，桩顶位移相差不多。以T1斜桩为例，图5给出了桩身倾角对斜桩桩顶水平位移的影响，需说明的是，下文中水平位移为X、Y向的水平合位移，水平荷载为X、Y向水平合力。可以看出，在整个水平加载过程中，各桩顶荷载-位移曲线均属于缓变型。在初期加载阶段，斜桩与直桩相差不多，当桩顶水平荷载达到一定值后，各桩顶荷载-位移曲线逐渐分离。如桩顶水平荷载为50 kN时，直桩桩顶水平位移为6.98 mm，

10°及20°斜桩桩顶水平位移分别为6.97 mm、6.41 mm。当水平荷载增大到50 kN以后，同一桩顶水平荷载作用下，斜群桩桩顶水平位移均小于直群桩，且水平荷载越大，斜群桩与直群桩的桩顶水平位移差异越大，桩身倾角越大，斜群桩桩顶水平位移越小。如当桩顶水平荷载为400 kN时，10°斜桩桩顶水平位移为111.46 mm，20°斜桩桩顶水平位移为97.03 mm，相比直桩桩顶水平位移138.47 mm，分别减小了19.5%、29.9%。

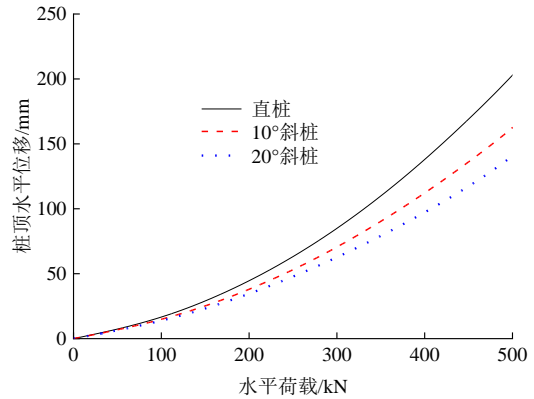


图5 桩身倾角对T1斜桩桩顶水平位移的影响

Fig. 5 Influence of inclination angle on horizontal displacement of T1 batter pile top

从以上分析可以得到，斜群桩的水平承载力要比直群桩的水平承载力大，且桩身倾角越大，斜群桩水平承载力越大。

图6给出了在223 kN桩顶水平荷载作用下，T1斜(直)桩桩身水平位移沿深度的变化。可以看出，直桩桩顶水平位移最大，随着桩体深度的增加，桩身水平位移逐渐减小。同一深度处，斜桩桩身水平位移均小于直桩，桩身倾角越大，斜桩桩身水平位移越小。如在深度3.5 m处，20°斜桩桩身水平位移为11.38 mm，相比于10°斜桩桩身水平位移12.77 mm，减小了约10.9%，相较于直桩桩身水平位移16.31 mm，减小了约30.2%。

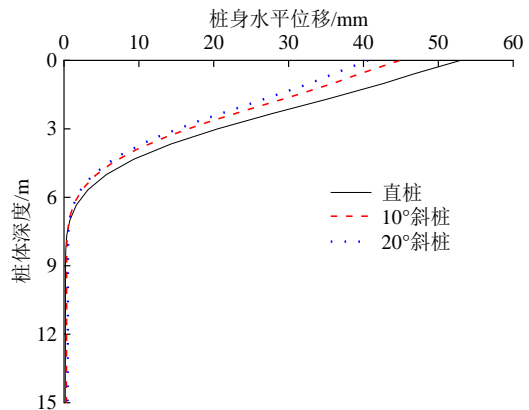


图6 桩身水平位移随深度的变化

Fig. 6 Variation of pile horizontal displacement with depth

(2) 不同倾角桩身弯矩和剪力分析

水平荷载为 559 kN 时, 斜群桩中 T1 斜桩的桩身弯矩沿桩体深度的变化如图 7 所示, 与同一工况相应直桩基础相比, 同一深度斜桩桩身弯矩均不大于直桩桩身弯矩。桩顶下 1 m 处, 桩身弯矩最大, 直桩桩身最大弯矩为 769.77 kN·m, 相比 10°斜桩桩身最大弯矩 683.24 kN·m, 增大了约 12.7%, 相比 20°斜桩桩身最大弯矩 675.60 kN·m, 增大了约 13.9%, 可以看出斜桩倾角越大, 桩身最大弯矩值越小。在桩顶 2.6 m 以下位置, 斜桩基础与直桩基础的桩身弯矩均呈现先增大后减小的规律, 桩身弯矩最大值埋深位置相差不大 (约为 5.5 m 深度处), 20°斜桩桩身最大弯矩为 423.88 kN·m, 10°斜桩桩身最大弯矩为 471.98 kN·m, 相比 20°斜桩桩身最大弯矩减小了约 10.2%, 在深度 11 m 以下桩身弯矩接近于 0。在桩顶到桩顶下 2.6 m 范围内, 桩身弯矩呈现先增大后减小的趋势, 分析其原因主要是由于桩顶下 1 m 处, 斜群桩基础受连梁作用引起的, 连梁的位置也影响桩身最大弯矩的发生位置。整体来看, 输电线路中采用斜桩基础的桩身弯矩均小于直桩基础的桩身弯矩值。

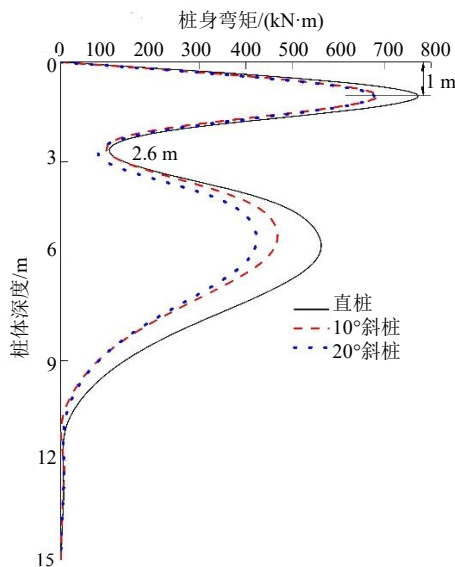


图 7 桩身弯矩沿桩体深度的变化

Fig. 7 Variation of pile bending moment along pile depth

桩顶水平荷载为 559 kN 时, 斜群桩中 T1 斜桩及直群桩中 T1 直桩的桩身剪力沿桩体深度的变化如图 8 所示。桩顶剪力值最大, 桩身剪力段主要集中在桩身 11 m (约 22 倍桩身直径) 深度以上。在桩身剪力区段同一深度处, 直桩桩身剪力均大于斜桩桩身剪力, 如在深度 3.6 m 处, 20°斜桩、10°斜桩及直桩桩身剪力分别为 163.42 kN、184.49 kN 及 213.65 kN, 与直桩桩身剪力相比分别减小了 23.5%、

13.6%。随着桩身倾角增大, 桩身剪力值也减小, 如在深度 7 m 处, 10°斜桩剪力为 133.42 kN, 20°斜桩剪力为 114.87 kN, 与 10°斜桩相比减小了 13.9%。

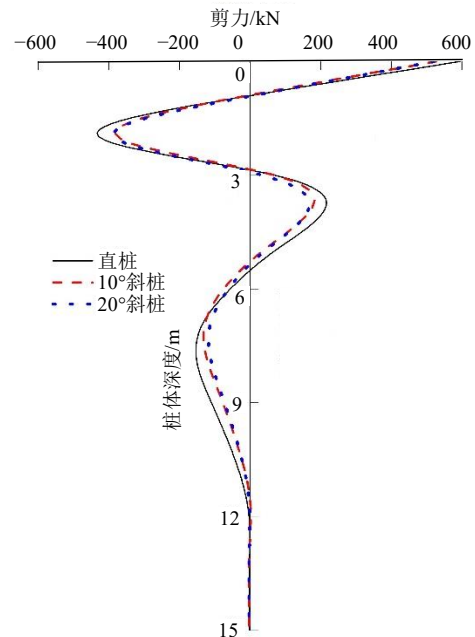


图 8 桩身剪力沿桩体深度的变化

Fig. 8 Variation of pile shear force along pile depth

(3) 桩身倾角对桩-土接触压力的影响

图 9 为 559 kN 桩顶水平荷载作用下, 斜群桩中 T1、T2、T3 及 T4 斜桩桩前、桩后桩-土接触压力沿深度的分布, 并与直群桩中相应直桩进行了对比。可以看出, 桩前与桩后桩-土接触压力在深度 11 m (22 倍桩身直径) 以下基本相同, 而各桩桩前与桩后的桩-土接触压力在深度 11 m 以上存在很大差异, 这里以 10°斜群桩中 T1 斜桩为例来说明。从桩顶向下一定深度内, 桩后桩-土接触压力为 0。在该脱离深度以下至 11 m 深度区间, 桩后桩-土接触压力从 0 迅速增大到最大值后有出现回落的趋势。不同于桩后, 桩前在桩顶处具有一定的压力, 随着深度的增加桩前桩-土接触压力逐渐增大到最大值, 然后逐渐减小, 在深度 7.6 m 处达到最小值。在深度 7.6 m 以下, 桩前桩-土接触压力随深度逐渐增大。

在桩后上部形成的零压力区段, 主要是由于在水平荷载作用下, 斜桩桩身上部发生一定的弯曲变形, 致使桩前土受到挤压作用, 而桩后发生了桩土脱离即零压力区段。在此之后桩身一定区段发生反弯变形, 致使该区段桩挤压桩后土体, 桩后桩-土接触压力迅速增大, 桩前处桩-土挤压作用减弱, 桩前接触压力逐渐减小。在深度 12 m 以下部分, 桩身几乎未发生变形, 桩前及桩后处于静态平衡状态, 因此桩前和桩后桩-土接触压力相同。

通过图9(a)~9(d)可以看出,在深度12 m以上区段,不同桩身倾角斜桩桩前及桩后桩-土接触压力的大小不同。对于T1斜桩而言,随着桩身倾角增大,桩前及桩后桩-土接触压力最大值增大,如图9(a),20°斜桩桩前桩-土接触压力的最大值为338.48 kPa,10°斜桩桩前桩-土接触压力的最大值为321.85 kPa,相比直桩桩前桩-土接触压力297.52 kPa,分别增大了40.96 kPa、24.33 kPa。而

对于T2与T3斜桩,随着桩身倾角增大,桩前及桩后桩-土接触压力最大值减小,如图9(b),20°斜桩桩前桩-土接触压力的最大值为259.24 kPa,10°斜桩桩前桩-土接触压力的最大值为299.80 kPa,相比直桩桩前桩-土接触压力340.15 kPa,分别减小了80.91 kPa、40.35 kPa。对于T4斜桩,如图9(d)所示,10°斜桩桩前桩-土接触压力的最大值最大,20°斜桩桩前桩-土接触压力的最大值最小。

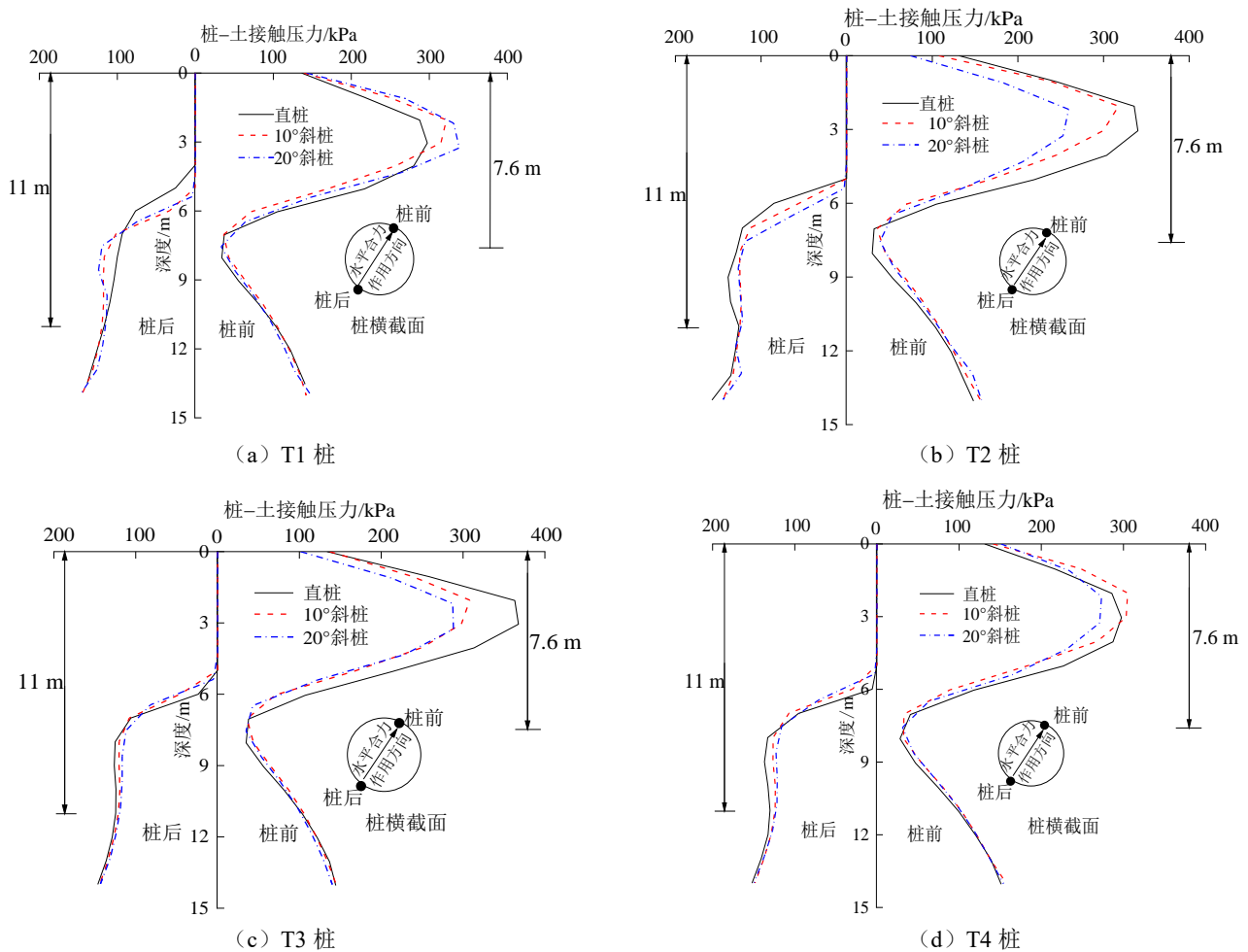


图9 桩身倾角对桩-土接触压力的影响

Fig. 9 Influence of inclination angle on pile-soil contact pressure

从以上分析可以得到,斜桩桩-土接触压力不仅受桩身倾角影响,还与水平荷载作用方向和斜桩倾斜方向的相对关系有关。

2 结论

本文通过分别建立输电线塔基斜群桩三维有限元模型,分析了桩身倾角对斜群桩水平承载性状的影响,并与直群桩基础进行了比较分析,得到以下结论:

(1) 斜群桩的水平承载力要比直群桩的水平

承载力大,且桩身倾角越大,斜群桩水平承载力越大。直群桩中桩身弯矩和剪力比斜群桩大,随着桩身倾角的增大,斜群桩桩身弯矩和剪力减小,深度在22倍桩身直径以下的桩身弯矩和剪力接近于0。连梁的设置改变了群桩基础桩身弯矩和剪力的分布形式,建议在实际工程应用中结合具体情况设置连梁并控制连梁的刚度。桩身倾角增大虽能提高水平承载力,但过大的桩身倾角不利于现场施工质量控制,建议桩身倾角在工程设计中控制在20°范围以内。

(2) 水平荷载作用下,斜群桩中各桩桩-土接

触压力不仅受桩身倾角影响, 还与水平荷载作用方向和斜桩倾斜方向的相对关系有关。

参考文献

- [1] 王云岗, 章光, 胡琦. 斜桩基础受力特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2184-2190.
WANG Yun-gang, ZHANG Guang, HU Qi. Study of force characteristics of battered pile foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 2184-2190.
- [2] 杨征宇, 杨剑, 王天慧, 等. 输电塔基础斜桩非线性 p - y 曲线[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2010, 38(1): 104-108.
YANG Zheng-yu, YANG Jian, WANG Tian-hui, et al. Nonlinear p - y curve for battered piles in foundation of transmission towers[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2010, 38(1): 104-108.
- [3] 李颖, 贡金鑫. 有斜桩和无斜桩高桩码头地震反应的非线性有限元分析[J]. 水利水电工程学报, 2011(2): 1-13.
LI Ying, GONG Jin-xin. Nonlinear finite element analysis for seismic performance of wharf structures with and without battered piles attached[J]. Hydro-Science and Engineering, 2011(2): 1-13.
- [4] 吕凡任, 陈云敏, 陈仁朋, 等. 任意倾角斜桩承受任意平面荷载的弹性分析[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2004, 38(2): 191-194, 248.
LU Fan-ren, CHEN Yun-min, CHEN Ren-peng, et al. Analysis of battered pile under arbitrary inclined loads in semi-infinite solid[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2004, 38(2): 191-194, 248.
- [5] 杨剑, 高玉峰, 程永锋, 等. 受侧向土体位移斜桩的特性[J]. 防灾减灾工程学报, 2008, 28(4): 506-512.
YANG Jian, GAO Yu-feng, CHENG Yong-feng, et al. Behavior of battered pile due to lateral soil movement[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008, 28(4): 506-512.
- [6] 曹卫平, 石玉斌, 高帅鹏. 上拔力-水平力-扭矩组合荷载作用下斜桩承载特性模型试验[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(6): 145-150.
CAO Wei-ping, SHI Yu-bin, GAO Shuai-peng. Model test on bearing behavior of battered piles under the combined action of uplift, horizontal and torque loads[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022, 33(6): 145-150.
- [7] 周德泉, 蔡强, 王创业, 等. 负斜桩顶部水平受拉响应及 p - y 曲线特征试验研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2023, 50(1): 198-207.
ZHOU De-quan, CAI Qiang, WANG Chuang-ye, et al. Experimental study on tensile response and p - y curve characteristics of negative battered pile under top horizontal tension[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2023, 50(1): 198-207.
- [8] 樊文甫, 曹卫平. 带承台倾斜单桩水平承载变形性状数值分析[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(10): 121-125.
FAN Wen-fu, CAO Wei-ping. Numerical analysis of lateral bearing deformation behavior of single battered pile with cap[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(10): 121-125.
- [9] 吕凡任, 陈仁朋, 陈云敏, 等. 软土地基上微型桩抗压和抗拔特性试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(3): 99-105.
LÜ Fan-ren, CHEN Ren-peng, CHEN Yun-min, et al. Field tests on compression and uplift behavior of micropiles in soft ground[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(3): 99-105.
- [10] 吕凡任. 倾斜荷载作用下斜桩基础工作性状研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
LÜ Fan-ren. Study on behavior of battered piles under inclined load[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [11] 曹卫平, 樊文甫. 水平荷载作用下斜桩承载变形性状数值分析[J]. 中国公路学报, 2017, 30(9): 34-43.
CAO Wei-ping, FAN Wen-fu. Numerical analysis on bearing and deformation behavior of horizontally loaded battered piles[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(9): 34-43.