

DOI: 10.11779/CJGE2022S1039

# 复杂荷载工况下输电线路挖孔桩承载性能现场试验研究

崔 强, 杨文智

(中国电力科学研究院有限公司, 北京 102401)

**摘要:**为了研究输电线路基础在复杂受力条件下的承载性能的差异,以输电线路工程中常用的人工挖孔桩为对象,选取典型输电线路工程的黄土地基为试验场地,开展了四种荷载工况下输电线路挖孔桩承载性能的现场试验。通过测试桩顶位移、桩端土体压力,分析了不同荷载工况下人工挖孔桩的荷载位移曲线、极限承载力以及桩端土压力。结果表明:由于承载机理及破坏模式的差异,不同性质竖向荷载作用下的挖孔桩,其荷载-竖向位移曲线形态特征呈现明显差异,具体表现为上拔荷载工况时呈“陡降型”,下压荷载工况时呈“缓变型”;对于组合荷载工况下的挖孔桩,下压力提高了其抗水平承载能力,反之,上拔力削弱了其抗水平承载能力;桩端土压力与下压荷载之间关系可回归为二次函数,由于不同类别桩基在水平荷载作用下变形特性的差异,刚性桩桩端土压力偏心作用明显,弹性桩偏心作用不明显。

**关键词:** 输电线路; 挖孔桩; 倾斜荷载; 荷载位移曲线; 极限承载力; 桩端; 土压力

**中图分类号:** TU43      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2022)S1-0219-07

**作者简介:** 崔 强(1980—),男,工学博士,正高级工程师,主要从事输电线路地基基础工程的科研及试验检测工作。  
E-mail: everjsl@126.com.

## Field tests on bearing capacity of digging-hole pile for transmission lines under complex loads

CUI Qiang, YANG Wen-zhi

(China Electric Power Research Institute, Beijing 102401, China)

**Abstract:** In order to study the bearing performance and difference of the foundation for transmission lines under complex load-bearing situations, by taking the digging-hole piles commonly used in transmission-line projects as the object and selecting the typical loess area as the test site, the field tests on the bearing performance of digging-hole piles for transmission lines under four loading cases are carried out. By testing the displacements of pile top and the soil pressures at pile end, the load-displacement curves, the ultimate bearing capacities and the soil pressures at pile end of digging-hole piles under different loading conditions are analyzed. The results show that due to the differences of bearing mechanism and failure mode, the morphological characteristics of load-vertical displacement curve of digging-hole piles under different vertical loads are obviously different, which is shown as "steep drop" under uplift loads and "slow change" under compression loads. For the digging-hole piles under combined loads, the compression force improves the horizontal bearing capacity, on the contrary, the uplift force weakens the horizontal bearing capacity. The relationship between the soil pressure at pile end and the compression load can be expressed by the quadratic function. Due to the different deformation characteristics of different types of piles under horizontal loads, the eccentric effects of the soil pressure at the end of the rigid piles are obvious, and those of the elastic piles are not obvious.

**Key words:** transmission line; digging-hole pile; inclined load; load-displacement curve; ultimate bearing capacity; pile end; soil pressure

## 0 引言

杆塔基础是架空输电线路的重要组成部分,用于支撑来自于上部杆塔及导线金具的全部荷载。杆塔运行中,会承受来自导线、金具、以及风等作用。通常情况下,杆塔基础承受垂直荷载与水平荷载,其中顺

着线路方向为纵向水平荷载、垂直接线方向为横向水平荷载,因此,实际的杆塔基础主要以承受竖向与横

基金项目: 基于国际标准的架空输电线路杆塔基础设计方法及软件系统(中英文版)研发项目(GC83-20-006)

收稿日期: 2022-09-25

向荷载组合而成的倾斜荷载作用。

关于倾斜荷载作用下桩基承载性能的研究，国内外学者开展了大量的研究工作。以 Meyerhof 为代表的学者<sup>[1-11]</sup>通过大量的模型试验，分析了均质及双层地基条件下，倾斜荷载作用下的刚性桩、柔性桩的承载机理，推导出倾斜荷载作用下桩基极限承载力计算的经验方法；日本学者横山幸满<sup>[12]</sup>基于理论推导，提出地基系数不变时，倾斜荷载作用下桩基承载力的计算，仅仅通过竖、横向承载力的简单叠加是不确切的；范文田<sup>[13]</sup>基于横山幸满的研究成果，通过理论推导，分析了轴向压力对桩身横向变位及内力的影响；赵明华等<sup>[14-16]</sup>、侯云秋等<sup>[17]</sup>、彭文祥等<sup>[18]</sup>、吴鸣等<sup>[19]</sup>通过室内模型试验，研究了不同倾斜角度荷载作用下桩基承载机理，并提出桩基承载力与倾角之间的椭圆曲线关系；文松霖<sup>[20]</sup>通过均质砂土中扩底桩模型的离心机试验，分析了竖向荷载对桩基水平承载性能的影响；吕凡任等<sup>[21]</sup>通过求解倾斜荷载作用下单桩的位移积分方程，分析了倾斜角度对桩基承载性能的影响，提出倾斜角度对桩基竖向及水平向位移的影响差异；郑刚等<sup>[22]</sup>借助有限元法，分析了成层地基土中，倾斜荷载作用下桩基土抗力的分布特点及影响因素；王孝兵等<sup>[23]</sup>采用 FLAC 有限差分软件，分析了倾斜荷载作用下大直径长桩的受力性状，并提出倾斜角度对桩基位移、桩侧土抗力分布的影响规律；周立朵等<sup>[24]</sup>基于  $p-y$  曲线法，并考虑桩-土相对滑移和竖向力引起的二阶弯矩效应，分析了倾斜荷载作用下群桩的受力变形特征。

以上研究工作大多针对倾斜下压荷载作用下的桩基承载特性开展的相关研究工作，而正如上文分析，实际的输电线路基础不仅承倾斜下压荷载作用，同时还承受倾斜上拔荷载作用，而针对同时包括以上两种荷载工况下的桩基承载性能及差异方面的研究，目前鲜见相关文献报道。

本文选取临近 750kV 兰平乾输电线路工程的黄土地基作为试验现场，分别开展了 2 种单一荷载工况、2 种组合荷载工况的 6 组挖孔桩足尺现场试验，通过分析荷载位移曲线规律、极限承载力及桩端土压力分布，研究了复杂荷载工况下挖孔桩的承载特性及差异，为架空输电线路基础承载机理的揭示以及优化设计提供了重要的理论依据。

## 1 试验条件及方案设计

### 1.1 试验场地

本次试验场地位于甘肃省定西市巉口镇西北 20 km 外的车道岭山，地处陇西黄土高原丘陵区，距离 750 kV 兰—平—乾线路#192 塔位 20 m 处，如图 1 所

示。该处常年缺水，地基土体主要以第四系上更新 Q<sub>3</sub> 黄土为主。



图 1 试验场地概貌

Fig. 1 Overview of test site

在现场开展原位试验，获得该试验场地的主要物理力学参数值为：相对质量密度为 2.72，密度为 1.65 kg/m<sup>3</sup>，含水率为 9.7%，孔隙比  $e$  为 1.23，液限为 31.2%，塑限为 20.5%，黏聚力为 11.24 kPa，内摩擦角为 24.76°。根据规范<sup>[25]</sup>判断，现场地基土为低液限粉质黏土。

### 1.2 试验基础

本次试验对象为黄土地基输电线路工程中常用的大直径等截面挖孔桩基础，如图 2 所示。为了避免基础在受拉（弯）作用下桩身本体破坏，每个试验桩的全截面配筋率均按照 1.5% 设计。为了分析不同入土深度下，挖孔桩的受力特点，同时结合输电线路基础的受力特点，本次试验共设计 6 个基础样本，分为 4 种荷载工况，详见表 1 所示。

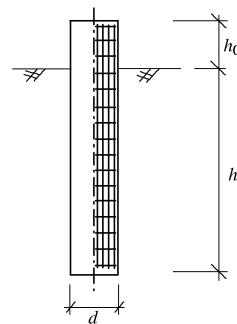


图 2 试验基础示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test foundation

表 1 试验基础明细表

Table 1 Information list of test foundation

编号	$d/\text{mm}$	$h/\text{mm}$	$h_0/\text{mm}$	荷载工况
#1	1000	5000	500	上拔
#2	1000	7500	500	上拔+水平
#3	1000	10000	500	上拔+水平
#4	1000	5000	500	下压+水平
#5	1000	7500	500	下压+水平
#6	1000	7500	500	水平

试验基础采用人工开挖，现场浇筑的方式制作，整个施工流程可概括如下：首先根据基础布置图，定点放线，确定每个试验基础与反力基础的准确位置（图 3（a））；其次根据图 2 和表 1 所示的基础尺寸进行基

坑开挖(图3(b)), 同时制作钢筋笼和地脚螺栓骨架(图3(c)); 待基坑挖至设计深度后, 采用机械将钢筋笼吊装于基坑内(图3(d)), 其中上拔基础还包括地脚螺栓; 最后进行混凝土浇筑, 完成试验基础制作(图3(e))。浇筑完成后养护28 d后即可开展试验。

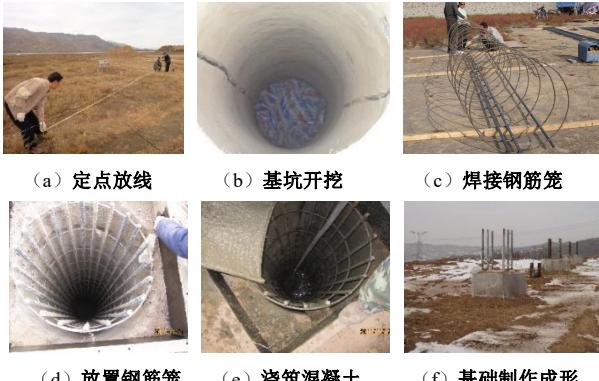


图3 试验基础现场制作

Fig. 3 Field fabrication of test foundation

### 1.3 试验加载方案

6个试验基础均采用锚桩法<sup>[26]</sup>进行现场加载, 采用RS-JYC型桩基静载荷测试分析系统实现加载、测试和数据记录, 如图4所示。竖向荷载由千斤顶、上拔螺杆、反力钢梁与钢筋混凝土反力墩组成的传力系统提供; 水平荷载由千斤顶、水平箱梁、反力基础组成传力系统提供, 其中千斤顶一端施加于试验基础顶部, 另一端支撑于具有足够刚度与承载能力的反力基础上。试验过程中采用布设于基础顶部的位移传感器测定基础的竖向与水平向位移。

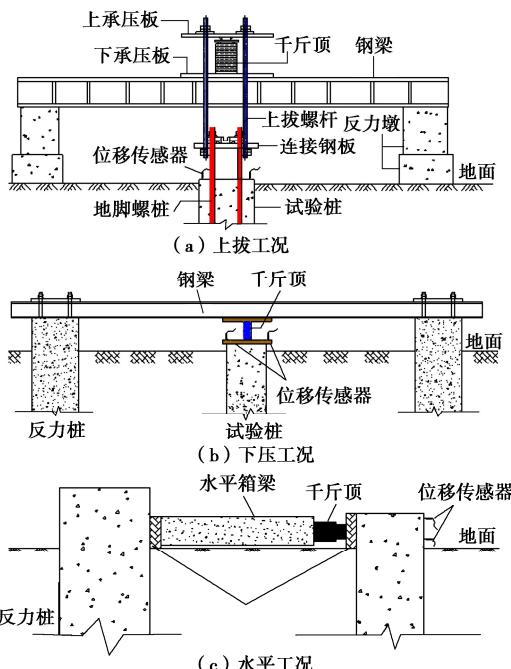


图4 试验加载测试装置

Fig. 4 Loading and testing devices for tests

试验采用慢速荷载维持法, 其中竖向荷载与水平

向荷载按照7:1比例同步加载(与竖直方向倾斜8°), 每个试验基础均加载至破坏状态, 具体加载方案、加载终止条件详见相关规范<sup>[26-27]</sup>。

## 2 试验结果分析

### 2.1 变形破坏特征

通过记录每级荷载作用下试验桩不同位置处位移传感器的数据, 获得6个挖孔桩的荷载-位移曲线, 如图5所示, 其中图5(a)为各试验桩的竖向荷载与位移关系曲线, 图5(b)为相应的水平荷载与位移关系曲线。

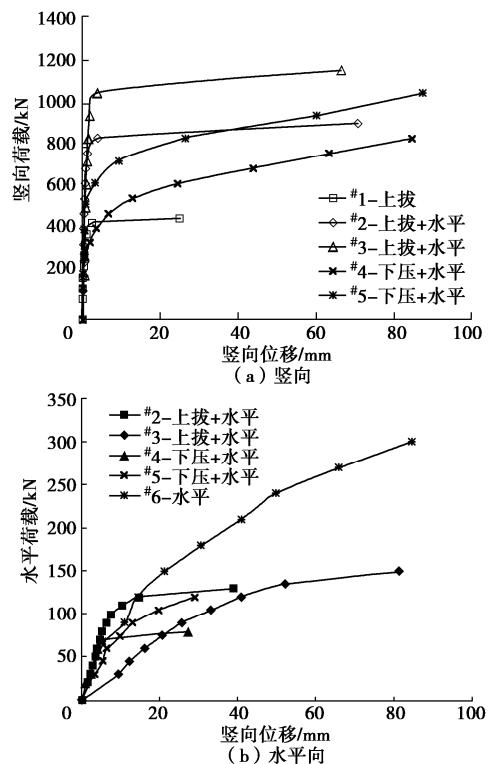


图5 试验桩的荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves of test piles

从图5(a)中可以看出, #1~#3试验桩荷载位移曲线屈服点明显, 其曲线特征较好地符合“陡降型”; #4、#5试验桩荷载位移曲线与之相反, 屈服点不明显, 其特征较好地符合“缓变型”。

究其原因, 主要由于试验桩在不同荷载工况下的承载机理及破坏模式差异所致。上拔荷载作用下, 试验桩主要依靠其自重与桩土界面间的摩阻力抵抗上拔力。图6所示为#2试验桩破坏时, 地表土体破坏时的照片, 透过土体裂缝间隙可清晰地看到桩土界面处脱开的混凝土表面; 下压荷载作用下, 桩基承载力包括摩阻力与端阻力两部分, 沉降量由桩体压缩、桩端土体沉降两部分组成, 根据土体性质, 桩基可能会发生整体剪切、局部剪切、刺入剪切3种破坏模式<sup>[28]</sup>中的

一种，而无论发生哪种破坏，桩基达到极限状态时的位移量以及桩土体系呈现出的塑性变形特性较上拔荷载作用时更大、更明显。



图 6 #2 桩破坏时的地表裂缝

Fig. 6 Surface cracks in foundation at damage of pile No. 2

试验过程中，4个组合荷载工况下的试验桩（#2～#4）加载终止条件均由竖向荷载决定。由图5(b)可知，除#4外，其余5个试验桩的水平向荷载位移曲线整体均呈“缓变型”曲线特征。

Meyerhof<sup>[2, 5]</sup>提出倾斜荷载作用下的桩基，可采用桩-土相对刚度  $K_r$  表征桩基础抗水平承载能力：

$$K_r = \frac{E_p I_p}{E_s L_t^4} , \quad (1)$$

式中， $E_p I_p$  为桩体的抗弯刚度， $E_s$  桩侧土水平变形模量， $L_t$  为桩入土深度。

采用公式(1)推算出3个入土深度相同的试验桩的  $K_r$  值，如表2所示。从表2中可以看出，入土深度相同时， $K_r$  从大到小的荷载工况依次为：下压+水平（#5）、水平（#6）、上拔+水平（#2）。由此可见，组合荷载工况下的挖孔桩，下压力可有效提高其抗水平承载能力，反之，上拔力会削弱其抗水平承载能力。

表 2 试验桩的  $K_r$  值

Fig. 2 Values of  $K_r$  of test piles

编号	$d/\text{mm}$	$h/\text{mm}$	荷载工况	$K_r$
#2	1000	7500	上拔+水平	0.1111
#5	1000	7500	下压+水平	0.1815
#6	1000	7500	水平	0.1248

## 2.2 极限承载力

根据规范<sup>[26-27]</sup>中推荐的方法确定#1、#6 试验桩上拔、水平荷载工况下的极限承载力。针对倾斜荷载工况下桩基极限承载力的确定，目前主要有两种方法：倾斜荷载-位移曲线法<sup>[13]</sup>、倾斜荷载-合成位移曲线法<sup>[14]</sup>，本文采用倾斜荷载-位移曲线法，即在同一坐标系中做出倾斜荷载与竖向、水平位移曲线，分别确定出对应的极限荷载，然后取其较小值作为桩基极限承载力，如图7所示。

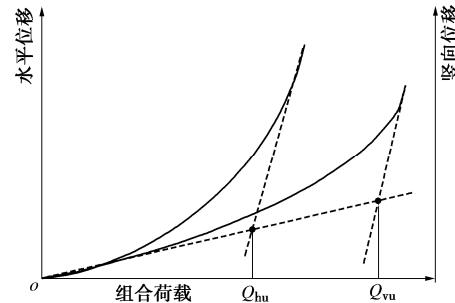


图 7 倾斜荷载作用下桩基极限承载力取值示意图

Fig. 7 Schematic diagram of ultimate bearing capacity of pile under inclined loads

由表3可知，#2～#5 四个试验桩的极限承载力均由荷载-竖向位移曲线确定，由此表明：承受组合荷载作用下的输电线路基础，竖向承载力往往是设计中的控制因素。在此需要说明的是，此规律仅限于基础露头  $h_0$  较小、且高配筋率条件下。当  $h_0$  较大且配筋率较小时，水平荷载在自由段范围内产生较大的初始弯矩，基础承受明显的“弯剪效应”，此时，基础往往受到水平承载力控制，设计中除校核桩顶水平位移之外，还需校核基础的构件承载力。

表 3 试验桩的极限承载力

Table 3 Ultimate bearing capacities of test piles

序号	$Q_{vu}/\text{kN}$	$s_{vu}/\text{mm}$	$Q_{hu}/\text{kN}$	$s_{hu}/\text{mm}$	$Q_u/\text{kN}$
1	450	2.52	—	—	450
2	848	3.91	919	3.87	848
3	1060	3.76	1072	10.00	1060
4	730	50.00	848	7.51	730
5	923	50.00	1060	8.92	923
6	—	—	315	10.00	315

注：①陡降型曲线，取陡降起始点；缓变型曲线，取允许位移对应的荷载值，其中允许位移取值分别为：上拔 25 mm，下压 50 mm (0.05d)、水平 10 mm。② $Q_{vu}$  和  $s_{vu}$ 、 $Q_{hu}$  和  $s_{hu}$ 、 $Q_u$  分别为竖向极限荷载值及相应位移、水平极限荷载值及相应位移、极限承载力值。

同时，对于相同尺寸与入土深度的试验桩，下压+水平组合荷载下的#5 桩较上拔+水平组合荷载下的#2 桩承载力高出 9%，如上节分析可知，主要由于不同荷载工况下，桩基承载力的组成存在差异所致。

## 2.3 桩端土压力

为了测试桩端阻力，在#4、#5 桩的桩底不同位置处布置 3 个土压力盒。通过记录每级荷载作用下土压力盒的测试数据，绘制出桩端土压力与下压荷载之间的关系曲线，如图8所示。

从图8中可以看出，桩端土压力随下压荷载的增加呈非线性增加趋势，其两者之间的关系曲线为

$$f = A \cdot p^2 + B \cdot p , \quad (2)$$

式中  $f$  为桩端土压力 (kPa)； $p$  为下压荷载强度 (kPa)； $A$ 、 $B$  分别为拟合参数， $A$  单位为 1/kPa， $B$  量纲为 1，见表4。

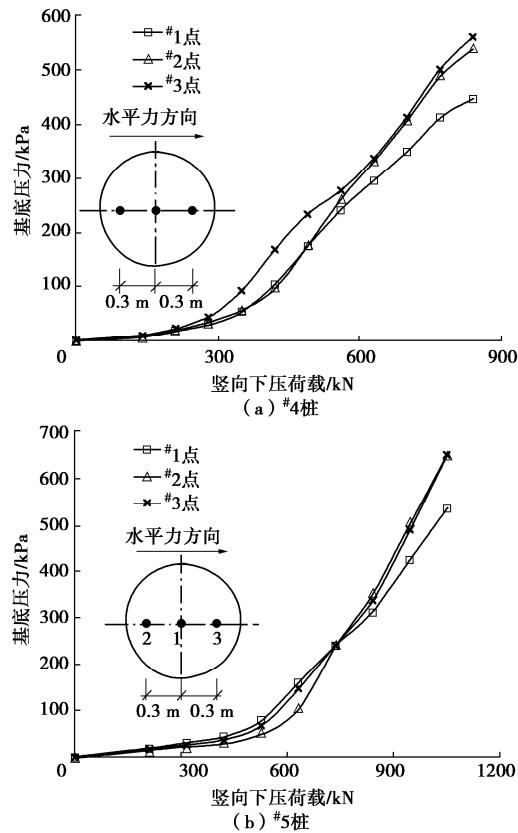


图 8 下压荷载与桩端土压力关系曲线

Fig. 8 Relationship between compression load and soil pressure at pile end

表 4 参数  $A$ 、 $B$  的取值Table 4 Values of parameters  $A$  and  $B$ 

基础编号	测点号	$A/kPa^{-1}$	$B$	拟合方差	$q_{pk}/kPa$
#4	1	0.0004	-0.011	0.98	336
	2	0.0006	-0.079	0.99	445
	3	0.0005	0.028	0.99	458
#5	1	0.0004	-0.104	1.00	431
	2	0.0006	-0.258	0.99	526
	3	0.0005	-0.211	0.99	443

将#4、#5 桩的极限荷载代入式(2), 即可求出各个测点的桩端土压力值  $q_{pk}$ , 如表 4 所示。

为了分析水平荷载对桩端土压力的影响, 分别绘制出 30%、60%、90% 极限荷载时, 不同位置测点处土压力的分布曲线, 如图 9 所示。

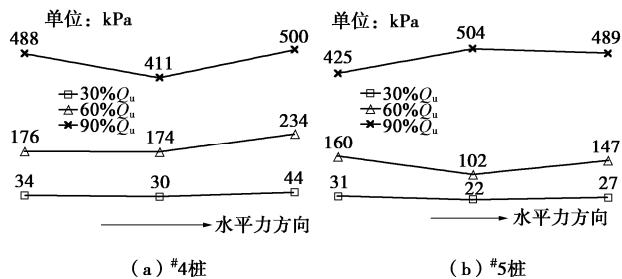


图 9 桩端土压力分布曲线

Fig. 9 Distribution curves of soil pressure at pile end

从图 9 可知, #4 桩中#3 测点土压力最大, 较#1、#2 测点分别大 22%、2% (90% 极限荷载时), 水平力引起的偏心作用明显; #5 桩中#1~#3 测点土压力的分布规律不明显, 水平力引起的偏心作用不明显。这主要由于#4、#5 桩的刚度差异而导致的运动方式不同所致。经计算#4、#5 桩的变形系数  $ah$  分别为 2.05、3.08, 根据文献[35], 判定出#4 为刚性桩、#5 为弹性桩。其中#4 桩在水平力作用下会绕桩体上某一点发生转动, 导致桩端平面产生转动趋势, 产生偏心效应, 如图 10 (a) 所示; 而#5 桩会产生如图 10 (b) 所示的运动方式, 此时, 桩端界面不会产生转动趋势, 因此桩端土压力的分布等同于轴心受压时的受力特征, 偏心效应不明显。

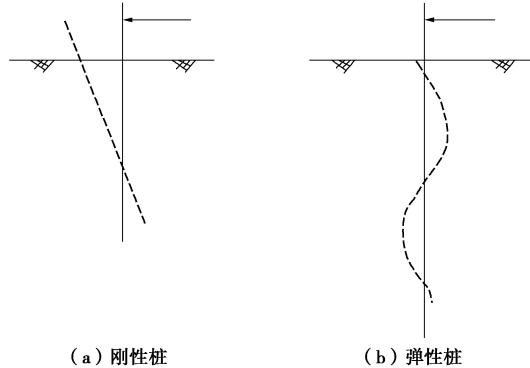
图 10 水平荷载作用下桩的变形模式<sup>[35]</sup>

Fig. 10 Deformation modes of piles under horizontal loads<sup>[35]</sup>

### 3 结 论

本文开展了 4 种荷载工况, 6 个挖孔桩真型基础承载性能的现场试验, 分析了输电线路挖孔桩基础在复杂荷载工况下的荷载值位移曲线、极限承载力及桩端土压力分布, 得到以下 3 点结论。

(1) 不同性质竖向荷载作用下的挖孔桩, 其荷载-竖向位移曲线形态特征呈现明显差异, 具体表现为: 上拔荷载作用下曲线型式呈“陡降型”, 屈服点明显; 下压荷载作用下曲线型式呈“缓变型”, 屈服点不明显, 这主要由于挖孔桩在不同性质竖向荷载作用下的承载机理及破坏模式差异所致。

(2) 采用 Meyerhof 公式, 分别推算出承受不同荷载组合、相同截面尺寸的挖孔桩桩土相对刚度  $K_r$  值, 分析结果表明: 下压+水平组合荷载工况下挖孔桩的  $K_r$  最大, 其次为水平荷载工况, 上拔+水平组合荷载作用时  $K_r$  最小。由此表明, 下压力可有效提高了挖孔桩的抗水平承载能力, 反之, 上拔力会削弱挖孔桩的抗水平承载能力。

(3) 试验结果表明: 桩端土压力与下压荷载之间

较好地服从二次多项式的函数关系。不同类别的挖孔桩，水平荷载的作用对桩端土压力分布的影响也存在差异。刚性桩由于其在水平力作用下产生了绕桩体的转动，导致桩端土压力偏心作用明显，相反，弹性桩产生的该偏心作用不明显。

### 参考文献：

- [1] KISHIDA H, MEYERHOF G G. Bearing Capacity of Pile Groups under Eccentric Loads in Sand[J]. Proc 6th ICSMFE Toronto, 1965, **109**(2): 270 – 274.
- [2] MEYERHOF G G, RANJAN G. The bearing capacity of rigid piles under inclined loads in sand. I: vertical piles[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1972, **9**(4): 430 – 446.
- [3] MEYERHOF G G, RANJAN G. The bearing capacity of rigid piles under inclined loads in sand. III: pile groups[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1973, **10**(3): 428 – 438.
- [4] CHARI T R, MEYERHOF G G. Ultimate capacity of rigid single piles under inclined loads in sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1983, **20**(4): 849 – 854.
- [5] MEYERHOF G G, SASTRY V V R N. Bearing capacity of rigid piles under eccentric and inclined loads[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1985, **22**(3): 267 – 276.
- [6] KOUMOTO T, MEYERHOF G G, SASTRY V V R N. Analysis of bearing capacity of rigid piles under eccentric and inclined loads[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1986, **23**(2): 127 – 131.
- [7] MEYERHOF G G, GHOSH D P. Ultimate capacity of flexible piles under eccentric and inclined loads[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1989, **26**(1): 34 – 42.
- [8] SASTRY V V R N, MEYERHOF G G. Behaviour of flexible piles under inclined loads[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, **27**(1): 19 – 28.
- [9] YALCIN A S, MEYERHOF G G. Bearing capacity of flexible piles under eccentric and inclined loads in layered soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1991, **28**(6): 909 – 917.
- [10] SASTRY V V R N, MEYERHOF G G. Behaviour of flexible piles in layered sands under eccentric and inclined loads[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, **31**(4): 513 – 520.
- [11] MEYERHOF G G. Behaviour of pile foundations under special loading conditions: 1994 R.M. Hardy keynote address[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1995, **32**(2): 204 – 222.
- [12] 横山幸满. 桩结构物的计算方法和计算实例[M]. 唐业清, 吴庆荪, 译. 北京: 中国铁道出版社, 1984. (YUKIMITSU Y H. Calculation Methods and Examples for Pile Structures[M]. TANG Ye-qing, WU Qing-sun, trans. Beijing: China Communications Press, 1984. (in Chinese))
- [13] 范文田. 轴向与横向力同时作用下柔性桩的分析[J]. 西南交通大学学报, 1986, **21**(1): 39 – 44. (FAN Wen-tian. Analysis of slender piles under simultaneous axial and transverse loading[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1986, **21**(1): 39 – 44. (in Chinese))
- [14] 赵明华, 侯运秋, 曹喜仁. 倾斜荷载下基桩的受力研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 1997(2):98 – 102, 109. (ZHAO Ming-hua, HOU Yun-qiu, CAO Xi-ren. Study on the behavior of inclinedly loading piles[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 1997(2):98 – 102, 109. (in Chinese))
- [15] 赵明华, 侯运秋, 单远铭. 倾斜荷载下桥梁桩基的计算与试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 1999, **26**(2): 86 – 91. (ZHAO Ming-hua, HOU Yun-qiu, SHAN Yuan-ming. Calculation and model test study on the bridge piles under inclined loads[J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 1999, **26**(2): 86 – 91. (in Chinese))
- [16] 赵明华. 倾斜荷载下基桩的受力研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2001. (ZHAO Ming-hua. Study on the behavior of piles under inclined loads[D]. Changsha: Hunan University, 2001. (in Chinese))
- [17] 侯运秋, 赵明华, 曹喜仁. 倾斜荷载下基桩的承载力研究[J]. 中南公路工程, 1998, **23**(1): 39 – 42. (HOU Yun-qiu, ZHAO Ming-hua, CAO Xi-ren. Study on bearing capacity of foundation pile under inclined load[J]. Central South Highway Engineering, 1998, **23**(1): 39 – 42. (in Chinese))
- [18] 彭文祥, 赵明华. 成层地基中倾斜荷载作用下桩的受力研究[J]. 中南公路工程, 1999, **24**(1): 27 – 30. (PENG Wen-xiang, ZHAO Ming-hua. Study on pile stress under inclined load in layered foundation[J]. Central South Highway Engineering, 1999, **24**(1): 27 – 30. (in Chinese))
- [19] 吴鸣, 赵明华. 大变形条件下桩土共同工作及试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(4): 436 – 440. (WU Ming, ZHAO Ming-hua. Study on pile-soil interaction under large deflection and its model test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(4): 436 – 440. (in Chinese))
- [20] 文松霖. 铅直、水平荷载作用下扩底桩的承载机理[J]. 长江科学院院报, 2004, **21**(5): 24 – 27, 31. (WEN Song-lin. Resistance behaviors of pile with enlarged base under axial and lateral loads[J]. Journal of Yangtze River Scientific

- Research Institute, 2004, **21**(5): 24 - 27, 31. (in Chinese))
- [21] 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 batter pile under arbitrary inclined loads in semi-infinite solid[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2004, **38**(2): 191 - 194, 248. (in Chinese))
- [22] 郑 刚, 王 丽. 成层土中倾斜荷载作用下桩承载力有限元分析[J]. 岩土力学, 2009, **30**(3): 680 - 687. (ZHENG Gang, WANG Li. Finite element analysis of bearing capacity of pile under inclined load in layered soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(3): 680 - 687. (in Chinese))
- [23] 王孝兵, 文松霖, 徐文强, 等. 荷载倾角对大直径长桩承载特性的影响分析[J]. 水利水运工程学报, 2012(2): 8 - 14. (WANG Xiao-bing, WEN Song-lin, XU Wen-qiang, et al. Numerical analysis of load inclination influence on the bearing behavior of large-diameter long pile[J]. Hydro-Science and Engineering, 2012(2): 8 - 14. (in Chinese))
- [24] 周立朵, 孔纲强, 彭怀风, 等. 倾斜荷载下群桩承载特性理论分析[J]. 岩土力学, 2017, **38**(9): 2647 - 2654. (ZHOU Li-duo, KONG Gang-qiang, PENG Huai-feng, et al. Theoretical analysis of bearing capacities of pile group under oblique load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(9): 2647 - 2654. (in Chinese))
- [25] 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范: GB 50021—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004. (Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for investigation of geotechnical engineering: GB 50021—2001[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004. (in Chinese))
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基桩检测技术规范: JGJ 106—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for testing of building foundation piles: JGJ 106—2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese))
- [27] 国家能源局. 架空输电线路基础设计技术规程: DL/T 5219—2014[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015. (National Energy Bureau of the People's Republic of China. Technical code for design of foundation of overhead transmission line: DL/T 5219—2014[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2015. (in Chinese))
- [28] 史佩栋. 桩基工程手册(桩和桩基础手册) [M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2015. (SHI Pei-dong. Pile Foundation Engineering Manual (Pile and Pile Foundation Manual)[M]. 2nd ed. Beijing: People's Communications Press, 2015. (in Chinese))

(编校: 孙振远)