

砂土地基中静压桩桩端阻力分析

朱寅跃, 肖昭然

(河南工业大学 土木工程学院, 郑州 450001)

摘要: 利用自主研发的大型土工试验装置, 在考虑桩长和桩尖角度影响的情况下, 开展了静压桩的沉桩以及静载荷试验, 以研究试验过程中桩端阻力的变化规律。试验结果表明: 沉桩过程中, 桩端阻力随沉桩深度的增加而非线性增大, 也随桩长和桩尖角度的增加而增大, 沉桩深度为 $25D$ 时, 桩端阻力基本达到极值, 同一沉桩深度处桩端阻力在沉桩阻力中的占比随桩长 ($20D \sim 30D$ 范围内) 的增加而减小, 随桩尖角度的增加而增大; 静载荷试验过程中, 桩端阻力随沉降量的增加而非线性增大, 也随桩长和桩尖角度的增加而增大, 同一沉降量处桩端阻力在桩顶荷载中的占比随桩长的增加而减小, 随桩尖角度的增加而增大。

关键词: 静压桩; 桩端阻力; 桩尖角度; 桩长

中图分类号: TU473 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-349X(2023)03-0009-06

DOI: 10.16160/j.cnki.tsxyxb.2023.03.002

Analysis of Pile End Resistance of Static-Pressure Pile in Sandy Foundation

ZHU Yin-yue, XIAO Zhao-ran

(College of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to study the change rule of pile end resistance of the static-pressure piles, the sinking and static load tests were carried out by using the self-developed large geotechnical testing device, with the influence of pile length and pile tip angle considered. The results show that, the pile end resistance increases non-linearly with the increase of pile sinking depth, and it also increases with the increase of pile length and pile tip angle during the pile sinking. The pile end resistance reaches the extreme value when the pile sinking depth is $25D$. The percentage of pile end resistance in the pile sinking resistance at the same depth decreases with the increase of pile length (within $20D \sim 30D$) and it increases with the increase of pile tip angle. During the static load test, the pile end resistance increases non-linearly with the increase of settlement, and it also increases with the increase of pile length and pile tip angle. The percentage of pile end resistance in the pile top load at the same settlement decreases with the increase of pile length, and it increases with the increase of pile tip angle.

Key Words: static-pressure pile; pile end resistance; pile tip angle; pile length

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178165)

作者简介: 朱寅跃(1998—), 男, 河南驻马店人, 硕士研究生, 研究方向为土与结构相互作用;

肖昭然(1958—), 男, 山东烟台人, 教授, 博士, 研究方向为土与结构相互作用。

静压沉桩是一种通过静力压桩机将预制桩压入土体中的桩基施工方法,具有施工无噪声、无振动以及无污染等优点。静压桩的沉桩阻力是选择静力压桩机时需要考虑的关键因素,明确沉桩阻力的变化规律有利于选择合适的静力压桩机,以节约成本。静压桩的沉桩阻力主要包括桩端阻力和桩侧总摩阻力两部分。牛富丽等^[1]认为静压桩桩端阻力随沉桩深度的增加而非线性增大。周健等^[2]认为桩端阻力的增幅随沉桩深度的增加逐渐减小并趋于稳定。马哲等^[3]和叶建忠等^[4]均认为沉桩过程中桩端阻力存在临界值。蒋跃楠等^[5-6]对静压桩桩尖角度与桩端阻力之间的关系进行了分析,认为沉桩过程中桩端阻力随桩尖角的增加而增大。刘勇等^[7]和马加骁等^[8]均认为沉桩过程中桩端阻力随桩长的增加而逐渐增大。郑华茂等^[9]认为沉桩过程中沉桩阻力主要为桩端阻力,桩侧总摩阻力在沉桩阻力中所占比例较小。胡立峰等^[10]认为桩端阻力和桩侧总摩阻力在沉桩阻力中的占比是变化的,沉桩前期桩端阻力占比比较大,后期桩侧总摩阻力占比较大。

综上所述,已有研究的重点主要集中在静压桩沉桩过程中桩端阻力的变化上,而对桩端阻力在沉桩阻力中占比变化规律的研究相对较少,而且在静载荷试验过程中桩端阻力以及其在桩顶荷载中占比的变化规律尚不明确。为了进一步研究沉桩以及静载荷试验过程中桩端阻力的变化规律,本文利用自主研制的大型土工试验装置,在考虑桩长和桩尖角度影响的情况下,开展静压桩的沉桩以及静载荷试验研究。

1 试验材料与方法

1.1 试验砂土

试验的砂土采用福建平潭标准砂, SiO_2 含量为 96.5%, 最大与最小干密度分别为: $\rho_{\text{dmax}} = 1.68 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{\text{dmin}} = 1.36 \text{ g/cm}^3$; 粒径组成特性参数为: $d_{50} = 0.48$, $d_{30} = 0.28$, $d_{10} = 0.10$, $C_u = 5.15$, $C_c = 1.46$; 砂样内摩擦角 $\varphi = 35^\circ$ 。为了便于控制砂样的相对密度,减少砂样装填时间,采用直径 550 mm 高 600 mm、直径 500 mm 高 1 200 mm 以及直径 450 mm 高 1 600 mm 的无

底圆桶在试验剪切砂箱中部位置取砂。具体实施过程为:首先,将高为 600 mm 的桶用电动缸压入砂土中,用勺子将桶内砂土取出;然后,采取同样的方式依次将高 1 200 mm 和 1 600 mm 的桶压入砂土中,用勺子将桶内砂土全部取出;最后,采用落雨法将所取出的砂土落入桶内,并依次取出高 1 600 mm, 1 200 mm 和 600 mm 的桶。砂土颗粒级配曲线如图 1 所示。

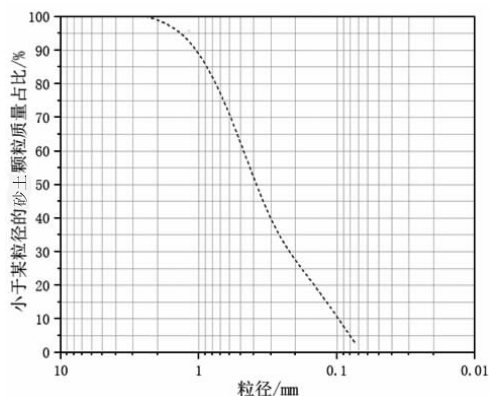


图 1 砂土颗粒级配曲线图

1.2 模型桩

模型桩采用 6061 铝合金材料制成,桩径为 40 mm,桩长为 1 250 mm(有效长度为 1 200 mm),壁厚为 5 mm,弹性模量为 69.5 GPa。模型桩的桩尖角度分别为 45° , 60° , 120° 和 180° 。模型桩的桩端设置端阻计,端阻计的量程为 0~20 kN,精度为 0.01 kN。模型桩实物如图 2 所示,不同桩尖角度的桩端如图 3 所示。

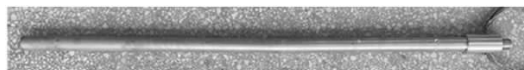


图 2 模型桩实物图

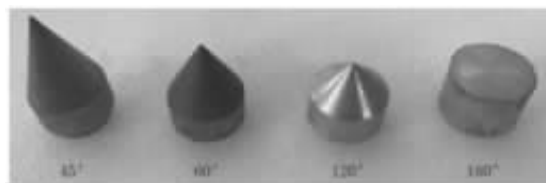


图 3 不同桩尖角度的桩端

1.3 试验设备

本模型试验采用的试验装置为 YTX-4000 型模型槽试验系统,主要包括静力加载系统、加载框架、剪切砂箱、伺服控制系统和数据采集分

析系统等部分。其中,模型槽静力加载系统分为导向系统和动力系统两部分。伺服控制系统由电动伺服控制器(PLC)、电动执行机构和力—磁传感器组成。电动伺服控制器(PLC)适用于一路通道的电动伺服,以控制全自动匀速、变速、周期等加载运动,可定制不同线速度的斜波、三角波、正弦波周期信号等进行位移、荷载自动双闭环控制,且能够自动记录数据,具有超限保护功能和通道信号诊断功能。采用东华 DH3816N 静态数据采集分析系统,进行沉桩以及加载过程中桩顶荷载和桩端阻力数据的采集。模型槽内部尺寸为:长 $\times$ 宽 $\times$ 深=3 000 mm $\times$ 2 000 mm $\times$ 2 000 mm。模型槽实物如图 4 所示。模型桩与模型箱边界的最小间距为 96 cm,约为 $24D$ (D 为模型桩直径),满足模型试验中对边界大于 $6D$ 的要求^[11]。

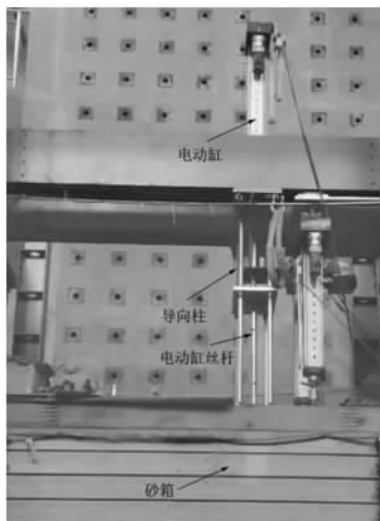


图 4 YTX-4000 型模型槽实物图

1.4 试验过程和方法

本模型试验的沉桩采用整体沉桩和分段沉桩两种方式进行。桩长为 1 200 mm 时,采用分段沉桩方式,具体实施步骤为:在选定区域先以 0.02 mm/s 的速度将模型桩沉入 600 mm,然后以 0.01 mm/s 的速度卸载,在电动缸上安装加长杆之后再沉入 600 mm。桩长为 600 mm, 800 mm, 1 000 mm 时,采用整体沉桩方式,即以 0.02 mm/s 的速度一次性沉入全部桩长。静压沉桩过程如图 5 所示。此沉桩过程采用水

平仪对桩体垂直度进行校对,确保模型桩被竖直压入砂土中。同时在压桩装置与模型桩之间放置球铰,保证竖向压桩力均匀施加在模型桩上。通过电动缸丝杆的伸缩量与加载时间控制沉桩速度和卸荷速度。沉桩完成后,静置 24 h, 然后进行静载荷试验。静载荷试验是指电动缸对模型桩施加指定荷载,直至桩端土体被破坏。此试验过程,通过安置的位移计和压力传感器测量桩体沉降量以及桩顶所受荷载。静载荷试验过程如图 6 所示。具体试验方案如表 1 所示。



图 5 静压沉桩过程图



图 6 静载荷试验过程图

表 1 试验方案

试验 类型	桩长 /mm	桩径 D /mm	桩尖角度 /°
类型一	15 D /20 D /25 D /30 D	40	45
类型二	30 D	40	45/60/120/180

2 试验结果与分析

2.1 沉桩过程中桩端阻力分析

根据试验数据,得到沉桩过程中不同桩长和桩尖角度条件下的桩端阻力随沉桩深度的变化曲线,如图 7 所示。

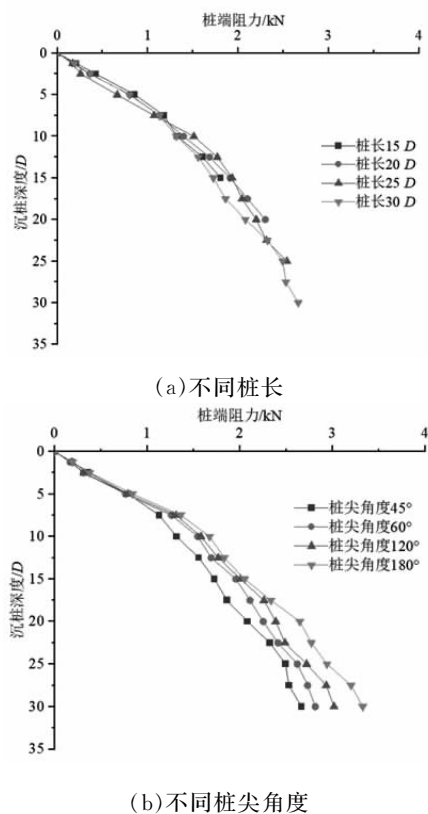


图 7 沉桩过程中桩端阻力变化曲线图

由图 7 可知,沉桩过程中,不同桩长和桩尖角度条件下桩端阻力随沉桩深度的变化规律基本一致,即随沉桩深度的增加非线性增大。由图 7(a)可知,桩端阻力随桩长的增加而增大。沉桩结束后,桩长为 15 D , 20 D , 25 D 和 30 D 的模型桩桩端阻力分别为 1.81 kN, 2.36 kN, 2.54 kN 和 2.66 kN, 相较于桩长 15 D , 桩端阻力分别增大了 30.39% (20 D)、40.33% (25 D) 和 46.96% (30 D)。对比可知,随桩长的增加桩

端阻力逐渐增大,但其增幅逐渐减小。这是由于随沉桩深度的增加,沉桩所引起的土体挤密作用逐渐增大,故桩端阻力也逐渐增大。沉桩过程中桩端阻力存在极值,随沉桩深度的增加,桩端阻力逐渐达到了极值,故其增幅逐渐减小,本试验中沉桩深度为 25 D 时,桩端阻力基本达到了极值。由图 7(b)可知,桩端阻力随桩尖角度的增加而逐渐增大。沉桩完成后,桩尖角度为 45°, 60°, 120° 和 180° 的模型桩桩端阻力分别为 2.66 kN, 2.80 kN, 3.01 kN 和 3.32 kN, 相较于桩尖角度 45°, 桩端阻力分别增大了 5.26% (60°)、13.16% (120°) 和 24.81% (180°)。分析可知,沉桩过程中,桩端刺入土体会造成土体的冲剪破坏,桩尖角度越小,冲剪作用越明显,桩端阻力越小。这与蒋跃楠^[5] 得出的结论一致。

图 8 为沉桩过程中不同桩长和桩尖角度条件下的桩端阻力在沉桩阻力中的占比变化曲线图。

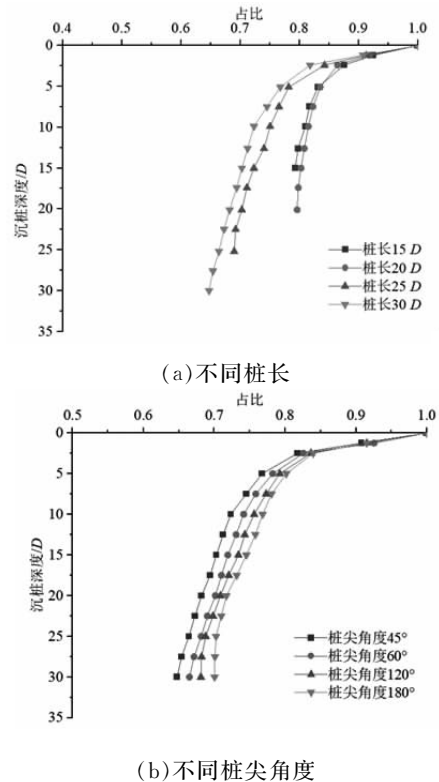


图 8 沉桩过程中桩端阻力在沉桩阻力中的占比变化曲线图

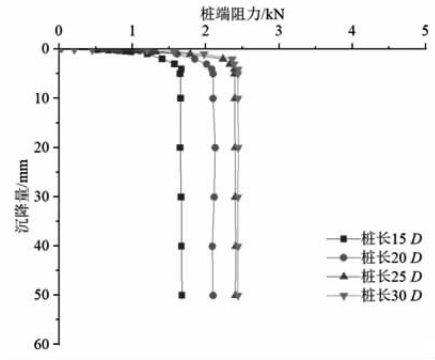
由图 8 可知,沉桩过程中,不同桩长和桩尖角度条件下桩端阻力在沉桩阻力中的占比均随沉桩深度的增加而逐渐减小,且减幅也逐渐减

小。由图 8(a)可知,沉桩结束时,桩长为 $15D$, $20D$, $25D$ 和 $30D$ 的模型桩桩端阻力在沉桩阻力中的占比分别为 79.29% , 79.62% , 68.97% 和 64.74% 。对比可知,桩长由 $15D$ 增加至 $20D$ 时,桩端阻力在沉桩阻力中的占比无明显变化,均为 79% 左右,但随着桩长的继续增大,桩端阻力在沉桩阻力中的占比逐渐减小。分析可知,桩端阻力存在极值,达到一定沉桩深度时,桩端阻力逐渐趋近于极限值,桩端阻力随沉桩深度增加其增幅逐渐减小,且小于沉桩阻力的增幅,故桩端阻力在沉桩阻力中的占比逐渐降低。由图 8(b)可知,沉桩结束时,桩尖角度为 45° , 60° , 120° 和 180° 的模型桩桩端阻力在沉桩阻力中的占比分别为 64.74% , 66.50% , 68.10% 和 70.04% 。对比可知,桩长相同时,桩端阻力在沉桩阻力中的占比随桩尖角度的增加而增大。这是由于桩尖角度越大,沉桩时的桩端阻力越大,且桩端阻力的增幅大于沉桩阻力的增幅,故随桩尖角度的增加,桩端阻力在沉桩阻力中的占比逐渐增大。

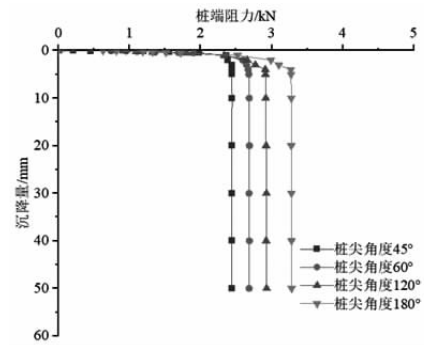
2.2 静载荷试验过程中桩端阻力分析

图 9 为静载荷试验过程中不同桩长和桩尖角度条件下的桩端阻力随桩体沉降量的变化曲线图。由图 9 可知,静载荷试验过程中,不同桩长和桩尖角度条件下桩端阻力随桩体沉降量的变化规律基本一致,即随桩体沉降量的增加而非线性增大。由图 9(a)可知,静载荷试验过程中,桩端阻力随桩长的增加而增大,但其增幅逐渐减小。桩端土体被破坏时,桩长为 $15D$, $20D$, $25D$ 和 $30D$ 的模型桩桩端阻力分别为 1.67 kN , 2.08 kN , 2.39 kN 和 2.44 kN ,桩长每增加 $5D$,桩端阻力分别增大了 24.55% , 14.90% 和 2.09% 。分析可知,随桩长的增加,桩端阻力逐渐达到极限值,故其增幅逐渐减小。由图 9(b)可知,桩端土体被破坏时,桩尖角度为 45° , 60° , 120° 和 180° 的模型桩桩端阻力分别为 2.44 kN , 2.67 kN , 2.91 kN 和 3.27 kN ,相较于桩尖角度 45° ,桩端阻力分别增大了 9.43% (60°)、 19.26% (120°) 和 34.02% (180°)。这是由于桩尖角度越大,荷载作用下桩端对土体的

冲剪作用越不明显,桩端受到的阻力也就越大。



(a) 不同桩长



(b) 不同桩尖角度

图 9 静载荷试验过程中桩端阻力变化曲线图

图 10 为静载荷试验过程中不同桩长和桩尖角度条件下的桩端阻力在桩顶荷载中的占比变化曲线图。由图 10 可知,静载荷试验过程中,不同桩长和桩尖角度条件下桩端阻力在桩顶荷载中的占比均随桩体沉降量的增加而逐渐减小,且减幅也逐渐减小。由图 10(a)可知,桩端土体被破坏时,桩长为 $15D$, $20D$, $25D$ 和 $30D$ 的模型桩桩端阻力在桩顶荷载中的占比分别为 71.06% , 69.56% , 61.28% 和 58.37% ,即随桩长的增加,桩端阻力在桩顶荷载中的占比逐渐减小,这与沉桩过程中桩端阻力在沉桩阻力中占比随桩长变化的规律较为一致。由图 10(b)可知,桩端土体被破坏时,桩尖角度为 45° , 60° , 120° 和 180° 的模型桩桩端阻力在桩顶荷载中的占比分别为 58.37% , 61.38% , 63.82% 和 65.53% 。对比可知,桩长相同时,桩端阻力在桩顶荷载中的占比随桩尖角度的增

加而增大,这与桩端阻力在沉桩阻力中的占比随桩尖角度变化的规律相符。

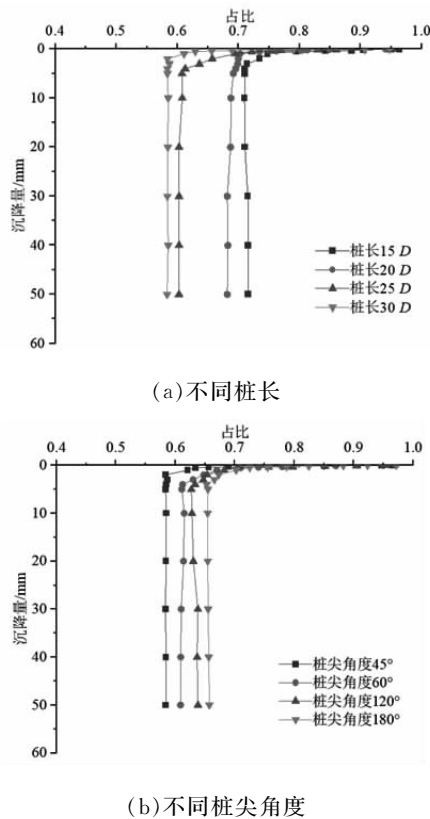


图 10 静载荷试验过程中桩端阻力在桩顶荷载中的占比变化曲线图

3 结论

(1)沉桩过程中,桩端阻力随沉桩深度的增加而非线性增大,也随桩长和桩尖角度的增加而非线性增大。沉桩深度为 $25D$ 时,桩端阻力基本达到极值。本试验中,桩长相同时,桩尖角度为 45° 的模型桩沉桩端阻力最小。

(2)沉桩过程中,桩端阻力在沉桩阻力中的占比随沉桩深度的增加而逐渐减小;沉桩深度相同时,桩端阻力在沉桩阻力中的占比随桩长($20D \sim 30D$ 范围内)的增加而逐渐减小,随桩尖角度的增加而逐渐增大。

(3)静载荷试验过程中,桩端阻力随沉降量的增加而非线性增大,也随桩长和桩尖角度的增加而增大;桩端阻力在桩顶荷载中的占比随桩体沉降量的增加而减小,沉降量相同时,桩端阻力在桩顶荷载中的占比随桩长的增大而减小,随桩尖角度的增加而增大。

(4)本试验中桩长和桩尖角度的变化对桩端阻力具有显著影响,工程中可根据实际需求选择合适的桩长和桩尖角度,在满足工程需要的前提下,减小沉桩阻力,以节约成本。

参考文献:

- [1] 牛富丽,辛翀,张明义,等.烟台地区静压桩沉桩阻力的实测分析[J].青岛理工大学学报,2015,36(3):17-21.
- [2] 周健,邓益兵,叶建忠,等.砂土中静压桩沉桩过程试验研究与颗粒流模拟[J].岩土工程学报,2009,31(4):501-507.
- [3] 马哲,吴承霞,肖昭然,等.静压桩端阻力和侧阻力的颗粒流数值模拟[J].中国矿业大学学报,2010,39(4):622-626.
- [4] 叶建忠,周健,韩冰.基于离散元理论的静压沉桩过程颗粒流数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2007(S1):3058-3064.
- [5] 蒋跃楠.静压桩动端阻力与桩端角的关联性分析[J].金陵科技学院学报,2016,32(1):15-19.
- [6] 蒋跃楠,黄广龙.砂土中静压桩的桩端作用效应分析[J].建筑科学,2016,32(11):74-82.
- [7] 刘勇,肖昭然,蒋敏敏.桩长对单桩沉桩阻力和承载力特性影响的模型试验[J].科学技术与工程,2019,19(7):215-219.
- [8] 马加骁,雷向丽,王永洪,等.考虑桩长影响的静压桩贯入过程模型试验[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2020,44(3):462-467.
- [9] 郑华茂,陈淮,肖昭然.砂土中静压桩贯入过程中的桩周应力分析[J].水运工程,2017(3):138-144.
- [10] 胡立峰,龚维明,过超,等.静压桩沉桩机理及承载力试验[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2009,10(6):610-614.
- [11] 王永洪,张明义,刘俊伟,等.黏性土中静压沉桩贯入力学机制室内试验研究[J].工程科学与技术,2020,52(4):203-212.

(责任编辑:冯兆娜)