

桩靴对饱和粉土中锤击管桩沉贯阻力的影响

光洪峰¹, 刘俊伟¹, 王正中², 王晨³

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266000;

2. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

3. 中铁十局集团第一工程有限公司, 山东 济南 250000)

摘要: 带桩靴管桩有利于提高打入桩的贯入效率, 并且会改变桩身荷载传递规律减小桩身破损。为探究饱和粉土中开口管桩锤击沉贯机理, 对双壁开口模型桩进行了室内贯入试验。锤击沉桩下考虑不同桩靴形式的影响, 采集沉桩过程中桩身应变和土塞变化。研究发现, 沉桩进入硬质砂土层后沉桩阻力明显增大, 桩端阻力占比较大, 桩靴能有效减小沉桩阻力; 在同一土层位置处, 外侧摩阻力会出现衰退现象, 内倾 30° 桩靴桩内单位侧摩阻最大; 桩端形式对土塞影响显著, 沉桩结束时土塞率内倾 30° 桩靴试桩、外倾 30° 桩靴试桩、无桩靴试桩分别为 41%、35% 和 31%。桩靴可有效降低穿越硬质土层的贯入阻力, 研究结论可用于指导打入桩施工, 为预制管桩打入过程选用合适的桩靴形式提供参考。

关键词: 桩靴形式; 开口管桩; 锤击沉桩; 贯入特性; 土塞效应

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)02-0137-06

Effects of Pile Shoe on Sinking Resistance of Hammered Pipe Pile in Saturated Silt Soil

GUANG Hongfeng¹, LIU Junwei¹, WANG Zhengzhong², WANG Chen³

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266000 China;

2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. China Railway No. 10 Engineering Group No. 1 Engineering Co., Ltd., Jinan, Shandong 250000, China)

Abstract: Pile with pile shoe pipe pile is beneficial to improve the penetration efficiency of the driven pile, and will change the load transfer law of the pile body and reduce the pile body breakage. In order to explore the hammering and sinking mechanism of open pipe piles in saturated silt, an indoor penetration test was carried out on double-walled open pipe piles. The influence of different pile shoe forms was considered under hammering pile sinking, and the pile body strain and soil plug changes were collected during the process of sinking pile. It is found that the resistance of pile sinking increases significantly after entering the hard sand layer, and the resistance at the end of the pile accounts for a relatively large proportion, and the pile shoe can effectively reduce the resistance of pile sinking. At the same soil position, the outer friction resistance will decay, and the inner unit friction resistance of the inverted 30° pile shoe pile is the largest. The pile end form had a significant influence on the soil plug, and the soil plug rates at the end of pile sinking were 41%, 35% and 31% respectively. The pile shoe can effectively reduce the penetration resistance through the hard soil layer, and the research conclusion can be used to guide the construction of the pile driven, and provide references for the selection of suitable pile shoe form for the precast pipe pile driving process.

Keywords: pile shoe style; open piles; pile driving; penetration characteristics; soil plug effect

收稿日期: 2022-10-26

修稿日期: 2022-11-30

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(4227713); 山东省优秀青年基金(ZR2021YQ31)

作者简介: 光洪峰(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为岩土与桩基工程。E-mail: ghfqt@163.com

通讯作者: 刘俊伟(1983—), 男, 博士, 教授, 主要从事近海岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: liujunwei@qut.edu.cn

锤击沉桩是通过瞬时冲击荷载克服沉桩阻力达到沉桩效果,PHC 管桩在沉桩过程中其桩身受力复杂,施工更易出现问题。桩靴通常作为辅助沉桩的有效手段,会明显提高打桩施工效率,降低管桩打桩破损。开口管桩土塞的生成使得桩内侧摩阻力成为沉桩阻力重要组成部分,不可忽视。

Liu Hongbiao 等^[1]通过 FBG 传感器对打入桩进行了力学监测,发现桩身中部的压缩应变明显大于桩端与桩顶。Salgado 等^[2]利用土壤反应模型对一维打桩模拟,开发了基于不同土质的打桩公式,能够预测多种条件下的桩承载力。彭宇彤^[3]采用室内模型试验与颗粒流数值模拟相结合的方法,研究了珊瑚钙质砂锤击桩的贯入机理。张大帅等^[4]针对斜桩桩头断裂问题进行了现场应变监测,并结合有限元模拟得到了锤击频率、锤击速度对桩顶应变的影响。刘路路等^[5]采用 CPTU 与静载试验对 PHC 管桩进行了现场测试,考虑土塞的影响,提出了管桩承载力的计算方法。Paikowsky 等^[6]通过试验观测了土塞的生成,并分析了土塞对管桩极限承载力的影响。杨校辉等^[7]研究了现场静力压桩试验和载荷试验过程中桩侧阻力的变化规律及其承载特性。陈乔等^[8]对大直径管桩静载试验进行数值模拟,得到不同因素下桩顶荷载-沉降及桩身轴力变化曲线。刘俊伟等^[9]利用大尺度模型试验研究了砂土中静压管桩的土塞效应,分析了不同桩靴形式下管桩的土塞高度、内外侧摩阻力的贯入特性。吴建等^[10]采用加强钢板加内环的桩靴作为嵌岩工程桩桩靴,可显著降低沉贯阻力。冯光华等^[11]在桩基直径 800 mm 和 1 000 mm 两种类型的 PHC 桩施工中针对不同桩靴形式的沉桩穿透性能进行研究。洪宏兴等^[12]通过现场沉桩发现桩靴长度对 PHC 管桩穿过砂层有明显影响,桩靴越长,穿过砂层所需的锤击数越少。Zhang Xiangyu 等^[13]通过数值分析研究了内桩靴与无桩靴的贯入荷载传递机理以及对极限承载力的影响。

沉桩过程中土塞高度变化对贯入阻力影响较大,现有研究多针对静压桩^[7,14-16]进行,不同桩靴形式下锤击沉桩的荷载传递规律仍未被揭示。本文采用自主研制的锤击沉桩试验系统,选用 PHC 管桩常用地区的饱和粉土作为锤击沉桩的试验土层,对不同桩靴形式下开口管桩锤击沉桩过程中荷载传递特性和土塞性状进行研究,为实际工程施工提供参考。

1 试验方案

模型试验系统的锤击装置是本次沉桩模型试验

的关键部分,如图 1 所示。锤击荷载试验装置可实现连续锤击,能根据试验需求设置固定落锤高度并提供稳定锤击能量,并且实时监测记录每锤贯入度及桩顶总沉降。

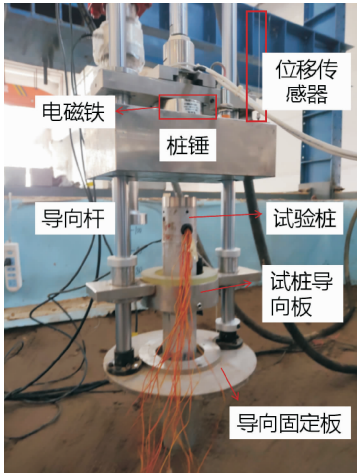


图 1 锤击装置

室内模型试验上部所需粉土为工程现场土,下部砂土选用与现场土力学性质相近的细砂。土体总厚度为 1 600 mm,上层粉土高度 600 mm,下层为细砂,厚度 1 000 mm。每次装土 100 mm,并进行注水饱和。在粉土和砂土层各预埋两个铝盒,用来测量土体参数。土层物理力学参数见表 1。

表 1 土层物理力学参数

土层	厚度 /mm	比重	重度 γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	含水率 /%	内摩擦角/($^{\circ}$)	黏聚力 c/kPa
粉土	600	2.71	18.6	33.2	20.1	8.7
细砂	1000	2.65	18.2	27.1	42.7	—

本次模型试验选用双壁开口管桩^[17-18],分别在 内管外部和外管开槽部位粘贴应变片,并涂刷环氧树脂进行保护,内管底部与底座之间分离,可通过双壁分别承受内、外侧摩阻,达到单独分析内外侧摩阻的目的。组合而成的双壁管桩截面尺寸为 70.0 mm $\times$ 47.2 mm $\times$ 1 300.0 mm(外径 $\times$ 内径 $\times$ 高),本试验制作两种桩靴,如图 2 所示,其中图 2(a)为内倾 30 $^{\circ}$ 桩靴,图 2(b)为外倾 30 $^{\circ}$ 桩靴,图 2(c)为无桩靴形式。试验中利用模型桩上部侧壁预留孔道设置滑轮系统,桩内部设有重锤与外部拉线位移计相连,通过重物跟踪土塞面实时监测土塞高度,共进行 3 组沉桩试验,模型桩均为同一尺寸的双壁开口管桩。为防止时间效应对试验数据的影响,每次试验桩沉桩间隔 2 d,并在每次试验桩沉桩完成并拔出后将空

洞填满静置,尽量减小试验桩的相互影响。

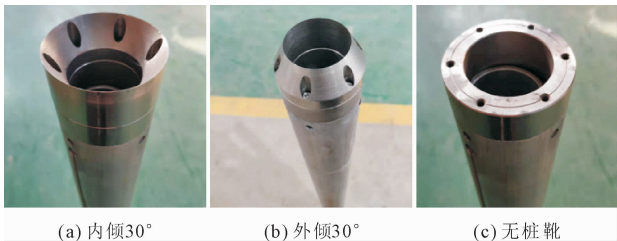


图2 双壁管桩桩靴

2 试验结果及分析

2.1 沉桩阻力

根据测得数据绘制的沉桩阻力变化曲线如图3所示。随着沉桩的进行,3组试桩的沉桩总阻力均呈现增大的趋势,且地层性质对沉桩阻力的影响较大,3组试桩均在贯入深度为600 mm 桩端进入砂土层时增幅明显变大。内倾30°桩靴试桩沉桩阻力由0.81 kN 增大到1.28 kN,增幅达58%,外倾30°桩靴试桩沉桩阻力由0.74 kN 增大到1.23 kN,增幅达66%,无桩靴试桩沉桩阻力由0.88 kN 增大到1.51 kN,增幅达72%,说明相比于上部粉土层,下部细砂层沉桩阻力更大。还可以看出,桩端形式对沉桩阻力有较大影响,在贯入1 000 mm 时,无桩靴试桩的沉桩阻力为1.82 kN,而内倾30°桩靴试桩、外倾30°桩靴试桩沉桩阻力分别为1.59 kN、1.54 kN,沉桩阻力约减小了15%,说明桩靴能有效减小沉桩阻力,利于沉桩。

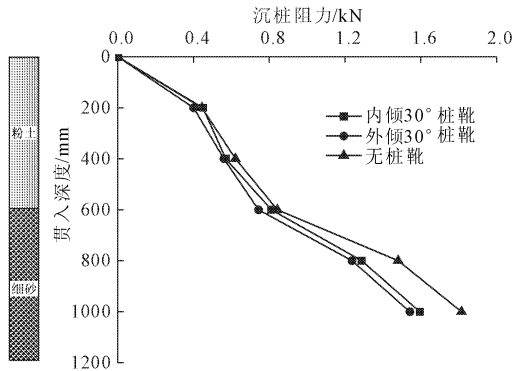


图3 沉桩阻力随贯入深度变化曲线

试验桩端阻力数值近似等于距离桩端20 mm 的传感器测得的轴力,绘制的不同打入深度下桩端阻力变化曲线如图4所示。随着打桩的进行,3组试桩的端阻均增大,地层性质对端阻的影响较大,在桩端打入砂土层即深度600 mm 时增幅变大,内倾30°桩靴试桩端阻由0.41 kN 增大到0.75 kN,增幅

达82%;外倾30°桩靴试桩由0.44 kN 增大到0.75 kN,增幅达70%;无桩靴试桩由0.57 kN 增大到0.99 kN,增幅达73%。3组试桩对比可以看出,桩端形式对桩端阻力的影响较大,在贯入后期,无桩靴试桩的桩端阻力为1.21 kN,而内倾30°桩靴试桩、外倾30°桩靴试桩沉桩阻力分别为0.98 kN、0.97 kN,桩端阻力约减小了18%。

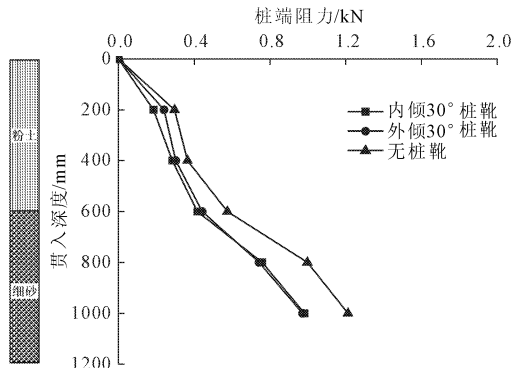


图4 桩端阻力随贯入深度变化曲线

2.2 侧摩阻力变化规律

在锤击沉桩过程中,管桩下沉与桩周土相对滑动产生剪切力,这剪切力即为桩外侧摩阻力。由于管桩下部开口,桩端土会进入管桩内形成土塞,土塞在沉桩过程中受桩端土体支撑作用与内壁形成的相互剪切力为桩内摩阻力。

如图5所示,随着打桩的进行,3组试验桩内、外管的总侧摩阻都呈现增大的趋势。外管总侧摩阻力增大原因较为明显,是因为随着沉桩的进行,下部土体由于上覆压力较大,提供的侧摩阻力更大,外加桩周土与管桩的接触面不断增大,致使外管总侧摩阻不断增大。而内管总侧摩阻增大原因是因为试桩桩内土塞高度变大,同时土塞也更为密实,导致内管总侧摩阻力增大。在贯入深度为600 mm 时,即桩端进入砂土层时,内管总侧摩阻力明显增大,这与上层粉土层下层砂土的上软下硬土层结构有关。

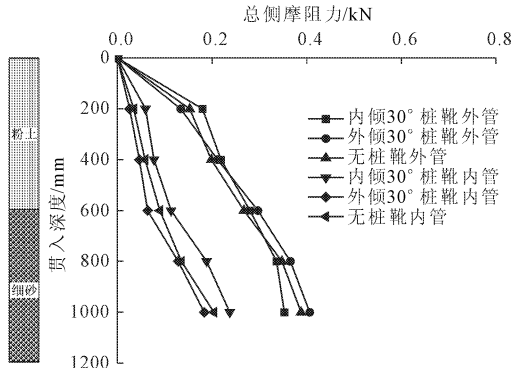


图5 桩侧总摩阻力随贯入深度变化曲线

还可以看出,三组试验桩外管总侧摩阻数值相差不大,总体来说外倾 30° 桩靴试验桩外管总侧摩阻力略大于其余两根试验桩,这是因为外倾 30° 桩靴的试桩在沉桩过程中的挤土效应略高于无桩靴与内倾 30° 桩靴,从而使外倾 30° 桩靴试桩的侧摩阻力略大于无桩靴与内倾 30° 桩靴试桩。三组试验桩内管总侧摩阻数值对比,内倾 30° 桩靴试桩的内管总侧摩阻力是大于其余两根试桩的,即土塞提供的摩阻效应更明显,这与内倾 30° 桩靴易于产生土塞,使内倾 30° 桩靴试桩桩内土塞高度大、土塞更密实有关。同时,随着打桩的进行,内侧摩阻在总侧摩阻的占比不断增大,内倾 30° 桩靴试桩从贯入深度 200 mm 时的占比 21.4% 增长到贯入深度 1 000 mm 时的 38.2%,外倾 30° 桩靴试桩从贯入深度 200 mm 时的占比 16.2% 增长到贯入深度 1 000 mm 时的 32.2%,无桩靴试桩从贯入深度 200 mm 时的占比 18.4% 增长到贯入深度 1 000 mm 时的 35.5%。说明随着沉桩的进行,土塞的承载效应不断发挥作用,其中内倾 30° 桩靴试桩的土塞承载效应最大。

为了更直观的研究沉桩过程中桩侧摩阻力的变化,可根据公式(1)求得内外管的桩侧单位摩阻力,计算公式为:

$$f_i = \frac{N_i - N_{i+1}}{A_i}$$

(1)

式中: q_i 为第 i 层土的桩侧单位摩阻力; N_i 和 N_{i+1} 为第 i 截面和第 $i + 1$ 截面的桩身轴力; A_i 为第 i 层土的桩侧表面积。

不同打入深度下内、外侧单位摩阻力变化曲线如图 6、图 7、图 8 所示。从图中可知,3 组试验桩外管单位侧摩阻变化基本一致,在同一沉桩时刻,单位摩阻随着深度增大而增大,原因是下层土体上覆土压力增大,桩周土径向土压力增大,使外管单位摩阻增大。如无桩靴试桩随着贯入深度从 400 mm 变为 1 000 mm 时,桩端位置处单位摩阻从 5.19 kPa 变为 12.71 kPa。比较 3 组试验桩外管单位侧摩阻,发现在同一时刻下,无桩靴与外倾 30° 桩靴试验桩单位摩阻是略大于内倾角 30° 桩靴试验桩,这是因为无桩靴与外倾角桩靴对桩周土的挤土效应略大于内倾角桩靴,使得其桩周土径向土压力较大,单位侧摩阻略大。从 3 组外管单位侧摩阻变化中还可以看出,在同一土层位置处,随着沉桩的进行,外管单位摩阻出现衰退现象,分析其原因,随着沉桩的进行,桩侧桩周土不断被剪切破坏重塑,重塑后的土体与管桩剪切作用下降,导致外管单位摩阻不断减小。

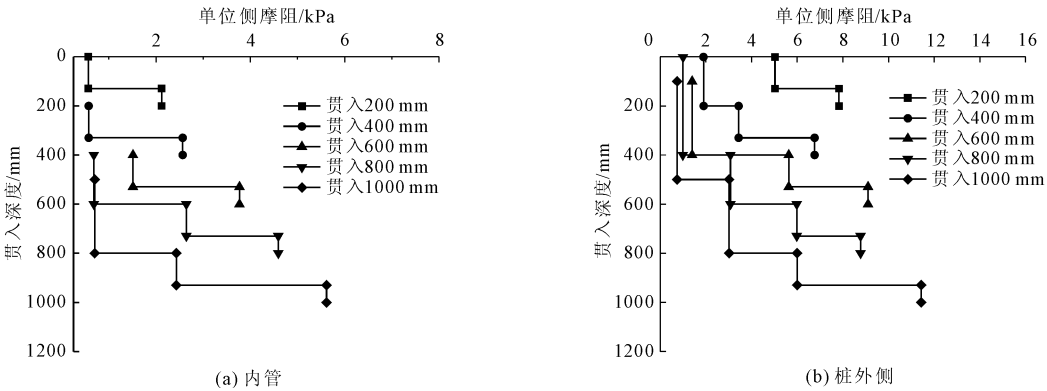


图 6 内倾 30° 桩靴桩侧单位摩阻力变化曲线

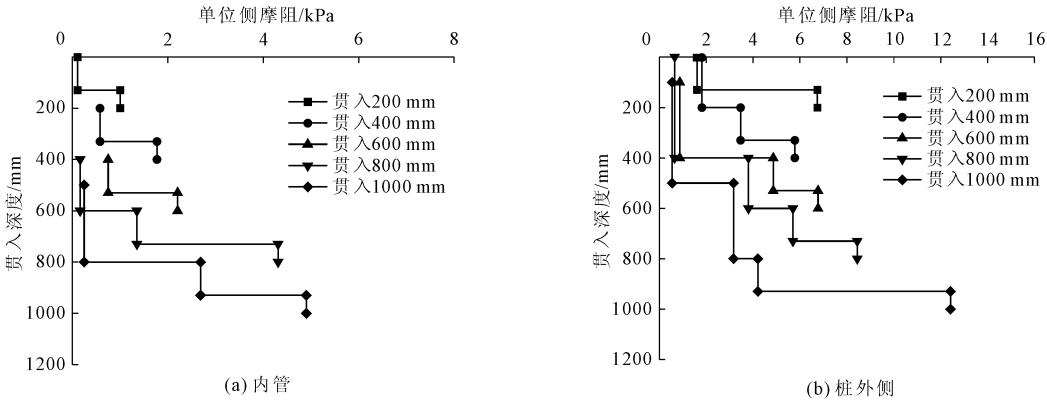


图 7 外倾 30° 桩靴桩侧单位摩阻力变化曲线

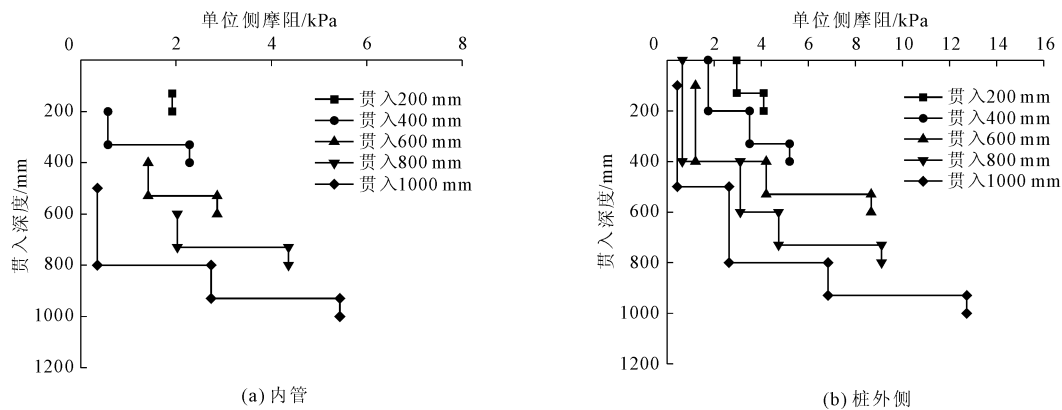


图 8 无桩靴桩侧单位摩阻力变化曲线

分析 3 组内管单位侧摩阻可知,在同一沉桩时刻,内管单位摩阻随深度的增加也是增大的,这主要是因为深度越大,土塞越密实,内侧单位摩阻越大。随着沉桩的进行,同一位置处单位侧摩阻不断增大,如打入深度分别为 200 mm、400 mm、600 mm、800 mm、1 000 mm 时,桩端位置单位侧摩阻依次增加为 1.91 kPa、2.28 kPa、2.86 kPa、4.36 kPa、5.43 kPa。究其原因是随着沉桩的进行,土塞高度不断增加,但土塞高度的增加是土塞稳态被破坏、重塑、再破坏的过程,土塞的每一次重塑都会更加密实,对内壁的挤压剪切作用越大,单位摩阻不断增大。从 3 组内管单位侧摩阻力图中还可以看出,在同一沉桩时刻,3 组不同桩端形式的试桩内管单位摩阻的大小依次为:内倾 30°桩靴试桩 > 无桩靴试桩 > 外倾 30°桩靴试桩,如在打入深度为 1 000 mm 时,桩端位置单位侧摩阻内倾 30°桩靴试桩为 5.6 kPa,无桩靴试桩为 5.4 kPa,外倾 30°桩靴试桩为 4.9 kPa。这就意味着桩端位置处内倾 30°桩靴试桩的土塞比其余试桩密实,该试桩土塞高度越大。

2.3 土塞高度发展规律

不同打入深度下土塞高度的变化如图 9 所示,从图中可以看出,随着沉桩的进行,3 组试桩土塞不断生成,由于桩端形式不同,最终形成的土塞高度差异较大。比较 3 组试桩可知,内倾 30°桩靴试桩更易将桩端土挤入桩体,最终形成的土塞高度最大,在沉桩结束后,内倾 30°桩靴试桩最终形成的土塞高度为 410 mm,外倾 30°桩靴试桩为 350 mm,无桩靴试桩为 310 mm。说明桩端形式会对土塞形成产生显著影响,这也解释了内倾 30°桩靴试桩的内侧摩阻力与内侧单位摩阻力大于其余桩的原因。

不同打入深度下的土塞率变化曲线如图 10 所示,从图中可以看出,随着沉桩的进行,土塞率呈现先减小后增大的趋势,在贯入深度 600 mm 处土塞率

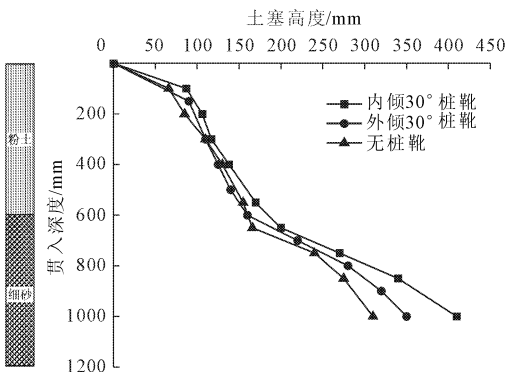


图 9 土塞高度随贯入深度变化曲线

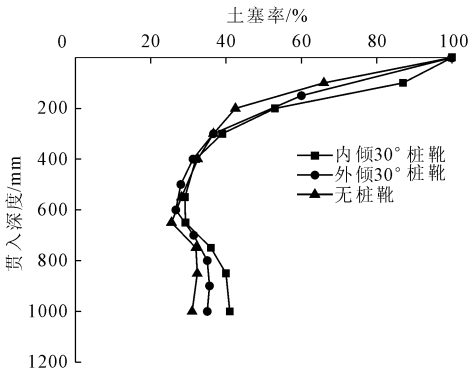


图 10 土塞率随贯入深度变化曲线

最小,内倾 30°桩靴试桩、外倾 30°桩靴试桩、无桩靴试桩土塞率最小值分别为 29.09%、26.67%与 25.53%。分析原因,在贯入初期,土塞高度较小,这时阻碍土塞形成的阻力很小,土塞增长速度几乎等于桩身贯入速度,桩体处于完全非闭塞状态;之后随着沉桩的进行,土体不断进入桩体内被压密,土塞高度持续增大,土塞作用于试桩的剪切力增大,土塞阻力不断增大,阻碍了新土塞的形成,土塞高度逐渐小于桩体入土深度,土塞率降低,这时桩体处于部分闭塞状态;当打入深度为 600 mm 时,土塞率增大是因为该处

位于土层交界面,上部粉土层较软,下部为细砂层较硬,上层粉土下层砂土的结构会促进土塞的形成;在沉桩完成后,内倾 30° 桩靴试桩、外倾 30° 桩靴试桩、无桩靴试桩的土塞率分别为 41%、35% 与 31%。

不同打入深度下的土塞增长率的变化曲线如图 11 所示,从该图能更直观的看出土塞增长速率的变化情况。在贯入前中期,土塞增长率不断降低,这与不断增加的土塞自重和土塞与试桩内侧摩阻力有关,桩体处于部分闭塞状态,内倾 30° 桩靴试桩、外倾 30° 桩靴试桩、无桩靴试桩土塞增长率最小值分别为 11%、15% 与 11%。当桩端贯入细砂层后,上软下硬的土层结构促进了土塞的形成,土塞增长率逐渐增大,在贯入深度约为 750 mm 时达到最大,3 组试桩土塞增长率最大值依次为 80%、60% 与 74%。随着土塞高度增加,土塞被进一步挤密,阻碍土塞形成的土塞自重和土塞-试桩产生的内侧摩阻力加大,土塞增长率逐渐减小,在沉贯完成后,3 组试验桩的土塞增长率依次为 50%、30% 与 24%。

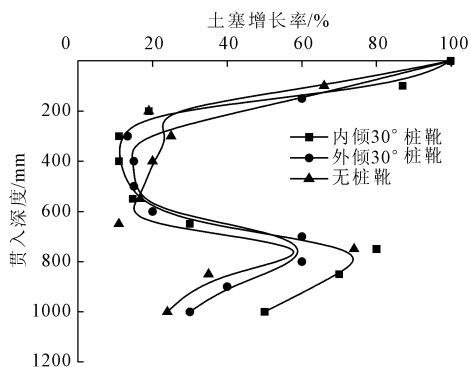


图 11 土塞增长率随贯入深度变化曲线

3 结 论

(1) 在锤击沉桩过程中,粉土进入砂土层沉桩阻力变大,桩靴能有效减小沉桩阻力,桩端阻力占比较大。

(2) 在同一土层位置处,随着沉桩的进行,外侧单位摩阻出现衰退现象;桩内部同一位置处单位侧摩阻不断增大,内倾 30° 桩靴桩内单位侧摩阻最大。

(3) 桩端形式会对土塞形成产生显著影响,在沉桩完成后,内倾 30° 桩靴试桩、外倾 30° 桩靴试桩、无桩靴试桩的土塞率分别为 41%、35% 与 31%。

参考文献:

[1] Liu Hongbiao, Zhang Qiang, Ren Liang. Mechanical performance monitoring for prestressed concrete piles used in a newly-built high-piled wharf in a Harbor with fiber bragg grating sensor technology when pile driving [J].

Applied Sciences, 2017, 7(5):489.

- [2] Salgado R, Zhang Y, Abou-Jaoude G, et al. Pile driving formulas based on pile wave equation analyses[J]. Computers & Geotechnics, 2017, 81:307-321.
- [3] 彭宇胖. 珊瑚钙质砂锤击钢管桩贯入机理试验研究[D]. 南京:东南大学, 2018.
- [4] 张大帅, 王千星, 夏溪岑, 等. 斜桩锤击过程中桩顶力学响应研究[J]. 水运工程, 2020(12):79-85.
- [5] 刘路路, 蔡国军, 耿功巧, 等. 考虑土塞效应的开口管桩承载力 CPTU 计算方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(2):280-285.
- [6] Paikowsky S G, Whitman R V. The effects of plugging on pile performance and design[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27(4):429-440.
- [7] 杨校辉, 朱彦鹏, 黄雪峰. 静压桩荷载传递与承载性状试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(1):139-143.
- [8] 陈 乔, 陈志波, 曾旭明, 等. 考虑土塞效应的大直径 PHC 管桩竖向承载特性[J]. 水利与建筑工程学报, 2022, 20(5):131-136.
- [9] 刘俊伟, 王立忠, 朱 娜, 等. 开口管桩贯入特性的大尺度模型试验[J]. 工程科学学报, 2019, 41(2):269-277.
- [10] 吴 建, 陈 超, 高倚山, 等. 嵌岩 PHC 桩基试验研究[J]. 工程勘察, 2012, 40(11):31-36.
- [11] 冯光华, 任 麟. 桩靴形式对 PHC 桩穿透性能的影响[J]. 水运工程, 2020(1):144-150, 167.
- [12] 洪宏兴, 夏国光, 盛 健, 等. 大直径 PHC 管桩在印尼密实厚砂层场区沉桩实践[J]. 水运工程, 2022(1):229-232.
- [13] Zhang Xiangyu, Fatahi B. Assessing axial load transfer mechanism of open-ended tubular piles penetrating in weak rocks using three-dimensional discrete element method[J]. Computers and Geotechnics, 2021, 137(9):104267.
- [14] 王永洪, 张明义, 白晓宇, 等. 基于光纤光栅传感技术的静压沉桩贯入特性及影响因素研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(12):4801-4812.
- [15] 王 跃, 孙艺宁, 张延新, 等. 考虑土塞效应的静压沉桩力学分析[J]. 建筑结构, 2021, 51(S2):1684-1690.
- [16] 肖昭然, 王艳林, 赵宪强, 等. 砂土地基中静压桩沉桩及其承载特性室内试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(11):294-302.
- [17] Finlay T, White D J, Md Bolton, et al. Press-in-piling: the installation of instrumented steel tubular piles with and without driving shoes[C]//5th International Conference on Deep Foundation Practice, Singapore, 2001.
- [18] Igoe D, Gavin K G, O' Kelly B C. Shaft capacity of open-ended piles in sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137(10):903-913.