

软硬交互成层土静压桩挤土效应研究

薛惠江¹, 吴先灿¹, 张磊^{2*}, 陈保国²

¹中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都

²中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉

Email: *changlei_zhang@qq.com

收稿日期: 2020年10月6日; 录用日期: 2020年10月22日; 发布日期: 2020年10月29日

摘要

基于ABAQUS有限元软件实现了软硬交互层状土中静压桩的连续贯入, 考虑了挤土所产生的位移场、应力场、超静孔隙水压力及消散等问题。结果表明: 不同土层静压桩挤土效应表现差异较大。在填土层, 距桩2 d处, 土体水平位移约为桩半径的5%, 距桩5.5 d处, 该比值约为1%; 在淤泥质土层, 距桩6.2 d处, 土体水平位移约为桩半径的5%, 距桩20 d处, 该比值约为1%。软土层土体径向位移大于硬土层, 径向应力小于硬土层。位移场、应力场均在土层界面处出现突变。静压桩沉桩过程中由于挤土作用在低渗透性的饱和土中会产生较高的超静孔隙水压力, 由于土层性质的差异, 全风化花岗岩层压桩结束15天后消散达99.5%, 淤泥质土层消散65.2%。

关键词

软硬交互土, 静压桩, 挤土效应, 超静孔隙水压力

Research on Compaction Effect of Jacked Pile in Soft Hard Layered Soil

Huijiang Xue¹, Xiancan Wu¹, Lei Zhang^{2*}, Baoguo Chen²

¹Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu Sichuan

²Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei

Email: *changlei_zhang@qq.com

Received: Oct. 6th, 2020; accepted: Oct. 22nd, 2020; published: Oct. 29th, 2020

Abstract

Based on ABAQUS finite element software, the continuous penetration of jacked pile in soft hard interaction layered soil is realized. The displacement field, stress field, excess pore water pressure

*通讯作者。

and dissipation caused by soil compaction are considered. The results show that the squeezing effect of jacked pile in different soil layers is quite different. In the filling layer, the horizontal displacement of soil is about 5% of the pile radius at 2 d away from the pile, and the ratio is about 1% at 5.5 d from the pile; in the muddy soil layer, the horizontal displacement of soil is about 5% of the pile radius at 6.2 d away from the pile, and the ratio is about 1% at 20 d from the pile. The radial displacement of soft soil is larger than that of hard soil, and the radial stress of soft soil is less than that of hard soil. The displacement field and stress field appear mutation at the interface of soil layer. In the process of jacked pile driving, high excess pore water pressure will be produced in saturated soil with low permeability due to soil compaction. Due to the difference of soil properties, 99.5% of the total weathered granite laminated pile dissipated 15 days after the end of the pile, and 65.2% of the muddy soil layer dissipated.

Keywords

Soft Hard Interaction Soil, Jacked Pile, Compaction Effect, Excess Pore Water Pressure

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

静压桩具有噪声小、污染少、施工方便、质量可靠等优点，在软土地基加固处理中得到了较为广泛的应用。但静压桩属于挤土桩，挤土桩施工会引发土体位移、应力变化、超静孔隙水压力的产生等一系列问题。

诸多学者对静压桩的挤土效应进行了深入研究，主要分为模型试验、理论研究以及数值模拟三个方面。在试验方面，刘智[1]采用室内模型试验研究了有孔管桩静压沉桩所引起的挤土效应问题和管桩的极限承载力。陈祥彬等[2]通过模型实验研究了静压桩在软粘土中沉桩时的土体位移变化规律和土中的应力变化规律。王永洪等[3]基于光纤光栅传感技术，开展了黏性土中静压贯入两种不同直径单桩的模型试验研究。在理论方面，刘裕华等[4]、周航等[5]基于圆孔扩张理论研究得到压桩挤土时塑性区半径、沉桩阻力、桩周土体位移场等。张亚国[6]基于圆孔扩张理论基础上，引入修正函数考虑了地表边界和沉桩深度对挤土位移的影响。在数值模拟方面，Kathrin A. Fischer [7]在数值模拟中通过新的建模方法处理了桩尖部分，有效解决了桩贯入过程中桩尖效应问题。吴亚军[8]、肖昭然等[9]使用 ABAQUS 数值模拟软件，研究静压桩在砂土中沉桩时的挤土效应，得到沉桩过程中土体应力和位移的变化曲线图。杨大海等[10]利用 ABAQUS 数值模拟软件对 PHC 管桩挤土效应进行了模拟，分析了桩周土弹性模量、泊松比、内摩擦角等对沉桩挤土位移和挤土应力的影响。

目前的研究大都假定土体为均质的各项同性的弹塑性体，对涉及成层土中的静压桩挤土效应同时考虑超静孔隙水压力条件的研究较少。本文以深圳市固戍二期水质净化厂工程为背景，通过数值模拟分析了软硬交互土层中静压桩挤土产生的位移场、应力场以及超孔隙水压力变化规律。

2. 数值建模

采用 ABAQUS 有限元软件建模，为了简化计算，采用二维轴对称模型来模拟。由于桩的刚度比土的刚度大得多，将桩体看做刚体，采用离散刚体模拟，桩底设置成抛物线形状。土体采用摩尔库伦本构模型，采用四节点二维轴对称孔压单元。建立如图 1 所示模型。桩土界面采用面 - 面摩擦接触单元，接触

类型为库伦摩擦。摩擦系数取土的内摩擦角的正切值。桩长 16 m，桩径 400 mm，为了减小边界条件的影响，取土体的分析区域宽度为 1 倍桩长(16 m)，高度为 30 m (约 75 倍桩径)。根据工程实际划分六层土，土层参数见表 1，各土层厚度由上至下依次为 6 m、2 m、4 m、3 m、3 m、12 m。地下水位位于地下 1.5 m 处。底面约束水平和竖向位移，右侧面约束水平位移，模型上表面为自由边界。在桩顶基于位移贯入法施加向下位移 16 m。

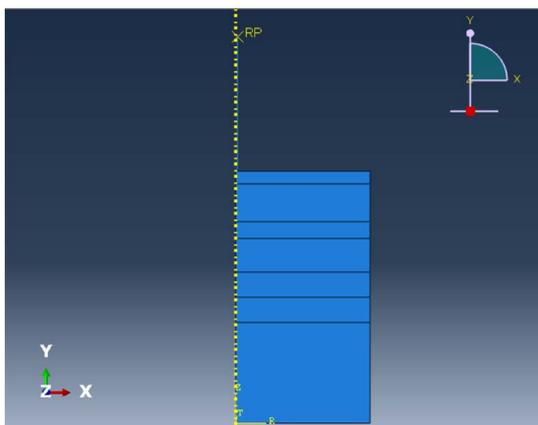


Figure 1. Numerical model
图 1. 数值模型

Table 1. Physical and mechanical parameters of formation
表 1. 地层物理力学参数

材料	泊松比	密度	弹性模量	粘聚力	摩擦角	渗透系数
		kg/m ³	/MPa	/KPa	/度	cm/s
粘性素填土	0.34	1670	12.8	15	12	7.5E-4
淤泥质土	0.30	1710	9.8	6	1.8	1.6E-8
粘土质粗砂	0.32	1820	20.8	22	20	8.5E-4
砂质粘性土	0.30	1830	18.4	21	20	4.34E-5
全风化混合花岗岩	0.30	1900	28	24	22	3.56E-5
砂土状强风化花岗岩	0.26	1930	40	30	32	1.20E-4

2.1. 土体水平位移场分布

地表土体及淤泥层土体(深度 7 m)水平位移变化如图 2 所示，水平位移均随着径向距离增大而迅速减小。

对于地表处土体，当距桩 0.8 m (约 2 d，d 为桩体直径)时，土体水平位移 10.08 mm，约为桩半径的 5%；距桩 2.2 m (5.5 d)处，土体水平位移 2.04 mm，约为桩半径的 1%。距桩 8.2 m (20.5 d)处，土体水平位移 1.01 mm，影响已极微弱。

对于深度 7 m 处淤泥质土层，其水平位移不论数值大小还是影响范围均要大于地表处土体，当距桩 0.32 m (0.8 d)时，土体水平位移 66.46 mm；距桩 2.4 m (6 d)处，土体水平位移 11.28 mm；距桩 6.2 d 处，土体水平位移约为桩半径 5%；距桩 20 d 时，位移约为桩体半径 1%。距桩 10.38 m 时，位移 1.1 mm，影响微弱。

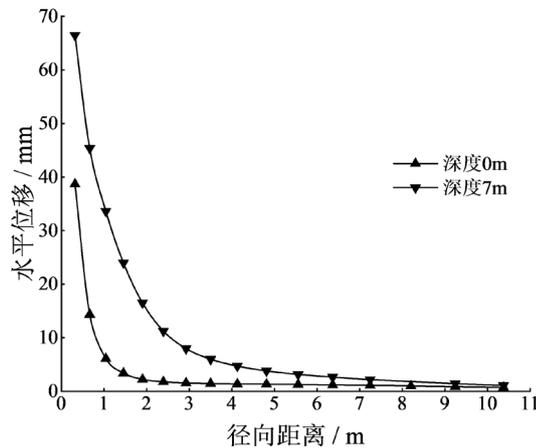


Figure 2. Distribution of horizontal displacement of soil along the radial direction
图 2. 土体水平位移沿径向分布

土体水平位移沿深度分布规律如图 3 所示。同一深度处随着距离桩径向距离的增大, 水平位移急剧减小。距桩越近的土体, 其水平位移在不同土层深度范围内波动越大, 呈现数个波峰。在不同土层交界处水平位移出现突变现象, 在深度为 6 m 的土层交界面处, 水平位移均快速增加, 距桩 0.32 m 处由 32.36 mm 迅速增大到 90.2 mm, 约为桩径的 22.6%。这是由于第二层土为淤泥质土, 压桩荷载在软土层扰动较大, 受桩体排开土体的影响, 会产生更大的水平位移。距桩 2.4 m (6 d) 土体水平位移在深度 7 m 的淤泥质土层达到最大值 10.52 mm, 约为桩径的 2.63%。随着向下进入较为坚硬的粗砂层, 在 8 m 深度处位移减小为 2.92 mm。随深度增大, 在 13.67 m 的粘性土层处位移再次增大到 8.63 mm。

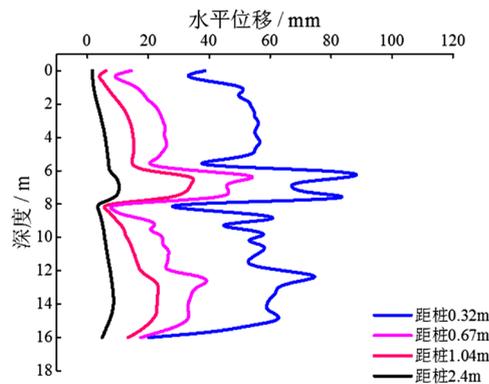


Figure 3. Distribution of horizontal displacement of soil along depth
图 3. 土体水平位移沿深度分布

2.2. 土体竖向位移场分布

土体竖向位移沿径向分布如图 4 所示, 距桩 0 m 处地表土体由于桩的拖拽作用而产生向下位移达 6 mm。随着径向距离增大, 拖拽现象减弱, 地表产生隆起, 隆起值先急剧增大后随径向距离增大而呈对数衰减并最终趋于稳定。距桩 0.32 m (0.8 d) 处竖向位移达到最大正值 38.7 mm, 距桩 0.67 m 处减小为 16.8 mm, 距桩 1.9 m (约 2.4 d) 处减小到 1.5 mm。随后微弱增长, 达到 2 mm 并保持稳定。

深度 7 m 处淤泥层土体距桩 0 m 处由于桩的拖拽挤压作用产生向下位移高达 256.2 mm, 随远离桩芯, 向下位移值急剧减小, 距桩 1.9 m (约 2.4 d) 处已减小为 1 mm, 距桩 2.4 m (约 6 d) 处土体已产生正竖向位移值 0.4 mm, 随后微弱增长, 距桩 4.8 m (约 12 d) 处隆起值达到 1.5 mm 并保持稳定。

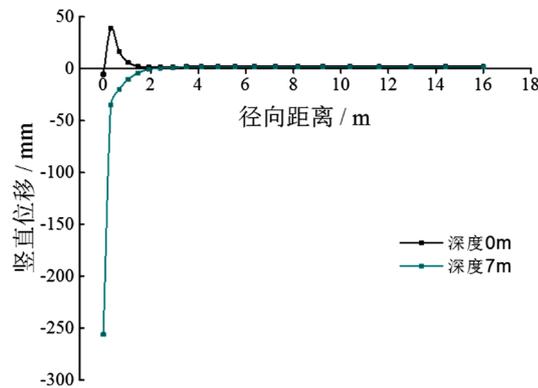


Figure 4. Distribution of soil vertical displacement along radial
图 4. 土体竖向位移沿径向分布

土体竖向位移沿深度变化如图 5 所示, 对于距桩 0.67 m (约 1.7 d)、1.04 m (约 2.6 d) 土层, 地表浅层土体(深度约 1.5 m 以上)产生向上的正向位移, 较深土体受到沉桩挤压作用而产生向下的负位移。且距桩越近的土体, 其竖向位移在不同土层深度范围内波动越剧烈, 土层交界面处为位移波动转折点。

距桩 1.7 倍桩径处土体, 负位移在素填土层达到一个较大值 34.16 mm, 进入淤泥质土层由于桩土摩擦阻力的急剧降低而位移值总体减小。随着进入粗砂层, 竖向位移值总体增大。向下进入粘性土层, 位移达到高值 40.45 mm 以后快速下降。

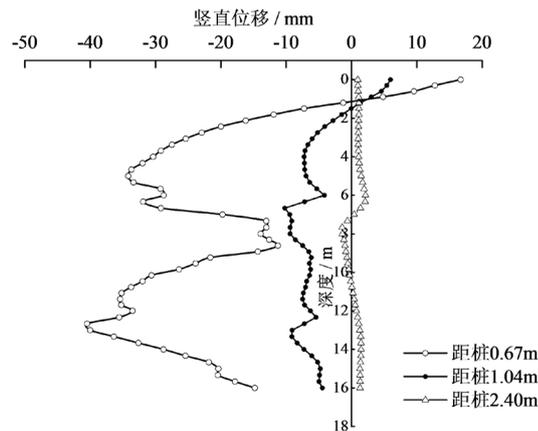


Figure 5. Vertical displacement of soil changes along depth
图 5. 土体竖向位移沿深度变化

距桩 2.6 倍桩径处土体, 其位移波动幅度远小于 1.7 倍桩径处。负位移值于深度 6.67 m (淤泥质土层) 处达到最大值 10.21 mm。

对于距桩 6 倍桩径处, 其浅层土体(7 m 深度内)存在微弱的隆起现象(1 至 2 mm), 较深土体(深度约 7 m 到 10.5 m)发生向下挤压产生微小的负位移, 深层土体(约 10.5 m 以下)发生正位移, 且不同土层性质差异对于竖向位移的影响已非常小。

2.3. 土体径向应力场分布

沉桩挤土效应径向应力场在深度方向上表现较为复杂, 受不同土层性质差异影响, 其径向应力并非随深度增大而增大, 而在软硬土层交界面处数值产生突变, 硬土层应力值要大于软土层。如图 6 所示, 距桩 1.04 m (2.6 d) 处土体在深度 6 m 处应力值急剧减小到 -40 KPa, 距桩 2.4 m (6 d) 处土体在此深度同样快速减

小至-31 KPa，在淤泥层二者应力差值相对减小。8 m 深度以下随着穿过软土层进入粘土质粗砂层应力值再次增大。在桩端附近，径向应力值先急剧增大后急剧减小，这是由于本例假设桩端呈抛物线形式。

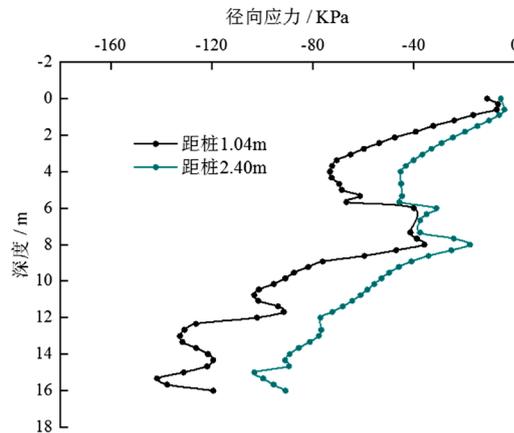


Figure 6. The radial stress of the soil changes along the depth
图 6. 土体径向应力沿深度变化

2.4. 超静孔隙水压力分布

静压桩时沉桩的挤土作用会在低渗透性的饱和土中产生超静孔隙水压力，其不但会影响施工进度，同时沉桩结束后其消散情况将影响着桩的承载力提升速度。如图 7 为压桩过程中桩贯入不同深度时超静孔隙水压力云图，在沉桩各个阶段，桩端处均产生应力云泡；压桩 2 m 时，超孔隙水压力最大值为 26.62 KPa；压入 6 m 时，最大值达到 159.0 KPa；压入 10m 时，最大值为 67.52 KPa；压入 14 m 时，最大值达到 309.0 KPa。沉桩过程中超孔隙水压力最大值基本发生在桩端附近，且随着桩的贯入深度增大而逐渐增大。压桩 10 m 时产生差异，由于其桩端位于粗砂层，最大值仍位于淤泥质土层处。

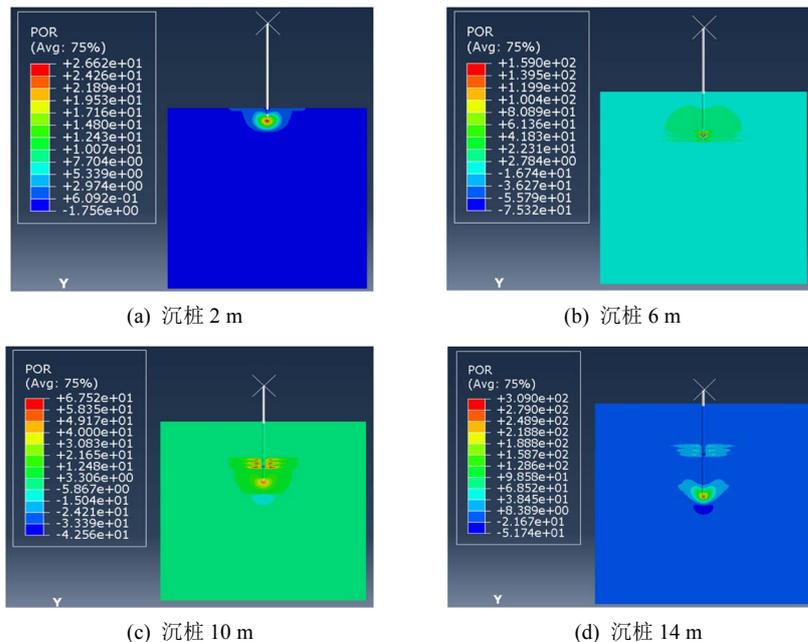


Figure 7. Cloud diagram of excess pore water pressure during pile pressing
图 7. 压桩过程中超孔隙水压力云图

压桩结束及完成后 15 天内超孔隙水压力消散如图 8 所示, 压桩结束瞬时, 桩端土体由于沉桩挤土作用产生较高的超孔隙水压力, 最大值达到 315.4 KPa, 随径向距离增大其值迅速降低, 距桩 2.92 m (约 7.3 d) 处减小为 3.97 KPa, 至 8.2 m (约 20.5 d) 处已小于 2 KPa。固结 15 天后, 桩端土降低为 1.65 KPa, 减小了 99.5%。

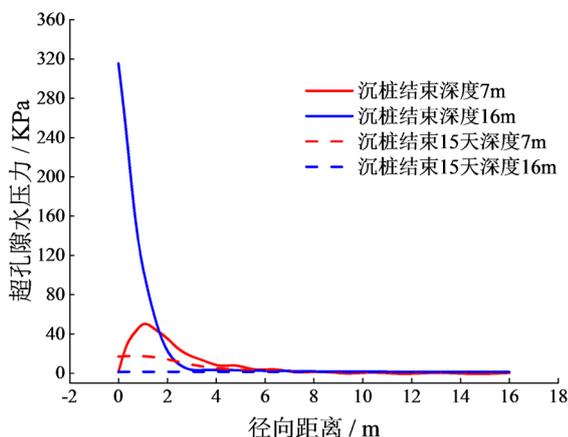


Figure 8. Radial distribution of excess pore water pressure
图 8. 超孔隙水压力沿径向分布

沉桩结束时深度 7m 的软土层最大值达到 50.17KPa。由于渗透系数非常小, 超孔隙水压力消散较慢, 固结 15 天后超孔隙水压力最大值仍达到了 17.47KPa, 降低了 65.2%。

3. 结论

1) 在填土层, 距桩 2 d 处, 土体水平位移约为桩半径的 5%, 距桩 5.5 d 处, 该比值约为 1%; 在淤泥质土层, 距桩 6.2 d 处, 土体水平位移约为桩半径的 5%, 距桩 20 d 处, 该比值约为 1%。随径向距离增加, 挤土效应明显减弱; 水平位移、超静孔隙水压力等均快速减小。

2) 水平、竖向位移, 径向应力均在软硬土层交界面处出现明显转折点, 软土层径向位移大于硬土层, 径向应力小于硬土层。距桩越近, 土体位移受不同土层性质差异影响越大。

3) 静压桩沉桩过程中会在桩端产生较高的超静孔隙水压力, 由于土层性质的差异, 超孔压消散程度不一。桩端全风化花岗岩层压桩结束 15 天后消散达 99.5%, 淤泥质土层消散 65.2%。

参考文献

- [1] 刘智. 有孔管桩静压沉桩挤土效应试验研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌航空大学, 2014.
- [2] 陈祥彬, 李利平. 软黏土中静压桩挤土效应模型实验研究[J]. 四川水泥, 2018(10): 259-260.
- [3] 王永洪, 张明义, 孙绍霞, 白晓宇, 苗德滋. 不同直径单桩静压贯入力学特性模型试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(1): 9-17.
- [4] 刘裕华, 陈征宙, 彭志军, 高倚山, 高鹏. 应用圆孔柱扩张理论对预制管桩的挤土效应分析[J]. 岩土力学, 2007(10): 2167-2172.
- [5] 周航, 孔纲强, 刘汉龙. 基于圆孔扩张理论的静压楔形桩沉桩挤土效应研究[J]. 中国公路学报, 2014, 27(4): 24-30.
- [6] 张亚国, 李镜培. 考虑地表边界效应的静压沉桩挤土位移解析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(9): 1195-1200+1260.
- [7] Fischer, K.A., Sheng, D.C. and Abbo, A.J. (2007) Modeling of Pile Installation Using Contact Mechanics and Quadratic Elements. *Computers and Geotechnics*, 34, 449-461.

- [8] 吴亚军, 雷胜友. 静压桩挤土效应数值模拟[J]. 河南城建学院学报, 2019, 28(1): 33-40.
- [9] 肖昭然, 郝友超, 蒋敏敏, 吕清显, 徐中原, 刘海军. 砂土中静压桩挤土效应的研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2019, 38(6): 126-133.
- [10] 杨大海, 汪志甜, 刘滨锐, 张骏, 黄凯. 土体参数对 PHC 管桩挤土效应的影响[J]. 建筑结构, 2020, 50(S1): 1106-1110.