

# 压桩过程中静压桩挤土位移的动态模拟和 实测对比研究

罗战友<sup>1,2</sup>, 夏建中<sup>1</sup>, 龚晓南<sup>2</sup>, 朱向荣<sup>2</sup>

(1. 浙江科技学院 岩土工程研究所, 浙江 杭州 310023; 2. 浙江大学 岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 圆孔扩张法及应变路径法由于土体的大变形和桩土界面摩擦接触问题而难以模拟动态的压桩过程, 数值模拟法能够考虑到土体的本构关系、大变形和桩土的相互作用等诸多因素的影响, 因而在静压桩挤土效应方面得到了广泛的应用。采用合适的土体屈服准则及有限变形理论, 通过在桩土界面设置接触以及在桩顶施加位移荷载建立了能够实现动态压桩过程的有限元模型。利用得到的有限元模型模拟了沉桩产生的水平及竖向挤土位移场, 讨论了动态压桩过程对沉桩挤土位移场的影响, 并和现场实测进行了对比。研究表明, 挤土位移场动态模拟结果与实测值相一致, 且能反映土性的变化情况; 在动态压桩过程中, 水平向的挤土位移随着压桩深度的增加而增大, 竖向挤土位移随着压桩深度的增加浅层土体表现为隆起增加, 而深层土体表现为下沉量增加。挤土位移的最大值与压桩深度存在滞后效应, 因此在压桩过程中要给予足够的重视。

**关键词:** 桩基工程; 静压桩; 挤土位移; 动态过程; 数值模拟; 现场试验

**中图分类号:** TU 473; O 241

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2008)08 - 1709 - 06

## COMPARATIVE STUDY OF DYNAMIC SIMULATION FOR COMPACTING DISPLACEMENT OF JACKED PILE AND IN-SITU TEST

LUO Zhanyou<sup>1,2</sup>, XIA Jianzhong<sup>1</sup>, GONG Xiaonan<sup>2</sup>, ZHU Xiangrong<sup>2</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract:** Due to soil large deformation and friction between pile and soil, cavity expansion method and strain path method can not simulate the dynamic penetration process of jacked pile; but finite element method has been widely used in the penetration process, solving the soil constitutive relationship, large deformation and interaction between pile and soil. An appropriate finite element model is given that accords with the actual process of jacked pile. This model adopts the rational constitutive model of soil and finite deformation theory. Through pile-soil interaction and displacement loading on pile top, the dynamic pile-sinking process is simulated. Horizontal and vertical displacement fields are studied through the finite element model. The effects of displacement fields caused by dynamic pile-sinking procedure are discussed; and moreover, the simulation results are compared with field test. The results show that compacting displacements are in accord with measured results; and further, change of compacting displacement can reflect the change of soil characteristic. During the installation of jacked pile, the

**收稿日期:** 2008 - 02 - 28; **修回日期:** 2008 - 06 - 02

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50708097); 中国博士后科学基金一等资助(20060400317); 浙江省教育厅基金(20061459); 浙江省高校中青年学科带头人资助项目

**作者简介:** 罗战友(1974 -), 男, 博士, 2001年于西安建筑科技大学岩土工程专业获硕士学位, 现任副教授, 主要从事静力压桩、地基处理及岩体结构等方面方面的教学与研究。E-mail: lzy0395@163.com

horizontal compacting displacements increase with the increase of pile penetration depth; but for the vertical compacting displacements, the heave increases in shallow soil layers and settlement increases in deep soil layers with the penetration depth increasing. The maximum compacting displacement delays the pile-sinking depth, so it is necessary to put great emphasis on dynamic pile-sinking process.

**Key words:** pile foundations; jacked pile; compacting displacement; dynamic procedure; numerical simulation; field test

## 1 引言

静压桩的施工过程是一个较为复杂的问题,常用的静压桩理论分析方法有:(1)圆孔扩张法<sup>[1~3]</sup>;(2)应变路径法<sup>[4~6]</sup>;(3)数值模拟法<sup>[7~9]</sup>。圆孔扩张法及应变路径法在一定的假定条件下能够给出静压单桩挤土效应的解析解,但由于压桩过程存在土体的大变形和桩土界面摩擦接触问题而难以模拟动态的压桩过程,使所得到的结果和实际有较大的差异<sup>[10]</sup>。数值模拟法能够考虑到土体的本构关系、大变形和桩土的相互作用等诸多因素的影响,且能够模拟动态压桩过程而在静压桩挤土效应方面得到了较为广泛的应用<sup>[11]</sup>。

目前压桩挤土采用的有限元法有如下几类:(1)基于圆孔扩张理论的有限元法<sup>[12]</sup>;(2)考虑桩土相互作用及力贯入的有限单元法<sup>[13]</sup>;(3)考虑桩土相互作用及位移贯入的有限单元法<sup>[14, 15]</sup>。基于圆孔扩张理论的有限元法由于没有考虑桩-土界面的相互作用,故只能实现分段压入,而不能模拟动态压桩过程。考虑桩土相互作用及力贯入的有限元法能够考虑桩土相互作用,但是由于采用的是施加力荷载的方式,只能分析桩预钻孔到一定深度后的挤土效应,而不能分析整个压桩过程。采用桩土相互作用及位移贯入的有限元法能够综合上述优点,实现动态的压桩过程。

## 2 数值模拟在压桩过程中的几个问题

### 2.1 本构关系问题

压桩过程中桩周附近的土层已进入塑性破坏状态,应变值很大,应力值也很大,已达到材料的破坏应力。因此,选择怎样的塑性本构模型来描述压桩过程土体的应力-应变关系是一个不能轻视的问题。从已有的研究成果来看,现在广泛使用的模型有修正的剑桥模型和 Mohr-Coulomb 模型。

本文采用了 Mohr-Coulomb 模型中近似修正的 Drucker-Prager 屈服准则,其流动准则既可以采用相关流动准则,也可以采用不相关流动准则。

### 2.2 有限变形问题

桩压入土体后引起桩周围土体产生严重拉裂和剪切,桩周附近部分土体中的应力值很高,部分土体进入塑性破坏状态。桩周土体中会产生大位移、大转动、大应变,土体中的应变与位移梯度不成线性关系,小变形假设对这个问题是不适合的,因此应该采用有限变形理论描述和分析压桩问题<sup>[9]</sup>,其表达式为

$$u_i = {}^{t+\Delta t}u_i - {}^t u_i \quad (1)$$

式中:  ${}^t u_i$ ,  ${}^{t+\Delta t}u_i$  分别为各质点在时间  $t$  和时间  $t + \Delta t$  时的位移。

### 2.3 桩-土界面接触问题

要得到符合沉桩实际过程的数值模拟就需要考虑桩与土的界面接触,静压桩的沉桩过程实际上是指桩-土界面互相挤压、滑移的过程,而诸如 Desai 单元模型和 Goodman 单元模型等是难以恰当地模拟如此大的相对滑移。因此,采用面-面接触模型才有效,而面-面接触问题通常涉及到接触面算法、接触面的位置、接触面刚度及摩擦类型,详细分析可见罗战友<sup>[10]</sup>的研究。

### 2.4 荷载施加问题

(1) 力贯入法。通常荷载的施加是通过桩顶受力而使桩体逐渐压入土中的过程, M. E. Mabsout 和 S. Sadek<sup>[9]</sup>是采用的这种施加荷载的方式,但是在压桩过程中压桩力是变化的量,不能很有效地运用有限元程序解决这个问题,而且计算时间长,不能满足实际工程的需要。

(2) 位移贯入法。位移贯入法与力贯入法是对应的,前者是通过在桩顶施加位移来实现压桩过程的,能够和实际的按照一定速率来控制压桩的情况较为符合,且计算时间短,能满足工程的需要。本文采用位移贯入法来施加荷载。

### 2.5 孔隙水压力问题

静压桩在施工中会产生较大的超孔隙水压力, 在饱和软黏土中, 随着孔压的消散, 桩周产生的挤土效应在水平方向与深度方向都会发生变化<sup>[16]</sup>。为了简化模型的复杂性, 本文采用总应力法进行模拟:

$$u_0(r) = \begin{cases} 2S_u \ln\left(\frac{R}{r}\right) & (r_0 \leq r < R) \\ 0 & (r \leq R) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $u_0(r)$  为超孔隙水压力,  $S_u$  为土体的不排水剪切强度,  $R$  为静压桩的影响半径,  $r$  为土体某点距桩中心的水平距离。

## 3 基本假定和计算简图

### 3.1 基本假定

本文采用以下基本假定:

- (1) 采用总应力法进行分析计算。
- (2) 根据实际沉桩施工过程的情况, 为了简化计算, 采用二维轴对称问题来模拟。

(3) 桩体为钢筋混凝土桩或钢桩, 均为线弹性体, 采用八节点二维轴对称单元。

(4) 土体为连续的弹塑性体, 其符合 Drucker-Prager 准则, 考虑几何非线性和材料非线性, 采用八节点二维轴对称单元。

(5) 桩 - 土界面采用面 - 面摩擦接触单元, 接触面的摩擦类型为库仑摩擦。

(6) 桩与土一旦接触就不再分离, 也就是处于接触且滑动状态。

### 3.2 计算简图

图 1 为有限元模型简图。桩径为 400 mm, 桩长为 22 m, 设土层径向影响范围为 20 m, 厚度为 40 m; 上表面为自由表面, 下表面和右侧面均为固定边界。如果实心桩的截面为方形, 将其转换为等面积的圆截面桩进行计算。

### 3.3 桩 - 土计算参数

为了对静压桩挤土位移场的动态变化进行分析, 得出更一般的结论, 假定土层为均质黏性土, 表 1 列出了地基土及桩的基准参数。由于预应力混凝土在施工中的优势, 近年来预应力静压桩工程常采用高强混凝土。为此, 选用强度等级为 C60 的混凝土, 其弹性模量为 3 600 MPa。另外根据《混凝土结构设计规范》(GB50010 - 2002)中的第 4.1.8 的

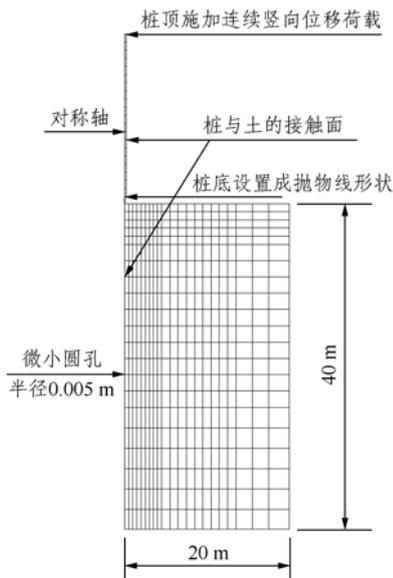


图 1 有限元模型简图

Fig.1 Finite element model

表 1 地基土及桩的基准参数

Table 1 Parameters of soil and pile

名称	$E$ /MPa	$\nu$	$\rho$ /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$c$ /kPa	$\varphi$ ( $^\circ$ )	摩擦 因数 $\mu$	最大动 摩阻力 $\tau_{\text{max}}$ /kPa	接触刚度 /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ )
土层	2 045	0.45	1 890	15	15	0.1	20	8 000
静压桩	3 600	0.20	2 500			0.1	20	8 000

条文说明, 取用的混凝土泊松比为 0.2。根据《建筑结构荷载规范》(GB 50009 - 2001)中第 5.2 条规定钢筋混凝土重度  $24 \sim 25 \text{ kN/m}^3$ , 文中取  $2 500 \text{ kg/m}^3$  作为混凝土的密度。土层的相关参数是参考浙江省若干岩土工程地质详细勘察报告经过综合分析选取的, 能够符合工程实际。

## 4 挤土位移场的动态模拟结果分析

上述有限元模型的位移荷载是连续的, 为了研究挤土位移场动态变化规律, 经过试算, 对于沿深度变化的位移场, 选取 0, 2, 7, 12, 17 及 22 m 作为对比压桩深度。对于沿水平距离变化的位移场, 选取 0, 3, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 和 22 m 作为对比的压桩深度。

### 4.1 水平及竖向挤土位移场随深度的动态变化

图 2 表明了不同的压桩深度情况下, 压桩产生的水平向挤土位移随深度的变化规律(径向距离为

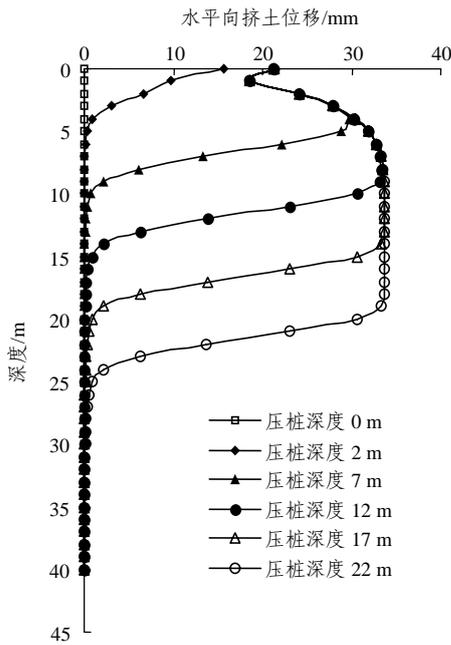


图2 水平向挤土位移随深度的动态变化

Fig.2 Dynamic change of horizontal compacting displacement with the depth

1.2 m)。从图 2 可知,随着压桩深度的增加,沿深度方向的水平位移逐渐增大。当压桩深度达到某一位置点时,这一位置点的水平位移并没有达到最大值,而是当压桩深度超过这一位置 3~4 m(7~10 倍桩径)时方达到最大值,且在随后的压桩过程中最大值基本保持恒定,这和 J. H. Huang 等<sup>[17]</sup>的观测结果相符合。

因此,若有周边建筑物需要保护时,不要误认为只要压桩深度达到周边建筑物基础深度时不产生破坏就安全了,要重视随后超过被保护建筑物基础深度的压桩过程对其产生的更大破坏。

图 3 为不同压桩深度下,竖向挤土位移随着深度的变化规律(径向距离为 1.2 m),正位移代表隆起,负位移代表下沉。从图 3 可知,随着压桩深度的增大,浅层土(0~3 m)的隆起变大,而深层土(3~22 m)的下沉量增大。但是竖向位移和水平位移的最大值变化规律不一样,当压桩深度达到某一位置时该位置处的竖向位移即达到最大值,而压桩深度超过该位置时其的竖向位移反而较最大值小,但减少幅度不大。

#### 4.2 水平及竖向挤土位移场随径向的动态变化

由图 4, 5 可知,随着压桩深度的增大,同一位置处的水平及竖向挤土位移均增大,而且随着径向

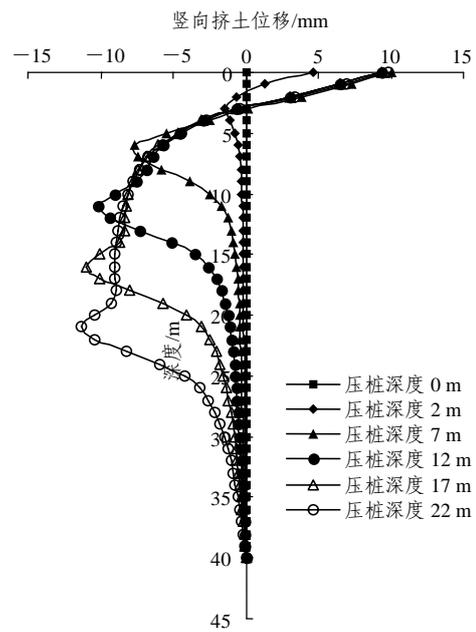


图3 竖向挤土位移随深度的动态变化

Fig.3 Dynamic change of vertical compacting displacement with the depth

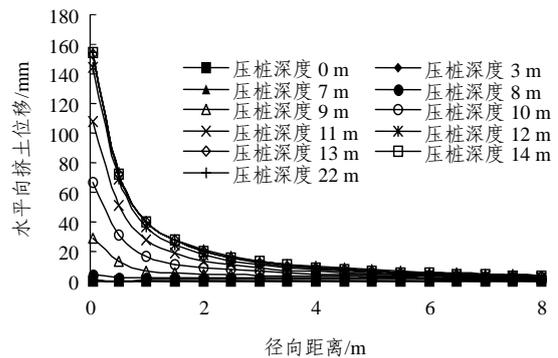


图4 水平向挤土位移随径向距离的动态变化(深度为 10 m)  
Fig.4 Dynamic variation of horizontal compacting displacements with the radial distance(10 m in depth)

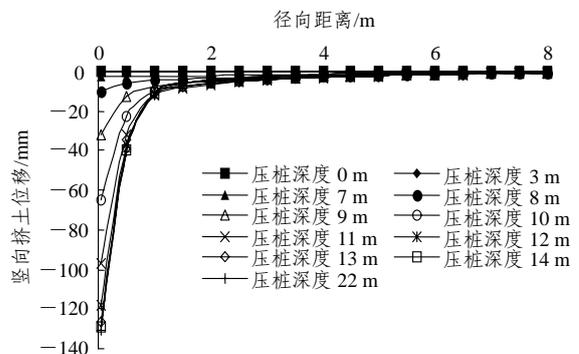


图5 竖向挤土位移随径向距离的动态变化(深度为 10 m)  
Fig.5 Dynamic variation of vertical compacting displacements with the radial distance(10 m in depth)

距离的增大而减少。对于深度为 10 m 的水平位置点而言, 当压桩深度达到 10 m 时, 水平及竖向位移并没有达到最大值, 而是当压桩深度为 13 m 时, 水平及竖向位移达到了最大值, 并在随后的压桩过程中基本保持不变。因此, 某一位置的最大挤土位移与压桩深度存在着滞后效应, 在施工过程中要给予足够的重视, 避免工程事故的发生。

## 5 现场试验研究

### 5.1 工程概况及工程地质

工程位于浙江省海盐秦山核电, 采用直径为  $\phi 600$  mm、桩长为 35 m 的预应力管桩基础。根据工程地质勘察报告所提供的资料, 工程场地在勘察深度内(60 m)的土层可分为 7 层, 压桩范围内土层的物理力学参数如表 2 所示, 静力触探结果如图 6 所示。

表 2 土的物理力学参数

Table 2 Physico-mechanical parameters of soils

土层	土层代码	层厚 /m	含水量 /%	重度 $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	孔隙比	承载力 /kPa	比贯入阻力/MPa
杂填土	MF	2.0	-	-	-	-	1.38
粉质黏土	SC	2.0	26.0	19.4	0.77	100	1.10
黏质粉土	SI	7.0	31.1	18.8	0.89	120	1.37
淤泥质粉质黏土	CL	9.0	41.6	17.5	1.20	90	0.66
砂质粉土	SS	11.0	31.3	19.0	0.91	150	2.99
粉砂土	SA	10.0	29.8	18.7	0.86	156	3.53

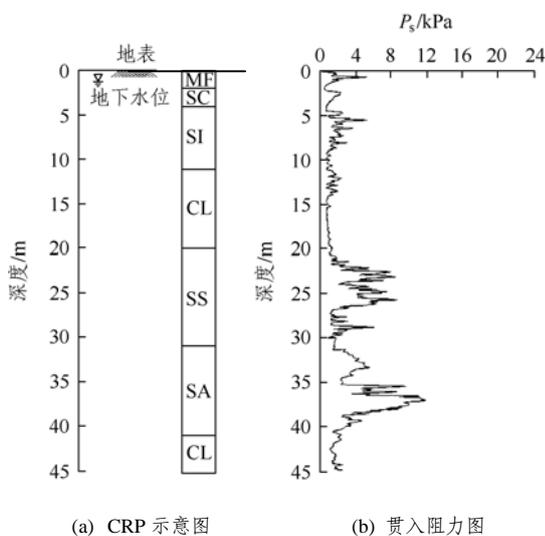


图 6 静力触探贯入阻力图  
Fig.6 Soil profiles from CPT

### 5.2 现场实测结果分析

在压桩过程中分别对压桩深度为 10, 17, 25 及 35 m 桩身范围内的压桩挤土位移场进行了现场实测和动态数值模拟, 对比结果如图 7 所示。由图 7 可知: (1) 不同压桩深度的水平位移实测值的变化规律是相似的, 这和数值模拟的结果基本相吻合, 因此动态的数值模拟对压桩过程中产生的挤土位移可以起到了预估的作用, 在施工前予以重视, 避免工程事故的发生。(2) 不同土层引起的压桩挤土位移也有差异。例如土质较差的淤泥质粉质黏土相对于其他土层的挤土位移较大, 这是由于淤泥质粉质黏土在压桩过程中会产生较大的超孔隙水压力而引起的, 因此, 在一定程度上挤土位移的大小可以反映土性的变化情况。

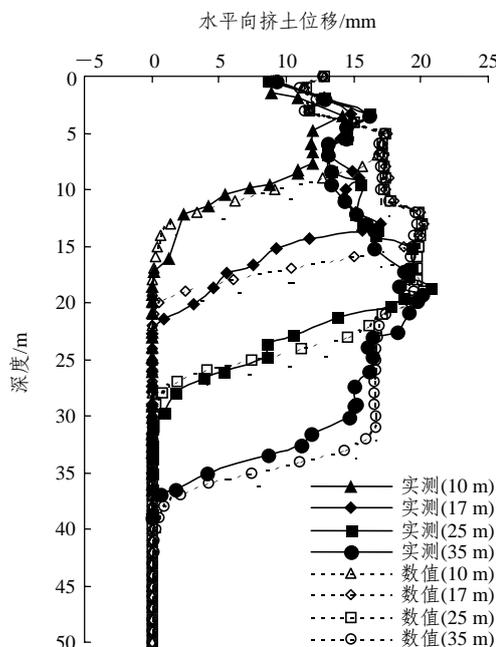


图 7 水平向挤土位移的对比图  
Fig.7 Comparative diagram of horizontal compacting displacements

## 6 结论

根据桩土相互作用及位移贯入机制建立了能够模拟动态压桩过程的有限元法模型, 并得到了如下结论:

- (1) 在动态压桩过程中, 水平向的挤土位移随着压桩深度的增加而增大, 竖向挤土位移随着压桩深度的增加浅层土体表现为隆起增加, 而深层土体表现为下沉量增加。

(2) 最大水平挤土位移与压桩深度存在着滞后效应。当压桩深度超过该点所在位置为 7~10 倍桩径时压桩产生的水平挤土位移方达到最大值, 因此, 在施工过程中要给予足够的重视, 避免工程事故的发生。

(3) 压桩位移的实测结果与动态数值模拟的变化规律相一致, 且挤土位移在一定程度上能够反映土性的变化情况。

### 参考文献(References):

- [1] 龚晓南, 李向红. 静压压桩挤土效应中的若干力学问题[J]. 工程力学, 2000, 17(4): 7 - 12.(GONG Xiaonan, LI Xianghong. Several mechanical problems in compacting effects of static piling in soft clay ground[J]. Engineering Mechanics, 2000, 17(4): 7 - 12.(in Chinese))
- [2] 罗战友, 夏建中, 龚晓南. 不同拉压模量及软化特性材料的球形孔扩张问题的统一解[J]. 工程力学, 2006, 23(4): 22 - 27.(LUO Zhanyou, XIA Jianzhong, GONG Xiaonan. Unified solution of expansion of spherical cavity of strain-softening materials with different elastic moduli in tensile and compression[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(4): 22 - 27.(in Chinese))
- [3] CAO L F, THE C I, CHANG M F. Undrained cavity expansion in modified Cam clay I: theoretical analysis[J]. Geotechnique, 2001, 51(4): 323 - 334.
- [4] BALIGH M M. Strain path method[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(9): 1108 - 1136.
- [5] CHOW Y K, THE C I. A theoretical study of pile heave[J]. Geotechnique, 1990, 40(1): 1 - 14.
- [6] SAGASETA C, WHITTLE A J. Prediction of ground movements due to pile driving in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(1): 55 - 65.
- [7] 罗战友, 龚晓南, 王建良, 等. 静压桩挤土效应的数值模拟及影响因素分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(7): 992 - 996.(LUO Zhanyou, GONG Xiaonan, WANG Jianliang, et al. Numerical simulation and factor analysis of compacting effects of jacked pile[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2005, 39(7): 992 - 996.(in Chinese))
- [8] 王浩, 魏道堉. 表面约束下的沉桩挤土效应数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(1): 107 - 110.(WANG Hao, WEI Daoduo. Numerical simulation research of the effect of squeezing soil due to pile driven in soft clay restrained on surface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(1): 107 - 110.(in Chinese))
- [9] MABSOUT M E, SADEK S. A study of the effect of driving on pre-bored piles[J]. International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2003, 27(2): 133 - 146.
- [10] 罗战友. 静压桩挤土效应及施工措施研究[博士学位论文][D]. 杭州: 浙江大学, 2004.(LUO Zhanyou. Study on compacting effects and construction measures of jacked pile[Ph. D. Thesis][D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.(in Chinese))
- [11] 周健, 徐建平, 许朝阳. 群桩挤土效应的数值模拟[J]. 同济大学学报, 2000, 28(6): 721 - 725.(ZHOU Jian, XU Jianping, XU Zhaoyang. Numerical simulation of pushing against soil of driven group piles[J]. Journal of Tongji University, 2000, 28(6): 721 - 725.(in Chinese))
- [12] 徐建平, 周健, 许朝阳. 沉桩挤土效应的数值模拟[J]. 工业建筑, 2000, 30(7): 1 - 6.(XU Jianping, ZHOU Jian, XU Zhaoyang. Numerical simulation of effect of pushing against soil of driven piles[J]. Industrial Construction, 2000, 30(7): 1 - 6.(in Chinese))
- [13] MABSOUT M E, TEESE L C, TASSOULAS J L. Study of pile driving by finite-element method[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1995, 121(4): 535 - 543.
- [14] 罗战友, 王伟堂, 刘薇. 桩-土界面摩擦对静压桩挤土效应的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3299 - 3304.(LUO Zhanyou, WANG Weitang, LIU Wei. Influence analysis of friction between pile and soil in compacting effects of jacked pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(18): 3299 - 3304.(in Chinese))
- [15] 张明义, 邓安福, 干腾君. 静压压桩数值模拟的位移贯入法[J]. 岩土力学, 2003, 24(1): 113 - 117.(ZHANG Mingyi, DENG Anfu, GAN Tengjun. Displacement penetration method used for numerical simulation of jacked pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(1): 113 - 117.
- [16] RANDOLPH M F, CARTER J P, WROTH C P. Driven piles in clay—the effects of installation and subsequent consolidation[J]. Geotechnique, 1979, 29(4): 361 - 393.
- [17] HUANG J H, LIANG N, CHEN C H. Ground response during pile driving[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(11): 939 - 949.