

文章编号: 1000 - 7598 (2013) 01 - 0283 - 07

砂土中开口管桩沉桩过程的颗粒流模拟研究

詹永祥¹, 姚海林¹, 董启朋¹, 贺东平²(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071;
2. 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院勘察分院, 昆明 650041)

摘 要: 基于颗粒流理论, 采用 PFC^{2D} 程序, 模拟再现不同型号开口管桩在沉桩过程中土塞的形成演化规律、土颗粒细观结构变化以及桩周土应力场分布情况, 并通过分析土体细观变化模式揭示沉桩过程中宏观力学响应的内在机制。计算结果表明, 管桩直径对土塞效应影响很大, 外径为 30 mm 的开口管桩, 沉桩过程中土塞增量填充率 (*IFR*) 值较小, 土塞效应明显, 土塞高度小, 类似闭口桩; 随着管桩直径的增大, 土塞效应迅速减小, 大直径管桩在砂土中沉桩全部闭塞的可能性很小。细观因素 (孔隙率和滑动比例) 与土体宏观位移表现之间存在着明显的相互对应关系, 并依此将桩周土划分 3 个区域。桩周土体水平应力、竖向应力和剪应力都在桩底附近形成“应力核”, 不同型号管桩桩周土应力场分布相近。

关键词: 砂土; 开口管桩; 土塞效应; 颗粒流; 细观; 应力场

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

Study of process of open-ended pipe pile driven into sand soil by particle flow simulation

ZHAN Yong-xiang¹, YAO Hai-lin¹, DONG Qi-peng¹, HE Dong-ping²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Survey Branch of Hydrochina Kunming Engineering Corporation, Kunming 650041, China)

Abstract: Based on particle flow theory, the laws of soil plug formation, meso-structural changes of sand soil particles and stress field distributions of soil around pile are studied by using PFC^{2D} to simulate and reconstruct the process for different types of open-ended pipe piles driven into sand soil. In addition, the macro-mechanical response is exposed by analyzing the variation of mesomechanical parameters. The results show that the soil plug effect is largely affected by the pipe diameter, for pipe pile of 30 mm outer diameter driven into sand soil, the value of the incremental filling ratio (*IFR*) is small, so the soil plug effect is significant and the height of soil plug is small, whose sinking mode is similar with close-ended pipe pile. While with the increase of pipe diameter, the plugging effect decreases rapidly, for the large diameter pipe, the sand soil in the pile is not plugged completely. The mesomechanical parameters such as porosity and sliding fraction have obvious corresponding relation with soil macro displacement; and based on this, soil around pile is divided into three regions. The horizontal stress, the vertical stress and the shear stress of soil around pile are formed the "stress nucleus" at pipe pile bottom during driving process, the stress field distributions of soil are close for different types of open-ended pipe piles.

Key words: sand soil; open-ended pipe pile; soil plug effect; particle flow; mesoscopic; stress field

1 引 言

开口管桩在沉桩过程中, 会同时产生挤土效应和土塞效应, 因此, 土塞是开口管桩最显著的特征^[1]。土塞对开口管桩承载力的影响早在 20 世纪 60 年代就引起了国外学者的关注, 许多学者研究打入土体中管桩土塞高度随桩打入深度变化的规律及其

影响因素, 并探讨了土塞效应对管桩承载力的影响。文献[2 - 10]针对开口管桩土塞效应进行了数值与试验研究, 上述研究成果多是针对开口管桩土塞闭塞效应从宏观的角度进行的, 而在沉桩过程中土塞的形成和发展机制的细观研究有待进一步完善。近年来, 细观层面的研究手段在岩土工程各类问题研究中的应用越来越得到国内外的肯定。颗粒流理论

收稿日期: 2011-10-31

基金项目: 国家重点基础研究发展规划“973”项目(No. 2013CB036405); 交通运输部建设科技项目(No. 2011 318 775 680); 中国科学院重点部署项目(No. KZZD-EW-05)。

第一作者简介: 詹永祥, 男, 1979 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事路基工程方面的研究工作。E-mail: zhanyongxiang@126.com

及其数值方法 (PFC) 作为一种特殊的离散单元法, 采用刚性单元, 把材料的力学响应问题从物理域映射到数学域内进行数值求解, 特别适用于散粒介质的力学分析, 通过离散单元方法来模拟圆形颗粒介质的运动及其相互作用。

颗粒流 PFC^{2D} 的主要理论准则为: 牛顿第二定律 (适用球 ball) 力-位移法则 (适用球与球之间的接触, 即 contact-bond)。其主要单元类型有: 球体和圆盘, 颗粒模型可以由这些基本单元构成, 设定不同的参数可以模拟不同的材料, 用 Clump 和 parallel-bond 可以模拟不同形状模型。本文根据颗粒流理论, 利用 PFC^{2D} 计算软件, 从土体细观层面上分析开口管桩在砂土中土塞发生发展的力学机制, 沉桩后土颗粒细观结构变化, 深入研究沉桩过程中桩周土体的应力场变化。

2 PFC^{2D} 颗粒流模型的建立

2.1 计算模型工况及参数选取

本次计算选取 4 种不同型号预应力混凝土管桩进行颗粒流模拟, 原型管桩型号分别为 $\phi 300 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 、 $\phi 400 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 、 $\phi 500 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 和 $\phi 600 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, 桩长 L 为 5 m, 地基水平方向宽度为 6 m, 竖向高度为 8 m。用 PFC^{2D} 模拟上述管桩压桩过程, 由于原型内颗粒数量巨大, 计算耗时, 且计算机容量限制难以实现, 需利用相似理论将原有模型进行缩尺, 从而实现散体数量的减少。本次计算采用缩尺模型, 将原型整体缩小 10 倍, 为克服模型内重力场不足, 将土体及管桩的重度放大 10 倍。土体及桩体的具体参数见表 1。

表 1 土体和桩体的颗粒模型参数

Table 1 Meso-parameters of numerical model for sand soil and pipe pile

颗粒类型	颗粒密度 $\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$	最大粒径 D_{\max} / mm	最小粒径 D_{\min} / mm	初始孔隙率 n	法向刚度 $k_n / (\text{MN}/\text{m})$	切向刚度 $K_s / (\text{MN}/\text{m})$	摩擦系数 μ
砂土	2.0	6.0	3.0	0.17	30	30	0.8
管桩	2.4				5 000	5 000	1.5

2.2 颗粒流模型的建立

根据几何相似原理, 颗粒流地基模型的尺寸为 $0.6 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$, 管桩的直径 D 分别为 30、40、50、60 mm, 壁厚分别为 6、8、10 mm, 桩长 $L=500 \text{ mm}$ 。首先建立 4 片墙体 (wall), 用于模拟土体的边界条件, 定义土体颗粒的最小粒径及孔隙率, 然后在给定的区域内生成颗粒, 按随机位置将颗粒填充在给定的范围内, 如图 1 所示。颗粒生成过程为: 将颗粒设计半径按同比例缩小, 在边界内部通过反复

尝试生成互不重叠的颗粒; 通过函数实现所生成颗粒集合体的实际孔隙率, 由实际孔隙率与设计孔隙率之间的关系计算得到半径放大系数; 将所有颗粒乘以半径放大系数, 颗粒膨胀使集合体达到设计孔隙率。

在打桩之前, 首先进行自重平衡的循环, 以消除模型内部的不平衡力, 从而达到所需要的初始应力状态。模型桩用 8 片墙体来模拟, 在压入过程当中, 桩体本身是不发生变形的, 但为了模拟实际桩体表面的粗糙性, 给模型桩赋予 1.5 的摩擦系数。

以 0.1 m/s 的速度静压桩体, 为了能够确定在压桩过程中桩周土体的应力场, 在程序中设置 108 个测试圆, 以量测在压桩完成后桩周土体孔隙率及应力的变化。测试圆的直径为 45 mm, 沿竖向每列布置 18 个测试圆, 水平方向利用对称性每行布置 6 个测试圆 (见图 1)。

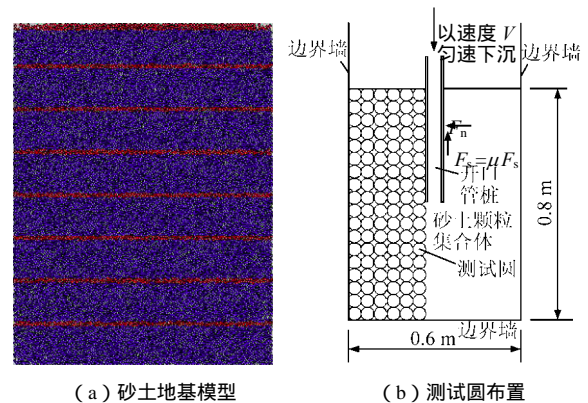


图 1 砂土地基初始模型及测试圆布置图
Fig.1 Initial model of sand foundation and layout of measure circle in foundation

3 土塞形成过程分析

颗粒流数值模拟再现了管桩沉桩过程 (如图 2 所示)。以 $\phi 30 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 管桩为例, 在压桩初期, 地基土在桩壁的作用下产生剪切破坏, 宏观上表现为只有紧靠桩端桩壁下方的土体颗粒产生剪切位移, 桩内土颗粒松散, 桩土间摩擦力较小, 土体颗粒并没有随桩产生向下显著移动, 桩径外附近土体发生少量隆起, 当压土深度为 100 mm 时, 土塞高度已为 72 mm。

随着开口桩切入土深度的增加, 土塞高度逐渐增大。与此同时, 随着桩内土塞颗粒的增加, 颗粒经历一个逐步压密楔紧的过程, 由于靠近桩壁的剪切变形大于土塞中部的砂颗粒, 此时桩内土塞在摩阻力作用下产生球状向上凸的“主动拱”, 桩周表层土向上隆起位移开始明显; 由于桩内土塞逐渐被压

密，其对内侧桩壁所产生的摩阻力越来越大，土塞效应逐渐增强，土塞效应使桩端横向产生剪切位移的范围以数倍扩大，远离桩端的土体颗粒也产生了整体的位移。由于土塞效应，管桩下端砂层形成球状向下凹的“被动拱”，“被动拱”跨径约为 2~3 倍管桩外径。

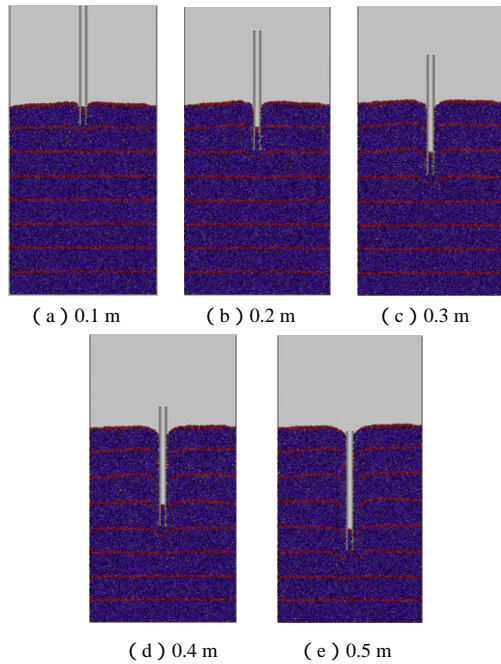


图 2 不同压入阶段土塞形成过程

Fig.2 Soil plug formation at different driving stages

随着压入深度的增大，当传递荷载超过拱的承载力时，拱随即发生剪切和膨胀破坏，桩端土涌入桩管内，直到形成一个新拱，此时拱的阻力又超过了向上的推力，拱效应将桩底土阻力转变为桩管内壁的法向挤压力，从而大大提高了砂土与桩管内壁的摩阻力。管桩在贯入过程中，涌入管内的砂土经历着一个拱的形成与破坏交替发生的循环过程。

当土塞与桩内壁的摩阻力和土塞自重大于桩端向上反力时，土塞将完全闭塞，此时土塞像“瓶塞”一样阻止土体继续涌入管内，开口桩就像闭口桩一样贯入土中，破坏产生于土塞端部的土体，此时管桩与闭口桩下沉模式相差不大。

4 不同直径管桩土塞效应分析

不同型号的管桩形成的土塞高度如图 3 所示。土塞的闭塞效应一般采用土塞增量与桩打入深度增量之比（即土塞增量填充率）*IFR* (the incremental filling ratio) 来评价^[7]。该指标定义为

$$IFR = \frac{dL_p}{dH} \times 100\% \quad (1)$$

式中： dL_p/dH 表示桩的打入深度增加一个单位长度，土塞长度的增加量。其中 $IFR=0$ 、 $IFR=100\%$ 分别对应两种极端情况是：土塞完全闭塞，没有任何土体继续进入桩内；土塞完全填充，其长度增加量与桩打入深度增加量相等。计算得到各型号管桩沉桩过程中不同深度时的 *IFR* 值，如表 2 所示。

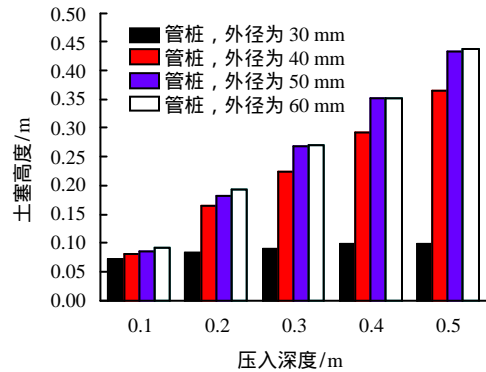


图 3 不同压入深度时土塞高度

Fig.3 Soil plug height at different driving depths

表 2 压入不同深度区间时 *IFR* 值

Table 2 Value of incremental filling ratio at different driving depths

桩底压入深度 /mm	<i>IFR</i> /%			
	φ 30 mm× 6 mm	φ 40 mm× 8 mm	φ 50 mm× 8 mm	φ 60 mm× 10 mm
0 ~ 100	72.0	79.8	86.0	92.7
100 ~ 200	11.8	84.0	95.0	99.6
200 ~ 300	6.6	59.4	86.9	78.3
300 ~ 400	6.9	68.0	84.4	80.5
400 ~ 500	0.1	73.9	81.9	86.2

外径为 30 mm 的管桩，在桩刚压入土时，土塞长度以较快速度增长，当压入 100 mm 以后，在沉桩过程中土塞高度基本在 83~97 mm 之间，*IFR* 很小，甚至趋于 0，即沉桩不久土塞已完全闭塞。外径为 40 mm 的管桩，在桩压入深度为 100 mm 时，压入土中的桩身 80% 被砂土充填，土塞闭塞作用较外径为 30 mm 的管桩要小，随着桩入土深度的增加，*IFR* 值减小，土塞的闭塞效应增强，土塞高度增长减慢，管桩达到设计高度时最终土塞高度为 365 mm。桩的直径越大，管桩内土塞高度就越大，*IFR* 值也越大，土塞效应迅速减弱，外径分别为 50 mm 和 60 mm 的管桩，沉桩过程中不同阶段 *IFR* 值均较高，管桩达到设计高度时最终土塞高度分别为 434 mm 和 437 mm，说明大直径桩挤土效应非常弱，在沉桩过程中土塞完全闭塞的可能性非常小。

5 土塞形成的微观结构分析

图 4 为不同型号管桩达到设计高度时孔隙率变化等值线图，孔隙率变化值大于 0 表示密实度降低。

图 5 为不同型号管桩达到设计高度时滑动比例等值线图，滑动比例代表发生滑动接触数的百分比。根据孔隙率变化等值线图，可以将桩周土划分为 3 个区域：浅层土体隆起扰动区、中层土体径向扰动区和深层土体向下压密区。

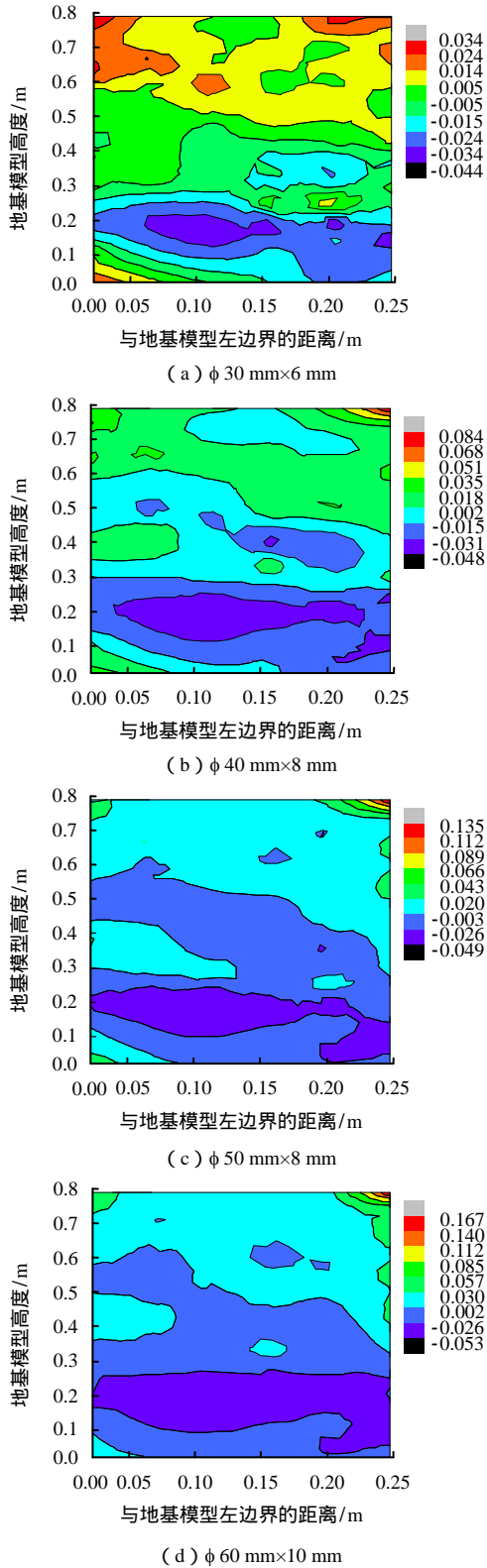


图 4 孔隙率变化等值线图
Fig.4 Isograms of porosity change

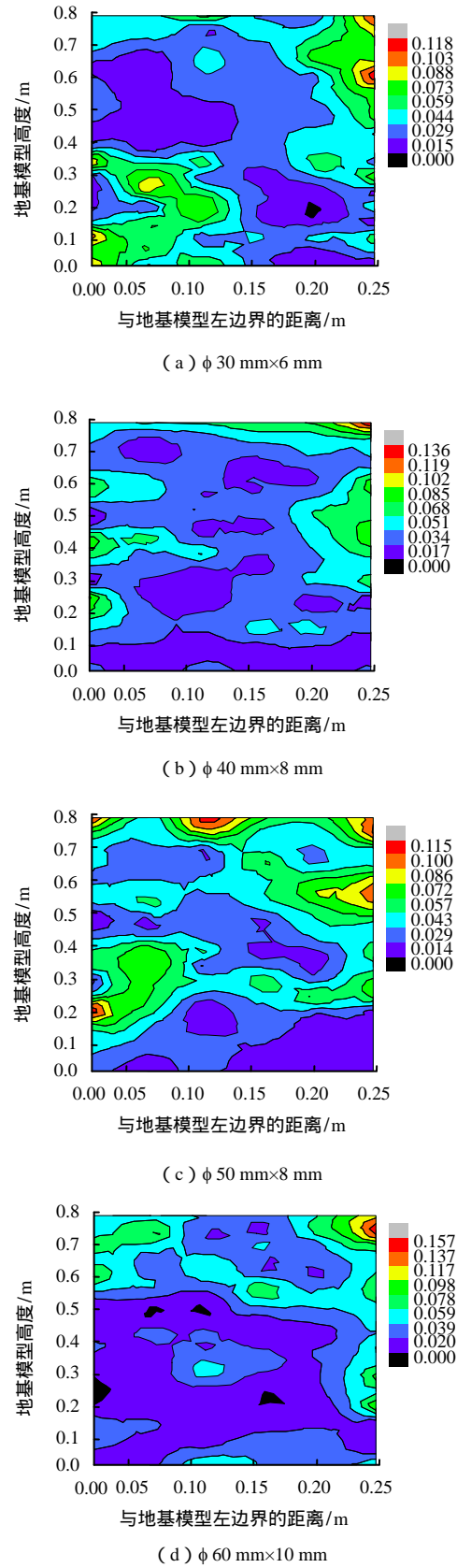


图 5 滑动比例等值线图
Fig.5 Isograms of sliding fraction

从图 4、5 中可以看出，桩身附近浅层土体孔隙率大于 0，且变化值较大，滑动比例较高，宏观上

表现为浅层土体上覆压力较小。在管桩压入过程中，桩周土体受到严重挤压，浅层土体因表面没有约束，土体只能向上移动，故以向上隆起位移为主，由于颗粒扰动较大，土体密实度降低，法向接触力的降低导致颗粒间容易产生滑动，因此，滑动比例较高，而远离桩的浅层土体由于扰动小，孔隙率基本不变，滑动比例也较低，这一区域为浅层土体隆起扰动区。

桩身中部土体，由于压桩过程中，近桩土体在桩-土摩阻力作用下产生相对滑动，形成一滑动剪切错动带，近桩土体孔隙率变化值为正，即桩周土体密实度降低，有一定比例的滑动发生，但比例较桩周浅层土体小。而这种剪切作用带仅在桩身附近一小区域内存在，沿远离桩轴的径向迅速衰减并消失。剪切带以外中层土体受到浅层和深层土体的制约沿径向移动，孔隙率变化值为负，土体径向挤密压缩。这一区域为中层土体径向扰动区。

桩端以下土体存在一明显密实区，主要是桩下部土体在桩身传递荷载和土塞效应双重作用下，桩底土体颗粒明显向两侧挤出运动，孔隙率显著降低，不同型号的管桩，密实区孔隙率大小略有不同，此区域在高法向接触力作用下，滑动约束力较大，滑动比例较小，这一区域为深层土体向下压密区。

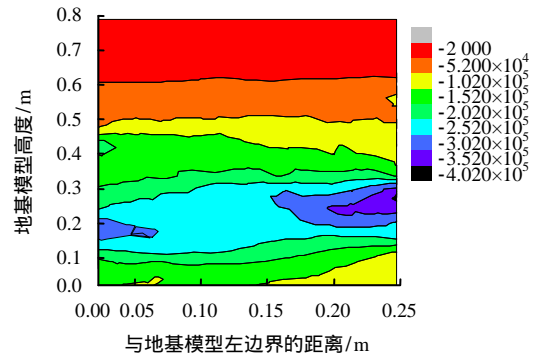
由以上分析可见，细观因素孔隙率和滑动比例与土体宏观位移表现之间存在着明显的相互对应关系。

6 桩周土应力场变化

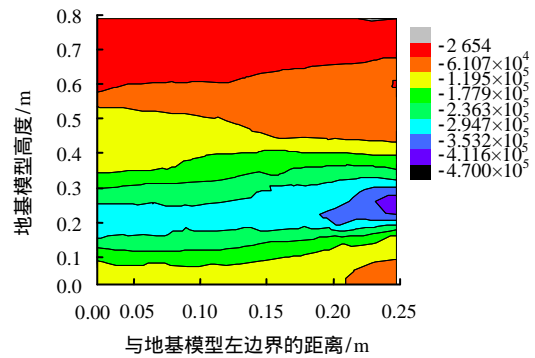
图 6~8 分别为不同型号桩体达到设计高度时桩周土体水平应力、竖向应力和剪应力的等值线图。总体而言，不同型号桩体在压入过程中桩周土体应力场分布相差不大，随着桩体贯入，由于挤土效应，靠近桩身附近水平应力、竖向应力和剪应力增加较大，尤其是在桩端附近，土体的不同应力场都产生了较高的应力区，形成“应力核”，最大水平应力值为 0.40~0.48 MPa，最大竖向应力值为 0.39~0.42 MPa，最大剪应力值为 0.11~0.16 MPa，位置基本发生在桩底附近。

桩周土体的水平应力、竖向应力和剪应力随距桩体由近及远而逐渐减小，而远离桩体区域，水平应力等值线基本水平。根据孔隙率变化划分的 3 个区域，在剪应力等值线上也有明显体现，表层向上剪切区域变大，深层向下剪切区域也变大，在中部土层剪应力值变号。这说明桩体在压入过程中，桩底土体在管桩荷载及土塞效应双重作用下，桩底土体颗粒明显向两侧作挤出运动，附近桩周土体受到了

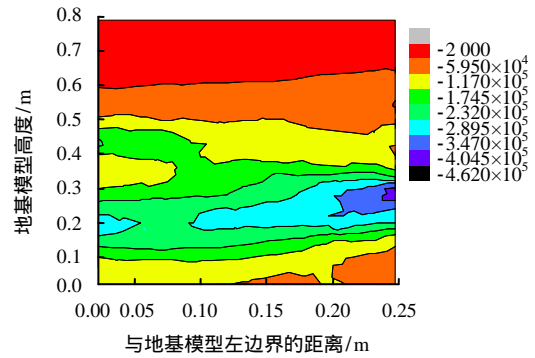
严重的剪切和错动。



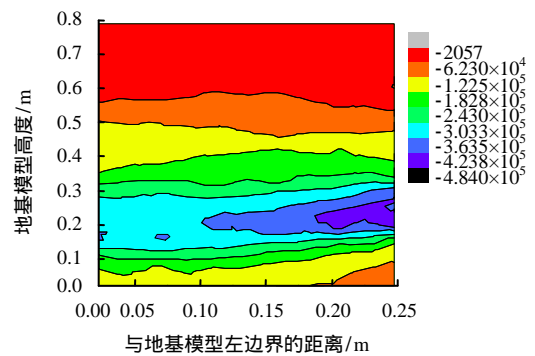
(a) $\phi 30 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$



(b) $\phi 40 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$



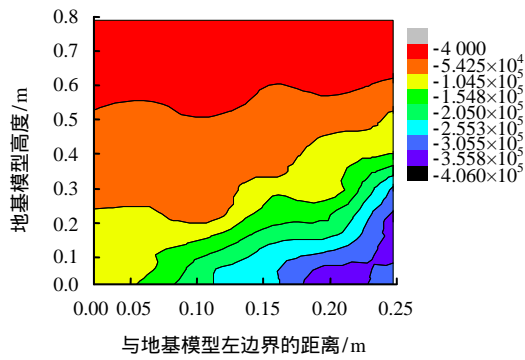
(c) $\phi 50 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$



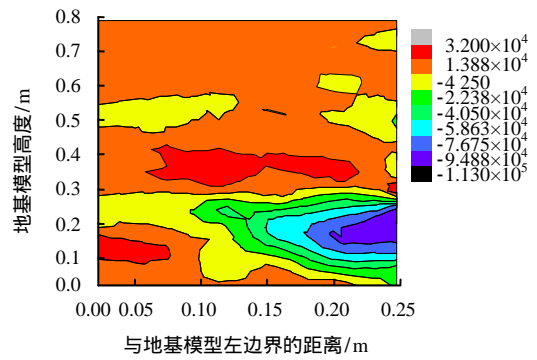
(d) $\phi 60 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$

图 6 水平应力等值线 (单位: Pa)

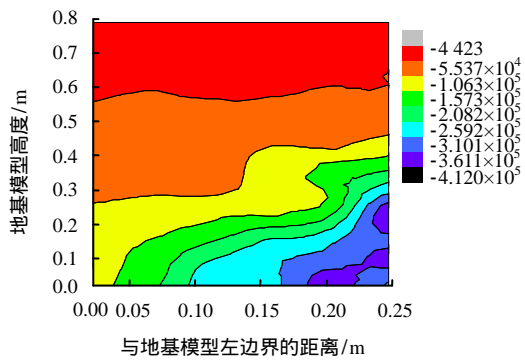
Fig.6 Isograms of horizontal stress (unit: Pa)



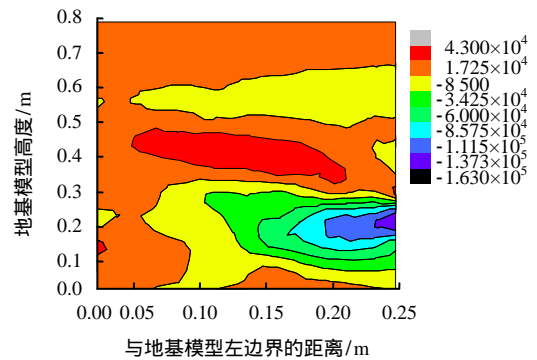
(a) $\phi 30 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$



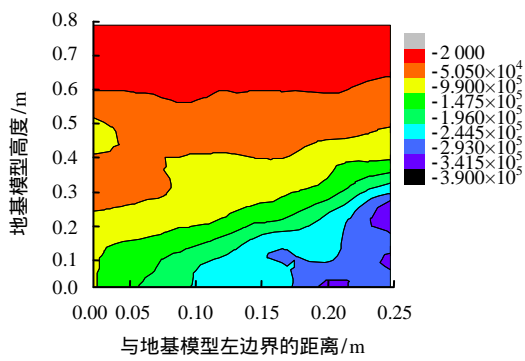
(a) $\phi 30 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$



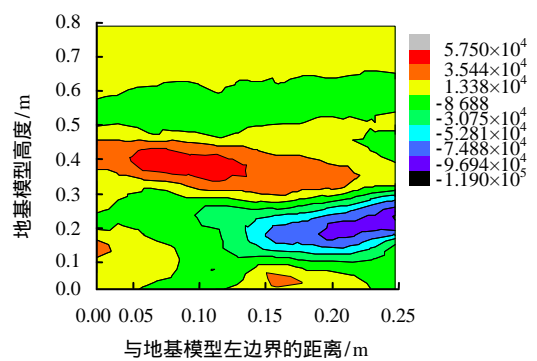
(b) $\phi 40 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$



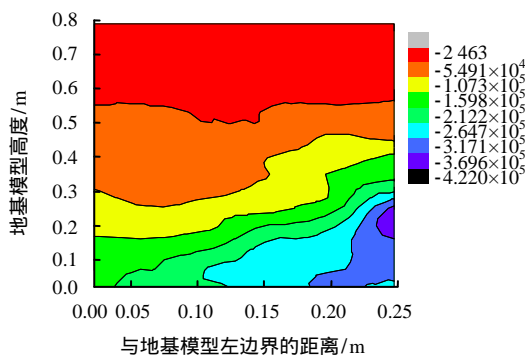
(b) $\phi 40 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$



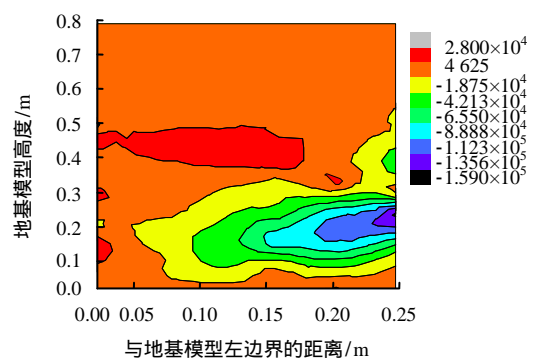
(c) $\phi 50 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$



(c) $\phi 50 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$



(d) $\phi 60 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$



(d) $\phi 60 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$

图7 竖向应力等值线 (单位: Pa)
Fig.7 Isograms of vertical stress (unit: Pa)

图8 剪应力等值线 (单位: Pa)
Fig.8 Isograms of shear stress (unit: Pa)

7 结 论

(1) 数值模拟再现了开口管桩在砂土沉桩过程中“主动拱”和“被动拱”形成过程。根据拱效应分析了土塞的形成过程,同时得到不同型号管桩不同沉桩深度时的土塞长度值。

(2) 外径为 30 mm 的管桩压入 100 mm 时,土塞已基本形成,在随后压桩过程中,土塞高度增长极为缓慢,IFR 处于较小值,土塞基本完全闭塞,可以看作闭口桩。随着管径的增大,IFR 值逐渐增大,土塞效应迅速减弱,在沉桩过程中只能部分闭塞。

(3) 细观因素与土体宏观位移表现之间存在着明显的相互对应关系,通过对孔隙率变化的分析,将桩周土体划为 3 个区域:浅层土体隆起扰动区、中层土体径向扰动区和深层土体向下压密区。

(4) 管桩沉桩过程中,桩周土体水平应力、竖向应力和剪应力都在桩底附近形成应力核,不同型号桩体在压入过程中桩周土体应力场分布相差不大。

参 考 文 献

- [1] 周健, 王冠英. 开口管桩土塞效应研究进展及展望[J]. 建筑结构, 2008, 38(4): 25 - 29.
ZHOU Jian, WANG Guan-ying. Development and expectation on soil plug in driving or jacked open-end pipe piles[J]. **Journal of Building Structures**, 2008, 38(4): 25 - 29.
- [2] RANDOLPH M F, LEOUG E C, HOULSBY G T. One-dimensional analysis of soil plugs in pipe piles[J]. **Geotechnique**, 1991, 41(4): 587 - 198.
- [3] LEONG E C, RANDOLPH M F. Finite element analyses of soil plug response[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 1991, 15(1): 121 - 141.
- [4] NICOLD A, RANDOLPH M F. The plugging behaviour of driven and jacked piles in sand[J]. **Geotechnique**, 1997, 47(4): 841 - 856.
- [5] 周健, 陈小亮, 周凯敏, 等. 静压开口管桩沉桩过程模型试验及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 2): 3839 - 3846.

- ZHOU Jian, CHEN Xiao-liang, ZHOU Kai-min, et al. Model test and numerical simulation of driving process of open-ended jacked pipe piles[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(Supp.2): 3839 - 3846.
- [6] 李剑强, 周健. 开口桩中土芯形成、影响因素及判别方法研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 449 - 454.
LI Jian-qiang, ZHOU Jian. Effects on soil plugging and plugged mode in open-ended pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(2): 449 - 454.
- [7] 谢永健, 王怀忠, 朱合华. 软黏土中 PHC 管桩打入过程中土塞效应研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1671 - 1675.
XIE Yong-jian, WANG Huai-zhong, ZHU He-hua. Soil plugging effect of PHC pipe pile during driving into soft clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(6): 1671 - 1675.
- [8] 朱合华, 谢永健, 王怀忠. 上海软土地基超长打入 PHC 桩工程性状研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 745 - 749.
ZHU He-hua, XIE Yong-jian, WANG Huai-zhong. Behavior of long PHC piles driven in Shanghai soft clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(6): 745 - 749.
- [9] 郑俊杰, 聂重军, 鲁燕儿. 基于土塞效应的柱形孔扩张问题解析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 2): 4004 - 4008.
ZHENG Jun-jie, NIE Chong-jun, LU Yan-er. Analytical solutions of cylindrical cavity expansion problems considering plugging effects[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(Supp.2): 4004 - 4008.
- [10] 谢世波, 陆林强. 大口径开口钢管桩打桩过程对周围土体的影响分析[J]. 上海铁道大学学报(自然科学版), 1997, 18(2): 67 - 72.
XIE Shi-bo, LU Lin-qiang. An analysis of the influence of big aperture opening steel tube pile during driven on surrounding soil[J]. **Journal of Shanghai Tiedao University (Natural Science)**, 1997, 18(2): 67 - 72.