

# 开口管桩沉桩过程试验研究与颗粒流模拟

周 健<sup>1,3</sup>, 陈小亮<sup>1,2</sup>, 王冠英<sup>4</sup>, 周凯敏<sup>1,3</sup>

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 浙江大学城市学院土木系, 杭州 310015;

3. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 4. 青岛高新区投资开发有限公司, 山东 青岛 266071)

**摘要:** 利用侧面透明的模型箱和铝管半模桩模拟了开口管桩在砂土中的沉桩过程. 分别测量了不同桩径和不同相对密度开口管桩完全闭塞时的土塞高度. 结果表明桩径越大, 相对密度越小, 则土塞高度越大. 利用高分辨率数码摄像设备观察到了土塞形成的三个阶段, 重点分析了土塞内几个特征砂颗粒的移动轨迹和压桩过程中孔隙率和接触数的变化, 从细观尺度出发探讨开口管桩沉桩过程中砂土的变形机制和土塞形成机理. 利用 Geodip 软件分析了桩土接触面处的砂粒长轴定向和平均配位数, 分析表明, 土塞形成过程中颗粒原先的结构被打破以及发生了剧烈旋转, 颗粒重新进行分布. 在模型试验基础上, 通过二次开发 PFC<sup>2D</sup> 颗粒流程序对沉桩全过程进行离散元仿真模拟. 数值模拟结果表明, PFC<sup>2D</sup> 能够模拟开口管桩从开始刺入砂土到形成土塞并最终呈现闭口管桩性态的整个过程.

**关键词:** 开口管桩; 土塞效应; 模型试验; 细观; 颗粒流

**中图分类号:** TU192

**文献标识码:** A

## Experimental and Numerical Analysis of Open-ended Pipe Piles During Jacking into Sand

ZHOU Jian<sup>1,3</sup>, CHEN Xiaoliang<sup>1,2</sup>, WANG Guanying<sup>4</sup>, ZHOU Kaimin<sup>1,3</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Civil Engineering, Zhejiang University City College, Hangzhou 310015, China; 3. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Qingdao Hightech Investment and Development Co., Ltd., Qingdao 266071, China)

**Abstract:** The mechanism of soil plug formation and particles movement were analyzed from the meso-scale with physical model tests and numerical simulations. The container consisting of four steel sheets and one glass side and aluminum semi-model pile, was used to simulate the installation of open-

ended jacked pipe pile in sand. The heights of soil-plug were recorded during the pile jacking into sand with different diameters and relative densities. The results show that, the larger pile diameters are, the higher soil-plug heights are; Conversely, the larger relative densities are, the smaller soil-plug heights are. The course of soil-plug formation was recorded from the transparent glass side and the process could be divided into three stages. Especially, the trails of some characteristic sand particles movement, porosities and contact numbers were analyzed emphatically. The major axis orientation and mean coordinate numbers of sand particles which located in pile-soil interface were analyzed with the software Gepdip. Results show that the original structure of particles are disturbed and rotated intensively, and the particles have been redistributed. Then, with the results of model test, the numerical model was established and the driving process was simulated, which could take both squeezing effects and plugging effects into consideration simultaneously. The behaviours of the numerical model are consistent with the results of physical model test. It indicates that PFC<sup>2D</sup> is capable of simulating the process of pile jacking into sand.

**Key words:** open-ended pipe piles; plugging effects; model test; particle flow; meso-scale

开口管桩在沉桩过程中, 会同时产生挤土效应和土塞效应. 土塞的存在对于沉桩特性及桩的承载性能影响非常大, 使得开口管桩的工程特性很大程度不同于闭口管桩. 目前, 土塞的分析方法以一维分析为主. 一维分析方法最初是由 Stefanoff 和 Boshinov<sup>[1]</sup> 提出的, 随后一些学者对其进行了改进, Murff 等<sup>[2]</sup>, Randolph 等<sup>[3]</sup> 通过求解土塞的平衡方程给出了土塞中竖向应力沿高度的分布. Nicola<sup>[4]</sup> 等人在压力室内分别对低、中、高密实度砂打入桩进行

收稿日期: 2010-12-01

基金项目: 国家自然科学基金(50578122); 高校博士点专项科研基金(200802470007)

第一作者: 周 健(1957—), 男, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为土体细观力学性质试验与数值模拟等方面的教学与研究工作.

E-mail: tjuzj@vip.163.com

了试验,研究砂土密实度对打桩过程中土塞高度的影响. Paik<sup>[5]</sup>等人利用打入砂土中的模型桩试验,发现土塞增量填充率 IFR 与砂土相对密实度、竖向有效应力、径向有效应力等密切相关. Malhotra<sup>[6]</sup>等研究了砂土中钢管桩不同壁厚对土塞形成的影响. Leong 和 Randolph<sup>[7]</sup>等利用有限元方法对不同加载条件(完全排水、部分排水和完全不排水)下土塞的端阻力进行了研究.

目前,研究者对于土塞效应多是从宏观的角度进行研究,很少对开口管桩沉桩过程中土塞的形成和发展机理进行细观研究. 细观研究可以从颗粒孔隙率、接触数、接触法向和切向、长轴定向以及单个颗粒呈现的特性来探明开口管桩在沉桩过程土塞效应的真正细观力学本质. 传统的有限元方法没有考虑砂土颗粒的散体特性,尤其是桩土接触面处常伴有的局部大变形、不连续性、应变软化和剪胀等现象,无法从本质上揭示土塞变形及其力学特性的细观机制.

本文采用铝管半模桩模拟开口管桩的静压沉桩过程,利用高分辨率数码相机观测土塞的形成发展过程,然后根据室内模型试验的结果,建立颗粒流数值模型,对沉桩过程中土塞的形成过程土颗粒细观组构变化以及土塞效应进行颗粒流仿真模拟,并与试验结果相对比,从颗粒尺度出发探讨开口管桩沉桩过程的宏细观力学机理和土塞的演变模式.

## 1 试验设备与过程

### 1.1 试验设备

模型槽尺寸为 500(宽)×800(长)×800 mm(高)如图 1 所示. 底板及侧面为钢板,正面及背面为透明钢化玻璃. 模型桩采用铝管半模桩,桩长为 450 mm,分别进行不同桩径(25 mm, 30 mm, 40 mm)和不同相对密实度(松砂,中密砂,密砂)管桩沉桩试验. 通过高精度的数据采集设备和数码成像设备记录土塞发生、发展过程. 土颗粒细观特性观测采用 Olympus 体视显微镜(放大倍率为 10~220 倍),结合 CCD 摄像/照相机进行连续拍摄.

试验土样采用福建平潭标准砂. 物理性质指标如下:颗粒级配为颗粒直径大于 0.65 mm 的占 3%,0.45~0.65 mm 的占 40±5%,0.25~0.4 mm 的占 51±5%,小于 0.25 mm 的占 6%. 颗粒密度  $G_s$  为 2.643;最大与最小孔隙比  $e_{\max}$  和  $e_{\min}$  分别为 0.848 及 0.519;粒径组成特性参数为:平均粒径  $d_{50}=0.34$

mm,不均匀系数  $C_u=1.542$ ,曲率系数  $C_c=1.104$ .

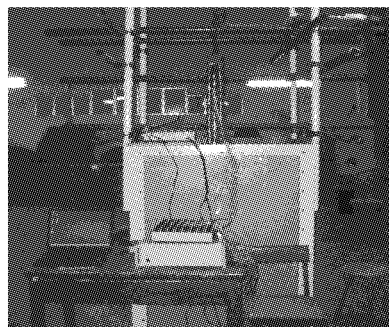


图1 模型试验系统图

Fig.1 Layout of model test device

### 1.2 试验过程

试验装样根据设计相对密实度分层摊铺,每层厚度为 50 mm,装样完成后静置 12 h,使砂在自重作用下压密,保证试样的均一性. 采用快速维持荷载法进行加载. 加载速率控制在  $0.055 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,沉桩过程每 50 mm 为一加载级,加载 15 min 后,分别记录土体位移场、桩身应变、桩顶位移、荷重传感器读数,然后进行下一级加载. 在装砂时用染色砂设置好细观观测追踪区,在加载开始前及特定加载级,用体视显微镜对追踪区进行观测,采集高分辨率细观图像.

## 2 试验成果与讨论

### 2.1 试验宏观结果分析

#### 2.1.1 土塞高度的变化

桩管内土塞长度的变化情况是反映土塞性状的一个重要指标,本文分别进行了不同桩径和不同密实度情况下压桩试验,对桩内土塞高度的变化进行了实测. 图 2 为桩径 30 mm, 40 mm 在中密砂土中的土塞高度变化曲线. 从图 2 可以看出,在压桩初期,土塞高度随压桩深度线性增长,打入土中的桩完全被填充,土塞闭塞作用较小,随着桩入土深度的增加,土塞的闭塞效应增加,其与桩壁之间的摩擦力也逐渐增大,土塞高度增加变缓,随着土塞在桩壁向下的摩擦力和桩端向上的双重压力作用下,越来越契紧,最后土塞高度不变,土塞完全闭塞,呈现闭口桩特性. 桩径越大,开口管桩完全闭塞时土塞高度越大. 松砂和密砂中土塞高度变化规律与中密砂基本一致. 随着砂土密实度的增加,管桩完全闭塞时土塞高度变小. 模型试验所得试验结果与前人研究一致<sup>[4-6]</sup>.

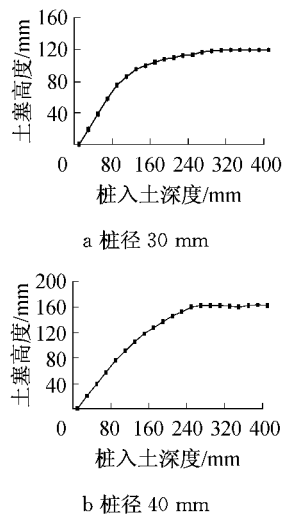


图2 土塞高度随桩打入深度的变化  
Fig.2 Relationship between soil plug length and pile penetration

### 2.1.2 土塞现象分析

在土样分层装入模型槽的过程中,夯实后用染色砂设置分层标志,图3为开口管桩在不同压入深度处管内土塞高度变化图,方便观测桩在压入过程中,桩身内不同位置处土塞的位移变化情况.由图可以看出,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壁的土体产生剪切位移,而桩内的土体并没有随桩向下产生显著移动,见图3a,3b,这可以称为土塞形成的第一阶段.

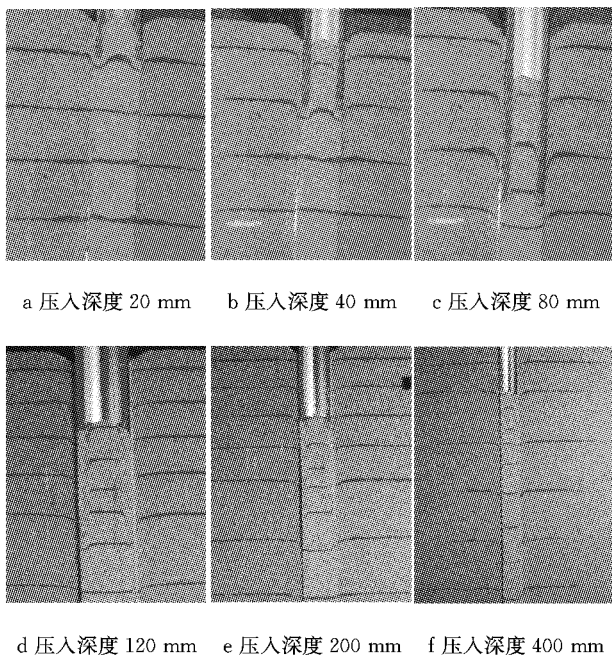


图3 不同压入深度土塞位移  
Fig.3 Soil plug shape of during pile penetration

随着桩入土深度的增加,土塞高度也随之增大,

其与桩壁之间的摩擦力也逐渐增大,当土塞高度达到一定值时,如桩径30 mm时桩压入120 mm,土塞高度95 mm,砂土与桩壁之间的摩阻力已足够大,土塞高度增加变缓,见图3c和3d.在此阶段内,土塞砂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,故在此阶段染色砂层呈现上凸的“主动拱”形式,这主要是由于桩壁带动其附近土体产生位移的结果,这可以称为土塞形成的第二阶段.

随着桩体的继续压入,桩内土塞受到桩壁向下的摩阻力及桩端土向上的反力两者的共同作用越来越大,土塞逐渐被压密,见图3e,3f.这可从土塞染色砂层之间距离与原地基砂染色层之间的距离相比较而得到.此阶段称为土塞形成的第三阶段.在此阶段内,染色砂层表现为球帽状下凹的“被动拱”形式,这也说明了在此阶段内,开口桩内由于拱效应的产生,土塞发挥了极大的摩阻力,土塞像“瓶塞”一样阻止了土体的进一步涌入桩内,开口桩就像闭口桩一样贯入土中,土塞高度不再增加.

在土塞贯入开口桩的整个过程中,不同的压桩阶段对应不同的土塞状态,随着桩体的不断贯入土中,管内土塞经历一个由主动拱逐渐转变为被动拱的力学转化过程,与之相应地,桩体也相应地由开口桩发展到闭口桩的特性.根据Randolph<sup>[3]</sup>、Murff和Raines<sup>[2]</sup>等引入楔形体概念,管桩内土塞可分为二部分:楔形土塞区和未楔形土塞区.楔入部分土体进行力的传递,而未楔入部分土体没有力的传递,仅对楔入部分土塞提供一个超载.因此,产生主动拱的部分主要是在土塞未楔入部分,而生产被动拱的部分主要是土塞楔入部分,主动拱到被动拱的转化也正是楔入部分与未楔入部分的分界区域.图3清晰记录了土塞从压桩初期的主动拱到后期的被动拱整个发展过程.

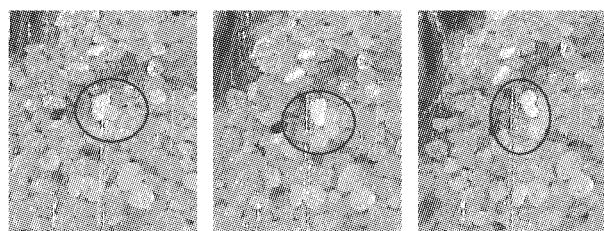
### 2.2 试验细观图像处理分析

利用体视显微镜CCD摄像设备,对压桩过程中土塞颗粒的变化进行拍摄,并利用Geodip软件<sup>[8]</sup>系统对其中的部分照片进行了分析,从细观角度对土塞形成机理进行研究.

#### 2.2.1 桩内土塞细观研究

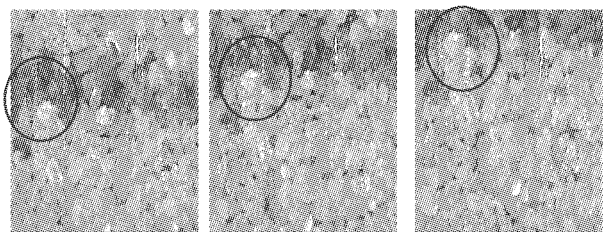
图4为压桩初期(第一阶段)不同部位砂颗粒的状态演化.压桩初期,发生位移的砂颗粒基本只发生在桩壁附近,桩端正下方的土体压缩下沉,而桩侧砂土颗粒发生旋转,从图4a上椭圆圈中砂颗粒可观察到.由于桩体压入,远离桩壁位置的土颗粒受到桩壁

的挤土而产生隆起现象,在图 4b 上表现为开口桩内染色条带向上挤出。从图 4b 土塞中间部位砂颗粒的状态演化图中监测颗粒(图中画圈颗粒)看出,砂颗粒从桩壁左侧的左下方移动到右上方,可以预测,与其轴向对称方向的颗粒将向土塞的左上方移动,土颗粒将形成如前所述的上凸的主动拱形式。



桩下压 20 mm      桩下压 40 mm      桩下压 60 mm

a 土塞桩内壁砂颗粒状态演化



桩下压 20 mm      桩下压 40 mm      桩下压 60 mm

b 土塞中间部位砂颗粒的状态演化图

图 4 压桩初期不同位置处砂颗粒状态演化

Fig. 4 Particle movement during the first stage

在第二阶段,受桩内壁与土塞之间的摩擦力逐渐增大的影响,随着桩的压入,桩内的土塞也基本呈整体下移,表现为染色砂层条带整体向下移动。从图 5 中的椭圆标志性砂颗粒的运动来看,砂颗粒的运动以平移为主,转动现象少有发生。这一阶段主要表现为土塞的压密过程。



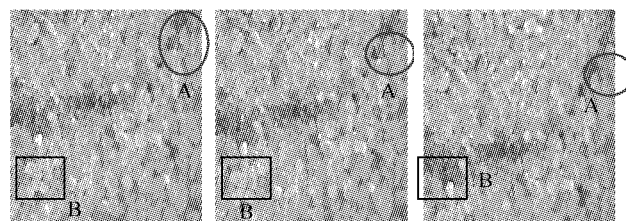
桩下压 80 mm      桩下压 100 mm      桩下压 120 mm

图 5 压桩第二阶段土塞中间部位砂颗粒状态演化

Fig. 5 Particle movement during the second stage

在压桩的后期,土塞闭塞效应基本形成,此阶段土塞颗粒的位移仍以平移为主,如图 6 上 A、B 标志点所示,两位置的土塞颗粒都没有产生明显的偏转

现象。但不同位置处颗粒的位移速率与上一阶段有明显差别。前两个阶段中,桩侧砂颗粒的位移要大于土塞中间颗粒的位移,产生主动拱,而在此阶段则完全相反,土塞中间颗粒 B 的位移要大于桩侧颗粒 A 的位移,从图 6 所示的染色砂条带的对比上可以看出,随着开口桩的不断压入,条带曲率不断增大,土塞闭塞效应中下凹被动拱现象产生。



桩下压 140 mm      桩下压 160 mm      桩下压 180 mm

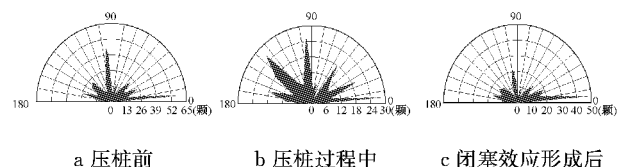
图 6 压桩第三阶段土塞中间部位砂颗粒状态演化

Fig. 6 Particle movement during the third stage

## 2.2.2 桩土接触面的细观组构分析

通过 Geodip 软件对桩土接触面颗粒在压桩过程中的细观组构变化进行了分析,这些细观参数包括砂土颗粒的定向性、平均配位数的变化等。取桩径为 30 mm 桩的压桩工况,分别对压桩前、试验过程中及压桩结束的照片进行分析。

图 7 为长轴定向玫瑰花图,反映颗粒长轴方向的角度频数分布。从长轴方向变化规律来看,在压桩过程中,接触面颗粒的长轴发生明显的转动。在初始阶段,由于颗粒的自然沉积,颗粒长轴方向大多分布在水平和垂直方向。随着压桩的进行,颗粒原先的结构被打破,颗粒重新进行分布,颗粒长轴方向变得杂乱,长轴的优选方向不明显,这也从另一方面说明颗粒发生剧烈的旋转。最后,颗粒调整结束,颗粒不断被挤压,垂直方向的颗粒不断倾斜压密,颗粒长轴方向明显优于水平方向,即垂直于压桩的方向。



a 压桩前      b 压桩过程中      c 闭塞效应形成后

图 7 桩土接触面上颗粒长轴定向玫瑰花图

Fig. 7 Rose figures of particle long axis direction evolution

平均配位数变化是砂土颗粒运动、重新排列的反映,图 8 表示的是接触面上颗粒接触数演化的玫瑰花图,扇形大小代表该方向的接触数。从图中可见,压桩前,试样砂颗粒的接触法向稍偏于垂向及水

平方向,压桩过程中,砂颗粒受到扰动,接触面上砂颗粒总的配位数减小了,而且向垂向进一步发展,压桩试验后,垂直向和水平向的接触数都较试验前有所增长,说明砂土变得更密实了。

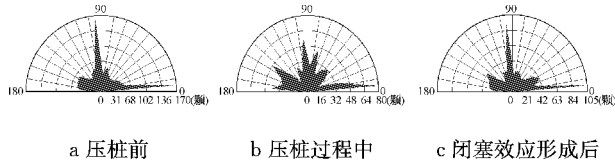


图8 桩土接触面上平均配位数玫瑰花图

Fig.8 Rose figures of average coordination numbers changes

### 3 颗粒流数值模拟

#### 3.1 数值试样的制备

在高 0.65 m,宽 0.50 m 的二维空间内按表 1 的参数生成级配服从均匀分布的椭圆颗粒试样来近似的模拟砂土颗粒.数值模型参数的选取原则详见文献[9].

模型桩用 8 片墙体来模拟,其中某一片墙采用 50 段墙体拼接而成,用以模拟开口管桩某一内壁,以反映压桩过程土塞土体对桩内壁各个分段的作用力,分析土塞形成过程中桩内壁摩阻力分布规律.其余内外壁分别采用一个墙体形成.为使问题简单,假定桩在整个过程不发生变形,模型桩法向刚度和切向刚度为  $1.0 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ .经过试算,桩内外壁摩擦系数分别为 2.0 和 1.0,使得数值模拟现象与室内试验现象相同.开口管桩内径分别采用 25 mm、30 mm、40 mm,壁厚 5 mm,长度 450 mm.

表 1 数值试样细观参数

Tab.1 Parameters of numerical model

$G_s$	$d_{\max}/\text{mm}$	$d_{\min}/\text{mm}$	$e$	$k_n/\text{Pa}$	$k_s/\text{Pa}$	$f$
2.64	2.4	1.2	0.15	$1.0 \times 10^7$	$1.0 \times 10^7$	0.8

#### 3.2 静压沉桩过程模拟

以  $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  的速度静压桩体,同时设置系统的初始时间,编制 FISH 函数使得每计算 0.5 s 时间,即桩每压入 50 mm 时自动保存文件并且输出图,共计算 4 s,压桩 400 mm.编制 FISH 函数自动计算开口管桩桩内土塞高度.图 9 为桩径 25 mm 时土塞高度随桩压入深度的变化情况,从中可以看出数值模拟结果与模型试验实测值有很好的 consistency.

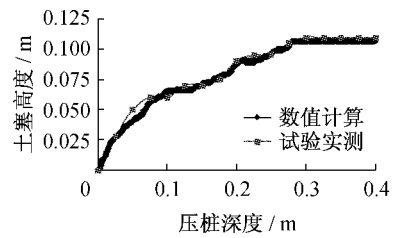


图9 桩径 25 mm 土塞高度随桩打入深度的变化

Fig.9 Relationship between soil plug length and pile penetration

### 4 数值模拟及结果分析

图 10 为桩径 25 mm 条件下颗粒流模拟开口管桩的压入过程颗粒分布与位移发展情况,左侧为土塞模型试样的颗粒分布图,右侧为土塞模型的位移矢量图.分析颗粒位置和位移变化趋势可以看出:

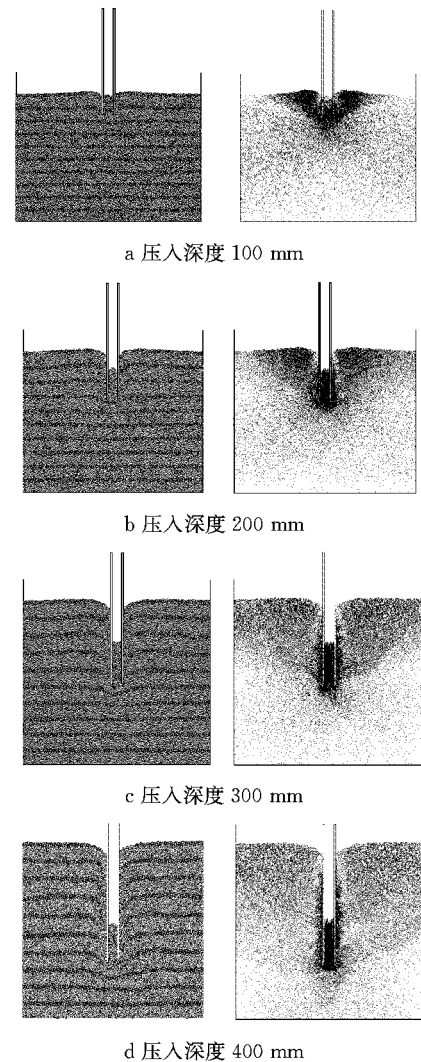


图 10 桩压入过程中颗粒分布及位移变化

Fig.10 Particle arrangement and displacement during pile driving

在桩体刺入过程的初期,见图10a,当开口管桩压入100 mm的过程中,引起桩径外附近土体隆起,这主要由于桩端土体受到开口管桩的挤压向上剪切移动引起的。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下方的土体产生剪切位移,而桩内的土体并没有随桩向下产生显著移动。

随着开口管桩入土深度的增加,见图10b,土塞与桩壁之间的摩擦力逐渐增大,土塞在摩阻力的作用下随桩体不断下移。另外,开口管桩外壁土体受到桩体压力的影响区域逐渐增大,呈明显楔形形体状。当压桩深度达到300 mm时,见图10c,此时土塞高度增加减缓,砂土与桩壁之间的摩阻力已很大,土塞高度渐趋稳定。在此阶段内,主要发生的是桩体切入地基破坏,桩内土塞砂颗粒经历一个逐步压密楔紧的过程,此时桩内土塞在摩阻力作用下产生向上凹的“被动拱”。

在压桩后期,见图10d,土拱作用导致非常高的内摩阻力,土塞像“瓶塞”一样阻止了土体进一步涌入桩内,开口桩就像闭口桩一样贯入土中,桩内土塞土体随桩的压入而下沉,土塞长度不再增加。此时开口管桩呈现闭口桩的沉桩特性。

## 5 结 语

模型试验完整的再现了开口管桩土塞的形成,同时利用高分辨率数码相机观察到了土塞“主动拱”和“被动拱”的形成。重点分析了土塞内几个特征砂粒的移动轨迹和压桩过程中孔隙率和接触数的变化,从细观尺度出发探讨开口管桩沉桩过程中砂土的变形机制和土塞形成机理。根据模型试验建立了PFC<sup>2D</sup>数值模型,土塞高度随压桩深度变化的数值模拟结果与模型试验实测值有很好的 consistency,再现了土塞发展的三个阶段和“主动拱”和“被动拱”的形成,很好的模拟了开口管桩的沉桩过程。表明用颗粒

流理论研究开口管桩刺入砂土过程中土塞形成机理是可行的。本文为研究土塞效应提供了一种新的思路。

## 参考文献:

- [1] Stefanoff G, Boshinov B. Bearing capacity of hollow piles driven by vibration[C]//Proc 9th Int Conf on Soil Mech and Found Engrg, Tokyo: International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1977:753-758.
- [2] Murff J D, Raines R D, Randolph M F. Soil plug behavior of piles in sand [C]//Proc 22nd Offshore Technology Conf, Houston: American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, 1990:25-31.
- [3] Randolph M F, Leong E C, Houlsby G T. One-dimensional analysis of soil plugs in pipe piles[J]. Geotechnique, 1991, 41(4):587.
- [4] Nicola A, Randolph M F. The plugging behaviour of driven and jacked piles in sand[J]. Geotechnique, 1997, 47(4): 841.
- [5] Paik K, Salgado R, Lee J, et al. Behaviour of open- and closed-ended piles driven into sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(4): 296.
- [6] Malhotra, Sanjeev. Effect of wall thickness on plugging of open ended steel pipe piles in sand[C]//Proceedings of Sessions of Geo-Denver 2007 Congress: Contemporary Issues in Deep Foundations (GSP 158), Denver: ASCE, 2007:1-16.
- [7] 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(2):121.
- [8] 余荣传. 基于数字图像技术的砂土模型试验细观结构参数测量[D]. 上海:同济大学土木工程学院, 2006.  
YU Rongchuan. Microstructure parameters measurement for granular soil model using digital image technology [D]. Shanghai: Tongji University. College of Civil Engineering, 2006.
- [9] 史旦达. 单调与循环加荷条件下砂土力学性质细观模拟[D]. 上海, 同济大学土木工程学院, 2007.  
SHI Danda. Micromechanical simulations of sand behavior under monotonic and cyclic loading [D]. Shanghai: Tongji University. College of Civil Engineering, 2007.