

文章编号: 1000-4750(2017)06-0157-09

# 桩基贯入过程中土体大变形分析与流动机理研究

李书兆<sup>1,2</sup>, 李 亚<sup>1</sup>, 鲁晓兵<sup>2</sup>

(1. 中海油研究总院, 北京 100028; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

**摘 要:** 土体大变形问题是海洋岩土工程界研究的难点, 由于其变形梯度较大、流动机理复杂等特点, 常规的岩土工程分析方法在求解该问题时表现出明显的局限性。因此, 该文研究了求解土体大变形问题的解析方法, 即 Strain Path Method (SPM) 和 Shallow Strain Path Method (SSPM), 详细介绍了这两种方法的计算原理; 并基于大、小应变理论, 采用 SSPM 分析了理想土性条件下桩基础贯入过程中周围土体的流动机理和位移场变化规律; 最后, 将 SPM 和 SSPM 计算结果进行比较分析, 阐明了两者之间的内在关系。基于大应变理论, 采用 SSPM 计算得到的土体位移场与 Sagaseta 给出的结果具有较好的一致性, 验证了计算结果的准确性。研究结果显示桩端上部土体会发生隆起现象, 而桩端附近及底部土体具有下沉的位移, 且在贯入深度位置处, 土体下沉位移达到最大值。在径向位置  $r/R=3$  (距桩壁 1 倍直径) 处, 基于大、小应变理论计算结果具有较好的一致性。研究成果有助于了解土体的大变形特性, 也可数值计算结果的校验提供基本数据。

**关键词:** 土体大变形; 桩基贯入; SPM; SSPM; 应力自由地表面

中图分类号: TU473.1 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.01.0018

## LARGE DEFORMATION ANALYSIS AND FLOW MECHANISM STUDY OF THE SOIL DURING PILE PENETRATION

LI Shu-zhao<sup>1,2</sup>, LI Ya<sup>1</sup>, LU Xiao-bing<sup>2</sup>

(1. CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Large deformation of soil mass is a challenge in marine geotechnical engineering. Conventional geotechnical engineering analysis methods are limited to large deformation issues on account of complexity of flow mechanics and high gradient of deformation. The analytical methods solving the large soil deformation issues, Strain Path Method (SPM) and Shallow Strain Path Method (SSPM), are studied in the paper. The paper presents the calculated theory, analyzes the change rule and flowing mechanism of soil displacement field induced by pile penetration based on large and small strain theory under ideal soil conditions. Finally, the comparisons of calculation results by SPM and SSPM clarify the internal relation of both methods. Results show that the soil deformation field determined by using SSPM based on the large strain theory agrees well with that given by Sagaseta, which illustrates the validity of the calculated results. The soil upheaval occurs on the upper of the pile tip, but the soil moves downward in the vicinity and bottom of the pile tip. The settlement reaches the maximum value when the vertical position is equal to the depth of pile penetration. Calculating results based on the large and small strain theory are generally consistent when the radial position lies in the 3 times pile radius which is 1 times pile diameter away from the pile edge. Research findings in the paper help elucidate the large soil deformation behavior in a consistent and rational manner, and also provide the basic data for validating numerical simulations.

**Key words:** large soil deformation; pile penetration; SPM; SSPM; stress free soil ground surface

收稿日期: 2016-01-07; 修改日期: 2016-07-05

基金项目: 中国海洋石油总公司科技项目(ZHKY-2013-ZY-05); 中国博士后科学基金项目

通讯作者: 李书兆(1985), 女, 河北人, 工程师, 博士, 从事海洋岩土工程方面的研究(E-mail: lishzh25@126.com).

作者简介: 李 亚(1974), 男, 河南人, 教授级高工, 博士, 中海油岩土工程特聘专家, 从事海洋岩土工程方面的研究(E-mail: liya4@cnooc.com.cn);

鲁晓兵(1968), 男, 湖北人, 教授, 博士, 博导, 从事海洋平台稳定性等方面的研究(E-mail: xblu@imech.ac.cn).

海洋岩土大变形问题是当前国际海洋岩土工程界研究的热点和难点,具体如筒形或箱形基础的嵌入问题、桩基础贯入问题、取样器对土体的扰动问题、钻井船插桩问题等。这些大变形问题具有破坏机理复杂,诱发因素较多,变形梯度较大等特性<sup>[1-3]</sup>。因此,采用传统的岩土工程方法(如解析解、荷载传递法、极限平衡法、塑性上限法,常规有限元法等)求解岩土大变形问题时存在明显的局限性,无法有效解决该类问题。因此,研究评价土体大变形的分析方法具有重要的科学和工程意义<sup>[4-6]</sup>。岩土大变形理论分析方法的研究是解决岩土大变形问题的基础。目前,对于岩土大变形理论分析方法的研究,具体情况如下:

Butterfield 和 Banerjee<sup>[7]</sup>假设土体为不可压缩、均匀且各向同性的理想弹塑性材料,提出了采用平面应变条件下圆孔扩张方法解决桩基的贯入问题。Carter 和 Randolph<sup>[8-9]</sup>、Collins 和 Yu<sup>[10]</sup>、Yu 和 Houlsby<sup>[11]</sup>、Cao 等<sup>[12-13]</sup>采用不同的土体模型,考虑土体的不同特性,利用圆孔扩张方法分析了沉桩时桩周土体径向位移场的变化情况。但是,圆孔扩张方法将桩周土体的扩张看作平面应变问题,土体的位移场、应变场等仅仅依赖于径向坐标,忽略了桩基贯入过程中竖向坐标的影响。试验研究表明,桩基贯入过程中土体发生竖向的隆起变形,平面应变下的圆孔扩张方法无法表征这一特性。李月健<sup>[14]</sup>、朱宁<sup>[15]</sup>等通过镜像的方法,基于小应变假设研究了沉桩时土体的径向和竖向位移场,但是无法模拟桩基的贯入过程,并且对于桩基近场处的土体采用小应变理论计算位移时会有较大误差。

Baligh 等<sup>[16-17]</sup>认为圆孔扩张理论不适合分析桩基的深贯入问题。因此他通过对试验结果的分析,指出基础深贯入时土体变形与土体特性无关,属于应变控制问题。在此基础上,提出了一种近似评价贯入器(桩基、CPT、取样器等)嵌入土体时周围土体位移场的理论方法,称为 Strain Path Method,简称 SPM。该方法在空穴扩张理论的基础上,假设土体为均质、各向同性、不可压缩、无限空间体,借助流体力学中的源理论,将桩基不排水贯入土体的过程,视为一簇无旋、无粘性理想均匀流绕固定源的流动过程,通过土颗粒速度沿流线积分确定土体的位移场。在缺乏现场土性物理及力学参数的情况下,对于预估土体变形、预测基础特性、解释现

场试验数据,SPM 是一种较好的选择<sup>[18]</sup>。Huang<sup>[19]</sup>采用 SPM 给出了不同形状旁压仪在贯入过程中土体产生的位移及应变场,由于采用许多平面四边形的组合代替实际贯入体的形状,因此只能采用数值解法获取土体位移场。Danziger 等<sup>[20]</sup>也采用 SPM 确定了贯入器在嵌入过程中土体产生的位移场。但是,由于地表面的存在,土体为半无限空间体,与该方法中假设土体为无限空间体相矛盾,因此利用 SPM 确定的土体位移场在贯入器端部附近较为合理,但却无法给出远离贯入器端部处土体准确的位移场。

针对 SPM 忽略地表面存在这一问题,Sagaseta 采用源汇理论模拟实际自由地表面的存在,通过求解土颗粒速度,并将速度沿流线积分获取土体位移,该方法被称为 Shallow Strain Path Method,简称 SSPM<sup>[21-22]</sup>。Sagaseta 基于小应变理论推导了土颗粒速度计算公式,并且给出了地表面位移计算积分表达式。Chow 和 Teh、黄院雄等<sup>[23-24]</sup>利用 Sagaseta 提出的源与源及源与汇的相互作用模拟地表面,基于小应变理论给出了不同方向位移计算表达式,得到了桩基贯入时周围土体的径向和竖向位移场。罗战友<sup>[25]</sup>基于 Baligh 提出的 SPM,结合源汇理论,在大应变假定情况下,推导了静压单桩周围土体位移场的解析解,给出了整个压桩深度内土体的位移场。但是,其基于大应变理论推导位移解析解的过程中,并未考虑修正应力产生的位移场。已有研究指出虽然修正应力对桩身范围内土体产生的位移仅为总位移的一小部分,但是其为应力自由地表面处土体位移的决定因素<sup>[21]</sup>。

基于以上分析可知,目前的研究多是基于小应变理论建立,即便通过大应变理论推导了位移计算表达式,但忽略了应力修正项对地表面位移的影响,不能准确确定地表面处土体的隆起变形。所以,本文以轴对称桩基础贯入问题为例,详细阐述 SPM 和 SSPM 的理论基础和计算方法;基于大、小应变理论,采用 SSPM 计算应力自由地表面处土体的位移,并揭示桩基在整个贯入过程中内部土体的变形特征和流动规律;最后,将 SPM 和 SSPM 计算结果进行比较分析,详细阐明两种方法之间的内在关系和不同特征。本文研究成果,有助于了解土体大变形的特性,也可为数值模拟计算结果的校验提供基本数据。

# 1 方法介绍

SPM 主要被用于求解深基础的贯入问题,采用欧拉方法描述土颗粒在空间的运动,通过土颗粒速度沿流线积分进而获得贯入器嵌入过程中土体产生的位移。然而,该方法忽略了应力自由地表面的存在。针对这一问题,Sagaseta 采用源汇理论模拟自由地表面的存在,提出了 SSPM 计算应力自由表面处的土体位移。以下以轴对称桩基贯入为例,详细介绍 SPM 和 SSPM 的理论基础和计算方法。

## 1.1 SPM 介绍

SPM 假定土体为均匀、各向同性、不可压缩的空间无限体。为模拟不排水稳定贯入状态,它利用单一球形源代替传统的空穴扩张,并且该单一球形源可在单位时间内排开不可压缩土体体积  $V$ 。因此,根据体积守恒定律,对于任意  $t$  时刻,有下式成立:

$$R(t) = \left( \frac{3}{4\pi} Vt \right)^{1/3} \quad (1)$$

式中,  $R(t)$  为  $t$  时刻源半径。

在球坐标系中,径向位置  $\rho(r, z)$  处土单元的速度为  $v_\rho = \frac{V}{4\pi} \frac{1}{\rho^2}$  [16]。通过坐标转换,在柱坐标轴中,土单元的径向速度和竖向速度为:

$$v_r^0 = \frac{V}{4\pi} \frac{\sin \varphi}{\rho^2}, \quad v_z^0 = \frac{V}{4\pi} \frac{\cos \varphi}{\rho^2} \quad (2)$$

其中:  $v_r^0$  为径向速度;  $v_z^0$  为竖向速度;  $\rho^2 = r^2 + z^2$ ;  $r = \rho \sin \varphi$ ;  $z = \rho \cos \varphi$ ; 上标符号 0 代表单一球源作用。

上述已说明,SPM 将土体视为无旋、无粘性均匀流体。因此,基于流体力学理论,对于轴对称问题,速度与流函数  $\psi$  之间的关系见式(3)[26]。对于单一球源作用下流函数的具体表达式见(4)。

$$v_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad v_z = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \quad (3)$$

$$\psi^0 = \frac{V}{4\pi} \cos \varphi, \quad \varphi = \arctan \frac{r}{z} \quad (4)$$

求解轴对称桩基础贯入时,SPM 采用在均匀流场中插入单一球源来模拟桩基础贯入过程,将土颗粒速度沿流线进行积分获取土体的位移场。设均匀流场在竖直方向的速度为  $U$ ,而流函数  $\psi$  则为单一源作用下的流场与均匀流场之和,见式(5)。土颗粒径向速度与单一球源作用下相同,而竖向速度为单一源作用下速度与均匀流场速度  $U$  之和,见

式(6)。

$$\psi = \psi^0 - \frac{r^2}{2} U \quad (5)$$

$$v_r = v_r^0, \quad v_z = U + v_z^0 \quad (6)$$

对于土体中任意土颗粒  $M_i$  初始坐标为  $r_i^0$  和  $z_i^0$ ,  $t$  时刻  $M_i$  的坐标可根据式(6)采用数值积分方法按下式确定:

$$\begin{cases} r_i^t = r_i^0 + \int_0^t v_r(r_i^\tau, z_i^\tau) d\tau \\ z_i^t = z_i^0 + \int_0^t v_z(r_i^\tau, z_i^\tau) d\tau \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $r_i^\tau$ 、 $z_i^\tau$  为采用大应变理论计算时,其值与时间有关;采用小应变理论计算时,其值为初始值 ( $r_i^0$ ,  $z_i^0$ )。

确定插桩过程中土体产生的位移场时,大、小应变理论直接决定计算结果的合理性。大应变理论是指采用数值积分计算土体位移时土颗粒的位置与时间有关,是时间的函数。数值积分过程中,土颗粒位置随着时间增量而不断更新,随之采用更新后的土颗粒位置作为新的初始条件继续计算,直到计算终止。采用大应变理论,可以较为准确地计算桩基周围土体的位移。而小应变理论则认为计算土体位移的积分表达式中土颗粒位置与时间无关,即整个数值积分过程中土颗粒的初始条件不变。采用小应变理论,可以较为准确地计算距离桩基较远时土体的位移值,但是计算距离桩基较近的土体位移值时,容易出现无穷解,该结果与实际情况差别较大。所以采用小应变理论,只能给出远距离土体的位移解,且与采用大应变理论求解值基本一致,后文具有详细说明;对于距离桩基近距离处土体位移的计算,只能基于大应变理论进行求解。

## 1.2 SSPM 介绍

SSPM 是通过源汇理论模拟应力自由地表面的存在,然后结合 SPM 所形成的一种方法。由于地表面的存在,将土体视为均匀流体绕固定源流动已然不合理。因此,其采用源以一定速度  $U$  在均质土体中下沉,模拟桩基础贯入过程,通过土颗粒速度沿流线积分求解土体位移,且通过土颗粒速度对坐标微分求解应变。

### 1.2.1 应力自由地表面

图 1 所示为采用 SSPM 求解桩基础贯入问题的示意图。图 2 所示为模拟应力自由地表面的方法,分为 3 步:

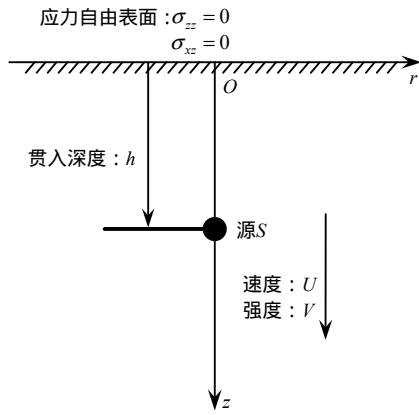


图1 SSPM 求解的桩基础贯入问题  
Fig.1 SSPM representation of pile penetration solution

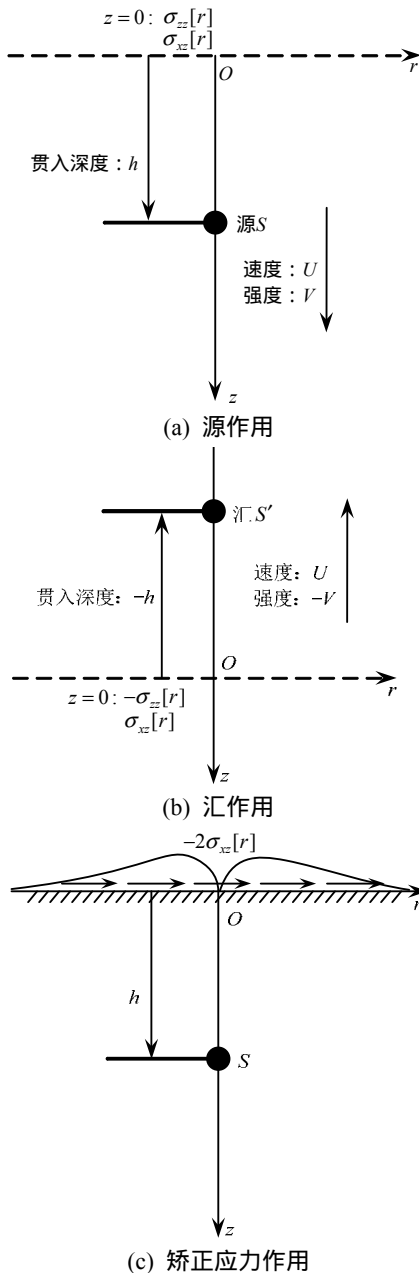


图2 考虑应力自由地表面的桩贯入模拟  
Fig.2 Simulation of pile penetration with stress free ground surface

1) 忽略自由地表面的存在,假定土体为无限空间体,求解  $z = h$  处源作用下土体的位移和应变;

2) 假定地面以上,与源相同位置处,即  $z = -h$ , 存在一虚拟汇,求解虚拟汇作用下土体的位移和应变。虚拟汇的运动方向与源相反,其单位时间内可汇入土体体积为  $V$ 。在应力自由表面处,源汇共同作用可抵消地表面径向位移,而使竖向位移加倍。

源作用下,地表面处产生法向应力  $\sigma_{zz}$  和切向应力  $\sigma_{xz}$ ,而虚拟汇在地表面处产生法向应力  $-\sigma_{zz}$  和切向应力  $\sigma_{xz}$ 。因此在源汇共同作用下,可抵消应力地表面处不存在的正应力,而使切向应力加倍。

3) 抵消应力自由地表面不存在的切向应力,按下述步骤进行: a) 假设土体为各向同性线性材料,根据步骤 1)和步骤 2)得到应变,计算切向应力  $2\sigma_{xz}$ ; b) 将大小相等、方向相反的切向应力(称为矫正应力)分布在地表面上,求解此时土体的位移。

将上述步骤中得到的位移相加,即得应力自由表面处土体的位移。计算过程中需注意两点,在应力自由地表面处: 1) 矫正应力产生的竖向位移为 0; 2) 其位移为源作用下的 2 倍。

1.2.1 SSPM 计算方法

由上可知,SSPM 由源、汇及矫正应力作用组成。桩半径  $R$  与点源排开不可压缩土体体积  $V$  之间的关系,见下式:

$$R = \sqrt{V / \pi U} \tag{8}$$

图 3 为轴对称情况下,土体中任意土颗粒  $P(r, z)$ ,在源与汇共同作用下的示意图。根据式(2)和式(8)可得源、汇及矫正应力作用下土颗粒的径向及竖向速度分别为:

1) 源作用下,土颗粒速度:

$$\begin{cases} v_{r1} = \frac{UR^2}{4} \frac{r}{r_1^3} \\ v_{z1} = \frac{UR^2}{4} \frac{z-h}{r_1^3} \end{cases} \tag{9}$$

式中:  $U$  为桩基贯入速度;  $R$  为桩基半径;  $r_1 = \sqrt{r^2 + (z+h)^2}$ , 为源与土颗粒  $P$  之间的距离。

2) 汇作用下,土颗粒速度:

$$\begin{cases} v_{r2} = \frac{UR^2}{4} \frac{r}{r_2^3} \\ v_{z2} = \frac{UR^2}{4} \frac{z+h}{r_2^3} \end{cases} \tag{10}$$

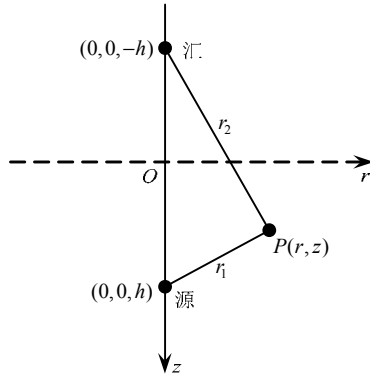


图 3 轴对称空间内源与汇共同作用示意图

Fig.3 Source and sink image in the axial symmetry

式中： $r_2 = \sqrt{r^2 + (z-h)^2}$ ，为汇与土颗粒  $P$  之间的距离。

3) 修正应力作用下，土颗粒速度：

$$\begin{cases} v_{r3} = \int_0^\infty I_r(r, z, a) F_{\gamma SP}(a) da \\ v_{z3} = \int_0^\infty I_z(r, z, a) F_{\gamma SP}(a) da \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中： $F_{\gamma SP}(a)$  表示径向距离为  $a$  处，土颗粒  $M(a,0)$  在源汇作用下产生的剪应变率，桩基贯入问题中， $F_{\gamma SP}(a) = 3UR^2 \frac{ha}{r_h^5}$ ，其中  $r_h = \sqrt{a^2 + h^2}$ ，表示源与土颗粒  $M$  之间的距离； $I_r$  和  $I_z$  为修正应力对土颗粒  $P$  的弹性影响系数，可通过 Curruti 问题求解获得<sup>[16]</sup>，见下式：

$$\begin{cases} I_r(r, z, a) = \frac{1}{2\pi} [A_{rK} K(k) + A_{rE} E(k)] \\ I_z(r, z, a) = \frac{1}{2\pi} [A_{zK} K(k) + A_{zE} E(k)] \end{cases} \quad (12)$$

式中：

$$\begin{aligned} K(k) &= \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 \theta}} ; \\ E(k) &= \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-k^2 \sin^2 \theta} d\theta ; \\ A_{rK} &= \frac{r_{a2}}{r} \left( 1 - \frac{2ar - z^2}{r_{a2}^2} \right) , \\ A_{rE} &= -\frac{r_{a2}}{r} \left[ 1 + \frac{z^2}{2} \left( \frac{1}{r_{a1}^2} + \frac{1}{r_{a2}^2} \right) \right] ; \\ A_{zK} &= -\frac{z}{r_{a2}} ; \\ A_{zE} &= \frac{z}{r_{a2}} \left[ 1 - \frac{2a(a-r)}{r_{a1}^2} \right] ; \end{aligned}$$

其中： $k^2 = 1 - r_{a1}^2 / r_{a2}^2$ ； $r_{a1} = \sqrt{(a-r)^2 + z^2}$ ； $r_{a2} = \sqrt{(a+r)^2 + z^2}$ 。

土颗粒速度确定后，可沿颗粒路径积分获取土体中任意土颗粒的径向和竖向位移。假定土体中任一土颗粒初始位置为  $P(r_0, z_0)$ ， $t$  时刻后土颗粒的位置  $P$  会移动至  $(r(h), z(h))$ ，按下式计算确定：

$$\begin{cases} r(h) \\ z(h) \end{cases} = \begin{cases} r_0 \\ z_0 \end{cases} + \int_0^t \begin{cases} v_r(r, z, h) \\ v_z(r, z, h) \end{cases} dt = \begin{cases} r_0 \\ z_0 \end{cases} + \int_0^h \begin{cases} v_r(r, z, h) \\ v_z(r, z, h) \end{cases} \frac{1}{U} dh \quad (13)$$

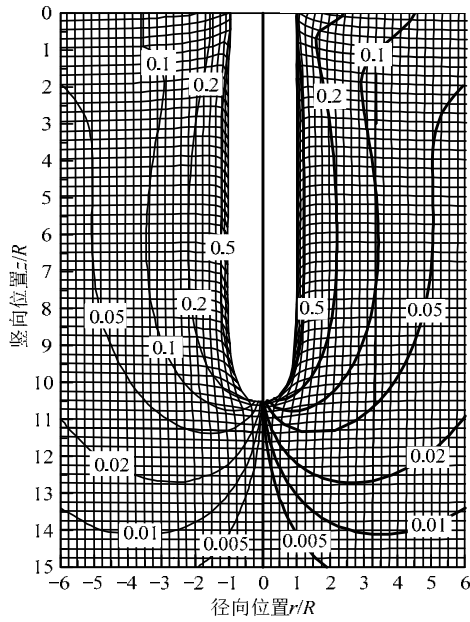
同样，采用大应变理论计算时，式中  $(r, z)$  与时间有关；采用小应变理论计算时，其值为初始值。

## 2 土体变形与流动机理

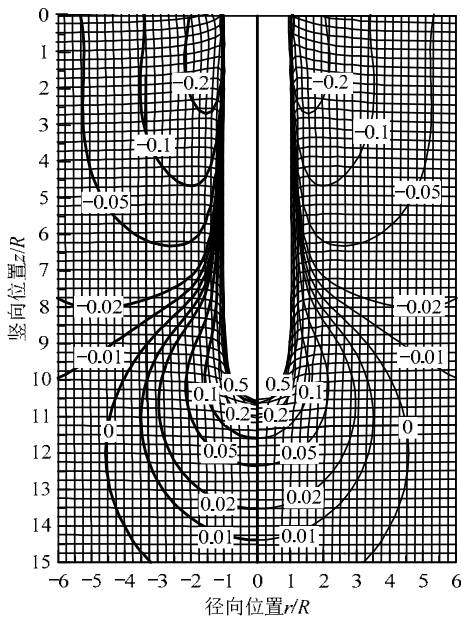
采用 SPM 和 SSPM 求解桩基贯入问题，以桩半径  $R$  作为归一化参数，采用土颗粒实际径向位置  $r$  和竖向位置  $z$  与  $R$  之间的比值表示土颗粒的位置，即  $r/R$  和  $z/R$ ；以土颗粒实际径向位移  $HD$  和竖向位移  $LD$  与  $R$  之间的比值表示土颗粒位移，即  $HD/R$  和  $LD/R$ ；以桩基实际贯入深度  $L$  与  $R$  之间的比值表示桩基贯入深度，即  $L/R$ 。

### 2.1 贯入深度时 $L/R=10$ 土体变形图

基于大变形理论，采用 SSPM 计算桩基贯入深度  $L/R=10$  时土体的位移场，土体变形情况和等值线变形图(变形云纹图)见图 4。图 4(a)和图 4(b)分别为径向和竖向云纹图，图 4(a)中的左图和图 4(b)中的右图均为 Sagaseta 给出的结果，图 4(a)中的右图和图 4(b)中的左图为本文采用 SSPM 的计算结果。对于径向变形，两者基本一致。但是，在地表面以下至  $z/R=1$  之间，径向位移 0.1 和 0.2 的云纹图有所差异，本文计算结果偏大。桩基贯入过程中，周围土体受到挤压作用，从而导致土颗粒在径向向外扩张、流动。然而，距桩轴线越远，受影响程度越小，径向位移也就越小。对于竖向变形，Sagaseta 给出的结果与本文的计算结果表现出较好的一致性<sup>[22]</sup>。由于桩基贯入时，远离桩端及桩端上部土体，会发生隆起现象，但是距离桩端附近及桩端底部土体位移向下运动，位移呈现“灯泡状”，所以在竖向云纹图中会出现“0”位移的情况。通过本文计算结果与 Sagaseta 结果的比较，验证了本文计算结果的准确性。



(a) 径向云纹图



(b) 竖向云纹图

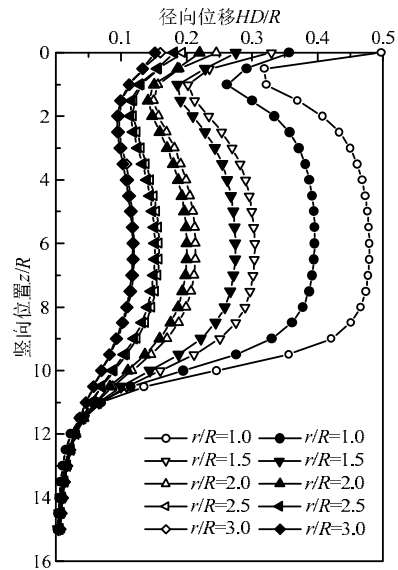
图4 桩基贯入  $L/R=10$  土体变形云纹图

Fig.4 Soil deformation contours of pile penetration  $L/R=10$

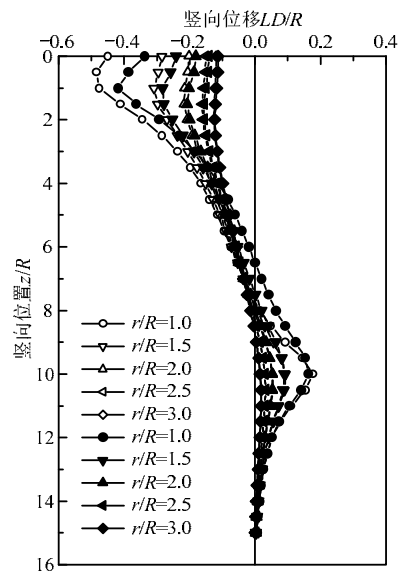
### 2.2 基于大、小应变理论土体位移场的变形规律

为研究基于大、小应变理论，计算得出的土体位移场的相关性和差异性。采用 SSPM 计算了贯入深度  $L/R=10$ 、径向位置  $r/R=1、1.5、2、2.5、3$  时土体的位移，见图 5。图中实心符号曲线为基于大应变理论的计算结果，空心符号曲线为基于小应变理论的计算结果。从图中可以观察到：地表面以下至竖向位置  $z/R=2$  以上，出现径向位移变小、而竖向隆起位移增大的现象，并达到土体隆起位移

的最大值，不同径向位置，出现这一现象的深度不同，但是可知随着径向位移的增大，该深度也逐渐增大；竖向位置  $z/R=2\sim z/R=8$  之间，径向位移逐渐增大，竖向隆起位移逐渐变小进而进入土体位移向下运动的情况；竖向位置  $z/R=8\sim z/R=10$  时，径向位移逐渐减小，而竖向位移达到向下运动的最大值，即在贯入深度位置处土体下沉位移达到最大值；竖向位置  $z/R=10$  以下，径向位移与竖向位移逐渐减小并趋于 0。从定性角度分析，基于大、小应变理论，计算结果具有相同的变形趋势，均详细表明了以上所述的土体位移场的变形规律和



(a) 径向位移



(b) 竖向位移

图5 基于大、小应变理论的 SSPM 计算结果

Fig.5 SSPM calculation results based on the large and small strain theory

特性。但是，定量上两者还存在很大的差别，基于大应变理论计算结果小于基于小应变理论计算结果。距桩轴线附近，基于小应变理论计算结果趋于无穷大解，两者差别最大，随着径向位置的增大，两者的差别逐渐变小，在径向位置  $r/R=3$  (距桩壁 1 倍直径) 处，两者表现出了较好的一致性。

2.3 不同贯入深度土体位移场的变化规律

为研究不同径向位置处，贯入过程中土体位移场的变化规律 图6和图7给出了径向位置  $r/R=1$ 、2、3、贯入深度  $L/R=2$ 、4、6、8、10 时，基于大应变理论采用 SSPM 计算得到的土体径向和竖向位移场的变化关系曲线。图6显示：当桩基贯入深度较浅(比如  $L/R=2$ ) 时，随着竖向深度的增加，径向位移逐渐减小但很快趋于 0，随着贯入深度的增加，在地表以下  $z/R=2$  以上，出现土体径向位移减小进而增大的现象。桩身范围内，同一深度，同一径向位置，随着贯入深度的增加，土体径向位移向外流动、并逐渐增加或达到某一定值，从图6也可以看出，贯入深度一致时，随着径向位置的增大，土体径向位移逐渐减小。对于不同径向位置土体、在不同贯入深度下竖向位移场的变化规律见图7。当桩基贯入深度较浅时，所有土体均表现出向上流动的隆起现象，随着贯入深度的增加，土体隆起位移增大，同时也出现了向下运动的位移。贯入深度越大，土体出现向下运动的深度越深，在贯入深度位置处，土体下沉位移达到最大值。另外，贯入深度一致时，随着径向位置的增大，土体竖向位移也表征出逐渐减小的特性，详细揭示了桩基贯入过程中土体的变形特征和流动规律。

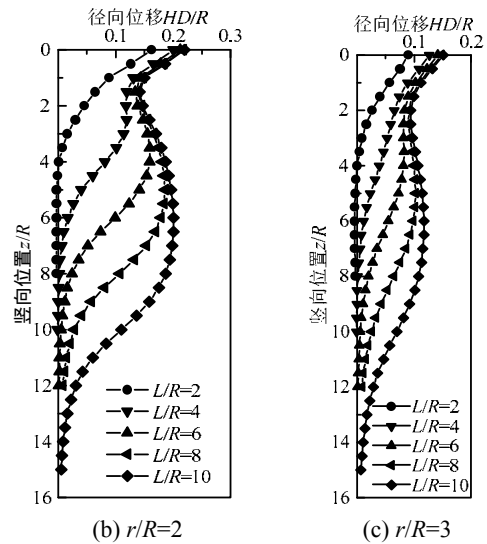
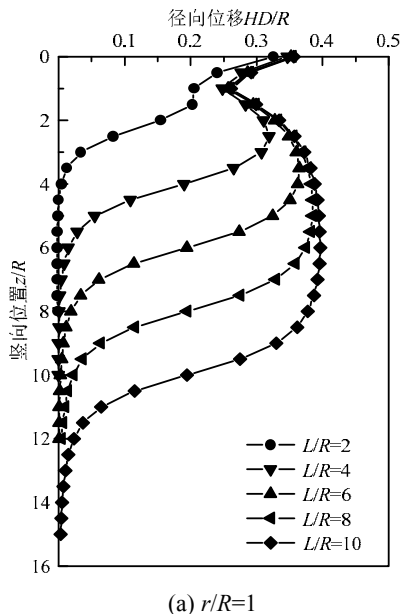


图6 不同径向位置处土体径向位移场  
Fig.6 Radial displacement of the soil with different radial positions

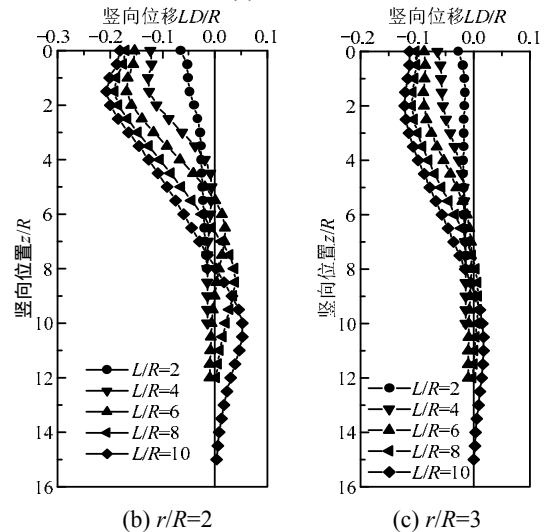
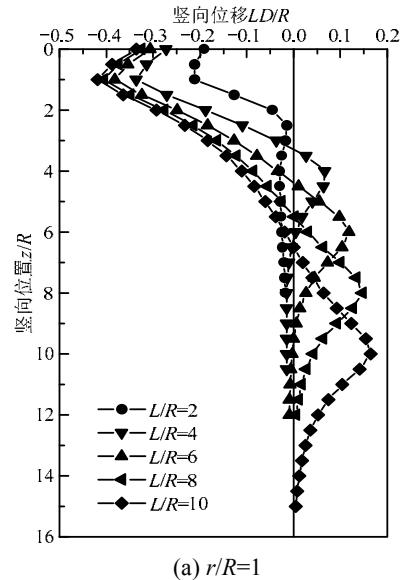


图7 不同径向位置处土体竖向位移场  
Fig.7 Vertical displacement of the soil with different radial positions

## 2.4 SPM 和 SSPM 计算结果分析

为考察 SPM 和 SSPM 之间的关系,基于大应变理论,采用 SPM 和 SSPM 确定了贯入深度  $L/R = 10$ , 径向位置  $r/R = 1, 2, 3$  处土体位移沿深度的变化关系,见图 8。图中实心符号曲线为 SSPM 计算结果,空心符号曲线为 SPM 计算结果。结果显示:对于径向位移,在桩端附近,SPM 和 SSPM 计算结果呈现出较好的一致性,但是远离桩端、靠近地面处两者相差较大,原因在于 SPM 中并未考虑自由地表面的存在,故靠近桩端处计算得到的土体位移较为准确,远离桩端处土体位移无实际物理意义;对于竖向位移,采用 SSPM 可以较为准确地计

算自由地表面土体的隆起位移,在桩端附近,由于 SSPM 考虑了点汇和矫正应力的作用,故计算结果小于 SPM 计算结果。

SPM 和 SSPM 采用流体力学理论求解岩土大变形问题,其计算结果有助于了解土体变形特性、变形机理和扰动情况,还可为校验数值仿真结果提供基本数据。在本文研究成果的基础上,对于采用数值仿真方法研究岩土土体大变形问题现已开展。

## 3 结论

海洋岩土大变形问题是海洋岩土工程的重要特征,也是海洋岩土工程界研究的热点及难点。常规的岩土理论分析方法,在求解大变形问题时均表现出一定的局限性。对于岩土大变形问题的理论分析方法研究是解决此类问题的基础。基于此,本文详细介绍了可用于评估土体大变形问题的 SPM 和 SSPM,以轴对称桩基贯入为例,采用这两种方法分析理想土性条件下桩基础贯入过程中土体的流动特性和土体位移场的变化规律,主要结论如下:

(1) 桩基贯入过程中,由于挤压作用,土颗粒在径向向外扩张、流动,距桩轴线越远,径向位移越小。对于远离桩端及桩端上部土体,会发生隆起现象。但是,距离桩端附近及桩端底部土体位移向下运动,位移呈现“灯泡状”,故在竖向云纹图中会出现“0”位移的情况。

(2) 基于大、小应变理论,计算结果具有相同的变形趋势,均详细表明了土体位移的变形规律和特性。但是基于大应变理论计算结果小于基于小应变理论计算结果,在径向位置  $r/R = 3$  (距桩壁 1 倍直径)处,两者表现出了较好的一致性。

(3) 当桩基贯入深度较浅(比如  $L/R = 2$ )时,随着竖向深度的增加,径向位移逐渐减小但很快趋于 0,所有土体均表现出向上流动的隆起现象。随着贯入深度的增加,在地表面以下  $z/R = 2$  以上,出现土体径向位移减小进而增大的现象;桩身范围内,同一深度,同一径向位置,随着贯入深度的增加,土体径向位移逐渐增加或达到某一定值;而土体隆起位移增大,同时也出现了向下运动的位移,在贯入深度位置处,土体下沉位移达到最大值。

(4) 对于径向位移,在桩端附近,SPM 和 SSPM 计算结果呈现出较好的一致性;对于竖向位移,由于点汇和矫正应力的作用,SSPM 可较为准确地计算自由地表面土体的隆起位移,但在桩端附近,其

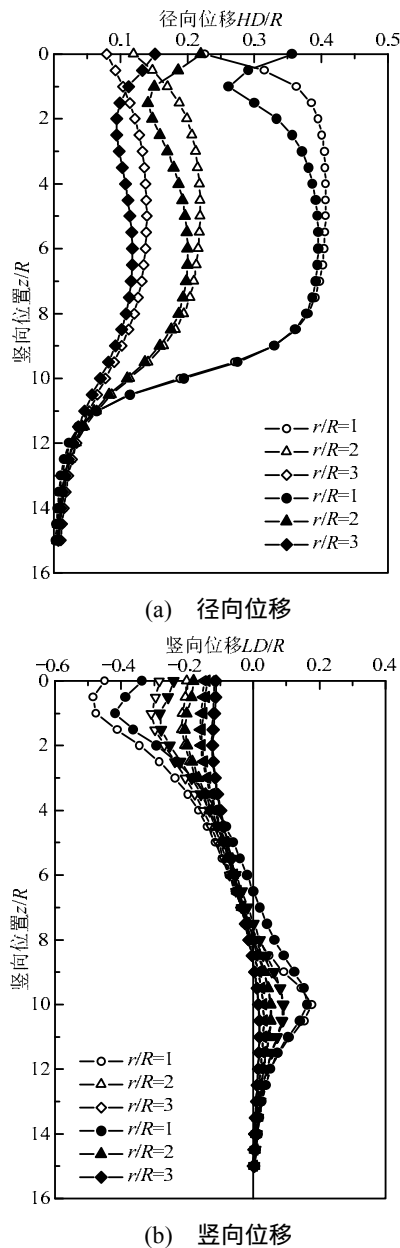


图 8 SPM 与 SSPM 计算结果

Fig.8 Calculation results from SPM and SSPM



计算结果小于 SPM 计算结果。

本文研究成果有助于了解土体的大变形特性和机理, 也可为数值模拟结果的标定提供基本数据。

#### 参考文献:

- [1] 闫澍旺, 贾沼霖. 大直径超长钢管桩溜桩机理及计算方法研究[J]. 工程力学, 2015, 32(9): 158-164.  
Yan Shuwang, Jia Zhaolin. Mechanisms and calculation of pile-run for long and large diameter piles [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(9): 158-164. (in Chinese)
- [2] 刘润, 徐余. 减沉桩基础作用特性的有限元分析[J]. 工程力学, 2006, 23(2): 144-148.  
Liu Run, Xu Yu. FE analysis of behavior of settlement reducing pile foundation [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(2): 144-148. (in Chinese)
- [3] 殷齐麟, 董胜, 樊敦秋. 复杂地层中自升式平台插桩的数值模拟[J]. 工程力学, 2016, 33(9): 204-211.  
Yin Qilin, Dong Sheng, Fan Dunqiu. Numerical simulation of penetration of jack-up platform in complex foundation soils [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(9): 204-211. (in Chinese)
- [4] Xie Y. Centrifuge model study on spudcan-Pile interaction [D]. Singapore: Department of Civil Environmental Engineering, National University of Singapore, 2009.
- [5] Hossain M S and Randolph M F. Experimental investigation of punch-through potential for spudcan foundations [C]. Proceedings of the 7th International Conference on Physical Modeling in Geotechnics, Zurich, Switzerland, 2010: 1025-1031.
- [6] Qiu G, Henke S and Grabe J. 3D FE analysis of the installation process of spudcan foundations [J]. Frontiers in Offshore Geotechnics II, 2010: 685-690.
- [7] Butterfield R, Banerjee P K. The effect of pore water pressures on the ultimate bearing capacity of driven piles [C]. Proceedings Second South East Asian Conference Soil Engineering, Bangkok, 1970: 385-394.
- [8] Carter J P, Randolph M F, Wroth C P. Stress and pore pressure changes in clay during and after expansion of a cylindrical cavity [J]. International Journal for Numerical and Analysis Methods in Geomechanics, 1979, 3(4): 305-322.
- [9] 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.
- [10] Collins I F, Yu H S. Undrained cavity expansion in critical state soils [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1996, 20(7): 489-516.
- [11] Yu H S, Houlsby G T. Finite cavity expansion in dilatant soil: loading analysis [J]. Geotechnique, 1991, 41(2): 173-183.
- [12] Cao L F. Interpretation of in-situ testing clay with particular reference to reclaimed sites [D]. Singapore: Nanyang Technological University, 1997.
- [13] Cao L F, Teh C I, Chang M F. Undrained cavity expansion in modified Cam clay [J]. Geotechnique, 2001, 51(4): 323-334.
- [14] 李月健. 土体内球形空穴扩张及挤土桩沉桩机理研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2001.  
Li Yuejian. A study on spheric cavity expansion and static piling in soils [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2001. (in Chinese)
- [15] 朱宁. 静力压桩引起桩周土体变形的理论分析[D]. 江苏: 河海大学, 2005.  
Zhu Ning. Theoretical analysis of soil deformation due to piles jacking [D]. Jiangsu: HoHai University, 2005. (in Chinese)
- [16] Baligh M M. Strain path method [J]. Journal of Geotechnical Engineering. ASCE, 1985, 111(9): 1108-1136.
- [17] Levadoux, J N. Pore pressures in clays due to cone penetration [D]. Thesis presented to the Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass., in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, 1980.
- [18] Szechey K. Deformations around and below driven and vibrated test tubes [J]. Acta Technica Academiae Scientiarum Hungaricae, 1968, 62(1/2): 97-113.
- [19] Huang A B. Strain path analyses for arbitrary three-dimensional penetrometers [J]. International Journal of numerical and analytical methods in Geomechanics, 1989, 13(5): 551-564.
- [20] Danziger F A B, Almeida M S S, Sill S G C. The significance of the strain path analysis in the interpretation of piezocone dissipation data [J]. Geotechnique, 1997, 47(5): 901-914.
- [21] Sagaseta C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss [J]. Geotechnique, 1987, 37(3): 301-320.
- [22] Sagaseta C, Whittle A J, Santagata M. Deformation analysis of shallow penetration in clay [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1997, 21(10): 687-719.
- [23] Chow Y K, Teh C I. A theoretical study of pile heave [J]. Geotechnique, 1990, 40(1): 1-14.
- [24] 黄院雄, 许清侠, 胡中雄. 饱和土中打桩引起桩周围土体的位移[J]. 工业建筑, 2000, 30(7): 15-19.  
Huang Yuanxiong, Xu Qingxia, Hu Zhongxiong. Soil displacement due to driving pile in saturated clay [J]. Industrial Construction, 2000, 30(7): 15-19. (in Chinese)
- [25] 罗战友. 静压桩挤土效应及施工措施研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2004.  
Luo Zhanyou. Study on compacting effects and construction measures of jacked pile [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2004. (in Chinese)
- [26] 梁智权. 流体力学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2002: 116-120.  
Liang Zhiquan. Fluid mechanics [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2002: 116-120. (in Chinese)