

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.05.007

## 桩靴贯入与拔出引起的邻近桩附加及残余荷载分析\*

姬海波<sup>1,2</sup>, 王建华<sup>1,2</sup>, 范怡飞<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津大学岩土工程研究所, 天津 300072)

**摘要:** 自升式钻井船桩靴贯入与拔出土层后会导致周围土体发生不可恢复的大变形, 从而使邻近平台桩基础受到附加荷载作用。目前, 对于钻井船插拔桩引起的附加荷载少有分析, 且没有较成熟的计算方法。为此, 建议了一种分析钻井船插拔桩附加荷载的方法。该方法首先通过耦合欧拉-拉格朗日(CEL)大变形有限元算法计算出桩靴贯入与拔出土层时邻近桩的水平位移; 然后依据计算出的桩身水平位移, 利用正交函数最小二乘法确定桩身位移分布函数, 进而依据主动桩的  $p-y$  关系曲线及梁的弯曲理论确定出桩身受到的附加荷载; 最后利用非线性地基梁模型, 分析附加荷载作用下的桩身内力响应。通过对软粘土中钻井船插拔桩离心模型试验的数值仿真模拟, 验证了这种分析附加及残余荷载方法的可行性。

**关键词:** 残余荷载; 钻井船插拔桩; CEL;  $p-y$  关系曲线; 梁的弯曲理论

**中图分类号:** TU473    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-2132(2020)05-0732-09

## Analysis of Additional and Residual Loads of an Adjacent Pile Induced by Spudcan Penetration and Extraction

Ji Haibo<sup>1,2</sup>, Wang Jianhua<sup>1,2</sup>, Fan Yifei<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Unrecoverable deformation of the surrounding soils will be induced by the jack-up spudcan penetration and extraction in the seabed, leading to additional loads on the adjacent platform piled foundation. At present, there is little research and mature calculation method of the additional loads induced by spudcan penetration and extraction. Therefore, in this paper, a method of calculating the additional loads induced by spudcan penetration and extraction is established. First, the lateral deflection of adjacent pile is obtained using the Coupled Euler-Lagrange (CEL) finite element method when spudcan penetration and extraction from stratum. Then, according to the pile deflection distributions along the shaft extracted from the numerical model, the function of the pile deflection distribution is obtained by the means of least square method of orthogonal functions. Furthermore, the additional

\* 收稿日期:2018-10-05;修回日期:2019-01-14

基金项目:国家自然科学基金(51579174)资助

作者简介:姬海波(1991-),男,硕士研究生。主要从事海洋土力学方面的研究。Email:646796717@qq.com

通讯作者:王建华(1955-),男,教授,博导。主要从事土动力学与海洋岩土工程方面的研究。Email:tdwjh@eyou.com

loads is determined through the  $p$ - $y$  relation curve of the active pile and the beam bending theory. Finally, the pile response along the shaft is calculated by applying additional loads on the non-linear foundation beam model. The feasibility of the proposed method to analyze the additional and residual loads is verified by numerical simulation of a centrifuge model test of spudcan penetration and extraction in soft clay.

**Keywords:** residual loads; spudcan penetration and extraction; CEL;  $p$ - $y$  relation curve; Beam Bending Theory

## 引言

在海洋平台附近,有时需要钻井船进行辅助作业。当钻井船作业时,需要将大直径桩靴贯入海床土层中,桩靴贯入过程中会使海床土体产生极大变形,从而对邻近平台桩基础产生附加的横向荷载。钻井船作业完成后,海床土体不可恢复的塑性变形又会使邻近桩受到横向的残余附加荷载。如果再遭遇极端环境荷载,过大的残余荷载就有可能成为桩基设计的控制荷载。

以往,分析钻井船插拔桩对邻近桩承载力影响的主要方法有模型试验及理论与数值分析。在模型试验方面,D. P. Stewart<sup>[1]</sup>进行了黏土地中桩靴贯入与拔出对邻近桩影响的离心模型试验,结果表明,在桩头荷载与桩靴贯入土层导致的附加荷载共同作用下,桩身位移较未受插桩影响的邻近桩大40%~60%,说明插拔桩导致的附加荷载增大了桩身位移,且拔桩过后的残余荷载不可忽视。Y. Xie<sup>[2]</sup>进行的离心模型试验更加系统的揭示了土层条件、插桩深度、桩靴与邻近桩净间距等不同条件下桩靴插拔桩对邻近桩的桩身响应的影响。

在理论分析方面,兰斐<sup>[3]</sup>基于Y. Xie<sup>[2]</sup>的离心模型试验,利用修正应变路径法计算插桩过程中土体的位移场,结果表明由于这种方法无法模拟插桩过程中的土体回淤现象,与存在回淤的情况相比,计算结果有局限性。郭少曾等<sup>[4]</sup>基于球孔扩张理论分析插桩过程中桩靴周围土体的附加荷载,同样由于未考虑土体的回淤而使结果具有局限性。

在数值分析方面,由于基于拉格朗日描述的传统有限元方法无法分析插桩过程中的土体极大变形问题<sup>[5]</sup>。目前将基于欧拉描述的大变形有限元分析(ALE方法、CEL方法)与非线性地基梁分析相结合,形成了分析钻井船插桩与邻近平台桩相互作用的两类主要方法。第一类是两段法,即首先通过求

解自由场地插桩过程中周围土体的位移场,然后依据非线性地基梁理论求解邻近桩的内力及位移;另一类是直接建立桩靴、土层、邻近桩的三维数值模型,直接分析插桩过程中邻近桩的响应。Y. Li等<sup>[6-7]</sup>利用ALE方法计算插桩过程中自由场地的土体位移场,然后依据土体位移及API规范<sup>[8]</sup>建议的主动桩 $p$ - $y$ 关系计算邻近桩的响应。范逸飞等<sup>[9-10]</sup>利用CEL方法计算插桩过程中自由场地的土体位移,进而依据双曲线型的 $p$ - $y$ 关系分析桩头水平荷载与土位移共同作用下邻近桩的响应。如何利用两段法分析钻井船拔桩后邻近桩的残余响应尚需做进一步研究。K. K. Tho等<sup>[11]</sup>采用CEL方法直接建立钻井船桩靴-土-邻近桩相互作用模型,然后分析钻井船插桩过程中邻近桩的响应。J. H. Wang等<sup>[12]</sup>通过CEL分析获得邻近桩桩身的变形,进而依据桩身变形及基于 $p$ - $y$ 关系的非线性地基梁模型,分析了桩头荷载与插桩附加荷载共同作用下的邻近桩桩身响应。

综上所述,在已有的工作中,有关钻井船桩靴拔出土层后邻近桩受到的残余附加荷载少有研究。为此,这里将CEL算法与主动桩的 $p$ - $y$ 关系及梁的弯曲理论相结合,建议了一种分析钻井船桩靴贯入与拔出土层引起的邻近桩残余附加荷载的方法,并通过与Y. Xie<sup>[2]</sup>的离心模型试验数据比较,验证这种分析方法的可行性。

## 1 附加荷载分析方法

### 1.1 桩基的受力分析

钻井船桩靴贯入与拔出土层的过程中导致的挤土效应会使邻近平台桩基受到横向的附加荷载<sup>[6-7]</sup>,进而使其产生相应的水平变形,如图1所示;由于这一过程中土体的运动规律较为复杂<sup>[2]</sup>,通过现有的手段与方法直接确定附加荷载 $q$ 非常困难。这里以桩基为研究对象,对其进行受力分

析,表明桩基的变形是由附加荷载  $q$  与桩侧土对桩的抗力  $p_2$  共同作用引起的,如图1所示;进一步,将该问题简化为桩基在总作用力  $p_1$  下产生了相应的变形。

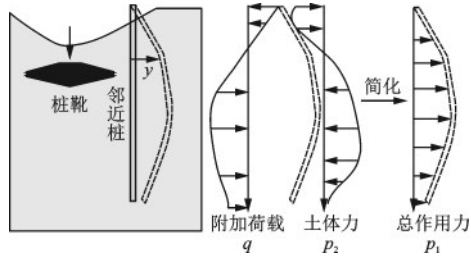


图1 邻近桩的受力

Fig.1 Loads applying on an adjacent pile

## 1.2 附加荷载 $q$ 的求解

基于上述分析,通过大变形有限元计算可获得桩身水平位移,如果能够得到相应的总作用力  $p_1 = q - p_2$  及土抗力  $p_2$ ,如图1所示,即可依据三者的关系计算出附加荷载  $q$ 。

对于  $p_1$  的求解,将桩基简化为一维的杆件,依据梁的弯曲理论中挠度与荷载之间的微分关系,依据式(1)进行求解。

$$EI \frac{d^4 y(z)}{dz^4} = p_1(z) \quad (1)$$

式中,  $EI$  为桩的抗弯刚度;  $y$  为沿桩身  $z$  深度处的桩身水平位移;  $p_1$  为沿桩身  $z$  深度处的总作用力。

在依据式(1)计算  $p_1$  时,需要对桩身位移进行四阶微分,此时就需要建立合理的位移函数  $y(z)$ ,才能客观的确定  $p_1$ 。桩基水平位移函数曲线  $y(z)$  可用一般多项式表示,采用最小二乘法原理进行曲线拟合,而文献[13]的研究表明,采用一般多项式对离散数据点进行最小二乘法拟合时,其法方程的病态矩阵会导致计算结果不稳定,因此,这里利用基于正交函数族的最小二乘法<sup>[13]</sup>来拟合桩身位移函数。计算结果表明,利用此法能够合理确定  $p_1$ 。以下阐述确定  $y(z)$  函数的具体过程。

对于一组给定的位移离散数据点  $(z_i, f(z_i)) (i = 1, 2, \dots, m)$ , 根据节点坐标  $z_1, z_2, \dots, z_m$  构造如下的正交函数族  $\{P_0, P_1, \dots, P_n\}$ :

$$\left. \begin{aligned} P_0(z) &= 1 \\ P_1(z) &= z - \alpha_1 \\ P_{k+1}(z) &= (z - \alpha_{k+1})P_k(z) - \beta_k P_{k-1}(z) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{k+1} &= \frac{(zP_k, P_k)}{(P_k, P_k)} = \frac{\sum_{i=0}^m z_i P_k^2(z_i)}{\sum_{i=0}^m P_k^2(z_i)}, \quad (k=1, 2, \dots, n) \\ \beta_k &= \frac{(P_k, P_k)}{(P_{k-1}, P_{k-1})} = \frac{\sum_{i=0}^m P_k^2(z_i)}{\sum_{i=0}^m P_{k-1}^2(z_i)}, \quad (k=1, 2, \dots, n) \\ (P_k, P_j) &= \sum_{i=1}^m P_k(z_i) P_j(z_i) = \begin{cases} 0, & j \neq k \\ A_k, & j = k \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中,  $f(z_i)$  为  $z_i$  深度处的桩身位移;  $m$  为离散数据点的个数;  $n$  为拟合多项式的次数;  $A_k$  为非零常数。

构造拟合函数的基函数为:

$$y(z) = \sum_{k=0}^n a_k^* P_k(z) \quad (4)$$

式中,  $a_k^*$  为待定系数。

利用式(4)进行最小二乘拟合,由于上述函数族正交,故求解  $a_k^*$  的线性方程组式(5)的系数矩阵为对角矩阵,从而可以保证拟合函数的唯一性,并避免了求解线性方程组,按照式(6)求解  $a_k^*$ 。

$$\begin{bmatrix} (P_0, P_0) & & & \\ & (P_1, P_1) & & \\ & & \ddots & \\ & & & (P_n, P_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0^* \\ a_1^* \\ \vdots \\ a_n^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_0, f_0 \\ P_1, f_1 \\ \vdots \\ P_n, f_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$a_k^* = \frac{(f, P_k)}{(P_k, P_k)} = \frac{\sum_{i=0}^m f(z_i) P_k(z_i)}{\sum_{i=0}^m P_k^2(z_i)}, \quad (k=0, 1, \dots, n-1) \quad (6)$$

对于拟合结果的最小残差,可利用式(7)进行判断。计算结果表明,在满足  $n < m$  的情况下,通过调整拟合函数的次数  $n$ , 使  $\|\delta\|_2 < 10^{-6}$ , 据此确定的桩身水平位移函数可满足计算  $p_1$  的要求。

$$\|\delta\|_2 = \sqrt{\sum_{i=0}^m (y_i - f_i)^2} \quad (7)$$

对于  $p_2(z)$  的求解,依据桩身的水平位移,按照主动桩的土抗力与水平位移之间的关系曲线,即  $p-y$  曲线来确定。

进而按式(8)计算附加荷载  $q(z)$ 。

$$q(z) = p_1(z) + p_2(z) \quad (8)$$

## 2 方法的可行性分析

### 2.1 离心模型试验简介及 CEL 模型

Y. Xie<sup>[2]</sup>在 100g 条件下进行了桩靴贯入、拔出土层时与邻近桩相互作用的离心模型试验,这里以粘土场地中的两组试验为例,说明上述分析附加荷载方法的可行性。其中两组试验中桩靴的最大贯

入深度均为 15 m。表 1 给出了这两组试验的有关参数。

之所以选用这两组试验,是因为试验 1 测量了桩靴贯入土层时,不同深度处的附加荷载与土抗力的合力  $p_1$  的变化,试验 2 测量了桩靴贯入土层时邻近桩的弯矩分布及拔出土层后的邻近桩的残余弯矩。图 2 给出了试验 1 中桩靴及邻近桩的相对位置及桩靴的几何尺寸。

表 1 离心模型试验条件

Table 1 Centrifugal model test condition

试验编号	土层类型	土层埋深/m	场地水平范围/m	土层强度/kPa	桩靴直径/m	净间距	邻近管桩的参数				桩头约束条件
							直径/m	壁厚/m	桩长/m	$EI/(GN \cdot m^2)$	
1	黏土	0~37	55	$s_u=2+1.5z$	12	0.5D	1.26	0.038	27	5.7	完全固定
	砂土	37~40		$32^\circ$							
2	黏土	0~26	50	$s_u=2+1.5z$	10	0.5D	1.26	0.01	27	4.3	完全自由
	砂土	26~29		$32^\circ$							

注:表中  $D$  及文中出现的  $D$  均代表桩靴直径;净间距指桩靴边缘与邻近桩边缘之间的最近距离; $s_u$  指黏土的不排水剪切强度

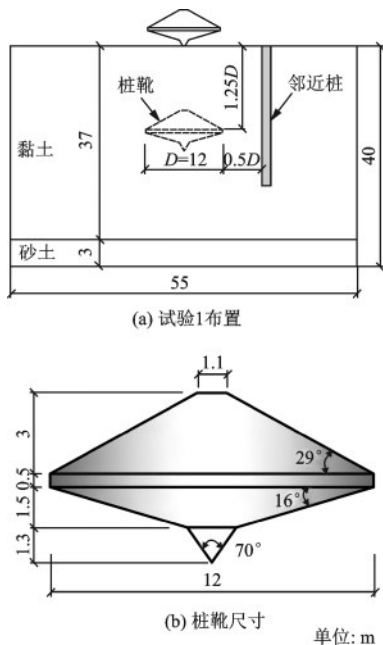


图 2 模型试验 1 的布置与桩靴尺寸

Fig.2 Layout of model test 1 and the spudcan size

对于试验 1,依据离心模型试验实际尺寸,利用 ABAQUS 软件建立 CEL 有限元模型。为了提高计算效率,参考 K. K. Tho<sup>[11]</sup>的研究,取场地水平方向的四分之一建立有限元模型,如图 3 所示。其中邻近桩位于  $45^\circ$  方向上,桩靴初始位置位于场地的中心。对于场地边界条件,欧拉区域竖向边界处的水

平速度设置为零,拉格朗日区域竖向边界处的水平位移设置为零,底部边界采用固定约束条件。

为了更好的模拟计算过程中土体的隆起与回淤,在泥面以上设置 10 m 的空穴区域。同时,为了得到精确的桩身位移响应,依据 J. H. Wang 等<sup>[14-15]</sup>的研究,将泥面以下 20 m 范围内的土体设为欧拉区域;泥面以下 20~40 m 的区域设为拉格朗日区。欧拉与拉格朗日单元分别为 8 节点六面体单元 EC3D8R 与 C3D8R。为了降低计算出现的震荡现象,对于土体单元网格划分,参考文献[16]的研究,水平方向上由场地中心往外 15 m 半径范围内取  $0.05D$ ,其余取  $0.1D$ ,竖直方向上网格尺寸大小均取  $0.05D$ 。钢管桩按抗弯刚度相等的原则转化为实体桩,并采用

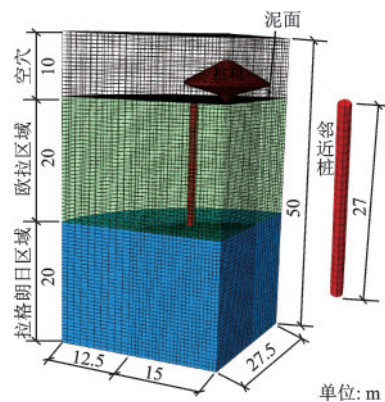


图 3 离心模型试验 1 的 CEL 有限元模型

Fig.3 Finite element model of centrifugal model test 1

C3D8R单元进网格行划分,水平方向网格最小尺寸为0.63 m,竖直方向上网格尺寸为1 m,如图3所示。桩靴视为刚体并用四面体拉格朗日单元离散。

对于材料设置,黏土服从Mises屈服准则,屈服应力取 $\sqrt{3}s_u$ ,砂土采用服从摩尔-库伦屈服准则。邻近桩视为弹性材料,其弹性模量具体参数设置见表2。

$$E_e = E I_p / I_1 \quad (9)$$

式中, $E_e$ 为实体桩的弹性模量; $E_p$ 为管桩的弹性模量; $I_p$ 为管桩的截面惯性矩; $I_1$ 为实体桩的截面惯性矩。

拉格朗日体与欧拉体之间的接触均为ABAQUS中的广义接触(general contact),其接触特性符合库伦摩擦模型,具体参数见表2。邻近桩与拉格朗日土体之间的接触设置为ABAQUS中的主面-从面接触。桩-土接触特性同样符合库伦摩擦模型,具体参数按照表3中的黏土进行设置。

表2 材料参数

Table 2 List of the material parameters

材料	有效重度/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ MPa	泊松比	内摩擦 角/(°)	剪胀 角 <sup>[17]</sup> /(°)
黏土	6	150 $s_u$	0.49	—	—
砂土	9	130 <sup>[2]</sup>	0.3	32 <sup>[2]</sup>	2
桩体	—	46 094	0.25	—	—

表3 接触参数

Table 3 List of the contact parameters

拉格朗日 日体	法向	切向	
		摩擦系数 $\mu$	最大剪应力/ kPa
桩靴	允许分离	—	—
邻近桩	允许分离	0.4	0.4 $s_u$
黏土	允许分离	1.0	$s_u$

为了考虑土体初始自重应力场,这里采用如下做法:(1)对于拉格朗日区域土体,采用初始地应力提取法,将计算的拉格朗日区域土体单元积分点的初始应力导入到CEL模型中;(2)对于欧拉区域土体,由于计算过程中欧拉单元不随材料变形而变形,因此无法采用地应力平衡法,这里依据文献[3]的研究,通过对欧拉区域土体施加10 s的自重荷载进行地初始应力场计算。

求解桩身位移的具体计算步骤为:

(1)土体的初始地应力平衡计算;

(2)桩靴贯入过程计算,为保证计算过程为准静态,以桩靴位移为控制条件,贯入速度取1 m/s;

(3)桩靴拔出过程计算,拔桩速度同样取1 m/s。

## 2.2 计算结果分析与验证

依据CEL有限元计算结果,图4(a)给出了桩靴贯入深度为0.5 $D$ 、0.75 $D$ 、1.00 $D$ 与1.25 $D$ 时的桩身水平位移。

土抗力 $p_2$ 需依据 $p$ - $y$ 曲线法进行求解,桩基的 $p$ - $y$ 曲线可依据API<sup>[8]</sup>的建议确定,具体见式(10)。

$$p_2 = 0.5 \left( \frac{y}{y_c} \right)^{\frac{1}{3}} p_u d \quad (10)$$

式中, $p_u$ 为极限土抗力; $y_c = 2.5\epsilon_{50}d$ ; $\epsilon_{50}$ 为未扰动土样不排水压缩试验中最大偏应力的50%所对应的应变值; $d$ 为桩径。

对于式(10)中的 $p_u$ ,可参照API<sup>[8]</sup>由式(11)确定。

$$p_u = \begin{cases} 3s_u + \gamma z + \frac{J s_u}{d}, & x < \frac{6d}{\frac{\gamma d}{s_u} + J} \\ 9s_u, & x \geq \frac{6d}{\frac{\gamma d}{s_u} + J} \end{cases} \quad (11)$$

式中, $\gamma$ 为土体的有效重度; $J$ 为0.25~0.5的经验常数,本试验取0.5。

由于本试验并未确定黏土的 $\epsilon_{50}$ ,依据Matlock<sup>[19]</sup>的研究,黏土的 $\epsilon_{50}$ 与 $s_u$ 之间的关系满足式(12),同时,试验表明<sup>[2]</sup>在桩靴贯入过程中土层强度基本不变,因此 $\epsilon_{50}$ 为:

$$\epsilon_{50} = \begin{cases} 0.02, s_u \leq 18 \text{ kPa} \\ 0.02 \left[ 1 - 0.2(s_u - 18)^{0.25} \right], 18 < s_u \leq 96 \text{ kPa} \end{cases} \quad (12)$$

依据图4(a)中的桩身位移,由式(10)得到相应的土抗力 $p_2$ ,结果见图4(b)。结果表明,随桩靴贯入深度增加,土抗力 $p_2$ 相应增加,当贯入深度大于0.75 $D$ 时,由于上部土体的回淤,导致泥面以下1倍桩靴直径范围内的桩身位移减小,土抗力相应减小。

进一步,利用上述正交函数的最小二乘法确定图4(a)中桩身位移的拟合函数,其中离散数据点的个数 $m$ 为28,结果表明,当拟合函数的阶数 $k$ 取为9时,其最小残差 $\|\delta\|_2 < 10^{-6}$ ,表4给出了系数 $a_k^*$ 的计算结果,图4(a)给出了相应的位移函数拟合曲线,这与CEL的计算结果基本吻合。

依据式(1),计算 $p_1$ 沿桩身的变化并与离心模型试验1的结果进行对比,见图5。图中的结果对比表

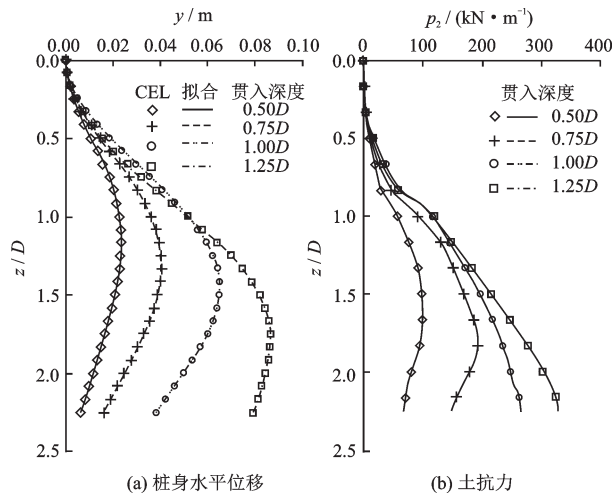


图4 桩身水平位移与土抗力计算结果

Fig.4 Calculation results of lateral deflection and stratum resistance on pile

表4 系数  $a_k^*$  的计算结果

Table 4 Calculation results of the coefficient  $a_k^*$

系数 $a_k^*$	0.50D	0.75D	1.00D	1.25D
$a_0^*$	$1.40 \times 10^{-2}$	$2.46 \times 10^{-1}$	$4.00 \times 10^{-2}$	$5.12 \times 10^{-2}$
$a_1^*$	$3.28 \times 10^{-4}$	$9.20 \times 10^{-4}$	$2.10 \times 10^{-3}$	$3.83 \times 10^{-3}$
$a_2^*$	$-1.17 \times 10^{-4}$	$-1.79 \times 10^{-4}$	$-2.21 \times 10^{-4}$	$-1.24 \times 10^{-4}$
$a_3^*$	$-8.43 \times 10^{-7}$	$-4.91 \times 10^{-6}$	$-1.12 \times 10^{-5}$	$-1.54 \times 10^{-5}$
$a_4^*$	$4.80 \times 10^{-7}$	$7.57 \times 10^{-7}$	$8.98 \times 10^{-7}$	$5.13 \times 10^{-7}$
$a_5^*$	$-1.75 \times 10^{-7}$	$-5.28 \times 10^{-9}$	$1.88 \times 10^{-8}$	$4.26 \times 10^{-8}$
$a_6^*$	$-5.56 \times 10^{-10}$	$-1.50 \times 10^{-9}$	$-1.55 \times 10^{-9}$	$-2.65 \times 10^{-10}$
$a_7^*$	$3.74 \times 10^{-10}$	$2.19 \times 10^{-12}$	$-7.91 \times 10^{-11}$	$1.12 \times 10^{-10}$
$a_8^*$	$-8.74 \times 10^{-13}$	$3.51 \times 10^{-12}$	$2.09 \times 10^{-12}$	$-2.83 \times 10^{-12}$
$a_9^*$	$-8.07 \times 10^{-14}$	$-3.68 \times 10^{-14}$	$1.88 \times 10^{-13}$	$1.58 \times 10^{-13}$

明,当桩靴贯入深度小于 $1.0D$ 时,计算出的 $p_1$ 与离心模型试验结果吻合。当桩靴贯入深度大于 $1.0D$ 时,与试验结果相比,计算结果偏大,但其变化趋势一致,表明CEL计算结果能够较好模拟桩靴贯入土层时邻近桩的桩身位移,进而通过相应的理论与计算方法可得到合理的 $p_1$ 。同时还表明,在桩靴贯入深度以下约 $0.25D \sim 0.42D$ 范围内桩身受到的总作用力最大。

依据式(8),图6给出了桩靴贯入深度为 $0.5D$ 、 $0.75D$ 、 $1.0D$ 与 $1.25D$ 时,沿桩身分布的附加荷载 $q$ 。图中结果表明随着桩靴的贯入,邻近桩身分布的附加荷载会出现一个极大值,其出现于桩靴位置以下 $0.25D$ 左右,并随桩靴贯入深度增加而增加。

求解出附加荷载 $q$ 后,再将其施加于非线性地基梁模型上,分析桩身的弯矩,进一步验证上述求

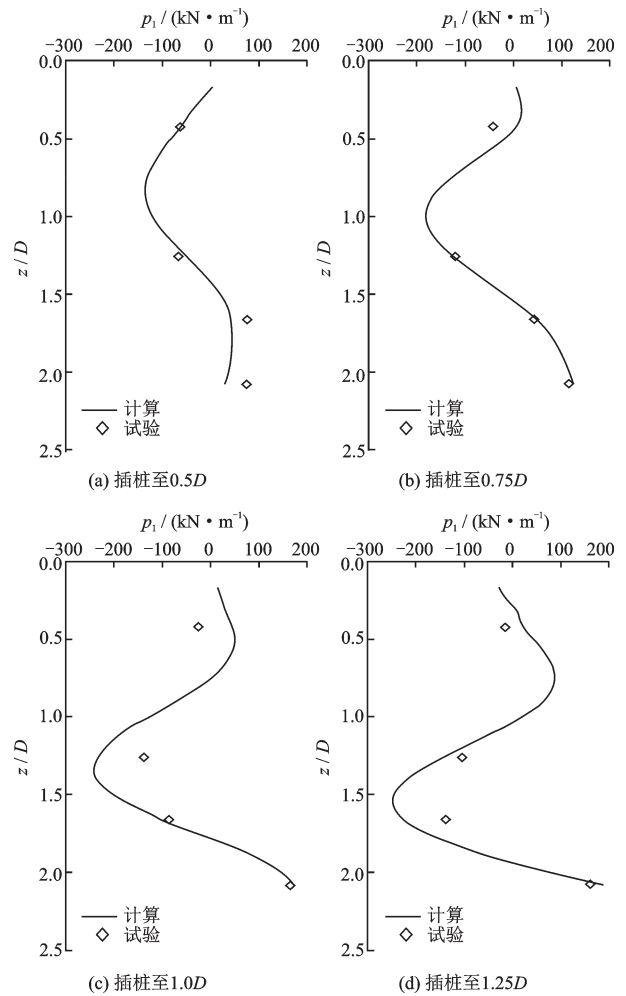


图5  $p_1$  的计算与试验结果比较

Fig.5 Comparison of calculated and experimental results of  $p_1$

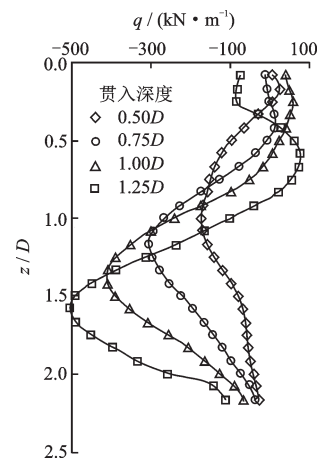


图6 沿桩身的附加荷载 $q$

Fig.6 Additional loads  $q$  along the pile shaft

解 $q$ 的正确性。仍利用ABAQUS软件建立非线性地基梁有限元模型,见图7。由于 $q$ 沿桩身连续分布,而ABAQUS中无法直接对梁单元施加非均匀的分布荷载,因此利用用户子程序Dload<sup>[20]</sup>对图7中的

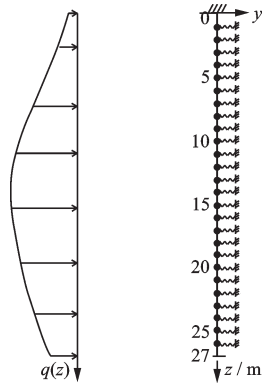


图7 非线性地基梁模型

Fig.7 Non-linear foundation beam model

非线性地基梁施加非均匀的分布荷载。

图8给出了计算与试验桩身弯矩的比较,结果显示除桩靴贯入至 $1.25D$ 时计算结果较试验结果偏小外,其余结果基本一致。这进一步表明上述依据桩身位移求解桩靴贯入土层引起的附加荷载的方法是可行性的。

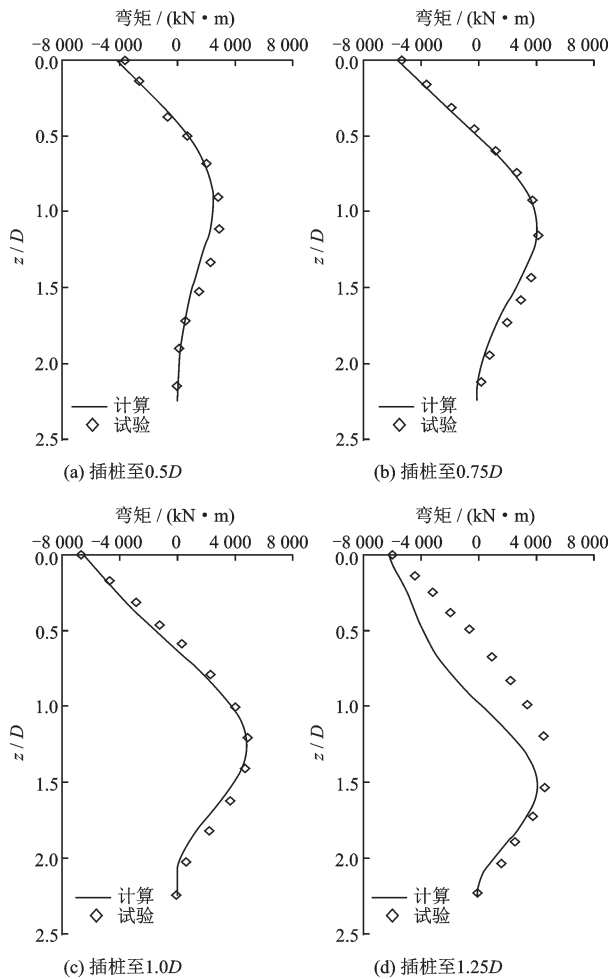


图8 弯矩结果比较

Fig.8 Comparison of bending moment results

### 3 残余荷载分析

#### 3.1 CEL 模型

结合离心模型试验2,利用以上方法对桩身残余荷载进行分析,说明利用上述方法计算桩靴拔出土层后的残余荷载的可行性。按照模型试验2的条件,图9(a)建立了CEL有限元模型,图9(b)给出了桩靴的几何模型。同样的,在泥面以上设置10 m的空穴,泥面以下20 m土体设为欧拉区域,20~29 m土体设为拉格朗日区域。由于试验2中邻近桩的材料为铝,泊松比取为0.33,邻近桩表面与砂土间的接触符合库伦摩擦模型,摩擦系数取 $0.4^{[11]}$ 。

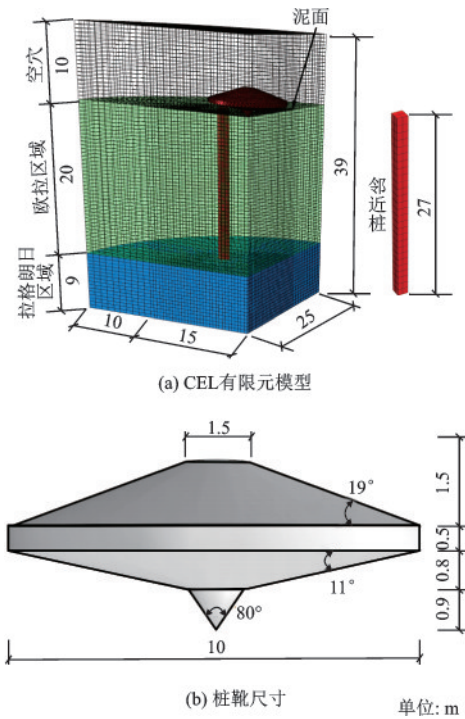


图9 模型试验2的CEL有限元模型及桩靴尺寸

Fig.9 CEL finite element model and spudcan size of centrifugal model test 2

#### 3.2 结果分析与验证

依据CEL计算结果,桩靴贯入并拔出土层后,由于土体的极大塑性变形,邻近桩会留下残余的水平位移,其结果见图10(a)。同上,依据桩身位移,由式(10)确定桩身受到的土抗力 $p_2$ ,见图10(b)。

同样,按照上述方法拟合与图10(a)中桩身残余位移对应的函数,其中离散数据点的个数 $m$ 同样为27,结果显示,当拟合阶数 $k$ 取为9时, $\|\delta\|_2 < 10^{-6}$ 。表5给出了相应系数 $a_k^*$ 的计算结果。

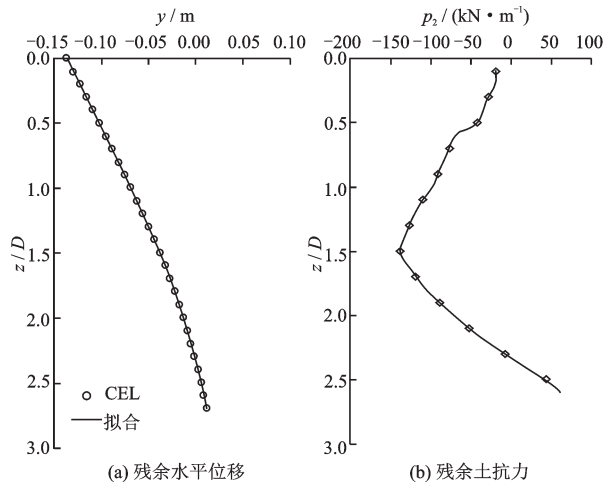


图10 桩身残余水平位移与土抗力计算结果

Fig.10 Calculation results of residual lateral deflection and stratum resistance on pile

表5  $a_k^*$ 的计算结果

Table 5 Results of  $a_k^*$

系数 $a_k^*$	计算结果	系数 $a_k^*$	计算结果
$a_0^*$	$-5.20 \times 10^{-2}$	$a_5^*$	$7.39 \times 10^{-9}$
$a_1^*$	$5.616 \times 10^{-3}$	$a_6^*$	$-2.4 \times 10^{-11}$
$a_2^*$	$-8.72 \times 10^{-5}$	$a_7^*$	$-5.17 \times 10^{-12}$
$a_3^*$	$-2.25 \times 10^{-6}$	$a_8^*$	$-7.44 \times 10^{-13}$
$a_4^*$	$1.01 \times 10^{-7}$	$a_9^*$	$-3.2 \times 10^{-15}$

利用式(1)计算出  $p_1$ , 其结果如图11(a)所示。进而依据式(8), 图11(b)给出了桩靴拔出土层后的残余荷载沿桩身的分布。

与图7类似, 将残余荷载作用于非线性地基梁模型中, 图12给出了计算与试验弯矩的比较, 二者较为吻合。表明利用上述方法分析桩靴拔出土层

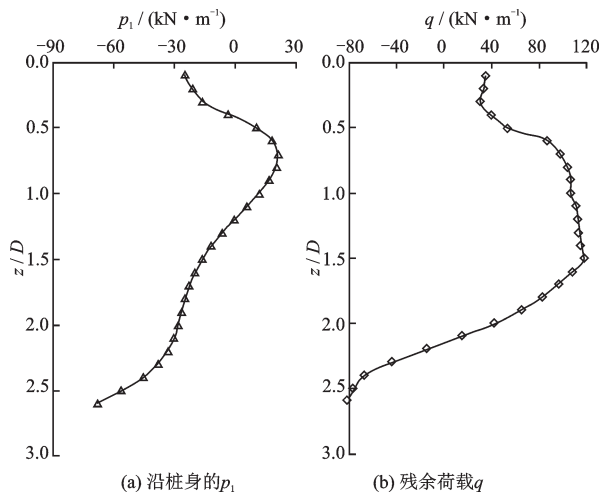


图11 沿桩身的  $p_1$  及残余荷载  $q$

Fig.11  $p_1$  and residual load  $q$  along the pile shaft

后的残余荷载是可行性的。

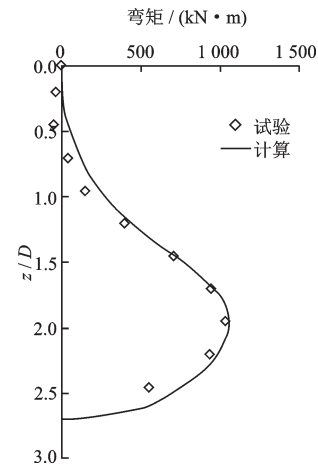


图12 残余弯矩结果比较

Fig.12 Comparison of residual bending moments

## 4 结论

钻井船桩靴贯入与拔出土层导致的挤土效应会对邻近平台桩基产生附加荷载, 由于土体的回淤与隆起, 给分析附加荷载带来困难。本文将大变形数值分析法、梁的弯曲理论以及主动桩的  $p-y$  曲线相结合, 建议了一种分析桩靴贯入与拔出土层时邻近桩受到的附加荷载与残余荷载的方法。

该方法首先通过 CEL 大变形分析算法确定桩靴贯入与拔出土层时的邻近桩的桩身水平位移, 依据主动桩的  $p-y$  曲线法得到土抗力作用, 再基于正交函数族的最小二乘法拟合出桩身位移函数, 进而依据梁的弯曲理论得到桩身的总做用力, 最终确定出附加荷载。

通过对 Y. Xie<sup>[2]</sup> 离心模型试验的模拟与计算, 得到桩靴贯入与拔出土层时邻近桩受到的附加荷载与残余荷载, 并将其作用于非线性地基梁模型中, 得到桩身弯矩响应, 经过与离心模型试验数据的比较, 验证了上述分析残余荷载的方法是可行的。

## 参考文献:

- [1] Stewart D P. Influence of jack-up operation adjacent to a piled structure [C]//Proceedings of the International symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics, Perth, Australia, 2005:543-549.
- [2] Xie Y. Centrifuge model study on spudcan-pile interaction [D]. Singapore: Department of Civil Environmen-

- tal Engineering, National University of Singapore. 2009.
- [3] 兰 斐. 钻井船插桩对邻近平台桩基影响的数值分析[D].天津:天津大学, 2015.  
Lan F. Numerical analyses on effects of the spudcan penetration on piles of adjacent platform[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015. (in Chinese)
- [4] 郭绍曾, 刘 润, 洪兆徽, 等. 插桩过程对邻近平台桩基础的影响研究[J]. 地震工程学报, 2015, 37(2): 446-452.  
Guo Sh Z, Liu R, Hong Zh H, et al. Influence of spudcan penetration on pile foundations on adjacent platform [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(2):446-452. (in Chinese)
- [5] Qiu G, Sascha H. Controlled installation of spudcan foundations on loose sand overlying weak clay[J]. Marine Structures, 2011, 24(4):528-550.
- [6] Li Y, Zhou Y R, Tao J H, et al. Numerical study of spudcan penetration induced loading on an adjacent jacket pile in soft clay[C]//Proceedings of the 25th International Ocean and Polar Engineering Conference, Hawaii, USA, 2015:692-699.
- [7] 李 亚, 李书兆, 张 超. 黏土中自升式钻井船插桩对邻近桩基影响的分析方法[J]. 岩土力学, 2018, 39(5):1 891-1 900.  
Li Y, Li Sh Zh, Zhang Ch. An approach to analyze effects of spudcan penetration of a jack-up rig on adjacent piles in cohesive soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(5):1 891-1 900. (in Chinese)
- [8] American Petroleum Institute. Geotechnical and Foundation Design Considerations [M]. Washington D S: ANSI/API Recommended Practice 2GEO First Edition, 2011.
- [9] 范逸飞, 王建华, 戴笑如. 基于土体的大变形分析钻井船插桩对邻近桩的影响[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(1):446-452.  
Fan Y F, Wang J H, Dai X R. Analysis of effects of spudcan penetration on adjacent piles based on soil LD-FE calculation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(1):446-452. (in Chinese)
- [10] Fan Y F, Wang J H. Lateral response of piles subjected a combination of spudcan penetration and pile head loads [J]. Ocean Engineering, 2018, 156:468-478.
- [11] Tho K K, Chun F L, Yean K C. Eulerian finite simulation of spudcan-pile interaction[J]. Canada Geotechnics, 2013, 50(6): 595-608.
- [12] Wang J H, Fan Y F, Ma J P. Numerical simulation of effects of the spudcan penetration on pile groups of jacket platforms[C]//Proceedings of the 27th International Ocean and Polar Engineering Conference, Sanfransisco, USA, 2017.
- [13] 常锦才, 赵 龙, 杨倩丽. 正交多项式的数据拟合方法[J]. 河北理工大学学报(自然科学版), 2011, 33(4): 79-84.  
Chang J C, Zhao L, Yang Q L. Data fitting method based on orthogonal polynomials [J]. Journal of Hebei Polytechnic University (Natural Science Edition), 2011, 33(4):79-84. (in Chinese)
- [14] Wang J H, Fan Y F, Dai X R, et al. Effects of eulerian domain size in CEL model on calculated results of spudcan-pile interaction[C]//Proceedings of the 26th International Ocean and Polar Engineering Conference, Rhodes Greece, 2016.
- [15] 王建华, 兰 斐. 钻井船插桩对邻近桩影响的耦合欧拉-拉格朗日有限元方法研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(4):1 127-1 136.  
Wang J H, Lan F. A coupled Eulerian-Lagrange FEM for analyzing the effects of spudcan penetration on an adjacent pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(4): 1 127-1 136. (in Chinese)
- [16] 戴笑如, 王建华, 范逸飞. 钻井船插桩 CEL 数值模拟中的若干问题[J]. 岩土力学, 2018, 39(6): 1 001-1 009.  
Dai X R, Wang J H, Fan Y F. Several issues of numerical simulation of the spudcan penetration based on CEL method [J]. Rock and Soil Mechanics. 2018, 39(6): 1 001-1 009. (in Chinese)
- [17] Zhao J, Jang B S, Duan M L, et al. Simplified numerical prediction of the resistance profile of spudcan foundation sediments with interbedded medium loose sand layer [J]. Applied Ocean Research, 2016, 55: 89-101.
- [18] SNAME. Guidelines for site specific assessment of mobile jack-up units[S]. New Jersey: Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2002.
- [19] Matlock H. Correlation for design of laterally loaded piles in soft clay [C]// Proceedings of 2nd Offshore Technology Conference, Houston, USA, 1970: 577-594.
- [20] Hibbitt D, Karlsson B, Sorensen P, et al. ABAQUS 6.13 user subroutines reference guide [M]. USA: HKS Co, 2013.

(本文责编:周小潭)