

砂土中筒型基础沉放过程渗流特性和沉贯阻力研究

丁红岩^{1,2}, 贾楠^{2,3}, 张浦阳^{1,2}

(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 建筑工程学院, 天津 300072;
3. 交通运输部 天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

摘 要: 筒型基础的沉放是一项关键施工过程, 沉放时土体在施工负压下产生渗流场, 而渗流对基础筒壁的侧摩阻力和端阻力产生影响, 导致沉贯阻力难以预测。针对这一问题, 首先应用试验和数值模拟的方法, 对筒型基础沉贯过程中的渗流特性进行分析, 揭示筒壁两侧及筒端土体超孔隙水压力的分布; 然后将分析结果应用于沉贯阻力的推导中, 并对推导的公式进行验证。研究表明: 筒型基础沉贯过程中, 筒壁两侧土体的超孔隙水压力沿筒壁深度几乎呈线性变化, 在接近筒端时出现非线性变化; 不同的沉贯深度下, 渗流对沉贯阻力的影响不同, 随着沉贯深度的增加, 减小的阻力占总沉贯阻力的比值越来越大; 通过推导的理论公式计算的试验模型和实际工程的沉贯负压理论计算值与实测值吻合较好。

关 键 词: 筒型基础; 砂土; 渗流特性; 沉贯阻力

中图分类号: TU 432

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 09-3130-10

Research of seepage characteristics and penetration resistance during installation of bucket foundations in sand

DING Hong-yan^{1,2}, JIA Nan^{2,3}, ZHANG Pu-yang^{1,2}

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

2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport of the People's Republic of China, Tianjin 300456, China)

Abstract: The penetration of the bucket foundation is a vital construction procedure. Seepage field is generated in the soil under the suction pressure during the penetration. The seepage has an influence on the friction along the skirt wall and on the resistance of the skirt tip, which leads to the difficulty in predicting penetration resistance. In order to solve this problem, firstly, the methods of experiment and numerical simulation were applied to analyze the seepage characteristics of the bucket foundation during the penetration; moreover the distribution of the excess pore water pressure along the bulkhead and skirt tip was revealed. Thereafter, the analytical results were applied to derive the penetration resistance, and the derived theoretical formulae were verified. The results show that during the penetration of the bucket foundation, the excess pore water pressure of the soil changes linearly along the depth of the skirt, but becomes nonlinearly near the skirt tip. The effect of seepage flow on the penetration resistance is different for different penetration depths; the reduced resistance caused by seepage accounts for a greater proportion of the penetration resistance with increasing penetration depth. The suction pressure of the test model and practical engineering calculated by the theoretical formulae are in good agreement with the measured values.

Keywords: bucket foundations; sand; seepage characteristics; penetration resistance

1 引 言

风能作为一种无污染的清洁能源逐渐引起人们

的重视, 由于陆上可开发的风电资源有限, 近些年来全球各国把眼光投向海上风电资源。筒型基础作为一种新型的海上风电基础型式, 具备海上安装速

收稿日期: 2016-12-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.51779171, No.51679163); 国家创新方法工作专项 (No.2016IM030100); 天津市应用基础与前沿技术研究计划 (No.15JCQNJC43900, No.17JCYBJC22000)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51779171, 51679163), the Innovation Method Fund of China (2016IM030100) and Tianjin Research Program of Application Foundation and Advanced Technology (15JCQNJC43900, 17JCYBJC22000).

第一作者简介: 丁红岩, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 主要从事岩土工程及海洋结构方面研究。E-mail: dhy_td@163.com

度快、施工费用低等特点^[1]，具有广阔的应用前景。挪威土工研究所于1994年成功研制Europipe16/11-E大型导管架平台，标志着吸力式筒型基础产生^[2]。2010年我国第一台复合筒型基础海上风机样机工程在江苏启东某海域施工完成，如图1所示。



图1 复合筒型基础

Fig.1 Composite bucket foundation

筒型基础施工过程中，沉贯安装是其关键环节。基础沉贯到预定位置，是其承载力达到设计值的重要保证^[3]。施加负压过大会造成土塞、渗透破坏等现象，太小则无法使基础下沉。丁红岩等^[4]开展了不同土质中吸力锚的沉贯模型试验，对沉贯过程中土塞的发展进行了研究，认为土塞的高度与吸力锚下沉深度有关，沉贯过程中应控制吸力，避免土塞或渗透破坏。朱斌^[5]、练继建^[6]等研究了饱和粉土及粉质黏土中筒型基础的沉贯特性。Feld^[7]、Ibsen^[8]、祁越^[9]等利用数值模型分析了引起渗透破坏的条件，以出口水力梯度为控制条件建立了临界吸力计算公式；Tran等^[10]通过一系列模型试验，研究了筒型基础在砂土和分层土中下沉时的特性，描述了土塞形成的过程，揭示了施加不同负压对基础下沉的影响。

根据前人的研究成果可知，基础沉贯过程中，合理控制施工负压的大小十分重要，这就需要对沉贯阻力进行预测。在黏土中，不存在渗流减阻效应，沉贯机制比较简单，可较为准确地预测施工负压^[11]。在砂土中，渗流减阻效应明显，在计算沉贯阻力时如何考虑渗流的影响是预测施工负压的关键。Mehravari等^[12]通过仿真软件，模拟了筒型基础下沉过程中沉贯阻力的变化；Lian等^[13]通过试验，研究了砂土中静压沉贯和负压下沉过程中的筒型基础与饱和砂土相互作用机制，通过对比两个过程下沉贯阻力的不同，得知渗流对下沉阻力的影响；Senders

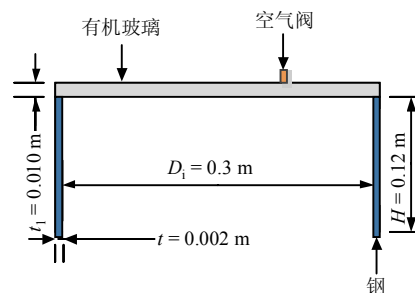
等^[14]忽略渗流对筒壁外侧的影响，假设负压对筒壁内侧摩阻力和端阻力的影响是线性的，得出砂土中沉贯阻力的计算公式。

渗流是造成筒型基础在砂土中沉贯阻力难以预测的根本原因，因此本文从渗流着手，应用试验和数值模拟的方法，研究筒型基础沉贯过程中的渗流特性，揭示筒壁两侧及筒端超孔隙水压力的分布。应用上述研究成果，通过理论计算，推导渗流对侧摩阻力和端阻力的影响，最后应用试验和实际工程实测数据对推导的理论公式进行验证。

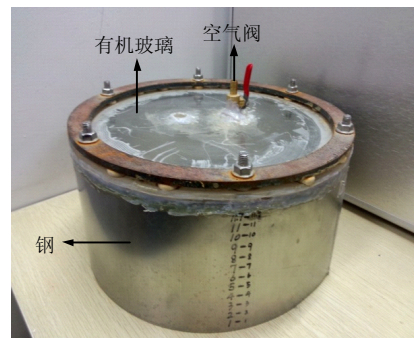
2 试验概况

2.1 试验模型和土质参数

试验模型筒壁为钢制圆筒，顶盖为有机玻璃，如图2所示。筒型基础为宽浅型基础，直径大、高度小，模型高径比为0.4，模型详细尺寸如表1所示。



(a) 模型示意图



(b) 试验模型

图2 试验模型示意图

Fig.2 Diagram of test model

表1 试验模型尺寸

Table 1 Dimensions of test model

项目	内径 D_i/m	筒壁厚 t/m	t/D_i	筒裙净高 H/m	H/D_i	顶盖厚 t_1/m	质量/kg
数值	0.3	0.002	0.006 7	0.12	0.4	0.010	3.135

试验土体为天津渤海海域砂土，土体主要由中砂颗粒（粒径范围为0.25~0.50 mm）和粗砂颗粒（粒径>0.50 mm）构成，土体颗粒级配曲线如图3

所示。筒型基础的沉贯试验在试验槽中进行,为加速槽内土体制备时的排水过程,在箱体底部从下往上分别布置 0.1 m 的砾石层、纱网、土工布。将试验砂土分层放在土工布之上,每层厚度约为 0.1 m,每放置一层砂土,向槽内倒入水,待其排水固结后,再放下一层砂土,最终饱和砂土高度为 0.5 m。在此过程中,将微型孔隙水压力计预埋到土中预定位置。静置一周的土体充分饱和后,避开孔压计位置,用振捣棒对土体均匀振捣。振捣完毕后,土体静置 30 d。静置完毕后测得土质参数如表 2 所示。

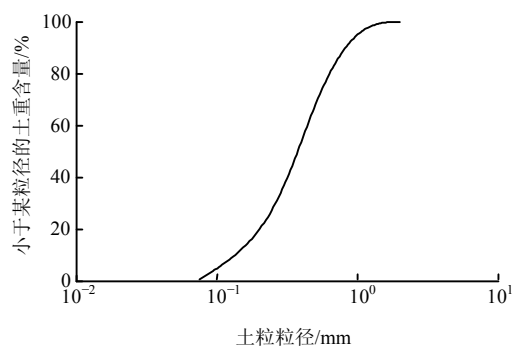


图3 试验砂土颗粒级配曲线

Fig.3 Particle size distribution curve for tested sand

表2 砂土土质参数表
Table 2 Soil parameters of sand

项目	重度 γ /(kN/m^3)	含水率 w /%	内摩擦角 φ /($^\circ$)	黏聚力 c /kPa	孔隙比 e	压缩模量 E_s /MPa	相对密实度 D_r	渗透系数 k /(m/s)
数值	20	11	35	0.785 5	0.593	27.9	0.721	0.000 21

2.2 试验设备及过程

筒型基础沉贯包括两个阶段:第1阶段,顶盖排气孔开启,模型在自重作用下沉贯稳定;第2阶段,利用真空泵与真空饱和缸逐级加载,即分级沉放^[15],即先关闭基础与真空饱和缸之间的阀门,使用真空泵抽吸真空饱和缸内部空气,使得真空饱和缸内部达到预定的真空度,再逐渐打开与模型相连

的真空饱和缸阀门,使基础内部缓慢形成平稳负压,待模型在稳定吸力的作用下下沉稳定后,关闭管路调节阀门,吸力快速消散。重复上述步骤,施加下一级稳定吸力,直至模型沉贯就位。负压调节系统保证了每阶段施加负压的稳定性,循环加水装置保证箱内水位高度始终不变,位移计记录筒型基础沉贯过程。整套试验装置如图4所示。

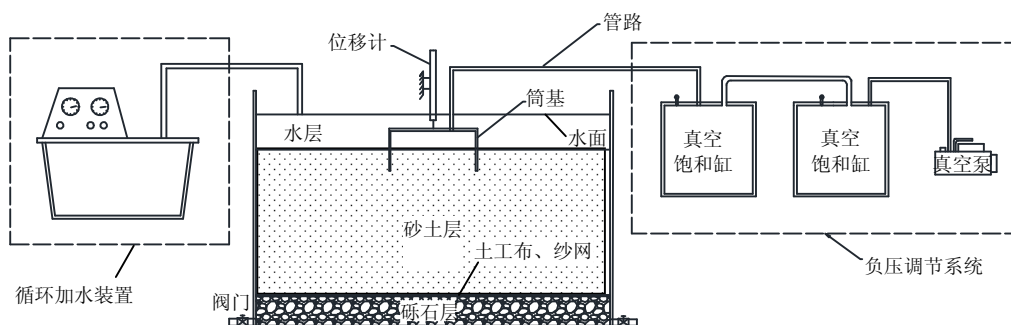


图4 试验装置

Fig.4 Test equipment

2.3 传感器布置

在试验槽土体中预埋孔隙水压力传感器 PP-1 和 PP-2,以监测筒型基础下沉过程中土体孔隙水压力的变化,传感器位置如图5所示。试验槽长为 1.2 m,宽为 0.6 m,高为 0.8 m。筒型基础顶盖上安装受力面向筒内的压力传感器 PS,以测量下沉过程中筒内压力值的变化。在相同试验条件下进行多次沉放试验,以确保试验结果的可靠性,以两次试验结果为例进行分析,编号为试验1和试验2。

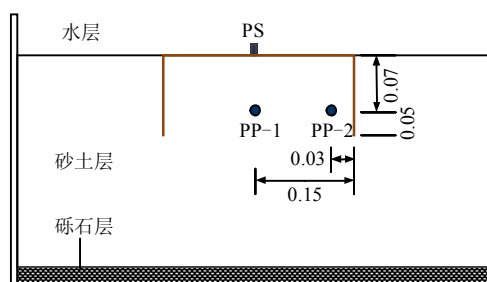


图5 传感器布置图(单位: m)

Fig.5 Layout of sensors (unit: m)

3 试验结果及分析

3.1 筒型基础沉放过程舱内压力变化

在试验 1 和试验 2 中, 筒型基础沉放深度和筒内压力随时间的变化曲线如图 6 所示, 基础分 10 级进行沉放, 每级沉放完毕后静置一段时间, 待筒内压力恢复至 0 左右后, 继续下一级沉放, 此种沉放方法可减小筒内土塞^[15], 两次试验均最终沉贯至 0.115 m 左右, 土塞较小, 是基础高度的 4.1%。

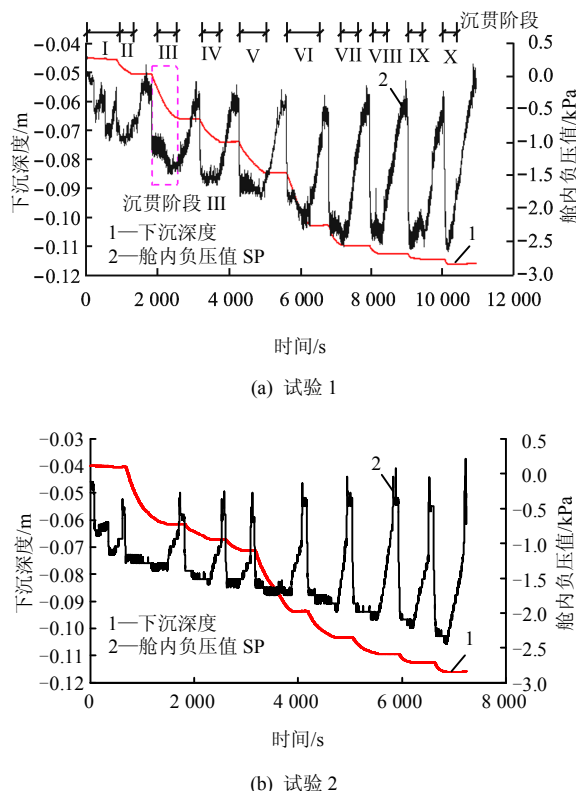


图 6 下沉深度和舱内压力值与时间关系曲线
Fig.6 Time histories of penetration depth and pressure in compartment

观察下沉深度和筒内压力值曲线, 下沉深度曲线中的斜线段为基础沉贯阶段, 当舱内压力达到沉贯所需负压时, 基础开始下沉。以试验 1 中的沉贯阶段 III 为例, 当舱内压力达到 -1.25 kPa 时, 基础开始下沉, 在此阶段, 舱内压力保持在 -1.25 ~ -1.50 kPa 之间, 基础由 0.050 m 沉贯至 0.067 m。筒内负压逐级增大, 基础沉贯深度也随之增加, 筒内负压达到 -2.50 kPa 时, 试验最终沉贯至 0.115 m。

3.2 土体超孔隙水压力变化

图 7 为筒型基础沉放过程中不同位置传感器测得的超孔隙水压力 (超孔压) 的变化曲线, PP-1 传感器位于筒内土体中央, PP-2 传感器距筒壁内侧 3 cm。向筒内抽吸负压时, PP-1 和 PP-2 测得的超孔压为负值, 且随着筒内负压的增大而增大, 表明

筒内不同位置土体的超孔压变化趋势与筒内负压一致。

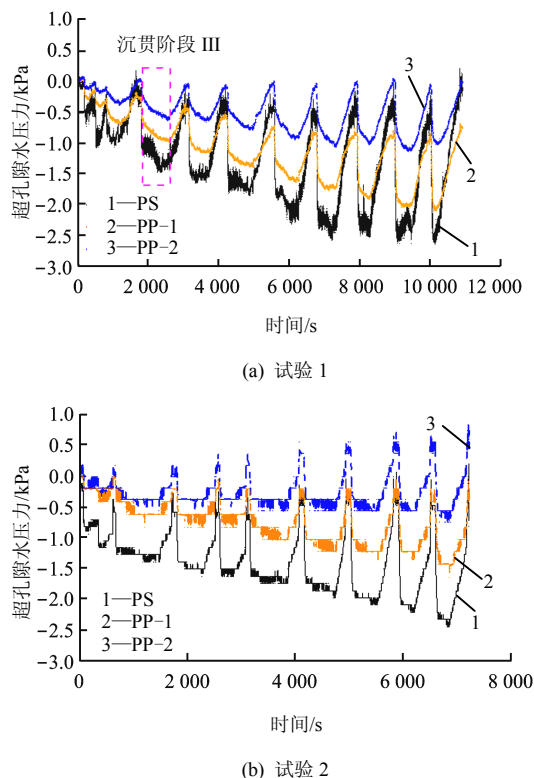


图 7 超孔隙水压力变化曲线
Fig.7 Curves of excess pore pressure

对比 PP-1 和 PP-2 测点曲线, 以沉贯阶段 III 为例, PP-1 测点的超孔压在 -0.50 ~ -1.00 kPa 之间, PP-2 测点的超孔压在 0 ~ -0.5 kPa 之间, 可见 PP-1 测点的超孔压绝对值大于 PP-2 测点的超孔压绝对值, 其他沉贯阶段规律均与此相似。以上分析表明, 沉贯过程中筒型基础中心位置土体的超孔压绝对值大于筒壁内侧周边土体的超孔压绝对值。

由以上分析可知, 基础沉贯过程中筒内中心及边部位置土体的超孔压变化规律。但是对于沉贯阻力的预测, 了解紧挨筒壁两侧土体的超孔压变化是关键, 因此为了探究在负压作用下筒内土体完整的渗流场及渗流对沉贯阻力的影响, 应用数值模拟的方法展开进一步研究。

4 渗流对沉贯阻力的影响

4.1 有限元模型的建立

将下沉过程分为几个状态进行分析, 假设每个阶段都达到稳态渗流, 针对 h/D 分别为 0.133、0.200、0.266、0.333、0.400 的 5 个下沉状态, 应用 ADINA 建立有限元模型, 如图 8 所示。模型分为两部分: 一是筒型基础, 基础高度为 H , 入泥深度为 h , 筒

内直径为 D_i ，筒外直径为 D_o ， $D = (D_i + D_o) / 2$ ，筒壁厚度为 t ；二是海床土体，土体渗透系数为 k ，有效重度为 γ' ， $OADC$ 为筒内土体， $ABHGFE$ 为筒外土体。

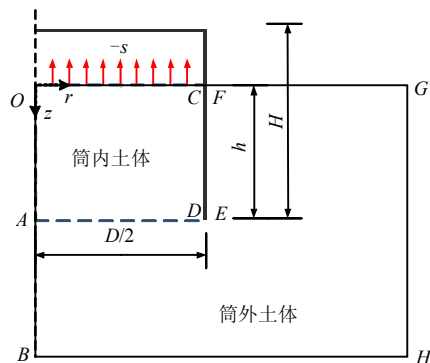


图 8 有限元模型示意图

Fig.8 Diagram of the finite element model

筒型基础设置为不透水材料，土体采用多孔介质材料模型，此模型假设孔隙中的流体是不可压缩的，且孔隙介质处于一种饱和状态，穿过孔隙骨架的孔隙流体流动符合达西定律。超孔隙水压力 p 适用于拉普拉斯方程，柱面坐标下 (r, θ, z) 表述为

$$\nabla^2 p = \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

在筒内负压 $-s$ 的作用下 (s 为正)，基础达到 h 的下沉深度。筒内土体表面 OC 的超孔隙压设置为与 $-s$ 大小相同的 $-p$ (p 为正)，来模拟筒内抽吸负压的过程。筒外海床表面土体 FG 超孔隙压设置为 0，模型中 GH 和 HB 边界距离负压作用区域较远，不受筒内负压影响，因此超孔隙压为 0， CD 和 EF 为不透水边界， OB 为轴对称边界。

超孔隙压 p 随着土体深度的增加而减小， p 在某一深度与筒顶负压的差值定义为负压损失 L 。为使分析结果不受基础尺寸的影响，将坐标无量纲化， $z' = z/D$ ， $r' = r/D$ ， $h' = h/D$ 。分析变量无量纲化， $p' = p/s$ 。

4.2 数值模拟结果验证

试验 1 与试验 2 试验条件相同，取两次试验结果中 PP-1 和 PP-2 超孔隙压的平均值与数值模拟结果对比，如图 9 所示。数值模拟 PP-2 测点的超孔隙压明显小于 PP-1 测点，与试验一致。数值模拟 PP-1 曲线在筒型基础负压沉贯初始阶段与试验结果有一定偏差，这是因为基础在负压沉贯刚开始时，试验中筒内负压较小且施加时间短，在筒内土体中不易形成完整的渗流场，而数值模拟考虑的是在每一下

沉阶段形成稳态渗流，因此试验 PP-1 的超孔隙压小于数值模拟结果，总体来说，数值模拟曲线与试验结果吻合较好。

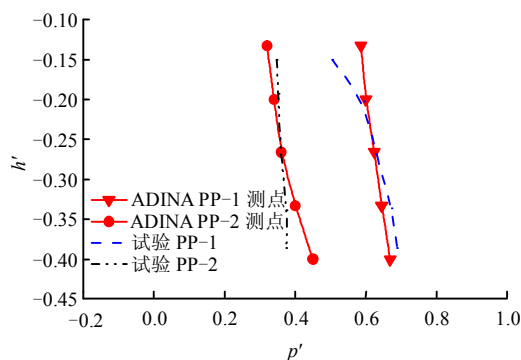
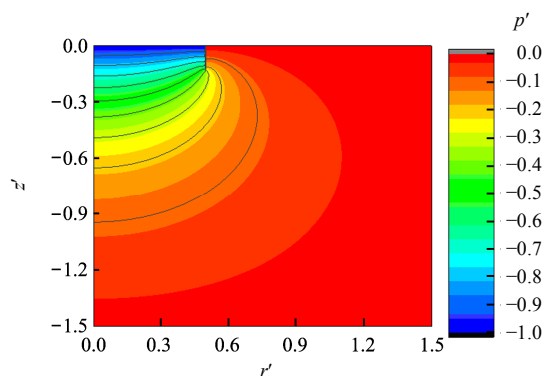


图 9 数值模拟结果验证

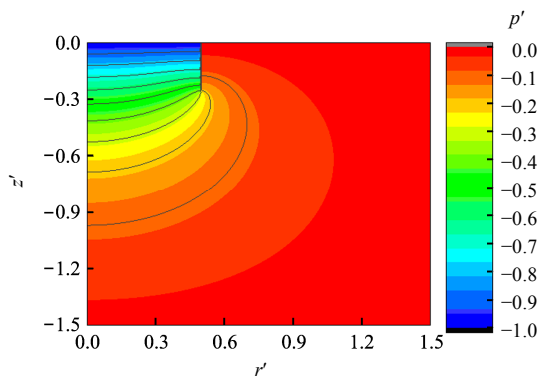
Fig.9 Verification of numerical simulation results

4.3 渗流场分析

以 $h' = 0.133$ 和 $h' = 0.266$ 为例，分析沉放过程中土体的渗流场，土体超孔隙压分布云图如图 10 所示。不同沉贯深度下超孔隙压的分布形式相似，筒内中央土体在深度方向受负压影响范围较大，超孔隙压分布范围较广。筒内靠近筒壁的土体超孔隙压等势线更加密集，水力梯度更大，负压对筒壁周边土体的影响更加明显。



(a) $h' = 0.133$



(b) $h' = 0.266$

图 10 超孔隙水压力分布云图

Fig.10 Distribution of normalized excess pore pressure

负压作用下产生的超孔隙水压力会使土体有效应力改变, 而筒壁周边土体有效应力的变化又会对筒型基础沉贯阻力产生影响。为探究渗流对筒型基础沉贯阻力的影响, 对筒壁两侧土体的超孔隙水压力分布情况作详细分析。以 $h' = 0.266$ 为例, 提取紧挨筒壁外侧土体各点的超孔压 p'_o 和内侧土体各点的超孔压 p'_i 进行对比, 如图 11 所示, 图中横坐标为超孔隙水压力, 纵坐标为各点距土表面的距离(分析变量均无量纲化), 点 A 为筒壁端部外侧土体, 点 B 为筒壁端部内侧土体。由图 11 可见, p'_i 和 p'_o 几乎呈线性变化, 在接近筒端时出现非线性变化。

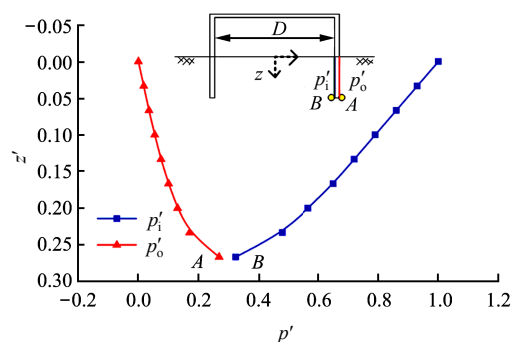


图 11 超孔隙水压力随筒壁深度的变化
Fig.11 Variation of normalised excess pore pressure with bulkhead depth

筒壁内侧负压损失定义为 L_i , $L_i = 1 - p'_i$; 筒壁外侧负压损失定义为 L_o , $L_o = p'_o$ 。负压损失 L 沿筒壁深度 z' 变化情况如图 12 所示。筒壁内侧点 B 的负压损失为 0.677, 筒壁外侧点 A 的负压损失为 0.267。筒壁有一定厚度, 因此筒端两点 A 、 B 之间负压损失 $L_{AB} = 1 - (L_i + L_o) = 0.055$ 。由以上分析可知, 筒壁内侧点 B 负压损失大于筒壁外侧点 A 负压损失, 由于筒壁厚度较小, 筒端的负压损失非常小。

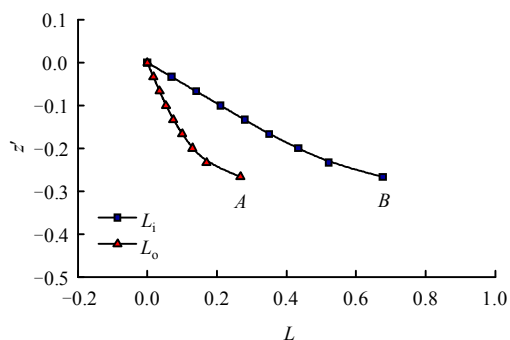
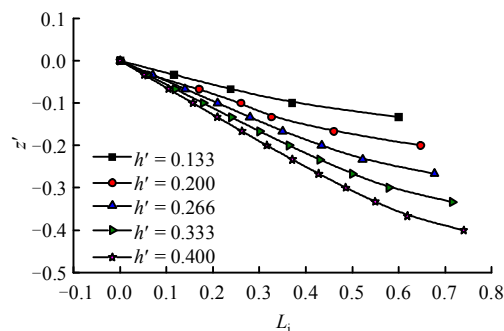


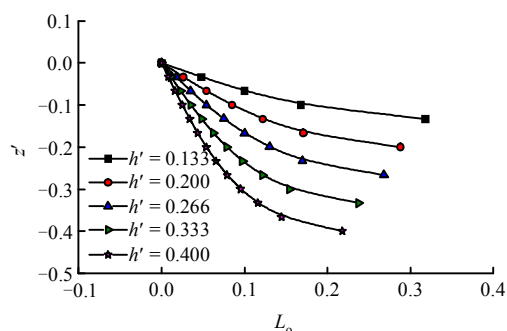
图 12 负压损失随筒壁深度的变化
Fig.12 Variation of suction pressure loss with bulkhead depth

h' 分别为 0.133、0.200、0.266、0.333、0.400 时, L_i 和 L_o 沿筒壁深度变化情况, 如图 13 所示;

筒端负压损失 L_{AB} 随沉贯深度的变化, 如图 14 所示。由图可知, 不同沉贯深度下 L_i 和 L_o 沿着筒壁深度几乎呈线性变化, 接近筒端处呈非线性变化; 随着沉贯深度的增加, 筒壁内侧土体点 B 负压损失增加, 筒壁外侧土体点 A 负压损失减小, 筒端负压损失减小。



(a) 筒壁内侧负压损失沿筒壁深度的变化



(b) 筒壁外侧负压损失沿筒壁深度的变化

图 13 不同沉贯深度下负压损失随筒壁深度的变化
Fig.13 Variation of suction pressure loss with bulkhead depth for different penetration depths

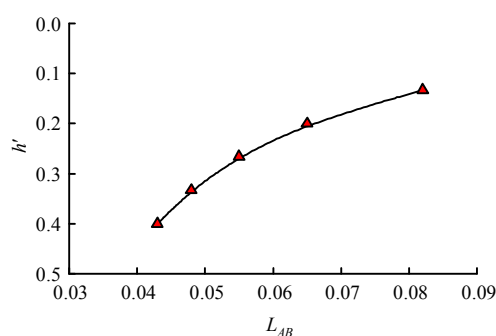


图 14 不同沉贯深度下筒端负压损失
Fig.14 Suction pressure loss of skirt tip for different penetration depths

将不同沉贯深度下, 两点 A 、 B 负压损失 (L_A 和 L_B) 及筒端负压损失 L_{AB} 汇总于表 3 中。由表可见, 在各个沉贯深度下, L_B 均大于 L_A , 负压对筒壁内侧土体的影响大于筒壁外侧。当 $h' = 0.400$ 时, L_B 达到 0.74, L_A 为 0.218, 负压损失集中在筒壁内侧, 对筒外土体的影响非常小, 这说明沉贯深度越

大,筒内土体负压损失越多,这与 Randolph 和 Ibsen 的研究相似^[8,14]。

表3 负压损失汇总表
Table 3 Summary of suction pressure loss

沉贯深度 h'	筒端点 A 负 压损失 L_A	筒端点 B 负 压损失 L_B	筒端负压 损失 L_{AB}
0.133	0.318	0.600	0.082
0.200	0.288	0.647	0.065
0.266	0.268	0.677	0.055
0.333	0.238	0.714	0.048
0.400	0.218	0.740	0.043

根据表3数据绘制 $(L_A - L_B)$ 与 h' 及 L_{AB} 与 h' 的关系曲线,对数据进行拟合,得到 $(L_A - L_B)$ 与 h' 及 L_{AB} 与 h' 的函数关系:

$$L_A - L_B = -0.1711 - 0.8953h' \approx -0.17 - 0.90h' \quad (2)$$

为求解侧摩阻力及端阻力计算公式做准备。本研究针对高径比为 0.4 的宽浅式筒型基础,因此拟合公式中 h' 范围为 $0 < h' \leq 0.4$ 。

$$L_{AB} = 0.025 \times h'^{-0.583} \quad (3)$$

4.4 渗流对筒型基础侧摩阻力和端阻力的影响

不计入渗流影响时,筒型基础的下沉阻力计算方法如下^[16]:

$$P_f = Q_{tip} + Q_{side} \quad (4)$$

$$Q_{tip} = q_{tip} A_{tip} \quad (5)$$

$$Q_{side} = Q_{s,out} + Q_{s,in} \quad (6)$$

$$Q_{s,out} = \int_0^h \gamma' z dz \cdot (K \tan \delta) \cdot \pi D_o \quad (7)$$

$$Q_{s,in} = \int_0^h \gamma' z dz \cdot (K \tan \delta) \cdot \pi D_i \quad (8)$$

$$q_{tip} = 0.5\gamma' t N_\gamma + q N_q \quad (9)$$

$$N_q = e^{\pi \tan \varphi} \tan^2 (45 + \varphi / 2) \quad (10)$$

$$N_\gamma = 1.5(N_q - 1) \tan \varphi \quad (11)$$

式中: P_f 为下沉总阻力; Q_{tip} 和 Q_{side} 分别为端阻力和筒壁侧摩阻力; $Q_{s,in}$ 和 $Q_{s,out}$ 分别为筒壁内外侧摩阻力; q_{tip} 为单位面积上基础端部阻力; N_γ 、 N_q 分别为与土体摩擦角 φ 有关的承载力系数; A_{tip} 为筒型基础端部的底面积; γ' 为土体有效重度; t 为筒壁厚度; q 为上覆土有效重度; K 为土体水平和垂直有效应力之比; δ 为土体与筒壁之间摩擦角; φ 为土体内摩擦角。

依据 4.3 节研究结果,推导渗流对侧摩阻力和端阻力的影响。为简化计算,认为负压损失沿筒壁

为线性变化^[17-18]。

4.4.1 渗流对侧摩阻力的影响

点 A 的负压损失为 L_A , 点 B 的负压损失为 L_B 。负压损失沿筒壁为线性变化, 则 $L_o = (L_A / h)z$, $L_i = (L_B / h)z$, $z \leq h$ 。渗流会增大筒外土体有效应力, 减小筒内土体有效应力^[18], 因此计入渗流影响时, 筒壁外侧深度 z 处的土压力为 $p_o = \gamma' z + L_o s = \gamma' z + (L_A / h)sz$, 内侧土体土压力为 $p_i = \gamma' z - L_i s = \gamma' z - (L_B / h)sz$, 则有

$$Q_{s,out} = \int_0^h (\gamma' + sL_A / h)z dz \cdot (K \tan \delta) \cdot \pi D_o \quad (12)$$

$$Q_{s,in} = \int_0^h (\gamma' - sL_B / h)z dz \cdot (K \tan \delta) \cdot \pi D_i \quad (13)$$

$$Q_{side} = Q_{s,out} + Q_{s,in} = \int_0^h (\gamma' + sL_A / h)z dz \cdot (K \tan \delta) \cdot \pi D_o + \int_0^h (\gamma' - sL_B / h)z dz \cdot (K \tan \delta) \cdot \pi D_i \quad (14)$$

由于 $t \ll D$, 假设 $D_o \approx D_i$, 式 (14) 可简化为以下形式:

$$Q_{side} = \int_0^h [2\gamma' + (L_A - L_B) / h]z dz \cdot (K \tan \delta) \cdot \pi D = [\gamma' h^2 + (L_A - L_B)h / 2] \cdot (K \tan \delta) \cdot \pi D \quad (15)$$

将式 (2) 代入式 (15), 可得只需要 s 、 h 、 t 、 D 等参数的侧摩阻力计算公式:

$$Q_{side} = [\gamma' h^2 + (-0.17 - 0.9h)s / 2] \cdot (K \tan \delta) \cdot \pi D = [(\gamma' - 0.45s / D)h^2 - 0.085sh] \cdot (K \tan \delta) \cdot \pi D \quad (0 < h / D \leq 0.4) \quad (16)$$

4.4.2 渗流对端阻力的影响

考虑渗流影响时, 筒壁端部的上覆土压力为 $q^* = \gamma' h - L_{AB} s$, 因此筒壁端部土体 γ' 为 $\gamma_{AB}^* = \gamma' - L_{AB} s / h$, 则端阻力为

$$q_{tip} A_{tip} = A_{tip} (0.5\gamma_{AB}^* t N_\gamma + q^* N_q) = A_{tip} [0.5(\gamma' - L_{AB} s / h) t N_\gamma + (\gamma' h - L_{AB} s) N_q] \quad (17)$$

将式 (3) 代入式 (17), 得端阻力关于 s 、 h 、 t 、 D 等参数的表达式:

$$q_{tip} A_{tip} = A_{tip} [0.5(\gamma' - L_{AB} s / h) t N_\gamma + (\gamma' h - L_{AB} s) N_q] = A_{tip} [0.5(\gamma' - 0.025sh'^{-0.583} / h) t N_\gamma + (\gamma' h - 0.025sh'^{-0.583}) N_q] = A_{tip} [(0.5tN_\gamma + hN_q)\gamma' - 0.025s(h / D)^{-0.583}(tN_\gamma / 2h + N_q)] \quad (0 < h / D \leq 0.4) \quad (18)$$

5 理论公式验证

5.1 模型试验验证

利用上述研究, 对本试验筒型基础的沉贯阻力进行计算, 验证所提公式的合理性。沉贯阻力减去筒型基础自重即为下沉所需负压。不考虑渗流影响和考虑渗流影响时, 下沉所需负压与试验施加负压对比如图 15 所示。计算侧摩阻力时, API 规范^[19]对于现场施工条件, K 取 0.8, δ 根据规范选取经验值。但是对于模型试验, 由于试验槽尺寸限制, 筒型基础沉放过程中, 槽体约束土体的变形, 提高了土体对筒壁的水平反力, 因此 Andersen 等^[16]在计算模型试验基础的沉贯阻力时, K 取 1.1, Harireche 等^[20]将 $K \tan \delta$ 取为 1.02, 本试验 $K \tan \delta$ 取 1.05。计算渗流影响时, s 取试验中实际施加的负压值。

由图 15 可见, 不考虑渗流影响时, 计算的下沉负压大于实际施加的负压, 考虑渗流影响时, 下沉负压与试验施加的负压吻合较好, 说明通过 ADINA 模拟渗流场, 从而计算渗流对沉贯阻力的影响是可行的。

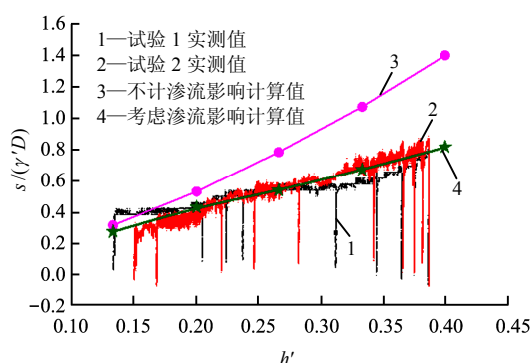


图 15 计算的下沉负压与试验施加负压对比
Fig.15 Comparison of calculated and measured suction pressures

根据 3.4 节公式定量分析渗流对总阻力的影响, 并揭示下沉过程中端阻力和侧摩阻力对总阻力的贡献比例。在 h' 分别为 0.133、0.200、0.266、0.333、0.400 共 5 种下沉深度下, 减小的阻力占总沉放阻力的比值分别为 13.17%、18.82%、31.08%、37.24%、41.70%。

不同下沉阶段端阻力和侧摩阻力对总阻力的贡献比例不同, 如表 4 所示。试验模型初始下沉时, 端阻力占总阻力的比例较大, 随着下沉深度的增加, 筒壁接触土体的面积增大, 侧摩阻力占总阻力的比例增加, 端阻力对总阻力的贡献比例减小。基础下沉过程中, 筒壁内侧摩阻力几乎完全消失, 筒壁外

侧摩阻力是侧摩阻力的主要构成, 这与陈飞等^[21]的研究相似。值得指出的是, 由于试验模型壁厚与直径之比 t/D 相对于原型基础较大, 因此表 4 中端阻力占总阻力的比例相应偏大。

表 4 端阻力和侧摩阻力对总阻力的贡献比例
Table 4 Proportions of tip resistance and lateral frictional resistance to total resistance

沉贯深度 h'	端阻力占总阻力的比例	侧摩阻力占总阻力的比例
0.133	0.635	0.365
0.200	0.576	0.424
0.266	0.493	0.507
0.333	0.462	0.538
0.400	0.432	0.568

5.2 实际工程验证

采用文献[17]中北海 Draupner E 立管平台吸力筒型基础的安装数据对所提出的吸力值计算公式合理性进行验证。该结构直径为 12 m, 高为 6 m, 筒壁厚度为 0.045 m。地基土体为密实的砂土, 内摩擦角为 44° , 浮重度为 8.5 kN/m^3 。通过文中 3.4 节推导的侧摩阻力和端阻力计算公式计算基础沉贯阻力, 并将公式推导的吸力值与 Draupner E 平台安装的实测数据对比, 如图 16 所示。由图可见, 公式计算值略低于实测吸力值, 但是总体来说相差不大。公式较高估计了渗流减阻的效应, 这是由于推导公式的前提是假设土体达到一个稳定的渗流状态。而实际工程中筒型基础尺寸较大, 地基土体较为密实, 土体中的渗流并不能在基础贯入过程中都达到稳定状态, 因此, 由于渗流所减小的阻力略低于公式推导值。

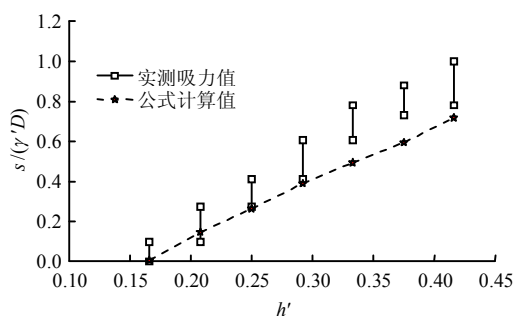


图 16 公式计算值与实测吸力值对比
Fig.16 Comparison of calculated and measured suction values

6 结 论

(1) 筒型基础沉贯过程中, 筒内中心位置土体的超孔隙水压力绝对值大于筒壁内侧附近土体的超

孔压绝对值。

(2) 筒壁两侧土体的超孔隙水压力沿筒壁深度几乎呈线性变化, 在接近筒端时出现非线性变化。随着沉贯深度的增加, 筒壁内侧土体的负压损失增大, 外侧土体的负压损失减小, 筒端的负压损失减小。

(3) 推导的理论公式可以较为准确地计算渗流对筒型基础沉贯阻力的影响。随着沉贯深度的增加, 渗流减阻效应越来越明显, 减小的阻力占总沉贯阻力的比值越来越大。

为精确计算筒型基础的沉贯阻力, 应进一步完善有限元模型, 模拟基础沉放的动态全过程, 揭示基础下沉每一时刻的瞬态渗流网分布, 从而更准确地推导渗流对基础沉贯阻力的影响。

参考文献

- [1] 丁红岩, 杜杰. 吸力锚下沉过程中土塞高度计算[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2002, 35(4): 439—442.
DING Hong-yan, DU Jie. Height of soil-plug calculation in suction anchor[J]. **Journal of Tianjin University(Science and Technology)**, 2002, 35(4): 439—442.
- [2] BYE A, ERBRICH C, EARL K. Geotechnical design of bucket foundation[C]//Offshore Technology Conference. Houston: [s.n.], 1995: 869—883.
- [3] SAHOTA B, WILSON Q. The breakout behavior of a suction anchor embedded in submerged sand[C]//Offshore Technology Conference. Houston: [s.n.], 1982: 117—132.
- [4] 丁红岩, 刘振勇, 陈星. 吸力锚土塞在粉质黏土中形成的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 441—444.
DING Hong-yan, LIU Zhen-yong, CHEN Xing. Model tests on soil plug formation in suction anchor for silty clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(4): 441—444.
- [5] 朱斌, 孔德琼, 童建国, 等. 粉土中吸力式桶形基础沉贯及抗拔特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(7): 1045—1053.
ZHU Bin, KONG De-qiong, TONG Jian-gang, et al. Model tests on penetration and pullout of suction caissons in silt[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(7): 1045—1053.
- [6] 练继建, 马煜祥, 王海军, 等. 筒型基础在粉质黏土中的静压沉放试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 1856—1862.
- LIAN Ji-jian, MA Yu-xiang, WANG Hai-jun, et al. Experimental study on static pressure sedimentation for bucket foundation in silty clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(7): 1856—1862.
- [7] FELD T. Suction buckets, a new innovative foundation concept, applied to offshore wind turbines[D]. Aalborg: Aalborg University, 2001.
- [8] IBSEN L B, THILSTED C L. Numerical study of piping limits for suction installation of offshore skirted foundations and anchors in layered sand[C]//Proceedings of International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics. Perth: [s. n.], 2011: 421—426.
- [9] 祁越, 刘润, 练继建. 无黏性土中筒型基础负压下沉模型试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 139—150.
QI Yue, LIU Run, LIAN Ji-jian. Model test of bucket foundation suction installation in cohesionless soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(1): 139—150.
- [10] TRAN M N, RANDOLPH M F. Variation of suction pressure during caisson installation in sand[J]. **Géotechnique**, 2008, 58(1): 1—11.
- [11] HOULSBY G T, KELLY R B, BYRNE B W. Field trials of suction caissons in clay for offshore wind turbine foundations[J]. **Géotechnique**, 2005, 55(4): 287—296.
- [12] MEHRAVAR M, HARIRECHE O, FARAMARZI A, et al. Modelling the variation of suction pressure during caisson installation in sand using FLAC^{3D}[J]. **Ships and Offshore Structures**, 2015, 12(7): 1—7.
- [13] LIAN JIJIAN, CHEN FEI, WANG HAIJUN. Laboratory tests on soil-skirt interaction and penetration resistance of suction caissons during installation in sand[J]. **Ocean Engineering**, 2014, 84: 1—13.
- [14] SENDERS M, RANDOLPH M F. CPT-based method for the installation of suction caissons in sand[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2009, 135(1): 14—25.
- [15] GUO Z, WANG L, YUAN F, et al. Model tests on installation techniques of suction caissons in a soft clay seabed[J]. **Applied Ocean Research**, 2012, 34: 116—125.
- [16] ANDERSEN K H, JOSTAD H P, DYVIK R. Penetration resistance of offshore skirted foundations and anchors in dense sand[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2008, 134(1): 106—116.