

DOI: 10.11779/CJGE20221397

海上风电场吸力筒基础沉贯特性研究

王卫¹, 刘俊峰², 李亚静³, 倪道俊³, 滕华灯², 黄绍幸²

(1. 中国长江三峡集团有限公司科学技术研究院, 北京 100038; 2. 三峡新能源阳江发电有限公司, 广东 阳江 529500;

3. 中国三峡新能源(集团)股份有限公司, 北京 100053)

摘要: 吸力筒沉贯特性是影响其工程应用的重要因素。基于海上风电场吸力筒导管架基础筒体下沉过程的实测数据, 研究真实海床地基条件下吸力筒沉贯阻力的 CPT 计算方法的可行性以及 DNV 规范推荐的土体沉贯阻力的经验系数的适用性, 分析黏土层和砂土层中沉贯阻力的组成和负压下沉过程中的筒内土塞机制。研究结果表明: CPT 计算方法能够较精确地计算吸力筒沉贯阻力, DNV 规范推荐的经验系数高估了海床地基中淤泥质土、粉质黏土层的黏土经验系数 $k_f(z)$ 以及砂砾、中砂、粗砂层等砂土经验系数 $k_p(z)$; 负压下沉过程中, 筒内土塞体积的发展规律与海床土层分布及土体物理力学性质密切相关。

关键词: 海上风电; 吸力筒基础; 沉贯特性; 土塞

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)03-0655-07

作者简介: 王卫(1992—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事海上风电机组支撑结构与胶结抛石防冲刷技术研究工作。E-mail: wangwei16@tsinghua.org.cn。

Penetration behavior of suction bucket foundations in an offshore wind farm

WANG Wei¹, LIU Junfeng², LI Yajing³, NI Daojun³, TENG Huadeng², HUANG Shaoxing²

(1. Institute of Science and Technology, China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China; 2. Three Gorges Renewables Yangjiang

Power Co., Ltd., Yangjiang 529500, China; 3. China Three Gorges Renewables (Group) Co., Ltd., Beijing 100053, China)

Abstract: The penetration behavior of suction bucket foundations has a significant effect on engineering application. Based on the measured installation data of two suction bucket jacket foundations in an offshore wind farm, the CPT-based method used for calculating the penetration resistance in seabed and the two critical empirical factors, $k_p(z)$ and $k_f(z)$, recommended by the DNV code are studied. The component of penetration resistance of suction bucket in clay soil layer and sand soil layer, respectively, and the soil plug during suction penetration process are analyzed. The results show that the penetration resistance of suction bucket can be precisely predicted by the CPT-based method. The empirical factor $k_f(z)$ for silty soil, silty clay soil and the empirical factor $k_p(z)$ for grit sand, medium-dense sand and coarse sand are overestimated by the DNV code. During suction penetration process, the soil plug of suction bucket foundations relies on the seabed soil layers and mechanical properties of soils.

Key words: offshore wind power; suction bucket foundation; penetration behavior; soil plug

0 引言

近年来, 开发和利用海上风能资源逐渐成为全球能源转型的重要支撑。吸力筒导管架基础具有海上施工时间短、适用于浅覆盖层海床、综合成本低等优点, 逐渐应用于海上风电工程^[1]。吸力筒的安全沉贯是其成功应用的关键, 沉贯特性分析通常包括沉贯阻力计算、沉贯过程中允许的最大负压和筒内土塞高度等。沉贯阻力计算与海床土体类型及土体力学参数密切相关, 由于海床的区域地质变异性和海洋土的高度非均质性, 沉贯过程存在不可预知的风险。吸力筒沉贯阻力通常采用基于力平衡原理^[2-4]的计算方法或基

于 CPT 锥尖阻力的经验公式^[5-6]。Andersen 等^[5]给出了一种混合计算方法, 即采用力学平衡原理计算侧摩阻力, 采用 CPT 勘测数据计算端阻力。李大勇等^[7-9]通过模型试验研究了吸力筒在砂土中的沉贯特性, 并基于滑移线理论, 建立了砂土中筒型基础沉贯过程的最小负压值理论公式, 同时基于砂土管涌破坏机制, 建立了最大负压值的理论公式。

在吸力筒负压的下沉过程中, 筒内常出现土塞现象^[10-12]。土塞是影响吸力筒沉贯深度能否满足设计

基金项目: 国家自然科学基金项目(52209171); 中国长江三峡集团有限公司科研项目(WWKY-2020-0179)

收稿日期: 2022-11-01

表 1 吸力筒设计参数

Table 1 Parameters of suction buckets

设计参数	筒体外径/ m	筒体长 度/m	沉贯深度/ m	预留间 隙/m	筒体壁 厚/mm	筒体数量/ 个	筒体间 距/m	筒体重 量/t	筒体承受 荷载/kN
#1	13	10.6	10.1	0.5	45	3	30	241.6	2029.58
#2	12.3	11.3	10.8	0.5	40	3	30	218.7	2052.12

要求的关键因素。DNV^[4]和 API^[13]规范指出，当施加的负压小于允许负压值时，土塞隆起的体积等于筒壁下沉所置换的土体。然而，Andersen 等^[14]研究表明当下沉深度超过一半时，土塞隆起的体积大于筒壁下沉所置换的土体。Zhou 等^[15]和 Chen 等^[16]研究表明土塞体积小于筒壁下沉过程中置换土体的体积。丁红岩等^[17]研究指出吸力筒在下沉过程应合理控制负压，避免筒内土体整体失稳形成土塞。闫澍旺等^[18]研究指出土塞是阻碍筒体在黏土中顺利下沉的最主要因素。

国内外学者关于吸力筒沉贯特性的研究以模型试验为主，且土体以单层均质土为主，基于现场沉贯数据的研究相对较少。目前，吸力筒基础的施工工艺和沉贯阻力计算方法主要借鉴 NGI、SPT 等欧洲研究机构制定的设计与施工标准。然而，中国黄海、东海、南海等海域地质条件与欧洲北海存在较大差异，直接借用欧美规范建议的设计参数和施工经验参数可能造成一定工程风险或设计冗余。

本文首先简要介绍国内首批采用吸力筒导管架基础的海上风电场工程；然后，基于实际工程的沉贯数据，分析黏土层与砂土层中吸力筒沉贯阻力随下沉深度的变化趋势；随后，评估 DNV 规范推荐的基于 CPT 数据的沉贯阻力经验公式及关键经验系数的适用性；最后，研究吸力筒负压下沉过程中的土塞效应。

1 工程介绍

1.1 海上风电场及吸力筒导管架基础

本工程海上风电项目场址水深范围 27~32 m。吸力筒导管架基础由 3 个吸力筒和导管架构成，3 个吸力筒呈等边三角形布设，与导管架之间采用肋板连接，筒体的中心距为 30 m（图 1）。2 台吸力筒导管架基础的吸力筒结构参数如表 1 所示。



图 1 吸力筒导管架基础

Fig. 1 Photo of suction bucket jacket foundation

1.2 工程地质

2 台吸力筒导管架基础机位点的中心钻孔和 CPT 勘测点的布置如图 2 所示，地层分布及 CPT 勘测数据分别如图 3、4 所示。其中，#1 机位点的土层分布与 CPT 勘测数据基本吻合，泥面以下 12 m 范围内以淤泥和淤泥质土为主，下层为中砂和粗砂层；#2 机位点 CPT 勘测数据显示泥面以下 6~7 m 范围内夹有一层厚 1 m 左右的砂砾土，泥面 12 m 以下分布一层厚薄不一的黏土混砂层，黏土混砂的 CPT 的勘测数据更接近于砂土。值得说明的是，吸力筒导管架基础在安装前，对机位点附近海床进行了清淤作业，清淤后的海床表面高程分别为-30.2，-30.0 m。

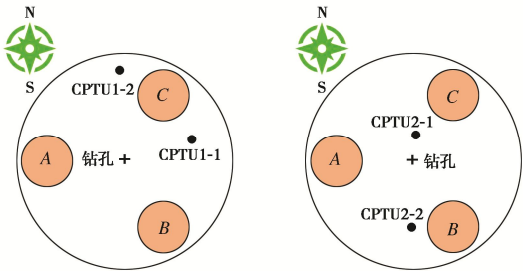


图 2 吸力筒导管架基础机位点地勘点布设示意图

Fig. 2 Plane arrangement of two suction bucket jacket foundations

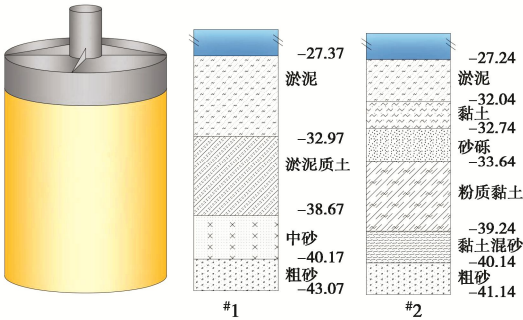


图 3 吸力筒导管架基础机位点地层分布

Fig. 3 Soil layers at sites of two suction bucket jacket foundations

2 吸力筒沉贯可行性

2.1 沉贯阻力计算方法

DNV-RP-C212 规范^[19]给出了基于 CPT 原位地勘试验数据总结提出的吸力筒沉贯阻力经验公式，总沉贯阻力由端阻力 R_{tip} 和侧摩阻力 R_{shell} 构成：

$$R = R_{tip}(z) + R_{shell}(z) \quad , \quad (1)$$

$$R_{tip}(z) = k_p(z) \times A_p \times q_c(z) \quad , \quad (2)$$

$$R_{\text{shell}}(z) = A_s \times \int_0^z k_f(z) q_c(z) dz \quad (3)$$

式中： R 为下沉阻力（kN）； z 为筒端下沉深度（m）； $k_p(z)$ ， $k_f(z)$ 分别为 $q_c(z)$ 与筒端贯入阻力、筒壁摩擦力的经验系数； $q_c(z)$ 为 CPT 勘测获得的平均圆锥贯入阻力（MPa），是深度 z 的函数； A_p 为筒端面积（m²）； A_s 为单位长度筒壁侧面积（m²）。

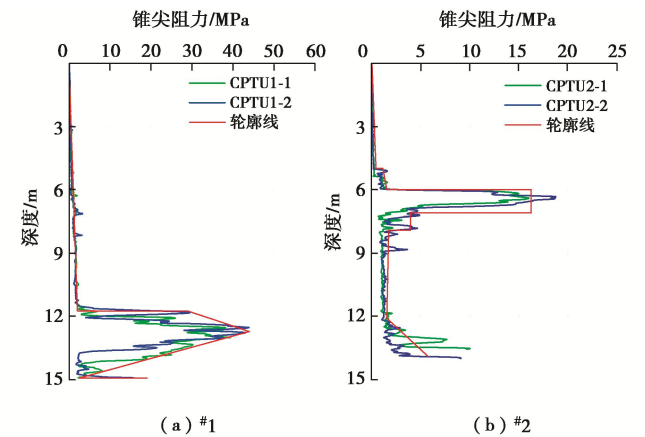


图 4 机位点 CPT 勘测数据

Fig. 4 CPT cone resistance at locations of suction bucket jacket foundations

2.2 经验系数

DNV-RP-C212 规范^[19]给出了欧洲北海海床黏土和砂土经验系数 $k_p(z)$ ， $k_f(z)$ 的建议值，如表 2 所示。SPT 公司基于吸力筒沉贯施工经验同样给出了砂土和黏土经验系数 $k_p(z)$ ， $k_f(z)$ 的预期最大值，其中 SPT 公司建议的砂土的经验系数为 MP 和 HE 工况的经验系数的平均值。SPT 公司建议的黏土经验系数与 DNV-RP-C212 规范^[20]相同，并指出黏土 $q_c(z)$ 需除以黏土的灵敏度。Chen 等^[19]研究指出中砂的 $k_p(z)$ ， $k_f(z)$ 经验系数分别为 0.35 和 0.0018。Andersen 等^[5]基于现场实测数据，建议砂土 $k_f(z)$ 经验系数取值为 0.0015。

表 2 CPT 方法经验系数

Table 2 Empirical factors for CPT method factors

来源	工况	黏土		砂土	
		$k_p(z)$	$k_f(z)$	$k_p(z)$	$k_f(z)$
DNV	MP	0.4	0.03	0.3	0.001
	HE	0.6	0.05	0.6	0.003
SPT	ME	0.6	0.05	0.45	0.002
Andersen ^[5]	MP	—	—	0.01~0.55	0.001
	ME	—	—	0.03~0.6	0.0015
Chen 等 ^[20]	—	—	—	0.35	0.0018

注：MP 和 HE 分别为 DNV 规范推荐的最大可能性和最高预期的经验系数，ME 为 SPT 公司推荐的最高预期的经验系数。

2.3 沉贯可行性分析

采用趋势线近似确定该机位点锥尖阻力 $q_c(z)$ 沿深度的分布（图 4），采用式（1）～（3）和表 2 中

MP 和 ME 工况下的经验系数分别计算 2 台吸力筒在自重下的入泥深度和在负压下沉过程中的沉贯阻力，如表 3、4 所示。由表 3 可知，采用 ME 工况建议的 $k_p(z)$ ， $k_f(z)$ 经验系数，2 台吸力筒的自重入泥深度的预期最小值分别为 4.63，5.18 m，远大于 0.5 m 的施工要求（工程实践中，0.5 m 通常认为能够保证筒体与海床形成密封，是负压下沉的必要条件）。2 台吸力筒导管架所需负压均在设计下沉深度时达到最大值，最高预期的沉贯阻力分别为 99，155 kPa。此外，下沉过程中所需负压均低于筒体发生屈曲变形的最大压差。值得说明的是，图例 MP 和 ME 是指采用 MP 和 ME 工况下的 $k_p(z)$ 和 $k_f(z)$ 计算得到的沉贯阻力，并考虑淤泥和黏土的灵敏度 $S_t=1.8\sim3.5$ 。

表 3 自重入泥深度预测值

Table 3 Predicted values of self-weight penetration depth

吸力筒	下沉深度/m	
	MP	ME
#1	6.03	4.63
#2	5.89	5.18

表 4 负压沉贯阻力预测值

Table 4 Predicted values of penetration resistance

吸力筒	沉贯阻力（负压）/kPa	
	MP	ME
#1	48	99
#2	78	155

3 吸力筒沉贯特性分析

3.1 沉贯过程分析

2 台吸力筒导管架基础在自重和负压作用下的实测沉贯数据如表 5 所示。由表 5 可知，2 台吸力筒的实测自重入泥深度分别为 5.7，3.5 m。对比表 3 可知，#1 吸力筒导管架基础的实测自重入泥深度介于 MP 工况和 ME 工况的预测值之间，更接近于 MP 工况的预测值；#2 吸力筒导管架基础的实测自重入泥深度远小于 ME 工况的预测值。上述结果表明，DNV 规范和 SPT 建议的 $k_p(z)$ ， $k_f(z)$ 经验系数不适用于淤泥和淤泥质土，同时 SPT 公司推荐值低估了黏土和砂砾土的经验系数。

表 5 吸力筒实测沉贯结果

Table 5 Measured results of penetration process of suction buckets

吸力筒		自重下沉深度/m	沉贯总深度/m	最大负压值/kPa
#1	B 筒	5.7	9.67	140
#2	B 筒	3.5	10.8	70

2 台吸力筒导管架基础在负压下沉过程中的沉贯阻力随深度的变化曲线如图 5 所示。可以看出，1#吸力筒导管架基础 B 筒的实测沉贯阻力高于 MP 工况的预测值，在负压下沉初期，实测沉贯阻力略低于 ME

工况的预测值,随着沉贯深度的增加,实测沉贯阻力高于 ME 工况的预测值。#2 吸力筒导管架基础的 B 筒在下沉初期,实测沉贯阻力高于 ME 工况的预测值,随着沉贯深度的增加,实测沉贯阻力低于 MP 工况的预测值,当沉贯深度为 5.0~7.0 m 时,实测沉贯阻力介于 MP 和 ME 工况的预测值之间,在下沉中后期,实测沉贯阻力低于 MP 工况的预测值。

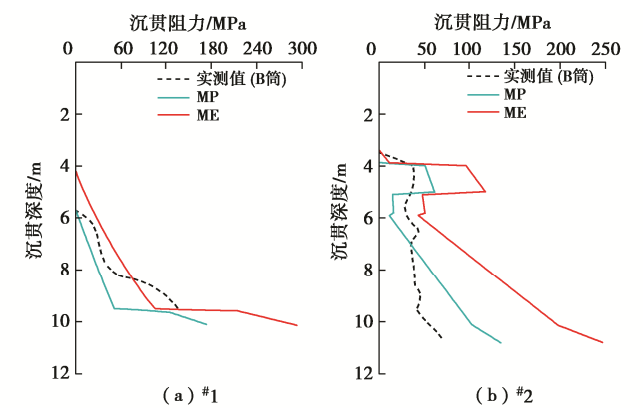


图 5 负压下沉过程的实测沉贯阻力

Fig. 5 Measured penetration resistances with depth

上述分析表明,在考虑淤泥、黏土的灵敏度前提下,采用 MP 工况的 $k_p(z)$ 和 $k_f(z)$ 经验系数的预测值低估了实际的沉贯阻力,而采用 ME 条件下的 $k_p(z)$ 和 $k_f(z)$ 经验系数的预测值在一定程度上高估了实际的沉贯阻力。分析其原因, DNV 规范^[19]和 SPT 公司推荐的经验系数主要基于欧洲北海硬黏土和致密砂土中筒型基础的安装经验,然而本工程海床覆盖层以淤泥、软黏土、中等密实度砂土为主,两者之间存在较大差异。此外,对比自重下沉和负压下沉过程中的实测沉贯阻力可知,负压有利于降低土体的沉贯阻力。

3.2 经验系数适用性分析

本节考虑本工程海域与欧洲北海的差异性,以 MP 工况建议的经验系数为基准,采用式 (4), (5) 进行经验系数适用性分析。

$$k'_p(z) = m \times k_p(z) \quad , \quad (4)$$

$$k'_f(z) = n \times k_f(z) \quad 。 \quad (5)$$

式中: m 和 n 分别为 $k_p(z)$, $k_f(z)$ 经验系数的修正系数。

在负压沉贯阻力分析时,以吸力筒导管架基础的实测自重入泥深度为负压沉贯阻力的计算起点,同时考虑机位点的海床清淤作业对锥尖阻力取值起点的影响。2 台吸力筒导管架基础 B 筒在负压下沉过程中各土层 $k_p(z)$, $k_f(z)$ 经验系数取值分别如表 6, 7 所示,沉贯阻力随下沉深度的变化趋势如图 6 所示。由图 6 可知,对于#1 吸力筒导管架基础,当砂土经验系数

$k'_p(z)$ 由 0.3 减小至 0.15, 泥面 8.5 m 以下的沉贯阻力预测值接近于实测值;当砂土经验系数 $k'_p(z)$ 由 0.3 减小至 0.15,且黏土经验系数 $k'_f(z)$ 由 0.03 减小至 0.024, 泥面以下 5.7~8.5 m 范围内的沉贯阻力曲线与实测沉贯曲线基本一致,但泥面 8.5 m 以下部分区域预测值低于实测值;当砂土经验系数 $k'_p(z)$ 由 0.3 减小至 0.15, 且黏土经验系数 $k'_f(z)$ 由 0.03 减小至 0.027, 计算的沉贯曲线与实测沉贯曲线基本重合。

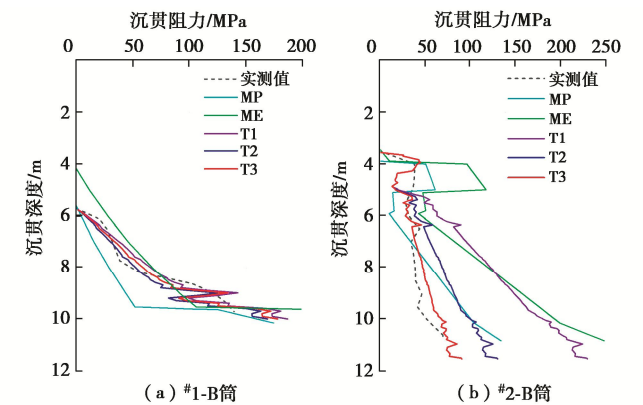


图 6 负压下沉过程的沉贯阻力经验系数的影响

Fig. 6 Effect of two empirical factors on penetration resistance

表 6 #1 机位点土体经验系数取值

Table 6 Empirical factors of $k_p(z)$ and $k_f(z)$ for location #1

土层	顶高	底高	T1		T2		T3	
			m	n	m	n	m	n
淤泥质土	-5.7	-8.77	1	1	1	0.8	1	0.9
中砂	-8.77	-11.0	0.5	1	0.5	1	0.5	1

表 7 #2 机位点土体经验系数取值

Table 7 Empirical factors of $k_p(z)$ and $k_f(z)$ for location #2

土层	顶高	底高	T1		T2		T3	
			m	n	m	n	m	n
砂砾	-3.5	-4.9	0.6	1.5	0.6	1.5	0.6	1.5
粉质黏土	-4.9	-10.9	1	1	1	0.5	1	0.3
粗砂	-10.9	-11.5	0.6	1.5	0.6	1.5	0.6	1.5

对于#2 吸力筒导管架基础,当砂土经验系数 $k'_p(z)$ 由 0.3 减小至 0.18 且砂土经验系数 $k'_f(z)$ 由 0.001 增加至 0.0015, 泥面以下 3.5~4.9 m 范围内(砂土层)的沉贯阻力预测值接近于实测值;当黏土经验系数 $k'_f(z)$ 由 0.03 减小至 0.015, 泥面 4.9 m 以下(黏土层)的沉贯阻力计算值接近于实测值;当砂土经验系数 $k'_p(z)$ 为 0.18 和 $k'_f(z)$ 为 0.0015, 且黏土经验系数 $k'_f(z)$ 为 0.009 时,沉贯阻力预测值与实测值吻合较好。

综上可知, DNV-RP-C212 规范^[19]推荐的沉贯阻力计算公式能够较好地预测下沉过程所需的负压。对于本工程海域的淤泥质土和粉质黏土层,建议减小黏土经验系数 $k'_f(z)$, 对于砂砾、中砂和粗砂层,建议减

小砂土经验系数 $k'_p(z)$ 。

3.3 吸力筒沉贯阻力成分分析

图7为2台吸力筒导管架基础的B筒在负压下沉过程中端阻力、侧摩阻力和总阻力随下沉深度的变化趋势,图中的端阻力数值为该深度的端阻力减去自重下沉结束时的端阻力,侧摩阻力为自重下沉深度以下筒体的摩擦阻力。对于#1吸力筒导管架基础B筒(#1-B),在淤泥质土层中,总沉贯阻力以侧阻力为主,端阻力接近于0,在泥面8.5 m以下,侧摩阻力增加幅度趋缓,端阻力的突然增大导致沉贯阻力的增加。对于#2吸力筒导管架基础B筒(#2-B),在砂土层中,总沉贯阻力以端阻力为主,在黏土层中,总沉贯阻力基本为侧摩阻力。综上,对于黏土层,侧摩阻力是影响负压下沉的重要指标;对于砂土层,端阻力是影响负压下沉的重要指标。结合3.2节中砂土的 $k_f(z)$ 经验系数远小于黏土,虽然砂土层的端阻力明显高于黏土层,但考虑到砂土层的侧摩阻力远低于黏土层以及侧摩阻力随下沉深度的不断累积,因此吸力筒基础适合于海床表层为砂土的地质条件。

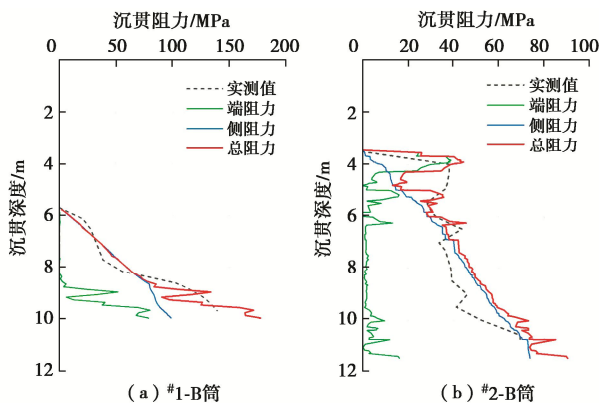


图7 负压下沉过程的沉贯阻力组成

Fig. 7 Composition of penetration resistance

3.4 土塞效应分析

在下沉过程中,采用压力传感器和回声测深仪分别测量筒外和筒内土体高度。在自重下沉过程中,2台吸力筒内部未出现明显的超土塞现象。在负压下沉过程中,负压值、筒内超土塞体积、筒壁嵌入体积随时间的变化趋势如图8所示。如图8中黄线所示, #1吸力筒导管架基础B筒在负压施加初期,筒内开始出现轻微的超土塞现象,随后超土塞体积总体上保持缓慢增加的趋势,当负压显著提高时,超土塞体积呈现短暂性增大,继续提高负压,超土塞体积又逐渐降低,最大超土塞体积为 14.96 m^3 ,超土塞高度约为 0.113 m 。同时,在下沉过程中,超土塞体积总体上高于嵌入海床的筒体体积,当达到设计深度时,超土塞体积

与筒体嵌入体积基本相等。#2吸力筒导管架基础B筒在负压施加的初期,筒内超土塞体积先呈现滞后性的突然增大、随后又显著减小的趋势;在整个负压下沉过程中,筒内超土塞体积总体上呈现先缓慢增大,然后快速增大的变化趋势;超土塞体积的增长速率远高于嵌入海床的筒体体积,当筒体达到设计沉贯深度时,超土塞体积约为筒体嵌入体积的6.4倍,超土塞高度约为 0.63 m 。

对比图8(a),(b)可知, #1和#2吸力筒导管架基础B筒在负压的施加的初期或突然增大的阶段,土塞体积均显著增大,分析其原因可能是在负压作用下,淤泥土颗粒克服黏聚力和重力,逐渐向上移动,导致孔隙比逐渐增大和筒内土体膨胀。2个吸力筒在后续下沉过程中超土塞体积呈现截然不同发展趋势,其原因可能是, #1机位点的表层土体为较厚淤泥层和淤泥质土层,在抽吸负压过程中,表层膨胀的淤泥会被部分抽出,导致超土塞体积波动式增加,但在沉贯后期,由于抽吸负压较大,表层膨胀的淤泥被不断抽出,进而呈现超土塞体积逐渐减小的变化趋势,该现象与筒内实际灌浆量高于设计值的施工数据也较为吻合; #2机位点的覆盖层主要为淤泥层、砂砾层和粉质黏土层,抽吸负压过程中土体可能发生渗流,筒底土体失稳破坏进入筒内,进而导致超土塞体积不断增加,因此在吸力筒负压下沉过程中,应严格控制负压值。

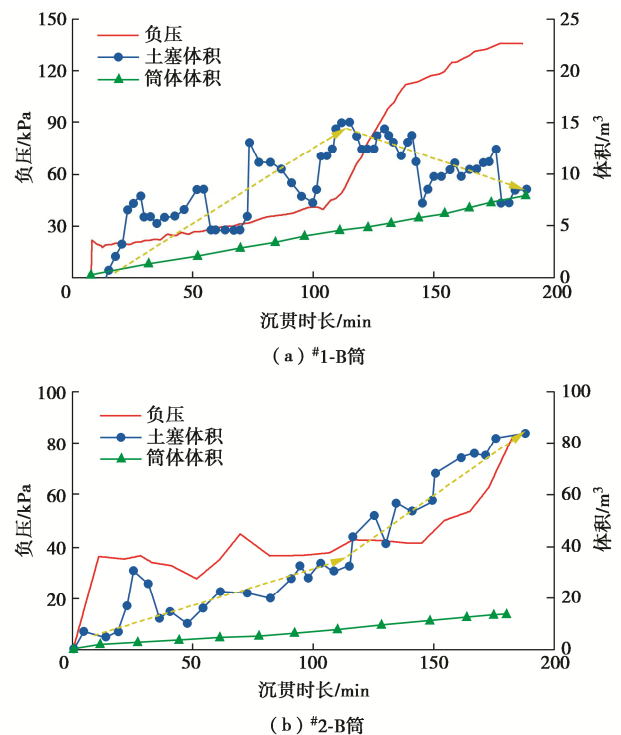


图8 土塞体积随沉贯时间的变化曲线

Fig. 8 Variation of volume of soil plug with penetration time

综上可知,吸力筒在负压下沉过程中,筒内均会出现土塞现象,超土塞体积(高度)与下沉深度无对应关系,超土塞发展趋势与土层分布密切相关,该现象不同于王胤等^[21]的试验结果。#1 和#2 吸力筒导管架基础 B 筒的土塞体积高于筒体嵌入体积的现象与 Andersen 等^[14]、王胤等^[21]试验结果一致。

4 结 论

本文基于 2 台海上风电吸力筒导管架基础的实测沉贯数据,分析了基于 CPT 数据的沉贯阻力计算方法的可行性以及 DNV 规范推荐的黏土、砂土经验系数的适用性,研究了砂土和黏土层中沉贯阻力的构成,讨论了吸力筒内土塞的发生机制,主要得到以下 3 点结论。

(1) DNV-RP-C212 规范推荐的吸力筒沉贯阻力计算公式能够较好地揭示沉贯阻力随下沉深度的变化趋势,但建议的经验系数不完全适用于本工程海域。对于本工程海床中的淤泥质土、粉质黏土层,建议减小黏土经验系数 $k'_r(z)$; 对于砂砾、中砂和粗砂层,建议减小砂土经验系数 $k'_p(z)$ 。

(2) 吸力筒在黏土层、砂土层下沉过程中的侧摩阻力和端阻力的占比存在显著差异,黏土层中的沉贯阻力以侧摩阻力为主,砂土层中的沉贯阻力以端阻力为主。综合黏土和砂土的 $k_p(z)$, $k_r(z)$ 经验系数取值,吸力筒基础适合海床表层以砂土为主的海床。

(3) 本工程吸力筒在自重下沉阶段,筒内无土塞现象,但在抽吸负压作用下,筒内出现明显的土塞现象。2 个吸力筒的土塞体积均高于嵌入海床的筒体体积,同时超土塞体积的变化趋势与土层分布密切相关,下沉深度对其无显著影响。

参考文献:

- [1] LIU B, ZHANG Y H, MA Z, ANDERSEN K H, et al. Design considerations of suction caisson foundations for offshore wind turbines in Southern China[J]. *Applied Ocean Research*, 2020, **104**: 102358.
- [2] HOULSBY G T, BYRNE B W. Design procedures for installation of suction caissons in clay and other materials[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 2005, **158**(2): 75-82.
- [3] HOULSBY G T, BYRNE B W. Design procedures for installation of suction caissons in sand[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 2005, **158**(3): 135-144.
- [4] DNVGL-RP-E303. *Geotechnical Design and Installation of Suction Anchors in Clay*[S]. 2017.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 李大勇, 张雨坤, 高玉峰, 等. 中粗砂中吸力锚的负压沉贯模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2012, **34**(12): 2277-2283. (LI Dayong, ZHANG Yukun, GAO Yufeng, et al. Model tests on penetration of suction anchors in medium-coarse sand[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(12): 2277-2283. (in Chinese))
- [8] 李大勇, 吴宇旗, 张雨坤, 等. 砂土中桶形基础吸力值的设定范围[J]. *岩土力学*, 2017, **38**(4): 985-992, 1002. (LI Dayong, WU Yuqi, ZHANG Yukun, et al. Determination of suction range for penetration of suction caissons in sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, **38**(4): 985-992, 1002. (in Chinese))
- [9] 李大勇, 侯新宇, 张雨坤, 等. 相对密度对沉贯中吸力基础桶壁-砂土界面力学特性的影响[J]. *岩土工程学报*, 2022, **44**(9): 1598-1607. (LI Dayong, HOU Xinyu, ZHANG Yukun, et al. Effects of relative densities on mechanical characteristics of interface between sand and suction caisson during penetration[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, **44**(9): 1598-1607. (in Chinese))
- [10] ZHANG Y, LI D, BAI Y. Experimental studies on suction-assisted installation of the modified suction caisson in dense sand[J]. *Applied Ocean Research*, 2022, **124**: 103221.
- [11] SENPERE D, AUVERGNE G A. Suction anchor piles-a proven alternative to driving or drilling[C]// *Offshore Technology Conference*. OnePetro, 1982.
- [12] TJELTA T I. Suction piles: their position and application today[C]// *The Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference*. OnePetro, 2001.
- [13] API-RP-2SK. *Recommended Practice for Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures*[S]. American Petroleum Institute, 2015.
- [14] ANDERSEN K H, JEANJEAN P, LUGER D, et al. Centrifuge tests on installation of suction anchors in soft clay[J]. *Ocean Engineering*, 2005, **32**: 845-863.

- [15] ZHOU H, RANDOLPH M F. Large deformation analysis of suction caisson installation in clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, **43**(12): 1344-1357.
- [16] CHEN W, ZHOU H, RANDOLPH M F. Effect of installation method on external shaft friction of caissons in soft clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, **135**(5): 605-615.
- [17] 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 Hongyan, LIU Zhenyong, 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. (in Chinese))
- [18] 闫澍旺, 霍知亮, 楚剑, 等. 黏土中桶形基础负压下沉阻力及土塞发展试验[J]. 天津大学学报, 2016, **49**(10): 1027-1033. (YAN Shuwang, HUO Zhiliang, CHU Jian, et al. Experiment on penetration resistance and soil plug development during suction caisson penetration in soft clay[J]. Journal of Tianjin University, 2016, **49**(10): 1027-1033. (in Chinese))
- [19] DNVGL-RP-C212. Offshore Soil Mechanics and Geotechnical Engineering[S]. 2017.
- [20] CHEN F, LIAN J J, WANG H J, et al. Large-scale experimental investigation of the installation of suction caissons in silt sand[J]. Applied Ocean Research, 2016, **60**: 109-120.
- [21] 王胤, 朱兴运, 杨庆. 考虑砂土渗透性变化的吸力锚沉贯及土塞特性研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(1): 184-190. (WANG Yin, ZHU Xingyun, YANG Qing. Installation of suction caissons and formation of soil plug considering variation of permeability of sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(1): 184-190. (in Chinese))

第四届全国软土工程学术会议第一号通知征文 2024年11月1—3日(中国·武汉)

主办单位: 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会

承办单位: 湖北工业大学; 河湖健康智慧感知与生态修复教育部重点实验室

会议介绍: 第一届全国软土工程学术会议针对“软土工程的理论创新与工程实践”主题, 于2013年11月在同济大学顺利召开。第二届全国软土工程学术会议围绕“软土工程的性能与安全”主题, 于2017年11月在天津大学成功举办。第三届全国软土工程学术会议针对“软土工程智能建造”主题, 于2023年3月在东南大学圆满举行。第四届全国软土工程学术会议将于2024年11月在湖北武汉召开。本次会议以“固碳减排、智能数字化软土工程发展机遇与挑战”为主题, 针对重大软土工程问题、软土工程新理论与新技术、软土工程学科发展等进行研讨, 全方位展示我国软土工程领域的发展动态与前沿趋势, 促进深度交流与合作, 为国家“双碳”战略目标和土木工程智能建造转型升级稳步实现贡献力量。

本次会议将为学者和同行面对面深入广泛的学术交流研讨提供平台, 通过大会特邀报告、主题报告、分组报告、研究生专场报告等形式, 共同探讨软土工程学科的发展新趋势, 展现最新研究进展和成果。欢迎全国各地软土工程专家学者欢聚一堂, 大家共享新思想, 激发新思维, 拓宽新视野, 进一步推动我国在软土工程理论和工程实践等方面的发展进程, 促进我国软土工程领域的可持续发展。

热烈欢迎从事相关领域研究、勘察、设计、施工的科技工作者和研究生踊跃撰稿, 积极参加会议!

征文内容: 会议主要研讨软土工程的基本理论、实践探索、新技术和新方法等。征文内容包括以下12个方面: ①软土的基

本特性与本构关系; ②软土勘察、测试与评价技术; ③绿色低碳软土工程; ④软土地基处理与加固; ⑤软土基础工程; ⑥软土地下工程; ⑦软土动力学与地震工程; ⑧软土工程碳捕捉与碳封存; ⑨软土工程数值仿真与信息化技术; ⑩软土工程新材料、新装备与智能建造; ⑪软土地区重大工程实践; ⑫软土生态加固或其他问题。

投稿要求: 应征论文须符合上述征文内容要求, 且未公开发表过, 作者文责自负。

学术委员会将组织专家对所提交的论文进行审查, 录用论文将推荐至《岩土工程学报》(增刊)、《地下空间与工程学报》等国内高水平期刊上发表。论文格式详见《岩土工程学报》征稿简则, 录用论文的版面费按照各期刊要求收取。

论文请通过电子邮件发到大会议秘书处会务邮箱 (softsoilhbut@163.com), 并注明通讯作者的详细通讯地址、邮编、联系电话及Email地址。

重要日期: 2024年1月1日接收论文投稿; 2024年4月30日提交论文全文截止; 2024年5月15日, 通知论文是否录用; 2024年6月30日提交修改后论文; 2024年11月1日会议报到。

联系方式: 联系人: 李丽华 (13545054802, researchmailbox@163.com), 陶高梁 (13307139112, tgl1979@126.com), 何俊 (15527128946, hjunas@163.com), 李文涛 (18171336329, wli20201027@hbut.edu.cn), 白玉霞 (18162747601, byxhhu@163.com), 地址: 湖北省武汉市洪山区南李路28号湖北工业大学, 会务邮箱: softsoilhbut@163.com。

(中国土木工程学会土力学及岩土工程分会 供稿)