

海上吸力筒导管架基础沉贯吸力计算分析

牛庆磊¹, 宋刚¹, 崔淑英¹, 寇贝贝², 田振亚³, 田英英¹

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000;

2. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广东广州 510075;

3. 阳江海上风电实验室, 广东阳江 529500)

摘要:吸力筒基础作为一种高效、经济、环境友好的基础形式,在海洋工程特别是海上风电领域得到了广泛的应用,多以吸力筒导管架形式出现。如何实现吸力筒安全、高效沉贯,并满足吸力筒导管架安装技术指标是施工设计的关键。本文系统总结了吸力筒基础在粘土和砂土地层中沉贯阻力、需求吸力和容许吸力计算方法。结合具体施工案例开展沉贯分析,预测了吸力筒的自重贯入深度,掌握了合理的吸力设置方法及容许吸力主要限制因素,为海上吸力筒导管架基础施工提供技术参考。

关键词:吸力筒导管架;负压沉贯;吸力设置;海上风电

中图分类号:P751;TU476 文献标识码:A 文章编号:2096-9686(2023)02-0031-08

Calculation and analysis of penetration force on offshore suction bucket jacket foundation

NIU Qinglei¹, SONG Gang¹, CUI Shuying¹, KOU Beibei², TIAN Zhenya³, TIAN Yingying¹

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;

2. Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou Guangdong 510075, China;

3. Yangjiang Offshore Wind Power Laboratory, Yangjiang Guangdong 529500, China)

Abstract: As an efficient, economical and environmentally friendly foundation form, suction bucket foundation has been widely used in marine engineering. Among them, the jacket foundation supported by multiple suction bucket is widely used in the offshore wind power field. How to realize the safe and efficient penetration of the suction bucket and meet the technical indicators of the installation of the suction bucket jacket is the key to the construction design. This paper systematically summarizes the calculation methods of penetration resistance, required suction and allowable suction of suction bucket foundation in clay and sand layers. Based on specific construction cases, the penetration analysis is carried out, the self-weight penetration depth of suction bucket is predicted, and the reasonable suction setting method and the main limiting factors of allowable suction are mastered, which provides technical reference for offshore construction of suction bucket jacket foundation.

Key words: suction bucket jacket foundation; suction penetration; suction setting; offshore wind power

0 引言

吸力筒基础作为一种新兴海上基础形式,以其

成本低、施工快速、可重复利用等优势受到业界青睐^[1]。吸力筒基础按结构型式分为单筒型、单筒多

收稿日期:2022-11-28; 修回日期:2023-02-10 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.02.005

基金项目:广东省重点领域研发计划项目“海域天然气水合物随钻测井和钻采井口稳定关键技术及装备研发”(编号:2020B1111030003)、“海上风电吸力筒导管架基础高效多体联动沉贯装备研制与产业化”(编号:2021B07073001);中国地质调查局地质调查项目“天然气水合物钻探技术支撑(勘探技术所)”(编号:DD20221721)

第一作者:牛庆磊,男,汉族,1988年生,高级工程师,勘察技术与工程专业,从事海洋勘探与基础施工方向研究工作,河北省廊坊市金光道77号,niuqinglei20@outlook.com。

引用格式:牛庆磊,宋刚,崔淑英,等.海上吸力筒导管架基础沉贯吸力计算分析[J].钻探工程,2023,50(2):31-38.

NIU Qinglei, SONG Gang, CUI Shuying, et al. Calculation and analysis of penetration force on offshore suction bucket jacket foundation[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(2):31-38.

舱复合型^[2]、单筒裙式^[3]和吸力筒导管架型(多筒型),其中吸力筒导管架在海上风电领域应用最为广泛,据统计2020年至2021年我国累计安装吸力筒导管架基础100余套,仅福建长乐外海A、C两区块就完成72套,是目前世界吸力筒导管架基础规模最大、数量最多、单机容量最大、基础单体重量最优、高度最高的海上风电工程。吸力筒导管架基础安装面临地层阻力测算不准确、安装精度控制难、施工风险高、成本高等一系列问题,且该技术长期受国外技术垄断。

吸力筒导管架基础沉贯过程对整个基础安装和服役至关重要,为保证吸力筒安装至设计标高,准确预测下沉过程中阻力和合理施加吸力值尤为重要^[4]。针对不同地层沉贯阻力、需求吸力、临界吸力计算,国内外专家学者开展了大量的理论计算、数值模拟和试验研究。沉贯阻力和需求吸力计算形成了三类方法,分别是基于土壤岩土特性方法(API、Houlsby and Byrne)、基于CPT数据的方法(DNV、NGI、Senders)、基于岩土特性和CPT数据的混合方法(Anderson)。容许吸力受限于海水空化压力、地层渗透、筒体屈曲压力及土塞形成等因素,需根据工程实际综合评定。上述方法为吸力筒基础施工设计提供了重要理论基础,但关键参数取值没有定量评估理论模型,只能通过模型试验或施工经验得出经验值,与实际工程数据存在一定偏差。

本文依托三峡新能源300MW海上风电场五期工程开展案例分析,结合施工地点地层勘察数据及吸力筒结构参数,进行沉贯阻力、吸力计算对比分析,分析结果可作为吸力筒导管架基础施工依据,并提出相应的施工建议。

1 吸力筒基础沉贯相关理论

吸力筒基础沉贯分为自重贯入和负压沉贯两个阶段,自重贯入阶段主要依靠筒体及导管架或其他结构物重量克服土体阻力,直至二者达到平衡,在自重贯入结束后通过施加吸力抽吸产生压差作用在锚顶,驱使吸力筒基础下沉达到预设深度。沉贯计算基本模型见图1,基本计算方程如下:

$$V' + sA_i = R_i + R_o + R_t \quad (1)$$

式中: V' ——有效竖向荷载,包括筒浮重及上部结构物施加荷载; A_i ——吸力筒顶板内面积; s ——负压贯入阶段施加压差; R_i 、 R_o 、 R_t ——分别为筒裙内

摩擦阻力,筒裙外摩擦阻力及裙端阻力。

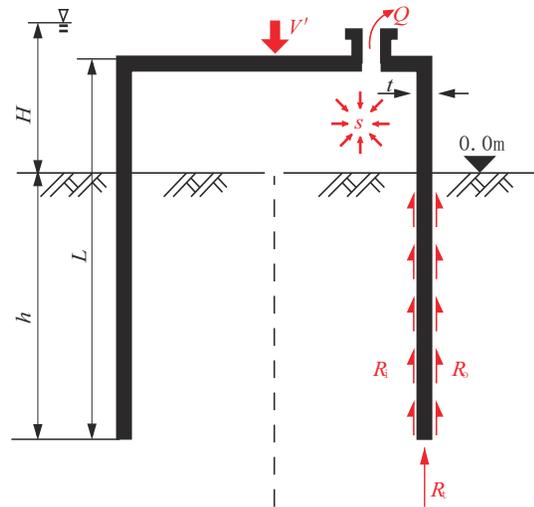


图1 吸力筒沉贯计算基本模型

Fig.1 Basic model diagram of suction bucket installing calculation

吸力筒基础沉贯分析的核心是精准预测沉贯阻力和施加合理的吸力,保证吸力筒高效、安全的贯入至地层中,防止内部海水气化、土塞隆起、砂土渗透及筒体屈曲发生,多筒沉贯还需控制沉贯同步性,及时纠斜以满足风电机组安装需求。

1.1 沉贯阻力计算

吸力筒基础大部分应用于粘土、砂土及二者相间层状土,在自重贯入阶段不受渗流作用影响计算较为简单,而当吸力阶段,受渗流作用影响,粘土和砂土的渗透性差别较大,导致计算公式截然不同。目前针对不同土壤贯入阻力,国内外专家开展了大量理论计算,并不断通过数值模拟和试验数据对关键参数给出推荐值,主要计算方法可归纳为基于土壤岩土特性的方法,基于CPT数据的方法,基于岩土特性和CPT的混合方法。

1.1.1 基于土壤岩土特性方法

基于土壤岩土特性方法主要利用现场或实验室测试确定的标准岩土参数进行计算,参数见表1。

1.1.1.1 基于粘土特性的计算方法

Houlsby等^[5]及DNVGL-RP-E303^[6]给出了粘土计算方法,见式(2):

$$V' + s \left(\frac{\pi D_i^2}{4} \right) = \alpha_o \pi D_o h s_{u1} + \alpha_i \pi D_i h s_{u1} + (\gamma' h + N_c s_{u2}) (\pi D t) \quad (2)$$

表1 基于岩土特性法所需岩土参数

Table 1 Geotechnical parameters required based on geotechnical characterization method

土壤类别	岩土参数
粘土	不排水强度 s_u
	土壤敏感性 S_t 或 重塑不排水抗剪强度 s_{ur}
	粘附系数 α
	土壤的单位重量 γ
砂土	内摩擦角 φ
	土壤的有效单位重量 γ'
	土壤渗透性 k (用于流量计算)

式中: N_c ——承载力系数,一般取 5.1~9.0; s_{u1} ——裙侧深度上土壤的平均不排水强度; s_{u2} ——裙尖处土壤的不排水强度; α_o 、 α_i ——分别为筒外壁和内壁的粘附系数,通常取 $\alpha=1/S_t$, α 在 0.25~0.33 之间; S_t ——粘土灵敏度,试验取 S_t 在 3~4 之间。

1.1.1.2 基于砂土特性的计算方法

砂土地层在负压贯入中吸力导致渗流效应发生,影响下沉阻力,计算变得较为复杂,HB 方法^[7]考虑了吸力筒下沉过程中渗流所导致的筒裙端阻力和筒壁内摩擦阻力减少及筒外摩擦阻力增加的影响,计算公式如下:

$$V' + s \left(\frac{\pi D_i^2}{4} \right) = \left(\gamma' + \frac{as}{h} \right) Z_o^2 \left(\exp \left(\frac{h}{Z_o} \right) - 1 - \frac{h}{Z_o} \right) (K \tan \delta)_o \pi D_o + \left(\gamma' - \frac{(1-a)s}{h} \right) Z_i^2 \left(\exp \left(\frac{h}{Z_i} \right) - 1 - \frac{h}{Z_i} \right) (K \tan \delta)_i \pi D_i + \left\{ \left(\gamma' - \frac{(1-a)s}{h} \right) Z_i \left(\exp \left(\frac{h}{Z_i} \right) - 1 \right) N_q + \gamma' t N_\gamma \right\} (\pi D t) \quad (3)$$

式中: a ——吸力筒裙端与顶板下方的超孔隙压力比; N_γ 、 N_q ——承载力系数; Z_o 、 Z_i ——砂土安装应力增强的控制参数; δ ——吸力筒与砂土界面摩擦角。

1.1.2 基于 CPT 数据的方法

基于 CPT 数据的沉贯阻力计算方法同样包含筒内外侧壁摩擦阻力和筒端部阻力之和,常用方法遵循 DNVGL-RP-C212(2017)^[8]方法,见式(4),式中核心问题是确定系数 k_t 和 k_p , DNVGL-RP-C212

(2017)及 Andersen 等^[9]基于现场施工案例给出了推荐值,见表 2。

$$V' + s \left(\frac{\pi D_i^2}{4} \right) = \pi D_o \int_0^h k_t(z) q_c(z) dz + \pi D_i \int_0^h k_t(z) q_c(z) dz + (\pi D t) k_p(L) q_c(L) \quad (4)$$

式中: k_t ——CPT 方法中侧摩擦系数; k_p ——尖端摩擦系数; q_c ——锥尖阻力。

表2 CPT 方法关键参数推荐值

Table.2 Suggested values of key factors of CPT method

地层类型	方法	最大可能		最高预期	
		k_p	k_t	k_p	k_t
粘土	DNVGL-RP-C212	0.4	0.03	0.6	0.05
	Anderson	0.01~0.55	0.001	0.03~0.6	0.0015

1.1.3 基于岩土特性和 CPT 的混合方法

Anderson 等^[9]建议了一种混合的沉贯阻力计算方法,见式(5),群侧摩擦阻力通过基于土壤岩土特性方法估算,而端部阻力通过基于 CPT 数据的方法进行计算。在负压沉贯阶段吸力减阻效应通过增加吸力和临界吸力值比(s/s_{crit})以及 r_i 、 r_o 和 r_t 三个经验系数,分别确认群内外侧摩阻力和群端阻力变化。

$$V' + s \left(\frac{\pi D_i^2}{4} \right) = \pi D_i r \tan \varphi \int_0^h \sigma'_v \left(1 - r_i \frac{s}{s_{crit}} \right) dz + \pi D_o r \tan \varphi \int_0^h \sigma'_v \left(1 + r_o \frac{s}{s_{crit}} \right) dz + A_{tip} k_p q_c \left(1 - r_p \frac{s}{s_{crit}} \right) \quad (5)$$

1.2 需求吸力和容许吸力

吸力筒基础负压沉贯过程应控制施加的吸力介于需求吸力和容许吸力之间,以保证吸力足以克服地层土体阻力,同时保证吸力不至于导致空化、土体达到临界破坏状态、筒体屈曲、土塞形成等问题。

1.2.1 需求吸力

根据上述沉贯计算方程,当吸力 $s=0$ 时,有效竖向荷载与地层侧摩阻力和端阻力平衡时,得出吸力筒基础自重贯入深度。自重贯入结束后,目标贯入深度上土体沉贯阻力对应的吸力值即为需求吸力,见式(6):

$$s_{\text{req}} = \frac{R_i + R_o + R_t - V'}{A_i} \quad (6)$$

1.2.2 容许吸力

容许吸力可理解为吸力筒内部对应水深的空化压力、临界吸力、筒体屈曲压力、土塞形成等限制条件的低值,抽吸压力是吸力筒沉贯的必须条件,决定了吸力筒的沉贯速度,在追求高效沉贯的同时必须严格控制在容许吸力以内,避免事故发生。

1.2.2.1 空化压力

海上风电吸力筒导管架基础通常应用于 20~45 m 浅海区域,应特别注意抽吸过程水泵形成的压力不得低于空化极限,防止空化引起汽蚀现象导致水泵叶轮损坏。理论空化极限计算公式如下^[10]:

$$s_{\text{cav}} = (h + w_s) \gamma_w + p_{\text{atm}} \quad (7)$$

式中: h ——泥面以下深度, m; w_s ——水深, m; γ_w ——海水单位重度, 10 kN/m³; p_{atm} ——大气压力, 100 kPa。

1.2.2.2 临界吸力

吸力筒负压沉贯阶段,特别是在砂土地层中渗透系数较大,吸力引起吸力筒内外形成渗流,筒外侧土体流入筒内,出现土塞隆起可导致基础沉贯不到位,或导致砂土管涌、流砂等渗透破坏。土体渗透破坏极限对应的吸力即为临界吸力 S_{cr} ,众多学者给出了砂土地层临界破坏时对应的临界吸力计算模型,典型计算方法见表3。

1.2.2.3 筒体屈曲破坏

在自重贯入结束后开始施加吸力,吸力筒位于泥线以上部分没有内部土体支撑,容易发生屈曲破坏。特别是在浅部地层遇到硬粘土,需要施加更大的吸力,可能存在屈曲破坏风险。筒体屈曲的方式分为轴向屈曲和周向屈曲,海上风电吸力筒属于薄

表3 砂土中吸力筒临界吸力计算方法

Table 3 Calculation of critical suction force of suction bucket in sand

计算模型	计算公式
Feld ^[11]	$\frac{S_{\text{cr}}}{\gamma' D} = 1.32 \left(\frac{h}{D} \right)^{0.75}$
HB ^[7]	$\frac{S_{\text{cr}}}{\gamma' D} = \left(\frac{h}{D} \right) \left(1 + \frac{\alpha_1 k_t}{1 - \alpha_1} \right)$
SR ^[12]	$\frac{S_{\text{cr}}}{\gamma' D} = \left\{ \pi - \arctan [5(h/D)^{0.85}] \left(2 - \frac{2}{\pi} \right) \right\} \frac{h}{D}$
IT ^[13]	$\frac{S_{\text{cr}}}{\gamma' D} = \left\{ 2.86 - \arctan [4.1(h/D)^{0.85}] \left(\frac{\pi}{2.62} \right) \right\} \left(\frac{h}{D} \right)$

注: $\alpha_1 = 0.45 - 0.36(1 - e^{-0.28h/D})$; k_t 为吸力下筒内和筒外渗透系数比, $k_t = k_i/k_o$, 取值 2.0~3.0。

壁短圆筒范畴,周向屈曲时一种常见的破坏模式。对于薄壁圆筒临界屈曲压力计算,可参考美国海军试验水槽公式^[14],见式(8):

$$S_{\text{bu}} = \frac{2.59E \left(\frac{t}{D_0} \right)^{2.5}}{\frac{L'}{D_0} - 0.45 \left(\frac{t}{D_0} \right)^{0.5}} \quad (8)$$

式中: E ——杨氏模量, 取值 2.1×10^5 MPa; L' ——泥面以上筒体高度, m。

1.2.2.4 土塞形成

通过大量工程实践中发现,在不同性质土体中进行吸力筒基础负压沉贯,筒内会形成土塞,土塞高度明显高于海底泥面,土塞过快成长会导致土塞提前接触吸力筒顶部,导致吸力筒无法达到预设深度。在粘性土中,由于渗流非常小,施加的吸力在吸力筒内外的渗流可忽略不计,Whittle等^[15]和 Andersen等^[16]学者认为粘性土中沉贯筒壁排开的土体进入筒内,造成土塞隆起,但对沉贯的影响较小。在非粘土施加的吸力引起筒内外的渗流,若施加的吸力超过极限,筒内砂土会出现液化的现象,加剧土塞形成。对于更为复杂的砂土和粘土层状土,存在土塞扰动、土塞开裂、渗流等多种失效模式。总之,目前关于土塞形成机理及发展规律研究结论并不一致,缺乏定量的判断,针对这一现象最为行之有效的办法是控制吸力施加的大小和方式,Senders^[17]认为土塞隆起是安装时间的函数,较大的排量和吸力会引

起土塞隆起加剧,但沉贯速度快、总的安装时间短,引起土塞隆起小。

综上所述,不同地层沉贯的阻力及吸力设置差异明显,国内外专家学者给出了多种计算方法,在工程实践中,需结合具体的地层条件,开展多种计算方法的对比分析,选取合理的经验参数,结合数值模拟、室内试验及现场试验,不断修正参数,使理论计算结果与实际数据更加接近。通过沉贯阻力准确计算,可预测自重贯入深度,不同深度处的需求吸力,结合容许吸力限制条件,设置合理的吸力范围,在保证施工安全前提下尽可能的提高安装速度。

2 工程案例

2.1 工程概述

三峡新能源 300 MW 海上风电场五期工程位于阳江市阳西县沙扒镇附近海域,场址面积约 43 km²,水深范围 26~29 m,中心离岸距离约 22 km,海底土壤以粉质粘土和细砂为主,施工内容包含 4 台三筒吸力筒导管架,单机容量为 6.45 MW,导管架风机序列号分别为 W8、W11、W13、W36,本文以 W13 机位为例,开展吸力筒导管架沉贯分析。

W13 机位勘探点平面位置如图 2 所示,在 3 个

吸力筒位置附近分别开展静力触探获取地质信息,基本参数见表 4,海底浅表地层(0~22 m)组成包括粉质粘土和细砂,以流塑和软塑性粉质粘土为主。

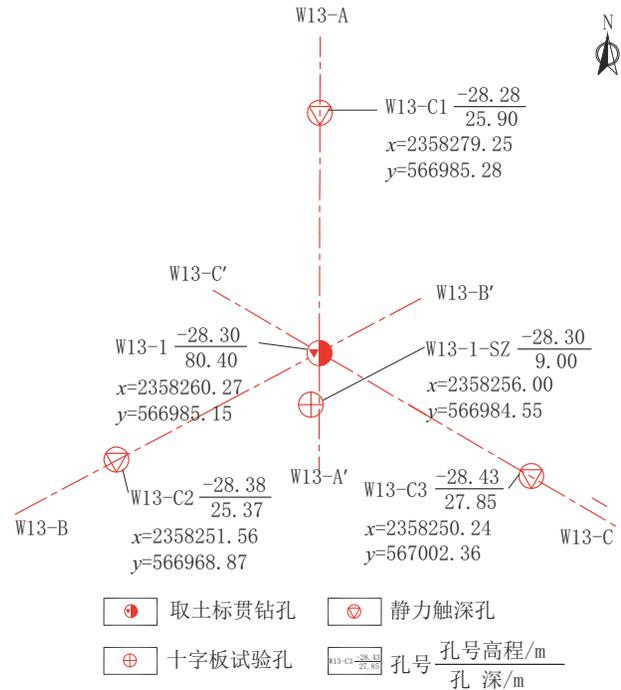


图 2 W13 风机勘探点平面位置
Fig.2 W13 wind turbine exploration point location plan

表 4 W13 风机点位地层参数
Table 4 W13 wind turbine point formation parameters

岩土层名称	状态	W13-C1		W13-C2		W13-C3	
		锥尖阻力 <i>q_c</i> /MPa	层底深度/m	锥尖阻力 <i>q_c</i> /MPa	层底深度/m	锥尖阻力 <i>q_c</i> /MPa	层底深度/m
① 淤泥质粉质粘土	流塑	0.79	8.4	0.73	9.00	0.46	7.20
① ₂ 粉细砂	稍密	2.24	10.30	1.32	10.50	2.55	10.30
③ ₁ 粉质粘土	软塑	1.43	22.10	1.11	22.70	1.27	21.20
③ ₃ 中粗砂	中密	7.51	25.00	3.03	24.50	16.86	24.30
⑨ ₁ 花岗片麻岩	全风化	27.81	25.90	5.54	25.37	8.97	27.85

注:篇幅原因详细 CPT 数据未展开,表中为区间平均值。

2.2 吸力筒导管架结构

吸力筒导管架由主体结构(吸力筒、架体、过渡段)和附属结构组成,如图 3 所示。其中架体高度 42 m,吸力筒数量 3 个,吸力筒中心间距 30 m,吸力筒外径 13 m,高 15.8 m,筒体壁厚 40 mm,架体重量约为 505 t,3 个吸力筒总质量约 895 t,吸力筒导管架总质量达 1400 t。

2.3 吸力筒导管架安装要求

吸力筒导管架中心的绝对位置允许偏差 ≤ 200 mm;高程允许偏差 0~-500 mm;调平后吸力筒导管架顶部法兰水平度偏差 ≤ 3‰^[18],换算成倾斜度 > 0.17°;吸力筒导管架整体方位角允许偏差 ≤ ± 2.5°;安装结束后,须进行位置、水平度、法兰顶高程的复核。

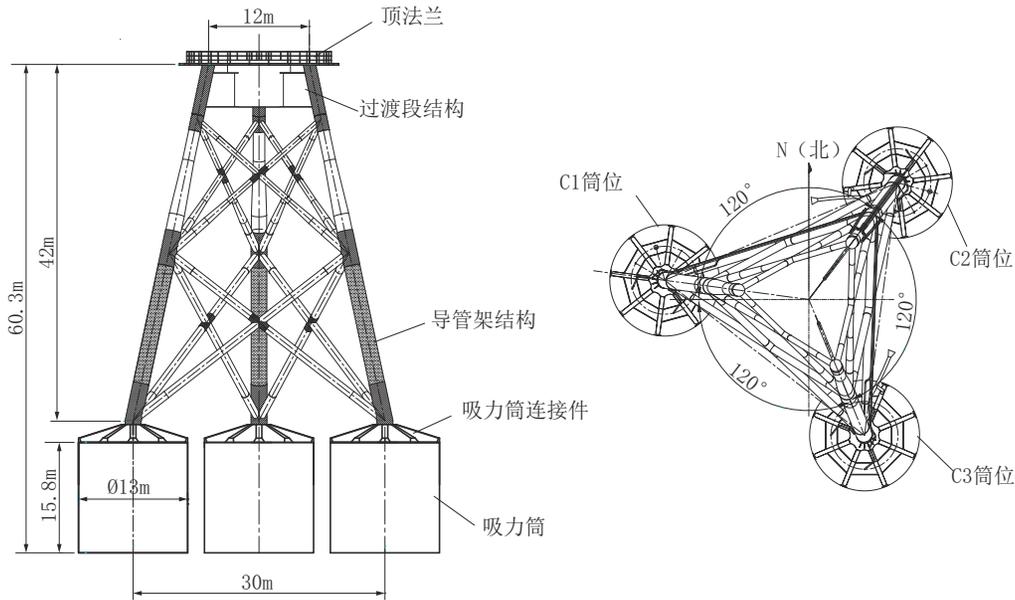


图3 W13吸力筒导管架外形结构

Fig.3 W13 suction bucket jacket outline structure drawing

2.4 吸力筒导管架沉贯分析

根据沉贯计算基本流程,分别开展沉贯阻力、需求吸力、容许吸力计算,并对比分析三个吸力筒沉贯特征参数,为吸力筒导管架海上安装提供安装数据及技术指导。

2.4.1 吸力筒沉贯阻力计算

根据已知吸力筒导管架基本尺寸及重量,综合考虑吸力筒受海水浮力、导管架浮重力(70%部分位于水下,30%部分位于水面上)、吊机提拉力的作用影响,作用在单筒上的重力作用约4041 kN,主要参数见表5。吸力筒贯入深度设计值15.30 m,筒顶预留0.5 m空隙用于灌浆,以确保筒顶与海床有效接触^[19-20]。

根据 W13-C1、W13-C2、W13-C3 三个点位 CPT 数据,参照 DNVGL-RP-C212 计算方法, k_t 和 k_p 选取最大可能值,计算3个吸力筒沉贯过程所克服的地层阻力,见图4。3组数据对比差异较为明显,C1、C2和C3点位均包含粉细砂层,C3在7.2 m即进入砂层,砂层侧摩擦系数 k_t 显著降低,导致C3点位沉贯阻力明显小于C1、C2点位。吸力筒重力与阻力相等时即为自重贯入深度,3个吸力筒自重贯入深度分别为4.27、3.62、5.65 m,C2点位在3.6~3.8 m深度出现硬夹层,导致提前结束自重贯入。

2.4.2 吸力筒需求及容许吸力计算

自重贯入结束后即进入负压沉贯阶段,开启吸

表5 吸力筒导管架基本参数

Table 5 Basic parameters of suction bucket jacket

导管架风机序列号	W13
水深/m	28.28
内径 D_i /m	12.92
外径 D_o /m	13.00
壁厚 t /m	0.04
筒顶面积/ m^2	131.10
端面面积 A_p / m^2	1.63
筒体高度/m	15.80
贯入深度/m	15.30
筒体总质量/t	895.00
导管架质量/t	505.00
重力/kN	4041.00

力泵同时从3个吸力筒内抽取海水,降低筒内压力,形成筒内外压差,在压差作用下将吸力筒压至设计深度。为克服地层阻力吸力设置需大于需求吸力 S_{req} ,为防止出现海水气化、地层渗透、筒体屈曲等问题,吸力的上限应控制在容许吸力以内,而容许吸力为空压压力 S_{cav} 、临界吸力 S_{cr} 、屈曲吸力 S_{bu} 三者的低值。根据吸力筒沉贯相关理论,计算结果见图5。

2.4.3 计算结果分析

(1)3个筒体需求吸力差异较大,C3吸力筒需求吸力明显小于其余2个吸力筒,在实际施工中应适当控制其吸力值,防止出现沉贯不同步导致吸力筒

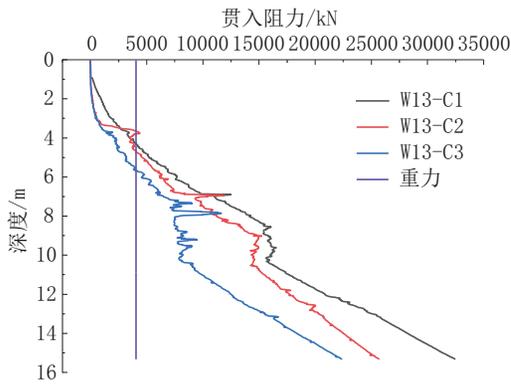


图 4 3个吸力筒沉贯深度-阻力曲线

Fig.4 Penetration depth-resistance curve of three suction buckets

导管架向 C3 吸力筒筒方向倾斜;

(2)W13 施工机位水深达 28.28 m,且吸力筒主体结构刚度较好,空化压力和屈曲压力远大于地层土体渗透破坏临界吸力,吸力上限应控制在临界吸力以内;

(3)临界吸力通过四种分析模型计算,Feld 模型、SR 模型和 IT 模型计算结果较为接近,IT 模型与 SR 模型计算结果几乎重合,三者较 HB 模型计算方法相对保守;

(4)C1 和 C2 需求吸力与 IT、SR、及 Feld 模型计算临界吸力出现交叉,为保证吸力筒沉贯到位,可适当增加吸力值,最大不超过 HB 模型计算值。

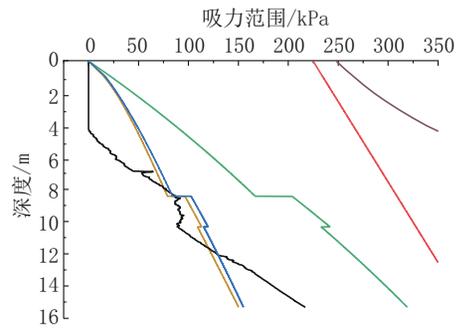
4 结论

吸力筒导管架因其多筒结构及高精度安装要求,施工难度远高于单筒吸力筒,科学的计算是吸力筒设计和顺利施工的可靠保障。本文以三峡海上风电工程为例,开展吸力筒导管架基础施工沉贯分析,主要结论如下:

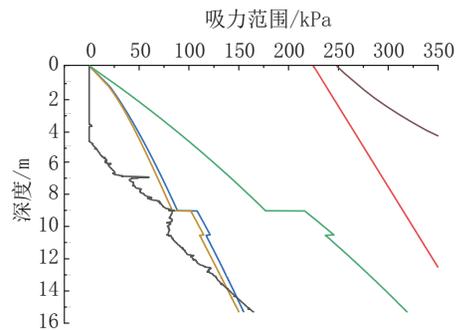
(1)吸力筒导管架安装精度要求较高,吸力筒沉贯同步性决定了最终导管架的垂直度,根据沉贯分析计算结果,应严格控制各个吸力筒的吸力,实现均匀沉贯,并通过监测数据不断进行纠斜;

(2)在水深超过 20 m 海域应用吸力筒,空化吸力明显高于渗透破坏临界吸力,不作为吸力主要限制因素;

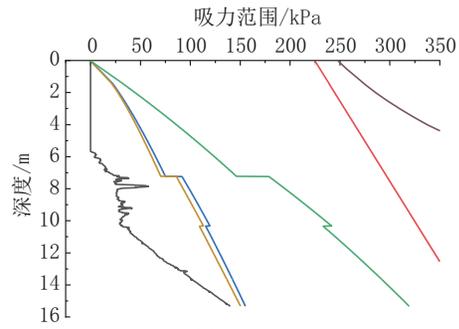
(3)吸力筒导管架筒体采用短圆筒结构,周向外压屈曲的风险较小,并且施加加工中,通常在筒体内部包含加强肋板,有效避免筒体屈曲问题,但施工过



(a) W13-C1



(b) W13-C2



(c) W13-C3



图 5 3个吸力筒沉贯深度-吸力曲线

Fig.5 Penetration depth-suction curve of three suction buckets

程中应避免筒体碰撞甲板及海底孤石导致筒体缺陷,增加屈曲风险;

(4)吸力筒临界吸力是容许吸力主限制因素,设置中应综合对比 4 种模型计算结果,临界吸力设置根据现场施工情况做是适当调整,在施工安全和效率之间寻找平衡点。

参考文献 (References):

[1] JIA N, DING H, ZHANG P, et al. The Seismic response of composite bucket foundation for offshore wind turbines under scour

- conditions[C]//Proceedings of the 27th International Ocean and Polar Engineering Conference, 2017, ISOPE-I-17-227.
- [2] 练继建,陈飞,杨旭,等.海上风机复合筒型基础负压沉放调平[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2014,47:987-93. LIAN Jijian, CHEN Fei, YANG Xu, et al. Suction installation and leveling of composite bucket foundation for offshore wind turbines[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2014,47(11):987-993.
- [3] 李大勇,冯凌云,张雨坤,等.饱和细砂中裙式吸力基础水平单调加载模型试验——承载力及变形分析[J].岩土工程学报,2013,35:2030-2037. LI Dayong, FENG Linyun, ZHANG Yukun, et al. Model tests on lateral bearing capacity and deformation of skirted suction caissons in saturated fine sand under horizontal monotonic loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35: 2030-2037.
- [4] 张超.近海风电吸力式多筒基础下沉调平研究[D].天津:天津大学,2018. ZHANG Chao. Research on penetration and sinking-leveling of multi bucket foundation for offshore wind turbines[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [5] Housby G, Byrne B. Design procedures for installation of suction caissons in clay and other materials[J]. Proceedings of The Institution of Civil Engineers-geotechnical Engineering, 2005, 158:75-82.
- [6] Det Norske Veritas. DNV-RP-E303 geotechnical design and installation of suction anchors in clay recommended practice [S]. Hovik, Norway: Det Norske Veritas, 2017.
- [7] Housby G T, Byrne B W. Design procedures for installation of suction caissons in sand[J]. Geotechnical Engineering, 2005,158 (3):135-44.
- [8] Det Norske Veritas. DNV-RP-C212 offshore soil mechanics and geotechnical engineering [S]. Hovik, Norway: Det Norske Veritas, 2019.
- [9] Andersen K H, Jostad H P, Dyvik R. Penetration resistance of offshore skirted foundations and anchors in dense sand[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2008,134 (1):106-16.
- [10] Sturm H. Design aspects of suction caissons for offshore wind turbine foundations [C]//Proceedings of the TC209 Workshop, TC 209 — Foundation Design of Offshore Wind Structures, 19th ICSMGE: Seoul, Korea, 2017.
- [11] Feld T. Suction buckets, a new innovative foundation concept, applied to offshore wind turbines[D]. Aalborg, Denmark: Aalborg University, 2001.
- [12] 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.
- [13] Ibsen L B, Thilsted C L. Numerical study of piping limits for suction installation of offshore skirted foundations an anchors in layered sand[C]//Proceedings of the the 2nd International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics. Perth, Australia, 2010.
- [14] Windenburg D F, Trilling C. Collapse by instability of thin cylindrical shells under external pressure[J], Journal of Fluids Engineering, 2010.
- [15] Whittle A J, Germaine J T. Behavior of miniature suction casissons in clay [C]//Proceedings of the Offshore Site Investigation and Foundation Behaviour: New Frontiers-Proceedings of an International Conference. London, UK, 1998.
- [16] Andersen K H, Jostad H P. Foundation design of skirted foundations and anchors in clay [C]//Proceedings of the Offshore Technology Conference. Houston, USA, 1999.
- [17] Senders M. Suction caissons in sand as tripod foundations for offshore wind turbines [D]. Perth, Australia: The University of Western Australia, 2009.
- [18] FD 003—2007(试行),风电机组地基基础设计规定[S]. FD 003—2007 (trial), Wind turbine generator foundation design regulation[S].
- [19] 郎绿原,艾四芽,曾宪仁,等.深水、恶劣海况下大吨位吸力式导管架风机基础施工方案分析[J].福建交通科技,2022,(9):96-101. LANG Lvyuan, AI Siya, ZENG Xianren, et al. Analysis of construction solutions for large tonnage suction jacket wind turbine foundations in deep water and rough sea conditions[J]. Fujian Transportation Technology, 2022,(9):96-101.
- [20] 刘辉.国内首例三桩吸力筒式导管架基础灌浆工艺[J].企业科技与发展,2021(12):28-31. LIU Hui. The first three-pile suction bucket type jacket foundation grouting process in china[J]. Sci-Tech & Development of Enterprise, 2021(12):28-31.

(编辑 王文)