

文章编号: 1008-2336 (2022) 03-0074-07

深水吸力锚井口承载能力研究——以挪威 Wisting 油田水平井吸力锚井口为例

邸建伟, 吴晓冬, 刘 晗

(中国石油集团海洋工程有限公司, 北京 100028)

摘要: 近年来随着特殊深水油气藏开发的需要, 国外吸力锚筒体开始替代常规导管作为井口支撑的装置, 例如挪威 Wisting 油田使用吸力锚技术钻成了极浅水平井。在国内, 吸力锚作为深水钻井水下井口的使用尚处于起步阶段, 需要对吸力锚井口承载力进行研究。该文基于 API 单桩轴向极限承载力经验公式的导管极限承载力计算模型, 结合吸力锚负压置入受力情况进行研究, 研究了吸力锚置入过程中瞬时承载力与随时间变化的实时承载力变化规律, 构建了吸力锚承载力-土壤恢复系数-土壤强度的耦合计算模型。以挪威 Wisting 油田吸力锚设计参数及区域土壤不排水抗剪强度为例, 吸力锚承载力-土壤恢复系数-土壤强度耦合计算模型的计算结果与工程实际吻合, 具有实际工程意义。

关键词: 深水; 吸力锚; 水下井口; 承载力; 浅层水平井

中图分类号: TE952 文献标识码: A DOI:10.3969/j.issn.1008-2336.2022.03.074

Research on Bearing Capacity of Conductor Anchor Node Wellhead in Deepwater——A Case Study of Conductor Anchor Node Wellhead of the Horizontal Well in Wisting Oilfield, Norway

DI Jianwei, WU Xiaodong, LIU Han

(CNPC Offshore Engineering Co. Ltd., Beijing 100028, China)

Abstract: In recent years, with the development of shallow oil & gas reservoirs in deepwater, the conductor anchor nodes are used abroad as wellhead support devices instead of conventional conduits. For example, In Norway Wisting Field, conductor anchor nodes had been used to drill extremely shallow horizontal wells. The conductor anchor wellheads are seldom used as the subsea wellheads for deepwater drilling in China. In order to ensure operation safety, it is necessary to study the bearing capacity of conductor anchor wellhead. In this paper, according to the API conductor ultimate bearing capacity calculating model and single pile axial ultimate bearing capacity empirical formula, combined with the negative pressure loading of conductor anchor node, the instantaneous bearing capacity and the real time bearing capacity of suction anchor in the process of placement are studied. A coupling calculation model of conductor anchor node bearing capacity, soil restoration coefficient and soil strength is established. As an example, taking the design parameters of conductor anchor node and the undrained shear strength of regional soil in Wisting Oilfield, Norway, the calculated results are in good agreement with the engineering practice.

Keywords: deepwater; conductor anchor node; subsea well head; bearing capacity; shallow horizontal well

吸力锚基础一般用来为船只提供系泊力, 也可作为海洋平台等构筑物的基础结构。1980 年 SBM 公司设计的两套链式锚腿系泊装置 (CALM)

的 12 个吸力锚首次成功地在北海丹麦海区 Gorm 油田中应用; 1995 年挪威国家石油公司在北海安装了 Europe16/11 大型吸力锚基础导管架平台, 标

收稿日期: 2021-08-06; 改回日期: 2021-09-15

基金项目: [1] 中国石油天然气集团有限公司科学研究与技术开发项目: “天然气水合物生产性试采技术装备研究和试验示范” (编号: 2021DJ4903); [2] 中国石油天然气集团有限公司科学研究与技术开发项目: “海洋油气开发及工程关键技术研究” (编号: 2021DJ2506)

第一作者简介: 邸建伟, 男, 1988 年生, 硕士, 工程师, 2015 年毕业于加拿大卡尔加里大学石油工程系, 从事海洋钻井设计与研究工作。E-mail: dijiw.cpoec@cnpc.com.cn。

志吸力锚基础在海上石油平台上的使用完全成功; 1999 年我国自行设计并建造的多桶吸力锚平台在渤海 JZ9-3 海域成功安装施工。但国内将吸力锚作为钻井水下井口承载结构应用较少, 缺乏其竖向承载力理论计算模型^[1-3]。

吸力锚井口在施工时, 吸力锚沉入水中后, 靠自重作用使筒体沉入泥中一定的初始深度, 形成桶内水体的封闭状态, 然后使用泵系统抽吸桶内的水, 使同一时间内抽出的水量大于自底部渗入的水量, 在锚筒内形成内外压差, 当负压差足够大, 以致向下的推力能克服下沉阻力时, 桶体就被不断地压入土中, 直至预定的设计深度。沉放就位后, 停止抽水并封闭水口, 此时锚筒内外压差逐渐消失, 最终恢复到周围环境的压力, 锚体则依靠内外侧壁的摩阻力和端部端承力以及土的吸附力等提供用阶段的抗拔或抗压承载力。当吸力锚使用期满, 欲回收时可通过泵系统的反向工作, 向锚筒内注水, 形成筒内外的正压差, 使顶盖上产生的顶升力将锚体顶出泥面。

目前国内外对深水井口竖向承载能力的研究, 主要是常规深水表层套管承载力计算、安全入泥计算、安全作业时间窗口和喷射施工作业参数等方面。BP 公司的 Philippe Jeanjean 基于土壤参数等, 提出了一种计算导管承载能力的方法, 并通过多次实验校准, 验证了计算模型的准确性^[4]。杨进基于油气井表层导管垂向受力分析, 研究了表层导管及上部井口载荷与表层导管外表面摩擦力之间关系, 建立了不同表层导管不同置入方式下的合理下入深度模型^[5-7]; 管志川在力学和桩基理论的基础上, 重点考虑时间效应对承载力的影响, 提出一种深水钻井导管喷射下入深度确定方法^[8]。陈国明考虑天然气水合物钻井不同阶段作业工况, 建立了钻井导管竖向承载力的计算模型^[8-9]。

本文在前人研究基础上, 结合吸力锚置入方式特点, 综合考虑深水浅部地层土力学特性, 建立吸力锚井口系统瞬时与实时竖向承载力计算模型, 为井口竖向稳定及现场作业提供理论参考。

1 吸力锚井口系统结构

吸力锚由大圆筒及内部构建组成, 直径可达

4~8 m, 长度 12~15 m, 重量约为 85~120 t, 基本结构形式是一个上端封闭、下端开口的圆桶, 其锚桶侧壁材料用钢材, 顶盖一般用钢材或钢筋混凝土材料, 锚桶顶盖留有抽水孔以连接抽水泵系统。吸力锚用于井口支撑时, 中间开孔, 预留后续导管通过的通道或内部预置单根导管或多个导管, 同时可对导管进行预造斜设置, 来进一步提高浅层造斜能力(图 1)。吸力锚井口主要优点有: (1) 提高承载能力; (2) 导管置入简单; (3) 节省井口占用时间, 提高时效。

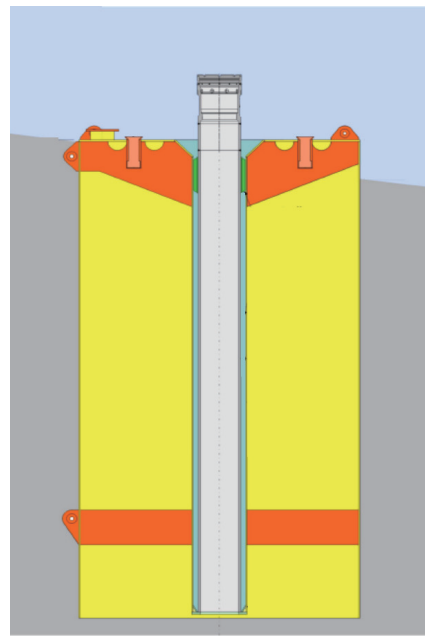


图 1 吸力锚井口示意图

Fig. 1 Conductor anchor node (CAN)

采用吸力锚井口技术时, 主要作业程序包含以下几步: (1) 工程船携带吸力锚下放至海底泥线, 吸力锚依靠自重沉入泥线一段距离; (2) ROV 对吸力锚实施吸真空, 吸力锚在压力作用下, 缓慢沉入泥线, 稳定, ROV 观察吸力锚上水平仪读数, 要求吸力锚沉入泥线过程中实现垂直沉入, 倾斜度要求范围内; (3) ROV 操作释放伸缩缆, 回收伸缩缆; (4) 回收吸力锚时, ROV 对吸力锚冲压, 回收吸力锚。吸力锚井口置入到设计深度后, 筒体内外表面与土壤作用产生摩擦阻力提供承载力。安装示意图见图 2。

由于吸力锚井口安装方式与常规导管喷射存在较大差异, 其承载能力计算需要进行研究, 建立适合吸力锚井口置入方式的承载力模型。

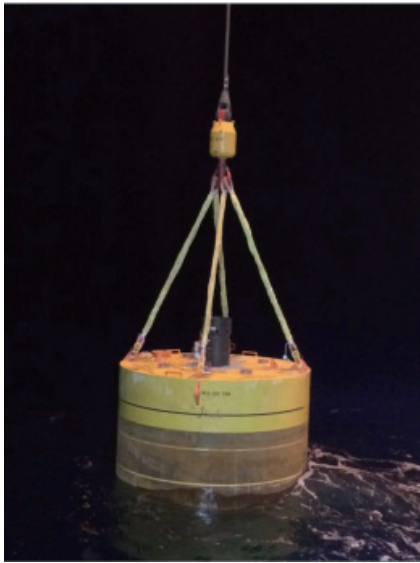


图2 吸力锚井口置入过程示意图

Fig. 2 Installation process of CAN

2 吸力锚井口承载力计算模型

2.1 置入后瞬时承载力

导管置入后初始承载力采用 SPE77357 介绍的方法 (美国 BP 公司), 基于该方法能够有效计算导管的初始承载能力、实时承载能力。该做法在墨西哥湾二十余口井得到成功应用, 南海已钻深水井喷射下导管也普遍采用此设计方法^[10]。如果采用导管喷射下入, 导管经喷射下入到最终深度时, 其初始承载能力 Q_0 :

$$Q_0 = WOB_{last} = R(W_{cond} + W_{LPWH} + W_{JP} + W_{CADA} + W_{Mud-Mat}) \quad (1)$$

式中: Q_0 为导管初始承载能力, kN; WOB_{last} 为最终测量钻压 (导管到达最终深度时作用在钻头上的重量), kN; R 为钻压利用率 (0.8~1.0); W_{cond} 为导管浮重, kN; $W_{Mud-Mat}$ 为防沉板浮重, kN; W_{LPWH} 为低压井口头浮重, kN; W_{JP} 为喷射管柱浮重, kN; W_{CADA} 为 CADA 工具浮重, kN。

吸力锚井口采用负压置入的方式, 缓慢匀速置入到规定深度, 分析其置入过程为安装时, 瞬时吸力锚保持近平衡状态, 土壤承载力满足了吸力锚的自重及负压产生的下压力。

吸力锚由于无钻压、无送入工具等其它重量, 其瞬时承载力仅与其自身湿重及安装时负压产生的下压力有关。同时吸力锚置入过程考虑缓慢进

行, 对土壤的扰动作用有限, 吸力锚内外表面摩擦阻力按照同等考虑。

式 (1) 可以优化为适合吸力锚承载力计算的式 (2):

$$Q_0 = R(W_{cond} + W_{负压}) \quad (2)$$

式中: W_{cond} 吸力锚导管浮重, kN; $W_{负压}$ 为安装压力产生的负压力, kN; R 为作用力的有效率, 考虑负压作用力直接作用于吸力锚井口, 无损失, 按照 100% 考虑。

2.2 实时承载能力

吸力锚置入到设计深度后, 吸力锚轴向承载力主要取决于侧向摩擦力的大小。

假设土壤不排水抗剪强度为:

$$S_u = a + bL_1 \quad (3)$$

则吸力锚单位长度 dl 受土壤侧向摩擦力为:

$$df = \pi D_1 S_u dl = \pi D_1 (a + bL_1) dl \quad (4)$$

对式 (4) 两边求积分, 求得入泥深度为 L_1 的吸力锚受到的总摩擦力为:

$$F = \pi D_1 \left(a + \frac{1}{2} bL_1 \right) L_1 \quad (5)$$

式中: S_u 为土壤不排水抗剪强度, kPa; L_1 为吸力锚入泥深度, m; D_1 为吸力锚单筒直径, m。

为方便表示导管侧向摩擦力, 引入平均抗剪强度 S_{uave} 的概念。土壤平均抗剪强度 S_{uave} 和不排水抗剪强度 S_u 关系可拟合成一元一次函数 (图 3)。

令

$$F = \pi D_1 S_{uave} L_1 \quad (6)$$

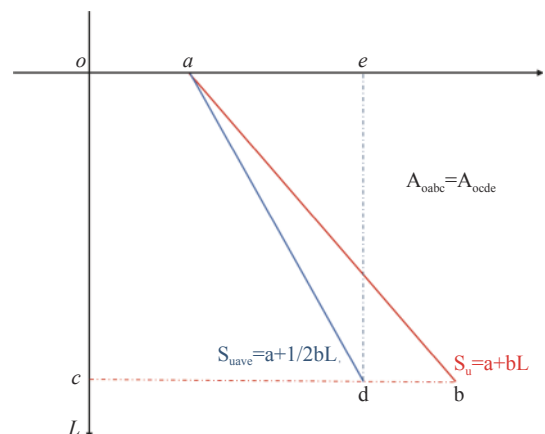


图3 平均抗剪强度和不排水抗剪强度关系示意图

Fig. 3 Relationship between average shear strength and undrained shear strength

图 3 中, 梯形 *oabc* 和梯形 *ocde* 面积相等, 则平均抗剪强度为:

$$S_{uave} = a + \frac{1}{2}bL_1 \quad (7)$$

经静置时间 t 后, 吸力锚井口实时承载能力 Q_{t1} :

$$Q_{t1} = Q_0 + SETUP = Q_0 + 2\Delta\alpha_t\pi D_1 S_{uave} L_1 \quad (8)$$

式中: $SETUP$ 为土壤恢复力, kN; $\Delta\alpha_t$ 为土壤强度恢复因子; D_1 为吸力锚单筒直径, m; L_1 为吸力锚入泥深度, m; S_{uave} 为土壤平均抗剪强度, kPa。

式 (8) 中, 土壤强度恢复因子 $\Delta\alpha_t$ 可以表示为:

$$\Delta\alpha_t = k[2 + \lg(t_1)] \quad (9)$$

式中: k 为恢复系数, 常数, 取 0.055; t_1 为吸力锚静置时间即土壤恢复时间, d。

综上所述, 吸力锚井口实时承载力为:

$$Q_{t1} = R(W_{cond} + W_{负压}) + 2k[2 + \lg(t_1)]\pi D_1 S_{uave} L_1 \quad (10)$$

3 轴向承载力敏感性影响因素分析

根据建立的吸力锚井口实时承载力计算式 (10), 影响吸力锚井口实时承载力的影响因素主要有吸力锚尺寸、湿重、土壤参数 (不排水抗剪强度、地层土质等)、吸力锚最终安装负压、安装后恢复时间。

对于某固定制造完成的吸力锚井口系统, 其尺寸和湿重为确认值, 下入至设计井位, 其区块土壤参数根据井场调查确认, 所以主要对实时承载力存在影响的因素主要为: 吸力锚最终安装负压、吸力锚及导管恢复时间、导管入泥深度。对某确定下入区块的尺寸吸力锚-导管系统, 固定其他变量, 对轴向承载力主要影响因素进行敏感性分析。

考虑 0~50 kPa 安装负压差 (实际安装压力可能远超过此值), 负压差考虑为 0 kPa、1 kPa、10 kPa、25 kPa、50 kPa, 恢复时间考虑 0~30 d, 吸力锚井口入泥深度为确定值, 计算结果见图 4。

从承载力计算结果图看出, 随着安装压力的增加, 产生的负压对承载力影响比较明显, 实时承载力恢复速度先快后缓, 10 d 后趋于恢复极限值, 承载力变化缓慢。

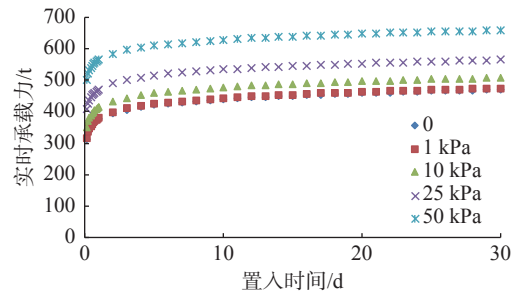


图 4 考虑负压及恢复时间承载力趋势

Fig. 4 Bearing capacity trend under time and negative pressure

4 挪威 Wisting 油田吸力锚井口实例应用

在距离挪威哈默菲斯特市 350 km、纬度 73° 的巴伦支海海域的 Wisting 油田, 是巴伦支海 Hoop 区域最大油田, 该油田水深 200~400 m, 油藏埋深浅, 处于泥线以下 240~270 m, 断层发育较多, 开发困难。

2016 年依靠吸力锚井口技术, 钻成了目前海上最浅层的常规油气水平井, 水深为 400 m, 油藏埋深约为 280 m, 其井身结构见图 5 (泥线深度 442 mTVD RKB)。

(1) 30" 导管 (452 m RKB)

吸力锚直井为 4 m, 高度为 11 m。吸力锚内预置 30" 导管, 入泥深度 10 m 支撑井口, 其中吸力锚高出泥线 1 m。其中 18-3/4" 高压井口头高出吸力锚 2.5 m, 36" 井口罩高出吸力锚 1.5 m。

(2) 26" 井眼 × 20" 表层套管 (505 m RKB)

26" 井眼钻进 63 m, 然后下 20" 表层套管固井。

(3) 12-1/4" × 17-1/2" 井眼 × 13-3/8" 技术套管 (708 m MD/681 m TVD RKB)

12-1/4" 井眼钻进到 708 m MD, 然后扩眼到 17-1/2" 井眼, 下入 13-3/8" 技术套管。

(4) 12-1/4" 井眼 × 9-5/8" 中间套管 (845 m MD/725 m TVD RKB)

12-1/4" 井眼钻进到 845 m MD, 下入 9-5/8" 中间套管。

(5) 8-1/2" 井眼 × 7" 尾管 (2 295 m MD/721 m TVD RKB)

8-1/2" 井眼钻进到 2 295 m, 下入 7" 尾管。

作为吸力锚井口承载力关键输入-浅部土壤地

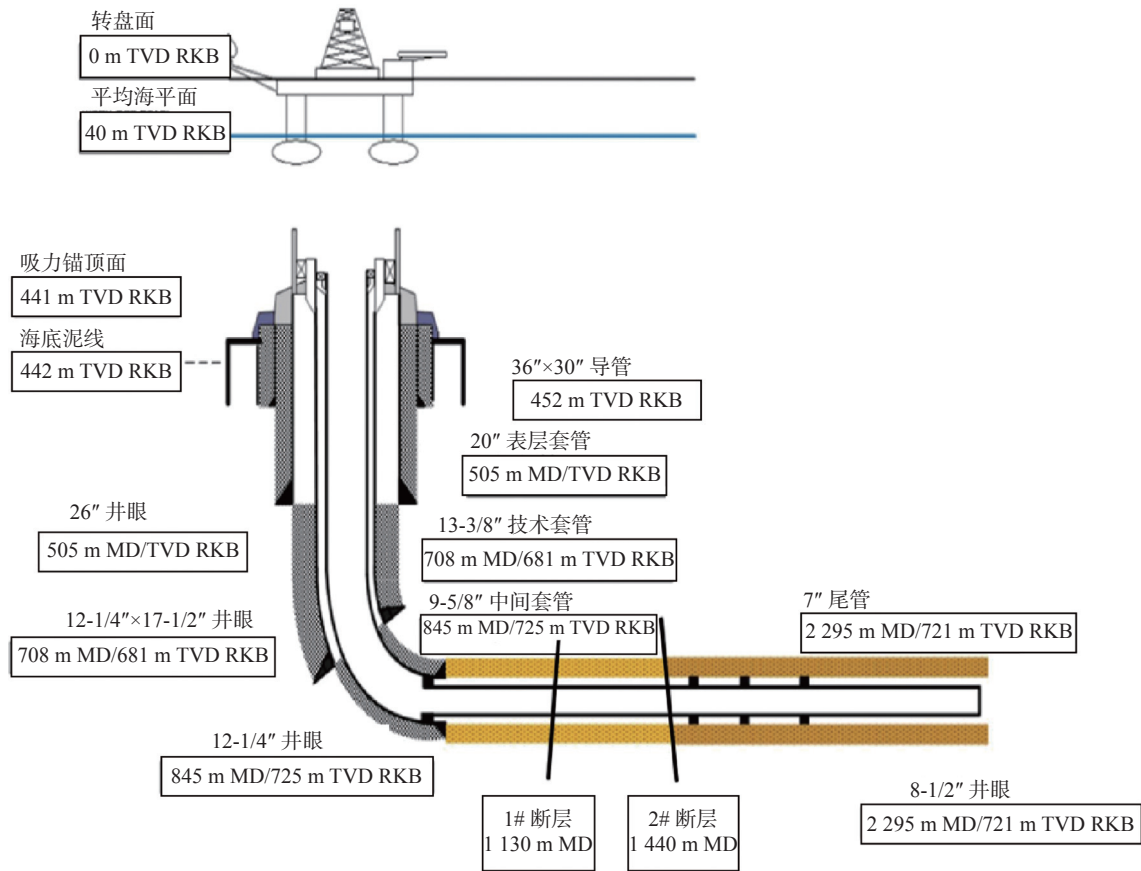


图5 挪威 Wisting 油田超浅水平井井身结构示意图

Fig. 5 Well structure diagram of shallow horizontal well in wisting oilfield

质参数，在吸力锚井口置入井位并没有进行工程地质参数取样，而在井位附件有一些工程取样本（图6）。对每个取样点浅部土壤的不排水抗剪强度的低值（LE）与高值（HE）进行分析（图7~图10）。以取样点1为例，按照式（7），需要拟合抗剪强度在浅表层的变化规律用以计算置入深入范围内的平均抗剪强度。从图8可以看出，浅部土壤不排水抗剪强度随深度变化呈现线性

增加的规律，无较大的异常突变，反应出该处土壤变化比较规律，无硬夹层存在，利于吸力锚井口的置入。从拟合规律来看，线性相关性较强， R^2 超过 0.96（图11），可以作为置入范围内不排水抗剪强度的预测。按照现场实施情况，吸力锚井口最终安装至 11 m，安装结束时的压力为 2.1 bar。

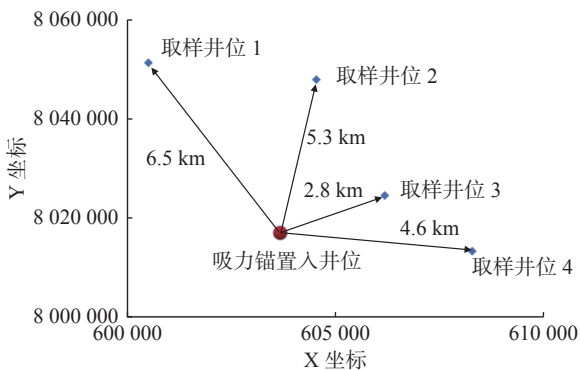


图6 吸力锚置入井位附近取样点

Fig. 6 Sampling location of geological parameters

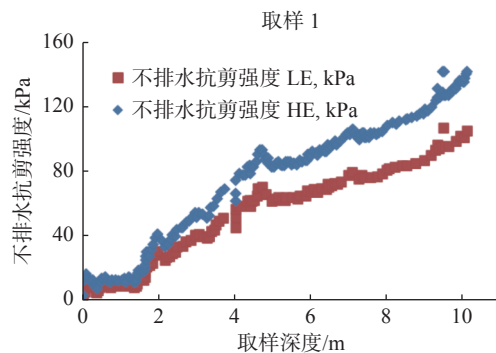


图7 1号取样点浅部土壤不排水抗剪强度低值（LE）与高值（HE）

Fig. 7 Extreme undrained shear strength of shallow soil at 1# sampling location

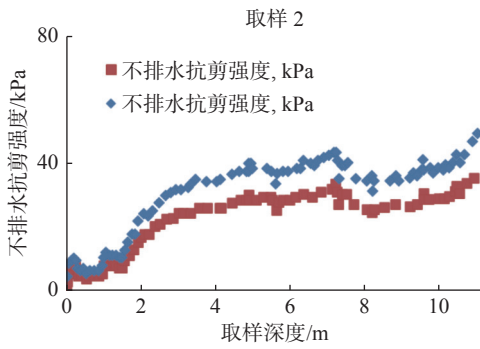


图 8 2 号取样点浅部土壤不排水抗剪切强度低值 (LE) 与高值 (HE)

Fig. 8 Extreme undrained shear strength of shallow soil at 2# sampling location

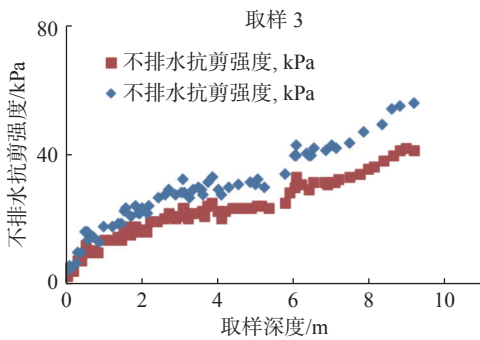


图 9 3 号取样点浅部土壤不排水抗剪切强度低值 (LE) 与高值 (HE)

Fig. 9 Extreme undrained shear strength of shallow soil at 3# sampling location

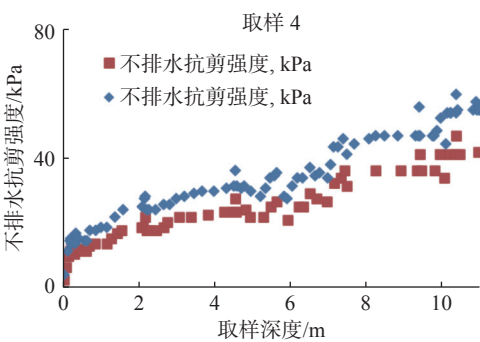


图 10 4 号取样点浅部土壤不排水抗剪切强度低值 (LE) 与高值 (HE)

Fig. 10 Extreme undrained shear strength of shallow soil at 4# sampling location

利用建立的吸力锚井口实时承载力计算模型, 对该井实时承载力进行计算, 以取样点 1 为例进行计算, 结果如图 12 所示。吸力锚井口置入后瞬时承载力达到 543 t (LE) 和 590 t (HE), 随置入时间延长, 土壤不断恢复, 承载力不断增加, 到 30 d 时, 基本处于稳定, 最终承载力为 775 t (LE) 和 936 t (HE)。

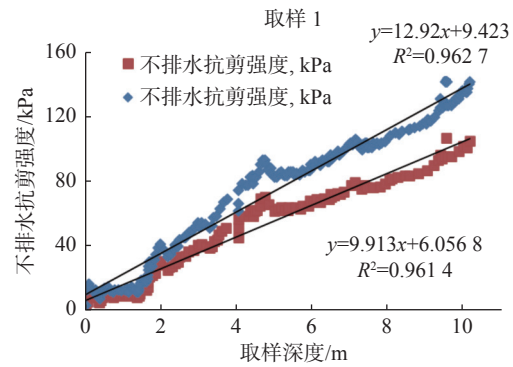


图 11 取样点 1 浅部土壤不排水抗剪切强度低值 (LE) 与高值 (HE) 随深度变化规律拟合

Fig. 11 Variation rule of undrained shear strength and depth at 1# sampling location

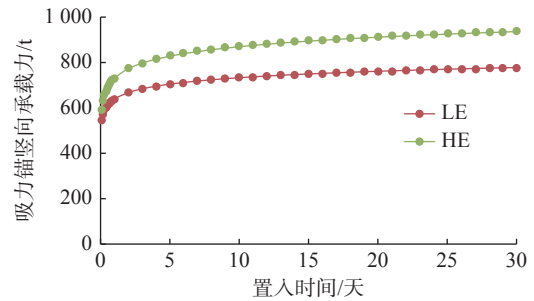


图 12 基于取样点 1 参数计算得到的吸力锚井口竖向承载力变化规律

Fig. 12 Results of Vertical Bearing Capacity of CAN at Sampling Location 1

按照上述同样的方法对其余 3 个取样点对应的吸力锚井口承载力进行计算。由于无法确定吸力锚置入井位准确土壤参数, 取 4 个取样点的算数平均值作为参考, 计算结果见表 1。计算得到平均承载力低值与高值分别为 670 t 与 780 t, 现场反馈预测实际承载力低值与高值分别为 645 t 与 867 t, 计算值与实际估算值误差为 3.9% 与 10%, 证明了该模型的准确性。

表 1 不同取样点计算吸力锚井口承载力与实际数据对比
Table 1 Theoretical data and engineering data of bearing capacity of CAN at different sampling locations

	承载力低值/t	承载力高值/t
取样点1	775	936
取样点2	716	805
取样点3	596	697
取样点4	593	682
计算平均值	670	780
现场实际数据	645	867
计算误差/%	3.9	10

5 结论

(1) 通过分析吸力锚井口负压置入瞬时受力情况, 置入瞬时承载力主要与自身湿重及负压大小有关, 同时基于简化 API 规范中的单桩轴向极限承载力经验公式, 建立适用于吸力锚井口负压置入瞬时承载力, 引入平均抗剪强度并考虑土壤恢复参数, 推导了吸力锚井口实时承载力计算模型。

(2) 以挪威 Wisting 油田水平井使用的吸力锚井口参数为算例, 利用构建的吸力锚井口竖向承载力计算模型, 分别计算了不同土壤取样参数条件下井口实时承载力大小。取 4 个取样点的算数平均值与实际现场估算数值进行对比, 承载力低值与高值的误差率分别仅为 3.9% 与 10%, 验证了计算模型的准确性, 为后续吸力锚井口承载力计算提供了理论支撑。

参考文献:

- [1] 赵学战, 陈光进, 弓大为, 等. 深水水下井口弯矩能力有限元分析 [J]. 海洋石油, 2022, 42 (1): 90-94, 107.
- [2] 程光明, 段梦兰, 叶茂, 等. 深水生产系统中吸力桩的承载能力计算 [J]. 石油矿场机械, 2013, 42 (12): 46-50.
- [3] 李文龙, 高德利, 杨进. 海域含天然气水合物地层钻完井面临的挑战及展望 [J]. 石油钻采工艺, 2019, 41 (6): 681-689.
- [4] Hollinger G, Trauner S, Dupuis C, et al. Transformation of mindset-cost-effective collaborative well engineering & operation delivers record horizontal appraisal well in the Barents// Proceedings of the SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition[C]. The Hague: SPE, 2017.
- [5] 杨进. 深水油气井表层导管下入深度计算方法 [J]. 石油学报, 2019, 40 (11): 1396-1406.
- [6] 杨进, 李文龙, 胡志强, 等. 深水钻井水下井口稳定性研究进展 [J]. 中国海上油气, 2020, 32 (4): 124-130.
- [7] 刘书杰, 周建良, 杨进, 等. 海上钻井隔水导管入泥深度预测与控制技术研究 [J]. 中国海上油气, 2013, 25 (6): 75-81.
- [8] 苏堪华, 管志川. 深水钻井导管及表层套管竖向承载能力分析 [J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2010, 12 (2): 22-24, 51.
- [9] 朱敬宇, 陈国明, 刘康, 等. 深水水合物钻井导管下深设计与地层安全承载研究 [J]. 石油钻采工艺, 2019, 41 (6): 690-696.
- [10] Mathis W, Strand H, Hollinger G. Case history: how to enable the horizontal development of shallow reservoirs//Proceedings of the SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition. The Hague: SPE, 2017.