

文章编号:1673-5005(2008)04-0047-04

深水钻井导管喷射下入深度确定方法

苏堪华¹, 管志川¹, 苏义脑²

(1. 中国石油大学 石油工程学院, 山东 东营 257061; 2. 中国石油 钻井工程技术研究院, 北京 100097)

摘要:通过分析深水钻井导管的受力特征,在土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,提出一种通用的深水钻井导管喷射下入深度确定方法。利用该方法可以合理地确定导管下入深度,减少设计的盲目性并节省钻井成本。结果表明:大直径导管的承载能力较大,所需下入深度较小;随着恢复时间的增加,导管承载力逐渐增强,所需下入深度可以相应减小,但是过长的时间间隔将增加钻井成本,要根据实际情况权衡确定;承载力增长系数的选取对设计结果有较大影响,应根据区域试验数据合理选取。

关键词:深水钻井; 导管; 下入深度; 承载能力; 时间效应

中图分类号:TE 21

文献标识码:A

Determination method of conductor setting depth using jetting drilling in deepwater

SU Kan-hua¹, GUAN Zhi-chuan¹, SU Yi-nao²

(1. College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China;

2. China Drilling Engineering Technology Research Institute, PetroChina, Beijing 100097, China)

Abstract: Based on the analysis of conductor mechanical characteristics, jetting technique, geotechnics and pile theory, a universal determination method of conductor setting depth considering time effect was proposed. The method can reduce conductor design blindness and drilling cost. Results show that the conductor with a large diameter has larger bearing capacity and needs less setting depth. With set-up time increasing, the bearing capacity of conductor enhances gradually, and the setting depth required could decrease. But longer set-up time could cause drilling cost increasing, the set-up time should be determined according to actual situation. The growth factor of bearing capacity has considerable influence on the result, and it should be selected on the basis of block experimental data.

Key words: deepwater drilling; conductor; setting depth; bearing capacity; time effect

目前,一般定义水深超过 500 m 的海域为深水,超过 1.5 km 则称为超深水,采用水力喷射方式下入导管到设计深度是多数深水或超深水钻井作业者的首选,因为该方式能极大地节约时间,从而节省昂贵的深水钻井费用。导管仅提供结构支撑而不能承受压力,其下入深度一般为 30 ~ 120 m,该深度主要取决于深水海底浅部软土支撑导管及后续套管柱的能力。若导管的下入深度过浅,则可能造成套管柱下陷失稳等事故;若下入深度过大,则造成经济上的浪费。所以需要导管承载能力进行计算分析,研究

导管下入深度的确定方法。R. D. Beck 等^[1]给出了一种计算喷射导管承载能力的方法,但是该方法采用的喷射下入工艺不适合目前深水超深水的要求,且该方法只考虑了瞬时承载能力而没有考虑承载能力的变化;G. L. Faul 等^[2]提出在深水中使用负压下入导管的方法,分析了导管下入过程中与其周围土壤简单的受力关系及参数控制;Philippe Jean-jean^[3]分析了导管的瞬时承载能力以及土壤强度随时间增加的特性,但他采用了线性化的墨西哥湾平均土壤剖面,而这并不代表其他区域的土壤特征;

收稿日期:2008-03-10

基金项目:国家“863”高技术研究发展计划项目(2006AA09A106)

作者简介:苏堪华(1978-),男(汉族),山东郓城人,博士研究生,研究方向为油气井力学、信息与控制。

T. J. Akers^[4]讨论了深水喷射下入导管的工艺设计与操作方法,但该方法实际上还是建立在经验基础上,并且计算结果有些保守;杨进等^[5]分析了浅水入泥式隔水导管的受力平衡关系,给出了其最小入泥深度的计算公式,但是该公式没有考虑承载力时间效应和管侧阻力是管长函数的特点,而且不适用于深水环境。笔者在土力学和桩基理论的基础上,结合前人研究成果,通过分析深水导管的受力特征,建立导管喷射下入深度的通用确定方法。

1 深水钻井导管受力分析

1.1 不同作业阶段导管的受力

根据喷射下入导管的施工工艺,对不同作业阶段的导管受力进行分析,其受力示意图如图1所示。

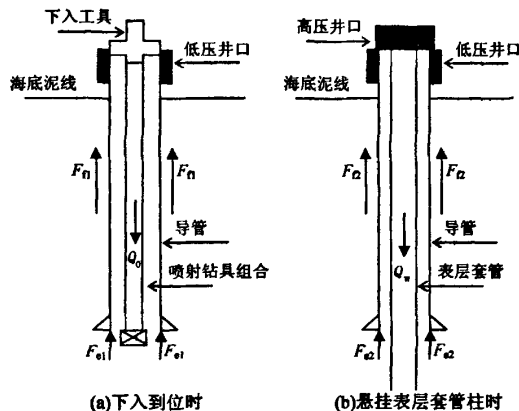


图1 导管在不同作业阶段受力示意图

1.1.1 导管下入到位时的受力

为了使导管能顺利下入到位,同时保证其能垂直下入而不发生倾斜,必须保证喷射钻压(下入重力)能克服海底土壤的阻力。根据图1(a)可以列出导管下入到位时的受力平衡关系为

$$Q_0 = F_n + F_{e1} \quad (1)$$

式中, Q_0 为导管下入到位时的最大钻压,kN; F_n 为导管外壁受到的扰动侧阻力,kN; F_{e1} 为导管底部受到的扰动端阻力,kN。

由于喷射对土壤的扰动,无法准确得到式(1)中被扰动的管侧和管端阻力,而下入到位时的瞬时最大钻压则可由文献[4]提供的理论钻压曲线得到,因此最大钻压等于导管的初始承载力,即

$$Q_0 = B_{fw}[(W_{con} + W_{col})x + W_{lh} + W_{tool}] \quad (2)$$

式中, B_{fw} 为海水中浮力系数; x 为设计的导管下入深度,m; W_{con} 和 W_{col} 分别为导管和喷射钻具线重,kN/m; W_{lh} 为低压井口重力,kN; W_{tool} 为下入工具重力,kN。

1.1.2 悬挂表层套管柱时的导管受力

导管下到位后,不再使用喷射方式钻井,而是采用常规旋转钻进方式钻出表层套管所需井眼,然后下入表层套管串及高压井口,坐于导管的低压井口上。固井前,整个表层套管柱及井口的重力也由导管承担,而一定恢复时间后的管侧与管端阻力由于扰动消失而逐渐增大,受力平衡关系如图1(b)所示,其中

$$\begin{cases} Q_w = Q_t, \\ Q_w = B_{fw}(W_{con}x + W_{sur}l) + B_{fw}(W_{lh} + W_{hh}), \\ Q_t = F_{a2} + F_{e2}. \end{cases} \quad (3)$$

式中, Q_w 为导管承担的总载荷,kN; Q_t 为 t 时刻导管实时承载力,kN; B_{fw} 为钻井液中浮力系数; W_{sur} 为表层套管线重,kN/m; l 为表层套管长度,m; W_{hh} 为高压井口重力,kN; F_{a2} 、 F_{e2} 分别为 t 时刻的管侧和管端阻力,kN。

1.2 导管实时承载力的确定

深水导管的极限承载力一般依靠现场土壤取样并通过试验测定而得到^[1,6-7],其值可根据土力学和桩基理论^[8-9]确定,即

$$Q_u = \pi D \sum_{i=0}^n q_{sk,i} L_i + \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) q_{pk} \quad (4)$$

式中, Q_u 为导管极限承载力,kN; D 和 d 分别为导管外径和内径,m; L_i 为导管周围各层土的厚度,m; $q_{sk,i}$ 为第 i 层土的单位极限管侧阻力,kPa; q_{pk} 为单位极限管端阻力,kPa。

桩基理论中,软粘土中摩擦桩的承载力随时间变化而呈一定程式增长。由于海底浅部地层多为软粘土层,处于其中的导管承载力同样具有随时间增加而增长的现象,所以需要考虑时间效应影响下的导管实时承载力。国内外对桩承载力时间效应的预测提出了许多实用的方法^[8-12],其中常用的有双曲线函数法和双对数函数法。

双曲线函数法是根据工程中单桩承载力随时间变化而近似呈双曲线特征^[10-11]得到其实时承载力计算式为

$$Q_t = Q_0 [1 + t/(at + b)] \quad (5)$$

式中, t 为恢复时间,d; a 、 b 分别为与桩径、桩长及土质有关的经验系数,须根据试桩试验回归得到。

根据试桩资料统计分析,Skov等^[12]提出实时承载力的对数函数法,计算公式为

$$Q_t = Q_0 (1 + k \lg t/t_0) \quad (6)$$

式中, t_0 为初始时间,d; k 为承载力增长系数,与地层土质有关。

顾自乘等^[8-10]在进行大量试验的基础上建立了实时承载力计算公式,在我国利用较多,其形式为

$$Q_t = Q_0 + k(1 + \lg t)(Q_u - Q_0).$$

(7)

Philippe Jeanjean^[3]根据墨西哥湾喷射导管载荷试验数据库回归出的实时承载力计算式为

$$Q_t = Q_0 + 0.055(2 + \lg t)Q_u.$$

(8)

为了使式(8)具有通用性,可用承载力增长系数代替式中定值 0.055,该值同样需要根据不同海域的地层特征试验得到。

双曲函数法需要确定两个经验系数,而对数函数法只需确定一个经验系数。采用文献[3]中的试验数据,根据式(8)可以算得 Q_u ,由式(6),(7)反推

出相应的承载力增长系数,结果见表 1。

从表 1 可以看出,在不同的区域位置 k 值是不同的,需要根据实际情况取值。式(6)中 t_0 对计算结果有一定影响,而式(7)中各参数均可根据具体情况确定,所以本文中采用式(7)来计算导管的实时承载力。由式(2),(4),(7)可得到扰动后一定恢复时间下的实时承载力 Q_t 。

为了防止导管下陷和下入过量,需要导管承担的总重力应小于且接近于导管在被扰动后一定恢复时间下的实时承载力,导管下入深度的设计准则为

$$\varepsilon_d < Q_t - Q_w < \varepsilon_u.$$

式中, $\varepsilon_u, \varepsilon_d$ 分别为合理安全余量上限和下限值。

表 1 承载力增长系数计算结果

位置	导管下入深度 x/m	导管直径 D/mm	恢复时间 t/d	测得的 Q_0/kN	测得的 Q_t/kN	计算的 Q_u/MN	由公式(6) 反推的 k	由公式(7) 反推的 k
A	41	762	1/6	600	>756	2.224	0.21	0.43
B	20	762	1	405	556	1.374	0.19	0.16
C	53	914	5	578	>1334	5.040	0.48	0.10

注:表中测得 Q_t 是承载力下限,因为此时导管并没有失效;计算 k 值时采用 $t_0 = 0.01 \text{ d}$ 。

2 实例分析

导管下入深度 x 须采用迭代法确定。通过海底土壤取样得到的泥线以下一定深度的导管单位管侧和管端阻力剖面,计算出 t 时刻的实时承载力剖面。试取导管的下深 x_j ,代入式(3)计算对应的总载荷 Q_{wj} ,同时根据实时承载力曲线求得 x_j 对应的实时承载力 Q_{tj} ,若 $\varepsilon_d < Q_{tj} - Q_{wj} < \varepsilon_u$,则 x_j 即为导管的合理下入深度,否则,重新给出 x_j 重复上述过程,直至满足设计要求。

某海域深水區通过土壤取样得到的导管单位管侧和管端阻力数据如表 2 所示。导管外径 914.4 mm,内径 863.6 mm,线重 7.8 kN/m,喷射钻具组合线重 3.6 kN/m,低压井口质量 13.1 t,下入工具质量 3.1 t,高压井口质量 4.1 t,悬挂的表层套管柱长 850 m,线重 2.1 kN/m,水中浮力系数取 0.85,钻井液中浮力系数取 0.78,极限承载力增长系数为 0.1,间隔时间为 2 d, $\varepsilon_d = 50 \text{ kN}$, $\varepsilon_u = 150 \text{ kN}$ 。

根据确定方法,依次得到导管的极限承载力 Q_u 和实时承载力 Q_t 随深度变化曲线(图 2),迭代试算得到导管长度为 75 m 时的总载荷为 2.145 5 MN,对应的 75 m 泥线以下深度的实时承载力 Q_{tj} 为 2.294 MN, $Q_{tj} - Q_{wj} = 148.5 \text{ kN}$ 在安全余量取值范围内,由此确定导管的合理下入深度为 75 m。

对影响设计结果相关因素的分析表明:

(1) $\Phi 762.0 \text{ mm}$ 导管的设计深度为 80 m,虽然小

直径导管总载荷小于大直径的,但是直径越小其承载能力越小,则所需下入深度越大,如图 3(a);

表 2 导管单位管侧阻力和管端阻力取样数据

泥线以下 深度 H/m	单位管侧 阻力 q_{sk}/kPa	单位管端 阻力 Q_{pk}/MPa	泥线以下 深度 H/m	单位管侧 阻力 q_{sk}/kPa	单位管端 阻力 Q_{pk}/MPa
10	8	0.10	70	105	0.95
20	20	0.15	80	125	1.00
30	45	0.25	90	130	1.05
40	60	0.40	100	145	1.10
50	80	0.65	110	160	1.10
60	95	0.80	120	165	1.30

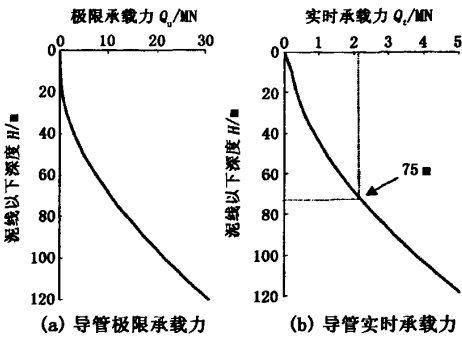


图 2 导管极限承载力和实时承载力剖面

(2) 由于导管底部截面面积较小,故管端阻力对导管承载力的影响很小,只考虑外管壁与土壤的侧阻力可以满足工程要求,如图 3(b);

(3) 当承载力恢复时间为 3 d 时, $\Phi 914.4 \text{ mm}$ 导管的设计深度为 70 m,可知承载力恢复时间对导管深

度确定有一定影响,随着恢复时间的增加,导管承载力逐渐增强,则所需下入深度相应减小,如图3(c);

(4)当 $k=0.15$ 时, $\Phi 914.4$ mm 导管的设计深度

为60 m,可知 k 值的选取非常重要,对设计结果有较大影响,一般应根据区域试验数据确定,如图3(d)。

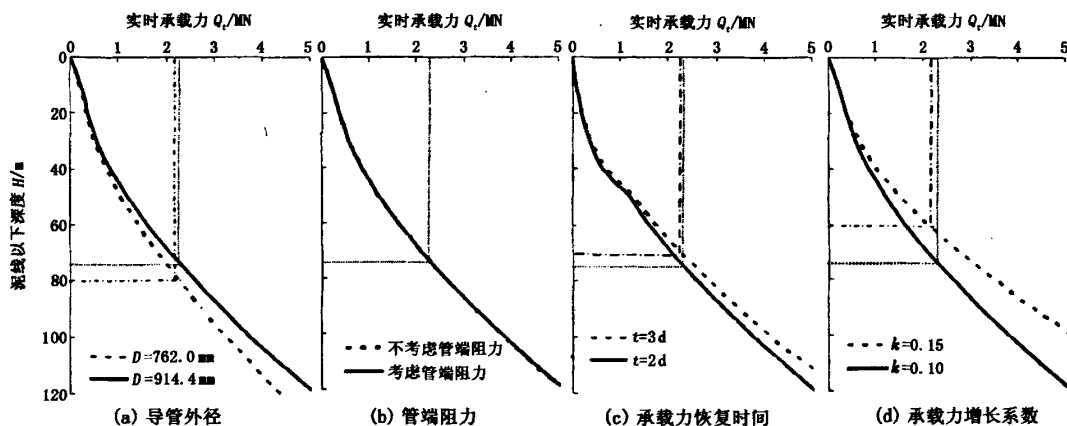


图3 影响因素分析

3 结论及建议

(1)提出的导管下入深度确定方法可以合理地确定导管下入深度,减少设计的盲目性,增加结构的可靠性并节省钻井成本。

(2)随着恢复时间的增加,导管承载力逐渐增强,所需下入的导管深度相应减小,但是过大的时间间隔将增加钻井费用,须根据实际情况权衡确定。承载力增长系数的选取对设计结果有较大影响,应根据区域试验数据确定。

(3)文中主要根据导管的竖向承载能力来确定其下入深度,而深水环境下隔水管的摆动及海流力作用将一定的横向力传递到导管上,该力对导管下入深度的影响程度有待进一步分析。

参考文献:

- [1] BECK R D, JACKSON C W, HAMILTON T K. Reliable deepwater structural casing installation using controlled jetting[R]. SPE 22542, 1991.
- [2] FAUL G L, AUDIBERT J M E, HAMILTON T K. Using suction technology for deep installation of structural pipe in deepwater[R]. IADC/SPE 39336, 1998.
- [3] PHILIPPE Jeanjean. Innovative design method for deepwater surface casings[R]. SPE 77357, 2002.
- [4] AKERS T J. Jetting of structural casing in deepwater environments: job design and operational practices[R]. SPE 102378, 2006.
- [5] 杨进,彭苏萍,周建良,等.海上钻井隔水管最小入泥深度研究[J].石油钻采工艺,2002,24(2):1-3.

YANG Jin, PENG Su-ping, ZHOU Jian-liang, et al. Study on the minimum driving depth of offshore drilling riser[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2002,24(2):1-3.

- [6] PARRY R H G. A study of pile capacity for the heather platform[R]. SPE 8083, 1978.
- [7] QUIRÓS G W, LITTLE R L. Deepwater soil properties and their impact on the geotechnical program[R]. OTC 15262, 2003.
- [8] 高大钊.土力学与基础工程[M].北京:中国建筑工业出版社,1998:273-325.
- [9] 《桩基工程手册》编写委员会.桩基工程手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1995.
- [10] 王伟,卢廷浩,宰金珉.单桩极限承载力时间效应估算方法比较[J].岩土力学,2005,26:244-247.
WANG Wei, LU Ting-hao, ZAI Jin-min. Methods for calculating time-dependent ultimate bearing capacity of single pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005,26:244-247.
- [11] 董光辉,张明义,郑丽.静压桩极限承载力的时效分析[J].岩土工程技术,2005,19(4):170-172.
DONG Guang-hui, ZHANG Ming-yi, ZHENG Li. Analysis on time limitation of the ultimate bearing capacity of jacked pile[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2005, 19(4):170-172.
- [12] SKOV R, DENVER H. Time-dependence of bearing capacity of piles: Proceedings 3rd International Conference on Application of Stress-Wave Theory to Piles, Ottawa, 25-27 May, 1988[C]. Vancouver: Bi Tech Publisher, 1988:879-888.

(编辑 李志芬)