

自升式钻井船桩脚插入深度计算

邢 延

(渤海工程设计公司, 天津)

提 要

本文分析了多年来积累的海底土质调查资料 and 自升式钻井船桩脚实测插深资料, 并在实测资料 and 理论计算对比分析的基础上, 比较系统地介绍了桩脚在不同土质条件下的计算方法; 推荐了适合于渤海土质特点的计算公式。同时, 对选择适合于渤海作业的钻井船型提出了建议。

一、前 言

目前世界上有几百艘自升式钻井船在各海域钻井作业, 事故发生率大约每年为10%, 其中1/3和地基土有关^[1]。

我国在海上勘探石油以来, 也发生过一些事故。如渤海2#钻井船曾滑移10次, 迫使中途改移井位, 并于1979年翻沉。南海1#钻井船, 在半年时间内发生5次桩脚不均匀下沉, 造成平台倾斜。勘探2#钻井船在石门潭一井作业时, 因事先对海底土质未作调查, 升船时桩靴穿透硬壳层进入软弱层, 一条腿突然下降, 操作失去控制, 顷刻间平台倾斜11°, 使桩腿扭弯, 经济上受到很大损失。为了避免或减少事故的发生, 我们必须在钻井船进入井场作业前, 做必要的海况调查和钻井船就位作业时的基础稳定分析。

渤海石油公司前后拥有11艘自升式钻井船。以基础类型可分为: ①独立基础带桩靴, 如渤海4#、8#、10#、12#钻井船(图1(a)); ②独立基础下不带桩靴, 如渤海1#、3#、5#、7#、9#钻井船(图1(b)), 它是我国自行设计建造的; ③沉垫式, 如渤海2#、6#钻井船(图1(c))。

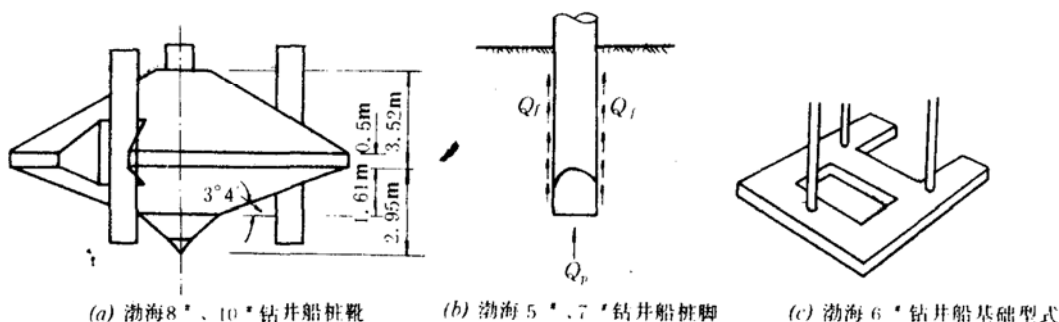


图1 自升式钻井船基础类型

用这些钻井船和海上固定平台, 在渤海、南黄海、东海共打188口探井和评价井。1980年以后打的89口井有土质调查资料, 并做了钻井船基础稳定计算, 其余只有桩脚最终插深资料。

本文主要讨论独立基础带桩靴与不带桩靴两种钻井船桩脚插深计算方法, 对沉垫式钻井船基础稳定分析, 另有专文介绍^[2]。

二、钻井场地的调查

(一) 海底土质调查

一般在预定井位钻1—2个钻孔。孔深取桩脚最大插深再加1.5倍的基脚宽度或直径^[3], 在渤海孔深大都取40m。取样间距: 海底—15m, 每米取一个原状土样; —15—30m, 每1.5m取一个原状土样; —30m以下, 每3m取一个原状样。根据需要, 取样也可加密。

在渤海曾用活动式小平台安装钻机, 下隔水导管, 采取陆上钻探取样方法。此法因受海洋动力影响较小, 取样成功率较高(95%以上)。同时还进行了标准贯入、静力触探, 十字板和旁压试验等原位测试。

目前使用滨海218船, 将Failing 1500 S型钻机安装在船上进行钻井作业。船体由锚链固定。由于采用了先进的钻进和取样方法, 所以速度很快。一般40m深的孔只需4—5 h, 120m深的孔需15—16 h就可完成。有三套取样器($\phi=50\text{mm}$, 60mm, 72mm), 可根据试验需要取不同直径的土样。土样采取后, 有些简单试验(如小型十字板, 容重等)可在船上做, 其它试验在陆上实验室进行。

粘性土要做三轴UU试验和单轴试验; 互层土做三轴CU试验。将现场和室内试验测试的土强度指标, 按深度统一排列, 取其代表值, 作为计算依据。

砂性土要做粒度分析和三轴CD试验。若现场取不到原状砂样, 可根据标准贯入击数N换算。如采用日本公式: $\phi=0.3N+27^\circ \leq 45^\circ$ 或美国McClelland公司推荐的N- ϕ 关系值(锤重175lb, 落距5ft), 见表1。

表1 锤击数与 ϕ 的关系

土 名	锤 击 数	$\phi(^{\circ})$
纯砂	0—10	30
	>10	35
粉砂	0—10	25
	>10	30
砂质粉土及粉土	0—10	20
	>10	25

首先按土的颗粒组成, 适当考虑矿物成分, 结合现场鉴定, 确定土名。再根据锤击数多少由表1定 ϕ 值。

(二) 地球物理调查

使用高分辨地球物理调查设备, 探明钻井场地范围内的地形、地貌情况, 有无危及钻井船就位作业的障碍物。地层剖面调查可配合地质钻孔资料在较大范围内查明土层分布的变化、充气层、海底不稳定等灾害地质情况。

井场的调查范围, 以井位为中心, 在1000m×1000m范围内设测线。在井口至四周200m范围, 测线间距为50m, 其它为100m。

(三)风、浪、流及水深调查

对钻井场地的风、浪、流、水深等要做详细的调查了解。若在结冰期, 还要考虑流冰的影响。对风暴荷载要以50年一遇的标准推算。

据以上调查资料, 确定场地的土层分布情况及每层土的物理、力学性质指标; 确定钻井位置; 选择钻井船就位方向、升船高度, 计算桩脚的预压载及桩脚插入深度。

三、桩脚插入深度计算

钻井船拖运到预定井位后, 桩脚下降到海底, 并压入地基土中。当地基土对桩腿的阻力等于或超过压桩荷载时, 桩脚贯入就会停止。因此, 地基土的性质、压桩荷载的大小和桩脚的形状, 是决定桩脚插入深度的关键因素。

(一)带靴的桩脚插深计算

计算地基土承载能力时, 桩靴的埋入条件是很重要的。在桩靴插入过程中, 土体被挤开, 若桩腿是桁架式的, 则被挤开的土可能又回填到桩靴上, 这将影响到地基土的承载力。

基础埋入条件如图2所示^[4]。当基础在海底表面时(图2(a)),

$$q_0 = q_u \quad (1)$$

当基础以上未回填时(图2(b)),

$$q_0 = q_u + \gamma' D \quad (2)$$

当基础以上回填时(图2(c)),

$$q_0 = q_u + \gamma'(D - D_1) \quad (3)$$

上三式中 q_u 为土的理论承载力; q_0 为决定桩靴插深的土的实际承载力; γ' 为基础排开土体的浮容重; D 为基础埋深。

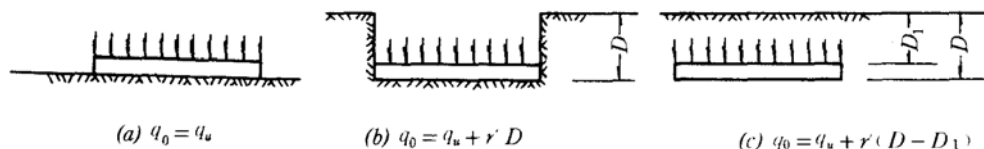


图2 基础埋入条件

对超荷项 $\gamma'(D - D_1)$ 可用 $\gamma' \frac{V}{A}$ 近似代替, 则式(3)为

$$q_0 = q_u + \gamma' \frac{V}{A} \quad (4)$$

式中 V 为桩靴排开土的体积; A 为桩靴最宽处的横截面面积。

$\gamma'(D - D_1)$ 或 $\gamma' \frac{V}{A}$ 和 q_u 相比是相当小的。若桩靴上面未被土回填, 则 $\gamma' D$ 值可能很大。这一概念建立后, 对图1(a)形状的桩靴就可进行各种不同土质的承载力计算。

1. 桩靴在粘性土层中

1951年Skempton提出

$$q_0 = N_c s_u + \gamma' \frac{V}{A} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} N_c &= 5(1 + 0.2 \frac{D}{B})(1 + 0.2 \frac{B}{L}) \geq 9 & (\text{方形基础}) \\ N_c &= 6(1 + 0.2 \frac{D}{B}) \geq 9 & (\text{圆形基础}) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中 q_0 为土的极限承载力, kPa; s_u 为计算断面下 $B/2$ 范围内土的平均不排水抗剪强度, kPa; N_c 为承载力系数, 它是基础埋深和基础尺度的函数; D 为计算断面至海底泥面间的距离, m; A 为计算断面的面积, m^2 ; B 为桩靴计算断面的宽度, cm; L 为方形基础的长度, m; 其它符号同上。

式(5)的使用范围: ① $\frac{D}{B} < 2.5$; ② s_u 相当一个常数。若桩靴计算断面下 $\frac{2}{3}D$ 内土的抗剪强度变化 $\pm 50\%$ 时, 此式不适用, 可作为成层土考虑。

2. 桩靴在砂土层中

使用 Terzaghi 和 Peck 公式计算砂土层的极限承载力

$$q_0 = 0.3\gamma_1 B N_r + \gamma_2 D (N_q - 1) + \gamma \frac{V}{A} \quad (7)$$

式中 N_r , N_q 为承载力系数; γ_1 为桩靴计算断面下 $\frac{B}{2}$ 范围内土的平均浮容重, kN/m^3 ; γ_2 为桩靴计算断面以下至海底泥面间土的平均浮容重, kN/m^3 ; 其它符号同上。

3. 桩靴在成层土中

支承在成层土上的桩靴, 通常造成穿透事故的原因有两种: ①硬粘土层(有限厚度)下有软弱粘土层; ②砂性土层(有限厚度)下有软弱粘土层。若硬层的厚度较薄, 且其承载能力低于压桩荷载时, 桩靴就会穿透硬层进入软弱层, 致使桩腿插入速率失去控制, 造成桩腿损坏, 甚至钻井船倾复。若硬层较厚, 承载能力大于压桩荷载, 且安全系数 $F_s \geq 1.5$, 同时要对软弱层顶面处的强度进行验算, 若 $F_s \geq 1.0$, 为安全的。

1969年 Brown 和 Meyerhof 提出桩靴在上硬下软的粘性土层(图3(a))中的计算公式如下:

$$q_0 = 3s_{ur} \frac{H}{B} + 6s_{ub} + \gamma \frac{V}{A} \quad (8)$$

式中 s_{ur} 为硬粘土的不排水抗剪强度, kPa; s_{ub} 为软粘土的不排水抗剪强度, kPa; H 为硬土层厚度, m。

1980年 Hanna 和 Meyerhof 提出桩靴在上为砂层下为软粘土层(图3(b))中的计算公式如下:

$$q_0 = 6s_u + \frac{2\gamma_1 H^2}{B} (1 + \frac{2D}{H}) K_s \tan \phi + \gamma \frac{V}{A} \quad (9)$$

当桩靴插入如图3(c)所示情况时, 计算公式变为

$$q_0 = 6s_u + \frac{2HK_s \tan \phi}{B} (H\gamma_1 + 2\gamma_2 D) + \gamma \frac{V}{A} \quad (10)$$

式中 s_u 为 $B/2$ 范围内粘土不排水抗剪强度的平均值, kPa; ϕ 为砂土的内摩擦角($^\circ$); K_s 为冲剪系数; 其它符号如图3所示。

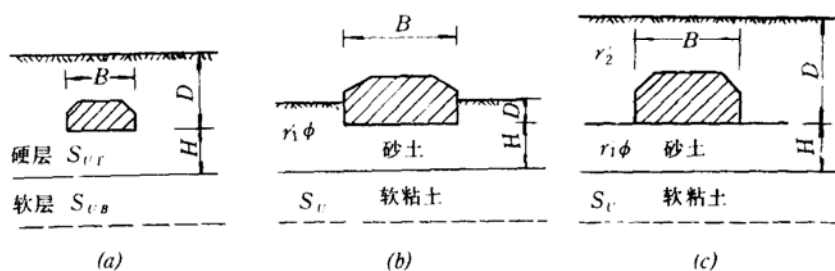


图3 桩靴插入土层的情况

上硬下软的成层土承载力还可用应力扩散传递法计算(图4)。图中应力是以1:3的斜率传递的。在软层顶面形成一个假想的基础,其承载力为

$$Q_f = A_f \cdot s_{UB} \cdot N_{cf}$$

而实际基础的承载力为

$$Q_n = A \cdot s_{UT} \cdot N_m$$

在平衡条件下,两式应相等,则

$$N_m = \frac{A_f}{A} \cdot \frac{s_{UB}}{s_{UT}} N_{cf} \geq N_c \quad (11)$$

式中 N_m 为修正的承载力系数,它取决于两层土的抗剪强度之比、硬层土的相对厚度 H/B 和基础的形状; A 为实际基础的断面积; A_f 为假想基础的断面积; N_{cf} 为假想基础的承载力系数,它随扩散斜率的不同而异; B , B' , H 和 D 如图4所示。

根据 Skempton (1951) 提出的 q_0 计算公式,由图4可导出上硬下软的成层土中的承载力公式如下:

$$q_0 = \frac{A_f}{A} s_{UB} \cdot N_{cf} + \gamma \frac{V}{A} \quad (12)$$

由式(12)求得的 q_0 值不能大于硬层的 q_0 计算值。斜率的选择可视硬层土的性质和强度的大小而定。在渤海,硬层为砂土时,斜率一般取1:2;硬层为粘土时取1:3。

当桩靴插在两土层交界面上时(图5),可根据上下土层的性质分别计算各自的极限承载力,再相加。即

$$q_u A = q_{u1}(A - A_2) + q_{u2} A_2 \quad (13)$$

式中 A 为桩靴最宽处横截面面积, m^2 ; A_2 为在交界面上基础面积, m^2 ; q_{u1} , q_{u2} 为用 Skempton 公式计算的上、下土层的极限承载力, kPa 。

若下面的硬层为砂土时,应用 Terzaghi 和 Peck 公式计算。

4. 其它计算公式

在渤海,用修正的 Terzaghi 公式^[5]也曾得到较好的效果。

$$q_0 = \alpha c + \beta \gamma'_1 B N_r + \gamma'_2 D N_q \quad (14)$$

式中 q_0 为极限承载力; c 为桩靴计算断面下土的粘聚力; γ'_1 为桩靴计算断面下土的浮容重; γ'_2 为桩靴计算断面至海底泥面间土的浮容重; D 为桩靴计算断面处的埋深; N_c , N_r , N_q 为承载力系数; α , β 为基础形状系数,圆形 $\alpha = 1.3$, $\beta = 0.3$ 。

当考虑水平力影响时,可用 Hansen 公式计算。

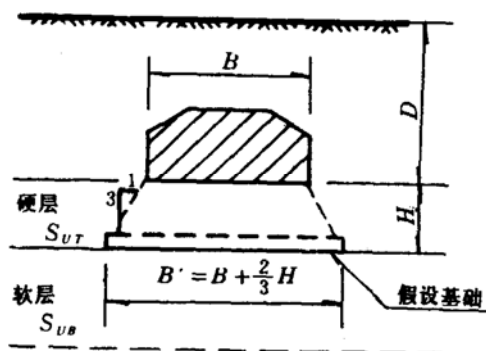


图4 应力扩散传递法

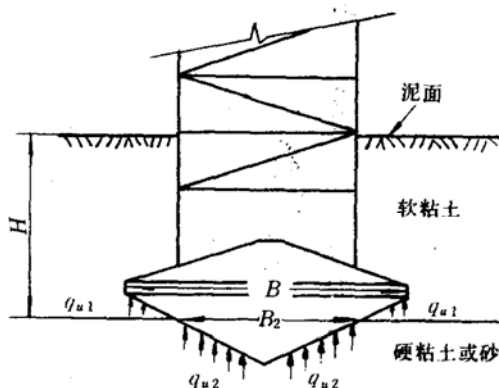


图5 桩靴在两土层交界面上

(二) 不带靴的桩脚插深计算

使用单桩轴向极限承载力公式^[6]

$$Q = Q_f + Q_p = fA_s + q_u A_p \quad (15)$$

式中 Q_f 为桩侧壁摩阻力, kN; Q_p 为桩端阻力, kN; A_s 为桩侧壁表面积, m^2 ; A_p 为桩端截面积, m^2 ; f 为桩侧壁单位摩擦力, kPa; q_u 为桩端单位极限阻力, kPa。

1. 桩腿插入粘性土层中

桩腿侧壁与土的摩擦力 f 应小于或等于粘土不排水抗剪强度 s_u 值。

$$\text{桩端阻力: } q_u = N_c \cdot s_u \quad (16)$$

式中 s_u 为土的不排水抗剪强度, kPa; N_c 为承载力系数, 通常按 $N_c = 9$ 采用。

2. 桩腿插入砂土层中

土与桩侧壁摩阻力由下式计算:

$$f = K_0 p_0 \tan \delta \quad (17)$$

$$\text{桩端阻力: } q_u = p_0 N_q \quad (18)$$

式中 K_0 为土层侧压力系数, 一般取 0.5—1.0; p_0 为有效上覆土压力, kPa; δ 为土与桩壁摩擦角; ϕ 为土的内摩擦角; N_q 为承载力系数。

从式 (17)、(18) 看出: f, q_u 与 p_0 成正比关系, 而 p_0 随土层深度 D 的增加而增加, 因此, D 愈大, f 和 q_u 也愈大。但实际上到某一临界深度 D_{cr} 时, f 和 q_u 值就基本不再增大, 其上限值见表 2。

表2 不同粉、砂类土 f , q_u 的上限值

土 类	ϕ (°)	δ (°)	$f_{\max}$ (kPa)	N_q	$q_{u\max}$ (MPa)
砾 砂	40	35	117	50	12.2
纯 砂	35	30	98	40	9.76
粉 砂	30	25	83	20	4.88
砂质粉土	25	20	68	12	2.93
粉 土	20	15	49	8	1.95

四、拔桩阻力的计算

钻井船的桩腿从海底土中拔出, 要克服自重和土的阻力。吸附力可用高压射水予以破坏, 故计算时可不考虑。

(一) 带靴的桩腿上拔力

1962年, Turer对带靴的桩腿上拔力提出如下计算公式^[7]:

$$Q_{ut} = 2.1(s_u)^{0.5} \left(\frac{D}{B}\right)^2 (B^2 - B_0^2) \quad \frac{D}{B} < 1.5 \text{ 时} \quad (19)$$

$$Q_{ut} = 5.8 s_u (B^2 - B_0^2) \quad \frac{D}{B} \geq 1.5 \text{ 时} \quad (20)$$

式中 Q_{ut} 为极限上拔力, kN; s_u 为土的不排水抗剪强度, kPa; D 为桩靴插入深度, m; B 为桩靴最宽处直径, m; B_0 为桩腿直径, m。式中均未考虑桩腿和桩靴的自重。

1975年 Tetior 通过模拟试验得出如下结论: 在砂土中, 桩靴插入很浅时, 凸顶桩靴比平顶桩靴阻力大10%—17%; 在粘性土或砂土中, 当桩靴插入较深时, 凸、凹或平顶桩靴的拔桩阻力均相等。

渤海石油公司采用式(21)计算带靴的桁架型桩腿的拔桩力, 其误差仅为3%—5%。

$$Q_{ut} = W + \gamma' V + s_u A \quad (21)$$

式中 W 为桩腿和桩靴的自重, kN; γ' 为桩靴以上回填土的浮容重, kN/m³; V 为桩靴以上回填土的体积, m³; A 为桩靴以上土的圆柱体表面积, m²; s_u 为土的不排水抗剪强度, kPa, 若时间较短, 可用扰动土强度值。

(二) 不带靴的桩腿上拔力

不带靴的桩腿上拔力可等于桩侧壁摩阻力^[6]加腿自重。

五、桩脚插深资料的分析

(一) 带靴的桩脚插深计算结果的分析

我们用 Skempton (下称S式)、Terzaghi (下称T式) 公式, 并部分用 Hansen 公式 (下称H式), 在同一土质条件下, 对带靴的桩脚插深分别进行了计算。计算结果与32(×3条腿) 例

实测值作了对比(见图6)。

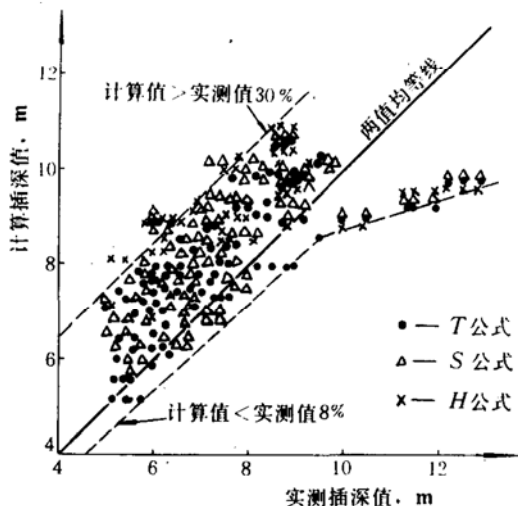


图6 带桩靴的插深计算值与实测值

位的土质调查资料用S式、T式和H式分别做了计算, 且同实测压桩曲线进行了比较(见图7)。

三个公式的计算结果, 总的变化趋势是一致的。从图6看出: 桩靴插深在9.5m以内时, 计算值往往大于实测值, 最大误差为30%, 小于实测值的出现率很少, 其最大误差为8%; 当桩靴插入9.5m以下时, 计算值往往小于实测值。

从渤海土质情况看, 海底9.5m以内多为淤泥和淤泥质粘土或粉质粘土, 一般土质很软, 灵敏度和触变性较高, 土样易扰动, 其误差是由量测土的强度值偏低而造成的^[8]。

另外, 我们在渤海BZ 27-4-A井处用渤海10#钻井船做压桩试验, 并根据该井

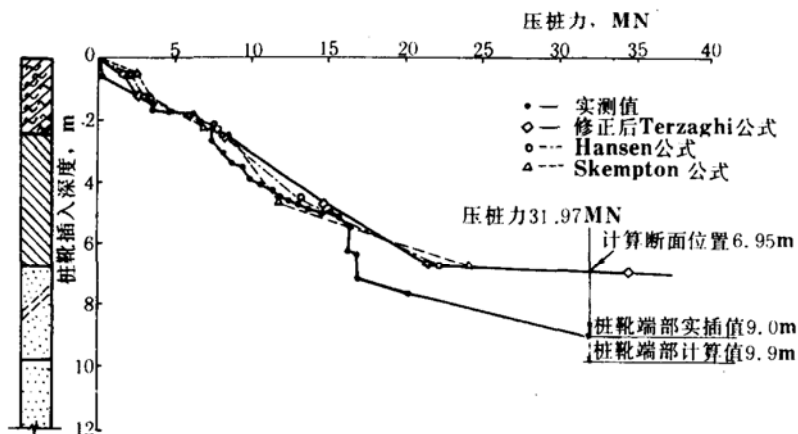


图7 实测压桩曲线与计算曲线

从图7看出, 三个公式计算的曲线与实测曲线的变化趋势是一致的, 且与土层的变化也较吻合。

通过以上的对比分析, 我们介绍的桩靴插深计算方法在渤海是适用的。不过, 当桩靴计算插深在9.5m以内时, 应结合渤海的土质特点作适当修正。

(二) 不带靴的桩脚插深计算结果的分析

不带桩靴的桩腿插深实测30(×4条腿)例, 对比结果表明, 计算值与实测值最大误差约30%, 个别较大(见图8)。特别是在同一井位, 4条桩腿之间插深也相差很大。如渤海1#钻井船在渤南一井作业时, 桩腿插深最大的相差10m。其原因, 一是这种桩脚型式的桩腿在压桩过程中对土质、土层变化比较敏感^[9]; 二是渤海的土质、土层分布的不均匀性和复杂性。

经验告诉我们, 计算时必须把井位一定范围内的土质、土层情况搞清楚, 合理确定土质参数, 方能得出较好的效果。

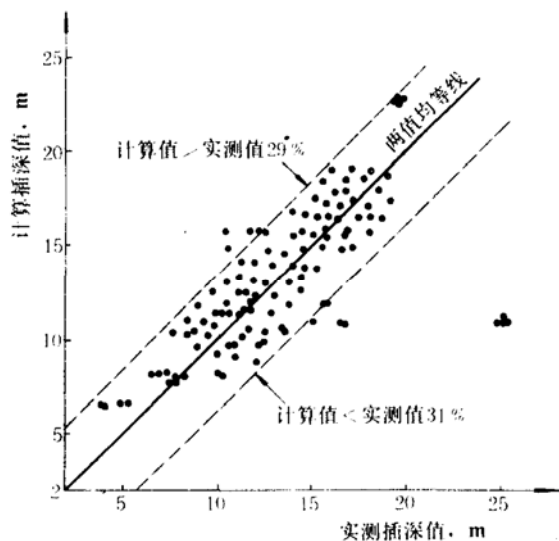


图8 不带桩靴的插深计算值与实测值

为验证式(15)的计算精确度, 用渤海7[#]钻井船做压桩试验。结果见图9。

从图9看出: 计算值稍大于实测值, 误差+6%; 两曲线的变化趋势同土层的变化也很吻合。由此说明, 式(15)在渤海可以使用。但对土的强度值的选用(特别是互层土)要慎重, 压桩时要避免人为因素的影响。

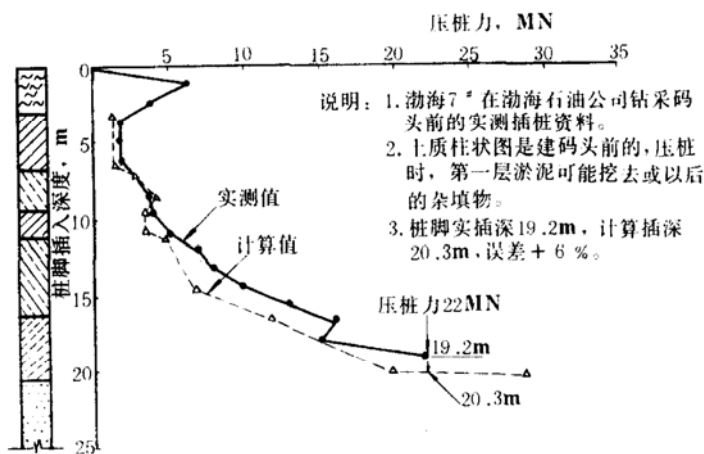


图9 实测压桩曲线和计算曲线

六、结 语

1. 独立基础带桩靴的自升式钻井船的桩脚插深计算, 建议使用 Skempton 公式(粘性土)、Terzaghi 和 Peck 公式(砂性土)。同时也可使用修正的 Terzaghi 公式。

当使用上述公式计算的桩脚插深值在9.5m以内时, 应作适当修正。

2. 独立基础不带桩靴的自升式钻井船的桩脚插深计算, 可使用单桩轴向承载力公式。

3. 拔桩力计算, 对带靴的桩腿使用式(21); 不带靴的桩腿上拔力可等于桩侧壁摩阻力和桩腿自重之和。

4. 根据多年来自升式钻井船在渤海各海域的作业情况、土质条件、桩腿实插资料, 我们认为, 独立基础带桩靴的自升式钻井船在渤海比较适用。

5. 从国内外自升式钻井船发生的事故中可知, 桩脚穿透事故占了很大比例。因此, 掌握硬层的埋藏深度、厚度、性质以及硬层下有无软弱层等问题非常重要。经计算, 当发现有穿透硬层的可能性, 而从勘探石油的角度又不宜移井位时, 可增加预压载或高压射水, 使桩脚穿过硬层进入稳定层, 但要考虑桩腿长度和能否拔出等问题。

6. 海底土质是影响钻井船桩脚插深的主要因素。因此, 必须重视土质调查工作, 加强原位测试, 提高室内试验技术, 以便获得更接近实际的土质参数。同时要结合地球物理调查资料, 对海底地形、地貌、土质、土层等作综合分析评价。

参 考 文 献

- [1] Young, A. G., et al, *Foundation Performance of Offshore Jack-up Drilling Rigs*, Presented at the ASCE Annual Convention in New Orleans, Louisiana, October, 1982, pp. 1-2.
- [2] 邢 延、吴 思、姜渭渔, “渤海六号”抗滑移的初步设想, 海洋石油, No. 4, 1982, pp. 61-72.
- [3] McClelland, B., et al, *Avoiding Jack-up Rig Foundation Failures*, Presented at the Symposium on Geotechnical Aspects of Offshore and Nearshore Structures, Bangkok, Thailand, Decemer 1981, pp. 15-18.
- [4] Endley, S. N., *Prediction of Jack-up Rig Footing Penetration*, OTC 4144, 1982, pp. 285-289.
- [5] 矢作枢, 土と基礎の設計計算演習(第3回改訂版), 日本土质工学会, 1978, pp. 211-252.
- [6] 中华人民共和国船舶检验局, 海上固定平台入级与建造规范, 北京, 1983, pp. 75-80.
- [7] McClelland Engineers, inc. Geotechnical Consultants, *Jack-up Rig Foundation Analysis Bohai Area*, Houston, Texas, July 1983, pp. 6-8.
- [8] 邢 延, 渤海南部海底土的工程性质, 中国海上油气(工程), Vol. 1, No. 3, 1989, pp. 17-25.
- [9] 交通部第三航务工程局编, 压桩, 人民交通出版社, 1974, pp. 1-13.

Calculation of Penetration Depth of Jack-up Leg Footing

Xing Yan

(Engineering and Design Company of BOC)

Abstract

BOC has accumulated a great deal information of seafloor soil and pratical penetration depth of leg footing of jack-up for many years. On the basis of analysing these informations and Comparing investigative data with the results of the theoretical calculation, the calculation methods of penetration depth into various seafloor soils were described systematically. And calculation formulae for the Bohai seafloor soil and selection of the types of jack-up applicable for the operation in Bohai were proposed in this paper.