

DOI: 10.11779/CJGE201402005

利用 CPTU 进行自升式钻井平台砂土插深预测分析研究

李 靓¹, 王耀存¹, 吴秋云², 姜 华², 周杨锐²

(1. 天津大学建工学院岩土所, 天津 300072; 2. 中海油服物探事业部, 天津 300451)

摘要: 随着海洋工程的发展, 自升式钻井平台被应用于水深更大, 环境条件更加恶劣的海域。在这种情况下, 自升式钻井平台桩靴的插深预测就成为钻井平台设计计算的重点和难点。原有的计算方法已经不能满足实际工程的需要。为了提高预测精度, 根据桩靴贯入砂土的特点, 采用球孔扩张理论模拟了桩靴贯入过程中的应力场变化, 推导出了该条件下球孔扩张的极限扩孔压力的理论解。在此基础上对钻井船桩靴与静力触探探头受力进行了对比, 推导了利用孔压静力触探试验数据计算桩靴承载力的理论表达式。为了验证公式的可靠性, 选取中国南海 6 个实际工程, 分别利用传统方法以及本文公式对插桩深度进行了预测, 并将预测结果与实测结果进行对比, 结果显示方法和实测结果吻合较好。

关键词: 桩靴; 静力触探; 球孔扩张; 插深预测

中图分类号: TU413 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)02-0301-06

作者简介: 李 靓(1970-), 女, 天津人, 博士, 副教授, 主要从事海洋土的工程性质、土与结构物相互作用以及海洋工程等方面的研究与教学工作。E-mail: lisa@tju.edu.cn。

Penetration depth prediction of spudcan in sand based on CPTU data

LI Sa¹, WANG Yao-cun¹, WU Qiu-yun², JIANG Hua², ZHOU Yang-rui²

(1. Geotechnical Institute, School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Geophysical Division, China Oilfield Services Limited, Tianjin 300451, China)

Abstract: With the development of offshore engineering, jack-ups have moved into deeper and harsher environment, hence increasing need to understand the behaviors of jack-ups and to develop more reliable analysis techniques. In order to improve the prediction accuracy, based on the characteristics of the spudcan penetration in sand, the spherical cavity expansion theory is used to analyze the penetration resistance of spudcan under no backflow condition. At the same time, this method is also used to present cone tip resistance of CPTU. According to the analytical solutions, the relationship between spudcan penetration resistance and cone resistance of CPTU is established. In order to verify the reliability of the relationship, the spudcan penetration depths of six jack-ups in South China Sea are predicted by using the traditional method and the proposed method respectively. The predicted results are compared with the measured data. It is shown that the results by the proposed method are in better agreement with the measured data than those by the traditional method commonly used today.

Key words: spudcan; CPTU; spherical cavity expansion; penetration depth prediction

0 引言

自升式钻井平台是一种常用的海洋平台结构形式。到 2012 年全球接近 77% 的钻井平台将超过设计使用年限。随着钻井平台的逐年陈旧, 加上市场的需要, 近年来钻井平台的建造前景乐观, 且建造的自升式平台大部分是能在 100 m 水深处工作的深水钻井平台^[1]。自升式平台到达海上工作位置后, 需将平台主体升离海面, 并使支撑的桩腿插入海底岩土中一定深度, 以保证平台在各种工作载荷和自然环境载荷的作用下都能安全工作。其就位、预压以及钻井过程如图 1 所示。对钻井船的插深的准确预测不仅决定着钻井

船就位时的安全, 而且也对使用过程中钻井船的安全评价具有重要的意义。

从钻井船作业过程(图 1)可以看到, 对其插桩深度的预测实质上是一个地基承载力问题。而对于这一问题, 目前国际上还没有统一的、能够得到普遍接受的规范。一般采用针对不同类型土的极限承载力公式进行计算^[2]。

目前常用的进行钻井船插深预测的方法主要有 Skempton 法、Hansen 法等。在实际工程中, 由于土质

条件、地区经验、试验方法等原因造成钻井船插深的预测精度相比于其他固定式平台承载力计算精度明显偏低^[3-4]。

为了规范相应的计算, 1997年造船工程师协会(SNAME)发布了“Guidelines for the Site Specific Assessment of Mobile Jack-Up Units”, 推荐了钻井船插深预测方法(一般称为SNAME法)^[5], 并于2002年对相关方法进行了修正^[6]。为了提高预测的准确性, 近年来很多学者进行了相关研究。Houlsby考虑了土体不排水强度随深度的变化以及桩靴结构形状和粗糙度对承载力的影响^[7]。Hossain等利用离心模型试验方法考虑土体流动模式对承载力公式进行了修正^[8]。Tho等采用有限元法对这一问题展开了探讨^[9]。这些研究都是围绕承载力公式展开的。鉴于这一方法的局限性, 有学者开始从其他角度研究这一问题。Lee等提出利用标贯试验结果进行钻井船插深预测^[10]。Britta等提出根据CPTU数据来预测桩靴在钙质砂中的插深^[11]。

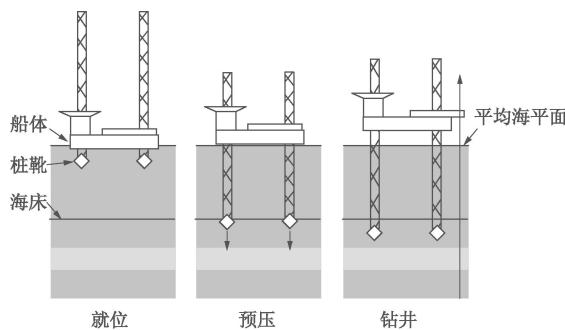


图 1 钻井船就位—预压—钻井过程

Fig. 1 Procedure of jack-up installation

随着海上孔压静力触探(CPTU)在海洋工程当中越来越广泛的应用, 由于CPTU试验方法自身的优越性, 其试验结果已经被广泛应用到很多领域, 包括土层划分、土质参数确定等等^[12-14]。在承载力方面, 国内外学者在CPTU指标应用于桩基承载力确定方面做了不少的尝试^[15-18]。对于浅基础承载力的确定也有相关的经验公式^[19]。但利用CPTU的结果进行钻井船插深预测国内外进行的很少, 仅在2012年Britta等^[11]根据离心模型试验和有限元计算得到的数据, 通过数据拟合的方法建立了在钙质砂中CPTU锥尖阻力和承载力之间的经验关系。由于CPTU和钻井船桩靴在贯入方式上的相似性, 使得利用CPTU预测桩靴插深成为可能。探讨利用CPTU的结果进行钻井船插深预测将具有重要的理论价值和实际意义。

本文采用球孔扩张理论建立了钻井船桩靴承载力与CPTU的锥尖阻力的关系, 利用这种关系进行了钻井船插深预测, 并将这种预测结果和实测结果进行了比较。

1 钻井船桩靴的贯入模式

为了对桩靴的贯入模式进行研究, 进行了室内模型试验, 模型率为1:100。试验用土为南海水深200 m处现场获取的粉质黏土, 试验前对土体进行饱和固结, 然后取制备好的土样测量其物理指标: 密度=1.92 g/cm³, 干密度=1.52 g/cm³, 含水率=26.6%, 塑限=22.6%, 塑性指数=13.6。采用微型十字板测量经过饱和固结后的土体强度, 其不排水强度 S_u 沿深度 h 的分布见图2(b), 图中A, B, C三点的位置如图2(a)。

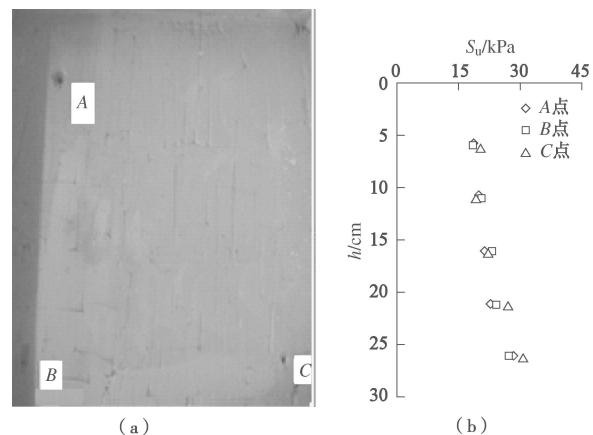


图 2 土体的不排水强度

Fig. 2 Undrained shear strength of soils

试验设备主要包括模型箱、液压装置、摄像装置和荧光片。其中模型箱的功能是供在其中填筑散体材料模型和安装固定有关设备(例如光源灯、摄像头等)。本次试验使用的模型箱的一个侧面由透明的有机玻璃制成, 便于观察和拍摄。模型箱尺寸长×宽×高为0.8 m×0.6 m×0.5 m。

液压泵为桩靴下压提供动力。液压泵通过油管与液压缸筒连接, 缸筒内的油压驱动钢芯使桩靴向下运动, 连接好的试验装置见图3。液压泵提供的油压值通过汇电滑环实时传输给数采计算机。

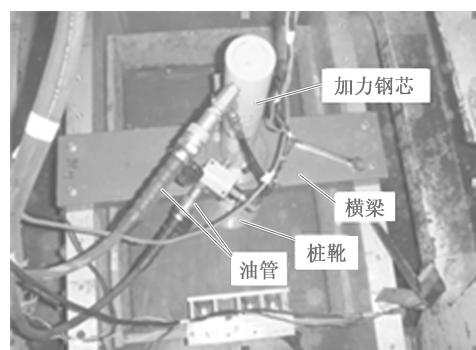


图 3 试验加载装置

Fig. 3 Test loading devices

为了能够观察到桩靴贯入时桩靴下土体的位移状况, 探讨桩靴贯入机理, 桩靴采用了半桩靴模型(见

图4(a), 其侧面紧贴模型箱侧壁。同时在模型箱透明玻璃面分行设置荧光片, 制作好的模型见图4(b)。

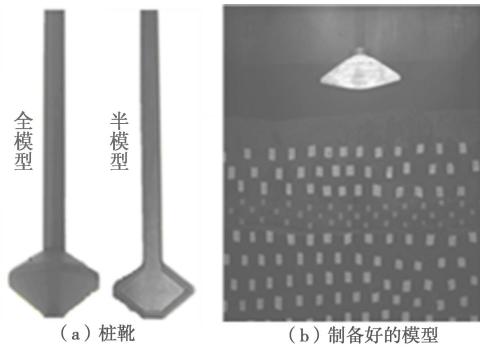
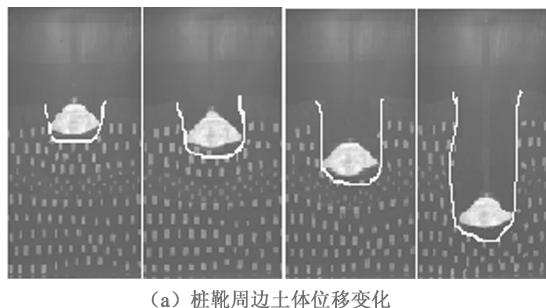


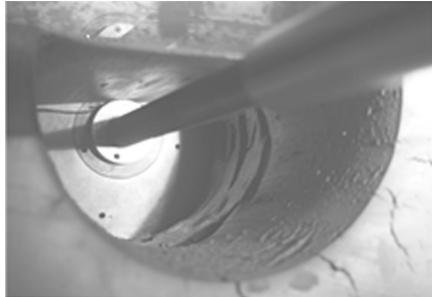
图4 试验模型

Fig. 4 Model of tests

在上述试验条件下进行桩靴的压入试验, 试验过程中, 桩靴周边土体的位移变化情况见图5(a)。试验结束时桩靴以及周围土体的情况见图5(b)。



(a) 桩靴周边土体位移变化



(b) 桩靴及土体情况

图5 桩靴贯入过程

Fig. 5 Procedure of spudcan penetration

从图5可以看到, 由于土体强度较高, 在桩靴插入过程中没有发生回填。在贯入过程不发生回填的情况下, 其贯入模式可用图6表示。在此种模式作用下, 可采用球扩张理论对桩靴的贯入进行分析计算。

2 孔扩张理论求解扩张力

由前面的试验可以看到, 桩靴贯入过程中不发生回填的情况下, 可以采用孔扩张理论求解桩靴承载力问题。在实际工程中, 在黏土中插桩, 由于入土深度较大, 一般在插桩过程中都会发生回填或部分回填。而在砂土中插桩时, 回填较少发生^[6]。因此在此针对

砂土中桩靴的插桩情况, 采用球扩张理论进行相应的模拟分析。计算简图见图7。

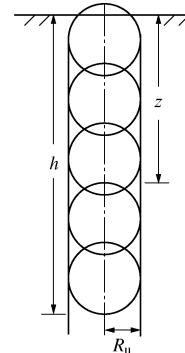


图6 不回填情况下的桩靴贯入模式

Fig. 6 Penetration mode of spudcan without backflow

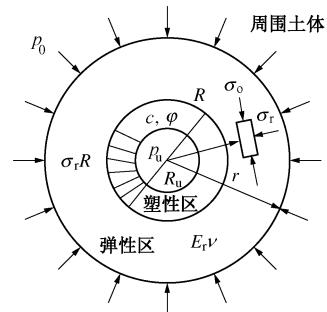


图7 球孔扩张

Fig. 7 Spherical cavity expansion

球孔扩张的基本方程如下:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + 2\frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad . \quad (1)$$

M-C 屈服条件: $(\sigma_r - \sigma_\theta) = (\sigma_r + \sigma_\theta) \sin \varphi + 2c \cos \varphi$ 。边界条件: $r_{i=u} = R_u = p_u$, $r_{i=\infty} = R_\infty = p_0$ 。式中, σ_r , σ_θ 分别为径向应力和周向应力, c , φ 为土的黏聚力和内摩擦角, r 为距孔心的距离, p_u 为极限扩孔压力, p_0 为土中初始应力。

根据上述方程, 得到极限扩孔压力为^[20]

$$p_u = \frac{3(1 + \sin \varphi)}{3 - \sin \varphi} (p_0 + c \cdot \cot \varphi) \left(\frac{R_p}{R_u} \right)^{\frac{4 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} - c \cdot \cot \varphi \quad . \quad (2)$$

令 $I_\pi = \frac{R_p}{R_u}$, 其中 R_p 为塑性区半径, R_u 为扩孔半径。

$I_\pi = \frac{I_r}{1 + I_r \Delta}$, 式中 $I_r = \frac{G}{S}$, I_r 为刚度指标, G 为弹性剪切模量, S 为土体抗剪强度, Δ 为塑性区平均应变。要得到 p_u 的数值就要确定 Δ 的数值, Δ 的数值可由下式确定^[21]:

$$\Delta = \frac{3\epsilon_{\theta R} (I_\pi - A I_\pi^{\frac{1+\alpha}{3}} - B I_\pi^{\frac{1-\beta}{3}} - D)_{\pi}}{I_\pi - 1} \quad , \quad (3)$$

$$I_{tr} = \{1 - 3\varepsilon_{\theta R} (I_{tr} - A I_{tr}^{\frac{1+\alpha}{3}} - B I_{tr}^{\frac{1-\beta}{3}} - D)\} / m, \quad (4)$$

式中, $\varepsilon_{\theta R} = \frac{\sin \varphi}{G(3 - \sin \varphi)} (p_0 + cc \tan \varphi)$, $\alpha = 2/M$, $M = (1 + \sin \psi) / (1 - \sin \psi)$, $\beta = 1 - [2(N-1)/N]$, $N = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi)$, $A = T / (1 - \alpha)$, $B = -Z / (1 - \beta)$, $Z = 6\chi / (\alpha + \beta)$, $\chi = [2(1 - \nu) - 2\nu(M + N) + MN] / D$, $D = 1 - A - B$, $m = \varepsilon_{\theta R}^3 - 3\varepsilon_{\theta R}^2 + 3\varepsilon_{\theta R}$, 其中, ψ 为剪胀角, ν 为泊松比。

由式(3)、(4)可以看到, Δ 的数值与土体中初始应力 p_0 以及土体的 c , φ , G , ψ , ν 有关。对于相同的土体和初始应力场, I_{tr} 的数值相同。

在砂土中, 当 $c=0$ 时, 式(2)可以写为

$$p_u = \frac{3(1 + \sin \varphi)}{3 - \sin \varphi} p_0 I_{tr}^{\frac{4 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}}. \quad (5)$$

3 桩靴与探头贯入阻力的球扩张解

当假定桩靴或圆锥探头在无限弹塑性体中的贯入过程等同于球孔从初始零半径扩张至桩靴或探头的半径, 此时, 桩靴和探头的受力如图8所示。

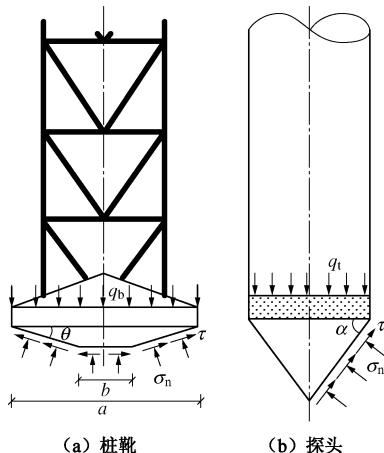


图 8 桩靴和探头受力

Fig. 8 Proposed stresses acting on spudcan and cone

根据破坏时桩靴和探头上力的平衡可以得到

$$\text{桩靴} \quad q_b = \sigma_n (1 + \frac{a-b}{a} \tan \varphi \tan \theta), \quad (6)$$

$$\text{探头} \quad q_t = \sigma_n (1 + \tan \varphi \tan \alpha), \quad (7)$$

式中, σ_n 即为极限扩孔压力 p_u , q_b 为桩靴的承载力, q_t 为修正的锥尖阻力, $q_t = q_c + (1-\eta)u$, 其中, q_c , u 为测量的锥尖阻力和孔压, η 为探头面积修正系数, 在海洋 CPTU 中, 采用的探头 $\eta = 0.75$ 。

式(6)、(7)中的 σ_n 相等, 将式(5)代入式(6)、(7)则得

$$q_b = q_t \left(\frac{1 + \frac{a-b}{a} \tan \theta \tan \varphi}{1 + \tan \alpha \tan \varphi} \right). \quad (8)$$

由此可以看到, 当桩靴尺寸、探头规格明确后, 桩靴承载力和土体的摩擦角有关。式(8)可写为

$$q_b = A q_t, \quad (9)$$

$$\text{式中, } A = \frac{1 + \frac{a-b}{a} \tan \theta \tan \varphi}{1 + \tan \alpha \tan \varphi}.$$

确定上述 A 值, 选择中国目前最大的自升式钻井平台 941 的桩靴型号, 即直径 $a=18.0$ m, $b=4.9$ m, $\theta=10^\circ$, 和目前中国使用的海洋 CPTU 探头规格, 即探头顶角 $\alpha=60^\circ$ 、圆锥底面积为 10 cm^2 、侧壁摩擦筒表面积为 150 cm^2 的探头。代入可得

$$A = \frac{1 + 0.12 \tan \varphi}{1 + 1.73 \tan \varphi}. \quad (10)$$

4 工程实例分析

根据上面的理论分析方法, 结合工程实例对本文提出的利用 CPTU 确定承载力的公式进行验证。

选择钻井船 941 在南海 6 个以砂土为主的场地的插桩情况进行计算分析。分别采用传统方法和本文提出的 CPTU 方法对钻井船插深进行预测, 并将预测结果与实测结果进行对比。在此以场地一的情况为例, 说明验证过程。

场地一的土层分布见表 1。各个土层的基本物理力学指标见表 2。现场 CPTU 测试结果见图 9。

表 1 场地一的土层分布情况

Table 1 Description of soil layers of site 1

| 层号 | 深度/m | 土层描述 |
|----|-----------|--------------|
| 1 | 0~5.8 | 松散到中密实的粉质细砂 |
| 2 | 5.8~8.7 | 稍硬的粉质黏土 |
| 3 | 8.7~12.4 | 中密实的砂质粉土 |
| 4 | 12.4~14.9 | 密实的细砂 |
| 5 | 14.9~20.1 | 中密实的粉质细砂 |
| 6 | 20.1~25.4 | 硬的粉质黏土 |
| 7 | 25.4~29.1 | 非常密实的细砂和细到粗砂 |
| 8 | 29.1~38.8 | 硬的黏土 |
| 9 | 38.8~40.9 | 密实的粉土 |

表 2 场地一土层的物理力学性质

Table 2 Physical and mechanical parameters of soils of site 1

| 层号 | 深度/m | | 浮重度 /(kN·m ⁻³) | 不排水 强度/kPa | 摩擦角 /(°) |
|----|------|------|-------------------------------|---------------|-------------|
| | 从 | 到 | | | |
| 1 | 0 | 5.8 | 8.8 | | 25 |
| 2 | 5.8 | 8.7 | 8.1 | 30~40 | |
| 3 | 8.7 | 12.4 | 8.8 | | 20 |
| 4 | 12.4 | 14.9 | 7.1 | | 30 |
| 5 | 14.9 | 20.1 | 8.7 | | 25 |
| 6 | 20.1 | 25.4 | 7.5 | 62 | |
| 7 | 25.4 | 29.1 | 10.1 | | 30 |
| 8 | 29.1 | 34.1 | 8.8 | 52 | |
| 9 | 34.1 | 38.8 | 8.1 | 65 | |
| | 38.8 | 40.9 | 7.4 | | 25 |

传统方法计算不同深度处的承载力公式根据土质的不同而有所不同, 在此对于黏土采用 Skempton 法^[22],

对于砂土, 其计算公式如下:

$$F_v = (0.5\gamma'BN_\gamma s_\gamma d_\gamma + p'_0N_q s_q d_q)A, \quad (11)$$

式中, $N_\gamma = 2(N_q + 1)\tan\varphi$, $N_q = e^{\pi\tan\varphi} \tan^2(45 + \frac{\varphi}{2})$,

$s_\gamma = 1 - 0.4(B/L)$ (对于圆形基础 $s_\gamma = 0.6$), $d_\gamma = 1$,

$s_q = 1 + (B/L)\tan\varphi$,

$$d_q = \begin{cases} 1 + 2\tan\varphi(1 - \sin\varphi)^2 D/B & (D/B \leq 1) \\ 1 + 2\tan\varphi(1 - \sin\varphi)^2 \arctan(D/B) & (D/B > 1) \end{cases}$$

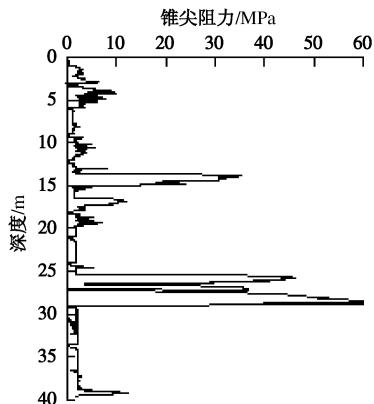


图 9 CPTU 锥尖阻力随深度的变化

Fig. 9 Change of CPTU cone resistance with depth

涉及到穿刺分析的, 采用 3:1 穿刺分析法^[23]。

利用上述各类公式计算可以得到的场地一的承载力随深度变化曲线以及预测深度; 同时采用本文提出的方法, 利用式(9)、(10)计算砂土中的承载力, 而黏土中承载力的计算采用如下公式:

$$q_b = 0.36q_t + 0.027, \quad (12)$$

有关式(12)的推导将另文做详细介绍, 计算结果见图 10。

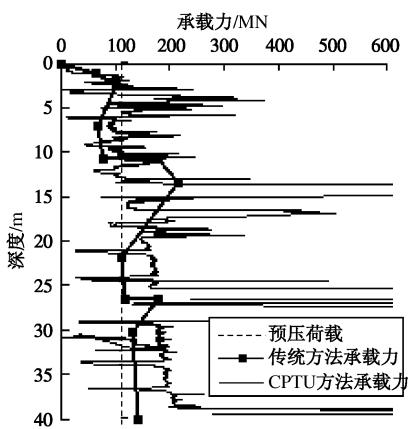


图 10 不同方法的桩靴插深预测

Fig. 10 Penetration depths predicted by different methods

桩靴贯入最大的预压荷载为 112 MN。在贯入过程中, 随着深度的变化, 土体所提供的承载力也会发生相应的变化, 图 10 反映了土体不同深度处承载力的变化情况。当预压荷载和土体承载力达到平衡时, 桩靴不再下沉。从图中可以看到, 采用传统方法和采用

本文提出的 CPTU 方法计算承载力得到的预测深度存在明显的差异。采用传统的承载力计算公式得到的预测插深在 11 m 附近; 而从采用 CPTU 方法得到的承载力随深度变化的曲线可以看到, 本地土层在 2~6 m 左右存在有明显的硬层, 同时硬层下方的土体的承载力也与最大预压荷载相当, 桩靴穿越此硬层的可能性不大。考虑插桩过程的影响, 桩靴最终的停留位置应该在 2.0~5.8 m。

现场实测记录显示, 钻井船 3 个桩腿的插桩深度在 3.6~3.9 m, 实测结果与 CPTU 结果吻合较好, 明显优于传统计算的预测结果。同时, CPTU 的预测结果数据点较多, 因而可以比较详细的了解承载力随深度变化情况, 有利于对插桩过程作出更加详细的分析。

采用相同的方法分别对其余 5 个工程进行了计算分析。CPTU 预测深度, 传统方法预测深度以及与实测数据的比较见表 3。从表 3 中可以看到采用本文提出的 CPTU 方法进行预测的结果总体上明显优于传统方法的计算结果。

表 3 不同方法得到的插深预测结果比较

Table 3 Comparison between predicted depths by different methods and measured data

| 工程 | 传统预测 /m | CPTU 方法预测 /m | 实测 /m |
|-----|----------|--------------|---------|
| 场地一 | 10.8 | 2.0~5.8 | 3.6~3.9 |
| 场地二 | 11.7 | 1.0~4.2 | 3.9~4.2 |
| 场地三 | 4.7~9.5 | 8.2~10.1 | 9.0~9.5 |
| 场地四 | 2.0 | 1.0~3.4 | 3.7~4.3 |
| 场地五 | 5.2~7.0 | 6.7~9.3 | 7.3~8.5 |
| 场地六 | 6.0~19.1 | 5.1~6.6 | 7.0~9.8 |

5 结语

钻井船插深预测是钻井船设计计算当中的重点和难点。由于 CPTU 的贯入模式和桩靴的静压模式的相似性, 使得利用 CPTU 数据进行钻井船插深预测成为可能。本文的研究显示, 桩靴贯入过程中如果不发生回填或回填很少可以忽略时, 可以采用球孔扩张理论对桩靴承载力进行计算分析, 建立起桩靴承载力与 CPTU 锥尖阻力之间的关系, 从而进一步对桩靴入土深度进行预测。与传统计算方法相比, 利用 CPTU 数据预测的插桩深度与实测数据更加吻合。同时, 由于 CPTU 数据点较多, 采用这种方法可以更好地了解土体中承载力的变化情况, 从而有助于对插桩深度作出更加详细和客观的评价。

参考文献:

- [1] 窦培林, 杜训柏. 基于断裂力学的老龄化自升式平台可靠性分析[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2009, 23(5):

- 383 – 386. (DOU Pei-lin, DU Xun-bai. Reliability analysis of aged jack-up structures based on fracture mechanics[J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science)*, 2009, **23**(5): 383 – 386. (in Chinese))
- [2] 郑喜耀. 自升式钻井平台插桩深度计算及几个问题的探[J]. 中国海上油气, 2000, **12**(2): 18 – 21. (ZHENG Xi-yao. Jack-up drilling platforms and several issues of the inserted depth of the pile calculation[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2002, **12**(2): 18 – 21. (in Chinese))
- [3] SHARPLES B P M, BENNETT Jr W T, TRICKEY J C. Risk analyses of jack-up rigs[C]// Proceedings of 2nd International Conference on the Jack-Up Drilling Platform. Singapore, 1989: 101 – 123.
- [4] MORANDI A C, FRIEZE P A, BIRKINSHAW M, et al. Reliability of fixed and jack-up structures: a comparative study[C]// Proceeding of BOSS'97 Behaviour of Offshore Structures. Delft: Delft University of Technology, 1997: 111 – 126.
- [5] SNAME. Guidelines for site specific assessment of mobile jack-up units[S]. 1997.
- [6] SNAME. Guidelines for site specific assessment of mobile jack-up units[S]. 2002.
- [7] HOULSBY G T, MARTIN C M. Undrained bearing capacity factors for conical footing on clay[J]. *Géotechnique*, 2003, **53**(5): 513 – 520.
- [8] HOSSAIN M S, RANDOLPH M. New mechanism-based design approach for spudcan foundations on single layer clay[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, **135**(9): 1264 – 1274.
- [9] THO K, LEUNG C, CHOW Y, et al. Eulerian finite-element technique for analysis of jack-up spudcan penetration[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2012, **12**(1): 64 – 73.
- [10] LEE J, RANDOLPH M. Penetrometer-based assessment of spudcan penetration resistance[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, **137**(6): 587 – 596.
- [11] BIENEN B, PUCKER T, HENKE S. Cone penetrometer-based spudcan penetration prediction in uncemented carbonate sand[C]// Offshore Technology Conference, 23002-MS, Houston, 2012.
- [12] 曹 权, 施建勇, 雷国辉, 等. 基于波速孔压静力触探试验计算软土中静压桩的单桩极限承载力[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(1): 51 – 57. (CAO Quan, SHI Jian-yong, LEI Guo-hui, et al. Calculation of ultimate bearing capacity of jacked-in piles in soft soil based on seismic piezocone penetration tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(1): 51 – 57. (in Chinese))
- [13] 陆凤慈, 曲延大, 廖明辉, 等. 海上静力触探(CPT)测试技术的发展现状和应用[J]. 海洋技术, 2004, **23**(4): 32 – 36. (LU Feng-ci, QU Yan-da, LIAO Ming-hui, et al. The development status and application of in situ penetration test technology[J]. *Ocean Technology*, 2004, **23**(4): 32 – 36. (in Chinese))
- [14] 吴波鸿. 静力触探在渤海某海上平台场址工程勘察中的应用研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2008. (WU Bo-hong. The application of cone penetration test in Bohai offshore platform site investigation[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2008. (in Chinese))
- [15] CAI Guo-jun, LIU Song-yu, ANAND J P. Reliability assessment of CPTU-based pile capacity predictions in soft clay deposits[J]. *Engineering Geology*, 2012, **141/142**: 84 – 91.
- [16] 蔡国军, 刘松玉. 基于 CPTU 测试的桩基承载力预测新方法[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(增刊 2): 479 – 482. (CAI Guo-jun, LIU Song-yu. New method based on CPTU data to evaluate pile bearing capacity[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, **32**(S2): 479 – 482. (in Chinese))
- [17] 蔡国军, 刘松玉, ANAND J P, 等. 基于 CPTU 测试的桩基承载力可靠性分析[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(3): 404 – 412. (CAI Guo-jun, LIU Song-yu, ANAND J P, et al. Reliability assessment of bearing capacity of pile foundation based on CPTU data[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(3): 404 – 412. (in Chinese))
- [18] 俞 峰, 杨 俊. 砂土钢管桩承载力的静力触探设计方法[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(增刊 2): 349 – 354. (YU Feng, YANG Jun. Design methods for bearing capacity of steel pipe piles driven in sand by means of cone penetration tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(S2): 349 – 354. (in Chinese))
- [19] LUNNE T, ROBERTSON P K, POWELL J J M. Cone penetration testing in geotechnical practice[M]. London: Blackie Academic & Professional, 1997: 50 – 56.
- [20] YU Hai-sui. Cavity expansion methods in geomechanics[M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [21] 李永盛, 高广运. 环境岩土工程理论与实践[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002. (LI Yong-sheng, GAO Guang-yun. Theory and practice in environmental Geotechnics[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2002. (in Chinese))
- [22] SKEMPTON A W. The bearing capacity of clays[M]. London: Building Research Congress, 1951.
- [23] YOUNG A G, REMMES B D, MEYER B J. Foundation performance of offshore jack-up drilling rigs[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1984, **110**(7): 841 – 859.