

# 海洋桩基平台钢管桩自由站立深度 分析与问题探讨

刘双双

(中海油田服务股份有限公司,天津塘沽 300459)

**摘 要:**钢管桩基础是海洋导管架平台比较常用的一种基础形式,对钢管桩自由站立深度的准确预测是导管架平台安装项目中的一项重要工作。如果自由入泥深度评估不准确,现场施工时可能会导致钢管桩发生变形损坏,进而可能影响到整个油气田的生产运营。基于实际生产项目,讨论了钢管桩自由站立深度实际结果与预测值之间的关系,分析了造成实际结果的原因,论证了除自身结构性质外,钢管桩自由站立深度的影响因素主要包括海底地层性质和沉桩速度。海底浅部地层性质直接决定土对桩的承载力;沉桩速度决定土对桩的应力类型。实践表明,应用多种方法对钢管桩自由站立深度进行综合分析评价,能够考虑到多种影响因素,从而使评估工作更加全面,大大提高预测的准确度。

**关键词:**钢管桩;自由站立深度;地层性质;沉桩速度

**中图分类号:**TE42; P642.11<sup>+</sup>6; P752

**文献标识码:**A

**文章编号:**1002-3682(2017)03-0037-09

**doi:**10.3969/j.issn.1002-3682.2017.03.005

据统计,全世界在低于 300 m 水深条件下超过 90% 的平台采用导管架结构<sup>[1-2]</sup>,导管架平台一般采用开口式钢管桩基础,桩的主要功能是承受导管架和上部平台模块的全部荷载并固定平台位置。

海洋平台桩基础的安装大致分为吊桩入水自由站立、打入桩和固桩等主要程序。在海上施工时,按照不同的作业水深钢管桩有接桩和不接桩两种安装方式。无论采用哪种方式安装,在施工作业前都要对桩放置于海底面时自由贯入到泥面以下的深度(简称桩的自由站立深度)进行准确地分析计算。对桩自由站立深度的评估,不仅影响到钢管桩前期的设计建造,而且影响到桩后续的安装。如果桩的自由站立深度评估不准确,会直接影响打桩及导管架平台安装作业进度,有时甚至在吊桩入水后会造桩自身结构的损坏<sup>[3-4]</sup>,进而影响到平台建设及油田投产,造成巨大的经济损失。

在实际施工作业过程中,由于受到海底底质、海上环境因素和现场施工操作等多种因素的影响,桩自由站立深度的实际结果与预测值之间会产生一定的偏差。本文结合南海 2 个平台场址的桩基安装实例,探讨和分析实际施工作业过程中影响桩的自由站立深度的主要因素,并为以后相关的桩基安装施工作业提供参考和建议。

## 1 自由站立深度

### 1.1 定 义

桩的自由站立深度,是指钢管桩被放置于海底泥面上时,由于自身重量连同其他附加荷载重量,在不施加其他人为动力干扰的情况下,桩自由贯入到海底泥面以下的深度。在实际的施工作业中,按打桩锤放置在

收稿日期:2017-03-10

作者简介:刘双双(1984-),男,工程师,主要从事海洋工程勘察方面研究. E-mail:liushsh6@cosl.com.cn

(李 燕 编辑)

桩顶的前后,分为带锤和不带锤 2 种工况下的自由贯入深度。

## 1.2 分析方法

计算桩的自由站立深度通常有以下 2 种方法:

一种是根据钢管桩的桩身结构确定单桩重量,同时计算出钢管桩在海底面以下不同深度土层处的承载力,与钢桩连同其他附加荷载重量相等的承载力所对应的土层深度即为桩的自由站立深度。桩承载力的分析计算主要依据 API RP 2A(2000)规范建议的方法<sup>[5]</sup>。对于给定的深度,极限压承载力( $Q$ )等于桩侧壁表面摩擦力( $Q_f$ )与桩端承载力( $Q_p$ )的总和:

$$Q = Q_f + Q_p = f A_s + q A_p, \quad (1)$$

式中, $f$  为单位表面摩擦力, $A_s$  为埋入泥面以下桩侧总面积; $q$  为单位桩端承载力; $A_p$  为桩端面积。总的桩端承载力( $Q_p$ ),不应大于桩内土塞的承载力。关于单位表面摩擦力  $f$  和单位桩端承载力  $q$  在 API 规范中也给出了相应的计算方法。

1) 单位表面摩擦力  $f$

对于黏性土:

$$f = \alpha \cdot c; \quad (2)$$

式中, $\alpha$  为黏聚力系数,计算方法为

$$\alpha = \begin{cases} 0.5 \cdot \psi^{-0.5} & (\psi \leq 1) \\ 0.5 \cdot \psi^{-0.25} & (\psi > 1) \end{cases}, \quad (3)$$

式中, $\psi = c/p_0$ ,其中  $c$  为黏性土不排水抗剪强度, $p_0$  为计算点处的上覆有效压力。

对于粒状土:

$$f = k \cdot p_0 \cdot \tan \delta, \quad (4)$$

式中, $k$  为土压力系数,对于开口无土塞打入桩, $k$  均假设取 0.8; $\delta$  为土桩间摩擦角,API 规范中给出了不同密实度土层  $\delta$  的建议值。

2) 单位桩端承载力  $q$

对于黏性土:

$$q = 9 \cdot c; \quad (5)$$

对于粒状土:

$$q = p_0 \cdot N_q. \quad (6)$$

式中, $N_q$  为无量纲承载力系数,API 规范中给出了不同粒径土组合  $N_q$  的建议值。

以上方法是基于土的静承载力工况分析出的结果。

另一种是利用基于 Smith 波动方程差分数值解法<sup>[6]</sup>的 GRLWEAP 软件进行桩的可打入分析时,在打桩分析结果中,锤击数为零或者出现初始锤击数对应的深度即为桩的自由站立深度。

Smith 波动方程理论把锤-桩-土系统简化为质量块、弹簧和阻尼器模型。应用 GRLWEAP 软件进行打桩分析时,需要输入的资料包括锤、桩和土的参数来建立分析模型,且模型中锤、桩、土系统的参数须尽可能地代表实际系统。

锤的参数主要包括能量、效率、锤芯重量、桩帽重量。其中锤的能量、锤芯重量和桩帽重量由所选用的打桩锤类型和型号决定,根据实际施工中的备选锤型确定。效率由锤的状况、桩的倾斜度及其他操作因素决定,一般参考所选用打桩锤在以往施工过程中的实际锤效。

桩的参数主要包括桩材质、直径、壁厚、桩截面积,设计入泥深度及设计桩长。海上导管架平台一般采用钢桩;桩径、壁厚、设计桩长计设计入泥深度等详细参数由具体的施工项目中决定;桩截面积与壁厚和桩径相关,在有土塞时为整个桩端面积,在无土塞时为环状桩端面积。

土的参数主要包括:土层分界深度、桩侧面及桩尖的弹性压缩或震动  $Q_s$  (Skin Quake) 及  $Q_p$  (Toe

Quake)、桩侧面及桩尖处的阻尼常数  $J_s$ (Skin Damping)及  $J_p$ (Toe Damping)。土层分界深度按照实际土质分层结果输入,  $Q_s, Q_p, J_s$  及  $J_p$  值选用由 Roussel<sup>[7]</sup> 推荐的数值。  $Q_s$  和  $Q_p$  均取值 2.54 mm,  $J_p$  取值 0.5 s/m,  $J_s$  在黏土、砂土、黏质粉土和粉土中取值分别为 0.65, 0.16, 0.50 和 0.33 s/m。

以上方法是桩处于动荷载工况下基于土的动阻力计算出的结果。

## 2 实 例

下面对南海 A, B 两个平台场址钢管桩的自由站立深度实际结果与预测值进行对比, 探讨分析造成自由站立深度实际结果的原因及其与预测值的关系。

A, B 场址位于中国南海海域, 预定导管架平台均采用四腿桩基础结构形式, 其中 A 场址平台尺寸为 60 m×65 m, B 平台尺寸为 42.5 m×42.5 m。由于 A, B 场址所处海域水深较大, 采用的均为超长桩(桩长超过 100 m), 海上不进行接桩作业。

### 2.1 A 场址

A 场址海底土层基本参数见表 1, 所使用钢管桩详细参数见表 2。实际施工过程中采用 MHU 800S 型液压锤进行打桩作业, 该型号打桩锤在空气中重量为 139 t, 水下重量为 112 t, 其额定能量 800 kJ, 打桩速率 38~45 /min。作业海域水深为 92.6 m。

表 1 A 场址土层(0~60.2 m)基本参数

Table 1 Basic parameters of soil layers at site A (0~60.2 m)

层 号	土层性质	层底深度 $d / m$	有效容重 $\gamma / kN \cdot m^{-3}$	设计强度		单位表面摩擦力 $f / kPa$	单位桩端承载力 $q / MPa$
				$S_u / kPa$	$\delta / ^\circ$		
1	粒状土	3.7	9.4	—	15	0~7	0.00~0.28
2	黏性土	9.0	7.5	20~30	—	13~24	0.18~0.27
		13.1	9.4	30~70	—	24~44	0.27~0.63
3	黏性土	15.2	8.6	55	—	39~42	0.50
4	互层土	18.0	8.6	75	20	38~45	0.60
5	黏性土	38.0	8.9	70	—	52~70	0.63
		42.5	8.6	80	—	80	0.72
6	互层土	47.1	10.1	130	20	100	1.17
7	黏性土	60.2	9.3	90	—	90	0.81

注:“—”处表示无数据

A 场址所使用钢管桩单桩重 532.7 t, 但是在吊桩入泥、放置打桩锤之前, 作用在海底土层中的实际荷载是单桩重量、吊钩及钢丝绳重量(2 t)与吊装器重量(25 t)三者之和, 约为 559.7 t(作用到土层中的力约为 5.5 MN)。表 1 显示 A 场址泥面以下 60.2 m 范围内土层以黏性土为主, 且黏性土层强度相对较小, 一般小于 100 kPa, 前人研究结果表明, 在以上较软弱土层沉桩过程中, 形成闭塞土塞的可能性较小<sup>[8]</sup>。根据以上数据和信息, 计算出单桩在静荷载、无土塞条件下自由站立深度为 15.2 m(图 1), 在动荷载、无土塞条件下的单桩自由站立深度为 42.5 m(图 2)。

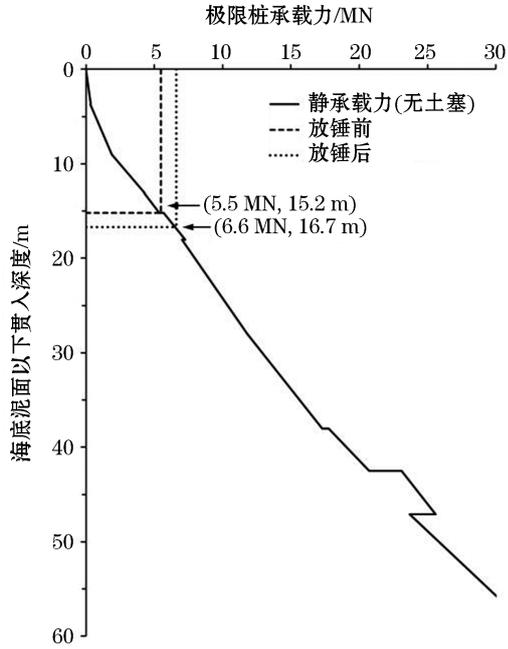
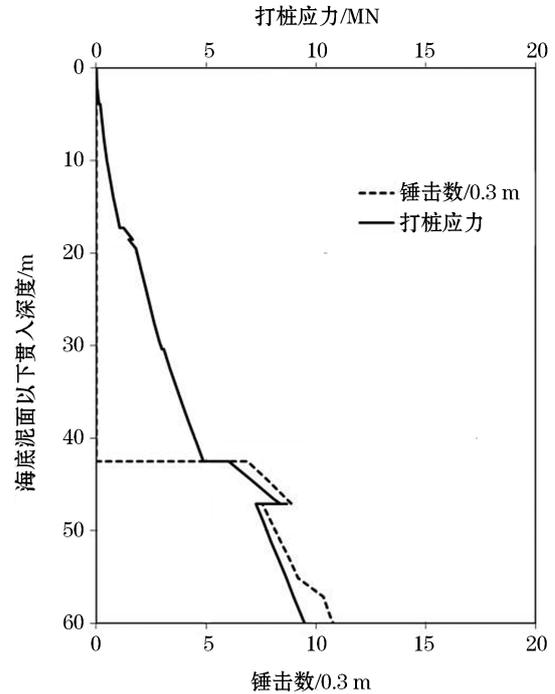


图1 A场址静极限桩承载力曲线

Fig.1 Static ultimate pile capacity curve at site A



注:无土塞,黏性土表面摩擦力取25%

图2 A场址锤击数及打桩应力曲线

Fig.2 Blow count and ultimate capacity curve at site A

表2 A场址桩基本参数

Table 2 Basic parameters of piles used at site A

桩径 /mm	设计入泥深度 /m	桩分段范围 /m	壁厚 /mm	桩靴设计	
				长度/m	壁厚/mm
2 591	103	0~7.5	60	3.0	80
		7.5~17.5	70		
		17.5~27.5	85		
		27.5~62.5	60		
		62.5~72.5	70		
		72.5~77.5	80		
		77.5~82.5	85		
		82.5~87.5	90		
		87.5~97.5	100		
		97.5~119.5	50		
119.5~122.5	80				

在现场安装施工过程中,共观察了3根桩(桩编号分别为1<sup>#</sup>,2<sup>#</sup>和3<sup>#</sup>)的沉桩情况,并对最终入泥深度和沉桩速度进行了统计分析。其中1<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>桩的自由站立深度分别为44.0和46.0 m,沉桩速度较快,分别为0.25和0.20 m/s(表3)。而3<sup>#</sup>桩在吊桩入泥时沉桩速度相对缓慢,沉桩速度仅为0.05 m/s,最终的自由站立深度为19.5 m,此时桩顶仍位于水面之上。之后将打桩锤放置在桩顶,桩入泥深度仍无明显变化,此时

作用在土层中的荷载需扣除吊装器重量再加上打桩锤在空气中的重量,经计算总共为 673.7 t(作用到土层中的力约为 6.6 MN),对应静荷载条件下桩贯入泥面以下深度为 16.7 m(图 1)。

表 3 沉桩速度统计

Table 3 Velocity of pile driving

桩号	沉桩长度/m	用时统计/s	沉桩速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
1#	24	98	0.25
2#	20	100	0.20
3#	9	180	0.05

根据以上对桩的自由站立深度实际值与预测值的对比,可以作出如下判断:1)在 A 场址,由于海底土层以黏性土为主,桩的自由站立深度较大,且均与无土塞工况条件下的预测值较为一致,表明在沉桩过程中未形成土塞,与前人研究成果一致;2)沉桩速度大小对桩的入泥深度会产生影响。

## 2.2 B 场址

B 场址海底土层基本参数见表 4,所使用钢管桩详细参数见表 5。实际施工过程中同样采用 MHU 800S 型液压锤进行打桩作业。B 场址位置水深为 100.1 m。

表 4 B 场址土层(0~36.0 m)基本参数

Table 4 Basic parameters of soil layers at site B (0~36.0 m)

层号	土层性质	层底深度 $d/\text{m}$	有效容重 $\gamma/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	设计强度		单位表面摩擦力 $f/\text{kPa}$	单位桩端承载力 $q/\text{MPa}$
				$S_u/\text{kPa}$	$\delta/^\circ$		
1	粒状土	1.7	9.8	—	15	0~4	0.00~0.13
2	粒状土	3.6	9.5	—	20	5~10	0.20~0.42
3	粒状土	12.0	9.3	—	30	16~52	1.39~4.51
4	粒状土	14.0	8.0	—	20	33~38	1.35~1.55
5	黏性土	21.0	7.7	80	—	51~60	0.72
6	粒状土	22.4	8.7	—	20	53~57	2.19~2.34
7	黏性土	26.2	8.7	70	—	58~63	0.63
8	粒状土	27.5	9.2	—	30	96	9.12~9.60
		30.4					9.60
9	互层土	36.0	8.0	80	20	67	0.72

注:“—”处表示无数据

表 5 B 场址桩基本参数

Table 5 Basic parameters of piles used at site B

桩径 /mm	设计入泥深度 /m	桩分段范围 /m	壁厚 /mm	桩靴设计	
				长度/m	壁厚/mm
2 438	95.0	0~14.0	60	2.5	60
		14.0~23.0	70		
		23.0~53.0	55		
		53.0~65.0	60		
		65.0~80.0	70		
		80.0~92.0	80		
		92.0~100.5	90		
		100.5~103.0	70		
		103.0~112.5	55		
		112.5~115.0	60		

B 场址所使用钢管桩单桩重 483 t, 放置打桩锤之前, 作用在海底土层中的实际荷载是单桩重量、吊钩重量(2 t)与吊装器重量(25 t)三者之和, 约为 510 t(作用到土层中的力约为 5.0 MN)。根据以上数据和信息计算得到单桩在静荷载、无土塞条件下自由站立深度为 9.9 m, 有土塞条件下为 3.6 m(图 3), 在动荷载、无土塞情况下的单桩自由站立深度为 21.9 m, 有土塞条件下为 10.1 m(图 4)。

在现场安装施工过程中, 共观察了 3 根桩的沉桩情况, 最终的自由站立深度分别为 3.6, 3.8 和 4.5 m, 沉桩速度缓慢, 最终桩顶均位于水面之上。之后放置打桩锤, 3 根桩入泥深度均无明显变化, 经计算, 此时作用在土层中的荷载为 624 t(作用到土层中的力约为 6.1 MN), 对应静荷载、无土塞条件下入泥深度为 11.4 m, 而在有土塞工况条件下, 上述荷载未超过 3.6 m 处土层的极限荷载, 入泥深度仍为 3.6 m(图 3)。

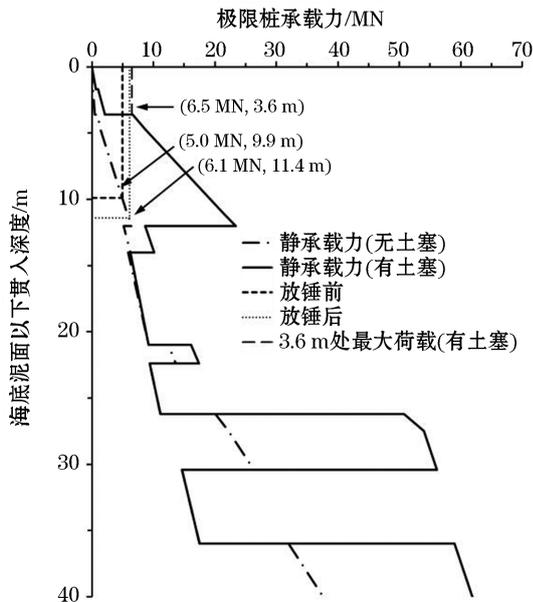


图 3 B 场址静极限桩承载力曲线

Fig.3 Static ultimate pile capacity curve at site B

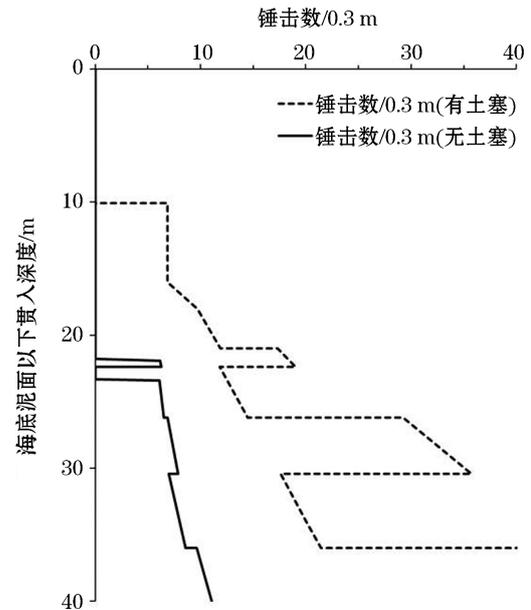


图 4 B 场址预测打桩锤击数

Fig.4 Predicted blow count at site B

综上,在 B 场址,桩的实际自由站立深度均远小于在静荷载、无土塞和动荷载、无土塞两种工况条件下的预测深度,据此判断,在沉桩过程中可能形成了土塞,且沉桩速度较慢,实际沉桩过程与静荷载、有土塞工况条件模式十分吻合。

### 3 影响因素

通过上述实例的分析可知,在钢管桩和打桩锤参数确定,现场施工环境相对稳定的前提下,影响钢管桩自由站立深度的因素主要包括海底地层性质和现场施工手法(沉桩速率)。

#### 3.1 海底地层性质

海底浅部地层的土质性质,如土质类型、黏性土的抗剪强度、粒状土的颗粒分布及密实程度等,都直接决定钢管桩的自沉深度。一般来讲,由于粒状土层的土体强度会大于黏性土层,故如果海底浅部土层以粒状土为主,且层厚较大,则桩的自由站立深度会相对较小,反之,在一般抗剪强度不大的黏性土层中钢管桩的自沉深度会相对较大。

另外,土塞的形成与否对钢管桩的承载力有较大影响,从而影响桩的自由站立深度。由于海洋桩基平台一般采用的是开口桩,在沉桩过程中桩内会有土体贯入,虽然土塞一般在打桩过程中,且贯入到泥面以下较深位置时才有可能形成,但也不排除在吊桩沉桩过程中形成土塞的可能性。以往很多专家学者对在打桩过程中的土塞效应的研究和分析方法很多<sup>[8-11]</sup>,一般认为对土塞效应和完全土塞形成与否的判断难度较大。而大量实践结果和理论研究表明,在软弱土层中形成完全闭塞土塞形成的可能性很小<sup>[8]</sup>,与黏性土层相比,在粒状土层中形成完全闭塞土塞比较容易。

#### 3.2 沉桩速度

沉桩速度决定着钢管桩在土层中的运动形式,从而影响其在土层中的荷载类型,尤其在海底浅部土层为较厚的粘性土层等软弱土层,桩入泥较深,沉桩速度的影响则可能表现的更为显著一些。当沉桩速度较快时,桩在土层中体现为动荷载,自由站立深度接近于动荷载工况条件下的计算深度;而当沉桩速度较慢时,桩与土层近似静止状态,自由站立深度则接近于静荷载工况条件下的预测深度。以上判断在 A 场址的沉桩实例中得到了较好的验证。

在以往对桩自由站立深度的评估工作中,往往忽视现场沉桩速度的影响,而且沉桩速度与现场具体的施工操作以及环境工况密切相关,一般情况下也很难对其进行较准确的评估和预测,从而可能造成实际结果与预测值出现偏差。在实际工作中,可以提供多种荷载工况条件下的预测结果,消除现场操作环节的影响,提高评估工作的全面程度。

## 4 结 论

本文论述了评价海上桩基平台钢管桩自由站立深度的主要理论和方法,同时依托生产实例,通过对预测值与实际沉桩结果进行对比,对造成偏差的原因进行了详细的分析,进而总结出影响钢管桩自由站立深度的主要因素。

1) 实践表明,海底地层性质和沉桩速度是影响钢管桩的自由站立深度的 2 个重要因素,对二者的准确评估和把握是提高预测准确度的关键。海底地层性质可以通过钻孔取样或原位测试等方式进行准确评估,而沉桩速度则与导管架现场安装施工直接相关,建议安装施工过程中作业人员严格参考调查和预测成果制定施工方案,以免造成沉桩速度不合理导致桩实际自由入泥深度与预测值产生偏差,造成桩或导管架的损坏。

2) 对于海底浅部土层以较低强度的黏性土层为主的场地,建议采用动荷载、无土塞条件下的预测值;对

于海底浅部土层以较高密实度的粒状土为主的场地,建议考虑有土塞条件下的预测值。

3)在开展海上桩基平台钢管桩自由站立深度分析评价工作时,建议考虑多种荷载工况条件,应用多种方法进行综合分析计算,尽量消除现场环节人为因素的影响,从而使桩的自由入泥深度评估工作更全面,评估结果更准确。

### 参考文献 (References):

- [1] LI J F, ZHOU M Y. Pipe pile stick-up and driveability analysis of offshore jacket platform[J]. Journal of Shengli College China University of Petroleum, 2010, 24(2): 11-14. 李景福, 周美燕. 海洋导管架平台桩基自由站立强度及可打入性分析[J]. 中国石油大学胜利学院学报, 2010, 24(2): 11-14.
- [2] HOU T, ZHANG X W, LIU H T, et al. Pile stick up analysis with timosshenko theory of elastic stability[J]. China Offshore Platform, 2010, 25(2): 34-38. 侯涛, 张孝卫, 刘洪涛, 等. 铁木辛柯弹性稳定理论在深水桩自由站立分析中的应用[J]. 中国海洋平台, 2010, 25(2): 34-38.
- [3] LIU R, YAN S W, MAO Y H, et al. Study on influence factors for pile stick-up stability in ocean engineering[J]. The Ocean Engineering, 2006, 24(3): 6-13. 刘润, 闫澍旺, 毛永华, 等. 海洋工程中桩身自由站立稳定性影响因素分析[J]. 海洋工程, 2006, 24(3): 6-13.
- [4] CHEN B, YAN S W, FAN Z X, et al. Driveability and stick-up analysis of steel pile of offshore platform[J]. China Offshore Oil and Gas (Engineering), 2011, 13(6): 1-5. 陈波, 闫澍旺, 樊之夏, 等. 桩基平台桩的可打入性和自由站立强度分析[J]. 中国海上油气(工程), 2011, 13(6): 1-5.
- [5] American Petroleum Institute. Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design: API RP 2A-WSD-2000[S]. Washington D C: American Petroleum Institute, 2000.
- [6] SMITH E A L. Pile driving analysis by the wave equation[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1960, 86(1): 35-61.
- [7] ROUSSEL H J, Jr. Pile driving analysis of large diameter high capacity offshore pipe piles[D]. New Orleans: Tulane University, 1979.
- [8] LIU R, ZHOU R H, YAN S W. Plug effect on drivability of large-diameter steel piles[J]. The Ocean Engineering, 2005, 23(2): 71-76. 刘润, 嵯瑞花, 闫澍旺. 大直径钢管桩土塞效应的判断和沉桩过程分析[J]. 海洋工程, 2005, 23(2): 71-76.
- [9] YAN S W, DONG W, LIU R, et al. Study of influence of soil plug on driving piles of offshore oil drilling platform[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(4): 703-709. 闫澍旺, 董伟, 刘润, 等. 海洋采油平台打桩工程中土塞效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 703-709.
- [10] PAIKOWSKY S G, WHITMAN R V. The effects of plugging on pile performance and design[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27(4): 429-440.
- [11] LU Z Q, GAO Y S, SONG M D. Some knowledge about working performance open-end steel pipe pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(1): 111-114. 陆昭球, 高倚山, 宋铭栋. 关于开口钢管桩工作性状的几点认识[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 111-114.

## Analysis and Discussion on the Free Penetration Depth of Steel Pipe Piles of the Offshore Pile Foundation Platform

LIU Shuang-shuang

(*China Oilfield Services Limited*, Tianjin 300459, China)

**Abstract:** Steel pipe pile foundation is one of the foundation forms more commonly used for the offshore jacket platform. Thus, the accurate prediction of the free penetration depth of the steel pipe piles is an important work in the jacket platform installation project. If the free penetration depth cannot be accurately predicted, the pipe piles might be deformed and damaged during the in-situ operation, and even the production and operation of the whole oil-gas field would be affected. Based on actual production projects, the relationship between the actual results of free penetration depth of steel pipe piles and their predicted values is discussed and the reasons producing the actual results are analyzed. Besides, the factors influencing the free penetration depth of the steel pipe piles are argued, which include chiefly the submarine stratum properties and the pile driving speed in addition to the structural characteristics of the piles. The properties of the shallow strata determine directly the bearing capacity of soil to pile and the pile driving speed determines the stress types of soil to pile. The practice shows that a variety of influencing factors can be considered if comprehensive analysis and evaluation of the free penetration depth of the steel pipe piles are carried out by using multiple methods, and then the evaluation work would be more complete and the prediction accuracy would be improved greatly.

**Key words:** steel pipe pile; free penetration depth; stratum properties; pile driving speed

**Received:** March 10, 2017