

# 海上风电大直径单桩自沉深度分析

崔永忠<sup>1</sup>, 苏荣<sup>2</sup>, 刘东华<sup>3</sup>, 孙伟<sup>4</sup>

(1. 广东省能源集团有限公司, 广州 510000; 2. 南方海上风电联合开发有限公司, 珠海 519000;  
3. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510000; 4. 辉固集团, 香港 999077)

**摘要:** [目的] 大直径单桩是海上风电最常用的基础形式之一, 为了能够更加准确、快捷地预测海上大直径单桩的自沉深度, 提前预警可能存在的施工安装风险, 分别采用了基于设计参数的方法和基于 CPT 原位测试的方法进行分析计算并根据现场实际施工数据进行初步反分析。[方法] 主要分析了基于桩基承载原理结合设计参数的计算方法、DNV 推荐工法中的 CPT 经验公式以及形式更加简单的直接 CPT 方法。并讨论了计算结果与实际深度之间的关系, 分析了计算结果与实际深度差异的原因。[结果] 分析结果表明: 基于设计参数的方法其理论架构更加清晰, 但分析结果受参数取值的人为因素影响较大, 而基于 CPT 方法其数据更加客观, 但部分关键参数的取值仍然依靠现场经验。[结论] 因此没有一种方法可以在任何条件下都能够准确预测单桩基础的自沉量, 因为地层的水平变化、单桩下沉速度、施工步骤等都会对单桩自沉有影响。为了能够准确评估单桩自沉, 保证顺利施工, 实际项目中需采用多个方法综合对比, 最终确定适合项目的施工方案。

**关键词:** 海上风电; 大直径单桩; 自沉; CPT; 土阻力

中图分类号: P751; TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)01-0040-07

## Self-weight Penetration Prediction Methods for Large Diameter Monopiles in Offshore Wind Farm

CUI Yongzhong<sup>1</sup>, SU Rong<sup>2</sup>, LIU Donghua<sup>3</sup>, SUN Wei<sup>4</sup>

(1. Guangdong Energy Group Co. Ltd., Guangzhou 510000, China;

2. South Offshore Wind Power Joint Development Co., Ltd., Zhuhai 519000, China;

3. China Energy Construction Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510000, China;

4. Fugro NV, Hong Kong 999077, China)

**Abstract:** [Introduction] Large diameter monopile is the most common used foundation in offshore wind projects. The Self Weight Penetration (SWP) usually takes up a large component of total penetration. To better predict the SWP of monopiles, three methods employing design parameters as well as CPT data have been studied in this paper and the preliminary back analysis have been carried out on the basis of the monitoring data on site. [Method] In detail, the method calculating the soil resistance during driving from design parameters, the SWP prediction method recommended in DNV manual and a directly derived CPT method were adopted to predict the SWP of monopiles and the interpretation to the difference between predicted and real penetration depth were made after the analyses. [Result] The results indicate that the SWP prediction with design parameters have better theoretic background but the result are strongly influenced by human factor, the latter CPT methods are based on CPT test data that are more objective but the key coefficients are heavily depend on local experience. [Conclusion] The real SWP depth are also significantly affected by fluctuation of subsoil layers, penetration rates and pile installation procedures; Not a single method can accurately predict the SWP under all conditions; Comprehensive interpretation of analysis results from different methods can improve the reliability of prediction.

**Key words:** offshore wind farm; large diameter monopile; self-weight penetration; CPT; SRD

目前, 大直径单桩基础 (直径 >7 m) 在海上风

电的应用越来越多。单桩基础的施工大致可以分为吊桩入水、自沉稳定、压锤、再次自沉稳定、打桩至设计深度等主要流程。大直径单桩的自沉 (SWP) 是基础施工的重要环节, 也是复核岩土工程设计的

收稿日期: 2020-01-19 修回日期: 2020-02-28

基金项目: 中国能建广东院科技项目“海上风电吸力桶基础受力机理与变形控制关键技术研究”(EV04631W)

第一步。对桩基础自沉深度的评估不仅影响到前期的设计建造,还影响到桩基础后续的现场安装。如果单桩基础的自沉评估不准确,轻则影响施工进度,重则影响施工平台的安全,造成社会经济损失。

现在应用较多的预测桩基础自沉深度的方法主要为基于 CPT 的经验方法和基于设计参数的计算方法。前者使用原始的 CPT 数据,能够真实完整反映该位置地层剖面随深度的变化,但是使用较多经验参数来计算桩的端阻力和侧阻力。基于设计参数的方法理论背景强,但需要专业工程师提出可靠的设计参数来保证该方法计算结果的准确。工程师在提出参数的过程中,CPT 依然是必不可少的原位测试手段。

在实际施工作业过程中,由于受到海底地质,特别是浅层地质变化、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。本文结合某工程海上风电单桩基础施工的实际案例,分别评估基于 CPT 和设计参数方法的计算结果,并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 项目背景及地质条件

### 1.1 工程概况

某工程海上风电场项目场区域至北侧的三灶的最近距离约 10.5 km,至西北侧的高栏岛最近距离约 10 km,至东北侧的横琴岛的最近距离约为 15 km,至东侧小万山岛的最近距离约 20.5 km。海底水深标高介于为 -12 m~-22 m,属于近海风电场。规划场址海域面积约 51 km<sup>2</sup>,建设装机容量规模 300 MW,计划安装风机 56 台。

### 1.2 场地地质

海上风电场场区属水下三角洲地貌单元,海床面标高在 -12 m~-22 m 之间,海床较为平坦,总体上海床自北往南缓缓降低,海床底质为淤泥底质。

场区地层由两大部分构成:第四系全新统海相沉积地层和第四系晚更新统海陆交互沉积地层。第四系全新统海相沉积地层基本为软土层;第四系晚更新统海陆交互沉积地层呈粘性土层和砂土层交互分布状,而下部主要为砂土层。

## 2 单桩基础沉桩过程

目前海上风电建设中,单桩基础是应用最广泛的基础形式之一。本项目中全部采用了单桩基础。单桩基础的施工主要分为如下几个基本步骤:

- 1) 单桩起吊并垂直通过稳桩平台放入海底。
- 2) 放松吊绳,单桩自沉并控制自沉速度。
- 3) 将替打(如有)以及打桩锤以吊放置在桩顶。
- 4) 放松吊绳,让单桩与沉桩系统在自重作用下继续自沉。
- 5) 开启打桩锤,开始锤击沉桩至设计深度。
- 6) 移走打桩锤。

单桩起吊并对准稳桩平台,通过稳桩平台并自沉稳定后,校核桩身位置和垂直度是否满足要求。然后将打桩锤放置于桩顶。放松吊绳后,单桩及沉桩系统在自重作用下开始自沉。现场记录自沉稳定时的贯入深度。

在本项目中,单桩基础自重 1 350 t 左右。桩基础与沉桩系统总自重 2 000 t 左右。

## 3 桩基础自沉深度计算方法

桩基础的自沉过程也是土阻力与自重平衡的过程。从桩基础下放至海床开始,桩基础持续下沉直至土阻力与桩基础(或者桩基础加上沉桩系统)自重平衡。

$$R=W_{\text{pile}} \text{ 或 } R=W_{\text{global}} \quad (1)$$

式中: $R$  为土阻力(kN); $W_{\text{pile}}$  为桩基础自重(kN); $W_{\text{global}}$  为桩基础与沉桩系统总自重(kN)。

在整个沉桩过程中,自沉是最开始的一步,也是检验设计采用的岩土参数是否符合现场实际的第一步。桩基础沉桩系统的自重为固定值,在确定施工方案后这部分的自重基本已经确定,自沉问题的评估重点在桩基础下沉过程的土阻力计算。Toolan and Fox (1977)<sup>[1]</sup>、Stevens et.al (1982)<sup>[2]</sup>、Alm and Hamre (1998, 2001)<sup>[3-4]</sup> 是目前工程中常见的土阻力计算方法。这些方法整体上分为两大类:基于参数法和基于 CPT 方法。顾名思义,基于参数法是根据每层土的强度参数计算桩基础下沉过程中的土阻力。基于 CPT 法则是直接根据 CPT 测试数据计算桩基础下沉过程中的土阻力。两种方法各有优势。CPT 可以最直接并且准确的反应地层强度的变化。但是如果项目使用海床 CPT,则 CPT 的测试深度

可能会小于桩基础的设计深度。这样使得 CPT 数据无法进行完整的可打性分析, 此时仍需要基于参数确定土阻力。但是设计参数的确定受人为因素的影响较大, 同样的事实数据不同的工程师可能得到不同的设计参数。

在实际的建设项目中, 为了自沉计算而进行详细的岩土参数分析无法满足项目的进度要求。为了实现快速评估桩基础的自沉深度, 本文分别使用基于设计参数法、DNV 经验 CPT 方法和 CPT 方法分别计算自沉深度。

### 3.1 基于设计参数法

基于参数法主要基于 API RP2GEO (2010) [5] 规范中桩基础轴向承载力计算的正文方法。同时考虑桩基础下沉过程中侧壁土的摩擦疲劳效应, 对 API RP2GEO (2010) [5] 的承载力计算做修正, 参数计算如表 1 所示, 桩侧摩阻及桩端阻力的限值如表 2 所示。土阻力的计算采用 [5]:

$$R = R_f + R_p = fA_s + qA_p \quad (2)$$

式中:  $f$  为桩侧摩阻力 (kPa);  $q$  为桩端阻力 (kPa);  $A_s$  为桩周面积 ( $m^2$ ), 考虑到大直径单桩发生土塞的概率很低, 一般取钢管桩内外侧面积之和;  $A_p$  为桩底净面积 ( $m^2$ ), 考虑到大直径单桩发生土塞的概率很低, 一般取钢管桩环形面积。

表 1 土阻力计算方法及参数意义

Tab. 1 SRD calculation methods and parameters

	粘土	砂土
侧摩阻力 $f$	式中: $f = \alpha S_u / S_r$ $\alpha = \begin{cases} 0.5\psi^{-0.5} (\psi \leq 1) \\ 0.5\psi^{-0.25} (\psi > 1) \end{cases} < 1$ $\psi = \frac{S_r}{p'_0}$	$f = 0.5p'_0 \tan \delta$
端阻力 $q$	$q = 7.5S_u$	$q = N_q p'_0$
注:	$S_u$ — 粘土不排水抗剪强度 (kPa); $p'_0$ — 上覆有效压力 (kPa); $S_r$ — 粘土灵敏度 (—);	$\tan \delta$ — 桩土摩擦角的正切值 (—); $N_q$ — 无量纲支撑能力系数 (—)。

同时对砂土中的侧摩阻和端阻力设置相应限值。

表 2 砂土中桩侧摩阻力及桩端阻力上限值

Tab. 2 Limiting unit shaft friction and unit end bearing for piles in sand

桩土摩擦角 / ( $^\circ$ )	侧摩阻力 $f_{lim}$ / kPa	端阻力 $q_{lim}$ / kPa
15	49	1 900
20	67	2 900
25	81	4 800
30	96	9 600
35	115	12 000

### 3.2 DNV 经验 CPT 方法 [6]

$$R = k_p A_p \bar{q}_c + \sum A_s k_f \bar{q}_c \quad (3)$$

式中:  $k_p$  为端阻系数, 取值取自表 3;  $k_f$  为侧阻系数, 取值取自表 3;  $\bar{q}_c$  为 CPT 锥尖阻力 (kPa)。

表 3 DNV 经验 CPT 法系数推荐值

Tab. 3 Recommended coefficient of DNV CPT method

土分类	土阻力最可能估计 ( $R_{prob}$ )		土阻力最大估计 ( $R_{max}$ )	
	$k_p$	$k_f$	$k_p$	$k_f$
粘土	0.4	0.03	0.6	0.05
砂土	0.3	0.001	0.6	0.003

值得注意的是, 就粘土而言, 我们首先简单的简化常见的 CPT 计算粘土不排水剪切强度公式为:

$$S_u = \frac{q_c}{20} \quad (4)$$

在 DNV 经验公式中, 粘土的桩端阻力  $R_p$  为:  $q = 0.4q_c = 8S_u$ 。这个结果与 API 中推荐的  $9S_u$  接近但是略低。因为这里我们计算的是桩基自沉的工况而不是桩在承受长期荷载的工况。侧阻力  $f_s = 0.03q_c = 0.6S_u = \frac{S_u}{1.67} = \frac{0.9S_u}{1.5}$ 。在自沉深度内, 粘土的强度通常较低, 按照 API 推荐计算的桩侧摩阻等于  $0.9 \sim 1.0 S_u$ 。这样相当于假设了一个  $1.5 \sim 1.7$  的等效的“灵敏度”。而砂土中不存在很直接的换算关系, 因此公式中砂土的  $k_p$  和  $k_f$  的取值有更多的经验成分。

### 3.3 直接 CPT 法

在 Toolan & Fox (1977) [11] 推荐在连续打桩的情况下, 桩端阻力可以等于 CPT 的锥尖端阻  $q_c$ , Alm and Hamre (2001) [14] 推荐在连续打桩的情况下, 桩端阻力可以等于 0.6 倍的 CPT 的锥尖端阻  $q_c$ 。而桩侧摩阻力在这里假设等于 CPT 的侧阻力值  $f_s$ 。这样本文就形成了一个更加简化并且直观的基于 CPT 测试数据的公式。这个公式的优点是在使用 CPT 数据的时候不需要考虑土的分类, 能够让现场的非岩土专业技术人员也能够快速评估单桩自沉深度。

$$R = 0.6A_p \bar{q}_c + \sum A_s f_s \quad (5)$$

## 4 计算结果

### 4.1 粘土灵敏度

CPT 的锥侧摩阻等于粘土的重塑强度 [7]。

$$f_s = S_{u-remolded} \quad (6)$$

粘土的灵敏度  $S_r$  根据如下式定义可以较便捷

的从 CPT 的成果中得到。如图 1 所示, 整个场地粘土的灵敏度取 2.0 比较合理。

$$S_r = \frac{S_{u-\text{remolded}}}{S_u} \quad (7)$$

$$S_u = \frac{q_{\text{net}}}{N_{\text{kt}}} \quad (8)$$

$$N_{\text{kt}} = 20 \quad (9)$$

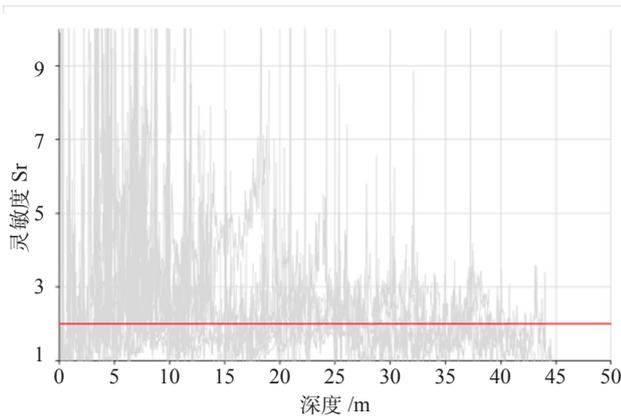


图 1 粘土灵敏度  $S_r$  的剖面图

Fig. 1 Sensitivity  $S_r$  profile

## 4.2 计算结果

本文计算了已经施工完成的 5 个机位处单桩与沉桩系统的总重下自沉量。其中 WT07、WT11、WT27 三个机位处有进行 CPT 测试。结果汇总以及现场自沉深度如表 4 所示。

表 4 桩自沉深度计算结果汇总

Tab. 4 Summary of SWP calculation results m

机位	基于设计参数法	DNV 经验 CPT 方法	DNV 经验 CPT 方法 (高阻力)	直接 CPT 法	现场自沉深度
WT07	24.5	17.2	12.5	17.4	11.0
WT08	23.0	无	无	无	23.5
WT09	32.0	无	无	无	25.25
WT11	27.0	19.8	16.3	24.5	23.5
WT27	28.0	20.1	17.4	18.9	24.0

为了更好的对比不同方法之间所计算的土阻力变化, 图 2 显示了 WT07、WT11、WT27 机位处的土阻力随深度的变化。

## 5 结果分析

整体上可以看到, 实际自沉深度与计算结果有一定程度偏差。由于目前只完成五个单桩基础的施工, 其中只有三个桩位有 CPT 测试。样本数量较小, 暂不具备很强的统计意义。因此, 本文仅针对已有

的数据做出方向性的分析和判断。

除了 WT08 桩以外, 基于设计参数方法的计算结果普遍高于实际的自沉量。可能的原因是设计参数并不能完全反应地层的情况, 不同桩位的设计参数可能受主观影响以及 WT08 在 23 m 左右的地方地层突然变硬。因此无论考虑何种方法, 可能在 WT08 位置最终自沉都会停留在 23 m 左右。

除了 WT07 桩以外, DNV 经验 CPT 方法的计算结果普遍低于实际自沉量。这个与欧洲北海的单桩施工经验相符。同时考虑到 DNV 经验 CPT 方法中经验系数的选取是基于北海的密实砂和硬粘土得到的, 该方法沿用到其他地区时, 需对经验参数做出修改。

本文还提出了更加简单的直接 CPT 方法。该方法的准确性需要更多的数据做进一步判断。该方法的优势在于能够指导没有岩土工程和设计背景的技术人员能够快速评估单桩的自沉深度和发现可能存在的溜桩风险。

## 6 差异原因分析

1) 现场在桩基础自沉稳定后, 吊锤需要一段时间, 一般为数个小时的时间, 如果有天气等其他因素影响, 等待时间可能需更长时间。在这段时间里, 由于桩侧土会有一定程度的恢复。本文的计算假设为连续自沉。

2) 桩基础下沉的速度在一定程度上也影响了其在土层中的荷载。当桩基础下沉速度较快的时候, 桩的自重表现为动荷载, 土阻力计算也应包含动阻力。随着桩入土深度增加, 桩的下沉速度逐渐降低, 桩与土之间接近静载状态<sup>[8]</sup>。

现场实际施工时, 在桩基础放到位后, 并不会完全脱钩, 而是逐渐放松吊绳力, 让桩逐步下沉, 因此桩基础的实际下沉速度也受人为因素影响。

3) 本文中的计算只考虑了桩基础及沉桩系统的自重, 并没有考虑实际环境中风、波浪、海流等对桩身及桩周土的作用。

4) 设计参数的目的是计算桩基础的长期承载能力。并且在数据解析得到最终设计参数的过程中有工程师的主观影响。CPT 方法则可以避免这个问题。

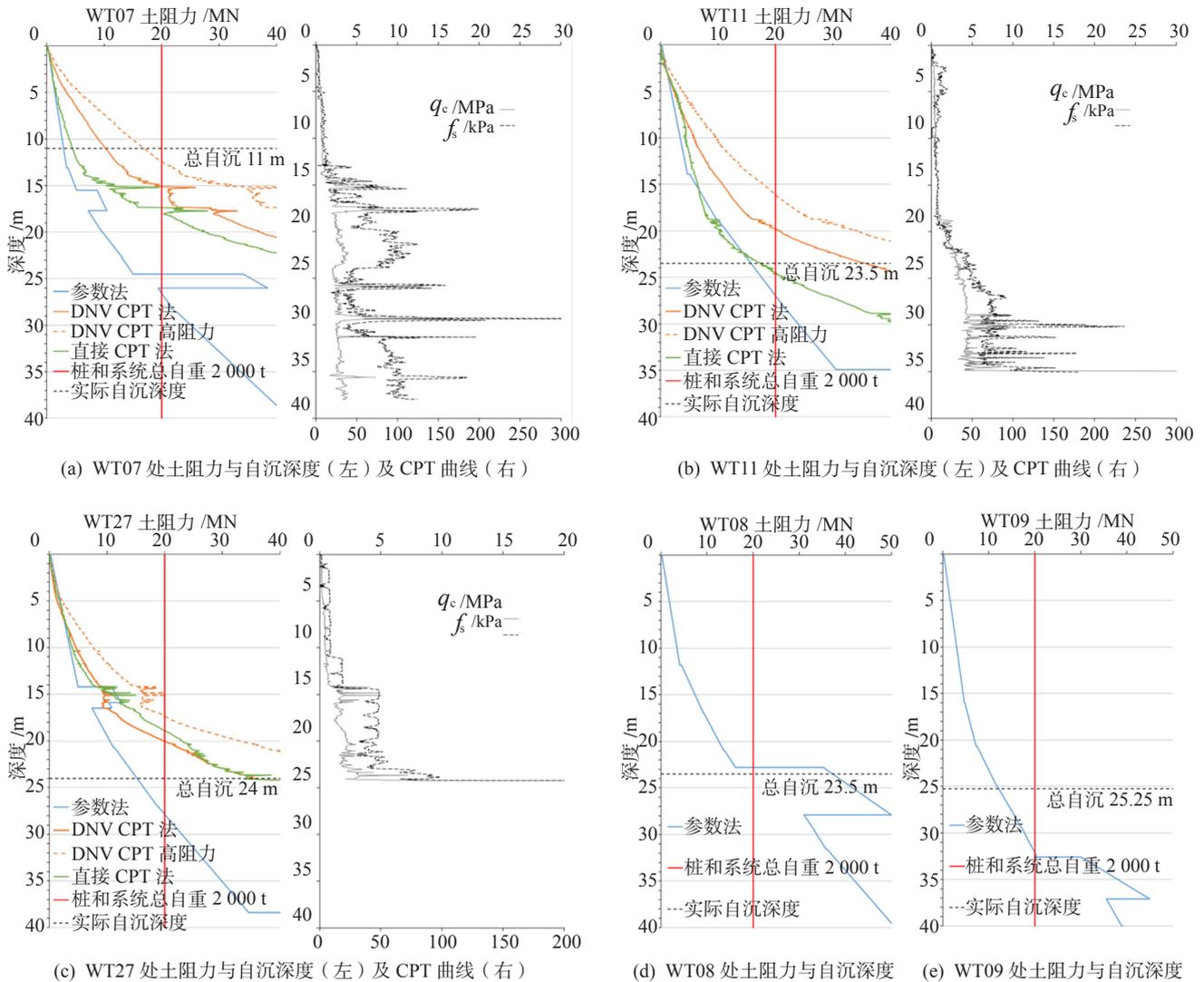


图 2 WT07、WT08、WT09、WT11、WT27 桩位处土阻力与自沉深度的剖面图

Fig. 2 SRD and SWP profile at WT07, WT08, WT09, WT11, WT27

5) DNV 经验公式是基于欧洲北海的地质情况而提出的。表中的经验系数也只适用于北海的硬粘土和密实砂, 对于中间性质的土, 如粉土、粉砂等, 参数可能介于 DNV 推荐值之间。因此在应用此公式到其他海域或其他岩土条件的场地时, 需对系数进行适当调整<sup>[6]</sup>。

6) 欧洲北海的单桩施工经验显示, 实际单桩自沉深度比 DNV 公式计算结果要深。可能的原因是在浅表层 1~1.5 m 深度内, 由于局部水力作用或者桩水平方向位移的影响会降低  $k_p$  和  $k_r$  的值。

7) 海上风电单桩尺寸一般达到 7~8 m, 对于大尺寸的桩基础自沉的准确计算需要更详细的勘察信息。一般的 CPT 探头只有 10 cm<sup>2</sup>, 一个桩位一

个 CPT 无法完整揭露桩基础可能遇到的所有岩土情况。比如浅层存在硬粘土包、局部存在硬层、土层界面水平方向起伏变化都会影响桩基础最终的自沉深度。

### 7 DNV 经验 CPT 反分析

本工程场地浅层地质以粘土为主。最上部深度 10~20 m 范围内大部分区域为淤泥和淤泥质土。淤泥下方为粘土及砂土交替出现。在单桩自沉范围内粘土的强度相对较低, 土阻力主要来自于粘土提供的桩侧摩阻力或砂层提供较高的端承力。因此, 在粘土和砂土的  $k_p$  和  $k_r$  中, 对单桩自沉影响最大的是粘土的  $k_r$  和砂土的  $k_p$ 。所以本文只针对这两

个参数进行进一步分析。基于 WT07、WT11、WT27 三个桩位的 CPT 数据，使用参数进行逐个计算，记录每个参数的单桩自沉计算结果。采用的参数如表 5 所示。

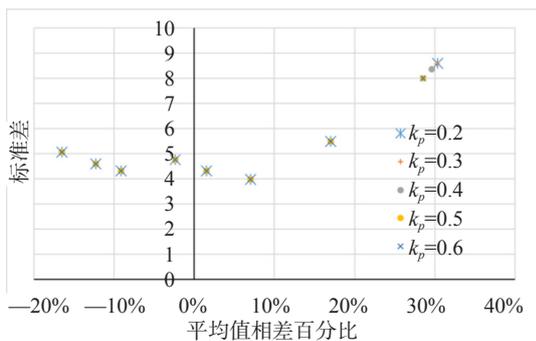
表 5 分析中使用的经验系数取值范围

Tab. 5 Resistance coefficients and increments used in back-analysis

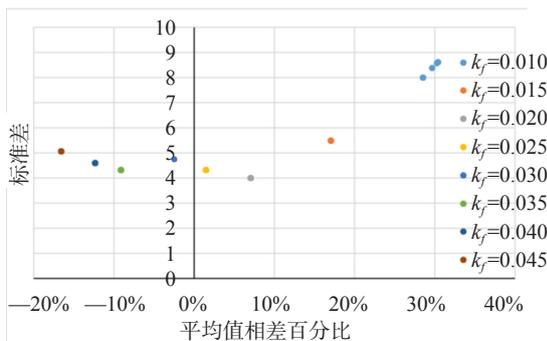
系数类型	范围	增项
粘土 $k_r$	0.01~0.045	0.005
砂土 $k_p$	0.2~0.6	0.1

图 3、图 4 是所有参数组合计算结果平均值与实际自沉深度之间的偏差百分比及标准差。可以看到，目前计算的三个桩位的砂土的  $k_p$  对自沉深度影响几乎为零。这主要与三个桩位的粘土层比较厚有关系。也正因如此，粘土的  $k_r$  对自沉深度的影响很大。当  $k_r$  高于 0.015 时，方差基本稳定。当  $k_r=0.027$  时，平均值相差为 0，可以认为计算模型与实际情况吻合很好。

但是此处需强调的是，WT07 自沉深度只有 11 m，远远低于计算模型的结果。可能与地层水平方向变化或施工过程中土恢复有关系。在剔除 WT07 的异常数据后，得到  $k_r=0.016$  时，平均值相差为 0。



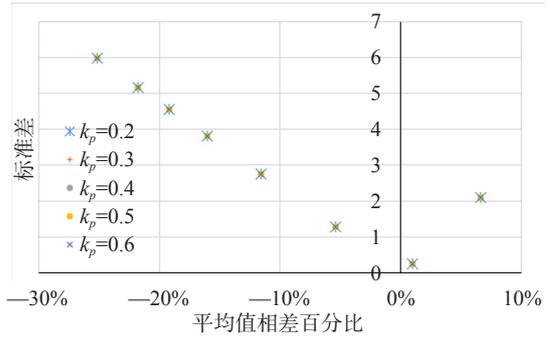
(a) 自沉深度对  $k_p$  的敏感性分析结果



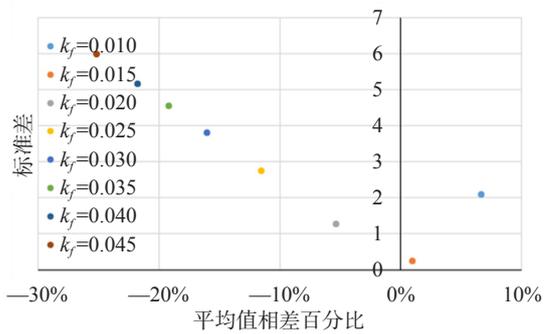
(b) 自沉深度对  $k_r$  的敏感性分析结果

图 3 自沉深度对  $k_p$  和  $k_r$  的敏感性分析结果

Fig. 3 Sensitivity analysis of  $k_p$  and  $k_r$  to SWP depth



(a) 自沉深度对  $k_p$  的敏感性分析结果 (剔除 WT07 异常数据)



(b) 自沉深度对  $k_r$  的敏感性分析结果 (剔除 WT07 异常数据)

图 4 自沉深度对  $k_p$  和  $k_r$  的敏感性分析结果 (剔除 WT07 异常数据)

Fig. 4 Sensitivity analysis of  $k_p$  and  $k_r$  to SWP depth (excluding the data of WT07)

所以，根据已有的三个桩位数据，初步修正经验参数如表 6 所示：

表 6 反分析结果

Tab. 6 Optimum SWP resistance coefficients

系数类型	未剔除异常点	剔除异常点
粘土 $k_r$	0.025	0.016
砂土 $k_p$	0.3	0.3

## 8 结论

本文结合某工程海上风电的实际自沉数据，对比评估了三种方法计算自沉的结果。并对造成偏差的原因做出了详细的分析。综上所述可以得到以下结论：

1) 基于设计参数的方法虽然理论完整，但该方法计算的准确与否很大程度取决于设计参数的提出是否准确。设计参数的提出受主观因素影响，而采用 CPT 方法则可以很好的避免这个问题。

2) DNV 经验 CPT 方法中的经验参数主要针对北海地区的密实砂和硬粘土，在计算其他区域或

其他土层中的单桩自沉时需对经验参数做出适当修改, 根据已完成三根桩的数据, 修正粘土的  $k_r$  至 0.016 可以取得较好的效果。

3) 对单桩基础自沉计算的意义除了能够直观评估自沉深度以外, 还能够通过对比土阻力曲线与桩基础自重的关系, 提前发现和预警可能存在的溜桩风险, 对安全施工有很好的指导价值。

4) 从欧洲和国内的项目经验来看, 没有一种方法可以在任何条件下都能够准确预测单桩基础的自沉量。为了能够准确评估单桩自沉, 保证顺利施工, 需采用多个方法综合对比, 最终确定适合项目的施工方案。

#### 参考文献:

- [1] TOOLAN F, FOX D. Geotechnical planning of piled foundations for offshore platforms [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1977, 62 (2): 221-244.
- [2] STEVENS R.S, WILTSIE E.A and TURTON T.H. Evaluating pile driveability for hard clay, very dense sand and rock [C]//OTC 4205. Proc. Offshore Tech Conf, Houston, USA, 1982. Houston: OTC, 1982: 465-481.
- [3] ALMT, HAMRE L. Soil model for driveability predictions [C]//OTC. Offshore Technology Conference, Houston, USA, 1998. Houston: OTC, 1998: 1-13.
- [4] ALMT, & HAMRE L. Soil model for pile driveability predictions based on CPT interpretations [C]//ISSMGE. International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Istanbul, Turkey, 2001. Istanbul: ISSMGE, 2001: 1297-1302.
- [5] API. RP 2GEO geotechnical and foundation design considerations [S]. Washington DC: API Publishing Services, 2010.
- [6] Det Norske Veritas. Foundations, classification notes 30.4 [S]. Oslo: DNV GL AS, 1992.
- [7] Powell J.J, Lunne T. Use of CPTU data in clays/fine grained soils [J]. Studia Geotechnica et Mechanica, 2005, 27 (3-4): 29-66.
- [8] 刘双双. 海洋桩基平台钢管桩自由站立深度分析与问题探讨 [J]. 海岸工程, 2017, 36 (3): 38-46.

#### 作者简介:



崔永忠

1968-, 男, 福建南平人, 广东省能源集团有限公司, 高级工程师, 武汉水利电力学院电厂热能动力工程学士, 主要从事火力发电、风力发电、光伏发电项目建设及技术管理 (e-mail) 513238334@qq.com。

崔永忠

#### 苏荣

1983-, 男, 广东汕头人, 南方海上风电联合开发有限公司, 工程师, 主要从事电力工程项目管理工作 (e-mail) surong@csg.cn。

#### 刘东华 (通信作者)

1981-, 男, 蒙古族, 辽宁葫芦岛人, 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 高级工程师, 清华大学土木水利学院水利水电工程专业工程硕士, 主要从事火力发电、风力发电、光伏发电项目水工结构设计工作 (e-mail) liudonghua@gedi.com.cn。

#### 孙伟

1992-, 男, 河北唐山人, 辉固集团岩土工程师, 香港大学岩土工程硕士, 主要从事海洋岩土工程勘察设计工作 (e-mail) m.sun@fugro.com。

(责任编辑 李辉)



海上风电项目大直径单桩施工