

DOI: 10.11779/CJGE201506022

打桩过程中考虑溜桩影响的土阻力研究

李 飒¹, 吴兴州², 王耀存¹, 张培献³, 李怀亮⁴, 孙振平⁴

(1. 天津大学建工学院岩土所, 天津 300072; 2. 中冶建工集团有限公司勘察设计研究院, 重庆 400084;
3. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222; 4. 海洋石油工程股份有限公司, 天津 300452)

摘 要: 大直径超长桩的可打入性分析的准确性是打桩施工顺利进行的重要保障, 打桩过程中土阻力预测是其中的关键一环。现有的预测方法都不考虑不同的打桩过程对打桩土阻力产生的影响, 根据东海某发生溜桩的实际工程, 对打桩中产生溜桩时的土阻力预测方法进行了研究。根据现场打桩全程高应变监测取得数据, 采用 CAPWAP 分析了整个打桩过程中土阻力随桩基入泥深度的变化, 试验数据显示, 打桩过程中的溜桩对桩侧摩阻力的分布产生了明显的影响; 根据其影响程度的不同可以划分为完全影响区, 部分影响区和不影响区 3 个部分, 同时给出了不同区域中土阻力的计算方法。实例验证显示, 这种方法预测的土阻力的精度明显高于现有常用方法的预测精度。

关键词: 土阻力; 溜桩; CAPWAP; 高应变动测

中图分类号: TU470 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 4548(2015)06 - 1150 - 08

作者简介: 李 飒(1970 -), 女, 天津人, 博士, 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.

Soil resistance to driving considering effect of pile running on pile installation

LI Sa¹, WU Xing-zhou², WANG Yao-cun¹, ZHANG Pei-xian³, LI Huai-liang⁴, SUN Zhen-ping⁴

(1. Geotechnical Institute, Civil Engineering Department, Tianjin University, Tianjin 30072, China; 2. China Metallurgical Construction Engineering Group Co., Ltd., Survey and Design Institute, Chongqing 400084, China; 3. China Water Resources Beifang Investigation, Design and Research Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 4. Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300452, China)

Abstract: The accuracy of the drivability analysis for large-diameter piles is very important for safe pile driving, and the prediction of soil resistance to driving (SRD) is the key in this analysis. The methods often used today do not consider the influence of installation process on SRD. In order to consider the influence of pile running on SRD, high-strain dynamic tests are used to monitor the whole pile-driving procedure where pile running happens in driving. The measured data are analyzed by CAPWAP, and the change of SRD during the pile driving is studied. It can be found that the friction changes obviously before and after pile running. The influence of pile running on SRD is different at different penetration depths. According to the influence of pile running, the totally affected zone, partly affected zone and unaffected zone are divided in the soil. Moreover, the method used to predict SRD is also different in different zones. The proposed method gives a better prediction of SRD than that calculated by the methods often used today.

Key words: soil resistance to driving; pile running; CAPWAP; dynamic load test

0 引 言

随着海洋工程向深海不断发展, 大直径超长开口钢管桩得到广泛应用, 桩体安装工程面临更大的难度和挑战。桩可打入性分析是安装工程的关键一环。桩体能否顺利打入设计深度受桩的设计参数、地质条件参数及施工工艺参数等的影响^[1-4]。桩体可打入性分析的可靠性取决于土阻力预测的准确性, 针对管桩打桩时土阻力计算, 国内外学者做了很多研究。Heerema等^[5]提出了桩侧摩阻力疲劳效应的概念, 认为打桩使土体产生疲劳, 桩侧摩擦力远远小于静承载力。

Stockard^[6]通过对打桩记录进行反算, 发现打桩时的土阻力仅仅是桩基承载力的0.33~0.5倍。Aurora^[7]发现70%的工程中, 土阻力为承载力的0.4, 35%的工程中土阻力仅为承载力的0.33, 甚至更小。Stevens等^[8]提出了黏性土、密砂和岩石中土阻力预测模型, 给出了当桩体闭塞和不闭塞情况下的土阻力值的上下限。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2014CB046800); 国家科技重大专项项目(2011ZX05056-002-01); 上海交大国家重点实验室开放课题(1201)

收稿日期: 2014-07-16

Zandwijk 等^[9]、Alm 等^[10]和 Colliat 等^[11]进行了相似的研究, 并提出了改进的模型。李飒等^[12-13]研究分析了大直径长管桩的成桩机理, 提出了打桩过程中土阻力变化特点并通过对土层打桩记录的反分析, 提出了打桩时黏土层计算参数的选取方法。随着对桩体可打入性的不断深入, 一些土阻力预测的其他方法被提出。Mabsout 等^[14]利用有限元模拟桩贯入的整个过程, 得到了打桩过程中土阻力以及阻力沿桩身和桩尖的分布情况。Goble 等^[15]采用打桩分析软件对打桩数据进行分析, 提出了土的动力特性对土阻力的影响。Frank 等^[16]通过对3个海洋工程桩基现场试验结果进行分析, 提出了开口桩桩端一定范围内土阻力计算方法。Alm^[17-18]对大量工程的桩基土阻力进行反分析, 并建立土阻力与 CPT 结果之间的关系。James 等^[19]对3个工程的在密砂中打桩数据进行反分析, 建立了土阻力与 CPT 之间的关系, 并对密砂中打桩机理进行了讨论。Choe 等^[20]建立了考虑打桩过程中能量转化因素的土阻力预测模型。

虽然国内外学者对打桩过程中土阻力的预测方法进行了大量的研究, 但这些方法均没有考虑不同的打桩过程对土阻力可能造成的影响。在实际工程当中, 打桩过程中土阻力的大小与打桩过程密切相关。例如, 打桩过程中的停锤很容易导致拒锤现象的出现; 而打桩过程中的溜桩, 使得打桩预测与实际情况产生较大的偏差, 往往导致打桩总锤击数的降低。溜桩一般是指桩在自重作用下自由下沉至一定的深度。本文中溜桩指的是在打桩过程中, 在一次锤击后桩体不受控制的自由下沉。为了进一步提高桩可打性分析的准确性, 考虑不同的打桩过程对土阻力的影响, 本文根据中国东海海域某工程中现场桩基的全程监测数据, 对打桩过程中出现溜桩情况时土阻力的预测方法进行了研究。

1 土阻力预测方法

目前国内外学者提出的预测土阻力的计算方法可以分为两类: 一类是根据地质勘察结果预测土阻力; 另一类是利用 CPT 结果进行土阻力预测。目前实际工程中常采用第一类方法进行计算, 采用这类方法预测土阻力时, 一般情况下, 对于砂性土, 单位侧摩阻力和单位桩端阻力的计算方法和文献[21]中计算静承载力时的方法相同。而对于黏土, 在计算打桩过程中的土阻力时, 需要考虑打桩的影响。文献[21]对于桩基承载力采用下式进行计算:

$$Q_d = Q_f + Q_p = fA_s + qA_p, \quad (1)$$

式中, Q_f 为桩侧摩阻力, Q_p 为桩端总承载力, f 为单位桩侧摩阻力, A_s 桩外侧表面积, q 单位桩端承载力, A_p 桩端总面积。在黏土中的桩基的单位侧摩阻为

$$f = \alpha S_u, \quad (2)$$

单位桩端承载力为

$$q = 9S_u, \quad (3)$$

式中, α 为无量纲系数, S_u 土体的不排水强度。

对于打桩过程中黏性土中土阻力计算方法目前比较常用的计算方法有以下3种:

(1) Semple 等^[22]计算方法

在连续打桩过程中, 土体不排水强度的选取考虑了应力历史的影响, 采用系数 F_p 进行折减, 打桩时的土阻力 (SRD) 可表示为

$$\begin{cases} \text{SRD} = \sum F_p S_{\text{unc}} (\text{OCR})^{0.85} A_s + 9S_u A_p, \\ F_p = 0.5(\text{OCR})^{0.3} S_u / S_{\text{unc}} = (\text{OCR})^{0.85}, \\ S_{\text{unc}} = \sigma'_v (0.11 + 0.0037\text{PI}). \end{cases} \quad (4)$$

式中 F_p 为承载力折减系数; OCR 为土体超固结比; S_{unc} 为黏性土正常固结条件下的不排水抗剪强度; S_u 为黏性土实际不排水抗剪强度; σ'_v 为有效上覆土压力; PI 为黏性土塑性指数。

(2) Stevens^[23]方法

Stevens^[23]指出连续打桩过程进行可打入分析时, 土阻力的预测有上限和下限两种情况。对于不形成土塞的管桩, 其下限值完全忽略管桩的内侧摩阻力。此时土阻力下限可以表示为

$$\text{SRD} = \sum 0.5S_{\text{unc}} A_s + 9S_u A_p. \quad (5)$$

(3) Puech 等^[24]方法

Puech 等^[24]通过对 Angola 近海的硬黏土中打桩数据进行研究, 发现在硬黏土中连续打桩几百锤之后, 土阻力仅仅为静承载力的20%, 甚至更小。他建议硬黏性土的土阻力的计算式为

$$\text{SRD} = \sum 0.2S_{\text{unc}} A_s + \sum 0.1S_{\text{unc}} A_i + 9S_u A_p. \quad (6)$$

式中, A_i 桩内侧表面积。

2 工程背景

2.1 工程概述

某导管架平台位于中国东海, 平均水深84.1 m。平台采用大直径钢管群桩基础, 共计12根。桩体直径 $\phi 2438$ mm (96"), 桩侧壁厚45~80 mm, 桩端壁厚65 mm, 桩长118.5 m, 每根桩质量达434.9 t, 最终入泥96 m。根据勘察报告提供的工程地质情况, 勘察揭露深度为125 m, 分为15个土层, 主要以粉细砂、砂质粉土和粉质黏土为主。各土层的分布及相应的力学指标见表1。

表1 土层分布及力学指标

Table 1 Description of soil layers and physical parameters

序号	深度/m	土层描述	力学指标
1	0~1.8	中密粉细砂	$\varphi=15^\circ$
2	1.8~3.3	中密—密实粉细砂	$\varphi=20^\circ$
3	3.3~8.0	砂粉和粉细砂	$\varphi=15^\circ$
4	8.0~13.0	软—稍硬粉黏	$S_u=15\sim 30\text{ kPa}$
5	13.0~19.5	中密粉细砂	$\varphi=20^\circ$
6	19.5~24.4	密实粉细砂	$\varphi=25^\circ$
7	24.4~32.0	中密砂粉和细砂	$\varphi=20^\circ$
8	32.0~39.2	稍硬—硬质粉黏	$S_u=45\sim 80\text{ kPa}$
9	39.2~53.0	硬—坚硬粉黏和粉土	$S_u=67\text{ kPa}$
10	53.0~55.2	中密—密粉砂和砂粉	$\varphi=25^\circ$
11	55.2~57.6	坚硬粉黏	$S_u=155\text{ kPa}$
12	57.6~64.2	中密—密砂粉和粉砂	$\varphi=25^\circ$
13	64.2~72.8	硬粉黏和粉土迭层	$S_u=81\text{ kPa}$
14	72.8~81.0	中密—密实砂粉	$\varphi=25^\circ$
15	81.0~125.0	非常坚硬—硬粉黏	$S_u=140\sim 170\text{ kPa}$

12根桩自由入泥在21 m左右,采用MHU1200液压锤进行打桩,在打桩过程中均发生了不同程度的溜桩,溜桩深度最大达40 m。为清楚起见,选择了其中一根桩的锤击能量随深度变化曲线,见图1。

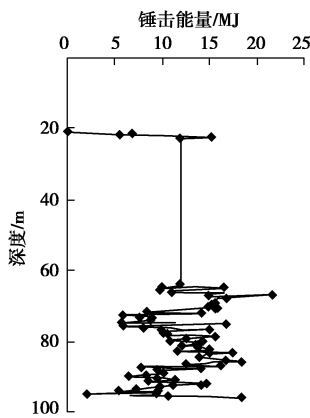


图1 打桩记录

Fig. 1 Driving record

2.2 现场高应变监测试验

为了保证打桩的顺利进行,打桩过程中对其中两根桩进行了全程高应变监控。本次试验使用PAK主机,防水传感器,防水电缆均为美国PDA公司的产品。高应变动测法应用于水下打桩,在国内尚属首次。与通常情况下的试验相比,水面以下动测试验成本高,难度大,对于传感器的安装、传感器与电缆连接和测试过程中水下防水电缆的处理提出了更高的要求。图2为本次水下高应变动测监控打桩过程的试验装置图。

由于两根桩的测试结果非常接近,采用一根桩的结果进行分析。试验桩自由入泥21.5 m,在打入24 m

时发生溜桩,至62 m停止,溜桩深度达38 m。

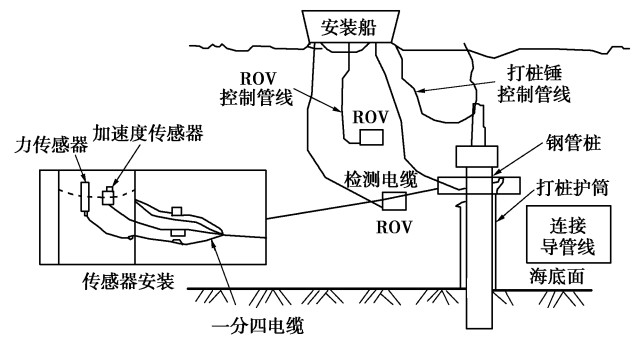


图2 水下高应变动测监控打桩过程试验装置图

Fig. 2 Test device for underwater dynamic load tests

该桩共锤击1868锤,每锤一击由传感器传输一组测试曲线,共计获得1868组数据,对这些数据采用了CAPWAP软件进行分析。CAPWAP打桩分析软件以一维波动理论为基础,以动测监测的力波曲线(或速度波曲线)为边界条件进行迭代计算,当计算曲线与实测曲线满足精度要求时,计算结束,输出结果。理论上讲,对每一条曲线进行分析,可以得到每一击的桩侧摩阻的分布和桩端阻力,因此可以通过现场测试数据对打桩过程中的土阻力变化进行追踪。

3 打桩过程对土阻力的影响

3.1 打桩结束时的土阻力

首先,对打桩结束时的土阻力进行分析。计算分析采用了4种不同的方法:①根据打桩的测试曲线采用CAPWAP进行分析(简称CAPWAP);②根据打桩记录,利用GRLWEAP进行分析。GRLWEAP是以波动方程为理论基础的打桩分析软件(简称GRLWEAP);③采用上文中提到的常用计算方法计算土阻力;④根据API 2A中对桩基承载力计算的相关规定计算单桩静承载力。将采用不同方法得到的结果进行对比,在计算过程中认为土塞处于不闭合状态,对比结果如图3。

从图3中看出,CAPWAP的结果与GRLWEAP的结果最为接近,而采用其他方法取得的预测值则与其有较大的区别。API法由于是计算桩基静承载力的方法,完全不考虑打桩过程的影响,因而偏差最大。其他的考虑打桩影响的方法得到的结果与CAPWAP相比均明显偏大。

为了探讨导致上述偏差的原因,对打桩过程中由CAPWAP得到的桩基单位侧摩阻力沿深度的分布以及桩端阻力与API得到的数值进行了比较,见图4,5。它们之间的区别可以近似的认为是打桩过程对土阻力的影响。

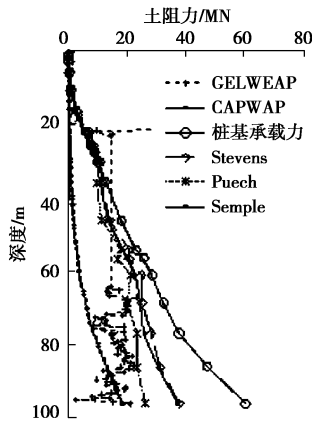


图 3 不同方法得到的打桩过程中土阻力对比

Fig. 3 Comparison of soil resistances among different methods

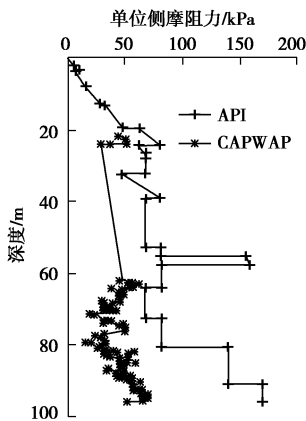


图 4 桩基的单位侧摩阻

Fig. 4 Unit friction resistance of piles

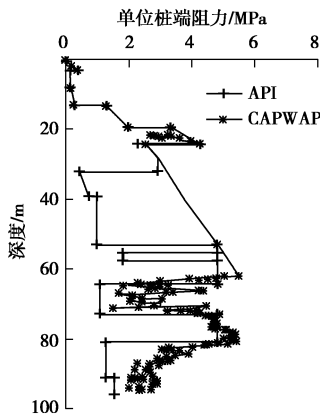


图 5 桩基的单位端阻

Fig. 5 Unit end bearing of piles

图 4, 5 显示, 打桩结束时测得的桩的单位侧摩阻要明显小于 API 的计算值, 而单位桩端阻与 API 的计算值相当, 甚至更大。说明打桩过程中土阻力的降低主要来自于桩侧摩阻力的减小。

3.2 打桩过程对桩侧摩阻力的影响

为了进一步明确打桩过程中桩侧摩阻力的变化情况, 对 CAPWAP 得到的不同贯入深度的桩侧摩阻分布进行了分析。图 6 选取了 5 个不同贯入深度时的桩侧

摩阻力随深度变化情况作为示例。其中曲线 A, B, C, D 和 E 分别代表当桩体贯入 24, 63, 68, 85, 96 m 时的桩侧摩阻力变化曲线。图 7 为打桩结束时即桩体贯入 96 m 时的实测曲线和 CAPWAP 分析曲线。

由图 6 可以看到, 利用实测曲线, 可以得到某一入泥深度处桩侧摩阻力在整个打桩过程中变化的情况。例如: 图 6 中的曲线 A 为入泥深度为 24 m 时桩侧摩阻力沿深度的分布, 由此曲线可以得到泥面以下 20 m 处的桩侧摩阻力在入泥 24 m 时为 3 MN, 曲线 B 为入泥 63 m 时桩侧摩阻力随深度的分布, 同样可以得到泥面以下 20 m 处的桩侧摩阻力在桩基入泥深度为 63 m 时为 0.5 MN。采用这样的方法, 对所测的曲线进行分析, 就可以得到在不同的贯入深度时, 同一位置处 (例如泥面以下 20 m) 侧摩阻力在整个打桩过程中的变化情况, 分析结果见图 8~10, 图 8~10 中分别给出了泥面以下 20 m; 30, 38, 50, 60 m; 70, 80, 90 m 位置的土体的单位侧摩阻力随桩基入泥深度的改变而变化的情况。

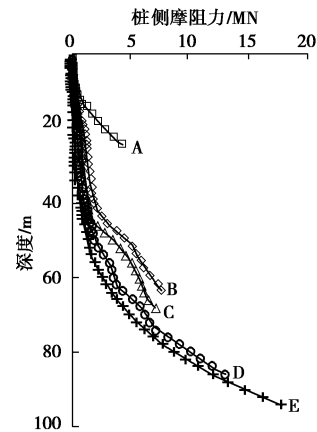


图 6 桩体贯入不同深度时的侧摩阻力

Fig. 6 Friction of piles at different penetration depths

图 8 给出的是泥面以下 20 m (粉细砂) 位置处单位侧摩阻力随打桩进程变化的情况。从图中可以看到, 此处的土体, 在没有发生溜桩之前, 即在桩基入泥深度小于 24 m 时, 单位侧摩阻力在 45~30 kPa 左右, 而在桩基入泥超过 24 m 后 (24~62 m 溜桩), 单位侧摩阻急剧减小, 在溜桩后的打桩过程中仅提供很小的侧摩阻力, 其平均值为 3 kPa, 为根据 API 规范计算数值 (70 kPa) 的 5% 左右。

图 9 为泥面以下 30, 38, 50, 60 m 位置处土体侧摩阻力在打桩过程中变化的情况。这些位置都是桩体溜桩经过的位置。从图中可以看到, 在这些土层中侧摩阻力随桩基入泥深度的变化并不完全相同。在 30 m 处 (砂质粉土和细砂) 单位侧摩阻在打桩过程中一直很小, 最大不超过 10 kPa, 在打桩结束时其平均

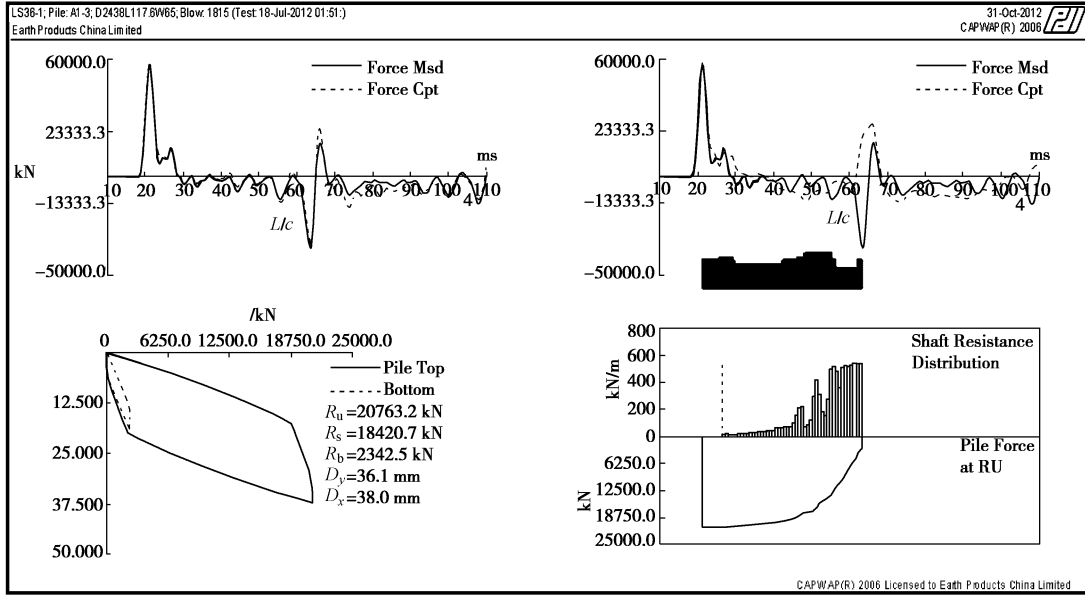


图 7 动测和 CAPWAP 分析曲线

Fig. 7 Results of dynamic load tests

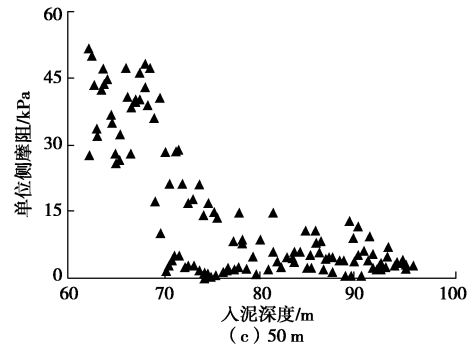
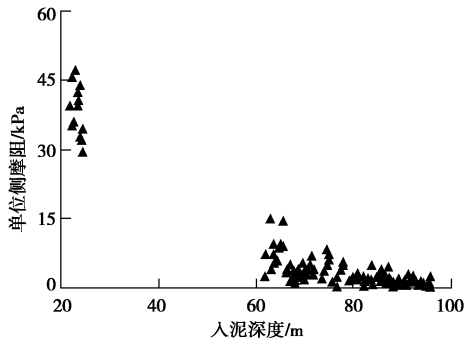


图 8 20 m 位置处单位侧摩阻随入泥深度的变化

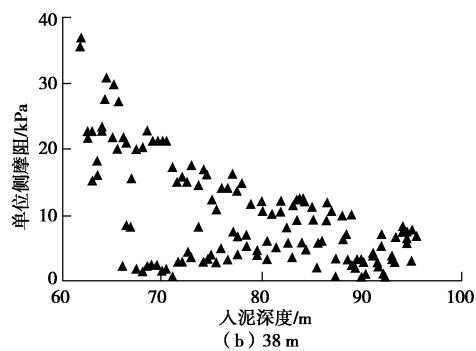
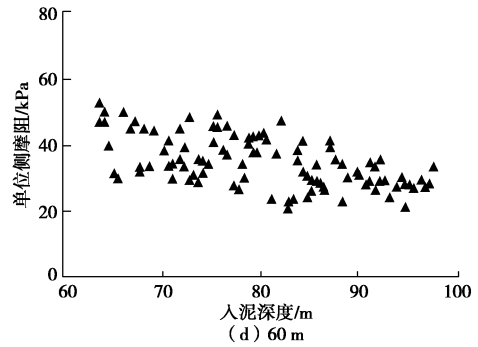
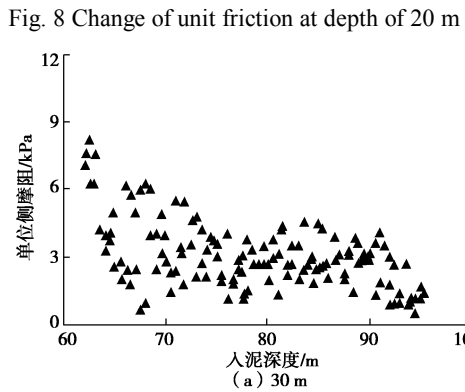


图 9 24~62 m 土体的单位侧摩阻随入泥深度的变化

Fig. 9 Change of unit friction with penetration at depth between 24~62 m

值为 4 kPa 为根据 API 规范计算数值 (63 kPa) 的 5% 左右。而在 38 m (粉质黏土), 50 m (粉质黏土和粉土) 处的土体在打桩入泥深度为 62~75 m 时仍然可以提供一定的侧摩阻力, 但侧摩阻力随着打桩的进行表现出了较明显的衰减, 在打桩结束时, 即入泥深度达到 96 m 时, 最终值平均仅为 3~5 kPa 左右。在 60

m (细砂和砂质粉土), 单位侧摩阻力也表现出了一定程度的随打桩进行的衰减趋势, 但其衰减速度明显降低, 在整个打桩过程中, 60 m 处的砂土提供的单位侧摩阻为 API 的 35%~50%。

由上分析可以看出, 在 0~30 m 的范围内, 由于溜桩的产生, 在后续打桩过程中基本不再提供侧摩阻力, 而 38~50 m 之间, 溜桩结束后仍能提供部分阻力 (50%左右), 随着打桩的进行侧摩阻力逐渐衰减至 5%左右。在 60 m, 溜桩对于侧摩阻力的影响明显减小, 在后续打桩中可以提供相应的阻力。

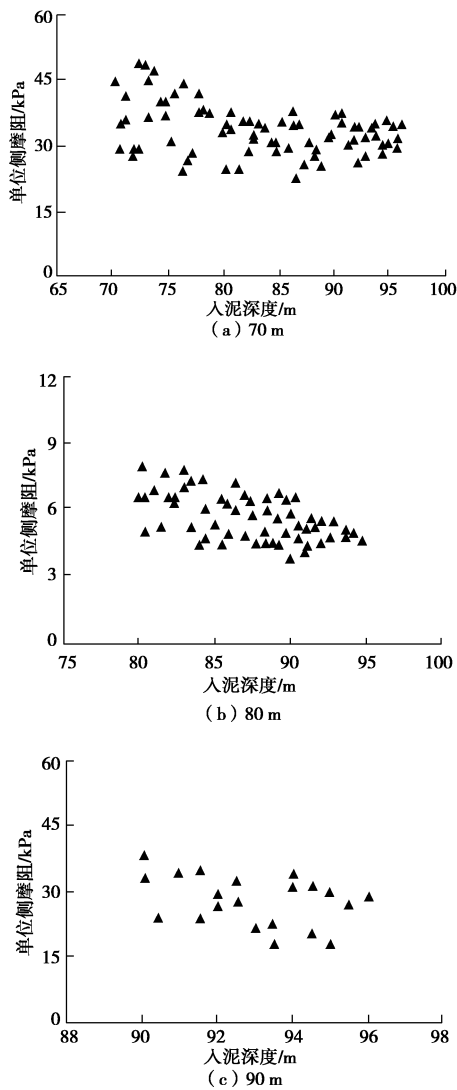


图 10 62~96 m 土体的单位侧摩阻随入泥深度的变化

Fig. 10 Change of unit friction with penetration at depth between 62~96 m

图 10 为泥面以下 62~96 m 土体中单位侧摩阻随打桩进行产生的变化。从图中可以看到, 随着打桩的进行, 在 70 m (粉质黏土和粉土迭层)、80 m (砂质粉土) 和 90 m (粉质黏土) 表现出了侧摩阻力随打桩进行而发生减小的情况, 与 API 规范计算值相比, 其

折减系数为 0.3~0.5, 与 Stevens 的推荐值比较接近。

4 存在溜桩时打桩土阻力的分布特点

4.1 土阻力分布特点

从上述分析可见, 打桩过程对于桩侧摩阻力的分布产生了很大的影响。打桩过程中发生溜桩现象对于不同位置处的土体影响程度并不完全相同。为了更加合理地描述桩体贯入不同位置处的土阻力情况, 采用相对深度比 z/H 来表示土体的位置, 其中 z 为土体在泥面以下的深度, H 为溜桩结束时的深度, 例如泥面以下 24 m 处的 $z/H=24/62$ 。选择两种不同入泥深度时的桩侧摩阻力进行对比分析, 见图 11。曲线 a 表示的是在溜桩结束时 (即桩基入泥深度为 62 m 时, 各深度处的单位侧摩阻力; 曲线 b 表示了打桩结束时即桩基入泥 96 m 时各深度处的单位侧摩阻力)。

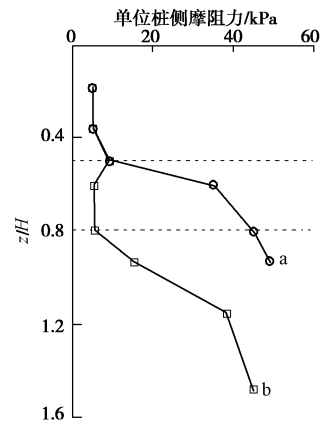


图 11 单位侧摩阻的变化

Fig. 11 Change of unit friction resistance

从图中可以看到, 溜桩对于不同深度处的桩侧摩阻力的影响程度可分为 3 种不同的情况。第一种情况发生在 z/H 在 0~0.5 的范围内, 在此范围的土体, 溜桩结束时的侧摩阻力与打桩结束时的侧摩阻力基本相同, 且数值很小, 这部分土体可以认为是受溜桩影响最为严重的区域, 将其称为完全影响区。第二种情况发生在 z/H 在 0.5~0.8 的范围, 此区域土体的特点是在溜桩结束时尚具备一定的土阻力, 但随着后续打桩的进行, 侧摩阻力迅速衰减至很小值, 将其称之为部分影响区。第三种情况发生在 z/H 大于 0.8 的范围, 侧摩阻力的变化与一般打桩过程中侧摩阻力的变化相似, 此区域土体基本不受溜桩的影响, 其桩侧摩阻力的衰减主要受打桩过程的影响。本次测试显示, 此区域黏性土其考虑打桩影响的折减系数为 0.3~0.5。

根据上述分析, 在预测桩侧摩阻力时, 计算公式的选择需要考虑溜桩的影响, 不同的影响区域采用不同的计算方法。

(1) 完全影响区

即 $z/H \leq 0.5$ 时, 认为桩侧摩阻力仅为 API 计算值的 0.05, 土阻力按下式计算: (砂土、黏土均适用)

$$f_{dr} = 0.05f \quad (7)$$

式中, f_{dr} 为打桩过程中的单位侧摩阻力, f 为静承载力的单位侧摩阻力。

(2) 部分影响区

即 $0.5 < z/H \leq 0.8$ 时, 需要进一步评价后续打桩过程的影响。

从图 8 (b)、(c) 可以看出, 当桩基入泥在 70 m 之内时, 桩基单位侧摩阻力近似呈线性衰减, 超过 70 m 以后, 桩侧摩阻力快速减小至很小的数值。由此可以看到, 桩基侧摩阻力的衰减程度与后续打桩的过程有关。当最终入泥深度较浅时 (例如最终入泥深度只有 70 m), 后续打桩的影响有限, 侧摩阻力的衰减可以按照常规方法进行, 即按照 Stevens 和 Semple 的方法进行; 如果桩基入泥深度较大, 后续打桩影响较大时, 侧摩阻力会衰减至很小的数值。根据上述分析, 对此部分进行进一步的分区, 即: ① 如果 $z/H_{end} \geq 0.44$, 式中 H_{end} 为桩基最终的入泥深度, 即设计入泥深度较小, 溜桩后, 后续打桩距离设计入泥深度较小, 后续打桩对土体性质影响较小, 仍采用常用方法进行计算。② 如果 $z/H_{end} < 0.44$, 即溜桩后, 设计入泥深度较大时, 后续打桩对土体性质影响较大, 此时有 (砂土, 黏土均适用):

$$f_{dr} = 0.05f \quad (8)$$

(3) 无影响区

即 $z/H > 0.8$ 时, 认为该区域土阻力不受溜桩影响, 仍采用常用公式处理。

4.2 土阻力分布特点验证

为了验证上述总结的土阻力分布特点的可靠性, 采用本文的方法对中国某海域另一工程 (工程一) 打桩过程中的土阻力进行预测, 并将预测结果与现场的实测结果进行了对比。

工程一平台采用钢管群桩基础, 共 16 根。桩体直径 $\phi 2743$ mm (108"), 桩长 158 m, 最终入泥 135 m, 壁厚 50~100 mm, 单桩质量约 755 t。该场地主要以粉细砂、砂质粉土和粉质黏土为主。打桩过程中对其中一根桩 (试验桩) 进行了全程高应变动测试验。试验桩自由入泥 12 m, 打桩于 13.5 m 处发生大范围溜桩, 溜桩至 72 m 结束。采用 CAPWAP 软件对该桩高应变动测结果进行了分析, 并将得到的土阻力沿深度的分布结果与采用本文方法以及不考虑打桩过程的常用方法的计算结果进行了对比, 见图 12。

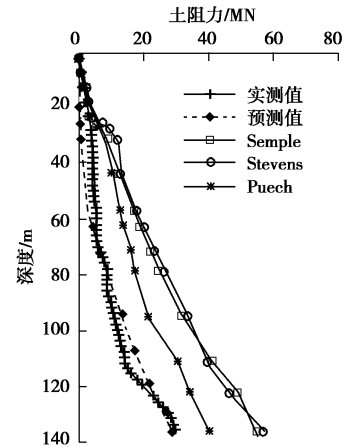


图 12 不同方法的结果对比

Fig. 12 Comparison of results of different methods

5 结 论

本文从实际工程中发生的溜桩实例出发, 根据现场动测试验对打桩过程中溜桩对土阻力变化的影响进行了探讨, 并提出了一种考虑溜桩的土阻力计算方法。通过上述研究可以得到以下 4 点结论。

(1) 打桩过程中出现溜桩现象对土阻力产生不可忽视的影响, 发生溜桩后土阻力明显减小, 采用不考虑溜桩影响的常用方法预测的土阻力与实测值偏差较大。

(2) 打桩过程中, 发生溜桩时土阻力的降低主要来自于桩侧摩阻力的减小。

(3) 泥面以下不同位置处的桩侧摩阻力受溜桩影响程度不同, 可以分为 3 个区域: 完全影响区, 不完全影响区和不影响区。

(4) 不同影响区域应采用不同的方法计算土阻力。在完全影响区, 桩侧摩阻力仅仅为静承载力的 5%。在部分影响区, 土阻力的计算需要结合最终的入泥深度进行评估; 在不影响区, 桩侧摩阻力为静承载力的 30%~50%, 仍按常用方法进行计算。

参考文献:

- [1] RAO G N, GANDHI S R. Parametric study on pile drivability-selection of hammer and other components[J]. IE(I) Journal, 1995, 76(5): 19 - 24.
- [2] 龚维明, 蒋永胜, 穆保岗, 等. 某海洋平台钢管桩可打性分析[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 227 - 230. (GONG Wei-ming, JIANG Yong-sheng, MU Bao-gang, et al. Drivability analysis of steel pipe pile of offshore platform[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(2): 227 - 230. (in Chinese))
- [3] 王仕方, 陈仁朋, 陈云敏. 预制桩可打性的分析[J]. 浙江大

- 学学报(工学版), 2003, **37**(6): 657 - 663. (WANG Shi-fang, CHEN Ren-peng, CHEN Yun-min. Study on pile drivability with a simplified method[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2003, **37**(6): 657 - 663. (in Chinese))
- [4] 张 伟, 王娜娜, 刘振纹, 等. 振动锤作用下海上桩基可打入性的数值模拟[J]. 中国海上油气, 2012, **24**(6): 61 - 65. (ZHANG Wei, WANG Na-na, LIU Zhen-wen, et al. Numerical simulation of drivability of offshore pile under the action of vibratory hammer[J]. China Offshore Oil and Gas, 2012, **24**(6): 61 - 65. (in Chinese))
- [5] 李 飒, 蒋衍洋, 周扬锐, 等. 大直径钢管桩打桩振动对黏土土阻力的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, **34**(2): 46 - 51. (LI Sa, JIANG Yan-yang, ZHOU Yang-rui, et al. Influence of pile driving on soil resistance in clay[J]. Journal of Civil, Architectural & Environment Engineering, 2012, **34**(2): 46 - 51. (in Chinese))
- [6] 李 飒, 韩志强, 杨清侠, 等. 海洋平台大直径超长桩成桩机理研究[J]. 工程力学, 2010, **27**(8): 241 - 245. (LI Sa, HAN Zhi-qiang, YANG Qing-xia, et al. The formation mechanism of super large diameter and deep penetration pile in offshore platform[J]. Engineering Mechanics, 2010, **27**(8): 241 - 245. (in Chinese))
- [7] HEEREMA E P. Relationships between wall friction, displacement velocity and horizontal stress in clay and in sand for pile drivability analysis[J]. Ground Engineering, 1979, **12**(1): 55 - 56.
- [8] STOCKARD D M. Case histories-pile driving in the Gulf of Mexico[C]// Proceedings of 11th Offshore Technology Conference. Houston, 1979, **3443**(2): 737 - 746.
- [9] AURORA R. Case studies of pile set-up in the Gulf of Mexico[C]// Proceedings of 12th Offshore Technology Conference. Houston, 1980, **3824**(3): 281 - 290.
- [10] STEVENS R F, WILTSIE E A, TURTON T H. Evaluating pile drivability for hard clay, very dense sand and rock[C]// Proceedings of 14th Offshore Technology Conference, Houston, 1982, **4205**(1): 465 - 482.
- [11] ZANDWIJK C, DIJK B P, VOETEN J A J, et al. An improved pile drivability theory for Gulf of Mexico soils[C]// Offshore Technology Conference. Houston, 1983, 4503.
- [12] ALM T, BYE A, KVALSTAD T. New interpretation of soil resistance for pile drivability analysis[C]// Proceedings of 12th ICSMFE. Rio de Janeiro, 1989.
- [13] COLLIAT J L, VERGOBBI P, PUECH A. Friction degradation and set-up effects in hard clay. Offshore Congo and Angola[C]// Proceedings of 25th Offshore Technology Conference. Houston, 1993, 7192.
- [14] MABSOUT M E, TASSOULAS J L.A finite model for the simulation of pile driving[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1994, **37**(2): 257 - 278.
- [15] GOBLE G G, RAUSCHE F. Pile drivability predictions by CAPWAP[J]. Numerical Method in Offshore Piling, ICE. London, 1980: 29 - 36.
- [16] FANK R, MATT N, SCOTT W and LIANG Li-qun. CAPWAP and refined wave equation analysis for drivability predictions and capacity assessment of offshore pile installation[C]// Proceedings of the ASME 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Honolulu, 2009: 1 - 9.
- [17] ALM T, HARME L. Soil model for drivability predictions[C]// Offshore Technology Conference, Houston, 1998.
- [18] ALM T, HAMRE L. Soil model for pile drivability prediction based on CPT interpretation[C]// Proceedings of 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Istanbul, 2001: 1297 - 1302.
- [19] JAMES A, IVY A. Analyzing drivability of open ended piles in very dense sands[J]. Journal of Deep Foundation Institute, 2010, **4**(1): 32 - 44.
- [20] CHOE J, JUVKAM-WORD H C. Pile driving analysis for top hammering and bottom hammering[J]. Journal of Geotechnology and Geoenvironmental Engineering, 2002, **128**(2): 174 - 182.
- [21] API RP 2A. Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platform-working stress design[S]. American Petroleum Institute, 2000: 60 - 63.
- [22] SEMPLE R M, GEMEINHARDT J P. Stress history approach to analysis of soil resistance to pile driving[C]// Proceedings of 13th Offshore Technology Conference. Houston, 1981(1): 165 - 172.
- [23] STEEVENS R F. The effect of a soil plug on pile drivability in clay[C]// Proceedings of 3rd International Conference on Application of Stress-Wave Theory to Piles. Ottawa, 1988: 861 - 868.
- [24] PUECH A, POULET D, BOISORD P. A procedure to evaluate pile drivability in the difficult soil conditions of the southern part of the Gulf of Guinea[C]// Proceedings of 22th Offshore Technology Conference. Houston, 1990(1): 327 - 334.