

水利水运工程学报

HYDRO-SCIENCE AND ENGINEERING

打桩过程互层土中桩基侧摩阻力变化研究

黄山田, 鲁华伟, 于文太, 董付庆, 谢圣杰, 李飒

Study on change of friction in pile driving in interlayered soil

HUANG Shantian, LU Huawei, YU Wentai, DONG Fuqing, XIE Shengjie, LI Sa

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20220625002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

PCC桩复合地基离心模型制备及桩土接触模拟

Simulating the PCC pile composite foundation for centrifuge modelling and pile-soil interaction

水利水运工程学报. 2020(2): 91 <https://doi.org/10.12170/20190121001>

桩靴贯入砂土层时邻近桩挤土压力分析

Analysis of pile shaft soil pressure caused by spudcan penetration into sand

水利水运工程学报. 2019(5): 91 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.05.012>

砂土中钻井船插桩对邻近群桩影响的模型试验

Model tests on effects of spudcan penetration on an adjacent pile group

水利水运工程学报. 2020(3): 75 <https://doi.org/10.12170/20190316001>

路堤深厚软基管桩复合地基数值模拟

Numerical simulation of pipe pile composite foundation of deep soft foundation under embankment

水利水运工程学报. 2018(2): 43 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.02.006>

桩基施工对边坡黏土强度影响试验研究

Experimental study on influence of pile foundation construction on slope clay strength

水利水运工程学报. 2018(2): 97 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.02.013>

钢管混凝土嵌岩桩钢-混凝土联合承载规律试验研究

Experimental research of steel-concrete joint bearing law of steel-concrete rock-socketed piles

水利水运工程学报. 2021(3): 9 <https://doi.org/10.12170/20200724002>



扫码进入官网, 阅读更多精彩文章



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20220625002

黄山田, 鲁华伟, 于文太, 等. 打桩过程互层土中桩基侧摩阻力变化研究 [J]. 水利水运工程学报, 2023(6): 126-132. (HUANG Shantian, LU Huawei, YU Wentai, et al. Study on change of friction in pile driving in interlayered soil[J]. Hydro-Science and Engineering, 2023(6): 126-132. (in Chinese))

打桩过程互层土中桩基侧摩阻力变化研究

黄山田¹, 鲁华伟¹, 于文太¹, 董付庆¹, 谢圣杰², 李 飒²

(1. 海洋石油工程股份有限公司, 天津 300461; 2. 天津大学 建工学院, 天津 300072)

摘要: 准确确定打桩过程中的单位侧摩阻力, 是提高桩基可打入性分析精度的重要途径。基于某互层土地现场静力触探数据及高应变动测结果, 分析打桩过程中单位侧摩阻力的变化规律。现场打桩全过程动测数据分析显示, 与常规场地类似, 打桩过程中同一深度的单位侧摩阻力随着贯入深度的增加而降低, 总侧摩阻力表现出明显的衰减趋势; 土体的互层分布对单位侧摩阻力随深度的变化趋势影响显著, 表现为在砂土及粉土层中单位侧摩阻力也出现明显降低。现有的半理论半经验公式无法正确描述上述情况, 对于互层土地, 建议黏土层可基于灵敏度确定折减因子, 砂土和粉土宜采用与上层黏土相同的折减因子。采用该方法计算得到的单位侧摩阻力与实测值基本吻合。该方法可用于互层土地的打桩计算, 提高桩基可打入性分析精度。

关键词: 钢管桩; 静力触探; 侧摩阻力; 互层土

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2023)06-0126-07

随着海洋工程的快速发展, 钢管桩得到越来越普遍的应用。受到现场土质、海洋环境等因素影响, 海上桩基的设计和安装变得越来越具挑战性。有效提高桩基可打入性分析的精度, 是海上桩基顺利安装的重要保障。目前, 桩基可打入性分析主要采用波动方程的方法, 打桩过程中土阻力的确定对计算结果具有重要影响。打桩过程中的土阻力由桩侧摩阻力和桩端阻力两部分组成, 其计算方法与桩基承载力的计算类似, 不同的是, 由于受到打桩过程的影响, 其数值往往小于桩基的设计承载力^[1]。常用的侧摩阻力计算方法主要有两类, 一类基于桩基设计参数, 一类基于 CPT 测试结果。基于桩基设计参数的常用方法有 Stevens 方法^[2], 在计算大直径管桩打桩中的土阻力时, 将计算分为土塞闭塞和土塞不闭塞两种情况: 当土塞不闭塞时, 在管壁内、外两侧都会产生侧摩阻力, 而在桩端, 端阻只作用于桩端环状面积上; 当土塞发生闭塞时, 侧摩阻力只发生在管桩外侧壁, 而桩端处阻力作用于桩端底部整个面积。两种情况均需分别计算土阻力的下限值和上限值, 上、下限值中侧摩阻力的计算方法有所不同。Sample 等^[3]提出, 砂土层中的单位侧摩阻力与 API(美国石油学会)规范的计算方法相同, 不进行折减, 而在黏土层中连续打桩时, 土阻力远小于静承载力, 需引入折减因子计算打桩中的侧摩阻力。

近年来, 采用静力触探试验(Cone Penetration Test, CPT)测试数据进行桩基承载力计算越来越被工程界所重视。这主要是因为作为原位试验的 CPT 方法可直接、持续、便捷地在现场测试岩土层的工程特性, 在海上勘察中得到了广泛应用^[4-5]。API 规范在 2007 年引入了 4 种基于 CPT 的桩基承载力计算方法^[6], 即简化设计方法 ICP-05、UWA-05、Fugro-05 和 NGI-05^[7-8]。需要说明的是这 4 种方法主要针对砂土中的钢管桩, 对于黏土中的钢管桩, 尚无认可度较高的方法。Alm 等^[9]基于 CPT 测试结果, 针对黏土和砂土分别提出

收稿日期: 2022-06-25

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(51890911)

作者简介: 黄山田(1979—), 男, 四川开县人, 高级工程师, 主要从事海洋工程海上安装研究。

E-mail: huangshantian@coopec.com.cn 通信作者: 李 飒(E-mail: lisa@tju.edu.cn)

了打桩过程中侧摩阻力的计算方法; Van 等^[10] 提出了基于 CPT 的黏土中侧摩阻力的计算方法; Prendergast 等^[11] 基于 ICP-05 和 Fugro-05 承载力计算方法, 提出了砂土中侧摩阻力计算方法。上述各种打桩过程中侧摩阻力的计算方法均属于半理论半经验的方法。

由于桩基属于隐蔽工程, 尤其是海上桩基, 环境荷载复杂, 为确保桩基在使用过程中的安全可靠, 桩基自身质量检验尤为重要^[12]。受到海上试验条件的限制, 海上桩基检测常采用高应变的方法。高应变动测是一种对单桩竖向承载力和桩身完整性进行判定的检测方法。尽管高应变动力测试结果受到桩身性质、测试仪器、测试条件、测试人员业务素质等许多因素影响, 但仍可以快速检测桩基的完整性和承载力, 适用条件宽泛^[13-15]。近年来, 高应变动测在海洋工程中得到广泛应用, 特别是高应变动测可以展开打桩全程监控, 这为研究打桩过程中的侧摩阻力变化提供了条件^[16]。

本文基于某黏土、砂土土层交替出现场地(本文称为互层土场地)的现场打桩全程动测数据, 对互层土场地打桩过程中侧摩阻力的变化规律进行分析, 探讨互层土场地打桩过程中侧摩阻力的计算方法。

1 工程背景

某海上打桩场地, 桩基采用大直径钢管桩。桩径 2 438 mm, 桩体分为两段, 第 1 段桩长 65 m, 第 2 段桩长 52 m, 两段桩长共计 117 m, 最终入泥深度 87 m, 采用 MHU1200S 液压锤进行安装。现场进行了钻孔取样及 CPT 原位测试, CPT 现场测试结果见图 1。结合钻孔取样及 CPT 的结果, 得到现场的土层分布见表 1。从表 1 和图 1 可见, 本场地土质条件比较特殊, 黏土、粉土、砂土交替出现。在桩基贯入深度范围内出现了 20 个土层, 大部分土层厚度小于 5 m。

对所取土样进行室内试验, 同时结合 CPT 的测试结果, 得到各土层的桩基设计参数见表 1。利用表 1 的数据, 根据 API 规范推荐的方法^[6], 计算得到现场桩基的单位桩端阻力和单位侧摩阻力随深度的分布见图 2。

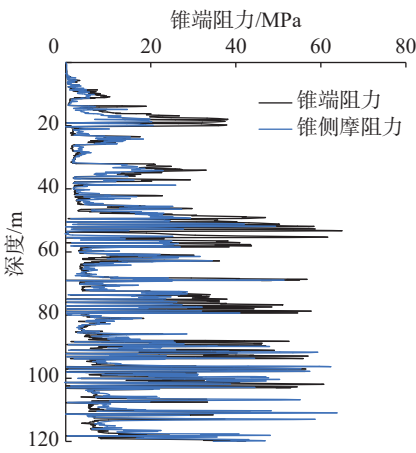


图 1 CPT 测试结果
Fig. 1 Results of CPT

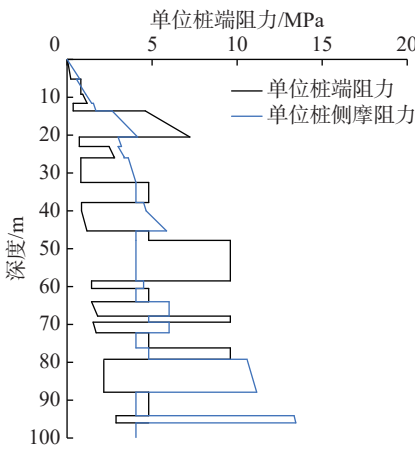


图 2 桩基单位端阻和单位侧摩阻力随深度的分布
Fig. 2 Unit toe and unit shaft resistance of pile

由于场地存在密实砂土层, 考虑到打桩过程中可能存在的风险, 对其中 1 根桩第 2 段的贯入进行了全程高应变动态监测。第 2 段桩基的贯入锤击数共计 3 624 击, 采集了其中 950 击的数据, 每组数据对应 1 组力波和速度波曲线, 利用 CAPWAP 软件对采集数据进行分析。

表 1 土层分布及桩基设计参数
Tab. 1 Distribution of soil layers and pile design parameters

层位	深度/m	土质描述	浮重度/ (kN·m ⁻³)	不排水强度/ kPa	桩土之间的 外摩擦角/(°)	层位	深度/m	土质描述	浮重度/ (kN·m ⁻³)	不排水强度/ kPa	桩土之间的 外摩擦角/(°)
1	0~5.1	黏土和粉质黏土	7.5	2~24		12	47.8~58.4	粉质细砂	9.5		30
2	5.2~9.1	砂质粉土与粉质黏土互层	9.4		20	13	58.5~60.4	粉质黏土	9.8	160	
3	9.2~11.5	砂质粉土	9.0		20	14	60.5~63.9	黏土和粉质黏土	9.1		25
4	11.6~13.5	粉质黏土	8.4	40		15	64.0~67.7	粉质细砂	10.3	160~200	
5	13.6~20.4	粉质细砂	9.5		30	16	67.8~69.3	粉质黏土	9.5		30
6	20.5~22.9	粉质黏土	10.0	80		17	69.4~72.1	粉质细砂	9.7	170~190	
7	23.0~25.9	砂质粉土	9.2		20	18	72.2~76.1	粉质黏土	9.4		25
8	26.0~32.4	粉质黏土	9.3	90		19	76.2~79.4	粉土和砂质粉土	10.0		30
9	32.5~37.7	砂质粉土和粉质细砂	9.4		25	20	79.5~87.8	粉质细砂	9.8	240	
10	37.8~45.2	粉质黏土	9.9	95~130		21	87.9~94.0	粉质黏土	9.8		20
11	45.3~47.7	砂质粉土	9.2		25	22	94.1~96.0	粉质细砂和砂质粉土	9.8	320	

2 互层土打桩过程中的桩侧摩阻力

通过安装在桩顶以下一定距离的力传感器和加速度传感器测得应力波信号,应用应力波理论得到不同贯入深度的桩侧摩阻分布。假设桩为一维弹性杆,桩的一维波动方程为:

$$\partial^2 u / \partial x^2 = (1 / c^2) \partial^2 u / \partial t^2 + R \tag{1}$$

式中: u 为截面 x 处的位移; x 为桩截面的位置; c 为应力波在桩内的传播速度, $c = \sqrt{E/\rho}$, E 为桩的弹性模量, ρ 为钢的密度; t 为时间; R 为反映土阻力的参数项。CAPWAP 计算程序中,土的计算模型采用 Smith 模型,土体模型不仅包含静阻力、弹性极限和阻尼系数,还包括土体再加载及卸载有关的参数^[17]。通过行波理论求解波动方程,可获得可靠度较高的桩基承载力,并区分桩侧摩阻和桩端阻力^[18]。

将现场实测的波形曲线输入 CAPWAP 程序中,利用实测曲线拟合法对计算值和实测值反复比较迭代,使计算结果与实测结果误差满足要求。每一组曲线可得到对应的桩侧摩阻分布和桩端阻力,因此可以通过现场测试数据对打桩过程中的土阻力包括桩侧摩阻力和桩端阻力的变化进行追踪。图 3 为 5 个不同贯入深度的桩基侧摩阻力随深度变化,以及桩单位侧摩阻力沿深度的分布。由图 3(a)可见,桩的侧摩阻力随深度的增加而增加,但同一深度处的侧摩阻力随贯入深度的增加而降低。同时可以看到,当侧摩阻力降低到一定数值后,其值基本保持不变。由图 3(b)可见,各土层的单位侧摩阻力随桩基贯入深度的增加也具有相同的趋势。这与 Alm 公式^[9]中认为存在残余桩基侧摩阻力的结论一致。

由于进行了全程监测,通过分析每次锤击的监测数据,可以得到不同桩基贯入深度时某固定位置所提供的单位侧摩阻力(见图 4)。以 31.0 m 为例,从图 4(a)可见,在贯入深度为 31.0 m 时,单位侧摩阻力约为 27 kPa,为设计单位侧摩阻力的 40%;随着贯入深度的增加,31.0 m 处的单位侧摩阻力进一步降低,当贯入深度超过 36.0 m 后,单位侧摩阻力趋于一个定值,即 Alm 方法^[9]中的残余桩侧摩阻力,约为 14 kPa,为设计承载力的 20%。从单位侧摩阻力的变化过程可见,打桩的影响主要集中在 5 m 左右;超过 5 m 后,即贯入深度超过 36.0 m 的后续打桩,对 31.0 m 处单位侧摩阻力的影响不大。各位置单位侧摩阻力的变化趋势与 31.0 m 的情况基本一致,随着贯入深度的增加,同类土体的残余单位侧摩阻力趋于一致,为 12~14 kPa。

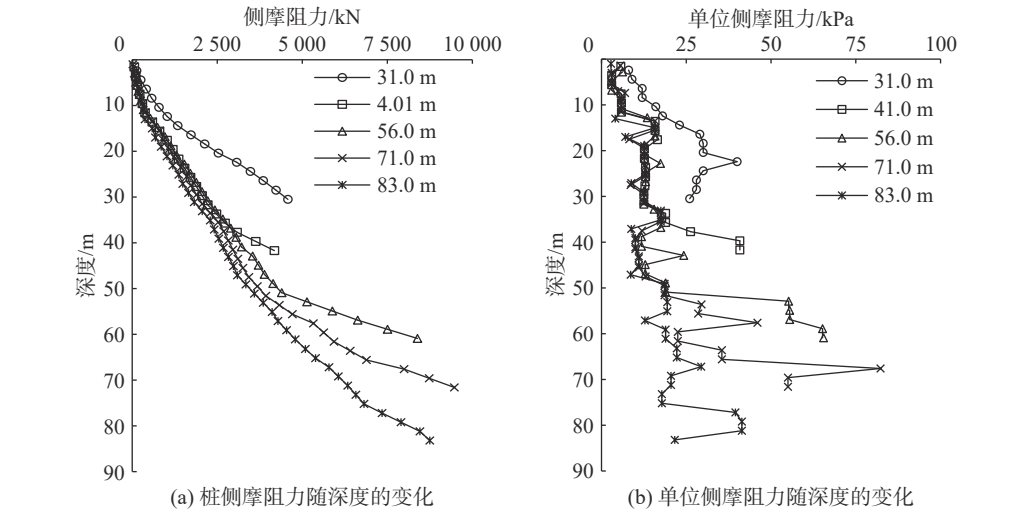


图 3 桩体贯入不同深度时的侧摩阻力
Fig. 3 Change of friction with penetration depth

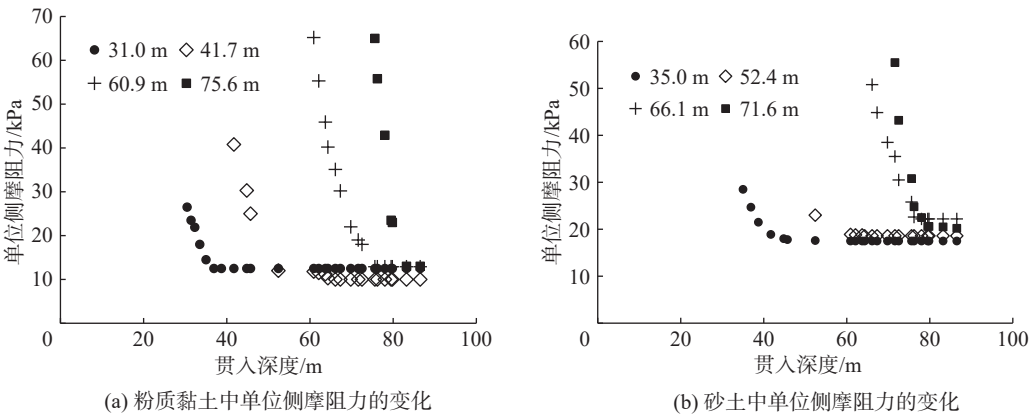


图 4 单位侧摩阻力随贯入深度的变化
Fig. 4 Change of unit friction with penetration depth

图 4(b)为深度 35.0、52.4、66.1 和 71.6 m 处(均位于细砂层,见表 1)单位侧摩阻随贯入深度变化的关系。可见,这些位置单位侧摩阻力的变化趋势与粉质黏土层基本一致,随着贯入深度的增加,同类土体的残余单位侧摩阻力趋于一致,约为 20 kPa,这一数值远低于该土层的设计单位侧摩阻力(见图 2)。造成这一现象的原因,主要是因为本场地的土层分布。从表 1 可见,深度超过 30.0 m 后,砂土层和粉质黏土层交替出现,各类土的土层厚度为 2~5 m,交替出现的土层降低了砂土层的排水性,使单位侧摩阻力大幅下降。

3 互层土打桩过程中桩侧摩阻力的计算方法

采用常用的 Stevens 方法^[2]和 Alm 法^[9]计算桩基单位侧摩阻力,其中 Stevens 法砂土层中的单位侧摩阻力与 API 规范的计算方法相同,不进行折减;黏土层中引入折减因子计算单位侧摩阻力^[2]:

$$f_{dr} = F_p f \tag{2}$$

式中: f_{dr} 为打桩过程中的单位侧摩阻力; f 为根据 API 规范计算得到的单位侧摩阻力; F_p 为折减因子, $F_p = 0.5(f_{OCR})^{0.3}$,其中, f_{OCR} 为超固结比,对于正常固结黏土, $f_{OCR}=1$,Stevens 折减因子为 0.5。

Alm 等提出打桩过程中单位桩侧摩阻力 f_s 与 CPT 锥端阻力 q_c 的关系^[9],

$$f_s = f_{sres} + (f_{si} - f_{sres})\exp(k(d - p)) \tag{3}$$

式中： f_s 为打桩过程中桩的单位侧摩阻力； f_{si} 为打桩前桩的单位侧摩阻力； d 为土层深度； p 为桩端贯入该土层深度； k 为衰减因数； f_{sres} 为打桩后的残余单位桩侧摩阻力，对于黏性土， $f_{sres} = 0.004q_c(1 - 0.0025q_c/p'_0)$ ，其中， q_c 为锥端阻力； p'_0 为有效上覆土压力；对于砂性土， $f_{sres} = 0.2f_{si}$ 。对于衰减因数 k ，其值与贯入深度有关，无论是黏土还是砂土， $k = (1/80)(q_c/p'_0)^{0.5}$ 。

采用上述两种方法得到的打桩过程中单位侧摩阻力见图 5。由图 5 可见，Alm 法在黏土层的计算结果与实测值吻合良好，但在砂土（粉土）层单位侧摩阻力明显偏大。Stevens 法无论在砂土还是黏土层，计算的单位侧摩阻力均大于实测值。

根据本场地的实际情况，考虑到打桩过程的安装效应，对于黏土中的单位侧摩阻力，参考 DNV 规范推荐的黏土中吸力锚安装过程中侧摩阻力的计算方法^[19]，采用灵敏度 S_t 的倒数代替 F_p 计算中的 $(f_{OCR})^{0.3}$ ，即 $F_p = 0.5(1/S_t)$ ，灵敏度 $S_t = S_{u0}/S_{ud}$ ，其中， S_{u0} 为原状土的不排水强度； S_{ud} 为完全扰动土体不排水强度。黏土层的灵敏度可以利用 CPT 测试数据进行计算^[20]， $S_t = S_u/f_s$ ， S_u 为土体的不排水强度； f_s 为 CPT 的侧摩阻。 S_u 的计算式为： $S_u = (q_t - \sigma_{v0})/N_{kt}$ ， q_t 为修正的锥端阻力； σ_{v0} 为上覆压力； N_{kt} 为参数，本文取 20。根据 CPT 获得的灵敏度见图 6。

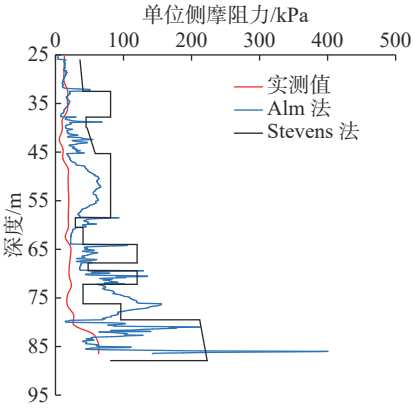


图 5 单位侧摩阻力计算值和实测值的比较

Fig. 5 Comparison between the measured and calculated unit frictions

对于砂土（粉土）层，根据图 4 可见，在互层土地，砂土（粉土）与黏土具有相同的衰减趋势，因此选择砂土（粉土）上一层的黏土土层的折减因子对砂土（粉土）层的单位侧摩阻力进行折减。采用上述方法得到单位侧摩阻力和实测值的比较见图 7。从图 7 可见，两者吻合良好。

4 结 语

基于某互层土地地的 CPT 测试及高应变全程监测数据，利用 CAPWAP 对打桩过程中的侧摩阻力进行分析研究，分析结果显示：

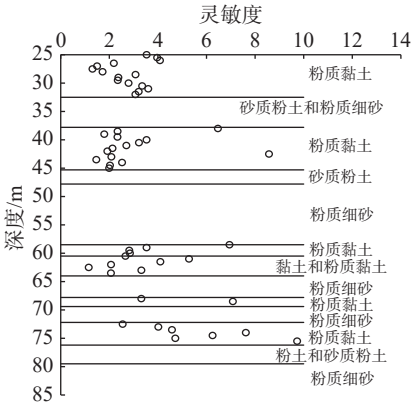


图 6 灵敏度随深度的变化

Fig. 6 Change of sensitivity with depth

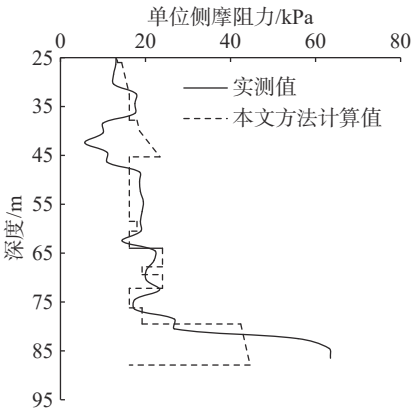


图 7 本文方法与实测值的比较

Fig. 7 Comparison between the measured and calculated unit frictions with the proposed method

(1)对于互层土地,打桩过程中桩侧摩阻力随深度的增加而增加,但是同一深度处的侧摩阻力随着贯入深度的增加而降低,这一趋势与常规场地相同。且无论是黏土、粉土,还是砂土,均存在残余单位侧摩阻力,这与 Alm 的研究结果一致。

(2)互层土地由于黏土、粉土、砂土层交替出现,且各土层的厚度大多为 2~5 m,因此粉土层和砂土层的单位侧摩阻力也表现出明显的衰减。这一点与常规场地侧摩阻力衰减主要出现在黏土层有明显差异,且无论黏土层还是粉土、砂土层,单位侧摩阻力降低至残余单位侧摩阻的贯入距离均约为 5 m。超过 5 m,桩的贯入对残余侧摩阻力的影响不大。

(3)对于本文的互层土地,现有的针对砂土和粉土层单位侧摩阻力计算方法得到的结果均偏大。这主要是因为现有计算方法中,对砂土和粉土层单位侧摩阻力的折减因子低于黏土层。考虑到互层土的特点,对常用的 Stevens 方法进行了修正,即在计算打桩过程中的单位侧摩阻力时,对于黏土层,引入灵敏度计算折减因子;对于砂土和粉土层,按照与其相邻的上一层黏土的折减因子进行折减。采用该方法计算得到的打桩过程中的单位侧摩阻力与实测值吻合良好。

参 考 文 献:

- [1] 徐保照,李飒,夏玲晓,等.不同安装法对管桩桩周土影响的有限元分析[J].[水利水运工程学报](#),2015(2):38-43.(XU Baozhao, LI Sa, XIA Lingxiao, et al. Numerical simulation analysis of driving methods affecting soil around pipe pile[J]. [Hydro-Science and Engineering](#), 2015(2): 38-43. (in Chinese))
- [2] STEVENS R S, WILTSIE E A, TURTON T H. Evaluating pile drivability for hard clay, very dense sand, and rock[C]//Offshore Technology Conference (OTC4205). Houston: Offshore Technology Conference, 1982: 465-481.
- [3] SEMPLE R M, GEMEINHARDT J P. Stress history approach to analysis of soil resistance to pile driving[C]//Proceedings 13th Annual Offshore Technology Conference. Houston: Offshore Technology Conference, 1981: 165-172.
- [4] 康思伟,贾志远.利用CPT结果进行可打入性分析[J].[中国港湾建设](#),2016,36(10):36-39,43.(KANG Siwei, JIA Zhiyuan. Pile driveability analysis by using CPT results[J]. [China Harbour Engineering](#), 2016, 36(10): 36-39, 43. (in Chinese))
- [5] 宋玉鹏,宋丙辉,孙永福,等.海洋静力触探在海上平台桩基承载力计算中的应用[J].[工程地质学报](#),2021,29(6):1942-1948.(SONG Yupeng, SONG Binghui, SUN Yongfu, et al. Application of seabed cone penetration test in calculation of bearing capacity of pile foundation of offshore platform[J]. [Journal of Engineering Geology](#), 2021, 29(6): 1942-1948. (in Chinese))
- [6] American Petroleum Institute. Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design: API RP 2A-WSD[S]. USA: API Publishing Services, 2007.
- [7] JARDINE R, CHOW F, STANDING J, et al. ICP design methods for driven piles in sands and clays[M]. London: Thomas Telford Publishing, 2005.
- [8] LEHANE B M, SCHNEIDER J A, XU X. A review of design methods for offshore driven piles in siliceous sand[C]//Frontiers in Offshore Geotechnics. Perth: Taylor & Francis Group, 2005.
- [9] ALM T, HAMRE L. Soil model for pile driveability predictions based on CPT interpretations[C]//15th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Istanbul: AA Balkema Publishers, 2001.
- [10] VAN DIJK B F J, KOLK H J. CPT-based design method for axial capacity of offshore piles in clays[C]//Proceedings of the Frontiers in Offshore Geotechnics II. London: Taylor and Francis Group, 2011.
- [11] PRENDERGAST L J, GANDINA P, GAVIN K. Factors influencing the prediction of pile driveability using cpt-based approaches[J]. [Energies](#), 2020, 13(12): 3128.
- [12] RAUSCHE F, MOSES F, GOBLE G G. Soil resistance predictions from pile dynamics[J]. [Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division](#), 1972, 98(9): 917-937.
- [13] SCHNEIDER J A, HARMON I A. Analyzing drivability of open ended piles in very dense sands[J]. [DFI Journal the Journal of the Deep Foundations Institute](#), 2010, 4(1): 32-44.

- [14] SVINKIN M R. High-strain dynamic pile testing: problems and pitfalls[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2010, 24(2): 99.
- [15] LIKINS G, ROBINSON B, PISCSALKO G. A brief overview of testing of deep foundations[C]//9th International Conference on Testing and Design Methods for Deep Foundations. Ishikawa: Elsevier BV, 2012.
- [16] 赵亮, 闫澍旺, 樊之夏, 等. 高应变动测技术在海洋石油平台桩基工程中的应用研究[J]. *工程力学*, 2011, 28(5): 219-225. (ZHAO Liang, YAN Shuwang, FAN Zhixia, et al. On the application of high strain testing in pile driving of offshore platform[J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(5): 219-225. (in Chinese))
- [17] 徐攸在. 桩的动测新技术[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. (XU Youzai. New dynamic testing technology for piles[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002. (in Chinese))
- [18] 徐攸在, 刘兴满. 桩的动测新技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989. (XU Youzai, LIU Xingman. New technology for dynamic test of pile[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1989. (in Chinese))
- [19] Det Norske Veritas. Geotechnical design and installation of suction anchors in clay: DNV RP E303[S]. Norway: DNV, 2005.
- [20] ROBERTSON P K, CABAL K. Guide to cone penetration testing for geotechnical engineering[M]. California: Gregg Drilling & Testing, Inc, 2014.

Study on change of friction in pile driving in interlayered soil

HUANG Shantian¹, LU Huawei¹, YU Wentai¹, DONG Fuqing¹, XIE Shengjie², LI Sa²

(1. *Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China*; 2. *Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

Abstract: Accurately determining the unit friction in pile driving is very important for improving the accuracy of pile driveability analysis. Based on the in-situ cone penetration test data and high strain dynamic test results of an interlayered soil site, the change of unit friction during pile driving is studied. The results show that during the pile driving, although the total friction of pile keeps increasing with increment of penetration depth, and the total friction at the same penetration depth decreases, which is the same as that in ordinary site, the interlayered soil has a significant effect on the change of unit friction with depth. The results of analysis shows that the unit friction also decreases significantly in sand layer and silt layer in the interlayered site, which could not be described correctly with the existing semi theoretical method. In view of this, a calculation method of reduction factor in clay based on sensitivity is proposed. At the same time, it is pointed out that the same reduction factor as that of clay should be used for sandy layer and silt layer for the interlayered soil. The unit friction obtained by the proposed method is basically consistent with the measured value. The proposed method could be used in practice to improve accuracy of pile driveability analysis in an interbedded soil site.

Key words: steel-pipe pile; cone penetration test; shaft; interlayered soil