

引用格式:徐玉,孔德森,邓美旭,等. 海洋平台大直径钢管桩溜桩区间计算方法[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2019,38(3):50-56.

XU Yu, KONG Desen, DENG Meixu, et al. Pile running interval calculation method of large-diameter steel pipe piles on offshore platform[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 38(3): 50-56.

海洋平台大直径钢管桩溜桩区间计算方法

徐 玉¹,孔德森^{1,2},邓美旭¹,白翼飞¹

(1. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590)

摘 要:溜桩作为海洋平台大直径钢管桩施工过程中常见的工程事故,影响成桩质量和工程进度。本研究对溜桩区间进行合理的预测和判断,结合工程实际对溜桩产生的原因进行分析。采用静力平衡方程求出溜桩发生时的钢管桩入泥深度;计算钢管桩第二次溜桩区间时考虑了溜桩对桩侧摩阻力的影响,并将桩侧摩阻力分成三个影响区计算;使用积分学方法,对沉桩阻力做功进行计算;利用功、能原理列出钢管桩能量方程,求出溜桩长度,进而得出溜桩区间。实例计算与实测结果对比显示,新计算方法的溜桩区间计算结果与实际情况误差范围为 8%~16%,具有较高的准确度。新计算方法计算结果与现场实测数据吻合较好,可为工程中预测钢管桩溜桩区间提供参考。

关键词:海洋平台;钢管桩;溜桩区间;桩侧摩阻力

中图分类号:TU470

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2019)03-0050-07

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2019.03.006

Pile running interval calculation method of large-diameter steel pipe piles on offshore platform

XU Yu¹, KONG Desen^{1,2}, DENG Meixu¹, BAI Yifei¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevent and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: In offshore platform engineering, pile running often occurs during the driving process of large-diameter pipe piles and it will affect the quality of pile-forming and engineering process. This study aims to make predictions and assessments of pile running intervals. The causes of pile running in practical engineering were first analyzed. The pile-running depth of steel pipe piles was calculated using static equilibrium equation. While calculating the second pile running interval, the influence of pile running on skin friction was considered and was divided into three influential areas. The work of pile-sinking resistance was calculated using integral calculus. The transformation equation of energy of piles was given by using the principle of work and power to obtain the length and then the interval of pile running. The calculation obtained in the actual case study was compared with the measured results. The comparison indicates that with an error range of 8%-16%, the proposed method has higher accuracy in pile running interval prediction. This can provide a reference for predicting the interval of pile running in projects, since the calculated results are in higher conformity with the measured data.

Key words: offshore platform; steel pipe pile; pile running interval; skin friction of pile

收稿日期:2018-08-03

基金项目:国家自然科学基金项目(41372288);山东科技大学研究生科技创新项目(SDKDYC180212)

作者简介:徐 玉(1995—),男,安徽六安人,硕士研究生,从事桩基工程方面的研究. E-mail: 1157070740@qq.com

孔德森(1977—),男,山东滕州人,教授,博士生导师,主要从事桩基工程方面的研究工作,本文通信作者.

E-mail: dskong828@163.com

海洋平台作为提供生产与生活设施于一体的构筑物,集钻井、运输、施工、观测、导航于一身。其桩基施工一般使用大直径超长钢管桩,通过液压打桩锤将管桩沿导管打入海底土层。打桩过程中,当钢管桩遇到海洋土层中的软弱土层时,由于桩端阻力与桩侧摩阻力减小,经常会发生溜桩现象。溜桩不仅影响成桩质量与桩基承载力,而且还会使桩的实际贯入度与桩基的设计高程产生较大误差。

近年来,国内外学者对溜桩问题开展了一系列研究。郭生昌等^[1]结合工程实际分析了溜桩原因,并提出了相应的预防措施;孙立强等^[2]考虑桩周土体的强度折减和超孔压等因素,提出了溜桩长度的计算方法;尹汉军等^[3]采用静力平衡法对溜桩区间进行了估算;Dover 等^[4]提出了一种溜桩预测方法,并对 26 根管桩的溜桩可能性进行了预测;闫澍旺等^[5]分析了大直径钢管桩的溜桩机理,并提出了溜桩长度的计算方法。以上研究大多是针对钢管桩溜桩过程中桩侧摩阻力的折减和溜桩长度的计算开展的,很少考虑溜桩过程中不同深度桩侧摩阻力的变化,且没有针对实际工程情况采用不同的溜桩计算方法。

针对以上问题,首先对海洋平台大直径钢管桩的溜桩原因进行了分析,然后考虑溜桩对不同深度桩侧摩阻力的影响,计算得到地基极限承载力与桩端阻力的关系,进而采用静力平衡与功能原理建立了大直径钢管桩溜桩区间的新计算方法,并通过工程实例进行了对比分析,验证了计算方法的合理性和可靠性。

1 溜桩原因分析

工程实践^[6]表明,溜桩通常会在以下两种情况下发生:一是当海洋土体表层为承载力较弱的软土层;二是桩从承载力较高的土层打入承载力较小的土层时。由于海洋土体的性质,每根钢管桩在打桩过程中溜桩发生的次数会在 0 到 3 次之间。

当钢管桩刚进入海洋表面土层时,由于土层承载力较弱,在桩锤未锤击的情况下,桩自由贯入土层一定深度。当桩进入硬质土层时,桩端阻力与侧摩阻力变大,钢管桩在锤击作用下逐渐贯入土中。当桩进入软黏土层中,桩端阻力减小,桩侧摩阻力不足以承受桩与桩锤的质量,此时桩会在未锤击的情况下贯入土层,即桩体发生溜桩。当桩进入硬质土层或桩侧摩阻力增加到一定值时,溜桩停止。当桩继续贯入时,虽然侧摩阻面积增加,但由于土体的重塑,桩侧摩阻力实际上是不断减小的。所以当再次进入软土层中,会发生二次溜桩现象。图 1 为溜桩现象示意图。

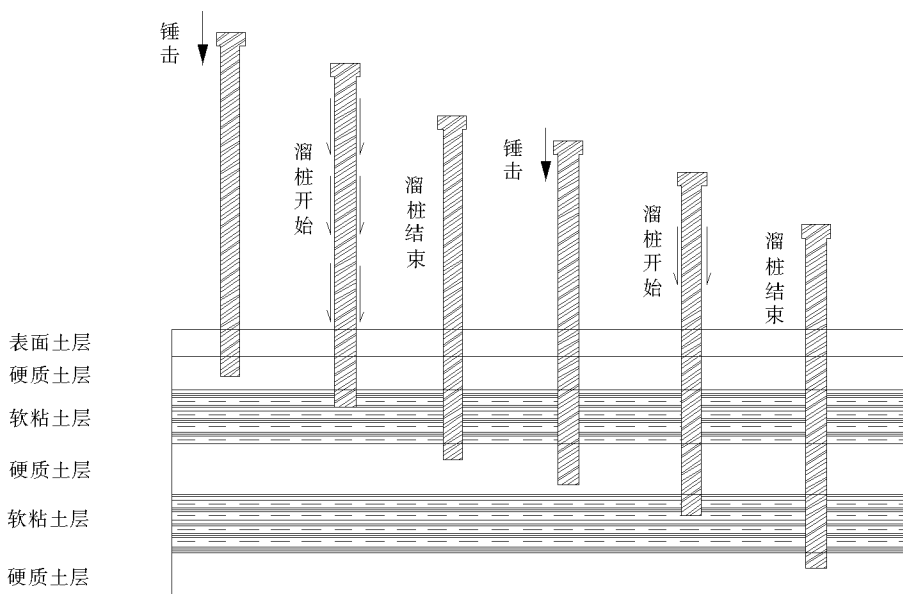


图 1 溜桩现象示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pile running phenomenon

当桩体受到的总土阻力满足以下条件之一时便有可能发生溜桩:①总土阻力小于桩身自重;②总土阻力小于桩与桩锤的重力;③总土阻力小于桩与桩锤的惯性力。

2 沉桩阻力计算

2.1 桩端阻力的计算

对于溜桩过程中大直径钢管桩受到的桩端阻力,可以通过求环状桩端受到的土阻力得到。砂土层中的环状桩端阻力采用别列柴策夫公式^[7]计算,将计算得到的桩的环形端部截面的极限承载力视为桩端阻力。

根据别列柴策夫计算公式,砂土层中桩端阻力

$$q_u = q_D N_q + \gamma B N_r \quad (1)$$

式中: q_u 为桩端阻力,kPa; N_q, N_r 为地基极限承载力系数,通过土体的内摩擦角 φ 确定; q_D 为地基处的超载,kPa; B 为钢管桩的直径,m; γ 为土层浮容重,kN/m³。地基极限承载力系数见表1。

表1 地基极限承载力系数表

Tab.1 Ultimate bearing capacity coefficient of foundation

$\varphi/(\circ)$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
N_r	0	0.51	1.20	1.80	4.00	11.00	21.80	45.40	125.00	326.00
N_q	1.00	1.64	2.69	4.45	7.42	12.70	22.50	41.30	81.30	173.30

对于钢管桩在黏性土中受到的环状桩端阻力,可通过 $q_u = N_r c_u$ 进行计算, c_u 为黏土的不排水抗剪强度,kN/m²。Som等^[8]通过实验和分析提出在黏性土中 N_r 取9比较合适,因此黏性土中桩端阻力为:

$$q_u = 9c_u \quad (2)$$

2.2 桩侧摩阻力的计算

通过对溜桩现象的分析^[9]可以得到,在桩贯入土体的过程中,桩底部土体会发生剪切破坏,土体形成重塑区,土体强度也随之改变。这种现象会导致土体重塑强度低于原土体强度,侧摩擦系数减小,因此桩土之间的静态摩阻力并不适用于桩侧摩阻力,需要计算桩土之间的动侧摩阻力。

Dover和Davidson^[4]通过实验与分析认为,钢管桩在砂土中受到的动侧摩阻力可以将静侧摩阻力折减0.7到0.9倍得到;张海山等^[10-12]认为沉桩过程中,大直街钢管桩内会形成10倍于桩径的土塞,桩壁内侧摩阻力是桩外侧摩阻力的50%。因此在考虑桩壁内侧摩阻力的基础上,对桩土之间的静态摩阻力使用折减因子进行折减,得到钢管桩在砂土层中的动侧摩阻力 f_s 为:

$$f_s = \alpha k p_0 \tan \delta \quad (3)$$

式中: α 为砂土动侧摩阻力折减系数,海洋岩土中 α 取0.75比较合理; k 为地基压力系数; p_0 为土层上覆压力,kN; δ 为土体外摩擦角。

对钢管桩在黏土层中桩侧摩阻力的计算,同样需要对土体强度进行折减。李飒等^[13-15]通过分析实验得出土体表面以下不同位置处的桩侧摩阻力受溜桩影响程度不同,将桩的入土深度划分为3个影响区,图2为不同影响区单位侧摩阻力的变化。

如图2所示,曲线a表示在溜桩结束时各深度处的单位侧摩阻力;曲线b表示了打桩结束时各深度处的单位侧摩阻力, z 为土体在泥面以下的深度, H 为溜桩结束时的深度。根据土体在泥面以下的深度 z 与管桩溜桩结束时的深度 H

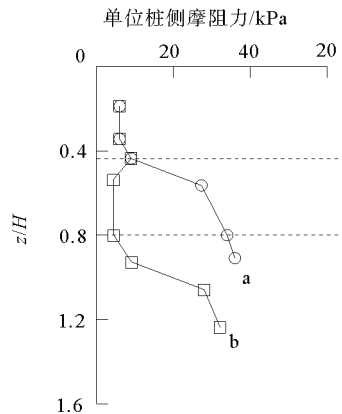


图2 单位侧摩阻的变化

Fig.2 Change of unit friction resistance

之间的比值,将管桩入泥土层分为完全影响区、不完全影响区和不影响区。

结合以上考虑,当钢管桩发生第一次溜桩时,桩动侧摩阻力可采用修正的 API 法来计算,计算公式为:

$$f_d = 0.3\beta c_u \quad (4)$$

式中: β 为黏着系数, c_u 为不排水抗剪强度, kN/m^2 。当 $c_u \geq 72 \text{ kPa}$ 时, $\beta = 0.5$,当 $24 \text{ kPa} \leq c_u < 72 \text{ kPa}$ 时, β 值在 $[0.5, 1]$ 区间内线性增加。

对于钢管桩发生二次溜桩的情况,计算桩在黏土层中的动侧摩阻力时,需要考虑第一次溜桩对桩侧摩阻力的影响,并根据影响程度的不同将桩基入泥深度区间分成三个影响区,分别是完全影响区、半完全影响区和无影响区。

1) 完全影响区

当 $z/H < 0.5$ 时,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,这部分土体是受溜桩影响最为严重的区域,称其为完全影响区。将桩受到的动侧摩阻力通过折减成静侧摩阻力的 0.075 倍得到,计算公式为:

$$f_d = 0.075f \quad (5)$$

式中: f_d 为黏土层中的动侧摩阻力, kN , f 为静侧摩阻力, kN 。

2) 半完全影响区

当 $0.5 < z/H < 0.8$ 时,此区域土体的特点是在第二次溜桩发生时尚具备一定的土阻力,但随着后续溜桩的继续,侧摩阻力迅速衰减,将其称之为部分影响区。计算时需要考虑管桩最终入泥深度 H_{end} 的影响:①如果 $z/H_{\text{end}} > 0.44$,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,仍可采用修正的 API 法进行计算;②如果 $z/H_{\text{end}} < 0.44$ 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,此时动侧摩阻力

$$f_d = 0.075f \quad (6)$$

3) 无影响区

当 $z/H > 0.8$ 时,该区域溜桩对土体的扰动小,桩体侧摩阻力受溜桩的影响忽略不计,桩体动侧摩阻力仍可用修正的 API 法计算方法,则该区域侧摩阻力

$$f = 0.3\beta c_u \quad (7)$$

式中:当 $c_u \geq 72 \text{ kPa}$ 时, $\beta = 0.5$;当 $24 \text{ kPa} \leq c_u < 72 \text{ kPa}$ 时, β 值在 $[0.5, 1]$ 区间内线性增加。

3 溜桩区间计算方法

通过对溜桩机理的分析,针对现有的溜桩区间算法的计算过程进行了改进。首先采用别列柴策夫公式得到桩端阻力,再考虑溜桩对桩侧摩阻力的影响,将黏性土分成不同影响区并使用不同的折减因子计算摩阻力,砂质土中则通过常规方法计算桩侧摩阻力,并基于溜桩这一动态过程,采用静力平衡与功能原理建立大直径钢管桩溜桩区间的新计算方法。

当钢管桩贯入海洋土层中时,桩体会受到液压锤的锤击力、自身重力、浮力、桩端阻力及桩侧摩阻力的作用。根据动力学经验,在液压锤锤击管桩时,管桩与液压锤的动力视为 1.2 倍的桩与液压锤的重力之和($G_1 + G_2$),所以管桩受力条件满足式(8)时会发生溜桩。通过式(8)~(9)即可计算出溜桩发生时管桩入泥深度 L 。

$$1.2(G_1 + G_2) = f_{\text{外}} + q_u + F \quad (8)$$

$$F = \gamma_s \frac{\pi B^2}{4} L \quad (9)$$

式中: F 为管桩受到的浮力, kN ; B 为钢管桩直径, m ; γ_s 为海水的容重。

随着溜桩的进行,钢管桩的速度会在土阻力与浮力的作用下逐渐减小至零,即桩的动能在克服土阻力与浮力的做功中耗散,因此可根据功能原理列出能量方程,求出溜桩长度 l 。溜桩过程中桩侧摩阻力所做功的计算公式为:

$$W_1 = \sum_{i=1}^x (f_{mi} \pi B l^2) + \sum_{j=1}^y \left(\int_0^l f_{mj} dv \right) \tag{10}$$

式中： W_1 为桩侧摩阻力做的功，kJ； B 为钢管桩直径，m； x 为开始溜桩时的土层数； f_{mi} 为溜桩发生位置前第 i 层土的摩擦力，kN； y 溜桩区间的土层数； f_{mj} 为溜桩区间内的第 j 层土的摩擦力，kN， v 为桩在溜桩区间内的每层土中的滑动距离，m。

由积分学方法可得， f_{mj} 在溜桩区间为分段函数，故在溜桩区间内黏土层与砂土层的动摩擦阻力通过如下两式计算：

$$f_{md} = \begin{cases} \beta c_u \pi B \cdot v, & 0 \leq v \leq t \\ \beta c_u \pi B \cdot t, & t < v \leq l \end{cases}; \tag{11}$$

$$f_{ms} = \begin{cases} \alpha k (p_{j-1} + \pi B^2 v \gamma_j / 4) \tan \delta, & 0 \leq v \leq t \\ \alpha k p_j \tan \delta, & t < v \leq l \end{cases} \tag{12}$$

式中： f_{md} 为溜桩区间内第 j 层黏土的摩擦力，kN； t 为相应土层的厚度，m； f_{ms} 为溜桩区间内第 j 层砂土的摩擦力，kN； p_{j-1} 为第 $j-1$ 层土的上覆土压力，kN； γ_j 为第 j 层砂土的重度，kN/m³； p_j 为第 j 层土的上覆土压力，kN。

对于溜桩过程中桩端阻力做的功，可通过对别列柴策夫公式积分得到，计算公式为：

$$W_2 = \left(\sum_{j=1}^{y-1} q_u \cdot t \right) + q_u \cdot t' \tag{13}$$

式中： W_2 为桩端阻力做的功，kJ； t' 为溜桩结束时钢管桩在所停留土层的插入长度，m。

钢管桩所受到浮力 F_f 会随着溜桩的进行逐渐增大，因此浮力所做的功

$$W_3 = \int_L^{L+l} \left(\frac{1}{4} \pi B^2 \rho g \right) v dv \tag{14}$$

式中： ρ 为水的密度，kg/m³； g 为重力加速度，m/s²。

当液压锤对钢管桩进行锤击时，会有能量耗散，通常使用 η 系数进行修正，因此桩与锤在溜桩开始时具有的能量为 ηE 。综合以上考虑，根据能量守恒可得出桩的能量方程满足：

$$\eta E = (G_1 + G_2) l + W_1 + W_2 + W_3 \tag{15}$$

根据式(15)即可求出溜桩长度 l ，结合溜桩发生时管桩入泥深度 L ，即可得到钢管桩的溜桩区间。

4 工程实例验算

根据南海荔湾桩基平台现场施工时采集的工程数据，选取合理的土体参数，使用新计算方法求出钢管桩的溜桩区间，将计算结果与实际工程中的溜桩区间进行比对分析，验证新计算方法的合理性。

该桩基平台共有 16 根钢管桩，平均分布在桩基平台的四个角上，每根钢管桩重 643.9 kg，直径 2.74 m，桩长为 158 m。液压锤的型号为 MHU1200S，额定输出能量 1 200 kJ。为保证钢管桩周围土层性质相同，选取了平台一个角上的四根钢管桩进行计算分析。通过对土体参数分析可知，钢管桩所在土层软硬土层交替，土体浅层具有较长的黏土层，极易发生溜桩，并且在 58.8 m 和 108 m 的土体深度时，土体再次出现软黏土层，此时很大可能会发生二次溜桩乃至三次溜桩，钢管桩所在土层的土体参数列于表 2。

结合实际工程选取的土体参数，使用式(1)~(7)计算得到钢管桩打桩过程中每层土的桩端阻力，砂土动侧摩阻力以及黏土的静摩擦阻力。由表 2 的计算结果可知，砂土层中桩体受到的桩端阻力较大，桩侧摩阻力较小，黏土层中桩端阻力较小，桩侧摩阻力较大，而在管桩刚贯入土层时，主要是通过桩端阻力承受桩与桩锤重力，由此也验证了溜桩产生的原因。

将表 2 的各土层阻力代入式(8)~(15)，求出溜桩发生时管桩的入泥深度与溜桩长度，得到了三个溜桩区间，分别为 13.3~27 m、38.0~60.5 m 和 64.9~84.0 m。通过理论溜桩区间与实际工程的溜桩区间的比对，得到了如图 3 所示的比对结果。

由比对结果可知，溜桩发生时桩的入泥深度及前两次溜桩区间与实际工程情况基本一致。对于第三次

溜桩区间的计算有些偏差,这是由于第二次溜桩同样对土体产生了影响,使桩侧摩阻力发生变化,但第三次溜桩区间比理论计算的区间长度小,处于桩基工程安全范围内,故理论溜桩区间仍可为桩基设计提供参考。同时说明溜桩区间的计算需要考虑溜桩对土体产生的影响,新计算方法得到的溜桩区间与实际溜桩区间基本吻合,新计算方法的合理性得到验证。

表 2 各土层土体参数与土阻力计算结果

Tab. 2 Parameters of soil layers and calculation results of soil parameters

土层 标号	土质	土层厚度 /m	不排水强度 /kPa	内摩擦角 /(°)	容重 /(kN/m ³)	层底标高 /m	桩端阻力 /kN	动摩阻力 /kN	静摩阻力 /kN
1	中密细到粗砂	2.4	0	39	8.5	3.0	3 291.70	39.0	—
2	软到硬黏土	7.9	35	0	8.9	10.9	259.90	—	1 024.1
3	中密到密粉砂	2.3	0	37	8.9	13.2	5 944.00	112.3	—
4	中密砂质粉土与硬黏土互层	7.8	70	0	8.6	21.0	519.80	—	1 644.2
5	硬粉质黏土	3.6	50	0	9.2	24.6	371.25	—	411.9
6	密实粉细砂	8.4	0	39	8.5	33.0	9 084.60	271.7	—
7	硬粉质黏土与重密粉土互层	20.3	90	0	8.3	53.3	668.30	—	5 501.6
8	硬粉质黏土	6.1	80	0	9.0	59.4	594.00	—	1 447.9
9	中密粉土/粉细砂	5.4	0	36	8.6	64.8	15 598.10	582.7	—
10	硬黏土	11.4	100	0	8.8	76.2	742.50	—	3 389.1
11	中密砂质粉土	3.4	0	36	8.3	79.6	13 963.50	717.0	—
12	硬粉质黏土	29.3	120	0	8.5	108.9	891.00	—	10 587.5
13	中密砂质粉土	2.9	0	36	8.5	111.8	2 655.40	1 394.5	—
14	硬黏土	19.6	160	0	9.0	131.4	1 188.00	—	9 443.0

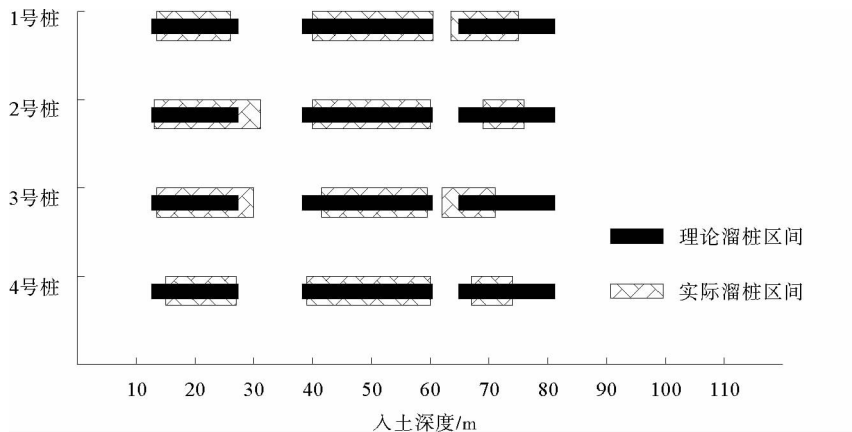


图 3 理论溜桩区间与实际溜桩区间的比对

Fig. 3 Comparison between theoretical and practical pile running interval

5 结论

通过对溜桩过程及产生原因的分析与研究,主要结论如下:

1) 当钢管桩发生二次溜桩时,考虑溜桩对桩侧摩阻力影响程度的不同,将黏土层中桩的侧摩阻力分为三个影响区,分别是完全影响区、半影响区和无影响区,对不同影响区的桩侧摩阻力使用不同的折减因子计

算,新计算方法得到的溜桩区间更接近工程实际。

2) 计算钢管桩溜桩区间时,利用静力平衡原理,求出在溜桩开始时管桩的入泥深度,使用积分学方法列出不同影响区的桩侧摩阻力与桩端阻力所做功的表达式,再结合功能原理列出管桩的能量方程,即可求出溜桩长度,进而得出钢管桩溜桩区间。

3) 通过工程实例验核,新计算方法的第一、二次溜桩区间的计算结果与实际情况误差范围为8%~16%,具有较高的准确度;第三次结果虽有所偏差,理论溜桩区间小于实际溜桩区间,仍处于桩基工程安全范围内,仍可供海洋平台桩基设计及施工提供参考。

参考文献:

- [1]郭生昌,吴少霖. 沉桩施工溜桩问题分析及解决措施[J]. 水运工程,2011(12):163-166.
GUO Shengchang, WU Shaolin. Problems of rapid sinking during pile driving and solutions[J]. Port & Waterway Engineering, 2011(12):163-166.
- [2]孙立强,贾天强,闫澍旺,等. 大直径管桩沉桩过程中溜桩判断方法研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(2):115-122.
SUN Liqiang, JIA Tianqiang, YAN Shuwang, et al. Research on prediction of pile running during large diameter pipe piles driving[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Sciences), 2016, 40(2):115-122.
- [3]尹汉军,刘玉玺,张孝卫,等. 大直径超长钢管桩溜桩长度计算新方法[J]. 中国海上油气,2014,26(增1):35-38.
YIN Hanjun, LIU Yuxi, ZHANG Xiaowei, et al. The new method for free-fall analysis of large diameter and super-long steel pile[J]. China Offshore Oil and Gas, 2014, 26(S1):35-38.
- [4]DOVER A R, DAVIDSON J. Large diameter steel pipe piles running under self weight in soft clay: Predicted vs. observed behavior—Richmond San-Rafael Bridge seismic retrofit[C]//11th Triennial International Conference on Ports, 2007:1-10.
- [5]闫澍旺,贾沼霖,孙立强,等. 大直径超长钢管桩溜桩机理及计算方法研究[J]. 工程力学,2015,32(9):158-164.
YAN Shuwang, JIA Zhaolin, SUN Liqiang, et al. Mechanisms and calculation of pile-run for long and large diameter piles [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(9):158-164.
- [6]RANDOLPH M F. Science and empiricism in pile foundation design[J]. Geotechnique, 2003, 53(10):847-876.
- [7]贾沼霖. 海洋平台大直径超长桩动态沉桩阻力及溜桩机制研究[D]. 天津:天津大学,2016.
- [8]SOM N N, DAS S C. Theory and practice of foundation design[J]. Tourism & Hospitality Research, 2014, 13(3):125-139.
- [9]KUITER J D, BERINGEN F L. Pile foundations for large North Sea structures[J]. Marine Geotechnology, 1978, 3(3):267-314.
- [10]张海山,杨进,严德,等. 海上钻井隔水导管打入作业溜桩深度预测[J]. 石油钻采工艺,2013,35(3):22-24.
ZHANG Haishan, YANG Jin, YAN De, et al. Study on the slip pile depth prediction for offshore drilling conductor installation[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35(3):22-24.
- [11]ZHANG L, CHEN J. Effect of spatial correlation of standard penetration test (SPT) data on bearing capacity of driven piles in sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49(4):394-402.
- [12]STEVENS R F. The effect of a soil plug on pile drivability in clay[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on the Application of Stress Wave Theory to Piles. Ottawa:1988:861-868.
- [13]李飒,吴兴州,王耀存,等. 打桩过程中考虑溜桩影响的土阻力研究[J]. 岩土工程学报,2015,37(6):1150-1157.
LI Sa, WU Xingzhou, WANG Yaocun, et al. Soil resistance to driving considering effect of pile running on pile installation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(6):1150-1157.
- [14]CHEN J J, ZHANG L. Effect of spatial correlation of cone tip resistance on the bearing capacity of piles[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2015, 139(3):494-500.
- [15]HWANG J H, LIANG N, CHEN C H. Ground response during pile driving[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(11):939-949.

(责任编辑:吕海亮)