

文章编号:1673-5005(2016)02-0115-08

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2016.02.014

大直径管桩沉桩过程中溜桩判断方法研究

孙立强^{1,2}, 贾天强^{1,2}, 闫澍旺^{1,2}, 贾沼霖^{1,2}

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072)

摘要:海洋工程中大直径管桩沉桩过程中常会出现溜桩现象, 未经预料的溜桩会引起很多严重的工程问题, 有必要对溜桩段进行准确判断。结合实际工程对溜桩产生及停止的机制进行分析; 通过研究沉桩过程中桩周土体强度折减及超孔压的作用, 提出动贯入阻力的计算方法; 利用功、能原理对溜桩过程中所发生的能量转化进行分析, 并推导相应计算公式, 结合动贯入阻力计算方法, 实现对溜桩过程的预测。结果表明, 当桩端进入深厚砂土层或动侧摩阻力达到一定值时溜桩将逐渐停止, 若是后者则再次打桩后不再发生溜桩现象。计算动侧摩阻时须考虑沉桩过程中扩孔效应和循环荷载作用。计算结果与现场实测数据吻合较好。

关键词:溜桩; 动侧摩阻; 强度折减; 孔压; 重塑强度

中图分类号: TU 470 **文献标志码:** A

引用格式: 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 Science), 2016, 40(2): 115-122.

Research on prediction of pile running during large diameter pipe piles driving

SUN Liqiang^{1,2}, JIA Tianqiang^{1,2}, YAN Shuwang^{1,2}, JIA Zhaolin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety in Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Institute of Architecture and Engineering in Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In ocean engineering, pile running often occurs during the driving process of large diameter pipe piles. Unpredicted pile running will cause severe consequences, so an accurate prediction is necessary. The generating and stopping mechanisms of pile running in practical engineering were analyzed. The computing method of dynamic resistance was proposed by researching the strength reduction of soil and the excess pore pressure around the pile. Using the principle of work and power, the transformation of energy was analyzed during pile driving, and the corresponding equations were derived. Combining with the computing method of dynamic resistance, the prediction for the process of pile running was realized. It turns out that the pile running will stop when the pile tip goes into a thick layer of sand or the skin friction reaches a certain high value. If the later situation occurs, the pile running won't happen again. When calculating the skin friction, the effects of pore expansion and cyclic loading must be considered. The calculated results agree well with the measured ones.

Keywords: pile running; dynamic skin friction; reduction of strength; pore pressure; remolding strength

溜桩是指桩在贯入某些软弱土层时, 在很少的锤击数下或是仅在桩和锤的自重作用下贯入很长距离。在软土地区沉桩施工时溜桩的现象时有发生。溜桩是沉桩过程中的重大隐患。对于溜桩问题国内

外的有关工作还不多见。郭生昌等^[1]认为溜桩的主要原因是存在软弱土层, 并且溜桩的难以预测给工程上造成很大风险。Dover等^[2]对旧金山 Richmond San Rafael 大桥桩基工程自由站立深度进行分

收稿日期: 2015-06-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41402263); 天津市自然科学基金重点项目(13JCZDJC35300)

作者简介: 孙立强(1979-), 男, 副教授, 研究方向为桩基和真空预压等海洋岩土工程。E-mail: slq0532@126.com。

析。Seed 等^[3]针对闭口桩打入粉土后土体强度问题进行了研究。Ladanyi 等^[4]将小孔扩张理论应用于沉桩分析,研究了沉桩过程中的超孔压和承载力问题。Airhar 等^[5]研究发现桩打入粉土过程中桩周土体中孔隙水压力持续增加。张咏梅等^[6]对沉桩过程观测发现在桩周一定范围内会形成一个半径为 R 的扰动区,扰动区内孔压均达到最大值。HWANG 等^[7]通过试验发现动力沉桩过程中桩周砂土中的超孔压最大可以达到上覆有效应力的 1.5 倍。王戌平^[8]对 PHC 沉入深厚软基进行试验。杨国权等^[9]对比了静压与锤击两种沉桩方法,发现锤击作用下土体的扰动更大且产生的超孔压也较大。以上研究对沉桩以及溜桩过程中土体中产生的超孔压和强度折减等问题进行了一定量的工作,但缺少对溜桩机制的详细分析,也并未实现对溜桩的准确预测。笔者对溜桩的机制进行分析,提出能够考虑桩周土体强度折减及超孔压的动贯入阻力计算方法,结合功能原理提出溜桩过程的计算和判断方法,并对中国南海以及旧金山湾桩基工程进行分析。

1 溜桩产生的过程及原因分析

溜桩现象的产生主要是由于桩贯入过程中所受到的侧摩阻力、端阻力以及浮力之和小于桩、锤的重量之和导致了桩加速下沉。

图 1 说明了溜桩发生的过程。桩从进入泥面开始(如①),在自重作用下开始自由贯入,当阻力与桩的自重相等时桩停止贯入(如②);随后桩在锤击

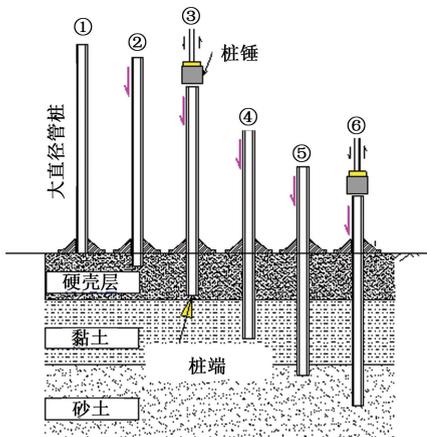


图 1 溜桩现象产生区域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pile running phenomenon area

作用下继续贯入(如③);当桩端进入第一层软土层时,端阻力迅速减小,此时贯入阻力远小于桩和锤的自重,桩开始加速下沉,溜桩现象发生(如④);当桩

端再次进入承载力较高的土层(如⑤),或侧摩阻力逐渐增大到一定值时桩将减速下沉直至停止溜桩(如⑥)。

图 2 为南海某大直径管桩贯入过程中,两相邻锤击下桩的下沉实拍图,钢桩发生了明显的溜桩现象,区间约为 14 ~ 36 m。

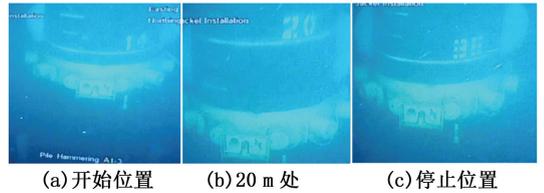


图 2 钢桩溜桩过程现场实拍图片

Fig. 2 Steel pile's scene photographs of pile running process

溜桩现象大多起始于承载力较小的黏土层,当桩端进入黏土层后端阻力将远小于硬土层中的端阻力,使得动贯入阻力大大减小,此时是否会发生溜桩主要取决于侧摩阻是否足够大。因此对溜桩段的判断是否准确主要取决于沉桩过程中侧摩阻的计算是否准确。

沉桩过程中动贯入阻力会远低于静承载力。经分析主要有两个原因:①在桩贯入过程中桩周土体会发生扰动并重塑,土体的强度减小,导致侧摩阻力较按原状土体强度计算值减小;②由于打桩动力作用和挤土效应使桩周土体中的超孔压上升,使得桩土之间的有效接触应力减小,因而侧摩阻力大幅度降低。

2 沉桩过程中动贯入阻力的计算方法

2.1 贯入过程中桩侧摩阻力的计算

对于静侧摩阻力的计算,钱家欢等^[10]提出,对于打入桩侧摩阻力受有效应力强度参数控制,具体公式可简化为

$$f_s = k\sigma'_v \tan \delta. \tag{1}$$

式中, k 为侧压力系数; σ'_v 为桩埋深范围内竖向有效应力; δ 为土与桩的外摩擦角。

沉桩过程中动侧摩阻力值的计算,须在静侧摩阻力公式基础上综合考虑桩周土的强度折减及在桩周产生的超孔压。

(1) 在桩不断贯入的过程中,桩底土体不断的发生冲剪破坏,并在桩周形成了一定范围的重塑区(图 3),重塑后土体外摩擦角 δ 减小,即侧摩擦系数减小,最终导致动侧摩阻力小于静侧摩阻力。灵敏度反映了土体结构性对强度的影响。将土体的强度

按照灵敏度进行折减后确定外摩擦角。

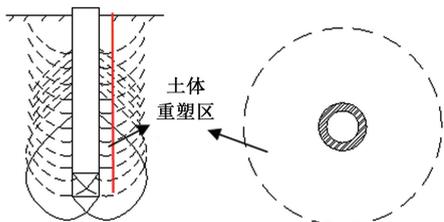


图 3 重塑示意图

Fig. 3 Remodeling schematic

(2) 沉桩过程中因为连续的锤击动力作用和挤土效应导致在桩周产生超孔压,使得土体有效应力降低,导致侧摩阻力减小。

基于以上分析,对式(1)进行修正,提出动侧摩阻力的计算公式为

$$f_s = k(\sigma_v - u) \tan \delta / S_l \quad (2)$$

式中, σ_v 为上覆土竖向自重应力; u 为孔隙水压力; δ 为土与桩的外摩擦角; S_l 为灵敏度。

根据式(2),若要对动侧摩阻力进行计算则须确定沉桩过程中桩周土内的超孔压以及土体的灵敏度。

2.1.1 土体灵敏度确定方法

在海洋工程特别是深海工程勘察中 CPT(静力触探试验)是反应土的工程性质最可靠的手段之一,很多学者根据现场 CPT 试验提出了一些灵敏度的计算方法。其中林宗元^[11]提到了斯米特曼通过双桥经历触探(CPT)试验计算土体灵敏度:

$$S_l = N_s / R_f \quad (3)$$

式中, N_s 为试验常数,一般取 5 ~ 10; R_f 为摩阻比。

中国地质大学基于双桥静力触探试验数据提出的灵敏度^[11]计算公式为

$$S_l = 100R_f \quad (4)$$

樊向阳等^[12]认为用单桥静力触探 P_s 值计算的各层土的极限侧摩阻力能够代表原状土的抗剪强度,而双桥经历触探测得的侧摩阻力可以代表重塑土的抗剪强度,则土体灵敏度可表示为

$$S_l = f_s / f'_s \quad (5)$$

式中, f_s 为由单桥静力触探 P_s 值计算各层土的极限侧摩阻力, kPa; f'_s 为双桥静力触探测得的侧摩阻力 kPa。

基于式(4),可以根据现场静力触探数据计算灵敏度。

2.1.2 沉桩过程中桩周超孔压确定

沉桩过程中超孔压有两方面原因,一方面沉桩贯入过程是在土中进行小孔扩张的过程,因此可根

据小孔扩张理论计算,基于 Tresca 准则可得到桩在下沉过程中桩周位置的超孔压为

$$u = c_u \ln \left[\frac{G}{c_u} \left(1 - \left(\frac{a_0}{a} \right)^2 \right) + \left(\frac{a_0}{a} \right)^2 \right] \quad (6)$$

式中, G 为剪切模量; c_u 为不排水强度; a_0 为起始半径; a 为末半径。

另一方面是由沉桩过程中循环荷载作用产生的动孔压,动孔压的大小是很多因素共同影响的结果,目前很难用一个统一的公式来准确描述,本文采用数值方法来模拟。

选用 FLAC^{3D} 来模拟打桩过程中孔压的发展,并求得最后的稳定值。记录在打桩力作用下孔压延深度的变化。建立模型示意图见图 4。

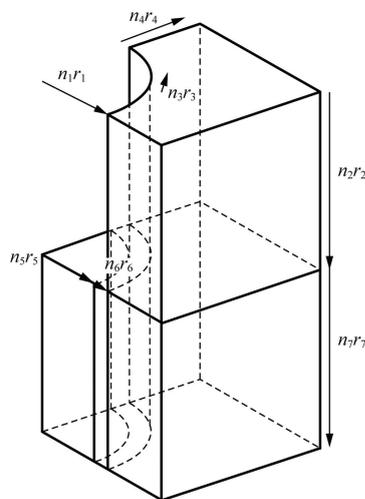


图 4 FLAC^{3D} 桩周孔压模拟模型

Fig. 4 FLAC^{3D} model of simulation on pore pressure around pile

根据最大打桩应力资料,将打桩力简化为 |sin(stress)| 的形式。根据桩参数建立空心管桩,将桩插入最终打桩深度处,在桩顶施加应力波,沿深度记录孔压值。

对于砂土而言,渗透性较大,挤土效应引起的超孔压不具备积累效应,因此不予考虑,只考虑循环荷载引起的超孔压增长;对于黏土,因渗透性较差,须考虑挤土效应和循环荷载共同作用下产生的超孔压。

2.2 贯入过程中桩端阻力计算方法

对于砂土层采用 Berezantzev 方法计算桩端阻力,其公式应用于管桩比较适合,钱家欢等^[10]针对类似太沙基的破坏形式提出基底极限承载力的计算公式为

$$q_u = q_D N_q + \gamma' B N_{\gamma} \quad (7)$$

式中, q_u 为基底极限承载力, kPa; q_D 为基底平面处

土的超载, kPa; γ' 为基底下土体浮容重, kN/m^3 ; B 为基础宽度, m; N_q 、 N_r 为承载力系数, 可根据基底下土的 φ 角从图 5 查得。

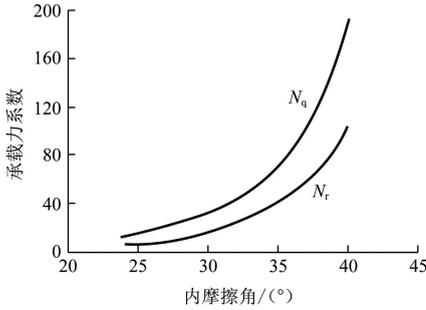


图 5 N_q, N_r 曲线

Fig. 5 N_q, N_r curve

对于深基础在黏性土中的单位桩端承载力, 可通过 $N_c c_u$ 计算, Som 等^[13] 通过分析和实验研究表明取 N_c 为 9 比较合适, 因此在黏土中桩端承载力公式为

$$q_u = 9c_u. \quad (8)$$

3 溜桩过程计算方法

溜桩可分为两个过程考虑: ①锤击能量转换为桩、锤系统的动能, 桩开始贯入; ②下沉过程中, 桩、锤的重力做正功, 土体对桩的贯入阻力及水的浮力做负功, 直到系统的动能为 0 时停止溜桩。桩在土中的受力分析见图 6 (图中, Q_f 为桩侧摩阻力, kN; Q_p 为桩端承载力, kN; F_f 为浮力, kN; G_1 为打桩锤重力, kN; G_2 为桩重力, kN)。当土阻力小于桩和锤的总重量时, 桩将加速下沉, 当土阻力大于桩和锤的总重量时桩将减速下沉, 直到速度减为 0。

在过程①中, 考虑锤击能量有一定耗散, 用锤的效率来计算, 因此桩锤系统获得的动能可根据功能原理计算:

$$\eta_1 W = Mv_0^2/2. \quad (9)$$

式中, M 为桩和锤的总质量; W 为锤的总能量, kW; η_1 为打桩锤效率; v_0 为桩和锤下落共同初速度。

在过程②中, 下沉过程中桩的变形耗散了一部分能量, 但溜桩过程中这部分能量损失是较小的, 本文通过修正系数对这部分能量进行修正; 另外在下沉过程中有重力、土的贯入阻力、以及浮力对系统做功, 于是推出溜桩过程中任意时刻的能量转化方程为

$$\eta W + Mg z = Q_f z + Q_p z + F_f z + E. \quad (10)$$

式中, η 为由锤击及桩变形导致的能量总损耗率; E 为桩和锤任意时刻的总动能, kN。

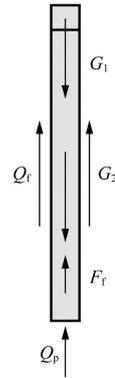


图 6 沉桩过程管桩受力分析

Fig. 6 Stress analysis during driving process

在每一锤击下, 桩每下沉 Δz 时, 桩锤系统动能变化可写为

$$\Delta E = (Mg - Q_f - Q_p - F_f) \Delta z. \quad (11)$$

进一步推导可得:

$$\frac{M}{2} (v_{j+1}^2 - v_j^2) = [Mg - Q_f - Q_p - F_f] \Delta z. \quad (12)$$

将单位侧摩阻延深度进行积分可得到 Q_f 为

$$Q_f = \int_0^D f_s(z) (1 + \beta) \pi d dz. \quad (13)$$

式中, β 为某一深度内外摩阻力比值; D 为桩入土深度; d 为管外径。

端阻力 Q_p 为

$$Q_p = q_u A_p = q_u(z) \pi d t. \quad (14)$$

式中, t 为管壁厚。

浮力 F_f 将随深度的增加不断增大, 对于桩在某一深度 D 时其浮力为

$$F_f = \pi d t (D + H_w) \rho_w. \quad (15)$$

式中, F_f 为浮力; ρ_w 为水的密度; H_w 为水深。

综合以上两方面可以求得某一溜桩段桩在土中每贯入 Δz 即从 j 位置下沉到 $j+1$ 位置时的能量方程。

将式 (13) ~ (15) 带入式 (12) 并进行整理得到速度的递推公式, 可根据 v_j 递推得 v_{j+1} 为

$$v_{j+1}^2 = 2 \left[Mg - \int_0^D \frac{k_i (\sigma'_v - u) \tan \delta}{S_i} (1 + \beta) \pi d dz - (q_u)_j \pi B t - \pi d t D_j \gamma_w \right] \Delta z / M + v_j^2. \quad (16)$$

将以上方法编制程序进行求解, 以第 k 锤击为例说明计算过程如下:

(1) 利用式 (9) 计算桩和锤共同下沉的初速度 v_0 。

(2) 假定一个微小的沉降量 Δz , 利用式(13)求出在深度 $z+\Delta z/2$ 处的侧摩阻力 Q_f 。

(3) 根据式(14)、(15)计算深度 $z+\Delta z$ 处的端阻力 Q_p 和浮力 F_f 。

(4) 利用式(16)计算 v_j^2 。

(5) 如果 $v_j^2 > 0$, 重复第(2)步至第(5)步直至 $v_j^2 \leq 0$; 如果 $v_j^2 = 0$ 则第 k 锤击下的沉降量 $z_k = j\Delta z$; 如果 $v_j^2 < 0$ 则须对最后一次的下沉量进行修正, 令 $v_j = 0$, 将 v_j 和 v_{j-1} 带入式(12)中求得最后的允许下沉量 Δz_i , 于是可求出第 k 锤击下的下沉深度为 $z_k = (j-1)\Delta z + \Delta z_i$ 。

4 工程实例分析

4.1 工程1: 中国南海

如图7为南海某钻井平台桩位图, 其中 A_1 到 A_4 的距离为 100 m, A_1 到 B_1 的距离为 87 m, 平台每个角各有四根桩。选取 BH_3 位置进行详细分析, 具体土参数见表1。所用锤质量为 163.6 t, 最大锤击能量为 1200 kW, 能量传递效率为 0.95, 最大锤击力为 261.9 MPa, 锤击频率为 2 Hz。工程用桩为钢管桩长 158 m, 入泥深度 135 m, 桩外径 2.743 m, 管壁厚 0.1 m, 桩重 643.9 t。沉桩时的锤击能量曲线如图8所示。

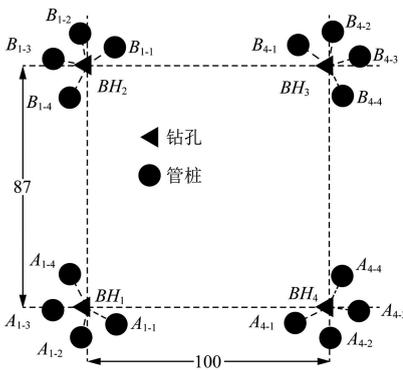


图7 桩位和钻孔位置

Fig.7 Sketch of pile and borehole location

(1) 灵敏度确定。

根据现场静力触探实验所得摩阻比 R_f (图9(a)), 由式(4)可以求得不同深度土层的灵敏度见图9(b)。

(2) 超孔压计算。

利用有限差分软件 FLAC^{3D} 求的沉桩过程中不同深度的超孔压, 由式(6)计算得到由于桩的挤土效应产生的超孔压, 叠加两部分超孔压形成打桩过程中产生的总超孔压, 计算结果如图10(a)所示。

表1 钻孔 BH3 中各土层的设计参数

Table 1 Geological profiles of BH3 borehole

土质	深度/ m	k / ($\text{cm} \cdot$ s^{-1})	c_u / kPa	ϕ / ($^\circ$)	γ / ($\text{kN} \cdot$ m^{-3})	E / MPa
中密细到粗砂	0	9.8×10^{-2}	-	39	18.2	35
软到硬黏土	2.4	9.8×10^{-8}	22.5	12	18.1	6
中密到密粉砂	10.9	9.8×10^{-4}	-	37	18.5	35
粉土与黏土互层	13.9	9.8×10^{-8}	60	12	18.6	20
中密到密粉细砂	16.7	9.8×10^{-3}	-	36	18.6	35
硬粉质黏土	19.8	9.8×10^{-8}	50	12	18.6	20
密实粉砂及粉细砂	25.2	9.8×10^{-3}	-	39	18.6	40
粉质黏土与粉砂互层	40	9.8×10^{-8}	60	15	18.3	30
同上	56.8	9.8×10^{-8}	140	15	19.3	30
中密砂质粉土	61.9	9.8×10^{-3}	-	36	18.3	35
硬粉质黏土	64.7	9.8×10^{-8}	95	20	18.8	20
硬粉质黏土	70.9	9.8×10^{-8}	145	20	18.8	20
中密粉土	75.5	9.8×10^{-5}	-	36	18.7	35
硬黏土	79.8	9.8×10^{-8}	85	24	18.8	20
非常硬的黏土	90.7	9.8×10^{-8}	130	24	18.9	25
硬黏土	112.8	9.8×10^{-8}	140	24	19.4	20
硬黏土	119	9.8×10^{-8}	190	24	19.3	20
密实粉到中砂	131.6	9.8×10^{-2}	-	40	19.7	60

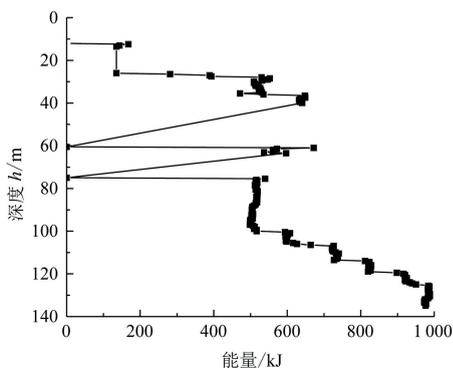


图8 沉桩能量曲线

Fig.8 Energy curve of piling

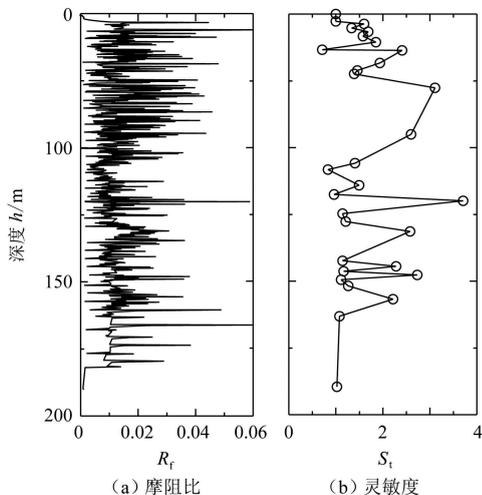


图9 摩阻比及灵敏度曲线

Fig.9 Friction-resistance ratio and sensitivity

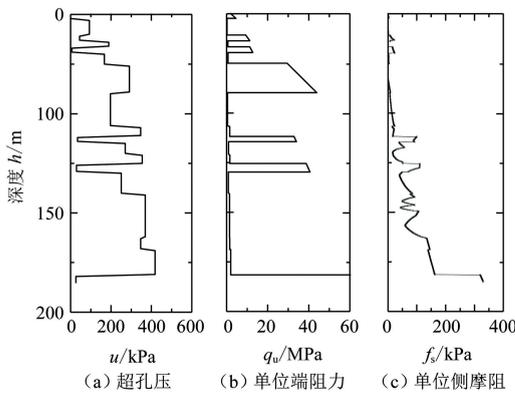


图 10 超孔压、单位端阻及单位侧摩阻力

Fig. 10 Excess pore water pressure, unit bearing capacity and unit skin friction

(3) 单位端阻力及侧摩阻力确定。

根据式(7)及(8)可以求得单位端阻力,如图10(b)。由式(2)求得单位外侧摩阻力见图10(c),内壁侧摩阻力与外侧摩阻力之比 β 约在0~0.5,分别选用0,0.15,0.3计算,并与实测曲线对比。

将沉桩时的锤击能量曲线、孔压、灵敏度以及桩、土、锤的参数输入所编制程序中,即可得到三组

沉桩曲线与实测曲线的对比见图11。

根据计算结果, $\beta=0.15$ 时溜桩深度模拟值与实测值较为接近,因此选取 $\beta=0.15$ 作为计算参数。

用同样的方法对该平台另外3个角点的桩 A_{4-1} 、 B_{1-1} 和 B_{4-3} 进行沉桩分析,汇总4根桩沉桩曲线的计算值与实测值对比见图12。

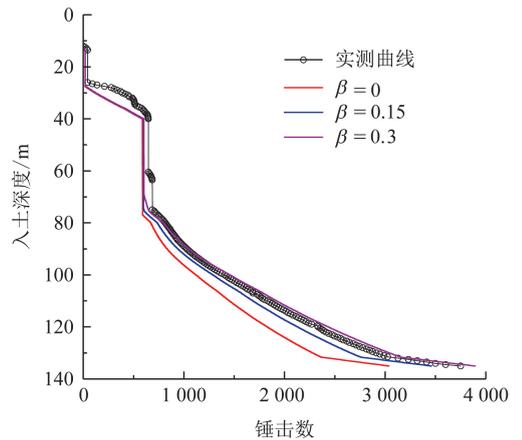
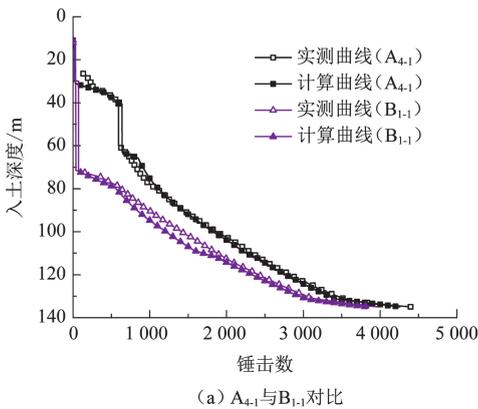
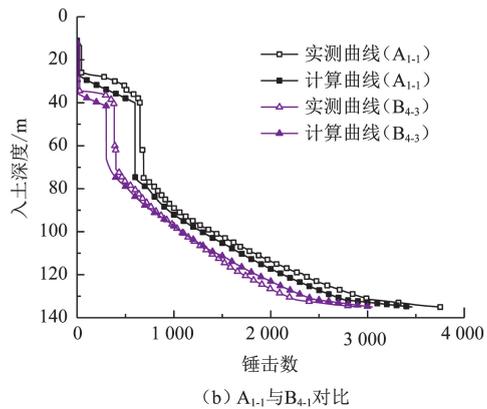


图 11 计算曲线与实测曲线对比图

Fig. 11 Comparison of calculated value and measured value



(a) A_{4-1} 与 B_{1-1} 对比



(b) A_{1-1} 与 B_{4-3} 对比

图 12 4根桩沉桩曲线的计算值与实测值对比

Fig. 12 Comparison of calculated and measured value of driving curves of 4 piles

由计算值与实测值对比可知,用本文方法计算得到的溜桩段与实测值吻合较好。

4.2 工程 2: 美国旧金山湾

Dover 等^[2]例举了旧金山 Richmond San Rafael 大桥,该桥 7 km 长,横跨旧金山湾北部,其基础设计为 26 根入土深度在 42.7 ~ 67.1 m 的大直径钢管桩,水域水深为 21 m。

选用该工程中 47#、48#桥墩作为研究对象,每个桥墩下 4 根大直径管桩,分别在东南(SE)、东北(NE)、西南(SW)、西北(NW)方向,利用本文计算方法对其自由下沉深度进行计算。47#桥墩所用管桩:外径 4.11 m,壁厚 57 mm,自重 278 t。土体灵敏

度和强度参数如表 2 所示。由于某些参数的缺失, Dover 和 Davidson 在论文中依据当地土质参数,给出了一定取值范围,本文取表中上、下限值进行计算。桩在土中由于自重下沉,桩周超孔压由于桩在土中的挤土效应产生,因此利用式(6)计算沉桩过程中土体内产生的超孔压(如图 13(a)),其中剪切模量 $G = E/2(1 + \mu)$ 。计算中泊松比假定为 0.35。利用式(2)和式(7)、(8)可以求得桩的单位侧摩阻力和单位桩端阻力,见图 13(b)、(c)。

48#桥墩所用桩外径为 3.81 m,壁厚为 44 mm,重量为 180 t,得到侧摩阻、超孔压以及端阻力见图 14。

利用本文的计算方法得到 47#和 48#桩自由下

沉深度见图15。

表2 土层参数

Table 2 Basic soil properties of seabed soils

深度/m	不排水强度/kPa	内摩擦角/(°)	S_t	弹性模量/MPa
0~6	0	15~20	1.5	15
6~42	4~60	15~18	3~3.5	5
42~52	45~90	25~40	3~3.5	35
52~70	120	15~18	2~2.5	25

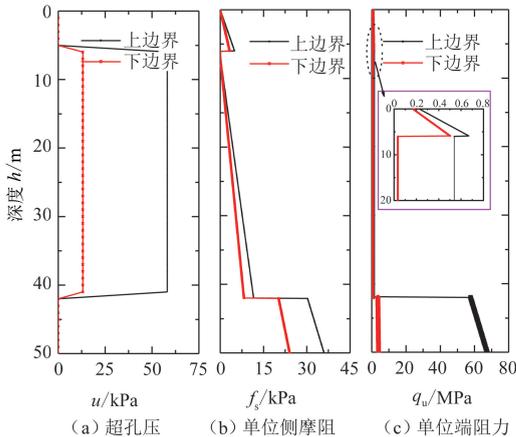


图13 47#桥墩位置超孔压、单位侧摩阻和单位端阻力计算值

Fig. 13 Calculated values of excess pore pressure, unit skin friction and ultimate unit bearing capacity in pier-47

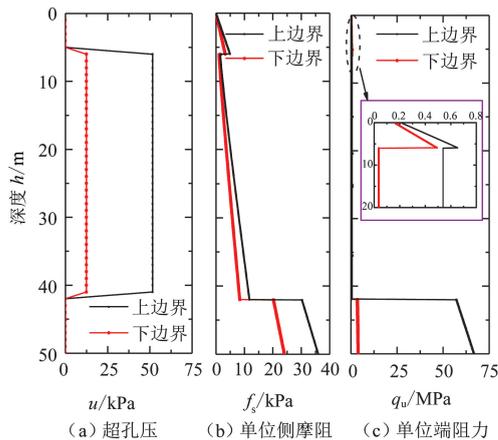


图14 48#桥墩位置超孔压、单位侧摩阻和单位端阻力计算值

Fig. 14 Calculated values of excess pore pressure, unit skin friction and ultimate unit bearing capacity in pier-48

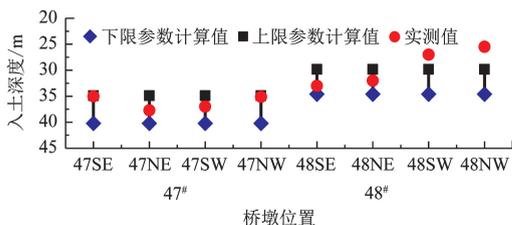


图15 47#、48#桥墩管桩自由下沉深度对比

Fig. 15 Comparison between computed and measured elevation of pile tip after free falling of pier-47 and pier-48

从图15中可以发现,实测的自由入泥深度基本

落入计算值之间,48#桥墩西南和西北两根桩的自由下沉深度略小于最小预测值,Dover和Davidson的计算中亦是如此,其文中分析可能存在未探明的砂土层,使得在西侧砂土层厚度大于东侧。

5 结论

(1)溜桩及沉桩过程中须采用土体重塑强度指标计算动侧摩阻力,此时可采用土的灵敏度对强度进行折减。

(2)在计算动侧摩阻力时,还应考虑因为挤土效应和循环荷载作用在桩周引起的超孔压。

(3)根据功、能原理提出的溜桩深度的计算方法可实现对溜桩段及溜桩深度的预测。

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] DOVER A, DAVIDSON J. Large diameter steel pipe piles running under self weight in soft clay: predicted vs. observed behavior Richmond San-rafael bridge seismic retrofit: proceedings of Ports 2007: 30 Years of Sharing Ideas [C]. San Diego: ASCE, c2007.

[3] SEED H B, REESE L C. The action of soft clay along friction piles [J]. American Society of Civil Engineers Transactions, 1955, 122: 731-754.

[4] LADANYI B. Expansion of a cavity in a saturated clay medium [J]. ASCE, 1963, 89(SM4): 127-161.

[5] VESIC A S. Expansion of cavities in infinite soil mass [J]. ASCE, 1972, 98(SM3): 265-290.

[6] 张咏梅,张善明. 打桩施工引起的孔隙水压力[J]. 土工基础,1982(1):58-64.
 ZHANG Yongmei, ZHANG Shanming. Pore pressure caused by pile driving [J]. Soil Engineering and Foundation, 1982(1): 58-64.

[7] HWANG J H, LIANG N, CHEN C H. Ground response during pile driving [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(11): 939-949.

[8] 王戌平. 深厚软土中PHC长桩的时效性试验研究[J]. 岩土工程学报,2003,25(2):239-241.
 WANG Shuping. Study on time effect of PHC open-ended pile in deep soft soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2): 239-241.

[9] 杨国权,刘海波. 锤击法与静压法施工预制桩单桩承载力差异分析[J]. 探矿工程:岩土钻掘工程,2009,36

(3):53-56.

YANG Guoquan, LIU Haibo. Analysis on the difference of prefabricated single pile bearing capacity between construction by hammer-driven and static-pressure[J]. Exploration Engineering: Rock & Soil Drilling and Tunneling, 2009,36(3):53-56.

[10] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 2版. 北京:中国水利出版社,1996.

[11] 林宗元. 岩土工程试验检测手册[M]. 沈阳:辽宁科

学技术出版社,1994.

[12] 樊向阳,顾国荣,黄宏伟. 上海地区土体灵敏度的研究[J]. 岩土工程技术,2004,18(3):130-132.

FAN Xiangyang, GU Guorong, HUANG Hongwei. Study on soil sensitivity in Shanghai region[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2004,18(3):130-132.

[13] SOM N N, DAS S C. Theory and practice of foundation design[M]. New Delhi: Prentice-Hall of India, 2003.

(编辑 沈玉英)