

# 考虑软化效应的滨海软土区基桩受力与变形特性分析

王飞<sup>1</sup>, 闫宇<sup>1</sup>, 焦立冬<sup>1</sup>, 申奉歧<sup>2</sup>, 陈璐<sup>2</sup>, 刘建华<sup>2</sup>

(1. 中化学建设投资集团有限公司, 北京市 102300; 2. 长沙理工大学 公路工程教育部重点实验室, 湖南 长沙 410114)

**摘要:**为探讨水平荷载作用下滨海软土区基桩受力与变形性能, 首先根据滨海软土区基桩受荷特点建立相应的简化受力模型; 其次, 考虑滨海软土的软化效应, 对现有的  $p-y$  曲线模型进行修正; 据此导出滨海软土区基桩挠曲微分方程, 并通过传递矩阵法对其内力及位移进行求解, 获得考虑软化效应的滨海软土区基桩非线性计算方法; 最后, 结合相关工程案例, 分析软化参数、桩径和桩体弹性模量对基桩水平承载性能的影响。研究表明: 采用传递矩阵法对软土区水平受荷桩进行受力分析精度较高, 计算效率也高, 可为相关工程提供参考; 软化参数每增加 0.3, 地面处桩身水平位移分别减小 24.12% 和 43.04%; 桩径每增加 0.7 m, 地面处桩身水平位移分别减小 62.63% 和 79.65%, 桩体位移及内力的影响深度随桩径增大而增大; 桩体弹性模量由 25.5 GPa 增加到 36.0 GPa 时, 桩身变形量分别减小了 6.25% 和 23.06%。

**关键词:** 桩基础; 软土; 软化效应; 水平承载特性;  $p-y$  曲线

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

## Mechanical and Deformation Characteristics of Piles in Coastal Soft Soil Areas Considering Softening Effect

WANG Fei<sup>1</sup>, YAN Yu<sup>1</sup>, JIAO Lidong<sup>1</sup>, SHEN Fengqi<sup>2</sup>, CHEN Lu<sup>2</sup>, LIU Jianhua<sup>2</sup>

(1. China Chemical Construction Investment Group Co., Ltd., Beijing 102300, China; 2. Key Laboratory of Road Engineering of the Ministry of Education, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

**Abstract:** In order to discuss the mechanical and deformation behavior of piles in coastal soft soil areas under horizontal load, the corresponding simplified mechanical model was established according to the loading characteristics of piles in coastal soft soil areas. Secondly, the softening effect of coastal soft soil was considered to modify the existing  $p-y$  curve model. On this basis, the differential equation of pile deflection in coastal soft soil areas was derived, and its internal force and displacement were solved by the transfer matrix method. A nonlinear calculation method of piles in coastal soft soil areas considering the softening effect was obtained. Finally, the influence of softening parameters, pile diameter, and elastic modulus of pile on the horizontal bearing capacity of piles was analyzed with relevant engineering cases. The results show that the transfer matrix method has high precision and calculation efficiency in the analysis of piles in soft soil areas under horizontal load, which can provide a reference for related projects. When the softening parameter increases by 0.3, the horizontal displacement of the pile at the ground decreases by 24.12% and 43.04%, respectively. When the pile diameter increases by 0.7 m, the horizontal displacement of the pile at the ground decreases by 62.63% and 79.65%, respectively. The influence depth of the pile displacement and internal force increases with the increase in the pile diameter. When the elastic modulus of the pile increases from 25.5 GPa to 36.0 GPa, the deformation of the pile decreases by 6.25% and 23.06%, respectively.

**Keywords:** pile foundation; soft soil; softening effect; horizontal bearing characteristics;  $p-y$  curve

收稿日期: 2023-08-27 (修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (编号: 51878070); 湖南省教育厅科学研究项目 (编号: 20B040); 长沙理工大学公路工程教育部重点实验室开放基金资助项目 (编号: kfj150201)

作者简介: 王飞, 男, 工程师. E-mail: 782014915@qq.com

## 0 引言

近年中国工程建设飞速发展,临海、跨海工程越来越多。对于滨海工程,往往存在深厚的软土,且其具有压缩性高、强度低、含水量大和固结变形持续时间较长等特点。滨海工程建设通常采用桩基础,但由于滨海深厚软土区工程特性异常复杂,使得桩基的安全与稳定难以保证,故很有必要对其水平承载机理及影响因素展开深入研究。

目前,软土区桩基的承载性能已受到工程界的高度重视,并展开了部分研究。如:Zhou等<sup>[1]</sup>将工程实例与有限元分析结果相结合,对比分析了软土地区钻孔灌注桩的承载性能以及作用荷载的影响;丁红岩等<sup>[2]</sup>采用有限元软件建立了桩土模型,分析了上覆软土层对海上基础水平承载特性的影响;黄锋等<sup>[3]</sup>针对 Osterberg 测桩法在桩底位置处位移变形不连续等问题,设计了现场荷载试验,分析了不同测桩法对软土区桩基承载特性的影响;刘飞成等<sup>[4]</sup>结合离心模拟试验,分析了软基上桩体的变形特性;于进江等<sup>[5]</sup>采用模型试验,研究了桩间距对深厚软土区桩基水平承载特性的影响;杨明辉等<sup>[6]</sup>将深厚软土区桩基中单桩有效桩长的计算方法应用至群桩基础,分析了各设计参数对群桩基础承载性能的影响;霍少磊等<sup>[7]</sup>分别采用  $m$  法和  $p$ - $y$  曲线法,对比了深厚软土地基中水平受荷钻孔灌注桩的承载特性。综上研究均表明:桩基水平承载能力受软土地基的影响较大,但关于地基土软化和桩基相关参数对其承载特性的影响研究较少,因此很有必要在考虑软土软化的基础上,进行桩基水平承载特性分析。

基于此,本文结合江苏省连云港徐圩港区的综合管廊工程,引入考虑软化效应的软土  $p$ - $y$  曲线模型,利用传递矩阵法求解方程,获得滨海深厚软土区桩基内力与位移关系的理论解;据此结合相关案例验证理论方法的合理性;进而基于工程实例探讨相关参数对桩基水平承载特性的影响,以期在实际工程提供参考。

## 1 考虑软化效应的桩基受力模型建立

### 1.1 滨海软土区桩基受力模型

对于滨海深厚软土区的桩基,其承载性能及变形机理受水平荷载的影响较大。其中水平荷载主要

由风荷载、水流力和波浪荷载组成<sup>[8-9]</sup>。考虑荷载效应的组合作用,将各水平荷载等效为作用在地面处的水平荷载  $Q$  和偏心弯矩  $M$ ,并将桩侧土抗力简化为抗力弹簧<sup>[10-12]</sup>,图1为深厚软土区基桩简化受力模型。

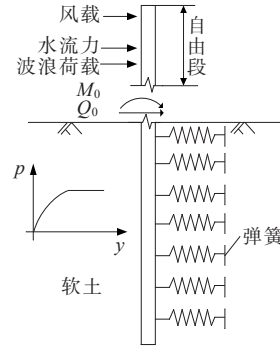


图1 深厚软土区基桩简化受力模型

Figure 1 Simplified mechanical model of foundation pile in deep soft soil area

#### (1) 风荷载

$$F_H = \frac{1}{2} \rho_k V_g^2 C_D A_n \quad (1)$$

式中:  $F_H$  为构件单位长度上的风荷载(N/m);  $\rho_k$  为空气密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $V_g$  为等效静阵风风速( $\text{m}/\text{s}$ );  $C_D$  为阻力系数;  $A_n$  为构件单位长度上顺风向的投影面积( $\text{m}^2/\text{m}$ )。

#### (2) 波浪荷载

$$P = C_M \frac{\gamma A H}{2} K_1 \quad (2)$$

$$M = C_M \frac{\gamma A H L}{4\pi} K_2 \quad (3)$$

$$K_1 = \frac{\text{sh}\left(\frac{2\pi z_2}{L}\right)}{\text{ch}\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \quad (4)$$

$$K_2 = \frac{1}{\text{ch}\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \left[ \frac{2\pi z_2}{L} \text{sh}\left(\frac{2\pi z_2}{L}\right) - \text{ch}\left(\frac{2\pi z_2}{L}\right) \right] \quad (5)$$

式中:  $P$  为最大水平总波浪力;  $M$  为波浪底部作用在桩体上的力矩;  $C_M$  为惯性力系数;  $\gamma$  为水的重度;  $A$  为桩体的断面面积;  $H$  为建筑物所在处进行波波高;  $L$  为波长;  $K_1$ 、 $K_2$  为相关计算参数;  $z_2$  为计算点在水底面以上的高度;  $d$  为建筑物前的水深。

#### (3) 水流力

$$F_w = C_w \frac{\rho_s}{2} V^2 A \quad (6)$$

式中:  $F_w$  为最大水流力;  $C_w$  为水流阻力系数;  $\rho_s$  为水

密度;  $V$  为水流设计流速;  $A$  为计算构件在与流向垂直平面上的投影面积。

## 1.2 考虑软化效应的 $p$ - $y$ 曲线

在现有  $p$ - $y$  曲线模型的基础上,进一步考虑软土的软化效应,得到考虑软化效应的  $p$ - $y$  曲线<sup>[13]</sup>,如图2所示。

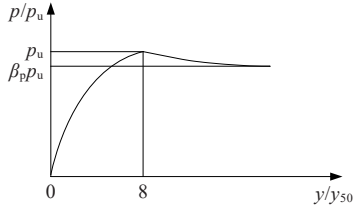


图2 考虑软化效应的  $p$ - $y$  曲线

Figure 2  $p$ - $y$  curve considering softening effect

图2中,当土体抗力达到峰值  $p_u$  后将出现弱化,即软化效应,其对应的函数关系为:

$$\frac{p}{p_u} = \frac{(y/y_{50})[a_p + c_p(y/y_{50})]}{[a_p + b_p(y/y_{50})]^2} \quad (7)$$

式中:  $a_p$ 、 $b_p$ 、 $c_p$  均为待定系数;  $p_u$  为软土地基以下深度  $z$  处的桩侧极限土抗力;  $y_{50}$  为  $z$  处桩侧极限土抗力发挥一半时的桩身挠度。

(1) 确定  $a_p$ 、 $b_p$ 、 $c_p$

对式(7)进行求导得:

$$\frac{dp}{dy} = \frac{(a_p y_{50} + 2c_p y)(a_p y_{50} + b_p y) - 2b_p(a_p y_{50} y + c_p y^2)}{(a_p y_{50} + b_p y)^3} \quad (8)$$

当  $y/y_{50} = 8$  时,  $dp/dy = 0$ , 通过计算可得:

$$a_p/(b_p - 2c_p) = 8 \quad (9)$$

当  $y/y_{50} = 8$  时, 有  $p/p_u = 1$ , 通过计算可得:

$$b_p - c_p = \frac{1}{4} \quad (10)$$

当  $y/y_{50} \rightarrow +\infty$  时, 有  $p/p_u = \beta_p$ , 通过计算可得:

$$c_p/b_p = \beta_p \quad (11)$$

联立式(9)~(11), 可得:

$$\begin{cases} a_p = 4 \frac{\beta_p - 1 + \sqrt{1 - \beta_p}}{\beta_p} \\ b_p = \frac{1 - \sqrt{1 - \beta_p}}{2\beta_p} \\ c_p = \frac{2 - \beta_p - 2\sqrt{1 - \beta_p}}{4\beta_p} \end{cases} \quad (12)$$

式中: 参数  $\beta_p$  为经验参数, 研究表明<sup>[14]</sup> 松散土  $\beta_p$  取 0.4~0.97, 密实土  $\beta_p$  取 1.0~2.0。

(2) 确定  $p_u$ <sup>[15]</sup>

$$p_u = \min \begin{cases} (a_u + b_u z) \sigma_1 D \\ 9D(c_0 + \gamma z \tan \varphi) \end{cases} \quad (13)$$

$$\sigma_1 = \gamma z \tan^2(45^\circ + \varphi/2) + 2c_0 \tan(45^\circ + \varphi/2) \quad (14)$$

式中:  $a_u = 1.121$ ;  $b_u = 0.663 1/D$ ,  $D$  为桩的直径;  $\gamma$  为土的重度;  $c_0$ 、 $\varphi$  分别为土体黏聚力和内摩擦角。

(3) 确定  $y_{50}$ <sup>[15]</sup>

$$y_{50} = 0.0158 a_v^{1.15} D^{0.75} \quad (15)$$

式中:  $a_v$  为土的压缩系数。

## 2 滨海软土区基桩受力变形分析

### 2.1 单桩挠曲微分方程建立

将图1中的基桩沿竖直方向等分成  $N$  段, 以单桩泥面处的截面中心为原点, 水平方向为  $y$  轴, 竖直方向为  $z$  轴, 建立  $yo z$  坐标轴。再取桩身沿深度方向的任一单元, 对其进行受力分析(图3)。

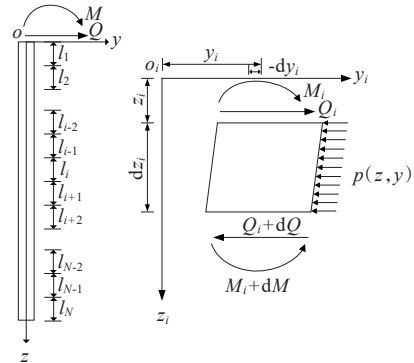


图3 桩体第  $i$  微元段受力分析示意图

Figure 3 Mechanical analysis of  $i$ -th microelement section of pile

对图3中的桩体微元段进行受力分析, 可建立相应的挠曲微分方程:

$$E_i I_i \frac{d^4 y_i}{dz_i^4} + b_i p_i(y, z) = 0 \quad (16)$$

式中:  $y_i$  为第  $i$  微元段桩身水平位移;  $z_i$  为第  $i$  微元段计算点到段顶的距离;  $E_i I_i$  为第  $i$  微元段桩身抗弯刚度;  $b_i$  为第  $i$  微元段桩的有效计算宽度;  $p_i(y, z)$  为第  $i$  微元段桩侧土体抗力。

### 2.2 桩身挠曲微分方程求解

对式(16)可采用幂级数法进行求解<sup>[16-17]</sup>, 设其解为:

$$y(z) = \sum_{j=0}^3 \eta_{i,j} U_{i,j} \quad (17)$$

$$c_i = \frac{b_i p_i(y, z)}{E_i I_i} \quad (18)$$

$$a_{i,j,n+4} = -\frac{c_i a_{i,j,n-1}}{(4+n) \times (3+n) \times (2+n) \times (1+n)} \quad n \geq 1;$$

$$a_{i,j,4} = -\frac{c_i a_{i,j,0}}{4 \times 3 \times 2 \times 1}$$

$$a_{i,j,n} = \begin{cases} 1 & j=n \\ 0 & j \neq n \end{cases} \quad (j, n=0, 1, 2, 3);$$

$$U_{i,j} = \sum_{n=0}^{+\infty} a_{i,j,n} z_i^n$$

式中:  $\eta_{i,0}$ 、 $\eta_{i,1}$ 、 $\eta_{i,2}$  及  $\eta_{i,3}$  均为待定系数。

根据关系式  $\theta_i = y'_i$ ,  $M_i = E_i I_i y''_i$ ,  $Q_i = E_i I_i y'''_i$  与式 (17) 可得第  $i$  微元段的  $\theta_i$ 、弯矩  $M_i$  和剪力  $Q_i$  分别为:

$$\begin{cases} \theta_i = \sum_{j=0}^3 \eta_{i,j} U'_{i,j} \\ M_i = E_i I_i \sum_{j=0}^3 \eta_{i,j} U''_{i,j} \\ Q_i = E_i I_i \sum_{j=0}^3 \eta_{i,j} U'''_{i,j} \end{cases} \quad (19)$$

消除待定系数  $\eta_{i,j}$  可得:

$$\begin{bmatrix} y_i \\ \theta_i \\ M_i \\ Q_i \end{bmatrix} = TT_i \begin{bmatrix} y_{i,0} \\ \theta_{i,0} \\ M_{i,0} \\ Q_{i,0} \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中:  $y_{i,0}$ 、 $\theta_{i,0}$ 、 $M_{i,0}$  及  $Q_{i,0}$  分别为第  $i$  微元段顶端 ( $z_i=0$ ) 的水平位移、转角、弯矩和剪力;  $TT_i$  为第  $i$  微元段的内力与位移传递矩阵, 其可表示为:

$$TT_i = T_i (T_i|_{z_i=0})^{-1} \quad (21)$$

$$T_i = \begin{bmatrix} U_{i,0} & U_{i,1} & U_{i,2} & U_{i,3} \\ U'_{i,0} & U'_{i,1} & U'_{i,2} & U'_{i,3} \\ E_i I_i U''_{i,0} & E_i I_i U''_{i,1} & E_i I_i U''_{i,2} & E_i I_i U''_{i,3} \\ X_1 & X_2 & X_3 & X_4 \end{bmatrix} \quad (22)$$

式中:

$$\begin{cases} X_1 = E_i I_i U'''_{i,0} \\ X_2 = E_i I_i U'''_{i,1} \\ X_3 = E_i I_i U'''_{i,2} \\ X_4 = E_i I_i U'''_{i,3} \end{cases} \quad (23)$$

若第  $i$  和  $i-1$  微元段桩身内力与位移连续, 则有:

$$\begin{bmatrix} y_{i,0} \\ \theta_{i,0} \\ M_{i,0} \\ Q_{i,0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{i-1,l_{i-1}} \\ \theta_{i-1,l_{i-1}} \\ M_{i-1,l_{i-1}} \\ Q_{i-1,l_{i-1}} \end{bmatrix} \quad (24)$$

式中:  $y_{i-1,l_{i-1}}$ 、 $\theta_{i-1,l_{i-1}}$ 、 $M_{i-1,l_{i-1}}$  及  $Q_{i-1,l_{i-1}}$  分别为第  $i-1$  微元段底端的水平位移、转角、弯矩及剪力。

联立式 (20)、(24), 可得第  $i$  微元段与基桩顶端之间内力与位移的递推关系:

$$\begin{bmatrix} y_i \\ \theta_i \\ M_i \\ Q_i \end{bmatrix} = TT_i \overline{TT}_{i-1} \overline{TT}_{i-2} \overline{TT}_{i-3} \cdots TT_1 \begin{bmatrix} y_0 \\ \theta_0 \\ M_0 \\ Q_0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

式中:  $\overline{TT}_{i-1} = TT_{i-1}|_{z_{i-1}=l_{i-1}}$ ;  $y_0$ 、 $\theta_0$ 、 $M_0$  及  $Q_0$  分别为桩顶水平位移、转角、弯矩及剪力。

对于常规的基桩, 其桩顶边界条件有自由、固定、铰支和弹嵌等 8 种情况<sup>[18]</sup>; 而桩端边界条件有自由、固定等。对位于深厚软土区的基桩由于其通常嵌入稳定的持力层, 故可假定其边界条件为:

$$\begin{cases} M|_{z=0} = M_0, Q|_{z=0} = Q_0 & \text{桩顶自由} \\ y|_{z=l_0+l_e} = 0, \theta|_{z=l_0+l_e} = 0 & \text{桩端固定} \end{cases} \quad (26)$$

式 (26) 中  $M_0$  和  $Q_0$  均已知, 可根据各微元段的内力与位移的连续条件联立求解, 具体可编程计算。

### 3 算例验证

为验证理论解答的正确性, 特以文献[13]中的 3 号试桩为例, 其计算参数为: 桩径  $b=0.20$  m, 桩入土深度  $l=11.855$  m, 自由段高度  $l_0=0.375$  m, 桩体抗弯刚度  $EI=5\,896$  kN·m<sup>2</sup>, 地基土物理力学参数如表 1 所示。其中桩顶水平荷载  $Q_0=30$  kN 和 50 kN, 计算得到的桩身水平位移对比如图 4 所示。

表 1 试桩地基土的物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of foundation soil for test pile

土层	厚度/ m	$c_0$ / kPa	$\varphi$ / (°)	$a_v$ / (MPa <sup>-1</sup> )
可塑状黄色黏土	1.5	34	4.0	0.51
软塑状黄色黏土	2.9	13	1.0	0.86
可塑淤泥质亚黏土夹粉砂	1.1	51	3.5	0.10
流动淤泥质亚黏土夹粉砂	5.5	13	4.5	0.51
可塑淤泥质亚黏土	2.0	24	2.5	0.66
流动淤泥质黏土	2.4	10	1.5	1.14

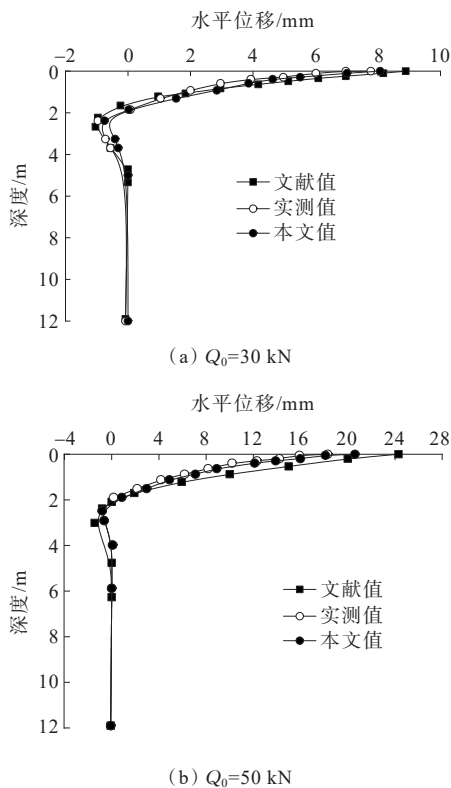


图4 桩身水平位移图

Figure 4 Horizontal displacement of pile shaft

从图4可看出:采用本文方法计算结果与文献[13]及实测结果均吻合较好,从而验证了本文方法及程序是合理的。

## 4 工程实例及影响因素分析

### 4.1 工程概况

江苏省连云港徐圩港区东防波堤西侧,三区围堰~四港池支管廊段,现状为水域。其中架管桥为应急消防通道的基础部分,每个结构段包括9排灌注桩。现以其中某灌注桩为例,该桩桩径为1400 mm,桩长为58 m,桩身弹性模量 $E=32.5$  GPa;桩顶位于设计高水位处,其标高为+5.4 m。静阵风风速 $V_g=13.8$  m/s,空气密度 $\rho_k=1.29$  kg/m<sup>3</sup>,水流流速 $V=0.15$  m/s,水密度 $\rho_s=1.025$  t/m<sup>3</sup>,水流阻力系数为0.73,其余参数取规范值<sup>[9]</sup>,根据荷载效应组合可得桩土交界处作用的水平荷载为83.33 kN,偏心弯矩为361.34 kN·m。场地以松散土为主,各土层物理力学性质指标见表2。

### 4.2 各土层的 $p$ - $y$ 曲线

考虑桩土相互作用,以该基桩所处的各土层为例,可得各土层横向抗力 $p$ 与横向位移 $y$ 的关系曲线

(均取各土层中点计算)如图5所示,对应的拟合曲线如图6所示。

表2 地基土的物理力学性质

Table 2 Physical and mechanical properties of foundation soil

土层	厚度/m	$c_0$ /kPa	$\varphi/(^\circ)$	$a_v/(\text{MPa}^{-1})$
淤泥	13.2	13.4	8.0	1.65
粉质黏土-1	2.3	19.0	20.0	0.53
粉砂/粉砂	4.2	11.8	28.5	0.15
黏土	1.8	23.9	13.0	0.39
粉质黏土-2	8.0	35.3	15.9	0.17
粉细砂	18.0	28.3	21.1	0.23

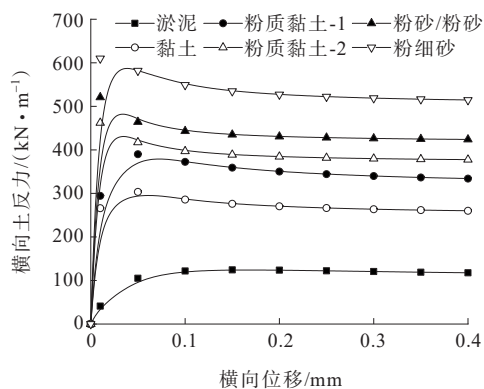
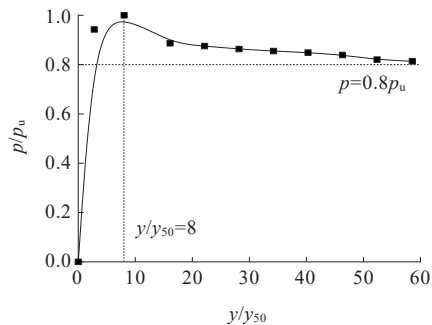


图5 各土层横向土反力-横向位移关系曲线

Figure 5 Calculation curve of lateral soil reaction-lateral displacement of each soil layer

由图5可知:各土层横向抗力随横向位移呈非线性变化,且具有显著的应力软化现象;因为各土层物理力学参数( $c_0, \varphi$ )的不同,其荷载-位移特性也表现出较大差异,但均与软土地基的非线性力学性质以及多层土体所具有的性质相符。将各土层的 $p$ - $y$ 曲线进行坐标变换,得到如图6所示的拟合曲线,其与前述考虑软化效应的软土 $p$ - $y$ 曲线模型基本相符,进而验证了 $p$ - $y$ 曲线模型的合理性。

图6 各层土拟合所得 $p$ - $y$ 曲线Figure 6  $p$ - $y$  curve of soil in each layer



### 4.3 影响因素分析

为考察桩身弹性模量、桩径以及软化参数 $\beta_p$ 对基桩水平承载特性的影响,制定表3所示的影响因素分析方案。

表3 影响因素分析方案

Table 3 Analysis scheme of influencing factors

方案	软化参数 $\beta_p$	桩径/m	桩身弹性模量/GPa
①	0.6/0.9/1	1.4	32.5
②	0.9	1.4/2.1/2.8	32.5
③	0.9	1.4	25.5/32.5/36.0

#### 4.3.1 软化参数的影响

对于滨海深厚软土地区的横向受荷桩,桩周土应力会发生软化<sup>[19]</sup>。因此,有必要分析软化参数 $\beta_p$ 对基桩水平承载特性的影响,根据方案①可得相应软化参数下的桩身弯矩与位移曲线,如图7所示。

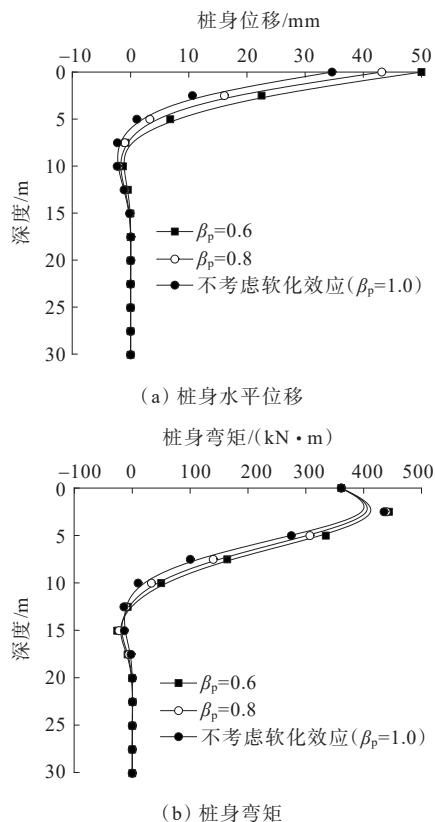


图7 软化效应的影响

Figure 7 Influence of softening effect

由图7可以看出:软化参数 $\beta_p$ 越大,地面处桩身位移越小,桩身最大弯矩越小。当软化参数依次由0.6增加到1.0时,桩身的变形量分别减小了13.64%和30.75%;桩身最大弯矩分别增加了1.01%和1.95%。综上可知,软化参数对基桩变形的影响要远

大于对基桩内力的影响,当软土区基桩所受水平荷载较大时,应对桩周软土地基进行加固处理<sup>[20]</sup>,从而保持其水平承载特性满足相关要求。

#### 4.3.2 桩径的影响

保持荷载和桩身强度不变,仅改变桩径大小以分析桩径对基桩内力与位移的影响。按照方案②计算得到的桩身水平位移及弯矩如图8所示。

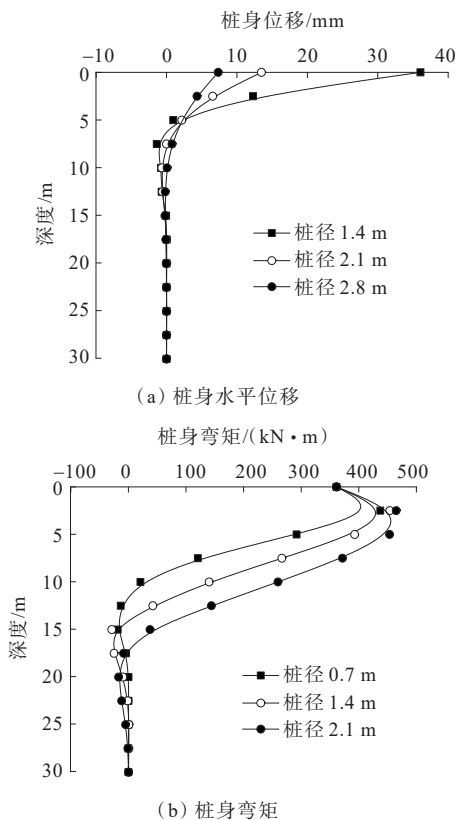


图8 桩径的影响

Figure 8 Influence of pile diameter

由图8可知:① 桩径越大,桩身水平位移越小,桩身最大弯矩越大;反之,桩径越小,桩身最大弯矩越小,桩身位移越大;② 桩径每增加0.7 m,桩身的变形量分别减小62.63%和79.65%;桩身最大弯矩分别增加3.79%和6.31%;③ 水平荷载对基桩内力与变形的影响深度随桩径的减小而减小。

#### 4.3.3 桩身弹性模量的影响

在灌注桩施工过程中,不可避免会考虑到材料的成本问题,因此在确保基桩满足安全性能的前提下,探讨不同材料强度对基桩承载特性的影响变得尤为重要,而桩体弹性模量受材料强度的影响较为明显<sup>[21]</sup>。为探讨滨海软土区桩体弹性模量对基桩水平承载性能的影响,根据方案③选取3种弹性模量,

分别计算得到的基桩内力与水平位移如图9所示。

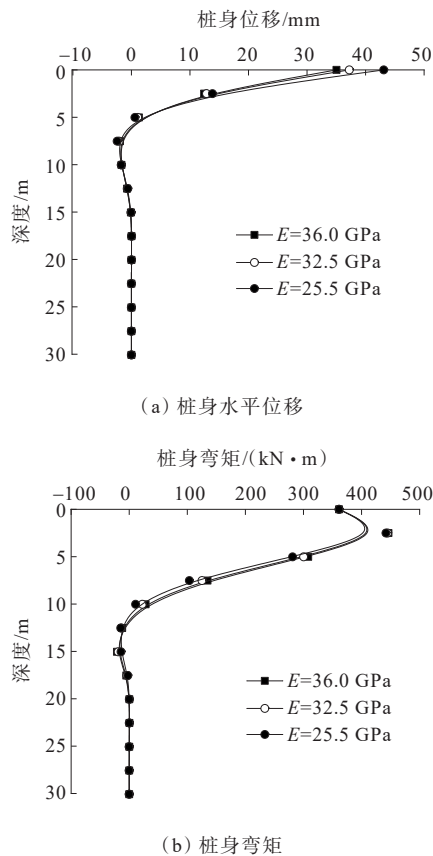


图9 弹性模量的影响

Figure 9 Influence of elastic modulus

从图9可以看出:随桩体弹性模量的增大,地面处桩身水平位移逐渐减小;桩身最大弯矩逐渐增大。当弹性模量依次由25.5 GPa增加至36.0 GPa时,桩身的变形量分别减小了6.25%和23.06%;桩身最大弯矩的变化范围均小于2.0%。为满足水平变形要求,建议采用弹性模量为32.5 GPa的混凝土浇筑基桩。

## 5 结论

该文建立软土区基桩简化受力模型,将传递矩阵法与 $p$ - $y$ 曲线模型相结合,研究滨海深厚软土区基桩水平承载特性。进而分析软化系数、桩径和桩身弹性模量等参数对基桩受力与变形的影响,得到主要结论如下:

(1) 基于软土区基桩的水平承载特性,考虑软土的软化效应,建立滨海深厚软土区水平受荷桩的理论分析模型,验证理论计算方法及程序的合理性。

(2) 结合江苏省连云港徐圩港区某桩基工程实例,探讨了各土层的横向力-横向位移关系,通过各

土层拟合得到的 $p$ - $y$ 曲线,说明软土区基桩桩周土体软化及其 $p$ - $y$ 曲线模型的合理性。

(3) 软化参数、桩径以及弹性模量对桩身水平位移的影响远大于桩身最大弯矩。软化参数每增加0.3,地面处桩身水平位移分别减小24.12%和43.04%;桩径每增加0.7 m,地面处桩身水平位移分别减小62.63%和79.65%;当桩身弹性模量由25.5 GPa增加至36.0 GPa,桩身变形分别减小了6.25%和23.06%。

## 参考文献:

## References:

- [1] ZHOU J J, WANG K H, GONG X N, et al. Bearing capacity and load transfer mechanism of a static drill rooted nodular pile in soft soil areas[J]. Journal of Zhejiang University Science A, 2013, 14(10): 705-719.
- [2] 丁红岩, 张超, 张浦阳, 等. 上覆软土层对海上风电四筒基础承载特性影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(1): 67-75.  
DING Hongyan, ZHANG Chao, ZHANG Puyang, et al. Effect of overlying soft soil layer on bearing capacity of four bucket foundation for offshore wind turbines[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(1): 67-75.
- [3] 黄锋, 刘朝钢, 李广信, 等. 桩承载力确定方法的探讨[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1998, 38(1): 28-32.  
HUANG Feng, LIU Zhaogang, LI Guangxin, et al. Discussion on determination method of pile bearing capacity[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1998, 38(1): 28-32.
- [4] 刘飞成, 张建经. 斜坡基底软土桩-网复合地基变形特性离心试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(1): 209-219.  
LIU Feicheng, ZHANG Jianjing. Centrifuge test on deformation characteristics of pile-geogrid composite foundation in soft soil under slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(1): 209-219.
- [5] 于进江, 程谦恭, 贺宏武, 等. 超大面积深厚软土桩-网复合地基承载性状模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3323-3330.  
YU Jinjiang, CHENG Qiangong, HE Hongwu, et al. Model test research on bearing behavior of pile-net composite foundation on oversized deep soft soil[J]. Rock and Soil

- Mechanics,2012,33(11): 3323-3330.
- [6] 杨明辉,单华峰,张小威.深厚软土区超长群桩有效桩长确定方法[J].中国公路学报,2013,26(1): 106-112.  
YANG Minghui, SHAN Huafeng, ZHANG Xiaowei. Determination method of effective length of super long pile group in deep soft soil area[J]. China Journal of Highway and Transport,2013,26(1): 106-112.
- [7] 霍少磊,竺明星,龚维明,等.深厚软土区大直径桩水平承载特性现场试验研究[J].工业建筑,2021,51(5): 139-144.  
HUO Shaolei, ZHU Mingxing, GONG Weiming, et al. Field tests of large diameter piles subjected to lateral loads in deep soft soils[J]. Industrial Construction, 2021, 51(5): 139-144.
- [8] 同济大学.公路桥梁抗风设计规范: JTG/T 3360-01—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.  
Tongji University. Wind-resistant design specification for highway bridges: JTG/T 3360-01—2018[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2019.
- [9] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司.港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.  
CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd.. Code of hydrology for harbour and waterway: JTS 145—2015[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015.
- [10] 范留军,路晓明,苗鹏.软土区碎石桩鼓胀变形正交数值试验影响因素分析[J].中外公路,2023,43(1): 25-30.  
FAN Liujun, LU Xiaoming, MIAO Peng. Analysis on influence factors of swelling deformation of gravel pile in soft soil area based on orthogonal numerical test[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(1): 25-30.
- [11] 张磊,龚晓南,俞建霖.水平荷载单桩计算的非线性地基反力法研究[J].岩土工程学报,2011,33(2): 309-314.  
ZHANG Lei, GONG Xiaonan, YU Jianlin. Solutions for laterally loaded single pile by nonlinear subgrade reaction method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(2): 309-314.
- [12] 柴芮祥,吴恺,叶薇,等.砂复合改性淤泥路用水稳性试验研究[J].中外公路,2023,43(2): 202-208.  
CHAI Ruixiang, WU Kai, YE Wei, et al. Experimental study on water stability of sand compound modified mud road[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(2): 202-208.
- [13] 贺志军,雷皓程,夏张琦,等.多层软土地基中单桩沉降与内力位移分析[J].岩土力学,2020,41(2): 655-666.  
HE Zhijun, LEI Haocheng, XIA Zhangqi, et al. Analysis of settlement and internal force displacement of single pile in multilayer soft soil foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(2): 655-666.
- [14] DAVIS R V, CHAN A K C. Pile design in Hong Kong[J]. Hong Kong Engineer, 1981, 9(3): 21-28.
- [15] 张舒羽.水平承载桩静载  $P$ - $Y$  曲线研究[D].南京:河海大学,2001.  
ZHANG Shuyu. Study on  $P$ - $Y$  curves of laterally loaded piles under static loading[D]. Nanjing: Hohai University, 2001.
- [16] HORNER G C, PILKEY W D. The riccati transfer matrix method[J]. Journal of Mechanical Design, 1978, 100(2): 297-302.
- [17] 饶文昌,竺明星.组合荷载作用下基桩水平承载特性的简化半解析解[J].中外公路,2021,41(6): 6-13.  
RAO Wenchang, ZHU Mingxing. Simplified semi-analytical solutions of horizontal bearing characteristics of pile foundation under combined load[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(6): 6-13.
- [18] 尹平保,杨铠波,杨朝晖,等.考虑温度和冻融循环的基桩水平承载特性研究[J].工程科学与技术,2021,53(3): 115-124.  
YIN Pingbao, YANG Kaibo, YANG Zhaohui, et al. Horizontal bearing characteristics of pile foundation considering the influence of temperature and freeze-thaw cycles[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(3): 115-124.
- [19] 慕东霖,田英辉,王乐,等.考虑软土软化效应时单桩基础水平循环受荷的有限元数值模拟[J].岩土工程学报,2022,44(4): 740-748.  
MU Donglin, TIAN Yinghui, WANG (Lei) Yue, et al. Finite element numerical simulation of single pile under horizontal cyclic loading considering softening effect of soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(4): 740-748.
- [20] 吴宜鹏,范庆来,任增乾,等.考虑软土应变软化效应的深埋式大圆筒承载性状分析[J].防灾减灾工程学报,2022,42(4): 859-865.  
WU Yipeng, FAN Qinglai, REN Zengqian, et al. Bearing behavior of deeply-embedded large-diameter cylindrical structure considering strain softening effect of soft clay[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(4): 859-865.
- [21] 章玲玲,鲁子爱,任云.软黏土中超长高强度混凝土管桩侧摩阻力计算研究[J].科学技术与工程,2014,14(18): 118-123.  
ZHANG Lingling, LU Ziai, REN Yun. Study on friction of super-long PHC pipe piles in soft soil foundation[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(18): 118-123.