

考虑桩靴贯入对邻近群桩效应影响的分析方法

范怡飞^{1,2}, 王建华^{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 岩土工程研究所, 天津 300072)

摘 要: 为考虑钻井船插桩对邻近平台群桩相互作用的影响, 以海洋平台群桩设计中使用的修正 Poulos 法为基础, 提出了一种考虑桩靴贯入影响的群桩分析方法。该法基于非线性地基梁模型确定桩靴贯入土层时单桩桩头位移; 依据桩同时承受桩头荷载与土体位移时对应的地基反力系数确定土层的弹性模量, 进而在 Poulos 群桩相互作用分析理论框架内, 分析桩靴贯入对群桩相互作用的影响, 确定桩靴贯入过程中由于群桩相互作用导致的附加桩头位移及相应的群桩桩头位移; 依据群桩桩头位移, 确定考虑桩靴贯入影响的群桩 p - y 曲线 Y 因子及相应的 p - y 关系。为了说明分析方法的可行性, 进行了桩靴贯入砂土时对邻近单桩和群桩相互作用影响的离心模型试验, 方法预测与试验结果基本一致, 从而验证了方法的合理性。对于文中的工况, 桩靴贯入没有导致群桩 p - y 关系进一步弱化, 此时采用桩靴贯入前的群桩 p - y 关系确定考虑桩靴贯入影响的群桩响应, 得到的结果偏安全。

关 键 词: 修正的 Poulos 法; 群桩效应; Poulos 分析法; 钻井船插桩; Y 因子

中图分类号: TU 753

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2020) 07-2360-09

Method to analyze the effect of spudcan penetration on an adjacent pile group

FAN Yi-fei^{1,2}, WANG Jian-hua^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Geotechnical Engineering Institute, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The modified Poulos method is universally used in design of laterally-loaded pile groups of platforms in current ocean engineering practices. However, given that increasing engineering cases have jack-up rigs with large-diameter spudcan foundations operating near a platform, the effects of spudcan penetration on the adjacent pile group should be evaluated. A pile group analysis method which is able to evaluate the effect of spudcan penetration on the pile group interaction is proposed in this paper. Single pile head deflections under the combined loading of spudcan penetration and the pile head load are firstly analyzed using the nonlinear foundation beam method. Then combining the effects of pile group interaction and nonlinear soil-pile interaction, the additional pile response due to the group effect is calculated through an elastic analysis. Finally, the pile group interaction Y -modifier is obtained by several pilot modifications of p - y curves of the single pile, whose variation during spudcan penetration indicates the effect of the spudcan penetration on the pile group interaction. Centrifuge model tests are conducted in sand to study the effect of spudcan penetration on adjacent a single pile and a pile group, respectively, and the proposed method is verified by comparison with predicted pile head deflections at different stages. In this case, the Y -modifier tends to decrease during spudcan penetration, and it can be inferred that the factor determined in the active loading stage is conservative enough in pile group analysis when considering spudcan penetration.

Keywords: modified Poulos method; pile group analysis; Poulos analysis method; spudcan penetration; Y -modifier

1 引 言

对于导管架海洋平台群桩基础, 桩间距通常小于 3 倍桩径, 因此设计桩基础时, 需要考虑群桩效

应的影响。当自升式钻井船在导管架平台附近进行钻井和修井作业时, 需要将大直径桩靴贯入土层中, 此时将导致桩靴周围土体产生极大变形。如果桩靴边缘与邻近平台群桩基础边缘距离较近, 平台桩基

收稿日期: 2019-10-03

修回日期: 2019-12-30

基金项目: 国家自然科学基金 (No.51579174)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51579174).

第一作者简介: 范怡飞, 女, 1993 年生, 博士研究生, 主要从事海洋土力学方面的研究。E-mail: 15620063315@163.com

通讯作者: 王建华, 男, 1955 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土动力学与海洋岩土工程方面的研究。E-mail: tdwjh@eyou.com

础将承受较大的由于桩靴贯入导致的附加挤土荷载, 从而对邻近群桩的相互作用产生影响。

关于桩靴贯入对邻近单桩的影响已进行了一定研究, Xie^[1]、Stewart^[2]等进行了黏土中桩靴贯入对邻近单桩影响的离心模型试验, 试验表明桩靴贯入时邻近桩的水平响应较大、且随桩靴与邻近桩净间距增大而减小。Tho^[3]、王建华^[4]等通过建立同时包括桩靴与邻近桩的三维有限元模型, 验证了 CEL 方法分析桩靴与邻近桩相互作用问题的可行性。李亚^[5]、范怡飞^[6]、Fan^[7]等则将大变形有限元方法和非线性地基梁模型结合起来, 建议了较为简便的分析方法。

而桩靴贯入对邻近群桩的影响更为复杂, 相关的研究不多。Wang 等^[8]通过对包括桩靴和邻近群桩的三维有限元模型进行 CEL 大变形分析, 确定群桩桩身位移, 进而借助非线性地基梁确定群桩桩身受到的挤土压力, 然后利用不考虑插桩影响的群桩 p - y 关系分析桩头荷载与桩身挤土荷载共同作用下群桩的响应。显然, 在分析中没有考虑桩靴贯入对群桩相互作用 p - y 关系的影响。

关于土体运动引起的挤土荷载对邻近群桩的影响也有过其他一些研究。Hong 等^[9]曾通过离心模型试验研究了隧道开挖导致的土体位移引起的邻近建筑物群桩基础的弯矩和轴力, 并对离心模型试验结果进行了有限元数值模拟, 其结果与试验结果较为接近。Jeong 等^[10]对边坡固结引起的土体位移对边坡脚处的群桩水平响应的影响做了数值模拟, 并把结果与离心模型试验结果进行了对比, 两者较为接近。这些研究表明, 可以通过有限元数值分析研究土体位移对群桩相互作用的影响。

Huang^[11]、Zhang^[12]等采用两段法分别分析了隧道和基坑开挖引起的土体位移对邻近建筑物群桩响应的影响。他们首先利用应变路径法确定不包括邻近群桩的自由场地土体开挖引起的靠近开挖位置一侧邻近桩位置处的土体水平位移, 然后基于非线性地基梁模型, 通过求解梁的挠曲微分方程确定桩身响应; 对于远离土体开挖位置处的桩, 为考虑群桩中前桩遮蔽效应对该桩位置处的土体位移影响, 则利用弹性理论中的 Mindlin 解确定该位置处的土体位移, 进而采用同样的方法分析其桩身响应。这样的分析虽然没有考虑群桩间相互作用对桩身响应的影响, 但是群桩中前桩遮蔽效应对后桩位置处土体位移影响的思路有借鉴意义。

目前海洋工程中, 一般采用非线性地基梁模型设计海洋结构物的群桩基础。由于非线性地基梁模

型无法直接考虑群桩相互作用, 故美国石油工程协会规范^[13]建议采用基于弹性理论的修正 Poulos 方法^[14]确定群桩的 p - y 曲线。该方法中的一个关键参数是土的弹性模量 E_s 。文献^[15]在分析土体位移导致的桩身响应时, 建议了一种依据 p - y 曲线确定土体弹性模量的方法, 这个思路对利用 Poulos 方法分析桩靴贯入土层对邻近群桩相互作用的影响有参考意义。

综上所述, 本文将修正的 Poulos 方法进行扩展, 首先给出求解受桩靴贯入影响的桩头受荷桩响应的过程, 再依据桩身 p - y 关系确定土体的弹性模量, 然后按照 Poulos 弹性分析理论, 在考虑桩靴贯入导致的土体位移前提下, 对群桩的相互作用进行分析, 并按照桩头位移、通过相应的 Y 因子确定群桩的 p - y 曲线, 形成一种考虑桩靴贯入对邻近群桩相互作用影响的分析方法。在此基础上, 又通过离心模型试验, 对本文建议方法的有效性进行验证。

2 分析方法

对于由 n 根桩组成的群桩, 如果已知群桩中各单桩桩头作用的力, 依据修正的 Poulos 方法, 可以将群桩中桩 k 的桩头水平位移 y_{kG} 表示为

$$y_{kG} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \Delta y_{ki(h)} + y_{k(h)} \quad (1)$$

式中: $\Delta y_{ki(h)}$ 为依据 Poulos 理论、且考虑土体大变形影响的群桩中桩 i 的桩头荷载与桩身挤土荷载引起的桩 k 附加桩头水平位移; $y_{k(h)}$ 为考虑桩靴贯入影响、通过非线性地基梁分析确定的单桩桩头水平位移。

在确定出群桩桩头位移后, 采用 Y 因子对单桩 p - y 数据进行修正, 确定考虑桩靴贯入影响的群桩 p - y 曲线。

以下, 首先给出确定 $y_{k(h)}$ 的方法, 然后阐述如何在考虑土体大变形导致的桩-土相互作用非线性前提下, 利用 Poulos 理论确定群桩相互作用导致的桩头附加位移 $\Delta y_{ki(h)}$ 的方法。

2.1 考虑桩靴贯入影响的单桩桩头位移计算

参考文献^[7]中的方法, 利用非线性地基梁模型确定受桩靴贯入影响的桩头位移 $y_{k(h)}$ 。

非线性地基梁模型将受水平荷载的桩简化为一地基梁, 利用沿桩身分布的一系列非线性弹簧描述桩-土的相互作用。由于桩靴贯入土层会导致土体位移, 所以当考虑桩靴贯入影响时, 非线性弹簧力的大小将取决于桩-土的相对位移, 据此下式给出

了非线性弹簧抗力 p 与桩-土相对位移之间的关系:

$$p(z) = k_s [y_s(z) - y_k(z)] \quad (2)$$

式中: $p(z)$ 为土抗力; z 为土面以下深度; k_s 为地基反力系数, 这里用 p - y 曲线的割线模量表示; $y_s(z)$ 为土体位移; $y_k(z)$ 为桩身位移。

地基梁的挠曲微分方程为

$$E_p I_p \frac{d^4 y_k(z)}{dz^4} = p(z) \quad (3)$$

式中: E_p 为桩的弹性模量; I_p 为桩截面惯性矩。将泥面下长为 L 的桩分为 n 段, 每段长度 $\delta = L/n$, 见图 1。进而将下式转化为有限差分格式^[16]:

$$y_k^{i-2} - 4y_k^{i-1} + [6 + 4(\lambda_i \delta)^4] y_k^i - 4y_k^{i+1} + y_k^{i+2} = 4(\lambda_i \delta)^4 y_s^i \quad (4)$$

式中: $\lambda_i = \sqrt[4]{k_s^i / 4E_p I_p}$, $3 \leq i \leq n+3$ 。式 (4) 是包含 $n+5$ 个未知量的 $n+1$ 个线性方程组, 其中包括为了进行差分计算在桩头和桩底设置的 4 个虚节点 1、2、 $n+4$ 和 $n+5$, 在图 1 中用虚线表示桩顶与桩底的 4 个虚拟单元。

求解式 (4) 时, 需引入桩头和桩底边界条件。下式中给出了以差分格式表示的剪力 H 、弯矩 M 、转角 θ 和桩身位移 y , 据此可以依据桩头和桩底的边界条件形成 4 个附加方程。

$$y_k^{i+2} - 2y_k^{i+1} + 2y_k^{i-1} - y_k^{i-2} = 2H\delta^3 / E_p I_p \quad (5)$$

$$y_k^{i+1} - 2y_k^i + y_k^{i-1} = M\delta^2 / E_p I_p \quad (6)$$

$$y_k^{i+1} - y_k^{i-1} = 2\delta\theta \quad (7)$$

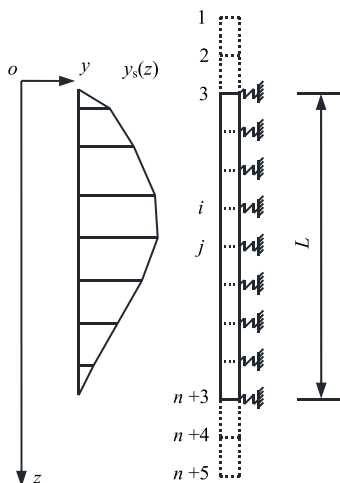


图 1 非线性地基梁分析模型

Fig.1 Nonlinear foundation beam model

$$y_k^i = y \quad (8)$$

对于桩头自由且受剪力 H 和弯矩 M 作用的浮承桩, 其桩底剪力和弯矩为 0, 依据式 (4) ~ (8) 可以得到求解桩身响应的差分方程组。该方程组为 $(n+5) \times (n+5)$ 的代数方程组。

$$\begin{bmatrix} -1 & 2 & 0 & -2 & 1 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & \\ 1 & -4 & 6 + (\lambda_3 \delta)^4 & -4 & 1 \\ & & \dots & & \\ 1 & -4 & 6 + (\lambda_3 \delta)^4 & -4 & 1 \\ & & & 1 & -2 & 1 \\ & & & -1 & 2 & 0 & -2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_k^1 \\ y_k^2 \\ y_k^3 \\ \dots \\ y_k^{n+3} \\ y_k^{n+4} \\ y_k^{n+5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2H\delta^3 / E_p I_p \\ M\delta^2 / E_p I_p \\ 4(\lambda_3 \delta)^4 y_s^3 \\ \dots \\ 4(\lambda_{n+3} \delta)^4 y_s^{n+3} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

求解上述方程组的过程如下:

(1) 通过大变形有限元计算, 确定桩靴在自由场地贯入土层时桩位置处的土体水平位移 y_s 。

(2) 给定初始地基反力系数 $k_s^{i(0)}$, 求解方程 (9), 确定桩身位移 $y_k^{(j)}$ 。

(3) 依据桩身位移 $y_k^{(j)}$ 及土体位移 y_s , 由式 (2) 确定 p 及相应割线模量 $k_s^{i(j)}$ ($j=1, 2, 3, \dots$)。

(4) 利用更新后的 $k_s^{i(j)}$ 再次求解桩身位移 $y_k^{(j+1)}$ 。

(5) 计算第 $j+1$ 次与第 j 次计算结果间的相对误差。若相对误差大于允许误差, 则重复第 (3) 步至第 (5) 步计算, 直到相对误差小于允许误差为止。

(6) 依据 (5) 的迭代收敛结果, 确定桩头水平位移 $y_{k(h)}$ 。

2.2 考虑桩靴贯入影响的群桩桩头附加位移计算

在非线性地基梁模型中, 桩-土相互作用被简化为非线性弹簧, 所以无法考虑群桩之间的相互作用。为此, 这里基于 Poulos 弹性理论法, 按下式确定 $\Delta y_{ki(h)}$, 式中的 $y_{pkG(h)}$ 与 $y_{pk(h)}$ 分别为按弹性理论法确定的考虑桩靴贯入影响的群桩桩头位移与单桩桩头位移。

$$\Delta y_{ki(h)} = y_{pkG(h)} - y_{pk(h)} \quad (10)$$

首先阐明 $y_{pk(h)}$ 的计算方法。Poulos 弹性理论法以半无限空间内作用有水平方向集中力的 Mindlin 解为基础^[16], 将泥面以下长度为 L 、截面宽度为 d 的桩分为 $n+1$ 个单元段, 桩顶和桩底的单元段长为 $0.5(L/n)$, 其他单元段长为 L/n , 见图 2。假设桩靴贯入过程中受荷桩的桩侧与土之间界面不分离, 则桩土界面受到的压力大小相等、方向相反, 见图 2。依据 Mindlin 解, 当土一侧受水平力 $\{p\}$ 作用时, 土体产生位移, 即桩-土相对位移 $\{y_{rs}\}$ 与水平力 $\{p\}$ 的关系表示为

$$-\{y_{rs}\} = d[I_{se}]\{p\} \quad (11)$$

式中: $\{y_{rs}\}$ 为考虑桩靴贯入影响的桩-土相对位移, 且 $\{y_{rs}\} = \{y_s\} - \{y_p\}$, 其中 $\{y_s\}$ 是桩靴在自由场地贯入土层时导致的土体位移, $\{y_p\}$ 是桩身位移; $[I_{se}]$ 为位移影响系数矩阵, 且矩阵中元素 $I_{Eij} = I_{ij} / E_{si}$, I_{ij} 为根据文献[17]中 Mindlin 解积分关系确定的 j 单元段压力导致的 i 节点位移影响系数, E_{si} 为 i 节点处土的弹性模量。

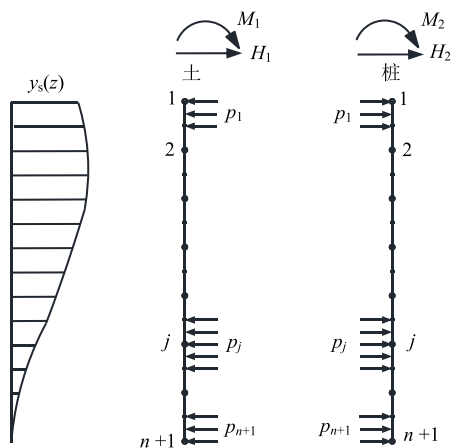


图2 Poulos 弹性分析模型图
Fig.2 Poulos elastic analysis model

将桩-土相对位移 $\{y_{rs}\}$ 代入式 (11), 得

$$\{y_p\} = d[I_{se}]\{p\} + \{y_s\} \quad (12)$$

对于桩头自由的浮承桩, 桩身挠曲微分方程(3)还可以表示为^[16]。

$$-\{p\} = \frac{E_p I_p n^4}{dL^4} [D] \{y_p\} + \frac{E_p I_p n^4}{dL^4} \{A\} \quad (13)$$

式中: $\{A\} = \left\{ \frac{ML^2}{E_p I_p n^2} \quad 0 \cdots 0 \right\}^T$; $[D]$ 为 $(n-1) \times (n+1)$ 阶有限差分系数矩阵, 且:

$$[D] = \begin{bmatrix} -2 & 5 & -4 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & -4 & 5 & -2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

其他符号的含义同前。

将式 (12) 代入式 (13) 并结合桩的桩头水平方向力以及力矩平衡条件, 即可求解单桩的桩身响应与桩头水平位移 $y_{pk(h)}$ 。

求解桩身响应时, 尚需确定土层弹性模量 E_s 。为了考虑桩靴贯入土层时, 土体大变形导致的非线性对计算结果的影响, 参考文献[15]中的思路, 按以下步骤确定不同埋深处土层的弹性模量 E_{si} :

(1) 按本文 2.1 中的方法计算单桩桩身响应。

(2) 由不同埋深处的地基反力系数 k_{si} 确定该埋深处土层的 E_{si} 为

$$E_{si} = p/y \times d = k_{si} d \quad (15)$$

以下, 以两根浮承桩组成的水平受荷群桩为例, 说明按 Poulos 弹性理论法确定群桩桩头位移 $y_{pkG(h)}$ 的方法。假设桩靴轴线与两根群桩轴线在同一平面内, 且群桩桩间距为 s , 桩 1 和桩 2 在桩头受水平力和弯矩作用, 图 3 给出了桩靴与群桩相对位置关系。

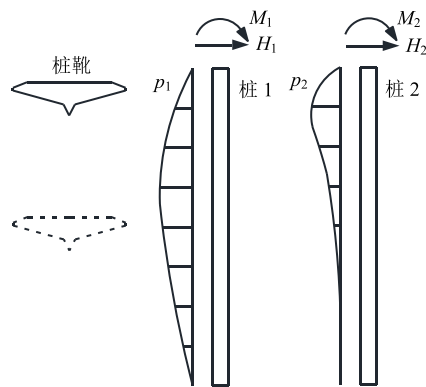


图3 群桩相互作用分析模型
Fig.3 Pile group interaction model

参照图 2, 仍将桩 1 与桩 2 沿桩长分为 $n+1$ 个单元段。对于桩 1, 除了桩 1 处的土压力 $\{p_1\}$ 对桩 1 的水平位移产生影响之外, 桩 2 的土压力 $\{p_2\}$ 也会对桩 1 的水平位移产生影响。当考虑桩靴贯入影响时, 按照 Poulos 弹性分析法, 如果桩靴贯入过程中桩土不分离, 则桩 1 位置处的桩身位移 $\{y_{p1G}\}$, 土位移 $\{y_{s1}\}$ 与土压力之间关系可以表示为

$$\{y_{p1G}\} = d([I_{sE11}]\{p_1\} + [I_{sE12}]\{p_2\}) + \{y_{s1}\} \quad (16)$$

式中: $\{p_1\}$ 、 $\{p_2\}$ 分别为桩 1 和桩 2 位置处的土压力; $[I_{sE11}]$ 与式 (11) 中的 $[I_{sE}]$ 相同; $[I_{sE12}]$ 为桩 2 位置处压力 $\{p_2\}$ 对桩 1 位置处各节点的位移影响系数与桩 1 处不同深度土层弹性模量的比值, 计算时, 位移影响系数按照 Poulos 的做法, 将各单元上的分布压力简化为单元中心处的集中力, 进而根据 Mindlin 半无限体内一点作用一集中力时, 任意一点水平位移解确定。

对桩 2 位置处的桩土相对位移, 需要考虑桩 1 的遮蔽作用对桩 2 位置处土位移的影响。参考文献 [11-12] 中的做法, 将桩 2 位置处的土体位移 $\{y_{s2}\}$ 表示为

$$\{y_{s2}\} = [\xi](\{y_{p1G}\} - \{y_{s1}\}) \quad (17)$$

式中: $[\xi]$ 为桩 1 处节点 i 与桩 2 处节点 j 之间的水平位移影响系数。矩阵中元素 ξ_{ij} 为根据 Mindlin 解确定的 j 点处相对位移对应的集中力导致的 i 节点的位移影响系数, 且有 $[\xi] = [I_{s12}] = [I_{s21}]$ 。

同理, 参照桩 1 的做法, 可得

$$\{y_{p2G}\} = d([I_{sE22}]\{p_2\} + [I_{sE21}]\{p_1\}) + [\xi](\{y_{p1G}\} - \{y_{s1}\}) \quad (18)$$

式中: $\{y_{p2G}\}$ 为桩 2 的桩身位移; $[I_{sE22}]$ 与式 (11) 中的 $[I_{sE}]$ 相同; $[I_{sE21}]$ 为桩 1 位置处压力 $\{p_1\}$ 对桩 2 位置处各节点的位移影响系数与桩 2 各节点处的弹性模量的比值, 若两桩几何尺寸相同, 有 $[I_{sE12}] = [I_{sE21}]$ 。

将式 (16) 与式 (18) 分别代入式 (12) 得

$$[X_1]\{p_1\} + [X_2]\{p_2\} = \{X_3\} \quad (19)$$

$$[X_4]\{p_1\} + [X_5]\{p_2\} = \{X_6\} \quad (20)$$

式中: $[X_1] = \frac{E_p I_p n^4}{L^4} [D][I_{sE}] + [I]$, 为 $(n-1) \times (n+1)$ 阶矩阵, $[I]$ 为 $(n-1) \times (n+1)$ 阶单位矩阵, 第 1 列和最后 1 列为 $(n-1)$ 阶 0 向量; $[X_2] = \frac{E_p I_p n^4}{L^4} [D][I_{sE12}]$, 为 $(n-1) \times (n+1)$ 阶矩阵; $\{X_3\} = -\frac{E_p I_p n^4}{L^4} [D]\{y_{s1}\} - \frac{E_p I_p n^4}{dL^4} \{A\}$, 为 $(n-1)$ 阶向量; $[X_4] = \frac{E_p I_p n^4}{L^4} [D][I_{sE22}] + [I] + \frac{E_p I_p n^4}{L^4} [D][\xi][I_{sE21}]$, 为 $(n-1) \times (n+1)$ 阶矩阵; $[X_5] = \frac{E_p I_p n^4}{L^4} [D][I_{sE12}] + \frac{E_p I_p n^4}{L^4} [D][\xi][I_{sE11}]$, 为 $(n-$

$1) \times (n+1)$ 阶矩阵; $\{X_6\} = -\frac{E_p I_p n^4}{dL^4} \{A\}$, 为 $(n-1)$ 阶向量。

对于桩头自由的情况, 式 (19) 和式 (20) 引入两根桩的桩身水平力与力矩平衡关系, 即可得到包含 $2n+2$ 个未知量的 $2n+2$ 个线性方程组。求解该方程组, 确定 $\{p_1\}$ 与 $\{p_2\}$, 然后由式 (16) 和式 (18) 确定桩身位移 $\{y_{p1G}\}$ 和 $\{y_{p2G}\}$, 进而得到群桩桩头位移 $y_{pkG(h)}$ 与相应的附加桩头位移 $\Delta y_{ki(h)}$ 。

2.3 求解步骤

综上所述, 考虑桩靴贯入对邻近群桩效应影响的方法求解步骤如下:

(1) 通过大变形数值仿真, 求解桩靴在自由场地贯入引起的桩 1 位置处的土体位移 $\{y_{s1}\}$ 。

(2) 利用 2.1 节中的方法, 计算受桩头水平荷载 H 与力矩 M 作用且考虑桩靴贯入影响时的单桩桩身响应 $\{y_k\}$, 并确定非线性地基梁中桩土相互作用的地基反力系数 k_{si} 和相应的等效弹性模量 E_{si} 。

(3) 利用等效弹性模量 E_{si} , 按照 2.2 节中的方法计算群桩桩头附加位移 $\Delta y_{ki(h)}$ 。

(4) 根据式 (1) 计算群桩桩头位移 y_{kG} 。

(5) 通过 Y 因子对单桩 p - y 曲线进行修正, 使得计算出的桩头位移等于 y_{kG} , 此时的 p - y 曲线即为考虑桩靴贯入影响的群桩 p - y 曲线。

利用 Y 因子评价桩靴贯入对群桩效应的影响时, 若考虑桩靴贯入的 Y 因子大于桩靴贯入前的 Y 因子, 则表明桩靴贯入增强了群桩效应; 反之则表明桩靴贯入没有增强群桩相互作用。

3 离心模型试验

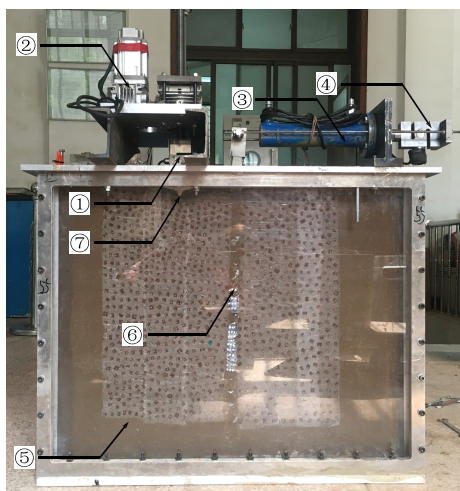
为了验证上述方法的可行性, 在清华大学土工离心机实验室进行了桩靴贯入砂土层时对邻近单桩、群桩影响的两组离心模型试验。单桩模型试验中桩的位置是群桩中靠近桩靴的桩位置。离心机容量为 $50 \text{ g} \cdot \text{t}$, 旋转半径为 2 m , 最大离心加速度 $50g$ 。

考虑到模型试验的对称性, 按半个模型尺寸制作离心模型试验箱与试验模型。

离心试验模型箱内壁长为 0.8 m , 宽为 0.25 m , 高为 0.68 m , 在模型箱的对称面安装了树脂玻璃视窗, 以便利用 PIV 技术对桩靴贯入土层时的土位移与桩身位移进行测量, 见图 4。

模型试验土层为饱和粉质细砂, 图 5 是该粉质细砂的颗粒分布曲线。采用分层压实法, 按 1.6 g/cm^3 的干密度, 分 7 层制备模型试验土层, 除底层为 5 cm 厚外, 其余 6 层均为 10 cm 。压实后模型土层厚为

65 cm, 以此模拟 32.5 m 厚的原型土层。采用低水头饱和法和对压实后的土层饱和 2 d 至水面超过泥面 2 cm 为止。对饱和后的土进行的固结排水三轴试验, 结果表明, 模型试验土层的有效内摩擦角为 30° 。



1—竖向力传感器; 2—桩靴贯入装置; 3—水平力施加装置; 4—水平力传感器; 5—树脂玻璃窗; 6—模型桩; 7—模型桩靴

图4 模型试验装置
Fig.4 Model test device

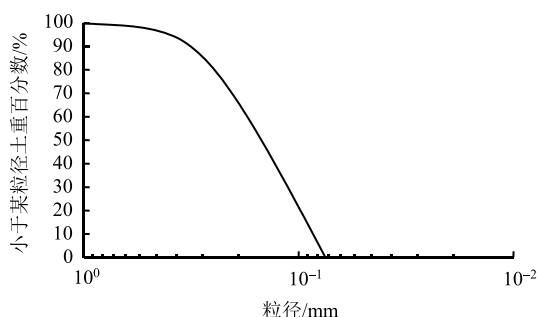


图5 砂土筛分曲线
Fig.5 Sieving curve of the sand

模型桩靴最大直径为 0.16 m, 以此模拟最大直径为 8 m 的原型桩靴, 见图 6。以下用 D 表示桩靴最大直径。模型桩为铝合金矩形截面管桩。桩长为 0.72 m, 入土深度为 0.6 m。截面外边长为 0.025 m (宽) $\times$ 0.040 m (长), 壁厚为 0.001 96 m。模拟长为 36 m, 埋置深度为 30 m, 截面外边长为 1.25 m $\times$ 2.00 m, 壁厚为 0.098 m 的长方形截面管桩。试验时, 在泥面以上 6 m 处施加水平力, 且桩头无约束 (自由桩头)。

群桩桩间距 $1.6d$ (d 为桩截面宽度)。试验时, 利用一动滑轮机构, 在泥面以上 6 m 处给两根桩施加大小相同、方向背离桩靴的水平力。

图 7(a)和图 7(b)分别给出了单桩和群桩离心模

型试验安排, 图中尺寸标注为原型尺寸。试验中利用 PIV 技术和粘贴在桩身的应变片测量桩身位移与弯矩。离心模型试验过程如下:

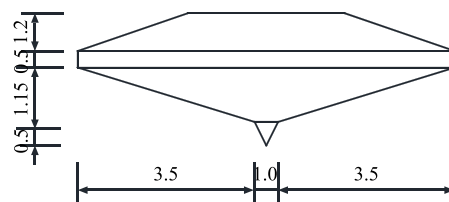
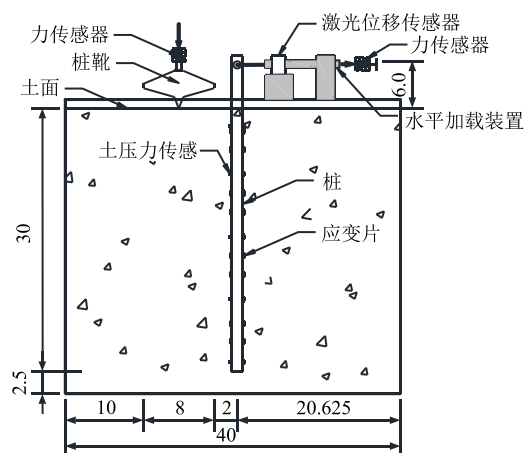
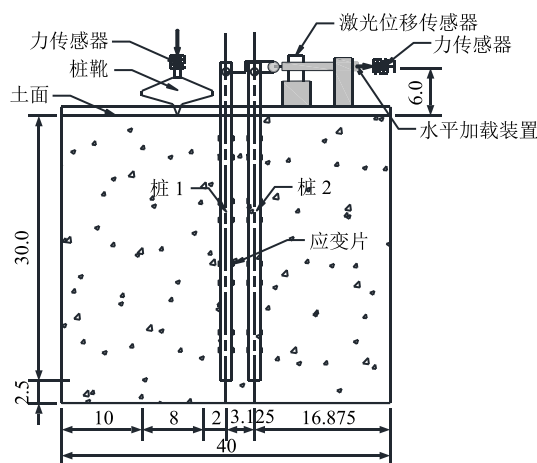


图6 桩靴 (单位: m)
Fig.6 Model spudcan (unit: m)



(a) 单桩



(b) 群桩

图7 离心模型试验安排 (单位: m)
Fig.7 Centrifuge model test configuration (unit: m)

(1) 将离心机模型旋转至 50g。

(2) 在土面以上 0.12 m (原型为 6 m) 分 7 级给桩施加水平力, 对于单桩施加的最终力为 350 N (相当于原型 875 kN), 对于群桩施加的最终力为 700 N (相当于原型 1 750 kN)。依据计算结果, 此时桩身最大弯曲应力为材料屈服应力的 50%。

(3) 以 0.15 mm/s 的速度使桩靴最大直径位置贯入泥面以下 $0.5D$ (原型为 4 m)。

4 分析方法的验证

4.1 土体位移

首先利用 CEL 大变形有限元方法求解桩靴贯入引起的自由场地土体位移。根据离心模型试验模拟的原型尺寸、并考虑对称性建立模拟桩靴在自由场地(不含邻近桩)贯入的 CEL 数值仿真模型, 模型泥面以上设置 10 m 厚的欧拉空穴区, 以此模拟桩靴贯入土层时周围土体的隆起与回淤, 见图 8。

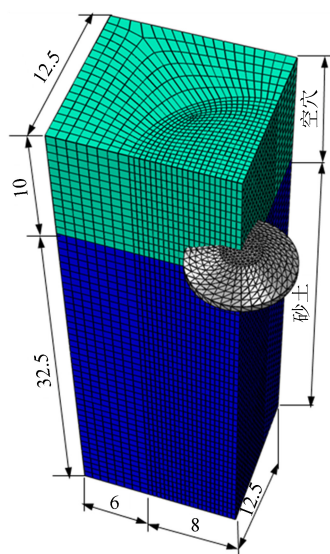


图 8 CEL 模型 (单位: m)

Fig.8 CEL model (unit: m)

采用 ABAQUS 有限元软件中的 EC3D8R 欧拉单元对数值仿真模型进行网格划分。在模型桩靴贯入中心水平方向 $1.0D$ 范围内, 网格尺寸为 $0.05D$, $1.0D$ 以外水平方向的网格尺寸为 $0.1D$, 模型竖直方向的网格尺寸为 $0.05D$ 。

计算中采用服从摩尔-库仑屈服准则的理想弹塑性模型描述砂土的应力-应变关系。砂土内摩擦角为 30° , 有效重度取 9 kN/m^3 , 弹性模量取 10 MPa , 泊松比取 0.25 。将桩靴设置为刚体, 桩靴与砂土之间为光滑接触。计算时的桩靴贯入速度取 0.1 m/s 。

利用作者开发的后处理程序^[7]确定桩靴贯入土层时, 邻近桩位置处的土位移, 结果见图 9, 图中还给出了试验测量结果, 可以发现除插桩深度为 $0.25D$ 时浅层土体预测与试验结果有一定差距外, 计算的土体位移基本反映了插桩过程的土体位移变化趋势。以下, 据此计算桩头位移, 并确定考虑桩靴贯入影响的群桩 p - y 关系 Y 因子。

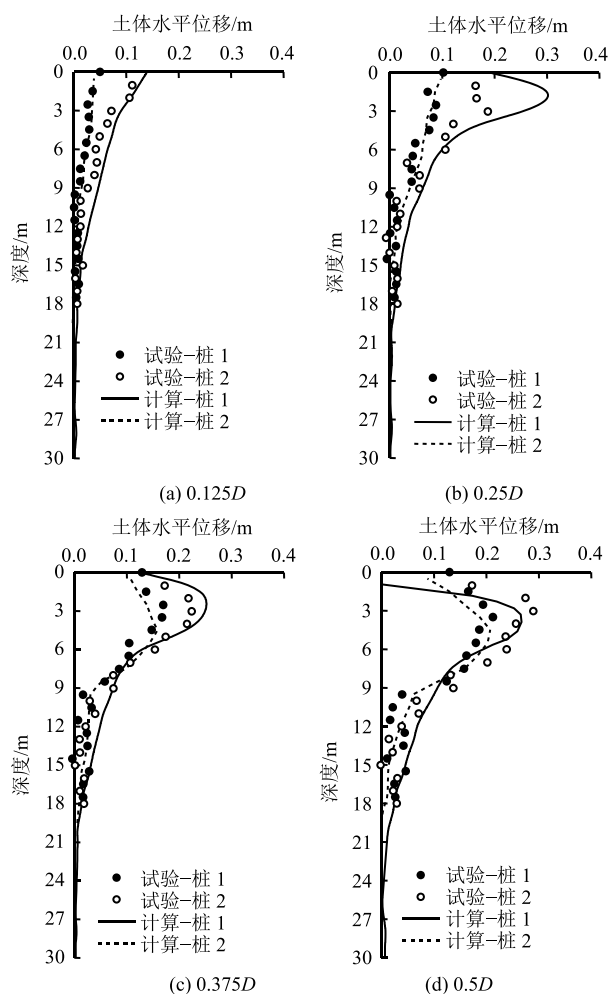


图 9 不同桩靴贯入深度对应的土体水平位移

Fig.9 Lateral soil displacement at different penetration depths

4.2 群桩响应

在单桩、群桩离心模型试验中, 水平力施加在泥面以上 6 m 处, 据此确定邻近桩泥面处的桩头边界条件为

$$H(0) = 1.75 \text{ MN} \quad (21)$$

$$M(0) = 10.5 \text{ MN} \cdot \text{m} \quad (22)$$

又依据模型试验测量结果可知, 邻近桩桩底弯矩与剪力为 0, 据此确定桩底边界条件为

$$H(30) = 0 \quad (23)$$

$$M(30) = 0 \quad (24)$$

依据原型桩的截面尺寸, 桩的截面惯性矩 $I_p = 0.149 \text{ m}^4$, 桩材料的弹性模量取 $E_p = 69 \text{ GPa}$ 。

利用 2.1 节中的方法计算桩头位移时, 将桩分为 300 段, 每段单元长 $\delta = 0.1 \text{ m}$, 迭代收敛标准取 10^{-5} 。结合图 9 给出的桩 1 位置处水平土位移计算结果, 计算与桩靴不同贯入深度对应的桩 1 和桩 2 的土面处桩头位移, 结果见图 10 中的标记。图中还

给出了桩 1 位置处的单桩离心模型试验土面处的桩头位移测量结果, 见图 10 中的实线。计算与模型试验结果相比表明两者基本吻合。

进一步, 依据与每个桩头位移对应的地基反力模量 $k_s(z)$, 由式 (15) 确定不同埋深土层的弹性模量 $E_s(z)$ 。

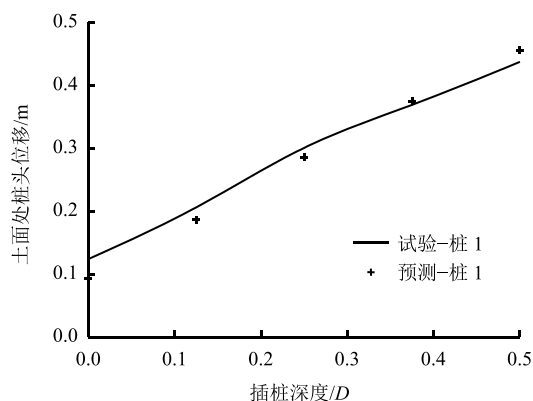


图 10 桩靴贯入过程中的单桩桩头位移
Fig.10 Head deflection of a single pile during spudcan penetration

再利用 2.2 节中的方法, 将桩身分为 30 个单元段, 同样依据图 9 中土体位移计算结果, 分别求解桩 1 和桩 2 的附加桩头位移 Δy_{12} 与 Δy_{21} , 以及相应的群桩桩头位移 y_{1G} 与 y_{2G} , 结果见图 11 中的标记。图 11 中的实线是离心模型试验结果, 标记为预测结果。计算与试验结果比较表明, 计算的桩头位移与试验测量结果较为吻合。

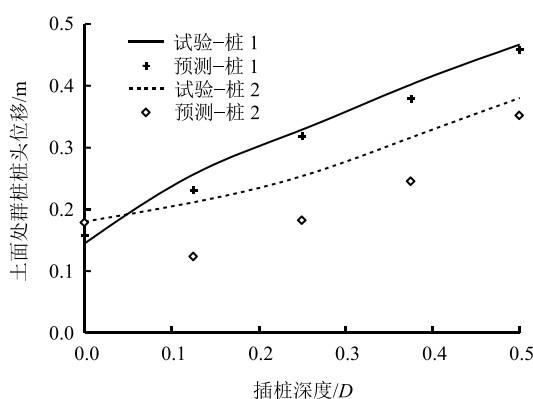


图 11 桩靴贯入过程中的群桩桩头位移
Fig.11 Head deflection of the pile group during spudcan penetration

再依据 y_{1G} 与 y_{2G} , 利用 Y 因子对单桩 p - y 曲线进行修正, 通过试算分别确定 y_{1G} 与 y_{2G} 对应的 Y 因子, 结果见图 12。图中的计算结果表明, 两者变化趋势一致, 即随桩靴贯入深度增加, 反映群桩相互作用的 Y 因子逐渐减小。在此种工况下, 桩靴贯

入虽然使桩头位移增大, 但没有增大群桩效应。

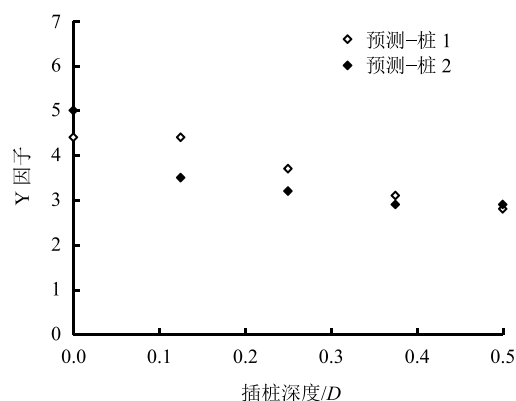


图 12 插桩过程中 Y 因子变化
Fig.12 Y modifier variation during spudcan penetration

5 参数分析

5.1 群桩桩间距的影响

由于桩间距对群桩效应的影响比较大, 以下利用前述方法预测桩间距为 $1d$ 、 $3d$ 和 $5d$ 时的 Y 因子变化, 见图 13。分析时仅改变桩 2 的位置, 桩 1 与桩靴之间的相对位置不变。

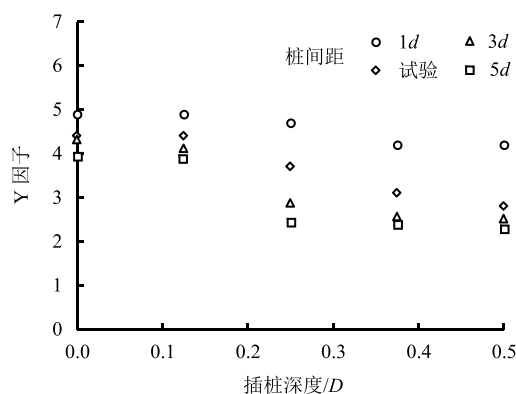


图 13 桩间距的影响
Fig.13 Effect of pile spacing

可以发现, 随着桩间距增大, Y 因子逐渐减小, 但 Y 因子随桩靴贯入深度增加时的变化规律不发生改变。

5.2 桩靴净间距的影响

为研究与桩靴边缘不同净间距时, 桩靴贯入时群桩效应的变化, 假设桩 1 位于试验中桩 2 的位置, 桩 2 仍位于桩靴与桩 1 的中心连线上, 桩间距仍为 $1.56d$, 研究桩靴与群桩净间距对 Y 因子随桩靴贯入深度变化规律的影响, 见图 14。

可以发现, 净间距增大, 桩靴贯入影响减弱, 同一插桩深度时, 距离桩靴较远时的 Y 因子大于距离较近时, 但仍随桩靴贯入深度增加而减小。

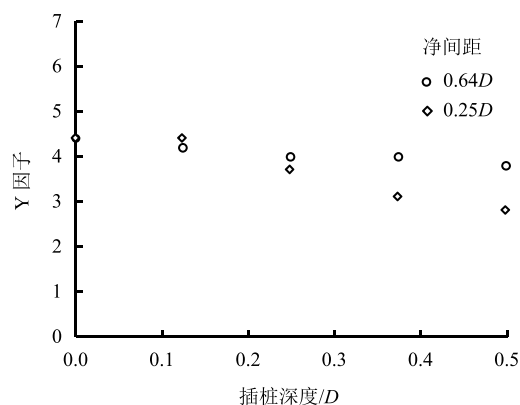


图 14 净间距的影响

Fig.14 Effect of spudcan-pile clearance

6 结 论

(1) 该方法能同时考虑群桩之间的相互作用和桩靴贯入引起的土体大变形对土体模量的影响。利用本文方法对离心模型试验结果进行了预测, 预测结果与试验结果吻合, 验证了方法的可行性。

(2) 试验和参数分析表明, 桩靴贯入砂土时群桩桩头位移增大, Y 因子减小。

(3) 群桩的桩间距越大, Y 因子减小, 但 Y 因子随桩靴贯入深度增加时的变化规律不变。群桩与桩靴间距增大, 桩靴贯入影响减弱, Y 因子仍随桩靴贯入深度增加而减小。

参 考 文 献

- [1] XIE Y. Centrifuge model study on Spudcan-pile interaction[D]. Singapore: Department of Civil Environmental Engineering, National University of Singapore, 2009.
- [2] STEWART D. P. Influence of jack-up operation adjacent to a piled structure[C]//Proceedings of International Symposium of Frontiers in Offshore Geotechnics. [S. l.]: Taylor & Francis, 2006.
- [3] THO K K, LEUNG C F, CHOW Y C, et al. Eulerian finite element simulation of spudcan-pile interaction[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2013, 50: 595-608.
- [4] 王建华, 兰斐. 钻井船插桩对邻近桩影响的耦合欧拉-拉格朗日有限元方法研究[J]. **岩土力学**, 2016, 37(4): 1127-1136.
WANG Jian-hua, LAN Fei. A coupled Eulerian-Lagrange FEM method for analyzing the effects of spudcan penetration on an adjacent pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(4): 1127-1136.
- [5] 李亚, 李书兆, 张超. 黏土中自升式钻井船插桩对邻近桩基影响的分析方法[J]. **岩土力学**, 2018, 39(5): 1891-1900.
LI Ya, LI Shu-zhao, ZHANG Chao. An approach to analyze effects of spudcan penetration of a jack-up rig on adjacent piles in cohesive soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(5): 1891-1900.
- [6] 范怡飞, 王建华, 戴笑如. 基于土体的大变形分析钻井船插桩对邻近桩的影响[J]. **岩土工程学报**, 2018, 40(1): 91-99.
FAN Yi-fei, WANG Jian-hua, DAI Xiao-ru. Effects of spudcan penetration on adjacent piles based on large deformation of soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 40(1): 91-99.
- [7] FAN Y F, WANG J H. Lateral response of piles subjected to a combination of spudcan penetration and pile head loads[J]. **Ocean Engineering**, 2018, 156: 468-478.
- [8] WANG Jian-hua, FAN Yi-fei, MA Jian-ping. Numerical simulation of effects of the spudcan penetration on pile groups of jacket platforms[C]//Proceedings of 27th International Offshore and Polar Engineering Conferences. Los Angeles: [s. n.], 2017.
- [9] HONG Y, SOOMRO M A, NG C W W. Settlement and load transfer mechanism of pile group due to side-by-side twin tunnelling[J]. **Computers and Geotechnics**, 2015, 64: 105-119.
- [10] JEONG S, SEO D, KIM Y. Numerical analysis of passive pile groups in offshore soft deposits[J]. **Computers and Geotechnics**, 2009, 36: 1164-1175.
- [11] HUANG M, ZHANG C, LI Z. A simplified analysis method for the influence of tunneling on grouped piles[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2009, 24: 410-422.
- [12] ZHANG R, ZHENG J, PU H, et al. Analysis of excavation-induced responses of loaded pile foundations considering unloading effect[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2011, 26: 320-335.
- [13] API. Geotechnical and foundation design considerations. ANSI/API recommended practice 2GEO first edition[S]. Washington D C: American Petroleum Institute, 2011.
- [14] FOCHT J A, KOCH K J. Rational analysis of the lateral performance of offshore pile groups[C]//Proceedings of Offshore Technology Conference. Dallas, Texas: OTC, 1973.
- [15] 杨敏, 周洪波. 承受侧向土体位移桩基的一种耦合算法[J]. **岩石力学与工程学报**, 2005, 24(24): 4491-4496.
YANG Min, ZHOU Hong-bo. A coupling analytical solution of piles subjected to lateral soil movements[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(24): 4491-4496.
- [16] POULOS H G, DAVIS E H. Pile foundation analysis and design[M]. Taipei: Rainbow Bridge Book Co., 1980.
- [17] DAVIS E H, POULOS H G. The use of elastic theory for settlement prediction under three-dimensional conditions[J]. **Geotechnique**, 1968(18): 67-91.