

考虑施工顺序及遮栏效应的静压群桩挤土位移场研究

罗战友^{1,2,3}, 龚晓南³, 朱向荣^{2,3}

(1. 浙江科技学院岩土工程研究所, 浙江 杭州 310023; 2. 浙江大学宁波理工学院, 浙江 宁波 315100;

3. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 基于应变路径法及源汇法理论, 建立了已存在桩情况下单桩挤土位移场。在此基础上, 结合拉格朗日插值函数推导出了考虑施工顺序及遮栏效应的群桩挤土位移场的解析解。该解较各桩的简单叠加更符合工程实际情况, 而且能够简化为不考虑施工顺序的静压群桩挤土位移场的解答。利用得到的解析解对群桩产生的挤土位移场进行了分析, 结果表明: 与忽略施工顺序及遮栏效应的群桩挤土位移场相比, 考虑施工顺序及遮栏效应的迎桩面挤土位移较大, 而背桩面的挤土位移较小。

关键词: 静压群桩; 挤土位移; 施工顺序; 遮栏效应

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)06-0824-06

作者简介: 罗战友(1974-), 男, 河南临颖人, 博士后, 副教授, 从事静力压桩、地基处理及结构面等方面的教学和研究工作。E-mail: lzy0395@163.com。

Soil displacements around jacked group piles based on construction sequence and compacting effects

LUO Zhan-you^{1, 2, 3}, GONG Xiao-nan³, ZHU Xiang-rong^{2, 3}

(1. Geotechnical Engineering Institute, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China; 2. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China; 3. Geotechnical Engineering Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: According to the strain path method and source-sink method, the closed-form analytical expressions of displacement fields due to the presence of adjacent piles were obtained. Based on the analytical expressions of single pile and Lagrange interpolating function, the closed-form analytical expressions of displacement fields of soil around jacked group piles were derived. The solution taking into consideration construction sequence and compacting effects was in accordance with the practical engineering. And the solution could be reduced to simplified solution without consideration of construction sequence and compacting effects. Displacement fields of soil around group piles were analyzed by the solution. It was shown that the displacement of frontal surface was larger and that of dorsal surface was smaller with consideration of construction sequence and compacting effects.

Key words: jacked group pile; compacting displacement; construction sequence; compacting effect

0 引 言

静压桩由于噪音小、无振动、施工应力小、沉桩速度快等诸多优点而得到了日益广泛的应用, 但是, 静压桩属于挤土桩, 产生的挤土效应会对周边环境造成不利的影响^[1-4]。

工程界与学术界对静压桩挤土效应的危害性非常关注。常用的理论研究方法有圆孔扩张法^[5-7]、应变路径法^[8-10]及数值模拟法^[11-13]。圆孔扩张法及应变路径法在一定的假定条件下能够给出静压单桩挤土效应的解析解, 但对于群桩挤土效应多采用单桩挤土效应的简单叠加或者“等量桩”的简化方法^[14]。数值模拟法

能够考虑到土体的本构关系、大变形和桩土的相互作用, 但是和其它方法一样, 有限元法多用于单桩挤土效应的分析^[15]。

在实际的工程应用中, 只有群桩产生的挤土效应才有可能对周边环境造成不利影响, 而群桩的挤土效应并不是单桩挤土效应的简单叠加或者“等量桩”的

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50708097); 中国博士后科学基金一等资助项目(20060400317); 浙江省教育厅基金(20061459); 浙江省高校青年教师资助计划项目(0202303005); 浙江省高校中青年学科带头人资助计划项目
收稿日期: 2007-04-23

简化方法, 需要考虑压入桩的施工顺序及已压入桩的遮栏效应的影响。本文结合实际施工过程对静压群桩的挤土位移场进行研究。

1 已压入桩情况下单桩的挤土位移场

1.1 基本假定^[16]

(1) 由于桩与桩之间有一定的距离, 由大小应变假定下的挤土位移场对比分析可知, 1 倍的桩径范围之外可以用小应变情况下的位移解来近似代替大应变的情况。

(2) 由于应力的修正对源与汇或源与源作用下的土体内部位移场影响较小, 可以忽略应力修正产生的土体内部位移场。

(3) 后续压入桩产生的挤土效应只受紧邻的已压入桩的影响, 而已压入桩产生的位移场不受后续压入桩的影响。

(4) 背桩面及迎桩面产生的位移场平均值和单桩情况下相一致。所有压桩产生的位移总和即为群桩产生的挤土位移。

1.2 静压单桩挤土效应的解析解

应变路径法 (SPM) 是由 Baligh 在 1985 年首先提出的, 其主要用于深基础的贯入问题, 该理论不考虑土体应力与应变之间的本构关系, 而是利用速度场得出挤土桩被压入过程中对土体产生的径向与竖向位移, 使计算结果简单合理。Sagaseta (2001) 在圆孔扩张理论的基础上采用了源汇法来解决半无限体的沉桩问题^[17]。笔者利用 SPM 法, 结合 Sagaseta 提出的源与源及源与汇的相互作用, 使结果更趋于合理, 见文献^[16]。

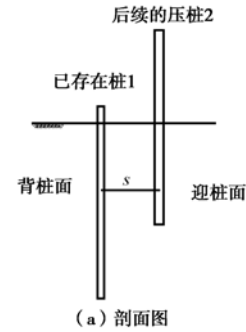
在单桩情况下, 所得的位移场如下式所示:

$$S_{x1} = \frac{1}{16} \frac{d^2 L}{x\sqrt{L^2 - 2zL + x^2 + z^2}} - \frac{1}{16} \frac{d^2 z}{x\sqrt{L^2 - 2zL + x^2 + z^2}} + \frac{1}{16} \frac{d^2 L}{x\sqrt{L^2 + 2zL + x^2 + z^2}} + \frac{1}{16} \frac{d^2 z}{x\sqrt{L^2 + 2zL + x^2 + z^2}}, \quad (1a)$$

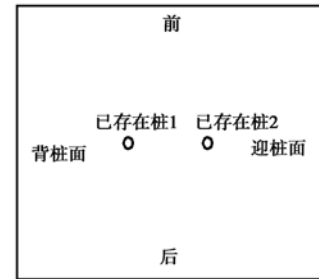
$$S_{z1} = -\frac{1}{16} \frac{d^2}{\sqrt{L^2 - 2zL + x^2 + z^2}} + \frac{1}{8} \frac{d^2}{\sqrt{x^2 + z^2}} - \frac{1}{16} \frac{d^2}{\sqrt{L^2 + 2zL + x^2 + z^2}} \quad (1b)$$

1.3 已压入桩情况下单桩的挤土位移场

图 1 为已压入桩情况下的计算模型, 后压入的桩与已存在桩的中心距为 s 。后压入桩产生的挤土位移场根据如下步骤求得:



(a) 剖面图



(b) 平面图

图 1 二根桩情况下的计算模型

Fig. 1 Model of two piles

(1) 当 $s = \beta d$ 时, 若超过 βd 距离, 桩与桩不存在相互影响, 可单桩进行计算。因此, 所产生的位移场同式 (1), 记为 S_{x0} , S_{z0} 。

(2) 当 $s = 1d$ 时, 两桩已紧邻, 如图 2 所示。此时可以等效为一根桩来计算位移场, 记为 S_{xt} , S_{zt} 。

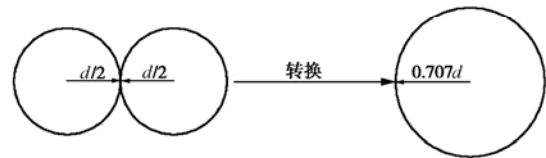


图 2 两桩紧邻时等效为一根桩的模型

Fig. 2 Model of two adjacent piles

(3) 对于迎桩面情况, 可以根据实际的桩距, 在第一根桩存在的条件下, 由第二根桩的压入所产生的位移场可由 (1) 与 (2) 两种情况下的拉格朗日插值进行叠加, 记为 S_{yx2} , S_{yz2} ,

$$S_{yx2}(x) = \alpha_{21} S_{x0}(x) + \alpha_{22} S_{xt}(x) \quad (2a)$$

$$S_{yz2}(x) = \alpha_{21} S_{z0}(x) + \alpha_{22} S_{zt}(x) \quad (2b)$$

式中 S_{yx2} , S_{yz2} 为第二根桩压入后所产生的迎桩面土体的水平及竖向位移场; x 为迎桩面计算点的位置到第二根桩中心的水平距离; α_{21} , α_{22} 为拉格朗日的插值基函数,

$$\alpha_{21} = \frac{\gamma - 1}{\beta - 1} \quad (3a)$$

$$\alpha_{22} = \frac{\gamma - \beta}{1 - \beta} \quad (3b)$$

其中, γ 为实际工程中两根桩的中心距, β 为二根桩

无影响时的桩距参数。

(4) 对于二桩之间的位移场, 当第二根压入时, 二桩之间的位移场可由基本假定推出

$$S_{zx2} = 2S_{x1}(x) - S_{x2}(x), \quad (4a)$$

$$S_{zz2} = 2S_{z1}(x) - S_{z2}(x), \quad (4b)$$

式中, S_{zx2}, S_{zz2} 为第二根桩压入后所产生的内部土体的水平及竖向位移场, x 为在二桩内部计算点到第二根桩中心的水平距离。

(5) 二桩情况下背桩面的挤土位移场, 在第二根压入桩的情况下背桩面位移场可由基本假定推出

$$S_{bx2} = 2S_{x1}(x + \gamma d) - S_{x2}(x + \gamma d), \quad (5a)$$

$$S_{bz2} = 2S_{z1}(x + \gamma d) - S_{z2}(x + \gamma d), \quad (5b)$$

式中, S_{bx2}, S_{bz2} 为第二根桩压入后所产生的背桩面土体的水平及竖向位移场, x 为背桩面计算点到第一根桩中心的水平距离。

2 静压群桩挤土位移场的解析解

2.1 模型的建立

(1) 计算出单桩情况下的位移场。

(2) 考虑已存在桩情况下单桩的挤土位移场。

(3) 步骤(1)和步骤(2)合并可得到二桩情况下的位移场。

(4) 考虑已存在桩的情况下的第 i 根桩的位移场 ($i \geq 3$)。

(5) 重复步骤(4)直到第 m 根桩压入后产生的位移场。

(6) 步骤(3), (4), (5)叠加可得到 m 根桩产生的挤土位移场。

(7) 由步骤(6)得到排桩情况的位移场, 根据群桩的先后施工顺序可分别求出平面内 x 方向与 y 方向的迎桩面及背桩面位移场。

2.2 考虑施工顺序及遮栏效应的群桩挤土位移场的求解

由排桩情况下的位移场可推得 $n \times m$ 根桩的位移场。静压桩的施工顺序可分为单流水法、双流水法、三流水法、四流水法、五流水法等几种情况, 不同的情况产生的位移场也就有很大的差异。但无论何种方法, 只需要根据群桩的先后施工顺序, 按排桩情况就可得到施工到任意阶段的土体位移场解答。本小节根据图 3 所示的施工顺序给出了群桩的位移场。

对于第 i 行 (i 为奇数) 左边的情况属于背桩面, 采用上述模型建立的方法可以给出计算式

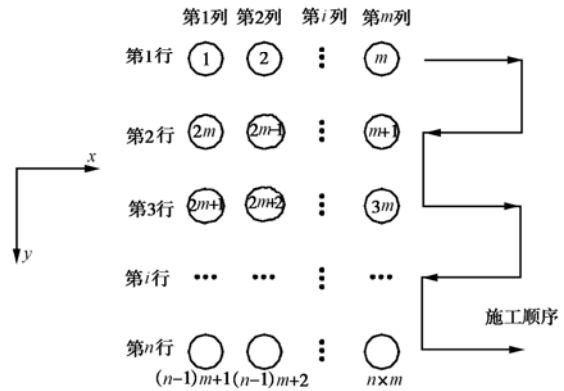


图 3 静压群桩的施工顺序示意图

Fig. 3 Construction sequence of jacked group piles

$$\begin{bmatrix} S_{bx(1+2+\dots+m)}(x) \\ S_{bz(1+2+\dots+m)}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{x1}(x) & S_{z1}(x) \\ S_{x1}((2-1)\gamma d + x) & S_{z1}((2-1)\gamma d + x) \\ \vdots & \vdots \\ S_{x1}((m-1)\gamma d + x) & S_{z1}((m-1)\gamma d + x) \\ -S_{x0}((2-1)\gamma d + x) & -S_{z0}((2-1)\gamma d + x) \\ -S_{x1}((2-1)\gamma d + x) & -S_{z1}((2-1)\gamma d + x) \\ \vdots & \vdots \\ -S_{x0}((m-1)\gamma d + x) & -S_{z0}((m-1)\gamma d + x) \\ -S_{x1}((m-1)\gamma d + x) & -S_{z1}((m-1)\gamma d + x) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ 2 \\ \alpha_{21} \\ \alpha_{22} \\ \vdots \\ \alpha_{m1} \\ \alpha_{m2} \end{bmatrix}; \quad (6a)$$

同样对于第 i 行右侧的情况则属于迎桩面, 其挤土位移场的计算式为

$$\begin{bmatrix} S_{yx(1+2+\dots+m)}(x) \\ S_{yz(1+2+\dots+m)}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{x0}((m-1)\gamma d + x) & S_{z0}((m-1)\gamma d + x) \\ S_{x1}((m-1)\gamma d + x) & S_{z1}((m-1)\gamma d + x) \\ S_{x0}((m-2)\gamma d + x) & S_{z0}((m-2)\gamma d + x) \\ S_{x1}((m-2)\gamma d + x) & S_{z1}((m-2)\gamma d + x) \\ \vdots & \vdots \\ S_{x0}((m-m)\gamma d + x) & S_{z0}((m-m)\gamma d + x) \\ S_{x1}((m-m)\gamma d + x) & S_{z1}((m-m)\gamma d + x) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \alpha_{11} \\ \alpha_{12} \\ \alpha_{21} \\ \alpha_{22} \\ \vdots \\ \alpha_{m1} \\ \alpha_{m2} \end{bmatrix}. \quad (6b)$$

式中 $S_{yx(1+2+\dots+m)}(x), S_{yz(1+2+\dots+m)}(x)$ 为第 i 行桩情况下迎桩面的水平及竖向位移场; $S_{bx(1+2+\dots+m)}(x), S_{bz(1+2+\dots+m)}(x)$ 为第 i 行桩情况下背桩面的水平及竖向位移场; $\alpha_{21}, \dots, \alpha_{m1}$ 为拉格朗日插值的第一项基函数, 其值是相等的; $\alpha_{22}, \dots, \alpha_{m2}$ 为拉格朗日插值的第二项基函数, 其值是相等的; x 为对于迎桩面, x 为计算点的位置到最后压入桩中心的水平距离; 对于背桩面, x

为背桩面计算点到第一根桩中心的水平距离。

对于第*i*行桩(偶数行),由压桩的施工顺序可知,第*i*行桩的右侧属于背桩面,而左侧属于迎桩面的情况。因此,可以用第*i*行桩的情况给出相应的背桩面与迎桩面的解。在此基础上采用各排桩挤土位移的相互叠加,就可得到群桩产生的挤土位移场。

2.3 不考虑施工顺序及遮栏效应的群桩挤土位移场

由于在考虑群桩的施工顺序及遮栏效应时,采用了拉格朗日插值函数,并引用了两个参数β和γ。若不考虑群桩的施工顺序影响时,只需β=γ即可由迎桩面或者背桩面的位移场得到不考虑施工顺序的群桩位移场,这样也就不需要区分迎桩面及背桩面的情况。此时可按如下式求得:

$$S_x(x,y)=\sum_i^{n \times m} S_{xli} \cdot \left(\frac{x-x_i}{\sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2}} \right), \quad (7a)$$

$$S_y(x,y)=\sum_i^{n \times m} S_{yli} \cdot \left(\frac{y-y_i}{\sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2}} \right), \quad (7b)$$

$$S_z(x,y)=\sum_i^{n \times m} S_{zli}, \quad (7c)$$

式中,*x*,*y*为计算点的位置,*x_i*,*y_i*为某桩在平面的位置。

3 静压群桩挤土位移的对比分析

为了便于比较分析,取桩长*L*为50*d*,β为20,γ为5*d*。群桩数为6×5,施工按照图4的顺序,其它说明如表1所示。

3.1 水平向位移场的变化规律

由图5可知,在群桩情况下得到的迎桩面及背桩面的变化规律和单桩的近似一样,即随着深度的增加,位移逐渐变小,且在桩底标高附近其的变化率急剧地

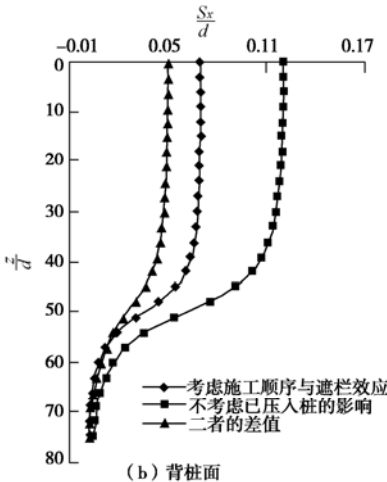
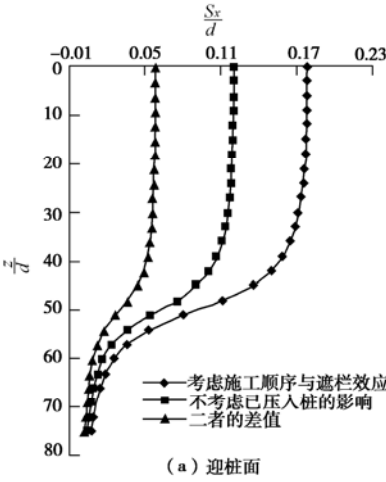


图5 群桩情况下迎桩面与背桩面的水平向位移沿深度的变化规律
Fig. 5 Variation of frontal and dorsal horizontal displacements of group piles with depth

表1 变化平面及变量的确定

Table 1 Change of plane and variable	
变化平面	变量
沿水平向变化	$z=0$
随深度变化	$x=5d$
	$x \geq 2d$
	$z \geq 0$

注:*z*方向垂直于地面向下。迎桩面时,*x*为到第28根桩中心的距离;背桩面时,*x*为到第3根桩中心的距离。

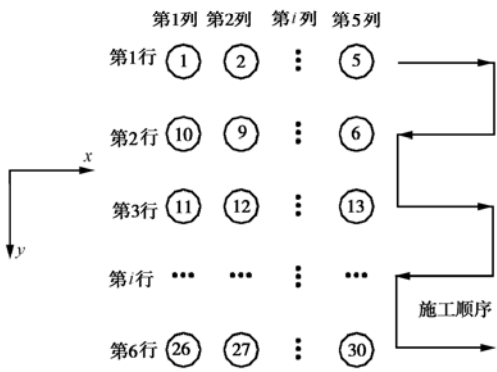


图4 静压群桩的施工顺序示意图
Fig. 4 Construction sequence of jacked group piles

增大。图5(a)中迎桩面的位移较同等距离下的不考虑施工顺序与遮栏效应的位移大,相反图5(b)中背桩面的位移较同等距离下的不考虑施工顺序与遮栏效应的位移小。就二者的差值来讲,迎桩面位移比背桩面位移的变化更加明显,这也说明在已存在桩的情况下迎桩面的位置受挤土影响较大,在施工时应给予重视。图6是水平向位移在不同的计算点的变化规律。从图中可以看出,随着距离的增大,迎桩面及背桩面的水平向位移逐渐变小,而且二者的差别也逐渐减少。由图6(a)及图6(b)中的对比分析可以得到:与忽略已存在桩情况下的挤土位移场相比较,迎桩面的位移较背桩面的变化率大,因此在计算迎桩面的挤土效应时更应该考虑施工顺序及遮栏效应的影响。

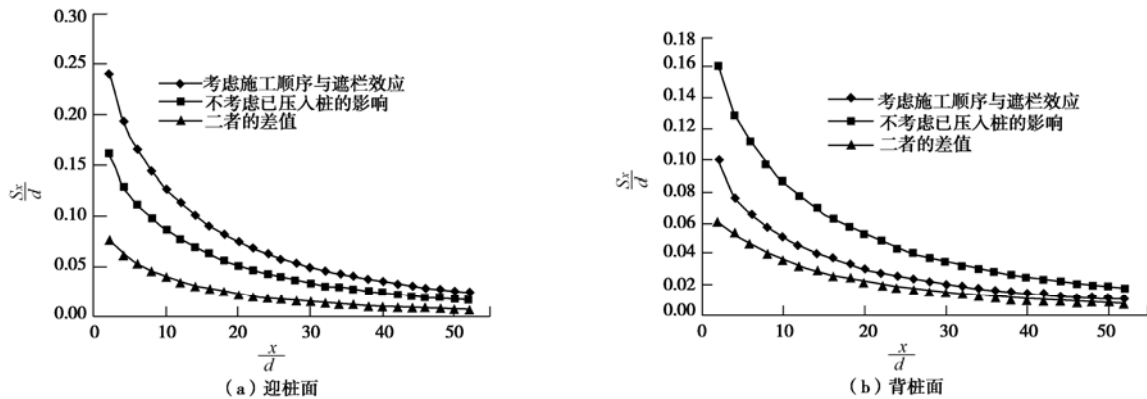


图6 群桩情况下迎桩面与背桩面的水平向位移沿水平距离的变化规律

Fig. 6 Variation of frontal and dorsal horizontal displacements of group piles with horizontal distance

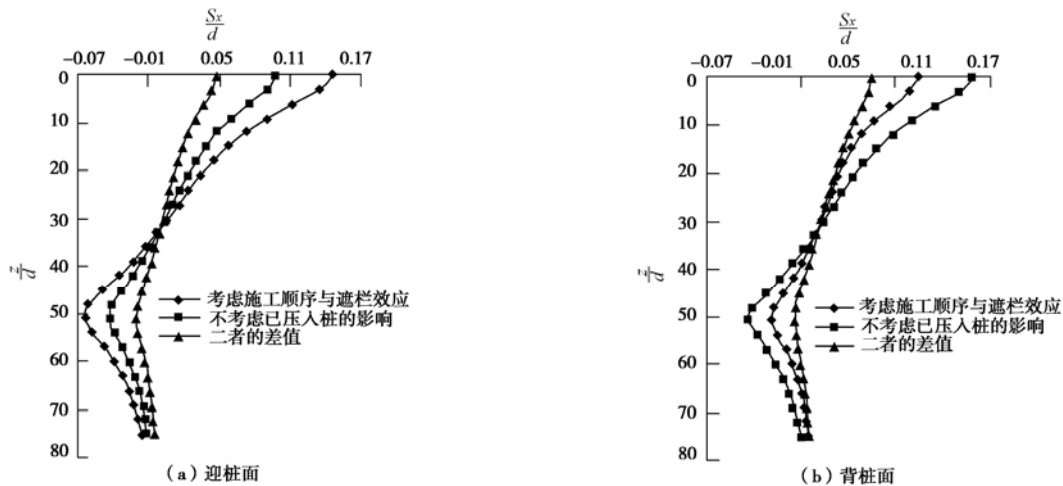


图7 群桩情况下迎桩面与背桩面的竖向位移沿深度的变化规律

Fig. 7 Variation of frontal and dorsal vertical displacements of group piles with depth

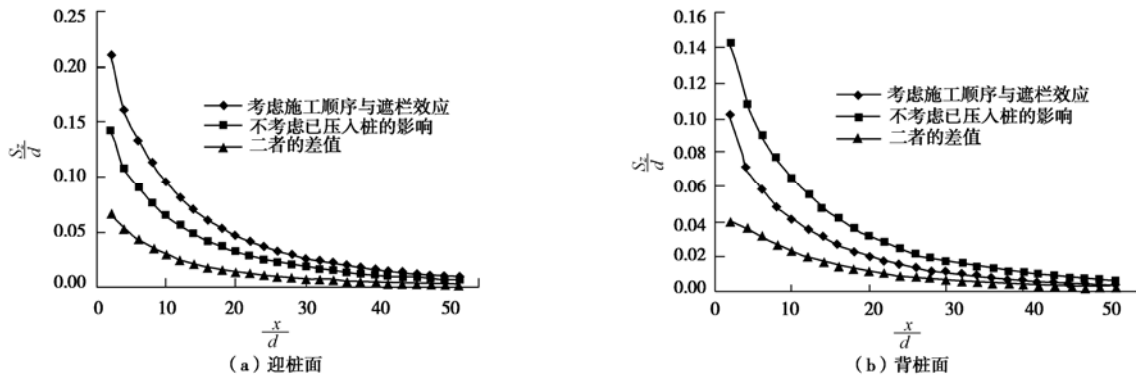


图8 群桩情况下迎桩面与背桩面的竖向位移沿水平距离的变化规律

Fig. 8 Variation of frontal and dorsal vertical displacements of group piles with horizontal distance

3.2 竖向位移场的变化规律

由图7可知,在群桩情况下所得到的迎桩面及背桩面位移场的变化规律和单桩的近似一样,即随着深度的增加,位移逐渐由隆起变为下沉。图7(a)中迎桩面的位移较同等距离下的不考虑施工顺序与遮栏效应的位移大,相反图7(b)中的背桩面位移场较同等距离下的不考虑施工顺序与遮栏效应的位移场小。但就二者的差值来讲,迎桩面位移比背桩面位移的变化更加明显,这也说明在已存在桩的情况下迎桩面的位

置受挤土影响较大,在施工时应给予重视。

图8是竖向位移的变化情况,从图中可以看出,随着距离的增大,迎桩面及背桩面的水平向位移逐渐变小,而且二者的差别也逐渐减少。由图8(a)及图8(b)中的对比分析可以得到:与不考虑已存在桩的作用情况下相比较,迎桩面的位移场较背桩面的变化大,因此,在计算迎桩面的挤土位移场时更应该考虑施工顺序及遮栏效应的影响。

4 结 论

在静压单桩挤土效应解析解的基础上,根据实际的施工情况,推导出了静压群桩挤土位移场的解析解,并对结果进行了分析。主要结论如下:

(1) 推导出了考虑施工顺序及遮栏效应的群桩迎桩面及背桩面挤土位移场的解析式。

(2) 与忽略施工顺序及遮栏效应的挤土位移相比,考虑施工顺序及遮栏效应的迎桩面挤土位移较大,而背桩面的挤土位移较小。

(3) 随着桩数的增多,迎桩面的挤土效应将会增强,而背桩面的挤土效应将会减弱,这与实际的工程情况相符。

(4) 施工中如要减少某一方向的位移量,需要逆着该方向进行沉桩施工,这样能够有效地减弱沉桩产生的挤土效应。

(5) 由于在考虑群桩的施工顺序时,采用了拉格朗日插值函数,并引用了两个参数 β 和 γ 。因此,若忽略群桩的施工顺序影响时,只需 $\beta = \gamma$ 即可由迎桩面或者背桩面的位移场得到忽略施工顺序影响的群桩挤土位移场,这样也就不用区分迎桩面及背桩面的情况。

参考文献:

- [1] HAGERTY D J, PECK R B. Heave and lateral movements due to pile driving[J]. Journal of Soil Mechanical Foundations Division, ASCE, 1971, **97** (SM11): 1513 - 1532.
- [2] POULOS H G. Pile behavior—theory and application[J]. Geotechnique, 1989, **39**: 365 - 415.
- [3] HUANG Jin-hung, NENG Liang, CHEN Cheng-hsing. Ground response during pile driving[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, **127**(11): 939 - 949.
- [4] 龚晓南, 李向红. 静力压桩挤土效应中的若干力学问题[J]. 工程力学, 2000, **17**(4): 7 - 12. (GONG Xiao-nan, LI Xiang-hong. Several mechanical problems in compacting effects of static piling in soft clay ground[J]. Engineering Mechanics, 2000, **17**(4): 7 - 11. (in Chinese))
- [5] CAO L F, THE C I, CHANG M F. Undrained cavity expansion in modified Cam clay I: Theoretical analysis[J]. Geotechnique, 2001, **51**(4): 323 - 334.
- [6] 李月健. 土体内球形孔扩张及挤土桩沉桩机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2001. (LI Yue-jiang. A study on spherical cavity expansion and static piling in soils[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001. (in Chinese))
- [7] 罗战友, 夏建中, 龚晓南. 不同拉压模量及软化特性材料的球形孔扩张问题的统一解[J]. 工程力学, 2006, **23**(4): 22 - 27. (LUO Zhan-you, XIA Jian-zhong, GONG Xiao-nan. Unified solution of expansion of spherical cavity of strain-softening materials with different elastic moduli in tensile and compression[J]. Engineering Mechanics, 2006, **23**(4): 22 - 27. (in Chinese))
- [8] BALIGH M M. Strain path method[J]. J Geotech Eng, ASCE, 1985, **111**: 1108 - 1136.
- [9] SAGASETA C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss[J]. Geotechnique, 1987, **37**(3): 301 - 320.
- [10] CHOW Y K, THE C I. A theoretical study of pile heave[J]. Geotechnique, 1990, **40**: 1 - 14.
- [11] MABSOUT M E, TEESE L C, TASSOULAS J L. Study of pile driving by finite-element method[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1995, **121**: 535 - 543.
- [12] 施建勇, 陈文, 彭劼. 沉桩挤土效应分析[J]. 河海大学学报, 2003, **31**(4): 451 - 418. (SHI Jian-yong, CHEN Wen, PENG Jie. Pile-sinking induced soil squeezing effect[J]. Journal of Hohai University, 2003, **31**(4): 451 - 418. (in Chinese))
- [13] 罗战友, 王伟堂, 刘薇. 桩-土界面摩擦对静压桩挤土效应的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(18): 3299 - 3304. (LUO Zhan-you, WANG Wei-tang, LIU Wei. Influence analysis of friction between pile and soil in compacting effects of jacked pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(18): 3299 - 3304. (in Chinese))
- [14] 王伟堂, 裘华君, 詹红琴. 压桩挤土位移的预估与防治的研究[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(3): 378 - 379. (WANG Wei-tang, QIU Hua-jun, ZHAN Hong-qin. Study on prediction and prevention for soil displacement caused by the statically pressed pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(3): 378 - 379. (in Chinese))
- [15] 周健, 徐建平, 许朝阳. 群桩挤土效应的数值模拟[J]. 同济大学学报, 2000, **28**(6): 721 - 725. (ZHOU Jian, XU Jian-ping, XU Zhao-yang. Numerical simulation of pushing against soil of driven group piles[J]. Journal of Tongji University, 2000, **28**(6): 721 - 725. (in Chinese))
- [16] 罗战友. 静压桩挤土效应及施工措施研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004. (LUO Zhan-you. Study on compacting effects and construction measures of jacked pile[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese)).
- [17] SAGASETA C, WHITTLE A J. Prediction of ground movements due to pile driving in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, **127**(1): 55 - 65.