

基坑开挖引起的邻近建筑物桩基变形受力响应

张陈蓉^{1, 2}, 黄茂松^{1, 2}

(1. 同济大学地下建筑与工程系 上海 200092; 2. 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 基坑开挖时处于土体影响区域的邻近建筑物的桩基会受到影晌, 而产生附加的弯矩和变形。采用两阶段分析方法, 将开挖产生的自由土体位移作为输入条件, 基于 Winkler 地基模型以及桩土变形协调条件, 建立单桩的水平位移控制方程。基于简化 Mindlin 方程考虑被动群桩的桩土相互影响得到群桩的遮拦效应, 从而建立群桩控制微分方程, 并采用有限差分法进行求解。通过与离心机试验结果的对比, 验证了本文方法的合理性。

关键词: 基坑开挖; 被动桩; Mindlin 方程; Winkler 地基

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)S0-0565-06

作者简介: 张陈蓉 (1982-), 女, 讲师, 从事基坑对环境影响研究。E-mail: zcrong33@tongji.edu.cn。

Behavior of pile foundation due to excavation-induced lateral soil movement

ZHANG Chen-rong^{1,2}, HUANG Mao-song^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Shanghai 200092, China)

Abstract: The excavation-induced lateral soil movement may adversely affect any nearby pile foundation systems. A two-stage method is used to determine the additional bending moments and deflections on pile foundations. Firstly, the free field soil movement is used as the input to acquire the lateral differential governing equation of a single pile based on the Winkler subgrade model and deformation compatibility condition. Then, the shielding effect due to pile-soil-pile interaction is considered by the simplified Mindlin's equation. The pile group governing equations are obtained at last and are solved by the finite difference method. Comparisons are made between the observed behaviors of centrifugal model tests and those computed by the proposed method.

Key words: excavation; passive pile; Mindlin equation; Winkler subgrade model

0 引言

基坑开挖时由于地应力释放引起的土体自由位移场会引起处于影响范围内的桩基础产生附加弯矩和变形, 积累到一定程度, 桩基会因变形过大或承载不够而失效。在建筑物桩基础的设计阶段, 一般不会考虑此种工况, 如何评估基坑开挖对邻近桩基础的影响成为一个重要的问题。

基坑开挖对桩的影响隶属于被动桩课题, 分析方法包括经验公式法、土压力法、位移法以及整体法^[1]。本文介绍的两阶段分析方法隶属于位移法, 分为两个阶段: 第一阶段求解基坑开挖引起的自由土体位移场, 第二阶段将该位移场施加于桩分析桩的反应。两阶段法有两类: 一类是基于弹性地基模型的边界单元法^[2-3], 另一类是基于非线性地基模型的地基梁数值方法^[4-5]。从工程应用角度, 边界单元法或其它弹性半空间解的积分方程法计算过于复杂, 相关土体参数难以确定。另外现有的两阶段分析方法一般更关注单桩研究, 对

被动群桩的桩-土-桩的相互作用方面涉及较少。

本文采用两阶段法分析基坑开挖对邻近桩基的影响。基于 Winkler 地基模型和桩土变形协调条件, 建立单桩的水平位移控制微分方程。然后考虑桩基对土体的约束, 通过平面 Mindlin 解得到土体水平位移传递系数, 以计算群桩的遮拦效应。最后基于叠加原理计算群桩中各个单桩的反应。

1 分析方法

对于建筑物密集区域的基坑开挖施工, 需要对由于地应力释放引起的自由土体位移进行严格监控, 以保证在影响区域内建筑物桩基的安全性。两阶段法的意义也在于此, 将基坑开挖过程和对桩基的评估影响分为两个阶段, 并不关注基坑开挖的实际施工过程, 而只是对开挖引起的土体位移场进行控制。

给定位移法能否做出足够精度的预测, 很重要的一点取决于所输入的自由土体位移^[1]。建议采用实测位移或通过有限元计算得到的侧向自由土体位移。

(1) 基坑开挖对单桩的影响

计算简图见图 1, 令基坑开挖引起的水平向自由土体位移为 $s_y(z)$, 将桩周土体作用离散为沿着桩身独立的弹簧, 由变形协调条件得到单桩控制微分方程为

$$E_p I_p \frac{d^4 y_p}{dz^4} + k_y (y_p - s_y(z)) = 0 \quad (1)$$

式中 E_p 为桩身材料的弹性模量, I_p 为桩的截面惯性矩; k_y 为桩侧地基反力模量 (N/m^2), 定义为桩身某点处单位长度土体抗力 pd (p 的单位为 N/m^2) 与局部相对桩身位移 y 的比值, Vesic^[6] 得到 k_y 与土体弹性模量 E_s 、泊松比 ν_s 的关系 $k_y = \frac{0.65 E_s}{1 - \nu_s^2} \left[\frac{E_s d^4}{(1 - \nu_s^2) E_p I_p} \right]^{\frac{1}{12}}$ 。令 $\lambda = \sqrt[4]{\frac{k_y}{4 E_p I_p}}$, 则方程 (1) 变换为

$$\frac{d^4 y_p(z)}{dz^4} + 4\lambda^4 [y_p(z) - s_y(z)] = 0 \quad (2)$$

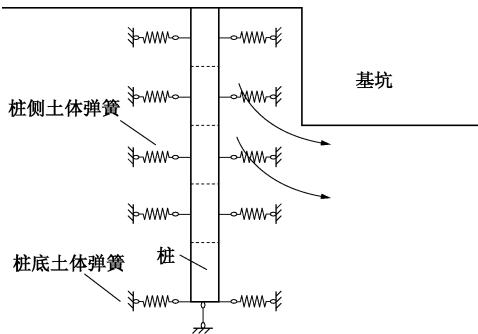


图 1 计算简图

Fig. 1 Schematic of simplified calculation

将桩沿着桩长进行 n 等分, 每等分的长度为 h , 桩顶和桩底各增加 2 个虚拟等分点, 编号为 $-2, -1, n+1, n+2$, 得到微分方程 (2) 的标准差分表达式为

$$y_{p,i-2} - 4y_{p,i-1} + (6 + 4\lambda_i^4 h^4)y_{p,i} - 4y_{p,i+1} + y_{p,i+2} = 4\lambda_i^4 h^4 s_{y,i} \quad (3)$$

结合单桩两端边界条件的 4 个方程得到基坑开挖引起的水平向土体位移对单桩影响的微分方程:

$$[K_y] \{y_p\} = [K_{sy}] \{s_y\} + \{F_y\} \quad (4)$$

式中, $[K_y]$, $\{F_y\}$ 分别为单桩水平向刚度矩阵和水平向荷载列向量, $\{y_p\}$ 为基坑开挖下单桩水平向位移向量, $\{s_y\}$ 为基坑开挖引起的自由土体位移场在单桩桩位处引起的水平向自由土体位移向量, $[K_{sy}]$ 为土体水平向刚度矩阵。

基坑开挖条件下邻近单桩水平向位移为

$$\{y_p\} = [K_y]^{-1} ([K_{sy}] \{s_y\} + \{F_y\}) \quad (5)$$

随着荷载增大, 桩侧土体水平抗力会持续增加, 当节点 i 桩侧土体达到极限抗力 p_f 时, 自由土体位移达到极限值 $s_{yc,i}$, 单桩的水平向位移为临界位移 $y_{pf,i}$, 微分方程表示为:

$$E_p I_p \frac{d^4 y_p(z)}{dz^4} + k_y (y_{pf}(z) - s_{yc}(z)) = 0, \quad (6)$$

其差分格式为

$$y_{p,i-2} - 4y_{p,i-1} + 6y_{p,i} - 4y_{p,i+1} + y_{p,i+2} = -4\lambda^4 h^4 (y_{pf,i} - s_{yc,i}) \quad (7)$$

桩侧极限水平土抗力分别为黏土^[7], $p_f = 2(1+z/d)C_u \leq 9C_u$; 砂土^[8], $p_f = \alpha K_p \sigma'_v$ 。式中, C_u 为土体的不排水剪切强度, α 为经验系数, 一般取 3~9, K_p 为朗肯被动土压力系数, σ'_v 为上覆土体有效应力。

在弹性差分格式的基础上, 对相应的桩身水平向刚度矩阵进行修正, 以考虑土体非线性的影响。

(2) 两根被动桩的相互影响

由于土体连续体的本质, 单桩的桩土相互作用力在土体内会产生附加位移场, 而处于该附加位移场影响范围内的邻近桩受其影响, 会产生相应的变形和内力, 称之为土体的遮拦效应。作为一种应力迁移现象, 被动桩的遮拦效应减少了群桩中的单桩变形及受力。借助平面 Mindlin 解考虑桩土桩的相互作用, 首先分析两桩, 其次借助叠加原理扩展到整个桩群。见图 2, 图 3。两桩距离为 s , 桩 1 处因基坑开挖引起的水平向自由土体位移为 s_{y1} , 由单桩分析可以求得相应桩 1 的位移为 y_{p1} , 从而水平向桩土相互作用力为

$$p(z) = k_y(z)(y_{p1} - s_{y1}) = k_y(z)\Delta y_{p1}, \quad (8)$$

式中, Δy_{p1} 为基坑开挖条件下的桩土相对遮拦位移。

该桩土作用力引起的桩 2 处土体位移表示为

$$s_{y,21}(z, s) = \zeta(s) \frac{p(z)}{k_z(z)} = \zeta(s) \Delta y_{p1} \quad (9)$$

由 Mindlin 基本解可以得到桩 1 的 j 节点对桩 2 的 i 节点的土体位移传递系数为

$$\begin{aligned} \zeta_{21,ij} &= \frac{s_{y,21ij}}{\Delta y_{p1,j}} \\ &= \frac{k_{yj} h}{16\pi G_{sij} (1 - \nu_s)} \left[\frac{3 - 4\nu_s}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{x^2}{R_1^3} + \frac{(3 - 4\nu_s)x^2}{R_2^3} + \right. \\ &\quad \left. \frac{2z_i z_j}{R_2^3} \left(1 - \frac{3x^2}{R_2^2} \right) + \frac{4(1 - \nu_s)(1 - 2\nu_s)}{R_2 + z_i + z_j} \left(1 - \frac{x^2}{R_2(R_2 + z_i + z_j)} \right) \right]. \end{aligned}$$

式中 $R_1 = \sqrt{s^2 + (z_i - z_j)^2}$, $R_2 = \sqrt{s^2 + (z_i + z_j)^2}$,

$$G_{sij} = \frac{G_{si} + G_{sj}}{2}, G_{si}, G_{sj} \text{ 为相应位置处土体剪切模量}.$$

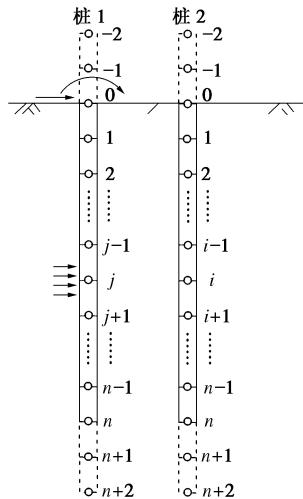


图 2 基坑附近两根桩计算模型

Fig. 2 Computational model for two piles

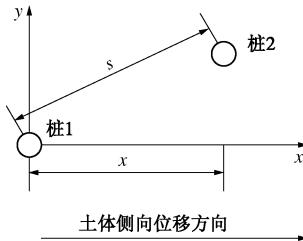


图 3 桩桩相互作用

Fig. 3 Interaction between two piles

基坑开挖条件下, 作为被动桩的桩 2 受桩 1 的影响而产生的附加位移和内力, 其控制微分方程为:

$$\frac{d^4 y_{p21}(z)}{dz^4} + 4\lambda^4 [y_{p21}(z) - \zeta(s) \cdot \Delta y_{p1}] = 0, \quad (10)$$

式中, y_{p21} 为开挖中桩 1 的影响桩 2 产生的附加位移。

该微分方程的基本差分格式为

$$y_{p21,i-2} - 4y_{p21,i-1} + (6 + 4\lambda_i^4 h^4)y_{p21,i} - 4y_{p21,i+1} + y_{p21,i+2} = 4\lambda_i^4 h^4 \sum_{j=0}^n \zeta_{21,ij} \Delta y_{p1,j}. \quad (11)$$

由边界条件得到其整体矩阵方程为

$$[K_y] \{y_{p21}\} = [K_{sy}] [\zeta_{21}] \{\Delta y_{p1}\}, \quad (12)$$

式中, $\{y_{p21}\}$ 为基坑开挖条件下由于桩 1 的影响对桩 2 产生的附加位移列向量。 $[\zeta_{21}]$ 为桩 1 对桩 2 的水平向影响系数矩阵。

由式(12)得到由于桩 1 影响桩 2 的水平向附加位移为

$$\{y_{p21}\} = [K_y]^{-1} [K_{sy}] [\zeta_{21}] \{\Delta y_{p1}\}. \quad (13)$$

(3) 基坑开挖条件下的被动群桩计算

基坑开挖附近群桩中的单桩 i 变形两部分组成:

- ①基坑开挖引起的单桩位移 y_{pii} ; ②桩桩相互作用引起的附加桩基位移 y_{pij} 。群桩中第 i 根桩的水平位移为两者相加。

2 算例验证

Leung 等^[9-10], Ong 等^[11]对基坑开挖附近的砂土、软黏土中的单桩、群桩进行了一系列离心模型试验研究。本文选取了文献中测量了桩位处自由土体位移场的试验进行分析。模型桩桩长 12.5 m, 截面抗弯刚度 $220 \times 10^3 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$ 。

2.1 单桩分析

(1) 砂土中

围护墙体嵌入土体深度 8 m, 开挖深度 4.5 m。砂土采用 Toyoura 标准砂, 砂土重度为 $15.78 \text{ kN}/\text{m}^3$, 土体弹性模量沿深度线性分布, $E_s = 6z$ 。桩侧极限土压力 $p_y = 3K_p \sigma'_v$ 。各桩位处的自由土体位移场见图 4。

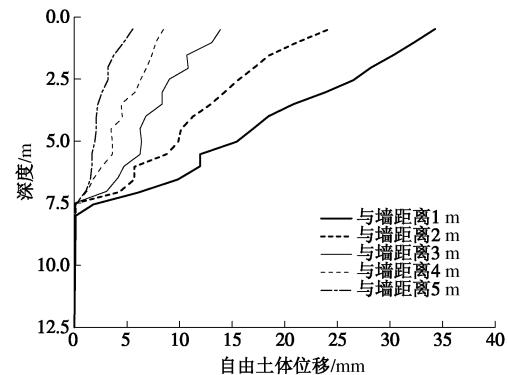
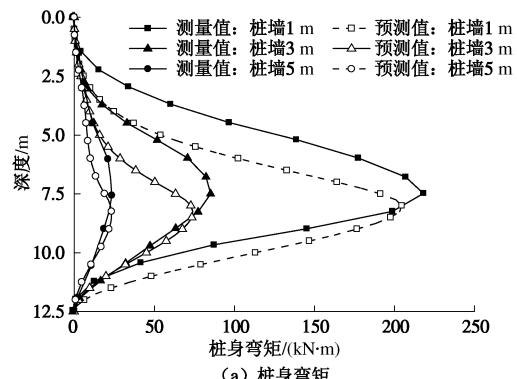


图 4 砂土围护墙体稳定情况下自由土体位移场

Fig. 4 Free soil movement

图 5 给出了桩顶自由离围护墙体 1, 3, 5 m 处的单桩沿桩身的弯矩以及水平位移分布图。图 6 给出了桩顶为位移转角全约束以及位移约束转角部分约束下离围护墙体 3 m 处的单桩沿桩身的水平位移及弯矩分布图。由图 5 看到, 离围护墙体越近自由土体位移越大, 本文得到的桩基变形与实测值误差也越大, 另外沿桩身最大弯矩的位置与实测值相比也越来越低。计算得到桩顶自由时仅桩顶区域很浅部分土体发生屈服。而可能实际情况下桩顶附近土体屈服范围比本文计算中的范围大, 另外本文采用的砂土桩侧极限土压力依然存在偏大。图 6 中桩顶位移边界条件约束, 浅层土体屈服范围减少时, 最大弯矩的位移和大小预测结果与实测值相比更为接近。



(a) 桩身弯矩

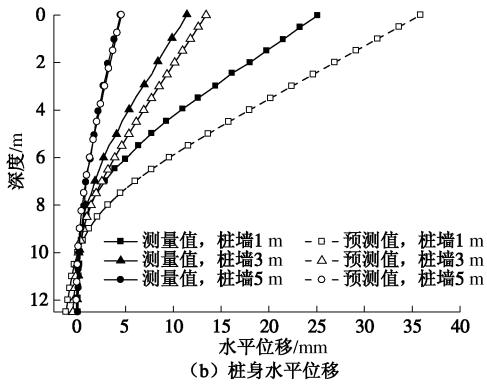


图 5 桩顶边界条件自由时桩基受力变形反应

Fig. 5 Response of pile

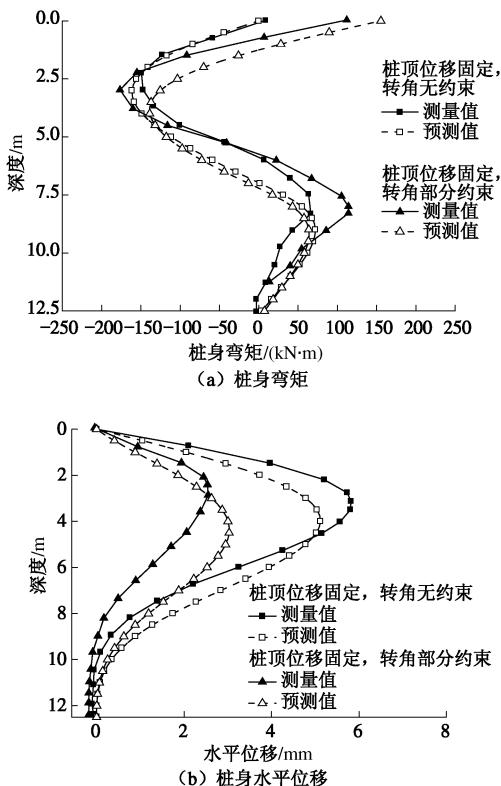


图 6 桩顶边界条件约束时桩基受力变形反应

Fig. 6 Response of pile

(2) 黏土中

围护墙体嵌入土体深度 8 m, 基坑开挖深度 1.2 m, 采用标准 Kaolin 黏土, 自由土体位移见图 7。试验前后分别测量了桩墙距离 1.5 m 和 3 m 处土样不排水抗剪强度, 开挖前土样 0~2.5 m 深度处为超固结黏土, 2.5 m 深度以下为正常固结黏土, 开挖后桩墙距离 1.5 m 处沿土体深度 0~2.5 m 范围内土体不排水抗剪强度显著降低, 桩墙距离 3 m 处土体影响不大。这是由于开挖引起的土体应力释放导致邻近扰动区域的土体有效应力降低从而土体强度降低。文献中认为土体应变大于 2%, 土体强度的损失会显著降低桩土极限土压力, 本试验中基坑开挖周围土体应变大于 2% 的区域在墙后 0~1.5 m 范围内, 在实际计算中, 根据

实测得到的土体开挖后不排水抗剪强度来确定桩侧极限土压力。图 8 为桩墙距离 1, 3, 5, 7 m 的单桩沿桩身的弯矩和水平位移分布图, 计算结果与实测结果比较吻合。

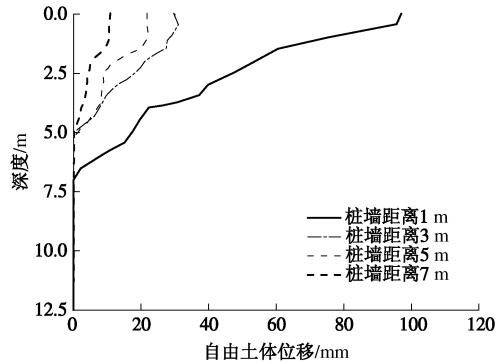


图 7 黏土中基坑开挖引起的桩位处自由土体位移场

Fig. 7 Free soil movement

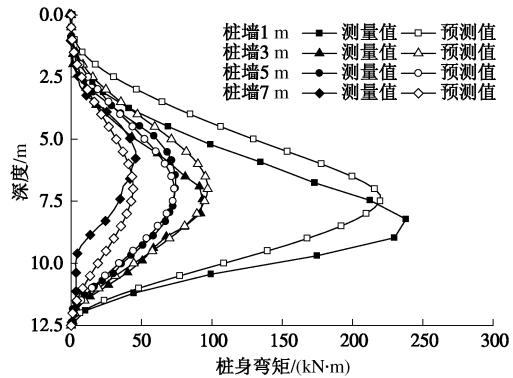


图 8 桩顶边界条件自由黏土中桩基弯矩分布

Fig. 8 Response of pile

2.2 群桩分析

围护墙体嵌入土体深度 8 m, 开挖深度 4.5 m, 围护墙体稳定, 采用 Toyoura 标准砂。自由土体位移场见图 4。共对比了 9 组试验, 具体的群桩布置及试验编号见表 1。桩桩相互作用在基坑开挖下对群桩反应是有益的, 基坑开挖下单桩桩土相互作用引起的附加位移场阻碍了群桩中其余桩的进一步变形和受力。

图 9 两桩与土体位移方向一致, 桩桩相互影响很小, 实测得到的各桩弯矩分布基本一致, 承台对桩顶不起约束作用。图 10 为桩顶自由桩墙距离为 3 m 的桩弯矩分布图, 所不同的是 G3 中该桩为后桩 (与围护墙相比) 有前桩阻挡, G5 中该桩为前桩, 有后桩存在, 桩桩相互的影响 G3 比 G5 大, 因为 G3 中前桩的桩土相互作用大对后桩影响较大所致。G3 桩的弯矩分布整体比 G5 桩的弯矩小。桩桩相互作用的合理性得到验证。图 11 显示了 2×2 群桩自由桩顶的前桩和后桩的弯矩分布图, 前桩所受到的桩桩相互作用影响要小于后桩。图 12~图 15 给出了有承台约束的群桩中

表 1 群桩平面布置图

Table 1 Plan of pile group

群桩布置	试验编号	距离/m		桩顶边界条件
		a	b	
围护墙	G1	3	2	自由桩顶
	G2	3	2	承台约束
围护墙	G3	1	2	自由桩顶
	G5	3	2	自由桩顶
围护墙	G6	1	2	承台约束
	G7	3	2	承台约束
围护墙	G9	3	2	自由桩顶
	G10	1	2	承台约束
围护墙	G11	3	2	承台约束

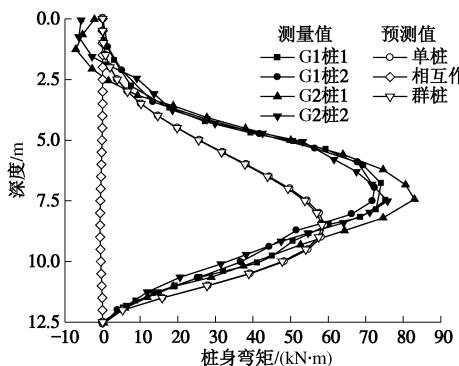


图 9 试验 G1 和 G2 的桩身弯矩分布

Fig. 9 Bending moment of pile

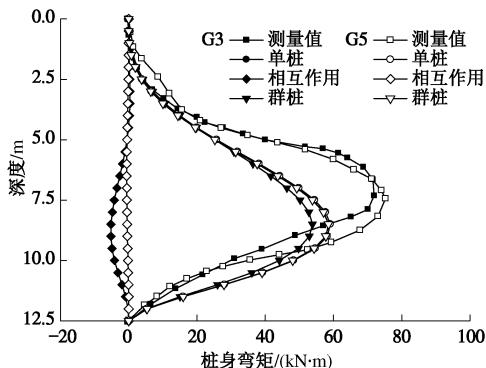


图 10 试验 G3 和 G5 的桩身弯矩分布

Fig. 10 Bending moment of pile

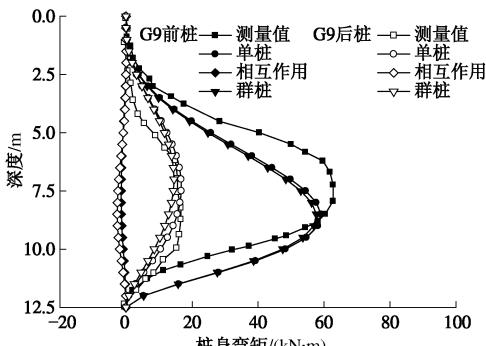


图 11 试验 G9 的桩身弯矩分布

Fig. 11 Bending moment of pile

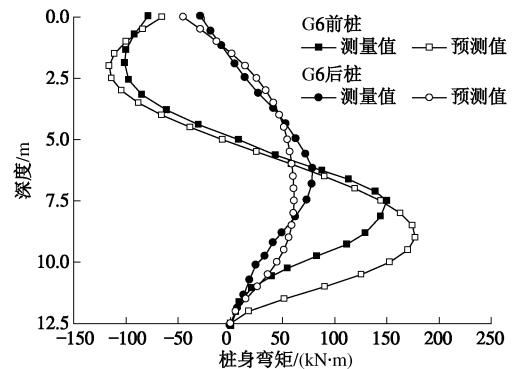


图 12 试验 G6 的桩身弯矩分布

Fig. 12 Bending moment of pile

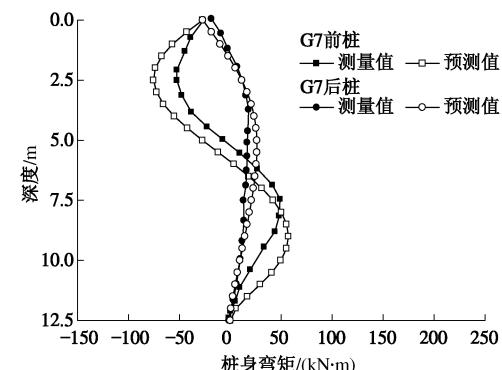


图 13 试验 G7 的桩身弯矩分布

Fig. 13 Bending moment of pile

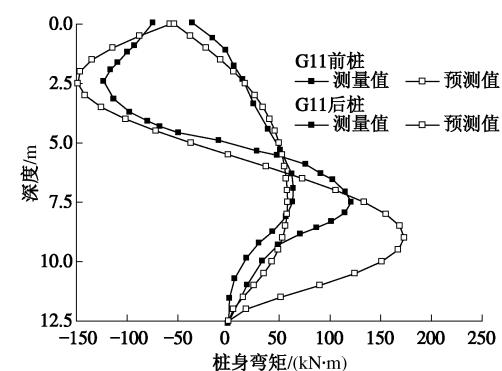


图 14 试验 G10 的桩身弯矩分布

Fig. 14 Bending moment of pile

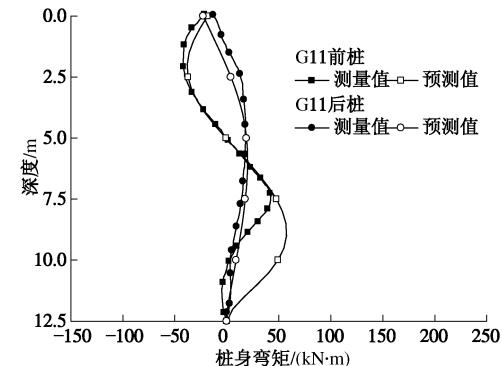


图 15 试验 G11 的桩身弯矩分布

Fig. 15 Bending moment of pile

各单桩的弯矩分布与实测值的对比, 桩墙距离越近, 自由土体位移越大, 得到的结果与实测值相比误差会增大。将 G6 与 G3, G7 与 G5 的结果进行对比, 可以发现承台约束了桩顶的水平位移, 在群桩中进行了应力重分配, 水平位移和桩身的弯矩分布均发生了变化, 前桩受力减小, 后桩受力增加, 前后桩的应力差值变小。

3 结语

本文基于 Winkler 地基模型, 提出了计算基坑开挖附近建筑物桩基受力变形的两阶段分析方法。第一阶段自由土体位移的获得通过实测数据或者有限元程序得到。第二阶段将自由土体位移作为输入条件, 求解被动桩的弯矩和变形, 基于 Mindlin 解考虑桩桩相互作用, 对群桩进行分析。将本文方法的计算结果与离心试验结果进行对比, 验证了本文方法的合理性。

参考文献:

- [1] STEWART D P, JEWELL R J, RANDOLPH M F. Design of piled bridge abutments on soft clay for loading from lateral soil movements[J]. *Géotechnique*, 1994, **2**: 277 - 296.
- [2] POULOSS H G, CHEN L T. Pile response due to excavation-induced lateral soil movement[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 1997, **123**(2): 94 - 99.
- [3] CHEN L T, POULOSS H G. Piles subjected to lateral soil movements[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 1997, **123**(9): 802 - 811.
- [4] GOH A T, TEH C I, WONG K S. Analysis of piles subjected to embankment induced lateral soil movements[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 1997, **123**(9): 792 - 801.
- [5] 莲茂田, 韩丽娟, 年廷凯, 等. 被动桩—土相互作用的简化分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, **24**(4): 370 - 375. (LUAN Mao-tian, HAN Li-juna, NIAN Ting-kai, et al. A simplified analysis of interaction of soils and pile in passive state[J]. *Journal of disaster prevention and mitigation engineering*, 2004, **24**(4): 370 - 375. (in Chinese))
- [6] VESIC A B. Bending of beam resting on isotropic elastic soild[J]. *Journal of The Engineering Mechanics Division*. 1961, **87**(2): 35 - 53.
- [7] Poulos H G, Davis E H. *Pile Foundation Analysis and Design*[M]. John Wiley & Sons, Inc. 1980.
- [8] BROMS B B. Lateral resistance of pile in cohesive soils[J]. *Journal of Soil Mechnaics and Foundation Division*, ASCE, 1964, **90**(2): 27 - 63.
- [9] LEUNG C F, CHOW Y K, SHEN R F. Behavior of pile subject to excavation-induced soil movement[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2000, **126**(11): 947 - 954.
- [10] LEUNG C F, LIM J K, SHEN R F, et al. Behavior of pile groups subjected to excavation-induced soil movement[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2003, **129**(1): 58 - 65.
- [11] ONG D E L, LEUNG C F, CHOW Y K. Pile behavior due to excavation-induced soil movement in clay. I : stable wall[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2006, **132**(1): 36 - 44.

(本文责编 孙振远)