

DOI: 10.11779/CJGE2014S2054

基于小应变特性的基坑开挖对邻近桩基影响分析方法

木林隆^{1, 2}, 黄茂松^{1, 2}

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

摘要: 越来越多的基坑紧邻既有建筑开挖, 需要评估基坑开挖对邻近建筑的影响, 因此基于变形控制的基坑设计已经成了必然要求。目前仍缺乏有效简单的方法去估算基坑开挖对邻近建筑的影响, 特别是采用桩基础的建筑。而且当进行变形控制设计时, 要求基坑变形控制在较小的范围内, 此时基坑周边土体处在小应变范围内, 要建立基坑开挖对周边建筑影响的分析方法必须考虑土体小应变特性。首先采用基于小应变特性计算基坑开挖引起的深层土体位移的经验计算公式计算基坑开挖引起的自由场土体三维位移, 然后基于差分方法提出了基坑开挖对邻近桩基竖向和水平向影响的两阶段分析方法。通过与有限元结果的对比, 验证了本方法的正确性。并分析了基坑开挖深度和桩基离基坑距离这两个因素对邻近桩基的响应的影响。研究表明开挖深度越小对桩基影响越小, 基于桩基内力控制时, 基坑开挖深度应避开桩底位置, 且桩基在距离基坑 0.5 倍开挖深度距离时最为危险。

关键词: 小应变; 基坑开挖; 桩基础; 简化方法

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)S2-0304-07

作者简介: 木林隆(1984-), 男, 博士, 讲师, 主要从事桩基与地下工程开挖方面的研究工作。E-mail: mulinlong@tongji.edu.cn。

Small-strain behavior-based method for effect of excavations on adjacent pile foundations

MU Lin-long^{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, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Estimating the damage potential on buildings induced by excavations is required because more and more foundation pits are excavated near the existing buildings. Thus, displacement control becomes a critical index of excavation design. Unfortunately, there is nearly no simplified method that can estimate the influence of excavation on the existing buildings and easy to be used. Small-strain behavior of soils should be considered when establishing method to estimate influence of excavation on the adjacent buildings for the strain of the soils is very small under displacement control design. In order to fit the requirement for the simplified method to estimate the influence on excavation on the existing buildings supported by pile foundation, a two-stage method is proposed herein to estimate the responses of piles adjacent to the excavation. Firstly, the empirical method based on small-strain behavior of soils proposed by Mu and Huang is employed to calculate the three-dimensional soil displacement induced by excavation. Then, a two-stage method is proposed to calculate the vertical and horizontal pile responses in layered soils. The method is verified through comparison with the results from FEM. And the influences of excavation depth and the distance between pile and retaining on pile responses are analyzed. The study shows that the additional force and deformation of piles increase with the increase of excavation depth, and the excavation base should avoid the base of the pile. It is most dangerous when the pile is 0.5H from the retaining wall.

Key words: small strain; excavation; pile foundation; simplified method

0 引言

随着城市建设的发展, 特别是在大城市, 城市空间极度匮乏, 中国进入了地下空间大开发的时代。然而, 由于城市建筑密集, 大量的地铁车站或者新建摩天大楼需要紧邻原有建筑建设。地铁车站或大楼地下

室的基坑开挖势必会对邻近既有建筑造成影响, 甚至造成邻近建筑的破坏, 如何评估基坑开挖对邻近建筑

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208378); 国家科技支撑计划(2013CB036304)

收稿日期: 2014-07-28

物的影响成了工程界与学术界普遍关心的一个重要问题。

基于邻近建筑保护要求, 往往要求基坑变形控制在较小的范围内, 基坑周边土体应普遍处于小应变范围内^[1]。自 Burland 提出土体小应变特性对基础工程的影响之后, 国内外学者对土体小应变特性展开了大量研究^[2-5], 也普遍认识到土体小应变特性对基坑变形的影响^[6-8]。因此要准确估计基坑开挖对邻近建筑的影响, 必须考虑土体的小应变特性。

由于基坑变形的复杂性, 以及邻近基坑的建筑物的多样性, 目前评估基坑开挖对邻近建筑物的影响主要采用有限元整体计算的方法^[9-12], 然而考虑土体小应变特性的有限元分析并不普遍^[7-8], 绝大多数有限元分析均未考虑土体小应变特性。由于有限元理论较为复杂, 特别是考虑土体小应变特性以及基坑的三维效应时, 使用的技术要求更高, 因此对于设计施工单位来说使用难度过大, 难以大范围推广。因此, 推进基于环境保护要求的基坑工程设计能力的进步就迫切需要一种简单的方法去估计基坑开挖对邻近建筑物的影响。

由于问题的复杂性与多样性及理论较高, 建立理论方法难度较高, 国内外学者对这一问题进行了大量的试验研究^[13-17], 希望通过研究结果得到可行的经验方法来估算基坑开挖引起的周边建筑变形。根据相邻建筑的基础类型, 基坑开挖对邻近建筑的影响研究主要分为两类: 一类为研究基坑开挖对浅基础建筑的影响; 第二类为研究基坑开挖对桩基础建筑的影响。针对第一类, 目前基坑开挖引起的地表沉降经验方法较多^[18-20], 因此可近似用地表沉降去估计对浅基础建筑的影响, 该方法也常有报道^[21]。而对于第二类问题, 由于缺乏计算基坑开挖引起的地表以下土体位移的有效方法, 因而很少有报道。张爱军等^[22]根据影像源法推导了基坑开挖对邻近桩基影响的两阶段方法, 但是其公式仅限于均质地基且较为复杂, 无法考虑土体的小应变特性, 且其研究仅针对水平向变形无法综合考虑土体竖向变形的影响。

基于以上问题, 本文采用木林隆等^[15]提出的考虑土体小应变特性的基坑开挖引起的深层土体的位移的经验公式, 同时考虑了桩筏基础竖向和水平向的响应, 提出了基坑开挖对邻近桩筏基础影响的两阶段方法, 分析了基坑开挖对邻近桩筏基础的影响。

1 分析方法

1.1 基坑开挖引起的自由场位移计算

考虑到位移控制设计时土体的小应变特性, 木林

隆等^[23]基于反分析技术结合有限元计算结果提出了考虑土体小应变特性影响的基坑开挖引起周边土体三维位移场的简化计算方法。本文采用木林隆等^[23]提出的计算方法来计算基坑开挖引起的自由场位移。其位移模式如图 1 所示, 计算公式如下:

$$u(x, y, z) = u_{\max} \cdot a_x \cdot e^{-\left(\frac{z-H_{\max}}{H+D}\right)^2} \cdot e^{-\pi\left(\frac{y}{R}\right)^2} \cdot e^{-\left(\frac{x-b_x}{c_x}\right)^2}, \quad (1)$$

$$w(x, y, z) = \begin{cases} 0.8u_{\max} \cdot a_z \cdot \left(\frac{x}{H} + 0.5\right) \cdot e^{-\pi\left(\frac{y}{R}\right)^2} \cdot e^{-\left(\frac{x-b_x}{c_x}\right)^2} & (0 \leq x \leq 0.5H) \\ 0.8u_{\max} \cdot a_z \cdot \left(-0.6\frac{x}{H} + 1.3\right) \cdot e^{-\pi\left(\frac{y}{R}\right)^2} \cdot e^{-\left(\frac{x-b_x}{c_x}\right)^2} & (0.5H \leq x \leq 2H) \\ 0.8u_{\max} \cdot a_z \cdot \left(-0.05\frac{x}{H} + 0.2\right) \cdot e^{-\pi\left(\frac{y}{R}\right)^2} \cdot e^{-\left(\frac{x-b_x}{c_x}\right)^2} & (2H \leq x \leq 4H) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $u_{\max}$ 为围护墙最大水平位移值, $a_x = 1 + e^{-10.47\frac{z}{H} + 0.76}$, $b_x = e^{-6.45\frac{z}{H} + 2.76}$, $c_x = e^{-2.86\frac{z}{H} + 2.64}$, $a_z = 1 + e^{-1.56\frac{x}{H} - 1.68}$, $b_z = e^{-2.56\frac{x}{H} + 1.02}$, $c_z = e^{-2.09\frac{x}{H} + 1.75}$, $R = \frac{L}{2} \left[0.069 \ln\left(\frac{H}{L}\right) + 1.03 \right]$, L 为基坑沿围护墙方向开挖长度, H 为基坑开挖深度。

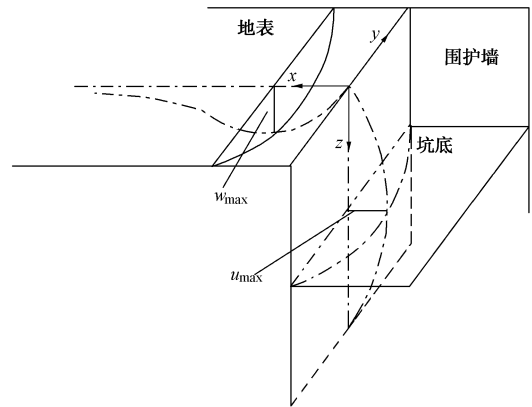


图 1 基坑围护墙及地表变形示意图

Fig. 1 Schematic diagram of deformations of wall and soils induced by excavation

1.2 基坑开挖对单桩影响分析方法

根据图 1 所示的差分形式, 采用弹性理论法分别建立竖向和水平向荷载作用下桩身的平衡方程 (图 2):

$$\left(I - \frac{d^2 E_p}{4\delta^2 E_s} I_p I_s \right) p = Y, \quad (3)$$

$$\left(I + \frac{E_p I_p}{\delta^2} I_{pL} I_{sL} \right) q = Y_L. \quad (4)$$

式中 E_p 为桩身弹性模量; I_p 为桩截面惯性矩; d 为桩直径; $\mathbf{p}$ 和 $\mathbf{q}$ 分别为桩周竖向和水平向阻力列向量; $\mathbf{Y}$ 为竖向外荷载列向量, $\mathbf{Y} = \left\{ \frac{Q}{\pi d_0 \delta} \quad 0 \quad \cdots \quad 0 \quad 0 \right\}^T$; $\mathbf{Y}_L$ 为水平外荷载列向量, $\mathbf{Y}_L = \left\{ \frac{2\delta^3 T + 2\delta^2 M}{E_p I_p} - \frac{\delta^2 M}{E_p I_p} \quad 0 \quad \cdots \quad 0 \right\}^T$, 其中 $\delta = L/n$, L 为桩长, n 为桩身分段数; $\mathbf{I}_p$ 和 $\mathbf{I}_{pL}$ 为竖向和水平向桩身系数矩阵; $\mathbf{I}_s$ 和 $\mathbf{I}_{sL}$ 分别为桩周土的竖向和水平向位移柔度矩阵^[24]。

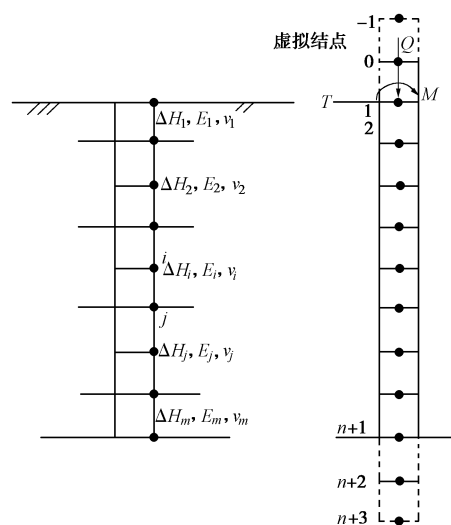


图 2 单桩桩身平衡方程计算模型

Fig. 2 Computational model of pile equilibrium equations

假设隧道开挖引起的桩轴线处土体自由场竖向和水平向位移向量分别为 $\mathbf{w}_s$ 和 $\mathbf{u}_s$, 且桩身与桩侧土不产

生分离和相对滑移, 即桩土截面保持位移协调, 则考虑土体位移对桩的作用后, 桩身平衡方程可写为

$$\left(\mathbf{I} - \frac{d^2 E_p}{4\delta^2 E_s} \mathbf{I}_p \mathbf{I}_s \right) \mathbf{p} = \mathbf{Y} + \frac{d E_p}{4\delta^2} \mathbf{I}_p \mathbf{w}_s, \quad (5)$$

$$\left(\mathbf{I} + \frac{E_p I_p}{\delta^2} \mathbf{I}_{pL} \mathbf{I}_{sL} \right) \mathbf{q} = \mathbf{Y}_L - \frac{E_p I_p}{\delta^4} \mathbf{I}_{pL} \mathbf{u}_s. \quad (6)$$

由式 (5)、(6) 求出桩侧阻力后, 可由土体位移平衡方程 (7)、(8) 求出桩身位移:

$$\mathbf{w}_p = \frac{d}{E_s} \mathbf{I}_s \mathbf{p}, \quad (7)$$

$$\mathbf{u}_p = \mathbf{I}_{sL} \mathbf{q}, \quad (8)$$

式中, $\mathbf{w}_p$ 和 $\mathbf{u}_p$ 分别为桩身竖向和水平向位移列向量。

2 方法验证

采用本文方法以及三维有限元方法对如图 3 所示临近基坑的单桩进行分析。基坑开挖深度为 15 m, 围护结构由 1 m 厚的搅拌桩墙和 5 道混凝土楼板支撑组成。有限元分析时土体参数可见表 1。简化方法分析时, 各土层弹性模量首先根据式 (9) 计算每层土中心点处的 E_{s0} , 再根据芝加哥地区经验取 6 倍的 E_{s0} 为弹性模量。取桩与围护墙的距离分别为 3 m 和 5.4 m 进行计算。

$$E_{s0} = E_{s0}^{\text{ref}} \left(\frac{c \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{\text{ref}} \sin \varphi} \right)^m. \quad (9)$$

图 4 为桩位处自由场土体位移简化方法计算结果和有限元计算结果的对比如图。从图上可见, 在两个桩位处水平位移简化方法计算结果和有限元计算结果基本

表 1 有限元计算参数

Table 1 Soil parameters for FEM analysis

土层	砂土回填层	黏土硬壳层	Blodgett 黏土	Deerfield 黏土	Park Ridge 黏土	Tinley 黏土	Hardpan 黏土
排水条件	排水	不排水	不排水	不排水	不排水	不排水	不排水
$E_{s0}^{\text{ref}}/\text{kPa}$	2299	618	746	596	995	3851	7663
$E_{\text{sed}}^{\text{ref}}/\text{kPa}$	1609	432	522	417	697	2696	5364
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{kPa}$	6897	1853	2238	1788	2985	11552	22989
OCR	1.5	1.5	1.5	1.37	1.7	1.5	1.5
C^{ref}	19.16	0.92	0.00	0.00	0.00	0.00	2.29
$\phi/(\circ)$	35	32.8	29	30.6	30.6	45	45
$\psi/(\circ)$	5	0	0	0	0	0	3
$v_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	0.33	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1
p^{ref}	5	5	5	5	5	5	5
m	0.5	0.85	0.8	0.85	0.85	0.85	0.85
K_0^{NC}	0.6	0.458	0.603	0.568	0.458	0.6	0.6
C_{incr}	0	0	0	0	0	0	0
R_f	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
T-Strength	0	0	0	0	0	0	0
R_{inter}	0.67	0.5	1	1	0.5	0.5	0.5
Interface Perm	Neutral	Neutral	Neutral	Neutral	Neutral	Neutral	Neutral
d-inter	0	0	0	0	0	0	0
$G_0^{\text{ref}}/\text{kPa}$	—	—	78000	95000	83400	—	—
$\gamma_{0.7}$	—	—	7.64×10^{-5}	6.56×10^{-5}	7.21×10^{-5}	—	—

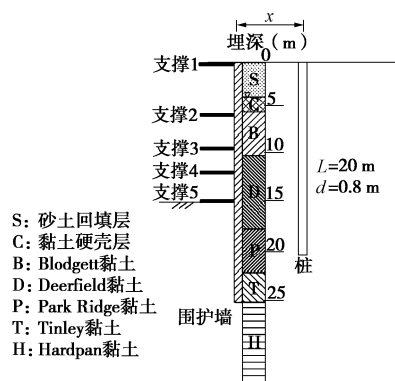


图 3 临近基坑单桩模型

Fig. 3 Single pile adjacent to excavation

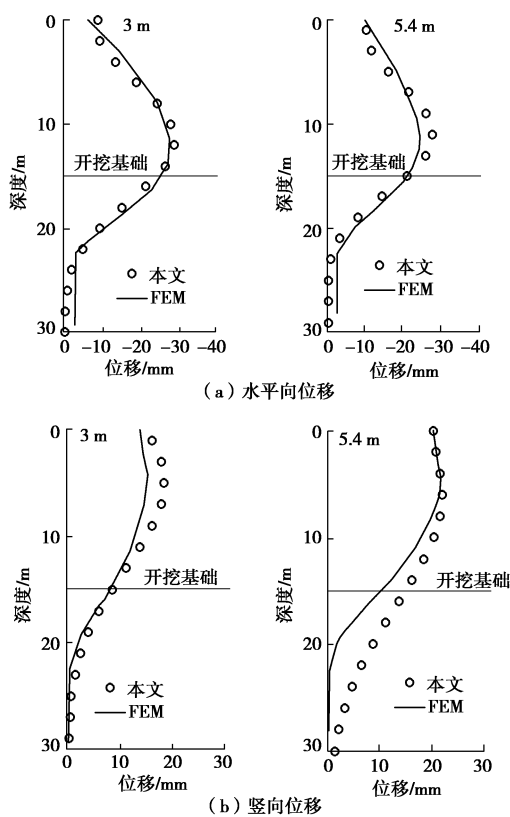


图 4 桩位处土体自由场位移

Fig. 4 Soil movement induced by excavation at location of pile 一致。距离围护墙 3 m 桩位处竖向位移简化方法计算和有限元相近，而在距离围护墙 5.4 m 桩位处竖向位移计算结果要稍大于有限元计算结果。

图 5 为距离围护墙 3 m 和 5.4 m 处桩的变形及受力特性。从图 5 可见，本文简化方法计算所得桩身竖向位移和水平位移分布和大小与有限元计算结果较为一致，由于在距离围护墙 5.4 m 处开挖面以下本文简化方法计算所得土体位移与有限元所得土体位移相差较大，有限元计算所得竖向位移沿竖向衰减要比简化计算方法所得竖向位移衰减快，从而造成有限元计算

所得桩基轴力最大值出现位置要比简化方法计算所得桩基轴力最大位置高。

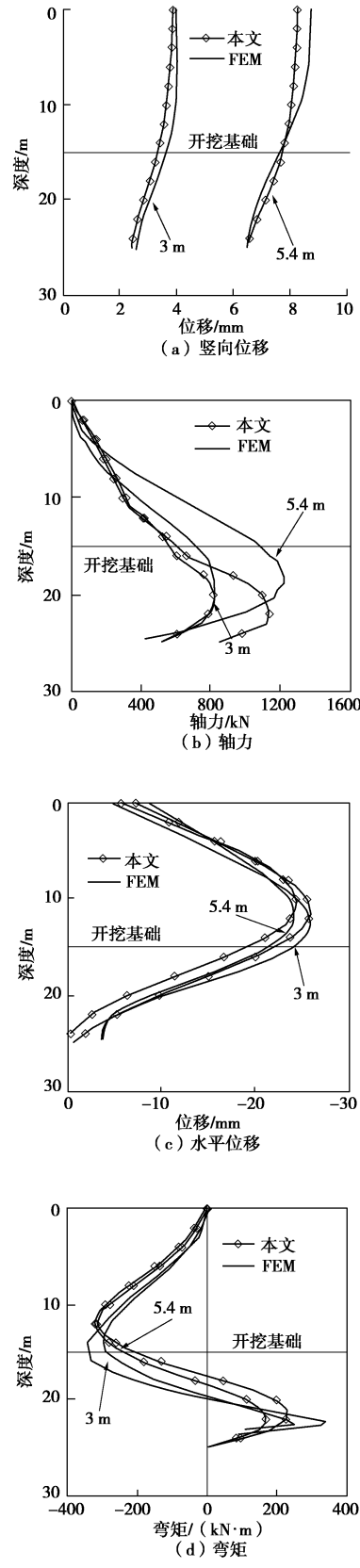


图 5 基坑周边单桩受力特性

Fig. 5 Pile responses induced by excavation

3 影响因素分析

基于以上方法, 本文对基坑开挖深度及桩基距离围护墙的距离这两个主要因素对基坑周边桩基响应的影响进行了分析。

3.1 开挖深度

采用图 3 所示模型, 令桩距离围护墙距离为 3 m, 开挖深度分别设为 3.75, 7.5, 15, 30 m 计算基坑开挖深度对单桩的影响, 假设所有工况围护墙最大水平位移一致。计算结果如图 6 所示。从图 6 可见, 随着开挖深度的增加竖向位移和轴力随之增加。当开挖深度小于 3.75 m 时桩基水平向呈现悬臂式变形, 开挖深度大于 3.75 m 小于桩长时桩基呈现鱼腹式变形, 开挖深度大于桩长时呈现出整体倾斜的趋势, 最大水平位移随着开挖深度的增加而增加。从弯矩图上可以看到, 当开挖深度小于桩长时, 弯矩随着开挖深度的增加而增加, 而开挖深度大于桩长时, 弯矩反而减小。从该分析可以得知, 要对临近桩基进行位移控制时, 开挖深度应越小越好, 而若需对桩基进行受力控制保护桩基自身安全, 开挖深度应该避开桩底位置, 且越小越好。

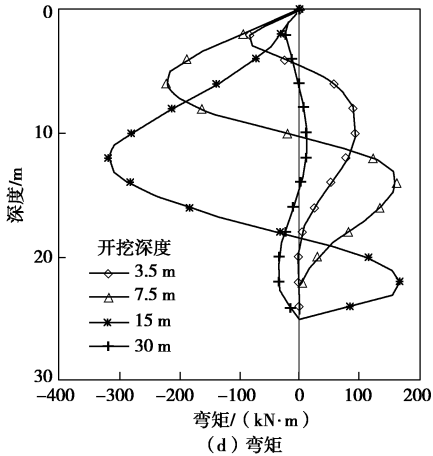
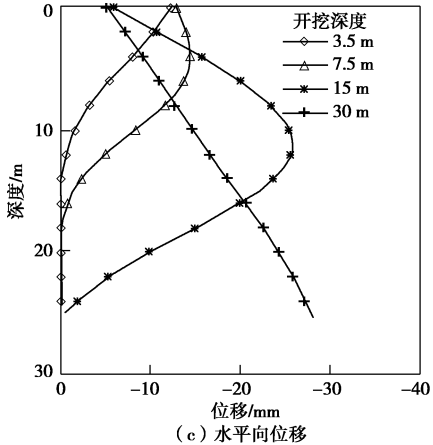
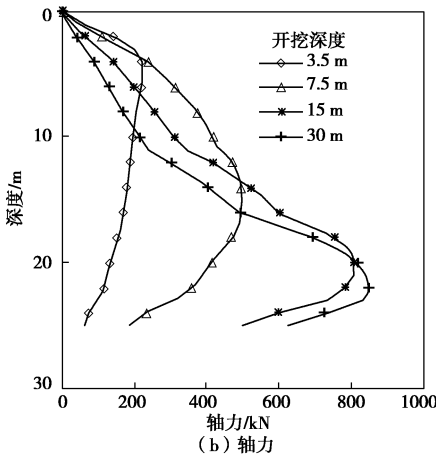
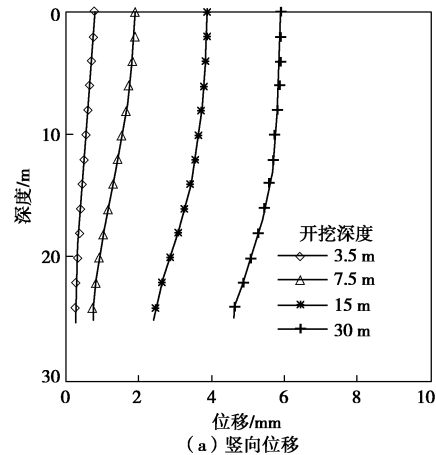
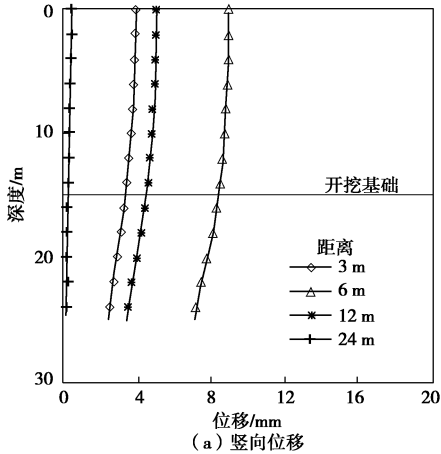


图 6 基坑开挖深度对临近桩基础的影响

Fig. 6 Influence of excavation depth on pile responses

3.2 桩与围护墙距离

设置桩基与围护墙的距离分别为 3, 6, 12, 24 m。图 7 为计算结果, 从图 7 可见, 竖向位移和轴力随着距离的增加先增加后减小, 且在靠近距围护墙 0.5 倍开挖深度的地方达到最大值, 在距离围护墙 0.5 倍开挖深度距离内随着距离的增加而增加, 而在 0.5 倍开挖深度距离以外随着距离的增加而减小。随着距离的增加桩基水平位移减小, 且最大位移出现的位置随之往上移动。桩身弯矩也呈现相同的规律。



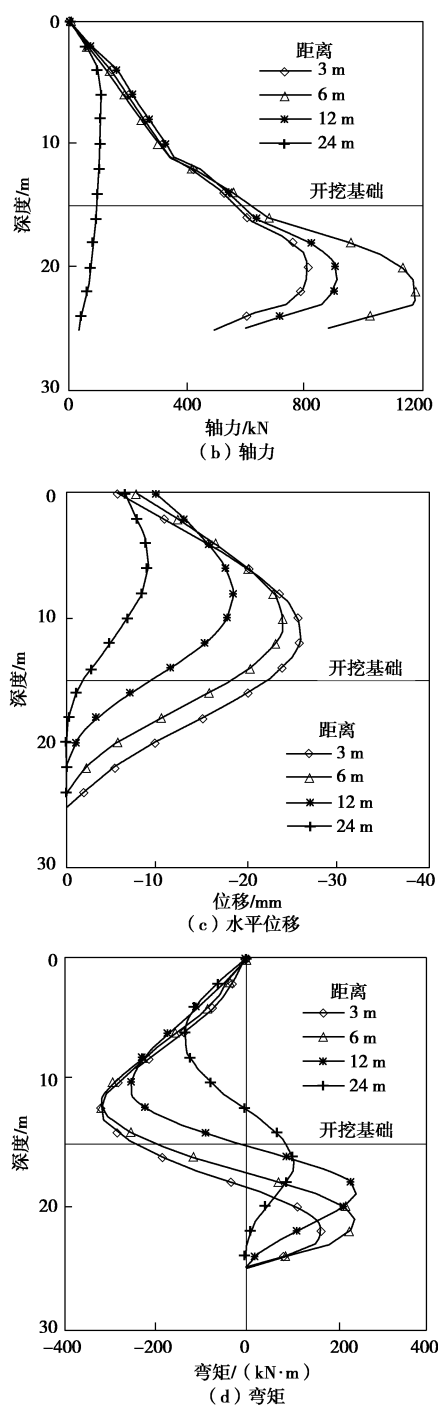


图 7 基坑开挖宽度对邻近桩基的影响

Fig. 7 Influence of distance between pile and retaining wall on pile responses

4 结 语

本文采用考虑土体小应变特性的简化方法计算基坑开挖引起的自由场位移, 然后基于分层中被动桩的两阶段分析方法, 提出了一种考虑土体小应变特性的较为准确的估算分层地基中基坑开挖对邻近桩基础影响的简化分析方法。该方法合理的模拟了变形控制设计时基坑周边土体处于小应变状态的特点。通过与有限元计算结果的对比验证了本方法的正确性。并通过

该方法对基坑开挖深度和桩与围护墙的距离这两个影响因素进行了分析, 研究表明要对临近桩基进行位移控制时, 开挖深度应越小越好, 而若需对桩基进行受力控制保护桩基自身安全, 开挖深度应该避开桩底位置, 且越小越好, 而桩在距围护墙 0.5 倍的基坑开挖深度时最为危险。

参考文献:

[1] BURLAND J B. Ninth laurits bjerrum memorial lecture: “Small is beautiful”-the stiffness of soils at small strain[J]. Can Geotech, 1989(26): 499 - 516.

[2] HRYCIW R D. Small-strain-shear modulus of soil by dilatometer[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 116(11): 1700 - 1716.

[3] BELLOTTI R, JAMIOLKOWSKI M, PRESTI D C F, et al. Anisotropy of small strain stiffness in TICINO sand[J]. Géotechnique, 1996, 46(1): 115 - 131.

[4] HOYOS L R, SUESCUN E A, PUPPALA A J. Small-strain stiffness of unsaturated soils using a suction-controlled resonant column device with bender elements[C]// Proceedings of Geo-Frontiers 2011. Texas: Geo-Institute of ASCE, 2011.

[5] CLAYTON C R I. Stiffness at small strain: research and practice[J]. Géotechnique, 2011, 61(1): 5 - 37.

[6] WHITTLE A J, HASHASH Y M A, WHITMAN R V. Analysis of deep excavation in Boston[J]. J Geotech Eng, 1993, 119(1): 69 - 90.

[7] KUNG G T C, OU C Y, JUANG C H. Modeling small-strain behavior of Taipei clays for finite element analysis of braced excavations[J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36: 304 - 319.

[8] XUAN F, XIA X, WANG J. The application of a small strain model in excavations[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (SCIENCE), 2009, 14(4): 418 - 422.

[9] FINNO R J, LAWRENCE S A, ALLAWH N F, et al. Analysis of performance of pile groups adjacent to deep excavation[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1991, 117(6): 934 - 955.

[10] 杨 敏, 周洪波, 杨 烨. 基坑开挖与邻近桩基相互作用分析[J]. 土木工程学报, 2005, 38(4): 93 - 96. (YANG MIN, ZHOU Hong-bo, YANG Ye. Numerical analysis of pile response due to unsupported excavation-induced lateral soil movement[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(4): 93 - 96. (in Chinese))

[11] ILIADELIS D. Effect of deep excavation on an adjacent pile

- foundation[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [12] 陈福全, 汪金卫, 刘毓氟. 基坑开挖时临近桩基形状的数值分析[J]. 岩土力学, 2008, **29**(7): 1971 - 1976. (CHEN Fu-quan, WANG Jin-wei, LIU Yu-chuan. Numerical analysis of pile response due to braced excavation-induced soil lateral movement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(7): 1971 - 1976. (in Chinese))
- [13] LEUNG C F, CHOW Y K, SHEN R F. Behavior of pile subject to excavation-induced soil movement[J]. J Geotech Geoenviron Eng, 2000, **126**(11): 947 - 954.
- [14] LEUNG C F, LIM J K, SHEN R F, et al. Behavior of pile groups subject to excavation-induced soil movement[J]. J Geotech Geoenviron Eng, 2003, **129**(1): 58 - 65.
- [15] GOH A T C, WONG K S, THE C I, et al. Pile response adjacent to braced excavation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, **129**(4): 383 - 386.
- [16] ONG D E L, LEUNG C E, CHOW Y K. Pile behavior due to excavation-induced soil movement in clay. I: stable wall[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, **132**(1): 36 - 44.
- [17] LEUNG C F, ONG D E L, CHOW Y K. Pile behavior due to excavation-induced soil movement in clay II: Collapsed Wall[J]. J Geotech Geoenviron Eng, 2006, **132**(1): 45 - 53.
- [18] HSIEH P G, OU C Y. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, **35**(6): 1004 - 1017.
- [19] FINNO R J, BLACKBURN J T, ROBOSKI J F. Three-dimensional effects for supported excavations in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, **133**(1): 30 - 36.
- [20] KUNG G T C, JUANG C H, HSIAO E C L, et al. Simplified model for wall deflection and ground-surface settlement caused by braced excavation in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, **133**(6): 731 - 747.
- [21] BOONE J. Ground-movement-related building damage[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **122**(11): 886 - 896.
- [22] 张爱军, 莫海鸿, 李爱国, 等. 基坑开挖对邻近桩基影响的两阶段分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(增刊 1): 2746 - 2750. (ZHANG Ai-jun, MO Hai-hong, LI Ai-guo, et al. Two-stage analysis method for behavior of adjacent piles due to foundation pit excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(S1): 2746 - 2750. (in Chinese))
- [23] 木林隆, 黄茂松. 基坑开挖引起的周边土体三维位移场的简化分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(5): 1 - 8. (MU Linlong, HUANG Maosong. Simplified method for analysis of soil movement induced by excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(5): 1 - 8. (in Chinese))
- [24] 木林隆. 分层地基中地下工程开挖对临近桩筏基础的影响分析[D]. 上海: 同济大学, 2012. (MU Lin-long. Analysis of responses of pile-rafts induced by underground excavations in layered soil[D]. Shanghai: Tongji University, 2012. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)