

# 土体侧移模式对邻近桩基性状影响的三维数值分析

梁发云<sup>1,2</sup>, 李彦初<sup>1,2</sup>

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

**摘要:** 地下工程开挖对邻近桩基的影响主要是由于开挖引起的土体侧移作用在桩身上, 使得邻近桩基产生了附加的桩身位移和弯矩, 当土体侧移较大时, 可能会对邻近桩基的正常使用产生危害。采用有限元软件 ABAQUS 进行三维有限元分析, 将土体位移作为边界条件输入, 讨论不同土体侧移模式对于邻近桩基承载和变形性状的影响。数值分析表明, 土体侧移模式包括其最大侧移值、分布范围以及分布形状等对桩基的侧移和弯矩均有着不同程度的影响, 在实践中应针对不同工程情况予以充分重视。

**关键词:** 土体侧移模式; 被动桩; 承载性状; 桩土接触; 数值分析

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)S2-0399-05

**作者简介:** 梁发云(1976-), 男, 安徽肥东人, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事桩基础、深基坑工程及桥梁冲刷等方面的研究与教学工作。E-mail: fyliang@tongji.edu.cn。

## Numerical analysis for effects of lateral soil movement on adjacent piles

LIANG Fa-yun<sup>1,2</sup>, LI Yan-chu<sup>1,2</sup>

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

Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Effects of underground excavation on the adjacent piles are that the movement of lateral soil on the piles leads to additional pile displacement and bending moment. It may do serious harm to the normal use of adjacent piles when the movement of the lateral soil is large. The 3D finite element software ABAQUS is adopted to study the behavior of passive piles subjected to the movement of the lateral soil by regarding the movement of the lateral soil as the boundary conditions to simplify the process of excavation, and the effects of different modes of lateral movement of soil on pile deflection and bending moment are analyzed. The results from the numerical analysis show that the pile deflection and bending moment are obviously affected by different modes of the lateral movement of soil, such as different maximum displacements, distribution ranges, distribution shapes and so on, which cannot be ignored in practical pile design.

**Key words:** lateral soil movement; passive pile; bearing capacity; pile-soil contact surface; numerical analysis

## 0 引言

目前岩土工程界对主动桩问题的研究较为深入, 基本上已可满足工程设计的要求。相比之下, 由于对土体侧向运动规律和桩土相互作用的机理认识不够, 对被动桩问题的研究还很不充分。桩基在使用期间可能受到土体侧移作用, 附加的土体侧移在设计阶段一般没有予以考虑, 而土体侧移可能导致桩基产生较大的侧向附加荷载和弯曲变形, 甚至发生折断破坏。这方面已有多起报道, 如 Finno 等<sup>[1]</sup>、Amirsoleymani<sup>[2]</sup>以及 Chu<sup>[3]</sup>等。因此, 土体侧向位移对邻近桩基承载性状的影响不容忽视。

国内外学者对土体侧移对邻近桩基的承载性状已进行了一些研究。Poulos 和 Chen<sup>[4]</sup>提出采用两阶段方法研究基坑开挖对邻近桩基的影响。Chen 等<sup>[5]</sup>采用 Loganathan 和 Poulos<sup>[6]</sup>提出的解析方法分析隧道开挖引起桩的响应问题。Leung 等<sup>[7-9]</sup>采用离心机试验系统研究了不同开挖模式对邻近单桩及群桩的影响。梁发云等<sup>[10]</sup>基于 Winkler 地基模型对土体侧移作用下的邻近桩基相互作用进行分析。姚国圣等<sup>[11]</sup>采用有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup>对土体侧移作用下轴向受荷单桩承载性状进行了数值分析, 重点讨论了土体强度、桩身刚度以及不同桩顶约束条件下的单桩性状。

在土体侧移对邻近桩基承载性状影响的相关研究中, 为避免开挖过程的复杂分析, 可将开挖引起的位移影响简化为边界条件施加在挡墙或者土体边界上, 但不同土体侧移模式对桩的承载和变形性状的影响程度是有区别的, 目前对于此问题的认识还不够充分, 文献[11]中也没有对这个问题进行深入讨论。本文采用有限元软件 ABAQUS, 建立了考虑桩土接触的三维有限元模型, 将土体位移作为边界条件输入, 分析了单桩在不同土体侧移模式作用下的变形和弯矩情况, 以期为工程实践提供参考。

## 1 数值模型

### 1.1 模型尺寸及网格

本文参考文献[7]的离心模型试验研究方案, 建立了三维有限元模型。模型尺寸为长 17 m, 宽 10 m, 高 23.5 m; 挡墙宽 0.16 m, 高 8.0 m; 桩在挡墙后 3 m, 桩径为 0.63 m, 桩长为 12.5 m。整个有限元网格包含了 21116 个单元和 23733 个节点, 土体、挡墙和桩均采用六面体实体单元 C3D8R。模型网格如图 1。

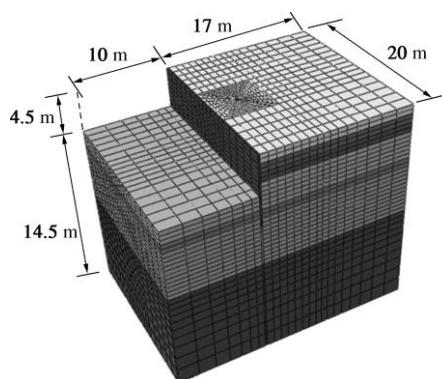


图 1 三维有限元网格

Fig. 1 3D FEM mesh of model

### 1.2 本构模型和材料参数

数值分析中, 挡墙和桩体均可视为弹性材料, 也即本构关系为线弹性本构关系。由于简化了基坑开挖过程, 不需要考虑加载、卸载模量的不同, 因此选用 Mohr-Coulomb 模型作为土的本构模型。

挡墙和桩的材料参数均采用了文献[7]在离心模型试验分析中采用的参数, 具体见表 1。对于土体变形模量, Poulos<sup>[12]</sup>提出  $E = (6 \sim 8) z$  (MPa), 其中  $E$  为土体的变形模量,  $z$  为土层深度。本文在  $E=6z$  的基础上做了适当简化, 将地基土划分为 10 层, 取每层中心, 按  $E=6z$  作为该层的代表性模量, 其余土体参数

均参考文献[7]所用参数, 具体见表 2。

本文考虑桩土接触及可能出现的脱开情况, 桩侧与土体设置接触条件, 接触面切向采用罚函数, 接触面内摩擦角为  $20^\circ$ , 则摩擦系数设置为 0.364 (也即  $\tan 20^\circ$ ), 法向采用硬接触, 桩底采用 “TIE” 约束。

表 1 挡墙与桩材料参数

Table 1 Mechanical parameters of retaining wall and piles

材料	$\gamma$ /(kN m <sup>-3</sup> )	$E$ /MPa	$\nu$
桩	25	$2.85 \times 10^4$	0.2
挡墙	25	$2.7 \times 10^4$	0.25

表 2 土体材料参数

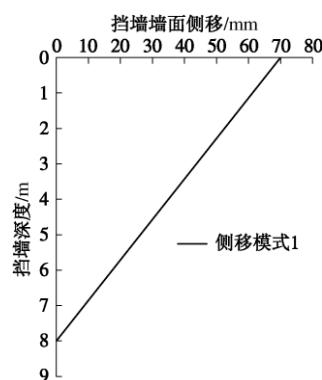
Table 2 Mechanical parameters of soil

深度/m	$\gamma$ /(kN m <sup>-3</sup> )	$E$ /MPa	$\nu$	$c$ /kPa	$\phi$ /(°)
1.0	15.8	3.0	0.35	2	35
2.0	15.8	9.0	0.35	2	35
3.0	15.8	15.0	0.35	2	35
4.0	15.8	21.0	0.35	2	35
5.0	15.8	27.0	0.35	2	35
6.0	15.8	33.0	0.35	2	35
7.0	15.8	39.0	0.35	2	35
8.0	15.8	45.0	0.35	2	35
12.5	15.8	61.5	0.35	2	35
23.5	15.8	108.0	0.35	2	35

## 2 算例验证

本文分析采用与文献[7]的离心模型一致的条件, 模型侧面限制水平位移, 底面固定, 模型上表面为地表, 取为自由边界。桩顶自由, 不施加边界约束。

根据文献[13~14]和文献[7]的结果, 浅基坑开挖对土体产生的是倒三角形或者半抛物线形位移模式。本文将基坑开挖简化为在挡墙上施加倒三角形土体侧移, 根据文献[7]离心机试验结果显示, 挡墙最大侧移为 70 mm 左右, 因此本文位移模式中挡墙顶位移取为  $S_{\max}=70$  mm, 施加土体位移的范围为地面上以下 8 m, 位移方向朝坑内为正 (下文皆同), 具体位移模式如图 2 所示。



基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50708078); 上海市科技攻关计划资助项目 (10231200500)

收稿日期: 2011-08-04

图 2 土体侧移模式

Fig. 2 Mode of lateral movement of soil

图 3 表示单桩在无轴向荷载条件下施加了图 2 所示位移模式后, 其桩身变形和弯矩特性与文献[7]中的离心机试验结果对比。其中  $z$  代表沿桩身深度,  $L$  代表桩长。

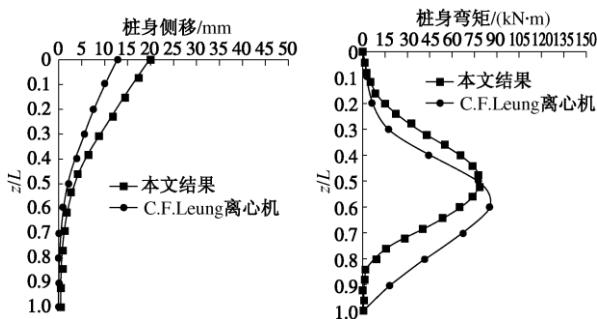


图 3 桩身侧移及弯矩对比

Fig. 3 Comparison between pile deflection and bending moment

从图 3 中可以看出, 本文所得桩身侧向变形最大值出现在桩顶, 桩身侧移随着桩身埋置深度增加, 桩尖处变形值逐渐趋于零, 这与文献[7]相同。桩身侧移与弯矩分布特性与文献[7]变化趋势一致, 说明本文采用直接施加土体侧向位移的分析是可行的。

### 3 土体侧移模式的影响

单桩桩身变形与弯矩受到很多因素的影响, 如土体强度、桩身刚度、桩顶约束条件、轴向荷载大小以及土体侧移模式等, 文献[11]曾对前面几种影响因素进行过较为详细的讨论, 本文将重点考察土体侧移模式对邻近单桩桩身变形与弯矩的影响, 共设计了 6 种土体侧移模式, 详见表 3。

表 3 土体侧移模式

Table 3 Modes of lateral soil movement

模式编号	分布形状	最大侧移/mm	分布范围/m
侧移模式 1	倒三角	70	0~8
侧移模式 2	倒三角	75	0~8
侧移模式 3	倒三角	80	0~8
侧移模式 4	倒三角	70	0~6
侧移模式 5	倒三角	70	0~7
侧移模式 6	半抛物线	70	0~8

#### 3.1 不同最大侧移

首先考察分布范围相同的倒三角形位移模式, 在不同的最大侧移作用下桩身侧移和弯矩的变化情况, 具体的土体侧移模式如图 4。

图 5 比较了不同最大侧移对桩身侧移和弯矩的影响, 可以看出: 随着施加的土体最大侧移的增大, 桩

身中上部位移有明显增大趋势, 侧移模式 1 相对于侧移模式 2 和 3 的桩顶位移分别增加了 6.5% 和 11.5%, 下部位移大小变化不明显; 桩身最大弯矩均发生在大致  $0.5L$  桩长位置, 且随着施加最大侧移的增大而增大, 侧移模式 1 相对于侧移模式 2 和 3 的桩身最大弯矩增加了 10.6% 和 13.1%。可见施加的最大侧移对桩身最大弯矩的影响较之桩身侧移更为明显, 因此, 可能发生桩身侧移发展不明显, 但弯矩发展明显的情况, 工程中须加以注意。

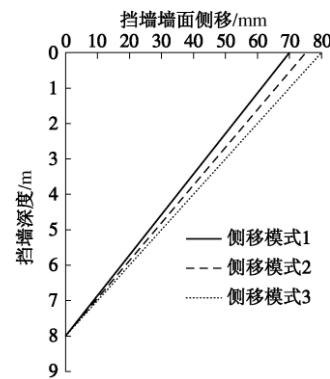


图 4 最大侧移不同的土体侧移模式

Fig. 4 Modes of lateral movement of soil with different maximum displacements

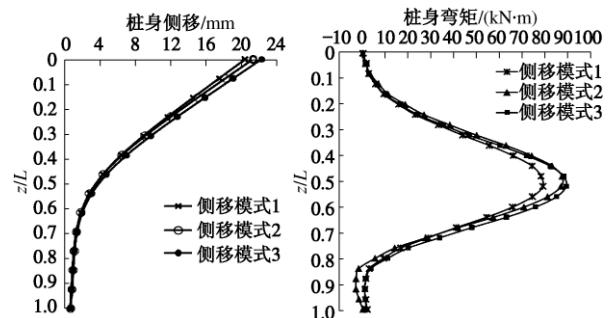


图 5 最大侧移不同对桩身侧移和弯矩的影响

Fig. 5 Effects of different maximum displacements on pile deflection and bending moment

#### 3.2 不同分布范围

此节考察土体侧移分布形状和最大侧移相同, 但沿墙身分布范围不同的情况下, 单桩的桩身侧移和弯矩的变化情况, 具体土体侧移模式如图 6。

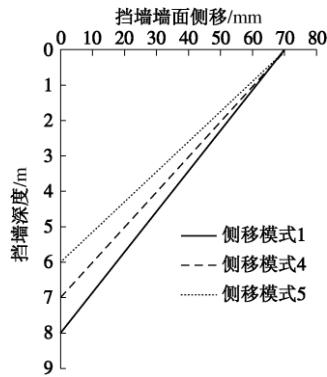


图 6 分布范围不同的土体侧移模式

Fig. 6 Modes of lateral movement of soil with different distribution ranges

图 7 比较了土体侧移分布范围对桩身侧移和弯矩的影响, 可以看出: 随着分布范围的减小, 桩身侧移明显减小, 侧移位移模式 1 与侧移位移模式 4 和 5 相比, 桩顶位移分别减小了 56.7% 和 33.5%; 与桩身侧移规律一致, 桩身弯矩也随分布范围的减小而明显减小, 桩身最大弯矩位置有逐渐向上移动的趋势, 侧移位移模式 1 与侧移位移模式 4 和 5 相比, 桩身最大弯矩分别减小 63.4% 和 36.5%。说明施加土体侧移沿墙身的分布范围对桩身的侧移及弯矩有明显的影响。

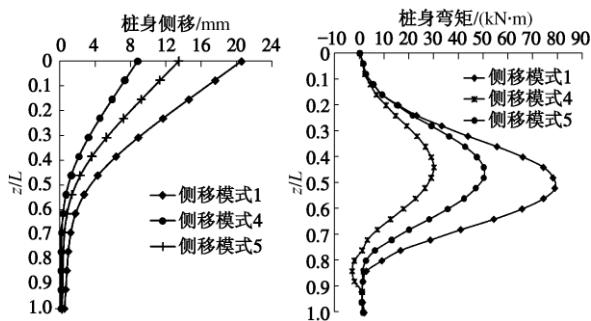


图 7 分布范围不同对桩身侧移和弯矩的影响

Fig. 7 Effects of different distribution ranges on pile deflection and bending moment

### 3.3 不同分布形状

该部分考察了土体侧移分布范围和最大侧移相同, 但分布形状不同情况下, 单桩的桩身侧移和弯矩的变化情况, 具体土体侧移模式如图 8。

图 9 比较了不同土体侧移分布范围对桩身侧移和弯矩的影响, 可以看出: 施加的最大侧移和分布范围相同情况下, 半抛物线分布比倒三角分布引起的桩身侧移明显更大, 桩顶最大位移相差约 45.0%; 桩身弯矩也存在较大差异, 半抛物线分布比倒三角分布引起的桩身弯矩更大, 且最大弯矩相差约 51.0%。说明土体侧移的分布形状对邻近单桩的侧移和弯矩影响较为明显, 设计时应根据工程的具体情况, 选择恰当的土体位移模式。

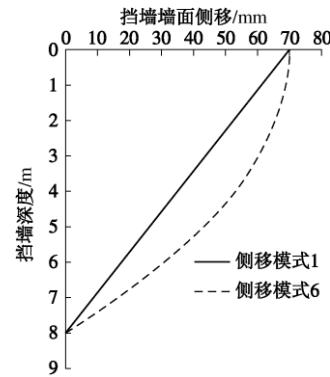


图 8 分布形状不同的土体侧移模式

Fig. 8 Modes of lateral movement of soil with different distribution shapes

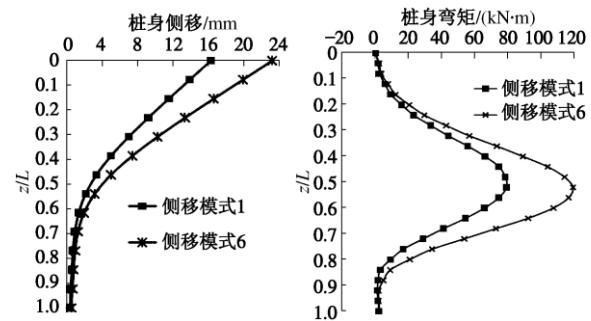


图 9 分布形状不同对桩身侧移和弯矩的影响

Fig. 9 Effects of different distribution shapes on pile deflection and bending moment

## 4 结语

本文采用 ABAQUS 建立了三维有限元分析模型, 将基坑开挖简化为对挡墙施加位移边界条件, 所得结果与文献[7]的离心模型试验及其理论预测结果对比, 桩身侧移和弯矩大小和变化趋势都较为接近, 说明本文方法合理可行。

在此基础上, 本文着重针对不同土体侧移模式对邻近单桩的侧移和弯矩影响进行了分析, 研究表明不同的土体侧移模式, 包括墙顶最大位移、沿深度方向的分布以及侧移分布形状等对邻近单桩的侧移和弯矩影响较为显著。因此, 在工程设计或相关研究工作中, 应综合考虑各因素, 选取合适的土体侧移模式。

本文针对土体侧移对邻近桩基的影响研究还不够深入, 工作仅仅针对单桩展开, 并未拓展到对群桩的分析, 另外对既有轴向荷载的情况也未加以讨论, 有待更深入的研究。

## 参考文献:

- [1] FINNO R J, LAWENCE 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.
- [2] AMIRSOLEYMANI T. Removing soil layer under foundations to rotate buildings[C]// Proceedings of Ninth Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bangkok, Thailand, 1991, 1: 201 - 204.
- [3] CHU Y K. A failure case study of island method excavation in soft clay[C]// Proc Int Conf on Design and Construction of Deep Foundation, 1994, 3: 1216 - 1230.
- [4] POULOS 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.
- [5] CHEN L T, POULOS H G, LOGANATHAN N. Pile responses caused by tunneling[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1999, 125(3): 207 - 215.
- [6] LOGANATHAN N, POULOS H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1998, 124(9): 846 - 856.
- [7] 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, 123(11): 947 - 954.
- [8] LEUNG C F, LIM J K, SHEN R F, et al. Behavior of pile groups subject to excavation-induced soil movement[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2003, 129(1): 58 - 65.
- [9] LEUNG C E, ONG D E L, CHOW Y K. Pile behavior due to excavation-induced soil movement in clay. II: collapsed wall[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2006, 132(1): 45 - 53.
- [10] 梁发云, 于峰, 李镜培, 等. 土体水平位移对邻近既有桩基承载性状影响分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 449 - 454. (LIANG Fa-yun, YU Feng, LI Jing-pei, et al. Analysis of the bearing capacity of a single pile under adjacent building subjected to lateral soil movements[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 449 - 454. (in Chinese))
- [11] 姚国圣, 梁发云, 李镜培, 等. 土体侧移作用下轴向受荷单桩承载性状数值分析[J]. 同济大学学报, 2011, 39(1): 1 - 6. (YAO Guo-sheng, LIANG Fa-yun, LI Jing-pei, et al. 3D numerical analysis for behavior of axially loaded pile subjected to lateral soil movement[J]. Journal of Tongji University, 2011, 39(1): 1 - 6. (in Chinese))
- [12] POULOS H G. Pile behaviour—theory and application[J]. Geotechnique, 1989, 39(3): 365 - 415.
- [13] POULOS H G. Ground movements—a hidden source of loading on deep foundations[J]. DFI Journal, 2007, 1(1): 37 - 52.
- [14] POULOS H G. Analysis of piles in soil undergoing lateral movement[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, 1973, 99(SM5): 391 - 406.

(本文责编 李运辉)