

# 均质地基中桩-桩位移相互作用系数的有限元分析<sup>①</sup>

曹 明

(上海开放大学 信息与工程学院, 上海 200433)

**摘要:**在实际工程分析中用有限元法模拟无限域需要考虑很大一部分桩周土体来保证计算的精度, 从而导致计算量的增大, 同时对计算机的要求也很高。特别是对于大规模的群桩问题, 有限元的计算工作量使一般的计算机无法满足其要求, 这就限制了其在实际工程中的应用。本文基于叠加原理用有限元法计算桩-桩位移相互作用系数, 不仅能减少群桩的计算量, 又能提高计算精度。

**关键词:** 相互作用系数; 有限元法; 桩; 均质地基; 水平荷载

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)增刊 1-0052-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0563

## Finite Element Analysis of Displacement Interactive Coefficients between Two Piles in a Homogeneous Foundation

CAO Ming

(School of Information and Engineering, Shanghai Open University, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** A finite element method was used to ensure the accuracy of calculation used to simulate the infinite domain of a large portion of soil around piles. In the analysis of a practical project, a lot of computer time was required to run the analysis. In the case of large scale pile group problems, a standard computer has been unable to meet the requirements of the finite element calculation, which limits its application in practical engineering. The finite element method was used to calculate the interactive coefficient of pile-pile interactions. On the basis of the superposition principle, the proposed method is expected to be applicable to the calculation of large pile group. The method can not only reduce the amount of calculation time for a pile group problem but also can improve the accuracy of the calculation. Conversely, the piles were simulated by beam elements to consider the engineering characteristics of piles under horizontal loads.

**Key words:** interactive coefficient; finite element method; pile; homogeneous foundation; horizontal load

### 0 引言

目前桩基沉降计算方法主要有荷载传递法<sup>[1]</sup>、剪切位移法<sup>[2]</sup>、弹性理论法<sup>[3]</sup>、有限元法<sup>[4]</sup>、边界元法<sup>[5]</sup>、混合法<sup>[6]</sup>等。水平荷载作用下桩的分析方法主要有三种:一是将桩周土视为弹簧的地基反力法<sup>[7]</sup>;二是将桩周土模拟为弹性连续介质的弹性理

论法<sup>[8]</sup>;三是数值模拟法<sup>[9]</sup>,包括有限单元法。

由于桩与土相互作用的复杂性,单纯用理论分析的方法很难准确反映水平荷载作用下桩与土之间的相互作用。有限元法克服了其他方法在理论上的局限性,是一种比较成熟的数值计算方法,由于其有效性和可靠性,自问世以来已广泛地应用于包括桩基在内的各类建筑物计算分析当中。在早期,Ran-

① 收稿日期:2015-04-01

基金项目:上海开放大学 2013 年理科重点课题(JF1301);上海市教育委员会科研创新项目(15ZZ103)

作者简介:曹 明(1974-),男,河北宣化人,博士,从事桩基础、地基处理研究。E-mail: mingcaoxh@hotmail.com

dolph<sup>[10]</sup>使用二维有限元模型分析了水平向荷载作用的桩土相互作用,土为弹性连续体,桩为弹性梁。随着有限元计算技术的提高,三维有限元应用到该问题的分析和研究中,如 Jeremic 等<sup>[11]</sup>和 Fan 等<sup>[12]</sup>以土为弹塑性材料,桩为线弹性材料。Chik 等<sup>[13]</sup>和 Taha 等<sup>[14]</sup>用 Mohr-Coulomb 模型模拟土体,进行三维有限元计算。Youngho 等<sup>[15]</sup>采用  $p$ - $y$  曲线法计算桩的挠度和荷载分布,桩土相互作用采用三维有限元进行分析,得到与现场试验结果吻合的计算结果。在有限元法模拟无限域中,为了保证计算的精度,在实际工程分析中要考虑很大一部分桩周土体,这就导致计算量的增大,对计算机的要求很高。对于大规模的群桩问题,有限元的计算工作量使一般的计算机已无法满足其要求,其计算结果的精度受到了制约。

本文基于叠加原理,用有限单元法计算桩-桩位移相互作用系数,并有望应用于大规模群桩的计算,减少群桩的计算量,提高计算精度。

## 1 三维有限元模型

### 1.1 模型的建立

运用商业有限元软件建立三维实体模型,土体采用 8 节点等参元,桩采用梁单元。具体计算模型如图 1 和图 2 所示。

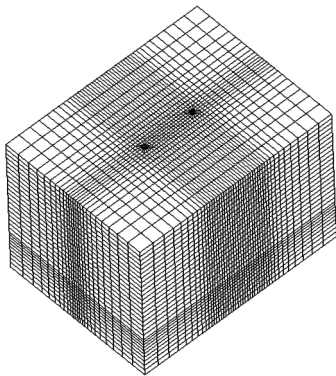


图 1 三维有限元计算模型

Fig. 1 Three-dimensional finite element model

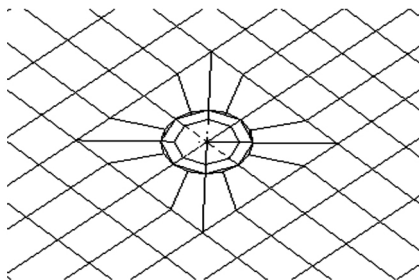


图 2 桩顶模型

Fig. 2 Model of pile top

为保证计算精度,桩周土体的计算边界应该足够大。计算范围通过试算来确定,即通过继续增加土体的计算范围使桩的计算结果变化很小时,确定计算边界。本模型中,桩周土体的计算边界距离桩中心的距离为  $15d$ ,其中  $d$  为桩的直径;桩底土体的计算边界距离桩中心的距离为  $10d$ 。

假定工作荷载作用下材料处于弹性状态,桩和桩周土均采用线弹性本构模型模拟,不考虑桩土间的相对滑动。

### 1.2 有限元网格、荷载施加及边界条件

在模型网格划分中,分为靠近桩的区域和远离桩的区域。靠近桩的区域对桩的计算结果产生的影响相对大,单元划分加密,而远离桩的区域单元划分稀疏。

外加荷载以集中力的方式作用于桩顶中心。计算模型的边界设为滚动支座,即边界节点可以沿边界平面移动,但不能沿边界法向移动。

## 2 与已有计算结果的比较

### 2.1 竖向荷载作用下计算结果的比较

为验证有限元法计算桩-桩位移相互作用系数的正确性,首先用竖向荷载作用下得到的桩-桩位移相互作用系数与已有计算结果进行比较。

Poulos<sup>[3]</sup>提出了均质半无限空间中两根桩间相互作用系数  $\alpha$  的概念

$$\alpha = \frac{\omega^{pp}(0) - \omega^p(0)}{\omega^p(0)} \quad (1)$$

式中: $\omega^{pp}(0)$ 表示半空间体中两根相同的桩,其桩顶均作用相同的单位竖向荷载时的桩顶位移; $\omega^p(0)$ 表示半空间体中单位竖向荷载作用下单桩桩顶的位移。

本文解答与 EL Sharnouby 等<sup>[16]</sup>, Poulos 等<sup>[17]</sup>, Southcott 等<sup>[18]</sup>,曹明等<sup>[19]</sup>计算结果进行了对比。设土的泊松比  $\mu_s = 0.49$ ,桩长细比  $L/d$ ,对不同桩土弹性模量比 ( $E_p/E_s = 100, 1\ 000$ ) 竖向荷载作用下两根摩擦桩之间的相互作用系数进行比较(图 3)。

从图 3 可以看出,对于不同的桩土弹性模量比,包括本文在内的 5 种求解方法对两根摩擦桩相互作用系数的计算结果都有区别,这是由于在计算桩-土相互作用时采用的计算模型不同。本文计算结果比其他学者的解答都小,这是由于在计算两桩相互作用系数时,通过有限元法充分考虑了桩在土中的“加筋效应”,因此本文的解答更为合理。

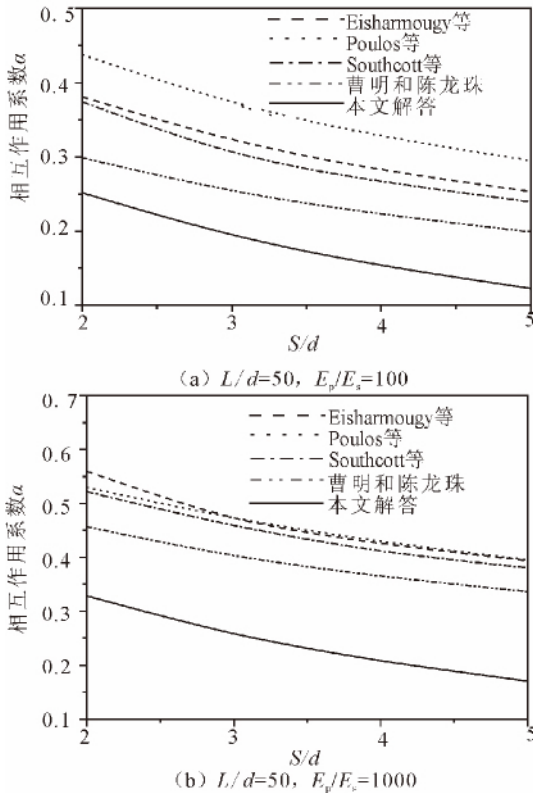


图3 竖向荷载作用下位移相互作用系数的比较

Fig. 3 Comparison of the displacement interaction coefficients under vertical loads

2.2 水平荷载作用下计算结果的比较

图4给出了本文解答与 Poulos<sup>[20]</sup>解答的对比结果。Poulos<sup>[20]</sup>给出了在均质半无限空间体中,相对于各种桩长细比 L/d、不同的刚度系数  $K_R = E_p I_p / E_s L^4$  和桩间距 S/d 的水平荷载作用下,两根摩擦桩之间桩-桩位移相互作用的系数。土的泊松比  $\mu_s = 0.49$ 。

从图4中可以看出,与竖向荷载作用下一样,本文的计算结果偏小。这是因为在计算中,有限单元法充分考虑了桩土分离后桩所在位置空洞的存在,在理论上更加严密,误差更小。随着桩间距的增大,两者的计算结果相对差别变化不大。

为了进一步说明本文计算结果与其他学者解答的区别,图5给出了与 Poulos<sup>[20]</sup>、Randolph<sup>[10]</sup>和 Leung 等<sup>[21]</sup>解答的对比结果。土的泊松比  $\mu_s = 0.49$ ,刚度系数  $K_R = E_p I_p / E_s L^4 = 10^{-5}$ ,桩长细比  $L/d = 25$ 。本文计算结果与 Leung 等<sup>[21]</sup>的计算结果相对相差不大,而与 Poulos<sup>[20]</sup>和 Randolph<sup>[10]</sup>的计算结果基本相同。

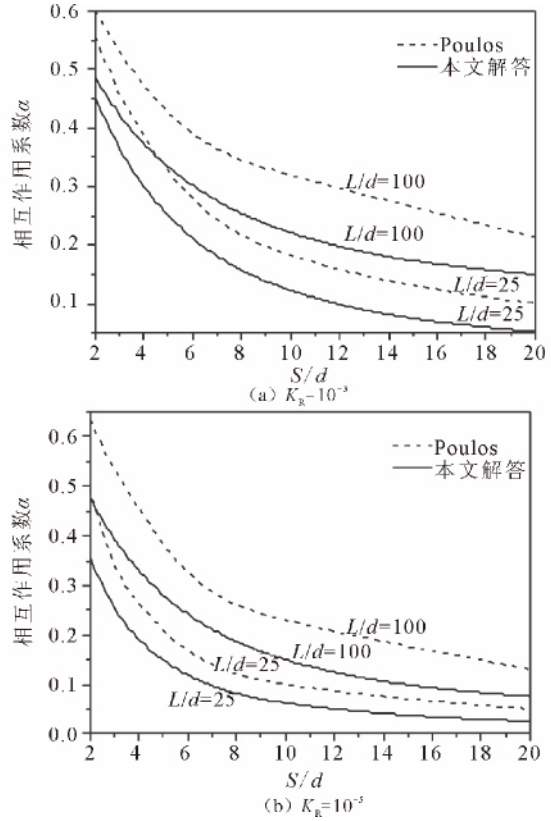
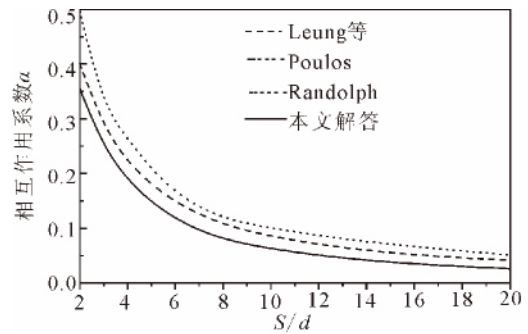


图4 水平荷载作用下位移相互作用系数的比较 (本文解答与 Poulos 解答)

Fig. 4 Comparison of the displacement interaction coefficients under horizontal loads (present solution and Poulos' solution)



5 水平荷载作用下位移相互作用系数的比较 (本文解答与其他三种解答)

Fig. 5 Comparison of the displacement interaction coefficients under horizontal loads (present solution and other three solutions)

3 参数分析

为了考察两根摩擦桩之间相互作用系数的特性,图6给出了土的泊松比为  $\mu_s = 0.3$ ,取不同的桩长细比 ( $L/d = 40, 50, 60$ ),桩直径  $d = 1$ ,土的弹性模量  $E_s = 50$  MPa,不同的桩土弹性模量比 ( $E_p / E_s$

=10,100,1 000)情况下两根摩擦桩的相互作用系数随不同桩距  $S/d$  的变化情况。

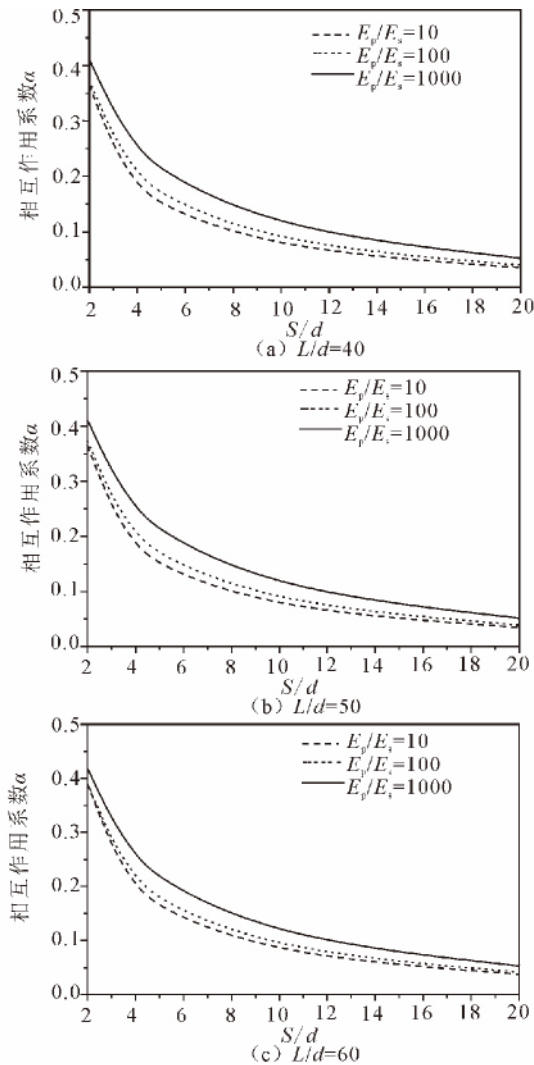


图 6 相互作用系数随桩距的变化

Fig. 6 Interaction coefficient versus pile spacing

从图中可以看出,随着桩距的增大两根桩的相互作用系数明显减小。但是相互作用系数  $\alpha$  在大的桩距下仍然较大且不可忽略。如图 6(a)所示,在桩距  $S/d=20$ ,桩土弹性模量比  $E_p/E_s=1\ 000$ 和桩长细比  $L/d=40$ 时,由相邻桩引起的沉降为4.9%。桩土弹性模量比  $E_p/E_s$ 对相互作用系数  $\alpha$ 有明显影响,随着  $E_p/E_s$ 的增大  $\alpha$ 显著增加。对于不同的桩长,两根桩之间的相互作用系数随桩间距的变化规律基本相同。

#### 4 结论

本文采用有限单元的方法来计算桩-桩相互作用系数,充分考虑了桩土分离以后桩体孔洞的存在。通过与其他方法的比较,可以看出本文计算方法充

分考虑了桩的存在对土变形的影响,即考虑了桩在土中的“加筋效应”。本文进行的参数研究可以供工程实际参考,此外本文的计算方法可以推广到多根桩的群桩计算问题中,其具体方法将在以后的研究中进行介绍。

#### 参考文献(References)

- [1] Seed H B, Reese L C. The Action of Soft Clay Along Friction Piles[J]. Transactions, ASCE, 1957, 22: 731-746.
- [2] Cooke R W. The Settlement of Friction Pile Foundations[C]// Proceedings Conference on Tall Buildings. Kuala Lumpur, 1974.
- [3] Poulos H G, Davis E H. The Settlement Behavior of Single Axially Loaded Incompressible Piles and Piers[J]. Geotechnique, 1968, 18(3): 351-371.
- [4] Ottaviani M. Three-dimensional Finite Element Analysis of Vertically Loaded Pile Groups [J]. Geotechnique, 1975, 25(2): 159-174.
- [5] Butterfield R, Banerjee P K. The Elastic Analysis of Compressible Piles and Pile Groups[J]. Geotechnique, 1971, 21(1): 43-60.
- [6] Hain S J, Lee I K. The Analysis of Flexible Raft-pile Systems [J]. Geotechnique, 1978, 28(1): 65-83.
- [7] 建筑桩基技术规范(JGJ 94-2008)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [8] Poulos H G. Behavior of Laterally Loaded Piles; I-single Piles [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1971, 5: 711-731.
- [9] Youngho K, Sangseom J. Analysis of Soil Resistance on Laterally Loaded Piles Based on 3D Soil-pile Interaction[J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38(2): 248-257.
- [10] Randolph M F. The Response of Flexible Piles to Lateral Loading[J]. Geotechnique, 1981, 31(2): 247-259.
- [11] Jeremic B, Yang Z. Numerical Analysis of Pile Behavior Under Lateral Loads in Layered Elastic-plastic Soils[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2002, 2: 1-31.
- [12] Fan C C, Long J H. Assessment of Existing Methods for Predicting Soil Response of Laterally Loaded Piles in Sand[J]. Computers Geotechnics, 2005, 32(4): 274-289.
- [13] Chik Z, Abbas J, Taha M, et al. Lateral Behavior of Single Pile in Cohesionless Soil Subjected to Both Vertical and Horizontal Loads[J]. Eur J Sci Res, 2009, 29(2): 194-205.
- [14] Taha M R, Abbas J M, Chick Z H, et al. The Performance of Laterally Loaded Single Pile Embedded in Cohesionless Soil With Different Water Level Elevation[J]. J Appl Sci, 2009, 9: 909-16.
- [15] Youngho K, Sangseom J. Analysis of Soil Resistance on Laterally Loaded Piles Based on 3D Soil-pile Interaction[J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38(2): 248-257.
- [16] E L Sharnouby B, Novak M. Stiffness Constants and Interaction Factors for Vertical Response of Pile Groups[J]. Canadian

- an Geotechnical Journal, 1990, 27: 813-822.
- [17] Poulos HG, Mattes N S. Settlement and Load Distribution Analysis of Pile Groups[J]. Australian Geomechanics Journal, 1971, 1(1): 18-28.
- [18] Southcott P H, Small J C. Finite Layer Analysis of Vertically Loaded Piles and Pile Groups[J]. Computers and Geotechnics, 1996, 18(1): 47-63.
- [19] Cao M, Chen L Z. Analysis of Interaction Factors Between two Piles[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University(Sci), 2008, 13(2): 171-176.
- [20] Poulos H G. Behavior of Laterally Loaded Piles: II-pile Group. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division[C]//Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 1971, SM5: 733-751.
- [21] Leung C F, Chow Y K. Response of Pile Groups Subjected to Lateral Loads[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1987, 11: 307-314.