

开挖条件下非均质地基中被动群桩水平反应分析

黄茂松, 张陈蓉, 李 早

(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: 地下工程开挖包括基坑开挖、隧道开挖等, 邻近建筑物的桩基因开挖引起的土体位移会产生弯矩和变形。基于两阶段分析方法, 考虑土体的非线性, 采用 Winkler 地基模型模拟被动单桩桩土之间的相互作用, 运用有限差分法进行求解以考虑地基土的分层特性, 并基于简化 Mindlin 方程考虑群桩的桩-桩相互影响, 计算被动群桩的遮拦效应, 从而得到开挖条件下被动群桩水平反应的简化分析方法。最后将基于两阶段分析方法的差分解法与边界元解、现场实测结果、离心机实验结果等进行对比, 验证了该方法的合理性及实用性。

关键词: 两阶段分析法; Winkler 地基模型; 被动群桩; Mindlin 解; 有限差分法

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)07-1017-08

作者简介: 黄茂松(1965-), 男, 浙江玉环人, 教授, 博士生导师, 从事岩土工程的科研与教学工作。E-mail: mshuang@mail.tongji.edu.cn。

Lateral response of passive pile groups due to excavation-induced soil movement in stratified soils

HUANG Mao-song, ZHANG Chen-rong, LI Zao

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

Abstract: Lateral soil movement induced by excavation or tunneling might adversely affect any nearby pile foundation systems. In this paper, a simple analysis solution was outlined for computing the lateral response of passive pile groups subjected to urban underground excavation. Based on a two-stage method, nonlinear analysis with a Winkler model was adopted to study the effect of pile-soil interaction, combined with finite difference method in the case of multi-layered soils. A specified free-field soil movement profile was used as an input. Then, the governing equation of group piles was obtained considering the shielding effect in pile groups by the simplified Mindlin's equation. Comparisons were made among the behaviors obtained from boundary-element analysis, in-situ observations, centrifuge model tests and those computed by the proposed finite difference method. Generally, a satisfactory prediction of the lateral response of passive pile groups could be given by the proposed method.

Key words: two-stage method; Winkler model; passive pile group; Mindlin's equation; finite difference method

0 引 言

基坑开挖、地面堆载、隧道开挖等施工行为对邻近建筑物桩基的影响分析属于被动桩课题, 其受力变形机理与主动桩有着本质区别。就理论分析方法而言, 被动群桩的分析包括整体分析方法和两阶段分析方法。整体分析方法^[1-6]可以全面考虑开挖过程以及支护等复杂条件, 但其工作量大, 计算中的诸多不确定因素限制了其对施工的准确模拟, 难以为工程界接受。相比而言, 两阶段方法^[7]优势明显, 该法中开挖施工引起的土体自由场位移是已知的。在工程界对地下工程开挖引起的土体自由场变形有着丰富的经验积累及了解的前提下, 两阶段法可以很好地为安全施工提供变形控制的标准。其大致分为两类: ①Poulos 等提出

的边界单元法^[8-13], 对单桩、群桩均适用, 但该法难以扩展到非线性; ②将被动单桩简化为传统的弹性地基梁并运用数值手段求解, 如有限单元法^[14-15], 有限差分法^[16]以及解析方法^[17-18]。弹性地基梁涉及的地基模式选取, 包括 Winkler 地基模型、基于 Mindlin 解或更为复杂的积分方程解的弹性层状半空间地基模型等。诸多文献显示目前被动桩的研究主要在单桩方面。至于群桩, Kitiyodom 等^[15]基于 Winkler 地基梁的有限单元法分析了隧道开挖对邻近群桩的影响, 但没有考虑群桩的遮拦效应; 笔者^[17-18]采用解析方法对隧道开

基金项目: 教育部高等学校博士点基金资助项目 (20070247066)

收稿日期: 2007-05-14

挖引起的群桩竖向和水平向力学反应进行了分析,考虑了群桩中“被动桩”与周围土体的相互作用,但解析法仅适用均质地基的线弹性状态,而实际情况应该都是分层土体且水平被动桩桩顶附近土体的非线性作用明显,因此解析法有其明显的局限性。至于基坑开挖条件下被动群桩的两阶段分析方法更是未见报导。

本文采用 Winkler 地基梁的有限差分法对非均质地基中被动群桩的力学性状进行分析,在桩土间分析中考虑了桩顶周围土体的非线性影响,在桩桩相互作用中考虑了群桩中的“被动桩”对周围土体的遮拦效应,通过与边界元解、离心试验结果以及现场实测结果的对比,验证了本文提出方法的合理性。

1 被动群桩的两阶段分析方法

被动桩的两阶段分析方法分为两个阶段:①第一阶段为获取地下工程开挖引起的土体自由场水平位移;②第二阶段基于 Winkler 地基模型,首先建立单桩在被动水平位移下的控制方程及其差分形式矩阵,其次考虑群桩中“被动桩”的存在对土体自由场的约束作用,通过平面 Mindlin 解得到土体水平位移传递系数,以考虑被动群桩的桩桩相互作用,计算群桩的遮拦位移,最后通过叠加原理计算群桩由于地下工程开挖产生的水平位移和内力。

1.1 地下工程开挖引起的土体水平自由场位移

地下工程开挖引起的土体自由场位移计算方法有经验法、有限元法和解析法 3 种。作为对两阶段分析方法的验证还可采用假定或实测的土体自由场位移,基于位移控制的整体有限元方法求解被动群桩的力学反应。采用实测的土体自由场位移进行求解,被动桩基的分析结果准确性会高很多。至于隧道开挖引起土体自由场位移可基于平均地层损失比利用 Loganathan 等^[19]提出的解析解进行计算,见文献[17, 18]。

1.2 被动单桩的分析

作为简化分析方法,本文不考虑桩顶与周围土体脱开的情况,现作如下假定:①基于 Winkler 地基模型将桩视作弹性地基梁;②考虑桩周土体屈服的影响,土体为完全弹塑性连续变形体;③桩土相互作用由弹簧来模拟,桩土紧密接触且变形协调;④不考虑桩中轴力的影响。

由单桩弹性地基梁模型得到桩挠曲线微分方程:

$$E_p I_p \frac{d^4 y_p}{dz^4} - p_s d = 0, \quad (1)$$

式中, y_p 为桩身水平位移, p_s 为作用于桩侧的土压力 (N/m^2), E_p 为桩体材料的杨氏模量, I_p 为桩截面的惯性矩。

地下开挖引起的水平向自由土体位移,因桩体的

存在而受到约束,其约束位移产生的桩侧土压力在弹性阶段表示为

$$p_s = k_z (y_s - y_p). \quad (2)$$

式中 y_s 为桩位处开挖引起的水平自由土体位移; k_z 为桩周土体的地基反力系数 (N/m^3),其确定方法很多,本文采用 Vesic^[20]提出的地基反力系数表达式为

$$k_z = \frac{0.65}{d} \left(\frac{E_s}{1 - \nu_s^2} \right)^{1/2} \sqrt{\frac{d^4 E_s}{E_p I_p}}, \quad (3)$$

其中, E_s 为土体弹性模量, ν_s 为土体泊松比。

为了进一步考虑桩周土体屈服的影响,本文引入桩侧极限土压力的概念。Poulos^[7]在 Broms^[21]工作的基础上,提出了黏土中桩侧极限土压力的表达式为

$$p_u = 2(1 + z/d) C_u \leq 9C_u, \quad (4a)$$

式中, z 为桩入土深度, d 为桩径, C_u 为土体相应深度处的不排水剪切强度。砂土中的桩侧极限土压力则采用 Broms^[21]提出的公式:

$$p_u = \alpha K_p \sigma'_v, \quad (4b)$$

式中, 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。

从而,开挖条件下被动单桩的求解步骤如下:①基于线弹性模型,求解桩身水平位移;②比较桩侧 p_s 与 p_u 值的大小,若 $p_s > p_u$,表明该节点处土体已经屈服,桩侧土压力以 p_u 值代入进行计算,重新求解桩身水平位移;③重复步骤②,直至桩侧所有节点的桩侧土压力均不超过其极限值。

下面介绍 k_z 沿土体深度变化的非均质地基中运用差分法求解被动单桩的具体过程。首先假设桩周土体处于弹性阶段,则可以得到位移控制方程:

$$\frac{d^4 y_p}{dz^4} + 4\lambda^4 (y_p - y_s) = 0, \quad (5)$$

式中, $\lambda = \sqrt[4]{\frac{k_z d}{4E_p I_p}}$, Vesic^[20]定义其为等效阻尼衰减系数,用于长短桩判别依据。

将桩沿全长 n 等分,每段长为 h 。桩头至桩端节点号分别为 0, 1, ..., $n-1$, n 。桩顶及桩底各增加两个虚拟节点 -2, -1, $n+1$, $n+2$ 。根据差分与导数的关系,标准点 i 的差分格式为

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

由不同的边界条件可以得到相应的边界节点差分方程。

(1) 桩顶自由支承且作用有外力 H 和弯矩 M 时,有

$$\left. \begin{aligned} -y_{p,-2} + 2y_{p,-1} - 2y_{p,1} + y_{p,2} &= (2H/E_p I_p)h^3, \\ y_{p,-1} - 2y_{p,0} + y_{p,1} &= (M/E_p I_p)h^2. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

(2) 桩顶完全固定时, 有

$$\begin{cases} -y_{p,-1} + y_{p,1} = 0, \\ y_{p,0} = 0. \end{cases} \quad (8)$$

同理可得到桩底相应的边界节点方程。

新增加的 4 个边界节点方程与原有的 $n+1$ 个方程相结合, 消去虚拟的 $-2, -1, n+1, n+2$ 节点变量, 得到弹性范围内被动单桩的位移方程

$$[K_p^e]\{y_p^e\} = [K_s]\{y_s^e\} + \{F^e\}, \quad (9)$$

式中, $[K_p^e]$ 和 $\{F^e\}$ 分别为水平桩身刚度矩阵以及外荷载列向量, 均与桩身的边界条件有关, $\{y_p^e\}$ 为桩身水平位移节点列向量, $\{y_s^e\}$ 为水平自由土体位移节点列向量, $[K_s]$ 为土体水平向刚度矩阵,

$$\left. \begin{aligned} \{y_p^e\} &= \{y_{p,0}^e, y_{p,1}^e, \dots, y_{p,i}^e, \dots, y_{p,n-1}^e, y_{p,n}^e\}^T, \\ \{y_s^e\} &= \{y_{s,0}^e, y_{s,1}^e, \dots, y_{s,i}^e, \dots, y_{s,n-1}^e, y_{s,n}^e\}^T, \\ [K_s] &= \begin{bmatrix} k_{s,0} & & & & & \\ & k_{s,1} & & & & \\ & & \vdots & & & \\ & & & k_{s,i} & & \\ & & & \vdots & & \\ 0 & & & & & k_{s,n-1} \\ & & & & & & k_{s,n} \end{bmatrix}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中, $k_{s,i} = k_{zi}dh$ ($0 \leq i \leq n$)。

限于篇幅, 本文仅以桩顶自由作用有外荷载且桩底自由的边界条件加以说明, 此时外荷载列向量可为

$$\{F^e\} = \{F_0^e, F_1^e, \dots, F_i^e, \dots, F_{n-1}^e, F_n^e\}^T, \quad (11)$$

式中, $F_0^e = \frac{2M}{h} + 2H$, $F_1^e = -\frac{M}{h}$, $F_i^e = 0$ ($2 \leq i \leq n$)。

水平桩身刚度矩阵表示为

$$[K_p^e] = \frac{E_p I_p}{h^3} \begin{bmatrix} B_0^e & -4 & 2 & & & \\ -2 & B_1^e & -4 & 1 & & 0 \\ 1 & -4 & B_2^e & -4 & 1 & \\ & \vdots & \vdots & \vdots & & \\ & 1 & -4 & B_i^e & -4 & 1 \\ & & \vdots & \vdots & \vdots & \\ & & & 1 & -4 & B_{n-2}^e & -4 & 1 \\ 0 & & & & 1 & -4 & B_{n-1}^e & -2 \\ & & & & & 2 & -4 & B_n^e \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中, $B_0^e = 2 + 4\lambda_0^4 h^4$, $B_1^e = 5 + 4\lambda_1^4 h^4$, $B_i^e = 6 + 4\lambda_i^4 h^4$ ($2 \leq i \leq n-2$), $B_{n-1}^e = 5 + 4\lambda_{n-1}^4 h^4$, $B_n^e = 2 + 4\lambda_n^4 h^4$ 。

下面讨论桩身变形进一步增大, 桩周土体达到屈服的情况。先判断土体是否已经屈服, 若 $k_z(y_{s,i}^e - y_{p,i}^e) > p_{u,i}$, 表示相应节点的土体已经屈服,

屈服状态的桩身位移微分方程为

$$\frac{E_p I_p}{d} \frac{d^4 y_p}{dz^4} = p_u, \quad (13)$$

其差分格式:

$$y_{p,i-2} - 4y_{p,i-1} + 6y_{p,i} - 4y_{p,i+1} + y_{p,i+2} = \frac{p_{u,i} dh^4}{E_p I_p}. \quad (14)$$

在弹性矩阵方程的基础上对相应屈服点进行修正, $B_i^p = B_i^e - 4\lambda_i^4 h^4$, $F_i^p = F_i^e + p_{u,i} dh$, $y_{s,i}^p = 0$, ($0 \leq i \leq n$)。取 $y_{s,i}^p$ 为 0 表示塑性阶段土体位移不参与运算。

最后, 单桩考虑桩周土体非线性的桩身位移方程可写为

$$[K_p]\{v_p\} = [K_s]\{v_s\} + \{F\}, \quad (15)$$

对应桩周土体处于弹性阶段的桩身节点取 B_i^e , $y_{s,i}^e$, F_i^e , 对应桩周土体处于塑性阶段的桩身节点以 B_i^p , $y_{s,i}^p$, F_i^p 代入, 得到整体矩阵, 继而得到水平桩身位移为

$$\{v_p\} = [K_p]^{-1}([K_s]\{v_s\} + \{F\}). \quad (16)$$

在已知桩身各节点位移的前提下, 基于差分法可以得到桩身各节点的转角、弯矩、剪力。

1.3 两根被动桩的相互影响

在水平主动群桩的分析中, 因桩体自身刚度远远大于桩周土体的刚度, 土体位移受到桩体约束, 称为群桩中的“被动桩”对土体位移的遮拦效应。遮拦效应是一种应力迁移现象, 其结果是使群桩中的单桩通过桩-土-桩的相互遮拦屏蔽以减少桩体的变形及受力。因此, 在群桩分析中应该考虑群桩中的“被动桩”与土体的相互作用。

本文基于差分法以及 Mindlin 解分析群桩的遮拦效应。首先分析两根桩模型的桩桩相互作用, 然后将其扩展至整个桩群。

考察如图 1 所示的桩 1、桩 2, 分别等矩划分为 n 个单元, 每段桩长 h , 桩 1 某深度处的水平自由土体位移为 $y_{s1,j}$, 桩 1 的最终位移为 $y_{p1,j}$, 桩 1 处土体的约束位移即桩对土的遮挡为

$$\Delta v_{1,j} = v_{s1,j} - v_{p1,j}. \quad (17)$$

由于桩-土-桩的相互作用, 桩 1 的 j 节点处土体约束位移对桩 2 的 i 节点处土体产生的影响位移为

$$y_{s21,ij} = \zeta_{21,ij} \Delta v_{1,j} = \zeta_{21,ij} (y_{s1,j} - y_{p1,j}), \quad (18)$$

式中, $\zeta_{21,ij}$ 为土体位移传递系数, 本文采用 Mindlin 解简化分析土体位移传递系数。

基于主动桩理论, 假设桩 1 的 j 节点处土体水平位移为 $y_{1,j}$, 由 Winkler 地基模型假定, 土体受到的水平抗力为 $k_g dy_{1,j}h$, 根据 Mindlin 解, 桩 2 任意 i 节点处的传递土体位移为

$$y_{2,j} = \frac{y_{1,j} k_{zj} dh}{16\pi G(1-\nu_s)} \left\{ \frac{3-4\nu_s}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{x^2}{R_1^3} + \frac{(3-4\nu_s)x^2}{R_2^3} - \frac{2z_i z_j}{R_2^3} \left(1 - \frac{3x^2}{R_2^2} \right) + \frac{4(1-\nu_s)(1-2\nu_s)}{R_2 + z_i + z_j} \left(1 - \frac{x^2}{R_2(R_2 + z_i + z_j)} \right) \right\}, \quad (19)$$

式中, $R_1^2 = s^2 + (z_j - z_i)^2$, $R_2^2 = s^2 + (z_j + z_i)^2$, s 为两桩间的直接距离, z_i 和 z_j 分别为两节点的埋深, x 为两桩间沿土体位移方向的距离, 详见图 1。

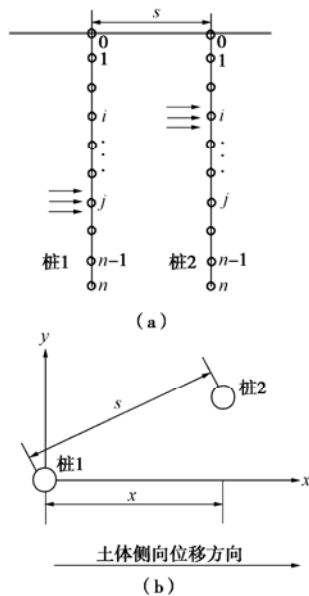


图 1 两根桩的计算模型

Fig. 1 Computation model for two passive piles

从而水平土体位移影响系数可以表示为

$$\zeta_{21,ij} = \frac{y_{2,ij}}{y_{1,j}} = \frac{k_{zj} dh}{16\pi G(1-\nu_s)} \left\{ \frac{3-4\nu_s}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{x^2}{R_1^3} + \frac{(3-4\nu_s)x^2}{R_2^3} - \frac{2z_i z_j}{R_2^3} \left(1 - \frac{3x^2}{R_2^2} \right) \right\}.$$

$$[\zeta_{21}] = \begin{bmatrix} \zeta_{21,00} & \zeta_{21,01} & \cdots & \zeta_{21,0i} & \cdots & \zeta_{21,0(n-1)} & \zeta_{21,0n} \\ \zeta_{21,10} & \zeta_{21,11} & \cdots & \zeta_{21,1i} & \cdots & \zeta_{21,1(n-1)} & \zeta_{21,1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \zeta_{21,i0} & \zeta_{21,i1} & \cdots & \zeta_{21,ii} & \cdots & \zeta_{21,i(n-1)} & \zeta_{21,in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \zeta_{21,(n-1)0} & \zeta_{21,(n-1)1} & \cdots & \zeta_{21,(n-1)i} & \cdots & \zeta_{21,(n-1)(n-1)} & \zeta_{21,(n-1)n} \\ \zeta_{21,n0} & \zeta_{21,n1} & \cdots & \zeta_{21,ni} & \cdots & \zeta_{21,n(n-1)} & \zeta_{21,nn} \end{bmatrix}. \quad (21)$$

因桩 1 的存在, 桩 2 的水平遮拦位移微分方程为

$$\frac{d^4 y_{p21}}{dz^4} + 4\lambda^4 [y_{p21} - y_{s21}] = 0, \quad (22)$$

式中, y_{p21} 表示由于桩 1 的遮拦效应引起的桩 2 水平遮拦位移, 考虑到解的一致性, y_{s21} 按负值取。

式 (22) 采用差分方法求解时的边界条件为桩顶自由无外力, 其差分格式:

$$y_{n21,j-2} - 4y_{n21,j-1} + (6 + 4\lambda_i^4 h^4) y_{n21,j} - 4y_{n21,j+1} + y_{n21,j+2} = 4\lambda_i^4 h^4 \sum_{j=0}^n \zeta_{21,ij} \Delta y_{1,j}, \quad (23)$$

从而得到位移差分矩阵方程:

$$[K_p] \{y_{p21}\} = [K_s][\zeta_{21}]\{\Delta y_1\}. \quad (24)$$

若桩 1 的 j 节点处土体已经达到极限土压力, 则 j 节点的约束位移为

$$\Delta y_{1,j} = \frac{p_{u,j}}{k_{z,j}}, \quad (25)$$

从而得到由于桩 1 的遮拦效应引起的桩 2 水平遮拦位移为

$$\{y_{p21}\} = [K_p]^{-1} [K_s][\zeta_{21}]\{\Delta y_1\}. \quad (26)$$

1.4 群桩的计算方法

假设被动群桩桩数为 n , 则群桩中某单桩 i 的位移应由两部分组成: ①因桩位处土体自由场位移 $\{y_{si}\}$ 引起的桩基附加位移 $\{y_{pi}\}$; ②由于被动群桩中的桩 j 对其影响而引起的遮拦位移 $\{y_{pj}\}$ 。下标 ij 表示第 j 根桩对第 i 根桩的影响。

于是第 i 根桩水平位移可表示为

$$\{y_{pi}\} = \sum_{j=1}^n \{y_{pij}\}. \quad (27)$$

2 分析方法的验证

$\nu_p = 0.5$, 刚性承台。近桩距隧道垂直轴线 4.5 m, 远桩为 6.9 m。隧道中心线距地表 20 m, 隧道直径 6 m, 地层损失比 $\varepsilon = 1\%$ 。由于隧道开挖时桩顶部分位移较小, 沿桩身土体均没有达到极限土压力, 故算例中按土体处于弹性阶段计算。图 3 为隧道开挖引起的自由场土体水平位移。图 4 为采用本文有限差分方法计算得到的近桩、远桩的弯矩与 GEPAN 程序计算结果的比较, 弯矩分布形状与边界元程序结果得到了较好的一致性。桩身最大弯矩出现在隧道中心线附近, 无论

是近桩还是远桩, 采用本文方法计算的单桩位移和弯矩与群桩计算结果相差不大, 仅在桩顶处由于约束条件不同有所差别, 与边界元方法计算结果较一致。这说明在隧道开挖对桩基影响的分析中, 桩基水平遮拦效应并不明显, 这也验证了 Loganathan 等^[22]得到的结论即隧道开挖对群桩的侧向影响可近似由单桩代替。

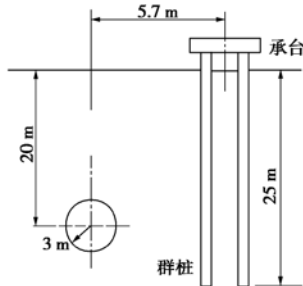


图2 隧道附近2×2承台群桩

Fig. 2 2×2 pile groups with caps adjacent to tunnels

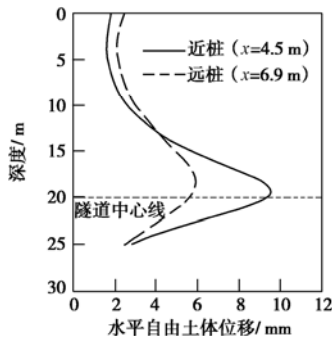


图3 隧道开挖引起的土体自由场位移 ($\varepsilon=1\%$)

Fig. 3 Free-field soil movement induced by excavation of tunnel

(2) 隧道开挖的工程实例分析

Lee 等^[23]曾经报道过一个隧道开挖引起桩基水平位移的工程实例如图5(a)所示, 隧道穿越一个由群桩基础支撑的七层楼房, 桩长20m, 桩径1.2m; 隧道中心线距地表约15m, 隧道纵轴线距最近桩轴线5.7m, 隧道分两阶段进行人工开挖, 第一阶段导洞直径4.5m, 第二阶段扩大洞直径8.25m, 两个阶段对应的地层损失比分别为1.5%和0.5%。现场勘察资料表明, 土层的排水抗剪强度 c_u 从土层顶部的50kPa线性增加到220kPa。根据文献^[10]提出的经验关系 $E_s = 400C_u$, 可以估算得到土体的弹性模量从20MPa线性增加到88MPa。桩身弹性模量 $E_p = 30000$ MPa。

图5(b)为采用本文有限差分法计算的隧道开挖引起的桩基最终水平位移, 并与实测数据进行了对比。由图可以看出采用本文方法计算的桩身水平位移分布规律与实测规律基本一致, 桩身最大水平位移发生在隧道中心线以上略高于实测值, 水平位移最大值略大于实测值。

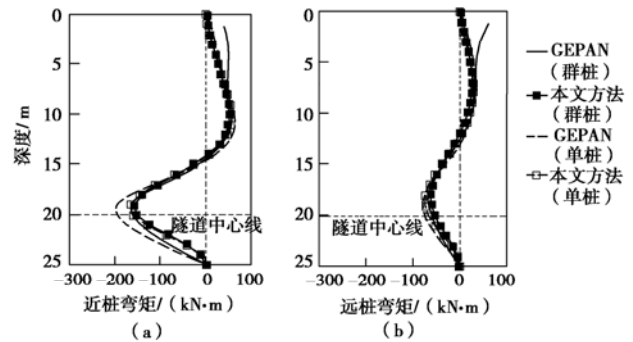


图4 隧道附近2×2承台群桩计算结果比较

Fig. 4 Comparison of results for 2×2 capped pile groups adjacent to tunneling

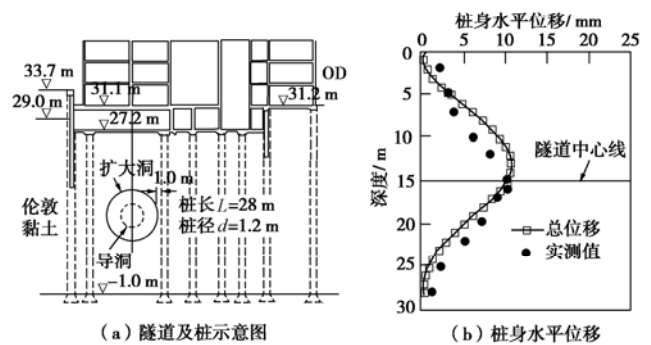


图5 隧道开挖工程实例分析

Fig. 5 Case study

2.2 基坑开挖情况

(1) 与边界元计算结果的对比

Chen 等^[9]报道过一个1×2被动群桩的模型试验, 并采用边界单元程序 PALLAS 进行了分析(图6所示)。桩体为完全弹性材料, 桩长1m, 直径25mm, 柔度系数 $E_p I_p = 3.6 \times 10^8$ kN·m², 实际有效桩长675mm, 土体弹性模量 $E_s = 0.025z$ (z 为深度mm), 泊松比 $\nu_s = 0.3$ 。土体极限土压力分别为近桩处 $6K_p \sigma'_v$ 与远桩处 $4.6K_p \sigma'_v$ 。自由土体位移轮廓为倒三角形, 土体表面位移60mm, 线性递减至350mm处的0mm。群桩桩顶自由, 两桩间距为2.5倍桩径。图6为采用本文有限差分法计算得到的近桩、远桩桩身弯矩与边界元程序 PALLAS 计算结果以及实测结果的比较。计算结果中弯矩的分布形状与桩身最大弯矩的位置均显示了较好的一致性。无论是近桩还是远桩, 本文方法预测的最大弯矩值与实测值以及边界元程序相比都偏于保守, 但相差不大。

(2) 与离心试验结果比较

Leung 等^[24]应用离心机模型试验, 研究了粉砂中无支撑基坑开挖对群桩的影响。本文选用2×2群桩的情况进行验证。近桩、远桩分别距离基坑围护3, 5m(见图7)。土体弹性模量 $E_s = 6z$, 泊松比 $\nu_s = 0.49$ 。

桩基为弹性体, 柔度系数 $EI = 220 \times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$, 桩长 $L = 12.5 \text{ m}$, 桩径 $d = 0.63 \text{ m}$ 。桩位处自由土体位移(如图 8 所示)采用实测值。桩侧极限土压力为 $3K_p \sigma'_v$ 。

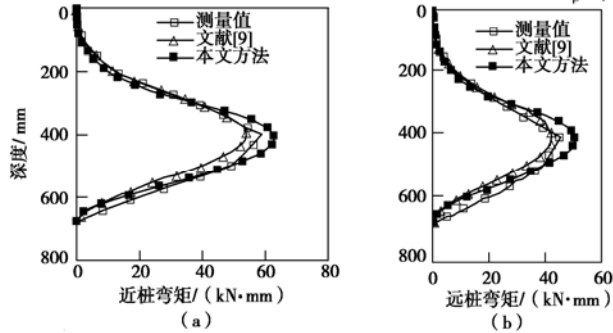


图 6 1×2 被动群桩计算结果比较

Fig. 6 Comparison of results for 1×2 passive pile group

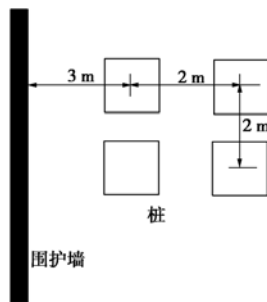


图 7 2×2 群桩离心实验模型

Fig. 7 Centrifuge model of pile groups

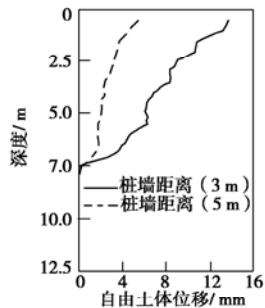


图 8 基坑开挖引起的土体位移

Fig. 8 Free-field soil movement induced by excavation

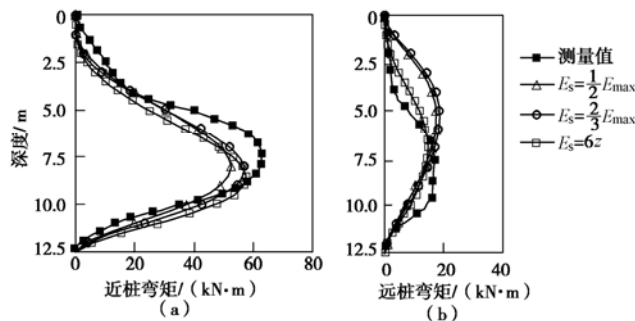


图 9 基坑开挖附近 2×2 自由群桩计算结果比较

Fig. 9 Comparison of results for 2×2 free-head pile groups adjacent to excavation

图 9, 10 分别给出了桩顶自由与桩顶有刚性承台两种情况下的本文有限差分法计算结果与离心模型试

验测试结果的对比。为了对比土体非均质性对分析结果的影响, 图 9, 10 同时给出了近似均质土体中

($E_s = \frac{1}{2} E_{\max}$ 和 $E_s = \frac{2}{3} E_{\max}$) 的计算结果。由图可以看

出考虑非均质土体的计算结果与试验的测量值更为接近, 但最大弯距的位置仍有一定的误差。笔者认为这是由于基坑开挖时, 相比隧道开挖, 桩顶土体位移较大, 此时桩侧主动土体部分与桩分离, 而本文的分析方法没有考虑该因素, 这是需要进一步改进的。

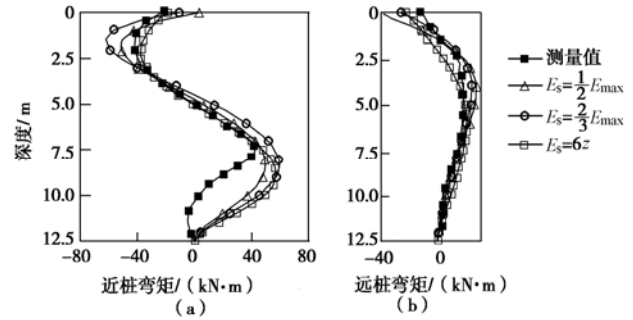


图 10 基坑开挖附近 2×2 承台群桩计算结果比较

Fig. 10 Comparison of results for 2×2 capped pile groups adjacent to excavation

3 结 语

基于 Winkler 地基模型, 提出了在地下工程开挖条件下非均质地基中被动群桩的两阶段分析方法: ①第一阶段通过简化的解析方法或实测得到自由土体位移; ②第二阶段将自由土体位移施加于桩, 运用有限差分法计算单桩附加位移和弯矩, 同时基于简化 Mindlin 解, 得到被动群桩遮拦位移, 进而叠加计算被动群桩的变形及受力。文章中与相关算例的对比均得到了较好的一致性。这种方法的优点在于意义明确, 计算简便, 易于被工程设计人员接受。不足之处在于忽略了桩中竖向轴力的影响, 但当桩身位移较小时, 本文方法还是可以满足计算精度要求的。

参考文献:

- [1] PAN J L, GOH A T C, WONG K S, et al. Three-dimensional analysis of single pile response to lateral soil movements[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2002, 26: 747 - 758.
- [2] MROUEH H, SHAHROUR I. Three-dimensional finite element analysis of the interaction between tunneling and pile foundations[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2002, 26: 217 - 230.
- [3] 杨 敏, 周洪波, 杨 焯. 基坑开挖与临近桩基相互作用分析[J]. 土木工程学报, 2005, 38(4): 91 - 96. (YANG Min,

- ZHOU Hong-bo, YANG Hua. Numerical analysis of pile response due to unsupported excavation-induced lateral soil movement[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, **38**(4): 91 - 96. (in Chinese))
- [4] LEE T K, NG C W W. Effects of advancing open face tunneling on an existing loaded pile[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2005, **131**(2): 193 - 201.
- [5] LEE C J, JACOBSZ S W. The influence of tunneling on adjacent piled foundations[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2006, **21**(3-4): 430.
- [6] MIAO L F, GOH A T C, WO Na K S, et al. Three-dimensional finite element analyses of passive pile behaviour[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2006, **30**: 599 - 619.
- [7] POULOS H G, DAVIS E H. Pile foundation analysis and design[M]. Florida: Pobert E Krieger Publishing Company, 1990.
- [8] 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.
- [9] CHEN L T, POULOS H G. Piles subjected to lateral soil movements[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1997, **123**(9): 802 - 811.
- [10] 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.
- [11] SURJADINATA J, et al. Combined finite and boundary-element analysis of the effects of tunneling on single piles[J]. International Journal of Geomechanics, 2006, **6**(5): 374 - 377.
- [12] XU K J, POULOS H G. 3-D elastic analysis of vertical pile subject to "passive" loadings[J]. Computers and Geotechnics, 2001, **28**: 349 - 375.
- [13] SURJADINATA J, HULL T S, CARTER Jp, et al. Combined finite- and boundary- element analysis of the effect of tunneling on single piles[J]. International Journal of Geomechanics, 2006, **6**(5): 374 - 377.
- [14] 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.
- [15] KITIYODOM P, MATSUMOTO T, KAWAGUCHI K. A simplified analysis method for piled raft foundations subjected to ground movements induced by tunneling[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2005, **29**: 1485 - 1507.
- [16] 栾茂田, 韩丽娟, 年延凯, 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-juan, NIAN Yan-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))
- [17] 李 早, 黄茂松. 隧道开挖对群桩竖向位移和内力影响分析[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(3): 398 - 402. (LI Zao, HUANG Mao-song. Analysis of settlement and internal forces of group pile due to tunneling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(3): 398 - 402. (in Chinese))
- [18] 黄茂松, 李 早, 杨 超. 隧道开挖条件下被动群桩遮拦效应分析[J]. 土木工程学报, 2007, **40**(6): 69 - 74. (HUANG Mao-song, LI Zao, YANG Chao. Analysis of the shielding effect of a pile group adjacent to tunneling[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, **40**(6): 69 - 74. (in Chinese))
- [19] LOGANATHAN N, POULOS H G. Analytical prediction for Tunneling-induced ground movement in clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1998, **124**(9): 846 - 856.
- [20] VESIC A B. Bending of beam resting on isotropic elastic soil[J]. Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, 1961, **87**(2): 35 - 53.
- [21] BROMS B B. Lateral resistance of piles in cohesive soils[J]. Journal of Soil Mechanics Foundation Division, ASCE, 1964, **90**(2): 27 - 63.
- [22] LOGANATHAN N, POULOS H G, XU K J. Ground and pile-group response due to tunneling[J]. Soils and Foundations, 2001, **41**(1): 57 - 67.
- [23] LEE R G, TURNER A J, WHITWORTH L J. Deformations caused by tunneling beneath a piled structure[C]// Proc 13th ICSMFE. New Delhi, 1994: 873 - 878.
- [24] LEUNG C F, LIM K J, 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.