

# 考虑工程桩存在对深基坑 变形性状影响的有限元分析

鲁宏<sup>1</sup>, 李小芳<sup>2</sup>

( 1 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院, 云南 昆明 650051; 2 天津市建筑设计院, 天津 300074)

**摘要:** 针对基坑计算中存在的问题, 分析工程桩的存在时基坑的变形性状, 并与不考虑工程桩的存在时的计算结果作比较. 考虑到用三维方法计算量非常大, 笔者采用平面有限元法. 采用轴向刚度等效的方法模拟基坑内存在的工程桩, 有限元分析表明, 工程桩的存在对基坑变形和支护结构内力产生影响. 对深基坑工程中工程桩对基坑变形、周围土体应力场和位移场的影响做较为深入的对比分析.

**关键词:** 深基坑; 变形性状; 工程桩; 有限元法

**中图分类号:** TU 476 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2006)05-0056-05

## A FEM Analysis of the Influence of the Foundation Pile on the Deformation Behavior of Deep Excavation

LU Hong<sup>1</sup>, LIXiao-fang<sup>2</sup>

(1. Kunming Hydroelectric Investigation Design & Research Institute

of China Hydropower Engineering Consulting Group Co., Kunming 650051, China

2 Tianjin Architecture Design Institute, Tianjin 300074, China)

**Abstract** Based on the problems in the analysis of excavation, deep excavation is analyzed considering foundation piles in retaining wall. And deformation behavior is compared with the behavior without foundation piles. Since 3-D analysis takes too much calculation, 2-D FEM is adopted. The method of equivalent axial stiffness is adopted to simulate foundation piles. The influence of foundation piles is analyzed deeply. FEM results show that the influence of foundation piles is obvious on the foundation pit deformation and internal force of strutted structure.

**Key words** deep excavation; deformation behavior; foundation pile; finite element method

### 0 引言

软土地区高层建筑基础大多采用桩基础的形式, 且在基坑开挖前, 工程桩先施工. 从大量的侧向位移实测资料来看, 坑底以下土体位移都较小, 其原因是工程桩的小位移起了很大作用. 同时, 基坑开挖对工程桩也有影响, 如在软土中可能使工程桩发生桩位偏移等. 在基坑平面或空间有限元分析中一般很少考虑工程桩对基坑变形的影响. 国内的王旭东等<sup>[1]</sup>用有限元法分析了水泥土挡土墙的基坑变形, 考虑了工程桩对地表沉降和坑底隆起的影响. 而对于地下连续墙的支护结构, 工程桩的存在对基坑开挖的影响没有见报道. 因此本文针对地下连续墙支护结构形式, 分析工程桩的存在对基坑开挖变形和内力的影响.

根据实际工程的需要和当前基坑工程的研究现状, 考虑到用三维方法计算量非常大, 本文拟采用平面有限元法, 对深基坑工程中工程桩对基坑变形的影响做较为深入的对比分析.

收稿日期: 2005-07-11

第一作者简介: 鲁宏 (1979~), 男, 硕士, 工程师. 主要研究方向: 地基与基础. E-mail: kyl@sina.com

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

## 1 有限元分析模型及假定

### 1.1 有限元分析基坑变形分析的基本假定

#### 1.1.1 平面应变假定

基坑开挖实际是三维问题. 二维和三维的分析结果相比较表明, 在反应基坑内外土体移动状况方面, 不仅形式相似而且数值接近, 误差小于 10%, 说明二维的假定可以满足工程计算的要求<sup>[2]</sup>. 如果墙体刚度越大, 支撑间距越小, 土体越软, 则深基坑的平面应变的假定越精确, 由于三维分析的复杂性及计算量非常大, 平面应变的假定也是合理的. 因此, 本文拟采用平面有限元法, 对考虑工程桩的基坑变形进行分析.

#### 1.1.2 开挖前工程桩、地连墙施工扰动影响不予考虑

初始应力场是非线性有限元计算的基础, 以后各个阶段的计算结果都是在此基础上计算. 地下连续墙的施工对土体的初始应力场有一定的影响. 在本文分析中, 不考虑工程桩、地连墙施工对土体扰动的影响.

### 1.2 有限元计算的模拟

#### 1.2.1 有限元计算模型

对于基坑平面有限元问题, 一般假定墙体为二维弹性体, 支撑 (或锚杆) 可简化为一维弹性体. 在平面问题中, 支撑一般简化为杆单元, 围护桩墙选用梁单元, 土体选用 6 节点或 15 节点三角形单元.

鉴于土的模量与围护结构的刚度差异较大, 土体和围护结构之间的接触面具有特殊的性质, 一般需在两者之间设接触单元. 本文采用 Goodman 接触单元<sup>[3]</sup>.

本文土体采用修正双曲线模型<sup>[4]</sup>, 即硬化土模型. 硬化土模型是模拟土的特性的高级模型, 对于 Mohr-Coulomb 模型, 应力极限状态用摩擦角  $\varphi$ 、粘聚力  $c$  和膨胀角  $\psi$  描述. 然而, 土体的刚度用三个不同的输入刚度表示更为准确: 三轴加载刚度  $E_{50}$ , 三轴卸载刚度  $E_{ur}$  和固结加载刚度  $E_{od}$ . 根据各种土的特性, 可取  $E_{ur} = 3E_{50}$ ,  $E_{od} = E_{50}$ . 与 Mohr-Coulomb 模型相比, 硬化土模型还考虑了刚度模量的应力依赖性, 这就表明土体的刚度随压力而增加.

在基坑工程中, 考虑工程桩的计算采用等效的二维系统来代替三维系统<sup>[3]</sup>, 如图 1 所示. 其基本思想是用降低了弹性模量的连续板桩, 来代替在长度方向每隔一定桩距布置的工程桩. 板桩厚度与原桩径相等, 假定它们的轴向刚度等效, 详见文献<sup>[3]</sup>. 在平面变形问题的有限元计算中, 用连续的板桩代替工程桩, 仅仅是桩的弹性模量用  $E'$ , 与实际情况很接近.

#### 1.2.2 基坑开挖过程的模拟

基坑的开挖过程就是基坑内土体分阶段连续卸荷的过程, 基坑内土体卸荷将引起土体和支撑系统中应力和位移改变. 开挖的有限元模拟就是模拟分阶段卸荷过程.

在有限元分析中, 首先确定天然状态下各个单元的初始应力场和初始位移场. 将分阶段开挖的土体分为若干土层单元, 计算挖去的一层土单元的开挖荷载, 再分析计算开挖荷载作用下各单元的应力变化和位移变化, 则第一次开挖完成的应力场和位移场为初始应力场和初始位移场与相应的应力变化和位移变化的叠加, 第二次开挖的应力场和位移场依此类推.

## 2 考虑工程桩对基坑变形影响的有限元分析

### 2.1 有限元计算模型

本文采用有限元方法分析了多个算例, 以下具体列出了其中一个典型的算例, 对该算例进行了详细的分析, 其它算例与该算例类似, 不再赘述.

基坑开挖长度  $L = 60\text{m}$ , 宽度  $B = 40\text{m}$ , 开挖深度  $H = 12\text{m}$ , 采用地下连续墙支护结构, 墙体深度  $h = 24\text{m}$ , 厚度  $t = 0.7\text{m}$ , 考虑混凝土地下墙体受力后开裂, 刚度将减小, 取折减后弹性模量  $E = 2.5 \times 10^7 \text{ kPa}$  泊

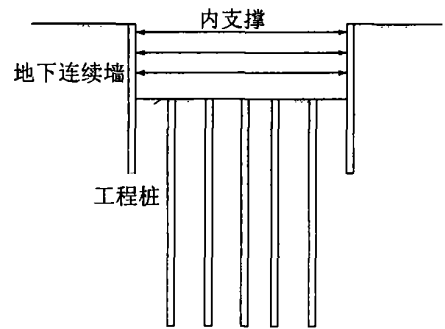


图1 有工程桩的基坑示意图  
Fig. 1 Foundation pit with pile

松比  $\nu=0.18$  重度为  $25 \text{ kN/m}^3$ ; 采用两道内支撑, 第一道支撑截面  $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ , 第二道支撑截面  $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ , 两道支撑水平间距均为  $L_s=5.0 \text{ m}$ ,  $E=1.8 \times 10^7 \text{ kPa}$ ,  $\nu=0.18$  地下水位情况: 坑内在开挖前水位降至坑底处, 即标高  $-12.00 \text{ m}$  处. 不考虑地面超载. 土质分布情况及计算参数见表 1.

本算例的工程桩为灌注桩, 截面尺寸为  $\Phi 800 \text{ mm}$ , 桩长  $L_p=40 \text{ m}$ , 桩间距  $S=4 \text{ m}$ , 桩的弹性模量  $E=2.4 \times 10^7 \text{ kPa}$  泊松比  $\mu=0.18$  桩的重度为  $25 \text{ kN/m}^3$ . 按轴向总刚度等效方法折算后, 板桩的弹性模量  $E'=0.16 E=3.84 \times 10^6 \text{ kPa}$   $\mu=0.20$ , 宽度为  $0.8 \text{ m}$ , 纵向长度为  $60 \text{ m}$ , 即为基坑长度.

采用平面有限元法计算, 分为不考虑工程桩的存在和考虑工程桩两种情况. 有限元计算模型如图 1 所示. 为了便于对比分析工程桩存在对基坑变形的影响, 不考虑工程桩时和考虑工程桩时的算例取相同的计算条件. 土体的本构模型采用修正双曲线模型, 其计算参数见表 1. 地连墙与土体之间采用 Goodman 接触面单元模拟两者之间的相互作用.

表 1 土体参数

Tab 1 Soil parameters

土名	厚度 /m	$\nu$ / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	$C$ /kPa	$\Phi$ /( $^\circ$ )	$E_{50}^{rd}$ / $\text{MN} \cdot \text{m}^{-2}$	$E_{oed}^{rd}$ / $\text{MN} \cdot \text{m}^{-2}$	$E_{ur}^{rd}$ / $\text{MN} \cdot \text{m}^{-2}$	$m$	$R_f$
土体 1	45	19(17)	22	19	6.0	6.0	18	0.60	0.90
土体 2	15	20(17)	1.0	38	12	12	36	0.70	0.90

注: 土体重度  $\nu$  括号前面的值是饱和重度, 括号内的值是非饱和重度.

### 2 计算结果分析

分为有工程桩和无工程桩两种情况进行有限元计算和对比分析, 计算结果如下: 图 2 为开挖结束时墙体沿深度方向水平位移分布. 由图 2 可以看出, 在坑内无工程桩时, 墙体最大侧向位移出现在坑底面以下  $1 \sim 2 \text{ m}$  处, 基坑墙体位移中部相对较大, 而两端相对较小; 在坑内有工程桩时, 墙体最大侧向位移出现在坑底面以上  $1 \sim 2 \text{ m}$  处, 基坑墙体位移比不考虑工程桩时小.

通过算例的综合分析比较, 有工程桩时的地连墙水平位移比无工程桩时有明显减小, 其中最大水平位移减少  $10\% \sim 20\%$  左右.

由图 3 可知, 基坑有工程桩存在时, 沉降曲线为凹槽形, 坑外最大地面沉降在距基坑边约  $10 \text{ m}$  处, 约为  $1.6 \text{ cm}$ ; 基坑无工程桩存在时, 沉降曲线为凹槽形, 坑外最大地面沉降在距基坑边约  $8 \sim 10 \text{ m}$  处, 为  $2.4 \text{ cm}$ . 有工程桩时的地面沉降量小于无工程桩时的沉降量.

由图 4 可知, 基坑有工程桩存在时, 坑底隆起曲线为波纹形, 波谷处是工程桩所在的位置, 基坑底面最大隆起量约为  $13 \text{ cm}$ ; 基坑无工程桩存在时, 隆起曲线为凸形, 基坑底面最大隆起量为  $28 \text{ cm}$ . 这就说明基坑中有工程桩时, 能显著减小基坑底面隆起. 通过算例综合分析比较, 有工程桩时基坑底面隆起比无工程桩时减少  $20\% \sim 50\%$  左右.

由图 5 可知, 在坑内无工程桩时, 墙体最大弯矩出现在基坑底面附近; 支撑对墙体弯矩有削弱的作用, 基坑开挖面以下墙体弯矩

表 2 基坑开挖步骤

Tab 2 Excavation steps

工况	施工阶段	分部开挖	基坑	支撑情况
		深度 /m	深度 /m	
1	第一次开挖	4	-4	
2	加第一道支撑	4	-4	标高 $-3.000 \text{ m}$ 处
3	第二次开挖	4	-8	中心标高 $-4.75 \text{ m}$ 处
4	加第二道支撑	4	-8	标高 $-7.000 \text{ m}$ 处
5	第三次开挖	4	-12	

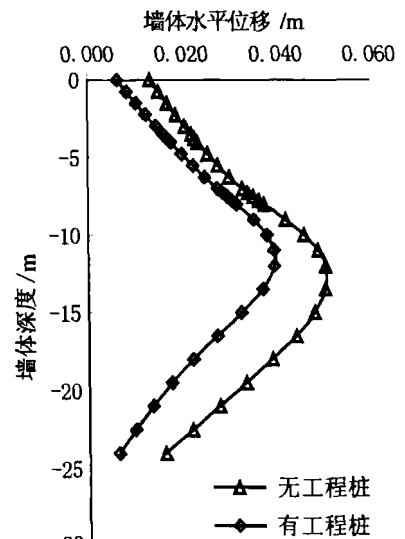


图2 基坑开挖结束时墙体水平位移

Fig. 2 Distribution of wall deformations

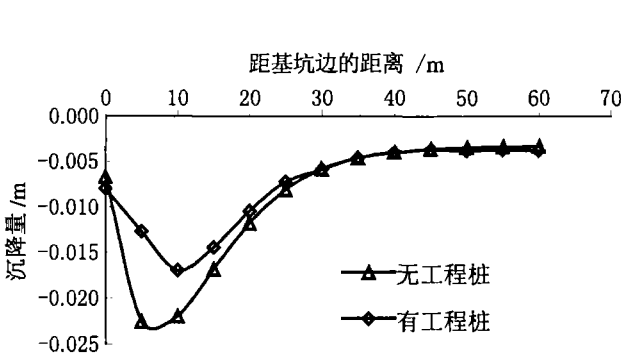


图3 基坑开挖结束时坑外地地面沉降

Fig. 3 Distribution of surface ground settlement

逐渐减小, 墙底附近没有反弯点出现. 在坑内有工程桩时, 墙体最大弯矩出现在基坑底面附近, 坑底以下墙体出现反弯点, 该反弯点以下的弯矩为墙底锚固弯矩. 可见, 由于工程桩对基坑开挖面以下被动区土体起到加固的作用, 增强了对墙体底部的约束作用, 致使墙体底部出现锚固弯矩, 墙体最大弯矩比无工程桩时的弯矩大.

### 3 基坑开挖对工程桩的影响分析

在基坑内有工程桩时, 工程桩对基坑的变形产生影响. 同时, 土体开挖对工程桩也将产生影响. 有限元分析表明, 基坑开挖将引起基坑底面以下及基坑外一定范围内土体产生位移, 基坑底面以下的土体产生向上的位移, 表现为坑底隆起; 基坑开挖外土体产生向基坑开挖方向位移, 使得基坑支护结构产生向基坑内位移, 基坑外地层移动.

基坑内有工程桩时, 由于工程桩与土相互作用, 将阻碍桩间土一定范围内位移, 即基坑底面隆起. 在桩与桩中间的部位受桩土相互作用影响较小, 土体位移值较大, 如图 6 图 7 所示.

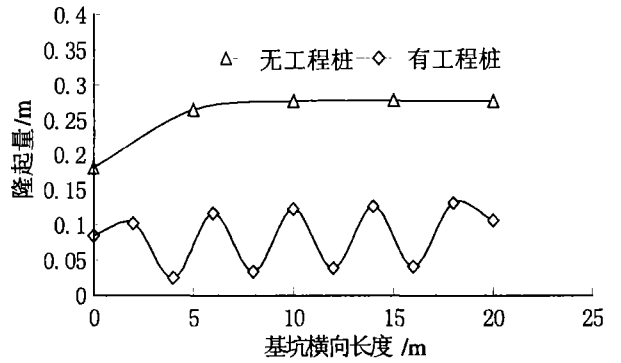


图4 基坑开挖结束时坑底隆起

Fig. 4 Distribution of heave excavation bottom

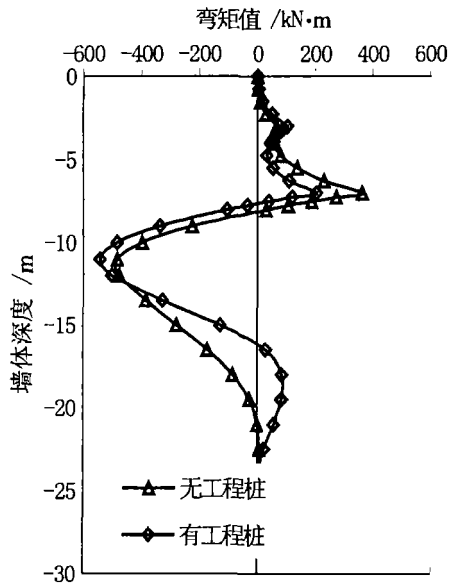


图5 基坑开挖结束时墙体弯矩图

Fig. 5 Distribution of wall moment

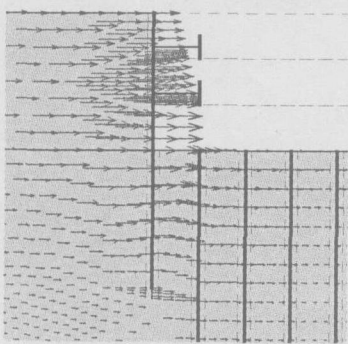


图6 开挖结束时基坑的水平位移场

Fig. 6 Distribution of horizontal deformation

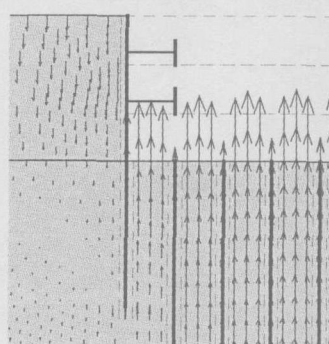


图7 开挖结束时基坑的竖向位移场

Fig. 7 Distribution of vertical deformation

基坑开挖结束时坑内工程桩桩身水平位移在靠近基坑开挖边沿, 桩顶水平位移较大; 在基坑中心, 桩顶水平位移减小, 如表 3 所示. 桩身水平位移主要分布在桩顶以下 10 m 范围内, 桩顶 10 m 以下桩身位移很小, 可以不计. 工程桩在基坑开挖结束后都有不同程度的向上竖向位移, 在靠近基坑开挖边沿, 桩顶竖向

位移较小;在基坑中心,桩顶水平位移较大,见表 4

#### 4 结 语

本文采用轴向刚度等效的方法模拟基坑内存在的工程桩,有限元分析表明:

1) 在坑内有工程桩时,基坑墙体位移在深度范围内均有所减小.有工程桩时地连墙水平位移比无工程桩时有明显减小,其中最大水平位移减少 10% ~ 20% 左右.基坑有工程桩存在时地面沉降量小于无工程桩时沉降量.

基坑中有工程桩时,能显著减小基坑底面隆起.通过算例的综合分析得知,有工程桩时基坑底面隆起比无工程桩时有显著减少.

2) 工程桩存在对基坑开挖面以下被动区土体起到加固的作用,致使墙体底部出现锚固弯矩,墙体最大弯矩比无工程桩时大 5% ~ 10% 左右.

3) 基坑开挖也相应地对坑内工程桩产生一定影响.软土地基基坑内的工程桩在基坑开挖时将产生变位,桩身位移主要在桩顶以下一定范围内.在基坑开挖边沿部分工程桩水平位移较大,竖向位移较小;在基坑开挖的中心部位,工程桩水平位移较小,竖向位移较大.

基于以上分析,如下问题有待进一步研究:

1) 在条件允许的情况下,可考虑采用三维空间有限元法,分析工程桩对软土地区基坑开挖变形的影响,更好地指导基坑设计和施工.

2) 在对大量工程实例分析和理论分析的基础上,找出更合理、考虑工程桩简化计算模型和分析方法.

#### 参 考 文 献:

- [1] 王旭东,黄力平. 基坑开挖中水泥土挡墙的变形分析[J]. 南京建筑工程学院学报, 1994, 28(1): 25-30
- [2] 刘建航,侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [3] 钱家欢,殷宗泽. 土工数值分析[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991.
- [4] 朱百里,沈珠江. 计算土力学[M]. 上海: 上海科技出版社, 1990.
- [5] 应宏伟,谢新宇. 软土深基坑开挖有限元分析[J]. 建筑结构学报, 1999, 20(4): 59-64.
- [6] 曾国熙,潘秋元,胡一峰. 软粘土地基基坑开挖形状的研究[J]. 岩土工程学报, 1988, 10(6): 13-22.

表 3 基坑开挖结束时工程桩的桩顶水平位移

Tab 3 Horizontal deformation of top pile

桩号	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>
桩顶水平位移 /mm	20.2	14.3	10.1	7.7

注: 1<sup>#</sup>至 4<sup>#</sup>桩距支护墙的距离依次增大.

表 4 基坑开挖结束时工程桩的桩身竖向位移

Tab 4 Vertical deformation of pile

桩号	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>
桩顶竖向位移 /mm	23.8	33.4	38.1	41.3

注: 1<sup>#</sup>至 4<sup>#</sup>桩距支护墙的距离依次增大.