

# 杭州地铁秋涛路车站深基坑支护结构性状分析

杨有海<sup>1</sup>, 武进广<sup>2</sup>

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 中国中铁七局集团有限公司, 河南 郑州 450016)

**摘要:** 深基坑支护结构的变形是影响深基坑变形的重要因素。针对杭州地铁秋涛路车站深基坑支护结构, 采用弹性地基梁杆系有限元分析方法, 首先以基坑标准段为工程实例进行计算分析, 通过计算结果与实测数据的对比分析, 验证该计算模型及计算方法的合理性。然后针对秋涛路车站砂质粉土地层, 讨论支护结构刚度、基坑开挖与支撑顺序、支撑排列方式和坑内土体加固深度等设计、施工因素对支护结构变形和内力的影响。分析结果表明: 在保证桩体强度满足要求的情况下, 通常不宜通过增加桩体刚度来减小围护结构的变形; 多道支撑排列以基坑下部密和上部疏的方式较好; 施工中应采用“先撑后挖”的开挖方式; 坑内土体加固存在一个临界深度。最后对各个影响因素进行评价分析, 以期为有关的设计和施工部门提供参考。

**关键词:** 土力学; 地铁车站; 深基坑; 支护结构; 影响因素

**中图分类号:** TU 473

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2008)增 2 - 3386 - 07

## ANALYSIS OF RETAINING STRUCTURES FOR DEEP FOUNDATION PIT OF QIUTAO ROAD STATION IN HANGZHOU METRO

YANG Youhai<sup>1</sup>, WU Jinguang<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. China Railway Seventh Group Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450016, China)

**Abstract:** The retaining structure deformation of the deep foundation pit is an important factor for the effect on the deformation of deep foundation pit. In view of the retaining structure of deep foundation pit for Qiutao Road Station in Hangzhou Metro, the finite element method of elastic foundation beam bar system is adopted. Firstly, the computation analysis to the standard section as a project example of the deep foundation pit is carried out through the contrastive analysis of the computed results and measured data, and then the computation model and the computation method are confirmed. Finally, in view of the silty sand soil stratum of the Qiutao Road Station, the rigidity of the retaining structure, the order of the excavating and the supporting of the deep foundation pit, the arrangement mode of the supports, and the improvement soils depth and other design and construction factors on effect of the deformation and internal force of the retaining structure are all discussed. The analytical results indicates that the pile intensity satisfies the requirements, usually it is not suitable through increasing the pile rigidity to reduce the deformation of the retaining structure. For the multi-support arrangement, the way that the supports are dense in the excavation upside and the supports are sparse in the excavation lower part is optimized. In the construction, the first supporting and then excavating excavation way should be adopted. There is a critical depth for the improvement soils. The appraisal analysis to each influencing factor is adopted to provide the reference to the related design and the construction.

**收稿日期:** 2007 - 09 - 12; **修回日期:** 2007 - 12 - 27

**作者简介:** 杨有海(1963 -), 男, 1990 年于兰州铁道学院岩土工程专业获硕士学位, 现任教授, 主要从事地基加固与边坡防护技术方面的教学与研究。E-mail: yangyh@mail.lzjtu.cn

**Key words:** soil mechanics; metro station; deep foundation pit; retaining structure; influential factor

# 1 引言

随着我国轨道交通的飞速发展以及城市地铁的不断兴建, 地铁车站基坑的开挖深度愈来愈深。由于地铁一般都是穿过城市繁华地段, 深基坑的支护不仅要保证基坑内能正常安全作业, 而且要防止基底及坑外土体产生过量移动, 确保基坑附近的建筑、道路、管线的正常运行<sup>[1]</sup>。这对地铁车站深基坑工程的设计和施工提出了更高的要求, 基坑开挖和支护问题已经成为建筑工程界的热点问题之一。

深基坑工程作为一种临时的支挡结构, 如果片面追求安全性, 按照永久结构来进行设计, 其浪费也是惊人的, 所以在深基坑的设计过程中, 要统筹兼顾, 在确保基坑工程安全稳定和变形得到控制的前提下, 又要满足其经济合理性的要求。因此, 正确认识基坑工程的变形和内力的影响因素, 对基坑工程的设计和施工有着重要的意义。

本文对杭州地铁秋涛路车站深基坑开挖进行了监测, 并采用数值分析方法进行了对比分析。然后以该深基坑工程为算例, 讨论了围护墙体刚度、支撑排列方式、基坑开挖与支撑顺序和被动区土体加固深度对支护结构变形和内力的影响, 可为后续及类似基坑工程的设计和施工提供参考。

# 2 计算原理及过程

目前, 在基坑工程支护结构设计和施工中, 弹性地基梁法简便实用, 被规程<sup>[2]</sup>所推荐。因此, 本文采用弹性地基梁杆系有限元法分析地铁车站深基坑支护结构性状及其影响因素。

## 2.1 弹性地基梁计算模型

弹性地基梁法就是取单位宽度的支护结构, 如把地下连续墙和支护排桩视为一竖置的弹性地基梁, 开挖面以上的土体卸除, 支撑简化为与截面积、弹性模量、计算长度等有关的二力杆弹簧, 其地基梁模型见图 1。

作用于弹性地基梁上的水土压力与土层分布和地下水位有关。当采用水土合算时, 按照朗肯土压力理论计算主动侧的水土压力。当采用水土分算法

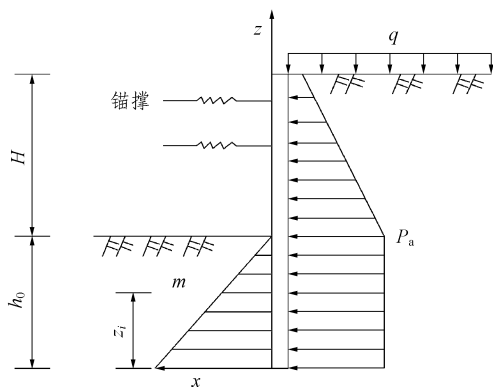


图 1 基坑弹性地基梁模型

Fig.1 Elastic foundation beam model of foundation pit

时, 也是按照朗肯理论计算土体压力, 然后叠加水压力即得主动侧的水土压力。开挖面以下主动区土体压力采用矩形分布模式来计算, 被动区的土体压力则采用规程所推荐的“m”法进行计算<sup>[3, 4]</sup>, 即

$$\sigma = m(h_0 - z_i)x_i \tag{1}$$

式中:  $x_i$  为计算点的水平位移,  $z_i$  为计算点到支护结构底部的距离,  $m$  为地基反力系数的比例系数。

对于支护结构一般采用弹性杆系有限元法, 把支护结构沿竖向划分为有限个梁单元, 为了计算简便, 支护结构的截面、荷载突变处、弹性地基梁床系数变化段及支撑或锚杆的作用点处, 均作为节点处理。则开挖面以上各单元的挠曲微分方程<sup>[5]</sup>可表示为

$$EI \frac{d^4 x_i}{dz_i^4} = e_a(z_i)b_s \quad (h_0 \leq z_i \leq H + h_0) \tag{2}$$

式中:  $EI$  为支护结构的抗弯刚度;  $e_a(z_i)$  为开挖面以上第  $i$  个单元桩侧主动土压力强度分布函数, 采用朗肯土压力理论计算;  $b_s$  为主动土压力的计算宽度, 排桩取桩中心距, 地下连续墙取单位宽度。

开挖面以下各单元的挠曲线微分方程<sup>[5]</sup>为

$$EI \frac{d^4 x_i}{dz_i^4} = e_{ah0}b_s + m(h_0 - z_i)x_i b_0 \quad (0 \leq z_i \leq h_0) \tag{3}$$

式中:  $e_{ah0}$  为开挖面以下支护结构矩形主动土压力强度分布函数;  $b_0$  为支护结构计算宽度, 排桩方形按  $b_0 = 1.5b + 0.5$  ( $b$  为桩截面边长), 圆形按  $b_0 = 0.9(1.5d + 0.5)$  确定( $d$  为桩截面直径), 确定的计算宽度不应大于排桩中心距, 地下连续墙取单位宽

度。

## 2.2 弹性地基梁杆系有限元计算方法

通常式(2), (3)仅对简单外荷载分布模式才能求得解析解, 而对设有锚撑、支挡结构作用荷载分布模式比较复杂的情况, 无法求得解析解, 但可以凭借弹性地基梁杆系有限单元数值计算方法进行求解。弹性地基梁杆系有限单元法分析挡土结构内力和变形的过程如下:

(1) 结构理想化。把挡土结构的各个组成部分, 根据其结构受力特性, 理想化为杆系单元, 即基底以上部分挡土结构简化为两端嵌固的梁单元、基底以下部分简化为 Winkler 弹性地基梁单元、锚撑简化为二力杆单元。

(2) 结构离散化。把挡土结构沿竖向划分成有限个单元, 每隔 1~2 m 划分一个单元。为计算方便, 尽可能将节点布置在挡土结构的截面、荷载突变处、弹性地基反力系数变化段及锚撑的作用点处, 各单元以边界上的节点相连接。

(3) 建立结构平衡方程。将各个单元的单元刚度矩阵经矩阵变换得到结构总刚度矩阵, 作用在结构节点上的荷载和节点位移之间的关系以结构总刚度矩阵来联系, 结构平衡方程为

$$[K] = \{\delta\} \{R\} \quad (4)$$

式中:  $[K]$  为结构总刚度矩阵,  $[\delta]$  为结构节点位移列阵,  $[R]$  为结构节点载荷列阵。梁单元、Winkler 弹性地基梁单元和杆单元的单元刚度矩阵可查阅相关研究<sup>[6]</sup>。

(4) 求解式(4)可得结构节点位移, 进而可求得单元内力。

## 3 工程实例

### 3.1 工程概况

杭州地铁一号线秋涛路车站横穿秋涛路与新开河, 与东城站路、婺江路方向一致。车站总长 259.6 m (含过渡线长 100.0 m), 车站宽度 18.9 m。秋涛路车站主体为地下双层岛式车站, 地下一层为站厅层, 地下二层为站台层, 有效站台长 100 m, 站台宽 10 m。整个车站建筑物由车站主体、出入口及风亭 3 个部分组成。共 6 个出口, 位于车站南北两侧; 车站设有 2 座风亭, 分别位于车站两端。车站采用

双层双跨箱形框架结构, 风道为双层箱型结构。车站顶板覆土埋深约 5.0 m, 车站主体结构底板最深处埋深 17.4 m, 坐落在②-6 砂质粉土及②-7 砂质粉土夹粉砂层, 地下水埋深 0.9~3.5 m。

### 3.2 模型参数

杭州市地铁车站结构底板埋深 17.4 m, 车站基坑围护结构采用  $\phi 1\ 000\ \text{mm}@750\ \text{mm}$  钻孔咬合灌注桩, 标准段桩长 33 m。车站标准段基坑从上到下设计为五道钢支撑, 钢支撑外径 609 mm, 第一、二道钢支撑管壁厚 12 mm, 分别在 -0.4 和 -4.3 m 处架设, 第三~五道钢支撑管壁厚 16 mm, 分别在 -7.8, -11.0 和 -14.2 m 处架设, 第一~五道钢支撑预加轴力分别为 120, 275, 460, 540 和 590 kN。采用的土压力模式是坑底以上采用朗肯土压力理论计算, 坑底以下土压力视为常数, 按水土分算法进行计算, 取地面超载  $q = 20\ \text{kPa}$ 。土层物理力学参数见表 1。

表 1 土层物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of soil layers

土层名称	层厚 /m	重度 /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	内摩擦角 /( $^{\circ}$ )	黏聚力 /kPa	$m$ /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-4}$ )
杂填土	2.40	18.0	8	0.6	360
砂质粉土	4.90	18.9	21	5.0	2 000
砂质粉土	3.50	19.2	23	4.0	4 000
砂质粉土	2.70	19.0	21	5.0	4 000
砂质粉土	2.25	19.3	27	5.0	4 000
砂质粉土	1.55	18.7	28	3.0	2 000

### 3.3 计算与实测结果对比分析

基坑标准段围护结构桩体水平位移计算与实测值曲线如图 2 所示, 由图可知, 围护结构桩体水平位移计算与实测值随深度的变化趋势基本相同, 最大位移实测值为 34.96 mm, 发生在 -16.0 m 处; 最大位移计算值为 32.79 mm, 发生在 -18.0 m 处, 表明实测值大于计算值, 其主要原因是: 地面存在着各种活荷载, 增加了作用在围护结构上的土压力; 支撑受到温度及施工因素的影响其轴力和预加轴力会有不同程度的损失; 被动区土弹簧刚度随时间的衰减所造成的。在桩顶位置由于冠梁和第一道支撑的作用, 桩体最大位移计算与实测值十分接近。

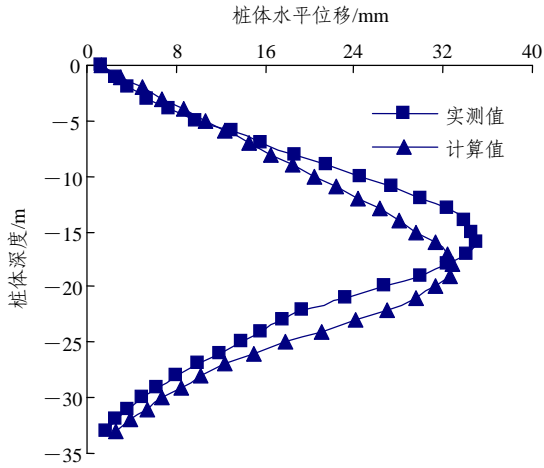


图 2 桩体水平位移计算与实测值曲线

Fig.2 Horizontal displacement calculated and measured curves of piles

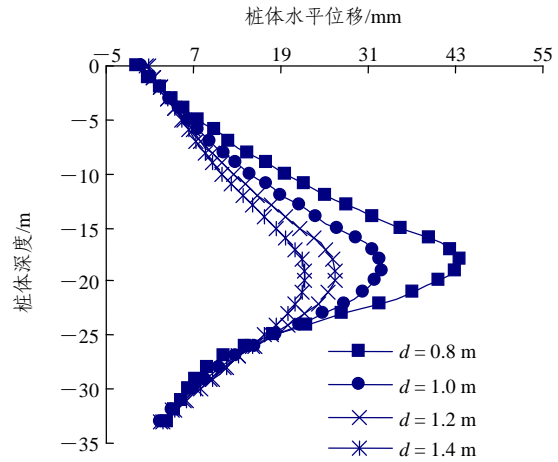


图 3 不同桩体直径时桩体水平位移图

Fig.3 Horizontal displacement of piles with different diameters

### 4 影响因素分析

影响基坑支护结构性状的因素有很多, 大体上可分为三类: 设计因素、施工因素和自然土质情况<sup>[7~13]</sup>。为进一步了解基坑支护结构性状, 以上述有限元模型为基础, 从数值分析的角度进一步研究围护墙体刚度、支撑排列方式、基坑开挖与支撑顺序和被动区土体加固深度等对支护结构弯矩、位移的影响。选取开挖到基坑底时桩身侧向变形和内力的计算结果进行分析。

#### 4.1 不同桩体刚度影响分析

刚度是影响咬合桩设计的主要参数, 当桩体材料不变时, 其刚度主要取决于桩径。为了研究桩体刚度变化对围护结构变形和内力的影响, 在原设计其他条件不变的情况下, 取咬合桩直径  $d$  分别为 0.8, 1.0, 1.2 和 1.4 m 四种情况进行模拟分析, 桩体水平位移和弯矩计算结果分别如图 3, 4 所示。桩体最大弯矩和最大应力变化量情况见表 2。其中,  $\Delta M_{\max}$ ,  $\Delta \sigma_{\max}$  分别为桩径从 0.8 m 增大到 1.0 m, 1.0 m 增大到 1.2 m, 1.2 m 增大到 1.4 m 时最大弯矩的增加百分比和最大应力的减小百分比(由于钻孔咬合桩是圆形截面, 因此取圆形截面进行计算分析)。

从图 3, 4 及表 2 可以看出, 随着桩体刚度的增大, 桩体的水平位移明显减小, 其中桩体最大水平位移减小较明显; 与此同时, 桩体的最大正弯矩(基坑开挖侧受拉为正)增大比较显著; 虽然桩体截面的增加往往会使桩体的最大应力减小, 但由表 2 可知, 桩体最大弯矩增加的幅度要比桩体最大应力减

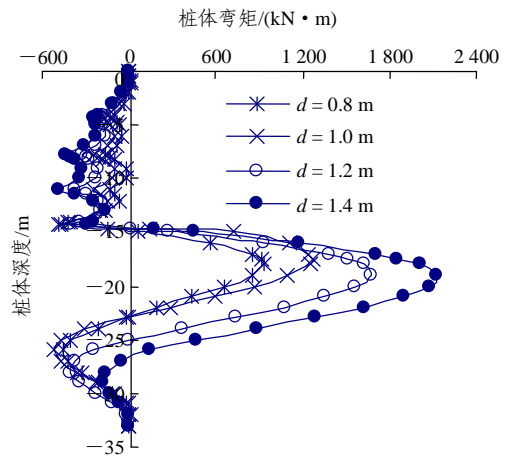


图 4 不同桩体直径时桩体弯矩图

Fig.4 Bending moments of piles with different diameters

表 2 桩体最大弯矩和应力变化量

Table 2 Maximum bending moment and stress variable quantity of piles

$d/m$	$M_{\max}/(kN \cdot m)$	$\sigma_{\max}/kPa$	$\Delta M_{\max}/\%$	$\Delta \sigma_{\max}/\%$
0.8	930.9	18 528.7	-	-
1.0	1 268.3	12 925.4	36.3	30.2
1.2	1 668.1	9 837.8	31.5	23.9
1.4	2 120.0	7 873.6	27.1	20.0

小的幅度要大。

由此可见, 增大墙体的刚度虽然可以比较有效地控制桩体最大的侧向位移, 但过大的刚度会因桩体最大正弯矩增大的幅度比桩体最大应力减小的幅度大而使受力不利, 而且通过增大桩体刚度的方法来改善桩体侧向变形的大小, 比较大的增加了工

程造价, 显然也是不经济的。因此, 在保证桩体强度满足要求的情况下, 通常不宜通过增加桩体刚度来减小围护结构的变形。

### 4.2 不同支撑排列方式影响分析

多道支撑的排列方式与基坑的变形和受力关系密切。本算例将五道支撑按照上密下疏和上疏下密 2 种方式进行排列, “上密下疏”时各道支撑标高分别为-0.4, -3.0, -6.0, -9.0 和-13.0 m, 上疏下密时各道支撑标高分别为-0.4, -4.3, -7.8, -11.0, -14.2 m, 其中基坑底标高均为-17.4 m, 开挖到基坑底时桩体水平位移和弯矩分别如图 5, 6 所示。

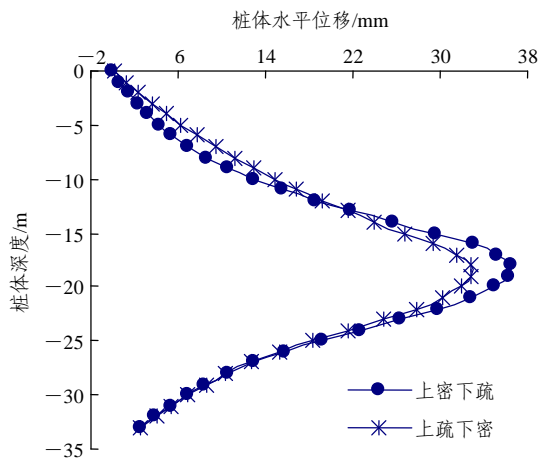


图 5 不同支撑排列方式时桩体水平位移

Fig.5 Horizontal displacements of piles with different tactic supports

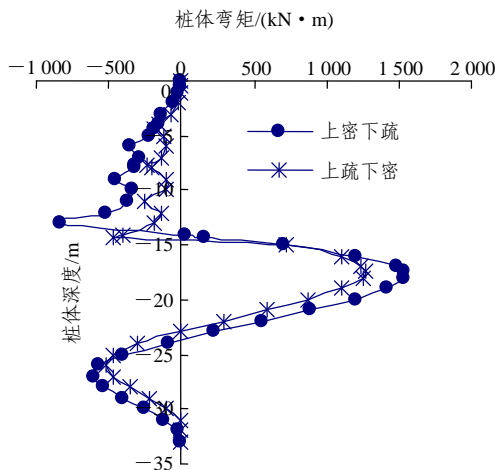


图 6 不同支撑排列方式时桩体弯矩

Fig.6 Bending moments of piles with different tactic supports

从图 5, 6 可以看出, 支撑以上疏下密的方式排列时比支撑以上密下疏的方式排列时桩体产生的最大位移减小较多, 桩体最大位移减小大约 10%; 同

时, 桩体最大正弯矩和最大负弯矩也减小较多。可见, 多道支撑排列以基坑下部密和上部疏的方式较好, 不但可以很好地控制基坑的变形, 而且对围护结构的受力更为有利。根据上述分析, 该车站西区基坑标准段在进行多道支撑优化设计时采用了上疏下密的支撑排列方式。

### 4.3 不同基坑开挖顺序影响分析

基坑开挖和支撑的顺序是影响支护结构变形和内力的因素, 在基坑施工开挖中, 有先撑后挖和先挖后撑两种开挖顺序, 2 种不同基坑开挖顺序时桩体水平位移和弯矩分别如图 7, 8 所示。

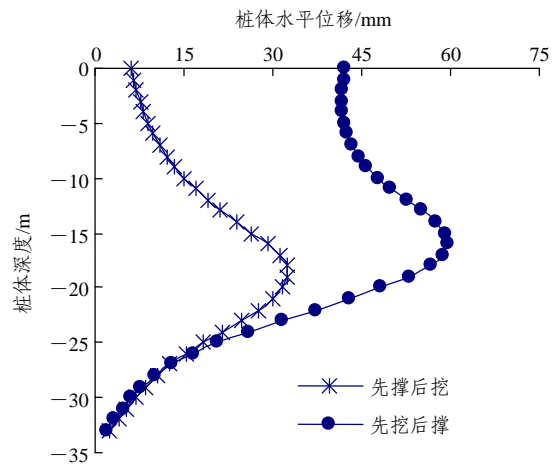


图 7 不同基坑开挖顺序时桩体水平位移

Fig.7 Horizontal displacements of piles with different excavation orders

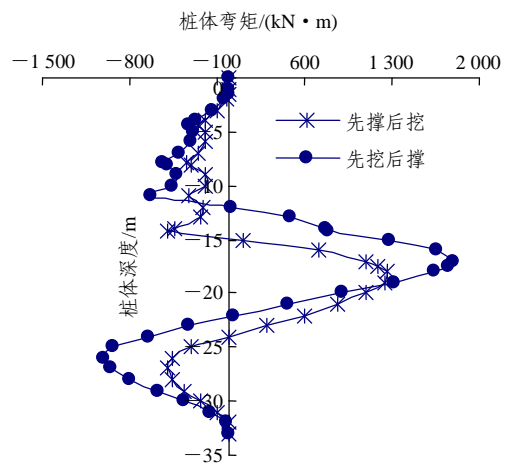


图 8 不同基坑开挖顺序时桩体弯矩

Fig.8 Bending moments of piles with different excavation orders

从图 7, 8 可以看出, 先挖后撑比先撑后挖的施工顺序桩体最大位移值增加较多, 增加约 80%, 主

要原因是先撑后挖的方式是桩在桩后支撑的约束下进行的卸载, 而先挖后撑的开挖方式是桩后的土体先卸载再对围护桩进行约束; 另外, 由于先挖后撑的施工方法头道支撑的安装晚了一个工况, 从而导致桩顶的水平位移明显增加, 由此可见及时安装头道支撑的重要性。同时, 先挖后撑比先撑后挖的施工方法引起的桩体弯矩增加很多, 因此在基坑施工中应该杜绝这种施工方法。

#### 4.4 不同土体加固深度影响分析

分析坑底未加固和加固深度  $h$  分别为 3, 5 和 9 m 时, 加固深度对基坑围护结构侧向位移的影响, 其计算结果如图 9, 10 所示。土体加固后的土体物理力学参数的增长以  $m$  值的增加来体现<sup>[14, 15]</sup>, 加固后土体  $m$  值取 6 000 kN/m<sup>4</sup>。

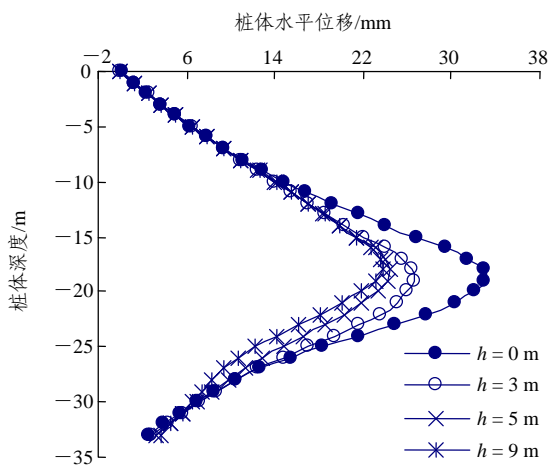


图 9 不同土体加固深度时桩体水平位移

Fig.9 Horizontal displacements of piles with different improvement soils depths

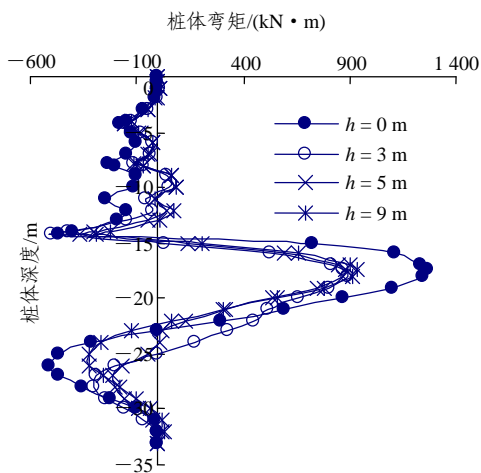


图 10 不同土体加固深度时桩身弯矩

Fig.10 Bending moments of piles with different improvement soils depths

从图 9, 10 可以看出, 在 5 道支撑下, 不论加固深度如何, 围护结构的位移由地表向下先增大后减少。随着加固深度的增加, 该段桩体的水平位移逐渐减小, 但对基坑最后一道支撑以上桩体的水平位移影响较小, 而且加固深度达到一定值(5 m)以后, 位移变化的幅度不大。同时, 加固深度在 0~3 m 变化时, 桩体弯矩减小比较明显。因此, 针对坑底加固深度而言, 要达到较高的性价比, 需要通过分析计算确定合理的加固深度。

## 5 结 论

本文基于弹性地基梁杆系有限元分析方法, 针对杭州地铁秋涛路车站深基坑支护结构进行了计算研究, 对不同参数的影响分析结果表明:

(1) 增大墙体刚度, 虽然可以比较有效的控制桩体最大侧向位移, 但过大的刚度会因桩体最大正弯矩增大的幅度比桩体最大应力减小的幅度大而使其受力不利, 而且比较大的增加了工程造价, 因此在保证桩体强度满足要求的情况下, 通常不宜通过增加桩体直径来减小基坑变形。

(2) 多道支撑排列以基坑下部密和上部疏的方式较好, 支撑按此方式排列桩体最大位移和最大弯矩都比较小, 而且由于基坑下部支撑密, 桩的入土深度可以相对较短, 不仅可以达到控制变形优化设计的目的, 而且可以降低成本, 减少投资。

(3) 通过对先挖后撑和先撑后挖两种施工工艺的对比可知, 采用先挖后撑的方法明显的增大了桩体的位移和弯矩, 因此在基坑施工中应该杜绝这种施工方法。

(4) 支护结构的侧向位移随加固深度的增大而减小, 但当加固深度达到一定值(5 m)以后, 位移变化的幅度不大, 即坑内加固体存在一个临界深度值。同时, 加固深度在 0~3 m 变化时, 桩体弯矩减小比较明显。

#### 参考文献(References):

[1] 赵占厂, 杨 虹, 谢永利. 金华大厦基坑工程支护系统的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1 219 - 1 222.(ZHAO Zhanchang, YANG Hong, XIE Yongli. Numerical analysis of excavation support system of Jinhua Building[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 1 219 - 1 222.(in

- Chinese))
- [2] 中华人民共和国行业标准编写组. JGJ 120 - 99 建筑基坑支护技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JGJ 120 - 99 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999.(in Chinese))
- [3] 杨敏, 冯永全, 王瑞祥. 深基坑支护结构的力学分析及与实测结果的比较[J]. 建筑结构学报, 1999, 20(2): 68 - 78.(YANG Min, FENG Yongquan, WANG Ruixiang. Analysis of flexible retaining structure of deep excavation and its comparison with observed results[J]. Journal of Building Structures, 1999, 20(2): 68 - 78.(in Chinese))
- [4] 肖武权, 冷伍明. 地铁深基坑支护结构位移动态预测[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(5): 84 - 88.(XIAO Wuquan, LENG Wuming. The dynamic displacement prediction for the retaining structure of the deep excavation pit in subway[J]. China Railway Science, 2004, 25(5): 84 - 88.(in Chinese))
- [5] 王旭东, 黄力平, 阮永平, 等. 基坑工程中地基土水平抗力比例系数  $m$  值的反分析[J]. 南京建筑工程学院学报, 1998, (2): 48 - 54.(WANG Xudong, HUANG Liping, RUAN Yongping, et al. Back-analyzing  $m$  value of subgrade reaction in excavation[J]. Journal of Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute, 1998, (2): 48 - 54.(in Chinese))
- [6] 陈忠汉, 黄书秩, 程丽萍. 深基坑工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.(CHEN Zhonghan, HUANG Shuzhi, CHENG Liping. Deep foundation pit engineering[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.(in Chinese))
- [7] 黄生根, 张希浩, 曹辉. 地基处理与基坑支护工程[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999.(HUANG Shenggen, ZHANG Xihao, CAO Hui. Ground treatment and bracing of foundation pit[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999.(in Chinese))
- [8] 高文华, 杨林德, 沈蒲生. 软土深基坑支护结构内力与变形时空效应的影响因素分析[J]. 土木工程学报, 2001, 34(5): 90 - 96.(GAO Wenhua, YANG Linde, SHEN Pusheng. Influencing factors analysis of the space-time effect on the timbering structure internal force and transmutation of soft clay deep foundation pit[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(5): 90 - 96.(in Chinese))
- [9] 何世秀, 吴刚刚, 朱志政, 等. 深基坑支护设计影响因素的有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增2): 5 478 - 5 484.(HE Shixiu, WU Ganggang, ZHU Zhizheng, et al. Finite element analysis of influence factors for timbering design of deep foundation pit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Supp.2): 5 478 - 5 484.(in Chinese))
- [10] 高文华, 沈蒲生, 杨林德. 基坑开挖中地层移动的影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1 153 - 1 157.(GAO Wenhua, SHEN Pusheng, YANG Linde. Influence factors on ground deformation during excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(8): 1 153 - 1 157.(in Chinese))
- [11] 应宏伟, 初振环. 带撑双排桩支护结构性状分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增): 1 450 - 1 454.(YING Hongwei, CHU Zhenhuan. Analysis of braced retaining structures with double-row piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(Supp.): 1 450 - 1 454.(in Chinese))
- [12] 郑刚, 颜志雄, 雷华阳, 等. 基坑开挖对临近桩基影响的实测及有限元数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5): 638 - 643.(ZHENG Gang, YAN Zhixiong, LEI Huayang, et al. Field observation and finite element numerical simulation analysis of effect on adjacent piles due to excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(5): 638 - 643.(in Chinese))
- [13] 杨敏, 周洪波, 杨桦. 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 Hongbo, 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))
- [14] 冯俊福, 俞建霖, 杨学林, 等. 考虑动态因素的深基坑开挖反演分析及预测[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 455 - 460.(FENG Junfu, YU Jianlin, YANG Xuelin, et al. Back analysis and prediction of deep pit foundation excavation considering dynamic factors[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(3): 455 - 460.(in Chinese))
- [15] 袁静, 刘兴旺. 基坑开挖过程中  $m$  参数的选取分析[J]. 工业建筑, 2000, 31(9): 46 - 51.(YUAN Jing, LIU Xingwang. Determination of coefficient  $m$  during excavation[J]. Industrial Construction, 2000, 31(9): 46 - 51.(in Chinese))