

# 软土地区深大基坑工程支护参数影响规律研究

张星磊<sup>1,2</sup>, 华昕若<sup>2</sup>, 马海龙<sup>1</sup>

<sup>1</sup>浙江理工大学建筑工程学院, 浙江 杭州

<sup>2</sup>嘉兴学院建筑工程学院, 浙江 嘉兴

收稿日期: 2023年10月20日; 录用日期: 2023年11月22日; 发布日期: 2023年11月29日

## 摘要

本文以嘉兴软土地区某中医院深大基坑工程为研究背景, 通过ABAQUS软件建立基坑三维模型, 与实际监测结果进行对比, 分析基坑开挖过程对支护桩水平位移的影响。同时, 通过改变混凝土支撑位置、截面尺寸以及支护桩桩径等因素分析支护参数对基坑开挖变形的影响规律进行研究。研究表明: 数值模拟计算结果与实际监测结果相接近, 验证了ABAQUS软件计算的准确性; 根据监测结果表明, 基坑变形受坑角效应的影响, 靠近坑角部分的支护桩水平位移较小; 在本基坑工程中, 基坑前三层最佳开挖深度为总开挖深度的0.2, 0.6, 0.8, 在每层开挖完成后, 在坑底架设混凝土支撑; 在原支撑横纵向截面尺寸0.2 m变化范围内, 支撑的截面尺寸对于支护桩水平位移影响较小; 当支护桩桩径在0.85 m到1.15 m之间时, 支护桩最大水平位移降低幅度与桩径变化大致成正比关系, 当支护桩桩径超过1.15 m时, 对支护桩水平位移降低幅度减弱, 不利于充分发挥桩体性能。

## 关键词

软土地区, 深大基坑, 水平位移, 支护参数, 数值模拟

# Research on the Influence Law of Support Parameters on Deep and Large Foundation Pit Engineering in Soft Soil Areas

Xinglei Zhang<sup>1,2</sup>, Xinruo Hua<sup>2</sup>, Hailong Ma<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang

<sup>2</sup>College of Civil Engineering and Architecture, Jiaxing University, Jiaxing Zhejiang

Received: Oct. 20<sup>th</sup>, 2023; accepted: Nov. 22<sup>nd</sup>, 2023; published: Nov. 29<sup>th</sup>, 2023

文章引用: 张星磊, 华昕若, 马海龙. 软土地区深大基坑工程支护参数影响规律研究[J]. 建模与仿真, 2023, 12(6): 5850-5859. DOI: 10.12677/mos.2023.126531

## Abstract

This article takes the deep and large foundation pit project of a traditional Chinese medicine hospital in the soft soil area of Jiaxing as the research background. A three-dimensional model of the foundation pit is established using ABAQUS software, and compared with the actual monitoring results to analyze the impact of the excavation process on the horizontal displacement of the support piles. At the same time, the influence of support parameters on the deformation of foundation pit excavation was studied by changing factors such as the position of concrete support, cross-sectional size, and diameter of support piles. The research results indicate that the numerical simulation calculation results are close to the actual monitoring results, verifying the accuracy of ABAQUS software calculation; According to the monitoring results, the deformation of the foundation pit is influenced by the pit angle effect, and the horizontal displacement of the support piles near the pit angle is relatively small; In this foundation pit project, the optimal excavation depth for the first three layers of the foundation pit is 0.2, 0.6, and 0.8 of the total excavation depth. After each layer of excavation is completed, concrete support is erected at the bottom of the pit; Within the range of 0.2 m variation in the cross-sectional size of the original support, the cross-sectional size of the support has little effect on the horizontal displacement of the support pile; When the diameter of the support pile is between 0.85 m and 1.15 m, the maximum horizontal displacement reduction of the support pile is roughly proportional to the change in pile diameter. When the diameter of the support pile exceeds 1.15 m, the reduction in horizontal displacement of the support pile is weakened, which is not conducive to fully utilizing the pile performance.

## Keywords

Soft Soil Area, Deep and Large Foundation Pits, Horizontal Displacement, Support Parameters, Numerical Simulation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着城市化进程不断发展,城市土地资源紧张,地下空间得到大规模开发和利用。基坑工程的规模不断扩大,越来越多的基坑工程面临着复杂的施工环境和严格的施工要求[1]。

嘉兴市位于我国沿海地区,土质具有天然含水量高、孔隙比大、压缩性高等特点,容易影响基坑工程的安全性和稳定性,同时也会对周边环境产生较大影响。近年来,越来越多的学者从多个方面对软土地区基坑开挖变形的影响展开大量的研究。李琳[2]等人对杭州和上海软土地区46个成功深基坑的实测结果进行了研究和总结,分析了基坑变形及其采用支撑系统相对刚度与基坑开挖深度之间的关系,并建立了支护结构最大侧移与抗隆起稳定安全系数之间的关系。唐新华[3]等人通过建立三维有限元模型研究软土地区基坑开挖工序对周边建筑的影响。Liu [4]等人基于南京泛洪区基坑的统计数据,探讨了软土厚度对基坑变形的影响。Feng [5]等人建立有限元模型研究基坑开挖过程中围护结构和周围土体的变形机理,并进行敏感性分析。

为了减少基坑开挖变形的影响,支护结构的选择和设计非常重要。国内外学者主要通过数值模拟的方法分析支护结构参数对于基坑变形的影响。廖镜旺[6]等人采用有限元软件对基坑开挖进行数值模拟,

研究了对撑式排桩支护参数对排桩的位移、稳定和弯矩的影响。钮佳伟[7]等人通过建立基坑二维模型研究旋喷桩加固深度、置换率、地基土性质以及支护桩嵌固深度对坑底回弹变形的影响。秦会来[8]等人采用有限元软件研究珠海地区深厚淤泥地层条件下基坑变形的影响,分析坑内加固区范围、支护桩嵌固深度、支护桩刚度对基坑变形的影响规律。Peng [9]等人采用数值模拟和现场监测相结合的方法,研究深大基坑开挖对既有地铁站和轨道的变形规律,分析不同支护参数对地铁站和轨道变形的影响。Li [10]等人通过现场监测和数值模拟的方法研究异形基坑支护结构的变形特征,考虑混凝土支撑和钢支撑的支撑深度对于基坑支护结构变形的影响。

在深大基坑工程中,如何保证基坑工程的安全性和稳定性,降低基坑开挖变形的影响非常重要。目前,国内外学者对软土地区基坑开挖变形的影响以及支护参数的影响规律进行大量的研究,但是在基坑支护参数的研究中很少考虑支撑位置的影响。同时由于环境的差异性,不同地区基坑工程的影响规律也存在差异性,需要进一步深入研究。本文以嘉兴地区某中医院深大基坑工程项目为研究背景,运用数值模拟和现场监测的方法,分析基坑开挖变形的影响,根据数值模拟结果对支护参数的影响规律进行研究,为类似基坑工程设计支护方案提供参考。

## 2. 项目概况

本工程项目位于嘉兴市某中医医院内,采用钻孔灌注桩结合三道混凝土支撑的围护方案。本基坑工程位于软土地区,土层种类较多。根据地质勘察报告,本次基坑工程数值模拟将土体分成9层。现场工程地质报告给出的通常是土体侧限条件下的压缩模量,在实际 ABAQUS 软件中采用的是弹性模量。根据工程经验,土体的弹性模量为压缩模量的 2~5 倍[11] [12] [13],按照倍数关系试算,最终确定本基坑工程项目土体弹性模量为压缩模量的 5 倍,如表 1 所示。

Table 1. Soil parameters

表 1. 土体参数

层号	岩土名称	厚度(m)	重度(kN/m <sup>3</sup> )	内摩擦角(°)	粘聚力(kPa)	弹性模量(MPa)	泊松比
1	素填土	3	18.5	10	12	3	0.4
2	淤泥质粘土	2.6	18	6	16	15	0.37
3	粘土	2.5	19.8	14.8	48.4	42	0.35
4	粉质粘土	4.8	19.3	9.7	30.5	35	0.35
5	砂质粉土	2.7	19.3	27.3	12.7	55	0.3
6	淤泥质粉质粘土	4.1	18.4	7.7	24	30	0.37
7	粘土	6.4	19.8	15.5	50	60	0.32
8	粉质粘土	2.4	19.5	11.5	36.5	52	0.35
9	砂质粉土	21.5	19.5	11.4	40	80	0.3

## 3. 数值模拟

### 3.1. 数值模型建立

采用 ABAQUS 有限元软件建立了内支撑支护结构基坑三维模型,并对基坑左上四分之一部分基坑开挖的全过程进行数值模拟,对支护桩沿深度方向的水平位移进行研究。

基坑采用钻孔灌注桩加三道混凝土内支撑的支护形式，根据工程实际的设计和施工情况，采用明挖法由上至下进行开挖。基坑第1层至第4层的开挖深度依次为2 m、5.9 m、4.4 m和2.9 m，共开挖15.2 m。在每层基坑开挖完成后，在底部架设混凝土内支撑。

本基坑工程钻孔灌注桩采用C30混凝土，直径为1.05 m，桩间距为1.15 m。共设置三道钢筋混凝土内支撑，前后部分为角撑，中间为水平支撑。其中第一道内支撑横截面积为 $0.8 \times 0.8$  m，连接在冠梁上，支撑的深度为1.6 m，第二、三道混凝土支撑内支撑直径为 $0.9 \times 0.9$  m，分别位于7.45 m，11.85 m位置处，通过围檩与钻孔灌注桩相连接。

钻孔灌注桩的受力形式与地下连续墙相近，可以根据公式进行换算[14]。

$$(D+t)h^3 = 12\pi D^4/64 \quad (1)$$

式中， $D$ 为钻孔灌注桩桩径， $t$ 为钻孔灌注桩之间的净距， $h$ 为转化的连续墙厚度。经过计算，最终确定连续墙厚度为0.85 m，埋深为32.2 m。采用实体单元模拟连续墙和土体，采用梁单元模拟混凝土支撑和立柱。基坑支护模型及部分监测点如图1所示。

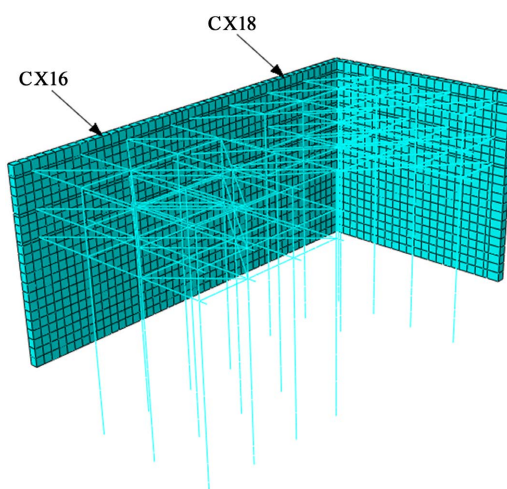


Figure 1. Foundation pit support model  
图1. 基坑支护模型

根据《城市轨道交通工程技术监测规范》[15]，基坑开挖对周边环境的影响范围分为三个分区，主要影响区为0.7倍的基坑开挖深度，次要影响区为0.7倍到3倍的基坑开挖深度。最终确定基坑模型的尺寸为 $80 \text{ m} \times 120 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 。模型顶部自由，周围四个面上施加水平方向的法向约束，底面施加固定约束，基坑开挖计算模型如图2所示。

### 3.2. 施工过程模拟

基坑的开挖过程在ABAQUS软件中通过生死单元实现，模拟步骤如下：

- (1) 去掉支护结构，进行地应力平衡。
- (2) 去掉与支护结构相重合的土体，激活地下连续墙，激活立柱。
- (3) 开挖2 m，激活第一道混凝土支撑。
- (4) 开挖5.9 m，激活第二道混凝土支撑。
- (5) 开挖4.4 m，激活第三道混凝土支撑。
- (6) 开挖2.9 m。

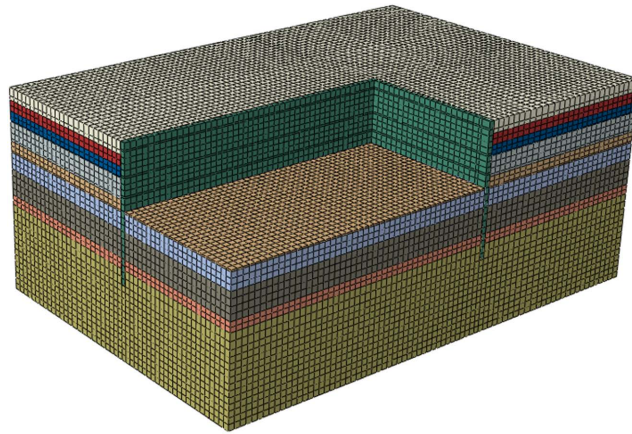


Figure 2. Calculation model for foundation pit excavation  
图 2. 基坑开挖计算模型

## 4. 数值模拟结果

### 4.1. 水平位移分析

如图 1 所示, CX16 监测点位于中间标准段水平支撑中点位置, CX18 监测点位于左上方斜支撑中点位置, 水平位移较大, 具有代表性。本次模拟主要选取这两处监测点位置的支护桩水平位移进行分析, CX16、CX18 位置处四个工况下支护桩水平位移监测结果与数值模拟结果对比如图 3、图 4 所示。

从图 3 和图 4 可以看出, 现场监测结果与数值模拟计算结果虽然在数值上存在一些差异, 但变形总体趋势大致相同。出现误差的主要原因: 在数值模拟计算中, 为了加强计算收敛性和网格划分的便利性, 将支护桩转化为连续墙进行模拟。四种工况下, 基坑底部数值模拟结果均大于监测结果, 主要是因为三轴水泥搅拌桩注浆对支护桩底部有加固作用, 在模拟中只是略微增大最后一层土体的弹性模量, 不能完全抑制住基坑底部位移。

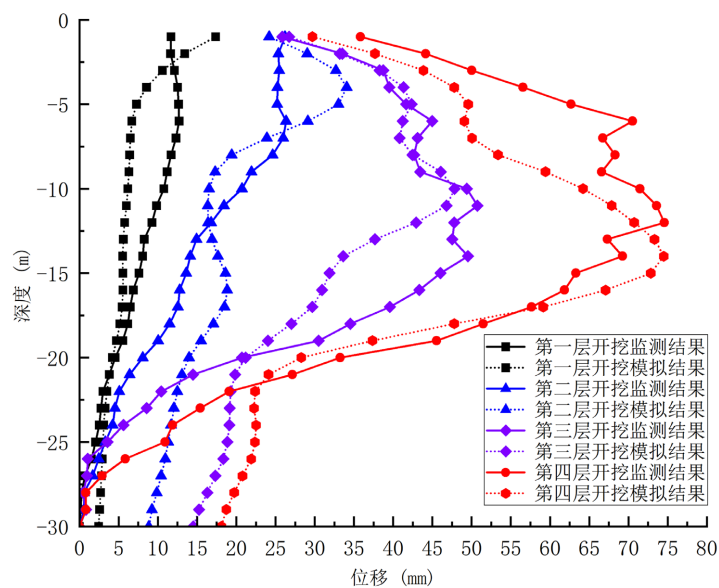
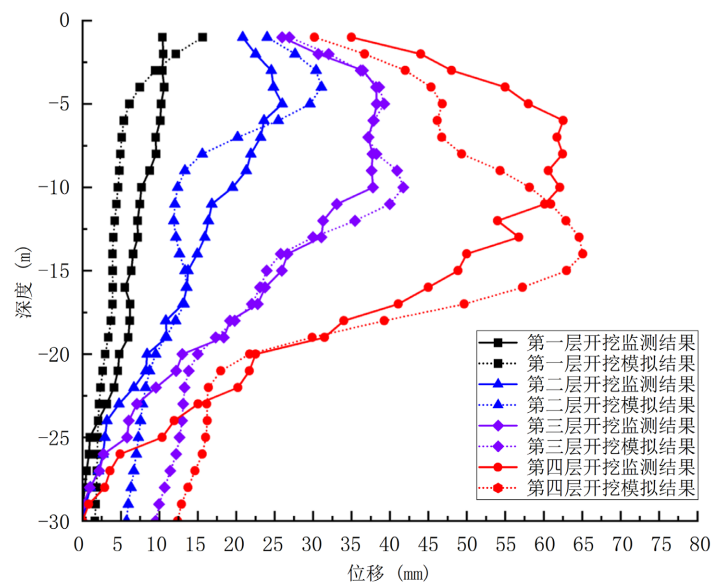


Figure 3. Horizontal displacement of support pile at CX16 position  
图 3. CX16 位置处支护桩水平位移



**Figure 4.** Horizontal displacement of support pile at CX18 position  
**图 4.** CX18 位置处支护桩水平位移

对比图 3 和图 4，两处位置支护桩水平位移变化趋势相近，基坑第一层土体开挖完成后，支护桩顶部位移较大，随着深度的增加，支护桩水平位移逐渐减小。随着基坑不断开挖，混凝土内支撑对支护桩的位移产生抑制作用，使得支护桩中间的位移曲线出现鼓肚状，随着开挖深度的增加，支护桩受混凝土支撑的效果越来越明显，支护桩的最大水平位移向下移动，桩顶的水平位移不断加大。四种工况下 CX16 位置处支护桩水平位移明显大于 CX18 位置处的支护桩水平位移，主要是因为 CX18 位置相比于 CX16 位置更加靠近坑角，受坑角效应的影响显著。由图 3 和图 4 可知，在土方开挖完成后，CX16 监测点处支护桩的最大水平位移达到 73.58 mm，CX18 监测点处支护桩的水平位移达到 62.54 mm。根据施工图设计要求，支护桩的水平位移预警值为连续 3 天大于 3 mm 或累计大于 50 mm，两处的基坑监测结果已经超出预警值。然而，在设计阶段，设计人员采用理工软件计算的基坑水平位移小于预警值，可能是因为计算中采用的是基坑二维模型，没有考虑空间效应的影响，局限性大。

#### 4.2. 混凝土支撑位置的影响

由于混凝土支撑架设在坑底之上，在改变支撑位置的同时，需要对相应工况中的基坑开挖深度进行调整。以基坑工程原支撑位置为初始参数，在保持其中两道支撑位置的不变的同时，以 0.5 m 为界限上下调整混凝土支撑位置。基坑开挖完成后，支护桩最大水平位移以及顶部水平位移随支撑位置的变化如表 2 所示。

**Table 2.** Changes in horizontal displacement of support piles with support position  
**表 2.** 支护桩水平位移随支撑位置变化

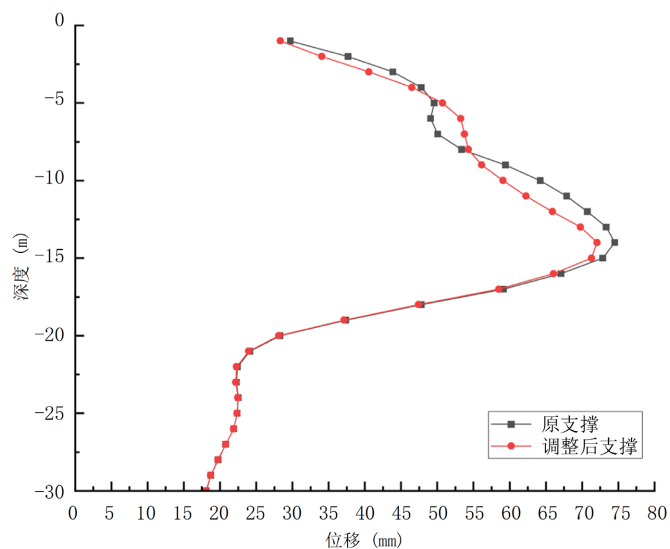
首道支撑深度(m)	中间支撑深度(m)	末道支撑深度(m)	支护桩最大水平位移(mm)	支护桩顶部位移(mm)
1.1	7.45	11.85	77.49	32.39
1.6	7.45	11.85	74.5	31.22
2.1	7.45	11.85	73.85	33.45

Continued

2.6	7.45	11.85	73.68	39.87
3.1	7.45	11.85	73.5	53.19
1.6	6.45	11.85	76.49	32.95
1.6	6.95	11.85	75.22	32.3
1.6	7.95	11.85	73.08	29
1.6	8.45	11.85	72.55	28.39
1.6	8.95	11.85	76.5	27.42
1.6	7.45	10.85	83.9	30.35
1.6	7.45	11.35	76	29.8
1.6	7.45	12.35	75.77	29.87
1.6	7.45	12.85	77.76	29.64

如表 2 所示，支护桩的水平位移受支撑位置影响大。随着首道支撑的位置不断降低，支护桩的最大水平位移逐渐减小，但顶部的水平位移逐渐增大。当首道混凝土支撑位置超过 2.6 m 时，第一层土体开挖完成后，支护桩的最大水平位移超过 30 mm，容易对支护桩顶部造成破坏。第二、三道混凝土支撑在本基坑工程中有一个最佳位置，在最佳位置以上或者以下均会增大支护桩的最大水平位移，越远离最佳位置，支护桩的最大水平位移增加越明显。

由上述规律可知，三道混凝土支撑的最佳位置分别为 2.6 m，8.45 m，11.85 m。说明在本基坑工程中，前三层基坑最佳开挖的深度大致为开挖深度的 0.2，0.6，0.8。调整后支护桩水平位移与支护方案对比如图 5 所示。



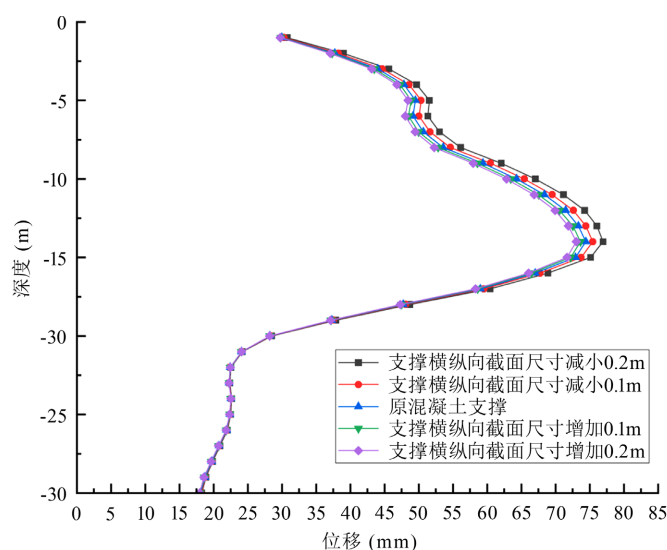
**Figure 5.** Changes in horizontal displacement of support structure before and after support adjustment  
**图 5.** 支撑调整前后支护结构水平位移变化

如图 5 所示，支撑位置调整后支护桩的最大水平位移为 72.07 mm，相比于原支撑减少 3.3%，桩顶的

水平位移为 28.33 mm，相比于原支撑减少 4.6%，说明调整支撑位置可以有效减少支护桩的变形，同时调整支撑位置比调整单一支撑位置的支护效果更好。因此，在初步设计基坑支撑位置时，首道混凝土支撑位置需要考虑桩顶水平位移，在保证桩顶的水平位移满足基坑变形控制的同时，尽可能下调首道支撑位置。二、三两道混凝土支撑可以考虑设置在基坑中间偏下位置，当基坑开挖至 0.6 倍开挖深度时，在基坑底部架设第二道混凝土支撑，开挖至 0.8 倍开挖深度时，架设第三道混凝土支撑。

### 4.3. 混凝土支撑截面尺寸的影响

支护桩的水平位移受混凝土内支撑的约束作用影响，且随着支撑截面即支撑刚度的增大，支护桩的最大水平位移逐渐减小[16]。为了研究基坑变形与混凝土支撑截面尺寸的关系，以基坑原支撑截面尺寸作为初始参数，通过改变混凝土内支撑的横纵向截面尺寸作为比较条件，分析其对支护桩水平位移的影响。基坑开挖完成后，不同混凝土支撑截面尺寸下支护桩的水平位移如图 6 所示。



**Figure 6.** Horizontal displacement of support piles after excavation of foundation pits with different cross-sectional dimensions  
**图 6.** 不同截面尺寸下基坑开挖完成后支护桩水平位移

如图 6 所示，支撑的截面尺寸主要影响支护桩中间的最大水平位移，对支护桩顶部以及未开挖部分的水平位移影响较小，可以有效控制支护桩中间的突起。随着支撑截面尺寸的增大，支护桩的最大水平位移逐渐减小。支撑的横纵向截面尺寸每增大 0.1 m，相比上一个支撑的降低幅度分别为 1.96%，1.3%，1.04%，0.8%。说明随着支撑截面尺寸的增大，支护桩的支护最大水平位移降低效率逐渐减弱。在原支撑横纵向截面尺寸 0.2 m 变化范围内，支护桩的最大水平位移受支撑的截面尺寸影响较小，略微减小支撑截面尺寸的大小可以在保持原支护效果的基础上降低工程造价。

### 4.4. 支护桩桩径的影响

本基坑采用桩径为 1.05 m 的支护桩，本文在保证其他参数不变的情况下，分别对桩径为 0.85 m、0.95 m、1.05 m、1.15 m、1.25 m 的情况进行分析，得到基坑开挖完成后 5 种不同桩径下支护桩水平位移曲线，如图 7 所示。

如图 7 所示，支护桩桩径大小对开挖部分的支护桩水平位移影响大，随着支护桩桩径增大，支护桩的水平位移逐渐减小。支护桩桩径每增大 0.1 m，支护桩的最大水平位移降低幅度分别为 7.66%，7.34%，



7.4%，6.08%，桩顶的水平位移降低幅度分别为 17.3%，14.9%，14.9%，12.5%。说明在桩径 0.85 m 到 1.15 m 范围内，随着桩径的增大，对于支护桩桩身的水平位移降低幅度相接近，支护桩最大水平位移降低幅度与桩径变化大致成正比关系。当支护桩桩径超过 1.15 m 时，支护桩水平位移降低效率减弱。因此，在实际工程中，过大的桩径不能充分发挥支护桩的性能，同时也会造成施工成本和难度的上升，选择合适的桩径有利于充分发挥支护桩的支护效果，节约经济。

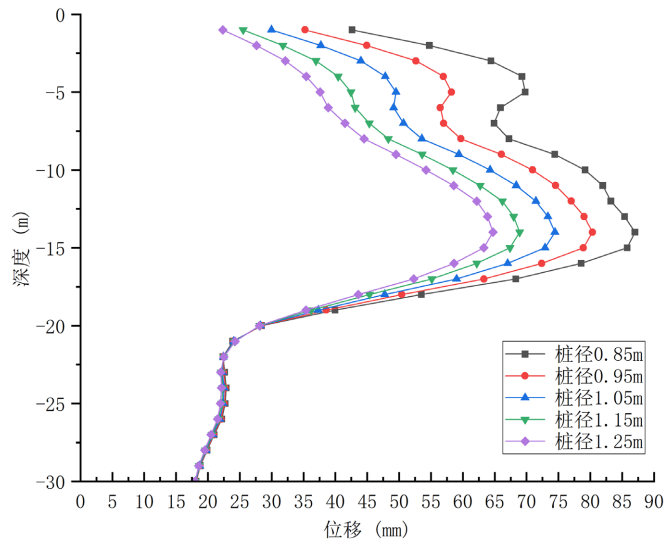


Figure 7. Horizontal displacement of support piles after excavation of foundation pits under different pile diameters  
图 7. 不同桩径下基坑开挖完成后支护桩水平位移

## 5. 结论

本文以嘉兴软土地区某中医院深大基坑项目为研究背景，采用数值模拟和现场监测相结合的方法分析该地区基坑开挖引起的变形影响，探究支护参数对于基坑开挖变形的影响规律，得到以下结论：

(1) ABAQUS 软件可以较好模拟基坑开挖过程。由监测结果可知，支护桩水平位移随着开挖深度的增加而增大，最大水平位移位于支护桩中间部分，随着开挖深度的增加逐步向下移动。基坑的变形受坑角效应影响，靠近坑角部分的支护桩水平位移较小。

(2) 支撑位置对支护桩水平位移影响大。在实际工程中，在保证桩顶位置满足施工要求的同时，降低首道支撑位置；二、三道混凝土支撑初步可架设在靠近深度为 0.6、0.8 倍开挖深度的坑底位置上。

(3) 支撑的截面尺寸主要影响桩身中间的最大水平位移。在原支撑横纵向截面尺寸 0.2 m 变化范围内，支护桩的最大水平位移受支撑的截面尺寸影响较小，可通过减小支撑截面尺寸降低造价。

(4) 支护桩桩顶主要影响开挖部分支护桩水平位移。在桩径 0.85 m 到 1.15 m 范围内，可充分发挥支护桩的性能。当桩径超过 1.15 m 时，支护桩的支护效果逐渐减弱。在实际工程中，应选择合适的桩径充分发挥支护桩的支护效果，节约经济。

## 参考文献

- [1] 徐健, 王自强, 王林枫, 等. 既有建筑下半盖挖深基坑变形影响因素研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(5): 1696-1704+1713.
- [2] 李琳, 杨敏, 熊巨华. 软土地区深基坑变形特性分析[J]. 土木工程学报, 2007, 40(4): 66-72.
- [3] 唐新华, 李向阳, 张俊赞, 王秋琦. 复杂环境下基坑开挖工序对周边构筑物的变形影响分析[J]. 建筑结构, 2022,

52(S1): 2531-2535.

- [4] Liu, L., Cai, G., Liu, S., *et al.* (2021) Deformation Characteristics and Control for Foundation Pits in Floodplain Areas of Nanjing, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **80**, 5527-5538. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02264-9>
- [5] Feng, Z., Xu, Q., Xu, X., Tang, Q., Li, X. and Liao, X. (2022) Deformation Characteristics of Soil Layers and Diaphragm Walls during Deep Foundation Pit Excavation: Simulation Verification and Parameter Analysis. *Symmetry*, **14**, 254. <https://doi.org/10.3390/sym14020254>
- [6] 廖镜旺, 刘川顺, 刘勇. 对撑式排桩支护体系的结构分析和优化设计[J]. 土工基础, 2022, 36(1): 1-4.
- [7] 钮佳伟, 郭锐, 谭文韬, 等. 软土地区电缆沟通道基坑开挖回弹控制研究[J]. 土工基础, 2022, 36(6): 894-898.
- [8] 秦会来, 黄俊, 李奇志, 等. 深厚淤泥地层深基坑变形影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S2): 23-26.
- [9] Peng, H., Tang, Q., Zhu, L., Li, Z., Li, H. and Wang, G. (2022) Deformation Control of Subway Stations under the Influence of the Construction of Deep and Large Foundation Pits with Composite Support Systems. *Applied Sciences*, **12**, 3026. <https://doi.org/10.3390/app12063026>
- [10] Li, Y.D., Wang, C.X., Sun, Y., Wang, R.C., Shao, G.J. and Yu, J., (2022) Analysis of Corner Effect of Diaphragm Wall of Special-Shaped Foundation Pit in Complex Stratum. *Frontiers in Earth Science*, **10**, 794756. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.794756>
- [11] 于丽鹏. 基于 FLAC3D 模拟的土体弹性模量取值分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(2): 162-166.
- [12] 李军, 周世冲, 王磊, 等. 软土地区数值分析中弹性模量的取值方法[J]. 中国水运(下半月), 2017, 17(5): 324-325+328.
- [13] 刘建华, 吴绍明, 王林枫, 等. 深长基坑开挖引发邻近建筑群沉降规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(4): 1374-1382.
- [14] 孙书伟, 林杭, 任连伟. *FLAC3D 在岩土工程中的应用*[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. *GB50911-2013 城市轨道交通工程技术监测规范*[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [16] 潘骏, 黄广龙, 赵升峰. 混凝土内支撑尺寸效应对基坑支护的影响分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2015, 38(4): 520-524+563.