

付冬平, 孔剑捷, 张欣亚. 软土深基坑施工监测与数值模拟分析[J]. 华南地震, 2024, 44(2): 136–143. [FU Dongping, KONG Jianjie, ZHANG Xinya. Monitoring and Numerical Simulation of Deep Foundation Pit Construction in Soft Soil[J]. South China journal of seismology, 2024, 44(2): 136–143]

## 软土深基坑施工监测与数值模拟分析

付冬平<sup>1</sup>, 孔剑捷<sup>2</sup>, 张欣亚<sup>2</sup>

(1.北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082; 2.上海大学力学与工程科学学院, 上海 200444)

**摘要:** 以上海地区某深基坑工程为研究背景, 分析了施工过程中围护结构和周边环境的监测数据, 为了对基坑围护设计方案进行校核优化, 采用FLAC<sup>3d</sup>软件建立了数值计算模型, 对比分析了监测数据和数值模拟结果, 研究了地下连续墙的厚度、深度、内支撑截面尺寸等设计参数对围护结构变形和基坑周边土体沉降的影响, 可为软土地区深基坑工程的围护结构设计提供经验和依据。

**关键词:** 淤泥质土; 围护结构; 深基坑; 地下连续墙; 数值模拟

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2024)02-0136-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2024.02.16

## Monitoring and Numerical Simulation of Deep Foundation Pit Construction in Soft Soil

FU Dongping<sup>1</sup>, KONG Jianjie<sup>2</sup>, ZHANG Xinya<sup>2</sup>

(1. Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100082, China;

2. School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

**Abstract:** Taking a deep foundation pit project in Shanghai as research background, the monitoring data collected from the retaining structures and adjacent environments during construction was analyzed. To optimize the design of the retaining structure of the foundation pit, a numerical calculation model was established by using the FLAC<sup>3d</sup> software. A comparative analysis was carried out between the monitoring data and the numerical simulation outcomes. The influence of various design parameters such as the thickness, depth, and cross-sectional dimensions of internal support of the underground diaphragm wall on the deformation of the retaining structure and the settlement of adjacent soils around the foundation pit was studied. The findings presented herein can provide valuable insights and foundational guidance for the design of retaining structures in deep foundation pit projects in soft soil terrains.

**Keywords:** Muddy soil; Retaining structure; Deep foundation pit; Underground continuous walls; Numerical simulation

收稿日期: 2024-02-10

作者简介: 付冬平(1977-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩土工程专业方面的研究。

E-mail: 47160390@qq.com

0 引言

在东部沿海发达地区,由于土地资源有限,人们对地下空间的开发利用逐渐增加,深基坑是地下工程建设的重要组成部分<sup>[1-2]</sup>。东南沿海的土层以淤泥质土层为主,这类海积、淤积土的天然含水率高、固结系数小<sup>[3-4]</sup>,开发时的难度和对支护结构设计的要求均高于一般地层深基坑。在开挖过程中,支护结构的变形控制不但会影响现有基坑的安全性,周边土体的扰动会导致周边建筑产生不均匀沉降,也会对周边地下管线产生影响。因此深基坑开挖过程中要对其进行监测,及时采取措施控制基坑的变形沉降<sup>[5-6]</sup>。

国内外许多学者已经进行了相关研究, Ren等<sup>[7]</sup>依托苏州河深隧道试验段超深圆形基坑工程,利用分布式光纤监测技术对深基水平位移进行监测。Lin等<sup>[8]</sup>对深基坑开挖过程中桩变形、桩顶位移、内支护轴向力计算值与实际值进行了比较,研究了开挖方法对变形的影响。刘晓峰等<sup>[9]</sup>对深基坑二次开挖过程中支护结构变形进行了监测,结合数值模拟研究了围护结构的变形规律。万志辉等<sup>[10]</sup>研究了不同地下连续墙深度对基坑稳定性的影响。孙锴等<sup>[11]</sup>依托某深基坑工程,研究了软土地区深基坑施工过程中对周边环境的影响。喻军等<sup>[12]</sup>通过现场监测数据统计和数值分析相结合的方法研究了4种典型变形模式下坑内不同位置土体和支护结构的位移特点。苟学登等<sup>[13]</sup>通过建立了深厚软土地层地铁深基坑变形的数值模型,并结合实测数据分析了软土深基坑变形的时空效应。

本文以上海市徐汇区某地块商办楼新建项目工程为背景,根据勘察和设计资料,在有限差分软件中建立了数值模型,并利用施工过程中得到的监测数据,验证分析此基坑围护结构设计的科学性。同时研究分析了地下连续墙的厚度、深度、内支撑截面尺寸等因素对围护结构变形和基坑周

边土体沉降的影响,并与工程实际进行对比分析,根据可行性对围护结构设计提出建议,以期为类似基坑设计和施工提供参考。

1 工程概况

1.1 工程简介

该商办楼项目工程位于肇嘉浜路南侧,基坑距离车站结构最近处约31.8 m,基坑开挖深度15.8~16.4 m。属深基坑工程,基坑总面积为7800 m<sup>2</sup>,在高地下水位的软土地基中开挖超深超大的基坑工程具有一定的风险性。基坑整体采用地下连续墙的围护形式,竖向设置三道水平支撑系统,基坑周边采用裙边加固的形式对基坑的被动土区域进行加固。

1.2 周边环境

本工程位于肇嘉浜路南侧,基坑周边环境较为复杂,基坑北侧、南侧、西侧的砖混结构居民楼,与基坑东侧的地铁车站均为本基坑的重点保护对象。基坑北侧管线密集,需进行针对性保护。综合基坑周边环境状况,基坑安全等级为一级。基坑东侧(位于地铁保护50 m范围内)围护结构最大侧移按照0.14%控制;其余三侧围护结构最大侧移按照0.18%控制。

1.3 地质及水文条件

该工程所在地区的地层参数如表1所示,场地范围内地层均为第四系松散沉积物,主要由饱和粘性土、粉性土及砂土组成。在基坑开挖深度范围内涉及有砂质粉土,该层土易渗水,易产生流砂现象。淤泥质粘土厚度达到18.5 m,该层土强度低,易扰动,在基坑开挖时易产生变形,对于基坑施工较为不利。

表1 地层参数表  
Table 1 Strata parameters

序号	土层名称	层厚/(m)	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$c/(\text{kPa})$	$\varphi/(^{\circ})$	泊松比	$E_s/(\text{MPa})$
1	素填土	1.8	17.6	8.0	6.0	0.42	4.21
2	粉质粘土	4.5	19.2	12.0	18.5	0.28	3.04
3	砂质粉土	1.7	20.1	6.0	30.5	0.30	8.36
4	淤泥质粘土	18.5	17.9	11.0	12.0	0.36	2.08

(转下表)

(接表1)

序号	土层名称	层厚/(m)	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$c/(\text{kPa})$	$\varphi/(^{\circ})$	泊松比	$E_s/(\text{MPa})$
5	粉质粘土	3.0	19.6	14.0	19.5	0.30	4.23
6	粉砂	31.0	20.9	3.0	35.0	0.30	13.88

2 支护结构设计及监测

2.1 支护结构方案

综合考虑本基坑所处周边环境及场地内土层性质，本基坑工程周边环境较复杂，结合设计施工实践经验<sup>[14]</sup>，采用地下连续墙的围护形式可较好控制基坑开挖对周边环境的影响。地下连续墙具有抗弯刚度大、水平变形小、抗渗漏能力强的特点。两墙合一可更充分利用地下空间，节约造价。此外，地下连续墙可发挥垂直承载能力以减小基础底面地基的附加应力，其本身也具备一定支承能力，可有效减小周边土层的沉降。

如图1所示，围护结构采用地下连续墙加支撑的形式，地下连续墙采用C30钢筋混凝土结构，共采用三道支撑，首排撑采用900 mm×800 mm的C30钢筋混凝土结构；第二排撑采用1200 mm×900 mm的C40钢筋混凝土结构；第三排撑采用1200 mm×800 mm的C30钢筋混凝土结构。地下连续墙1000 mm，墙深34 m。

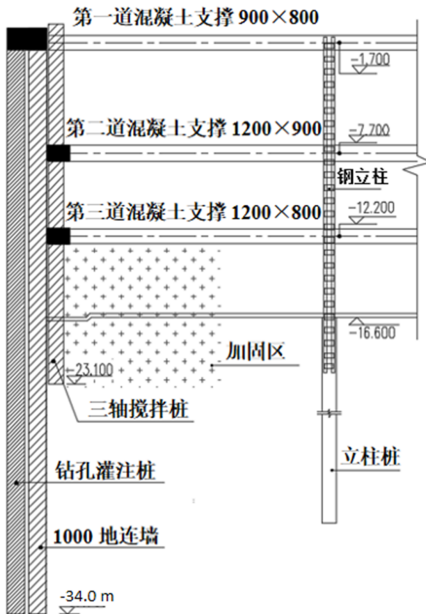


图1 基坑典型断面设计图(尺寸:mm,标高:m)  
Fig.1 Typical sectional design of foundation pit (dimensions: mm, elevation: m)

2.2 监测方案

为了确保工程、周边管线及建筑物的安全，从施工开始到结束，针对基坑周边两倍基坑开挖深度范围内的地表、管线、建筑物、12号线嘉善路站附属结构进行了变形监测，监测点布置图如图2所示，监测项目及预警值如表2所示。

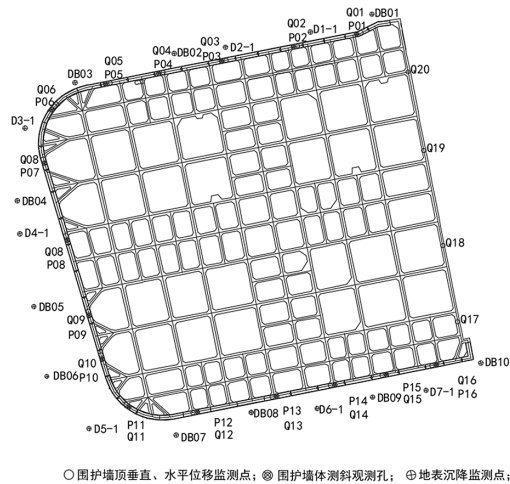


图2 监测点布置图  
Fig.2 Monitoring point layout

表2 监测项目及预警值			
Table 2 Monitoring project and warning value			
序号	监测项目	累计绝对值/ (mm)	变化速率/ (mm·d <sup>-1</sup> )
1	围护墙顶沉降	22	2
2	围护墙身位移	22	2
3	坑外地面沉降	27	2
4	周围管线	10	2

2.3 现场监测结果分析

2.3.1 围护墙顶水平位移分析

围护墙的变形直接影响基坑稳定性，随着基坑开挖，土压力卸载，围护墙受墙后土压力作用发生侧向变形，在施工过程中实时监测围护墙顶部的水平位移情况具有重要意义。选取图2中三个监测点Q03、Q08、Q13的数据进行分析，图3为围护墙顶部水平位移值随时间变化的关系曲线。

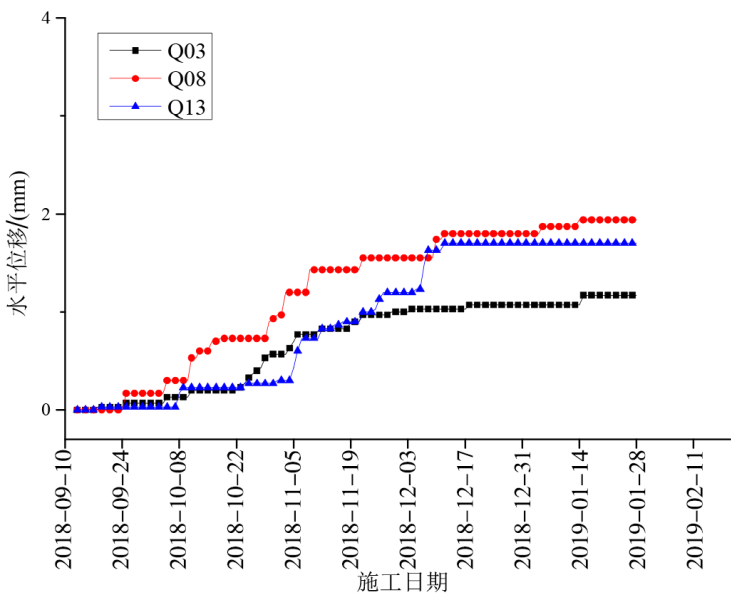


图3 墙顶水平位移与时间变化关系曲线

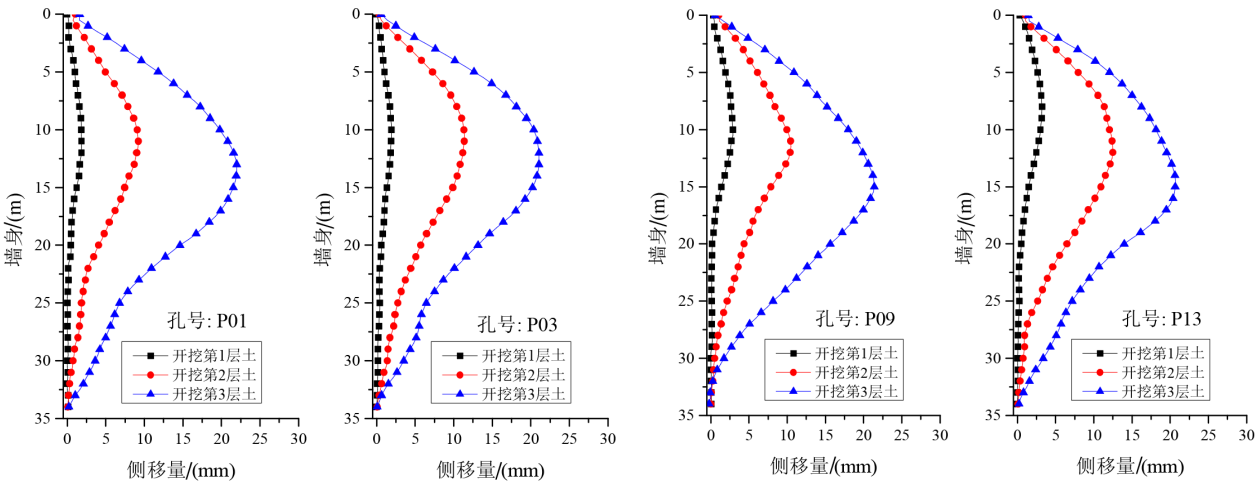
Fig.3 Variation of horizontal displacement of the top of the wall with time

随着基坑分层开挖，地下连续墙顶部的水平位移逐渐增大。监测点 Q03、Q08、Q13 分别位于基坑的北侧、西侧和南侧。监测点 Q03 的水平位移最大值为 1.17 mm，监测点 Q08 的水平位移最大值为 1.94 mm，监测点 Q13 的水平位移最大值为 1.7 mm。这说明基坑的西侧变形较大。基坑开挖结束后，水平位移值趋于稳定，各监测点的最大位移量均远小于预警值，表明地下连续墙的各道支撑发挥作用，抑制了墙体的变形，基坑整体上安全可控。

2.3.2 围护墙侧向变形分析

选取位于基坑北侧监测点 P01 和 P03、西侧监

测点 P09，南侧监测点 P13 进行分析。图 4 为各监测点的侧向位移曲线。从四组曲线图可发现，在开挖初期，在冠梁和第一道内支撑的作用下，墙体的侧向位移较小。随着第二层和第三层土体开挖，墙身变形明显增大。在开挖面下方，水平侧移量随墙深增加而逐渐减小。这是因为土压力零点以下，基坑内侧的土体会抵抗墙身变形，土体回弹受到限制并产生少量的压缩变形，这导致墙身在坑底以下的部分变形逐渐减小。地下连续墙随着基坑开挖，最大水平位移逐渐增大，所在位置也逐渐下移。



a P01 测点侧向位移曲

b P03 测点侧向位移曲线

c P09 测点侧向位移曲线

d P13 测点侧向位移曲线

图4 围护结构侧向位移曲线

Fig.4 Lateral displacement curve of retaining structure

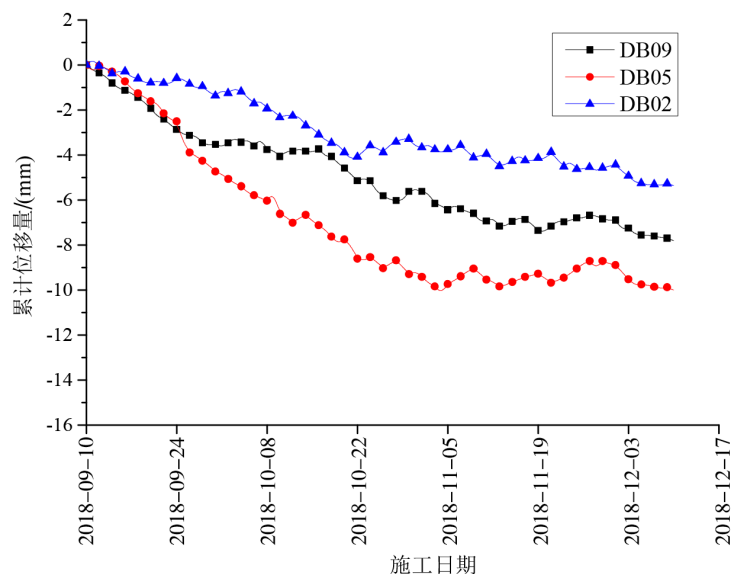


图5 地表监测点累计位移量与时间变化关系曲线

Fig.5 Variation of cumulative displacement of surface monitoring points with time

对比各处监测点的侧向变形数据可以发现, P01 和 P03 位于基坑北侧, 围护结构的变形较小, 最大位移值分别为 21.05 mm 和 20.09 mm。基坑西侧监测点 P09 和南侧监测点 P13 的测向位移量较大, 分别为 19.94 mm 和 20.62 mm, 均小于预警值。说明基坑的支护设计方案较保守, 存在优化空间。

### 2.3.3 坑外地面沉降分析

基坑周围的土体在开挖过程中会产生较大变形, 地表会发生沉降, 导致周边的建筑发生倾斜、开裂, 不均匀沉降还可能对地下管线产生影响。因此在基坑开挖过程中, 对地表的沉降监测十分重要。

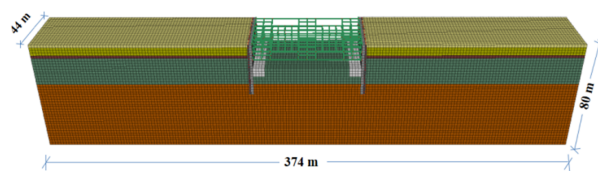
本节选取地表监测点 DB02、DB05、DB09 进行研究分析, 图 5 是监测点累计位移量与时间变化的关系曲线。随着基坑开挖施工, 在主动土压力的作用下, 坑外土体有向坑内移动的趋势, 三个测点的沉降量稳定增加。在地板浇筑完成后, 各监测点的位移量趋于稳定。位于基坑北侧的监测点 DB02 最终累计位移量为 5.36 mm, 位于基坑西侧的监测点 DB05 的最终位移量为 10.08 mm, 位于基坑南侧的监测点 DB09 的最终位移量为 7.81 mm。基坑西侧的变形量较大, 在开挖结束后, 各监测点的累计位移量趋于稳定, 均小于预警值, 基坑开挖过程安全可控。

## 3 数值模拟分析

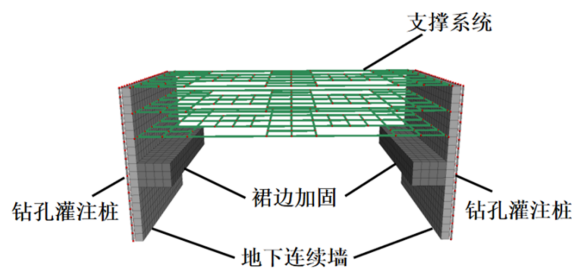
### 3.1 模型及边界条件

根据工程地质勘察报告和支护结构设计方案, 采用 Flac<sup>3d</sup> 软件建模分析。考虑到坑角效应会对数

值模拟的结果产生影响, 取距离坑角 20 m 外的标准段建立数值模型, 模型宽度为 44 m。根据圣维南原理, 模型的水平边界距离地下连续墙的距离不小于基坑挖深的 5 倍, 模型的高度一般取挖深的 2~4 倍。如图 6 所示, 模型的尺寸为 374 m×44 m×80 m。在数值模拟分析中, 地下连续墙、排桩和内支撑均采用弹性模型, 弹性模量为 28 GPa, 泊松比取 0.2。土层和基坑裙边的加固区均采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型, 各土层参数按照表 1 选取。坑内加固采用三轴搅拌桩, 加固形式为格栅式加固, 可根据面积置换率近似计算得到加固范围内水泥土桩及土的平均力学参数。加固体计算参数可按照《基坑工程手册》中的加固等效公式确定, 表 3 为得到的加固体力学参数。



a 基坑模型图



b 围护结构及坑内加固

图6 Flac<sup>3d</sup>模型图Fig.6 Flac<sup>3d</sup> model

表3 加固材料参数  
Table 3 Reinforcement material parameters

材料参数	取值
$m$	0.4
$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	17
$\mu$	0.25
$c/(\text{kPa})$	84
$\varphi/(^{\circ})$	30

由于地下连续墙采用混凝土材料，其变形模量与土体的差异较大，可设置接触单元来模拟地下连续墙与土体之间发生滑动分离的界面行为。接触面的切线方向服从Mohr-Coulomb破坏准则，界面单元参数取值如表4所示。

表4 模型界面单元参数表  
Table 4 Model interface element parameters

名称	取值
$k_n/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$5\times10^6$
$k_t/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$4.7\times10^5$
$c_t/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	10
$\varphi/(^{\circ})$	8.5
$R$	0.8
$t_v$	0.01

选取基坑北部的监测点P03，将监测值与模拟结果进行对比，如图7所示。该监测点最大水平位移的监测值为21.05 mm，模拟值为20.96 mm，监测值与模拟值十分接近，验证了模型参数合理性。

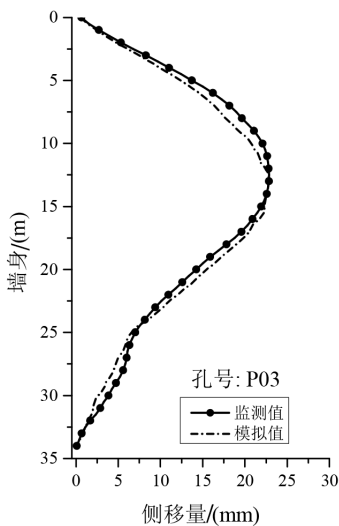


图7 P03处水平位移监测值与模拟值对比  
Fig.7 Comparison between the monitoring value and the simulated value of the horizontal displacement at P03

3.2 地连墙厚度对基坑变形的影响

地下连续墙的厚度是围护设计的重要参数，监测数据表明，基坑开挖完成后围护结构部分区域的侧向位移均小于预警值。这说明原设计方案偏保守，存在优化空间。故本节将数值模型中地下连续墙的厚度分别修改为600 mm和800 mm与实际墙厚1000 mm进行对比。

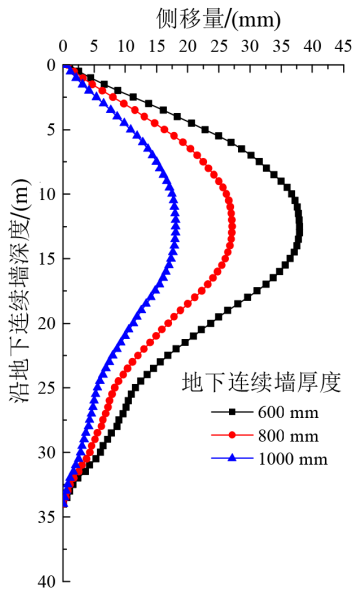


图8 不同厚度的地下连续墙对侧移量的影响  
Fig.8 Influence of underground diaphragm walls with different thicknesses on lateral displacement

图8为基坑开挖至坑底时，不同厚度的地下连续墙对侧移量的影响。随着墙厚的减小，墙身的侧移量明显增大，如将地下连续墙厚度由1000 mm减小至800 mm和600 mm，墙厚分别减少了20%和40%，墙身的最大侧移量由18.09 mm增大为27.13 mm和37.99 mm，地下连续墙的最大侧移量均超过预警值。这说明改变地下连续墙的厚度对控制围护结构侧向变形效果明显，地连墙厚度宜取1000 mm。

图9是不同厚度的地下连续墙对墙后土体沉降的影响关系曲线。随着地下连续墙的墙厚的增加，墙后土体的最大沉降量逐渐减小，沉降区域影响范围在距离地下连续墙仍在两倍深开挖深度处，墙后地表最大沉降点也仍在0.5倍开挖深度处。墙后土体沉降情况受地下连续墙墙厚的影响较明显。

地下连续墙墙厚由1000 mm调整为800 mm和600 mm，墙后土体的最大沉降量由12.24 mm增加到15.91 mm和22.03 mm。这说明减小地下连续墙的厚度不利于控制围护结构的侧向变形，墙后地表沉降量明显增大。

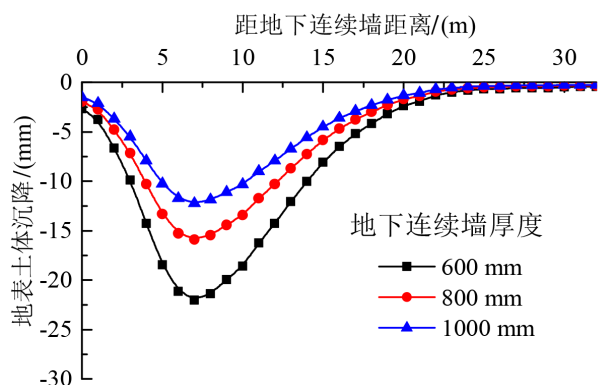


图9 不同厚度的地下连续墙对墙后土体沉降的影响

Fig.9 Influence of underground diaphragm walls with different thicknesses on the settlement of soil behind walls

### 3.3 地连墙深度对基坑变形的影响

地下连续墙的深度是围护设计的重要参数,该节将数值模型中地下连续墙的深度分别修改为28 m、30 m、32 m,与实际情况的34 m进行模拟分析和对比。图10为基坑开挖至坑底时,不同深度的地下连续墙对侧移量的影响,墙身的最大侧移量在开挖面附近,墙顶和墙底的位移量都较小,其破坏由地下连续墙的强度和变形控制。

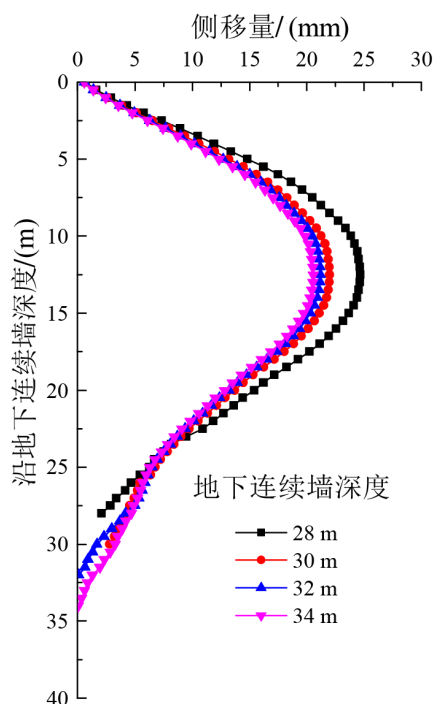


图10 不同深度的地下连续墙对侧移量的影响

Fig.10 Influence of underground diaphragm walls with different depths on lateral displacement

随着地下连续墙深度的减小,墙身的侧移量逐

渐增大,地下连续墙的深度由34 m减小至32 m和30 m,埋深分别减小了约5.8%和11.7%,墙身的最大侧移量由20.5 mm增大至21.17 mm和21.99 mm,仅增大了3.2%和7.2%。若将地下连续墙的深度减小至28 m,墙身的最大侧移量为24.67 mm,增大了20.3%。且侧移量超过了预警值,埋深过小会导致地下连续墙底部的侧移量迅速增大,影响围护结构的稳定性。因此建议将地下连续墙的深度减小至30 m。

基坑支护不仅要保证基坑本身的安全与稳定,还要控制基坑周围土层的变形。图11是不同深度的地下连续墙对墙后土体沉降的影响关系曲线,沉降曲线呈“凹槽”状,地下连续墙的埋深增加,墙后土体的最大沉降量逐渐减小,沉降区域影响范围在距离地下连续墙2倍深开挖深度处,墙后地表最大沉降点在0.5倍开挖深度处。

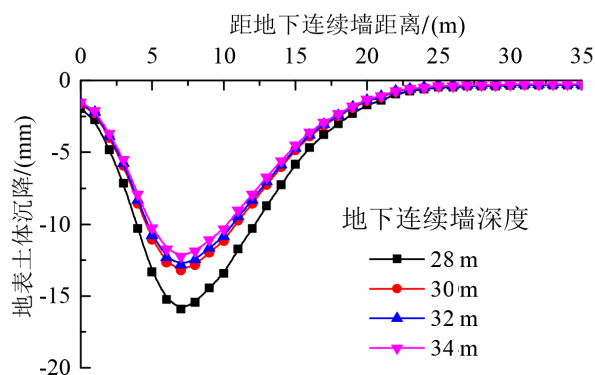


图11 不同深度的地下连续墙对墙后土体沉降的影响

Fig.11 Influence of underground diaphragm walls with different depths on settlement of soil behind walls

墙后土体沉降曲线受地下连续墙埋深的影响较明显。地下连续墙埋深由34 m调整为32 m、30 m和28 m,最大沉降量由12.24 mm增长为12.85 mm、13.2 mm和15.9 mm。这可能是由于嵌固深度不足,导致坑内土体隆起,墙后地表出现较大沉降。

### 3.4 内支撑截面尺寸对基坑变形的影响

本节将探究第一道内支撑的截面尺寸对基坑变形的影响。图12为不同内支撑截面尺寸对侧移量的影响曲线,围护结构设计方案中第一排内支撑采用900 mm×800 mm的C30钢筋混凝土结构,如将第一道内支撑截面尺寸更改为800 mm×800 mm,截面积减小了11.1%,墙身的最大侧移量由18.08 mm增大至20.80 mm,增大了15.04%,但未达到预警值。若内支撑截面尺寸更改为700 mm×800 mm,

截面积减少 22.2%，墙身的最大侧移量为 25.32 mm，增长了 40.0%，超过了基坑监测的预警值。

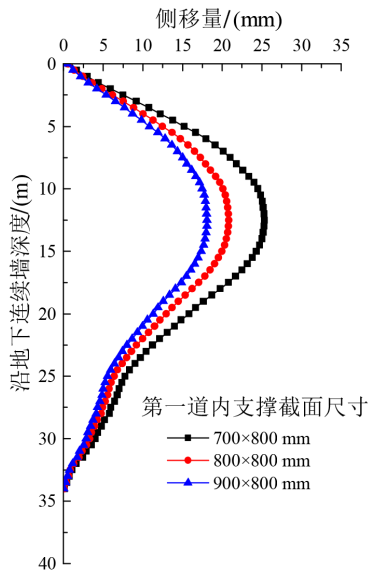


图 12 不同内支撑截面尺寸对侧移量的影响

Fig.12 Influence of internal support with different cross-sectional dimension on lateral displacement

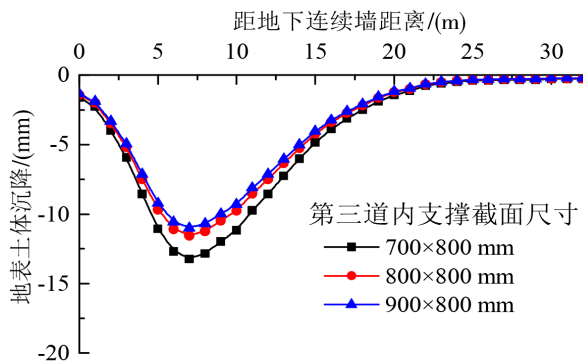


图 13 不同内支撑截面尺寸对墙后土体沉降的影响

Fig.13 Influence of internal support with different cross-sectional dimension on settlement of soil behind walls

图 13 为不同内支撑截面尺寸对墙后土体沉降的影响曲线，如将第三道内支撑截面尺寸由 900 mm × 800 mm 更改为 800 mm × 800 mm 和 700 mm × 800 mm，墙后土体沉降从 11.02 mm 变为 11.57 mm 和 13.22 mm。根据模拟结果，可将第一道内支撑的截面尺寸减小为 800 mm × 800 mm，基坑的侧向变形量和墙后土体沉降量均小于基坑监测预警值，满足设计要求。

## 4 结论

本文以上海市某地块商办楼新建项目工程为背景，通过 Flac<sup>3d</sup> 建立数值模型进行了分析，得到以下结论：

(1) 地下连续墙侧向位移监测结果与数值模拟结果对比分析表明，两者数值变化趋势相似，表明该模拟软件可对基坑工程中潜在的问题进行预测分析并提供优化建议；

(2) 在不同的地下连续墙埋深和厚度的情况下，墙后土体沉降区域影响范围和坑外地表最大沉降点始终保持在距离围护桩 2H 和 0.5H 处；

(3) 在本例中，原基坑围护设计方案偏保守，根据模拟结果，可将地下连续墙深度优化为 30 mm，并将第一道内支撑截面尺寸更改为 800 mm × 800 mm。

## 参考文献

- [1] 王卫东,徐中华. 基坑工程技术新进展与展望[J]. 施工技术, 2018, 47(6): 53-65.
- [2] 李尚明,洪成雨,姬凤玲,等. 深基坑的机器视觉监测与变形预测研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(03): 992-1000.
- [3] 鲁泰山,刘松玉,蔡国军,等. 软土地层基坑开挖扰动及土体再压缩变形研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(02): 565-573+580.
- [4] 杨忠平,刘浩宇,周小涵,等. 深厚淤泥土深长基坑开挖对邻近建筑的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(03): 1015-1024.
- [5] 任城,黄睿. 绍兴地铁某风井深基坑施工监测分析[J]. 土工基础, 2020, 34(03): 361-365.
- [6] 曲成平,叶明辉,孙浩方. 某项目深基坑变形监测与数值模拟分析[J]. 施工技术, 2019, 48(22): 59-62.
- [7] Ren B K, Zhu H H, Shen Y, et al. Deformation monitoring of ultra-deep foundation excavation using distributed fiber optic sensors[J/OL]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 7(861): 072057[2023-12-30]. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/861/7/072057>.
- [8] Lin P, Liu P, Ankit G, et al. Deformation monitoring analysis and numerical simulation in a deep foundation pit[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2021(58): 56-62.
- [9] 刘晓峰,彭成,熊智彪,等. 复杂深基坑二次开挖支护结构设计及监测分析[J]. 施工技术, 2019, 48(1): 31-35.
- [10] 万志辉,刘红艳,步艳洁. 深基坑围护结构变形监测与数值模拟分析[J]. 施工技术, 2015, 44(7): 83-86.
- [11] 孙锴,彭峰,杨果林,等. 泥炭土深基坑支护设计和位移监测[J]. 公路工程, 2018, 43(4): 62-66+132.
- [12] 喻军,尚安峰,蔡益丰,等. 不同围护结构变形模式对坑内土体位移影响[J]. 地基处理, 2023, 5(04): 346-353.
- [13] 苟学登,杨琛,宣伟琳,等. 基于时空效应的软土深基坑变形特性研究[J]. 市政技术, 2023, 41(07): 168-175.
- [14] 李平,鞠雅倩,徐建元,等. 我国黄土地区土层地震动峰值加速度衰减关系研究[J]. 地震研究, 2023, 46(4): 586-592.