

DOI: 10.7672/sgjs2026070031

# 天津软土地区深基坑变形特性实测与模拟分析\*

李石磊

(中铁十八局集团第三工程有限公司,河北 涿州 072750)

**[摘要]** 依托天津滨海新区东海路排水管网改造工程基坑开挖施工,开展现场监测和数值模拟,分析基坑围护桩桩体水平位移和地表沉降的发展规律,研究不同桩径、桩间距和嵌固深度对基坑变形特性的影响。结果表明,围护桩桩体水平位移随开挖深度的增大而增大,沿深度方向先增大后减小,深度10m处的桩体水平位移最大。基坑长边处桩体水平位移比短边处更大。基坑开挖过程中地表以沉降为主,地表沉降最大值在距离基坑边缘7.5m处产生。当距离基坑边缘超过30m时,地表基本不发生沉降。围护桩桩径和嵌固深度增加使得桩体水平位移和地表沉降减小,桩间距增大使得桩体水平位移和地表沉降变大。当围护桩桩径为1200~1400mm、桩间距为1000~1500mm、3层结构段和5层结构段围护桩嵌固深度分别不小于4m和2.5m时,对基坑变形控制效果较好。

**[关键词]** 基坑;软土;变形;监测;数值模拟

**[中图分类号]** TU473

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 2097-0897(2026)07-0031-07

## Field Monitoring and Numerical Simulation Analysis on Deformation Characteristics of Deep Foundation Excavation in Tianjin Soft Soil Area

LI Shilei

(China Railway 18th Bureau Group Third Engineering Co., Ltd., Zhuozhou, Hebei 072750, China)

**Abstract:** Based on excavation construction of the Donghai Road Drainage Pipe Network Reconstruction Project in the Tianjin Binhai New Area, on-site monitoring and numerical simulation were carried out to analyze the development law of horizontal displacement and surface settlement of foundation excavation retaining pile, and to study the influence of different pile diameter, pile spacing and embedded depth on the deformation characteristics of foundation excavation. The results indicate that the horizontal displacement of the retaining pile increases with the increase in the excavation depth, increasing first and then decreasing along the depth direction, and the horizontal displacement of the pile at the depth of 10m is the largest. The horizontal displacement of the pile at the long side of the foundation excavation is larger than that at the short side. During the excavation, the surface settlement is dominant, and the maximum surface settlement is generated at a distance of 7.5m from the edge of the foundation excavation. When the distance from the edge of the foundation excavation is more than 30m, basically no surface settlement occurs. The increase in pile diameter and embedded depth of retaining pile reduces the horizontal displacement of pile and surface settlement, and the increase in pile spacing makes the horizontal displacement of pile and surface settlement larger. When the pile diameter of the retaining pile is 1200~1400mm, the pile spacing is 1000~1500mm, and the embedded depth of the retaining pile in the three-layer structure section and the five-layer structure section is not less than 4m and 2.5m, respectively, the deformation of the foundation excavation can be well controlled.

**Keywords:** foundation excavation; soft soil; deformation; monitoring; simulation

### 0 引言

随着我国城市化进程加速推进,大量基坑工程位于城市建筑物密集区,基坑开挖卸荷会诱发周边土体产生变形,影响基坑稳定性和周边建(构)筑物

\* 中铁十八局集团有限公司2024年度科研创新项目(2024-031)

[作者简介] 李石磊,工程师,E-mail:1304725793@qq.com

[收稿日期] 2025-12-10

的正常使用<sup>[1]</sup>。因此,对开挖过程中深基坑变形特性及其对周边环境扰动的研究至关重要。张中杰等<sup>[2]</sup>和王卫东<sup>[3]</sup>建立了软黏土小应变本构模型,并考虑土体小应变本构模型参数的影响,对基坑变形特性进行了分析。张利平等<sup>[4]</sup>对邻近既有车站深基坑的变形特性开展了现场监测和数值模拟,结果表明,基坑开挖卸荷造成的坑底土体隆起,是既有车站开挖过程中向上抬升的主要原因,并进一步给出了相应的控制措施。Li等<sup>[5]</sup>总结了深基坑开挖过程中支护结构水平位移、锚杆内力和土体变形的发展规律,同时分析了周边建筑物的变形发展规律。翁志坚等<sup>[6]</sup>对某深基坑开挖过程中的基坑变形开展了现场监测和数值分析,结果表明由于车站整体刚度较大,靠近车站侧的基坑水平变形较小。Li等<sup>[7]</sup>分析了北京某车站基坑开挖变形特性,并研究了基坑支护结构参数对基坑稳定性的影响。李文强等<sup>[8]</sup>对砂卵石地层基坑支护结构水平位移和地表沉降进行了分析,并给出了围护桩桩径、嵌固深度和锚索倾角建议值。刘守花等<sup>[9]</sup>研究了狭长型基坑的宽度对其变形特性的影响,分析表明减小基坑宽度可减小土压力和支护结构内力,并降低对周边环境的影响。陈玉良等<sup>[10]</sup>建立了“桥墩-地基-基坑”三维有限元模型,对不同开挖方案和支护结构下基坑和桥墩的变形特性进行了分析,得到了基坑最优开挖方案和支护结构。以上研究对深基坑开挖变形特性和优化设计提供了重要参考,但上述多针对于对称基坑开挖变形特性开展研究。与对称基坑相比,非对称基坑开挖时的土体变形和支护结构受力有较大的不同。金亚兵等<sup>[11]</sup>、范晓真等<sup>[12]</sup>分别提出了非对称基坑支护结构受力和变形的理论计算方法,但均存在一定局限性。此外,针对非对称基坑变形特性的现场实测和数值模拟分析还较少,有待进一步研究。

本文依托天津滨海新区东海路排水管网改造工程中基坑开挖施工,对基坑变形开展现场监测,并建立基坑三维有限元模型,研究基坑围护桩桩体水平位移和地表沉降的发展规律,分析不同围护桩设计参数对基坑变形规律的影响。

## 1 工程概况

### 1.1 项目概况

天津滨海新区东海路排水管网改造工程起点为航运一道南侧,终点与海港公园方涵连接,本工程范围起点至第五大街段为顶管施工,顶管与方涵连接处需进行基坑开挖施工,如图1所示。基坑设计长40m,宽15.7m,平面呈矩形,分为3层结构

段和5层结构段,其中3层结构段长19m、宽15.7m,坑深18.53m;5层结构段长21m、宽15.7m、深35.89m,属于深基坑工程。拟采用盖挖逆作法进行施工,基坑支护结构设有5道混凝土支撑,并采用钻孔灌注桩作为围护结构,围护桩桩径1200mm,桩间距为1000mm,3层结构段桩体嵌入深度5.0m,5层结构段桩体嵌入深度3.5m。基坑南侧紧靠城市交通干道,车流量大,周边规划以商业和住宅用地为主,建(构)筑物密集,地质条件复杂。



图1 基坑平面

Fig. 1 Plane of the foundation excavation

### 1.2 工程地质条件

工程场地范围地面高程为8.040~10.740m,开挖深度范围内的地层呈现典型“上软下硬”的土岩复合结构,表层覆盖海陆交互沉积与河漫滩砂土及软黏土,下伏基岩为强风化砂岩及中风化砂岩,岩土层物理力学参数如表1所示。由表1可知,场地内软土主要为淤泥质粉质黏土,厚度约18.3m,具有含水率高、压缩性高、抗剪强度低等工程特性,易使基坑在开挖过程中产生过大变形。此外,上软下硬地层刚度突变会造成基坑支护结构产生应力集中,增大基坑支护结构破坏风险。场地浅层地下水为孔隙潜水,稳定地下水位埋深为1.4~4.8m,受降雨条件变化较大,年变幅1~1.5m。

### 1.3 基坑施工方案

与明挖法相比,盖挖逆作法采用立柱、上部顶板及中间板作为基坑内支撑,结构整体性较好,且具有较大的支撑刚度,在地下水丰富和软土地层施工时,能够更好地对基坑变形进行控制,提高基坑稳定性,并减少对周边环境的影响。因此,本次基坑开挖采用盖挖逆作法施工,具体施工步骤如表2和图2所示。

## 2 现场监测分析

### 2.1 现场监测方案

基坑开挖会引起地表沉降和支护结构变形,基坑的变形特性与工程地质条件、周边环境变化和开挖支护情况等密切相关。为准确获得深基坑变形特性,在基坑开挖过程中,对围护桩桩体水平位移和地表沉降开展现场监测,主要监测项目如表3所示,

表 1 岩土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of strata

岩土层	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	天然含 水率/%	压缩 模量/MPa	黏聚力/ kPa	内摩 擦角/( $^\circ$ )	渗透 系数/( $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ )	厚度/m
素填土	1 870	24.6	2.0	8	12.0	2.000	0.5
淤泥质粉质黏土	1 780	42.4	2.8	6	10.0	0.003	18.3
中密粗砂	1 900	36.2	5.5	0	22.0	60.000	3.0
粉质黏土	1 920	24.9	4.5	16	24.0	0.006	8.0
强风化砂岩	2 050	—	32.0	0	40.5	—	14.0
中风化砂岩	2 050	—	—	65	38.0	—	—

表 2 基坑施工方案

Table 2 Construction plan of the foundation excavation

施工步骤	工序内容
①	基坑围护结构施工及基坑降水
②	基坑第 1 次开挖至地下-4.000m 标高处,在标高-3.500m 处浇筑顶板
③	基坑第 2 次开挖至地下-8.500m 标高处,在标高-8.100m 处浇筑地下 1 层中间板
④	基坑第 3 次开挖至地下-14.500m 标高处,在标高-14.000m 处浇筑地下 2 层中间板
⑤	基坑第 4 次开挖至地下-21.500m 标高处,在标高-21.000m 处浇筑地下 3 层中间板,并完成与围护结构钢筋的连接,浇筑侧墙
⑥	基坑第 5 次开挖至地下-27.500m 标高处,在标高-27.00m 处浇筑地下 4 层中间板
⑦	基坑第 6 次开挖至地下-34.000m 标高处,在标高-34.000m 处浇筑基坑底板,并完成与围护结构钢筋的连接,浇筑侧墙
⑧	待混凝土强度达到设计要求后,开挖至基坑底部,并浇筑混凝土

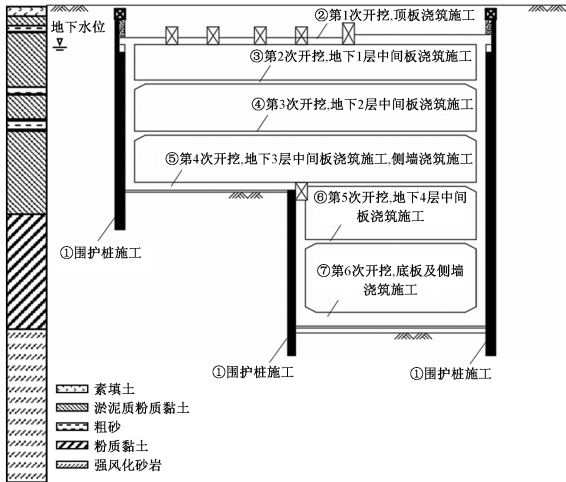


图 2 盖挖逆作法施工步骤

Fig. 2 Construction sequences of cover-and-excavation reverse method

具体测点位置如图 3 所示。由图 3 可知,本次现场监测沿围护结构布设 6 个桩体水平位移监测点,编号为 ZD1~ZD6。此外,依据 GB 50497—2019《建筑基坑工程监测技术标准》的规定并参考类似工程经验,在距基坑边缘 2.5,10,25m 处分别布设 18 个地表沉降监测点。

### 2.2 桩体水平位移

本次基坑开挖施工过程中,不同监测点处桩体水平位移均未超过控制值,最大桩体水平位移位于监测点 ZD4 埋深 10m 处,约 24mm。选取基坑开挖过程中监测点 ZD2 和 ZD6 处桩体水平位移的变化

表 3 监测项目

Table 3 Monitoring items

监测项目	监测点编号	变形控制 值/mm	变形控制 速率/( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )
桩体水平位移	ZD1~ZD6	25	2
地表沉降	DB1-1~DB3-6	30	3

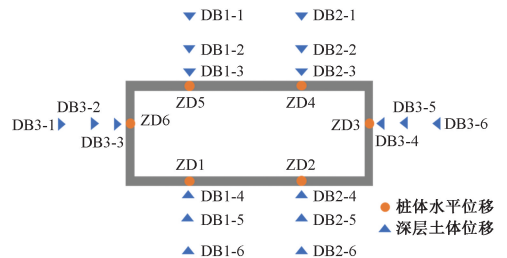


图 3 监测点布置

Fig. 3 Layout of the monitoring points

规律进行分析,其桩体水平位移分布曲线如图 4 所示,其中,桩体水平位移以向基坑内为正,向基坑外为负。由图 4 可知,基坑开挖过程中,桩体主要发生向基坑内的水平位移。基坑开挖不超过 14.5m 时,由于开挖深度较浅,围护桩和混凝土盖板及内支撑能够较好地承担土压力,使得桩体水平位移较小,最大值约 5mm。随着基坑继续向下开挖,桩体继续发生趋向于基坑内的水平位移,当开挖深度 27m 时,桩体水平位移达到最大,开挖深度 34m 时桩体水平位移与开挖深度 27m 时较为一致。在长边测点 ZD2 处,当开挖深度不超过 21m 时,桩体水平位移呈现典型的悬臂式分布特征,即桩体最大水平位

移出现在桩顶处,其水平位移随深度的增加不断减小,在30m深度处逐渐趋近于0。当开挖深度为27m和34m时,桩体水平位移随深度增大呈先增大后减小的趋势,桩体最大水平位移出现在深度7m处。而在短边测点ZD6处,桩体水平位移沿深度呈现“弓”字形分布,即随着深度的增加,桩体水平位移呈现先增大后减小的趋势。当开挖深度不超过14.5m时,桩体最大水平位移出现在深度4.5m处,此外,深度13~20m的桩体甚至出现向基坑外的水平位移;当开挖深度大于14.5m时,桩体最大水平位移出现在深度11m处。

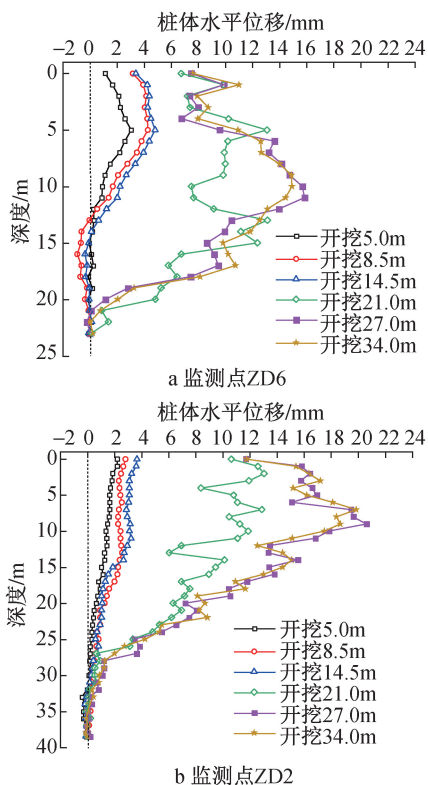


图4 桩体水平位移

Fig. 4 Horizontal displacement of retaining pile

由图4可知,基坑短边测点ZD6处的桩体最大

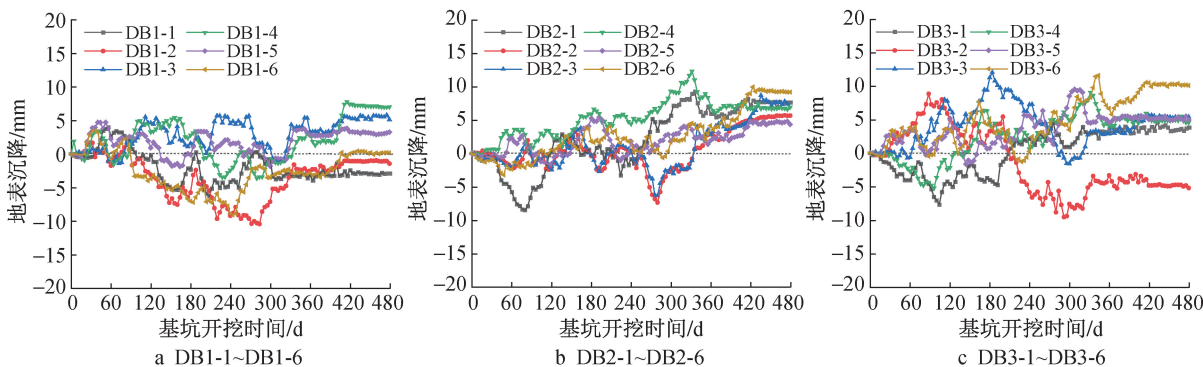


图5 地表沉降量监测结果

Fig. 5 Monitoring results of ground settlement

水平位移为15.86mm,而基坑长边测点ZD2处的桩体最大水平位移为19.88mm,基坑长边桩体水平位移总体上大于基坑短边桩体水平位移,这是由于基坑长边跨度大于短边,使得基坑长边桩体和支护结构的整体结构刚度相对更低,基坑开挖卸荷产生的土压力作用下,长边不同测点处的桩体水平位移更大。此外,较大的开挖面积使得基坑产生明显的空间效应,长边跨中区域产生明显的应力重分布和应力集中现象,使得基坑长边和短边处的桩体水平位移出现显著差异。

### 2.3 地表沉降分析

基坑周边不同测点处地表沉降随基坑开挖时间的变化规律如图5所示,图中以地表沉降为正值,地表隆起为负值。由图5可知,基坑开挖过程中,基坑周围地表均产生不同程度的沉降,其中,监测点DB2-1~DB2-6沉降较大,沉降量约10.6mm。而监测点DB1-1, DB1-2和DB3-2处则产生隆起,隆起最大值约9.7mm。此外,除监测点DB2-1~DB2-3和DB1-4~DB1-6外,其余各监测断面的地表沉降均随基坑边缘距离的增加先增大后减小,这表明围护桩水平位移使得地表沉降呈现“盆”形分布,地表最大沉降量通常在基坑边缘一定距离处产生。因此,基坑开挖施工期间,不仅要密切监测基坑边缘处的地表沉降,还应关注基坑周边土体的变形发展。

## 3 数值模拟分析

### 3.1 数值模型建立

为进一步研究天津滨海新区东海路排水管网改造工程中深基坑变形特性,建立基坑三维有限元模型。基坑开挖对周围土体的影响一般为3~5倍开挖深度<sup>[4,8]</sup>,为减小边界条件的影响,模型尺寸设置为长180m,宽160m,高120m,如图6所示。在设置边界条件时,固定模型下表面的水平位移和竖向位移,并限制模型四周法向位移,模型上表面则设

置为自由边界。假定土体为连续、均质、各向同性的弹塑性体,物理力学参数如表 1 所示,采用 Mohr-Coulomb 本构模型作为土体本构模型。假设钢筋混凝土构件均为线弹性材料,钻孔灌注桩采用等刚度原则换算为板单元进行模拟<sup>[8,14]</sup>,其物理力学参数如表 4 所示。为模拟钻孔灌注桩与周边土体之间的相互作用,在模型中设置桩-土接触类型为面-面接触,选取钻孔灌注桩表面为主面,土体表面为从面,采用硬接触模拟桩-土法向接触行为,采用罚函数模拟桩-土切向接触行为,摩擦系数为 0.1。

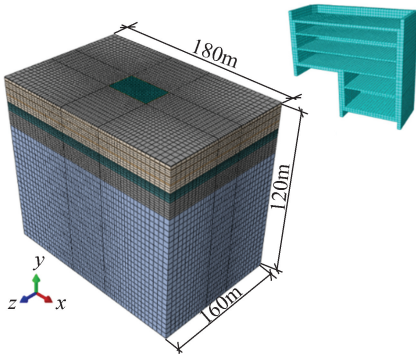


图 6 基坑三维有限元模型

Fig. 6 Finite element model of foundation excavation

表 4 基坑支护结构材料参数

Table 4 Material parameters of foundation excavation retaining structures

支护结构	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量/GPa	泊松比
钻孔灌注桩	2 500	30.0	0.20
混凝土盖板	2 500	31.5	0.20
混凝土中间板	2 500	30.0	0.20
侧墙	2 500	30.0	0.20

根据基坑实际施工过程(见表 2),模拟 7 个施工工况,分别为地应力平衡、开挖至 5.0, 8.5, 14.5, 21.0, 27.0, 34.0m 深度,数值模拟中基坑开挖施工按照现场施工方案进行。

### 3.2 模型验证

选取监测点 ZD5 的桩体水平位移和监测点 DB1-4~DB1-6 处的地表沉降实测值与模拟结果进行对比,如图 7 所示。由图 7a 可知,实测和模拟中桩体水平位移沿深度方向均呈现先增大后减小的趋势,实测桩体水平位移在深度 7m 处达到最大值 19.89mm,而数值模拟结果的桩体水平位移则在深度 10m 处达到最大值 21.3mm,现场监测与数值模拟获得的最大桩体水平位移相差较小。由图 7b 可知,数值模拟结果中地表沉降随基坑边缘距离的增加呈先增大后减小的趋势,监测点 DB1-5 和 DB1-6 的现场实测结果与数值模拟结果相差较小。综上

所述,上述建立的基坑三维有限元模型可以有效模拟基坑开挖过程中桩体水平位移和地表沉降的发展规律,进而分析基坑变形特性。

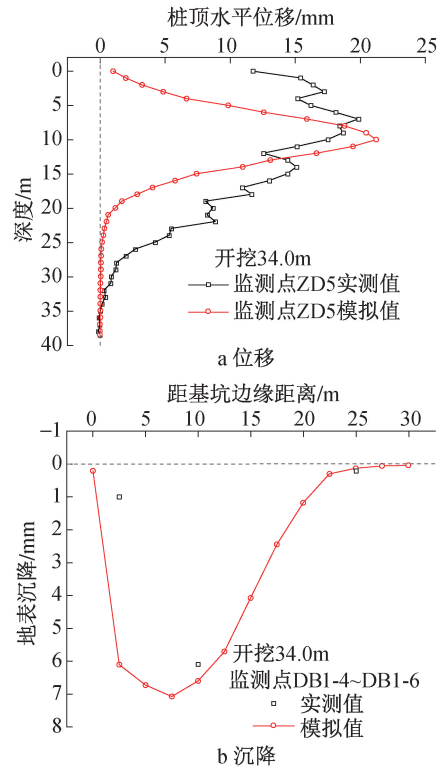


图 7 桩体水平位移和地表沉降实测值与模拟值对比

Fig. 7 Comparison of field monitoring and numerical simulation of horizontal displacement of retaining pile and ground settlement

### 3.3 深基坑变形控制

#### 3.3.1 围护桩桩径

本次基坑工程中采用钻孔灌注桩作为围护桩,以抵抗基坑开挖卸荷产生的土压力,并确保基坑稳定性。围护桩桩径与支护结构体系的刚度密切相关,也对基坑变形特性有重要影响。为此,将围护桩桩径分别设置为 800, 1 000, 1 200, 1 400mm 进行模拟分析,对比不同桩径下基坑变形发展规律,结果如图 8 所示。由图 8a 可知,不同桩径条件下,围护桩桩体水平位移曲线形态基本相似,最大水平位移出现在深度 11m 处。随着桩径的增大,桩体水平位移逐渐减小,这表明增大桩径能有效增强支护结构整体刚度,控制基坑变形。当桩径为 1 000mm 时,桩体最大水平位移为 25.72mm。当桩径为 1 200mm 时,桩体最大水平位移为 21.3mm,此时,桩体水平位移未超过表 2 中桩体水平位移限值。如图 8b 所示,不同桩径条件下,地表沉降随距基坑边缘距离增加先增大后减小,并且最大沉降发生在距基坑边缘 7.5m。当距基坑边缘超过 27.5m 后,地

表基本不发生沉降。随着围护桩桩径增大,地表沉降逐渐减小。桩径 800,1 000,1 200,1 400mm 时地表最大沉降分别为 17.6,10.9,7.1,4.1mm,均未超过表 2 中地表沉降限值。综合工程经济性和支护结构安全性,围护桩桩径可选择为 1 200~1 400mm。

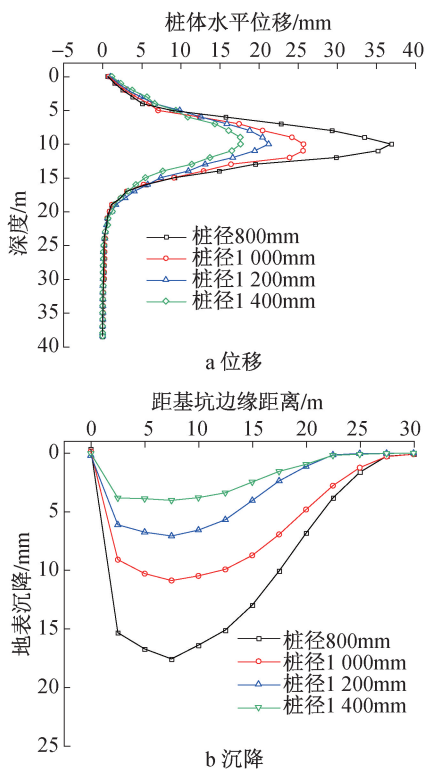


图 8 不同桩径时桩体水平位移和地表沉降

Fig. 8 Horizontal displacement of retaining pile and ground settlement with different pile diameters

### 3.3.2 围护桩桩间距

基坑支护体系刚度与围护桩桩间距密切相关,为此,将围护桩桩间距分别设定为 800,1 000,1 500,2 000mm 进行模拟分析,研究不同桩间距时基坑变形发展规律,结果如图 9 所示。由图 9 可知,随着桩间距的增大,体水平位移和地表沉降均逐渐增大,当桩体水平位移曲线和地表沉降曲线形态不随桩间距的增大而发生变化。如图 9a 所示,桩间距 800,1 000,1 500mm 时,桩体最大水平位移量分别为 20.26,21.3,23.16mm。桩间距由 800mm 增加至 1 000mm 时,桩体最大水平位移量增加不大;当桩间距超过 1 000mm 时,桩体最大水平位移迅速增加;当桩间距为 2 000mm 时,桩体最大水平位移约 26.27mm,此时不满足基坑对桩体水平位移的控制要求。如图 9b 所示,桩间距分别为 800,1 000,1 500,2 000mm 时,地表最大沉降分别为 6.9,7.1,8.5,10.4mm。需要说明的是,虽然桩间距 2 000mm 时的地表最大沉降为超过表 2 中的限值,但当桩间

距>1 000mm 时,地表最大沉降随桩间距呈现迅速增大的趋势,可能使基坑周围土体产生较大沉降。综上所述,围护桩桩间距设置在 1 000~1 500mm 时能够较好地保证基坑开挖稳定性。

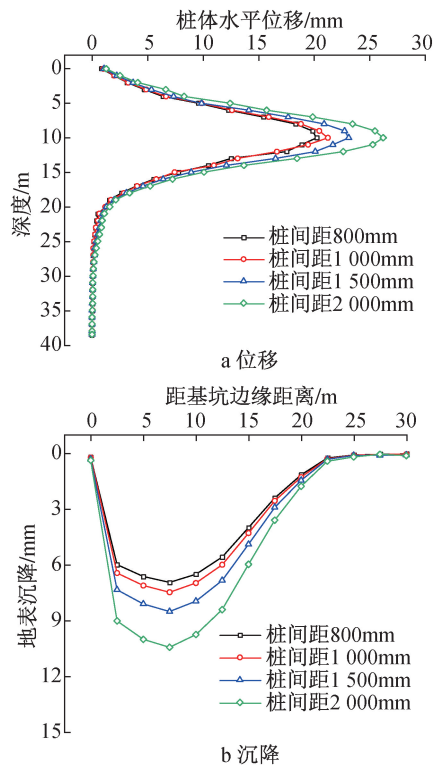


图 9 不同桩间距时桩体水平位移和地表沉降

Fig. 9 Horizontal displacement of retaining pile and ground settlement with different pile spaces

### 3.3.3 围护桩嵌固深度

围护桩嵌固深度对基坑变形和稳定性具有重要影响,为此,根据工程实际情况分别设计 5 种组合的围护桩嵌固深度,分别为:①3 层结构段 3m,5 层结构段 1.5m;②3 层结构段 4m,5 层结构段 2.5m;③3 层结构段 5m,5 层结构段 3.5m;④3 层结构段 6m,5 层结构段 4.5m;⑤5 层结构段 7m,5 层结构段 5.5m。对不同组合情况下的基坑变形特性开展数值模拟,结果如图 10 所示。

由图 10 可知,随着围护桩嵌固深度的增加,桩体最大水平位移和地表最大沉降均非线性减小。当 3 层结构段 3m,5 层结构段 1.5m 时,由于围护桩嵌固深度较浅,桩前强风化砂岩地层能够提供的抗力较小,桩体最大水平位移和地表最大沉降较大,分别达到 24.71mm 和 15.98mm。当 3 层结构段 4m,5 层结构段 2.5m 时,桩体最大水平位移和地表最大沉降较大,分别达到 21.28mm 和 6.09mm。随着围护桩嵌固深度继续增大,桩体最大水平位移和地表最大沉降略有减小,这表明继续增加嵌固深度

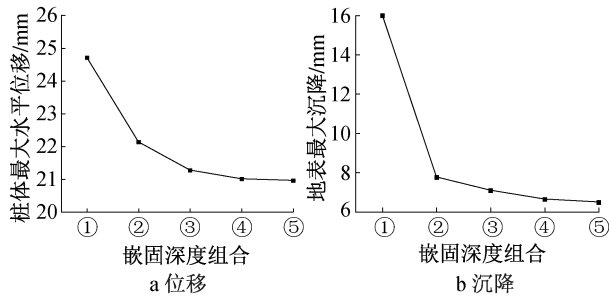


图 10 不同嵌固深度时桩体最大水平位移和地表最大沉降

Fig. 10 Maximum horizontal displacement of retaining pile and maximum ground settlement with different embedded depths

对基坑变形的影响较小。因此,围护桩嵌固深度可设计为 3 层结构段 4m,5 层结构段 2.5m。

#### 4 结语

1) 桩体水平位移随深度的增加呈先增大后减小的趋势,桩体水平位移在深度 10m 处达到最大。由于基坑长边跨度较大使得支护结构刚度相对较小,基坑长边处的桩体水平位移比短边处更大。

2) 基坑开挖后地表以沉降为主,地表沉降随距基坑边缘距离的增大呈现先增大后减小的趋势,地表沉降在距基坑边缘距离约 7.5m 处最大。当距基坑边缘距离大于 30m 时,地表基本不发生沉降。

3) 桩顶水平位移和地表沉降随着桩径和嵌固深度的增大而减小,随着桩间距的增大而增大。考虑基坑稳定性和工程经济性,建议围护桩桩径设计为 1 200~1 400mm,桩间距设计为 1 000~1 500mm,3 层结构段和 5 层结构段围护桩嵌固深度宜分别不小于 4m 和 2.5m。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 丘道展. 城市中心地带狭小空间深基坑开挖支护技术研究 [J]. 施工技术(中英文),2025,54(22):40-44.  
 QIU D Z. Research on excavation and support technology of deep foundation excavation in narrow space in urban center [J]. Construction technology,2025,54(22):40-44.
- [ 2 ] 张中杰,周赫宸,顾晓强,等. 天津某超深地铁基坑变形分析与小应变硬化参数取值[J]. 浙江大学学报(工学版),2025,59(12):2593-2603.  
 ZHANG Z J,ZHOU H C,GU X Q,et al. Deformation analysis and parameter determination of hardening soil model with small strain of an ultra-deep subway excavation in Tianjin [J]. Journal of Zhejiang University (engineering science),2025,59(12):2593-2603.
- [ 3 ] 王卫东. 软土深基坑变形及环境影响分析方法与控制技术 [J]. 岩土工程学报,2024,46(1):1-25.  
 WANG W D. Analytical methods and controlling techniques for deformation and environmental influence of deep excavations in

soft soils[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2024,46(1):1-25.

- [ 4 ] 张利平,王大梁,张硕隽,等. 富水砂卵石地层双基坑开挖引起的邻近既有车站变形规律分析[J]. 施工技术(中英文),2025,54(15):83-89.  
 ZHANG L P,WANG D L,ZHANG Q J,et al. Analysis of deformation characteristic in adjacent existing station induced by twin foundation excavation construction in water-rich sandy cobble stratum[J]. Construction technology,2025,54(15):83-89.
- [ 5 ] LI Z Q. Displacement monitoring during the excavation and support of deep foundation pit in complex environment [J]. Advances in civil engineering,2021(1):5715306.
- [ 6 ] 翁志坚. 深基坑施工对临近既有车站结构变形的影响[J]. 中国科技论文,2021,16(10):1055-1060,1067.  
 WENG Z J. Influence of deep foundation pit construction on deformation of adjacent subway station[J]. China sciencepaper,2021,16(10):1055-1060,1067.
- [ 7 ] LI P F, LI Z, GE C H, et al. Deformation characteristics and redundancy analysis of deep foundation pit excavation of metro stations constructed by the cover-and-cut method in sandy stratum [J]. Tunnelling construction, 2023, 43: 98-108.
- [ 8 ] 李文强,谢雄心. 砂卵石地层深基坑变形规律与控制技术研究[J]. 施工技术(中英文),2025,54(9):111-116.  
 LI W Q,XIE X X. Study on deformation law and control technology of deep foundation excavation in sandy pebble stratum [J]. Construction technology,2025,54(9):111-116.
- [ 9 ] 刘守花,王兆亮,阳军生,等. 广州软土地区狭长型深基坑变形性状及影响因素分析 [J]. 建筑科学,2025,41(3):140-148.  
 LIU S H,WANG Z L,YANG J S,et al. Study on deformation mechanism and influence factors of long and narrow deep excavation in Guangzhou soft soil area [J]. Building science,2025,41(3):140-148.
- [ 10 ] 陈玉良,李丹,庞建国,等. 深基坑施工对邻近南京长江大桥引桥桥墩影响分析 [J]. 施工技术(中英文),2023,52(24):17-21,59.  
 CHEN Y L,LI D,PANG J G,et al. Analysis of the influence of deep foundation excavation on the approach bridge pier of Nanjing Yangtze River bridge [J]. Construction technology,2023,52(24):17-21,59.
- [ 11 ] 金亚兵,余棚,葛帆,等. 非对称开挖基坑支护结构受力与变形计算方法 [J]. 长江科学院院报,2025,42(8):101-110.  
 JIN Y B,YU P,GE F,et al. Incremental iterative calculation method for stress and deformation of retaining structures under asymmetric excavation [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute,2025,42(8):101-110.
- [ 12 ] 范晓真,许海明,徐长节,等. 非对称开挖砂性土基坑刚性支护结构解析 [J]. 上海交通大学学报,2020,54(4):397-405.  
 FAN X Z,XU H M,XU C J,et al. Analytical solution for rigid retaining structure under asymmetric excavation in cohesionless soil [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University,2020,54(4):397-405.