

# 单排围护桩选型对深基坑工程的影响研究

黄波, 陈莹, 胡世兴, 赵越, 冉令

中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都

收稿日期: 2024年3月19日; 录用日期: 2024年4月9日; 发布日期: 2024年4月18日

## 摘要

依托成都市市区某基坑工程, 使用有限元软件分析了单排桩不同桩径及桩间距对场地及围护结构体系的影响。分析表明: 随围护桩桩间距的加密, 基顶水平位移值、基底隆起值、桩身最大弯矩、桩身最大剪力减小, 基顶沉降值增大; 随着围护桩桩径的增大, 基顶水平位移值、基底隆起值减小, 基顶沉降值、桩身最大剪力增大, 桩身最大弯矩明显增大。围护桩每延米抗弯刚度增大3倍, 基顶沉降增大20.2%, 基顶水平位移减小8.6%, 基底隆起减小12.5%, 桩身最大水平位移减小10.2%; 桩间距相同时, 桩径由1.2 m增大至1.5 m, 最大弯矩增大约130%。围护桩远离基坑的水平变形使得基顶沉降变小, 地下水对本工程影响较小。

## 关键词

基坑开挖, 单排围护桩, 变形, 受力

# Study on the Influence of Single-Row Enclosure Pile Selection on Deep Foundation Pit Engineering

Bo Huang, Ying Chen, Shixing Hu, Yue Zhao, Ling Ran

China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu Sichuan

Received: Mar. 19<sup>th</sup>, 2024; accepted: Apr. 9<sup>th</sup>, 2024; published: Apr. 18<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Based on a certain foundation pit project in the urban area of Chengdu, the influence of different pile diameters and spacing on the site and retaining structure system was analyzed using finite element software. The analysis indicates that: with the densification of the spacing between re-

taining piles, the horizontal displacement at the foundation top, foundation uplift, maximum bending moment of the pile, and maximum shear force of the pile decrease, while the foundation settlement increases. With the increase of the diameter of the retaining piles, the horizontal displacement at the foundation top, and foundation uplift decrease, while the foundation settlement, maximum pile shear force, and maximum pile bending moment significantly increase. The flexural stiffness of a retaining pile per meter increases by 3 times, leading to a 20.2% increase in foundation settlement, an 8.6% decrease in horizontal displacement at the foundation top, a 12.5% decrease in foundation uplift, and a 10.2% decrease in maximum pile horizontal displacement. With the same spacing, as the pile diameter increases from 1.2m to 1.5m, the maximum bending moment increases by approximately 130%. The horizontal deformation of the retaining piles away from the foundation pit results in reduced foundation settlement, and the impact of groundwater on this project is relatively small.

## Keywords

Excavation of Foundation Pit, Single-Row Enclosure Pile, Deformation, Stress

Copyright © 2024 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

城市及部分特殊工点旁的基坑项目由于周边环境复杂, 必须采用支护结构进行加固, 减小对周边环境的扰动, 而随着城市的发展, 基坑工程也越来越多。深基坑常使用围护桩进行支护, 基坑的稳定主要由周边岩、土体, 围护桩及支撑结构共同保障且相互影响, 随着场地及围护支撑结构体系的不同, 相互影响规律也不尽相同, 为此, 国内外做过很多相关的研究。孙超[1]对深基坑新型支护结构如土钉墙、连续墙的特征进行了归纳总结, 认为通过支护技术复合、支撑的组合, 能对基坑支护达到较好的效果。Leiyu Zhang [2]运用数值模拟、有限元分析计算等方法, 分析了软土基坑开挖时, 基坑中的土体变形及土体的力学特征。郝维钊[3]以某车行隧道基坑为例, 讨论了复杂基坑环境下的排桩 + 内支撑 + 截水帷幕围护方式的应用, 证明采用排桩 - 内支撑结构, 可有效地控制基坑侧壁的水平位移和周边地表沉降。沈威[4]从基坑支护方案、开挖与支护施工、基坑监控测量三方面分析了在场地受限条件下, “钻孔灌注桩 + 钢管内支撑”组合支护体系在深基坑工程中具有更大的优势。秦早立夫[5]研究了在管廊基坑中, 桩身尺寸、桩间距、桩长、内支撑位置对围护桩的水平位移效果的影响。张军贤[6]研究了基坑整体稳定性、坑底抗隆起、墙底抗隆起、抗倾覆稳定性系数以及最大沉降量随着围护桩嵌固深度的变化趋势, 基坑整体稳定性、坑底抗隆起、墙底抗隆起、抗倾覆稳定性系数以及最大沉降量随着围护桩嵌固深度的增加呈非线性增大的趋势。徐凌[7]利用 FLAC-3D 软件对不同深基坑工程进行模拟分析, 研究不同基坑支护结构受力和变形, 得出排桩加内支撑的结构形式支护效果更好。Phillip S.K. [8]对深基坑中的排桩支护进行了研究, 分析了排桩桩身的受力特征和位移, 得出了排桩数越多, 桩身变形控制越好的结论。当前, 国内外研究者证明了围护桩 + 内支撑方案在深基坑工程中的优势, 但鲜有人对围护桩选型变化对基坑工程的影响规律进行探索。本文使用二维有限元分析软件, 对成都市市区某基坑工程进行了开挖模拟, 对比了单排桩不同桩径及桩间距下基坑开挖对基坑周边环境及基坑围护结构体系的影响特征, 总结了其变化规律。

## 2. 数值分析模型

### 2.1. 模型建立

本数值模拟以成都市市中心某基坑工程为依托，其地层及基坑防护工程情况如图 1 所示，0~2.5 m 为稍密填筑土，2.5~6 m 为可塑~硬塑状粉质粘土、6 m 以下为卵石土，水位位于地表以下 4.1 m 处。基坑深 18.2 m，基坑宽 18.4 m，基坑共设置 4 道内支撑，第 1 道支撑为混凝土支撑，第 2~4 道撑为钢支撑，钢支撑设置预应力；围护桩为钢筋混凝土桩与素混凝土咬合桩，咬合桩充当止水帷幕，基坑内部降水。

为了减小边界效应对计算结果的影响，常取分析场地左、右两侧的计算边界为基坑宽度的 3~5 倍以上，下部计算边界为基坑开挖深度的 2 倍及以上，因此有限元分析模型宽 145 m，高 60 m；模型共设置 4 道支撑，第 1 道撑为混凝土支撑，第 2~4 道撑为钢支撑。有限元模型固定场地左右侧、下侧的方向位移，模型上侧为自由边界。围护桩两侧设置接触界面，模拟止水帷幕。模型共有 100,358 节点，99,510 单元，模型如图 2 所示。

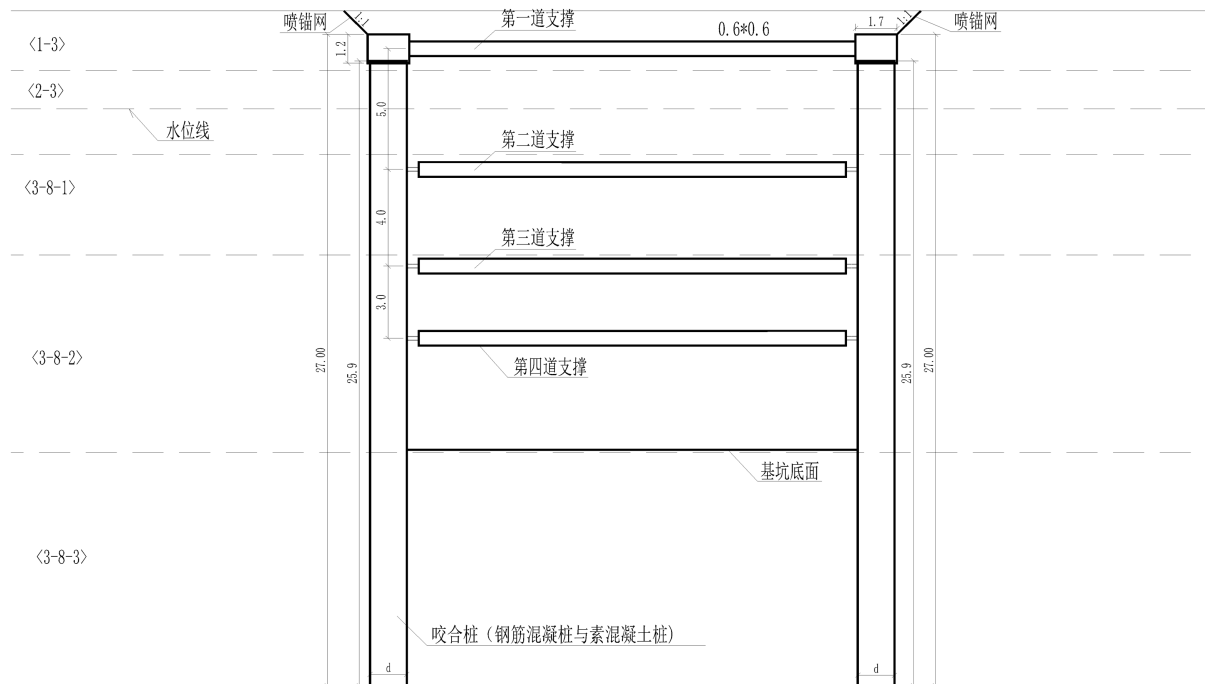


Figure 1. Representative cross-section

图 1. 代表性断面

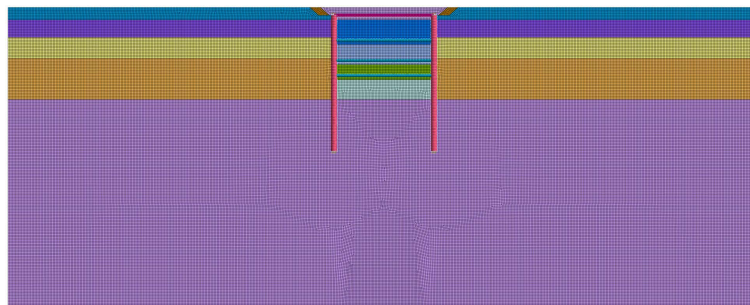


Figure 2. Two-dimensional numerical model

图 2. 二维数值模型

## 2.2. 参数选取

根据地质报告及相关设计资料,有限元分析模型材料参数如表 1 所示,内支撑设计参数如表 2 所示。

**Table 1.** Material parameters table

**表 1.** 材料参数表

类别	本构模型	弹性模量 (MPa)	泊松比	重度 (kN/m <sup>3</sup> )	黏聚力 (kPa)	内摩擦角(°)	渗透系数 m/d
<1-3>填筑土	修正摩尔库伦	50	0.25	19.5	20	13	5.E-04
<2-3>粉质黏土	修正摩尔库伦	30	0.28	19.6	27	11	1E-03
<3-8-1>卵石土(稍密)	修正摩尔库伦	180	0.23	21	0	35	25
<3-8-2>卵石土(中密)	修正摩尔库伦	260	0.22	22	0	38	20
<3-8-3>卵石土(密实)	修正摩尔库伦	300	0.2	23	0	40	18
Q235 钢	弹性本构	2.06E+05	0.2	78	-	-	-
C35 砼	弹性本构	3.15E+04	0.2	25	-	-	-

**Table 2.** Internal support design parameters

**表 2.** 内支撑设计参数

支撑编号	型号	水平间距(m)	预加轴力(kN)	轴力设计值(kN)
第一道混凝土支撑	0.6 × 0.6	6	-	-
第一道钢支撑	Φ609	3	400	700
第二道钢支撑	Φ609	3	500	1500
第三道钢支撑	Φ609	3	700	2100
第四道钢支撑	Φ609	3	700	2100

## 2.3. 模拟工况

本文建立二维数值分析模型,分析单排桩不同围护桩桩径及桩间距工况下,基坑开挖对基坑周边环境及基坑围护结构体系的影响,模拟工况如表 3 所示。

**Table 3.** Simulation table

**表 3.** 模拟工况表

序号	桩径(m)	桩间距(m)	每延米截面惯性矩(m <sup>3</sup> )
1	1.2	1.5	0.068
2		1.8	0.057
3		2	0.051
4		2.4	0.042

续表

5		1.8	0.138
6	1.5	2	0.124
7		2.5	0.099
8		3	0.083

为了便于对比围护结构强弱(桩径及桩间距)对基坑开挖的影响,将围护结构每延米惯性矩计算并绘制成图表,如图3所示。从图可看出,桩径1.5 m,间距1.8 m时围护结构能提供的每延米惯性矩最大,桩径1.2 m,间距2.4 m时最小,且随着桩间距的增大、桩径的减小,每延米惯性矩呈线性减小的趋势。

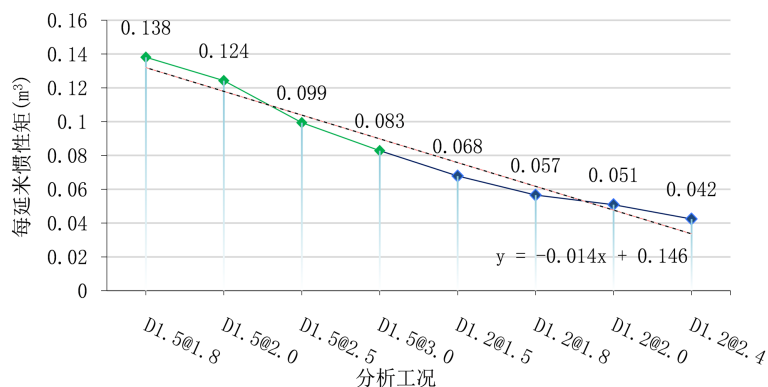


Figure 3. Diagram of moment of inertia per linear meter section

图3. 每延米截面惯性矩变化图

## 2.4. 施工步骤

基坑开挖模拟计算参照软件建模流程及实际施工过程进行模拟,考虑基坑内部降水,外部水位保持-4.1 m不变,各数值模拟工况的数值分析流程如下:

初始水力场计算,水位标高-4.1 m→初始应力场计算→位移清零→围护桩施工及第一道内支撑施工→第一层基坑开挖,开挖深度为2.5 m→第一次基坑降水,基坑内水位标高-7.9 m→第二次基坑开挖,开挖深度为7.4 m,本阶段应力释放比例为80%→第二次内支撑施工,同时施加预应力,本阶段释放所有基坑开挖应力→第二次基坑降水,基坑内水位标高-11.9 m→第三次基坑开挖,开挖深度为11.4 m,本阶段应力释放比例为80%→第三次内支撑施工,同时施加预应力,本阶段释放所有基坑开挖应力→第三次基坑降水,基坑内水位标高-14.9 m→第四次基坑开挖,开挖深度为14.4 m,本阶段应力释放比例为80%→第四次内支撑施工,同时施加预应力,本阶段释放所有基坑开挖应力→第四次基坑降水,基坑内水位标高-18.9 m→第五次基坑开挖,开挖深度为18.3 m,本阶段释放所有应力→施工期间水力场模拟。

## 3. 模拟结果及分析

### 3.1. 地表变形

基坑开挖完成后地表竖向沉降如图4所示,水平位移如图5所示。由图可知,基坑开挖完成后基坑周围地表发生沉降,且基坑顶沉降量较小,远离基坑一定距离的地表沉降相对较大,围护结构由于钢支撑的预应力作用产生远离基坑的变形,基坑底部发生隆起,模型变形规律基本合理。

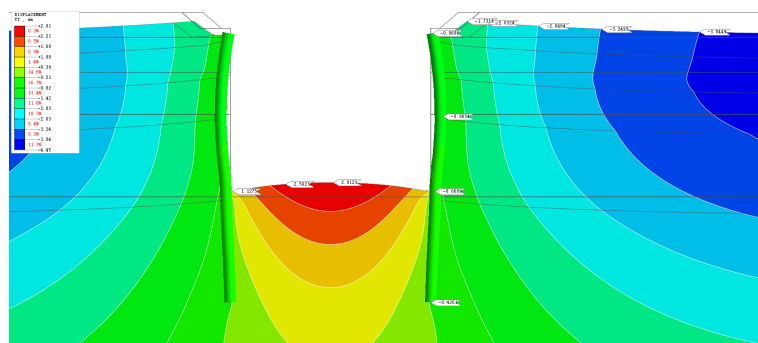


Figure 4. Vertical displacement contour map

图 4. 竖向位移云图

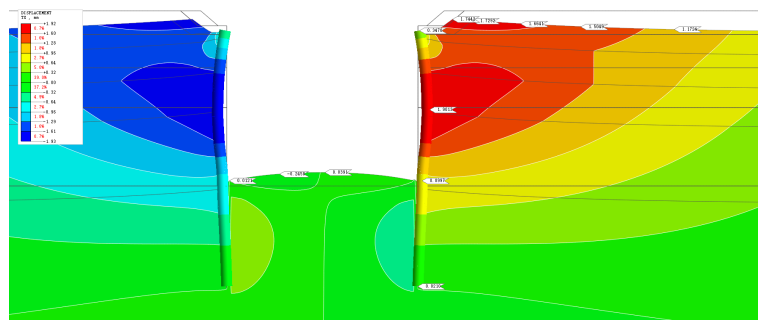


Figure 5. Horizontal displacement contour diagram

图 5. 水平位移云图

基顶及地表位移如表 4 及图 6 所示, 由图表可见, 基坑顶部产生竖向沉降及远离基坑方向的变形。基顶最大沉降值为 1.98 mm, 最大水平位移(远离基坑方向)为 1.78 mm。基顶最大沉降值随着围护桩每延米截面惯性矩的增大(围护桩抗弯能力增强)而增大, 即基顶沉降随着桩间距的加密而增大, 随着桩径的增大而增大; 基顶最大水平位移值随着随着围护桩每延米截面惯性矩的增大(围护桩抗弯能力增强)而减小, 即顶最大水平位移值随着随着桩间距的加密而减小, 随着桩径的增大而减小。当围护结构由 D1.2@2.4 加强至 D1.5@1.8(抗弯刚度由最弱变化到最强)时, 基顶沉降值由 1.646 mm 增大至 1.979 mm, 增大幅度为 20.2%; 基顶水平位移由 1.78 mm 减小至 1.63 mm, 减小幅度为 8.6%。

由图 5 可知, 桩身中部发生较大的水平位移, 挤压基坑中部两侧土体, 从而阻碍基坑两侧土体的沉降, 桩身中部的变形越大, 对基坑两侧的沉降阻碍作用越明显, 从而导致基顶沉降随围护桩抗弯刚度的减小而减小的现象。

Table 4. Base top displacement table

表 4. 基顶位移表

围护桩 类型	D1.2@1.5	D1.2@1.8	D1.2@2.0	D1.2@2.4	D1.5@1.8	D1.5@2.0	D1.5@2.5	D1.5@3.0
基顶竖向 位移/mm	-1.732	-1.688	-1.671	-1.646	-1.979	-1.920	-1.819	-1.759
基顶水平 位移/mm	1.744	1.762	1.770	1.778	1.625	1.652	1.698	1.727

注: 水平位移远离基坑方向为正。

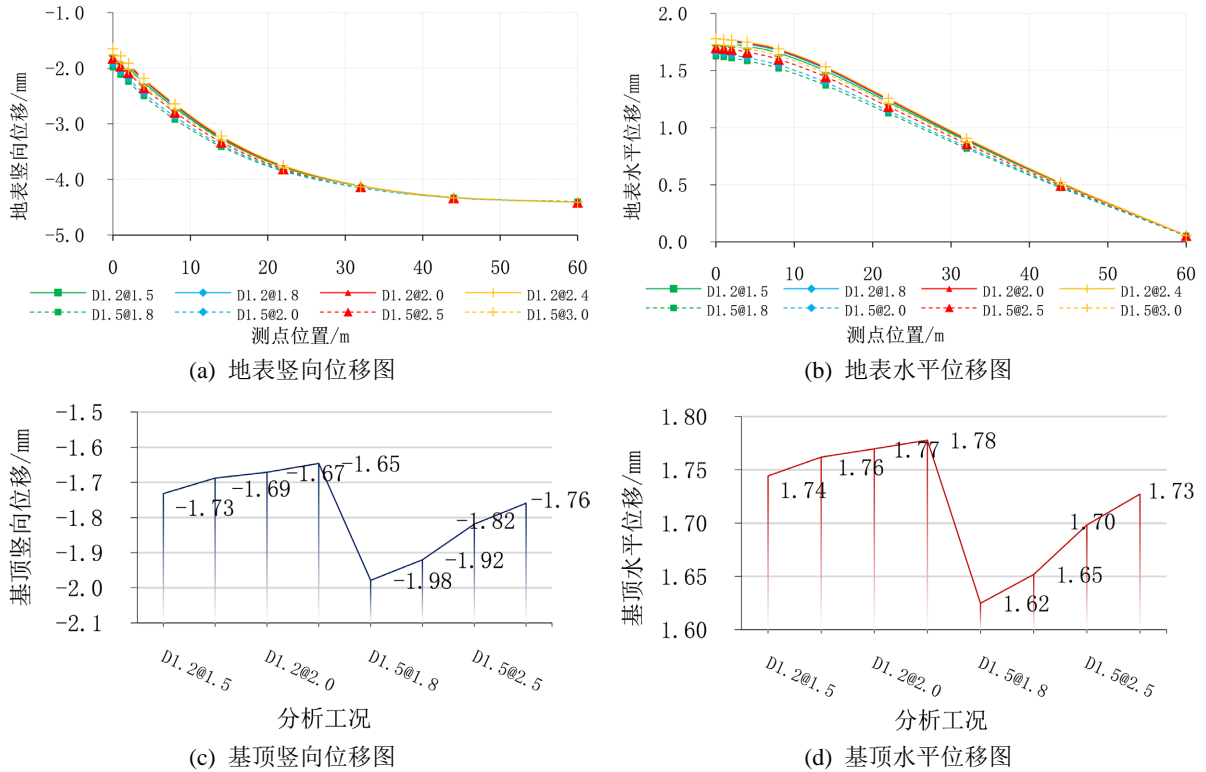


Figure 6. Surface deformation map

图 6. 地表变形图

场地总位移矢量云图如图 7 所示，远离基坑处场地发生竖向沉降，靠近基坑边缘处场地由于基坑中部的挤压，使得靠近基坑边缘的场地产生像斜下方的变形，围护桩两侧土体分别发生向下、向上的变形。靠近基坑的土体由于受到基坑水平挤压的作用发生向斜下方的变形，远离基坑的土体受基坑水平挤压影响较小，产生竖向沉降，与地表竖向位移变化特征相符。

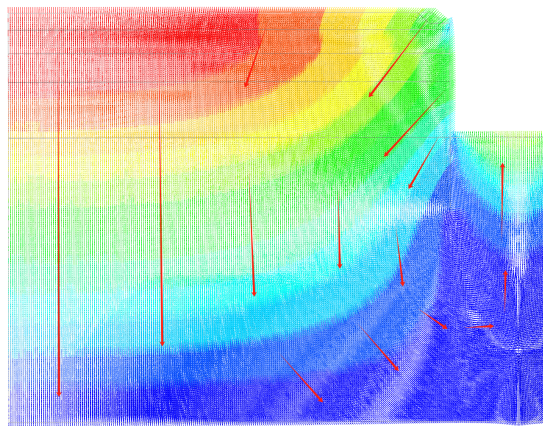


Figure 7. Displacement vector contour

图 7. 位移矢量云图

### 3.2. 基底隆起

基底隆起特征及基底最大隆起值如图 8 所示，基底隆起表现出中部大，两侧小的特征，变形规律基

本合理, 基底最大隆起值随着围护桩每延米截面惯性矩的增大(围护桩抗弯能力增强)而减小, 即基底隆起值随着桩间距的加密而减小, 随着桩径的增大而减小。当围护结构由 D1.2@2.4 加强至 D1.5@1.8 (抗弯刚度由最弱变化到最强)时, 基底隆起值由 2.92 mm 减小至 2.78 mm, 减小幅度为 12.5%。

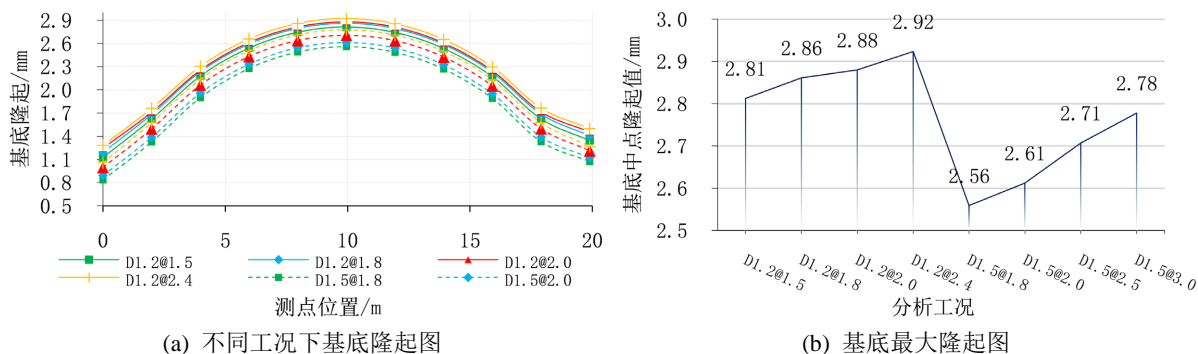


Figure 8. Basement uplift map  
图 8. 基底隆起图

### 3.3. 围护结构及支撑结构变形

围护结构代表性变形云图如图 9 所示, 内支撑结构产生竖向变形, 第一道混凝土支撑由于自重较大, 中部挠度约为 13 mm, 其余钢支撑中部挠度为 3~5 mm。围护桩产生竖向沉降, 桩顶沉降约为 1 mm, 桩顶沉降略比桩底沉降略大。

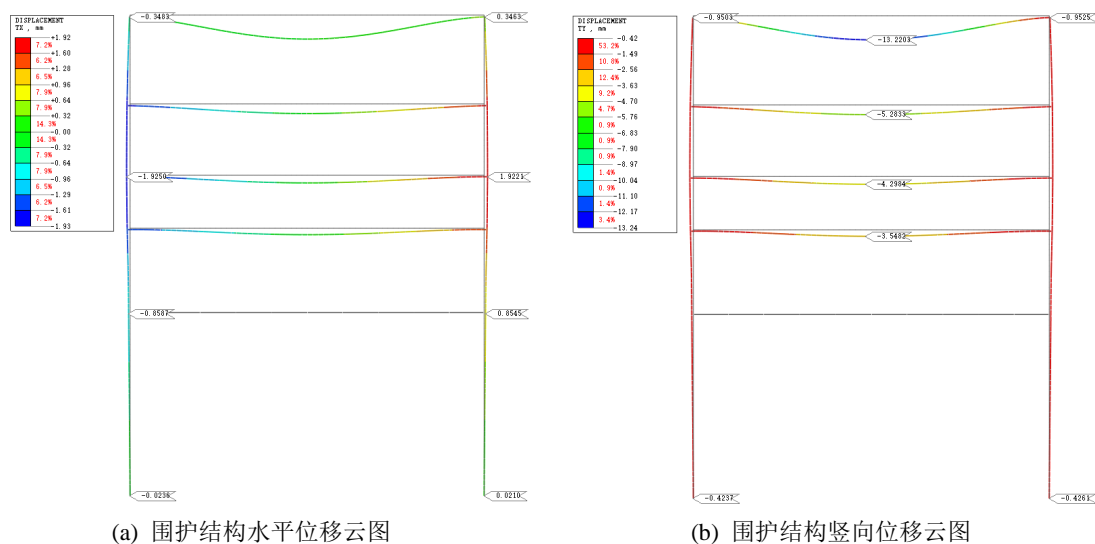


Figure 9. Retaining structure deformation map  
图 9. 围护结构变形图

图 10(a)展示了围护桩桩身变形图。围护桩中部由于钢支撑预应力作用产生远离基坑的位移, 最大位移值产生在第三道内支撑附近; 基坑顶部受第一道混凝土支撑的拉力而约束住水平变形, 变形值较小; 基坑底部位置也产生远离基坑的变形, 基底以下围护桩对桩外侧土体产生挤压作用; 桩底水平位移值接近 0 mm。

图 10(b)展示了桩身最大水平位移变化图, 桩身最大水平位移值随着围护桩每延米截面惯性矩的增大



(围护桩抗弯能力增强)而减小,即桩身最大水平位移值随着桩间距的加密而减小,随着桩径的增大而减小。当围护结构由 D1.2@2.4 加强至 D1.5@1.8 (抗弯刚度由最弱变化到最强)时,桩身最大水平位移值由 1.87 mm 减小至 1.68 mm,减小幅度为 10.2%。

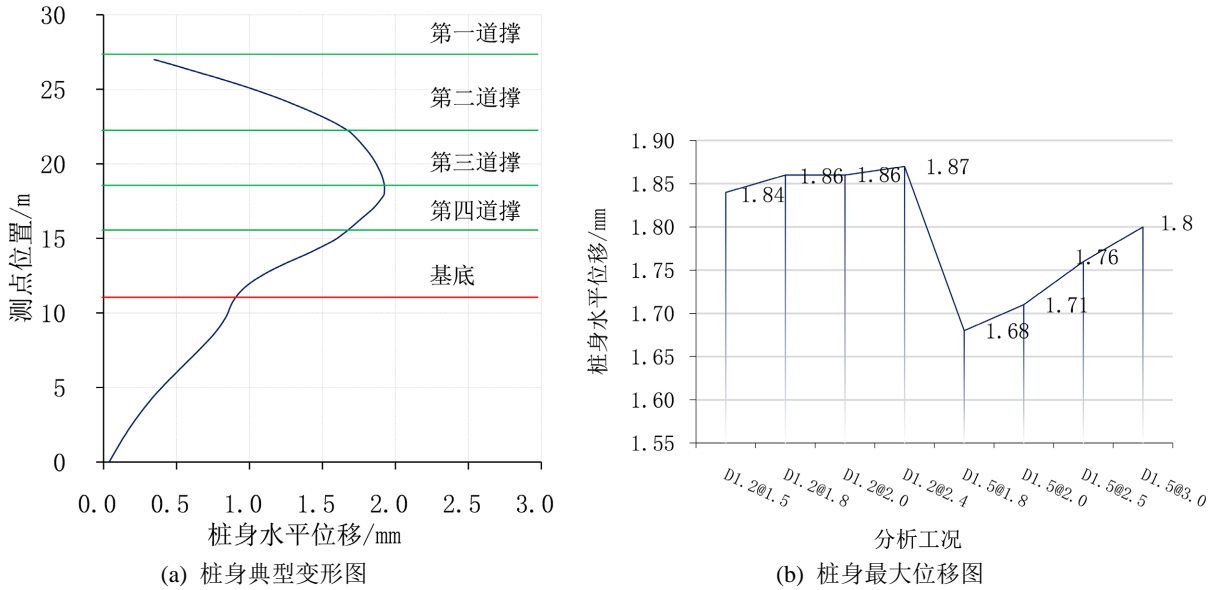


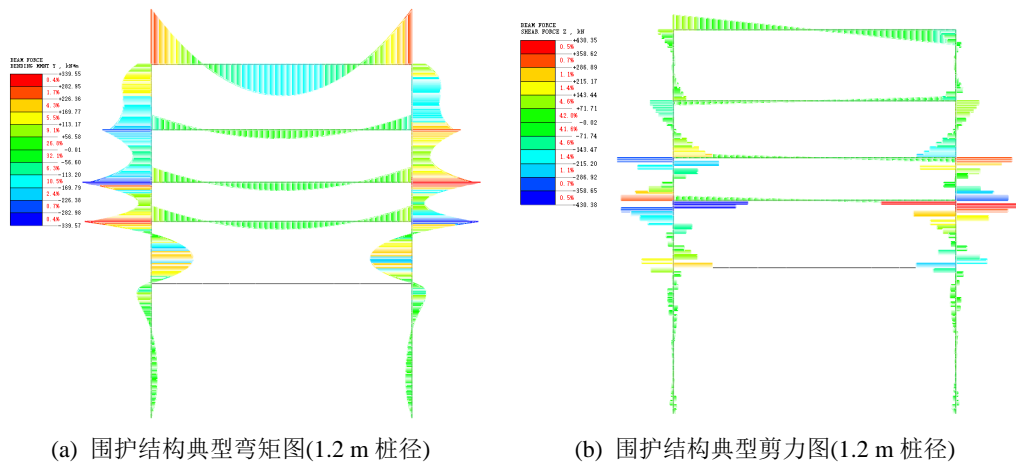
Figure 10. Diagram of pile deformation  
图 10. 桩身变形图

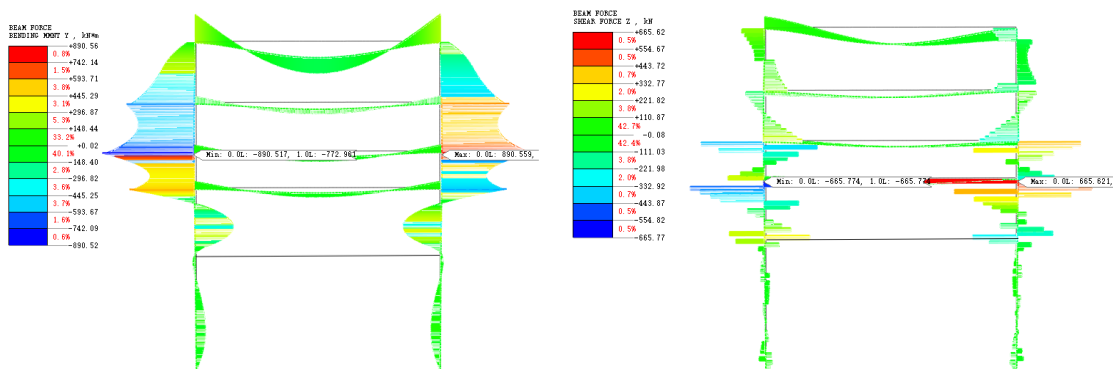
### 3.4. 围护结构及支撑结构受力

图 11 为围护结构典型受力图,内支撑范围内围护桩外侧受拉,最底层内支撑至基底范围围护桩内侧受拉,基底以下围护桩弯矩较小。当桩径增大至 1.5 m 时,围护桩外侧弯矩明显增大,剪力同时增大。

图 12 为围护桩最大受力值变化图,可以看出,随着桩间距变的逐渐稀疏,围护桩最大弯矩和最大剪力呈增大的趋势;当桩径增大后,桩身最大弯矩明显增大,最大剪力逐渐变大。

桩径 1.2 m 的条件下,桩间距由 1.5 m 变成 2.4 m 时,最大弯矩增大 38%;桩径 1.5 m 的条件下,桩间距由 1.8 m 变成 3.0 m 时,最大弯矩值增大 26.4%;当桩间距固定 1.8 m 或 2.0 m 时,桩径由 1.2 m 增大至 1.5 m,最大弯矩增大 130%左右,变化比较明显。



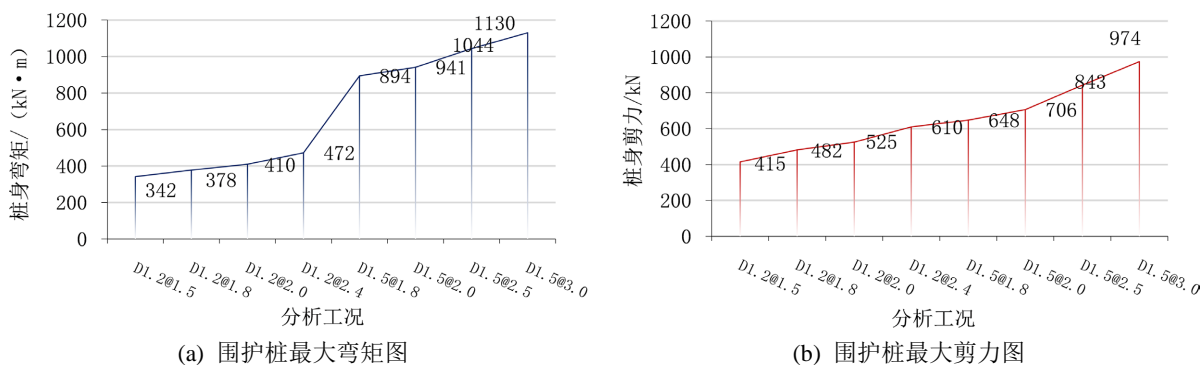


(c) 围护结构典型弯矩图(1.5 m 桩径)

(d) 围护结构典型剪力图(1.5 m 桩径)

Figure 11. Typical force diagram of the envelope structure

图 11. 围护结构典型受力图



(a) 围护桩最大弯矩图

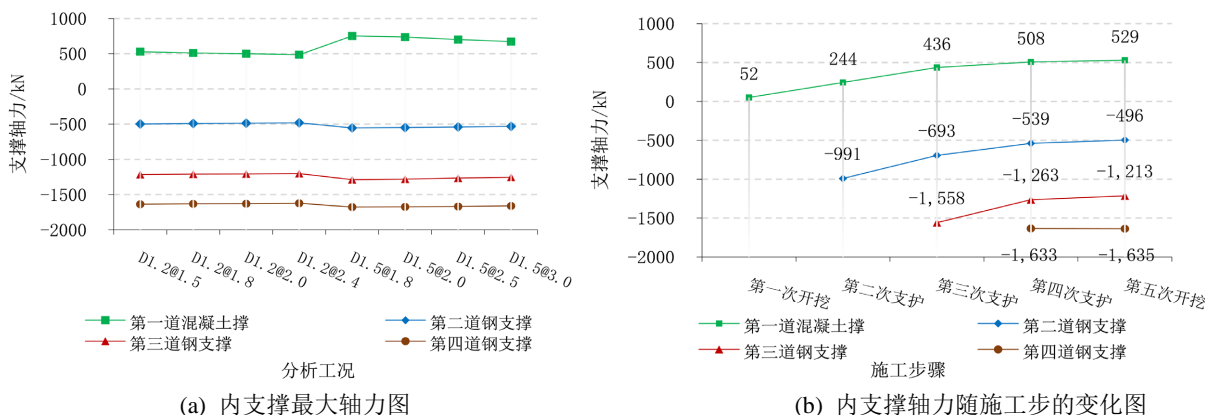
(b) 围护桩最大剪力图

Figure 12. Maximum force diagram of row piles

图 12. 围护桩最大受力图

图 13 为内支撑轴力表, 图 13(a)为不同工况下不同内支撑最终轴力图, 相同桩径条件下, 钢支撑轴力变化不大, 第一道混凝土支撑随着桩间距的稀疏而减小; 增大桩径后, 第一道混凝土支撑轴力及其余钢支撑轴力明显增大(第一道混凝土撑收拉, 其余钢支撑受压)。

图 13(b)为内支撑轴力随施工步的变化(D1.2@2.4), 随着施工的进行, 第一道混凝土支撑轴力逐渐变大(受拉), 其余钢支撑轴力预加压力逐渐减小。



(a) 内支撑最大轴力图

(b) 内支撑轴力随施工步的变化图

Figure 13. Diagram of the axial force variation of the inner support

图 13. 内支撑轴力变化图

### 3.5. 水位变化

图 14 为水位代表性流线随施工步的变化图，可见界面单元实现了较好的止水作用，地下水实现了绕流，结果较为合理。图 15 为基坑开挖完成后孔隙水压力云图，由于卵石土渗透系数较大，可见地下水位很快就与基坑底部降水水位保持一致；而场地地表粉质黏土由于渗透系数较小，有负孔压区，但水位以下粉质粘土层厚较薄，影响较小。

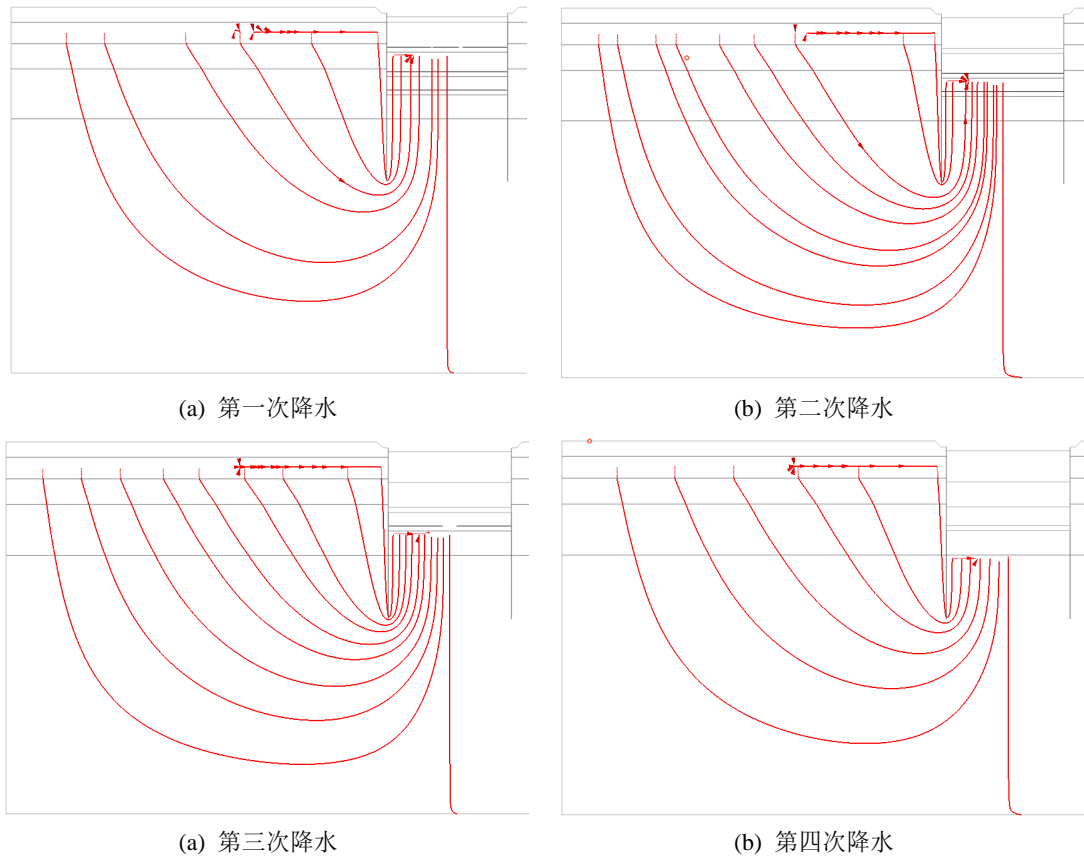
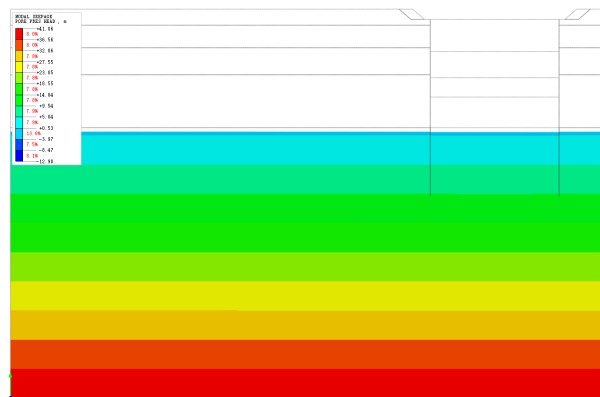


Figure 14. Diagram of water level changes  
图 14. 水位变化图



## 4. 结论

本文对成都市市区某基坑工程进行了开挖模拟,对比了单排桩不同桩径及桩间距下基坑开挖对基坑周边环境及基坑围护结构体系的影响。基顶竖向沉降与水平位移分别随围护桩桩间距的加密而增大或减小,随桩径的增大而增大或减小,围护结构水平变形使得基顶沉降变小;基底隆起值随着桩间距的加密而减小,随着桩径的增大而减小;桩身最大水平位移值随着桩间距的加密而减小,随着桩径的增大而减小;增大桩径导致围护桩弯矩明显增大,略微增大桩身剪力值,增大桩间距,略微增大桩身最大弯矩及剪力;第一道混凝土撑收拉,其余钢支撑受压,最终轴力值受围护桩桩型影响较小。围护桩每延米抗弯刚度增大3倍,基顶沉降增大20.2%,基顶水平位移减小8.6%,基底隆起减小12.5%,桩身最大水平位移减小10.2%;桩间距相同时,桩径由1.2 m增大至1.5 m,最大弯矩增大约130%。由于场地大部分为卵石土,水位对场地及围护结构影响较小。

## 参考文献

- [1] 孙超,郭浩天.深基坑支护新技术现状及展望[J].建筑科学与工程学报,2018,35(3):104-117.
- [2] Zhang, L.Y., Hao, Z.J., Chai, S.F., et al. (2019) Unloading Mechanical Effect Analysis of Retaining Structure of Deep Foundation Pit in Soft Soil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **252**, Article ID: 052054. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/252/5/052054>
- [3] 郝维钊.排桩-内支撑支护体系在复杂环境下深基坑中的应用[J].中国水运:下半月,2012(9):2. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-7973-C.2012.09.114>
- [4] 沈威.“围护桩+内支撑”支护体系在建筑深基坑工程中的应用[J].江西建材,2023(12):280-282.
- [5] 秦早立夫.基坑围护桩水平位移的影响分析[J].价值工程,2020,39(18):179-181. <https://doi.org/10.14018/j.cnki.cn13-1085/n.2020.18.079>
- [6] 张军贤,张军华,甘坚强,等.围护桩嵌固深度与基坑稳定性研究[J].矿产与地质,2021,35(4):805-810. <https://doi.org/10.19856/j.cnki.issn.1001-5663.2021.04.026>
- [7] 徐凌,陈格际,刘帅.FLAC 3D的深基坑支护方式的模拟对比分析[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2016,35(11):1279-1283.
- [8] Ooi, P.S.K., Chang, B.K.F. and Wang, S. (2004) Simplified Lateral Load Analyses of Fixed-Head Piles and Pile Groups. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, **130**, 1140-1151. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:11\(1140\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:11(1140))