

# 深基坑双排桩加锚索支护结构的力学特性及变形分析

闫申奥<sup>1</sup>, 李明超<sup>2</sup>

<sup>1</sup>华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

<sup>2</sup>河南省第五地质勘查院有限公司, 河南 郑州

收稿日期: 2026年3月2日; 录用日期: 2026年3月21日; 发布日期: 2026年3月31日

## 摘要

深基坑中双排桩加锚索支护结构凭借协同承载效率高、变形控制效果好的优势, 在深基坑等岩土工程中得到广泛应用, 其变形与力学响应规律是保障工程安全与设计优化的关键。为精准揭示该结构在复杂岩土环境中的工作机制, 本文采用Midas GTS NX软件开展数值模拟研究, 构建贴合工程实际的三维力学模型, 将单排锚索精准布置于双排桩缝隙处, 充分耦合桩-土-锚索的非线性相互作用, 实现对支护体系的精细化分析。研究表明: 前排桩主要承担外侧岩土体的主动土压力, 后排桩通过协同受力限制整体变形, 桩身水平位移呈“中间大、两端小”的抛物线分布; 锚索轴力沿锚固长度从自由段向固定段逐步衰减, 缝隙中布置的单排锚索可有效协调双排桩的变形差, 显著提升结构整体刚度; 结构变形与力学响应受桩间距、锚索预紧力、桩身刚度及岩土体物理力学参数的综合影响, 其中锚索预紧力对控制水平位移的敏感性最高。研究所得的变形特性与力学规律具有普遍性, 可为同类支护结构的工程设计与施工提供科学参考, 进一步验证了Midas GTS NX在特定布置形式支护结构数值模拟中的应用价值。

## 关键词

深基坑开挖, 双排桩, 锚索, 数值模拟

# Mechanical Characteristics and Deformation Analysis of Double-Row Piles with Anchor Cable Support Structure in Deep Foundation Pits

Shenao Yan<sup>1</sup>, Mingchao Li<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

<sup>2</sup>Henan Fifth Geological Survey Institute Co., Ltd., Zhengzhou Henan

Received: March 2, 2026; accepted: March 21, 2026; published: March 31, 2026

## Abstract

Double-row piles with anchor cable support structure in deep foundation pits have been widely used in geotechnical engineering such as deep foundation pits due to their advantages of high collaborative bearing efficiency and excellent deformation control performance. Its deformation and mechanical response laws are the key to ensuring engineering safety and design optimization. To accurately reveal the working mechanism of this structure in complex geotechnical environments, numerical simulation is carried out using Midas GTS NX software in this paper. A three-dimensional mechanical model consistent with actual engineering conditions is established, in which a single row of anchor cables is precisely arranged in the gap between double-row piles. The nonlinear interaction of pile-soil-anchor cable is fully coupled to realize refined analysis of the support system. The results show that the front-row piles mainly bear the active earth pressure of the outer rock and soil mass, while the rear-row piles restrict the overall deformation through collaborative stress. The horizontal displacement of the pile body presents a parabolic distribution of "large in the middle and small at both ends". The axial force of the anchor cable gradually attenuates from the free section to the fixed section along the anchorage length. The single row of anchor cables arranged in the gap can effectively coordinate the deformation difference between double-row piles and significantly improve the overall stiffness of the structure. The structural deformation and mechanical response are comprehensively affected by pile spacing, anchor cable pre-tightening force, pile stiffness and physical and mechanical parameters of rock and soil mass, among which the anchor cable pre-tightening force has the highest sensitivity to controlling horizontal displacement. The obtained deformation characteristics and mechanical laws are universal, which can provide a scientific reference for the engineering design and construction of similar support structures, and further verify the application value of Midas GTS NX in the numerical simulation of support structures with specific layout forms.

## Keywords

Deep Foundation Pit Excavation, Double-Row Piles, Anchor Cables, Numerical Simulation

Copyright © 2026 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

目前我国深基坑项目日渐增多, 与之相对的安全问题也更加令人重视。深基坑支护作为保障基坑开挖施工安全、保护周边环境的核心技术, 其稳定性与经济性直接决定工程成败。当前, 单一支护结构已难以满足复杂地质条件(如软土、砂层)及敏感周边环境(如临近既有建筑、地下管线)下的工程需求, 复合支护结构因综合性能优势成为研究与应用热点[1] [2]。

双排桩加锚索复合支护结构融合了双排桩的空间刚度优势与锚索的主动抗拉特性, 通过桩体协同变形与锚索预紧力调控, 可有效控制基坑侧壁位移、降低坑底隆起风险, 在深厚软土基坑、大开挖深度基坑工程中展现出显著适用性[3] [4]。

建立科学合理的数值模型, 开展双排桩加锚索复合支护结构的建模分析, 是揭示其受力变形规律、优化支护参数的关键手段[5]-[7]。而且双排桩加锚索支护结构的组合方式并不唯一, 不同的结构也会对结

果的准确性产生影响[8]。许多学者都在锚索与桩体一一对应的结构下进行研究[9][10], 其中锚索预应力变化, 桩距变化更是研究的热点内容[11]。为了更深入地研究双排桩加锚索支护结构的特性, 本文从实际出发, 采用将锚索放入桩缝的排列方法, 通过考虑桩土相互作用特性的桩接触单元构建精细化数值模型, 模拟基坑开挖全过程中支护结构的内力分布与位移响应, 旨在为该复合支护结构的设计优化提供理论依据与技术支撑, 进一步推动其在复杂基坑工程中的规范化应用。

## 2. 工程概况

拟建项目建筑场地位于郑州市经三路与红专路交叉口西南角。地下水位埋深在自然地面以下 13 m 左右, 不考虑基坑降水。基坑东, 西, 北三面距离城市道路约 20~30 m, 南面距离已有六层建筑较近处约 20 m。基坑侧壁安全等级为一级, 结合地质条件因素, 考虑采用双排桩加锚索的形式进行基坑侧壁支护。场地中各土层设计参数取值如表 1 所示。

Table 1. Table of soil parameters

表 1. 土层参数取值表

层号	土层名称	厚度/m	重度/(kN/m <sup>3</sup> )	黏聚力/(kPa)	内摩擦角/(°)
①	粉土	1.5	18	7.1	13.1
②	粉质黏土	1.6	18.5	5.4	8.6
③	粉土	3.6	18.5	6.6	8.8
④	粉质黏土	2.4	18.5	14.5	8
⑤	粉土	3.1	19	7	22.3
⑥	粉质黏土	5.2	19	14.1	11.2
⑦	细砂	12	19.5	2	28
⑧	粉土	7	19.5	10.3	17.2
⑨	粉质黏土	未揭露	19.5	16.5	13.4

## 3. 数值模拟计算

### 3.1. 计算模型及参数

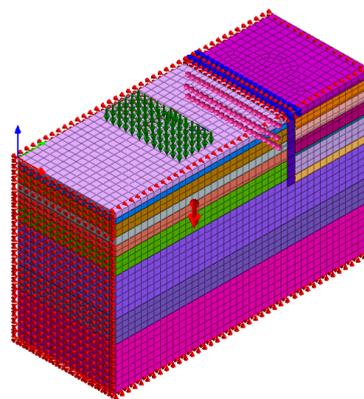


Figure 1. Numerical model diagram

图 1. 计算模型图

本研究采用 Midas GTS NX 对基坑的开挖和支护进行数值模拟。由于基坑南侧的开挖深度为 11.6 m, 且实际支护范围过大, 因此本文选取了其中的一部分进行分析研究, 将模型的尺寸设置为 80 m × 50 m ×

30.8 m, 其中网格节点数是 50,964, 网格单元数是 44,388, 计算模型如图 1 所示。其中模型外边界采用自动约束, 基坑外原有建筑物转化为均布荷载, 取值  $90 \text{ KN/m}^2$ 。基坑最大开挖深度为 11.6 m, 共分四步开挖, 七道工况, 具体施工工况模拟过程见表 2。土体本构模型为摩尔 - 库伦模型, 计算过程中不考虑基坑降水。

施工工况模拟步骤表:

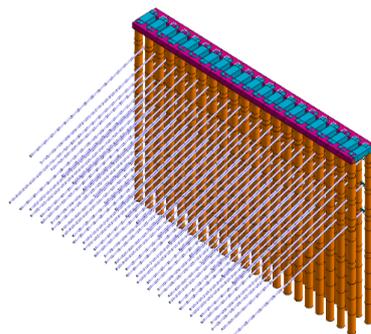
**Table 2.** Simulation process of construction conditions

**表 2.** 施工工况模拟过程

开挖步骤	工况描述
工况 1	基坑开挖至 2.0 m 处
工况 2	在 1.5 m 处进行第一道预应力锚索和腰梁的施工并喷射混凝土
工况 3	基坑开挖至 5.0 m 处
工况 4	在 4.5 m 处进行第二道预应力锚索和腰梁的施工并喷射混凝土
工况 5	基坑开挖至 8.0 m 处
工况 6	在 7.5 m 处进行第三道预应力锚索和腰梁的施工并喷射混凝土
工况 7	开挖至基底 11.6 m, 并进行喷射混凝土支护

### 3.2. 支护结构参数

基坑南侧剖面基坑深度为 11.6 m, 双排支护桩的桩顶标高为 0.0 m, 桩长 19.6 m、桩直径 0.8 m、嵌固深度为 8.0 m、桩间距为 1.5 m, 前排桩与后排桩间距为 2.4 m, 采用矩形排列方式布置, 桩体混凝土等级为 C30。支护结构模型图见下图 2。



**Figure 2.** Model drawing of supporting structure

**图 2.** 支护结构模型图

共设置三道锚索, 成锚工艺为高压旋喷法, 其中第一道锚索设置在地下 1.5 m 处, 第二道和第三道分别设置在地下 4.5 m 和 7.5 m 处, 同排锚索间距为 1.5 m, 锚索排距为 3.0 m。其中第一道锚和第三道锚, 锚固段长度为 11 m, 自由段长度为 8 m。第二道锚的锚固段长度为 13 m, 自由段长度为 9 m。三道锚索均由三束 15.2 mm 的钢绞线组成, 预应力均为 150 kN。外侧喷射混凝土保护层厚度为 0.1 m。

模型中锚索采用迈达斯软件中的锚建模助手创建, 桩体、连梁和冠梁均采用 1D 梁单元模拟。

## 4. 模拟结果分析

### 4.1. 基坑外土体沉降变形分析

由下图 3 可知, 随着基坑的逐渐开挖, 基坑内的深度越来越大, 坑外土体所受到的影响也越来越大。

沉降量随着开挖步骤逐渐增大, 并在第四道开挖步骤完成后达到最大值。

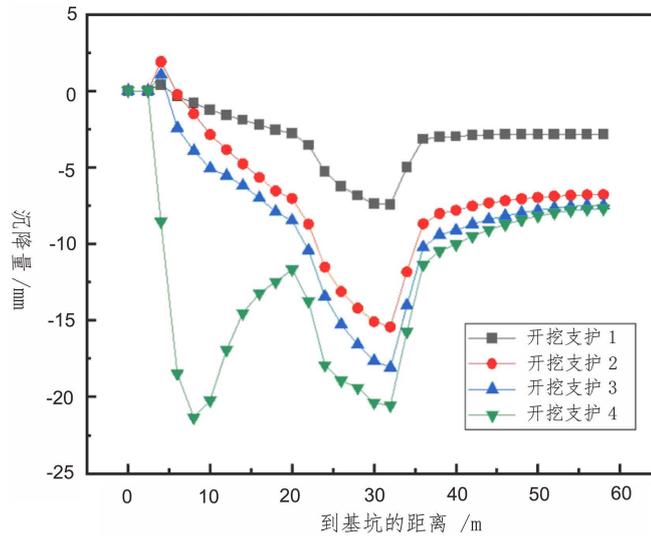


Figure 3. Surface settlement outside the foundation pit  
图 3. 基坑外地表沉降

如图 3 所示。其中第四步开挖过程中, 由于只设置了喷射混凝土的防护措施, 开挖对模型中桩后侧土体产生了较大影响, 排除奇异点的影响之后, 沉降量的最大值约为 21.5 mm。根据图中线条所示, 基坑外侧 20~35 m 处因为原有建筑物的荷载原因, 地表沉降量明显高于其他区域土体, 符合工程实践经验及变形规律。

#### 4.2. 坑外土体水平位移

由于基坑外侧土体的水平位移是在基坑开挖之后发生的, 因此基坑外土体的水平位移从基坑开挖开始分析。图 4 为不同工况下基坑外侧地表土体的水平位移变化趋势。

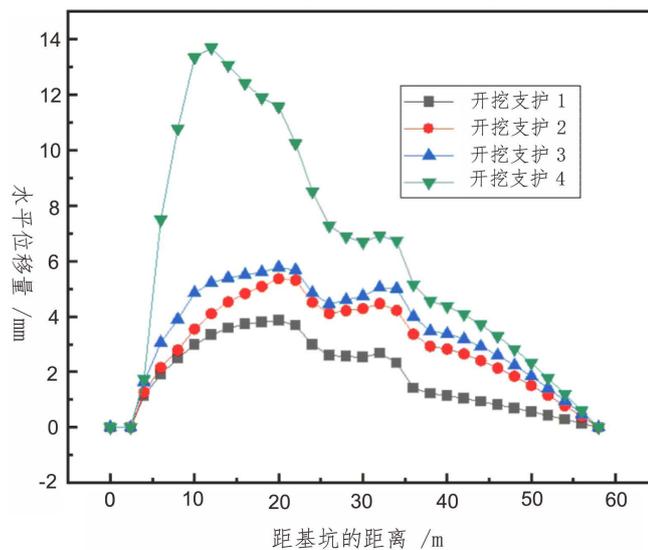


Figure 4. Horizontal soil displacement outside the excavation  
图 4. 基坑外土体水平位移

由图 4 可知, 随着基坑的开挖地表土体的水平位移随即开始增大, 起初的增速明显较快。随着开挖的进行, 支护结构的作用逐渐明显, 桩身和锚索承受了侧向土压力的作用, 位移变化趋势明显放缓, 由于最后一步开挖深度较大且并没有新增锚索支护, 因此第七工况进行后地表水平位移增量略大。

随着距基坑边缘的距离增加, 地表水平位移呈现出先增大后减小的趋势, 并且在基坑外大约 15 m 处达到峰值。地表距离基坑边缘 20 m 处存在一栋原有建筑物, 因此水平位移曲线在 20~35 m 处呈现出明显的聚拢趋势, 并有了一定程度的降低, 较为明显地减缓了水平位移的增长趋势。

### 4.3. 高压旋喷锚索内力分析

高压旋喷锚索工艺随着工程的发展已经越发成熟, 对于提高原位土体强度, 增大土体摩擦力方面具有明显的作用效果, 能有效地防止土体产生较大的变形, 从而影响工程的安全进行。下面图 5~10 是随着每一步基坑开挖, 各道锚索的内力变化情况。其中由于工况 1 进行时, 暂未进行第一道锚索的支护设置, 因此锚索内力变化从工况 2 开始进行分析的。

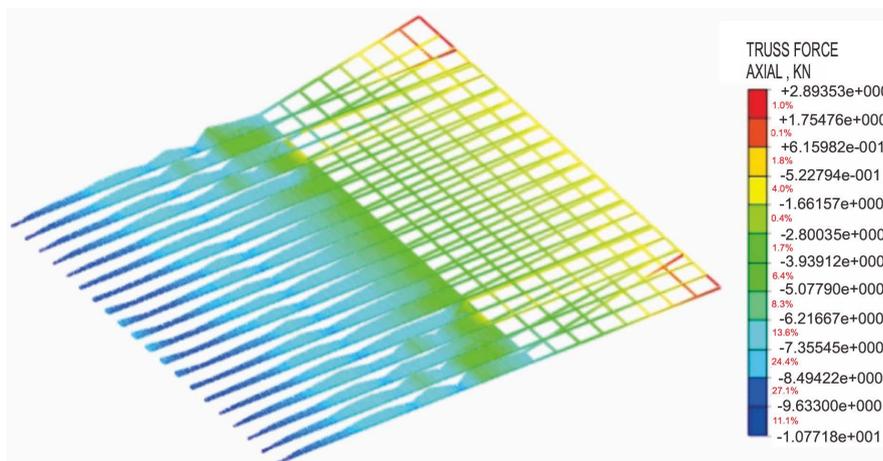


Figure 5. Internal force diagram of anchor cable for case 2  
图 5. 工况 2 锚索内力图

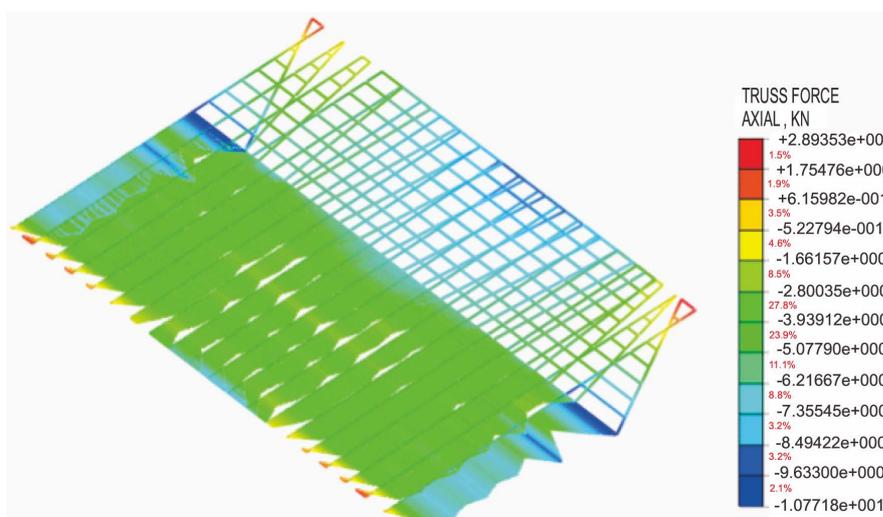


Figure 6. Internal force diagram of anchor cable for case 3  
图 6. 工况 3 锚索内力图

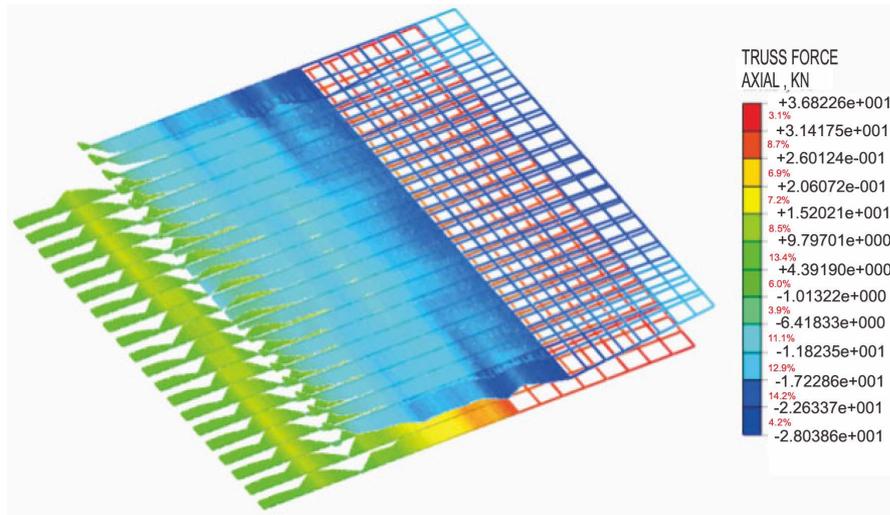


Figure 7. Internal force diagram of anchor cable for case 4  
图 7. 工况 4 锚索内力图

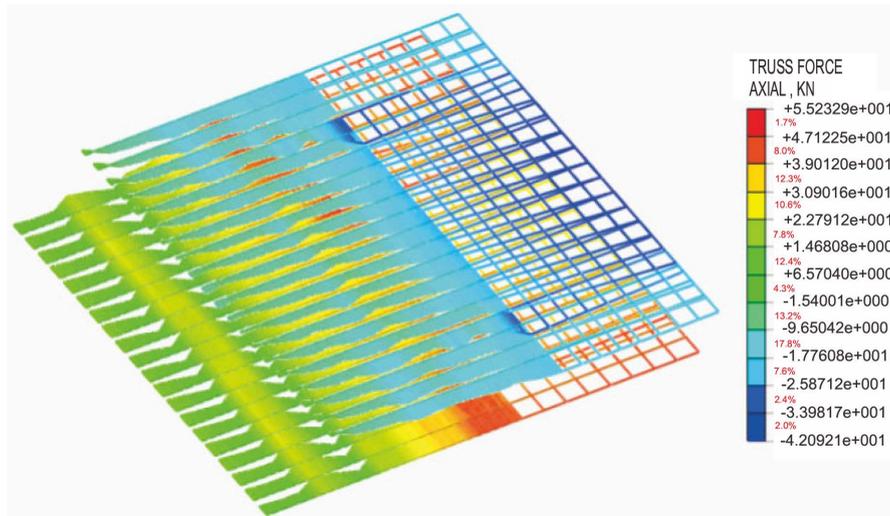


Figure 8. Internal force diagram of anchor cable for case 5  
图 8. 工况 5 锚索内力图

由图中锚索内力云图在不同工况时的变化情况可知, 随着基坑开挖深度的增加, 各道锚索的受力情况在随之不断地发生动态变化。其中第一排锚索自由段顶端的拉力由  $1.5571 \times 10^4$  N 增大到  $1.0141 \times 10^5$  N。锚固段底部的拉力从  $2.2505 \times 10^3$  N 一路增加到  $6.5022 \times 10^3$  N。并且在工况 7 进行后, 锚索所承受的力发生了较大变化, 这一点是由于最后一步开挖至基底的步骤中仅有额外的喷混, 没有再多设置一道锚索支护。即第一排锚索在受力过程中无论是锚固段底端还是自由段顶端均能够发挥出各自的承载能力, 对支护结构的整体稳定性做出贡献。第二排锚索自由段顶部拉力则是从  $3.2056 \times 10^4$  N 一路减小到  $4.3267 \times 10^3$  N, 锚固段底端的拉力从  $6.8869 \times 10^3$  N 增大到  $1.7722 \times 10^4$  N。在工况 6 中第三道锚索设置之后, 第二排锚索自由段和锚固段所承受的力均呈现出了不同程度的减小。说明第二排锚索在基坑开挖过程中也充分发挥了其支护作用。第三排锚索自由段顶端从  $3.4762 \times 10^4$  N 变化为  $4.5557 \times 10^4$  N, 变化程度较小, 锚固段底端从  $3.2952 \times 10^4$  N 迅速增大至  $1.2704 \times 10^5$  N, 受力效果显著, 说明第三排锚索在支护结构中承受了较大的力量, 这其中也受到工况 7 开挖到基底的直接影响。

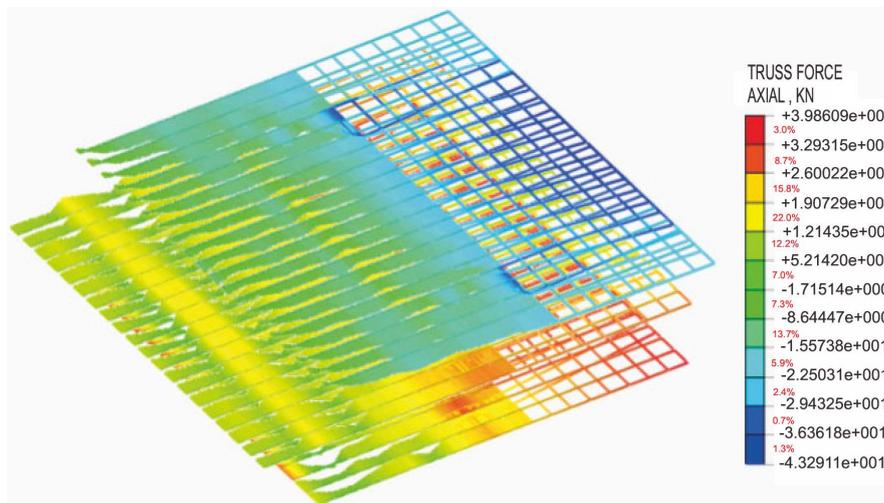


Figure 9. Internal force diagram of anchor cable for case 6  
图 9. 工况 6 锚索内力图

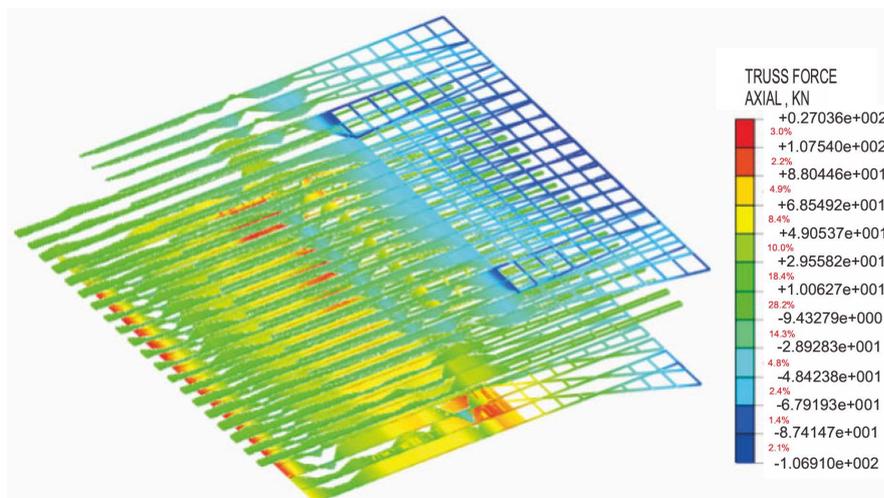


Figure 10. Internal force diagram of anchor cable for case 7  
图 10. 工况 7 锚索内力图

#### 4.4. 支护桩轴力及变形分析

##### 4.4.1. 支护桩侧向变形

由下图 11、图 12 可知,从变形量维度分析,前排桩的侧向变形量显著大于后排桩。在开挖工况下,前排桩最大侧向变形量可达 35 mm 左右(如开挖 4 工况),且变形主要集中在桩体中浅层;后排桩最大侧向变形量约 22.5 mm,变形分布相对平缓,深层也存在一定变形响应且前后两排桩侧向位移曲线均呈现出中间大两边小的抛物线形态。

其中,双排桩结构中前排桩承担了主要的侧向土压力,表现为“主动变形桩”,其变形量更大、变形集中性更强;后排桩受前排桩的遮挡效应、锚索支护的约束作用及结构空间效应影响,变形量更小且分布更平缓,起到“协同约束桩”的作用。这种变形差异体现了双排桩加锚索支护体系的空间受力特性——通过前后排桩的协同作用,有效分散侧向荷载,控制基坑整体侧向位移,验证了该支护体系在变形控制方面的有效性。

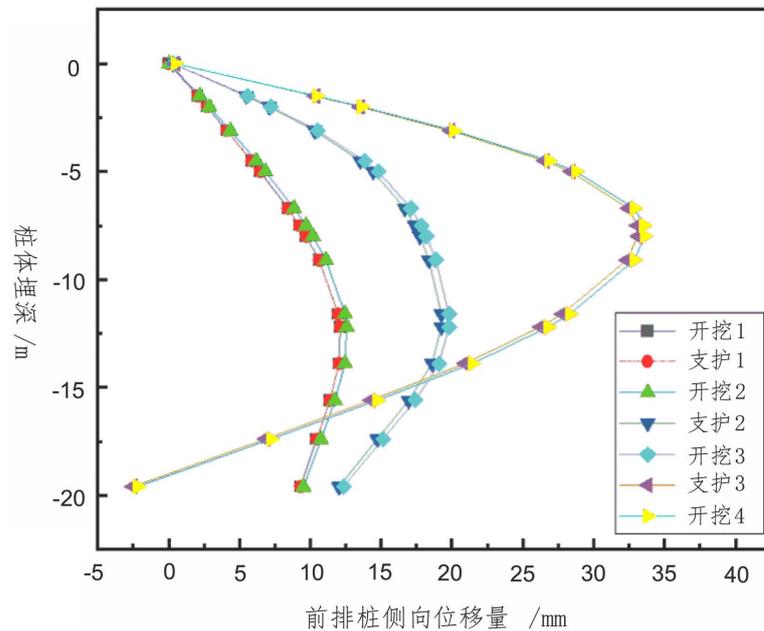


Figure 11. Lateral displacement of front-row piles  
 图 11. 前排桩侧向变形

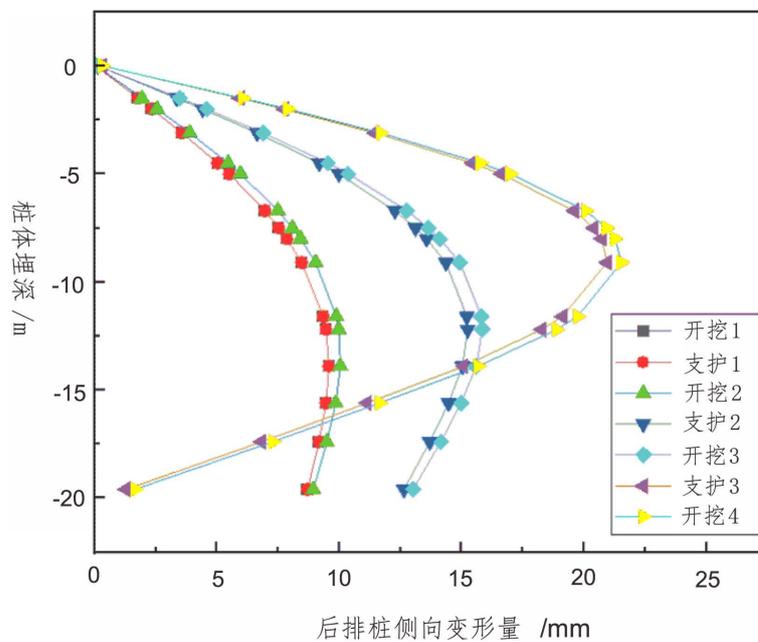


Figure 12. Lateral displacement of rear-row piles  
 图 12. 后排桩侧向变形

#### 4.4.2. 支护桩轴力

由下图 13 及图 14 可知, 前排桩轴力的绝对值范围更大, 拉压峰值的数值显著高于后排桩, 表明其承受了更显著的轴向荷载。桩身轴力分布的变异性强, 不同桩段间拉压状态交替明显、数值突变性突出, 反映出前排桩直接抵御外侧土压力, 在侧向荷载作用下桩身弯矩引发的轴力响应复杂。后排桩轴力的绝对值范围更小, 拉压峰值均远低于前排桩, 说明其轴向受力更为缓和。轴力分布均匀性较好, 变化梯度

小, 无明显的数值突变区段, 体现出后排桩受前排桩“遮挡效应”与锚索支护的协同约束, 土压力传递过程中存在明显衰减。

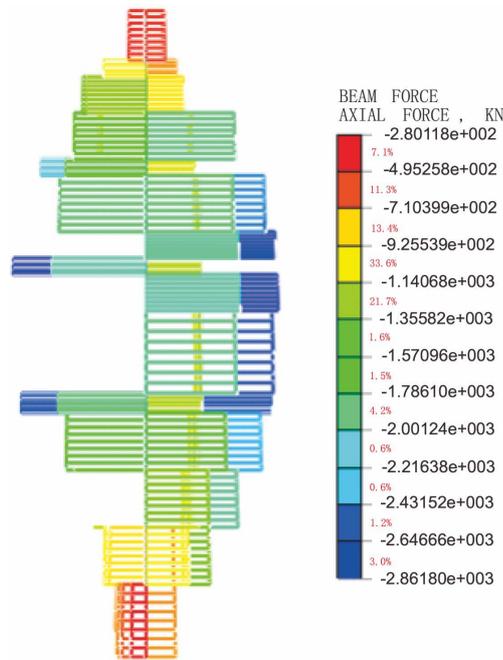


Figure 13. Axial force in front-row piles

图 13. 前排桩身轴力

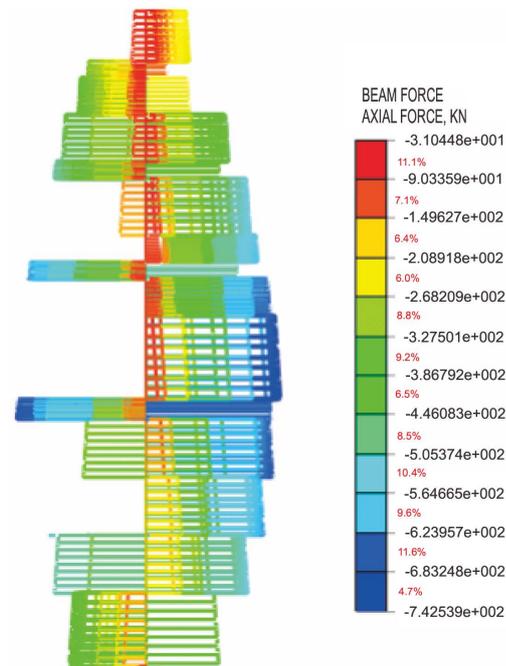


Figure 14. Axial force in rear-row piles

图 14. 后排桩身轴力

根据上图可知, 前后排桩体轴力沿深度呈现明显的分段分布特征。在 0~13 m 深度范围内, 桩体处于

受拉状态, 轴力由桩顶的 286.15 kN 线性递减至 13 m 处的 8.89 kN。进入 13 m 以下深度后, 桩体受力状态由拉转压, 轴力随深度增加线性递增, 至桩底(20 m)达到最大压力-140.42 kN。这种轴力分布模式反映了桩体在水平荷载作用下的典型受力响应, 上部受拉段主要抵抗上部结构的水平推力, 下部受压段则通过桩土相互作用提供侧向支撑。

在 0~14 m 深度范围内, 桩体处于受压状态, 轴力由桩顶的-742.59 kN 线性递减至 14 m 处的-146.38 kN。进入 14 m 以下深度后, 桩体受力状态由压转拉, 轴力随深度增加线性递增, 至桩底(20 m)达到最大拉力 111.40 kN。这种轴力分布模式反映了桩体在特定工况下的受力响应, 上部受压段主要传递上部结构荷载, 下部受拉段则通过桩土相互作用提供相应的抗力。

在上述双排桩加锚索支护体系中, 验证了双排桩加锚索支护结构的空问受力特性, 通过前后排桩的受力分工与协同工作, 实现了侧向荷载的合理分配, 既保证了前排桩对土压力的有效抵御, 又通过后排桩的协同约束降低了整体受力的突变性, 最终提升了支护体系的整体稳定性与变形控制能力。

## 5. 结语

本文通过 MIDAS GTS/NX 数值模拟软件, 对郑州市某深基坑支护项目进行了模拟分析, 在采用双排桩加锚索复合支护结构的形式下, 探讨了该支护结构在基坑开挖过程中的力学性能变化和变形特征, 主要得到以下几点结论:

1) 支护结构采用双排桩加锚索的复合支护形式是可行的, 开挖完成后基坑周边土体沉降量的最大值约为 21.5 mm, 符合规范要求; 基坑开挖过程中, 周边土体沉降随着工况的进行而逐渐增大, 沉降量随着到基坑距离的增加而减小, 最终趋于零, 基坑外建筑物所在范围内沉降量较周围土体稍大。

2) 基坑周边土体水平位移呈现出先增大后减小的趋势, 并且在基坑外大约 15 m 处达到峰值, 且基坑外原有建筑物对基坑开挖过程中周围土体水平位移的抑制作用较为明显。

3) 锚索内力随着深度的增加呈现出逐渐增大趋势, 第三排锚索相较于前两排在支护结构中发挥出更加重要的受力性能。自由段拉力呈现出一三排增大, 二排减小的趋势。锚固段拉力则均呈现出增大趋势, 并且由于最后一步开挖至基底的影响, 第三道锚索锚固段拉力变化较大。

4) 支护桩侧向位移曲线随着基坑的开挖呈现出先增大后减小的抛物线形式。并且前排桩的位移量要高于后排桩的位移量, 并且呈现出一定的趋从性。

5) 支护桩体轴力变化, 前排桩呈现出显著的两端高中间小的趋势, 后排桩则以上部轴力高于下部轴力为主, 并且前排桩的轴力极值和变化区间明显高于后排桩。

## 参考文献

- [1] 杨德森. 双排桩与锚索(内支撑)组合支护基坑分析方法研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2025.
- [2] 宋晓雷. 基于“双排桩 + 预应力锚索”的基坑支护变形研究[J]. 北方交通, 2024(9): 43-46.
- [3] 戚谟昊, 李向群. 长春市某基坑双排桩支护结构的变形研究[J]. 吉林建筑大学学报, 2024, 41(2): 65-69, 75.
- [4] 姚国鹏, 吴超. 临近地铁深基坑双排桩 + 支撑、锚杆支护设计[J]. 土工基础, 2023, 37(1): 14-17.
- [5] 黄文敏, 陈玉新. 浅淡深厚软土地区双排桩支护结构设计及加固[J]. 陕西水利, 2021(3): 207-209.
- [6] 王义军. 锚索双排桩深基坑开挖受力特性研究[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2020, 34(3): 74-78.
- [7] 邓学铮, 周毅. 深基坑双排桩数值模拟研究与实测分析[J]. 四川建筑, 2018, 38(3): 88-93.
- [8] 李杰. 双排桩-锚索支护的数值模拟分析与应用[D]: [硕士学位论文]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2018.
- [9] 王学军. 软土基坑双排桩-锚索复合支护结构数值模拟分析[J]. 价值工程, 2017, 36(29): 87-88.
- [10] 万晋军. 基于 MIDAS/GTS 双排桩支护结构三维有限元模拟[J]. 治淮, 2017(3): 14-15.
- [11] 李立军. 双排桩支护结构的数值分析与现场试验研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2013.