

# 基坑开挖对近接地铁隧道的影响分析

韩文童<sup>1</sup>, 陈海明<sup>1</sup>, 徐月梅<sup>2</sup>

<sup>1</sup>安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南

<sup>2</sup>宣城职业技术学院建筑与园林学院, 安徽 宣城

收稿日期: 2025年9月23日; 录用日期: 2025年10月13日; 发布日期: 2025年10月29日

## 摘要

为精准控制深基坑开挖对邻近运营地铁隧道的结构变形风险, 本文以郑州某邻近运营地铁2号线的商业综合体深基坑为研究对象。结合场地地勘数据, 在原“土钉墙 + 双层帷幕”支护方案基础上, 以“土钉墙布设与否、帷幕层数(单层/双层)”为变量, 优化设计3种新方案。应用Midas GTS NX软件建立三维有限元模型, 模拟基坑开挖全过程, 对比各方案下基坑及地铁隧道的位移响应及工程经济性。研究表明: “45°放坡无土钉 + 双层帷幕”的优化方案(方案一)综合效益最优, 基坑及邻近隧道的最大位移均满足位移允许值, 且相较于原方案, 工程造价降低了3.7%。此外, 基坑关键部位位移的现场监测数据与有限元模拟值相对误差仅3.2%~9.5%, 高度吻合, 有效验证了所建模型在该工程条件下变形预测的可靠性, 可为同类近接地铁深基坑工程提供技术参考。

## 关键词

深基坑工程, 地铁隧道结构, 有限元数值模拟

# Influence Analysis of Foundation Pit Excavation on Adjacent Metro Tunnels

Wentong Han<sup>1</sup>, Haiming Chen<sup>1</sup>, Yuemei Xu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

<sup>2</sup>School of Architecture and Landscape Architecture, Xuan Cheng Vocational & Technical College, Xuancheng Anhui

Received: September 23, 2025; accepted: October 13, 2025; published: October 29, 2025

## Abstract

To accurately control the structural deformation risk of adjacent operational metro tunnels caused by deep foundation pit excavation, this study took a deep foundation pit of a commercial complex adjacent to the operational Zhengzhou Metro Line 2 as the research object. Based on the site geological survey

data, and on the basis of the original “soil nailing wall + double-layer curtain” support scheme, three new schemes were optimized and designed with “whether to arrange soil nailing walls and the number of curtain layers (single-layer/double-layer)” as variables. The Midas GTS NX software was used to establish a 3D finite element model to simulate the entire process of foundation pit excavation, and the displacement responses of the foundation pit and adjacent metro tunnels as well as the engineering economy under different schemes were compared. The research showed that the optimization scheme (Optimization Scheme 1) of “45° slope without soil nailing + double-layer curtain” had the best comprehensive benefits. The maximum displacements of the foundation pit and adjacent tunnels all met the displacement allowable values, and compared with the original scheme, the project cost was reduced by 3.7%. In addition, the relative errors between the on-site monitoring data of displacements at key parts of the foundation pit and the finite element simulation values were only 3.2%~9.5%, showing a high degree of consistency. This effectively verified the reliability of the established model in deformation prediction under the engineering conditions of this project, and can provide technical reference for similar deep foundation pit projects adjacent to metro lines.

## Keywords

Deep Foundation Pit, Metro Tunnel Structure, Finite Element Numerical Simulation

Copyright © 2025 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

随着城市发展进入高密度发展阶段,城市核心区土地资源不足问题日益凸显,地下空间开发成为提升城市用地效率、缓解空间资源供需矛盾的关键路径。同时,大城市地下轨道交通网络持续加密,截至2024年底,中国大陆地区共有58个城市开通城市轨道交通,运营线路361条,运营里程12160.77 km,新建商业综合体、地下管廊等工程与既有地铁结构“近接施工”的场景愈发普遍,部分项目基坑边线与地铁隧道轴线最小水平距离不足10 m,对地铁结构运营安全构成潜在风险。因此,新建工程对既有地铁结构的影响控制已成为岩土工程领域亟待解决的重要课题[1]-[3]。其中,深基坑开挖是诱发地铁结构变形的主要环节,其影响机制可分为两类:一是空间约束下的支护设计难题,由于地铁保护控制线的严格限制,基坑支护体系(支护桩、锚杆)需在满足即可稳定的同时,兼顾与地铁的安全距离,导致支护方案设计复杂度显著提升;二是基坑开挖引起的结构变形风险,基坑开挖过程中土体卸荷会改变周边地层应力路径,诱发坑周土体侧向位移与竖向沉降,若该变形传递至邻近地铁隧道,易导致隧道管片出现差异沉降、接缝渗漏甚至开裂,直接威胁地铁运营安全与乘坐舒适性[4]。

现有研究多聚焦单一支护方案的变形预测,对“支护参数优化-变形控制-经济性平衡”的耦合分析不足,难以直接为复杂近接工程提供技术支撑。鉴于此,本文以郑州某商业综合体基坑项目为工程依托,针对该项目紧邻运营地铁隧道的特点,结合场地地质勘察数据,在原支护方案基础上优化土钉墙布设范围与帷幕层数,设计多组对比方案。通过Midas软件建立三维有限元模型,模拟基坑开挖全过程,系统分析不同支护方案下地铁隧道结构的位移响应规律,验证模型可靠性的同时提出兼具安全性与经济性的最优支护方案,为同类近接基坑工程的设计与施工提供理论参考和工程借鉴。

## 2. 项目概况

本项目为郑州北部核心商圈某商业综合体基坑支护工程,位于花园路东侧、中州大道西侧,柳林东

路北侧、新龙路南侧，项目地理位置及总平面图如图 1 所示。拟建工程包括 D1、D2、D3、D4 共 4 个地块，地下均为三层结构，且 4 个地块的地下二层、三层采用整体连通，基坑开挖深度约 15.0 m。



Figure 1. Geographical location and overall layout of the project  
图 1. 项目地理位置及总平面图

D1 地块西侧为花园路，基坑上口距离用地红线最近仅 2.7 m，红线外为宽度 47 m 的市政绿化用地；花园路地下为运营中的郑州地铁 2 号线盾构隧道，支护桩距离轨道交通控制线 23.5 m，锚杆距离轨道交通控制线仅 10.5 m。地铁隧道现状与项目基坑平面位置关系如图 2 所示。

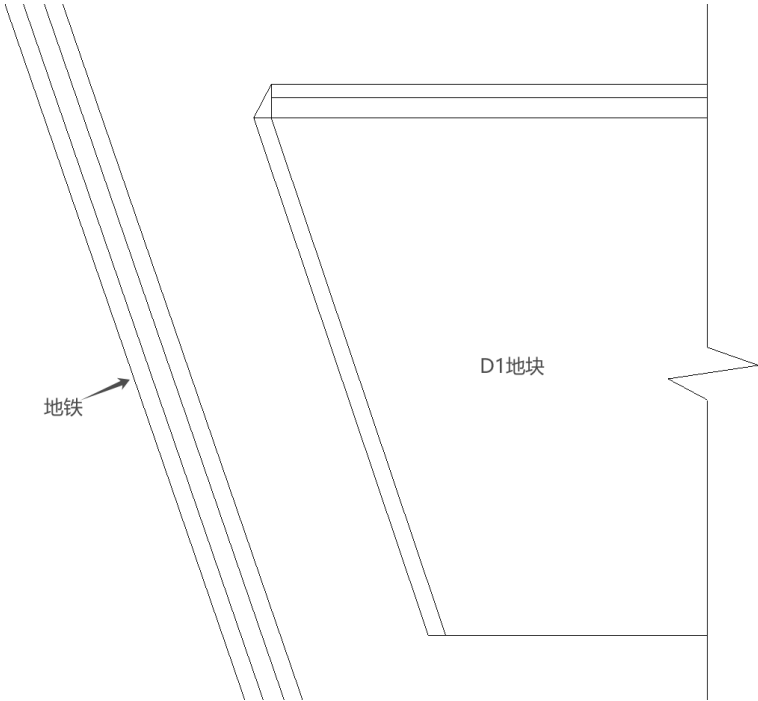


Figure 2. Schematic diagram of the relationship between foundation pit and subway location  
图 2. 基坑与地铁位置关系示意图

### 3. 基坑工程概况

#### 3.1. 基坑局部设计方案

D1 地块南侧支护采用灌注桩与高压旋喷桩咬合形成帷幕，并设置 4 层锚杆；西侧采用上部 4.5 m 内

放坡开挖，并布置土钉墙，4.5 m 处设置 1.5 m 宽工作平台，下部采用双层灌注桩与高压旋喷桩咬合形成帷幕，两层帷幕间距为 1.5 m，并设置 3 层锚杆；北侧采用上部 4.5 m 内放坡开挖，并设置 7 m 宽工作平台，下部采用灌注桩与高压旋喷桩咬合形成帷幕，并设置 3 层锚杆。基坑表面均设置钢筋网并喷射混凝土面层。

为简化三维有限元建模计算，对支护体系中的灌注桩采用板单元进行等效替代，即当将排桩简化为板单元时，应采用等效刚度法进行折算[5]。设桩径为  $D$ ，净距为  $t$ ，如图 3 所示。

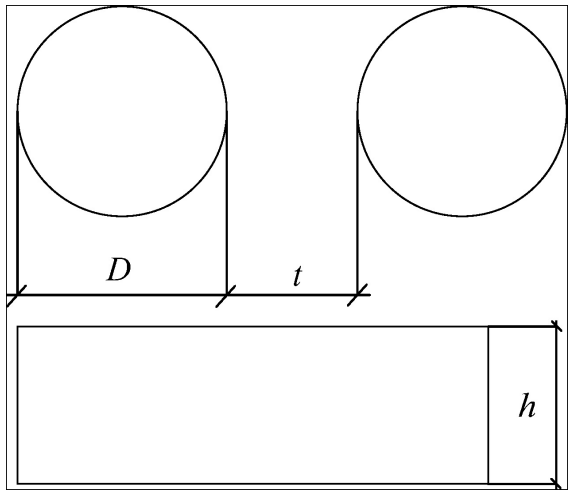


Figure 3. Equivalent plate unit diameter and spacing  
图 3. 等效板单元直径和间距

桩可以等效为长  $D+t$  的连续墙。令等效后的连续墙厚度为  $h$ ，按抗弯刚度相等的原则可得：

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

整理式(1)可得板单元的等效厚度  $h$  为：

$$h = 0.838D \left( \frac{D}{D+t} \right)^{1/3} \quad (2)$$

式中：

$h$ ——等效板单元厚度；

$D$ ——桩的直径；

$t$ ——桩的间距。

经计算，等效板单元厚度为 784 mm。

基坑支护所用结构设计参数见表 1~5。地铁隧道设计参数见表 6。

Table 1. Curtain design parameters  
表 1. 帷幕设计参数

| 位置 | 混凝土等级 | 等效厚度/(mm) | 长度/(m) |
|----|-------|-----------|--------|
| 南侧 | C30   | 784       | 26     |
| 西侧 | C30   | 784       | 20.5   |
| 北侧 | C30   | 784       | 20.5   |

**Table 2.** Anchor rod design parameters  
**表 2.** 锚杆设计参数

| 埋深/(m) | 支护位置 |     | 长度/(m) | 锚固段长度/(m) | 预应力大小/(kN) | 倾角/(°) |
|--------|------|-----|--------|-----------|------------|--------|
| -3     | 位置   | 南侧  | 23     | 12.5      | 230        | 25     |
| -6     |      | 南侧  | 23     | 14.5      | 260        | 25     |
|        | 位置   | 西侧  | 17     | 8         | 210        | 40     |
|        |      | 北侧  | 17     | 8         | 210        | 40     |
|        | -9   | 位置  | 南侧     | 23        | 20         | 310    |
| 西侧     |      |     | 17     | 10        | 270        | 40     |
| 位置     |      | 北侧  | 17     | 10        | 270        | 40     |
|        |      | -12 | 位置     | 南侧        | 20         | 14.5   |
| 西侧     | 15   |     |        | 9.5       | 270        | 40     |
| 北侧     | 15   |     |        | 9.5       | 270        | 40     |

**Table 3.** Design parameters of beam elements  
**表 3.** 梁单元设计参数

| 名称 | 长/(m) | 宽/(m) | 泊松比  | 弹性模量/GPa |
|----|-------|-------|------|----------|
| 冠梁 | 0.90  | 0.50  | 0.25 | 30       |
| 腰梁 | 0.35  | 0.25  | 0.25 | 30       |

**Table 4.** Design parameters of sprayed concrete layer  
**表 4.** 喷射混凝土层设计参数

| 名称      | 材料             | 厚度/(mm) |
|---------|----------------|---------|
| 喷射混凝土面层 | C30 混凝土、Φ6 钢筋网 | 80      |

**Table 5.** Design parameters of soil nails  
**表 5.** 土钉设计参数

| 位置 | 埋深/(m) | 长度/(m) | 倾角/(°) |
|----|--------|--------|--------|
| 西侧 | -1.25  | 12     | 15     |
|    | -2.25  | 12     | 15     |
|    | -3.25  | 9      | 15     |
|    | -4.25  | 9      | 15     |

**Table 6.** Design parameters for subway tunnel lining  
**表 6.** 地铁隧道衬砌设计参数

| 名称   | 材料        | 埋深/(m) | 隧道间距/(m) | 厚度/(cm) |
|------|-----------|--------|----------|---------|
| 地铁隧道 | C30 钢筋混凝土 | 22     | 6.68     | 60      |

**3.2. 基坑场地地貌及土体参数**

根据项目地质勘察报告，场地地层自上而下按岩性、物理力学特及工程性质可划分为 4 层，各层特

征如下：

- ① 杂填土：厚度为 2 m，地层呈杂色，主要为粉土，黄褐色、褐灰色，结构力学性质松散。见较多碎石砖块等建筑垃圾。
- ② 粉土：厚度为 6.3 m，地层呈黄褐色，稍湿~湿、中密~密实，干强度及韧性低，局部为粉砂，黄褐色，湿，稍密~中密，主要成分为石英、长石。
- ③ 粉土夹粉质黏土：厚度为 4.1 m，地层呈灰黑色、黄褐色，稍湿~湿，中密，干强度及韧性低，局部为粉质黏土、淤泥质粉质黏土，灰褐色，软塑~可塑。
- ④ 细砂：厚度为 30 m，地层呈褐灰色、黄褐色，局部为灰黑色，湿~饱和，稍密~中密，主要成分为石英、长石。

基坑 4 层土的物理力学参数见表 7。

**Table 7.** Recommended values of soil parameters for foundation pit engineering design  
**表 7.** 基坑工程设计土层参数采用值

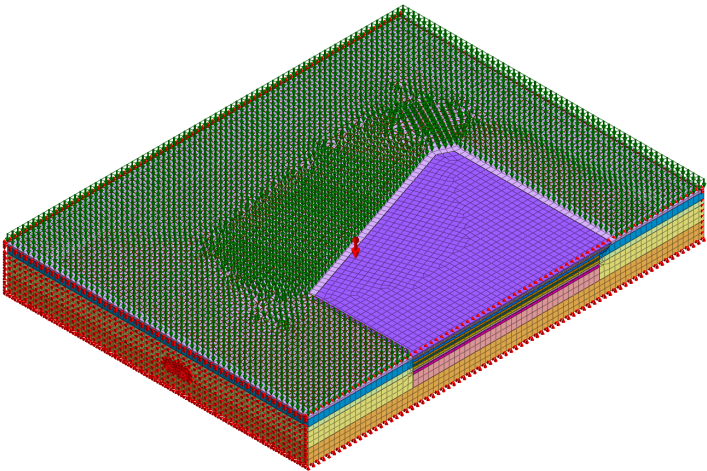
| 土层 | 岩土类别    | 重度/kN/m <sup>2</sup> | 粘聚力/kN/m <sup>2</sup> | 内摩擦角/° | 泊松比  |
|----|---------|----------------------|-----------------------|--------|------|
| 1  | 杂填土     | 18                   | 10                    | 15     | 0.38 |
| 2  | 粉土      | 17.7                 | 15.1                  | 23.2   | 0.35 |
| 3  | 粉土夹粉质黏土 | 19.4                 | 22.8                  | 14.5   | 0.34 |
| 4  | 细砂      | 19.4                 | 3                     | 30     | 0.33 |

4. 有限元模型建立及数值分析

4.1. 基坑模型建立

采用 Midas GTS NX 有限元软件，构建包含基坑工程支护体系、周边地层及邻近地铁隧道(局部)的三维数值模型，以精准模拟基坑开挖全过程的力学响应。在计算过程中，假定土层在水平以及垂直方向均呈均匀分布；土体采用修正摩尔 - 库伦模型；锚杆、土钉、帷幕、梁、喷射混凝土面层则采用各向同性弹性模型[6][7]。

基坑开挖深度为 15 m，分 8 次开挖，第 1 次开挖高度为 1 m，第 2 至第 8 次开挖高度为 2 m。基坑周围超载为 20 kPa。建模结果如图 4 所示。



**Figure 4.** Finite element model of foundation pit  
**图 4.** 基坑有限元模型



4.2. 位移允许值

根据 GB50497-2019《建筑基坑工程监测技术规范》和 CJJ/T202-2013《城市轨道交通运营技术规范》[8][9]等规范对城市轨道交通结构安全控制的指标值,结合本工程特点、地铁隧道与基坑相对位置,位移允许值如表 8 所示。

**Table 8.** Allowable displacement values for foundation pits and subways  
**表 8.** 基坑与地铁位移允许值

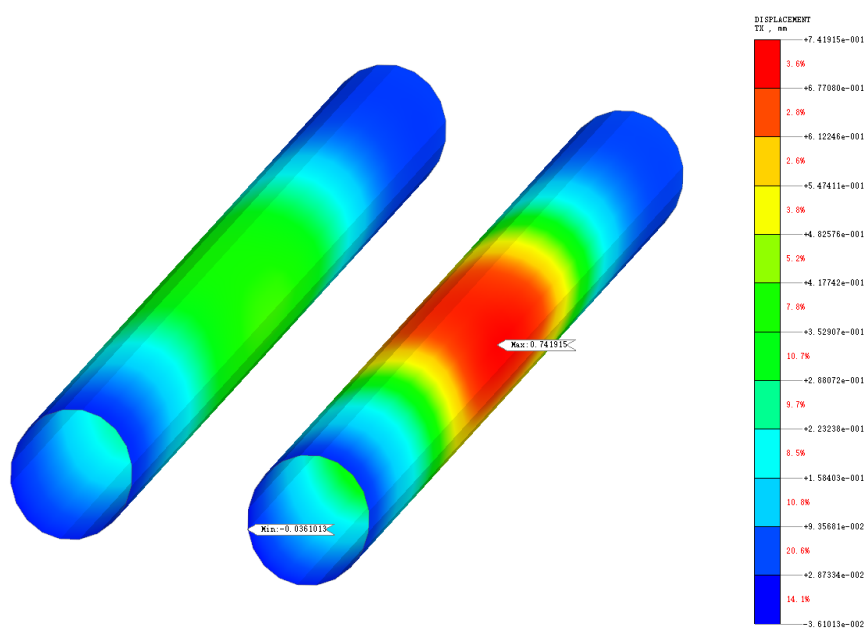
| 部位 | 监测项目     | 允许位移值/(mm) |
|----|----------|------------|
| 基坑 | 边坡顶部水平位移 | 25         |
|    | 边坡顶部竖向位移 | 10         |
|    | 深层水平位移   | 45         |
| 地铁 | 水平位移     | 10         |
|    | 竖向位移     | 上浮 5       |
|    |          | 沉降 10      |

4.3. 现有设计方案数值模拟结果

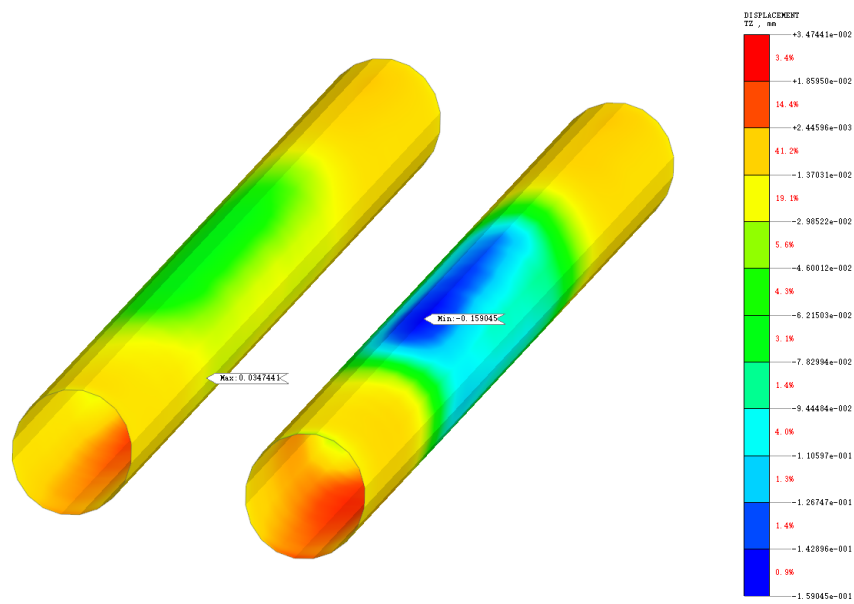
通过 Midas GTS NX 软件的“编辑施工阶段组”功能编辑基坑开挖与支护全过程施工模拟逻辑,将模型导入软件自带的岩土工程专用求解器进行非线性计算,获得基坑周边土体位移场及邻近地铁隧道结构的位移响应特征,具体模拟结果可视化云图如图 5~9 所示。

有限元模拟结果如表 9 所示。

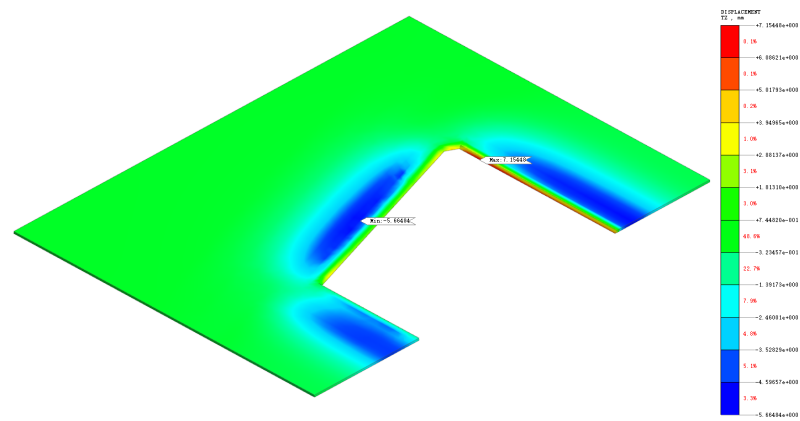
由表 9 (模拟结果)与表 8 (位移允许值)对比分析可知:在现有设计方案下,基坑及地铁隧道各控制对象的位移模拟最大值均小于对应允许值,说明现有支护体系能有效控制基坑开挖诱发的变形。



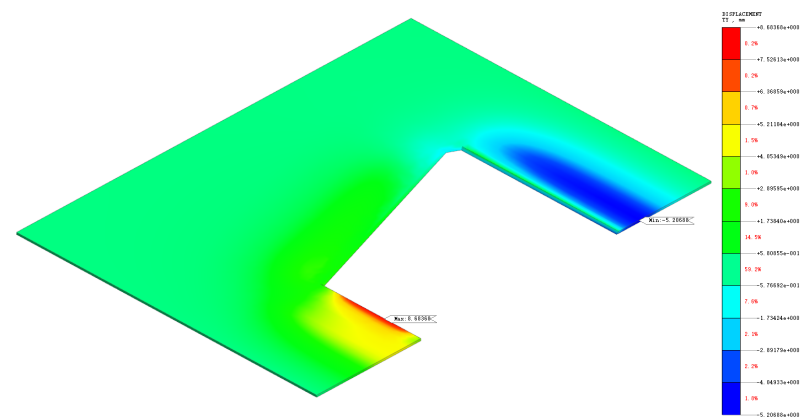
**Figure 5.** Cloud map of horizontal displacement of subway structure  
**图 5.** 地铁结构水平位移云图



**Figure 6.** Cloud map of vertical displacement of subway structure  
**图 6.** 地铁结构垂直位移云图



**Figure 7.** Cloud map of vertical displacement at the top of excavation slope  
**图 7.** 基坑放坡顶部垂直位移云图



**Figure 8.** Cloud map of horizontal displacement at the top of excavation slope  
**图 8.** 基坑放坡顶部水平位移云图



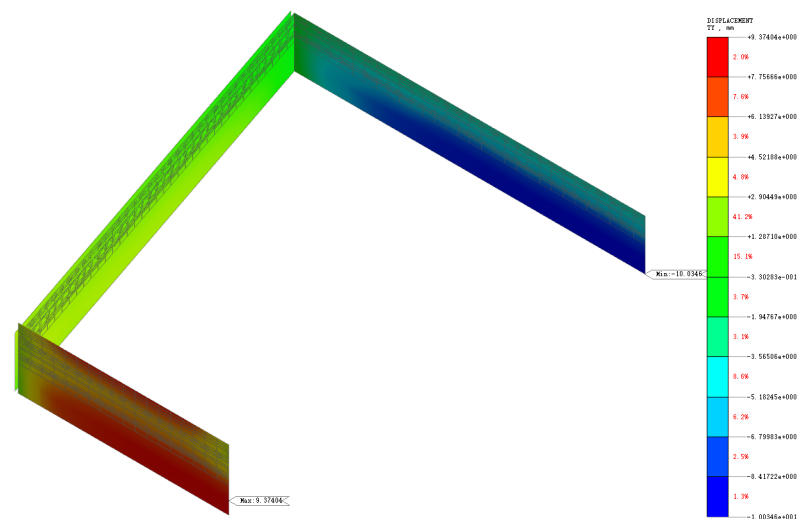


Figure 9. Deep horizontal displacement diagram of foundation pit support system  
图 9. 基坑支护体系深层水平位移图

Table 9. Maximum calculated displacement of foundation pit support system and subway structure  
表 9. 基坑支护体系与地铁结构位移最大计算值

| 部位 |          | 模拟位移值/(mm) |
|----|----------|------------|
| 基坑 | 边坡顶部水平位移 | 8.68       |
|    | 边坡顶部竖向位移 | 7.15       |
|    | 深层水平位移   | 10.03      |
| 地铁 | 水平位移     | 0.74       |
|    | 竖向位移     | 上浮 0.03    |
|    |          | 沉降 0.15    |

4.4. 降低基坑支护等级对地铁隧道位移的影响

根据 4.3 节模拟结果可知，现有支护方案能够有效控制基坑及地铁隧道的位移变形，但从工程经济性角度分析，原方案西侧(近地铁侧)采用“上部土钉墙 + 下部双层帷幕”的强化支护形式，支护强度存在一定冗余，整体造价偏高，具备通过合理降低支护等级优化经济性的空间。

因此本文设计了 3 种不同支护等级的基坑支护方案，如表 10 所列，与原方案形成对比，重点分析支护等级降低后地铁隧道的位移响应变化。

Table 10. Comparison of excavation support schemes  
表 10. 基坑支护方案对比

| 方案  | 上部 4.5 m    | 下部 10.5 m |
|-----|-------------|-----------|
| 原方案 | 45°放坡 + 土钉墙 | 双层帷幕结构    |
| 方案一 | 45°放坡       | 双层帷幕结构    |
| 方案二 | 45°放坡 + 土钉墙 | 单层帷幕结构    |
| 方案三 | 45°放坡       | 单层帷幕结构    |

采用与 4.1 节相同的计算参数及施工模拟逻辑，通过 Midas GTX NX 软件对上述 3 中新方案分别进行有限元模拟分析，得到各方案下基坑关键部位及地铁隧道结构的位移模拟结果，如表 11 所示。

Table 11. Displacement values of foundation pit after reducing the support level  
表 11. 降低支护等级后基坑位移值

| 位移类型     |      |    | 方案对应位移值/(mm) |       |       |
|----------|------|----|--------------|-------|-------|
|          |      |    | 方案一          | 方案二   | 方案三   |
| 基坑顶部水平位移 |      |    | 8.69         | 17.41 | 19.39 |
| 基坑顶部竖向位移 |      |    | 7.15         | 11.76 | 15.01 |
| 深层水平位移   |      |    | 10.34        | 18.78 | 22.78 |
| 地铁位移     | 水平位移 |    | 0.77         | 0.79  | 1.35  |
|          | 竖向位移 | 上浮 | 0.03         | 0.04  | 0.05  |
|          |      | 下降 | 0.16         | 0.18  | 0.29  |
|          |      |    |              |       |       |

对比表 8 和表 11 可知，方案二、三基坑顶部竖向位移值超出了允许范围。仅对“安全达标”的原方案与新方案一进行造价对比，基坑支护结构各部分造价明细如表 12 所示。

Table 12. Cost table of supporting structures  
表 12. 支护结构造价表

| 序号 | 名称     | 综合单价    | 单位               |
|----|--------|---------|------------------|
| 1  | 混凝土灌注桩 | 578.52  | 元/m              |
| 2  | 钢筋笼    | 156.812 | 元/m              |
| 3  | 高压旋喷桩  | 171.88  | 元/m              |
| 4  | 土钉     | 75.22   | 元/m              |
| 5  | 锚杆     | 113.26  | 元/m              |
| 6  | 喷射混凝土  | 71.37   | 元/m <sup>2</sup> |
| 7  | 钢筋网片   | 14.13   | 元/m <sup>2</sup> |
| 8  | 冠梁     | 287     | 元/m              |
| 9  | 腰梁     | 762.58  | 元/m              |

新方案一和原方案的整体造价对比如表 13 所示。

Table 13. Cost comparison table  
表 13. 造价对比表

| 结构名称      | 工程量  |      |
|-----------|------|------|
|           | 原方案  | 方案一  |
| 灌注桩/(m)   | 8839 | 8839 |
| 钢筋笼/(m)   | 8839 | 8839 |
| 高压旋喷桩/(m) | 8839 | 8839 |
| 土钉/(m)    | 6000 | -    |

续表

|                         |         |         |
|-------------------------|---------|---------|
| 锚杆/(m)                  | 16365   | 16365   |
| 喷射混凝土/(m <sup>3</sup> ) | 7062    | 7062    |
| 钢筋网片/(m <sup>2</sup> )  | 7062    | 7062    |
| 冠梁/(m)                  | 620     | 620     |
| 腰梁/(m)                  | 1395    | 1395    |
| 整体造价/(万元)               | 1216.92 | 1171.78 |

综合表 11 和表 13 可见,新方案一是 4 个方案中的最优方案。其核心优势体现在两方面:一是安全达标,所有控制对象的位移模拟值均严格控制在允许范围内,能有效保障基坑及邻近地铁 2 号线的运营安全;二是经济性最优,相比原方案降低了造价(降幅 3.7%),实现“安全可靠”与“经济合理”的平衡。

4.5. 基坑位移实测值分析

实际工程采用方案一进行施工,委托第三方监测机构,得到基坑沉降稳定后的最大位移实测值如表 14 所示。

Table 14. Table of displacement measured values  
表 14. 位移实测值表

| 部位 |          | 位移实测值/(mm) |
|----|----------|------------|
| 基坑 | 边坡顶部水平位移 | 8.1        |
|    | 边坡顶部竖向位移 | 7.38       |
|    | 深层水平位移   | 11.32      |

通过对比表 11 和表 14,方案一的位移模拟值与实测值基本吻合,各控制对象的实测值与方案一模拟值相对误差均在 3.2%~9.5%之间,平均误差 6.5%。基坑位移实测结果不仅证明方案一具备实际可行性与安全性,也验证了基于 Midas GTS NX 建立的有限元模型在本工程条件下的位移预测可靠性,为同类近接地铁深基坑工程的数值模拟与方案优化提供了实测数据支撑。

5. 结果与讨论

本文以郑州某邻近地铁 2 号线的商业综合体深基坑为研究对象,利用有限元软件 Midas GTX NX 建立三维数值模型,系统模拟了不同支护方案下基坑开挖对邻近地铁隧道的位移影响。

5.1. 支护方案对位移结果的影响

1) 帷幕层数的影响

对比方案一(双层帷幕)与方案三(单层帷幕)可知,在其他条件不变的情况下,仅通过改变帷幕层数,便对基坑深层水平位移产生了较大影响,其中单层帷幕方案中基坑深层水平位移达 22.78 mm,而双层帷幕方案将其控制在 10.34 mm。其原理在于双层帷幕在土体中形成了更为连续的刚度屏障,有效隔绝了土体卸荷应力波向深部土体的传播,从而减小了塑性区的扩展范围。

2) 土钉墙的作用

对比方案一(无土钉)与方案二(有土钉)可知,在其他条件不变的情况下,布设土钉墙对浅层土体(0~4.5 m)的加固程度有限。尤其是在深基坑工程中,土钉墙主要发挥“局部加筋”效应,难以对深部土体及地

铁隧道的位移响应产生影响。说明,在考虑深层土体位移的设计中,深层支护结构(如帷幕、锚杆)的刚度设计比浅层土钉更为关键。

### 3) 地铁隧道的响应机制

地铁隧道可以视为刚性结构,其变形主要是由于周围土体位移引起的。本研究中,所有方案下隧道的位移均以竖向沉降为主,水平位移相对较小,说明基坑开挖引起的地层损失主要表现为竖向卸荷。隧道沉降曲线呈“凹”形分布,最大沉降点位于基坑近侧。

## 5.2. 类似工程的对比分析

通过对比类似工程,可以发现以下共性与差异:

### 1) 变形模式共性

多数研究[3][4][7]均报道了基坑开挖引起隧道产生“整体沉降 + 局部收敛”的变形模式。本研究中,地铁隧道最大沉降值较小,可能与隧道埋深较大以及周围土体土质较好有关,而王林[10]等在紧邻地铁车站的基坑中也观察到类似现象,说明隧道埋深与支护刚度共同决定了变形模式。

### 2) 支护优化策略

张朝亮[11]指出随着基坑深度的增加和周边环境的复杂性的提高,造价也会相应增加。本研究通过系统对比多种方案,提出“取消土钉 + 保留双层帷幕”的优化路径,在保证安全的同时降低造价 3.7%,为“刚度 - 经济性”平衡提供了新思路。

## 6. 结论

基于上述结果与讨论,可以得出如下结论:

- 1) 基坑开挖对地铁隧道的位移影响可通过支护等级进行调控;
- 2) 双层帷幕较单层帷幕可以有效减小基坑坡顶土体的位移,尤其适用于对变形敏感的地铁保护区工程;
- 3) 土钉墙在深基坑中对整体变形控制贡献有限,可酌情优化或取消以节约造价;
- 4) 隧道变形以竖向沉降为主,支护设计应重点控制坑底隆起与坑周沉降;
- 5) 地质条件是决定变形控制难度的重要因素,在软土地区需进一步提高支护刚度或采用补偿性措施。

最后,本文应用有限元软件 Midas GTX NX 的位移预测可靠性得到现场实测的验证,说明该软件在近接地铁深基坑工程的位移预测中精度可靠,可为同类工程的支护方案设计与施工模拟提供技术参考。

## 参考文献

- [1] 李昌树. 基坑开挖对临近地铁高架结构变形的影响研究[J]. 现代工程科技, 2025, 4(7): 17-20.
- [2] 薛璟. 深基坑开挖对临近轨交结构的影响分析[J]. 建筑安全, 2025, 40(4): 39-45.
- [3] 胡鑫. 深大基坑开挖对邻近地铁隧道结构影响分析[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025(20): 128-130.
- [4] 刘凡来, 谭现江, 李钊. 基于 MIDAS GTS 的紧邻地铁车站出入口基坑开挖影响分析[J]. 交通世界, 2025(15): 11-13.
- [5] 吴慷琼, 毛毳. 钻孔咬合灌注桩计算模型的简化[J]. 天津城市建设学院学报, 2011, 17(2): 96-99.
- [6] 徐世祥, 吴波, 郑卫强, 等. 基于 CRITIC 和灰色系统理论的地铁深基坑工程施工风险评估: 以岱山站深基坑工程为例[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(28): 12325-12332.
- [7] 杨潇, 刘波. 软土地层深基坑施工对邻近地铁车站区间的影响分析[J]. 工程技术研究, 2024, 9(18): 12-14.
- [8] 刘俊岩. GB50497-2019 建筑基坑工程监测技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [9] 刘庭金. CJJ/T202-2013 城市轨道交通结构安全保护技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [10] 王林, 王根, 周卓, 等. 大型基坑施工对下邻地铁隧道变形影响分析[J/OL]. 安全与环境学报: 1-13. <https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2025.0492>, 2025-09-15.
- [11] 张朝亮. 地铁车站基坑工程造价成本的影响与控制研究[J]. 工程机械与维修, 2024(11): 145-147.