

# 基坑复合土钉墙支护变形监测与数值模拟研究

任泽煜, 杨晨曦, 秦浩健

华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2025年6月3日; 录用日期: 2025年6月25日; 发布日期: 2025年7月4日

## 摘要

为了研究基坑开挖卸荷对基坑侧壁及周边环境的影响。对郑州市某深基坑工程进行现场监测与MIDAS/GTS数值模拟, 研究粉质土层中基坑复合土钉墙支护结构的应力和变形规律。研究表明: 基坑侧壁水平位移和竖向位移随基坑开挖深度增加呈现先增后稳的趋势, 各监测点累积位移量及变化速率均未达到报警值; 基坑水平位移场云图呈同心环状扩散特征, 基坑竖向位移场云图呈现“浅层位移大、深层衰减快”的特征, 基坑剪应力场云图呈现典型的“C”型分布形态; 现场监测和数值模拟结果变化趋势较为一致, 工程实践验证了该类支护结构在粉土地层基坑支护中的有效性。

## 关键词

基坑, 复合土钉墙, 数值模拟, 粉土地层, 变形监测

# Research on Deformation Monitoring and Numerical Simulation of Composite Soil Nailing Wall Support for Foundation Pit

Zeyu Ren, Chenxi Yang, Haojian Qin

School of Earth Science and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: Jun. 3<sup>rd</sup>, 2025; accepted: Jun. 25<sup>th</sup>, 2025; published: Jul. 4<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

To investigate the effects of excavation unloading on the sidewalls and surrounding environment of a foundation pit, on-site monitoring and MIDAS/GTS numerical simulation were conducted on a deep foundation pit project in Zhengzhou City. This study focuses on the stress and deformation patterns of the composite soil nail wall support structure in silty soil layers. The findings reveal that as the excavation depth increases, both horizontal and vertical displacements of the pit's sidewalls

initially rise and then stabilize. Notably, the cumulative displacement and rate of change at each monitoring point remain below the alarm threshold. The horizontal displacement field of the foundation pit exhibits a concentric ring-like diffusion pattern, while the vertical displacement field displays significant shallow displacement and rapid attenuation in deeper layers. The shear stress field demonstrates a typical "C" shape distribution. The trends observed in on-site monitoring and numerical simulations align closely, confirming the effectiveness of this support structure in silty soil foundations through practical engineering applications.

## Keywords

Foundation Pit, Composite Soil Nail Wall, Numerical Simulation, Silty Soil, Deformation Monitoring

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

随着城市化进程加速，密集建筑群与地下空间开发则出现大量深基坑工程。粉质土层因强度弱、渗透性低，开挖易导致显著土体滑移变形[1]-[3]，从而威胁周边环境安全。基坑传统土钉墙支护作为柔性支护方法易造成变形较大等问题，而复合土钉墙通过协同土钉与微型桩的联合作用，可有效改善这一缺点[4]-[6]。现今通过基坑监测与数值模拟协同进行复合土钉墙稳定性分析的研究仍然不多[7]-[10]。本文以郑州某粉土地层基坑为对象，结合现场监测数据与 MIDAS/GTS 模拟，研究基坑复合土钉墙支护土体应力和变形规律。

## 2. 工程概况与地质条件

### 2.1. 工程概况

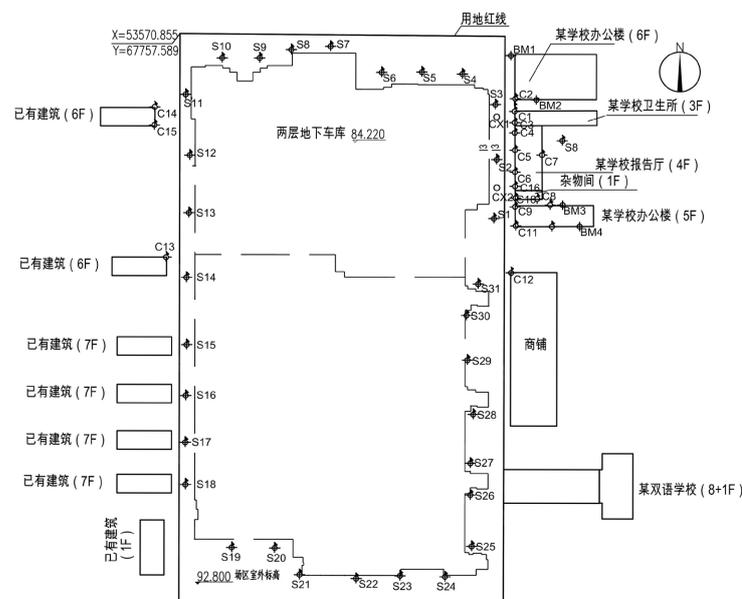


Figure 1. Layout of excavation site plan and monitoring points

图 1. 基坑场地平面及监测点位布置图

某基坑支护工程场地位于郑州市某街道东北侧，场地为拆迁场地，形状较规则，如图1。拟建工程基坑设计深度为8.4m；基坑周边环境比较复杂，基坑南侧为道路，距地下室外墙约30m，西侧为某学院楼（二层地下室区域）和住宅小区（7层，主要为一层地下室区域），距地下室外墙约7m，东北角为某学校建筑区，最近处距基坑约7m，最远处约14m，北侧为交通道路，距地下室外墙21m至39m，地下分布有市政管线。

## 2.2. 地质条件

该基坑工程地属黄河二级阶地，是郑州市典型的粉质土层地区。根据勘察报告资料显示，受基坑开挖影响的场地土层分布如下：① 杂填土、② 粉土、③ 粉质粘土、④ 粉土、⑤ 粉质粘土、⑥ 粉土。地下水位埋深8m左右，为潜水类型，水位年变幅1~2m左右，土层物理力学参数见表1。

Table 1. Physical and mechanical parameters of soil layers

表 1. 土层物理力学参数表

土层名称	厚度(m)	重度( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	粘聚力(kPa)	内摩擦角( $^{\circ}$ )	地基承载力(kPa)	压缩模量(MPa)
杂填土	1.17	18	8	10	—	—
粉土	2.33	17.3	8	16	120	12.2
粉质粘土	1.94	18.6	20	8	110	8.8
粉土	3.18	20	10	19	150	12
粉质粘土	3.98	19	23	10	120	8.2

## 3. 基坑监测内容与基坑支护设计方案

### 3.1. 支护设计方案

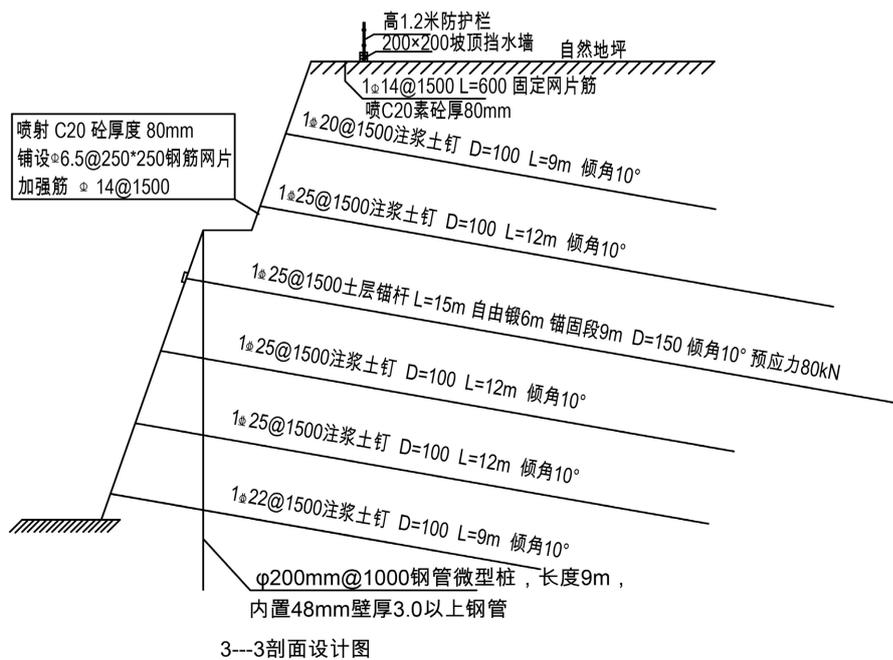


Figure 2. Design of support structure for section 3-3 on the northeastern side of the foundation pit  
图 2. 基坑东北侧 3-3 剖面支护结构设计图

根据设计规范,结合场地土层、开挖深度及环境条件,共划分 5 个基坑支护剖面段进行支护设计。因基坑东北侧靠近建筑物其周边环境复杂,故选取基坑该区域 3-3 典型剖面进行分析,该剖面采取复合土钉墙支护形式,其由注浆土钉、锚杆及微型桩组成,如图 2 所示。

### 3.2. 监测内容与方法

该基坑监测采取仪器监测为主,以现场巡视为辅的方式进行,基坑监测点位布置,如图 1 所示。(1) 坡体深层水平位移监测:在基坑东北侧中部设置 2 个测斜管断面,编号为 CX1-CX2;(2) 坡顶水平位移及沉降观测:在基坑北面布设 7 个测点(S4-S10),西面 8 个测点(S11-S18),南面 6 个测点(S19-S24),东面 10 个测点(S1-S3, S25-S31),监测点间距根据实际情况调整;(3) 建筑物沉降监测:在基坑东北侧布置 13 个沉降观测点(C1-C12, C16),西北侧布置 3 个沉降观测点(C13-C15)。

## 4. 监测结果分析

### 4.1. 坡顶水平位移和顶部沉降分析

图 3 给出了坡顶不同监测点(S1 至 S8)水平位移的变化情况。结果显示,多数监测点的坡顶水平位移随时间呈上升趋势,表明基坑开挖对基坑侧壁土体扰动较明显,有往基坑内部变形的趋势。其中, S2 点的位移量最大,约为 3.5 mm,而其他监测点的位移量相对较小,大多集中在 1 mm 左右;自 11 月中旬起,除 S2 点外,其余监测点的位移变化趋于稳定,这表明基坑开挖到底后侧壁土体达到一种相对平衡的状态。

图 4 给出不同监测点(S1 至 S8)坡顶竖向位移的变化情况,可以看出坡顶监测点竖向位移均呈上升趋势,表明受基坑开挖影响坡顶有垂直方向变形趋势,但绝对数值仍然很小;在 10 月中旬至 11 月初, S5、S6、S8 的竖向位移出现突变现象,其中 S6 点的累积位移量最大,约为 0.45 mm。

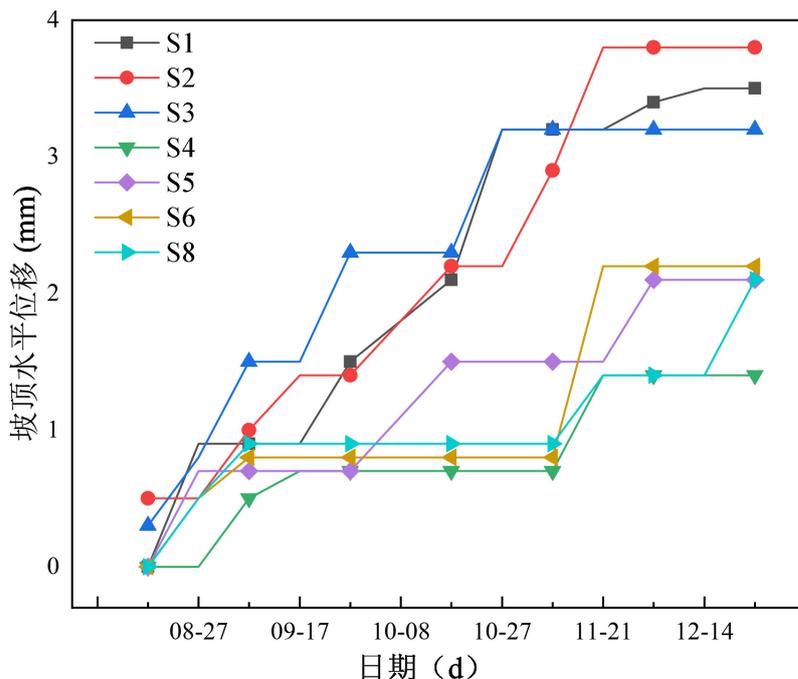


Figure 3. Horizontal displacement time curve of measuring points at the top of the slope  
图 3. 坡顶测点水平位移 - 时间曲线

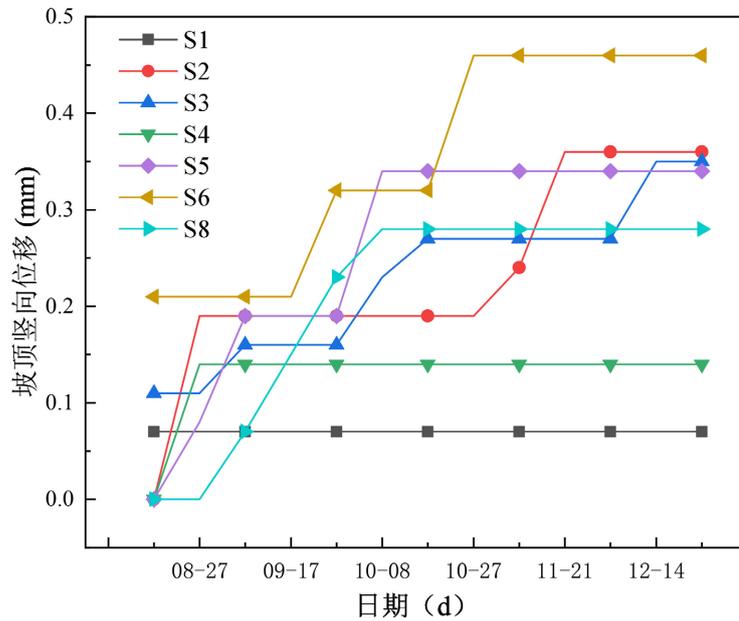


Figure 4. Vertical displacement time curve of measuring points at the top of the slope  
图 4. 坡顶测点竖向位移 - 时间曲线

#### 4.2. 深层水平位移监测数据分析

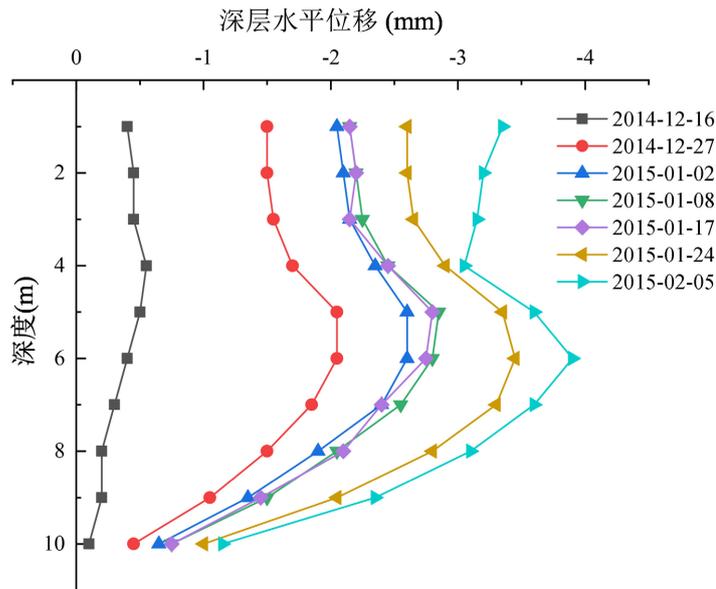


Figure 5. CX-1 inclinometer tube deep horizontal displacement time curve  
图 5. CX-1 测斜管深层水平位移 - 时间曲线

图 5 给出基坑测斜管 CX-1 的深层水平位移随深度的变化曲线，可以看出，2014 年 12 月 16 日至 12 月 27 日基坑深层水平位移变化较大，其中最大累积位移量为 $-2.05$  mm，位于深度 5 m 处，土体趋于向基坑内移动。这是由于基坑开挖初始阶段，粉质土体受到扰动破坏后，其应力释放速率与开挖深度呈非线性正相关，致使土层出现位移激增现象。2015 年 01 月 02 日至 01 月 17 日基坑的深层水平位移变化相对稳定，此时基坑暂停开挖，基坑变形保持稳定。

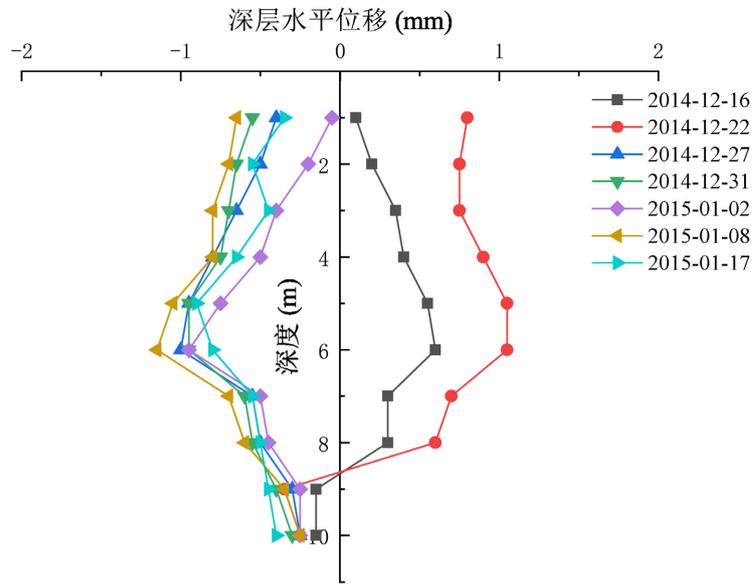


Figure 6. CX-2 inclinometer tube deep horizontal displacement time curve  
 图 6. CX-2 测斜管深层水平位移 - 时间曲线

图 6 给出基坑测斜管 CX-2 的深层水平位移随深度的变化曲线，可以看出，2014 年 12 月 16 日至 12 月 22 日基坑深层水平位移差异明显，其中最大累积位移为 1.05 mm，位移深度 5 m 处，土体趋于向坑外移动。然而 2014 年 12 月 27 日至 2015 年 01 月 17 日基坑深层水平位移波动较小且数值整体为负，土体移动方向反转趋于坑内移动。这是由于在基坑开挖初始阶段，土体应力释放速率过大易导致土体在快速压缩下发生回弹现象，在图 6 中体现正值位移量；基坑开挖进行一段时间后土体因应力卸载，位移方向转为向坑内移动，在图 6 中体现负值位移量，进而曲线方向发生反转。

### 4.3. 坑周建筑物沉降监测数据分析

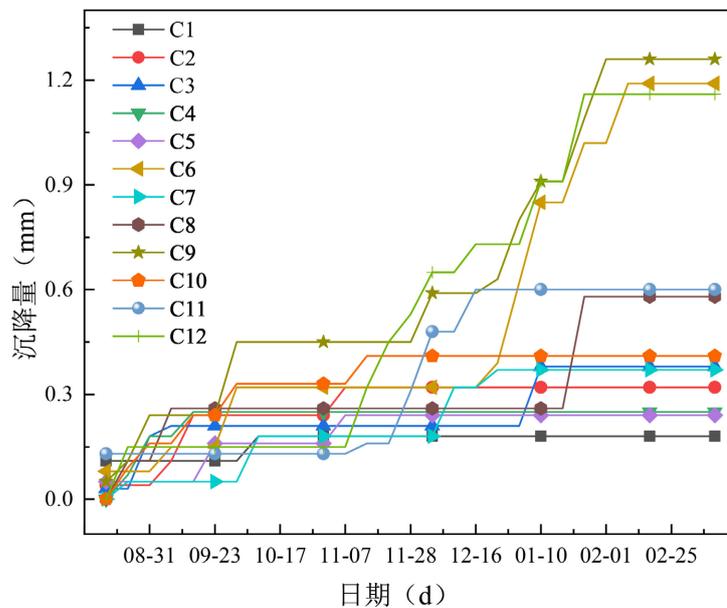


Figure 7. Settlement time curve of the building complex on the northeast side of the foundation pit  
 图 7. 基坑东北侧建筑群沉降 - 时间曲线

图 7 给出了基坑东北角附近各监测点沉降随时间的变化规律, 随基坑开挖深度增加, 各监测点处沉降量呈现渐进式增加, 其中 C6、C9 和 C12 基坑开挖到底时的累积沉降量最大, 其值约为 1.2 mm, 累积沉降量没有达到国家规范规定的报警值。监测数据整体成渐进式上升趋势, 基坑开挖到底时各监测点沉降变化稳定, 且现场巡视过程中未发现任何裂缝。

## 5. 数值模拟

### 5.1. 模拟过程及参数选取

本文采用有限元软件 MIDAS/GTS 对典型剖面 3-3 进行二维数值模拟, 如图 8 所示, 该位置基坑开挖深度为 5.66 m, 二维模型尺寸为 x 方向 31.46 m、y 方向 17.1 m、z 方向 1 m, 在建模过程中对基坑侧壁土体均选用修正 Mohr-Coulomb 模型, 锚杆和土钉采用植入式桁架单元模型, 微型桩采用梁单元模型。

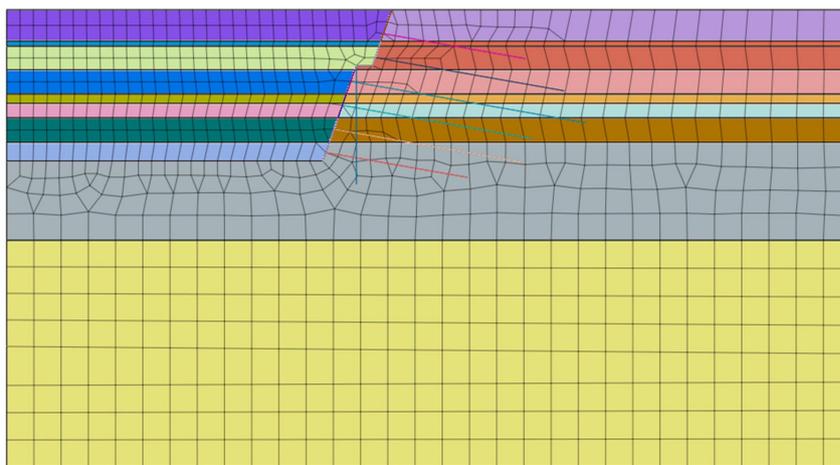


Figure 8. Grid division diagram of section 3-3 of foundation pit  
图 8. 基坑 3-3 剖面网格划分图

### 5.2. 模拟结果分析

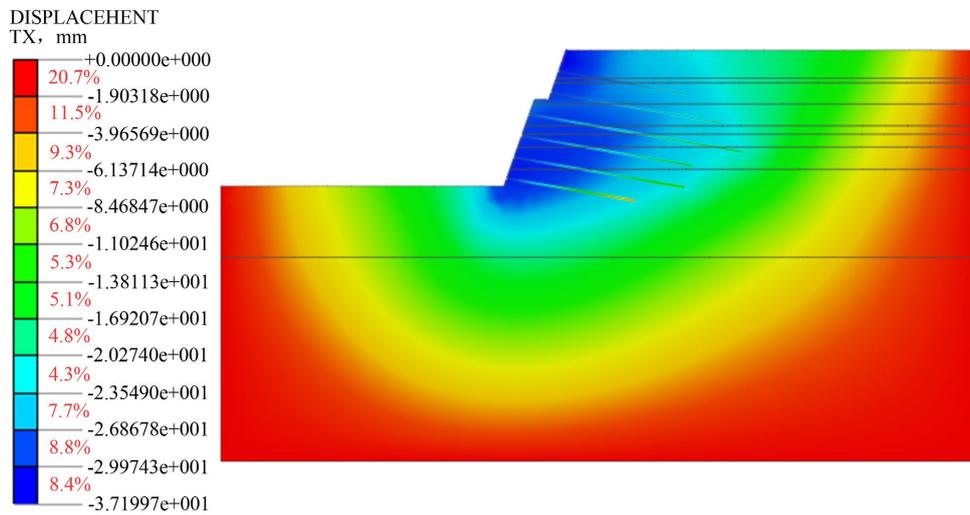
#### 5.2.1. 位移分析

图 9 给出基坑开挖到底 3-3 剖面处水平位移云图, 模拟云图呈现“同心环状扩散”特征。由模拟结果可得水平位移最大值为 32.18 mm, 位于基坑开挖边坡与坡顶交界处。表明该模型能有效复现复合土钉墙的侧向约束机制。

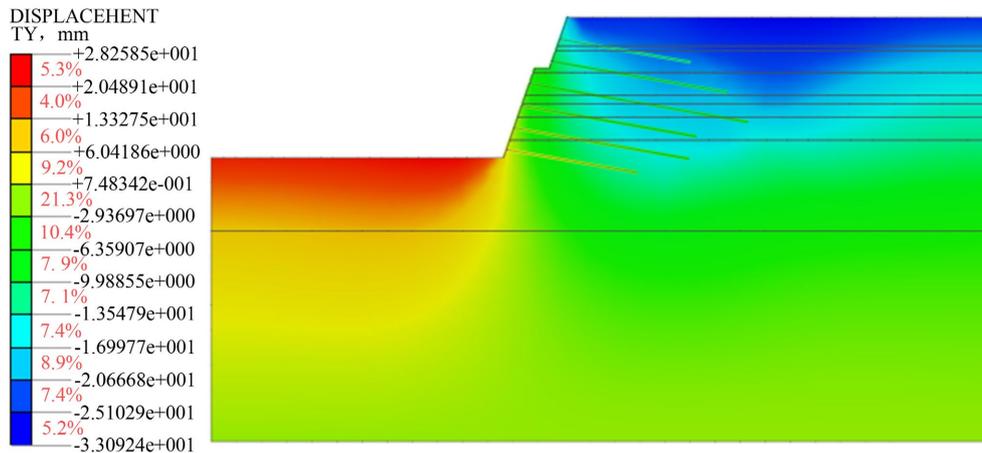
图 10 给出基坑开挖到底 3-3 剖面处竖向位移云图, 模拟云图呈现“浅层位移大、深层衰减快”的特征, 由模拟结果可得竖向位移最大值为 28.96 mm, 位于基坑底部, 表明基坑底部存在土体反弹现象。监测数据与数值模拟结果存在一定差异, 这是由于现场土体性质参数难以准确把握, 现场施工情况复杂等多种因素造成的。

#### 5.2.2. 应力分析

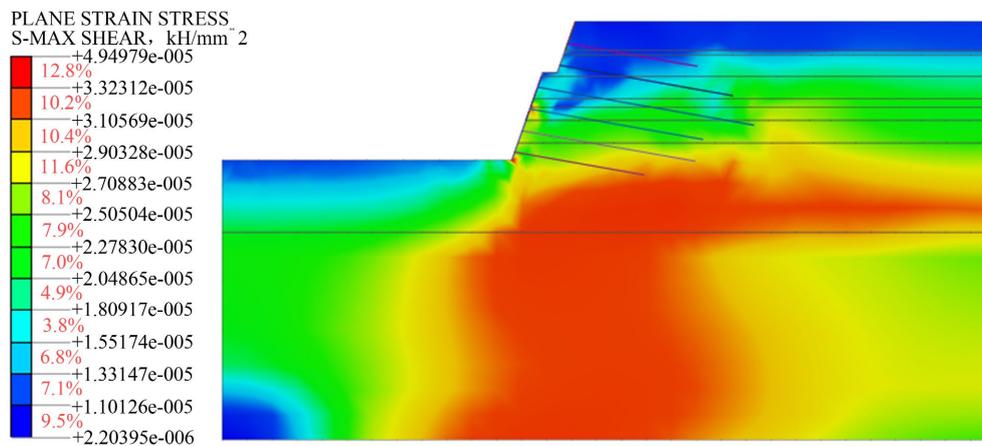
图 11 给出基坑开挖到底 3-3 剖面处最大剪应力云图, 从模拟云图中可以看出 3-3 剖面处随开挖深度的不断增加云图颜色不断上移, 剪应力场呈现典型的“C”型分布形态, 其中最大剪应力为 4.95 kPa, 位于基坑侧壁坡脚处。这是由于该区域受到较大的侧向土压力作用, 从而导致在坡脚处产生应力集中现象。



**Figure 9.** Horizontal displacement cloud map at section 3-3 after excavation to the bottom  
**图 9.** 开挖到底后 3-3 剖面处水平位移云图



**Figure 10.** Vertical displacement cloud map of section 3-3 after excavation to the bottom  
**图 10.** 开挖到底后 3-3 剖面竖向位移云图



**Figure 11.** Cloud map of maximum shear stress at section 3-3 after excavation to the bottom  
**图 11.** 开挖到底后 3-3 剖面处最大剪应力云图

## 6. 结论

本文通过现场监测和数值模拟对郑州某基坑变形和应力等进行分析,得出以下结论:(1) 基坑坡顶水平位移、坡顶竖向位移、周边建筑物沉降及深层水平位移随基坑开挖逐步增加,各监测点位的监测数据变化未达到国家规范规定的报警值。(2) 基坑东北侧临近建筑物区域水平和竖向位移量均变化稳定且沉降变形较小,现场巡视没有发现明显的危险情况。(3) 数值模拟结果显示基坑东北侧 3-3 剖面处位移形变量较小且相对稳定。该基坑所采用的复合土钉墙支护结构类型,能够有效地降低土体的侧向位移,确保了基坑周边环境的安全。

## 参考文献

- [1] 黄志全, 李宣, 王安明, 等. 郑州市某建筑深基坑监测[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2014, 35(1): 51-55.
- [2] 单仁亮, 董洪国, 魏龙飞, 等. 粉质砂土土钉墙水平位移与土钉轴力的 FLAC3D 研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(S2): 565-571.
- [3] 刘建华, 吴绍明, 王林枫, 等. 深长基坑开挖引发邻近建筑群沉降规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(4): 1374-1382.
- [4] 罗正东, 吴鹏, 黄河, 等. 富水砂卵石地层深基坑开挖变形监测与数值分析[J]. 建筑结构, 2020, 50(23): 128-133.
- [5] 鲍如意, 谢东武. 复杂环境下基坑开挖监测和数值模拟研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(S1): 890-896.
- [6] 叶帅华, 李德鹏. 复杂环境下深大基坑开挖监测与数值模拟分析[J]. 土木工程学报, 2019, 52(S2): 117-126.
- [7] 周勇, 李康. 基于开挖过程的深基坑桩锚支护结构位移的数值模拟分析[J]. 兰州理工大学学报, 2018, 44(5): 132-136, 173.
- [8] 尚玉金. 复合土钉墙支护技术在黄河三角洲地区的研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2014.
- [9] 孙剑平, 魏焕卫, 刘绪峰. 复合土钉墙变形规律的实测分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(S1): 479-483.
- [10] 周陈发, 潘泓. 复合土钉墙阳角部区域土钉受力性状分析[J]. 地下空间与工程学报, 2007(S1): 1310-1313.