

# 非对称结构作用下深基坑围护结构受力变形分析

万朝栋<sup>1,2</sup>, 祁小龙<sup>1</sup>, 郑亚楠<sup>2</sup>, 杨旺军<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中铁十八局集团有限公司, 天津

<sup>2</sup>同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海

收稿日期: 2024年4月30日; 录用日期: 2024年5月20日; 发布日期: 2024年5月29日

## 摘要

本文基于苏州地区某地铁车站的实际工程, 采用数值模拟与现场监测相结合的方法, 研究了非对称结构作用下深基坑围护结构的受力变形规律。研究表明: 1) 非对称既有车站的存在使得结构对称的新建深基坑围护结构呈现非对称的受力变形规律。2) 既有车站对于基坑围护结构受力的影响程度与其所处位置与既有车站的距离有关, 邻近既有车站侧地连墙较对侧地连墙拉应力增大, 坑底以上压应力减小, 坑底以下压应力增大。3) 既有车站的遮拦影响使得邻近侧地连墙变形量小于对侧地连墙, 对称截面呈现非对称的变形特征, 且非对称变形程度随着开挖的推进逐渐增加。

## 关键词

非对称结构, 软土地层, 深基坑开挖, 围护结构受力变形, 数值模拟

# Analysis of Stress and Deformation in Deep Excavation Support Structures under Asymmetric Structural Actions

Chaodong Wan<sup>1,2</sup>, Xiaolong Qi<sup>1</sup>, Yanan Zheng<sup>2</sup>, Wangjun Yang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>China Railway 18th Bureau Group Corporation Limited, Tianjin

<sup>2</sup>Key Laboratory of Road and Transportation Engineering, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai

Received: Apr. 30<sup>th</sup>, 2024; accepted: May 20<sup>th</sup>, 2024; published: May 29<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

In this paper, based on the actual engineering of a subway station in the Suzhou area, a combined

文章引用: 万朝栋, 祁小龙, 郑亚楠, 杨旺军. 非对称结构作用下深基坑围护结构受力变形分析[J]. 土木工程, 2024, 13(5): 664-674. DOI: 10.12677/hjce.2024.135072

approach of numerical simulation and on-site monitoring was employed to investigate the stress and deformation patterns of deep excavation support structures under asymmetric structural actions. The study reveals the following findings: 1) The presence of an existing asymmetrical station results in non-symmetric stress and deformation patterns in newly constructed deep excavation support structures with initially symmetric configurations. 2) The degree of the impact of the existing station on the stress in the excavation support structure is related to the distance between the station and the existing station, with increased tensile stress on the side adjacent to the existing station's Earth-retaining wall and decreased compressive stress above the excavation bottom, while compressive stress below the excavation bottom is increased. 3) The obstructive influence of the existing station leads to smaller deformations in the Earth-retaining wall on the side adjacent to the station compared to the opposite side, resulting in an asymmetric deformation profile in the originally symmetric cross-section, with the degree of asymmetry increasing with the progress of excavation.

## Keywords

Asymmetric Structure, Soft Soil Stratum, Deep Excavation, Stress and Deformation in Support Structure, Numerical Simulation

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

随着人们对地下空间的开发需求逐渐高涨，地下建筑施工面临着更为复杂的施工条件和更多变的施工环境，使得地下建筑设计需要将自身结构与周围环境综合考虑。近年来，邻近既有地铁车站建设新站的工程屡见不鲜，郭磊[1]的研究表明，新建基坑施工对既有地铁车站影响显著，基坑开挖至基底时影响最大，结构向着基坑开挖临空面产生位移。王志杰等[2]结合板壳理论、数值模拟和现场实测，针对综合交叉换乘车站群大型基坑单侧开挖对既有车站变形响应的影响特征问题，指出车站结构整体变形随附加荷载的增大呈线性增大，且结构顶部变形受附加荷载影响较最大变形位置更为敏感。马乾瑛等[3]指出，考虑现有计算理论的实际情况，基坑施工过程中需遵循“时空效应”原则，避免大块土体的开挖，引起基坑底部地层应力释放现象过分集中。大量研究表明，深基坑开挖会对邻近既有车站的稳定性产生较大影响[4] [5] [6]，现有的研究也多集中于控制既有建筑的结构安全，而既有建筑的存在对深基坑围护结构的影响研究却鲜有涉及。

事实上，新建地铁车站基坑与既有车站结构间存在相互作用关系[7] [8] [9]，张国亮等[10]的研究表明，既有车站的存在可以减小基坑同侧桩体的变形和钢支撑轴力，而基坑开挖会使既有车站结构产生位移和转动。程玉兰等[11]考虑流固耦合作用，研究了软土深基坑与邻近地铁车站的相互变形影响，结果表明，既有地铁车站的存在会使基坑两侧桩体位移呈现非对称变形。

既有建筑的存在使得几何对称基坑处于非对称地应力场中，在一定程度上可以等效为承受偏心荷载，徐健等[12]采用数值模拟的方法，研究了半盖挖深基坑承受既有建筑偏压荷载时基坑与支护结构的变形情况，结果表明，既有建筑导致地连墙侧移曲线整体发生向基坑内的移动。针对地铁车站基坑围护结构的局部支护能力被既有管线削弱的问题，李文[13]提出采用“地下连续墙 + 钻孔灌注桩”组合支护结构形式，并采用冷冻法进行局部加固。李洪庆等[14]利用 FLAC 对有无既有车站的工况进行了对比模拟分析，结果表明，基坑开挖 1 倍深度范围内为强影响区，2 倍深度范围内为弱影响区，超过 2 倍深度范围为无

影响区。赵平等[15]的研究表明, 偏压荷载的增加不仅会导致近超载侧围护结构受力变形增长, 还会引起远侧围护结构顶部出现远离基坑的位移。本文在前人研究的基础上, 探究非对称结构即既有车站作用下深基坑围护结构的受力变形规律。

## 2. 工程简介

苏州地铁 8 号线某新建车站采用明挖法施工, 基坑标准段深 26.5 m, 共设置六道支撑; 端头井深 28.3 m, 设置七道支撑, 支撑参数见表 1。围护结构为地下连续墙, 厚度为 1 m, 埋深 50.8 m。基坑几何呈“工”字形关于两中线对称。

**Table 1.** Support parameter table

**表 1.** 支撑参数表

序号	材料	截面尺寸 (mm)	端头井支撑埋深 (m)	标准段支撑埋深 (m)
1	混凝土	800 × 1000	1.00	1.00
2	钢管	φ609, t = 16	7.20	7.20
3	钢管	φ609, t = 16	10.80	10.80
4	混凝土	1000 × 1000	15.60	15.60
5	钢管	φ800, t = 20	18.30	19.50
6	钢管	φ609, t = 16	21.00	22.50
7	钢管	φ800, t = 20	24.90	-

注: t 为钢管支撑厚度。

新建车站为换乘车站, 与既有车站最小距离仅为 12.5 m。既有车站为两层三跨框架结构, 站厅层层高 6.35 m, 站台层层高 8.35 m。根据地勘报告, 土层的地质参数见表 2。

**Table 2.** Geological parameter table of soil stratum

**表 2.** 土层地质参数表

层序	压缩模量 $E_s$ (MPa)	重度 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	泊松比 $\mu$	粘聚力 $c$ (kN/m <sup>2</sup> )	内摩擦角 $\varphi$ (°)
① <sub>1</sub> 杂填土	1.50	18.6	0.33	5.0	12.0
③ <sub>1</sub> 黏土	7.55	19.6	0.33	48.3	14.0
③ <sub>2</sub> 粉质黏土	5.45	19.6	0.34	25.4	14.2
④ <sub>1</sub> 粉质黏土	5.51	18.9	0.28	23.3	13.7
④ <sub>2</sub> 粉土夹粉砂	9.49	19.3	0.28	4.4	30.3
⑤ <sub>1</sub> 粉质黏土	5.45	19.0	0.40	24.7	13.1
⑥ <sub>2</sub> 粉质黏土	7.19	19.6	0.34	41.0	14.9
⑦ <sub>2</sub> 粉土夹粉砂	9.90	19.4	0.28	5.7	25.8
⑦ <sub>3</sub> 粉质黏土	6.16	19.2	0.34	26.6	14.4
⑧ <sub>2</sub> 粉质黏土夹粉土	6.64	19.4	0.34	26.6	14.0

### 3. 模型介绍

#### 3.1. 计算模型

建立三维有限元模型，考虑结构实际尺寸与边界效应，取模型长 450 m，宽 350 m，深 70 m。既有车站与新建车站深基坑的相对位置及网格划分如图 1 所示。

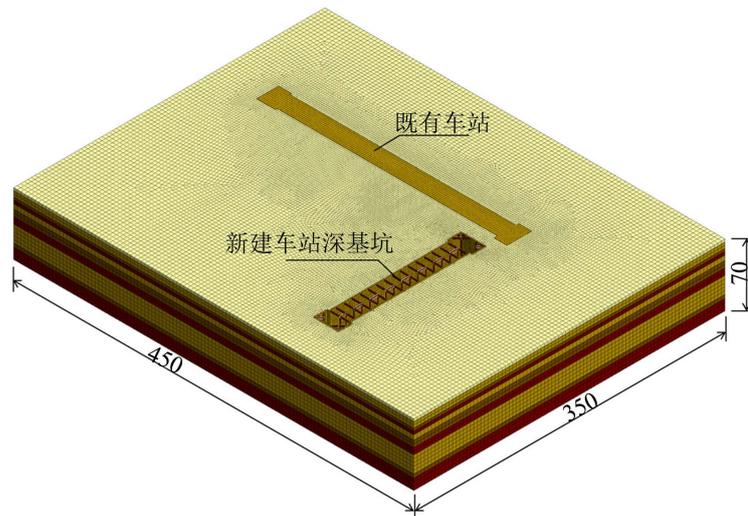


Figure 1. Schematic diagram of computational model (unit: m)

图 1. 计算模型示意图(单位: m)

土体本构模型选用修正摩尔 - 库伦模型，其中主压密加载试验切线刚度  $E_{oed}^{ref}$  近似值取表 2 中压缩模量  $E_S$ ，取三轴实验割线刚度  $E_{50}^{ref} = E_{oed}^{ref}$ ，卸载弹性模量  $E_{ur}^{ref} = 4E_{50}^{ref}$ 。

模型侧面设置法向位移约束，底面设置  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向的位移约束，顶部为自由表面。

梁、柱、桩、各层支撑采用梁单元模拟，地连墙、角撑、车站楼板、侧墙采用二维板单元模拟，土层采用三维实体单元进行模拟。

#### 3.2. 计算过程

模型就有无既有车站形成两对照工况，分别模拟新建车站深基坑开挖施工工况。定义工况 1 与工程实际一致，存在既有车站的影响。定义工况 2 深基坑附近无其他建筑影响。为了消除非对称开挖因素对分析非对称结构作用的干扰，将开挖方案简化为整层开挖。工况 1 主要计算步骤有：

- 工序一(Step 1): 激活既有车站结构;
- 工序二(Step 2): 施作深基坑地连墙、抗拔桩和格构柱;
- 工序三(Step 3): 深基坑开挖第一层土，厚度为 3.00 m，施作冠梁及第一道混凝土支撑;
- 工序四(Step 4): 深基坑开挖第二层土，厚度为 3.00 m;
- 工序五(Step 5): 深基坑开挖第三层土，厚度为 3.35 m，施作第二道钢管支撑;
- 工序六(Step 6): 深基坑开挖第四层土，厚度为 2.85 m，施作第三道钢管支撑;
- 工序七(Step 7): 深基坑开挖第五层土，厚度为 3.40 m，施作腰梁及第四道混凝土支撑;
- 工序八(Step 8): 深基坑开挖第六层土，厚度为 3.90 m，施作第五道钢管支撑;
- 工序九(Step 9): 深基坑开挖第七层土，厚度为 3.00 m，施作第六道钢管支撑;
- 工序十(Step 10): 深基坑开挖第八层土，厚度为 4.00 m，施作第七道钢管支撑;

工序十一(Step 11): 深基坑开挖第九层土, 厚度为 1.75 m。

## 4. 计算结果分析

### 4.1. 计算结果与实测对比分析

深基坑地连墙两对称轴线位置侧移监测点如图 2 所示, 现场实测数据与工况 1 计算结果对比如图 3 所示。

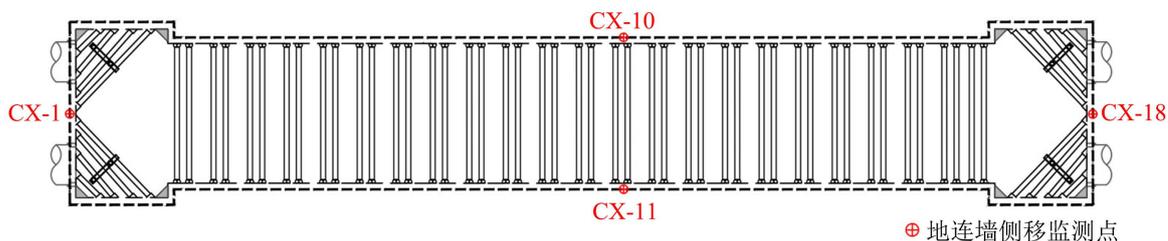


Figure 2. Schematic diagram of location of monitoring points for lateral displacement of Earth-retaining wall  
图 2. 地连墙侧移监测点位置示意图

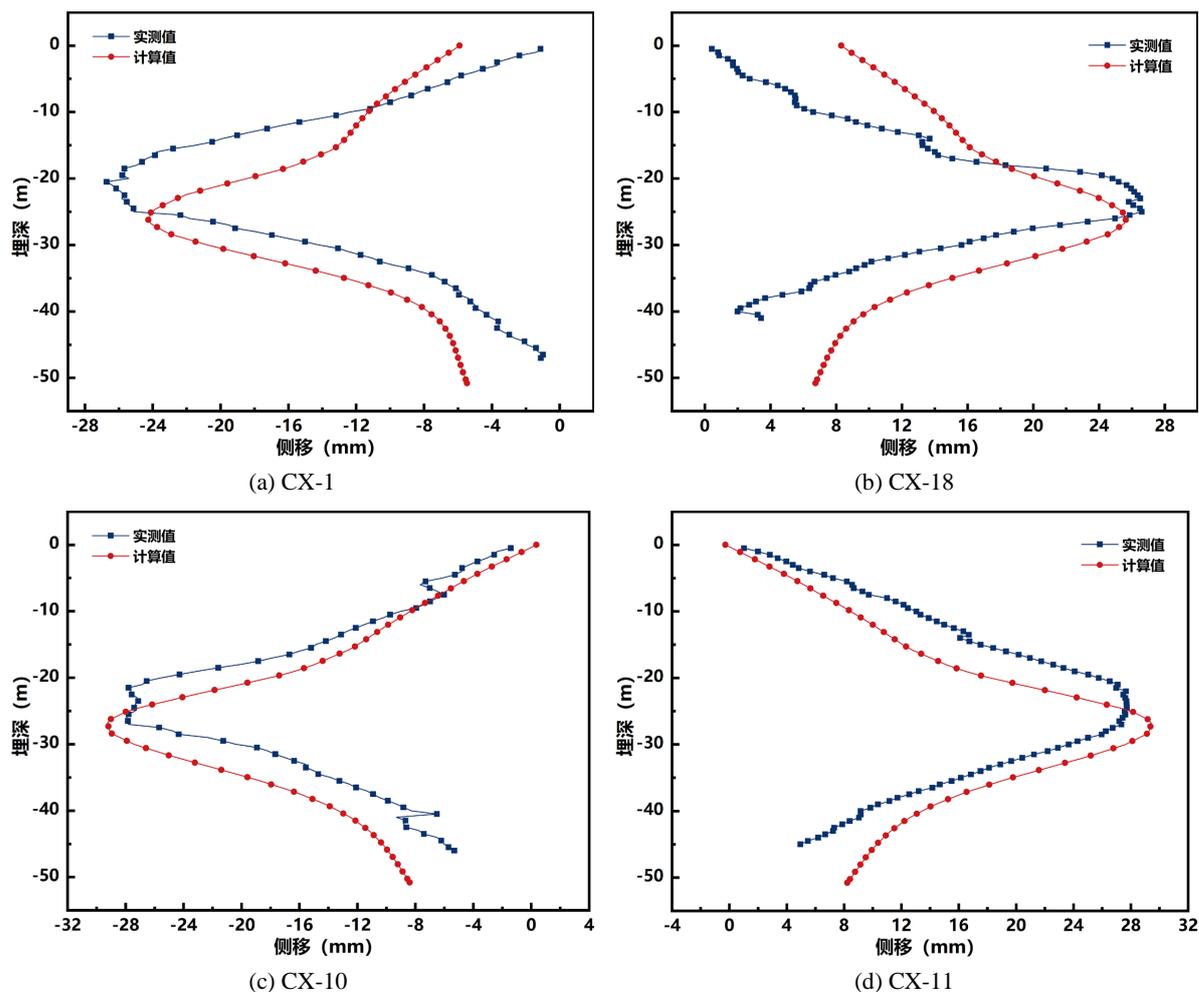


Figure 3. Comparison graph of measured values and calculated values  
图 3. 实测值与计算值对比图

如图 3 所示, 测点 CX-1 处地连墙实测最大侧移为 26.72 mm, 位于 20.5 m 深度处, 最大侧移计算值为 24.25 mm, 位于 26.2 m 深度处, 实际工程中该测点受附近换乘通道基坑施工影响, 故最大侧移值相差 9.2%。测点 CX-18 处地连墙实测最大侧移为 26.60 mm, 位于 25.0 m 深度处, 最大侧移计算值为 25.63 mm, 位于 26.2 m 深度处。分析两测点地连墙顶、底面侧移实测值与计算值存在差异的原因为: 实际工程中连接既有车站与新建车站的换乘通道结构对深基坑在该方向的移动起约束作用。

测点 CX-10 处地连墙实测最大侧移为 27.92 mm, 位于 26.0 m 深度处, 最大侧移计算值为 29.25 mm, 位于 26.8 m 深度处; 测点 CX-11 处地连墙实测最大侧移为 27.73 mm, 位于 20.0 m 深度处, 最大侧移计算值为 29.42 mm, 位于 26.8 m 深度处。两测点处实测值与计算值较为吻合, 故针对工程采用的施工方法, 模型计算结果能够反映不同工况下深基坑结构的受力变形特征。

#### 4.2. 非对称结构作用下深基坑地连墙受力分析

对既有车站的周围环境进行分区处理, 定义距离既有车站 0.5 倍基坑深度范围内为区域 1, 2 倍基坑深度范围内为区域 2, 大于 2 倍基坑深度范围为区域 3, 如图 4 所示。1-1 断面与 2-2 断面相对于基坑中线对称, 分别位于区域 1 与区域 3, 3-3 断面与 4-4 断面、5-5 断面与 6-6 断面均相对于基坑中线对称分布, 分别处于区域 2、区域 3。

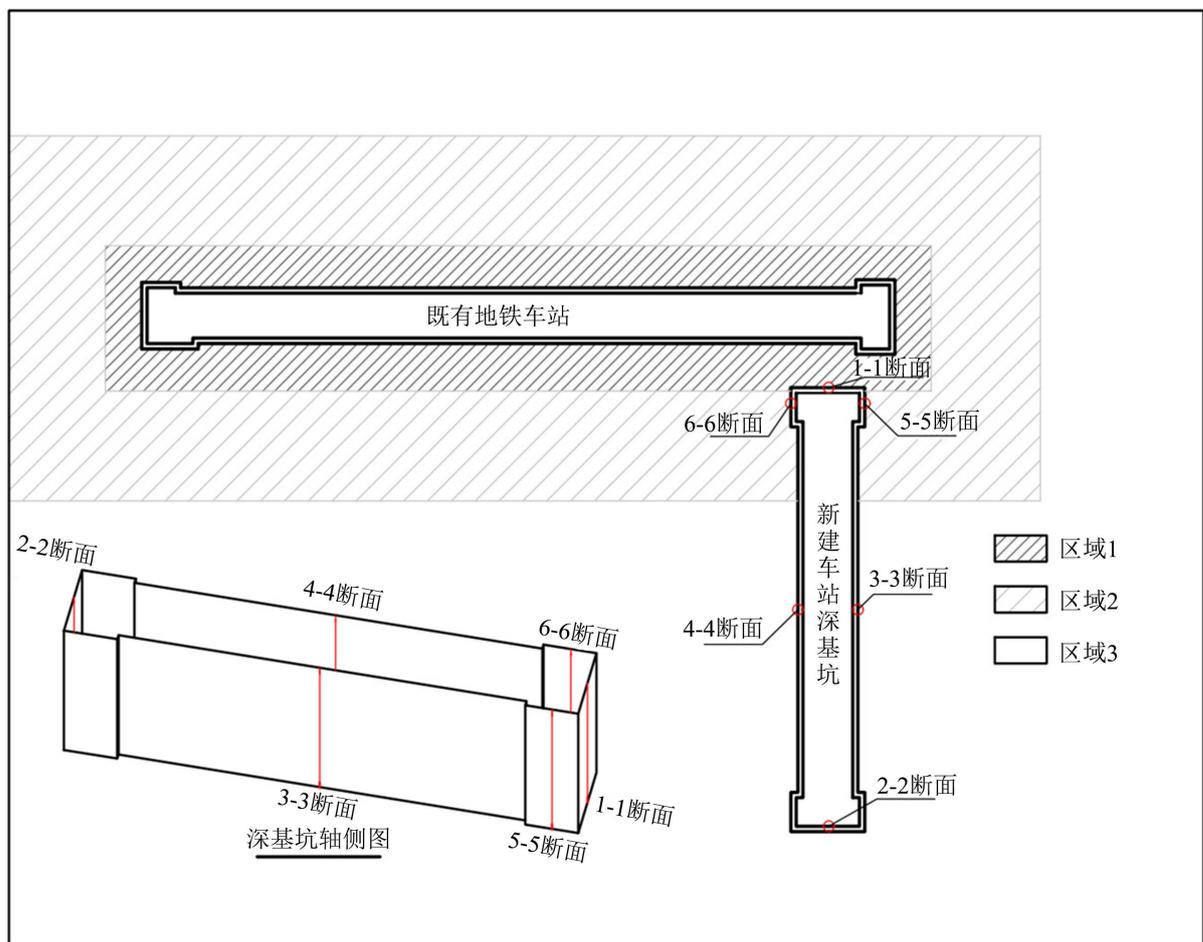
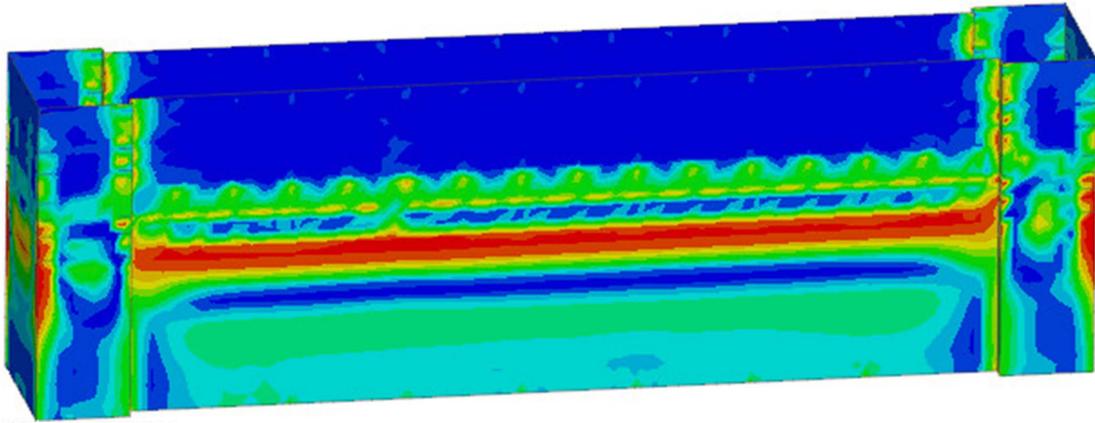


Figure 4. Schematic diagram of the zoning of influence areas for existing stations

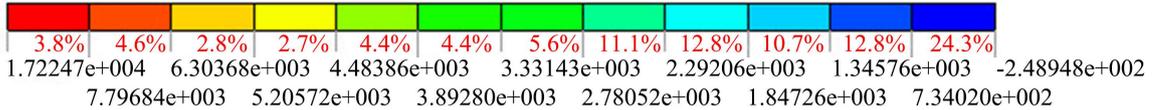
图 4. 既有车站影响区分区示意图

施工完成后，工况 2 深基坑地连墙受力情况如图 5 所示。最大主应力以受拉为主，最小主应力以压应力为主，压应力最大值为 19.98 MPa，坑底内及基坑边角附近出现应力集中。工况 2 不受既有车站的影响，此时深基坑地连墙受力关于两中线呈对称分布。

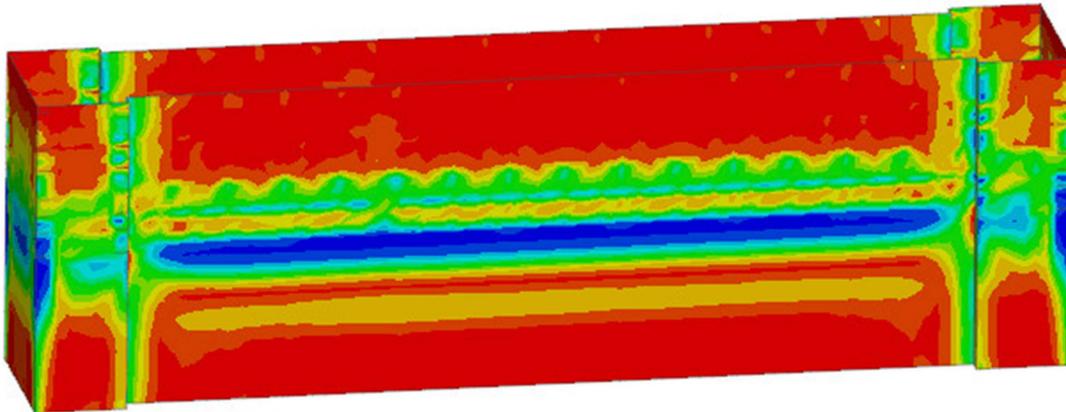


SHELL STRESS

S-MAJOR PRIN MAX, kN/m<sup>2</sup>

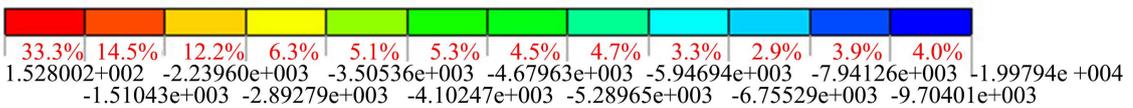


(a) 最大主应力



SHELL STRESS

S-MAJOR PRIN MIN, kN/m<sup>2</sup>



(b) 最小主应力

Figure 5. Stress cloud map of deep excavation Earth-retaining wall under working condition 2

图 5. 工况 2 深基坑地连墙应力云图

工况 1 中图 4 所示深基坑地连墙 1-1 断面、3-3 断面在开挖过程中不同埋深处应力变化如图 6 所示(受拉为正值，受压为负值)。1-1 断面最大主应力为拉应力 7.42 MPa，拉应力大于 C35 混凝土抗拉强度标准值，钢筋起到主要分担作用。断面最小主应力为 9.78 MPa，位于 26.7 m 深度附近，压应力满足混凝土抗压强度标准值。

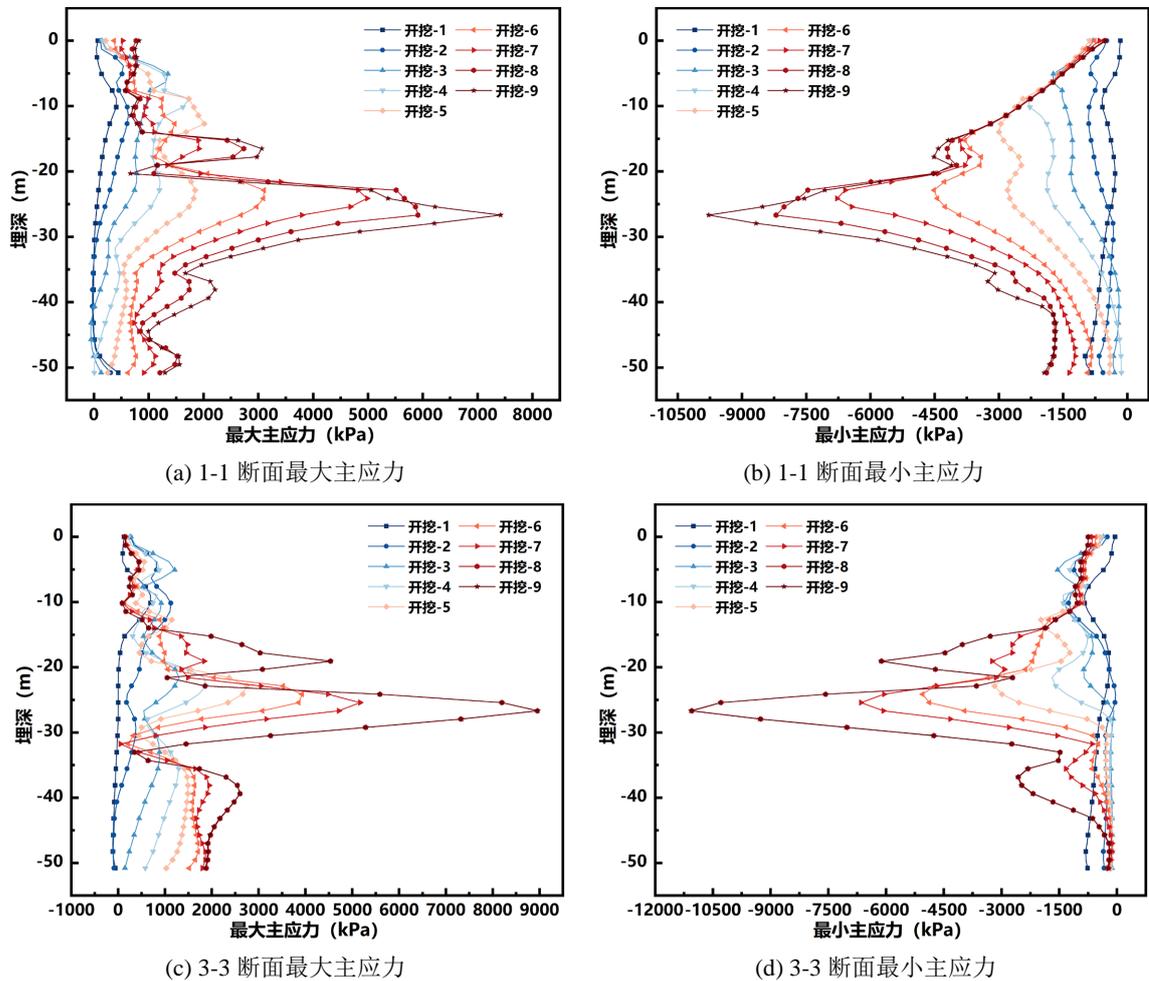


Figure 6. Stress distribution diagram of cross-section of Earth-retaining wall in excavation  
 图 6. 基坑地连墙断面应力分布图

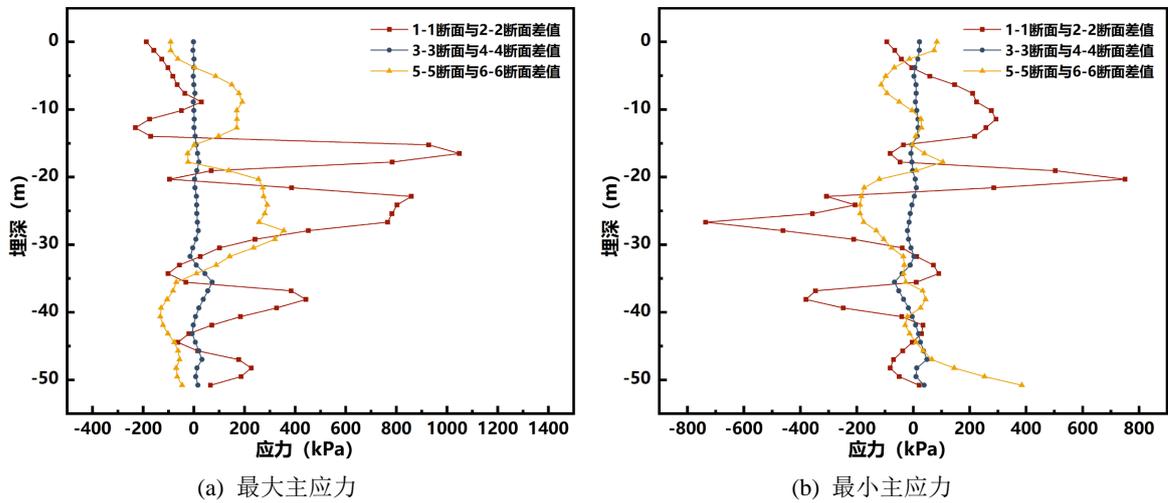
3-3 断面最大拉应力为 8.97 MPa，最大压应力为 11.07 MPa，开挖步 9 拉压应力存在大幅度增长。最大主应力与最小主应力均位于基坑底部深度附近，且各层支撑对于基坑地连墙受力起到了明显的约束作用。

图 4 中标注了三组地连墙的对称截面，截面间应力差如图 7 所示，非对称结构既有车站的影响使得三组对称截面应力差值表现呈现差异。1-1 断面拉应力整体大于 2-2 断面，最大差值达 1.05 MPa，基坑深度范围内压应力小于 2-2 断面，最大差值为 0.75 MPa，坑底以下压应力大于 2-2 断面，最大差值为 0.74 MPa。5-5 与 6-6 断面的受力差值明显小于 1-1 与 2-2 断面。3-3 断面拉应力大于 4-4 断面，压应力差值正负值交替分布。而 3-3 与 4-4 断面受力差值几乎为零，该处地连墙受既有车站影响较小，应力呈现对称分布特征。

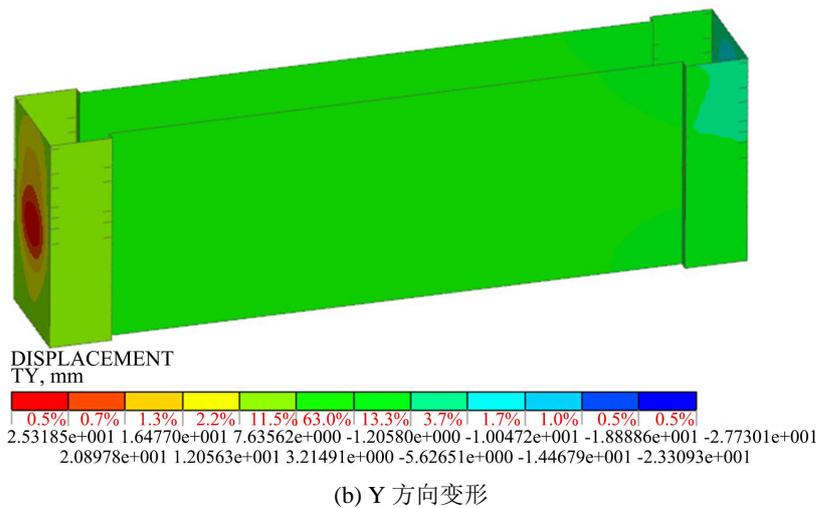
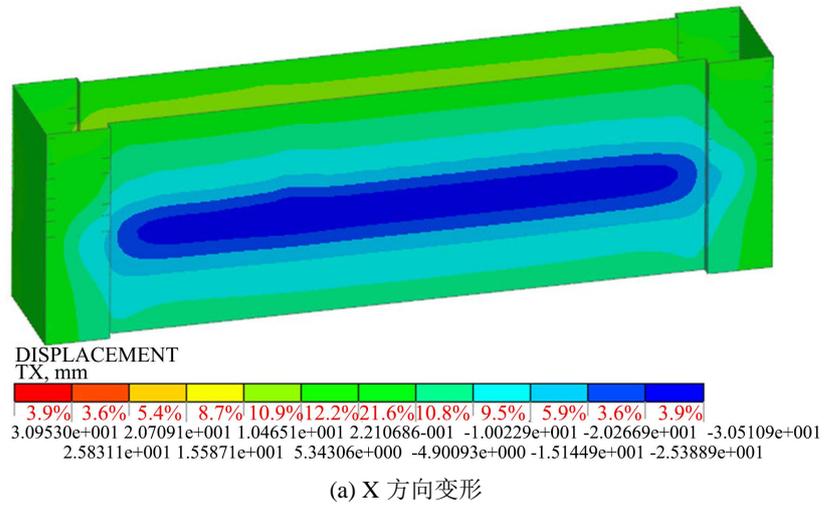
### 4.3. 非对称结构作用下深基坑地连墙侧移分析

施工完成后，工况 2 深基坑地连墙变形如图 8 所示。对称面变形呈对称分布，标准段最大变形为 30.95 mm，端头井最大变形为 27.73 mm。

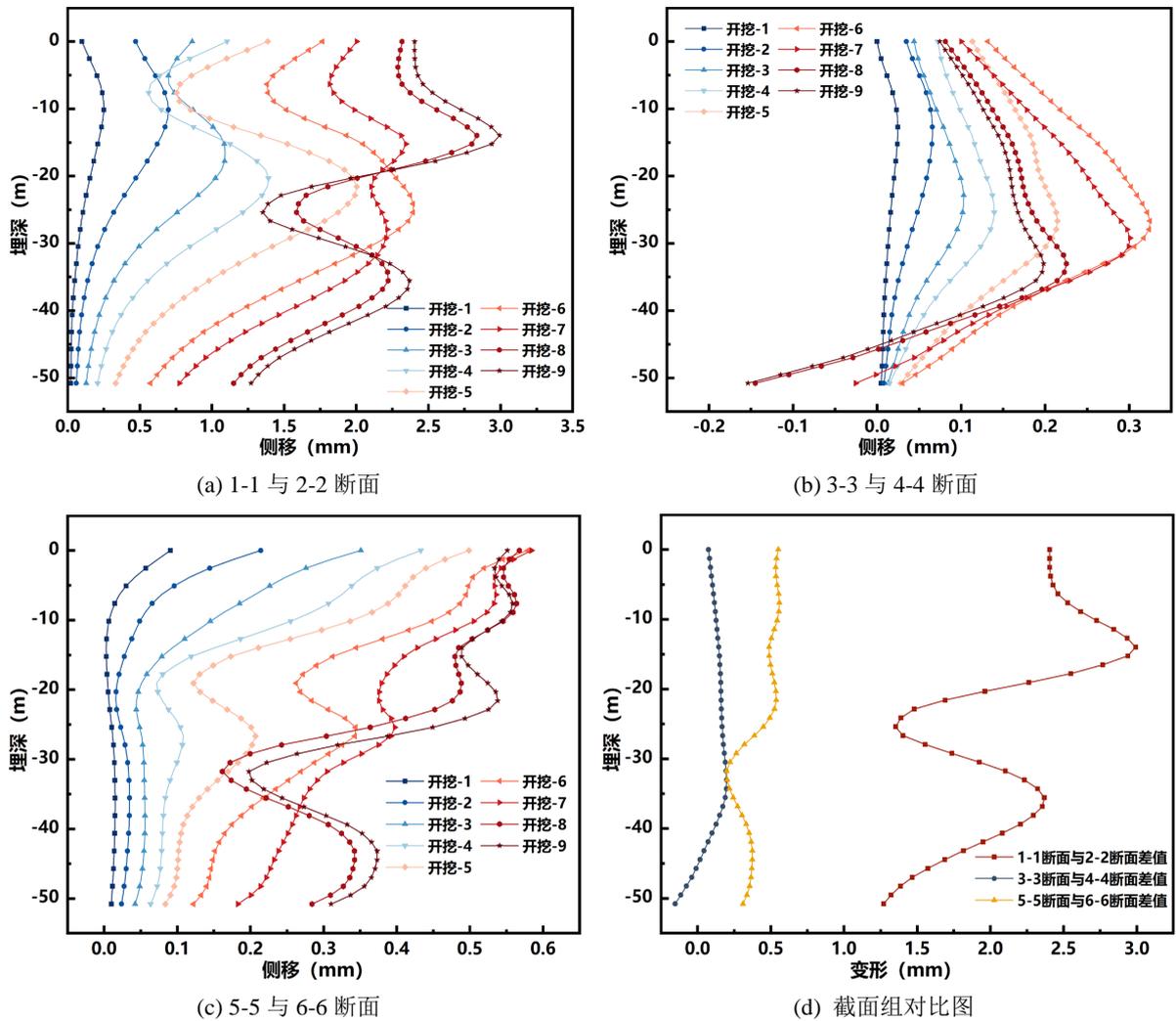
既有车站的存在，使得工况 1 地连墙对称截面产生非对称变形。图 9(a)中 1-1 断面变形量整体小于 2-2 断面，且随着开挖的推进，非对称变形程度逐渐增加，差值最大处位于 13.97 m 深度处，差值大小为 3.00 mm，占该处侧移量的 23.8%。



**Figure 7.** Distribution diagram of differential stress on symmetrical section  
**图 7.** 对称截面应力差分布图



**Figure 8.** Deformation cloud map of deep excavation Earth-retaining wall under working condition 2  
**图 8.** 工况 2 深基坑地连墙变形云图



**Figure 9.** Variation maps of differential deformation of symmetrical section with excavation under working condition 1  
**图 9.** 工况 1 对称截面变形差随开挖变化图

3-3 与 4-4 断面、5-5 与 6-6 断面同样遵循非对称变形量随开挖推进逐渐增大的规律。5-5 断面、1-1 断面变形分别大于 6-6 断面、2-2 断面的原因为：地下结构横向刚度较大，对土体位移产生反向的遮拦作用，从而反向作用于基坑围护墙，使得与既有车站距离较近处地连墙变形量较小。如图 4 所示，3-3 断面与 4-4 断面均处于距离既有车站大于两倍基坑深度的区域，如图 9(d)所示非对称变形量较小。

### 5. 结论

- 1) 新建车站基坑开挖施工，对称围护墙结构受既有车站的影响呈现出非对称的受力变形特征。
- 2) 既有车站对于基坑围护结构受力的影响程度与其所处位置与既有车站的距离有关，基坑纵向的对称截面更能体现这一特征。既有车站的存在使得邻近侧地连墙拉应力增大，基坑深度范围内压应力减小，坑底以下压应力增大。
- 3) 既有车站的遮拦效应使得邻近侧地连墙变形量小于对侧地连墙，且非对称变形程度随着开挖的推进逐渐增加，最大差值位于约 1/2 基坑深度处。
- 4) 建议在车站设计阶段考虑非对称结构的影响，避免因按照对称简化设计而造成严重的安全风险。

## 参考文献

- [1] 郭磊. 新建基坑工程对既有地铁车站的影响及对策[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(2): 109-112.
- [2] 王志杰, 周飞聪, 周平, 等. 基于强近接大型基坑单侧开挖卸载既有车站变形理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(10): 2131-2147.
- [3] 马乾瑛, 毛念华, 赵均海, 等. 基坑开挖对已建地铁站结构的安全性影响研究[J]. 铁道工程学报, 2014(4): 107-112.
- [4] 王志杰, 许瑞宁. 基坑开挖对紧贴既有地铁车站的影响分析[J]. 公路, 2015, 60(4): 299-302.
- [5] 朱峰. 新建地铁结构近接既有地铁车站工程全过程分析[J]. 北方交通, 2020(1): 80-84.
- [6] 黄明峰. 深基坑近接施工对既有运营地铁车站稳定性的影响研究[J]. 工程技术研究, 2021, 6(23): 4-6.
- [7] 何君佐, 刘浩, 廖少明, 等. 双排桩支护下深基坑与紧邻地铁车站相互作用[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(S2): 821-831.
- [8] 郭景琢, 裴昊田, 周强, 等. 相邻深大基坑同期施工相互影响及对邻近既有地铁结构影响研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(S1): 2802-2808.
- [9] 刘喆. 地铁盾构隧道与邻近深基坑开挖相互影响分析[J]. 工程建设, 2023, 55(6): 51-58.
- [10] 张国亮, 韩雪峰, 李元海, 等. 新建地铁站基坑与既有车站结构间相互影响的数值分析[J]. 隧道建设, 2011, 31(3): 284-288.
- [11] 程玉兰, 王毅红. 软土深基坑与邻近地铁车站相互变形影响分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(9): 14-20.
- [12] 徐健, 王自强, 王林枫, 等. 既有建筑下半盖挖深基坑变形影响因素研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(5): 1696-1704+1713.
- [13] 李文. 既有管线影响下地铁车站基坑围护结构局部冷冻加固技术研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(7): 153-158+171.
- [14] 李洪庆, 陈佳玮. 海积软土地层平行近接深基坑施工相互影响分析[J]. 广东土木与建筑, 2017, 24(3): 62-65.
- [15] 赵平, 王少航, 程雪芬. 基于非对称荷载作用下的基坑变形特性研究[J]. 安徽科技学院学报, 2023, 37(3): 102-108.