

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2022.04.014

# 基坑卸载对临近地铁车站影响的数值模拟研究

王立新<sup>1,2,3</sup>, 王强<sup>4</sup>, 李炳龙<sup>4</sup>, 薛勋强<sup>5</sup>, 徐硕硕<sup>4</sup>, 范飞飞<sup>4</sup>

(1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043; 2. 轨道交通工程信息化国家重点实验室, 陕西 西安 710043; 3. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048; 4. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 5. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

**摘要:** 为探究西安地区黄土地层新建基坑开挖对邻近既有地铁车站的影响规律, 依托西安某新建基坑实际工程, 借助 MIDAS GTS NX 有限元软件建立了基坑与既有车站结构三维数值模型, 研究新建基坑开挖全过程中围护结构变形与内力、既有地铁车站位移与周边地表沉降的响应规律, 将模拟结果与实测结果对比验证其准确性。结果表明: 基坑开挖过程中, 围护结构位移较小, 钢管内支撑可以有效控制围护结构的变形; 既有车站最大侧向位移、竖向位移均出现于车站中间部位, 侧向变形曲线呈典型的“内凸型”, 竖直方向表现为沉降变形, 变形增长速率随着基坑开挖深度的增加有所减小; 车站周边地表沉降随基坑开挖逐渐增大, 至基坑开挖结束, 最大沉降值为 -8.63 mm; 数值模拟结果与现场监测数据规律一致且偏差较小, 开挖完成后围护结构的最大位移为 7.20 mm, 既有车站侧墙中间部位的最大水平位移为 1.18 mm, 基坑施工风险较低, 基坑卸载对临近既有地铁车站影响较小。

**关键词:** 黄土地层; 深基坑; 数值模拟; 围护结构内力与变形; 既有车站变形

**中图分类号:** U451      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1006-4710(2022)04-0577-11

## Numerical simulation study on influence of foundation pit unloading near adjacent subway station

WANG Lixin<sup>1,2,3</sup>, WANG Qiang<sup>4</sup>, LI Binglong<sup>4</sup>, XUE Xunqiang<sup>5</sup>, XU Shuoshuo<sup>4</sup>, FAN Feifei<sup>4</sup>

(1. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China;

2. State Key Laboratory of Rail Transit Engineering Information (FSDI), Xi'an 710043, China;

3. Faculty of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

4. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 5. Shanghai Municipal

Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to explore the influence of the excavation of the new foundation pit on the adjacent existing subway stations in the loess stratum of Xi'an, relying on the actual project of a new foundation pit in Xi'an, the three-dimensional numerical model of the foundation pit and the existing station structure was established with the help of the MIDAS GTS NX finite element software; the new foundation pit was studied during the whole excavation process, the deformation and internal force of the enclosure structure, the displacement of the existing subway station and the response law of the surrounding surface subsidence were compared with the finite element calculation results, with the measured results verifying the accuracy of the numerical simulation. The results show that: during the excavation of the foundation pit, the displacement of the envelope structure is small, and the inner support of the steel pipe can effectively control the deformation of the envelope structure; the maximum lateral displacement and vertical displacement of the existing station both occur in the middle of the station, the lateral deformation curve is a typical "

收稿日期: 2021-08-17; 网络出版日期: 2022-06-14

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.n.20220610.1404.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52078421); 陕西省“特支计划”青年拔尖人才(陕组通字[2018]33号); 铁一院科技研究开发计划(19-42-01)

通信作者: 王立新, 男, 博士, 教授, 博导, 正高级工程师, 研究方向为隧道与地下工程。E-mail: 458601714@qq.com

inward convex shape", the vertical direction shows settlement deformation, and the deformation growth rate gradually decreases with the increase of the excavation depth of the foundation pit; surface settlement around the station increases gradually with the excavation of the foundation pit, and when the excavation of the foundation pit ends, the maximum settlement value is  $-8.63$  mm; the numerical simulation results are consistent with the on-site monitoring data, and the deviation is small, the maximum displacement of the enclosure structure is  $7.20$  mm after the excavation is completed, and the maximum horizontal displacement of the middle part of the existing station side wall is  $1.18$  mm. The risk of foundation pit construction is lower, and the unloading of the foundation pit has little impact on the adjacent existing subway stations.

**Key words:** loess stratum; deep foundation pit; numerical simulation; internal force and deformation of retaining structure; deformation of existing station

进入 21 世纪以来,我国城市基础设施建设发展迅速,城市建设用地面积锐减,城市地下空间的开发利用已经成为我国城市基础建设的重要组成部分。针对城市交通拥堵问题,地铁在缓解客运交通压力方面效果显著<sup>[1-3]</sup>。由于我国公共用地日益紧张,使得目前众多新建工程不得不与既有地铁站近接施工。而新建工程施工势必会导致大量土体开挖卸荷,破坏本区域原有的应力平衡,使周围土体产生移动,进而引起邻近既有车站结构变形<sup>[4-6]</sup>,由于地铁车站结构的重要性,地铁车站对于自身变形有着严格的管控标准,从而对邻近基坑工程施工提出了更高的技术要求。因此对于邻近地铁站深基坑施工,保障既有地铁站安全运营是目前工程界亟待解决的工程难题。

针对基坑开挖对既有车站的响应规律,国内外学者以数值模拟和现场监测等手段开展了系统研究。张爱民等<sup>[7]</sup>依托南昌某新建基坑工程探讨了不同基坑开挖工序对既有车站结构变形的影响;章润红等<sup>[8]</sup>通过数值模拟,研究了基坑开挖卸荷作用下,邻近地铁隧道的埋深、隧道和基坑地连墙的距离及刚度比等关键因素对地铁结构附加弯矩和附加位移的影响;殷一弘<sup>[9]</sup>通过现场实测验证了设置隔离桩和轴力补偿钢措施可有效控制深基坑开挖对侧方地铁结构的影响;江智鹏<sup>[10]</sup>采用有限元软件对苏州地铁一号线星海街站基坑工程建立了数值计算模型,发现基坑对称开挖对既有地铁站结构的影响较小;王志杰等<sup>[11]</sup>结合板壳理论、数值模拟和现场实测,探究了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;王立新等<sup>[12]</sup>以实际工程为例,采用数值模拟手段,分析了新建基坑开挖对既有车站、既有隧道的影响。上述研究中,关于基坑开挖对既有车站结构的响应规律虽大致相同,但由于区域差异,不同工况下基坑开挖对既有地铁站的响应规律不尽相同,因此还有待进一步深入

研究。

鉴于此,为获得西安地区黄土地层新建基坑开挖对邻近既有地铁车站的力学响应规律,以西安某地铁站旁新建基坑为依托工程,建立新建基坑与既有地铁站三维数值模型,总结了基坑不同开挖步骤下围护结构内力与变形、既有地铁站变形、周边地表沉降的响应规律,并与实际监测数据进行对比,研究新建基坑对既有车站的影响,相关研究成果可为提升黄土地层地铁站减灾防灾能力提供参考。

## 1 工程概况

### 1.1 新建基坑与既有地铁站相对位置关系

本文所依托的工程为西安市某基坑工程,基坑与已运营的既有地铁站近接施工,平面位置如图 1 所示。

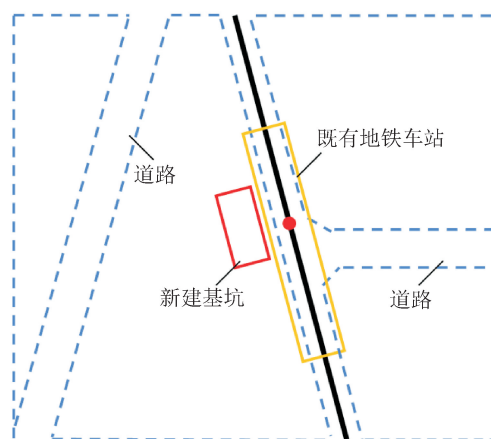


图 1 新建基坑与既有车站平面位置关系

Fig. 1 Plane position relationship between the new foundation pit and the existing station

新建基坑总体呈南北走向,开挖长度为  $60$  m,开挖宽度为  $25$  m,开挖深度为  $23$  m,新建基坑围护结构与既有车站围护结构在水平方向的最小距离仅为  $2.4$  m。既有车站长  $160$  m,为三层结构,最宽处

约为 25 m,顶板埋深为 3.4 m,车站底板埋深为 23 m。车站顶板、中板、底板厚度不一,分别为 800 mm、400 mm、1 000 mm,侧墙厚 900 mm。

### 1.2 工程地质条件

新建基坑位于交叉路口旁,交通密集,周边建筑物较多。根据施工场地钻探勘测报告可知,地层从上到下分别为全新统人工填土( $Q_1^{ml}$ )、上更新统风积新黄土( $Q_3^{eol}$ )、残积古土壤( $Q_3^{cl}$ )、中更新统风积黄土( $Q_2^{eol}$ )、残积古土壤( $Q_2^{cl}$ )。

### 1.3 围护结构形式

围护结构形式的选择是保证基坑施工安全的关键因素。参考黄土地层以往的成功案例,结合基坑工程所处环境条件,采用钻孔灌注桩和内支撑作为新建基坑的围护结构。由于新建基坑工程支护结构距既有车站围护结构的净距仅有 2.4 m,故在紧邻既有车站一侧采取加强措施,即利用既有地铁车站基坑的围护桩( $\Phi 1200@1600$  mm,长 35 m)作为后桩,选用对周围环境影响较小的钻孔灌注桩( $\Phi 1200@1600$  mm,长 33 m)作为前桩,前后桩采用高 800 mm、宽 1 200 mm 的连梁进行连接,组成双排桩,双排桩净距为 2.4 m,桩间采用袖阀管注浆进行加固。基坑其他三面则采用  $\Phi 1200@1600$  mm 钻孔灌注桩支护,钻孔灌注桩嵌固深度为 10 m。整个基坑采用壁厚为 16 mm 的  $\Phi 800$  钢管作为内支撑,典型剖面如图 2 所示。

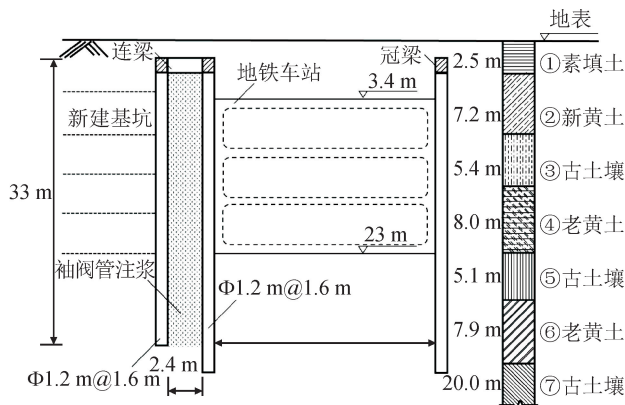


图 2 基坑工程与既有地铁车站典型横剖面图  
Fig. 2 Typical cross section of foundation pit project and existing subway station

## 2 安全控制标准

基坑内土体开挖卸荷,导致基坑邻域内土体应力重分布而产生位移,将基坑开挖对周边土体的扰动区域划分为可能影响区、次要影响区、主要影响区<sup>[13-14]</sup>。新建基坑工程扰动区域简图如图 3 所示,扰动分区如表 1 所示,其中  $H$  为基坑设计深度。

在本基坑工程中,考虑到新建基坑与既有地铁车站的水平距离仅有 2.4 m,为确保基坑开挖过程中,地铁车站结构的安全与正常运营,全面结合国内有关地铁深基坑规范标准和相关工程,同时借鉴西安地区黄土地层地铁建设的相关经验<sup>[13-15]</sup>,确定新建基坑、既有地铁车站施工变形安全控制值如表 2 所示。

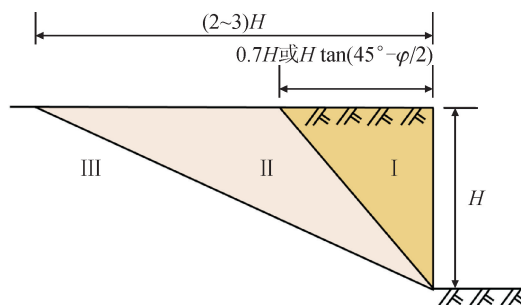


图 3 新建基坑工程扰动区域简图  
Fig. 3 Schematic diagram of disturbed area of new foundation pit engineering

表 1 基坑工程周边土体扰动分区

Tab. 1 Zoning of soil disturbance around foundation pit engineering

| 基坑工程影响区域   | 范围   |
|------------|--|
| 主要影响区(I)   | 基坑周边 $0.7H$ 或 $H \tan(45^\circ - \varphi/2)$ 范围内                                   |
| 次要影响区(II)  | 基坑周边 $0.7H \sim (2 \sim 3)H$ 或 $H \tan(45^\circ - \varphi/2) \sim (2 \sim 3)H$ 范围内 |
| 可能影响区(III) | 基坑周边 $(2 \sim 3)H$ 范围外   |

表 2 各结构施工变形安全控制值  
Tab. 2 Safety control value of construction deformation of each structure

| 主要监测项目 |          | 控制值/mm |
|--------|----------|--------|
| 新建基坑   | 周边地表沉降   | 15     |
|        | 围护结构侧向位移 | 15     |
|        | 围护结构竖向位移 | 10     |
| 既有地铁车站 | 车站结构竖向位移 | 10     |
|        | 车站结构侧向位移 | 10     |

## 3 三维有限元模型的建立

### 3.1 工程地质条件

#### 3.1.1 模型尺寸

采用有限元软件 MIDAS GTS NX 建立新建基坑及既有车站结构三维数值模型。根据圣维南原理,充分考虑基坑施工对基坑周边的影响范围,为消除边界效应影响并考虑模型单元数量和计算精

度<sup>[15-16]</sup>,扰动范围取基坑开挖尺寸的 3 倍,结合基坑开挖尺寸,最终确定整个模型的尺寸为:长 200 m (Y 方向),宽 160 m (X 方向),高 95 m (Z 方向),共计 440 693 个单元,594 339 个节点,整体模型如图 4 所示。基坑的内支撑及圈梁模型如图 5 所示。

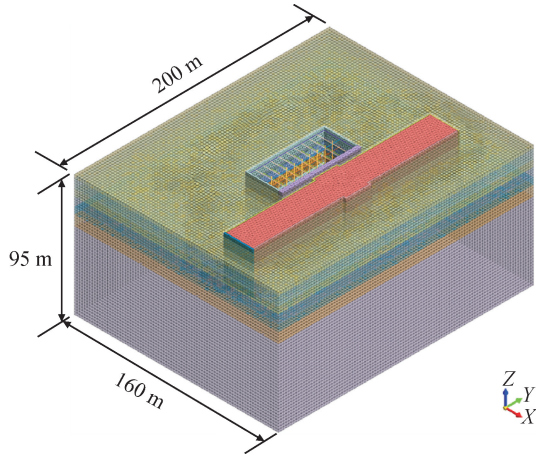


图 4 整体模型  
Fig. 4 Overall model

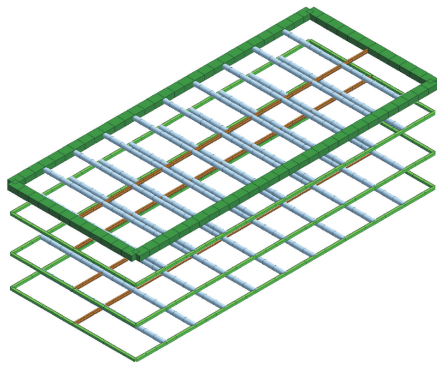


图 5 基坑内支撑及圈梁  
Fig. 5 Inner support and ring beam of the foundation pit

模型土体采用 3D 实体单元进行模拟,采用修正的摩尔-库伦本构模型。基坑冠梁、钻孔灌注桩及双排桩根据间距与截面尺寸用具有等效厚度的 3D

实体单元进行模拟,车站结构采用 2D 板单元模拟,钢管内支撑、格构柱、连梁、圈梁采用 1D 梁单元模拟,采用线弹性本构模型。在模型四周施加法向的边界约束,在模型底部施加竖向约束,模型上部设置为自由边界。

3.1.2 模型计算参数

模型中涉及的土层物理力学参数以及围护结构、新建基坑工程和既有车站的结构参数均参考地质勘探报告,并结合以往工程设计经验来确定。双排桩及由袖阀管加固过的地层可根据桩及加固土体的弹性模量,折减为有限元模型中 3D 实体单元的整体弹性模量。具体数值如表 3、表 4 所示。

表 3 车站及支护结构物理力学参数  
Tab. 3 Physical and mechanical parameters of stations and supporting structures

| 材料名称  | 截面参数/mm            | $E_c$ /MPa         | $\mu$ | $\gamma$ /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ) |
|-------|--------------------|--------------------|-------|---|
| 排桩支护  | 厚 700              | $3.15 \times 10^4$ | 0.2   | 25  |
| 双排桩支护 | 厚 2 600            | $2.00 \times 10^4$ | 0.12  | 21  |
| 冠梁    | 1 600×1 000        | $3.15 \times 10^4$ | 0.2   | 25  |
| 钢支撑   | Φ800,壁厚 16         | $2.00 \times 10^5$ | 0.28  | 78  |
| 钢围檩   | 2×45C              | $2.00 \times 10^5$ | 0.28  | 78  |
| 连梁    | H 型钢 500×300×11×18 | $2.00 \times 10^5$ | 0.28  | 78  |
| 钢格构柱  | H 型钢 500×300×11×18 | $2.00 \times 10^5$ | 0.28  | 78  |
| 抗拔桩   | Φ1 200             | $3.00 \times 10^4$ | 0.2   | 25  |
| 车站顶板  | 厚 800              | $3.15 \times 10^4$ | 0.2   | 25  |
| 车站中板  | 厚 400              | $3.15 \times 10^4$ | 0.2   | 25  |
| 车站底板  | 厚 1 000            | $3.15 \times 10^4$ | 0.2   | 25  |
| 车站侧墙  | 厚 800              | $3.15 \times 10^4$ | 0.2   | 25  |
| 车站柱   | Φ1 000             | $3.00 \times 10^4$ | 0.2   | 25  |
| 车站梁   | 1 000×1 800        | $3.15 \times 10^4$ | 0.2   | 25  |

注:  $E_c$ 、 $\mu$ 、 $\gamma$  分别为线弹性模量、泊松比、天然重度。

表 4 土体物理力学参数

Tab. 4 Physical and mechanical parameters of soil

| 土层名称 | $\gamma$ /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | $c$ /( $\text{kPa}$ ) | $\varphi$ /( $^\circ$ ) | $E_{\text{0ed}}^{\text{ref}}$ /( $\text{kPa}$ ) | $E_{50}^{\text{ref}}$ /( $\text{kPa}$ ) | $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ /( $\text{kPa}$ ) | $\mu$ | $K_0$ | $H$ /m |
|------|---|-----------------------|-------------------------|---|---|--|-------|-------|--------|
| ①素填土 | 17.8  | 8                     | 18.5                    | 7 600   | 7 600                                   | 22 800   | 0.3   | 0.42  | 2.5    |
| ②新黄土 | 16.9  | 24                    | 22.5                    | 15 000  | 15 000                                  | 45 000   | 0.28  | 0.38  | 7.2    |
| ③古土壤 | 19.7  | 21                    | 24                      | 13 000  | 13 000                                  | 39 000   | 0.32  | 0.47  | 5.4    |
| ④老黄土 | 19.8  | 28                    | 23                      | 18 000  | 18 000                                  | 54 000   | 0.33  | 0.49  | 7      |
| ⑤古土壤 | 19.7  | 21                    | 24                      | 13 000  | 13 000                                  | 39 000   | 0.32  | 0.47  | 5.1    |
| ⑥老黄土 | 19.8  | 28                    | 23                      | 18 000  | 18 000                                  | 54 000   | 0.33  | 0.49  | 7.9    |
| ⑦古土壤 | 19.6  | 22                    | 23                      | 14 000  | 14 000                                  | 42 000   | 0.33  | 0.47  | >20    |

注: $c$ 、 $\varphi$ 、 $K_0$  分别为黏聚力、内摩擦角、侧压力系数;  $E_{\text{0ed}}^{\text{ref}}$ 、 $E_{50}^{\text{ref}}$ 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$  分别为主固结仪加载中的切线刚度、标准三轴试验中的割线刚度、弹性卸载再加载时的弹性模量。

### 3.2 计算工况设计

为得到各阶段的基坑位移以及施工中支护结构的位移变形云图,需要根据实际情况进行计算工况设计。

由于新建基坑开挖时,地铁车站已经存在,因此对既有地铁车站的施工不做详细模拟,且不考虑车站施工对土层的扰动,即在初始地应力分析后,将车站单元激活,并进行位移清零。

模型计算时,先对模型土体进行初始地应力分析,然后进行车站的激活并位移清零。基坑的开挖步序:基坑开挖前施作排桩围护结构、格构柱,然后进行土层开挖,每层开挖完成后,及时施作钢管内支撑、连梁、圈梁,以保证基坑不产生较大的变形,直至开挖至基坑底部。

计算分析步序如表 5 所示。

表 5 计算分析步序  
Tab. 5 Calculation and analysis steps

| 序号 | 工况     | 实施过程               |
|----|--------|--------------------|
| 1  | 初始应力平衡 | 初始地应力分析,位移清零       |
| 2  | 地铁车站施工 | 激活地铁车站,位移清零        |
| 3  | 排桩施工   | 激活钻孔灌注桩、格构柱单元      |
| 4  | 开挖 1   | 开挖至-3m,激活第 1 道钢支撑  |
| 5  | 开挖 2   | 开挖至-9m,激活第 2 道钢支撑  |
| 6  | 开挖 3   | 开挖至-16m,激活第 3 道钢支撑 |
| 7  | 开挖 4   | 开挖至-21m,激活第 4 道钢支撑 |
| 8  | 开挖 5   | 开挖至-23 m           |

此外,本工程中的黄土均不具有湿陷性,对于黄土或其它特殊土在有限元中的模拟,主要通过修正其物理力学参数来实现。

近年来出现了很多以局部施工监测数据为基础,反演计算得出土层物理力学参数的方法<sup>[17-18]</sup>。在本地区同类型研究中,基于神经网络进行土体参数反演分析,将反演结果运用到由 MIDAS GTS NX 有限元软件建立的模型中,模拟全工况下隧道结构的变形预测值。

结果表明,西安地区黄土地层数值模拟选用修正莫尔-库伦本构模型进行计算时,各参数可按照  $E_{\text{uf}}^{\text{ref}}$  取压缩模量  $E_s$  的 7.2 倍,应力水平相关幂指数  $m$  取 0.62,侧压力系数  $K_0$  取地勘资料的 1.15 倍进行修正较为适用。

## 4 数值计算结果分析

### 4.1 基坑围护结构变形分析

由于基坑采用钻孔灌注桩和钢管内支撑作为围护结构,故重点关注围护结构的变形情况。图 6 为新建基坑开挖过程中基坑围护结构侧向位移变化云图,图 7 为围护结构的变形曲线。

由图 6 可知,基坑开挖过程中,最大侧向位移主要集中于围护结构的中间部位,而两侧位移较小,这是因为围护结构两端有另一排桩作为支撑,而中部支撑较弱。随着基坑逐步开挖,最大侧向位移产生部位下移,墙体顶部与底部的位移相对较小。

为进一步研究基坑开挖过程中基坑围护结构侧向位移的变化,选取基坑围护结构远离车站的长边和与其相邻的一侧短边作为测试断面,提取不同深度处的侧向位移值。

由图 7 可知,围护结构 X 向与 Y 向的变形曲线总体上呈“内凸型”分布,长边排桩在 X 方向的最大位移为 7.41 mm(正值表示向基坑内侧发生变形),最大变形大约位于墙深 15 m 位置处,短边排桩在 Y 方向的最大位移为 8.79 mm,同样,最大变形大约位于墙深 15 m 位置处,约为 0.65H,这是由于随基坑开挖深度的增加,坑内外土压力差逐渐增大,当基坑开挖至底部时,围护结构达到变形峰值所致。并且,长边排桩在 X 方向的变形随基坑开挖缓慢增加,而 Y 方向的变形在第二次、第三次开挖后快速增长,Y 方向的最大变形大于 X 方向的最大变形,这主要是因为本模型为便于计算,在基坑开挖时仅对 X 方向施加了内支撑,对 Y 方向未施加内支撑,但两者的最大变形均满足安全控制标准。因此,实际基坑开挖过程中,在对长边墙加设支撑的同时,应加强对短边墙的变形监测。

此外,由图 6 可知,紧邻地铁车站一侧由于采用了加强支护,在开挖深度为-3 m、-9 m、-16 m、-21 m 及 -23 m 时,变形值分别为 0.40 mm、1.88 mm、4.22 mm、6.27 mm 及 6.69 mm,其变形值较远离车站一侧的 0.44 mm、2.18 mm、4.68 mm、6.95 mm 及 7.42 mm,平均减小了 10.5%。因此,双排桩加强支护对基坑的变形抑制效果显著。

### 4.2 基坑围护结构内力分析

图 8(a)~(d)给出了基坑第 2~5 次开挖过程中内支撑的轴力变化云图。计算结果显示,在五次开挖过程中,内支撑的轴力均为负值(见表 6),这是由于基坑开挖过程中,地下连续墙向基坑内产生变形而挤压内支撑,内支撑受压从而表现为负值。

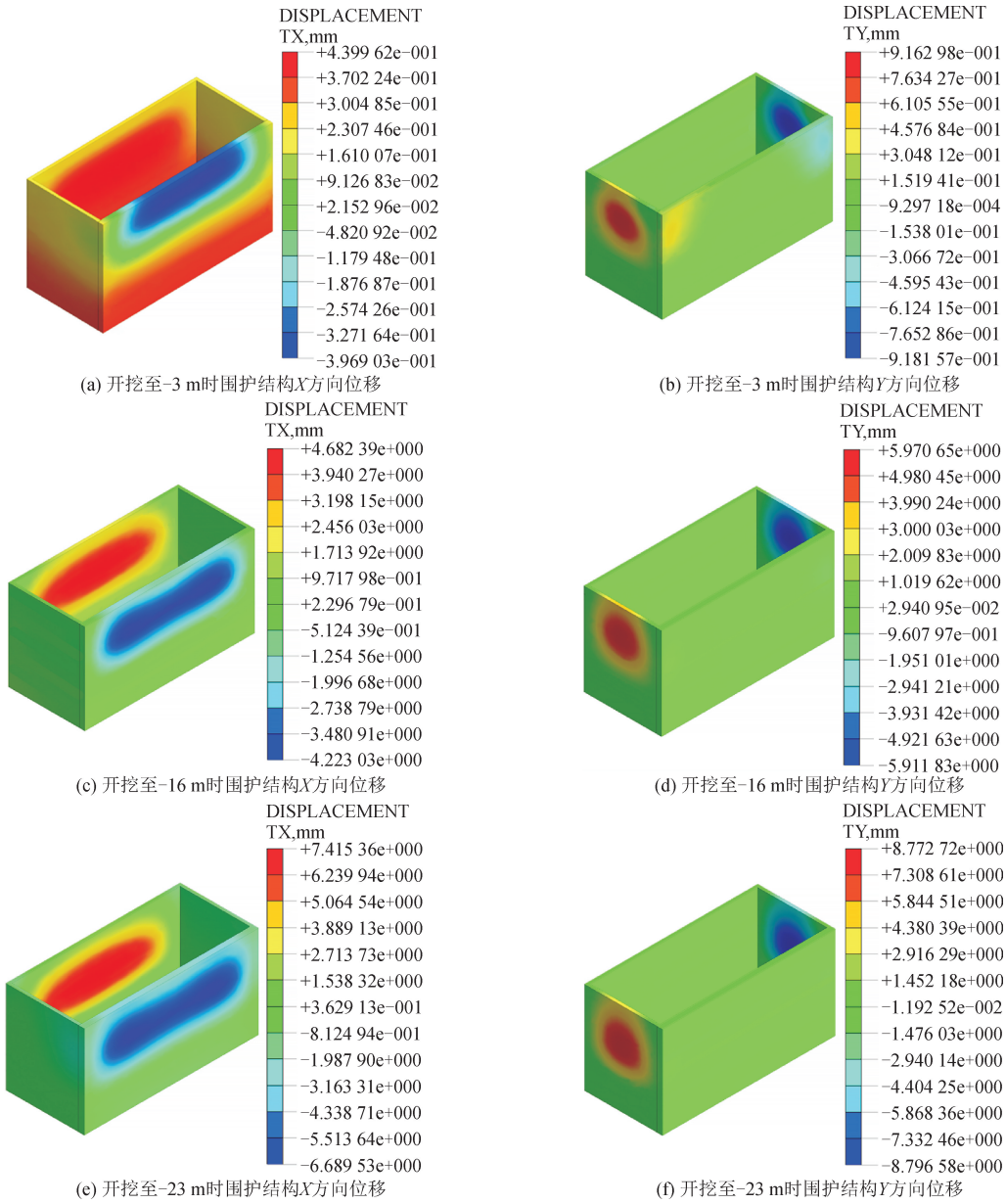


图 6 不同开挖步序下围护结构侧向变形云图

Fig. 6 Cloud map for lateral deformation of enclosure structure under different excavation steps

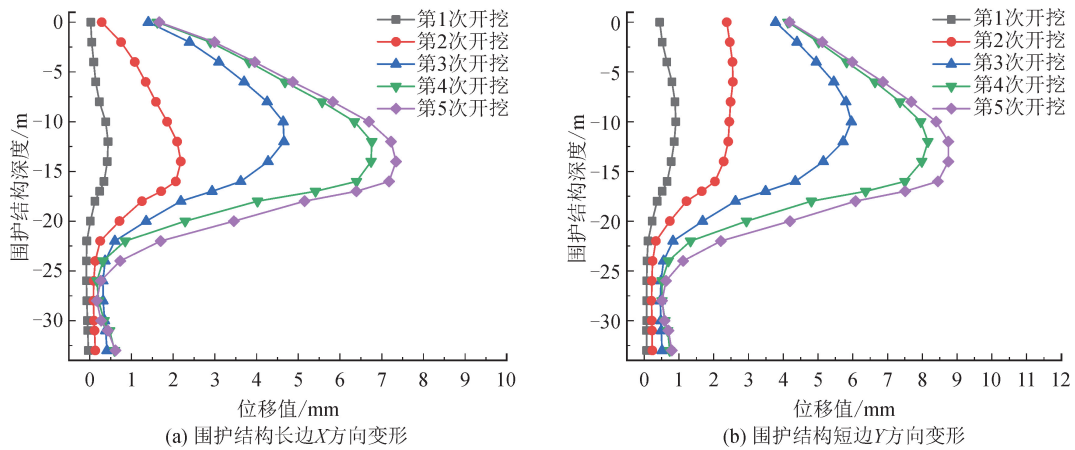


图 7 地下连续墙侧向位移变化曲线图

Fig. 7 Curve of lateral displacement of underground diaphragm wall

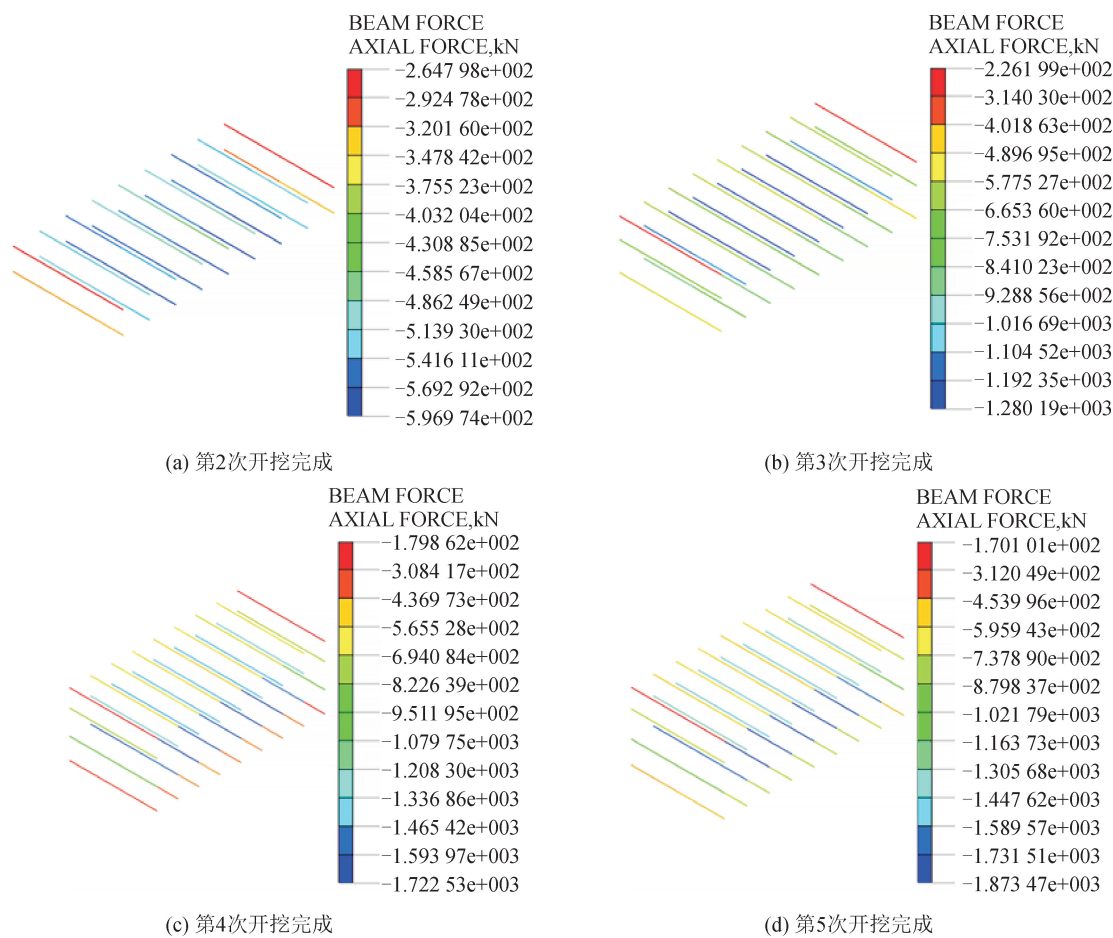


图 8 钢管内支撑轴力变化云图

Fig. 8 Cloud diagram of axial force change in steel pipe

表 6 内支撑轴力值

Tab. 6 Axial force value of inner support

| 内支撑 | 轴力/kN       |             |              |              |              |
|-----|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
|     | 第 1 次<br>开挖 | 第 2 次<br>开挖 | 第 3 次<br>开挖  | 第 4 次<br>开挖  | 第 5 次<br>开挖  |
| 第一道 | -224.714 4  | -488.870 1  | -564.459 5   | -542.477 3   | -539.648 6   |
| 第二道 |             | -596.974 2  | -1 280.188 9 | -1 457.684 2 | -1 479.678 7 |
| 第三道 |             |             | -880.456 1   | -1 722.529 2 | -1 873.469 8 |
| 第四道 |             |             |              | -366.199 7   | -760.868 4   |

为研究内支撑在控制基坑围护结构变形上所发挥的作用,选取基坑内典型的内支撑作为研究对象,提取其轴力值。结果表明,随基坑逐步开挖,内支撑的轴力总体呈增长趋势,即施加内支撑后,围护结构向基坑内变形而挤压内支撑,内支撑对控制基坑围护结构的变形作用明显。并且,当后一道支撑施作后,前一道支撑的轴力增长速率有所减小,这是因为新架支撑分担了一部分侧向压力。当基坑第 4、5 次开挖时,第一道支撑的轴力有所减小,这可能是因为随着基坑的开挖,基坑围护结构的最大侧向位移向

下移动,下部支撑承受了更大的侧向压力,从而减小了第一道支撑的压力。在整个基坑开挖过程中,第一、二、三、四道内支撑的最大轴力值分别为 -564.460 kN、-1 479.679 kN、-1 873.470 kN、-760.868 kN,均小于钢管内支撑的临界力,满足规范要求。

#### 4.3 既有车站变形分析

基坑开挖后,既有车站产生侧向位移,选取既有车站靠近基坑的一侧作为测试断面,沿车站埋置深度和长度方向分别提取横向位移及竖向位移,如图

9 所示。既有车站侧墙的横向变形如图 10 所示,图中正值表示向基坑方向产生位移。

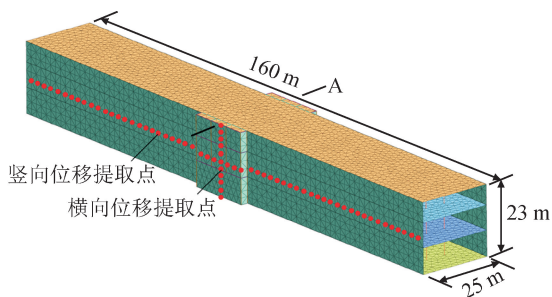


图 9 侧墙及地表位移提取点

Fig. 9 Side wall and surface displacement extraction points

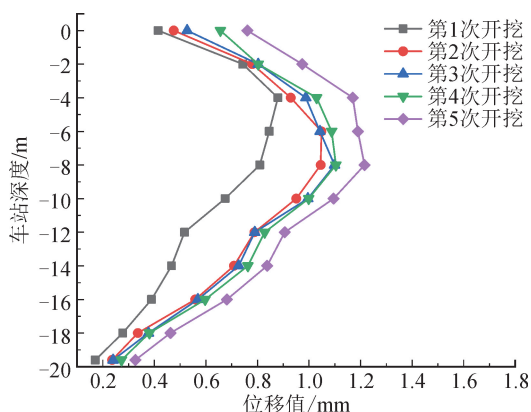


图 10 侧墙横向变形曲线图

Fig. 10 Lateral deformation curve of side wall

由图 10 可知,既有地铁车站顶板部位的横向位移随基坑开挖不断增大,至第 5 次开挖结束时最大值为 0.76 mm。并且,既有车站侧墙的横向位移随车站埋深总体上呈先增大后减小的趋势,为典型的“内凸型”曲线。第 1 次开挖结束后,车站侧墙的最大侧向位移位于 -4 m 处,最大值为 0.88 mm;第 2 次开挖完成后,最大位移值的位置下移至 -6.5 m 处,最大值为 1.05 mm,相比第 1 次开挖,增幅达 19.3%;第 3 次开挖完成后,最大位移值的位置继续下移至 -8 m 处,最大值为 1.10 mm,相比第 2 次开挖,增幅为 4.8%,最大位移较第 2 次开挖后增长减缓,且第 2 次、第 3 次、第 4 次开挖后,侧墙侧向变形曲线有多处重合,侧向位移变形较小,这可能是由于车站本身刚度和受到的约束较大,使得新建基坑土体开挖对车站结构的侧向位移影响较小。

为研究基坑开挖过程中车站结构竖向位移的变化,于车站近基坑侧墙体深度 10 m 处,沿长度方向每隔 4 m 提取墙体竖向位移值,如图 9 所示,竖向位移变化曲线如图 11 所示。

由图 11 可知,随基坑逐步开挖,车站侧墙在 Z 方向的位移均为负值,即产生向下的沉降位移,并且

随基坑开挖深度的增加,沉降逐渐增大。基坑开挖后,最大沉降发生在墙体中间部位,墙体两侧的沉降值较小,呈现由中间向两边递减的趋势,这是因为新建基坑位于车站中部,基坑土体的开挖对侧墙中间部位的影响最大。第 1、2 次开挖后变形最大值分别为 -0.99 mm 和 -1.62 mm;随基坑继续开挖,墙体持续发生沉降变形,至第 3 次开挖至 -16 m 时,最大沉降为 -2.45 mm,较第 2 次开挖后增加了 51.2%;第 4、5 次开挖后最大沉降值分别为 -3.04 mm 和 -3.25 mm,增幅减缓,变形值均小于变形控制标准。

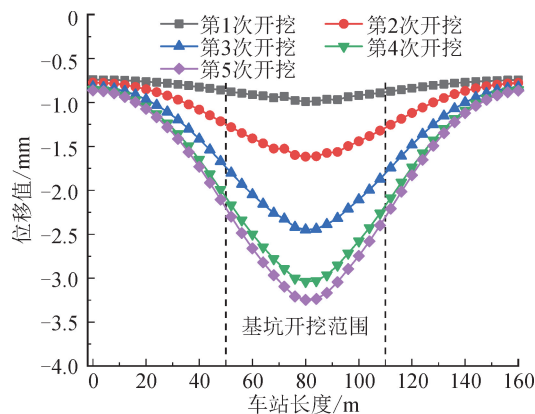


图 11 近基坑侧墙竖向位移变化

Fig. 11 Vertical displacement change of side wall near the foundation pit

综上所述,既有地铁车站的最大侧向位移和最大竖向位移均发生在车站中间部位。紧邻新建基坑一侧的中间部位作为站厅、站台的核心部位,具有一定的特殊性,因此,施工时应加强对该部位的监测,防止产生过大变形。

#### 4.4 地表沉降分析

新建基坑土体大范围卸荷,将会扰动基坑邻域地表土体产生沉降,故以基坑边缘为 X 轴原点,作既有车站 A 断面,如图 9 所示。作周邻地表随基坑开挖的沉降规律曲线,如图 12 所示。

由图 12 可知,邻近既有地铁车站的土体在基坑开挖后产生沉降变形,至第 5 次开挖结束,近基坑一侧的地表最大沉降值为 -8.63 mm,远基坑一侧的地表最大沉降值为 -6.90 mm。这是由于基坑内土体开挖卸荷对周边土体的影响程度随水平净距的增大而逐渐减小,即距离基坑越近的土体受影响越大。并且,当既有车站两侧土体沉降的同时,车站上方的土体也发生了沉降,最大沉降发生在近基坑既有车站边缘,最大值达到 -3.18 mm,这可能是由于既有车站相较于土体刚度更大,随着基坑内土体的开挖,周边土体向基坑方向移动,导致车站结构产生沉降,



车站上方的土体也随之发生沉降,但均小于控制值。

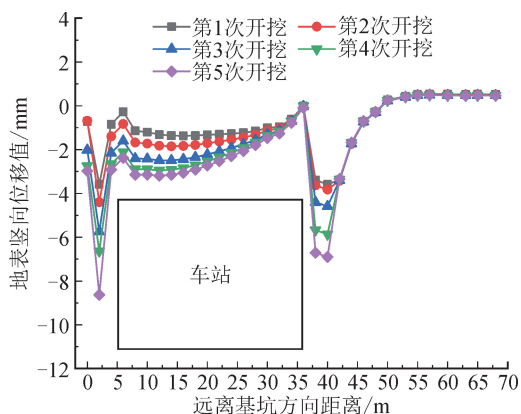


图 12 既有车站 A 断面地表沉降变化  
Fig. 12 Changes in surface settlement of section A of existing station

#### 4.5 方案优化及影响因素分析

为探究基坑及既有车站变形的影响因素,结合基坑的支护形式、开挖工序,优化既有车站的支护方法。同时,由于基坑远离车站的一侧周围无建筑物,具备施作锚杆的条件,故此增设有锚杆的工况进行分析。锚杆长 15 m,锚固长度 5 m,施加 160 kN 预应力。开挖深度和内支撑的施作位置不变,预应力锚杆共施作六道,分别位于 -2 m、-6 m、-10 m、-14 m、-18 m、-22 m 深度处,水平间隔 4 m。同时,基坑开挖完成后,对坑底以下 3 m 内古土壤进行地基加固。锚杆使用 MIDAS GTS NX 软件中的植入式桁架来模拟;地基加固则通过钝化和激活材料属性来实现。施作锚杆及数据提取点示意图如图 13 所示。计算完成后,提取基坑两个长边中间部位的 X 方向(水平方向)位移值与未施作锚杆工况进行对比,如图 14 所示。

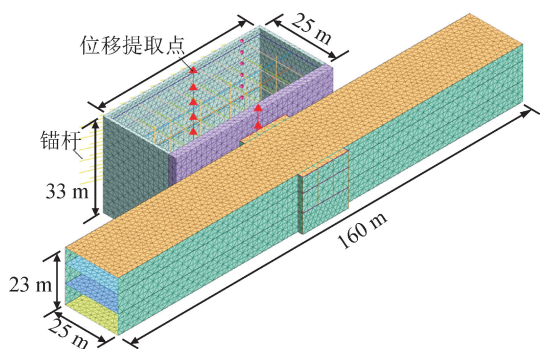


图 13 施作锚杆及位移提取点示意图  
Fig. 13 Schematic diagram of applying anchor and displacement extraction point

由图 14 可知,左侧曲线表示围护结构施作预应力锚杆的区域,右侧曲线表示围护结构采用双排桩加强支护的区域。在此工况下,远离基坑一侧施作

锚杆的围护结构随着开挖深度的增大,最大变形值分别为 0.35 mm、1.82 mm、4.09 mm、6.07 mm 和 6.90 mm,较未施作锚杆时平均减小了 10.2%;靠近基坑一侧施作双排桩的围护结构随着开挖深度的增大,最大变形值分别为 0.42 mm、2.07 mm、4.43 mm、6.43 mm 和 6.98 mm,较未施作锚杆时平均减小了 5.7%。结果表明,预应力锚杆和地基加固措施对减小基坑变形效果显著,且双排桩一侧的变形也有小幅减小。综上所述,在条件允许且预算充足的情况下,可以在原有支护结构的基础上施作预应力锚杆,在基坑开挖完成后进行地基加固,以减小基坑变形。

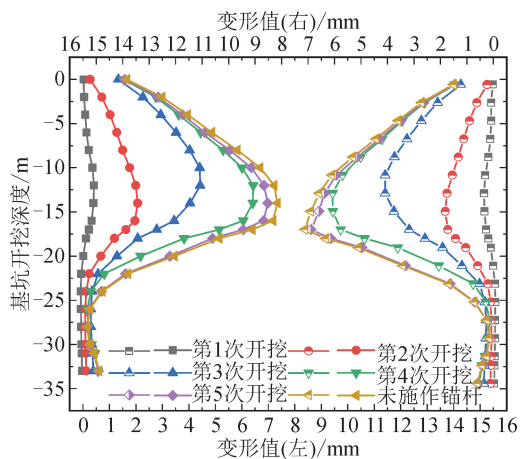


图 14 施作锚杆后基坑 X 方向变形值  
Fig. 14 Deformation value of foundation pit in X direction after bolting

根据不同工况的数值模拟结果,新建基坑对相邻既有地铁车站变形的影响因素主要有以下几个:①结合实际工况,在临近既有车站一侧加强支护措施可有效减小对车站变形的影响;②内支撑布置形式对基坑变形影响显著,在数值模拟中,为简化分析,仅在 X 方向设置了内支撑,导致 Y 方向变形大于 X 方向,因此,在工程建设时应关注这一点,必要时采取一定的措施,以保证施工过程中 Y 向变形可控;③在条件允许的情况下,增加预应力锚杆和对基坑进行地基加固,可进一步降低基坑变形和对既有车站的影响。

## 5 基坑与既有车站变形监测

### 5.1 现场监测布置

基坑施工现场采用钻孔灌注桩加钢管内支撑的维护方式,在临近既有车站一侧采用双排桩支护,未施作锚杆。为对基坑变形及地铁车站变形进行监控测量,在基坑的钻孔灌注桩中安装测斜管,同时,在既有车站临近基坑侧墙处布置水平位移监测点,如图 15 所示。

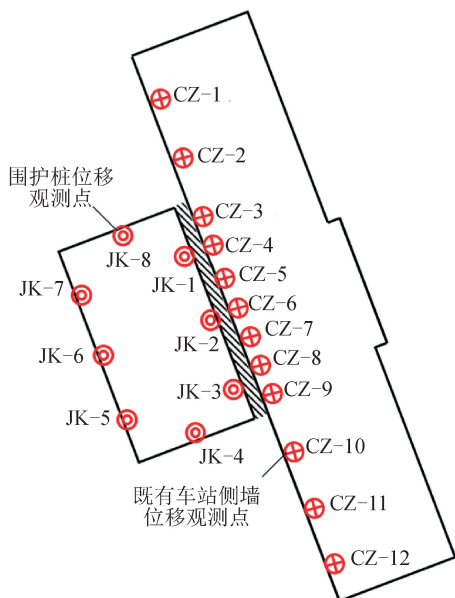


图 15 围护结构及既有车站位移关键监测位置  
Fig. 15 Key monitoring positions for displacement of enclosure structure and existing station

### 5.2 实测与数值模拟结果对比

基坑开挖完成后,为研究基坑变形情况,评估基坑风险性,选取基坑 JK-2、JK-4、JK-6 和 JK-8 位置的水平位移监测数据,并提取有限元模型中对应位置的计算结果,绘制水平位移变形曲线,如图 16 所示。

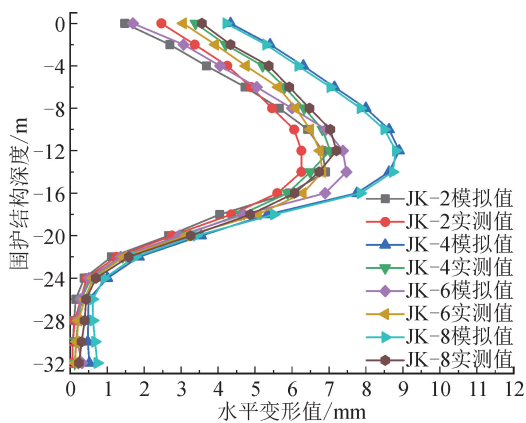


图 16 围护结构实测位移与数值模拟结果对比  
Fig. 16 Comparison between measured displacement and numerical simulation results of enclosure structure

由图 16 可知,基坑围护结构的水平位移实测值与数值模拟结果规律一致且偏差较小,基坑实际位移小于数值模拟结果。其中 JK-4 和 JK-8 数值模拟结果较大,这可能是由于模型中简化了 Y 向的内支撑所致,同时,模型中的基坑也没有设置角撑,从而导致短边的模拟结果比实测值大。基坑四个方向的最大实测位移分别为 6.26 mm、7.03 mm、

6.82 mm 和 7.20 mm,均小于安全控制标准,基坑整体稳定性良好、围护结构安全,基坑施工风险较低。

基坑开挖完成后,为研究既有车站的变形情况,选取既有车站侧墙 CZ-4、CZ-6 和 CZ-8 位置处的水平位移监测数据,并提取有限元模拟中对应工况对应位置的计算结果,绘制水平位移变形曲线,如图 17 所示。

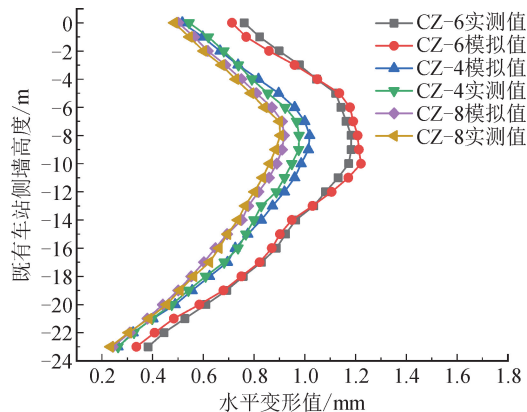


图 17 车站侧墙实测位移与数值模拟结果对比  
Fig. 17 Comparison between measured displacement and numerical simulation results of station side wall

由图 17 可知,既有车站侧墙的水平位移实测值与数值模拟结果规律一致且偏差较小,可认为数值模拟结果符合实际。既有车站侧墙中间部位的最大模拟值为 1.22 mm,而最大实测值为 1.18 mm。综上,选取的三条测线的实测值均小于模拟值,既有车站侧墙的最大水平位移符合控制标准,基坑卸载对临近既有地铁车站影响较小。

### 6 结论

依托西安某新建基坑工程,借助 MIDAS GTS NX 有限元软件建立了新建基坑与既有车站结构的三维数值模型,模拟了新建基坑开挖全过程中,围护结构变形与内力、既有地铁车站位移与周边地表沉降的响应规律。

1) 在依托工况的数值模拟中,围护结构的最大侧向位移发生在基坑中间部位,且沿中部向两侧递减。墙体在 X 方向的最大位移为 7.41 mm,在 Y 方向的最大位移为 8.79 mm。紧邻基坑一侧的围护结构由于采取了加强措施,其变形值较远离基坑一侧减小了 10.5%,因此,双排桩加强支护对于基坑的变形抑制效果显著。

2) 数值模拟结果表明,在基坑开挖过程中,钢管内支撑受到围护结构的挤压,随基坑开挖产生较大变化。由于后续支撑的施加,第一道支撑的轴力在基坑开挖后期有所减小,说明内支撑的施加可以

有效控制围护结构的变形。钢管内支撑的最大轴力为 $-1\ 873.469\ 8\ \text{kN}$ ,小于钢支撑的临界力,满足相关控制标准。

3) 既有车站横向位移变形曲线与基坑围护结构变形曲线相似,呈典型的“内凸型”。受基坑开挖的影响,车站侧墙在Z方向表现为沉降变形,车站结构沉降变形的增长率随基坑开挖深度的增加有所减小。最大侧向位移和最大竖向位移均出现于车站中间部位,因此,施工时应加强对该部位的监测,防止出现过大的变形。

4) 车站周边地表沉降随着基坑的开挖逐步增大,至第5次开挖结束,最大沉降值为 $-8.63\ \text{mm}$ 。车站上方土体也产生了沉降,最大沉降值为 $-3.18\ \text{mm}$ ,均小于安全控制值。

5) 现场监测数据表明,基坑围护结构各个方向的最大实测位移分别为 $6.26\ \text{mm}$ 、 $7.03\ \text{mm}$ 、 $6.82\ \text{mm}$ 和 $7.20\ \text{mm}$ ,均小于安全控制标准,基坑整体稳定性良好、围护结构安全,基坑施工风险较低;既有车站侧墙中间部位的最大实测值为 $1.18\ \text{mm}$ 。实测数据与模拟结果规律一致、相差较小,基坑卸载对临近既有地铁车站影响较小。

#### 参考文献:

- [1] 李涛,郑力蜚,高原,等.深基坑倒挂井壁法开挖对地层变形影响研究[J].西安理工大学学报,2020,36(2):245-250.  
LI Tao, ZHENG Lifei, GAO Yuan, et al. Study on the influence of deep foundation pit excavation by the method of inverted shaft wall on ground deformation[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2020, 36(2): 245-250.
- [2] 安伟博.基坑分段开挖下部盾构隧道纵向变形规律研究[J].铁道勘察,2021,47(1):104-109.  
AN Weibo. Study on the longitudinal deformation law of shield tunnel during the segmented excavations of foundation pit[J]. Railway Investigation and Surveying, 2021, 47(1): 104-109.
- [3] 聂浩,张康,鹿江,等.侧方基坑开挖对盾构隧道的影响研究[J].铁道勘察,2019,45(5):69-75.  
NIE Hao, ZHANG Kang, LU Jiang, et al. Study on the influence of foundation pit excavation on existing shield tunnel[J]. Railway Investigation and Surveying, 2019, 45(5): 69-75.
- [4] GU Xin, CHEN Fuyong, ZHANG Wengang, et al. Numerical investigation of pile responses induced by adjacent tunnel excavation in spatially variable clays[J]. Underground Space, 2022, 7(5): 911-927.
- [5] LI Yongqin, ZHANG Wengang, ZHANG Runhong. Numerical investigation on performance of braced excavation considering soil stress-induced anisotropy[J]. Acta Geotechnica, 2022, 17: 563-575.
- [6] 章润红,GOH Anthony,周廷强,等.考虑空间变异性的基坑降水支护开挖引起地面沉降的可靠度评估(英文)[J].土木与环境工程学报(中英文),2021,43(1):54-63.  
ZHANG Runhong, GOH Anthony, ZHOU Tingqiang, et al. Reliability assessment of excavation-induced ground surface settlement with groundwater drawdown considering spatial variability[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(1): 54-63.
- [7] 张爱民,王宁.大型建筑基坑施工对临近地铁车站的影响分析[J].城市轨道交通研究,2020,23(10):53-57.  
ZHANG Aimin, WANG Ning. Influence analysis of large building foundation pit construction on adjacent metro station[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(10): 53-57.
- [8] 章润红,刘汉龙,仇文岗.深基坑支护开挖对临近地铁隧道结构的影响分析研究[J].防灾减灾工程学报,2018,38(5):857-866.  
ZHANG Runhong, LIU Hanlong, ZHANG Wengang. Numerical investigation on tunnel responses induced by adjacent deep braced pit excavations[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(5): 857-866.
- [9] 殷一弘.深厚软土地层紧邻地铁深大基坑分区设计与实践[J].岩土工程学报,2019,41(S1):129-132.  
YIN Yihong. Design and practice of partitioning of deep large foundation pits close to subway in thick soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S1): 129-132.
- [10] 江智鹏.基坑开挖方式对轨道交通结构变形影响分析[J].铁道工程学报,2019,36(6):86-90.  
JIANG Zhipeng. Analysis of the effect of foundation pit excavation method on structure deformation of rail transit[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(6): 86-90.
- [11] 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.  
WANG Zhijie, ZHOU Feicong, ZHOU Ping, et al. Research on deformation theory of existing stations based on single side excavation and unloading of large foundation pits with strong close connection[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(10): 2131-2147.
- [12] 王立新,李储军,汪珂,等.黄土地区基坑近接施工变形控制标准数值模拟研究[J].铁道标准设计,2020,64(4):123-129.  
WANG Lixin, LI Chujun, WANG Ke, et al. Displacement analysis and control standards of foundation pit construction in loess area[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(4): 123-129.

(下转第602页)

注:①当桥臂电流大于零且投入子模块时(D1导通,T2关断),会产生 $E_{off}$ 的必要开关动作能量消耗;当桥臂电流大于零且切除子模块时(D1关断,T2导通),会产生 $E_{on} + E_{rec}$ 的必要开关动作能量消耗;当桥臂电流小于零且投入子模块时(D2关断,T1导通),会产生 $E_{on} + E_{rec}$ 的必要开关动作能量消耗;当桥臂电流小于零且切除子模块时(D2导通,T1关断),会产生 $E_{off}$ 的必要开关动作能量消耗;综上,根据表S1,本文选定的功率开关管动作时间为 $3.00\text{ s} \sim 3.02\text{ s}$ ,以上4种状态均包含其中;② $\rho$ 为投入子模块个数变化率的绝对值, $P_{ess}$ 为必要开关

损耗平均功率。

#### 4) 附加开关损耗

根据正文式(10)~式(12)计算可得基于离散度阈值均压策略的附加开关损耗为 $6\,826.67\text{ W}$ ,基于最大偏差量均压策略的附加开关损耗为 $7\,120\text{ W}$ 。

#### 5) 系统损耗

基于离散度阈值均压策略的系统损耗:

$$(P_{cond} + P_{ess} + P_{add}) \times 6 = 1447490.88\text{ W}$$

基于最大偏差量均压策略的系统损耗:

$$(P_{cond} + P_{ess} + P_{add}) \times 6 = 1449250.86\text{ W}$$

(责任编辑 周 蓓)

(上接第587页)

[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.城市轨道交通工程监测技术规范:GB 50911—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.

[14] 丁智,张霄,梁发云,等.软土基坑开挖对邻近既有隧道影响研究及展望[J].中国公路学报,2021,34(3):50-70.

DING Zhi, ZHANG Xiao, LIANG Fayun, et al. Research and prospects regarding the effect of foundation pit excavation on an adjacent existing tunnel in soft soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(3): 50-70.

[15] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑基坑支护技术规程:JGJ 120—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.

[16] 安慧,高勇强,郭世豪,等.明挖基坑紧邻既有地铁车站施工力学响应分析[J].现代隧道技术,2020,57(S1):513-520.

AN Hui, GAO Yongqiang, GUO Shihao. Mechanical response of an existing subway station due to an adja-

cent open-cut foundation pit construction[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(S1): 513-520.

[17] 赵俊杰,贾斌,张东,等.基于BP神经网络的阿拉套山隧道围岩物理力学参数反演分析[J].隧道建设(中英文),2019,39(S1):220-226.

ZHAO Junjie, JIA Bin, ZHANG Dong, et al. Inverse analysis of physical and mechanical parameters of Alataoshan tunnel surrounding rock based on BP neural network[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(S1): 220-226.

[18] 刘春梅,姜巍,宫亚峰,等.基于K-means改进RBF神经网络对深基坑变形分析及预测[J].隧道建设(中英文),2021,41(S2):246-254.

LIU Chunmei, JIANG Wei, GONG Yafeng, et al. Analysis and prediction of foundation pit deformation based on K-means improved radial basis function neural network[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(S2): 246-254.

(责任编辑 周 蓓)