

DOI: 10.7672/sgjs2025240034

# 深基坑开挖及场地回填对既有浅埋地铁区间的影响分析

王丁杰<sup>1</sup>, 程 涛<sup>2</sup>, 袁利军<sup>1</sup>, 晏克勤<sup>2</sup>, 周 伟<sup>1</sup>, 戚永峰<sup>1</sup>

(1. 中建三局集团有限公司, 湖北 武汉 430062; 2. 湖北理工学院, 湖北 黄石 435003)

[摘要] 以广州市某深基坑工程为研究背景, 通过数据模拟分析深基坑工程开挖、基坑回填过程及场地回填至设计标高后的三维动态工况, 分析施工及土方回填至设计标高过程中浅埋地铁区间隧道的变形发展过程, 确定其实施过程中地铁区间隧道的最大变形增量, 以此分析深基坑开挖及土方回填对下方地铁区间隧道变形的不利影响, 并评估地铁区间隧道的安全状态, 旨在为基坑支护设计合理性及施工方案优化提供实质性建议。

[关键词] 基坑; 地铁; 回填; 变形; 数值模拟; 影响分析

[中图分类号] TU753

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)24-0034-06

## Impact Analysis of Deep Foundation Excavation and Site Backfilling on the Existing Shallow Subway Intervals

WANG Dingjie<sup>1</sup>, CHENG Tao<sup>2</sup>, YUAN Lijun<sup>1</sup>, YAN Keqin<sup>2</sup>, ZHOU Wei<sup>1</sup>, QI Yongfeng<sup>1</sup>

(1. China Construction Third Engineering Bureau Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430062, China;

2. Hubei Polytechnic University, Huangshi, Hubei 435003, China)

**Abstract:** Taking a deep foundation excavation project in Guangzhou as research background, this paper analyzes the three-dimensional dynamic conditions during excavation of the deep foundation excavation, backfilling of the foundation excavation, and backfilling of the site to the design elevation through data simulation. It examines the deformation development process of the shallow subway interval tunnel during construction and backfilling to the design elevation, determines the maximum deformation increment of the subway interval tunnel in implementation process, and thereby this paper analyzes the adverse effects of deep foundation excavation and soil backfilling on the deformation of the subway interval tunnel below, and assesses the safety status of the subway interval tunnel. The aim is to provide substantive suggestions for the rationality of foundation excavation support design and optimization of construction schemes.

**Keywords:** foundation excavation; subways; backfilling; deformation; simulation; impact analysis

## 0 引言

随着我国城镇化水平不断提高, 城市地下空间被不断加大规模得以利用, 在已投入运营的地铁车站或地铁隧道区间附近甚至上、下方涌现出越来越多的基坑开挖工程<sup>[1]</sup>。在邻近地铁等公共交通的基坑支护工程, 不仅要满足基坑在开挖过程中的结构稳定性和安全性要求, 在土方开挖过程中, 还需注意避免因原土体平衡状态被破坏造成原有车站或隧道结构的应力重分布而产生较大的附加应力和变形。此时, 基坑支护工程施工中对既有交

通隧道的影响进行安全性评估尤为重要, 所以在一定程度上对既有地铁的安全性影响分析对满足新建基坑支护工程平稳地完成施工和原地铁隧道结构的安全运营具有重要的理论意义和工程价值。

国内外学者针对邻近地铁隧道区间的基坑支护工程对周边土体沉降及隧道变形影响等方面问题, 进行了一系列分析与研究, 并得出可实施性工程建议。其中, 学者针对基坑支护开挖类型、深度、距离等因素对地铁沉降的影响分析, 得出影响因素与地铁荷载的关系, 从而确定基坑支护类型及设计参数<sup>[2-3]</sup>。同时, 基于数值模拟分析方法得出基坑

开挖对地铁影响的位移、沉降、变形的特点,并得出预防地铁隧道变形的可行性措施和建议<sup>[4]</sup>。

以上是针对地铁隧道相对于基坑开挖深度较大,且所处地质情况稳定的条件下进行的研究分析。本文针对地铁埋深相对于基坑深度较小,且地铁隧道距离基坑边线近、地下水位丰富等因素对地铁的安全影响进行分析,通过数值模拟结果优化基坑支护设计方案和施工方案,并提出相对应的合理化建议和措施。

## 1 工程概况

### 1.1 工程简介

某项目南侧临近广汕路下穿的地铁 21 号线正线盾构区间,项目东侧临近九龙大道及下沉隧道。该项目基坑形状类似梯形,面积为 22 616m<sup>2</sup>,基坑深度约 9m,基坑采用中心岛+放坡支护形式(见图 1)。基坑回填后,后期还拟进行场地回填,以达到设计标高。



图 1 项目基坑位置

Fig. 1 Location of the project foundation excavation

广州地铁 21 号线出入场线自西南至东北方向斜穿该项目地块,基坑围护结构外边线与北侧地铁出入段线最近距离 12.3m,且斜穿区间的地铁埋深为 4~6m,该区间地铁埋深小于本项目基坑开挖深度,基坑工程在地铁区间上方开挖土体,将导致紧邻地铁区间隧道的受力和变形状态发生改变,从而诱发区间隧道发生不均匀变形,可能影响地铁区间隧道的正常使用,严重时甚至危及地铁区间隧道安全。因此,如何在出入段线土方开挖和回填的同时保障地铁隧道安全性是本工程的重难点。

地铁隧道与基坑支护结构位置关系如图 2 所示。

### 1.2 工程地质水文条件

该项目基坑深度范围内从上向下依次为:①填土层,②<sub>1</sub> 粉砂层,②<sub>2</sub> 粉质黏土层,②<sub>3</sub> 中砂层,②<sub>5</sub> 砂层,③<sub>1</sub> 砂质黏性土层,④<sub>1</sub> 全风化花岗岩层,④<sub>2</sub> 强风化花岗岩层,④<sub>3</sub> 中风化花岗岩层,④<sub>4</sub> 微风化花岗岩层。

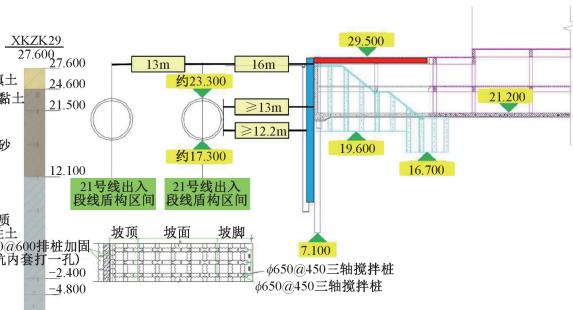


图 2 隧道与基坑支护结构位置关系

Fig. 2 Location relationship between the tunnel and foundation excavation support structure

根据区域水文地质资料,地下水主要有 3 层,分别为上层滞水、第四系孔隙水、基岩裂隙水。每年 4—9 月为本区雨季,大气降水丰沛,水位抬升,而在冬季因降水减少而地下水位随之下降,勘察场区地下水位动态变化一般为 2.70~4.80m。总体评价为,该场地地下水水量较大。

### 1.3 基坑设计方案

基坑拟采用中心岛+天然放坡支护方案,具体支护设计为,靠近地铁侧基坑边线采用中心岛支护,东侧基坑边线采用放坡+三轴搅拌桩止水帷幕支护;西北侧(距 21 号线出入段线 12.3m)、南侧(距 21 号线区间 31.3m)基坑及东北侧(距 21 号线出入段线 30m)基坑围护采用 800mm 厚地下连续墙,墙内外槽壁加固均采用三轴搅拌桩套打一孔,在施工中心岛前需留放坡土台反压(见图 3)。施工中心岛后,采用  $\phi 600 \times 16$  钢管支撑连接中心岛及地下连续墙,方可开挖剩余土台(见图 4)。坑中施工采用 FSP 拉森钢板桩+钢支撑支护形式。

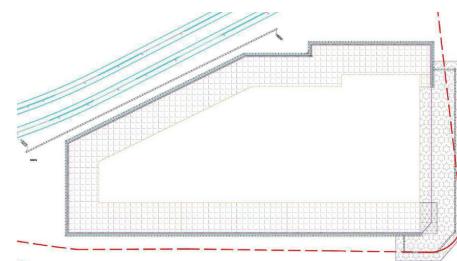


图 3 施工中心岛前留土台反压

Fig. 3 Back pressure of soil retaining platform before center island construction

此外,为对埋深较小的出入段线与基坑相邻位置进行针对性保护,基坑设计方案提出了保护方案,主要包含两部分:主动施工隔离加固搅拌桩(在基坑北侧地下连续墙外与出入段线区间设置 1 排  $\phi 850 @ 600\text{mm}$  三轴水泥土搅拌桩)及跟踪注浆(作

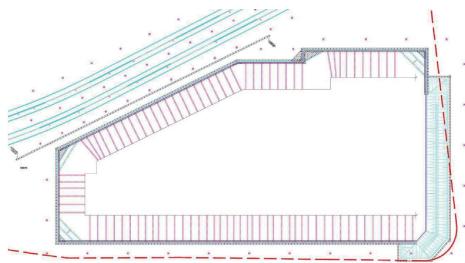


图 4 施工中心岛后钢支撑支护开挖至坑底

Fig. 4 Steel support excavation to the bottom of the pit after center island construction

为应急方案)。

## 2 基坑开挖及场地回填对盾构隧道影响三维模拟分析

### 2.1 三维数值模型及边界条件

根据项目基坑和出入段隧道结构的空间立体关系及基坑工程支护结构设计与基坑工程开挖特点,采用 MIDAS GTS NX 软件建立三维有限元计算模型。三维有限元计算模型的边界条件为:模型底部  $x, y, z$  方向位移约束,模型前、后面  $y$  方向约束,模型左、右面  $x$  方向约束(见图 5,6)。

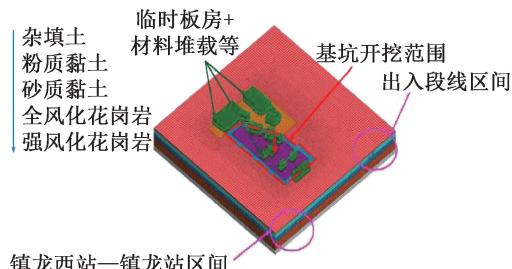


图 5 三维有限元整体模型

Fig. 5 The overall 3D finite element model

地下连续墙与出入段线间设置单排 6850@600 三轴搅拌桩隔离加固,该搅拌桩于地下连续墙施工前施工,注浆深度至地下连续墙槽壁加固的深度

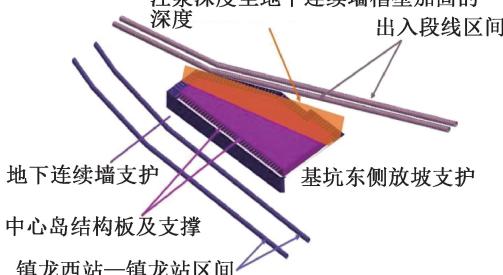


图 6 基坑与地铁隧道结构模型位置关系

Fig. 6 Location relationship between foundation excavation and structural model of the subway tunnel

### 2.2 材料参数选取及设定

三维模拟分析计算时充分结合本工程的地层分布特点合理选取计算参数,并根据地铁隧道附近的工程地质条件进行适当简化,主要有杂填土、粉质黏土、

砂质黏性土、全风化花岗岩、强风化花岗岩,其中土体及混凝土均为三维实体单元,其材料属性及单元属性根据详勘报告及规范标准选取,如表 1 所示。盾构隧道(管片厚度 300mm)、地下连续墙(厚度 800mm)选取为板单元,混凝土强度等级分别为 C50 和 C30;钢支撑选取为线单元;钢支撑选取为钢材。

表 1 三维数值模拟材料参数取值

Table 1 Material parameter values for three-dimensional numerical simulation

材料	重度 模型本构 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	黏聚力 $c/kPa$	内摩擦角 $\phi/^\circ$	变形模量 $E/MPa$	泊松比 $\mu$
素填土	莫尔-库仑	17.0	5	10	15
粉质黏土	莫尔-库仑	18.3	23	13	35
砂质黏土	莫尔-库仑	17.9	21	20	40
全风化花岗岩	莫尔-库仑	18.3	19	23	80
强风化花岗岩	莫尔-库仑	18.7	25	28	150
水泥土搅拌桩	莫尔-库仑	19.0	25	25	500
C50 混凝土	线弹性	25.0	—	—	34 500
C30 混凝土	线弹性	25.0	—	—	30 000
后期回填材料 (轻质混凝土)	线弹性	12.0	—	—	34 500

### 2.3 施工模拟分析

通过分析对基坑开挖、回填工况及基坑回填后的大范围回填等构建模型。基坑开挖及回填的主要工况为,初始应力场分析(S0),出入段线主动隔离开三轴搅拌桩加固(S1),临建荷载及材料堆载(S2),施作基坑围护结构(S3),桩基础施工(S4);坑中坑开挖至基底(S5),施作主体结构中心岛及钢支撑(S6),抽条开挖反压土一半(S7)及开挖剩余反压土至坑底(S8),基坑回填(S9)。场地后期回填的主要工况(考虑到回填区域、回填材料、回填高度等因素)为,出入段线上方 2 处管线处施工并回填,出入段线上方回填(S10,S11),基坑范围内大范围回填至设计标高(S12),如图 7 所示。

为保证设计方案合理及考虑施工过程中的突发应急情况,模拟工况增加关于后期启动跟踪注浆应急措施及降水情况对隧道的影响等,其具体工况如表 2 所示。

### 3 三维模拟结果与分析

#### 3.1 地铁出入段隧道影响模拟沉降结果分析

项目开挖全过程(不考虑假定工况)对出入段线的影响位移累计值最大分别为 1.77mm(水平位移  $T_x$ ),3.60mm(水平位移  $T_y$ ),8.75mm(竖向位移  $T_z$ ),8.78mm(总位移  $T$ )(见表 3)。

基坑开挖及远期场地回填过程中下方的镇龙站—镇龙北站出入段隧道竖向位移云图( $T_z$ )如图 8 所示。

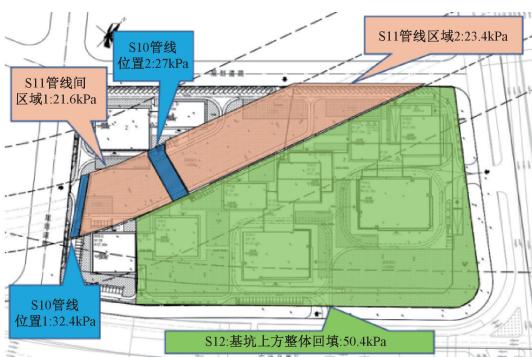


图 7 地铁站及基坑上方大面积回填后工况

Fig. 7 The condition after extensive backfilling above the subway station and the foundation excavation

### 3.2 地铁出入段既有隧道结构管片内力分析

根据模拟计算结果,开挖过程中地铁隧道结构内力影响最大的工况为开挖剩余反压土。其他结构部位内力变化小,选取该部位进行配筋及开裂

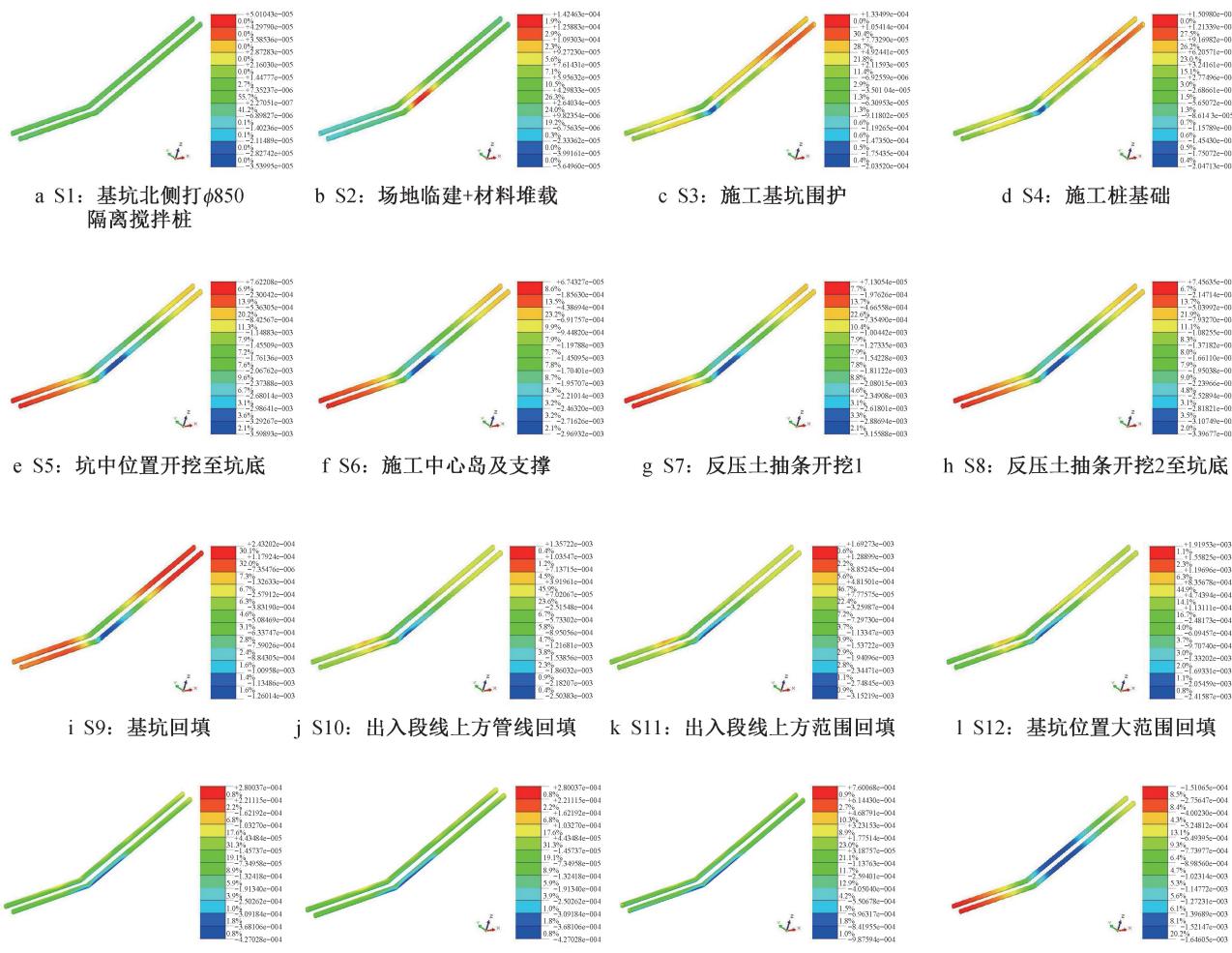


图 8 基坑开挖及远期回填过程诱发出入段隧道竖向位移云图(单位:m)

Fig. 8 Vertical displacement of the tunnel in the entrance and exit sections induced by excavation and long-term backfilling of the foundation excavation (unit:m)

验算。

开挖过程中,地铁隧道单位宽度侧墙单元最大弯矩  $M = 215.7 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ,如图 9 所示。根据地铁结构设计资料计算分析的结果,地震作用、人防作用均不对结构承载力起控制作用,本验算取值正常使用情况下荷载起控制作用计算配筋验算:单元截面宽度  $b = 1000\text{mm}$ ,高度  $h = 300\text{mm}$ ,弯矩设计值  $M$  取  $215.7 \times 1.4 \times 1.1 = 332.18 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ,C50 混凝土轴心抗压强度设计值  $f_c = 23.1 \text{ N/mm}^2$ ,C50 混凝土轴心抗拉强度设计值  $f_t = 1.89 \text{ N/mm}^2$ ,钢筋抗拉强度设计值  $f_y = 360 \text{ N/mm}^2$ 。

截面有效高度  $h_0$  为:

$$h_0 = h - a_s = 300 - 30 = 270\text{mm}$$

$$\alpha_s = \frac{M}{\alpha_i f_c b h_0^2} = 0.418$$

$$\xi = 1 - \sqrt{1 - 2\alpha_s} = 0.161$$

0.6% 0.1350e-004  
27.5% 0.0821e-005  
20.2% 0.2057e-005  
23.0% 0.40571e-005  
15.1% 0.7896e-006  
3.0% 0.8861e-005  
1.5% 0.5072e-005  
1.3% 0.6145e-005  
0.5% 0.15789e-004  
0.2% 0.4548e-004  
0.2% 0.5072e-004  
0.2% 0.4713e-004

0.6% 0.1350e-004  
27.5% 0.0821e-005  
20.2% 0.2057e-005  
23.0% 0.40571e-005  
15.1% 0.7896e-006  
3.0% 0.8861e-005  
1.5% 0.5072e-005  
1.3% 0.6145e-005  
0.5% 0.15789e-004  
0.2% 0.4548e-004  
0.2% 0.5072e-004  
0.2% 0.4713e-004

0.6% 0.1350e-004  
27.5% 0.0821e-005  
20.2% 0.2057e-005  
23.0% 0.40571e-005  
15.1% 0.7896e-006  
3.0% 0.8861e-005  
1.5% 0.5072e-005  
1.3% 0.6145e-005  
0.5% 0.15789e-004  
0.2% 0.4548e-004  
0.2% 0.5072e-004  
0.2% 0.4713e-004

0.6% 0.1350e-004  
27.5% 0.0821e-005  
20.2% 0.2057e-005  
23.0% 0.40571e-005  
15.1% 0.7896e-006  
3.0% 0.8861e-005  
1.5% 0.5072e-005  
1.3% 0.6145e-005  
0.5% 0.15789e-004  
0.2% 0.4548e-004  
0.2% 0.5072e-004  
0.2% 0.4713e-004

0.6% 0.1350e-004  
27.5% 0.0821e-005  
20.2% 0.2057e-005  
23.0% 0.40571e-005  
15.1% 0.7896e-006  
3.0% 0.8861e-005  
1.5% 0.5072e-005  
1.3% 0.6145e-005  
0.5% 0.15789e-004  
0.2% 0.4548e-004  
0.2% 0.5072e-004  
0.2% 0.4713e-004

0.6% 0.1350e-004  
27.5% 0.0821e-005  
20.2% 0.2057e-005  
23.0% 0.40571e-005  
15.1% 0.7896e-006  
3.0% 0.8861e-005  
1.5% 0.5072e-005  
1.3% 0.6145e-005  
0.5% 0.15789e-004  
0.2% 0.4548e-004  
0.2% 0.5072e-004  
0.2% 0.4713e-004

表 2 应急开挖工况

Table 2 Emergency excavation conditions

施工阶段	工况编号	工况描述
启动跟踪注浆开挖分析	S15	启动跟踪注浆+反压土抽条开挖
	S16	启动跟踪注浆+反压土抽条开挖至坑底
降水工况分析(假定)	S20	假定工况:降水 1m
	S21	假定工况:降水 2m
	S22	假定工况:降水 3m

表 3 出入段隧道位移

Table 3 Tunnel displacement in the entrance and exit sections

工况	总位移 $T$	水平位移 $T_x$	水平位移 $T_y$	竖向位移 $T_z$	mm
S0:初始状态	—	—	—	—	
S1:基坑北侧打 φ850 隔离搅拌桩	0.08	0.01	0.05	0.08	
S2:场地临建+材料堆载	0.16	0.08	0.14	0.13	
S3:施工基坑围护	0.32	0.07	0.20	0.26	
S4:施工桩基础	0.33	0.07	0.20	0.26	
S5:坑中位置开挖至坑底	4.00	1.77	3.60	0.35	
S6:施工中心岛及支撑	3.31	1.48	2.97	0.31	
S7:反压土抽条开挖 1	3.52	1.58	3.16	0.35	
S8:反压土抽条开挖 2 至坑底	3.80	1.70	3.40	0.53	
S9:基坑回填	1.43	0.57	1.26	0.49	
S10:出入段线管线回填	5.59	1.33	2.50	5.53	
S11:出入段线上方范围回填	8.78	1.70	3.15	8.75	
S12:基坑位置大范围回填	8.72	1.40	2.42	8.72	
S13:假定工况-降水 1m	1.84	0.32	0.43	1.82	
S14:假定工况-降水 2m	3.58	0.46	0.74	3.58	
S15:假定工况-降水 3m	5.01	0.67	0.99	5.00	
S16:假定工况-跟踪注浆+ 抽条开挖到坑底	1.78	0.90	1.65	0.26	

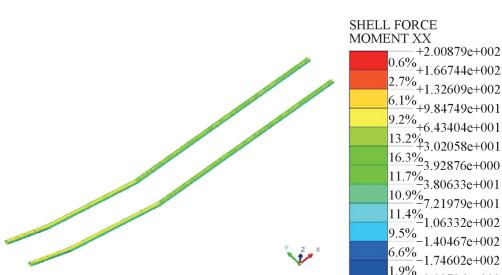


图 9 隧道结构管片弯矩最不利影响(单位:kN · m)

Fig. 9 The most unfavorable effect of bending moment on tunnel structure segments( unit : kN · m )

相应地,  $\gamma_s = 1 - 0.5\xi = 0.919$ ,  $\varepsilon < \varepsilon_b$ , 符合要求。其中,  $\gamma_s$  为内力臂系数,  $\xi$  为相对受压区高度,  $\varepsilon$  为受拉钢筋的应变,  $\varepsilon_b$  为受弯构件正截面受弯的界限相对受压区高度对应的受拉钢筋应变,  $\alpha_s$  为受弯构件正截面承载力计算中的一个系数,  $a_s$  为保护层厚度。

$$A_s = \frac{M}{h_0 \gamma_s f_y} = 2920 \text{ mm}^2$$

实际配筋为  $10\phi 20$ ,  $A_s = 3141 \text{ mm}^2$ , 配筋满足要求。

开裂验算如下。

根据设计参数,验算结构裂缝宽度。

$$f_{tk} = 2.64 \text{ N/mm}^2, \rho_{te} = 0.0203$$

$$\frac{d_{eq}}{\rho_{te}} = \frac{20}{0.0203} = 985.22$$

$$\sigma_s = \frac{M_q}{0.87 A_s h_0} = 360 \text{ N/mm}^2$$

$$\varphi = 1.1 - \frac{0.65 f_t}{\rho_{te} \sigma_s} = 0.866$$

$$\omega = a_{cr} \varphi \frac{\sigma_s}{E_s} \left( 1.9 c_s + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \right) =$$

$0.146 \text{ mm} < \omega_{lim} = 0.2 \text{ mm}$ (管片裂缝宽度控制值)式中: $c_s$  为最外层纵向受拉钢筋外边缘至受拉区底边的距离; $\sigma_s$  为按荷载准永久组合计算的钢筋混凝土构件纵向受拉普通钢筋应力或按标准组合计算的预应力混凝土构件纵向受拉钢筋等效应力; $f_{tk}$  为混凝土轴心抗拉强度标准值; $E_s$  为钢筋的弹性模量; $a_{cr}$  为构件受力特征系数; $d_{eq}$  为受拉区纵向钢筋的等效直径( $\text{mm}$ ); $\rho_{te}$  为按有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率; $\varphi$  为裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数; $\omega$  为裂缝宽度。

裂缝宽度未超出规范限制值。

### 3.3 地铁出入段隧道沉降对比及影响分析

结合现场实际施工进度、监测周期及设置监测位置的数据收集情况,选取特征监测点 R9-4(里程桩号 ZDK0+887),此监测点位于出入段线与基坑距离最近的结构环片上,从一定程度上能呈现实际监测数据特征(见图 10)。

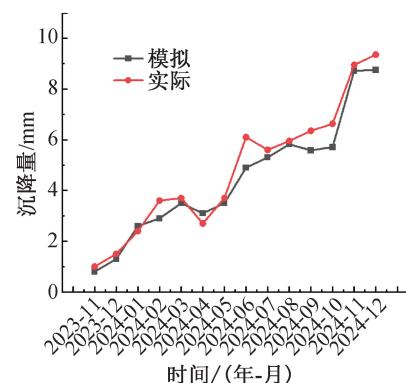


图 10 监测点 R9-4 模拟与实测数据对比

Fig. 10 Comparison of simulated and measured data at monitoring point R9-4

对比分析可知,实际数据与模拟数据分析从变化趋势上呈现一致性,排除施工过程中的干扰因

素,差异性较大的时间段为正值雨季时地铁上方积水等因素对地铁结构的附加应力等作用,整体表现出模拟数据与监测变化趋势的一致性及数据的相似性。

通过模拟基坑开挖对地铁出入段及区间隧道的影响,分析如下:由于地铁出入段隧道埋深较小,基坑开挖及场地回填等工况会导致隧道发生一定沉降,基坑开挖过程中整个隧道水平位移趋势为朝向基坑内侧<sup>[5]</sup>。

根据城市轨道交通既有结构安全控制值,既有隧道水平和竖向位移控制值为15mm<sup>[6]</sup>,整个基坑开挖过程中地铁区间隧道位移累计值均小于变形控制值,盾构裂缝宽度及结构受力小于规范及标准的限制值。因此,在基坑开挖及场地回填过程中,地铁区间隧道结构处于安全可控范围。

#### 4 结语

1)控制场地内尤其是在接近地铁出入段线区域的临时建筑、覆土材料堆场及行车荷载,建议超载≤20kPa<sup>[7]</sup>;同时,在后期回填中,严格按照设计方案进行“普通回填土+轻质回填土”施工工作。

2)为了降低地铁隧道沉降风险,本工程施工期间不建议采取任何大范围降水措施。当基坑周边水位下降1.5m时采用回灌方式补充地下水,结合基坑设计方案及三维模拟分析结果,建议基坑周边水位监测报警值采用2m。基坑开挖期间应做好相应防水措施,防止由于基坑开挖时坑内降水引起的坑外地铁隧道沉降加大。

3)由于基坑开挖深度较大,在开挖过程中应放慢开挖速度,严格遵循设计施工顺序施工,严禁超挖,基坑靠近周边结构的较近区域建议分块开挖,严格控制开挖范围,禁止一次开挖至基坑底,必要时在深基坑工程紧邻地铁隧道结构侧采取基坑内留土堆载反压预案,以降低深基坑土体开挖卸载诱发对地铁隧道结构的不利影响<sup>[8]</sup>。

4)基坑拆撑时,应注意拆撑时间和顺序,必须达到基坑设计要求的拆撑条件方可拆撑,并准备好相应的应急处理措施。

5)若发现基坑位移超过设计控制值,应立即停止开挖,及时进行基坑坑内反压回填,加强基坑监测频率,同时加强对盾构隧道监测频率,必要时采取注浆加固方式对地铁结构周边土体进行加固<sup>[9]</sup>。

6)建议开挖过程中加强对深基坑围护结构受力和水平侧向位移、基坑内支撑受力和地表沉降等的监控量测工作,以确保深基坑工程开挖安全<sup>[10]</sup>。

#### 参考文献:

[ 1 ] 陆海峰. 紧邻轨道交通复杂地下环境深基坑施工监理控制要

点[J]. 建设监理, 2022(5):38-41.

LU H F. Discussion on the key control points of the supervision of the deep foundation pit construction in complicated underground environment adjacent to the metro system [J]. Project management, 2022(5):38-41.

[ 2 ] 李家平. 基于MAS的城市轨道交通列车运行调整方法研究[D]. 北京:北京交通大学, 2008.

LI J P. Study on train operation adjustment method of urban rail transit based on MAS [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.

[ 3 ] 陈东杰. 上海铁路南站相邻基坑开挖变形影响研究[J]. 建筑科学, 2005, 21(6):59-63.

CHEN D J. Study on excavation displacement transformation of adjacent pits in Shanghai South Railway Station [J]. Building science, 2005, 21(6):59-63.

[ 4 ] 张勇. 邻近既有地铁隧道的深基坑施工安全风险评估与控制研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2017.

ZHANG Y. Study on safety risk assessment and control of deep foundation pit construction adjacent to existing subway [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.

[ 5 ] 吕秋玲, 明亮, 汪东林. 基坑开挖对临近地铁区间结构影响安全性评估[J]. 工程与建设, 2020, 34(5):886-890.

LÜ Q L, MING L, WANG D L. Safety assessment of the influence of foundation pit excavation on adjacent metro section structure [J]. Engineering and construction, 2020, 34(5):886-890.

[ 6 ] 广州地铁设计研究院有限公司. 城市轨道交通结构安全保护技术规范: CJ/T 202—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2013.

Guangzhou Metro Design and Research Institute Co., Ltd. Technical code for protection structures of urban rail transit: CJ/T 202—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.

[ 7 ] 交通运输部科学研究院. 城市轨道交通运营管理规范: GB/T 30012—2013[S]. 北京:人民交通出版社, 2013.

China Academy of Transportation Sciences. Regulations for operation management of urban rail transit: GB/T 30012—2013[S]. Beijing: China Communications Press, 2013.

[ 8 ] 常曼, 陆航. 基坑开挖对邻近地铁隧道结构的影响规律分析[J]. 西部交通科技, 2019(10):96-100, 169.

CHANG M, LU H. Analysis on the influence law of foundation pit excavation on adjacent subway tunnel structure [J]. Western China communications science & technology, 2019(10):96-100, 169.

[ 9 ] 刘晨, 张季超. 基坑开挖对下方地铁隧道结构影响的分析[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(S1):1390-1392, 1431.

LIU C, ZHANG J C. Influence of excavation of foundation pits on adjacent subway tunnels in the underground space [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2010, 6 (S1): 1390-1392, 1431.

[ 10 ] 秦长利. 城市轨道交通工程测量[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008.

QIN C L. Engineering survey of urban rail transit [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.