

## 济南地铁汽修厂站深大基坑拆撑过程的稳定性分析\*

赫德亮

(中铁十四局集团第四工程有限公司, 250002, 济南)

**摘要** [目的] 地铁站深大基坑在拆撑过程中容易失稳, 影响工程安全。故须针对地铁站深大基坑拆撑过程中的稳定性进行分析。[方法] 依托济南地铁汽修厂站深大基坑工程, 针对支撑轴力、地下连续墙变形和地面沉降, 采用现场监测与三维数值模拟相结合的方法, 研究深大基坑开挖拆撑期间的变形特性及力学响应动态演化规律。[结果及结论] 基坑开挖完成, 地下连续墙水平位移最大处深度为总开挖深度的0.7~0.8倍; 拆除底部钢支撑后, 地下连续墙的墙体变形速度加快, 第一道混凝土支撑的轴力值为稳定时轴力的4~6倍; 为保证施工安全, 应尽量减少无支撑时间; 基坑施工地面主要影响区域为地下连续墙后0~20 m范围, 应作为监测重点。现场监测结果验证了数值模拟的有效性。

**关键词** 地铁车站; 深大基坑; 支撑拆除; 稳定性分析

**中图分类号** TU433: TU94<sup>+2</sup>

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2024.06.038

### Stability Analysis of Jinan Qixiuchang Metro Station during the Foundation Pit Temporary Supports Dismantling

HE Deliang

(China Railway 14th Bureau Group 4th Engineering Co., Ltd., 250002, Jinan, China)

**Abstract** [Objective] It is prone to lose stability, affecting the engineering safety in the process of dismantling the supports for metro station deep and large foundation pit. Therefore, it is necessary to analyze the stability in the above process. [Method] Based on the deep and large foundation pit project of Jinan Qixiuchang Metro Station, on-site monitoring and three-dimensional numerical simulation are used to study the deformation characteristics and the dynamic evolution of mechanical response during deep and large foundation pit excavation and the supports dismantling, focusing on problems like supporting axial force, deformation of underground diaphragm wall and land subsidence. [Result & Conclusion] When the excavation is completed, the depth point where the underground diaphragm wall shows the maximum horizontal displacement is 0.7~0.8 times the total excavation depth. After the bottom steel support

is removed, the diaphragm wall deformation accelerates and the axial force of the first support increases by 4 to 6 times. In order to ensure the construction safety, the unsupported time should be reduced as short as possible. The main ground area affected by foundation pit construction ranges from 0 to 20 m, and should be the focus of monitoring. On-site monitoring results verify the effectiveness of the numerical simulation.

**Key words** metro station; deep and large foundation pit; supports dismantling; stability analysis

地铁车站深大基坑施工期间稳定性与周边建筑物的不均匀沉降密切相关<sup>[1]</sup>。在保证基坑快速、安全施工的同时, 要有效控制基坑支护结构变形, 减小由于基坑开挖给周围环境带来的影响, 是基坑施工过程中的一大难题。

目前, 已有诸多针对车站深大基坑支护结构轴力、深层水平位移变化及周边地面沉降的相关研究。文献[2]采用相似材料试验分析了不同工况下基坑支撑轴力变化规律和地下连续墙深层水平位移变化规律。文献[3]将现场监测和Plaxis2D有限元软件数值计算相结合, 分析了随基坑开挖周边地面沉降的变化规律。文献[4]对北京地区基坑案例进行统计分析, 对基坑开挖引起墙体最大侧移、侧移位置及影响因素等进行总结。文献[5]利用有限元软件对基坑开挖全过程的数值模拟, 证明其工程施工方法具有良好的控制基坑变形能力。基于现场测试, 与普通钢支撑段相比, 液压伺服钢支撑能减小围护结构变形量约20%<sup>[6]</sup>。文献[7]以苏州某基坑为背景, 结合当地实测数据, 分析苏州地区顺做法施工的大尺度基坑变形控制要点。基于模糊层次分析法, 构建深大基坑施工安全性能指标, 确定项目风险等级<sup>[6]</sup>。文献[8]通过建立不同围护结构条件下的基坑开挖模型, 对比分析了不同支护形式下的基坑开挖墙体变形和地面沉降形态。

现阶段关于基坑支撑轴力、围护结构变形规律

\* 国家重点研发计划资助项目(2018YFC0407006)

的研究,主要是针对基坑工程的开挖过程。对于顺作法施工基坑工程主体结构施工阶段,拆撑时期基坑支护结构支撑轴力和围护结构变形规律报道相对较少。

依托济南地铁汽修厂站(以下简称“汽修厂站”)深大基坑项目,针对基坑开挖完成后的拆撑阶段,研究地下连续墙的水平变形特性、支撑力学响应,以及顺作法拆撑施工对第一道支撑轴力和地下连续墙深层水平位移的影响。由于现场场地空间限制,地面沉降测点有限,采用 FLAC3D 三维有限差分数值模拟软件,开展深大基坑开挖过程数值模拟,对比数值计算结果与现场监测数据,研究基坑开挖对基坑周边地面沉降的影响,以期对现场施工和类似工程提供借鉴和参考意义。

## 1 工程背景

汽修厂站位于济泺路与泺口南路交叉口以南约 300 m 处,沿济泺路南北方向布置。根据规划方案,汽修厂站总长 299.3 m。车站底板埋深为 20.7 ~ 22.0 m,顶板覆土厚度最大值为 6.72 m。基坑形状接近矩形,属于一级深大基坑工程。

汽修厂站主体结构采用明挖顺作法施工。基坑支护结构采用地下连续墙+支撑的形式。其中围护结构为 153 幅 800 mm 厚的地下连续墙。在支撑中,第一道混凝土支撑是截面为 800 mm × 1 000

mm 的混凝土支撑,间距为 7.0 m;第一道钢支撑采用壁厚  $t = 16$  mm 的  $\phi 609$  mm 钢管支撑,间距为 3.5 m;第二、三道钢支撑采用  $t = 20$  mm 的  $\phi 800$  mm 钢管支撑,间距为 3.5 m。

汽修厂站地处冲积-冲洪积平原,施工场内地势相对平缓,高程为 23.81 ~ 24.51 m,高差约为 0.7 m。场地自上而下为杂填土①、砂质粉土②、黏质粉土③、粉质黏土③、粉质黏土④、粉质黏土⑤、粉质黏土⑥。

汽修厂站标准断面如图 1 所示。场地各土层的物理力学参数如表 1 所示。

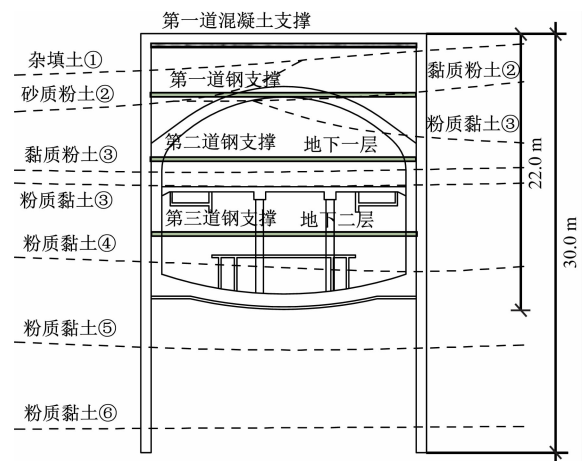


图 1 汽修厂站标准断面示意图

Fig. 1 Standard cross section of Qixiuchang Metro Station

表 1 土层物理力学参数表

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of strata

土层	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	重度/(kN/m <sup>3</sup> )	静止侧压力系数	分布深度/m
砂质粉土②	12.5	10.7	18.4	0.30	4.10 ~ 8.70
黏质粉土③	22.0	10.0	18.6	0.43	7.40 ~ 13.10
粉质黏土③	22.4	12.0	16.9	0.43	9.50 ~ 14.00
粉质黏土④	22.8	10.7	19.5	0.43	16.00 ~ 20.00
粉质黏土⑤	22.7	11.4	19.7	0.28	18.70 ~ 24.80
粉质黏土⑥	26.4	13.9	19.6	0.40	27.60 ~ 29.30

## 2 现场监测

### 2.1 布置方案

现场监测内容包括支撑轴力、地下连续墙变形和地面沉降。基于监测结果总结三项监测内容随拆撑过程的变化规律,以及施工给周围地面沉降带来影响。由于基坑较长,且几何形状及地层几乎对称,故为节省篇幅,仅选取南部半个基坑的典型测

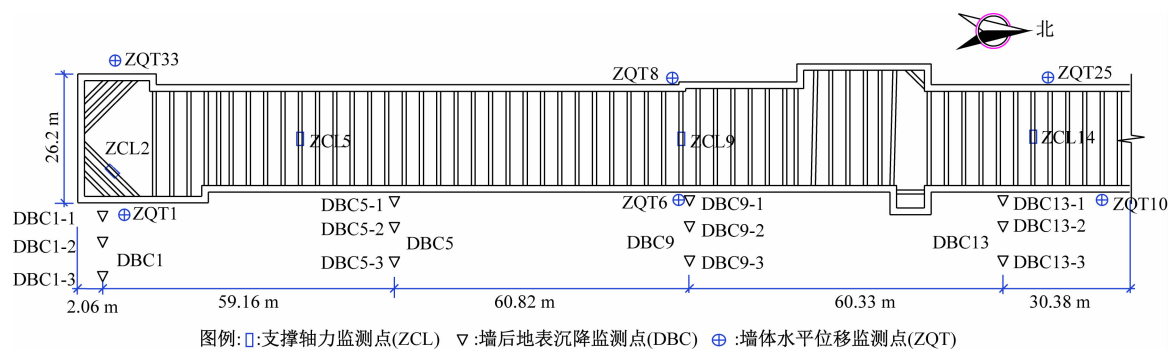
点进行监测。汽修厂站南部半个基坑的典型测点布置如图 2 所示。

### 2.2 现场监测结果

#### 2.2.1 支撑轴力

钢支撑与混凝土支撑的轴力,不仅能够反映支撑的承载状态,也能侧面反映出基坑的变形特性,是保证基坑安全施工的重要监测项目。

图 2 中的 4 组支撑轴力测点,在第一道混凝土



注:ZCL2—ZCL14 为支撑轴力测点组;ZQT1—ZQT 33 为地下连续墙的墙体水平位移测点组;DBC1—DBC13 为地面沉降测点组,DBC1 测点组中,地面沉降测点 DBC1-1、DBC1-2、DBC1-3 分别设于距离地下连续墙 3 m、7 m 和 15 m 处,余类同。

图2 汽修厂站南部半个基坑的典型测点布置

Fig. 2 Typical measuring point layout of half foundation pit in the south of Qixiuchang Metro Station

支撑安装完成后、基坑开挖前,开始进行支撑轴力监测。施工期间连续监测近 300 d,能够比较全面地反映拆撑过程中的轴力动态变化。其中,基坑南端部距 ZCL2 测点组 7.95 m,距 ZCL5 测点组

44.60 m,距 ZCL9 测点组 122.88 m,距 ZCL14 测点组 192.40 m。根据 4 组测点的监测数据,绘制拆撑过程中的支撑轴力变化曲线如图 3 所示。

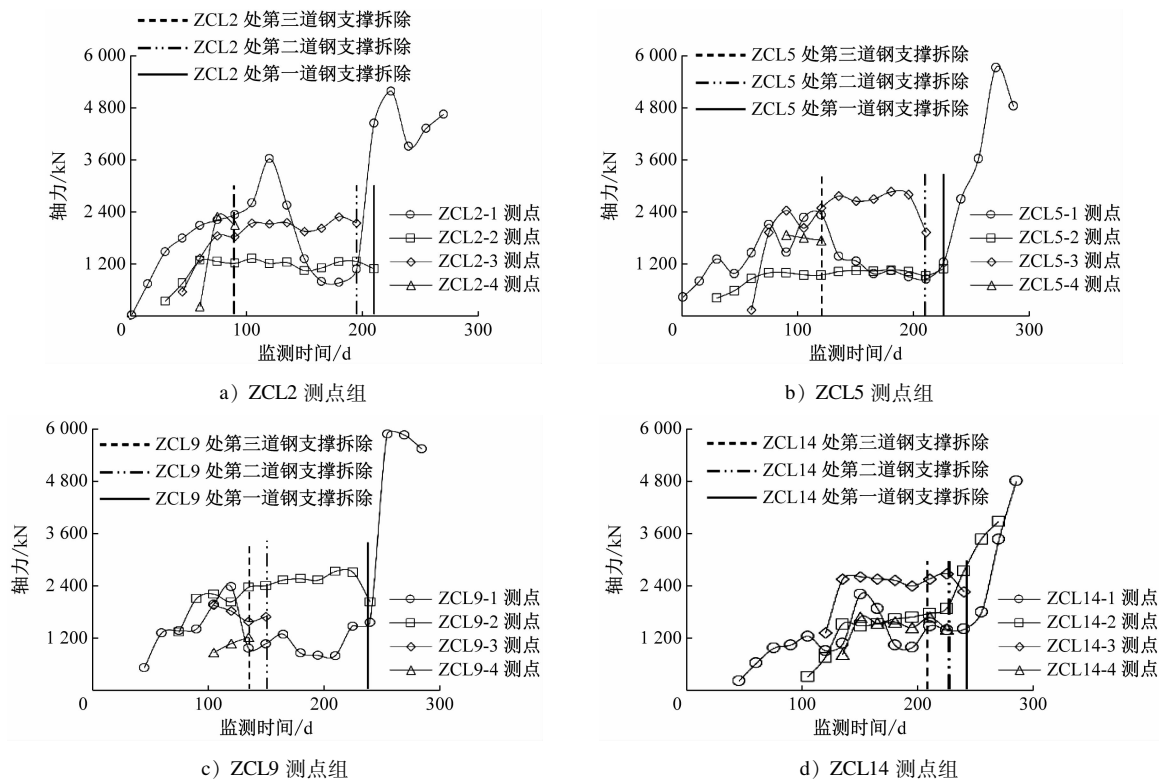


图3 拆撑过程中的支撑轴力变化曲线

Fig. 3 Curves of the support axial force changing in the support dismantling process

从图 3 可以看出:各支撑均在架设后短期内进入承载状态,并维持稳定;各测点处,第二道支撑轴力为 1 000 ~ 2 000 kN,第三道支撑轴力为 1 500 ~ 2 500 kN,第四道支撑轴力为 1 000 ~ 2 000 kN;其中第一道支撑的轴力上下波动较大,但总体仍在一

定范围内。经分析,由于第一道支撑临近地面,故施工过程中的杂物堆积及车辆停放会导致其上下波动。

从图 3 还可看出,支撑轴力大小与同组不同深度其他支撑的安装与拆卸有关:安装同组其他支撑

后,压力被分担,轴力减小;拆除同组其他支撑后,压力重新分配,未拆除支撑的轴力会变大。图3中可明显看出,各测点处第一道支撑在其他三道支撑拆除后,其轴力在短时间内由800~1 200 kN增至5 000~6 000 kN,增大了约4~6倍。

由此可见,在拆撑过程中要关注邻近支撑的轴力变化,及时监测轴力数据,以避免施工风险。基坑支护结构设计不仅要考虑基坑周围土压力情况,

还要考虑拆撑时剩余支撑的轴力变化。

### 2.2.2 地下连续墙的水平位移

地下连续墙水平位移可有效反映墙体变形情况,是衡量基坑稳定性的重要指标。

根据在基坑南侧端部附近的ZQT1测点组及ZQT33测点组监测数据,按不同施工阶段(开挖完成时、底板浇筑完成时及钢支撑拆除完成时)分别绘制地下连续墙墙体水平位移曲线,如图4所示。

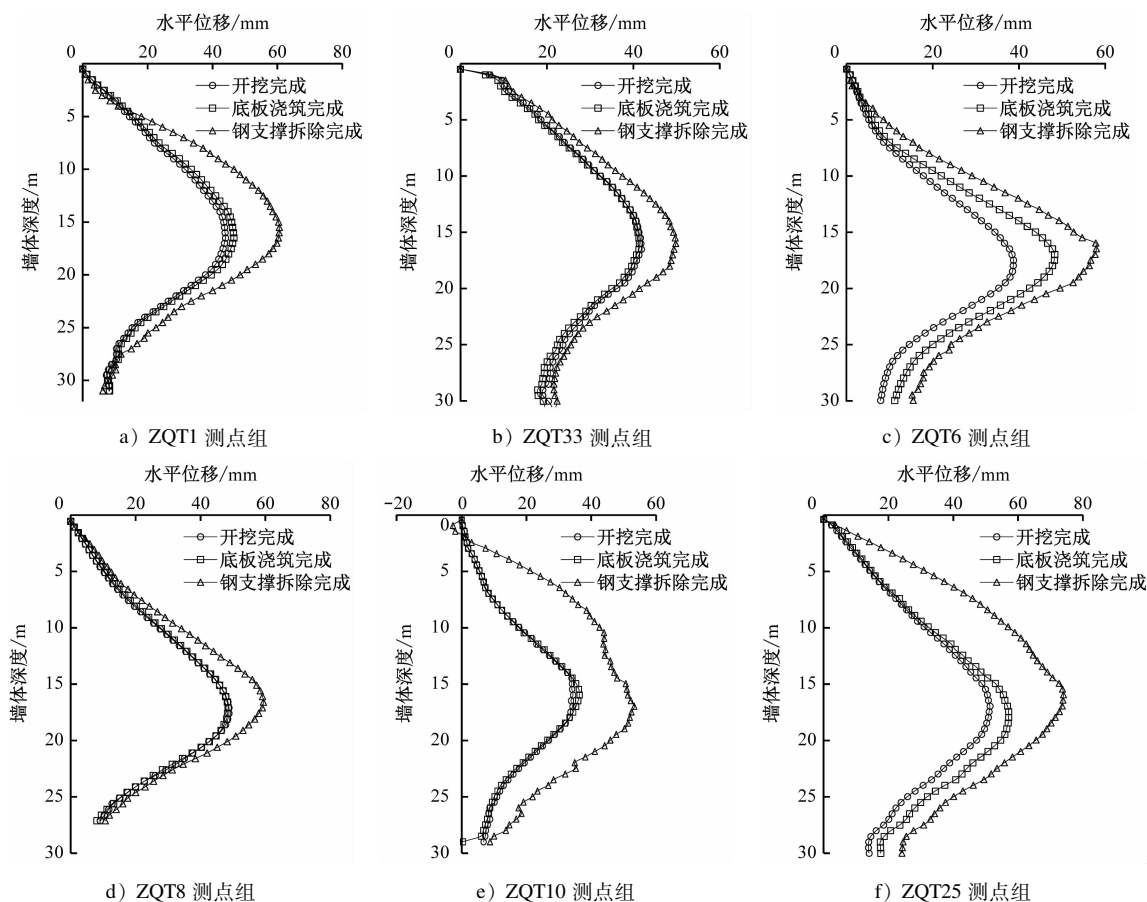


图4 地下连续墙的墙体水平位移曲线

Fig.4 Curves of the horizontal displacement of underground diaphragm wall

根据监测结果,统计各测点组在不同施工阶段的地下连续墙水平位移最大值 $d_{\max}$ 及最大变形处深度 $h$ ,如表2所示。

由表2可见:不同施工阶段的 $h$ 均为16~18 m,为基坑总开挖深度的0.7~0.8倍;基坑开挖完成时 $d_{\max}$ 与底板浇筑完成时 $d_{\max}$ 基本一致;在钢支撑拆除完成时,地下连续墙水平位移增量较大, $d_{\max}$ 增大约9~17 mm,是底板浇筑完成时 $d_{\max}$ 的1.2~1.3倍。这说明钢支撑起到了较好的控制效果,故在拆撑后的地下连续墙变形增大,若没有支撑则地

下连续墙的变形速度会更快。因此,为保证施工安全,要减少基坑无支撑暴露时间,在钢支撑拆除后,应及时浇筑中板与顶板,以控制地下连续墙的变形,保证施工安全。

## 3 深大基坑开挖过程的模拟分析

基坑开挖会引起基坑边地面沉降,进而影响周边建(构)筑物的安全,故须控制基坑开挖引起的地面沉降。研究基坑开挖引起的地面沉降变化规律,对控制地面沉降具有指导性意义。



表 2 各测点组在不同施工阶段的地下连续墙水平位移最大值及最大变形处深度

Tab. 2 Maximum horizontal displacement of the underground diaphragm wall and the depth at maximum deformation point from each group of measurement points at different construction stages

测点组	与基坑南侧 端部距离/m	$d_{\max}/\text{mm}$			$h/\text{m}$		
		开挖完成时	底板浇筑完成时	拆撑完成时	开挖完成时	底板浇筑完成时	拆撑完成时
ZQT1	9.54	44.00	46.55	60.57	16.50	16.50	15.50
ZQT33	7.30	41.80	41.31	49.74	16.50	16.00	16.00
ZQT6	122.05	38.56	48.04	57.71	17.50	17.00	16.50
ZQT8	121.60	48.73	48.47	59.38	17.00	17.00	16.55
ZQT10	207.28	34.20	36.21	53.04	16.00	16.00	17.00
ZQT25	196.51	51.38	57.17	74.11	17.00	17.50	16.00

受施工现场的空间条件限制,地面沉降的实际监测点布置范围有限。对此,本研究基于地面沉降的实际监测情况,采用 FLAC3D 三维有限差分软件建立数值模型来模拟基坑开挖过程,分析基坑开挖对地面沉降的影响范围,进而对汽修厂站深大基坑拆撑过程的稳定性作进一步分析。

3.1 建立数值模型

建立的汽修厂站基坑三维数值计算模型如图 5 所示。三维土层本构模型选择更适宜描述土体破坏变形特征的 HS( Plastic Hardening Soil) 模型<sup>[9]</sup>。基坑支护结构视为理想弹性体,采用弹性本构模型。其中,地下连续墙和钢筋混凝土采用实体单元,钢支撑采用梁单元(beam)模拟。由于本基坑尺寸较大,开挖深度较深,为全面反映基坑开挖给周围土体带来的影响,故深大基坑三维模型的计算区域为距基坑边缘 180 m 内的全部土体,三维模型尺

寸为 750 m(X 向) × 394 m(Y 向) × 80 m(Z 向)。

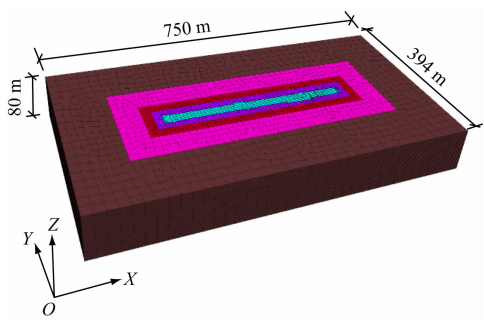


图 5 汽修厂站基坑三维数值计算模型

Fig. 5 Three-dimensional numerical model of Qixiuchang Metro Station foundation pit

考虑数值模拟实际情况,对相似力学参数的地层进行合并简化。简化后得到数值模拟的地层及围护结构物理力学参数分别如表 3 及表 4 所示。

表 3 数值模拟的地层物理力学参数

Tab. 3 Physical and mechanical parameters of strata from numerical simulation

地层	泊松比	密度/ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	弹性模量指数/ MPa	切线刚度/ MPa	固结系数	深度/m
粉质黏土	0.30	1 800	0.3	37	0.66	0 ~ 50
辉长岩	0.25	2 200	0.3	37	0.66	50 ~ 80

表 4 数值模拟的围护结构物理力学参数

Tab. 4 Physical and mechanical parameters of enclosure structure from numerical simulation

围护结构	弹性模量/GPa	泊松比	密度/( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
地下连续墙	24	0.2	2 500
格构柱	200	0.3	3 500
混凝土支撑	24	0.2	2 500
钢支撑	200	0.3	

数值计算边界条件:模型顶面采用自由边界条

件,其他面均约束法向方向。

开挖模拟计算过程为:首先,对开挖前的土体进行初始地应力平衡,获得土体的初始应力状态;然后,安装布置地下连续墙、格构柱及混凝土支撑,并设置初始位移场为 0;最后,实际分层开挖的施工顺序来设定开挖模拟工况,并进行模拟计算。

具体开挖模拟工况分别为:工况 1,布设第一道混凝土支撑;工况 2,基坑开挖至 7 m,布设第一道钢支撑;工况 3,基坑开挖至 11 m,布设第二道钢支撑;

工况 4, 基坑开挖至 16 m, 布设第三道钢支撑; 工况 5, 基坑开挖至 22 m, 完成开挖。主要的开挖模拟工

况如图 6 所示。

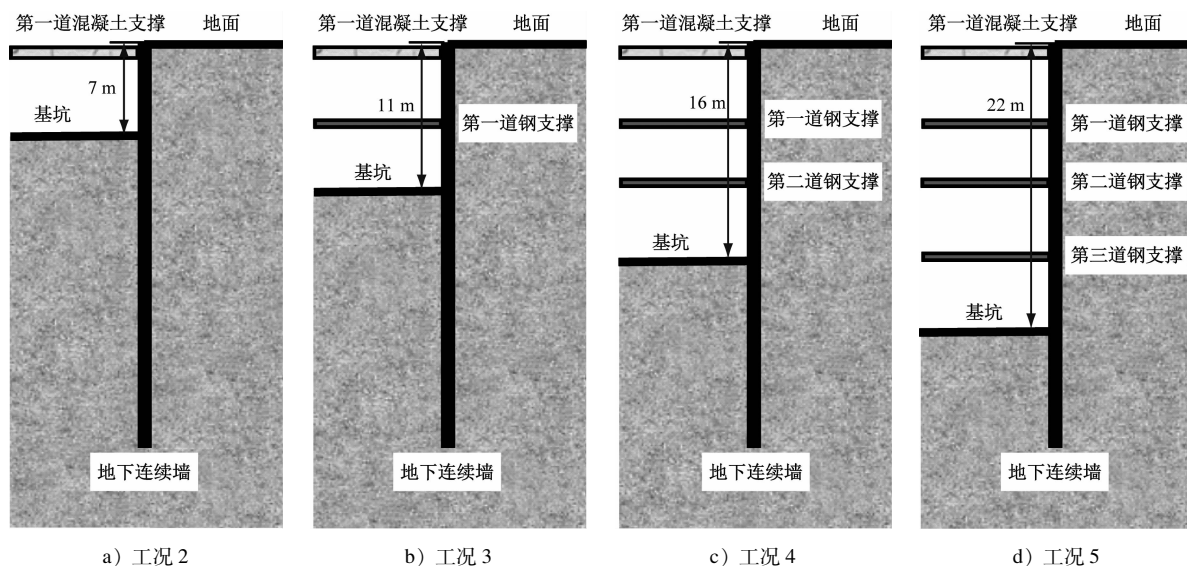


图 6 汽修厂站深大基坑主要的开挖模拟工况

Fig. 6 Main simulated excavation conditions of the large and deep foundation pit at Qixiuchang Metro Station

### 3.2 模拟结果与实际监测结果的对验证

#### 3.2.1 地下连续墙深层水平位移

地下连续墙的水平位移变化可以直观地反映基坑变形情况, 故可作为判定基坑稳定性的指标。对此, 须先结合现场实测结果验证 FLAC3D 软件模

型模拟计算的正确性, 再通过模拟计算进一步验证拆撑过程中的基坑稳定性。选取具有代表性的典型测点组 ZQT6、ZQT10, 对地下连续墙水平位移分布情况进行模拟计算, 并将模拟值与实际监测值进行对比, 结果如图 7 所示。

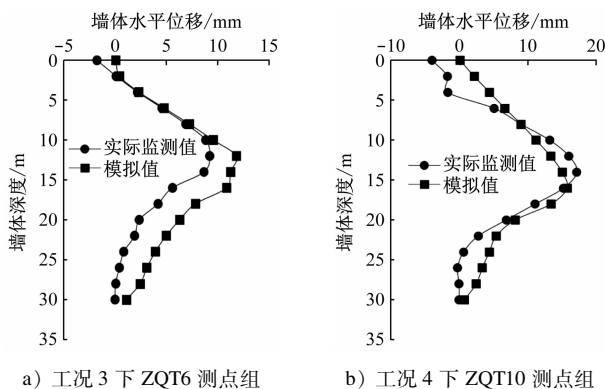


图 7 典型测点组处的地下连续墙水平位移模拟值及实际监测值

Fig. 7 Simulated and actual monitored horizontal displacement values of the underground diaphragm wall at the typical measuring point group

由图 7 a) 可知, 在 ZQT6 测点组处: 当开挖深度为 11 m 时, 地下连续墙水平位移最大值  $d_{\max}$  模拟值为 9.25 mm,  $d_{\max}$  实际监测值为 11.82 mm; 随着开挖深度的增加, 墙体最大变形逐渐增大, 最大变形位置向下移动。从图 7 b) 看出, 在基坑中部测点 ZQT10 处, 当开挖深度为 16 m 时,  $d_{\max}$  模拟值为

15.76 mm,  $d_{\max}$  实际监测值为 17.17 mm; 随着开挖深度的增加, 墙体变形逐渐增大, 最大变形位置向下移动。

对比地下连续墙深层水平位移模拟值与实际监测值不难发现, 两者的变形量和变形特征基本一致, 说明模拟计算所选参数以及计算工况与实际工

程基本一致,能反映现场工程特点,可以为后续基坑开挖对地面沉降影响分析提供依据。

### 3.2.2 地面沉降

选取与基坑南侧端部距离不同处的地面沉降测点组(DBC1、DBC5、DBC9、DBC13,见图1)作为典型测点组,对工况5下(基坑开挖完成后)典型测

点组处的地面沉降进行模拟计算,并根据地面沉降模拟值与实际监测值绘制地面沉降分布曲线,如图8所示。其中,实际监测值分别取距离地下连续墙3 m、7 m和15 m位置地面沉降测点,模拟值分别取距离地下连续墙2 m、5 m、8 m、11 m、14 m和17 m位置。

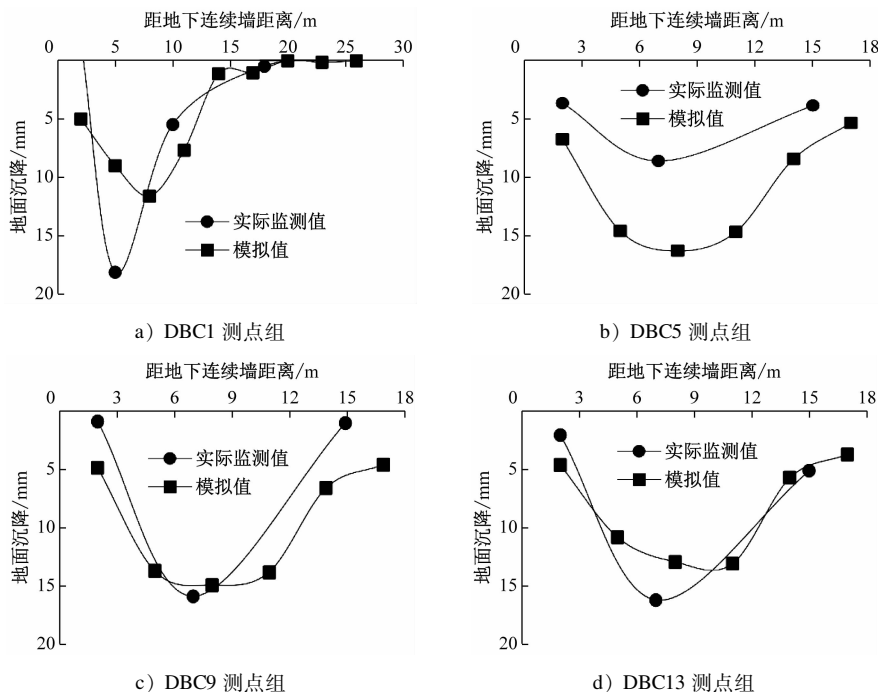


图8 工况5下的典型测点地面沉降曲线

Fig. 8 Curves of land subsidence at the typical measuring point under Case 5

由图8 a)可见,对于 DBC1 测点组:与实际监测值相比,墙后距离为 5 m 处的地面沉降模拟值较大,其他位置处的地面沉降模拟值基本吻合。

由图8 b)可见,对于 DBC5 测点组,地面沉降的实际监测值虽小于模拟值,但二者变化趋势基本相同。其中,最大沉降量为 8.00 mm,对应墙后距离为 8 m,约为开挖深度的 0.36 倍。

由图8 c)可见,对于 DBC9 测点组,地面沉降的实际监测值与模拟值基本吻合。其中,最大沉降量为 15.86 mm,对应墙后距离为 8 m,约为开挖深度的 0.36 倍。

由图8 d)可见,对于 DBC9 测点组,地面沉降的实际监测值与模拟值基本吻合。其中,最大沉降量为 16.19 mm,对应墙后距离为 7 m,约为开挖深度的 0.32 倍。

综合来看,个别测点地面沉降受现场环境复杂或施工技术等因素影响,其实际监测值与模拟值有差

异,除此之外,地面沉降的实际监测值与模拟值基本吻合,说明模拟计算结果基本准确。由此,本研究利用该模型对工况5下典型测点组在墙后距离为 40 m 范围内的地面沉降进行模拟计算,并绘制地面沉降模拟曲线如图9所示。

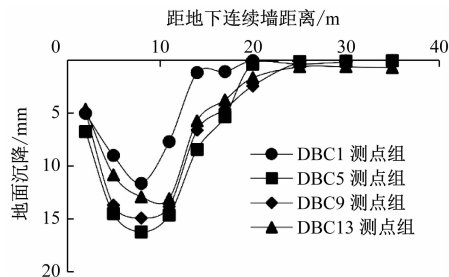


图9 工况5下典型测点组的地面沉降模拟曲线

Fig. 9 Simulated curves of land subsidence at the typical measuring point group under Case 5

由图9可知:基坑开挖完成后,各典型测点组最大的地面沉降模拟值均为 15 mm 左右;与其他测点组相比,距基坑南侧端部最近的 DBC1 测点组地面

沉降量最小。这说明,基坑开挖后,与基坑中部相比,基坑端部处的地面沉降量更小。此外,墙后距离超过 20 m 部分的地面沉降量变化逐渐趋于平缓,并保持稳定。由模拟结果可判断,基坑开挖造成地面沉降的主要影响区域为地下连续墙后方 0~20 m 范围,且对应的墙后距离约为开挖深度的 1.0 倍;次要影响区域为地下连续墙后方为 20~40 m 范围,且对应的墙后距离约为开挖深度的 1.0~2.0 倍。根据实际监测结果及模拟结果,最大地面沉降量约为开挖深度的 0.7‰。

## 4 结语

依托济南地铁汽修厂站深大基坑工程,采用现场监测和三维数值模拟方法,研究地下连续墙深层水平位移、支撑轴力和基坑周边地面沉降随施工过程的演化规律,得出以下结论:

1) 顺作法施工拆撑期间,首道支撑的轴力值约为稳定时轴力的 4~6 倍。建议在拆撑期间,密切关注剩余支撑轴力变化;基坑支护结构设计不仅要考虑基坑周围的土压力值,还要考虑拆撑时剩余支撑的轴力变化。

2) 基坑拆撑后,地下连续墙的水平位移迅速增大,水平位移最大值增加了约 9~17 mm,为底板浇筑完成时水平位移最大值的 1.2~1.3 倍。故为保证施工安全,应减少基坑无支撑暴露时间,拆撑后及时浇筑中板与顶板。

3) 基坑开挖完成后,主要影响区域为地下连续墙后 0~20 m 范围,对应墙后距离约为开挖深度的 1.0 倍;次要影响区域为地下连续墙后 20~40 m 范围,墙后距离约为开挖深度的 1.0~2.0 倍。地面沉降最大值约为 15 mm,是开挖深度的 0.7‰。

4) 通过数值计算分析得出的墙体水平位移变形趋势、墙后地面沉降与实际现场监测数据基本吻合,相互验证,说明该数值计算模型和本构模型参数选择的合理性,能够反映该工程实际特征。

## 参考文献

- [1] 王国富,路林海,王婉婷,等. 济南地区典型基坑工程信息统计分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(8): 72.  
WANG Guofu, LU Linhai, WANG Wanting, et al. Analysis on engineering information statistics of the typical foundation pit in Jinan area[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(8): 72.
- [2] 陈保国,闫腾飞,王程鹏,等. 深基坑地连墙支护体系协调变形规律试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(10): 3289.  
CHEN Baoguo, YAN Tengfei, WANG Chengpeng, et al. Experi-

mental study on compatible deformation of diaphragm wall support system for deep foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(10): 3289.

- [3] 叶帅华,丁盛环,龚晓南,等. 兰州某地铁站深基坑监测与数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊1): 177.  
YE Shuaihua, DING Shenghuan, GONG Xiaonan, et al. Monitoring and numerical simulation analysis of deep foundation pit in a subway station in Lanzhou[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S1): 177.
- [4] 李淑,张顶立,邵运达. 北京地铁车站深基坑复合型变形模式下坑外深层土体位移场分析[J]. 北京交通大学学报, 2020, 44(4): 13.  
LI Shu, ZHANG Dingli, SHAO Yunda. Analysis of soil displacement fields outside deep excavations in composite deformation model of Beijing subway station[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2020, 44(4): 13.
- [5] 冯晓腊,李滕龙,张亮,等. 基坑工程中长短桩支护形式数值模拟研究[J]. 低温建筑技术, 2019, 41(4): 96.  
FENG Xiaola, LI Tenglong, ZHANG Liang, et al. Study on numerical simulation of long-short pile support in foundation pit engineering[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2019, 41(4): 96.
- [6] 陈金铭,狄宏规,周顺华,等. 城市轨道交通车站基坑伺服钢支撑轴力补偿与开挖变形控制效果[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(10): 13.  
CHEN Jinming, DI Honggui, ZHOU Shunhua, et al. Axial force compensation for urban rail transit station servo steel support and control effect of foundation pit excavation deformation[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(10): 13.
- [7] 廖少明,魏仕锋,谭勇,等. 苏州地区大尺度深基坑变形性状实测分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3): 458.  
LIAO Shaoming, WEI Shifeng, TAN Yong, et al. Field performance of large-scale deep excavations in Suzhou[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(3): 458.
- [8] 张运良,聂子云,李凤翔,等. 数值分析在基坑变形预测中的应用[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊1): 113.  
ZHANG Yunliang, NIE Ziyun, LI Fengxiang, et al. Application of numerical analysis in deformation prediction of foundation pit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S1): 113.
- [9] 姜兆华,张永兴. 硬化土模型在 FLAC<sup>3D</sup> 中的二次开发[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2013, 14(5): 524.  
JIANG Zhaohua, ZHANG Yongxing. Second development of hardening soil constitutive model based on FLAC<sup>3D</sup>[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 14(5): 524.

· 收稿日期:2021-12-14 修回日期:2022-03-01 出版日期:2024-06-10  
Received:2021-12-14 Revised:2022-03-01 Published:2024-06-10  
· 作者:赫德亮,高级工程师,hedlmail@126.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license