

文章编号:1673-9469(2020)02-0038-07

DOI: 10.3969/j.issn.1673-9469.2020.02.007

## 地铁车站深基坑动态施工过程变形规律与数值仿真分析

杨波<sup>1</sup>,孙大齐<sup>2\*</sup>,周记名<sup>3</sup>

(1. 浙江华东建设工程有限公司,浙江 杭州 310000;2. 中国铁道科学研究院,北京 100081;

3. 中国土木工程集团有限公司,北京 100038)

**摘要:**以南京地铁虹桥站深基坑工程为依托,结合土体开挖过程中基坑各项监控量测数据,利用FLAC 3D软件建立车站深基坑的三维数值仿真模型,对基坑的开挖和支护动态施工过程进行模拟,对比研究数值仿真的变形计算结果与监控量测数据,研究结果表明:(1)地连墙水平位移在墙身范围内,大致呈“弓”形,随着基坑的开挖而呈非线性增加,位移峰值出现在基坑开挖工作面附近。(2)地表土体受基坑开挖的影响范围主要在基坑边 $1H$ ( $H$ 为基坑深度)范围内,不同工况下沉降曲线大致呈抛物线形,且沉降峰值呈线性增加,峰值沉降发生在 $0.5H$ 附近;在同一工况条件下,随着时间的推移,不同距离位置处的土体位移呈现不断重分布的过程,但整体曲线仍呈“凹”形。(3)基坑隆起量也与基坑开挖过程有关,土体的最大隆起量发生在基坑中轴线附近,随着开挖深度的增加隆起量呈非线性增加。(4)支撑的架设对围护结构的变形和土体的沉降控制能起到良好的正面作用,延迟支撑架设对变形的发展极为不利。

**关键词:** 基坑工程;地铁车站;变形规律;数值模拟;内力与变形

**中图分类号:** TU93

**文献标识码:** A

## Deformation Properties and Numerical Simulation Analysis of Dynamic Construction Process of Deep Foundation Pit in Metro Station

YANG Bo<sup>1</sup>, SUN Daqi<sup>2\*</sup>, ZHOU Jiming<sup>3</sup>

(1. Zhejiang Huadong Construction Engineering Co., LTD., Zhejiang, Hangzhou 310000, China; 2. China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China; 3. China Civil Engineering Group Co., LTD., Beijing 100038, China)

**Abstract:** Based on the deep foundation pit project of Hongqiao Station of Nanjing Metro, combined with the monitoring and measurement data of the foundation pit in the process of soil excavation, FLAC 3D software was used to establish a three-dimensional numerical simulation model of the deep foundation pit of the station so as to simulate the excavation and support dynamic construction process of the foundation pit. In addition, the deformation calculation results and monitoring data of the numerical simulation were compared. The research results show that: (1) the horizontal displacement of the diaphragm wall is in the range of the wall body, approximately in the shape of parabola. With the excavation of the foundation pit, it increases nonlinearly, and the peak value of displacement appears near the excavation working face of the foundation pit. (2) The influence of the surface soil by the excavation of the foundation pit is mainly in the range of  $1H$  ( $H$  is the depth of the foundation pit), and the settlement curve under different working conditions is approximately parabola, and the peak value of settlement is linear increase; under the same working condition, the displacement value of monitoring points at different positions presents a process of continuous redistribution over time, but the overall curve is still “concave”. (3) The amount of foundation pit uplift is also related to the excavation process of foundation pit, the

收稿日期:2020-02-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51268003)

作者简介:杨波(1982-),男,杭州富阳人,硕士,高级工程师,研究方向为岩土设计及防灾减灾勘查设计结合数字化。

\* 通讯作者:孙大奇(1989-),男,江苏淮安人,博士,讲师,研究方向为桥梁工程。

maximum uplift of soil occurs near the central axis of foundation pit, and the amount of uplift increases nonlinearly with the increase of excavation depth. (4) The erection of support can play a positive role in the deformation of the retaining structure and the settlement control of the soil mass, and the delayed erection of the support is extremely unfavorable to the development of the deformation.

**Key words:** foundation pit engineering; subway station; deformation law; numerical simulation; internal force and deformation

地铁深基坑工程是一项危险性较大的分部分项工程,建设场区一般位于城市交通干道上,周边环境十分复杂,由于周边建筑物众多、管网密集、环境保护要求高、基坑支护、出土及主体结构施工工期短、工程造价经济性要求高等因素,给岩土工程界提出了许多技术难题,已成为国内外岩土工程中发展最为活跃的领域之一<sup>[1-9]</sup>。因城市地铁深基坑开挖造成的土体变形是一个不可逆的塑性变形,基坑工程在开挖过程中具有的时间和空间效应使得围护结构和周围土体的变形规律具有明显的非线性,研究动态施工过程中基坑的变形规律对基坑安全和变形控制皆有重要意义。孙凯<sup>[10]</sup>等人对深基坑预应力锚索支护结构的变形和内力进行了数值模拟分析和现场监测数据采集,两者结果基本一致。黄传胜<sup>[11]</sup>采用有限元法分析深基坑开挖引起的变形,并尝试采用灰色系统、马尔科夫链及人工神经网络模型对变形进行预测。王玉田等<sup>[12]</sup>采用 MIDAS GTS 软件对青岛地铁流亭机场站进行了数值分析,指出地表的沉降曲线,初期随着距离基坑边线的增加呈“三角形”,后期逐渐演变为“凹”形。本文以南京地铁虹桥站深基坑工程为依托,结合土体开挖过程中基坑各项监控量测数据,尝试利用 FLAC 3D 软件建立车站深基坑的三维数值仿真模型,对基坑的开挖和支护动态施工过程进行模拟,对比研究数值仿真的变形计算结果与监控量测数据,总结深基坑工程在动态施工过程中的一般变形规律。

## 1 工程概况

### 1.1 车站基本情况

南京地铁虹桥站为 9 m 无柱两层框架式钢筋混凝土结构,车站有效站台中心里程为 K31+794.600,车站起点里程右 K31+710.350,终点里程右 K31+929.350。虹桥站位于中山北路与新模范马路交叉路口北侧,沿中山北路南北向跨路口布设,现状宽度 40 m。新模范马路,现状宽度 60 m,如图 1 所示。



图 1 拟建虹桥站平面位置示意图

Fig.1 Location of the proposed Hongqiao Station

车站主体总长度 219 m,标准段总宽度 18.5 m,标准段基坑平均深度 18.76 m(盾构井段 18.86 m),覆土厚度约 3 m,车站结构采用明挖顺作法施工,主体结构采用钢筋混凝土箱形框架结构。车站支护结构采用 800 mm 厚地下连续墙+内支撑结构的围护方案,首道砼支撑(800 mm×1 000 mm),3 道钢管支撑( $\phi 609$  mm,  $t = 16$  mm),墙体嵌固深度标准段为 19.00 m,盾构井段为 24.70 m,如图 2 所示。

### 1.2 场区地质条件

拟建车站场地处于秦淮河漫滩区,砂土、粉土及软土较发育,地下水位较高,工程地质条件一般。各岩土层工程特征分述如下:

①-1 层填土,厚度 0.5~6.6 m,松散—稍密状态;②-1d3 层粉砂,呈稍密,局部中密状态,中低压缩性;②-2c3 层粉土,呈稍密状态,局部夹薄层粘性土,中压缩性;②-3c2-3 层粉土,呈稍密—中密状态,夹粉砂薄层,中等压缩性;②-3d1-2 层粉砂,呈中密—密实状态,局部夹粉土薄层,中低压缩性,水平层理发育;②-3b3-4 层粉质粘土、淤泥质粉质黏土,呈流塑状态,局部为软塑,局部夹薄层粉砂、粉土,水平层理发育,高压缩性;②-4b2 层粉质黏土,呈可塑状态,中等压缩性;②-5e 含砾粉质黏土,呈软塑—可塑状态,卵砾石含量 20% 左右,局部混砂岩碎块,土质不均,中等压缩性;J31-2 层强风化岩,风化强烈,岩芯多呈碎块状,位于车站南侧;J31-3 层中风化岩,岩芯多呈长柱状,岩体较完整,岩石强度较高,为软岩—较软岩;J1-2x-2 层强风化岩,风化强烈,岩芯多呈碎块状、砂土状;J1-2x-3 层中风化岩,岩芯多呈长柱状,岩体较完

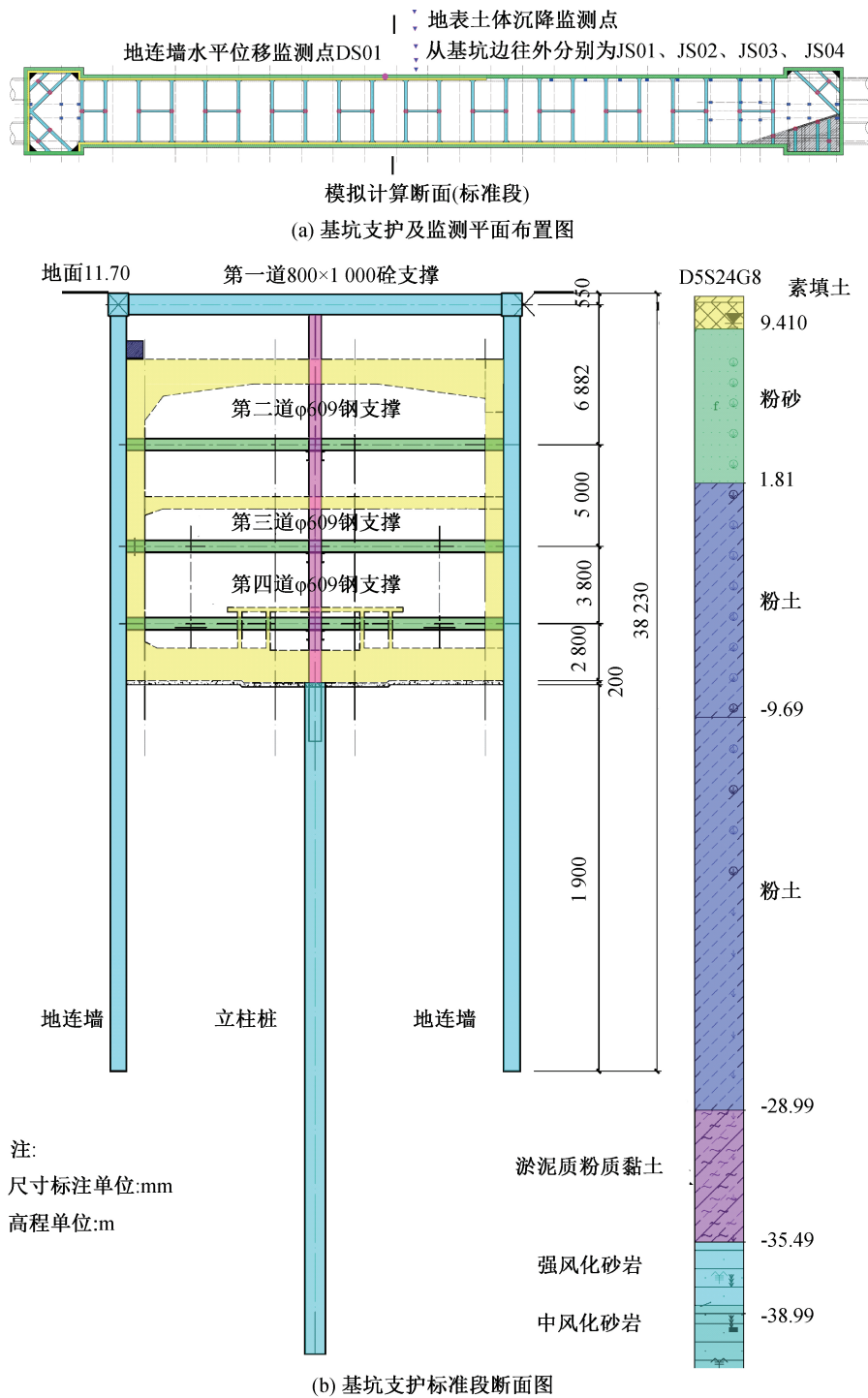


图2 基坑支撑平面和断面图

Fig.2 Foundation pit support plan and profile

整,岩石强度较高,为较软岩—较硬岩。各层土层物理力学性质指标如下表1。

### 2 基坑现场监控量测

为了更好地说明仿真数据的精度,揭示动态施工过程中基坑支护结构和周边土体变形的一般规律,同时也为了保证基坑的稳定和周边环境的

安全,在基坑周边布置了多种类型的监测点,如图2(a)所示监测位置与仿真,布置了地下连续墙墙顶水平位移监测点 DS01,采用全站仪和水准仪进行数据监测,在地表距离基坑边 0、2.5、5、15、35 m 处布置地表沉降位移监测点,依次为 JS01、JS02、JS03、JS04、JS05,采用全站仪进行数据监测。在基坑开挖期间,监测频率皆为 1 次/24 h,墙体水平位

表 1 土层物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of soil layer

层号	岩土名称	重度	压缩系数	压缩模量	固快		慢剪		侧压力系数	水平基床系数	垂直基床系数	渗透系数	承载力特征值
		$\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$\alpha_{1-2} / \text{MPa}^{-1}$	$E_s / \text{MPa}$	$C_{sq} / \text{kPa}$	$\varphi_{sq} / (^\circ)$	$C_s / \text{kPa}$	$\varphi_s / (^\circ)$	$k_0$	$K_h / (\text{MN} \cdot \text{m}^{-3})$	$K_v / (\text{MN} \cdot \text{m}^{-3})$	$k / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$F_{ak} / \text{kPa}$
①-1	杂填土	20			-5	-25			-0.5	9	7	2 000	
①-2	素填土	18.2			-10	-10			-0.6	7	8	10	
②-1d3	粉砂	19.21	0.16	11.57	7.9	31.8	4.3	32.4	0.4	15	16	500	140
②-2c3	粉土	18.23	0.25	8.37	12.2	28.5	4.3	27.7	0.43	11	13	100	110
②-3c2-3	粉土	18.76	0.28	7.34	11.4	26.6	4.2	25.1	0.42	12	14	100	120
②-3b3-4	淤泥质粉质黏土	17.44	0.53	3.97	14.5	22.2			0.6	11	9	10	100
②-3d1-2	粉砂	18.13	0.17	11.51	6.6	27.5	[4.1]	24.2	0.4	21	22	500	160
②-4b2	粉质黏土	19.6	0.28	6.71	29.8	13.6			0.5	16	12	5	180
②-5e	含砾粉质黏土	21.5			-30	-15			0.32	23	20	20	200
J3l-2	强风化岩	23.5			0	-30			0.3	130	150	1 200	350
J1-2x-2	强风化岩	24			0	-32			0.3	140	160	1 500	400
J3l-3	中风化岩	25.2			-250	-33			0.25	210	240	240	5 000
J1-2x-3	中风化岩	25.3			-400	-35.5			0.25	210	250	250	6 500

移和地表城建位移限制均为基坑深度的 0.15%，且不超过 30 mm。

理采用软件内嵌的接触面模拟，地连墙底部按固结考虑。

### 3 基坑数值仿真模型建立

从图 2(a)可知，虹桥站车站基坑为长条形基坑，为 2 层标准站，几何尺寸上具有对称性，由地勘报告可知，沿车站纵向地层起伏不大，同时，场区 1~2 倍基坑深度范围内无建筑物和对分析造成明显影响的外荷载，由此，根据对称性原理和相关文献的研究成果<sup>[13-17]</sup>，避免数值软件的冗余模拟，建立 FLAC 3D 基坑三维模拟，如图 3 所示，沿基坑纵向为 35 m，基坑宽度为标准段宽度 20.10 m（含地连墙厚），基坑深度取标准段断面开挖深度 19.20 m（如图 2(b)所示），为避免边界效应的影响，土体模型尺寸应该在每个维度上为基坑模型的 2~3 倍，本文取为 3 倍，即长×宽×高为：115 m×60.30 m×57.6 m。按 FLAC 3D 软件自动网格生成器对整体模型进行网格自动划分，共获取 273 223 个单元，108 934 个节点。

模拟时，采用软件内嵌的 null 模型实现土体单元的“消失”，模拟基坑的动态施工开挖，采用实体弹性体单元模拟地下连续墙，混凝土支撑和钢支撑按弹性本构考虑，采用梁单元进行模拟，其模拟参数参见表 2 所示，土体的本构模型采用摩尔库伦本构，其模拟参数见表 1 所示。墙体边界接触处

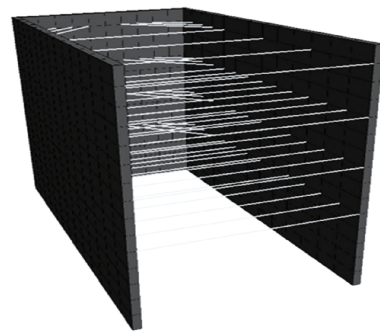


图 3 车站支护体系三维模型

Fig.3 Three dimensional model of station support system

为考虑施工开挖和支撑架设的动态性，对不同开挖过程进行工况分析，建立如下五种工况：

工况一：地下连续墙完成，基坑围护结构封闭，基坑开挖至地表下 2.0 m，施作第一道混凝土支撑。

工况二：基坑继续开挖至地表以下 8.0 m，并施作第 2 道钢支撑。

工况三：基坑继续开挖至地表以下 13.5 m，并施作第 3 道钢支撑。

工况四：基坑继续开挖至地表以下 17.5 m，并施作第 4 道钢支撑。

工况五：基坑开挖至基坑底，即地表下 19.20 m。

表 2 支护体系材料参数

Tab.2 Material parameters of support system

材料	尺寸/mm	容重 $\rho/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	泊松比 $\mu$	弹性模量 $E/\times 10^4/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$
第 1 道 C35 砼支撑	800×1 000	25.0	0.2	3.15
地连墙	800	25.0	0.2	3.15
第 2-4 道 Q235 钢支撑	$\Phi 609, t=16$	78.5	0.3	21.00

#### 4 仿真结果与监控量测数据对比分析

基坑的动态施工将引起基坑围护结构、支护体系和土体的协同变化,FLAC 3D 对三维结构和土体的变形具有可视化直观云图显示功能,从云图中可以抽取墙体水平位移、基坑周边土体位移和基底隆起量,具体分析结果如下。

##### 4.1 地下连续墙水平位移分析

图 4 为基坑开挖至基坑底部时的地下连续墙云图。从图中可以看出,地下连续墙的位移沿墙身范围主要发生在结构外侧,呈现出“弓”形,表现为在地连墙顶部和嵌固段水平位移值较小,中间段累积水平位移较大,表明深基坑在开挖过程中需要控制中间段的变形发展,避免因此产生的变形扰动引发基坑周边土体的附加沉降。

通过抽取标准段断面的墙体水平位移模拟数据和该断面处的监测点 DQ20 数据,典型对比图如图 5 所示。从图中可以看出,在基坑开挖初期,如工况一条件下,基坑的开挖深度较浅,仅为 2 m,同时架设了混凝土支撑,围护结构的实测水平位移和数值模拟结果两者基本一致,且水平位移值较小,最大水平位移小于 1 mm,水平位移曲线大致呈“弓”形,当进一步对基坑进行开挖,如工况二条件下,围护结构的监测水平位移和数值模拟结果沿墙身变化曲线大致呈“弓”形,峰值水平位移出现在开挖面 8.0 m 附近,最大位移值小于 7.5 mm,已开挖段墙体监测水平位移和数值模拟结果接近,

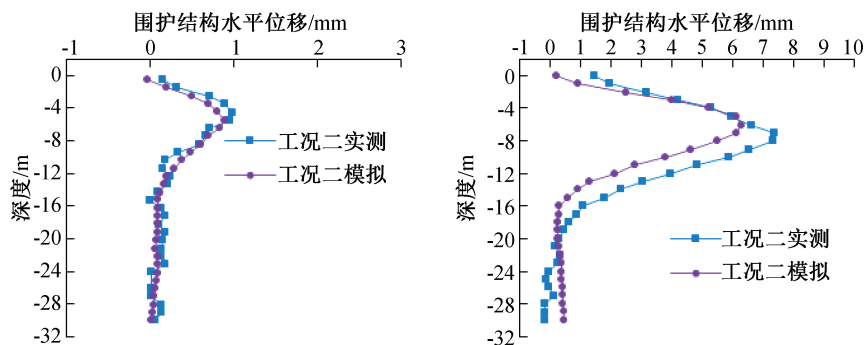


图 5 不同工况下的地下连续墙水平位移实测数据和模拟数据对比

Fig.5 Comparison of measured and simulated horizontal displacement data of diaphragm wall under different working conditions

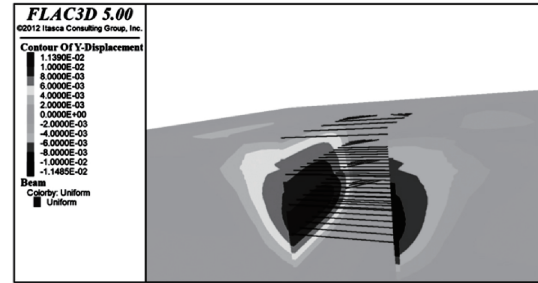


图 4 基坑地下连续墙水平位移云图

Fig.4 Cloud chart of horizontal displacement of diaphragm wall

但在基坑开挖面以下墙体监测水平位移值比数值模拟结果大约 15%,同时两者的数值逐渐收敛,在墙底嵌固段范围内趋于一致。从工况三至工况五的监测水平位移和数值模拟结果对比曲线发现,规律与工况二类似,此处不再累述。

图 6 为工况一至工况五施工过程中地下连续墙的水平位移曲线。从图中容易看出,动态施工对墙体的水平位移的累积作用,主要表现为:(1)无论何种工况条件下,墙体水平位移沿深度曲线变化大致呈“弓”形;(2)对比五种工况条件,容易看出水平位移峰值都出现在开挖面附近,且随着基坑开挖和支护架设的动态施工,水平位移峰值呈非线性增加;(3)从工况一至工况二,墙体的水平位移发展迅速,而从工况二至工况五,开挖面以上墙体水平位移接近,而开挖面以下墙体水平位移增幅明显,在墙底位置处收敛,表明在基坑开挖初期应采取控制墙体变形(如缩小支撑间距和及时架设支撑等),同时加强监测,防止变形过

快过大增长,另一方面,基坑的动态施工使土压力不断传递给支撑和地下连续墙嵌固段,由此造成开挖面以下墙体的位移增加,而开挖面以上支撑的架设对墙体水平位移的控制具有正面效应。

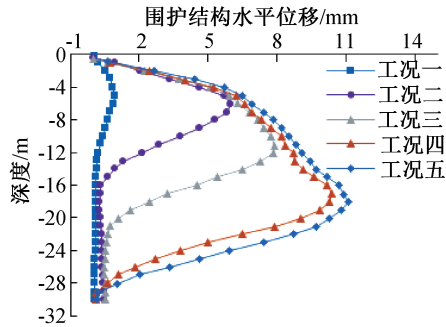


图 6 不同工况下的地下连续墙水平位移  
Fig.6 Horizontal displacement of diaphragm wall under different working conditions

#### 4.2 基坑周边土体沉降分析

图 7 为基坑开挖时周边和基坑底的土体变形云图(工况二)。从图中可以看出,地表的变形主要集中在基坑两侧,数值在基坑横剖方向上呈现出中间大两边小的规律,计算最大水平位移为 2.20 mm。在同一工况下,对基坑的土体沉降进行持续监测,每隔 24 h 读取基坑边不同距离处的沉降值,典型曲线如图 8 所示,从图中可以看出,在同一工况条件下,随着时间的推移,不同位置距离位置处的位移值呈现不断重分布的过程,但整体曲线仍呈“凹”形,基坑开挖后 24 h 范围内(图中 10 月 30 日沉降曲线),实测沉降值为 1.65 mm,与数值模拟结果接近,但随着时间的推移,周围土体受到开挖的扰动影响,土体附加应力增加,沉降变形不断累积,在 11 月 7 日达到监测数据的最大值为 3.80 mm,比计算值 2.20 mm 大 72%,因此,深基坑在开挖过程中,控制施工速率,减少基坑暴露时间,及时架设支撑以避免周边土体的不可逆塑性变形的积累。

图 9 为工况一至工况五施工过程的周边土体沉降曲线。可知,地表土体受基坑开挖的影响范围主要在基坑边  $1H$  ( $H$  为基坑深度) 范围内,不同工况下沉降曲线大致呈抛物线形,且沉降峰值呈线性增加,峰值沉降发生在  $0.5H$  附近。施工时在此范围内的建筑(构)物、地下管网应加强监测,保证基坑的安全和减少对周边环境的影响。

#### 4.3 基坑底隆起量分析

结合图 7 和图 10 可知,基坑隆起量也与基坑

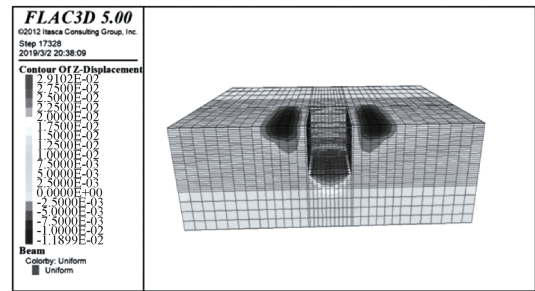


图 7 地表土体沉降和基坑底土体位移云图  
Fig.7 Cloud chart of surface soil settlement and foundation pit bottom soil displacement

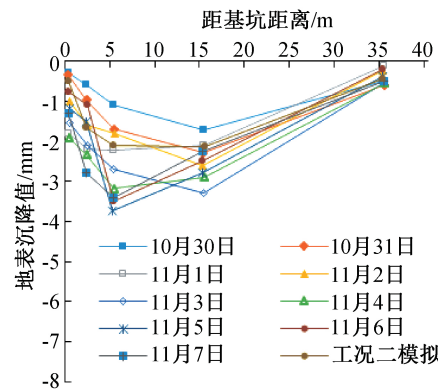


图 8 工况二条件下基坑地表土体沉降变化曲线  
Fig.8 Settlement curve of foundation pit surface soil under condition II

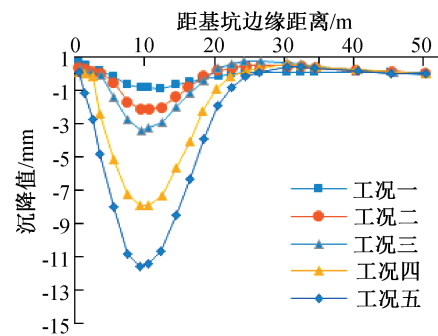


图 9 不同工况下的地表沉降曲线  
Fig.9 Surface settlement curve under different working conditions

开挖过程有关,土体的隆起曲线大致呈对称抛物线状,土体的最大隆起发生在基坑中轴线附近,在围护墙附近隆起量最小,随着开挖深度的增加隆起量呈非线性增加,从工况四至工况五,基坑底的隆起增幅小,土体受到的隆起变形趋于稳定,隆起峰值为 28 mm。

### 5 结论

1)地连墙水平位移在墙身范围内,大致呈“弓”形,随着基坑的开挖而呈非线性增加,位移峰

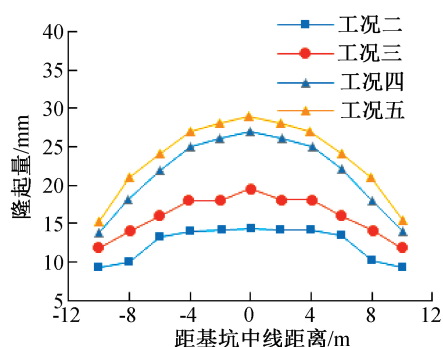


图10 不同工况下的基底隆起曲线

Fig.10 Uplift curve of basement under different working conditions

值出现在基坑开挖工作面附近。

2) 地表土体受基坑开挖的影响范围主要在基坑边  $1H \sim 1.5H$  ( $H$  为基坑深度) 范围内, 不同工况下沉降曲线大致呈抛物线形, 且沉降峰值呈线性增加, 峰值沉降发生在  $0.5H$  附近; 在同一工况条件下, 随着时间的推移, 不同位置监测点的位移值呈现不断重分布的过程, 但整体曲线仍呈“凹”形。

3) 基坑隆起量也与基坑开挖过程有关, 土体的最大隆起发生在基坑中轴线附近, 随着开挖深度的增加隆起量呈非线性增加。

4) 支撑的架设对围护结构的变形和土体的沉降控制能起到良好正面作用, 支撑延迟架设对变形的发展极为不利。

#### 参考文献:

- [1] 徐中华, 王建华, 王卫东. 上海地区深基坑工程中地下连续墙的变形性状[J]. 土木工程学报, 2008, 41(8): 81-86.
- [2] SUN Haixia, ZHANG Ke, CHEN Sili. Monitoring and analysis on the supporting structure for deep foundation pit[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 580/581/582/583: 787-790.
- [3] 胡安峰, 张光建, 王金昌, 等. 地铁换乘车站基坑围护结

构变形监测与数值模拟[J]. 岩土力学, 2012, 34(S1): 77-81.

- [4] 刘勇, 冯志, 黄国超, 等. 北京地铁工程深基坑围护结构变形研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(2): 329-335.
- [5] 王桂平, 刘国彬. 考虑时空效应的软土深基坑变形有限元分析[J]. 土木工程学报, 2009, 42(4): 114-118.
- [6] LIU Jie, YAO Hailin, REN Jianxi. Monitoring and Numerical Simulation of Deformation of Retaining Structure in Subway Station Foundation Pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31: 456-461.
- [7] 蒋洪胜, 刘国彬, 刘建航. 软土地铁车站基坑开挖过程中的时空效应分析[J]. 建筑施工, 1999(2): 30-33.
- [8] 刘杰, 姚海林. 地铁车站基坑围护结构变形监测与数值模拟[J]. 岩土力学, 2010, 31(S1): 1123-1125.
- [9] 李磊, 段宝福. 地铁车站深基坑工程的监控量测与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S1): 76-79.
- [10] 孙凯, 许振刚, 刘庭金, 等. 深基坑的施工监测及其数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 293-298.
- [11] 黄传胜. 地铁深基坑开挖变形预测方法及工程应用研究[D]. 湖南: 中南大学, 2011.
- [12] 王玉田, 范思广, 姜福香, 等. 城市地铁车站基坑施工变形监测与数值模拟[J]. 青岛理工大学学报, 2019, 33(2): 49-52.
- [13] 刘杰, 姚海林, 任建喜. 地铁车站基坑围护结构变形监测与数值模拟[J]. 岩土力学, 2010, 31(S2): 456-461.
- [14] 郭余根. 地铁车站明挖施工深基坑监控量测及数值模拟研究[J]. 施工技术, 2014, 43(1): 78-82.
- [15] 张磊, 李雨润, 王小燕, 等. 地铁车站超深基坑开挖施工监测与数值模拟[J]. 施工技术, 2018, 47(3): 72-76.
- [16] 刘国彬, 王卫兵. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [17] WANG Z W, NG C W W, LIU G B. Characteristics of Wall Deflections and Ground Surface Settlements in Shanghai[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 42(5): 1243-1245.

(责任编辑 王利君)