

# 复杂地质条件下浅埋暗挖地铁车站 施工期地面沉降量 FLAC<sup>3D</sup> 分析

白明洲, 许兆义, 时 静, 张爱军, 雷 军, 谢晋水

(北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 浅埋暗挖地铁车站施工期地面沉降量对施工安全具有重要意义。北京地铁 10 号线苏州街车站为多套地层力学性质差异较大的复杂场地, 根据地质勘察结果的地层三维空间分布状况, 建立车站场地的三维地质模型; 应用试验结果确定各类土层的物理力学参数; 依据工程设计方案, 概化洞桩法施工过程为 6 个施工步序; 采用等效模拟的方法概化超前地层预加固; 应用 FLAC<sup>3D</sup> 计算软件, 优化开挖施工方案, 模拟动态施工过程, 分析各施工步序暗挖车站周围土体的变形量和地面沉降量; 研究确定引起最大地面沉降量的施工步序。通过现已完成施工的导洞开挖步序施工变形监测结果与计算结果比较分析, 验证计算结果的可靠性, 根据计算结果预测地铁车站施工期的最终地面沉降量。

**关键词:** 隧道工程; 三维地层分布; 地铁车站; 地面沉降量; 数值模拟

**中图分类号:** U 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2006)增 2 - 4254 - 07

## ANALYSIS OF GROUND SETTLEMENT OF A SUBWAY STATION UNDERCUT WITH SHALLOW OVERBURDEN DURING CONSTRUCTION WITH FLAC<sup>3D</sup> UNDER COMPLEX GEOLOGICAL CONDITIONS

BAI Mingzhou, XU Zhaoyi, SHI jing, ZHANG Aijun, LEI Jun, XIE Jinshui

(School of Civil Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** The settlement of a subway station undercut with shallow overburden has important effect on the construction safety. The engineering field of Suzhou Street Station of Beijing No.10 Subway has complex strata with different mechanical characters. According to the three-dimensional spatial distribution of strata, a three-dimensional geological model of the subway station has been built. The physico-mechanical parameters of every stratum have been ascertained by test. On the basis of the subway engineering, the course of the cave-pile method is abstracted to six construction step. The equivalent simulation method is used to abstract the preceding reinforcing stratum. The FLAC<sup>3D</sup> is used to simulate the construction process. The caving project is optimized by simulation. The deformations of the soil around the station and ground settlement in every construction step have been analysed. The construction step that causes the largest ground settlement has been found by three-dimensional numerical simulation. Through the comparison between the deformation monitoring data of pilot drift cavity with calculation results, the reliability of the calculation results has been testified. At the same time, the eventual ground settlement is forecasted by the calculation results.

**收稿日期:** 2005 - 12 - 21; **修回日期:** 2006 - 02 - 20

**基金项目:** 铁道部科技开发计划项目(TDB2004G021 - B - 1); 北京交通大学科研基金项目(2003SM020)

**作者简介:** 白明洲(1967 - ), 男, 博士, 2000 年于成都理工大学环境与土木工程学院地质工程专业获博士学位, 现任副教授, 主要从事工程地质方面的教学与研究工作。E-mail: mzhbai@bjtu.edu.cn

**Key words:** tunnelling engineering; three-dimensional distribution of stratum; subway station; ground settlement; numerical simulation

### 1 引言

地下岩土体的开挖会引起地表沉降和变形，地表沉降到一定的程度，将影响地面建筑物的安全和地下管线的正常使用<sup>[1, 2]</sup>。而地铁线路一般都会穿过人口密集、地面建筑物林立、地下管网密布的市中心繁华地段，施工产生的地表位移和变形的要求都很高<sup>[3]</sup>，施工方法的选择如稍有失误，将会造成不可估量的损失。为了保证隧道工程的进行以及周围构筑物的安全，进行隧道工程施工力学分析，预测由隧道开挖引起的地表移动及变形，提出防止过大变形、保证地下既有管线及车站施工安全的技术措施，是具有现实意义的<sup>[4, 5]</sup>。

北京地铁 10 号线苏州街车站为双层暗挖车站，主体宽 22.50 m，埋深 6.0~7.0 m，车站结构底板埋深约 23.0 m，采用矿山法暗挖施工。车站场地地质条件复杂，具有多层力学性质差异很大的地层分布，对施工期地面沉降量的预测与控制是决定施工安全的重要因素。为分析预测该车站施工期的地表最大沉降量，本文在地质勘察、明确场地地质条件的

基础上，应用岩土工程领域的大型数值分析软件 FLAC<sup>3D</sup> 进行了开挖支护施工过程的三维数值模拟，预测了引起最大地表沉降的施工步骤和最大沉降量。FLAC<sup>3D</sup> 即三维快速拉格朗日分析<sup>[6]</sup>，可以较好地模拟材料的弹塑性分析和大变形分析<sup>[7, 8]</sup>。

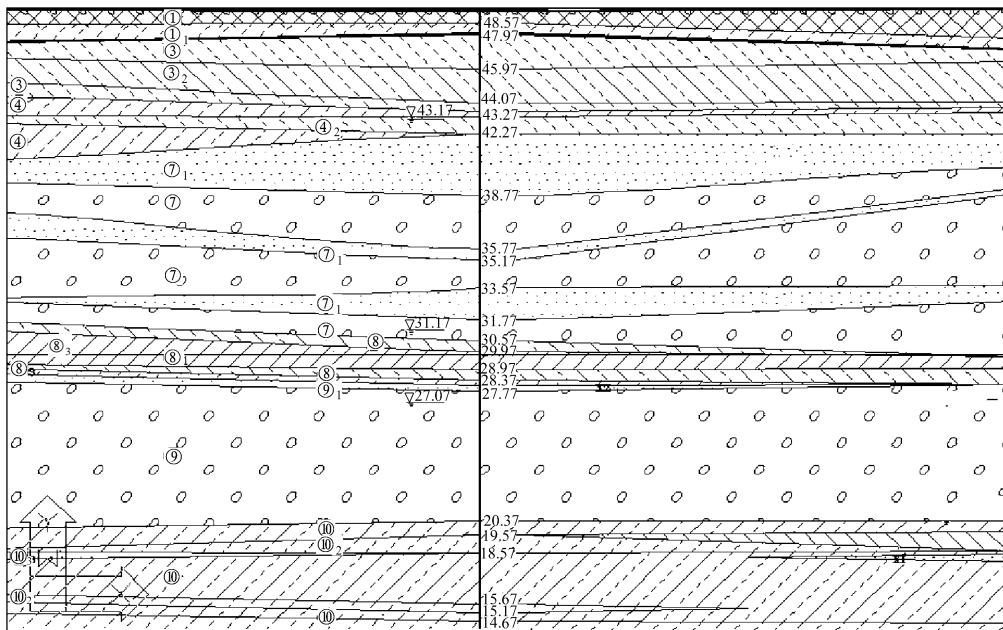
### 2 工程地质条件

根据钻孔揭露的地层资料，按照地层沉积年代、成因类型及岩性、随深度变化的岩性特征分布情况可分为人工堆积层和第四纪沉积层两大类，选取施工范围内一个典型断面，车站场地地质剖面如图 1 所示，该车站场地主要土体类型有粉土、粉质黏土、砂卵石、细砂、粉砂、黏土等。

### 3 计算模型

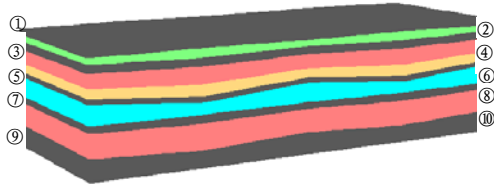
模拟计算中，出于简化计算的需要将地质情况进行了概化，概化后地层分为 10 层，概化模型如图 2 所示。

#### 3.1 几何模型



①—杂填土；①<sub>1</sub>—粉土填土；③—粉土；③<sub>2</sub>—粉质黏土；④—粉质黏土；④<sub>2</sub>—粉土层；⑦—卵石、圆砾；⑦<sub>1</sub>—细砂、中砂；⑧—粉质黏土；⑧<sub>1</sub>—黏土；⑧<sub>3</sub>—粉土；⑨—卵石、圆砾；⑨<sub>1</sub>—细砂、中砂层；⑩—粉质黏土、黏土和粉土；⑩<sub>2</sub>—粉土为主；⑩<sub>3</sub>—砂卵石为主

图 1 场地地质剖面图(单位: m)  
Fig.1 Geological section of engineering field(unit: m)



①—杂填土为主；②—粉土填土为主；③—粉土为主；④—粉质黏土为主；⑤—细砂为主；⑥—中砂为主；⑦—圆砾为主；⑧—黏质粉土为主；⑨—砂卵石为主；⑩—黏质粉土夹粉土为主

图2 地层概化模型示意图

Fig.2 Sketch map of generalized stratum model

模型尺寸取车站主体双层浅埋暗挖段，沿隧道纵向为 60 m，横向左、右各取车站宽度的 3 倍，总长为 193.2 m。模型上边界取至地表，下边界取至车站结构底部以下 27 m 处，总高度为 51.055 m。应用 FLAC<sup>3D</sup> 软件计算的模型网格划分如图 3 所示，共有 49 660 个单元，53 802 个节点。采用洞桩法施工，即在主体下部边导洞内施工条形基础，主体下部中导洞内施工主体底纵梁，在主体上部边导洞内施工挖孔桩及桩顶冠梁，主体上部中导洞内施工主体顶纵梁。六导洞计算模型开挖顺序如图 4 所示。

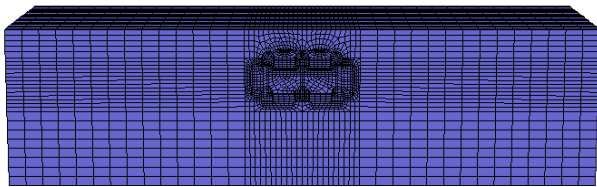


图3 模型网格划分

Fig.3 Division of model grid

### 3.2 边界条件

模型边界条件为：侧面和底面为位移边界，侧面限制水平移动，底部限制垂直位移，上边界为自由面。

### 3.3 介质物理力学性质

根据试验结果确定各土层的物理力学参数如表 1 所示，工程材料的物理力学参数见表 2。开挖中初次衬砌及二次衬砌材料类型为：初期支护为 C25 混凝土，二次衬砌采用 C30 混凝土，钢筋混凝土柱采用 C50 混凝土。

## 4 开挖与支护设计

导洞开挖按先下后上顺序施工，纵向拉开 10~15 m，下导洞施工至设计里程时，由车站中部向两端开始施作条形基础及底纵梁。上导洞施工至设计里程时，由车站中部向两端施工边桩及钢管柱，接着施工桩顶冠梁及顶纵梁，然后施作主体双层结构，拱部超前支护，开挖土体和施工初期支护。向下开挖土体至中板以下，施作中板、中纵梁及部分边墙，然后施工拱部二次衬砌结构，由上自下继续开挖土体至底板下设计高程，分别完成底板及剩余边墙结构的施工，从而完成车站主体双层结构。根据设计施工程序，概化施工过程为 6 个施工步序，进行模拟计算：(1) 六导洞开挖；(2) 桩、柱、底纵梁施工；(3) 中洞开挖扣拱；(4) 拆除小导洞初支，施作拱部二次衬砌；开挖主体结构土体，施作中楼板及部分边墙二次衬砌；(5) “V”型开挖土体到设计标高，跳槽开挖主体内土体，施作底板及边墙结构；(6) 开挖完主体内土体，施作剩余底板及边墙，闭合全部车站结构。

导洞和中洞开挖前采取预加固措施，根据围岩类别采用锚杆、超前小导管注浆和管棚等支护措施对其进行加固处理，以提高围岩的稳定性，加固措施的模拟采用等效计算的方法<sup>[9]</sup>，在模拟计算时，依据经验<sup>[10]</sup>，将围岩参数中的  $c$ 、 $\phi$  值提高一定比例，这里采取在六导洞开挖及中洞开挖时将初期支护外 0.5 m 范围内的土体  $c$ 、 $\phi$  值提高 30% 的措施，超前预加固区范围如图 5 所示。模拟计算中材料破

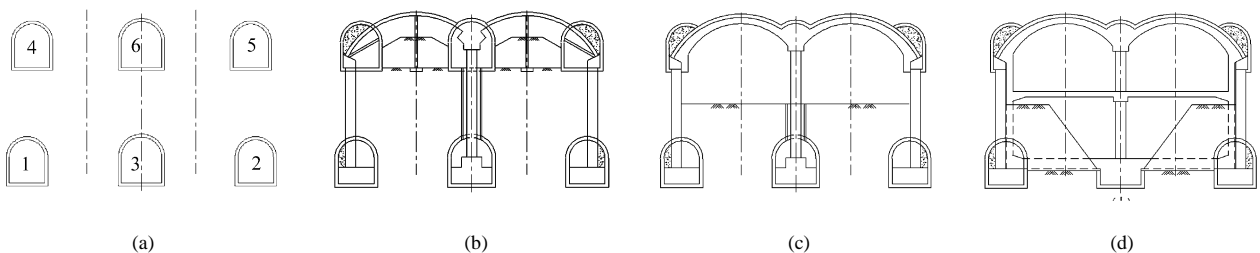


图4 六导洞计算模型开挖顺序

Fig.4 Excavation sequence of calculation model of six-pilot cave

表 1 各土层物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of every soil stratum

土层编号	土性	厚度/m	密度/(kg · m <sup>-3</sup> )	体积模量/MPa	剪切模量/MPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	静止侧压力系数
1	杂填土为主	2.2	1 920	12.82	6.62	15.0	10.0	0.740
2	粉土填土为主	2.0	1 930	19.20	9.00	27.0	40.0	0.400
3	粉土为主	2.8	2 230	34.10	21.80	25.0	40.0	0.350
4	粉质黏土为主	4.1	2 010	38.10	22.70	26.0	40.0	0.400
5	细砂为主	3.2	1 980	40.90	28.80	18.0	58.0	0.363
6	中砂为主	6.8	1 990	42.90	30.00	18.0	58.0	0.363
7	圆砾为主	1.8	2 130	42.50	31.90	18.0	58.0	0.250
8	黏质粉土为主	2.4	2 130	33.10	20.80	25.0	40.0	0.350
9	砂卵石为主	7.8	2 230	45.50	33.90	18.0	58.0	0.250
10	黏质粉土夹粉土为主	8.1	2 010	38.10	22.70	26.0	40.0	0.400

表 2 工程材料的物理力学参数

Table 2 Physico-mechanical parameters of engineering materials

工程材料	密度/(g · cm <sup>-3</sup> )	泊松比	弹性模量E/MPa	体积模量K/MPa	剪切模量G/MPa
C25 混凝土	2 300	0.25	28 000	18 667	20 000
C30 混凝土	2 500	0.25	30 000	11 200	12 000
C50 混凝土	2 500	0.25	34 500	23 000	13 800

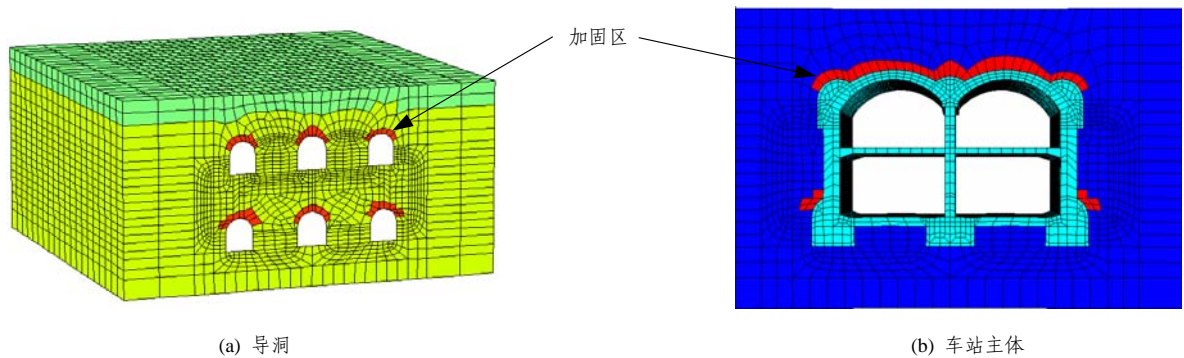


图 5 超前预加固区示意图

Fig.5 Sketch map of preceding reinforcing region

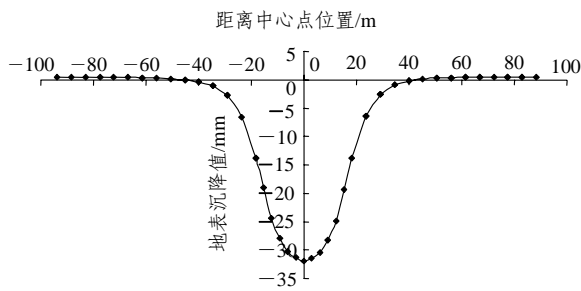
坏采用莫尔 - 库仑准则，计算采用大应变变形模型计算，开挖步长设定为 6.0 m，按拟定工序各导洞错峰同时施工。

### 5 方案比选

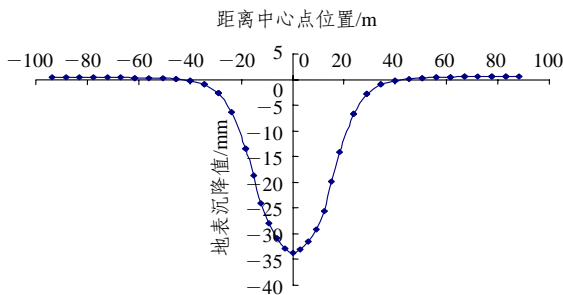
经验表明，洞桩法施工导洞开挖顺序的不同对地表沉降量会造成影响，因此首先对六导洞的不同施工顺序方案进行了分析比选。如图 2 所示的不同

导洞编号，分别比选了以下几种方案：(1) 3→2→1→6→5→4；(2) 1→3→2→4→6→5；(3) 1→2→3→4→5→6。不同方案的横断面沉降槽曲线如图 6 所示。

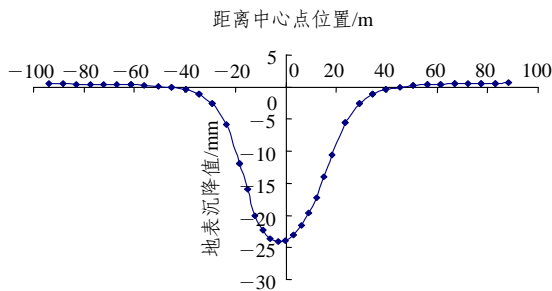
六导洞开挖完成后 3 种方案地面沉降情况对比如下：方案(1)地面沉降平均值为 -6.55 mm，最大值为 -31.92 mm；方案(2)地面沉降平均值为 -6.66 mm，最大值为 -33.81 mm；方案(3)地面沉降平均值为 -5.04 mm，最大值为 -24.10 mm。由于地面沉降



(a) 方案(1)



(b) 方案(2)



(c) 方案(3)

图6 不同方案的横断面

Fig.6 Settlement trough curves of cross sections in different cases

变形是考虑的重点，所以从沉降角度比较分析，方案(3)即先下导洞后上导洞、先边导洞后中导洞的施工顺序最为合理，沉降变形没有超过规定的容许值，但也已处于预警值外，在后续施工步骤中要采取相应措施。在方案(3)基础上进行车站主体双层模拟段其他施工步序的模拟计算。

## 6 计算结果分析

根据设计方案，本文模拟了整个车站的开挖支护施工过程。图7~10分别为第1, 3, 5, 6主要施工步完成后垂直方向的沉降量等值线图。

由图7~10可以看出，六导洞开挖完成后，第6个小导洞(上部中导洞)拱顶小范围内出现最大沉降，沉降值在40 mm左右，导洞间沉降值为30~40

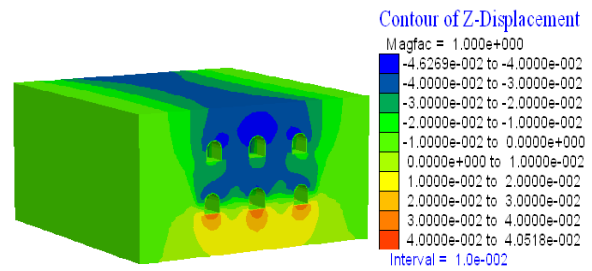


图7 第1步施工完成后垂直方向沉降量等值线图(单位: mm)

Fig.7 Isogram of settlement in vertical direction after completion of construction step 1(unit: mm)

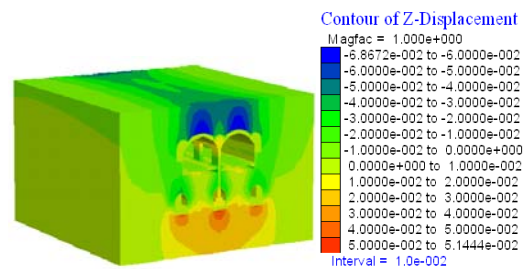


图8 第3步施工完成后垂直方向沉降量等值线图(单位: mm)

Fig.8 Isogram of settlement in vertical direction after completion of construction step 3(unit: mm)

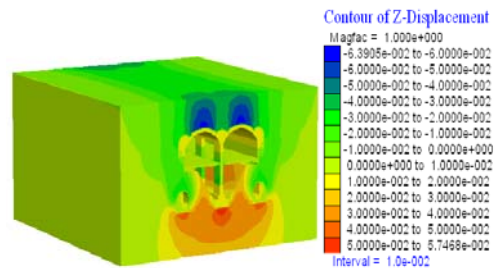


图9 第5步施工完成后垂直方向沉降量等值线图(单位: mm)

Fig.9 Isogram of settlement in vertical direction after completion of construction step 5(unit: mm)

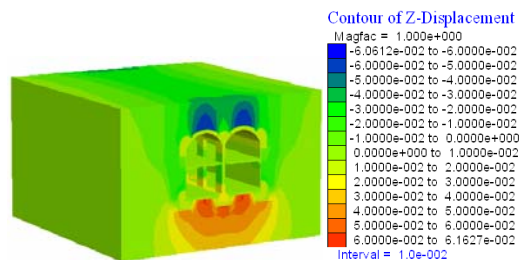


图10 第6步施工完成后垂直方向沉降量等值线图(单位: mm)

Fig.10 Isogram of settlement after completion of construction step 6(unit: mm)

mm，可以看出导洞间的相互影响效应明显。下导洞

底部均出现隆起，最大隆起值为 40 mm。桩、柱、底纵梁施工完成后等值线图没有大的变化，拱顶沉降值有少量增加，最大沉降值达到 46 mm，导洞间沉降值维持在 3~4 mm。中洞开挖完成并扣拱后，拱顶沉降量有明显增加，最大沉降值达到 6 mm，最大沉降区域转移到中洞拱顶。车站主体周围形成“V”形沉降区域，总沉降值维持在 30~40 mm。底部隆起量没有明显变化。第 3 步完成后中洞拱顶沉降量有所增加，达到 65 mm，车站主体周围“V”形沉降区域有增大迹象，“V”形区域外围沉降值在 10~30 mm，核心部分沉降值为 30~45 mm；底部土体隆起量有所增加，达到 45 mm。第 4 步完成后中洞顶部大沉降区域面积减小，沉降量维持在 65 mm 左右，这是因为边墙结构施作后缓解了对中洞拱顶的压力。周围“V”形沉降区基本维持原状，沉降量为 10~40 mm。车站结构全部完成后等值线图基本呈左右对称分布，中洞拱顶的沉降区域没有进一步发展，拱顶最大沉降量维持在 62 mm，周围“V”形沉降区域沉降情况保持稳定。由此可见对土体扰动作用最明显的施工步骤为六导洞开挖和中洞开挖，因此这两个过程中一定要做好支护措施，这样将有效控制最终沉降量。

对以上不同阶段的沉降计算结果进行分析，可得出以下认识：六导洞开挖完成后，导洞拱顶沉降最大达到 24 mm，由于群洞效应的影响，两导洞间的地面沉降大于导洞外侧的地面沉降。随中跨土体开挖及后续步序的施作，车站中心线处的地面沉降逐渐增大，开挖过程中地表沉降逐渐增大，施工完成时地表最大沉降为 42 mm。六导洞开挖引起的地面沉降变形在所有施工步序中占的比例为 55.8%，在各个模拟施工步序中所占比例最大，其他 5 个概化施工步序施工期产生的沉降量占地表总沉降量的 44.2%(见表 3)。

表 3 各施工步序产生的沉降值对比  
Table 3 Comparison of settlement induced by each construction step

施工步序	沉降值/mm	所占比例/%
1	24	55.8
2	3	7.5
3	6	15.0
4	2	4.6
5	3	7.5
6	4	9.6

该工程已进行导洞开挖施工，六导洞施工期在车站中间位置横断面 5 个地表沉降监测点的沉降情况如图 11 所示，5 个监测点位分别为左、中、右 3 个导洞和 2 个中洞的拱顶对应地表位置。由图可见，最大沉降量为 25 mm 左右，与模拟计算结果基本吻合，所以可以说明计算模型和施工步序概化基本合理，能够模拟实际情况，通过模拟计算可以预测施工最终地表沉降量为 42 mm。

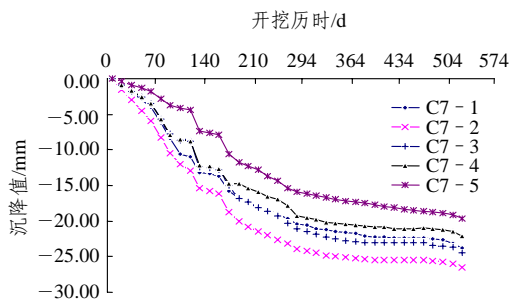


图 11 六导洞施工期地面沉降观测曲线  
Fig.11 Observation curves of ground settlement during construction process of six-pilot cave

## 7 结 语

基于工程勘察结果，建立工程场地的三维地质模型，以此为基础进行三维有限差分的数值分析，模拟地铁车站开挖支护的动态施工过程，可以较好地反应地铁施工的动态力学过程，通过数值模拟分析可以看到该浅埋暗挖地铁车站施工期地表最大沉降量为 42 mm，基本满足设计规范要求。另外根据初步的施工监测结果，车站六导洞开挖施工的地表沉降量与计算结果基本一致，进一步说明场地地质模型对数值模拟的重要性。

### 参考文献(References):

[1] 吴 波, 高 波. 地铁区间隧道施工对近邻管线影响的三维数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增 1): 2 451 - 2 457.(Wu Bo, Gao Bo. 3D numerical simulation of effect of tunnel construction on adjacent pipeline[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(Supp.1): 2 451 - 2 457.(in Chinese))

[2] 刘维宁, 张 弥, 邝 明. 城市地下工程环境影响的控制理论及其应用[J]. 土木工程学报, 1997, 30(5): 66 - 75.(Liu Weining, Zhang Mi, Kuang Ming. Analysis of controlling and assessing environmental damage induced by tunneling and underground works

- in urban areas[J]. *China Civil Engineering Journal*, 1997, 30(5): 66 - 75.(in Chinese))
- [3] 张云, 殷宗泽, 徐永福. 盾构法隧道引起的地表变形分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(3): 388 - 392.(Zhang Yun, Yin Zongze, Xu Yongfu. Analysis of three-dimensional ground surface deformations due to shield tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(3): 388 - 392.(in Chinese))
- [4] 黄俊, 张顶立. 地铁重叠隧道上覆地层变形的数值模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(12): 2 176 - 2 182.(Huang Jun, Zhang Dingli. Numerical simulation of stratum deformation above overlapping metro tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(12): 2 176 - 2 182.(in Chinese))
- [5] 钱源. 广州地铁客村联络线岔口段隧道工程地面沉降原因分析及控制[J]. *石家庄铁道学院学报*, 2003, 16(增): 19 - 22.(Qian Yuan. Analysis of the reason and control of ground settlement of subway at Guangzhou Subway No.2 line Kecun contact line fork[J]. *Journal of Shijiazhuang Railway Institute*, 2003, 16(Supp.): 19 - 22.(in Chinese))
- [6] 李秀珍, 许强, 孔纪名, 等. 九寨—黄龙机场高填方地基沉降的数值模拟分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(12): 2 188 - 2 193.(Li Xiuzhen, Xu Qiang, Kong Jiming, et al. Numerical modeling analysis of settlements of high filling foundation for Jiuzhai—Huanglong Airport[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(12): 2 188 - 2 193.(in Chinese))
- [7] 乔国文, 王运生, 房冬恒. 西南某电站右岸开挖边坡稳定性的 FLAC<sup>3D</sup> 分析[J]. *工程地质学报*, 2004, 12(3): 280 - 284.(Qiao Guowen, Wang Yunsheng, Fang Dongheng. A FLAC<sup>3D</sup> analysis of the slope stability at a hydropower station[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2004, 12(3): 280 - 284.(in Chinese))
- [8] 寇晓东, 周维垣, 杨若琼. FLAC<sup>3D</sup> 进行三峡船闸高边坡稳定分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(1): 6 - 10.(Kou Xiaodong, Zhou Weiyuan, Yang Ruoqiong. Stability analysis of the high slopes of Three Gorges shiplock using FLAC<sup>3D</sup>[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(1): 6 - 10.(in Chinese))
- [9] 朱维申, 张玉军. 锚杆加固围岩的效应及其在船闸高边坡中的应用[A]. 见: 国际岩土锚固与灌浆新进展[C]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996. 209 - 216.(Zhu Weishen, Zhang Yujun. Study on the effect of reinforcing surrounding rockmass by bolt and its application to shiplock high side-slop[A]. In: *New Progress of International Soil and Rock Anchorage and Grouting*[C]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1996. 209 - 216.(in Chinese))
- [10] 侯朝炯, 勾攀峰. 巷道锚杆支护围岩强度强化机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(3): 342 - 345.(Hou Chaojiong, Gou Panfeng. Mechanism study on strength enhancement for the rocks surrounding roadway supported by bolt[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(3): 342 - 345.(in Chinese))