

# 分坑施工在控制基坑长边效应中的应用

宋德鑫 陶 铸 范钦建

(中亿丰建设集团设计研究院有限公司,江苏苏州 215008)

**【摘 要】** 分坑施工通过把一个大的基坑划分为若干个小的基坑,利用时空效应,先后施工,能有效地控制基坑长边的变形,确保基坑周边管线及建筑物的安全。通过一分坑施工的基坑实例,采用 Plaxis3D 三维有限元软件进行数值模拟,分析了基坑分坑施工和不分坑施工对基坑周边环境的影响,并通过分坑施工有限元数值分析结果和实际基坑监测数据进行了对比。结果表明,分坑施工能有效减小基坑长边的变形。

**【关键词】** 长边效应;超大基坑;三维有限元;分坑施工

**【中图分类号】** TU 473.2

**【文献标识码】** A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2015.02.008

## Construction Technology of Separate Pit Applied to Control Long Side Effect of Foundation Pit

Song Dexin Tao Zhu Fan Qinjian

(ZYF Construction Group Design & Research Institute Co., Ltd, Suzhou 215008, Jiangsu, China)

**【Abstract】** Construction technology of separate pit divides a large foundation pit into several small foundation pits. Using the method of “time—space effect”, successively construction often can effectively control the deformation of the long side of pit and ensure the safety of pipelines and buildings around. Based on a typical case of excavation, the paper analyzed influence of the surrounding environment in the case of zoned excavation and overall construction by Plaxis3D dimensional finite element numerical simulation. Then the simulated results were compared with the measured monitoring data. It is shown that construction technology of separate pit can effectively reduce the deformation of the long side of pit.

**【Key words】** long side effect; super large foundation pit; 3D FEM; zoned excavation

### 0 引 言

随着城市建设的快速发展,超大规模的基坑越来越多,许多基坑单边长度往往超过 200 m,开挖深度超过 15 m。此种基坑具有开挖深度较深、周长较长等特点。由于这些深基坑大部分位于中心城区,基坑周边地面建(构)筑物众多,且其中不乏历史保护建筑以及相当部分的老式居民住宅,基坑周边地下管线及市政设施密集,有的基坑紧邻地铁站及地铁隧道<sup>[1]</sup>。基坑开挖对周边环境的保护要求较高,如此大规模的基坑开挖后常常因基坑的长边效应而导致基坑出现较大的变形,过大的变形往往会影响到基坑周边管线及建筑物的安全。传统的基坑分析计算软件采用的竖向弹性支点法,计算方便,但无法考虑土与结构的协同作用。由于基坑开挖是典型的时

间及空间问题,这种方法无法反映基坑开挖的时空效应<sup>[2]</sup>。三维有限元模型能考虑土与结构的共同作用,并能考虑基坑的时空效应,可以动态模拟基坑开挖的施工工况。笔者以苏州市某广场基坑为例,建立三维有限元模型,通过对比分析基坑分坑施工和不分坑施工对基坑周边环境的影响,并将分坑施工的三维有限元数值模拟分析结果和实测数据进行对比,重点讨论分坑施工对控制基坑长边效应的作用。

### 1 工程概况

该广场位于苏州工业园区,北邻翠园路,西邻南施街,西北侧与苏州地铁一号线南施街站相接。本工程总建筑面积约 32 万 m<sup>2</sup>,由办公楼、演播楼、酒店楼、商业楼等组成,办公楼地上 42 层,酒店楼地上 37 层,演播楼及商业楼地上 8 层,整体设三层地下室。

**作者简介:**宋德鑫,1986 年生,男,汉族,陕西安康人,大学本科,主要从事岩土工程设计工作。

E-mail:songdexin3131@126.com

基坑开挖面积约 3.35 万 m<sup>2</sup>,周长约 770 m,基坑开挖深度为 15.6~18.6 m,基坑呈长方形,长边约 250m,短边约 150m。

1.1 周边环境条件

本基坑北侧为翠园路,路面以下有地铁一号线南施街站及区间盾构隧道,隧道底埋深约 14.0 m,隧道直径 6.2 m,南施街站底板埋深约 16.0 m,隧道距离本基坑最近约 11.0 m,道路边有雨水管、给水管、燃气管、污水管、通信等管线经过;基坑西侧为

南施街,基坑距南施街人行道最近约 7.0 m,道路边有雨水管、给水管、燃气管等管线经过;基坑东侧及南侧为中央河,河道距离基坑最近约 13.0 m,河面绝对标高为 1.00 m,河底标高为-1.1 m。基坑周边环境、基坑分区及监测点示意图见图 1。基坑周边环境条件复杂,基坑开挖后,地铁侧要求地铁结构设施绝对沉降及水平位移量≤20 mm;隧道变形的曲率半径 R≥15 000 m;相对弯曲≤1/2500;隧道外壁附加荷载≤20 kPa,保护要求极高。

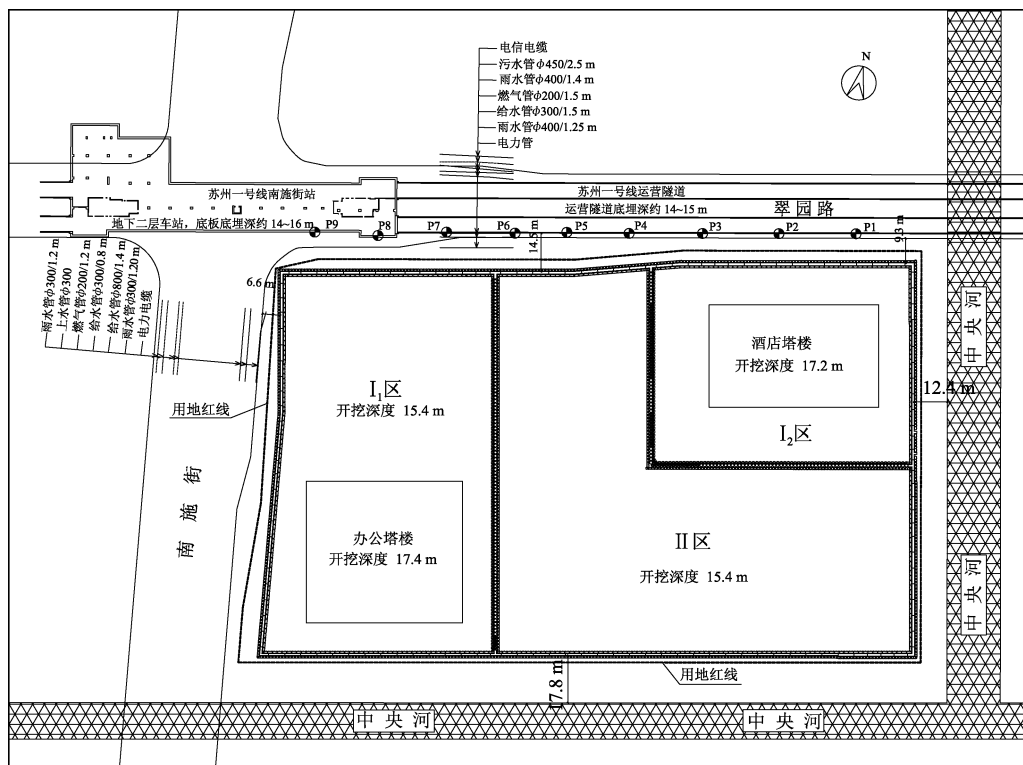


图 1 基坑周边环境、基坑分区及监测点示意图

1.2 地质概况

本工程基坑开挖影响范围内的土层自上而下依次为:①素填土、②粘土、③粉质粘土夹粉土、④粉

质粘土夹粉土、④<sub>2</sub>粉质粘土、④<sub>3</sub>粉质粘土夹粉土、⑤粉质粘土、⑥<sub>1</sub>粘土、⑥<sub>2</sub>粉质粘土、⑦粉质粘土、⑧粉质粘土夹粉土。各层土的物理力学性质指标见表 1。

表 1 土层物理力学性质指标

层号	土层名称	层厚 /m	含水量 w/%	重度 γ/(kN·m <sup>-3</sup> )	压缩模量 E <sub>s</sub> /MPa	固结快剪		渗透系数	
						c <sub>k</sub> /kPa	φ <sub>k</sub> /°	k <sub>v</sub> /(cm·s <sup>-1</sup> )	k <sub>H</sub> /(cm·s <sup>-1</sup> )
① <sub>1</sub>	素填土	0.7~5.0	34.9	18.5	4.07	12.0	10.0	4.9E-05	5.1E-05
②	粘土	0.6~3.8	28.3	19.7	6.15	41.9	10.3	4.7E-08	5.3E-08
③	粉质粘土夹粉土	1.8~4.5	29.8	19.4	6.33	37.3	11.5	9.5E-05	1.5E-04
④ <sub>1</sub>	粉质粘土夹粉土	3.0~5.1	34.1	18.8	4.09	23.9	11.8	4.6E-04	6.4E-04
④ <sub>2</sub>	粉质粘土	2.2~5.5	31.1	19.3	5.14	31.8	11.9	4.5E-06	5.7E-06
④ <sub>3</sub>	粉质粘土夹粉土	1.4~6.1	30.9	19.2	6.72	25.6	13.0	7.7E-05	1.2E-04
⑤	粉质粘土	3.7~8.8	30.8	19.3	5.07	31.6	12.1	4.0E-06	5.2E-06

续表

层号	土层名称	层厚/m	含水量 $w/\%$	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	压缩模量 $E_s/\text{MPa}$	固结快剪		渗透系数	
						$c_k/\text{kPa}$	$\varphi_k/(\text{°})$	$k_v/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	$k_H/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
⑥ <sub>1</sub>	粘土	1.5~5.7	24.3	20.3	7.58	54.1	10.5	4.5E-08	5.5E-08
⑥ <sub>2</sub>	粉质粘土	2.3~6.0	30.2	19.4	6.78	36.1	12.0	4.6E-06	6.2E-06
⑦	粉质粘土	2.0~7.3	31.9	19.0	6.03	31.6	12.9	4.6E-06	6.2E-06
⑧	粉质粘土夹粉土	3.0~10.4	32.0	18.8	5.91	29.9	14.4	1.1E-04	1.6E-04

### 1.3 水文地质概况

场地对本工程有影响的地下水有四层:①潜水、②微承压水、③第Ⅰ承压含水层及第Ⅱ承压含水层。拟建场地浅层孔隙潜水赋存于表层填土层中,分布不均匀,水量小。主要接受大气降水补给,以侧向排泄于河湖为主要排泄途径,水位随季节变化明显。勘察期间测得稳定水位标高为0.91~1.35 m。场地内较浅的微承压水主要贮存于③粉质粘土夹粉土及④粉质粘土夹粉土与粉土夹粉质粘土系列土层中,主要接受侧向径流补给及越流补给。测得稳定水头标高为0.17~0.35 m。本场地承压水主要赋存于⑧层中,主要接受径流及越流补给,埋藏深。勘察期间测得该含水层稳定水头标高为-1.50~-2.00 m。

### 2 支护结构设计

本基坑开挖深度深,开挖面积大,基坑北侧紧邻地铁,保护要求高,基坑北侧边长超过250 m,如此大规模的基坑如同时大面积开挖,势必会引起基坑周边产生较大的变形,特别是基坑的长边,由于长边

效应,在基坑长边中部的变形往往会达到最大。为减小基坑开挖对地铁的影响,本基坑利用时空效应,采取分坑施工。把整个基坑划分为3个区域(见图1),先施工塔楼所在的Ⅰ区,在Ⅰ区施工至±0.00后再开挖施工Ⅱ区,按如此分区,既能保证塔楼的施工进度,又能较好地解决施工场地的布置问题,并且,通过分区施工,基坑的长边分为了3个区段先后施工,可以减少基坑大面积一次性开挖卸载对北侧地铁设施的扰动影响。

综合考虑本工程的周边环境条件、工程地质情况、基坑开深度及经济性等因素,本基坑外围均采用地下连续墙,地铁侧地下连续墙同地下室结构墙形成复合墙,其余三侧地下连续墙与地下室结构外墙采用两墙合一的形式,基坑中隔墙采用钻孔灌注桩十三轴水泥土搅拌桩止水帷幕的形式。基坑沿竖向设置三道钢筋混凝土支撑,支撑采用对撑+角撑的布置形式,下加立柱桩作为水平支撑的竖向支撑体系。基坑围护体剖面见图2。

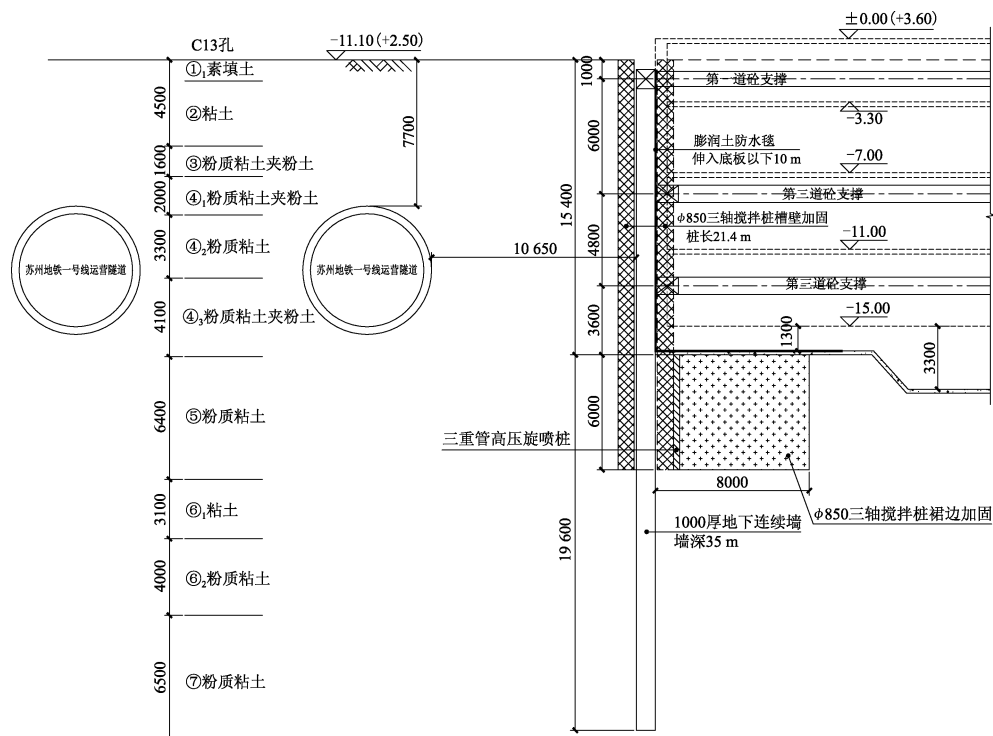
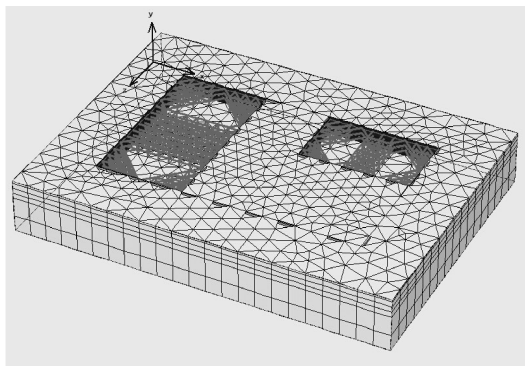


图2 基坑围护体剖面图

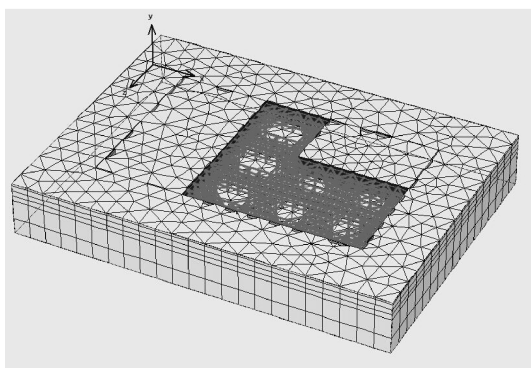
### 3 三维有限元模拟

#### 3.1 有限元模型建立

分别建立分坑开挖和不分坑开挖三维有限元模型,经模拟试算,确定模型尺寸为  $350\text{ m} \times 250\text{ m} \times 50\text{ m}$ ,土体单元采用 15 节点的轴对称模型来模拟,板单元采用 8 节点三维板单元,梁、桩采用 3 节点空间梁单元,梁、板、桩按弹性体考虑。模拟计算模型采用硬化土模型(Hardening-Soil 模型)。模型分别见图 3、图 4。



(a)



(b)

图 3 三维有限元模型图(分区)

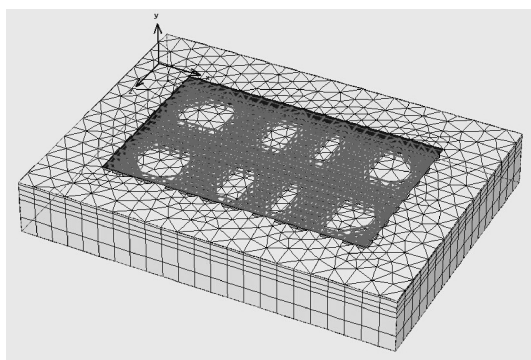


图 4 三维有限元模型图(不分区)

#### 3.2 土体参数的确定

数值分析选用合适的本构模型及计算参数,是有限元模拟计算结果是否合理的关键。土体硬化本

构模型能考虑软粘土的硬化特征、能区分加荷和卸荷的区别,且其刚度依赖于应力历史和应力路径,计算结果能同时给出较为合理的墙体变形及墙后土体变形,适合于复杂环境下的基坑开挖数值分析<sup>[3]</sup>。土体硬化模型主要参数包括:粘聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$ 、剪胀角  $\psi$ 、标准排水三轴试验中的割线刚度  $E_{50}^{\text{ref}}$ 、主固结仪加载中的切线刚度  $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ 、卸载/重新加载刚度  $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 、泊松比  $\nu_{\text{ur}}$ 、刚度参考应力  $p^{\text{ref}}$ 、正常固结下  $K_0$ 、破坏比  $R_f$ 。根据王卫东等对基坑开挖数值分析中土体硬化模型参数的试验研究<sup>[4]</sup>,粘聚力、内摩擦角取本项目勘察报告固结快剪指标;标准排水三轴试验中的割线刚度  $E_{50}^{\text{ref}}$ 及主固结仪加载中的切线刚度  $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ 取  $0.9 \sim 1.1$  倍  $E_{s1-2}$ (土体压缩模量);卸载/重新加载刚度  $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 取 8 倍标准排水三轴试验中的割线刚度  $E_{50}^{\text{ref}}$ ;泊松比  $\nu_{\text{ur}}$ 、刚度参考应力  $p^{\text{ref}}$ 、破坏比  $R_f$ 、剪胀角  $\psi$  采用 Plaxis 软件模型手册<sup>[5]</sup>中的建议值,分别取  $0.2$ 、 $100\text{ kPa}$ 、 $0.9$ 、 $0$ ;  $K_0$  可由  $K_0 = 1 - \sin\varphi$  计算得出。

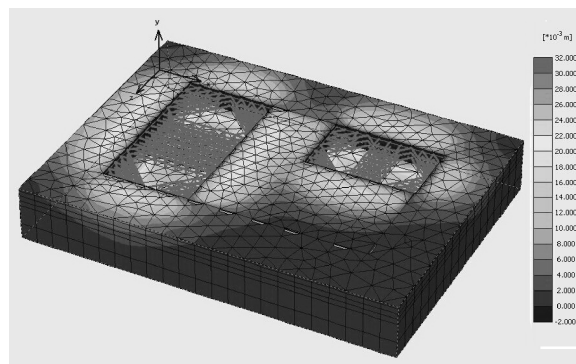
#### 3.3 开挖工况模拟

通过在计算开始之前将土体应力设定为其自重应力并令其初始位移为零来实现土体单元的自重应力的模拟。基坑施工工况的模拟可通过有限元程序中的“杀死”和“激活”功能来实现。基坑开挖共分 7 个工况来完成。

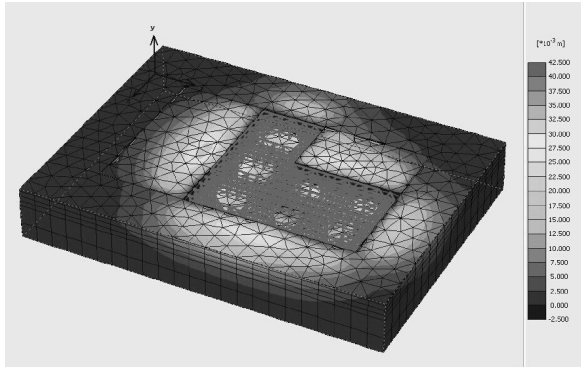
- 工况 1: 第一层土方开挖到标高  $-2.5\text{ m}$ ;
- 工况 2: 在  $-2.0\text{ m}$  安装第一道支撑;
- 工况 3: 第二层土方开挖到标高  $-7.5\text{ m}$ ;
- 工况 4: 在  $-7.0\text{ m}$  安装第二道支撑;
- 工况 5: 第三层土方开挖到标高  $-12.5\text{ m}$ ;
- 工况 6: 在  $-12.0\text{ m}$  安装第三道支撑;
- 工况 7: 第四层土方开挖到标高  $-17.0\text{ m}$ 。

#### 3.4 模拟计算结果及其分析

通过模型计算分析,各模型的计算结果见图 5、图 6。



(a)



(b)

图5 三维有限元计算结果(分区)

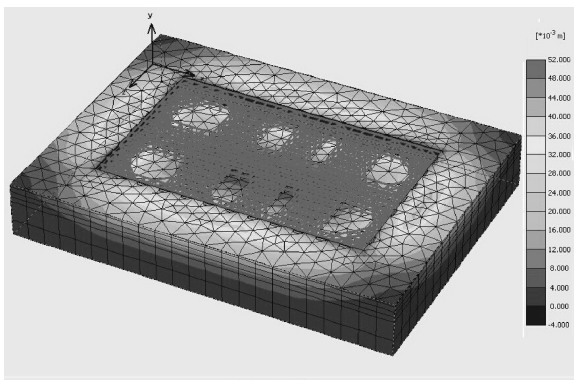


图6 三维有限元计算结果(不分区)

通过对本基坑分区开挖和整体开挖有限元数值模拟对比分析,图5为分区开挖到坑底后的变形云图,图6为整体开挖到坑底后的变形云图。从图中可以看出,分区开挖基坑周边的变形明显小于整体开挖时基坑周边的变形。在工况7下,分区施工和整体施工时地铁侧各位移控制点(P1—P9,见图1)的位移见图7。

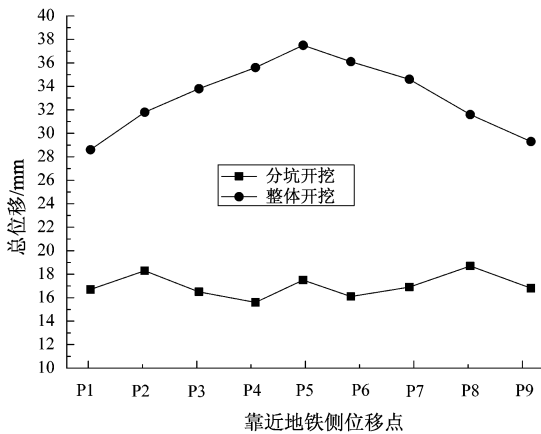


图7 分区开挖和整体开挖位移对比分析

从图中可以看出,基坑整体开挖时,在基坑中部P5点的位移最大,达到37.5 mm,从基坑的中部到两侧位移逐渐变小;基坑分区开挖时,各点的总位移约为整体开挖时的50%,在各分区的中部位移达到最大,P2、P5、P8点的总位移分别是18.3 mm、17.5 mm、18.7 mm。从以上的数据可以看出,本基坑的长边效应比较明显。在软土地区的基坑中,由于土体具有流变的特性,基坑的变形和时间密切相关。此外,基坑的变形还与土方开挖的空间顺序相关<sup>[6]</sup>。基坑时空效应中的时间效应,主要体现在基坑底下的被动区土体在基坑开挖卸荷后会因坑底暴露时间过长而产生相当的流变位移,从而引起周围地层的位移的增大<sup>[7]</sup>。空间效应主要体现在土方开挖卸荷范围及地下应力的变化,引起坑底土体的回弹,从而引起基坑围护体自身及周边土体变形的增大。分区施工通过减少基坑开挖卸荷的范围以及减少基坑开挖后暴露的时间,能有效减小基坑周边的变形。

#### 4 实测与模型计算结果对比分析

##### 4.1 现场实测

本基坑周边环境复杂,对基坑北侧地铁一号线的保护为本基坑应重点考虑的问题。本基坑采取分区施工,为分析三维有限元模型数值分析的可靠性,根据本基坑的监测成果,在地铁侧抽取地表沉降监测点P2、P5、P8(见图1)的沉降情况,与三维有限元计算结果进行对比分析。

##### 4.2 监测结果与模型数值分析结果对比

根据图1中的监测点布置,取P2、P5、P8为例加以分析,图8—图10分别为其对应工况下的地铁侧地表沉降示意图。从图中可以看出,地铁侧各点的实测沉降值变化趋势与模型数值分析沉降值基本吻合,地铁侧累计沉降量均不超过20mm,满足地铁相关保护要求。开挖到坑底工况,部分监测点的实测累计沉降量比模型数值分析得出的沉降量偏大,出现这种现象一方面是因为基坑开挖到坑底后,施工难度加大,土方开挖及出土速度变慢,坑底暴露时间相对加长,从而导致围护结构及基坑周边变形加大;另一方面是由于地铁1号线已进入试运营阶段,地铁震动荷载会对地面沉降产生一定的影响。

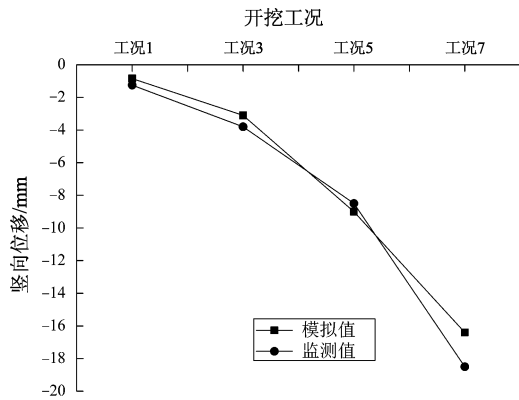


图8 P2点模型分析沉降与实测沉降对比

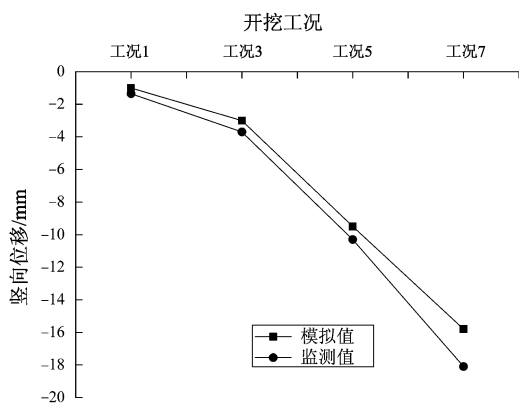


图9 P5点模型分析沉降与实测沉降对比

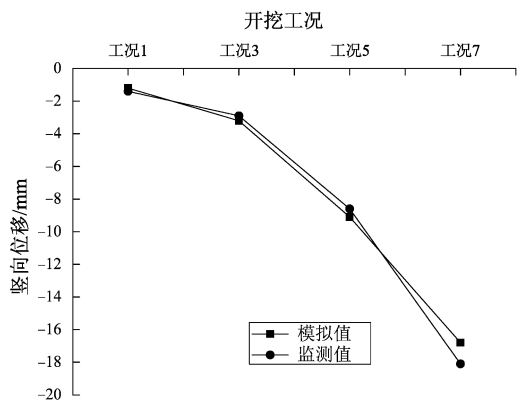


图10 P8点模型分析沉降与实测沉降对比

## 5 结论

1) 三维有限元能考虑基坑开挖的时空效应, 利用硬化土模型(Hardening-Soil)能较好地反应土体的性状, 能充分反映基坑开挖对基坑周边环境的影响, 适用于特大基坑在复杂环境中的数值模拟分析。

2) 超大规模的深基坑, 特别是对于长边较长的基坑, 因为基坑的长边效应, 在基坑长边的中部变形往往最大。

3) 分区施工充分利用时空效应, 减少基坑开挖卸荷的范围及减少基坑开挖后暴露的时间, 从而减小被动区土体的蠕变和松弛, 能有效减小基坑周边的变形。

4) 基坑通过合理分区, 把主楼分为一区先施工, 裙房等后施工, 既能保证主楼的施工进度, 又能解决施工场地的布置问题, 对以后类似工程具有指导意义。

## 参 考 文 献

- [1] DG/TJ 08—61—2010 基坑工程技术规范[S]. 上海: 上海市城乡建设和交通委员会, 2010.
- [2] 侯永茂, 王建华, 陈锦剑. 超大型深基坑开挖过程三维有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(S): 1374-1377.
- [3] 徐中华, 王卫东. 敏感环境下基坑数值分析中土体本构模型的选择[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 258-264.
- [4] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 基坑开挖数值分析中土体硬化模型参数的实验研究[J]. 岩土力学, 2012, 8(1): 2283-2290.
- [5] BRINKGREVE R B J, BROERE W. Plaxis material models manual[M]. Delft: [s. n.], 2006.
- [6] 王卫东, 李进军, 徐中华. 敏感环境条件下深基坑工程的设计方法[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(S): 349-354.
- [7] 刘爱华, 黎 鸿, 罗荣武. 时空效应理论在软土深基坑施工中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(3): 571-576.

收稿日期: 2014-08-18