

# 软土地区邻近既有建筑半盖挖深基坑变形特征

徐 健<sup>1</sup> 周子涵<sup>2</sup> 王林枫<sup>2</sup> 周小涵<sup>2</sup>

(1. 南京地铁建设有限责任公司, 210005, 南京; 2. 重庆大学土木工程学院, 400045, 重庆//第一作者, 高级工程师)

**摘 要** 为研究邻近既有建筑的半盖挖深基坑变形特性及环境效应,以南京地铁5号线山西路站的软土地区半盖挖深基坑工程为例,将基础形式、支护形式等作为变量,设计了8种数值模拟工况进行分析。研究表明:既有建筑使基坑一侧产生偏压导致地连墙侧移曲线整体向基坑内移动,盖板与地连墙的刚性连接使其顶部发生翘曲,地连墙嵌入岩层限制了底部侧移量,改变了地连墙下端侧移曲线形状;坑外地面沉降曲线受建筑及基础形式影响较大,受盖板和地连墙深度影响较小;基坑开挖主要影响墙后2倍深度以内三角形区域的土体沉降,既有建筑地下室和桩基础能有效控制建筑靠近基坑一侧土体的沉降大小及范围。

**关键词** 地铁; 软土地区; 半盖挖施工; 深基坑变形

**中图分类号** TU447:TU433

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.01.014

## Deformation Characteristics of Semi-covered Deep Foundation Pit Adjacent to Existing Buildings in Soft Soil Area

XU Jian, ZHOU Zihan, WANG Linfeng, ZHOU Xiaohan

**Abstract** To study the deformation characteristics and environmental impact of semi-covered deep foundation pit adjacent to existing buildings, taking the foundation pit engineering in soft soil area of Nanjing Metro Line 5 Shanxi Road Station as example, and adopting foundation form and support form as variables, 8 groups of numerical simulation working conditions are designed and analysed. Research results show that existing buildings cause eccentric loads on one side of the foundation pit, leading to the overall movement of diaphragm wall lateral curve into the pit. The rigid connection between cover plate and diaphragm wall makes the wall top warp, and the embedment of diaphragm walls into rock stratum limits the lateral movement of the bottom and changes the shape of diaphragm wall bottom lateral curve. The land subsidence curve outside the pit is greatly influenced by the form of building and its foundation, and has little relation with cover plate and depth of diaphragm walls. The foundation pit excavation mainly affects soil settlement in the triangular area within 2 times of depth be-

hind the wall, and the existing building basement and pile foundation can effectively control the soil settlement size and scope on the side of the building close to foundation pit.

**Key words** metro; soft soil area; semi-covered excavation; deep foundation pit deformation

**First-author's address** Nanjing Metro Construction Co., Ltd., 210005, Nanjing, China

近年来,由于城市建设和经济发展的需要,特别是城市轨道交通建设的迅速发展,深基坑工程大量涌现。软土地区实施的深基坑工程往往容易产生较大的变形。目前,越来越多的学者开始关注基坑开挖与既有建(构)筑物的相互影响问题。文献[1]分析了与基坑边呈不同角度条件下的浅基础框架建筑受基坑开挖的影响。文献[2]结合深厚软黏土地区某地铁车站深基坑工程进行了系统性监测及结果分析,总结了基坑变形与开挖深度之间的关系。文献[3]基于某地铁车站深基坑工程现场监测数据,分析了自基坑开挖到主体结构施作不同阶段引发的邻近建筑沉降值比例关系。文献[4]通过数值模拟的方法,拟合了围护结构最大侧移值与地面最大沉降值之间的关系。文献[5-6]基于宁波地区轨道交通工程现场监测数据,提出了城市轨道交通深基坑周边建筑物安全评判方法与施工对周边建筑物影响的简化预测分析方法。

城市用地紧张、施工工期限制、变形控制要求及交通往来需求等因素使得兼顾明挖和盖挖优点的半盖挖基坑施作方法获得了广泛的应用<sup>[7-10]</sup>,因此有必要对半盖挖基坑变形特性及其环境效应进行深入研究。由于盖板和上方交通荷载,半盖挖深基坑往往承受较大的偏压,而同侧存在既有建筑的情况加剧了这种非对称偏压,此时基坑和支护结构变形与稳定情况尚不明了。本文以南京地铁5号线山西路站的软土地区半盖挖深基坑工程

为例,采用数值模拟方法,将基础形式、支护形式等作为变量,设计了 8 组数值模拟工况进行分析研究。本研究旨在为相关工程提供一定的借鉴与参考。

## 1 工程概况

### 1.1 工程背景

南京地铁 5 号线山西路站为一座地下二层岛式车站,基坑位置及周边建筑物情况如图 1 所示。车站长为 272.80 m,主体结构标准段宽为 21.10 m,顶板覆土厚约 3.08 m,标准段基坑深度为 16.60 m。南端头井宽为 25.30 m,顶板覆土厚约 3.07 m,基坑深度约为 17.93 m。北端头井宽为 25.30 m,顶板覆土厚约为 3.21 m,基坑深度约为 18.13 m。基坑采用 800 mm 厚地下连续墙,标准段和端头井地连墙入土深度分别为 13.50 m 和 14.50 m,地连墙底位于粉质黏土中。受场地限制,采用左线半幅铺盖疏解交通。坑内共设置 4 道支撑,其中第 1 道为混凝土支撑,截面尺寸为 800 mm×1 000 mm,深度为 0.5 m,第 2 道—第 4 道支撑为  $\phi$  609 mm(厚度为 16 mm)钢支撑,其深度分别为 5.50 m、10.00 m、13.50 m。基坑开挖遵循先撑后挖的原则,开挖到对应支撑深度后立即施作支撑,再进行后续土体的开挖。半盖挖基坑支护体系示意图如图 2 所示。

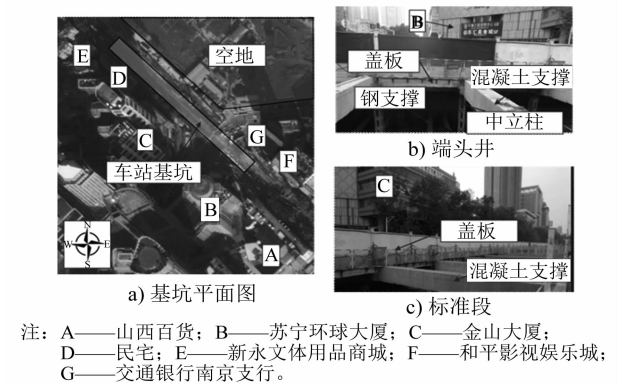


图 1 基坑位置及其周边建筑物情况

Fig. 1 Foundation pit location and surrounding environment condition

### 1.2 工程及水文地质条件

基坑处于秦淮河漫滩平原区,软土、砂土发育,地层自上而下依次为:①杂填土;②素填土;③粉砂;④淤泥质粉质黏土;⑤粉质黏土;⑥强风化安山岩;⑦中风化安山岩。

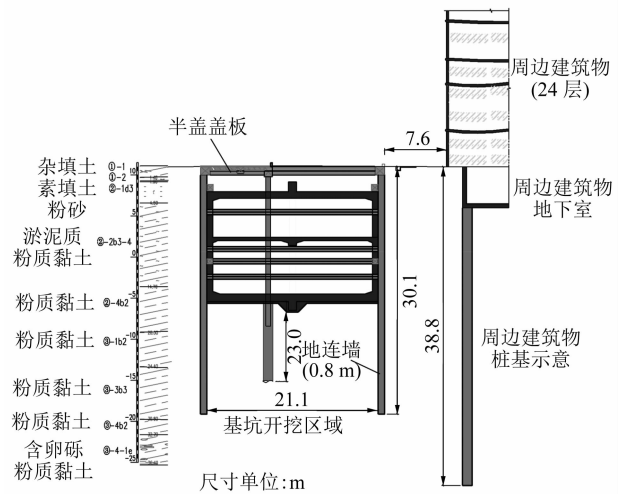


图 2 半盖挖基坑支护体系示意图

Fig. 2 Diagram of support system for semi-covered excavation foundation pit

基坑处于饱和弱透土层中,实测场地地下水位为 1.2~2.6 m,年变化幅度约为 1.0 m。浅部松散层中透水层主要为填土层,其余地层透水性弱,为相对不透水层。

### 1.3 周边环境

基坑周边主要建筑物概况如表 1 所示,深基坑周边建筑物位置关系平面图如图 3 所示。

| 表 1 基坑周边主要建筑物概况   |            |        |       |   |
|---|------------|--------|-------|---|
| Tab. 1 Overview of main buildings around foundation pit |            |        |       |   |
| 建筑物名称   | 建筑物距基坑距离/m | 上层建筑层数 | 地下室层数 | 建筑物结构形式   |
| A   | 南 7.1      | 6      | 0     | 框架结构,预制方桩基础(边长为 450 mm,桩长为 36 m)                            |
| B   | 南 25.6     | 8      | 3     | 框-剪结构,地下室埋深 13 m,钻孔灌注桩基础(桩径为 800 mm 或 1 200 mm,桩长为 25.0 m)  |
| C   | 南 15.4     | 35     | 3     | 框架结构,地下室埋深 14 m,钻孔灌注桩基础(桩径为 1 000 mm 或 1 200 mm,桩长为 30.0 m) |
| D   | 南 10.8     | 4      | 0     | 砖混结构,浅基础  |
| E   | 南 7.8      | 7      | 0     | 砖混结构,浅基础  |
| F   | 北 6.5      | 5      | 1     | 框架结构,地下室埋深 13 m,钻孔灌注桩基础(边长为 450 mm,桩长为 23.0 m 或 25.0 m)     |
| G   | 北 6.7      | 24     | 1     | 框架结构,地下室埋深 5.5 m,钻孔灌注桩基础(桩径为 1 200 mm,桩长为 33.8 m)           |

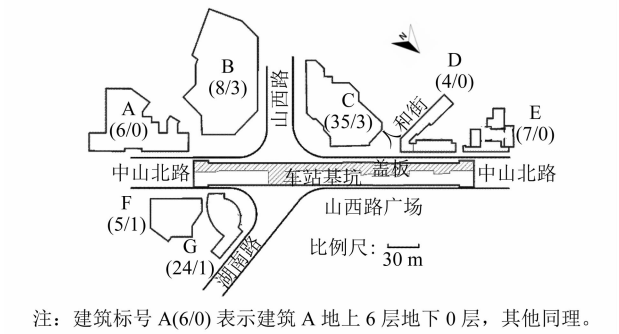


图 3 深基坑周边建筑物位置关系

Fig. 3 Location relation of buildings around deep foundation pit

| 表 2 地层物理力学参数                                 |         |        |                                 |      |           |          |               |                |                |                  |                           |                |
|--|---------|--------|---------------------------------|------|-----------|----------|---------------|----------------|----------------|------------------|---------------------------|----------------|
| Tab. 2 Stratum physical mechanics parameters |         |        |                                 |      |           |          |               |                |                |                  |                           |                |
| 层数   | 土质      | 平均深度/m | $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$ | $M$  | $\lambda$ | $\kappa$ | $\nu_\lambda$ | $K/\text{MPa}$ | $G/\text{MPa}$ | $c_u/\text{kPa}$ | $\varphi/(\text{^\circ})$ | $T/\text{MPa}$ |
| ①  | 杂填土     | 1.0    | 22.0                            | —    | —         | —        | —             | 7.8            | 3.0            | 5.0              | 25.0                      | 0              |
| ②  | 素填土     | 1.0    | 18.5                            | —    | —         | —        | —             | 11.1           | 2.9            | 10.0             | 10.0                      | 0              |
| ③  | 粉砂      | 7.0    | 19.6                            | —    | —         | —        | —             | 13.2           | 5.7            | 6.2              | 32.1                      | 0              |
| ④  | 淤泥质粉质黏土 | 8.0    | 17.6                            | 0.98 | 0.128     | 0.024    | 3.3           | —              | 2.2            | 14.4             | —                         | —              |
| ⑤  | 粉质黏土    | 15.0   | 19.5                            | 1.13 | 0.088     | 0.017    | 3.3           | —              | 4.6            | 35.5             | —                         | —              |
| ⑥  | 强风化安山岩  | 3.0    | 22.0                            | —    | —         | —        | —             | 80.2           | 52.8           | 100.0            | 33.0                      | 7.0            |
| ⑦  | 中风化安山岩  | —      | 25.7                            | —    | —         | —        | —             | 8 064.0        | 6 302.0        | 300.0            | 36.0                      | 10.0           |

注： $\gamma$  为重度； $M$  为临界状态线斜率； $\lambda$  和  $\kappa$  为固结曲线和回弹曲线斜率； $\nu_\lambda$  为体积比容； $K$  为体积模量； $G$  为剪切模量； $c_u$  为有效黏聚力； $\varphi$  为内摩擦角； $T$  为抗拉强度。

| 表 3 支护结构参数                             |                        |                                   |              |     |
|--|------------------------|-----------------------------------|--------------|-----|
| Tab. 3 Supporting structure parameters |                        |                                   |              |     |
| 支护结构                                   | 尺寸                     | 密度/<br>( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) | 弹性模量/<br>GPa | 泊松比 |
| 地下连续墙                                  | 800 mm                 | 2 500                             | 30           | 0.2 |
| 混凝土盖板                                  | 300 mm                 | 2 500                             | 30           | 0.2 |
| 混凝土支撑                                  | 800 mm×1 000 mm        | 2 500                             | 30           | 0.2 |
| 混凝土立柱桩                                 | $\phi$ 1 000 mm        | 2 500                             | 30           | 0.2 |
| 钢支撑                                    | $\phi$ 609 mm×16 mm(厚) | 7 800                             | 200          | 0.3 |
| 钢格构柱                                   | 500 mm×500 mm          | 7 800                             | 200          | 0.3 |

| 表 4 接触面参数                         |                  |                  |             |                       |
|-----------------------------------|------------------|------------------|-------------|-----------------------|
| Tab. 4 Contact surface parameters |                  |                  |             |                       |
| 接触面位置                             | 法向刚度/<br>(GPa/m) | 切向刚度/<br>(GPa/m) | 黏聚力/<br>kPa | 内摩擦角/<br>( $^\circ$ ) |
| 地连墙侧面                             | 0.016            | 0.016            | 10          | 16                    |
| 地连墙底部                             | 0.150            | 0.150            | 70          | 23                    |

## 2.2 确定盖板荷载

根据 JGJ 120—2012《建筑基坑支护技术规程》及场地实际情况,围挡外侧 5 m 范围、地连墙外 4 m 范围用于交通行车,按照普通行车荷载施加 20 kPa 的均布荷载。围挡外侧 5 m 范围内行走渣土车,按

## 2 建立数值计算模型

### 2.1 确定模型参数

采用有限差分法软件 FLAC3D 5.0 进行建模计算。模型中淤泥质粉质黏土和粉质黏土采用修正剑桥模型进行计算,其余土层和岩层采用摩尔-库伦模型进行计算。地层物理力学参数如表 2 所示。支护结构采用弹性本构,其参数如表 3 所示。建筑参数与地连墙相同,桩基础尺寸及参数与混凝土立柱桩相同。接触面参数如表 4 所示。高层建筑地下室侧面接触面参数与地连墙侧面相同,底面接触面参数与地连墙底面相同。

照集中荷载的形式施加在盖板上。根据 CJJ 77—1998《城市桥梁设计荷载标准》以及山西路地铁车站设计文件,临时路面铺盖系统荷载采用城-A 级车辆荷载标准。车辆荷载的冲击力计算方法为自重荷载乘以  $(1+\mu)$ ,其中  $\mu$  为冲击系数,其值最大不得超过 0.4。冲击系数计算公式为:

$$\mu = 0.668\,6 - 0.303\,21 \lg L \quad (1)$$

式中:

$L$ ——上部构造的跨径,m。

上部盖板的跨径为 10 m,可以计算得出  $\mu = 0.365\,39$ ,取  $\mu = 0.37$  进行计算。计算模型中的盖板荷载分布示意图如图 4 所示。

### 2.3 数值计算模型

考虑边界效应,确定模型尺寸为 171.0 m(长)×154.0 m(宽)×50.0 m(高)。建筑 D 位于基坑盖板侧距离基坑边缘 10.8 m 处,距基坑最远距离为 30.8 m;建筑 C 位于基坑盖板侧距离基坑边缘 15.8 m 处,距基坑最远距离为 45.8 m。数值计算模型如图 5 所示。模型四周约束法向变形,底部约束各向变形,顶部不施加约束。盖板及地连墙外 4.0 m 范围

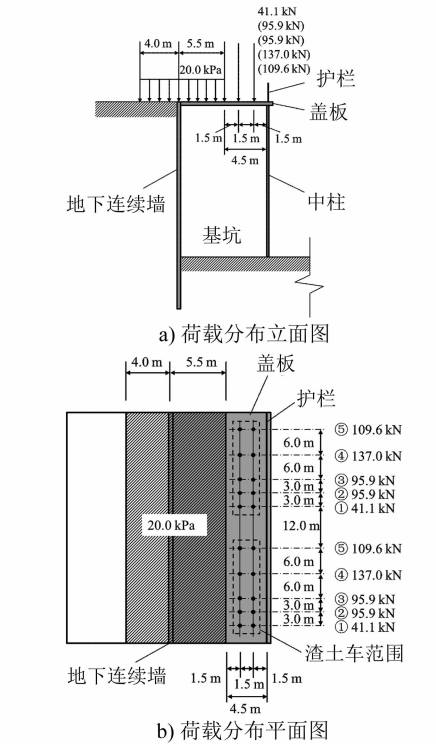


图 4 计算模型中的盖板荷载分布示意图

Fig. 4 Diagram of cover plate load distribution in calculation model

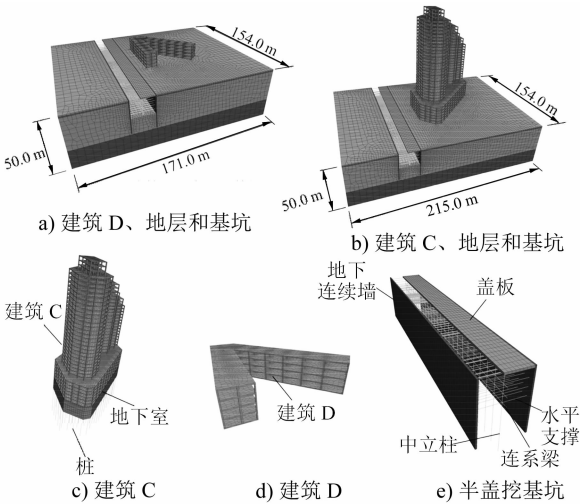


图 5 数值计算模型

Fig. 5 Numerical calculation model

内施加盖板荷载。在钢支撑与地连墙连接处施加向基坑外的集中力以模拟钢支撑预加轴力,其大小为:第 1 道钢支撑施加 800 kN 预加轴力,第 2 道和第 3 道钢支撑施加 600 kN 预加轴力。

模拟过程中考虑基坑的分步开挖与支护,支撑采用梁单元模拟,中立柱及抗拔桩采用桩单元模

拟,盖板采用实体单元模拟,并与地连墙刚接。模型地应力平衡且位移清零后,施作地连墙及中柱,然后开挖至第 1 道支撑底面,施作第 1 道混凝土支撑及盖板,随后依次开挖至第 2 道、第 3 道、第 4 道支撑底并施作支撑,最后开挖至基坑底。

### 3 计算结果与现场监测数据对比

#### 3.1 建筑 D 的位移

开挖完成后,对比地连墙侧移与建筑 D 的竖向位移数值模拟结果与实际监测值,如图 6 所示。由图 6 可知,数值模拟结果与实际监测值较为吻合,受建筑荷载和盖板及行车荷载的影响,两侧地连墙顶部有向基坑无建筑侧移动的趋势,顶部侧移量约为 5~10 mm。建筑侧地连墙最大侧移达到了 25 mm 左右,无建筑侧最大侧移不超过 20 mm,最大侧移位置在开挖面附近。由于地连墙未嵌岩,底部发生了一定向基坑内的侧移。在位移方面,建筑 D 的第二部分建筑物位移模拟值与监测值吻合得较好,第一部分建筑物位移模拟值要小于监测值(见图 6 b)),原因在于建筑 D 呈 L 型,分为两段施工,第一部分平行于基坑方向且处于基坑开挖主要影响区,受基坑开挖影响较大,模拟中未考虑建筑 D 的实际

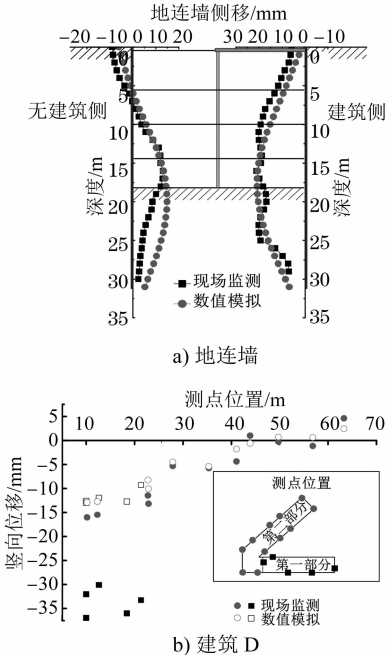


图 6 地连墙侧移与建筑 D 竖向位移数值模拟结果与实际监测值对比

Fig. 6 Comparison between numerical simulation and field monitoring results of diaphragm wall lateral displacement and building D vertical displacement

施工分段,建筑沉降结果较为均匀。受建筑刚度影响,距离基坑越近,建筑物沉降越大,沉降值与距离呈明显的线性关系。建筑远端由于建筑物的整体偏转发生向上的隆起。

3.2 建筑 C 的沉降

开挖完成后,对比地连墙侧移与建筑 C 的沉降数值模拟结果与实际监测值,如图 7 所示。由图 7 可知,建筑和盖板荷载导致地连墙顶部向无建筑侧移动,但其地连墙侧移量要大于建筑 D。由于建筑体量大导致荷载较大,两侧地连墙变形差异更为显著。在沉降方面,数值模拟与监测结果吻合得较好。与建筑 D 相比,由于地下室和桩基的作用,基坑开挖引起的建筑 C 沉降较小。此外,由于建筑 C 体量大、结构复杂,其沉降表现出更明显的空间效应。

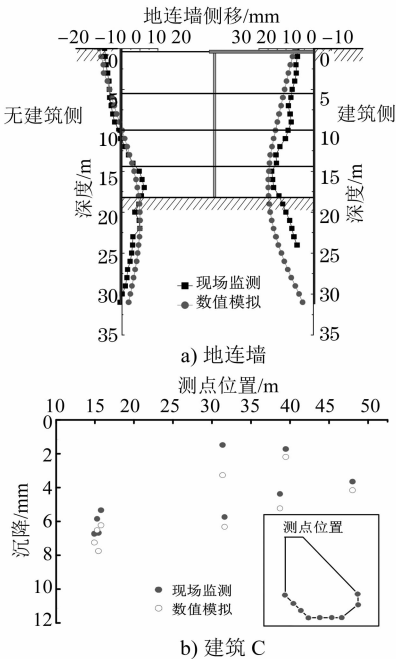


图 7 地连墙侧移与建筑 C 沉降数值模拟结果与实际监测值对比

Fig. 7 Comparison between numerical simulation and field monitoring values of diaphragm wall lateral displacement and building C subsidence

4 变形影响因素分析

4.1 计算工况

在前文数值模拟基础上,进一步研究盖板、地连墙深度等因素对软土地区邻近既有建筑情况下深基坑开挖变形的影响。各工况具体计算数值如表 5 所示。为了便于对比,建筑均布置在基坑盖板侧(或无盖板组同样位置)距离基坑边缘 10.0 m 处,距离基坑最远处距离为 30.0 m。

| 工况<br>编号 | 周边建筑       |           |             | 基坑支护形式    |             |
|----------|------------|-----------|-------------|-----------|-------------|
|          | 上层建筑<br>层数 | 地下室<br>层数 | 桩基础<br>长度/m | 有/无<br>盖板 | 地连墙<br>深度/m |
| 1        | 4          | 0         | 0           | 有         | 31          |
| 2        | 4          | 0         | 0           | 有         | 35          |
| 3        | 4          | 0         | 0           | 无         | 31          |
| 4        | 4          | 0         | 0           | 无         | 35          |
| 5        | 35         | 3         | 30          | 有         | 31          |
| 6        | 35         | 3         | 30          | 有         | 35          |
| 7        | 35         | 3         | 30          | 无         | 31          |
| 8        | 35         | 3         | 30          | 无         | 35          |

注:建筑荷载均为 15 kPa/层;地下室层高均为 4 m。

4.2 地连墙侧移

8 种计算工况下,建筑侧地连墙侧移曲线如图 8 所示。不同建筑基础形式下,盖板和地连墙深度对地连墙侧移的影响规律相同。盖板通过与地连墙间的刚性连接显著影响地连墙顶部以下 8 m 内的变形曲线,使顶部发生向基坑外的挠曲。地连墙嵌岩能极大地限制底部侧移,但其下半段的整体变形略有增大。由于桩基础建筑层高、建筑荷载大,导致其地连墙侧移量明显大于浅基础建筑。一方面其地连墙最大侧移量达到了 32~35 mm,大于浅基础建筑下的地连墙最大侧移量 25~27 mm;另一方面其顶部侧移量达到了 16~22 mm,大于浅基础建筑下的顶部侧移量 2~9 mm。此外,桩基础建筑下的地连墙最大侧移位置也稍有上升。

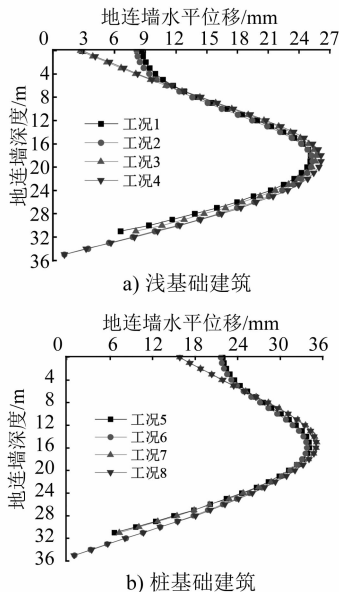


图 8 8 种计算工况下建筑侧地连墙侧移曲线  
Fig. 8 Lateral displacement curve of building side diaphragm wall under 8 calculation working conditions

综上所述,既有建筑使基坑侧产生偏压,并使地连墙侧移曲线整体发生向基坑内的移动;盖板主要影响地连墙顶变形,通过与地连墙的刚性连接使顶部发生翘曲;地连墙嵌入岩层可以限制自身底部侧移量,从而改变地连墙下端侧移曲线形状。既有建筑、盖板和地连墙嵌岩对地连墙侧移曲线影响示意图如图 9 所示。由图 9 可知:既有建筑使基坑侧产生偏压,并使地连墙侧移曲线整体发生向基坑内的移动;盖板主要影响地连墙顶变形,通过与地连墙的刚性连接使顶部发生翘曲;地连墙嵌入岩层可以限制自身底部侧移量,从而改变地连墙下端侧移曲线形状。若同时存在 2 个因素甚至 3 个因素,其对地连墙侧移曲线的影响可叠加。该结论可推广到一般情况。

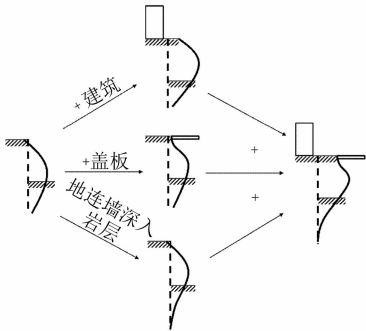


图 9 既有建筑、盖板和地连墙嵌岩对地连墙侧移曲线影响示意图

Fig. 9 Influence diagram of existing buildings, cover plate and diaphragm wall embedded in rock stratum on lateral displacement curve of diaphragm wall

### 4.3 地面沉降

8 种计算工况下,建筑侧坑外地面沉降如图 10 所示。由图 10 可知:坑外地面沉降受建筑基础形式影响显著,浅基础建筑下坑外地面沉降曲线呈典型“凹槽形”;最大沉降位置约为距离基坑 0.6 倍开挖深度处,最大沉降量相差不大,约为 16~18 mm;距离基坑 2 倍开挖深度后,地面沉降接近于 0;盖板会增大墙后约 0~4 m 内的土体沉降;地连墙嵌入岩层(地连墙深度为 35 m)后,坑外地面沉降比未嵌入岩层的地表沉降(地连墙深度为 31 m)稍大。与浅基础建筑相比,由于桩基础建筑刚度大,协调变形能力强,所以建筑位置的沉降变化趋近于直线。超高层建筑中,常采用箱型基础以取得较好的地面变形控制效果。桩基础建筑下,靠近基坑边缘的地面沉降要大于浅基础建筑,原因在于高层建筑荷载导致地连墙侧移更大,加剧了附近的土体沉降。

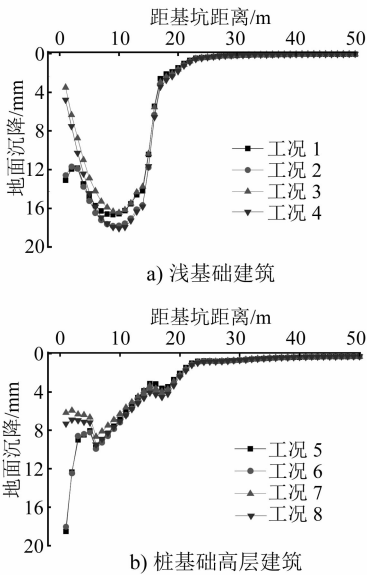


图 10 8 组计算工况下建筑侧坑外地面沉降

Fig. 10 Land subsidence of building side outside pit under 8 groups of calculation working conditions

两种建筑形式下,有盖板且地连墙深度为 31 m 时的坑外土体沉降云图如图 11 所示。由图 11 可知:基坑开挖主要影响墙后 2 倍开挖深度以内三角形区域的土体沉降;当既有建筑有地下室时,最大地面沉降发生在建筑靠近基坑一侧(与图 10 结论相符),此时建筑有向内倾倒的趋势。对比图 11 a)

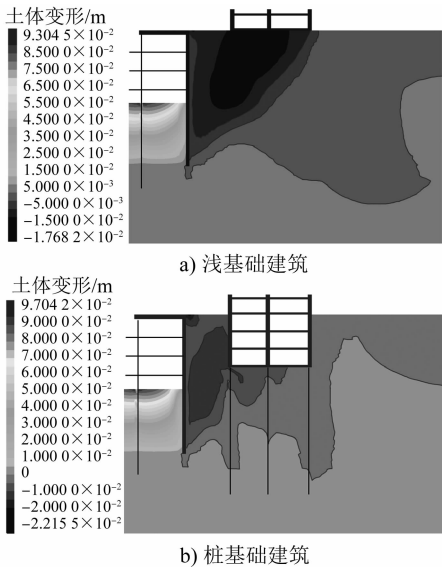


图 11 两种建筑形式下有盖板且地连墙深度为 31 m 时坑外土体沉降云图

Fig. 11 Settlement nephogram of soil outside the pit with cover plates and diaphragm wall depth of 31 m under two building forms

和图 11 b)可知;坑外存在浅基础建筑时,坑外土体沉降影响范围较大;而采用地下室和桩基础的建筑,尽管建筑层数更多,但地面沉降影响范围却大大缩小。图 11 进一步证明了既有建筑地下室具有协调变形能力,可以有效减小土体沉降,控制沉降范围。当桩基础较长时,可通过其与周围土体的摩擦及桩端承载力控制建筑与周围土体的沉降。

## 5 结语

本文以实际工程为例,采用数值模拟方法,针对浅基础建筑和桩基础建筑两种建筑形式,根据有无盖板、地连墙不同深度等因素,设计了 8 种计算工况,探讨了邻近既有建筑下半盖挖基坑开挖变形特征。主要获得以下结论:

1) 既有建筑与盖板偏压使地连墙顶向基坑内移动,其中盖板通过与地连墙间的刚性连接使顶部发生翘曲,导致顶部侧移增大约 6 mm。地连墙嵌入岩层限制了底部侧移,改变了地连墙下端侧移曲线形状,但对地连墙最大侧移量作用不大。由于桩基础建筑荷载较大,地连墙整体侧向变形更大。

2) 浅基础建筑附近的坑外地面沉降曲线呈典型“凹槽形”;桩基础建筑由于基础刚度大,坑外地面沉降呈直线,且其沉降量小于浅基础建筑。盖板显著影响地连墙外侧土体沉降,地连墙嵌固深度对地面沉降影响不大。

3) 基坑开挖主要影响墙后 2 倍开挖深度以内三角形区域的土体沉降。既有建筑地下室和桩基础的刚度较大,因此最大地面沉降发生在建筑靠近基坑一侧,二者能有效控制土体沉降大小以及沉降范围。

## 参考文献

- [1] 张治国,贾延臣,王卫东. 邻近建筑与基坑边成任意角度受基坑开挖影响分析[J]. 地下空间与工程学报,2015,11(增刊2):617.  
ZHANG Zhiguo, JIA Yanchen, WANG Weidong. Influence analysis of foundation pit excavation on building in arbitrary angle with foundation pit[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(S2): 617.
- [2] 刘念武,陈奕天,龚晓南,等. 软土深开挖致地铁站基坑及邻近建筑变形特性研究[J]. 岩土力学,2019,40(4):1515.  
LIU Nianwu, CHEN Yitian, GONG Xiaonan, et al. Analysis of deformation characteristics of foundation pit of metro station and adjacent buildings induced by deep excavation in soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(4): 1515.
- [3] 郑翔,汤继新,成怡冲,等. 软土地区地铁车站深基坑施工全

过程对邻近建筑物影响实测分析[J]. 建筑结构,2021,51(10):128.

ZHENG Xiang, TANG Jixin, CHENG Yichong, et al. Measured analysis on the impact of entire construction process of deep foundation pits of subway stations on neighboring buildings in soft soil areas[J]. Building Structure, 2021, 51(10): 128.

- [4] 彭志雄,周元刚. 深基坑开挖对临近建筑物相互影响效应分析[J]. 施工技术,2017,46(8):32.  
PENG Zhixiong, ZHOU Yuangang. Analysis on interaction between deep foundation excavation and adjacent buildings[J]. Construction Technology, 2017, 46(8): 32.
- [5] 龚迪快,成怡冲,汤继新,等. 城市轨道交通深基坑周边建筑物安全评判方法[J]. 城市轨道交通研究,2017,20(10):48.  
GONG Dikuai, CHENG Yichong, TANG Jixin, et al. Safety evaluation for the buildings around deep foundation pit of urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(10): 48.
- [6] 成怡冲,张挺钧,郑翔,等. 软土地区明挖隧道施工引起周边建筑沉降的预测方法[J]. 城市轨道交通研究,2018,21(10):62.  
CHENG Yichong, ZHANG Tingjun, ZHENG Xiang, et al. Prediction method of surrounding building settlement caused by open-excavated tunnel construction in soft soil area[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(10): 62.
- [7] 任建喜,马霖南,白进龙,等. 半幅铺盖法地铁车站基坑中立柱变形规律研究[J]. 铁道工程学报,2017,34(9):103.  
REN Jianxi, MA Jinan, BAI Jinlong, et al. Research on the deformation laws of center pillar of metro station excavated by semi-covered method[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(9): 103.
- [8] 刘守花,阳军生,高浩然,等. 半盖挖法偏压基坑中立柱受力与变形特征[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2019,47(6):86.  
LIU Shouhua, YANG Junsheng, GE Haoran, et al. Mechanical and deformation characteristics of erect column piles of bias foundation pit excavated by semi-covered method[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(6): 86.
- [9] 王申侠. 盖挖半逆作法地铁车站关键部位的受力及变形分析[J]. 城市轨道交通研究,2020,23(5):86.  
WANG Shenxia. Stress and deformation analysis of metro station key areas constructed with semi-reverse method of cover and excavation[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(5): 86.
- [10] 李华磊,王碧云. 半幅铺盖法施工的地铁车站基坑中铺盖体系的稳定性研究[J]. 城市轨道交通研究,2020,23(10):99.  
LI Hualei, WANG Biyun. Stability of the pavement system in metro station foundation pit construction by semi-pavement method[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(10): 99.
- [11] YANG X, JIA M, YE J. Method for estimating wall deflection of narrow excavations in clay[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 117: 103224.

(收稿日期:2022-03-15)