

DOI: 10.11779/CJGE2014S2058

复杂条件下基坑开挖对周边环境变形影响的数值模拟分析

冯晓腊^{1, 2}, 熊宗海^{2*}, 莫云², 庞建成³

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 武汉丰达地质工程有限公司, 湖北 武汉 430074;
3. 武汉华中岩土工程有限责任公司, 湖北 武汉 430074)

摘要: 以武汉老铺片商业及住宅项目深基坑工程为背景, 采用有限元软件 PLAXIS 对其进行了基坑开挖全过程的数值模拟分析, 结合模拟计算结果分析了复杂条件下基坑支护结构体系及周边环境的受力、变形情况。数值模拟计算及实测结果表明: 支护结构、周边建(构)筑物及土体的变形均满足规范关于变形控制的要求, 证明采用 PLAXIS HS 模型能够较好的完成复杂条件下基坑开挖对周边环境变形影响的数值模拟分析, 同时也证明本工程采用的支护及半逆作施工方法, 能够对复杂条件下基坑开挖对周边环境变形的影响起到有效控制作用。

关键词: 复杂条件; 基坑开挖; 周边环境; 数值模拟

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)S2-0330-07

作者简介: 冯晓腊(1964-), 男, 教授, 主要从事水文地质与工程地质、岩土力学与工程等教学、科研及实际工程工作。E-mail: fxld@163.com。

Numerical simulation and analysis of surrounding environment deformation influenced by excavation of foundation pits under complex conditions

FENG Xiao-la^{1, 2}, XIONG Zong-hai², MO Yun², PANG Jian-chen³

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Wuhan Fengda Geological Engineering Ltd., Wuhan 430074, China; 3. Wuhan Huazhong Geotechnical Engineering Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: For the deep foundation pit of Laopupian Commercial and Residential Building, the whole process of its excavation is simulated and analyzed by use of the finite element software PLAXIS. The situations of stress and deformation of supporting structures of foundation pit and surrounding environment under complex conditions are studied. The numerical analysis and monitoring results show that the deformations of supporting structure system of the foundation pit and the surrounding environment can meet the requirements of the specifications for deformation control. It proves that PLAXIS HS model can effectively simulate and analyze the deformation of the surrounding environment influenced by excavation of the foundation pit, and the semi-inverse method used in this project can effectively control the deformation of the surrounding environment influenced by excavation of the foundation pit under complex conditions.

Key words: complex condition; foundation pit excavation; surrounding environment influence; numerical simulation

0 引言

环境效应是深基坑工程较为显著的特点, 基坑开挖势必会引起其周边土体的应力状态发生变化, 导致其发生变形, 从而对邻近的建(构)筑物和地下管线产生较大影响并危及其安全。武汉市因复杂多变的岩土工程条件, 其深基坑工程对周边环境的影响显得尤为突出, 尤其是在地处典型二元结构的长江 I 级阶地进行的深基坑工程来说则更具高风险性和挑战性。该地层结构不仅具有深厚的软土层, 还富含地下水, 再加上此区域多为城市核心地带, 对周边环境变形影响

控制的要求极高。

有限元分析方法是集合力学分析理论、数学计算方法和计算机分析技术于一体的综合分析方法, 近年来在工程领域中发挥了重要作用。诸多学者通过建立岩土体本构计算模型和支护结构计算单元, 模拟分析了支护结构构件的变形和受力、坑底的隆起、坑外土体沉降、周边建筑的变形情况等大量工程实际问题。

基金项目: 武汉市建设科研项目(201226)

收稿日期: 2014-07-28

*通讯作者

但是对于武汉地区复杂地质与周边环境条件下, 基于基坑开挖全过程的有限元数值模拟分析还不多, 尚有待作进一步的研究工作^[1-8]。

武汉老铺片商业及住宅项目深基坑工程地处长江 I 级阶地, 位于武汉市商业核心地段, 基坑周边密布建筑物、城市交通干道、地铁隧道和轻轨, 基坑开挖深度较大, 基坑施工对周边环境变形影响控制要求非常高。为了较为准确的预测基坑开挖引起的变形, 确保基坑支护设计方案的安全性, 采用岩土工程专业有限元软件 PLAXIS, 选取基坑最不利剖面, 考虑最不利开挖工况, 对整个基坑工程开挖全过程进行了数值模拟分析。以期对武汉地区的类似深基坑工程的设计和施工起到一定的指导和借鉴意义。

1 工程概况

1.1 工程简介

武汉老铺片商业及住宅项目主体结构由 3 栋 41 层高层住宅及 6 层裙楼组成, 底部为联为一体的地下室。本项目基坑呈不规则矩形, 东西向最长约 213 m, 南北向最长约 170 m, 基坑开挖面积约 30050 m², 基坑周长约为 748 m。纯地下室部分普遍开挖深度为 12.75 m, 最大处达 16.35 m; 塔楼区域开挖深度为 14.25 m 及 17.85 m, 局部落深区开挖深度达 19.40 m。

1.2 周边环境条件

本基坑工程位于武汉市核心商业区, 北临京汉大道及轻轨交通一号线, 东临江汉路, 东北角为在运营中的江汉路地铁站, 南侧为江汉四路, 西侧为前进五路。该基坑周边距离现有建筑物、轻轨、道路、在建地铁站等均较近, 环境条件极为紧张。

1.3 工程地质条件

本基坑工程处长江 I 级阶地, 地下水类型主要为填土层中的上层滞水和砂层中的孔隙承压水。场区内覆盖层为一套厚度达 50~60 m 的第四系全新统冲洪积地层, 具有典型的二元结构, 下卧基岩为二迭系粉砂质泥岩或砂岩地层。

覆盖层浅部主要为: ①杂填土、②₁黏土, 其中②₁层呈软一流塑状、强度低、高压缩性, 为典型的软土; 覆盖层中部为软弱互层土: ②₂粉质黏土夹粉土、粉砂以及③₁粉砂夹粉质黏土、粉土, 其中②₂层呈软一流塑状, 高压缩性, 力学性质较差且易流渐。覆盖层下部主要为: ③₂粉砂夹粉质黏土、③₃细砂, ④圆砾, 该三层砂土层呈稍密—中密状态, 中等压缩性, 力学性质较好, 为承压含水层, 水量丰富, 其中③₃层中含透镜状分布的相对软弱层③_{3a}细砂夹粉质黏土。下卧基岩为⑤₁强风化粉砂质泥岩及⑤₂中—微风化粉砂质

泥岩(以下对各土层简称其层号)。

本基坑工程坑壁土主要由浅层软弱和中部软弱互层土组成, 其强度低、高压缩性、高敏感性, 对支护结构控制变形极为不利。同时, 基底已进入承压含水层, 抗承压水稳定性安全系数不满足相关规范要求, 因此基坑工程面临极为严峻的承压水影响问题。

总之, 武汉老铺片商业及住宅项目深基坑工程具有开挖面积大、开挖深度大、周边环境复杂、地质条件复杂、施工空间狭小等特点。由于所研究基坑条件较为复杂, 一般的深基坑支护设计软件无法评价其开挖对周边环境的影响, 因此采用专业岩土工程有限元分析软件 PLAXIS 对本基坑工程开挖全过程进行模拟, 以较为全面地分析和评价因基坑开挖施工对周边环境的影响问题。

2 有限元模型的建立

2.1 岩土体本构模型的选择

基坑开挖是一个岩土体与结构共同作用的复杂过程, 岩土介质本构关系的建立是研究该过程的关键。Plaxis HS 模型是等向硬化弹塑性模型, 它假设三轴排水试验的剪应力 q 和轴向应变 ε_1 呈双曲线关系, 并采用弹塑性关系表达这种关系。此外, 模型还考虑了土体的剪胀和中性加载, 与理想弹塑性模型不同的是, Plaxis HS 模型在主应力空间中的屈服面并不是固定不变, 而是可以随着塑性应变而扩张的。该模型可以同时考虑剪切硬化和压缩硬化, 并采用 Mohr-Coulomb 破坏准则。

Plaxis HS 模型具有 6 类基本参数: ① m 为与应力水平相关的刚度幂指数, 对软土 m 取为 1.0, 对砂土和粉土 m 取为 0.5 左右; ② E_{50}^{ref} 为主偏量加载情况下引起土体塑性应变的参考割线刚度模量; ③ $E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$ 为主压缩情况下引起土体塑性应变的参考切线刚度模量; ④ $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为卸载和再加载的参考杨氏模量; ⑤ ν_{ur} 为卸载和再加载泊松比, 默认值为 0.2; ⑥ c , φ , ψ 为 Mohr-Coulomb 破坏模式下的黏聚力、内摩擦角和剪胀角。

2.2 模拟计算剖面的选取

由于本基坑场地呈不规则矩形, 周边环境复杂且存在重要建(构)筑物, 受典型的不对称附加荷载作用, 故应选择不同剖面进行二维分析。根据本基坑工程的开挖深度和周边环境情况, 选取最不利 4 个剖面进行分析, 4 个剖面标号为 1-1、2-2、3-3、4-4, 其相对位置如图 1 所示。

2.3 模拟计算参数的选取

本基坑工程采用 0.8 m 厚“两墙合一”地连墙结

合首层临时支撑兼做施工栈桥+地下室结构梁板支撑的支护结构体系。支护结构及其他相关构件的计算参数根据结构设计参数折减到每延米,考虑到钢筋混凝土结构受温度、徐变以施工等因素的影响,对各结构构件的刚度进行了一定程度的折减。结构构件的计算参数如表 1 所示。

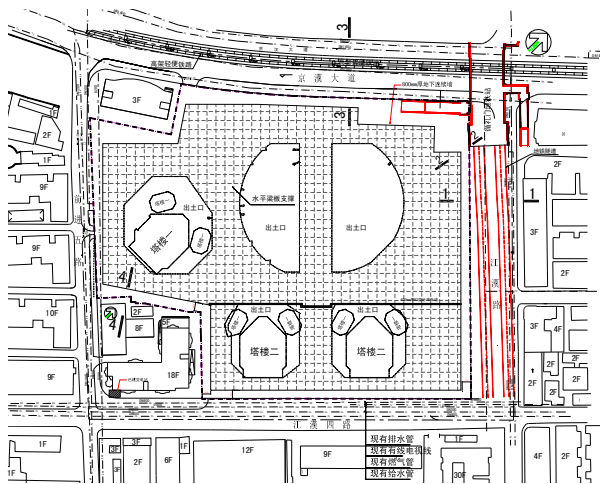


图 1 有限元计算剖面平面位置

Fig. 1 Plane position of simulation sections

对于 Plaxis HS 模型的 6 类基本参数,可结合本基坑工程的岩土工程勘察报告及相关工程经验综合确定。其中在缺少相应试验基础情况下,根据相关经验

令 $E_{ur}^{ref} \approx 3E_{50}^{ref}$ 和 $E_{oed}^{ref} \approx E_{50}^{ref}$ 是满足工程分析需求的,其中固结仪加载刚度 E_{oed}^{ref} 根据相关经验,可取为土体压缩模量 E_s 的 1.3 倍。同时,考虑用一个折减系数 R_{inter} 来描述接触面强度参数与所在土层强度参数之间的关系。模型的岩土层计算参数如表 2 所示。

2.4 有限元模型的建立

基坑工程施工是一个土体不断卸载、土体内应力、应变不断重分布的过程,因此基坑周围一定范围内的土体受力、变形均受基坑土方开挖施工的影响。根据一般分析经验,若分析围护结构的变形,则侧向边界应至少在墙后 3 倍的开挖深度之外;若分析地表的沉降情况,则侧向边界应至少放置在墙后 4 倍的开挖深度之外;下边界则需根据土层决定,一般选择较坚硬、稳定性好的土层作为下边界。所选用的计算剖面,基坑开挖深度均在 17 m 左右,选取围护墙迎土侧边界设置在 3 倍的开挖深度之外,围护墙背土侧边界设置在 4 倍的开挖深度之外,下边界选择较为稳定的中分化岩层作为边界,因此二维计算模型的尺寸为 120 m×70 m。

各个支护结构构件、基坑周边建筑物采用弹性模型,并采用板单元等效替代,其中临时支撑系统采用 PLAXIS 软件中锚定杆单位进行等效替代,轻轨模型采用线弹性无孔介质模型进行模拟,地铁隧道采用

表 1 结构构件计算参数

Table 1 Parameters of structures

构件名称	材料性质	抗压刚度 $EA/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	抗弯刚度 $EI/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{m}^{-1})$	备注
首层支撑	C30 砼	2.400×10^7	1.280×10^6	锚定杆单元
B1 层梁板	C40 砼	4.392×10^7	5.440×10^6	板单元
B2 层梁板	C40 砼	6.800×10^7	7.760×10^6	板单元
格构柱	Q235B 钢材	4.064×10^7	1.416×10^6	板单元
立柱桩	C35 砼	1.430×10^7	6.450×10^5	板单元
地下连续墙	C30 砼	1.920×10^7	1.024×10^6	板单元
0.8 m 基础底板	C35 砼	1.920×10^7	1.024×10^6	板单元
2.5 m 基础底板	C35 砼	6.230×10^7	3.280×10^7	板单元

表 2 岩土体本构模型计算参数

Table 2 Parameters of constitutive model for rock and soils

岩土层	γ $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	P^{ref} $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	V_u	k_0	c $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	φ $/(^{\circ})$	ψ $/(^{\circ})$	R_{inter}	E_s $/\text{MPa}$	E_{50}^{ref} $/\text{MPa}$	E_{oed} $/\text{MPa}$	E_{ur}^{ref} $/\text{MPa}$
①	18.0	100	0.452	0.826	5	10	0	0.65	3.0	3.9	3.9	11.70
② ₁	18.8	100	0.447	0.809	19	11	0	0.65	4.9	6.37	6.37	19.11
② ₂	18.8	100	0.468	0.878	15	7	0	0.65	3.9	5.07	5.07	15.21
③ ₁	19.0	100	0.391	0.642	3	21	0	0.65	9.0	11.7	11.7	35.10
③ ₂	20.0	100	0.347	0.531	0	28	0	0.65	12.0	15.6	15.6	46.80
③ ₃	20.0	100	0.327	0.485	0	31	0	0.65	17.0	22.1	22.1	66.30
③ _{3a}	19.0	100	0.379	0.609	12	23	0	0.65	11.0	14.3	14.3	42.90
④	20.5	100	0.278	0.385	0	38	0	0.68	34.0	44.2	44.2	132.60
⑤ ₁	21.0	100	0.256	0.344	16	41	0	0.70	42.0	54.6	54.6	163.80
⑤ ₂	21.8	100	0.118	0.134	25	60	0	0.70	55.0	71.5	71.5	214.50

PLAXIS 软件中隧道单元进行模拟。基坑周边道路和施工附加荷载去 20 kN/m。根据相关规范, 取 40 kN/m 作用于轻轨上以替代轻轨。所选计算剖面有限元模型如图 2 所示。

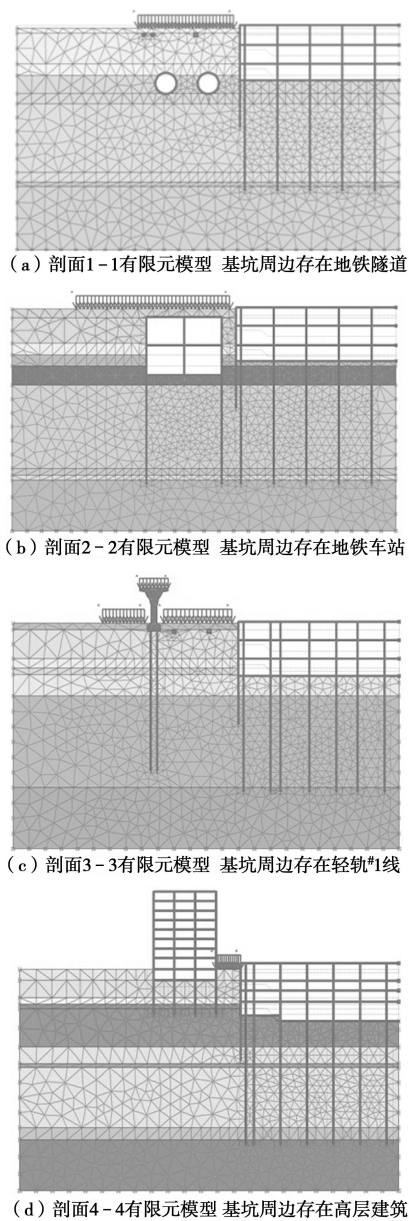


图 2 各模拟计算剖面有限元模型

Fig. 2 Finite element model for four sections

3 基于基坑开挖全过程的有限元分析

3.1 基坑开挖全过程的施工工况

采用 Goodman 接触面单元考虑土体和地下结构之间的相互作用, 通过有限元软件的“单元生死”来模拟基坑盆式分层开挖以及各个支护结构的施工过程, 根据本基坑工程“半逆作法”施工工况模拟基坑开挖的全过程。

所选计算剖面, 除 4-4 剖面多了施工 B1 层夹层工况, 其他施工工况基本一致, 故将 4-4 剖面施工

B1 层夹层梁板并入工况阶段 8 中。各计算剖面施工工况如表 3 所示。

表 3 基坑开挖全过程施工工况

Table 3 Construction conditions of excavation process of deep foundation pit

工况	施工项目
阶段1	施工地连墙、立柱和工程桩
阶段2	开挖第一层土体至临时支撑底标高, 施工第一层临时支撑系统-4.000 m
阶段3	待临时支撑达足够强度, 盆式开挖第二土体至 B1 层梁板支撑底标高-7.65 0m
阶段4	施工 B1 层梁板支撑系统
阶段5	待 B1 层梁板支撑达足够强度, 盆式开挖第三土体至地下二层梁板支撑底标高-13.800 m
阶段6	施工 B2 层梁板支撑系统
阶段7	待 B2 层梁板支撑达足够强度, 盆式开挖第四土体至基底-17.450 m
阶段8	同时施工基础底板 (B1 层夹层梁板)
阶段9	待地下 B1 层夹层梁板及其他结构体系达足够强度, 拆除临时支撑
阶段10	施工 B0 层梁板结构

3.2 基坑开挖最不利工况下的数值模拟结果分析

一般情况下, 基坑开挖至基底时, 土体临空面及卸荷量达最大, 此时支护结构体系将承受由水土压力和周边附加荷载产生的最大侧向荷载作用, 支护结构体系处于最大负荷状态, 选取阶段 7 基坑开挖至基底工况和阶段 9 拆除临时支撑工况两个最不利工况进行分析。通过 PLAXIS 软件计算, 可以得到这两种工况下对应的基坑土体水平位移和垂直位移。

限于篇幅, 仅给出了 1-1 剖面阶段 7 和阶段 9 的水平位移和垂直位移云图 (图 3, 4), 各剖面相应的变形极值如表 4 所示。

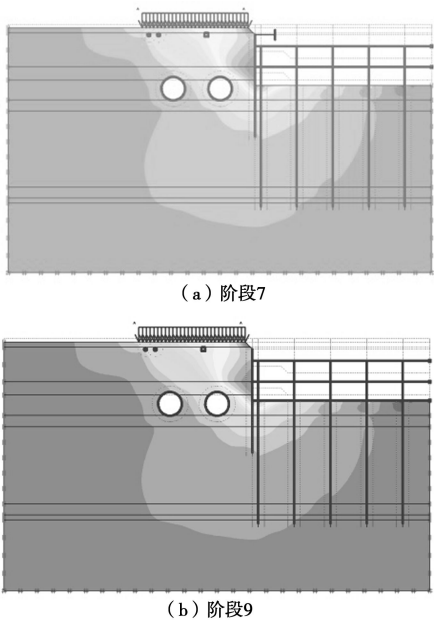


图 3 剖面 1-1 (地铁隧道侧) 阶段 7 和阶段 9 的水平位移云图

Fig. 3 Horizontal displacements of section 1-1 at Stage 7 and 9s

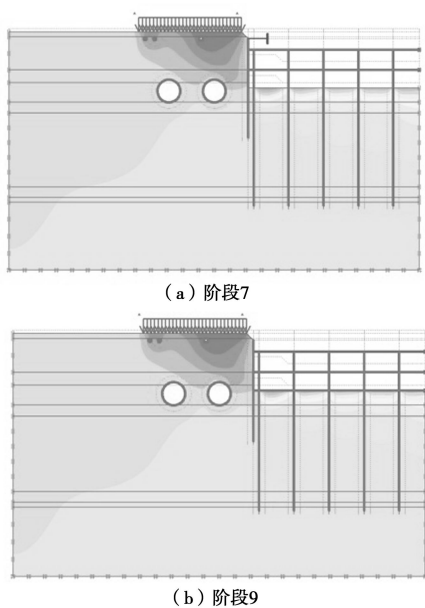


图 4 剖面 1-1(地铁隧道侧) 阶段 7 和阶段 9 的垂直位移云图
Fig.4 Perpendicular displacements of section 1-1 at Stage 7and 9s

表 4 阶段 7 和阶段 7 工况下基坑变形极值

Table 4 Deformation values of foundation pit at Stage 7and 9					
计算剖面	施工工况	墙身最大水平位移/mm	墙顶水平位移/mm	墙后地表最大沉降/mm	坑底土体最大隆起值/mm
剖面 1-1	阶段 7	26.42	4.18	20.11	28.98
	阶段 9	26.47	6.34	21.04	25.83
剖面 2-2	阶段 7	27.26	1.93	11.46	32.88
	阶段 9	27.29	5.55	11.71	31.50
剖面 3-3	阶段 7	21.58	1.16	18.85	29.77
	阶段 9	22.76	2.58	18.69	28.68
剖面 4-4	阶段 7	22.35	2.13	20.90	27.99
	阶段 9	23.22	3.13	20.55	26.41

通过数值模拟分析可得到如下结论:

(1) 基坑水平位移最大处发生在第二层梁板支撑的下侧,即基坑深度的 2/3 处,两种工况下基坑变形的模式基本一致。

(2)由于基坑开挖产生的墙后土体变形影响范围在 3~4 倍基坑深度区域。

(3) 地连墙墙顶水平位移较小,是因为本工程采用的临时支撑兼做施工栈桥作为首层支撑本身具有较大刚度,可见其对控制基坑初始变形具有良好效果。

(4) 对比阶段 7 工况和阶段 9 工况下各个计算结果,除了地连墙墙顶位移变化稍大外,其他各计算结果均相差不大,说明拆除临时支撑后支护体系仍具有较强的控制变形能力。这是因为地下结构梁板支撑系统本身具有强大刚度,在加上临时支撑拆除前又施工了基础底板,局部还施工了结构夹层,因此支护结构体系的整体刚度大大得到增强。

(5) 对于坑底土体最大隆起值,阶段 9 工况较阶段 7 工况的有所较小,虽然阶段 9 工况拆除了临时支撑,但基底已经浇筑了基础底板满铺与基底,总体上讲整个地下室结构总荷重增加了,限制和减小了坑内

土体的隆起量。因此,当基坑开挖至基底时,应加快施工进度,加快基础底板施工速度,尽早对基底进行封底,以更好的控制基坑变形,提高基坑施工的安全性。

(6) 总体上,地连墙墙身最大位移均控制在 30 mm 以内,墙后地表最大沉降控制 20 mm 左右,满足基坑设计规范关于变形控制的要求,说明本工程采用的支护及半逆作施工方法,具有良好的控制基坑变形的能力,能够对周边环境变形影响起到有效的控制作用。

3.3 周边建(构)筑物的受力和变形分析

有限元分析软件不仅能反应围护结构受力、变形情况,而且能反应基坑周边建(构)筑物,坑内支护结构体系的情况。根据模拟计算结果,各计算剖面周边建(构)筑物最大变形情况见表 5,各计算剖面周边建筑物最大总位移趋势见图 5。

表 5 各计算剖面周边建(构)筑物最大变形情况

Table 5 Maximum deformations of surrounding buildings of four simulation sections			
剖面	对象	最大水平位移/mm	最大竖向位移/mm
1-1	地铁隧道	12.50	15.12 (沉降)
	管线	16.45	19.51 (沉降)
2-2	地铁站	19.87	3.05 (隆起)
3-3	轻轨高架桩基础	11.83	9.60 (沉降)
	管线	16.19	17.36 (沉降)
4-4	8 层住宅楼	18.26	20.36 (沉降)

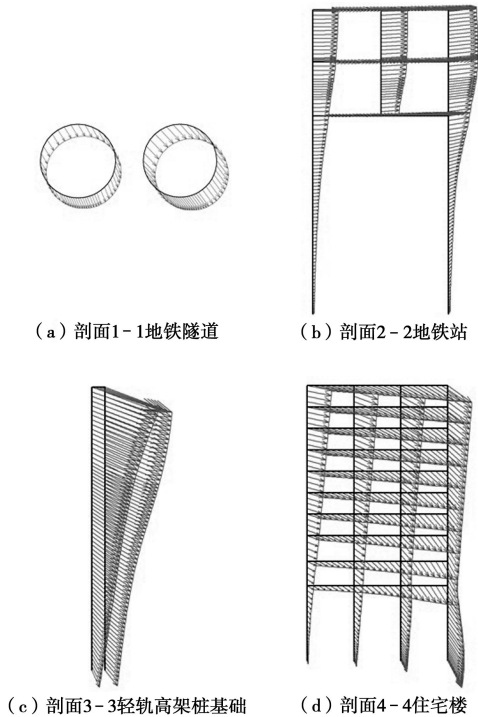


图 5 各计算剖面周边建(构)筑物最大总位移趋势示意图
Fig. 5 Maximum deformation trend of surrounding buildings of four simulation sections

通过分析表 6 及图 5, 可以得到如下结论:

(1) 基坑开挖的过程是一个土体不断卸荷和回弹的过程, 围护结构在坑内外由于挖土而产生压力差发生侧移, 坑内土体由于回弹效应而发生基底隆起。总的来说, 基坑变形其内在表现为在基坑有效影响范围内的土体均向基坑内侧发生位移, 其外在表现为基坑周边建筑物及地表发生沉降、围护墙体发生侧移、坑内土体发生隆起。

(2) 基坑有效影响范围内, 在土体位移产生的推力作用下, 各周边建(构)筑物发生了向基坑内侧方向的位移, 而且越靠近基坑开挖面的结构构件位移值越大。

(3) 从变形趋势来看, 随坑外土体深度的加大, 基坑开挖导致其变形量随之减小, 说明基坑开挖的影响随着坑外土体深度的增加而减小。

(4) 基坑周边的建(构)筑物的变形均较小, 最大水位位移为 19.87 mm, 最大竖向位移为 20.36 mm (沉降), 两变形值均在 20 mm 左右, 满足规范规定的关于变形控制的要求, 说明本工程采用的支护及半逆作施工方法, 具有良好的控制基坑变形的能力, 能够对周边环境变形影响起到有效的控制作用。

3.4 数值模拟结果与实测结果对比分析

为了分析上述数值模拟计算结果与实测值的拟合程度, 对应所选数值模拟计算剖面, 选取了其附近具有代表性的监测点数据, 进行了对比分析。监测结果如下: ①周边建筑物累计最大沉降量为 14.0 mm; ②周边地下管线累计最大沉降量为 13.6 mm; ③轻轨高架桥桥墩累计最大沉降量为 10.1 mm; ④地连墙墙身最大水平位移为 23.5 mm; ⑤墙后地面累计最大沉降量为 12.4 mm。

结果表明: 计算值和实测值的变形趋势基本一致, 两者数据相差不大, 且均在规范允许范围内。证明采用 Plaxis HS 模型能够较好的预测基坑围护墙体的变形情况, 其模拟计算结果是合理、可靠的。

4 结 语

以武汉老铺片商业及住宅项目深基坑工程为背景, 采用有限元软件 PLAXIS 对其最不利剖面进行了基坑开挖全过程的数值模拟分析, 并结合计算结果分析了复杂条件下, 基坑支护结构体系及周边环境的受力、变形情况。

采用有限元软件对基坑开挖全过程的数值模拟, 不仅可以了解每个施工工况情况下坑内外土体、支护结合和周边建构筑的变形、受力情况, 更重要的是可以帮助基坑设计和施工人员超前判断和分析基坑施工过

程中最不利工况下可能险情及其原因, 以帮助他们针对不同施工情况对基坑进行动态控制。

基坑开挖至基底时, 土体临空面及卸荷量达最大, 此时支护结构体系将承受由水土压力和周边附加荷载产生的最大侧向荷载作用, 支护结构体系处于最大负荷状态。于此同时, 临时支撑拆除过程中, 围护结构发生二次受力和二次变形, 从而使周边土体应力和应变重分布, 这将进一步不同程度的影响周边环境。因此, 在这些工况下更应该增加监测、巡查频率, 并及时反馈信息, 根据整个基坑工程施工运行情况合理的安排施工, 并提出针对性保护措施以保证整个工程的安全。

基坑变形是支护结构体系、基坑范围内土体、基坑施工、周边环境情况等等多种因数相互作用的综合反映。因此, 对复杂条件下的基坑支护结构设计应以变形控制为主、结构强度设计为辅, 同时兼顾周边环境的适应能力和基坑施工合理优化, 这样才能为后期工程的施工打下坚实的基础。

数值模拟计算及实测结果表明, 支护结构的变形、周边建(构)筑物的变形、周边土体的变形均满足规范关于变形控制的要求, 证明采用 Plaxis HS 模型能够较好的完成复杂条件下基坑开挖对周边环境变形影响的数值模拟分析, 其模拟计算结果是合理、可靠的, 同时也证明本工程采用的支护及半逆作施工方法, 具有良好的控制基坑变形的能力, 能够对复杂条件下基坑开挖对周边环境变形的影响起到有效控制作用。

参考文献:

- [1] 黄茂松, 朱晓宇, 张陈蓉. 基于周边既有建筑物承载能力的基坑变形研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 11(31): 2305 - 2312. (HANG Mao-song, ZHU Xiao-yu, ZHANG Chen-rong. Deformation controlling criterion for excavation based on bearing capacity of adjacent buildings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 11(31): 2305 - 2312. (in Chinese))
- [2] 李镜培, 柏挺, 杨军. 框架逆作超大深基坑施工对周边环境的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 11(31): 2354 - 2363. (LI Jing-pe, BO Ting, YANG Jun. Influence of construction of super-large excavation with frame-top-down method on environments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 11(31): 2354 - 2363. (in Chinese))
- [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. (XU

- Zhong-hua, WANG Wei-dong. Selection of soil constitutive models for numerical analysis of deep excavations in close proximity to sensitive properties[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(1): 258 - 264. (in Chinese))
- [4] 王曙光. 复杂周边环境基坑工程变形控制技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **33**(增刊 1): 474 - 477. (WANG Shu-guang. Deformation control of excavation engineering with comlicted surroundings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **33**(S1): 474 - 477. (in Chinese))
- [5] 郑刚, 李志伟. 基坑开挖对邻近任意角度建筑物影响的有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **4**(34): 615 - 623. (ZHEN Gang, LI Zhi-wei. Finite element analysis of response of buildings with arbitrary angle adjacent to excavations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **4**(34): 615 - 623. (in Chinese))
- [6] 李四维, 高华东, 杨铁灯. 深基坑开挖现场监测与数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **31**(增刊 1): 284 - 291. (LI Wei-si, GAO Hua-dong, YANG Tie-deng. Monitoring and numerical analysis of a deep foundation pit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **31**(S1): 284 - 291. (in Chinese))
- [7] 侯玉杰, 冯晓腊, 莫云, 等. 天津高银中央商务区基坑工程内支撑体系受力及变形特征分析[J]. 工程勘察, 2013(11): 15 - 20. (HOU Yu-jie, FENG Xiao-la, MO Yun, et al. Weighted and deformation characteristics analysis of internal support system in Tianjin high silver CBD foundation pit excavation engineering[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2013(11): 15 - 20. (in Chinese))
- [8] 查甫生, 林志月, 崔可锐. 深开挖卸载条件下基坑应力和变形特性的数值分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 1): 484 - 488. (ZHA Pu-sheng, LIN Zhi-yue, CUI Ke-rui. Numerical analysis of stress and deformation characteristics of foundation pits under deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S1): 484 - 488. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)