

# 复杂环境下桩锚土钉复合支护分析

靳军伟<sup>1</sup>,杜浩鸣<sup>2</sup>,张志强<sup>3</sup>,郭院成<sup>1</sup>,宋卫康<sup>1</sup>

(1. 郑州大学土木工程学院,河南 郑州 450001; 2. 河南省交通规划设计研究院股份有限公司,河南 郑州 450052; 3. 河南省第一建筑工程集团有限责任公司,河南 郑州 450014)

**摘要** 目的 针对郑州地区某基坑工程存在电力隧道和防空洞等复杂情况进行研究,提出采用桩锚土钉复合支护体系处理该类深基坑的方法,为类似工程提供参考。

**方法** 采用有限元软件建立同时存在电力隧道和防空洞的深基坑桩锚土钉复合支护有限元模型,模拟分析复杂环境条件下基坑工程施工过程中支护结构坡顶竖向和水平位移、深层土体水平位移以及周边建筑物的沉降以及桩身位移及内力,并与相应的监测结果进行对比分析。

**结果** 施工过程中实测基坑坡顶水平最大位移 20.6 mm,沉降 7.4 mm、土体深层水平位移 8.4 mm,周边建筑物沉降 2.1 mm,均满足规范要求。

**结论** 深基坑工程存在电力隧道和防空洞的复杂环境条件下,采用桩锚土钉复合支护体系能满足基坑的安全稳定要求和周边建筑物的保护要求。

**关键词** 复杂环境;桩锚土钉复合支护;有限元分析;监测分析

中图分类号 TU925

文献标志码 A

## Analysis of Pile-anchor and Soil-nailing Composite Supported System under Complex Environment

JIN Junwei<sup>1</sup>, DU Haoming<sup>2</sup>, ZHANG Zhiqiang<sup>3</sup>, GUO Yuancheng<sup>1</sup>, SONG Weikang<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, China, 450001; 2. Henan Provincial Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Zhengzhou, China, 450052; 3. Henan No. 1 Construction Engineering Group Co., Ltd., Zhengzhou, China, 450014)

**Abstract:** The research focus on the pile-anchor soil-nailing composite supporting method under complex environment which nearby electric tunnel and anti-air cavity. The finite element method is used to simulate the construction progress and the electric tunnel and anti-air cavity considered. During the study vertical and horizontal displacements of the roof of the support structure, horizontal displacement of the deep soil and the settlement of the surrounding buildings and the displacement and internal force of the pile are analyzed. Meanwhile the simulation results are compared with the measure results. The results show that during the construction progress, the maximum ver-

收稿日期:2016-01-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51509017);郑州大学青年教师启动基金项目(F0000587)

作者简介:靳军伟(1986—),男,博士,主要从事隧道与基坑工程方向研究。

tical and horizontal displacements at the top of the support structure are 20.6 mm and 7.4 mm, the maximum deep horizontal displacement of soil is 8.4 mm and maximum the settlement of surrounding buildings is 2.1 mm. All above results meet the standard requirements. In conclusion, for the complex environment of deep excavation with electric tunnel and anti-air cavity, the pile-anchor soil-nailing supporting system is effective for the stability and safety of pit foundation and nearby buildings.

**Key words:** complex environment; pile-anchor soil-nailing composite supporting system; finite element analysis; monitoring analysis.

随着城市化进程的推进,市区深基坑工程设计施工中所处的周边环境越来越复杂,如既有建筑物、电力隧道、燃气管线、通信隧道、市政雨水管网等. 基坑工程在施工过程中,不仅要保证支护结构的安全可靠,也要严格控制基坑开挖导致的周边建筑结构的变形和安全<sup>[1]</sup>.

目前基坑工程设计施工水平发展迅速,许多学者对不同土体条件<sup>[2-4]</sup>、不同支护形式<sup>[5-8]</sup>、不同计算方法<sup>[9-15]</sup>进行了深入的研究. 同时,城市复杂环境下基坑工程支护结构问题,也受到越来越多学者们的关注,并得到不少有益的结论. 徐中华等<sup>[16]</sup>分析了敏感环境下基坑数值分析中土体本构模型的选择问题;王文忠<sup>[17]</sup>介绍了长春某深基坑采用土钉桩锚支护结构形式并取得良好的安全、经济效果;王浩然等<sup>[18]</sup>给出了上海申能能源大厦基坑紧邻地铁隧道和建筑,复杂环境条件下的基坑工程设计与实测分析;王曙光<sup>[19]</sup>认为当基坑周边环境复杂时,基坑工程的主要控制条件为变形控制,提出了基坑工程变形控制流程.

上述研究表明,城市建设过程中复杂环境条件下的基坑支护问题,需要因地制宜,采取适当的方式,而目前该部分工作尚不完善. 基于此,笔者针对郑州地区某基坑工程,存在电力隧道和防空洞的深基坑桩锚土钉复合支护方案进行研究,并对数值分析结果及实测数据进行了分析;研究结果表明,桩锚土钉复合支护结构可以满足复杂环境下的基坑支护要求.

1 工程概况

基坑项目位于郑州地区,场地以粉土和粉质黏土为主要地层条件. 基坑周边存在已有交通道路以及规划道路,基坑开挖边线距离最近的棉纺西路人行道约 8.5 m(见图 1). 同时基坑周边存在多栋既有建筑,包括北部的商住楼,西部的 3 层和 7 层砖混结构建筑,最近距离仅 1.35 m. 南侧基坑支护施工场地存在电力隧道,与基坑侧壁基本平行.

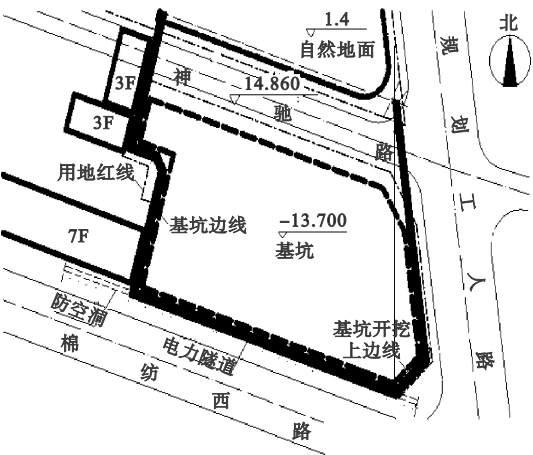


图 1 基坑周边环境

Fig. 1 Surroundings around foundation

基坑支护南侧存在既有电力隧道与防空洞,位置关系如图 2 所示. 既有电力隧道内部净高 2.6 m,内净宽 1.5 m,壁厚 0.37 m,由砖墙砌筑而成,电力隧道底板标高 -5.5 m,位于基坑设计支护桩顶面以下 1.3 m,隧道侧墙与设计支护桩距离为 3.1 m. 同时,在设计支护桩附近存在有防空洞,防空洞顶部标高 -8.5 m,内净高 2.5 m,壁厚 0.37 m,砖

砌结构,基坑支护桩与既有电力隧道的现场位置关系如图3所示。

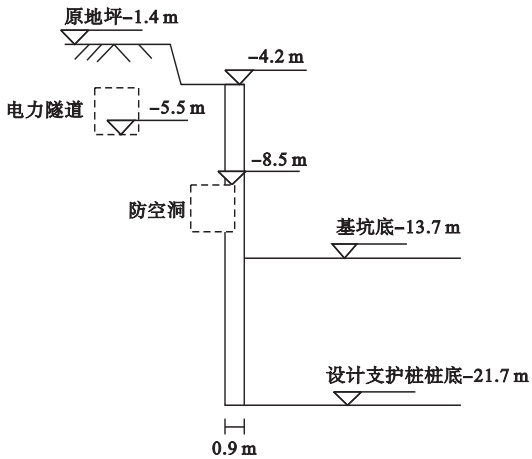


图2 支护桩与既有电力隧道、防空洞位置关系

Fig.2 Location of electric tunnel, air-raid shelter and supporting pile



图4 钢护筒混凝土支护桩

Fig.4 Concrete supporting pile in steel tube

2.2 防空洞封堵处理方案

支护桩施工完成后,在基坑分段开挖过程中,基坑南侧既有防空洞在170 m 范围内,按照30~40 m 进行砌墙分隔,分段内部填充水泥石土,填充和基坑开挖同步进行.对于东西方向与基坑侧壁垂直的防空洞,处理过程中为防止防空洞与市政管网连接,造成市政污水和雨水倒灌基坑,在洞口2 m 处砌筑500 mm厚砖墙,中间喷射1 m 厚C20 混凝土,洞口砌筑500 mm 厚砖墙<sup>[20]</sup>.在距洞底200 mm 高处设置溢流管,方便及时将水排出.防空洞封堵示意图如图5所示。

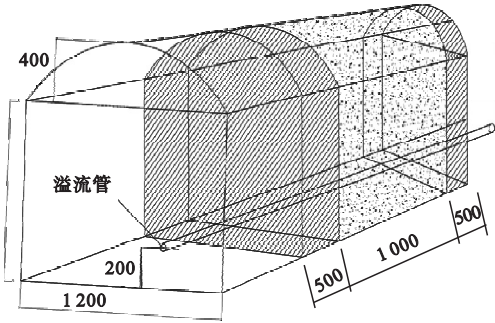


图5 防空洞封堵

Fig.5 Seal air-raid shelter

2 防空洞处理及基坑支护方案

2.1 支护桩遇防空洞的处理方案

本基坑工程中部分支护桩需要穿越防空洞,对于穿越防空洞的支护桩需要进行处理<sup>[20]</sup>.支护桩采用钢护筒桩模,桩模内径为900 mm,长3.5 m,壁厚3 mm,两端在防空洞的上顶和下底各伸出500 mm,钢护筒在防空洞范围内作为桩身混凝土的侧模,然后进行钢筋混凝土支护桩的混凝土浇筑(见图4)。

2.3 支护方案

在自然地坪与设计支护桩顶之间,高2.8 m 范围内,采用3排土钉支护,距地面深度分别为0.8 m、1.5 m、2.2 m.为了保护既有电力隧道,对土钉长度进行限制.土钉长度设置为2.5 m,

水平间距1.5 m.下部采用桩锚支护,桩体采用C30 混凝土现浇灌注桩,桩长为17.5 m,桩身嵌固深度为8 m,直径为900 mm,桩间距为1.5 m,支护结构详图见图6所示.

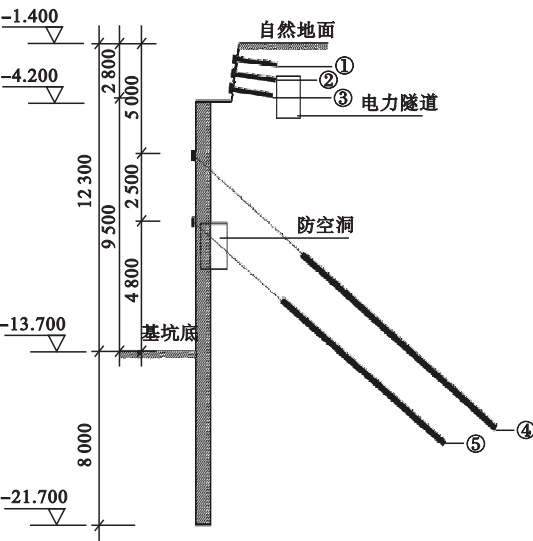


图6 支护结构

Fig. 6 Supporting structure

3 有限元与实测分析

3.1 有限元模型及参数

计算模型场地长70 m,土体深度32.5 m,模型两侧约束土体水平向位移,模型底部约

束水平和竖向位移.基坑上部土钉墙支护部分存在电力隧道,锚杆支护部分存在防空洞,有限元模型如图7所示.

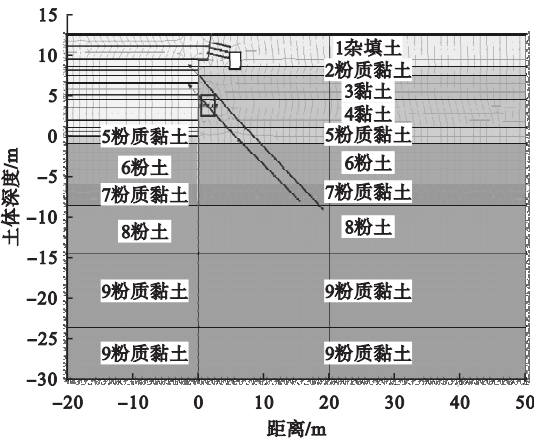


图7 整体有限元模型

Fig. 7 Whole FEM model

场地土体参数如表1所示,土体弹性模量根据表1 压缩模量,依据文献[21]进行修正后得到.有限元模型如图7所示,基坑上部采用土钉墙支护,下部采用桩锚支护.对于既有防空洞及电力隧道计算时按照水泥土考虑,计算中土钉长度为2.5 m,锚杆长度20.0 m,具体参数如表2所示.有限元分析中,土体本构采用摩尔-库伦模型,不考虑剪胀角的作用<sup>[20]</sup>.

表1 基坑工程设计土层参数

Table 1 Soil parameters of excavation engineering

土层	类别	土层厚度/m	重力密度/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	黏聚力/kPa	内摩擦角/( $^{\circ}$ )	压缩模量/MPa
1	杂填土	3.7	18.0	5.0	15.0	5.0
2	粉质黏土	1.3	18.8	22.2	15.9	6.4
3	粉土	2.8	18.4	14.2	26.1	13.9
4	粉土	3.8	18.2	13.0	22.8	19.0
5	粉质黏土	1.9	18.4	22.0	14.5	10.2
6	粉土	4.6	18.5	15.2	26.0	14.5
7	粉质黏土	2.9	18.6	21.5	17.1	10.6
8	粉土	5.9	18.4	16.0	23.1	19.0
9	粉质黏土	8.9	35.78	18.6	21.5	17.1

基坑深度为12.3 m,分步开挖,每次开挖1.5 m,最后一步开挖0.3 m,具体工况如

下:  
工况0:生成初始地应力;

表 2 土钉与锚杆参数

Table 2 Soil-nailing and anchor parameters

编号	埋深/m	杆长/m	自由段长度/m	锚固段长度/m	倾角/(°)	预应力/kN	锚固体直径/mm
1	0.80	2.5	—	—	10	—	100
2	1.50	2.5	—	—	10	—	100
3	2.20	2.5	—	—	10	—	100
4	5.00	25.00	8.00	17.00	40	220	200
5	7.50	20.50	6.50	14.00	40	200	200

工况 1:基坑开挖至深度 1.5 m;  
工况 2:开挖至深度 3.0 m,并施工第 1 排土钉;  
工况 3:施工支护桩,并开挖至深度 4.5 m,并施工第 2、3 排土钉,同时激活支护桩;  
工况 4:开挖至深度 6.0 m;  
工况 5:开挖至深度 7.5 m,施工第 1 排和第 2 排锚杆;  
工况 6:开挖至深度 9.0 m;  
工况 7:开挖至深度 10.5 m;  
工况 8:开挖至深度 12.0 m;  
工况 9:开挖至深度 12.3 m.  
具体开挖工况及深度如图 8 所示.

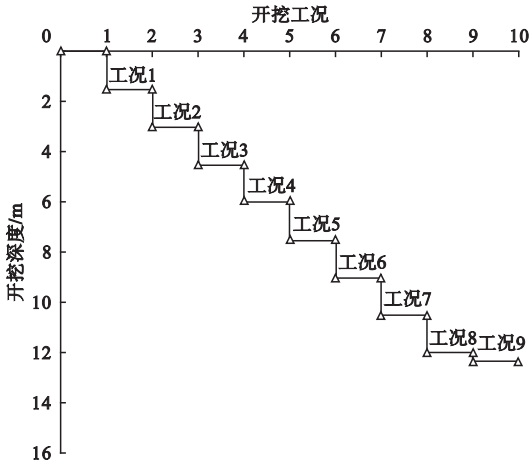


图 8 基坑开挖工况及深度

Fig. 8 Excavation depth and construction state

3.2 有限元结果分析

当基坑开挖至坑底埋深时,基坑竖向最大沉降为 17.2 mm,底部隆起最大为 29.7 mm,水平位移最大为 27.9 mm. 基坑整体位移矢量如图 9 所示,基坑水平位移和竖向沉降云图分别如图 10 ~ 图 11 所示.

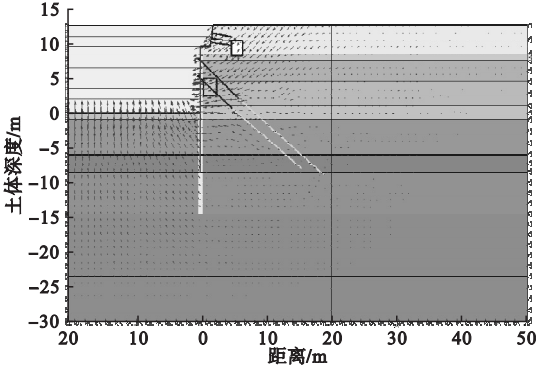


图 9 基坑位移矢量图  
Fig. 9 Displacement vector

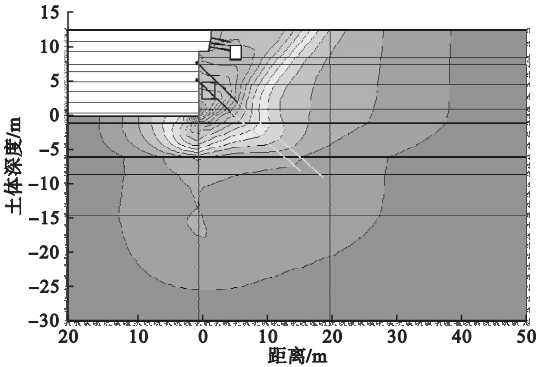


图 10 基坑水平位移云图  
Fig. 10 Horizontal displacement of pit

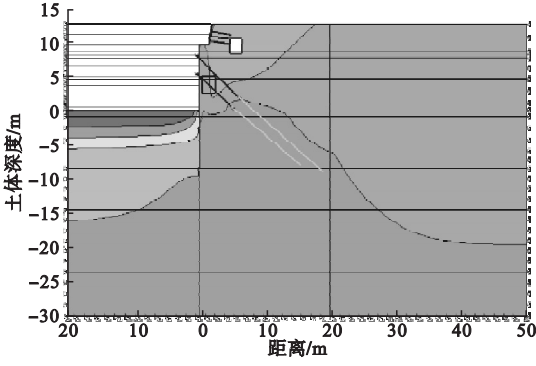


图 11 基坑竖向位移云图  
Fig. 11 Vertical displacements of pit



计算结果表明,基坑位移满足《建筑基坑监测技术规范》要求,计算得到的桩身水平位移如图 12 所示. 由于前两步开挖时,尚未开挖至桩顶位置,故笔者分析从开挖步 3 开始. 从计算结果来看,随着开挖深度的增加,桩身水平位移向坑内移动数值逐渐增加. 工况 8~工况 9 结果差别不大的原因在于该步骤的开挖深度仅为 0.3 m,较其他计算步 1.5 m 计算深度小. 模拟中预应力锚杆位置处的桩身水平位移受到锚杆拉力的影响,位移向坑外移动.

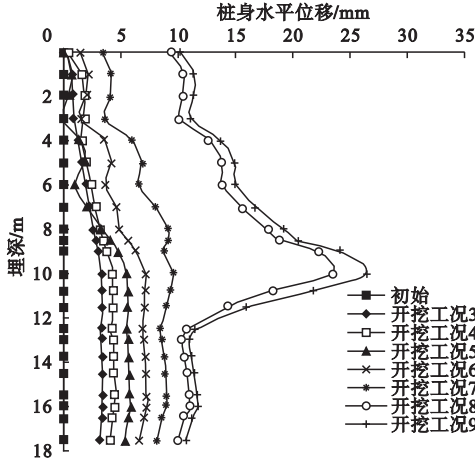


图 12 桩身水平位移

Fig. 12 Horizontal displacements of pile

3.3 实测数据与有限元计算对比分析

本项目施工过程中,对基坑支护结构坡顶水平位移、坡顶竖向位移、深层土体水平位移以及周边建筑物变形进行了监测,监测周期为 2012 年 6 月到 2013 年 4 月. 本项目桩锚复合支护结构的监测点为 7~9 号点. 监测数据与有限元计算结果对比如图 13~图 16 所示,图中 FEM 为采用有限元方法对各时间点处工况分析的结果.

由图 13 可知:7、8、9 号点处累计位移量分别为 10.0 mm、15.7 mm、20.6 mm. 文中有限元计算工况与测点 7 情况较为接近. 有限元计算得出支护结构最大水平位移为 9.5 mm,最终变形量与实测结果十分接近. 桩锚土钉复合支护结构坡顶水平最大位移为

20.6 mm,满足规范要求.

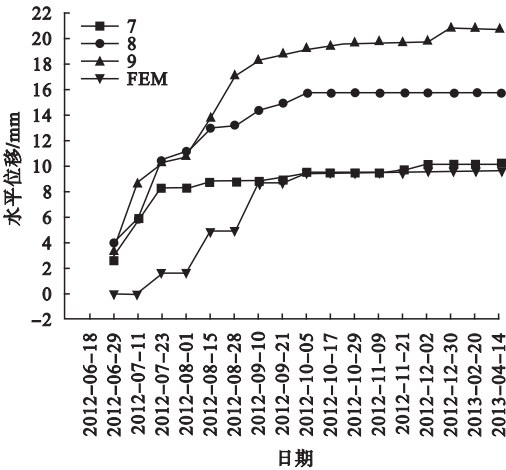


图 13 支护坡顶水平位移

Fig. 13 Horizontal displacements of slope crest

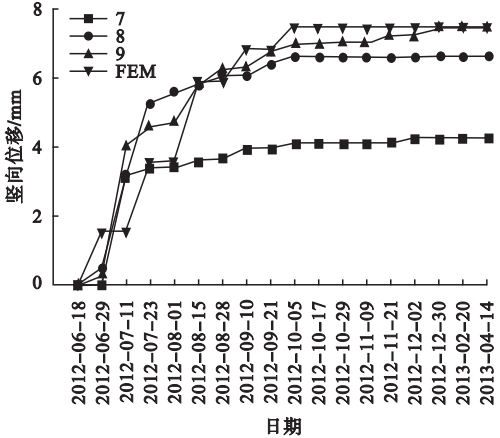


图 14 支护坡顶竖向位移

Fig. 14 Vertical displacements of slope crest

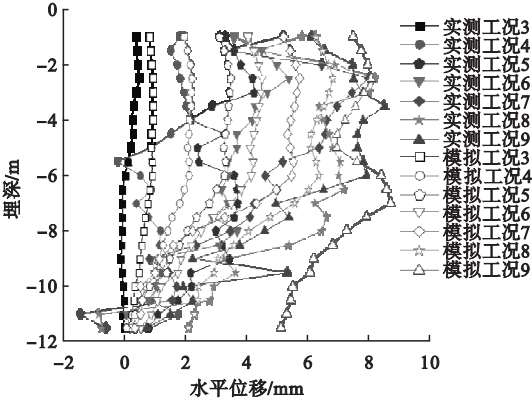


图 15 深层土体水平位移

Fig. 15 Deep horizontal displacements of soil

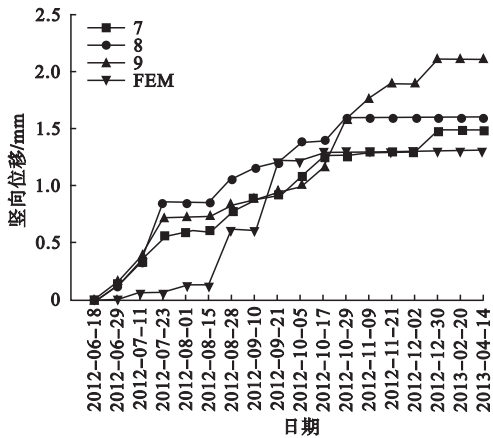


图 16 基坑周边建筑物竖向位移

Fig. 16 Vertical displacements of buildings

由图 14 可知:7、8、9 号点处累计沉降量分别为 4.3 mm、6.6 mm、7.4 mm。有限元计算得出支护结构最大沉降值为 7.5 mm,桩锚土钉复合支护结构坡顶最大沉降为 7.4 mm,满足规范要求。采用有限元方法计算得出的支护坡顶沉降在 2012 年 10 月份后开挖结束,故竖向沉降不再变化。

深层土体水平位移是从工况 3 开始进行监测(见图 15)。实测深层土体水平位移最大值为 8.4 mm,有限元计算得出深层土体水平位移最大值为 8.7 mm,深层土体整体位移、最大值以及变化速率均未达到控制值,满足规范要求。

基坑周边建筑物竖向位移监测 7、8、9 号点处累计沉降量分别为 1.5 mm、1.6 mm、2.1 mm,有限元计算得出基坑建筑物所在位置处沉降最大值为 1.3 mm,建筑物沉降应与之相似。从图 16 可以看出,有限元计算结果与实测趋势基本一致。实测基坑周边建筑物沉降最大值为 2.1 mm,满足规范要求。

4 结 论

(1)本基坑工程项目在存在电力隧道和防空洞等复杂施工环境下,采用桩锚土钉复合支护结构并对电力隧道和防空洞进行处理,结果表明本项目支护结构的合理性和处理措施的有效性。

(2)通过采用有限元方法,与实测基坑工程坡顶水平和竖向位移、邻近建筑物沉降、深基坑深层土体水平位移进行对比分析,结果表明有限元方法能很好地计算施工过程中的土体位移问题。

参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑支护技术规程:JGJ120—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.  
(Ministry of Construction, P. R. China. Technical Specification for Retaining and Protection of Building Foundation Excavations: JGJ120—2012 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012.)

[2] 徐中华,王建华,王卫东. 软土地区采用灌注桩围护的深基坑变形性状研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1362 – 1366.  
(XU Zhonghua, WANG Jianhua, WANG Weidong. Deformation behavior of deep excavations retained by bored pile wall in soft soil [J]. Rock and soil mechanics, 2009, 30(5): 1362 – 1366.)

[3] LIU Xianshan, LIU Shaowei. Study on deformation characteristics of deep foundation excavation in soft-soil and the response of different retaining configurations [J]. Geotechnical and geological engineering, 2012, 30(2): 313 – 329.

[4] KATZENBACH R, LEPPLA S, RAMM H. Design and construction of deep foundation systems and retaining structures in urban areas in difficult soil and groundwater conditions [J]. Heiko kutting procedia engineering, 2013, 57(2): 540 – 548.

[5] 郭印,赵刚,孙元,等. 桩锚式支护桩内力和变形测试研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(5): 1020 – 1024.  
(GUO Yin, ZHAO Gang, SUN Yuan, et al. Test study on the internal force and deformation for anchored bracing pile [J]. Journal of underground space and engineering, 2009, 5(5): 1020 – 1024.)

[6] 李振. 复杂场地桩锚支护基坑变形性状及影响因素研究[D]. 重庆:重庆大学, 2012.  
(LI Zhen. Study on deformation behavior and its impact factors of deep foundation pit supported by pile anchorage in construction cite of complicated geological conditions [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.)

- [7] 侯玉杰,冯晓腊,莫云,等.天津高银中央商务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 Yujie, FENG Xiaola, 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.)
- [8] 古海东,杨敏.土钉墙在疏排桩支护基坑中的加固效果试验研究[J].土木工程学报,2015(1):129-138.  
(GU Haidong, YANG Min. Experimental study on supporting effect of scattered row piles in soil nailing wall for foundation pit protection[J]. China civil engineering journal, 2015(1):129-138.)
- [9] MULLAPUDI R, AYOUB A. Nonlinear finite element modeling of beams on two-parameter foundations[J]. Computers and geotechnics, 2010, 37(3):334-342.
- [10] LIN Hang, XIONG Wei, CAO Ping. Stability of soil nailed slope using strength reduction method[J]. Journal of environmental and civil engineering, 2013, 17(9):872-885.
- [11] WEI W B, CHENG Y M. Soil nailed slope by strength reduction and limit equilibrium methods[J]. Computers and geotechnics, 2010, 37(5):602-618.
- [12] SCHWEIGER H F, VERMEER P A, WEHNERT M. On the design of deep excavation based on finite element analysis[J]. Geomechanics and tunneling, 2009, 2:333-334.
- [13] LIU Jian, SHANG Ke, XU Xing. Stability analysis of soil nailing supporting structure based on system failure probability method[J]. Geotechnical special publication, 2014, 252:27-39.
- [14] 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 Siwei, GAO Donghua, YANG Tiedeng. Monitoring and numerical analysis of a deep foundation pit[J]. Journal of rock mechanics and engineering, 2011, 31(S1):284-291.)
- [15] 查蓍生,林志月,催可锐.深基坑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 Pusheng, LIN Zhiyue, CUI Kerui. Numerical analysis of stress and deformation characteristics of foundation pits under deep excavation[J]. Journal of geotechnical engineering, 2013, 35(S1):484-488.)
- [16] 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 Zhonghua, WANG Weidong. Selection of soil constitutive models for numerical analysis of deep excavation in close proximity to sensitive properties[J]. Rock and soil mechanics, 2010, 31(1):258-264.)
- [17] 王文忠.复杂条件下基坑支护设计研究[J].吉林建筑工程学院报,2012(6):9-12.  
(WANG Wenzhong. Research on design of foundation pit support in complicated conditions[J]. Journal of Jilin institute of architecture and civil engineering, 2012(6):9-12.)
- [18] 王浩然,徐中华.复杂环境条件下的基坑工程设计与实测分析[J].地下空间与工程学报,2011,7(5):968-976.  
(WANG Haoran, XU Zhonghua. Design and monitoring of the deep excavation in complicated environment[J]. Journal of underground space and engineering, 2011, 7(5):968-976.)
- [19] 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 Shuguang. Deformation control of excavation engineering with complicated surroundings[J]. Journal of rock mechanics and engineering, 2013, 33(S1):474-477.)
- [20] 郭文胜,杜浩鸣,张志强.复合土钉墙处理复杂环境下基坑工程适用性分析[J].中国管理信息化,2016,19(20):101-104.  
(GUO Wensheng, DU Haoming, ZHANG Zhiqiang. Applicability analysis of foundation pit engineering under composite soil-nailed wall processing complicated environment[J]. China management informationization, 2016, 19(20):101-104.)
- [21] 贾堤,石峰,郑刚,等.深基坑工程数值模拟土体弹性模量取值的探讨[J].岩土工程学报,2008,30(增刊1):155-158.  
(JIA Di, SHI Feng, ZHENG Gang, et al. Elastic modulus of soil used in numerical simulation of deep foundation pits[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2008, 30(S1):155-158.)