软土地区异形深基坑变形及对邻近建筑物的影响分析

游欣雨[1] 李 彤[1] 武钰涵[1] 刘恒娟[1] 肖 宇[2,3,*] 童立元[2,3]
（1.南京城建隧桥智慧管理有限公司，南京 210017；2.东南大学交通学院，南京 211189；
3.东南大学岩土工程研究所，南京 211189）

摘 要 近年来，城市核心区的基坑工程向着形状不规则、开挖深度大、紧邻既有建构筑物的趋势迅速发展，在基坑开挖支护的过程中把控其对周边环境的影响，成为基坑工程安全实施的关键。本研究以南京惠民大道综合改造工程中的基坑工程为依托，结合实测数据，对异形深基坑开挖全过程进行模拟分析，得到异形深基坑的变形特点及对邻近建筑物的影响规律。研究结果表明：异形深基坑受空间效应的显著影响，基坑角部附近地下连续墙和坑外土体的变形较小，基坑边中部变形较大；增加支撑层数及采用轴力伺服钢支撑可以有效控制地下连续墙的变形；有限宽度土体的土压力较半无限土体更小；基坑开挖对邻近建筑物靠近基坑边中部处的影响较大，且影响与距基坑距离的增大而衰减。

关键词 软土，异形深基坑，变形，邻近建筑物，数值模拟
中图分类号：TU47 **文献标志码**：A **DOI**：10.15935/j.cnki.jggcs.202604.0019

Analysis on Deformation of Irregular Deep Excavation in Soft Soil Area and Its Influence on Adjacent Buildings

YOU Xinyu[1] LI Tong[1] WU Yuhan[1] LIU Hengjuan[1] XIAO Yu[2,3,*] TONG Liyuan[2,3]
（1.Nanjing Urban Construction Tunnel and Bridge Wisdom Management Co., Ltd., Nanjing210017, China;
2.School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China;
3.Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China）

Abstract In recent years, foundation pit engineering in urban core areas has increasingly exhibited characteristics such as irregular shape, large excavation depth, and proximity to existing buildings. Controlling the influence on the surrounding environment during the excavation has become the key to ensuring the safe implementation of excavation projects. Based on the deep foundation pit engineering of the Huimin Avenue Comprehensive Reconstruction Project in Nanjing, combined with measured data, a simulation analysis was conducted on the entire excavation process of the irregular deep foundation pit, and the deformation characteristics and the influence on adjacent buildings were obtained. The results indicate that the irregular deep foundation pit is significantly affected by spatial effects. The deformation of diaphragm wall and soil near the corner of the pit is relatively smaller, while that is relatively bigger at the middle of pit. Increasing the number of support levels and employing servo axial force steel supports can effectively control the deformation of the diaphragm wall. The earth pressure of narrow width soil behind wall is smaller than that of

收稿日期：2024-11-21
基金项目：国家自然科学基金资助项目（52178384）
作者简介：游欣雨（1988-），男，江苏连云港人，硕士，高级工程师，主要从事建设工程管理工作。E-mail：1157180386@qq.com
[*] **联系作者**：肖 宇（1995-），男，江苏南京人，博士生，主要从事岩土及地下工程研究工作。E-mail：230208837@seu.edu.cn

semi-infinite space soil. The excavation process exerts significant influence on adjacent buildings located near the middle of the pit, and the influence decreases with increasing distance from the pit.

Keywords soft soil, irregular deep excavation, deformation, adjacent building, numerical simulation

0 引 言

随着城市人口密度的不断攀升,城市核心区的土地资源日益稀缺,基坑工程往往紧邻既有建构筑物,场地受限严重,形状不规则的基坑愈发常见[1-2]。此外,城市核心区的基坑工程必须严控环境影响,保证邻近建构筑物的安全,也同时增加了设计与施工的难度[3-4]。对于沿江、沿海经济发达地区的城市而言,地下空间开发的需求持续扩大,但广泛分布的含水率高、强度较低的深厚软土及高地下水位的地层条件,更是对基坑工程的开展提出了挑战[5-7]。

在此背景下,一些学者采用现场试验、数值分析等方法对软土基坑变形及环境影响开展了一系列研究,取得了一定成果。赵意晋等[8]对某软土地层下的异形地铁车站深基坑开展数值模拟研究,结果显示地表沉降具有明显的空间效应,支撑轴力的大小与开挖深度、宽度以及支撑类型有关,建筑物沉降在离基坑越近处越大。韩健勇等[9]结合实测数据和有限元模拟,提出了坑后土体主次影响区,并总结了建筑物基础位置、不同附加应力对围护桩体和建筑物变形的影响规律。刘露等[10]采用有限元法分析发现,临坑建筑桩基的水平和竖向位移均表现出随着基坑开挖深度的增加而逐渐增大的规律。顾正瑞等[11]结合实测数据和数值模拟研究了临江软土地区分区顺逆作,结合基坑的变形性状,发现基坑变形受空间效应的影响,角部变形较中部更小,有限宽度土体的侧压力明显小于半无限土体,附近建筑物的沉降随距基坑距离的增大而减小。李琳等[12]通过三维有限元模拟研究了深大异形基坑开挖对邻近桥墩、砖混房屋的影响,发现深基础变形小于浅基础,变形距基坑由远及近逐渐增大,基于模拟结果提出了增加地下连续墙(简称地连墙)长度、在基坑和桥墩之间进行三轴搅拌桩加固的保护方案。综上,在异形基坑中,由于支护结构-土的相互作用机制与常规形状基坑不同,异形基坑开挖过程中的空间效应特征及其与周围既有建构筑物的相互影响更为复杂。在城市核心区中,与日俱增的异形基坑施工引起的周围环境的复杂动态响应对工程安全提出了新的挑战。因此,对异形基坑尤其在软土地层条件下的空间效应及对紧邻建构筑物的影响规律仍需更加深入的探讨。

本文依托位于城市核心区的南京惠民大道综合改造工程中的基坑工程,建立了异形深基坑和邻近建筑物的三维有限元模型,模拟了深基坑开挖的全过程,并与实测数据对比验证了模型的可靠性,分析了异形深基坑的开挖变形特点,以及对邻近建筑物的影响。研究成果可为类似基坑工程的设计与施工提供参考。

1 工程背景

1.1 工程概况

南京惠民大道是建宁西路过江通道南岸接线的第一条高等级被交道路,随着建宁西路过江通道总体建设的推进,惠民大道综合改造工程也同期开展。惠民大道综合改造工程长约2.3 km,主要包括惠民大道高架桥改建为双向六车道隧道、建宁西路过江通道惠民大道地下互通匝道、惠民大道干线管廊等。其中,三标段采用明挖法施工,由于改造面积较大,分为三期施工。一期基坑整体呈南北向展布,开挖形状不规则,总面积约3 042 m^2,深度达29.5 m,东侧紧邻大型商场。商场近似L形,为地上5层地下2层的框架结构,桩筏基础,距本基坑东侧开挖边线的净距在1倍开挖深度范围内,北部西侧与基坑最小距离仅为7.3 m。基坑平面如图1所示。

1.2 工程地质条件

本场地隶属于长江漫滩地貌单元,区内广泛分布粉质黏土、淤泥质粉质黏土、粉细砂等。场地潜水主要赋存于填土、黏性土中,水位埋深为0.50~2.93 m,年变幅1.5 m左右。承压水主要赋存于深部④-2层粉细砂中,埋深在40~50 m以下,具弱承压性。场地距长江仅约570 m,地下水受长江水位影响较大。

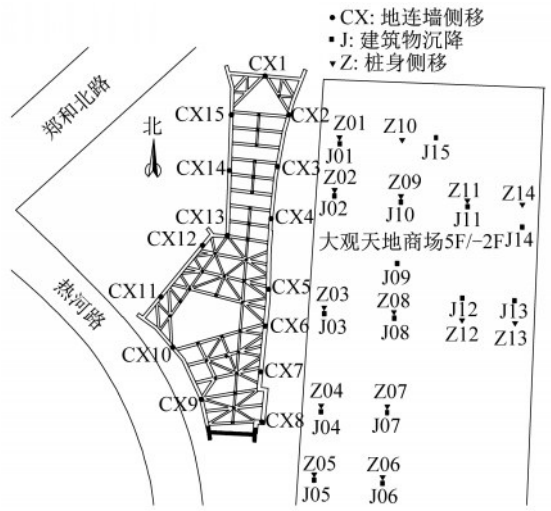


图1　基坑平面示意图

Fig.1　Schematic diagram of foundation pit

1.3　基坑设计方案

由于本基坑工程位于交通主干道交叉口，紧邻大型商场，周围管线、高压输电设施较多，环境条件复杂，为确保工程安全和减小环境影响，充分考虑地层条件和施工条件，本工程采用地下连续墙+内支撑的支护体系，且分区设计，北部与南部支撑层数与类型不同。地连墙采用C35混凝土，墙厚1.2 m，基坑南部东侧为1.5 m，墙底均入岩至少1.0 m，地连墙内外采用三轴搅拌桩进行加固，接缝采用全方位高压喷射(MJS)工法桩加强止水效果。基坑北部狭长，采用4层混凝土支撑+4层轴力伺服钢支撑；南部开挖面积较大、形状不规则，采用7层混凝土支撑，冠梁、首层支撑采用C35混凝土，第二层及以下采用C40混凝土，钢支撑均采用ϕ800×20(mm)(Q235B)钢管。基坑剖面图如图2所示。

2　数值模型

2.1　三维有限元模型

研究采用ABAQUS大型有限元软件建立基坑和商场的三维有限元模型。地层计算域尺寸为520 m×700 m×90 m，网格划分采用近密远疏的原则，基坑处网格均较密，网格密度随着远离基坑的方向变疏。支撑、桩采用B31梁单元，地连墙采用C3D8I单元，土体采用C3D8P单元，商场采用C3D8R单元，模型如图3所示，共划分285 404个单元和330 703个节点。模型侧面设置水平方向

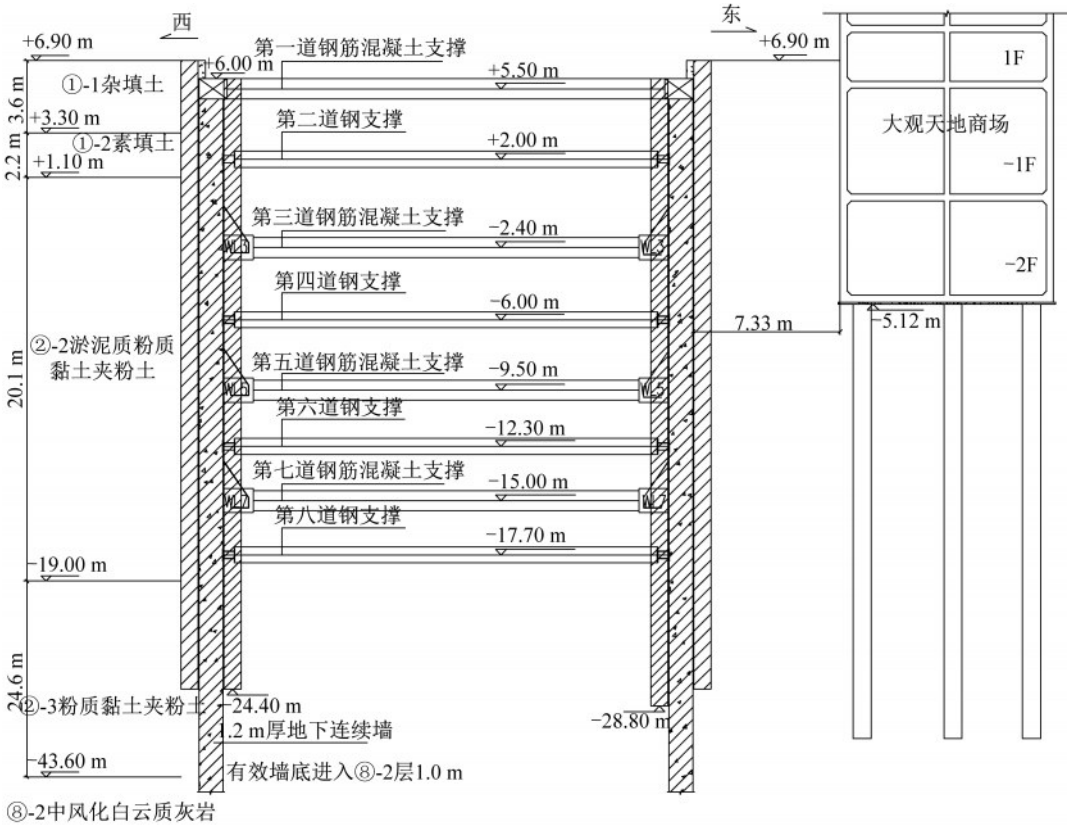


图2　基坑剖面图

Fig.2　Foundation pit profile

约束，底部设置固定约束，地下水位设置在地表下1 m处，施加孔压边界，各侧面设置为常水头边界。

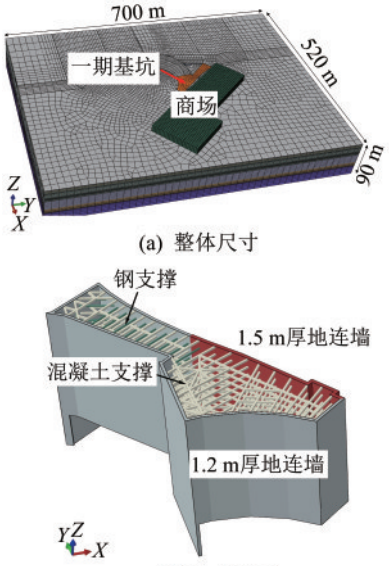


图3 三维有限元模型

Fig.3 3D finite element model

2.2 模拟参数

地连墙、支撑、桩、楼板、梁、柱中，C35、C40混凝土密度为2 400 kg/m^3，弹性模量分别为31.5 GPa、32.5 GPa，泊松比为0.2；钢支撑密度为7 800 kg/m^3，弹性模量为210 GPa，泊松比为0.3。对于填土和黏性土，采用修正剑桥本构模型；对于砂性土和岩石，采用摩尔-库仑本构模型，各土层的计算参数基于勘察参数确定，见表1、表2。

2.3 分析步序

首先对模型施加重力，并设置孔压边界，还原地层初始应力，再激活既有建筑，得到基坑未施工的状态，然后开始进行施工地连墙、地基加固、降水开挖、架设支撑等一系列工序。各层土体开挖前，均将坑内地下水位降至开挖面以下1 m，每层开挖深度均控制在下一层支撑底部标高以下0.5 m。具体模拟工况见表3。

表1 填土和黏性土计算参数

Table 1 Calculation parameters for fill and cohesive soils

地层名称	密度 ρ/(kg·m^{-3})	静止侧压力系数K_0	孔隙比e_0	泊松比v	λ	κ	M	e_1	渗透系数K/(m·s^{-1})
杂填土	1 880	0.60	0.98	0.350	0.081 0	0.003 0	0.446 8	1.205	2.0×10^{-5}
素填土	1 820	0.59	0.99	0.360	0.115 0	0.004 0	0.607 0	1.462	2.5×10^{-7}
淤泥质粉质黏土	1 790	0.60	1.06	0.375	0.113 8	0.012 2	0.699 3	1.670	5.0×10^{-8}
粉质黏土	1 851	0.55	0.90	0.350	0.106 2	0.009 1	0.763 7	1.545	4.0×10^{-8}

表2 岩石和砂性土计算参数

Table 2 Calculation parameters for rock and sandy soils

地层名称	密度 ρ/(kg·m^{-3})	静止侧压力系数K_0	孔隙比e_0	弹性模量E/MPa	泊松比v	黏聚力c'/kPa	内摩擦角φ'/(°)	渗透系数K/(m·s^{-1})
粉细砂	2148	0.38	0.673	30	0.39	2.1	33.4	1.63×10^{-5}
中等风化灰岩	2750	0.56	0.053	5 500	0.36	800	40.0	1×10^{-9}

表3 模拟工况

Table 3 Simulation conditions

工况步数	施工工况
1	施加重力，进行地应力平衡
2	激活商场建筑
3	施工地连墙、地基加固
4	第一层降水
5	第一层开挖
6	施工第一层支撑，开挖至下一层支撑
……	……
28	第九层降水
29	第九层开挖

2.4 模型验证

基坑开挖结束后，选取靠近建筑物的地连墙水平位移数据和建筑物沉降数据，与三维模型数值计算结果进行对比，见图4。从对比中可以看到，地连墙侧移最大值和最大值位置吻合较好，但在坑底以下计算值更大；建筑物沉降值变化趋势基本一致，总体看来，计算值与实测值的分布规律一致，验证了有限元模型的有效性。

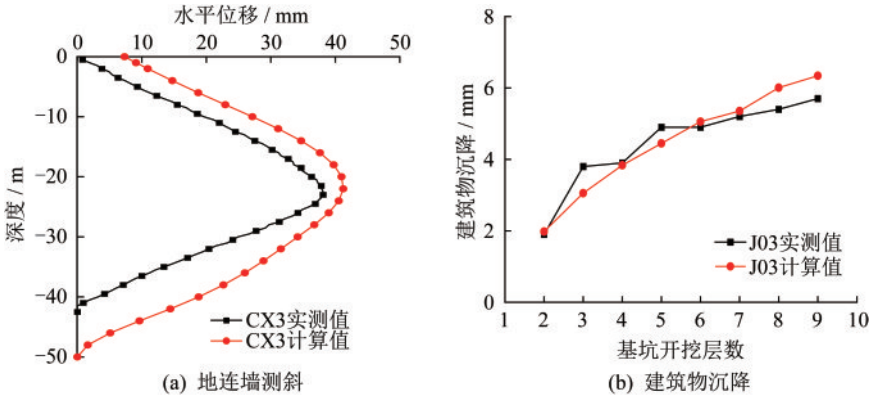


图 4　实测值与模拟结果对比

Fig.4　Comparison between measured and simulation results

3　计算结果分析

3.1　地连墙变形

图 5 为基坑开挖至坑底后地连墙的变形云图。可以看出，基坑北部地连墙最大变形较南部更小，最大变形位于北部西侧的开挖面附近，约为 44 mm（0.15%H_e，H_e为挖深）。北部东侧地连墙靠近商场，该侧承受墙外的有限宽度土体土压力，墙厚（1.2 m）虽不及南部东侧（1.5 m），但变形小于南部东侧地连墙。可见，北部支撑层数较南部多一层，且设置 4 道轴力伺服钢支撑，北部的地连墙变形控制效果较南部更好。基坑南部开挖面积较大，形状不规则，东侧存在小部分凸出，西南侧为凹向坑内的弧形，坑内均设置混凝土支撑，最大变形位于南部东侧的开挖面附近，约为 48 mm（0.163%H_e）。基坑整体受空间效应的影响明显，地连墙角部附近变形较小，远离角部处的中部变形较大。基坑北部北侧地连墙、南部南侧地连墙水平跨度较短，故变形均较小；南部东侧凸出部分对地连墙局部抗弯刚度产生加强作用，故附近变形较小。

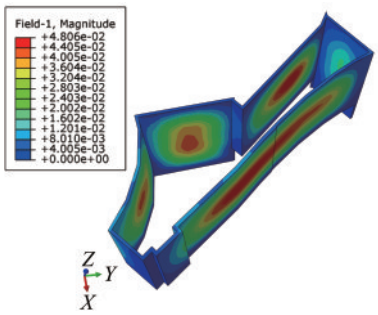


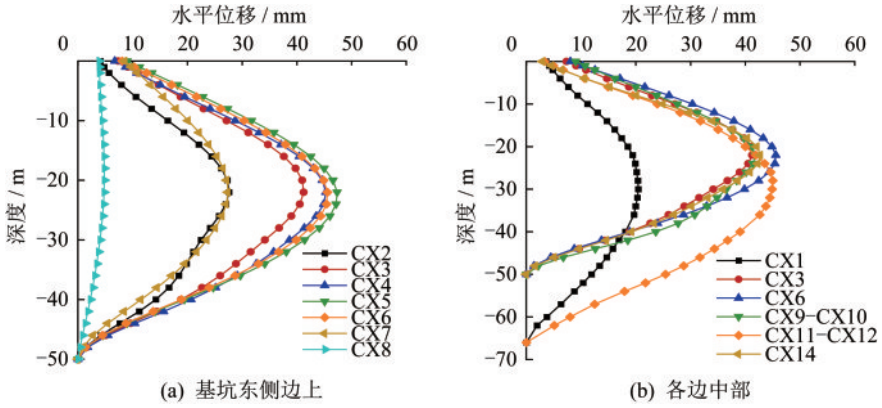
图 5　地连墙变形云图

Fig.5　Deformation contour of diaphragm wall

为体现异形基坑的空间效应和整体变形特点，选取部分测点绘制地连墙侧向变形曲线图。

图 6（a）中为基坑东侧（靠近商场）地连墙各测点侧向变形，变形曲线均呈“内凸”形，开挖面附近变形较大，顶端和底部变形较小，部分墙顶向坑内位移，最大变形位置均在开挖面附近，最大变形值由北向南（CX2→CX3→CX4→CX5→CX6→CX7→CX8）先增大后减小，反映了基坑边上的空间效应，即地连墙中部的侧移值较大，角部的侧移值较小。CX5 处变形最大，最大变形值达 48.1 mm（0.163%H_e）；CX8 处变形最小，最大变形值仅为 4.83 mm（0.016%H_e）。尽管南部支撑层数较北部更少，且未设置预应力支撑，但由于南部东侧地连墙厚度为 1.5 m，局部刚度得到加强，同时西南侧弧形地连墙上的不利荷载通过支撑传递至东侧地连墙，使得 CX6 处最大变形值与北部东侧的 CX4 处相当。CX7 处靠近东侧局部凸出部分，最大变形值与靠近角部的 CX2 处相当，CX2 处受角部斜撑作用，墙顶变形较 CX7 处更小。

图 6（b）展示了基坑各边上具有代表性的墙体中部测点的侧向变形。CX1 处最大变形值明显小于 CX14 处，可见基坑长边上中部的最大侧移值大于基坑短边中部处，坑角效应的影响范围有限，对短边的影响更大。受东侧地连墙外有限宽度土体影响，CX3 处的最大侧移值小于 CX14 处，反映了有限宽度土体土压力较半无限土体状况下更小[13]。CX11—CX12 处的最大侧移值仅次于 CX6，较 CX9—CX10 处更大，可见当基坑开挖剖面上的开挖宽度增加时，土体卸荷体积更大，坑内被动区土抗力减小更加显著，导致地连墙侧移更大。



(a) 基坑东侧边上　　(b) 各边中部

图6　地连墙侧向变形曲线

Fig.6　Lateral deformation distribution of diaphragm wall

3.2　周围土体变形

图7为基坑开挖至坑底后基坑周围土体的沉降云图。图中显示，基坑周围土体沉降受空间效应影响显著，基坑角部附近的沉降明显小于坑边中部附近。北部西侧沉降最大，最大沉降在CX14附近，其值为30.3 mm(0.103%H_e)，北部北侧和南部南侧沉降均较小。东侧靠近商场的有限宽度土体沉降较西侧半无限土体状况下更小，最大沉降值由北向南先增大后减小，与东侧地连墙变形分布规律一致，最大沉降在CX5附近，其值为23.7 mm(0.08%H_e)。

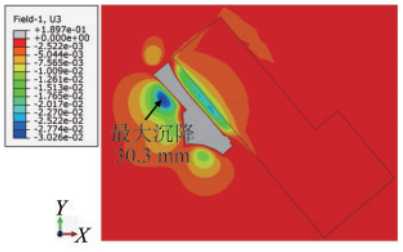


图7　土体沉降云图

Fig.7　Settlement contour of soil

图8展示了基坑部分墙体中部处的地表沉降曲线，沉降数据取自相应的地连墙测斜点处的坑外土体(垂直于地连墙方向)。图中显示，地表沉降曲线均呈“凹槽”形，沉降影响范围约为80 m(2.71H_e)；CX1外最大沉降值较小，仅为7.52 mm(0.025%H_e)，最大沉降位置位于坑外约11.5 m(0.39H_e)处；CX14外最大沉降值较大，达28.57 mm(0.097%H_e)，最大沉降位置位于坑外约12.2 m(0.41H_e)处。CX9—CX10外、CX11—CX12外的最大沉降值相当，约为11.5 mm(0.039%H_e)，最大沉降位置分别位于坑外约11.5 m(0.39H_e)、9.6 m(0.33H_e)处。基坑的空间效应在沉降上的表现为短边外沉降较小(CX1外)，长边外沉降较大(CX14外)，直线形边外(CX1外、CX11—CX12外、CX14外)的最大沉降位置均在约0.4H_e处，而凹弧形边外(CX9—CX10外)的最大沉降位置更近，在约0.33H_e处。

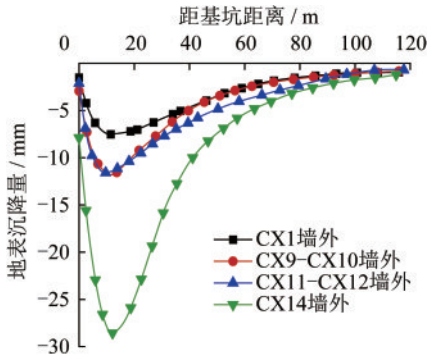


图8　地表沉降曲线

Fig.8　Settlement curves of ground surface

3.3　建筑物上部结构变形

图9为基坑开挖完成后东侧商场上部结构的沉降云图。商场北部受西侧基坑开挖卸荷的影响较大，产生的沉降由靠近基坑的西侧向远离基坑的东侧逐渐减小，且在靠近基坑的西部沿基坑边线方向呈带状分布，与基坑东侧有限土体的沉降分布规律相似，最大沉降值达11.2 mm。商场南部远离基坑开挖面，受影响较小，沉降分布由北向南逐渐减小。

图10给出了基坑开挖完成后商场上部结构沉降的分布情况。从图中可以看出，在基坑开挖影响下，商场产生不均匀沉降，且在南北、东西方向上的分布具有明显规律。图10(a)给出了南北

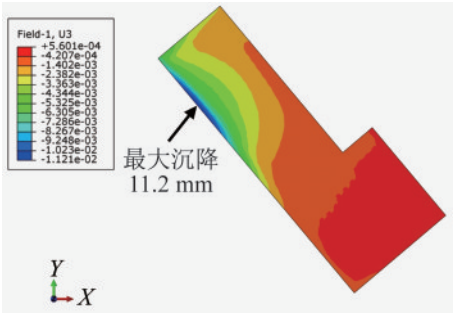


图 9　上部结构沉降云图

Fig.9　Settlement contour of superstructure

方向上的沉降分布，在商场北部基坑南北开挖范围以内，沉降值在靠近基坑边中部处较大，如测点 J02、J03、J09、J10，向南北两侧逐渐减小，而在基坑开挖剖面以外逐渐趋于零。图 10(b)给出了东西方向上的沉降分布，商场沉降值随距基坑距离的增加逐渐减小，靠近基坑的西侧测点 J01—J03 沉降值较大，其次为测点 J08—J10，距基坑最远的测点 J11—J12 沉降值较小。其中，J03 测点沉降值最大，达 5.85 mm，其位置邻近地连墙 CX5 最大侧向变形点，而 J11 测点沉降值最小，仅为 2.15 mm。

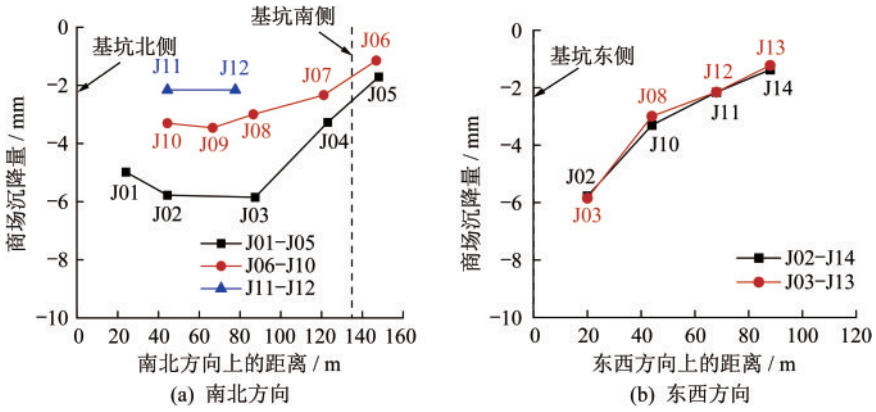


图 10　上部结构沉降分布

Fig.10　Settlement distribution of superstructure

3.4　建筑物桩基变形

图 11 为基坑开挖完成后桩基的变形云图。桩基整体变形分布特点与上部结构相似，北部变形较大，南部几乎不受影响，北部桩基产生向基坑的变形，分布由西向东逐渐减小，最大变形所在深度与西侧地连墙最大变形所在深度一致。

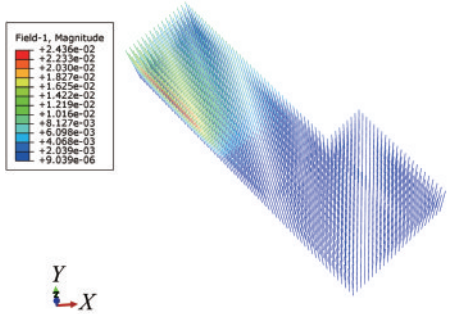


图 11　桩基变形云图

Fig.11　Deformation contour of pile-foundation

图 12 给出了基坑开挖完成后桩身向基坑方向的侧向变形曲线。图中显示，在基坑开挖剖面以外的 Z05、Z06 测点处桩身侧向变形曲线呈“三角”形，桩顶变形较大，其他测点处桩身侧向变形曲线均呈“凸出”形，桩身向坑内变形，中上部变形较大。距基坑较近的 Z02—Z04 测点最大变形位置在深度约−24 m 处，与地连墙东侧最大变形位置相当，而距基坑较远的 Z07—Z10 测点最大变形位置上升，在深度约−20 m 处，且最大变形值明显减小。图 13(a)显示，在南北方向上，桩身最大侧移值由北向南先增大后减小，靠近基坑东侧中部的 Z02、Z03 测点最大侧移值较大，约为 16.67 mm，基坑开挖剖面以外的 Z05、Z06 测点最大侧移值较小，仅为 3.8 mm 左右。图 13(b)显示，在东西方向上，桩身最大侧移值距基坑由近及远迅速减小，在远离基坑的 Z13、Z14 测点处，桩身最大侧移值仅为 3.01~3.53 mm。

4　结　论

本文以南京惠民大道综合改造工程为依托，以软土地层条件下的异形深基坑为研究对象，采用 ABAQUS 有限元软件对深基坑开挖的全过程进行了模拟，在实测数据验证后，分析了异形深基坑开挖后的变形特点及对邻近建筑物的影响规

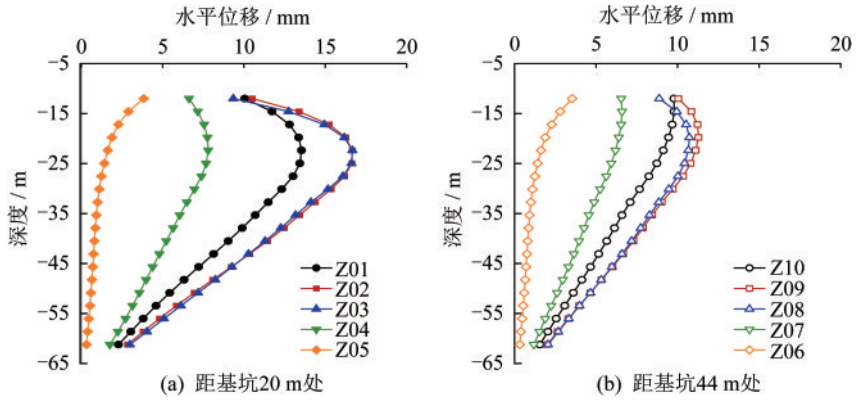


图 12 桩身侧向变形曲线

Fig.12 Lateral deformation distribution of pile

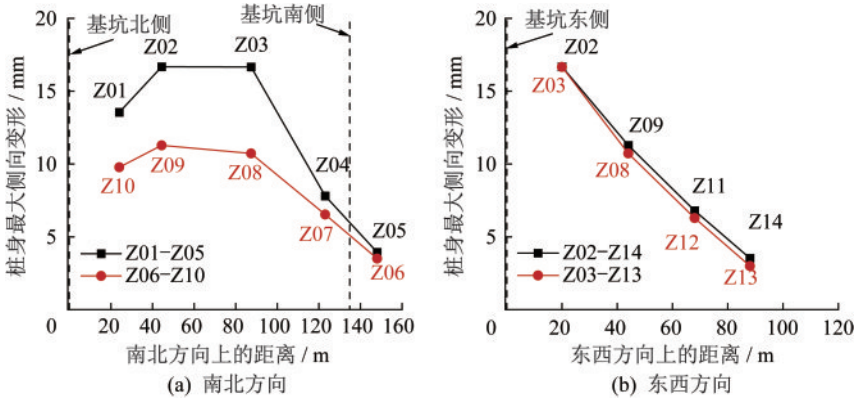


图 13 桩身最大侧向变形

Fig.13 Maximum lateral deformation of pile

律，主要结论如下：

（1）基坑地连墙部分位置的墙顶向坑内位移，最大变形位置在开挖面附近；基坑北部东侧地连墙墙厚较南部东侧更小，但最大变形反而较南部更小，表明更多的支撑层数及轴力伺服钢支撑可以更加有效地控制变形，设计中可适当增加支撑层数，酌情采用轴力伺服支撑。

（2）异形深基坑受空间效应影响显著，角部附近地连墙变形和沉降较小，中部较大，且长边中部变形与沉降值明显大于短边，地连墙最大变形值为0.163%H_e，最大沉降值为0.103%H_e。最大沉降位置在直线形边外约0.4H_e处，而在凹弧形边外更近，约0.33H_e处，施工中应注意此处堆载。

（3）基坑靠近建筑物的东侧地连墙承受有限宽度土体的土压力，较半无限土体状况下更小，因此其最大侧移值小于西侧，同时土体最大沉降值也较西侧更小，建议在邻近建筑物的基坑设计中，考虑有限宽度土体状况下非对称荷载的影响。

（4）邻近建筑物上部结构及桩基的变形规律相似，靠近基坑的北部影响更大，而远离基坑的南部或东部区域影响较小。北部变形随着距基坑的距离，由西向东逐渐减小；西侧变形由北向南先增大后减小，分布规律与邻近地连墙最大侧向变形、土体沉降的规律一致。工程实践中，可在基坑边中部与邻近建筑物之间设置隔离桩或加固措施，以降低不利影响。

参 考 文 献

[1] 张季超，丁晓敏，庞永师，等. 广州市城市地下空间开发利用分析[J]. 工程力学，2009，26(S2)：106-114.
Zhang Jichao, Ding Xiaomin, Pang Yongshi, et al. Analysis for development and utilization of underground space in Guangzhou [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(S2): 106-114.(in Chinese)

[2] 姚国圣，吴晓俊，苏鹏. 上海软土单层地下室大面积换撑基坑变形特性实测分析[J]. 结构工程师，2024，40(3)：179-186.
Yao Guosheng, Wu Xiaojun, Su Peng. Deformation characteristics analysis of single-story basement with large-area bracing replacement method in Shanghai

soft soil[J].Structural Engineers, 2024, 40(3): 179-186.(in Chinese)

[3] 覃子玲,李镜培,姚建平,等.超大面积软土基坑施工风险评价指标与综合评价方法[J].结构工程师,2022,38(4):176-185.
Qin Ziling, Li Jingpei, Yao Jianping, et al. Risk assessment index and comprehensive evaluation method for construction of super large excavation in soft soils[J].Structural Engineers, 2022, 38(4): 176-185.(in Chinese)

[4] 金国龙,周竝,汪贵平.城市核心区深大基坑群的设计总结与反思——基于苏州中心广场项目实践[J].建筑施工,2016,38(4):383-386.
Jin Guolong, Zhou Bing, Wang Guiping. Summary and reflection of super deep and large foundation pit group design in urban core area—based on Suzhou Central Plaza project practice[J].Building Construction, 2016, 38(4):383-386.(in Chinese)

[5] 秦会来,田潇屹,王蓉,等.长江漫滩区深基坑开挖诱发地层变形及围护结构响应特性分析[J].结构工程师,2024,40(3):165-171.
Qin Huilai, Tian Xiaoyi, Wang Rong, et al. Analysis of ground deformation and response characteristics of retaining structures induced by deep foundation pit excavation in the Yangtze River floodplain area [J]. Structural Engineers, 2024, 40 (3): 165-171. (in Chinese)

[6] 段凯,石广.降水对超深基坑围护结构的影响分析[J].结构工程师,2024,40(1):142-149.
Duan Kai, Shi Guang. Analysis of influence of dewatering on supporting structure of ultra-deep foundation pit[J].Structural Engineers, 2024, 40(1): 142-149.(in Chinese)

[7] 王峻,刘松玉,张心源,等.长江漫滩区明挖隧道基坑降承压水环境影响研究[J].岩土工程学报,2024,46(S2):221-225.
Wang Jun, Liu Songyu, Zhang Xinyuan, et al. Environmental effects of confined aquifer dewatering for cut and cover tunnels in floodplain areas of Yangtze River [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(S2):221-225.(in Chinese)

[8] 赵意晋,刘恒,蔡晓慧,等.深厚软土地层中异形地铁车站深基坑开挖三维数值模拟分析[J].南京工业大学学报(自然科学版),2023,45(5):563-572.
Zhao Yijin, Liu Heng, Cai Xiaohui, et al. Three dimensional numerical simulation analysis of special shaped deep foundation pit excavation of subway station in deep soft soil stratum[J].Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2023, 45(5):563-572.(in Chinese)

[9] 韩健勇,赵文,李天亮,等.深基坑与邻近建筑物相互影响的实测及数值分析[J].工程科学与技术,2020,52(4):149-156.
Han Jianyong, Zhao Wen, Li Tianliang, et al. Field measurement and numerical analysis of the influences between the deep excavation and adjacent buildings [J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(4): 149-156.(in Chinese)

[10] 刘露,孔进,李存柱,等.基坑开挖对支护桩及临近建筑桩基的影响[J].低温建筑技术,2023,45(1):143-146.
Liu Lu, Kong Jin, Li Cunzhu, et al. Influence of foundation pit excavation on supporting pile and pile foundation of adjacent buildings[J].Low Temperature Architecture Technology, 2023, 45(1): 143-146.(in Chinese)

[11] 顾正瑞,徐中华,王卫东,等.顺逆作结合的临江深基坑变形性状三维分析[J].建筑科学,2024,40(9):102-111.
Gu Zhengrui, Xu Zhonghua, Wang Weidong, et al. 3D FEM analysis of deformation behavior of riverside deep excavation using the combination of bottom-up and top-down method[J].Building Science, 2024, 40(9):102-111.(in Chinese)

[12] 李琳,李彬,刘东,等.深厚软土区深大异形基坑开挖对临近建构筑物的影响[J].长江科学院院报,2023,40(1):140-145.
Li Lin, Li Bin, Liu Dong, et al. Influence of the excavation of large irregular deep foundation pit on adjacent buildings in soft soil area [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research, 2023, 40(1): 140-145.(in Chinese)

[13] 陈桥枫,雷升祥,赵伟,等.基于渐近法的城市近接地下空间有限土体土压力计算方法研究[J].铁道科学与工程学报,2022,19(10):3025-3034.
Chen Qiaofeng, Lei Shengxiang, Zhao Wei, et al.Study of the earth pressure for the limited soil adjacent to underground space in urban areas based on the asymptotic method[J].Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(10):3025-3034.(in Chinese)