



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.06.023

仇建春, 房彬, 曹睿哲, 等. 深基坑中新型双排复合支护结构的三维空间有限元分析[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(6): 157-164. QIU J C, FANG B, CAO R Z, et al. Three dimensional finite element analysis of new type double row composite supporting structure in deep excavation[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(6): 157-164. (in Chinese)

## 深基坑中新型双排复合支护结构的 三维空间有限元分析

仇建春<sup>1,2,3</sup>, 房彬<sup>4</sup>, 曹睿哲<sup>5</sup>, 周明明<sup>1,2,3</sup>, 田始光<sup>1,2,3</sup>

(1. 河海大学 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 南京 210098;

2. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 3. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098;

4. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵阳 550081; 5. 上海市水利工程设计研究院有限公司, 上海 200061)

**摘要:** 将两种或两种以上的支护结构组合成复合支护结构, 应用于复杂软土地基深基坑工程已受到许多研究与设计人员的关注, 以确保工程的安全、稳定及经济性。针对目前关于将地下连续墙与钻孔灌注桩及高压旋喷桩联合成新型双排复合支护结构的研究较少, 本文以某软土深基坑工程为例, 设计采用了该新型双排复合支护结构, 基于三维弹塑性有限单元法对深基坑工程的分层土体开挖与降水展开数值模拟, 通过分析该新型双排复合支护结构的结构性能及深基坑开挖对周围环境的影响, 验证设计方案的有效性, 为该类型的复合支护结构在深基坑工程中的应用和推广提供有益帮助。

**关键词:** 复合支护结构; 钻孔灌注桩; 地下连续墙; 高压旋喷桩; 有限单元法; 位移

**中图分类号:** TU 432      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-1683(2017)06-0157-08

### Three dimensional finite element analysis of new type double row composite supporting structure in deep excavation

QIU Jianchun<sup>1,2,3</sup>, FANG Bin<sup>4</sup>, CAO Ruizhe<sup>5</sup>, ZHOU Mingming<sup>1,2,3</sup>, TIAN Shiguang<sup>1,2,3</sup>

(1. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. HYDR OCHINA Guiyang Engineering Corporation Co., Ltd., Guiyang 550081, China; 5. Shanghai Water Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Shanghai 200061, China)

**Abstract:** The composite supporting structure which consists of two or more kinds of supporting structures has received much attention from researchers and designers, and has been applied in complex soft soil deep excavation engineering to ensure the safety, economy, and stability of the engineering. Considering there are few studies on the new-type double row composite supporting structure which consists of diaphragm wall, bored pile, and high pressure jet grouting pile, we took one soft foundation pit engineering as a case study, and designed the new-type double row composite supporting structure. Using the three dimen-

收稿日期: 2017-05-12      修回日期: 2017-09-13      网络出版时间: 2017-11-15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20171115.1025.014.html>

**基金项目:** 国家重点研发计划课题(2016YFC0401601); 国家自然科学基金项目(51579085; 51279052; 51379068; 51209077; 51379083; 51409167; 51479054; 51579086); 国家自然科学基金重点项目(41323001; 51139001); 2014年水文水资源与水利工程科学国家重点实验室研究项目(20145028312); 江苏省“333高层次人才培养工程”科研项目(2016-B1307101); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2015B32514; 2015B33314), 淮安市水利院士工作站资助。

**Funds:** National Key R & D Program of China (2016YFC0401601); National Natural Science Foundation of China (51579085; 51279052; 51379068; 51209077; 51379083; 51409167; 51479054; 51579086); Key Program of the National Natural Science Foundation of China (41323001; 51139001); Project Funded by China State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering (20145028312); Jiangsu Province "333 High Level Personnel Training Project" (2016-B1307101); Fundamental Research Funds for the Central Universities (2015B32514; 2015B33314); Huai'an Water Conservancy Academician Workstation.

**作者简介:** 仇建春(1989-), 男, 江苏扬州人, 博士研究生, 主要从事水工混凝土结构振动、安全监控及结构工程等领域的研究。E-mail: 121267184@qq.com

sional elastoplastic finite element method, we conducted numerical simulation of the stratified excavation and precipitation of the engineering. Through the analysis of the structural performance of the new-type double row composite supporting structure and the influence of excavation on the surrounding environment, we verified the validity of the design. This research can provide help to the application and popularization of the new-type composite supporting structure in deep excavation engineering.

**Key words:** composite supporting structure; bored pile; diaphragm wall; high pressure jet grouting pile; finite element method; displacement

随着沿海城市经济与社会的发展,高层建筑、地铁、隧道、水利工程等迅速发展,其中,软土深基坑开挖与支护工程受到广泛的关注和研究<sup>[1-3]</sup>。由于强度低、含水量大、压塑性和流变特性显著的特点,软土深基坑工程中支护结构的设计不当将导致支护结构变形过大、周围地表或建筑物变形过大等情形,影响着基坑工程乃至周围环境的安全与稳定性,甚至造成人民生命和财产的损失。常用的支护结构包括地下连续墙、灌注桩、钢板桩、土钉墙、锚杆或喷锚等,考虑到软土深基坑工程的特点,单一的支护结构型式可能无法满足实际工程的需要,将两种或两种以上支护结构组合成最佳的复合支护结构体系已逐渐受到研究和设计人员的广泛关注,以达到软土深基坑工程安全稳定、经济和技术合理的目的<sup>[4-8]</sup>。截至目前,关于地下连续墙与钻孔灌注桩加高压搅拌桩的联合双排复合支护结构在深基坑工程中应用研究较少,设计研究认为该种复合支护结构不仅具有不需内支撑、节省地下空间资源和缩短施工周期的作用,还兼具止水和围护的双重功效。某河道地处软土地区,工程地质与环境复杂,且地下水位较高,现拟建一座大型景观水闸,面临着深基坑降水与开挖工程问题,基坑最大开挖深度达到 13.6 m,且深基坑工程附近存在多幢高层建筑。由于基坑开挖平面尺寸较大,且开挖完后进行闸室段施工,内支撑的支护结构型式不适合该深基坑工程。综合工程现状,且地下水位较高,研究人员在基坑南侧(该侧有多幢建筑高楼)设计采用该种新型双排复合支护结构,在满足基坑工程安全与稳定性的基础上,希望通过该种新型双排复合支护结构的应用以丰富工程经验并进行推广。工程施工开挖前,需研究并探讨支护结构的设计合理性,本文基于三维弹塑性有限单元法<sup>[9-11]</sup>,通过模拟工程中的分层开挖与降水<sup>[12]</sup>,研究分析该新型复合支护结构的结构性能及深基坑开挖对周围环境的影响,以此对设计方案的有效性作先期检验与校正。

## 1 数值模型

### 1.1 工程概况

某地准备修建一座景观闸,该地为软土地区,修

建前闸室段面临深基坑开挖问题,基坑开挖平面尺寸为 35.0 m × 60.0 m,其中横河向长度为 60.0 m,顺河向长度为 35.0 m。由于工程采用底轴下卧式闸门,闸室段分低侧与高侧两段,两段顺河向长度均为 17.5 m。闸室段低侧基坑底高程为 -0.6 m,闸室段高侧基坑底高程为 1.5 m,由于基坑顶侧土体高程为 13.0 m,故最大开挖深度达 13.6 m。整个水闸工程中基坑开挖段设计长度较大,包括闸室段、上游连接段及下游连接段,其中闸室段先开挖后即进行闸室的相关施工,为此本文分析闸室段基坑开挖对支护结构的结构性能及周边环境的影响,图 1 给出了基坑开挖线图。该基坑工程地下水位较高,水位达 9.0 m,考虑基坑开挖深度较大,且基坑南侧有多幢高层建筑,分别为 2 层、6 层、7 层、11 层高楼。为保证深基坑工程及周围环境的安全与稳定性,基坑南侧设计采用了联合地下连续墙与钻孔灌注桩及高压旋喷桩的新型双排复合支护结构,图 2 和图 3 分别为该复合支护结构平面图及纵向剖面图。闸室段近基坑侧第一排支护结构为钻孔灌注桩与高压旋喷桩的组合结构,该段高程 7.0 m 至 9.0 m 浇筑成整体式冒梁结构,以增强该部位的整体性与结构强度。高压旋喷桩打入到基坑底部以下 3~4 m 深度至高程 -4.5 m,与钻孔灌注桩结合可发挥钻孔灌注桩的挡土功能及高压旋喷桩的止水功效,有效地节省了材料与工程费用。在此基础上,通过隔墙将第一排支护结构与第二排地下连续墙连接,整个双排复合支护结构与其内部的土体形成半重力式结构,加上地下连续墙的较好的防渗效果及高压旋喷桩的止水功能,该新型双排复合支护结构可以依靠自身承受基坑施工过程坑内外的水土压力,且具有整体刚度大、抗渗性能好、有效降低基坑变形的特点。基坑北侧设计采用锚拉地下连续墙的支护结构,本文仅对新型双排复合支护结构作研究,故不作介绍。

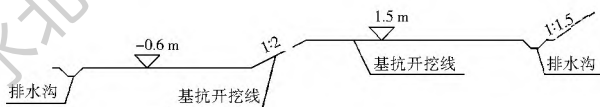


图 1 基坑开挖线

Fig. 1 Excavation line of the foundation pit

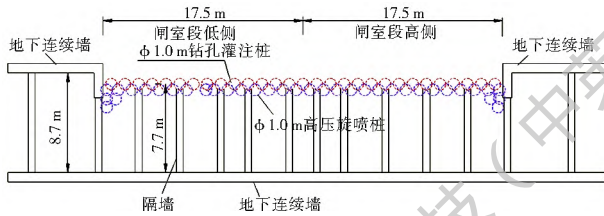


图2 双排复合支护结构的平面图

Fig. 2 The planar graph of the double row composite supporting structure

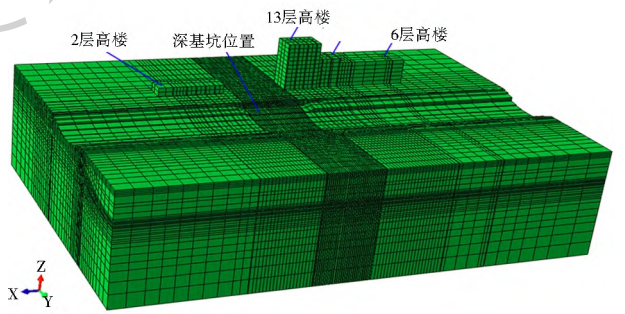


图4 基坑整体的网格图

Fig. 4 The grid chart of the whole foundation pit

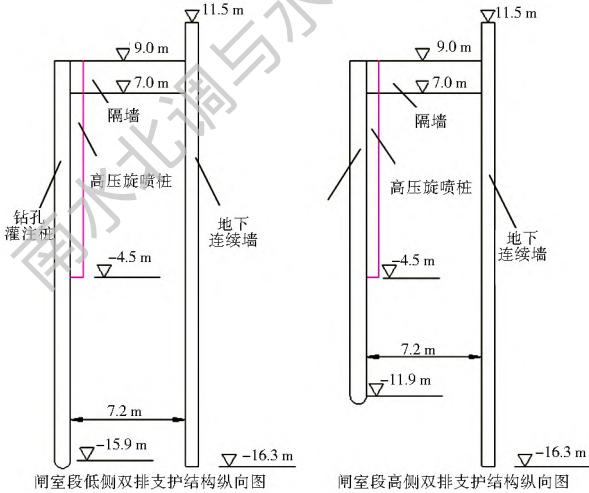


图3 双排复合支护结构的纵向剖面图

Fig. 3 The longitudinal section of the double row composite supporting structure

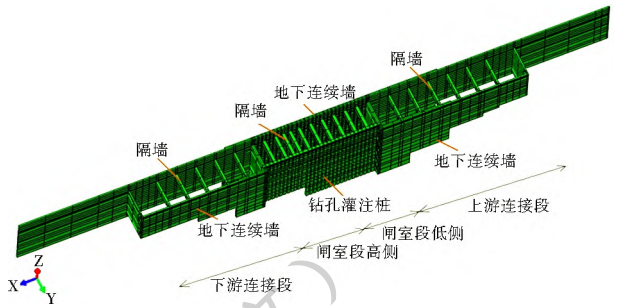


图5 双排复合支护结构数值网格图

Fig. 5 The grid chart of the double row composite supporting structure

## 1.2 模型简介

为验证设计方案的有效性及其合理性,考虑到三维弹塑性有限单元法可模拟复杂软土地基下深基坑工程的施工过程,本文首先基于大型有限元建模软件 Hypermesh 软件建立该深基坑工程模型,然后采用大型商业有限元软件 ABAQUS 展开数值模拟分析。研究发现软土深基坑中坑外土体沉降最大影响范围达 4 倍基坑开挖深度,由于基坑开挖最大深度达 13.6 m,且基坑南侧有多幢建筑高楼,为此,自支护结构向南侧延伸 83.0 m,向东侧、西侧、北侧、下侧延伸 55.0 m,模型尺寸为 300 m × 210 m × 78 m,基坑数值模拟的网格图见图 4,图中可见深基坑位置及南侧多幢建筑高楼。由于钻孔灌注桩为圆形且直径为 1 m,为简化模拟,按照刚度等效的原则将钻孔灌注桩模拟为边长为 0.876 m 的正方形钻孔灌注桩,图 5 为该工程采用的新型复合双排支护结构的数值模拟图。整个基坑工程数值模型,由 227 767 个单元组成,其中土体、地下连续墙、钻孔灌注桩及高层建筑均用三维八节点单元 C3D8 模拟,模型四周施加水平约束,底边界施加固定约束<sup>[13-15]</sup>。

## 1.3 本构模型及力学参数

对于土体的模拟,本文采用理想弹塑性 Mohr-Coulomb 本构模型,对于各土层的弹性模量,表 1 列出了《岩土工程手册》中的弹性模量与压缩模量经验关系表,以此为参考,基于各土层的压缩系数,确定各层土的弹性模量与压缩模量的比例关系,则各层土的勘测参数和物理力学参数见表 2。地下连续墙、钻孔灌注桩、高层建筑的刚度较土体刚度大多个数量级,本文采用线弹性模型展开模拟。地下连续墙及钻孔灌注桩的强度等级为 C30,考虑到刚施工不久,为安全考虑其影响,其弹性模量乘折减系数 0.8,取为 24 GPa,泊松比为 0.2。多幢建筑高楼按照实体材料进行模拟,按混凝土强度等级 C25 考虑,弹性模量取为 28 GPa,泊松比为 0.2,高楼的荷载大小按照设计方考虑,取每层楼 20 kN/m<sup>2</sup> 大小考虑。高压旋喷桩不仅发挥着止水的功效,且对土体具有加固作用,而设计及施工中高压旋喷桩<sup>[16-17]</sup>的抗压强度  $F_{cu} = 3 \text{ MPa}$ ,则对应加固土体部位的弹性模量取  $F_{ref} = 126F_{cu} = 378 \text{ MPa}$ ,泊松比取为 0.2。

表 1 弹性模量与压缩模量经验关系

Tab. 1 The empirical relationship between elasticity modulus and compression modulus

土的种类	弹性模量/压缩模量
老黏性土,低压缩性土	2~3
一般黏性土	1.4~2
新近沉积黏性土	0.8~1.0
一般高压缩性土	0.9~1.2
淤泥及淤泥质土	1.1~1.5
黄土	2~5

表 2 数值模拟土层力学参数

Tab. 2 Soil mechanical parameters in numerical simulation

土层号	土层描述	比重	黏聚力 / kPa	内摩擦角 (°)	饱和容重 / (kN · m <sup>-3</sup> )	压缩系数	压缩模量 / MPa	弹性模量 / 压缩模量	弹性模量 / MPa	泊松比
1	淤泥质粉质壤土	2.75	6	4	16.17	1.11	2.54	1.3	3.0	0.35
2	重粉质砂壤土	2.71	6	18	18.91	0.2	9.07	1.8	16.3	0.35
3	重粉质壤土	2.73	12	9	17.74	0.6	3.55	1.8	6.4	0.35
4	重粉质壤土	2.73	31	14	19.11	0.28	6.35	2	12.7	0.35
5	重粉质砂壤土	2.71	5	19	19.11	0.18	9.83	3	29.50	0.35
6	黏土	2.74	69	19	19.50	0.15	11.89	3	35.7	0.3
7	中细沙	2.69	11	25	19.80	0.14	12.5	3	37.5	0.3
8	黏土	2.74	64	18	19.40	0.14	12.38	3	37.1	0.3

此外, 钻孔灌注桩、地下连续墙、建筑高楼与土体在材料属性上有较大的差异, 随着基坑开挖与降水的进行, 墙土间可能会发生相对较小的移动, 有必要考虑两者间的接触问题并展开模拟<sup>[18-20]</sup>。ABAQUS 软件中有面面接触模型模拟墙土间的接触特性, 包括两个主要特性, 即接触面间的法向特性与接触面间的切向特性。本文采用理想硬接触算法模拟墙土间的法向接触, 不允许墙土间发生穿透位移。

墙土接触面间切向摩擦采用理想弹塑性库伦摩擦模型模拟, 在墙土接触面产生相对滑动前, 接触面上的总剪切应力

$$\tau_c = \sqrt{\tau_x^2 + \tau_y^2} \quad (2)$$

式中:  $\tau_c$  为总剪切应力;  $\tau_x$  及  $\tau_y$  分别为接触面上两个相互垂直方向上的剪切应力。

而接触面间的滑动摩阻力  $\tau_s$  与法向接触应力  $p$  成正比:

$$\tau_s = \mu p \quad (3)$$

式中:  $\mu$  为墙土接触面间的摩擦系数。

当接触面上的总剪切应力超过滑动摩阻力时, 墙土间即会产生相对滑动。对于滑动摩阻力与接触面间相对位移的关系, 本文采用罚函数法实现接触面间的切向接触, 该算法允许墙土接触面间出现较小的相对滑动。

对于墙土接触面间的摩擦系数及允许相对滑动, 参考地质资料及国家建筑桩基技术规范取值, 见表 3。而墙土接触面间的相对滑动较模型的单元尺寸小许多, 对计算结果影响较小, 本文允许相对滑动取为 1.0 mm。

表 3 土层接触面摩擦系数

Tab. 3 Friction coefficient of contact surface between soil layers

参数	第 1 层	第 2 层	第 3 层	第 4 层	第 5 层	第 6 层	第 7 层	第 8 层
$\mu$	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.40	0.25

## 1.4 模拟方案

为确保基坑工程的安全, 需研究该深基坑工程在不同开挖深度下支护结构的变形、墙后地表沉降及高楼沉降等, 以与实际施工过程中进行比较分析并反馈设计与施工人员。对于基坑工程中地下水位, 由于地下连续墙及高压旋喷桩的防渗性能, 加上实测监控墙后地下水位并可及时采取措施, 墙后地下水位保持 9.0 m。每次开挖前, 对坑内进行降水处理, 为保证顺利开挖, 水深降至对应开挖步以下 0.5 m。考虑到基坑最大开挖深度达到 13.6 m, 且河道型基坑呈凹形, 综合设计与施工要求, 对该深基坑分四次开挖, 各层土体开挖厚分别为 4.5 m、3.0 m、3.0 m、3.1 m, 对应开挖土层底高程分别为 8.5 m、5.5 m、2.5 m、-0.6 m。

支护结构上的水土压力采用目前常用的水土计算方法<sup>[2]</sup>, 该方法中作用在支护结构上的侧向压力由土体的有效应力及孔隙水压力组成, 地下水位以下的土体取浮容重, 地下水位以上的土体采用饱和容重, 作用在支护结构上的水压力通过直接施加三角形分布荷载模拟。

## 2 计算结果

### 2.1 支护结构位移分析

支护结构的位移是评判其力学性能的重要指标, 由于开挖卸荷的影响, 支护结构将产生向基坑方向的水平向位移, 且随着基坑开挖深度的增大而逐渐增大, 图 6 为基坑开挖至底部时支护结构的水平向位移。由于该双排复合支护结构的特性及在深基坑中的位置, 可看到第一排灌注桩的最大水平向位移位于基坑中部位置, 达 44.8 mm, 第二排地下连续墙的水平向位移最大达 44.9 mm。随着距主基坑段的距离加大, 支护结构的水平向位移逐渐



减小。由于隔墙的连接作用,支护结构隔墙两端(高程9.0 m)的灌注桩及地下连续墙的水平向位移相差较小。

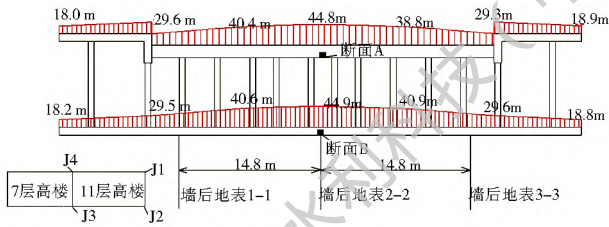


图6 开挖至基坑底部时双排复合支护9.0 m 高程水平向位移

Fig. 6 Horizontal displacement of the double row composite supporting structure at the elevation of 9.0 m when the soil was excavated to the bottom of the foundation pit

由于基坑开挖过程中未设置内支撑体系,依靠结构自身抵挡坑内外水土压力,因此该复合支护结构的水平向位移类似于悬臂梁变形,最大水平向位移位于支护结构顶部。图7及图8分别为第一排灌注桩断面A及第二排地下连续墙断面B的在不同开挖深度下的水平向位移,由图可见纵墙变形整体倾斜趋势,且水平向位移随基坑开挖深度增大而增大,最大水平向位移均位于墙顶位置,断面A与B的水平向位移最大值分别为44.8 mm和44.9 mm。在纵向方向上,地下连续墙水平向位移随着高程的降低而逐渐减小,由于隔墙增大了支护结构上部的刚度,支护结构上部位置水平向位移减小的趋势较小,而下部位置水平向位移减小的趋势较大。

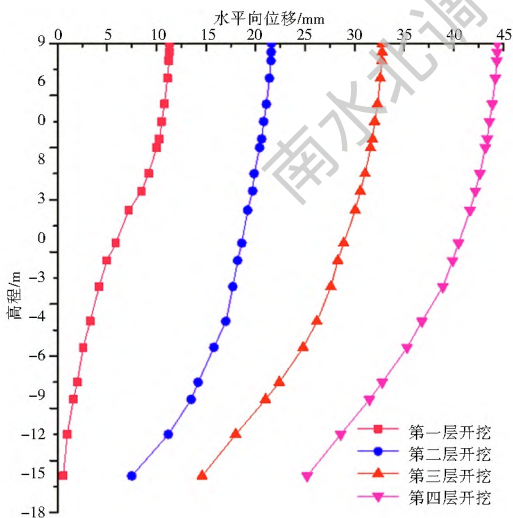


图7 双排复合支护结构断面A水平向位移  
Fig. 7 Horizontal displacement of section A of the double row composite supporting structure

对于支护结构的竖直向位移,由于开挖卸荷的影响,基坑会发生回弹现象,地下连续墙也将发生竖直向的位移,其中断面A与断面B的竖直向位移最大,图9为所示断面在不同开挖深度下的竖直向位

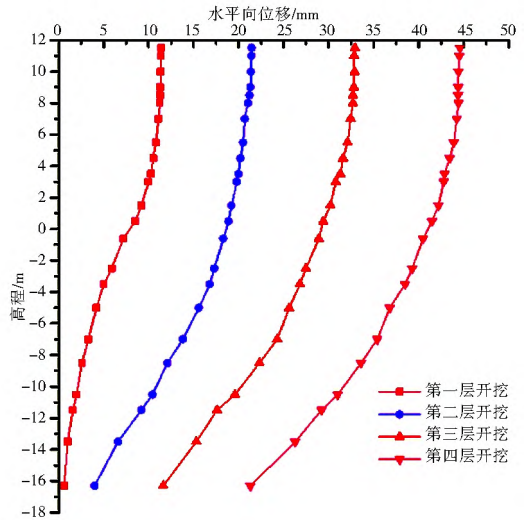


图8 双排复合支护结构断面B水平向位移

Fig. 8 Horizontal displacement of section B of the double row composite supporting structure

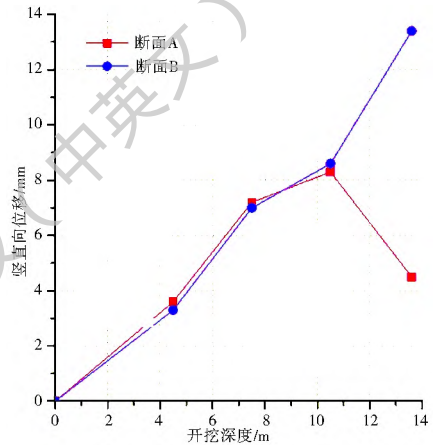


图9 双排复合支护结构断面A及断面B的竖直向位移

Fig. 9 Vertical displacement of sections A and B of the double row composite supporting structure

移。开挖深度在10.5 m前,由于基坑回弹两断面的竖直向位移逐渐增大,开挖最后一层土体时,由于其水平向位移增大及支护结构整体向基坑倾斜的作用,断面A的竖直向位移有一定的减小,而结构的整体变形协调导致断面B的竖直向位移继续增大,最大竖直向位移达13.4 mm。

参照《GB 50497-2009 建筑基坑工程监测技术规范》,结合该深基坑工程,该支护结构的最大允许水平向位移及最大允许竖直向位移分别为40~50 mm、25~30 mm,因此支护结构的位移均在规范允许范围内。

## 2.2 墙后地表沉降分析

基坑开挖卸荷不仅导致双排复合支护结构水平向位移,还将引起坑内土体回弹隆起的现象,在支护结构侧向变形及土体回弹隆起的共同作用下,墙后土体也将发生变形,其中墙后土体沉降是评价基坑

开挖对周围环境影响的重要指标。研究认为<sup>[21]</sup>, 墙后地表沉降分为三角型和凹槽型两种形态。后续开挖引起的支护结构下部水平向位移增大较快时, 墙后地表往往表现为凹槽型沉降, 而前期开挖产生的水平向位移较大而后期产生的水平向位移较小时, 墙后地表发生三角型沉降。为此, 本文取图 6 所示的墙后地表 3 个断面作分析, 图 10 至图 12 分别为墙后地表 3 个断面在不同开挖层次下的沉降曲线, 三个断面墙后地表沉降均呈凹槽型。由图可见, 地表沉降随着开挖深度的增大而逐渐增大, 当基坑开挖至底部时, 沉降达到最大, 三个断面的沉降最大分别为 -20.3 mm、-17.7 mm、-17.0 mm, 其中墙后地表 1-1 断面沉降最大, 且最大沉降位于墙后 12.7 m, 证明了附近高楼荷载对加大地表沉降存在着影响。参照《GB 50497-2009 建筑基坑工程监测技术规范》, 墙后地表沉降允许值为 25~30 mm, 因此墙后地表沉降在安全范围内。

### 2.3 高楼位移分析

墙后地表的水平向位移及沉降将进一步带来附近高楼产生位移, 过大的高楼位移将对附近居民的生命财产安全造成危害性的影响, 因此对高楼位移展开数值模拟对确保及验证支护结构的安全有着重要的意义。考虑到离主基坑最近为 11 层高楼, 且该建筑高楼最高, 势必位移最大, 也最具危险性, 因此对其展开位移分析极具代表性。如图 6 所示, 取 11 层高楼 4 个角点, 表 4、表 5 列出 11 层高楼角点 J1 至 J4 在不同开挖深度下的横河向位移及竖向位移, 可看出 11 层高楼 4 角点随着基坑开挖深度的增大而逐渐增大, 其中角点 J1 的横河向位移最大达到 20.53 mm, 沉降最大达到 16.00 mm。参照《GB 50497-2009 建筑基坑工程监测技术规范》, 墙后地表沉降允许值为 10~60 mm, 且最大不均匀沉降允许倾斜为 0.2%, 由于 J1 与 J2 的距离为 15.6 m, 且两位置处沉降分别为 16.0 mm、1.03 mm, 则其倾斜度为  $14.97 \text{ mm} / 15.6 \text{ m} = 0.096\%$ , 因此在安全允许范围内。

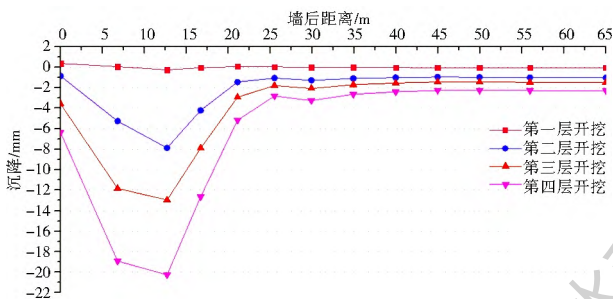


图 10 墙后地表 1-1 沉降曲线

Fig. 10 Settlement of section 1-1 behind diaphragm wall

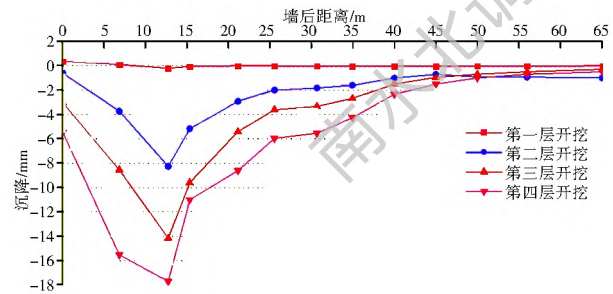


图 11 墙后地表 2-2 沉降曲线

Fig. 11 Settlement of section 2-2 behind diaphragm wall

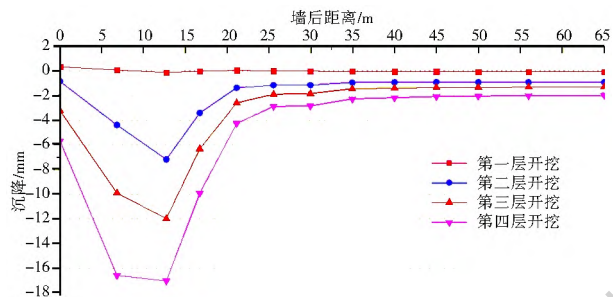


图 12 墙后地表 3-3 沉降曲线

Fig. 12 Settlement of section 3-3 behind diaphragm wall

表 4 11 层高楼角点横河向位移

Tab. 4 Horizontal displacement perpendicular to the river in the corners of the 11-story building mm

位置	J1	J2	J3	J4
开挖第一层土	0.29	0.29	0.23	0.23
开挖第二层土	7.43	7.46	6.39	6.39
开挖第三层土	14.14	14.13	12.17	12.18
开挖第四层土	20.53	20.52	17.75	17.75

表 5 11 层高楼角点竖向位移

Tab. 5 Vertical displacement in the corners of the 11-story building mm

位置	J1	J2	J3	J4
开挖第一层土	-0.26	-0.45	-0.37	-0.17
开挖第二层土	-5.28	-1.15	-1.16	-5.29
开挖第三层土	-10.40	-0.97	-1.10	-10.52
开挖第四层土	-16.00	-1.03	-1.15	-15.87

### 3 结论

本文采用三维弹塑性有限元法对某设计采用新型双排复合支护结构的深基坑工程展开数值模拟, 分析了基坑开挖过程中的变形特性, 得出以下结论。

(1) 该双排复合支护结构依靠结构自身抵挡水土压力, 其水平向位移类似于悬臂梁变形, 第一排灌注桩和第二排地下连续墙的水平向位移随着高程的降低而逐渐减小。在基坑开挖过程中, 整个支护结构的最大水平向位移位于支护结构顶部, 且随着开

挖深度的增大,水平向位移逐渐增大,开挖至基坑底部时,第一排灌注桩和第二排地下连续墙的水平向位移最大分别达到 44.8 mm 和 44.9 mm。由于隔墙的连接作用,隔墙两端的灌注桩及地下连续墙的水平向位移相差较小。双排复合支护结构的结构特性及其深基坑中的布置,决定了支护结构的最大水平向位移位于基坑中部位置,支护结构水平向位移沿基坑中轴线向上游和下游呈减小趋势。

(2) 双排复合支护结构断面 A 和断面 B 的竖直向最大,且均发生回弹,两个断面在开挖前三步的竖直向位移随着开挖深度增大而增大,第四步开挖时,断面 B 的垂直向位移继续增大,由于整个支护结构向基坑内部产生较大的水平向位移,且第四步开挖发生在基坑底部,整个支护结构呈向基坑倾倒的位移趋势,整个支护结构的协调变形促使断面 A 在最后一步开挖时竖直向位移减小。

(3) 双排复合支护结构的墙后地表沉降均呈凹槽型,且在开挖过程中,地表沉降随着开挖深度的增大而逐渐增大,高楼荷载会加大地表沉降,靠近高楼建筑物一侧的墙后地表 1-1 断面沉降最大,最大沉降达到-20.3 mm。

(4) 墙后地表水平位移和沉降进一步带来附近高楼产生位移,离主基坑的 11 层高楼水平向位移和沉降最大分别达到 20.53 mm 和 16.00 mm。

(5) 整个双排复合支护结构的水平向位移和竖直向位移、墙后地表沉降、附近高楼的水平向位移和沉降均在《GB 50497-2009 建筑基坑工程监测技术规范》中对应该深基坑工程的安全范围内,从而验证了该工程设计结构方案的有效性,能够辅助设计并指导施工,并为同类工程提供借鉴。

#### 参考文献(References):

- [1] 王晓晖. 软土深基坑支护结构内力与变形的影响因素分析[D]. 南京: 河海大学, 2003. (WANG X H. Analysis of factors on effect of internal force and deformation for retaining structure of deep foundation pit under soft soil[D]. Nanjing: Hohai University, 2003. (in Chinese))
- [2] 候永茂. 软土地层中格形地下连续墙维护结构性状研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010. (HOU Y M. Behavior of cellular diaphragm wall in soft deposit[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010. (in Chinese))
- [3] 李佳. 基坑开挖位移及土体水平抗力比例系数的反分析[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 185-191. (LI J. Back analysis on displacement of supporting structure and proportional coefficient of horizontal resistance during foundation excavation[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(2): 185-191. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddqk.2017.02.028.
- [4] 李峰. 桩锚土钉复合支护基坑施工时变力学研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2010. (LI F. The research on construction time varying mechanics and its application on pile anchor and soil nailing composite supporting deep foundation pit[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2010. (in Chinese))
- [5] 陈洪凯, 梁丹, 董平, 等. 隧道径向锚杆-斜交锚杆复合支护技术研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(3): 754-760. (CHEN H K, LIANG D, DONG P, et al. Study on tunnel composite supporting technology with short radical anchors & long sloping bolts[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(3): 754-760. (in Chinese))
- [6] 管玉坤. 基坑复合支护结构的桩土相互作用与土拱效应研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2010. (GUAN Y K. Studies on pile-soil interactions and soil arching effect in composite supporting structure of foundation ditch[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [7] 林忠伟, 王新宇, 张振铎. 微型护坡桩和土钉墙复合支护结构设计及实践[J]. 岩土工程技术, 2008, 22(5): 263-266. (LIN Z W, WANG X Y, ZHANG Z D. Combined retaining structure of slope protection micropile and soil nailing wall[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2008, 22(5): 263-266. (in Chinese))
- [8] 周亮. 排桩复合土钉支护结构工作机理及设计方法研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2014. (ZHOU L. Research on working mechanism and design method of piles in row and composite soil nailing supporting structure[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2014. (in Chinese))
- [9] 赵利益, 蔡伟铭. 深基坑开挖三维弹塑性有限元分析[J]. 上海铁道大学学报, 1997, 18(4): 100-105. (ZHAO L Y, CAI W M. 3 dimension elastic plastic finite element analysis of the deep foundation pit excavation[J]. Journal of Shanghai Tiedao University, 1997, 18(4): 100-105. (in Chinese))
- [10] 时爱祥, 邓祥吉, 仇建春, 等. 格形地连墙的三维有限元分析[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(03): 571-574. (SHI A X, DENG X J, QIU J C, et al. Three dimensional finite element analysis of cellular diaphragm wall. [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(03): 571-574. (in Chinese))
- [11] 曹明杰, 曹鑫, 徐政治. 泵站基坑开挖中的地下连续墙有限元结构计算[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(6): 204-208. (CAO M J, CAO X, XU Z Z. Finite element structural calculation of underground continuous wall in excavation of pump station foundation pit[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(6): 204-208. (in Chinese))
- [12] 仇建春, 时爱祥, 夏友超, 等. 双排格形地下连续墙的空间变形三维有限元分析[J]. 水利水电技术, 2014, 45(8): 78-82. (QIU J C, SHI A X, XIA Y C, et al. 3D finite element analysis on spatial deformation of double row cellular continuous diaphragm wall[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2014(08): 78-82. (in Chinese))
- [13] ARAI Y, KUSAKABE O, MURATA O, et al. A numerical

- study on ground displacement and stress during and after the installation of deep circular diaphragm walls and soil excavation[J]. *Computers & Geotechnics*, 2008, 35(5): 791-807. DOI: 10.1016/j.compgeo.2007.11.001.
- [14] CHEN J J, LEI H, WANG J H. Numerical analysis of the installation effect of diaphragm walls in saturated soft clay[J]. *Acta Geotechnica*, 2014, 9(6): 981-991. DOI: 10.1007/s11440-013-0284-x.
- [15] CARRUBBA P, COLONNA P. A comparison of numerical methods for multistaged walls[J]. *Computers & Geotechnics*, 2000, 27(2): 117-140. DOI: 10.1016/S0266-352X(00)00007-0.
- [16] 郝峰. 高压旋喷桩复合土钉墙 Plaxis 有限元分析[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2009, 36(9): 52-55. (HAO F. Plaxis finite element analysis on supporting structure with high pressure jet grouting pile and composite soil nailing wall[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling & Tunneling)*, 2009, 36(9): 52-55. (in Chinese))
- [17] 刘震国. 高压旋喷桩止水帷幕在深基坑支护中的应用[J]. *建筑机械化*, 2012, 33(S1): 68-71. (LIU Z G. High pressure chemical churning pile water stop curtain applied in deep foundation pit[J]. *Construction Mechanization*, 2012, 33(S1): 68-71. (in Chinese))
- [18] 李龙舟. 基于 ABAQUS 软件的覆盖层中塑性混凝土防渗墙的应力变形分析[J]. *科技创新与应用*, 2014(2): 1-3. (LI L Z. Deformation and stress analysis of plastic concrete cut off wall in overburden layer with ABAQUS software[J]. *Technology Innovation and Application*, 2014(2): 1-3. (in Chinese))
- [19] 朱守鹏. 接触算法在桩土结构相互作用中的应用[D]. 柳州: 广西工学院, 2012. (ZHU S P. Application of contact algorithm in the pile soil structure interaction[D]. Liuzhou: Guangxi University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [20] 何良德, 苏兴海, 徐笛清, 等. 基于修正剑桥渗流耦合模型的闸室有限元分析[J]. *中国港湾建设*, 2013(3): 16-21. (HE L D, SU X H, XU D Q, et al. Finite element analysis of chamber walls of ship locks based on modified cam clay model coupling with biot theory[J]. *China Harbour Engineering*, 2013(3): 16-21. (in Chinese))
- [21] HSIEH P G, OU C Y. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1998, 35(6): 1004-1017. DOI: 10.1139/cgj35-6-1004.

(上接第 156 页)

- [18] 卞小林. 地表粗糙度的计算研究[J]. *通化师范学院学报*, 2008, 29(8): 111-113. (BIAN X L. Surface roughness calculation study[J]. *Journal of Tonghua Normal University*, 2008, 29(8): 111-113. (in Chinese))
- [19] SEIDEL J P, HABERFIELD C M, 杨翠珠. 节理粗糙度研究的新进展[J]. *地质科学译丛*, 1996(2): 70-78. (SEIDEL J P, HABERFIELD C M, YANG C Z. Towards an understanding of joint roughness[J]. *Journal of Geoscience Translations*, 1996, 13(2): 70-78. (in Chinese))
- [20] 张慧娟, 孙宇瑞, 林剑辉, 等. 不同粗糙度尺度下预测表层土壤孔隙率量化指数比较研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2009, 17(1): 69-76. (ZHANG H J, SUN Y R, LIN J H, et al. Comparative study on predicting porosity by different roughness indices[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2009, 17(1): 69-76. (in Chinese))
- [21] 胡金星, 潘懋, 马照亭, 等. 高效构建 Delaunay 三角网数字地形模型算法研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2003, 39(5): 736-741. (HU J X, PAN M, MA Z T, et al. Study on faster algorithm for constructing Delaunay triangulation's DTM[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2003, 39(5): 736-741. (in Chinese))
- [22] 黄培之. 基于等高线特性的三维表面重建方法的研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2005, 30(8): 668-672. (HUANG P Z. 3D Terrain surface reconstruction with contour data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(8): 668-672. (in Chinese))