

深厚软土地层地下车站端头井深开挖施工与数值模拟

李桂颖¹, 陆玉和¹, 朱海星², 苗李欣¹

¹中铁四局集团第四工程有限公司, 安徽 合肥

²同济大学, 上海

收稿日期: 2022年1月19日; 录用日期: 2022年2月9日; 发布日期: 2022年2月16日

摘要

深厚软土地区土体承载力低, 易产生触变性, 引起周边土体不均匀沉降。为研究深厚软土地层地下车站端头井深开挖周边土体的位移特征及围护结构的受力变形特性, 运用MidasGTSNX计算软件, 对软土地层某地铁深基坑施工过程进行建模分析。结果表明, 在开挖的过程中, 地表沉降随着开挖进行会越来越大, 沉降最大位置出现在端头井距端头井边界0.5倍的端头井宽度处, 沉降影响范围为端头井宽度两倍处; 随着开挖的进行, 地连墙侧向位移也会不断变大, 最大位移处在开挖面附近; 除了第一道支撑外, 其余支撑轴力值在开挖至坑底时达到最大。

关键词

深厚软土层, 车站深基坑, 施工技术, 数值模拟, 受力与变形

Construction and Numerical Simulation of Deep Excavation of End Shaft of Underground Station in Deep Soft Soil Layer

Guiying Li¹, Yuhe Lu¹, Haixing Zhu², Lixing Miao¹

¹The Fourth Engineering Co., Ltd. of China Tiesiju Civil Engineering Group, Hefei Anhui

²Tongji University, Shanghai

Received: Jan. 19th, 2022; accepted: Feb. 9th, 2022; published: Feb. 16th, 2022

文章引用: 李桂颖, 陆玉和, 朱海星, 苗李欣. 深厚软土地层地下车站端头井深开挖施工与数值模拟[J]. 土木工程, 2022, 11(2): 158-167. DOI: 10.12677/hjce.2022.112016

Abstract

The bearing capacity of soil in deep soft soil area is low, which is easy to produce thixotropy, resulting in uneven settlement of surrounding soil. In order to study the displacement characteristics of the soil around the deep excavation of the end well of the underground station in the deep soft soil layer and the stress and deformation characteristics of the retaining structure, the construction process of a subway deep foundation pit in the soft soil layer is modeled and analyzed by using Midas GTS NX calculation software. The results show that in the process of excavation, the surface settlement will increase with the progress of excavation. The maximum settlement occurs at the width of the end well 0.5 times from the end well to the end well boundary, and the influence range of settlement is twice the width of the end well; with the progress of excavation, the horizontal displacement of the diaphragm wall will continue to increase, and the maximum displacement is near the excavation surface; except for the first support, the axial force of other supports reaches the maximum when they are excavated to the bottom of the pit.

Keywords

Deep Soft Soil Layer, Deep Foundation Pit of the Station, Construction Technology, Numerical Simulation, Stress and Deformation

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着中国城市化程度不断加快,城市基础设施建设远远落后于城市化进程的矛盾日益显露,越来越多的城市需要进行地下空间的建设,因此基坑和隧道工程大量涌现,并且开挖深度逐渐增大。由于深基坑开挖施工的地质条件和环境条件日益复杂,呈现出很强的复杂性和独特性,工程事故率和损失也越来越大。

由于台州长期受海侵和海退的影响,沿海地区广泛分布有深厚的海陆交互相沉积软黏土。该类软黏土抗剪强度低、承载力低、灵敏度大、空隙比大、极易被扰动,且被扰动后土体性质急剧降低难以恢复,易产生触变、流变,易引起周边土地不均匀变形沉降,这样的地质条件给工程设计和施工提出了严峻的挑战[1]。付宪章[2]、古存军[3]等以深厚软土地区施工深基坑作为具体案例,分析深基坑支护设计要点和施工过程中的关键控制点,控制地表不均匀沉降;吴波[4]等通过现场监测数据,研究具体基坑在施工过程中,长期的地表变形规律;奚家米[5]等以上海虹桥 SOHO 深基坑为研究对象,运用数值计算软件对比研究了不同支护形式对基坑变形的影响;马永峰[6]等以杭州某软土深基坑工程为例,分析基坑开挖引起土体变形及对临近地铁隧道的影响。

本文结合台州市中心站 S2 线车站东端头井深开挖施工技术,利用 Midas GTS NX 有限元分析软件对车站端头井深开挖过程进行数值模拟计算与分析,为工程建设提供技术依据和保障,达到保证安全、优化设计、指导施工的目的,同时为台州以后的城市地下空间基坑和隧道设计与施工提供理论和技术经验。

2. 工程背景

2.1. 工程概况

台州中心站为台州市域铁路 S2 线与 S1 线的换乘站，位于椒江区葭芷街道下北山村市府大道和东官河南侧，采用明挖法施工。

S2 线台州中心站为地下三层车站，车站主体深度约 31.41 m，支护形式为地下连续墙+内支撑，地下连续墙墙厚 1.2 m。长度约为 32.8 m，宽度约为 31.9 m，处围护结构地连墙最深达 71 m，端头井设计尺寸大、开挖深度深。工程范围内为冲海积平原区大范围分布的软土层，主要为淤泥，其具有易触变性、高压缩性、强度低等特性，基坑施工变形控制难度大，安全风险高。

2.2. 场地工程地质条件

根据地质勘察报告，本工程场地属冲海积平原区，地形平坦开阔，深厚层软土为本工程的主要特殊岩土，软土地基的强度低、稳定性差和不均匀沉降及变形大等，是主要工程地质问题。勘探深度范围内的土层之上而下分为 10 个主要土层，特殊岩土主要包括填土、淤泥和黏土。土体主要物理力学参数如表 1 所示。

Table 1. Soil layer parameters

表 1. 地层参数表

层序	压缩模量 E(MPa)	重度 γ (kN/m ³)	泊松比 μ	粘聚力 c (kN/m ²)	内摩擦角 φ (°)
① 黏土	3.24	18.40	0.35	16.70	8.72
② 2 淤泥	1.43	16.30	0.40	2.28	2.15
② 3 淤泥质黏土	3.49	18.80	0.40	14.32	7.76
③ 黏土	5.47	19.20	0.35	28.58	12.86
④ 黏土	5.30	19.50	0.35	29.55	11.88
⑤ 黏土	6.04	19.70	0.30	32.65	12.59
⑥ 黏土	5.79	19.70	0.30	35.00	15.40
⑦ 黏土	6.80	20.00	0.25	34.27	14.16
⑨ 含砾粉质黏土	6.08	20.10	0.25	33.00	14.20
⑩ 2 强风化凝灰岩	50.00	24.00	0.20	50.00	50.00

2.3. 端头井施工方案

针对本工程地质软土的特点，根据“时空效应”理论，对基坑端头井围护和开挖过程中的时空效应进行认真分析，严格控制基坑变形。

S2 线东端头井围护结构采用地下连续墙 + 内支撑的支护型式。端头井地连墙围护结构封闭后，开始施作冠梁及第一道混凝土支撑，当达到设计强度后，开始基坑开挖。基坑开挖严格遵守“纵向分段，水平分层，随挖随撑，严禁超挖”的原则进行施工。每个工作面内均采用流水作业方式，做到开挖、支撑、监控量测等相关工序紧密配合。

S2 线车站为地下三层结构，设六道支撑，其中端头井第一、二、四道为砼支撑，其余均为钢支撑。以各道支撑为界，竖向相应分为六层放坡开挖。基坑中部设有格构柱，格构柱两侧各设置 1 台挖掘机，两侧土体同时开挖，高差控制在 2 m 以内。开挖时，每一个放坡段长度一般不超过 12 m，开挖时间和钢支撑的安装时间控制在 16 小时和 8 小时以内。开挖中及时测定支撑安装点，监控支撑端部中心位置控制在容许限值内。

3. 端头井施工数值模拟

3.1. 有限元模拟及模拟工况

基坑工程在开挖施工过程中所处的状态比较复杂，面临的问题及困难也很多。为保证工程本身及周围环境的安全，需要充分了解施工过程中结构及土体的受力变形情况。

结合台州中心站 S2 东端头井深基坑开挖实际情况，建立计算模型，如图 1 所示。为了减小有限元模型中边界约束条件对计算结果产生的不利影响，计算模型的边界范围在各个方向上均大于三倍的端头井深度。具体计算时，计算区域在水平向上的长度为 210 m，宽度为 147 m，在竖直方向上，取竖直长度为 120 m。整个计算模型划分 75,467 个单元。

计算模型中，根据场地地层情况，将土体划分为 10 层，土体采用三维实体单元模拟，定义土体为弹塑性体，采用修正 Mohr-Colomb 本构，相关参数取值情况如表 1 所示；地连墙采用三维结构单元模拟，厚度为 1.2 m，采用 C35 混凝土材料，桩基和支撑采用一维结构单元模拟，均为混凝土材料，地连墙、桩基和支撑结构均定义为弹性体，模型顶面为自由面，无约束；底面采用固定端约束；4 个侧面均只约束法向，其余方向自由无约束。

在模型仿真计算中，计算模型的网格划分和计算结果的收敛性直接相关，在对基坑内部土体和坑周土体网格划分时，对坑内土体进行加密划分，控制网格尺寸，保证计算精度和模型收敛性，坑外至模型边界处尺寸较大，以提升计算效率。

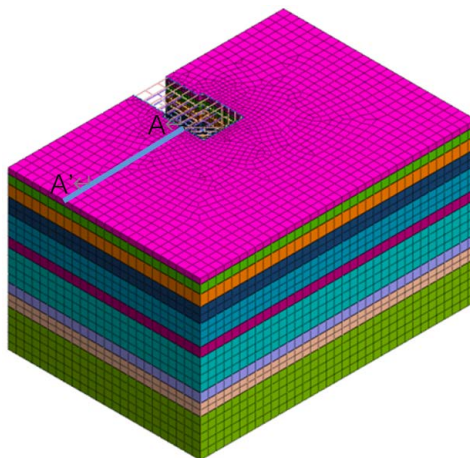


Figure 1. Numerical calculation model

图 1. 数值计算模型

3.2. 工况模拟

1) 初始位移清零。在进行模型仿真计算时，需要考虑土体自身的固结沉降以及周边建构筑物引起的地表沉降，因此，需要在基坑施工的步骤前进行模型的初始位移清零。

- 2) 地下车站深基坑端头井施加第 1 道支撑后, 开挖至第 2 道支撑底;
- 3) 地下车站深基坑端头井施加第 2 道支撑后, 开挖至第 3 道支撑底;
- 4) 地下车站深基坑端头井施加第 3 道支撑后, 开挖至第 4 道支撑底;
- 5) 地下车站深基坑端头井施加第 4 道支撑后, 开挖至第 5 道支撑底;
- 6) 地下车站深基坑端头井施加第 5 道支撑后, 开挖至第 6 道支撑底;
- 7) 地下车站深基坑端头井施加第 6 道支撑后, 开挖至端头井坑底。

4. 计算结果分析

本文重点研究开挖过程对端头井周边土体沉降、地连墙侧向位移和内支撑轴力分布的影响。

4.1. 实测计算结果对比

在端头井开挖前, 于北侧地连墙距东墙面 5 m 左右处设置测斜管, 由于现场施工条件制约, 实测采集到开挖第一层和开挖第五层的地连墙实际测斜数据, 和模型计算数据对比, 整理如图 2 和图 3 所示侧向位移图。

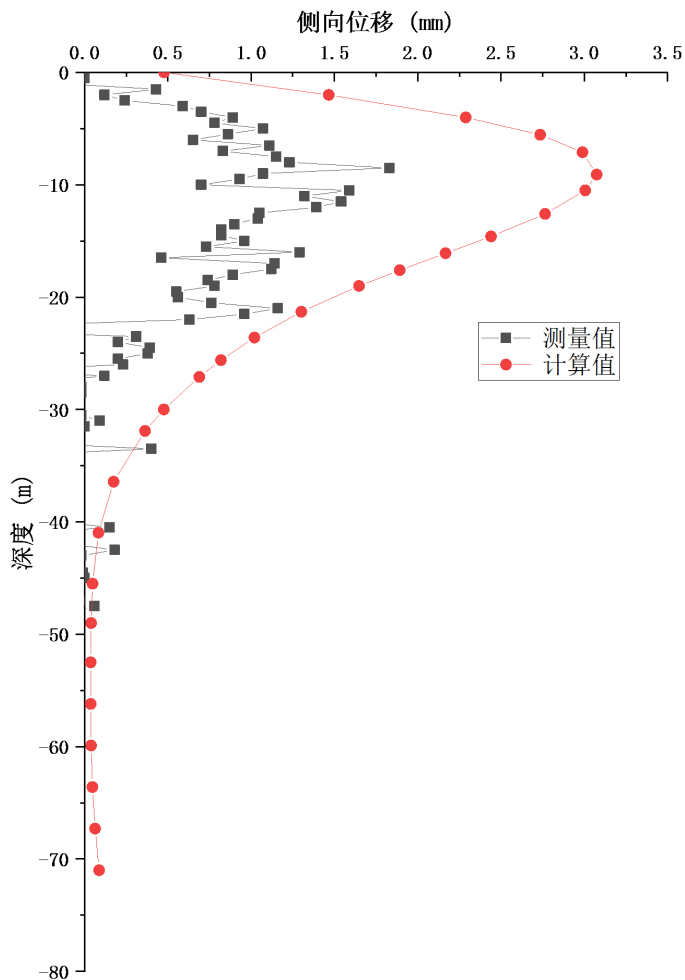


Figure 2. Lateral displacement of diaphragm wall in the first step of excavation

图 2. 第 1 步开挖地连墙侧向位移

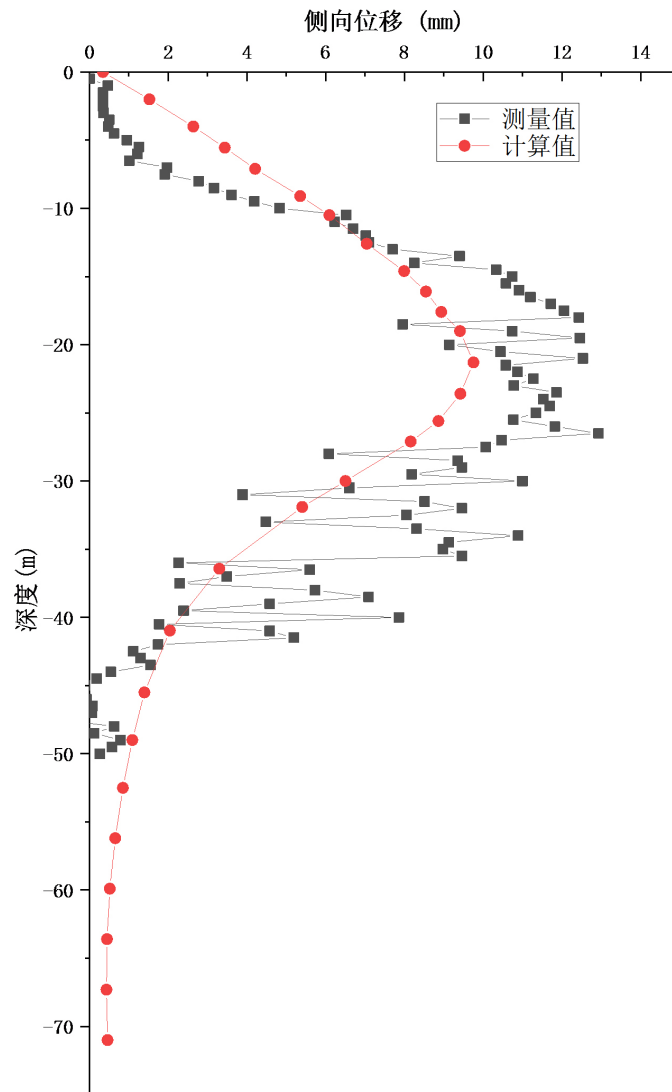


Figure 3. Lateral displacement of diaphragm wall in the fifth step of excavation

图3. 第5步开挖地连墙侧向位移

由图2和图3可知,在开挖第一层时,实际测量值与理论计算值的变化趋势一致,即侧向位移都是随着深度的增加,先增大后减小,侧向位移最大值都出现在地下9 m左右,该处实测最大位移值为1.83 mm,模型计算最大位移值为3.07 mm;在开挖第五层时,实际测量值与理论计算值的变化趋势同样一致,也为侧向位移都是随着深度的增加,先增大后减小,侧向位移最大值都出现在地下21.3 m左右,该处实测最大位移值为12.53 mm,计算最大位移值为9.75 mm。根据测量值和理论值变化趋势和转折点位置,考虑有可能出现的测量误差,计算模型与工程实际结果匹配,计算结果参考性强。

4.2. 地表沉降结果分析

提取图1中A-A'断面的计算结果,绘制地表沉降图,如图4所示。由计算结果可知,周边土体沉降随着开挖层数的增加不断增大;根据图中每个开挖步骤对应的最大沉降量可知,增速随着开挖深度的增加会适当放缓。且开挖对地表沉降的影响范围约60 m左右,约等于两倍的端头井宽度(31.9 m),当距离

端头井边缘超过 60 m 处, 地表土地沉降不足 1 mm, 可以忽略不计; 由图 4 可知, 周边土体在开挖的过程中, 地表土体沉降呈现的沉降槽形状和位置不变, 即变形量大小关系随着距离端头井边缘的远近变化规律一致, 最大的位置几乎不变, 均为距离基坑边 15 m 左右, 在第六步开挖施工完成后, 该区域沉降值最大。

在端头井开挖过程中, 土层的应力会发生重分布, 会造成土体的变形沉降。地表沉降为槽型, 原因是距离端头井较近位置处有围护结构加固, 地表沉降变形受基坑开挖影响较小, 距离端头井边缘稍远处, 土体挤压作用明显, 地表沉降变形大, 远离基坑边缘的位置, 开挖对土层的应力分布逐渐变小, 因此地表沉降逐渐减小。

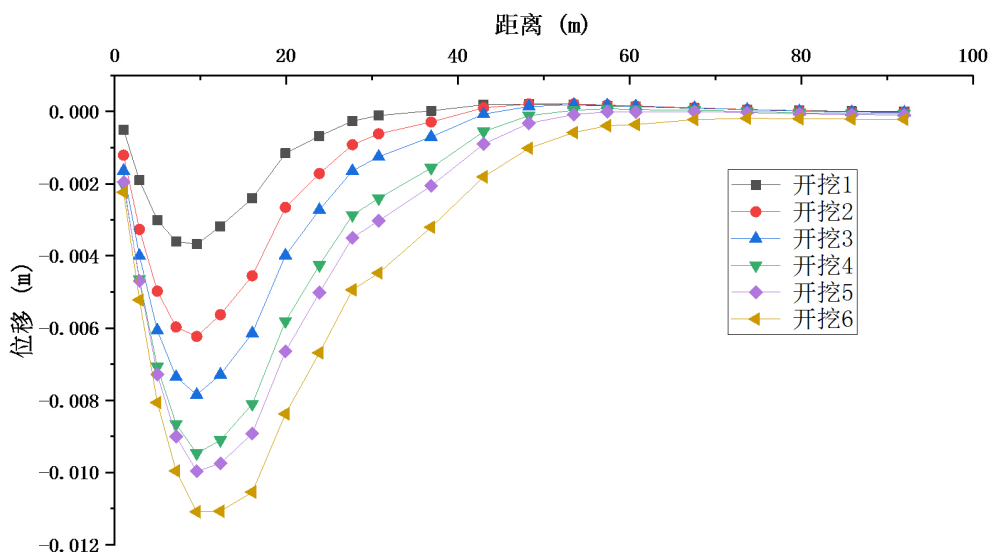


Figure 4. Surface settlement

图 4. 地表沉降图

4.3. 地连墙水平位移结果分析

根据计算模型结果整理得到, 基坑开挖至坑底时, 地连墙的侧向变形云图如图 5 所示。地连墙各开挖步骤对应的最大侧向位移如表 2 所示。

Table 2. Maximum lateral displacement and maximum displacement position of each excavation step

表 2. 各开挖步侧向位移最大值及最大位移位置表

开挖步骤	侧向变形最大值(cm)	最大位移深度(m)
第一层开挖	0.71	9.1
第二层开挖	1.20	12.6
第三层开挖	1.50	16.1
第四层开挖	1.81	19
第五层开挖	1.95	21.3
第六层开挖	2.12	30

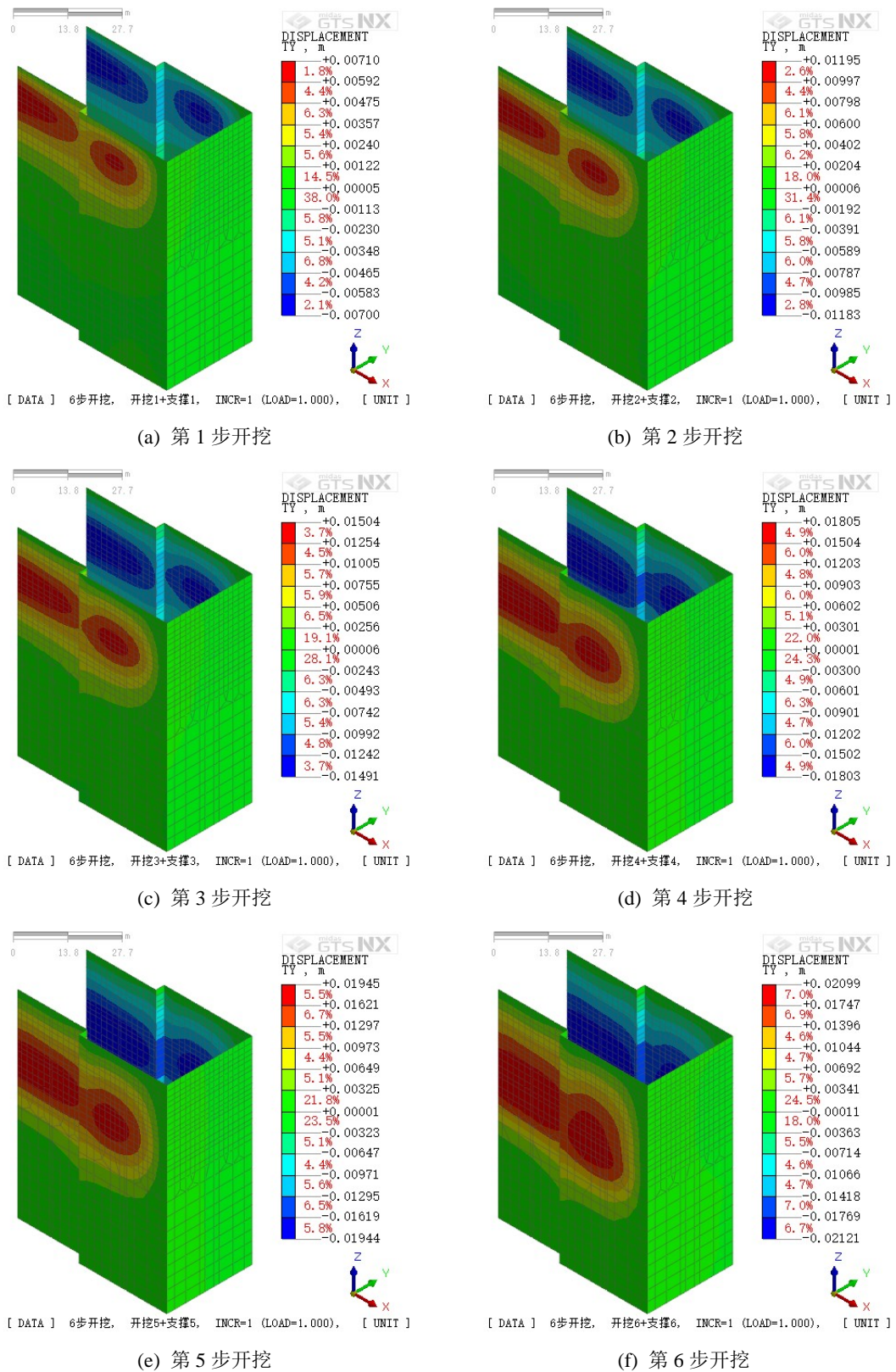


Figure 5. Cloud diagram of lateral deformation of six parts of diaphragm wall during excavation
图5. 地连墙分阶段开挖侧向变形云图

由图 5 和表 2 分析可知：随着开挖的不断深入，地连墙最大侧向位移量也在不断变大，地连墙最大位移发生点也在不断下移，最大位移点分布在坑底附近，为 2.12 cm。具体来说，开挖初期最大位移点出现在开挖面以下，随着开挖的进行，最大位移点最终处于开挖面以上位置，均在开挖面附近。

结合各个开挖步骤，在开挖及布置内支撑以后，发生最大水平方向位移处在不断下移，说明开挖产生应力重分布，会伴随着对地连墙体产生力的作用，并且在开挖面处作用效果最明显。在内支撑施工完成以后，该位置墙体位移变小，内支撑对地连墙荷载的传递作用明显。

4.4. 地连墙水平位移结果分析

根据计算模型整理得到基坑分步开挖过程中，各道支撑最大轴力随开挖进行计算值如表 3 所示。

Table 3. Calculation value of support axial force of each layer

表 3. 各层支撑轴力计算值

开挖层数	支撑轴力(kN)					
	第一道支撑	第二道支撑	第三道支撑	第四道支撑	第五道支撑	第六道支撑
第一层	2423					
第二层	3012	3117				
第三层	2991	4305	3285			
第四层	2766	4936	4972	4952		
第五层	2652	5054	5512	5882	4055	
第六层	2518	5048	5764	6792	6574	6237

由表 3 可知，第 1 道支撑轴力在开挖到第二层时达到最大，随着开挖的进行，支撑轴力逐渐减小；第 2 道、第 3 道、第 4 道、第 5 道和第 6 道支撑轴力均随着开挖的进行，轴力值逐渐增大，开挖到坑底时达到最大值；其中开挖至坑底时，第 4 道支撑轴力大于其他支撑结构的支撑轴力，最大值达到 6792 kN。

通过表 3 可以看到，支撑轴力会随着开挖进行，迅速对地连墙等围护结构产生力的作用，以控制变形。端头井在开挖过程中，开挖不断向下，内支撑受到的压力会快速增大。但是随着后一道支撑的施加，轴力得到分担，轴力的变化趋势产生拐点，随后随着支撑开挖，变化趋于平缓。

5. 结论

本文采用摩尔 - 库伦模型对深大基坑端头井过程进行模拟计算，研究深厚软土地区基坑开挖对地表沉降的影响、开挖过程中地连墙侧向变形情况以及基坑横撑轴力变化情况。

数值计算结果表明，在深厚软土地层基坑开挖过程中，基坑周围土层会出现沉降现象，并且随着开挖的进行，沉降量会不断变大。沉降最大值出现在距离基坑边缘 15 m 处，即 0.5 个基坑宽度处，沉降的影响范围约 60 m 左右，为两倍的基坑宽度。

在基坑开挖的过程中，作为围护结构的地连墙会发生水平位移，位移量随着开挖的进行不断变大，在开挖至坑底时达到最大值，位移最大值出现的位置和开挖面位置相近。

基坑开挖过程中，内支撑受到压力迅速增加，随着后一道支撑完成施工，上一道支撑轴力会得到分担；开挖到第二层时，第一道支撑轴力达到最大值，开挖到坑底时，其他支撑轴力达到最大值。

参考文献

- [1] 徐江, 龚维明, 穆保岗, 等. 软土区某地铁深基坑施工过程数值模拟及现场监测[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(3): 590-598.
- [2] 付宪章, 武登辉, 赵庆亮, 等. 滨海软土地区深基坑支护设计与施工[J]. 施工技术, 2020, 49(17): 75-79.
- [3] 古存军. 深厚软土地区地铁车站工程深基坑开挖施工监测控制技术研究[J]. 路基工程, 2016(2): 124-128, 133.
- [4] 吴波, 彭逸勇, 蒙国往, 等. 宁波软土地区相连深基坑开挖施工时空效应实测分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(1): 82-94.
- [5] 奚家米, 熊元林, 张驰, 等. 复杂环境下软土深基坑开挖对周围环境的影响[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2021, 42(1): 68-75.
- [6] 马永峰, 周丁恒, 曹力桥, 等. 临近地铁隧道的软土深基坑施工影响分析[J]. 青岛理工大学学报, 2015, 36(1): 34-40.