

软土地区超深地连墙施工全过程变形分析

冯 师¹, 刘羿辰^{2*}

¹上海隧道地基基础工程有限公司, 上海

²同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海

收稿日期: 2021年12月24日; 录用日期: 2022年1月8日; 发布日期: 2022年1月24日

摘 要

本文针对软土地区超深地连墙施工中普遍关心的稳定性问题, 首先对国内外地连墙开挖相关文献资料进行了综合分析。其次, 依托上海机场联络线梅富路工作井基坑工程, 采用三维数值方法对超深地连墙施工全过程土体变形特征进行了模拟分析, 获得了超深地连墙动态施工过程的变形规律和扰动影响范围, 并与实测数据进行了对比分析和验证, 研究成果为超深地连墙工程的安全施工提供了参考。

关键词

软土地区, 地下连续墙, 数值模拟, 土体变形

Analysis on the Whole Process Displacement during Ultra-Deep Diaphragm Wall Construction in Soft Area

Shi Feng¹, Yichen Liu^{2*}

¹Shanghai Tunnel Foundation Engineering Co., Ltd., Shanghai

²Department of Geotechnical Engineering, School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

Received: Dec. 24th, 2021; accepted: Jan. 8th, 2022; published: Jan. 24th, 2022

Abstract

In this paper, aimed at general stability of ultra-deep diaphragm wall construction in soft area, firstly, literatures related to diaphragm wall around the world are summarized, then based on the Meifu road shaft of Shanghai airport connection line, comprehensive numerical simulation of the whole

*通讯作者。

construction process of an ultra-deep diaphragm wall has been carried out. The results show that the characteristics of lateral displacement and disturbance range during ultra-deep diaphragm wall construction process, which are compared and verified by measured data. And the research results can provide reference for the safety construction of ultra-deep diaphragm.

Keywords

Soft Area, Diaphragm Wall, Numerical Simulation, Soil 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

软土地区超深地连墙开挖容易引发较大的地层变形,并且与地层侧向土压力的变化特征有较大关系,基坑开挖后会产生较大的卸荷效应,导致地应力重分布。当软土地区基坑工程开挖深度大时,开挖后还会产生较大的地层位移,这又会反作用于土压力。因此,要更好地解决超深地连墙施工中的变形和破坏问题就需要弄清超深地连墙施工全过程的土体变形特征。本研究依托工程的土体具有“含水量高、孔隙比大、强度低及压缩性高”的特点,土体本身也会随着时间产生蠕变,这对土压力的大小也会产生影响,具有明显的时间效应[1] [2] [3] [4] [5]。

目前分析地下连续墙施工引起的地层响应的计算方法主要有两种:极限平衡方法与数值方法。尽管极限平衡分析方法简便,机理清晰,但其较难反映周围土体的应力变化和变形性状,因此不能确定地层侧向位移和地面沉降大小[6] [7] [8]。而数值方法却可以弥补极限平衡方法的不足,基于连续体介质力学数值方法能够模拟软粘土的应力与变形性状,刻画地下连续墙施工引起的土体变形和受力的动态变化特征。另外,分析地下连续墙施工引起的地层响应评价方法研究主要集中在对以往工作从折减系数(朗肯理论)、破坏形式和搜索最危险滑动面方法(库伦理论)这几个方面的改进和修正[9] [10] [11]。基于库伦理论的评价方法在工程中应用较广泛,但以往的研究都是假定成槽周边土体为均质,对层状地层结构中地下连续墙成槽开挖稳定性评价方法的研究较少[12] [13] [14] [15]。

综上所述,超深地下连续墙成槽施工过程对周围土体原有的应力和变形会产生更大影响,对土体扰动程度以及土体的动态变化特征进行系统的研究就显得很有意义。如果土体扰动较小,超深地下连续墙成槽施工过程效应将并不明显,后续的设计中也不需专门考虑其作用;反之,如果影响作用较大,且考虑影响下的变形计算结果较之原设计计算影响作用要大,则更应引起设计和施工单位的高度重视。本文将依托上海市域线机场联络线梅富路工作井基坑工程采用三维数值模拟方法开展超深基坑施工全过程的变形和受力分析,研究成果可为工程实践提供参考。

2. 工程概况

本研究依托工程为上海市域线机场联络线(西段) JCXSG-3 标梅富路工作井,该工作井西临梅富路,南侧为春申塘,坑底深度约为 31 米。工作井基坑工程范围现状场地位于梅南路上;东侧为梅强路,南侧临近 220 kV 高压电线塔;西侧为梅富路市政泵站,1~2 层混凝土结构,距离基坑最近处约 49 m,北侧为空地。梅富路工作井采用 1200 mm 厚度的地下连续墙围护加内支撑,接头为刚性接头,地墙两侧加固采用 $\varnothing 850$ 三轴水泥土搅拌桩加固。工作井位置及周边环境平面图如图 1 所示。梅富路工作井所处场地位

于上海市中部,且地势较为平坦,钻探标高一般在 4.48~4.91 m 之间。超深地连墙穿越的土层主要为填土、淤泥质粘土、粉质粘土等软土地层。

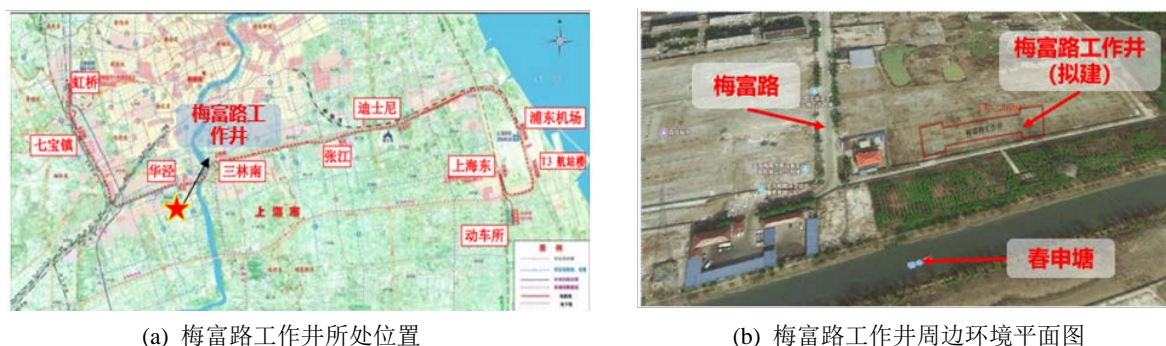


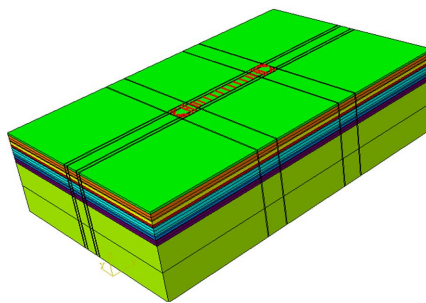
Figure 1. Location of Meifu Road working shaft
图 1. 梅富路工作井地理位置

本工程基坑开挖深度达到 36.5 m,地连墙插入深度达到 66 m,施工过程中存在许多安全隐患,所以本研究将利用 ABAQUS 有限元软件对梅富路工作井的开挖施工全过程进行三维数值模拟分析,模拟中考虑了坑外土体性质、坑内支撑体系以及开挖施工步骤等,通过模拟结果探究了超深基坑开挖导致的土体及围护结构地连墙的变形情况,可为工程提供参考。

3. 三维数值计算模型和计算参数

3.1. 计算模型

本模拟选取整个梅富路工作井及周围土体作为研究对象,三维数值模型如图 2 所示。考虑到边界效应的影响,地层模型尺寸确定为 $400\text{ m} \times 250\text{ m} \times 100\text{ m}$,并将其沿深度方向根据地勘报告划分为 8 个土层,采用 Mohr-Coulomb 本构模型;按照对应土层参数,采用三维实体单元 C3D8 进行土体建模。为计算方便,地下连续墙建模将各幅地连墙建立一个整体,且由于地连墙沿幅宽方向尺寸远大于厚度方向尺寸,所以选用壳单元 S4R 进行模拟,平面尺寸为两个工作井 $25\text{ m} \times 25\text{ m}$,连廊 $15\text{ m} \times 90\text{ m}$,地连墙高度 66 m,厚度 1.2 m。支撑体系中包括支撑横梁、连系梁和格构柱,均采用梁单元 B31 进行模拟,其中横梁截面尺寸为第一、三、五道钢筋混凝土支撑 $1000\text{ m} \times 1000\text{ m}$,第七道钢筋混凝土支撑 $1200\text{ m} \times 1000\text{ m}$,第九道钢筋混凝土支撑 $1400\text{ m} \times 1000\text{ m}$,其余均为钢管支撑 $\varnothing 800\text{ mm}$, $t = 200\text{ mm}$,连系梁和格构柱截面尺寸均为 $600\text{ m} \times 600\text{ m}$ 。模型中相关约束为墙体和土体绑定,支撑横梁和墙体绑定,连系梁、格构柱和支撑横梁之间绑定,格构柱埋入土体部分与土体施加嵌入式约束。边界条件为模型四周设置法向约束,底部设置固定约束,地表自由。整个模型一共 305,720 个网格结点,288,685 个网格单元。



(a) 地层模型

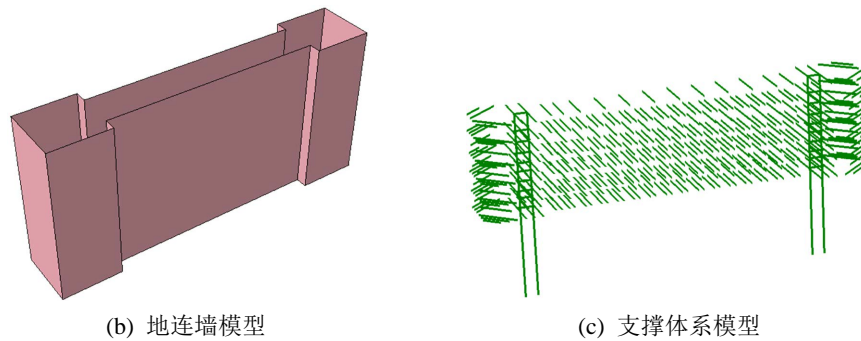


Figure 2. 3D numerical simulation model of Meifu road working shaft
图 2. 梅富路工作井三维数值模型

3.2. 计算参数

三维数值模拟分析中采用的土体本构模型是 Mohr-Coulomb 模型, 依据地勘报告提供的参数值, 综合分析后将土体分成 8 层进行建模, 各土层及对应的建模参数如表 1 所示。其中, 建模时土体的弹性模量按照地勘给出的压缩模量的 2~5 倍进行取值。

Table 1. Mechanical parameters of ground strata
表 1. 地层力学参数

层号	层底深度(m)	重度 $\cdot\gamma$ (kN/m ³)	压缩模量 E_s (MPa)	粘聚力 c (KPa)	内摩擦角 φ (度)
② ₁	2.5	18.8	5	20.5	17
③ ₁	9.0	17.4	2.87	11.8	14.1
④	14	17.4	2.99	11.8	13
④ ₋₁	16.5	18.6	10.19	4.6	31.4
⑤ ₁	26	17.8	3.61	15.3	15.6
⑥ ₁	30.5	19.5	7.48	46.3	15
⑦ ₁	36.5	19.5	12.04	3.6	31.8
⑦ ₂	-	19.8	14.75	3.6	31.8

4. 数值模拟步骤

本模拟根据工作井基坑实际开挖步骤进行数值模拟, 计算步骤如下:

- 1) 第一步为地层的地应力平衡;
- 2) 第二步为超深地连墙及格构柱的施工, 在本步骤重激活事先杀死的地连墙和格构柱模型及其约束来模拟地连墙和格构柱的施工;
- 3) 后续开始基坑开挖以及支撑体系的施工模拟按照工序分十步杀死基坑内土体, 同时在每一步重激活该层支撑体系完成基坑开挖和支护。分析步骤如表 2。

Table 2. Procedures of 3D numerical simulation
表 2. 三维数值模拟步骤

分析步	模拟过程
Ep1	地应力平衡

Continued

Step2	激活地连墙和格构柱以及对应约束
Step3	杀死第一步开挖土体并激活第一道支撑
Step4	杀死第二步开挖土体并激活第二道支撑
.....
Step12	杀死第十步开挖土体并激活第十道支撑

5. 结果分析

5.1. 连廊方向地连墙侧向位移

通过三维数值分析可得到基坑开挖完成后工作井连廊方向地连墙侧向位移随开挖施工的变化典型云图如图 3 所示。由图 3 可以看出, 超深地连墙沿深度方向变形呈两边小中间大的鼓形, 并且中间最大位移发生在开挖面处。随着开挖的进行, 最大位移位置在逐渐下移, 模拟的变形规律与现场监测结果吻合。总体上, 变形分布在沿连廊方向呈连廊中间大, 两边工作井处小的鼓形。

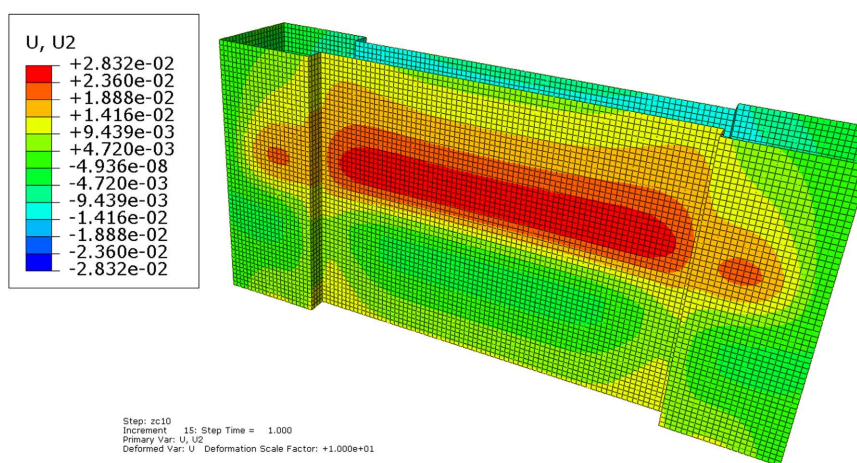


Figure 3. Displacement contour of diaphragm wall along connection corridor (unit: m)
图 3. 连廊方向地连墙侧向位移云图(单位: m)

连廊中间部分侧向位移变化与现场监测数据对比如图 4 所示。可以看出地连墙侧向的位移变化规律与实际监测结果基本一致, 但也存在一定的差异, 主要体现在地连墙下半部分发生朝向基坑外侧的反弯变形, 这是由于模拟中选取的土体本构为 Mohr-Coulomb 模型所致, 该本构模型在岩土开挖模拟中会出现较明显的地表膨胀隆起的现象, 导致基坑底部边缘土体发生隆起; 此外, 模拟结果中地连墙侧向位移最大值有一定偏差, 这可能与计算参数和实际存在差异所致, 但整体变形规律一致。

5.2. 超深地连墙周围土体变形特征

随着深基坑的开挖, 基坑外土体由于卸载作用产生应力释放发生变形。在刚开始开挖基坑时, 由于地应力的释放, 基坑两侧浅层土体发生向基坑内侧的变形, 最大影响范围达到 50 m。由于此时支撑体系还未完工, 所以地连墙会随着土体变形发生向基坑内侧的倾覆, 导致地连墙墙趾有向基坑外侧移动的趋势, 引起周围土体发生与地表土体相反的变形。但由于支撑体系的刚度大于基坑内土体的刚度, 所以随着开挖的进行以及支撑体系的作用, 基坑开挖对地表土体的影响范围也越来越小, 基坑外土体的变形主

要集中在开挖面两侧, 并且在开挖面与基坑壁交角处发生明显的地表隆起情况, 要特别注意超深基坑开挖过程中地连墙的反弯变形和反弯点的动态变化, 这与水土压力随着深度的变化关系较大。整个开挖过程中土体全过程变形如图 5 所示。

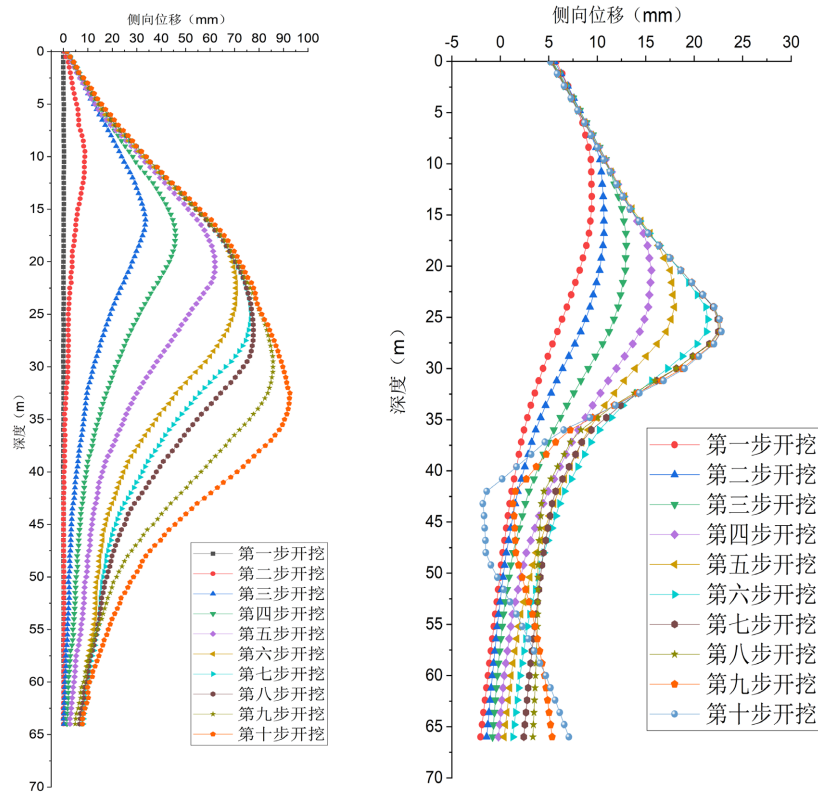
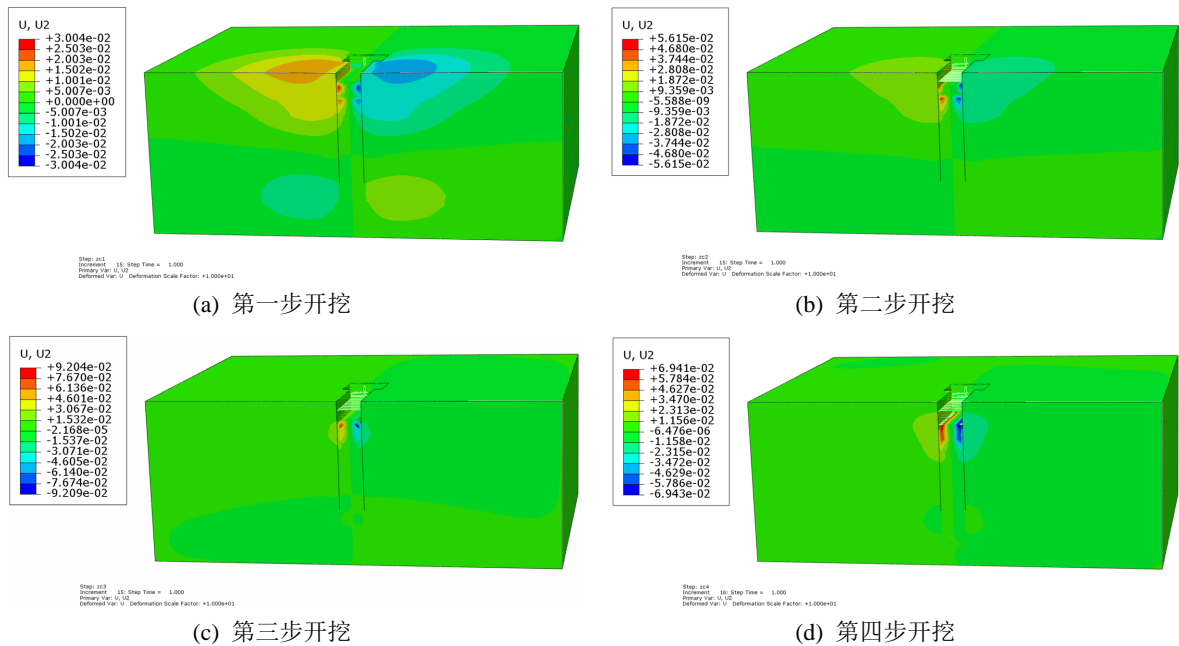


Figure 4. Comparison analysis of lateral displacement of diaphragm wall along connection corridor
图 4. 连廊中部地连墙侧向位移对比分析



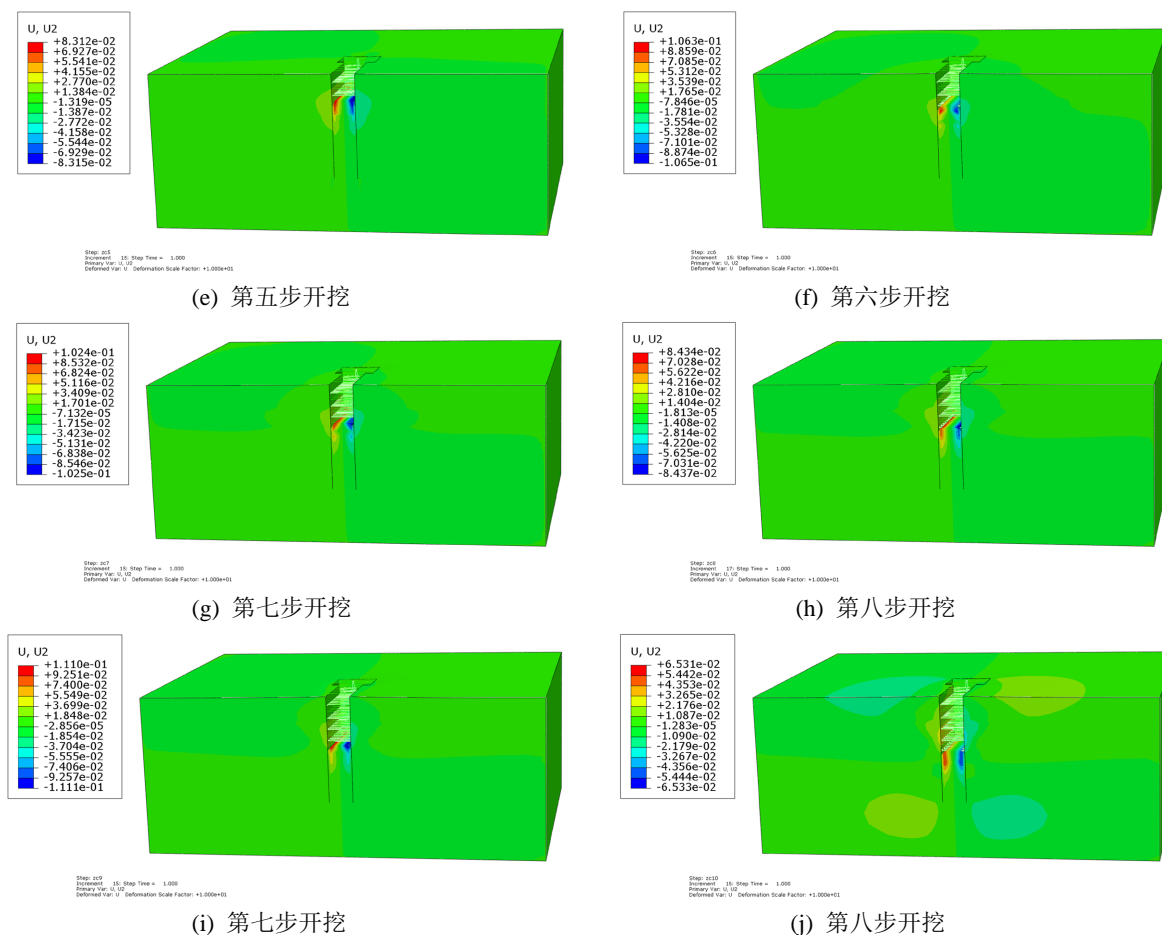


Figure 5. Soil displacement contour of super-deep diaphragm wall (unit: m)

图 5. 超深地连墙周围土体变形云图(单位: m)

6. 结论

本文以上海市域线机场联络线梅富路工作井超深地连墙为研究对象, 通过三维数值模拟和现场实测研究, 获得了软土地区超深地连墙施工全过程的土体变形特征, 探究了超深地连墙侧向变形模式, 并将计算结果与数值模拟结果进行对比分析, 得到如下结论:

1) 通过 ABAQUS 有限元软件对深基坑开挖过程进行了三维数值模拟研究, 获得了超深基坑开挖全过程对超深地连墙变形的主要影响因素, 其最大影响范围是 50 米左右;

2) 数值分析中全面考虑工作井施工、支撑体系以及周围土体性质, 模拟了超深地连墙施工全过程的动态演化特征以及基坑外土体的变形过程, 并与现场监测数据进行对比分析, 发现软土地层中超深基坑中间最大位移是发生在开挖面处, 且随着开挖深度不断下移; 在开挖面与基坑壁交角处会发生明显的地表隆起情况, 因此超深地连墙施工中要重点重视开挖面的土体变形状态。

致谢

本项目得到了上海市科委重大科技攻关项目(19DZ1201004)的资助, 在此一并致谢。

参考文献

[1] Loganathan, N. and Poulos, H.G. (1998) Analytical Prediction for Tunneling-Induced Ground Movements in Clays. *Jour-*

-
- nal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, **124**, 846-856.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1998\)124:9\(846\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:9(846))
- [2] Tsai, J.-S., Chang, C.-C. and Jou, L.-D. (1998) Lateral Extrusion Analysis of Sandwiched Seak Soil in Slurry Trench. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **124**, 1082-1090.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1998\)124:11\(1082\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:11(1082))
- [3] 丁勇春, 李光辉, 程泽坤, 等. 地下连续墙成槽施工槽壁稳定机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013(A1): 2704-2709.
- [4] 陈孟红. 地下连续墙局部与整体稳定性分析[J]. 公路工程, 2013, 38(4): 218-221.
- [5] 刘杨, 刘维, 史培新, 赵宇, 王秒. 超深地连墙成槽富水软弱层局部失稳理论研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(S1): 10-18.
- [6] Han, C.-Y., Wang, J.-H., Xia, X.-H., *et al.* (2012) Limit Analysis for Local and Overall Stability of a Slurry Trench in Cohesive Soil. *International Journal of Geomechanics*, **15**, No. 5.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000268](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000268)
- [7] 秦会来, 李峰, 郭院成. 超深地连墙槽段施工的三维数值分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 335-340.
- [8] 徐日庆. 考虑位移和时间的土压力计算方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2000, 34(4): 370-375.
- [9] 张常光, 单冶鹏, 高本贤. 考虑挡墙位移的土压力数学拟合新方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(10): 2124-2135.
- [10] Fang, Y.-S. and Ishibashi, I. (1986) Static Earth Pressures with Various Wall Movements. *Journal of Geotechnical Engineering*, **112**, No. 3. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1986\)112:3\(317\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1986)112:3(317))
- [11] Fang, Y.-S., Chen, T.-J. and Wu, B.-F. (1994) Passive Earth Pressures with Various Wall Movements. *Journal of Geotechnical Engineering*, **120**, 1307-1323. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1994\)120:8\(1307\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:8(1307))
- [12] 周应英, 任美龙. 刚性挡土墙主动土压力的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1990(2): 19-26.
- [13] 李志忠. 富水砂卵地层连续墙槽壁稳定性与施工技术研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2014
- [14] 魏龙海, 王明年, 陈炜韬, 等. 地下连续墙在厦门海底隧道穿越富水砂层中的应用研究[J]. 现代隧道技术, 2008, 45(5): 53-58.
- [15] 张厚美, 夏明耀. 地下连续墙泥浆槽壁稳定的三维分析[J]. 土木工程学报, 2000(1): 73-76.