

超深基坑水下开挖三维数值模拟研究

——以上海吴淞口长江隧道工程为例

赵子腾¹, 包 蓁²

¹同济大学土木工程学院, 上海

²上海隧道工程有限公司, 上海

收稿日期: 2025年9月22日; 录用日期: 2025年10月12日; 发布日期: 2025年10月28日

摘 要

随着城市地下空间开发的深入, 超深基坑在富水软土地区日益增多, 其施工面临着变形控制和稳定性等问题。本文依托上海吴淞口长江隧道浦西接收井的超深基坑, 采用三维有限元数值模拟方法对基坑水下开挖结合逆作法施工的全过程进行了模拟。模拟结果表明: 1) 水下开挖时坑内水体形成的静水压力有效平衡了部分坑外水土压力, 最大侧向位移仅为28 mm, 变形控制效果良好。2) 开挖至坑底时因卸荷导致的最大隆起量约为10 mm, 有效抑制了坑底土体的过大回弹。3) 坑内疏干后素混凝土底板最大上浮量约为10 mm, 最大Mises应力为0.118 MPa, 远低于C30混凝土的设计强度。4) 抗拔桩受力分布呈现“中间小、两边大”的特点, 最大拉力为2332 kN, 小于单桩承载力设计值2747 kN。研究结果验证了该超深基坑水下开挖方案的可行性。

关键词

超深基坑, 水下开挖, 数值模拟, 变形控制

Three-Dimensional Numerical Simulation of Underwater Excavation in Ultra-Deep Foundation Pits

—A Case Study of the Shanghai Wusongkou Yangtze River Tunnel Project

Ziteng Zhao¹, Zhen Bao²

¹School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

²Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai

Received: September 22, 2025; accepted: October 12, 2025; published: October 28, 2025

文章引用: 赵子腾, 包蓁. 超深基坑水下开挖三维数值模拟研究[J]. 土木工程, 2025, 14(10): 2507-2519.
DOI: 10.12677/hjce.2025.1410270

Abstract

With the continuous expansion of urban underground space development, the number of ultra-deep foundation pits in water-rich soft soil areas has been increasing, posing challenges in deformation control and overall stability. This study focuses on the ultra-deep foundation pit of the reception shaft on the Puxi side of the Wusongkou Yangtze River Tunnel in Shanghai, where a three-dimensional finite element numerical simulation was carried out to model the entire process of underwater excavation combined with the top-down construction method. The results showed that: 1) the hydrostatic pressure inside the pit during underwater excavation effectively counterbalanced part of the external earth and water pressures, limiting the maximum lateral displacement to only 28 mm with satisfactory deformation control; 2) when excavation reached the pit bottom, unloading induced a maximum heave of about 10 mm, effectively suppressing excessive rebound of the subsoil; 3) after dewatering, the plain concrete base slab exhibited a maximum uplift of approximately 10 mm and a maximum Mises stress of 0.118 MPa, which is far below the design strength of C30 concrete; 4) the uplift-resisting piles showed a load distribution characterized by “smaller in the middle and larger at the edges,” with a maximum tensile force of 2332 kN, lower than the designed ultimate pile capacity of 2747 kN. These findings confirm the feasibility of the proposed underwater excavation scheme for ultra-deep foundation pits.

Keywords

Ultra-Deep Foundation Pit, Underwater Excavation, Numerical Simulation, Deformation Control

Copyright © 2025 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

随着城市化进程的加速, 越江隧道等大型基础设施建设快速发展, 使得富水软弱地层中进行超深基坑的开挖成为工程建设的常态。这类大型基坑工程普遍面临高承压水位、超厚强透水地层等严峻挑战, 基坑的稳定与安全成为制约工程成败的关键。

传统降水开挖的深基坑施工方法在具有强水力联系的透水地层中实施存在很大弊端。巨大的补水量使得降水成本高昂难以达到预期效果, 并且大规模降水易引发周边地面不均匀沉降[1][2], 对邻近建筑物构成严重威胁。更重要的是, 坑内外巨大的水头差极易导致基坑底部产生管涌、流砂甚至整体突涌[3]-[5], 造成严重后果。

因此, 通过在开挖过程中向基坑注水来平衡外界水土压力的水下开挖技术逐渐得到广泛应用。许多学者对于深基坑水下开挖进行了相关研究: 李耀良等[6]以上海长兴岛造船基地的超大面积港池为背景, 介绍了陆上开挖与水下开挖相结合的施工技术, 以解决超大基坑的施工难题; 孙智勇[7]结合南京和福州两个市政工程案例, 系统分析了水下开挖法在处理高水位、超厚强透水地层深基坑中的可行性、适应性及关键技术点; 赵宗智[8]以南京纬三路过江通道通风井为工程背景, 全面总结了在临江富水地质条件下, 采用地基加固、水下开挖和水下混凝土灌注等关键技术成功建设超深基坑的经验; 张健[9]针对南水北调穿黄隧道超深竖井在开挖中遭遇涌水涌砂的难题, 详细阐述了采用向基坑内灌水反压后再进行水下逆作开挖的创新技术, 确保了工程安全; 杨坤[10]针对福州地铁临近乌龙江的超深风井, 创新性地采用了“上部降水干挖 +

下部带水湿挖”的两级开挖工艺,成功解决了国内罕见的超深地铁基坑施工难题;刘建伟等[11]以北京地铁8号线永定门外站为例,研究了在强透水、富水卵石地层中,采用水下开挖及水下混凝土封底这项关键技术来建造超深基坑的设计计算方法与施工难点对策;陈扬勋等[12]探索了富水区深基坑水下开挖工法的设计,重点研究了在封底和地下连续墙之间设置凹凸樁槽及立柱以抵抗巨大水浮力和突涌风险的创新设计;李博等[13]依托北京地铁8号线永定门外站深基坑工程,利用数值模拟和实测数据,详细分析了在富水砂卵石地层中进行水下开挖的变形特性,并对坑底分仓布置形式进行了优化;邹志炎等[14]针对基坑地下水与江河水存在稳定水力联系的工程难题,提出了一套系统的深基坑注水与水下开挖设计计算方法,并通过数值模拟优化了注水高度等关键参数;黄应超等[15]以武汉市某深基坑降水工程为例,通过数值模拟分析了降水与回灌过程,证实了坑外回灌对于恢复周边水位、控制因降水引发的地面沉降具有明显且有效的作用。

然而对于水下开挖结合逆作法施工的临江超深基坑,其围护结构变形机理、坑底渗流场演化规律以及基底隆起控制等关键科学问题的认识仍显不足。因此,本文依托上海吴淞口长江隧道浦西接收井超深基坑工程,建立三维数值模型对基坑开挖的全过程进行模拟,深入研究了采用水下开挖方案在临江富水地层超深基坑开挖过程中的变形规律与受力特性。

2. 工程背景

2.1. 工程概况

沪通铁路太仓至四团段吴淞口长江隧道位于宝山区黄浦江吴淞口附近,隧道左线起止里程为DK140+040~DK152+989.142,右线起止里程YDK140+040.00~YDK152+989.142,其中浦西接收井为超深基坑工程,基坑顶面标高2.5 m,基坑深度37.6 m,地墙深度82~85 m,采用铰接法施工。主体结构为叠合墙形式,采用逆作法施工。

2.2. 工程地质条件

根据地勘报告可知,拟建场地主要由第四系上更新统和全新统淤泥质黏土、淤泥质粉质黏土、黏土、粉质黏土、粉土、砂类土组成,地质剖面图如图1所示。

2.3. 水文条件

工程场地紧邻长江与黄浦江,地表水位受潮汐影响显著。场区地下水系统复杂,浅部为潜水,下部发育多层承压含水层,且与地表水存在一定的水力联系。这种水文地质条件给基坑开挖的稳定性带来了巨大挑战。

2.4. 开挖方案

基坑总体施工步骤如下:

步骤一:施作冠梁、立柱桩与降水井。

步骤二:挖至第一层框架梁以下,安装滑降式伺服支撑体系,施作第一层框架梁、框架梁下部侧墙。

步骤三:第2次开挖,挖至第二层加强框架梁以下,滑降支撑到位,施作第二层框架梁、框架梁下部侧墙,施作负一层侧墙。

步骤四:依次类推自上而下施工完成第三、四、五、六层的加强框架梁以及相应的下部侧墙,施作负二、三、四、五层的侧墙。

步骤五:剩余部分基坑需采用水下开挖方式完成,拟比原基坑深度超挖3 m,填筑素混凝土,水下开挖之前回水至一定标高。

步骤六：水中开挖至 40.6 m 深，潜水员下水，基面整平与桩头处理等水下作业。

步骤七：水中浇筑 3.2 m 厚素混凝土垫层，滑降伺服支撑下降至 33.85 m 深。

步骤八：疏干坑内水，抢筑底板，期间严格监测地墙变形。

每一个具体施工步骤如图 2 所示。

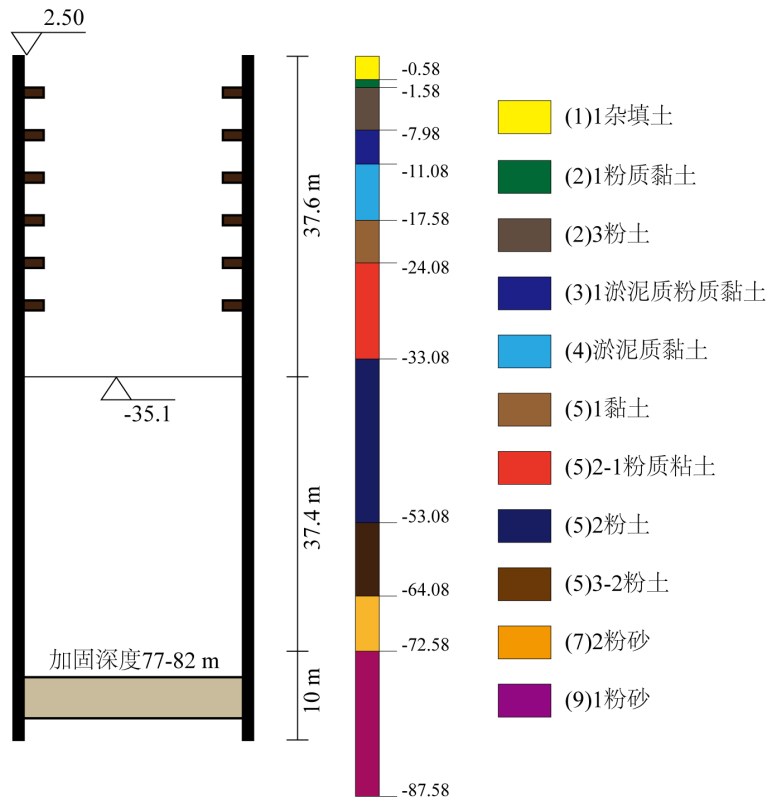
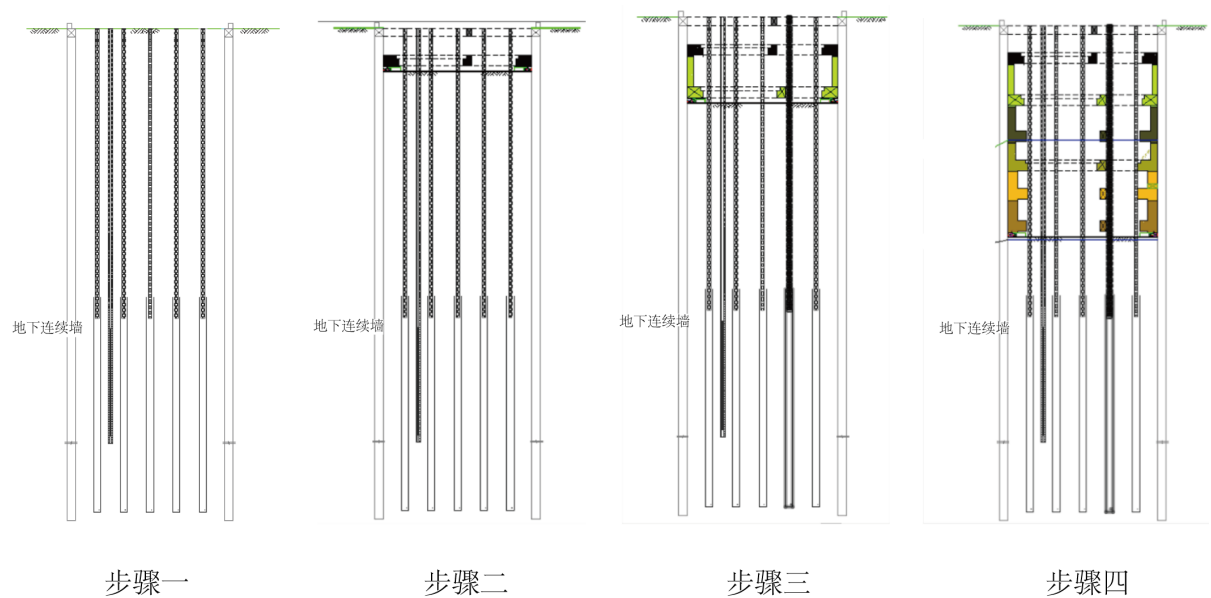


Figure 1. Geological profile of foundation pit

图 1. 基坑地质剖面图



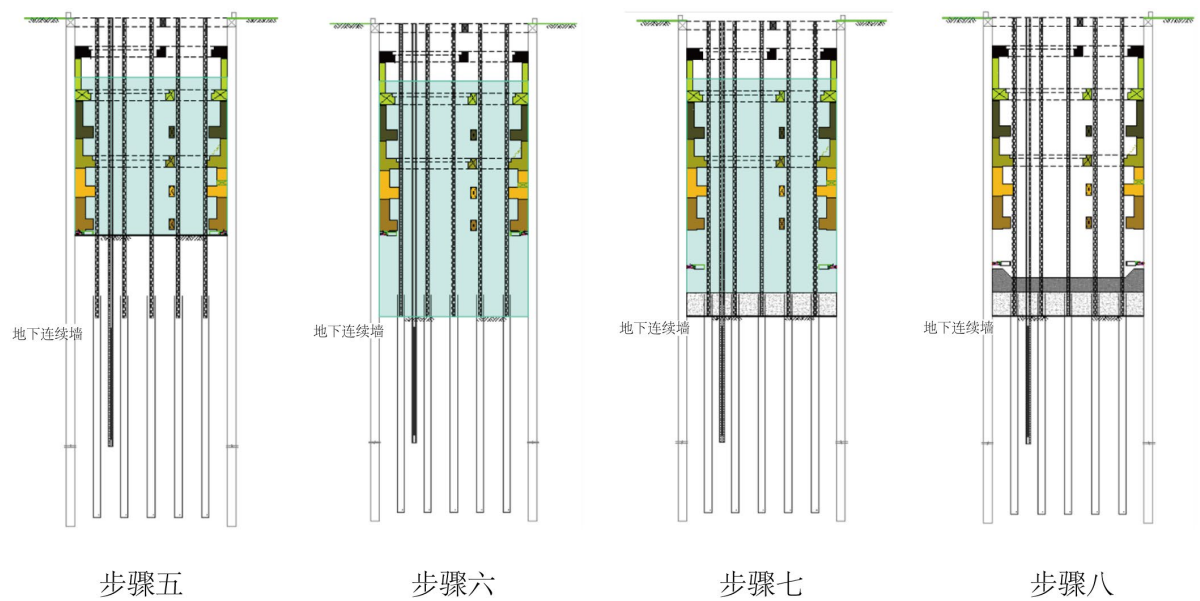


Figure 2. Construction steps
图 2. 施工步骤

3. 深基坑水下开挖三维数值模拟

3.1. 数值模型

基坑内轮廓尺寸为 $20.8\text{ m} \times 41\text{ m}$ ，为尽可能消除模型计算的边界效应，建模范围控制在基坑各方向尺寸的 5 倍左右，故将模型长边设定为 200 m ，短边设定为 120 m 。地下连续墙的深度为 85 m ，考虑到已知地层的厚度，故设定模型总高度为 100 m ，基本满足计算需求。几何模型如图 3 所示。

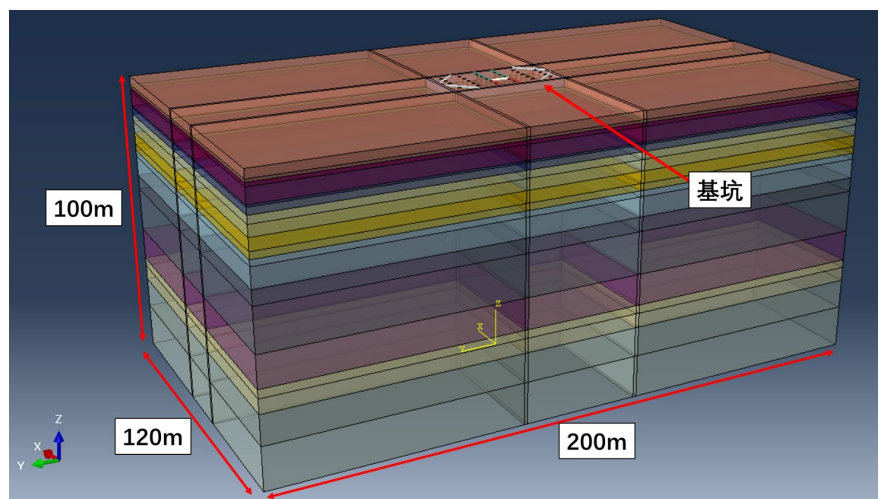


Figure 3. Three-dimensional geometric model
图 3. 三维几何模型

根据开挖方案中所给的内支撑体系设计，本计算模型的基坑内部包括以下部件：1) 地下连续墙：厚度为 1.2 m ，长边外轮廓长度为 43.4 m ，内轮廓长度为 41 m ；短边外轮廓长度为 23.2 m ，内轮廓长度为 20.8 m ；2) H 形支撑；3) 斜撑；4) 框架梁。内支撑结构体系如图 4 所示。

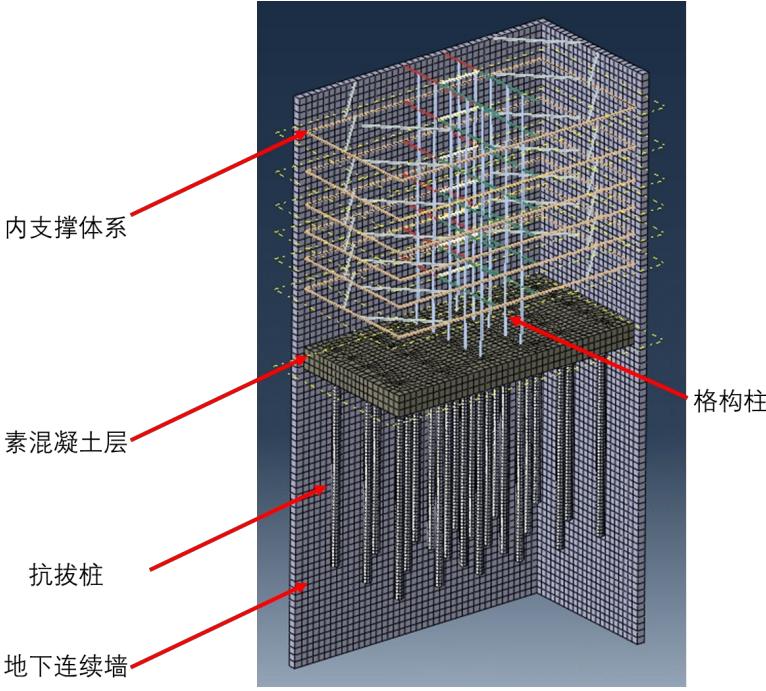


Figure 4. Internal support structure system
图 4. 内支撑结构体系

岩土体本构模型采用 Mohr-Coulomb 模型，物理力学参数见表 1。基坑开挖过程中，地下连续墙、桩基、素混凝土底板都视作处于线弹性变形区间，故采用线弹性本构模型。其重度取 25 kN/m³，杨氏模量取 30 GPa，泊松比取 0.17。

Table 1. Physical and mechanical properties of rock and soil
表 1. 岩土体物理力学参数

土层	摩擦角/°	重度/kN/m ³	厚度/m	杨氏模量/MPa	渗透系数/m/s	孔隙比	粘聚力/kPa
(2)1 粉质黏土	10.3	18.8	1	20.68	1.00E-07	0.917	14.5
(2)3 粉土	28.02	19	6.4	32.68	4.74E-06	0.837	6.38
(3)1 淤泥质粉质黏土	10.88	18.2	3.1	13.32	6.00E-08	1.083	11.06
(4)淤泥质黏土	6.26	17.2	6.5	9.04	1.00E-08	1.369	10.93
(5)1 黏土	9.19	17.9	6.5	12.08	1.00E-08	1.169	12.28
(5)2-1 粉质黏土	10.27	18.4	9	31.68	1.00E-07	1.008	14.5
(5)2 粉土	28.39	18.7	20	18	9.14E-06	0.894	5.93
(5)3-2 粉土	28.54	18.7	11	35.44	8.00E-06	0.883	6.96
(7)2 粉砂	31.67	19.4	8.5	57.36	2.00E-05	0.744	4.45
(9)1 粉砂	30	19.4	25	23.96	7.00E-05	0.817	5

3.2. 荷载及边界条件

- 1) 荷载
模型整体受到重力作用，重力加速度为 9.8 m/s²。

此外，在水下开挖混凝土过程中，地下连续墙两侧，基坑底部均受到静水压力作用。

2) 边界条件

① 位移边界条件：土体模型四周均控制其法向位移为零。

② 水力边界条件：通过设置指定截面的孔隙水压力值，达到坑内降水的目的。根据施工方案，开挖至回水前，控制坑内(5)2层土水位降至-21.17 m；回水至标高-5.5 m后停止降水；最终疏干前，恢复(5)2层降水，使水位标高降至-36.1 m。基坑外部水头保持不变。

3) 相互作用及接触

混凝土和土体之间两侧采用摩擦型接触，法相接触设置为硬接触，切向接触摩擦系数取 0.1。地下连续墙底部与土体之间、抗拔桩底部与土体之间均采用绑定接触(Tie)。抗拔桩顶部与素混凝土底板之间采用绑定接触。内支撑系统与地下连续墙接触部分采用绑定解除，并根据划分网格的情况给予一定的捕捉容差。

3.3. 模拟过程

本数值模拟严格遵循 2.4 节所述的施工步骤，通过分步激活与“杀死”单元、施加荷载与调整边界条件等方式，依次实现了地应力平衡、支护结构施工、分六层降水开挖与支护、坑内回水、水下开挖至-38.1 m、浇筑素混凝土底板以及最终坑内疏干等全过程的仿真。模拟中的关键步骤如图 5 所示。

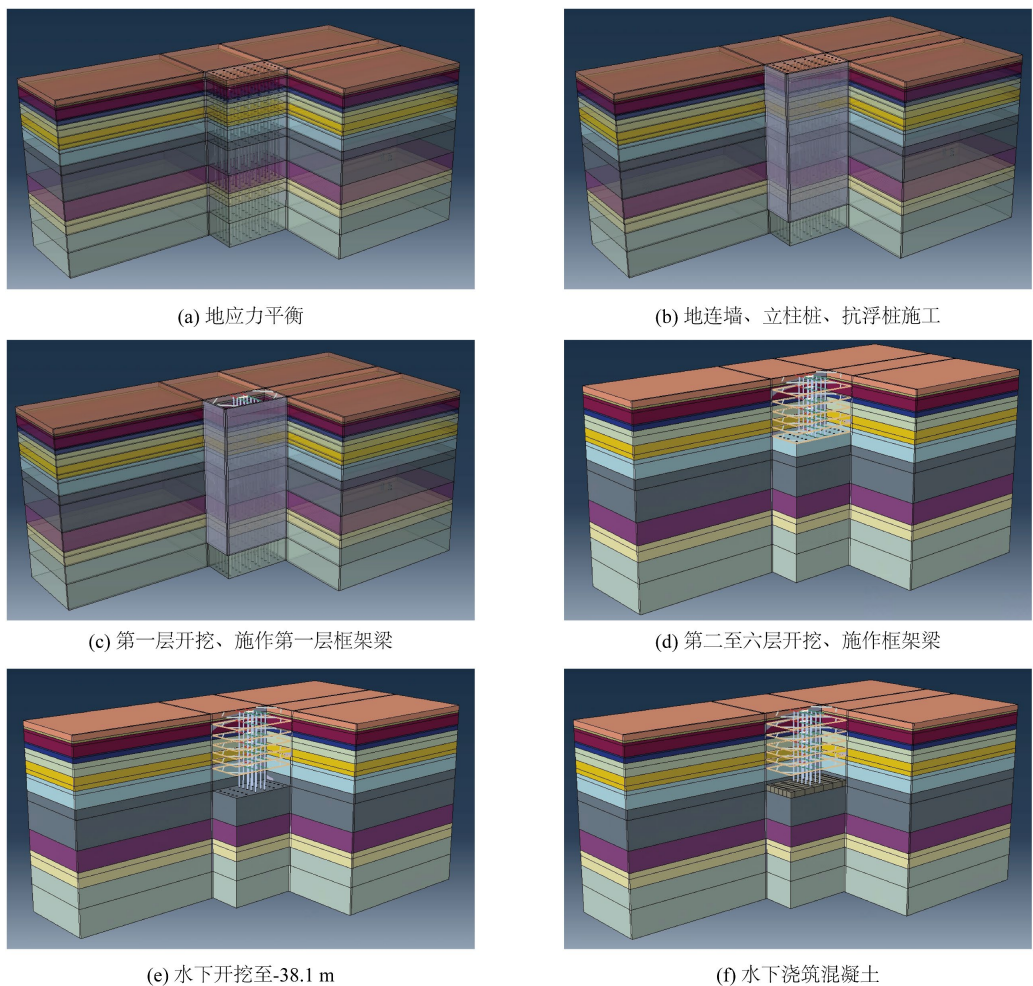


Figure 5. Key steps in simulation
图 5. 模拟关键步骤

3.4. 模型假设及说明

本研究数值模型为实际工程的理想化与简化, 为使计算聚焦于核心问题并保证收敛性, 在建模过程中进行了一系列假设。

首先, 模型忽略了桩基的施工扰动。在本模型中立柱桩与抗拔桩的施工通过“杀死”桩体范围内的土体单元再激活桩单元的方式实现, 未考虑实际工程中打桩或钻孔过程对桩周土体的挤压、应力释放等扰动。由于桩基施工远早于主体开挖阶段, 其产生的超孔隙水压力和土体扰动到开挖阶段时已基本消散。本研究的核心在于分析基坑开挖阶段的力学响应, 因此忽略早期施工扰动对后续开挖引起的变形规律影响较小。此简化可能导致对基坑开挖前初始地表沉降的模拟值偏小, 但对开挖引起的主要围护结构变形和坑底隆起等结论的影响有限。

其次, 岩土体采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型。上海地区软土地层具有一定的黏塑性和流变特性。然而基坑的开挖与支撑体系的施作是分步、快速进行的, 每一工况的持续时间相对较短, 其主要变形由卸荷引起的弹塑性变形主导, 因此本模拟未考虑土体的流变性。对于施工期的短期行为预测, 忽略流变性是合理的。这一假设意味着模拟结果反映的是各施工步骤完成后的短期变形, 未包含长期蠕变变形。因此模拟所得的位移值相较于长期监测值可能会偏于乐观, 但对于验证施工方案在短期内的安全性和变形控制效果是充分的。

对于模拟过程中的各阶段的水位标高均严格依据工程的施工组织设计。通过精确控制坑内外水头差, 实现对围护结构稳定性的主动控制。尤其是在进行深层开挖时向坑内回水, 利用静水压力平衡大部分坑外水土压力是减小围护结构变形、防止坑底突涌的关键措施。

模型中分层设置的框架梁与地下连续墙的连接被简化为刚性连接, 这与实际工程中现浇钢筋混凝土结构在节点处整体性良好保持一致。对于滑降临时支撑, 因其刚度和与墙体的连接状态复杂且难以精确量化, 因此在模拟中未予考虑。这是一种偏于保守的处理方式, 忽略了其对墙体的部分支撑作用, 使得计算出的墙体位移和结构内力会略大于实际情况, 增加了安全储备, 能够更严格地检验整体方案的可行性。

3.5. 结果分析

3.5.1. 墙体侧向位移分析

对开挖各阶段地下连续墙的侧向位移进行整理, 可得如图 6 所示结果。结果表明, 随着基坑开挖, 地下连续墙的侧向位移逐渐增加, 且其峰值点有向下移动的趋势。最终峰值点所在深度为 20 m 处左右, 略超过基坑深度的一半。最大侧向位移约为 28 mm。相较于同类工程, 基坑的侧向位移较小, 这是由于水下开挖过程中, 坑内回灌的水体对地下连续墙存在相当大的静水压力, 抵消了一部分来自坑外土体的主动土压力。

3.5.2. 基坑坑底渗流分析

当基坑开挖至底部时, 为渗流影响最不利工况。沿基坑长边剖面(图 7)的渗流场显示, 地下水主要绕过地连墙墙踵进入基坑, 墙踵处渗流路径最短, 渗流速度也最大, 平均约 4×10^{-6} m/s, 而坑底中心区域渗流速度较小。这种由边缘指向中心的渗流场使得土体有效应力降低, 呈现出与流速等势面一致的“山丘”式隆起趋势。从坑底(标高-38.1 m)横断面(图 8)看, 由于桩体不透水, 水流在桩周存在一定的聚集现象, 最大渗流速度约为 2.435×10^{-7} m/s。

3.5.3. 基坑坑底隆起分析

基坑在开挖过程中, 由于尚未完成封底, 坑底土体由于卸荷作用, 将产生隆起现象。一旦隆起过大, 将会造成土体开裂, 严重者将会发生管涌现象, 威胁安全。其中, 坑底隆起最不利情况为水下开挖至坑

底(标高-38.1 m)且尚未浇筑素混凝土底板时。故将标高-38.1 m 以下部分土体位移单独提取, 绘制了坑底位移随水平距离变化曲线, 如图 9 所示。

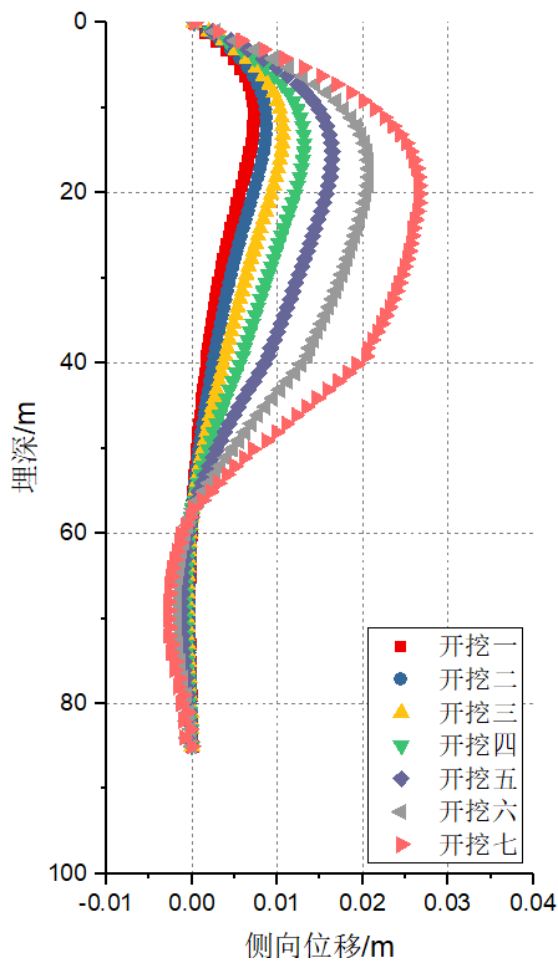


Figure 6. Variation of lateral wall displacement during excavation

图 6. 开挖过程中侧墙位移变化情况

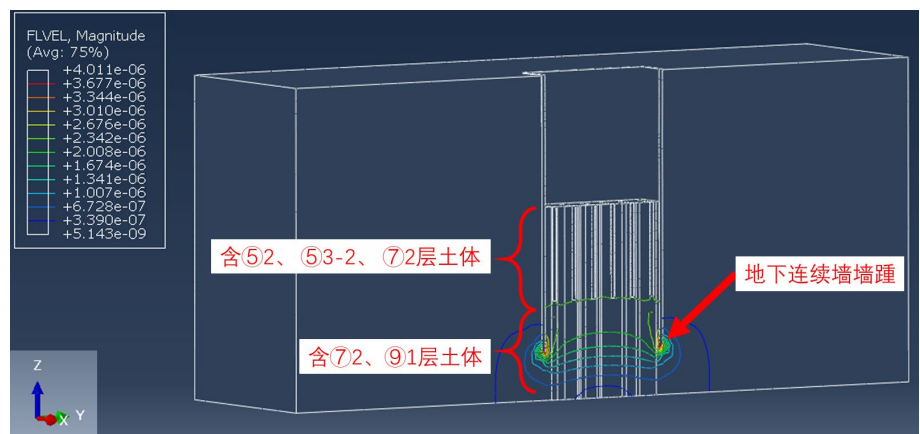


Figure 7. Seepage equipotential map along the long-side section of the foundation pit

图 7. 沿基坑长边剖面渗流等势图



Figure 8. Plan view of seepage equipotential contours across the bottom section of the foundation pit (elevation -38.1 m)
图 8. 基坑坑底横断面渗流等势图(俯视, 标高-38.1 m)

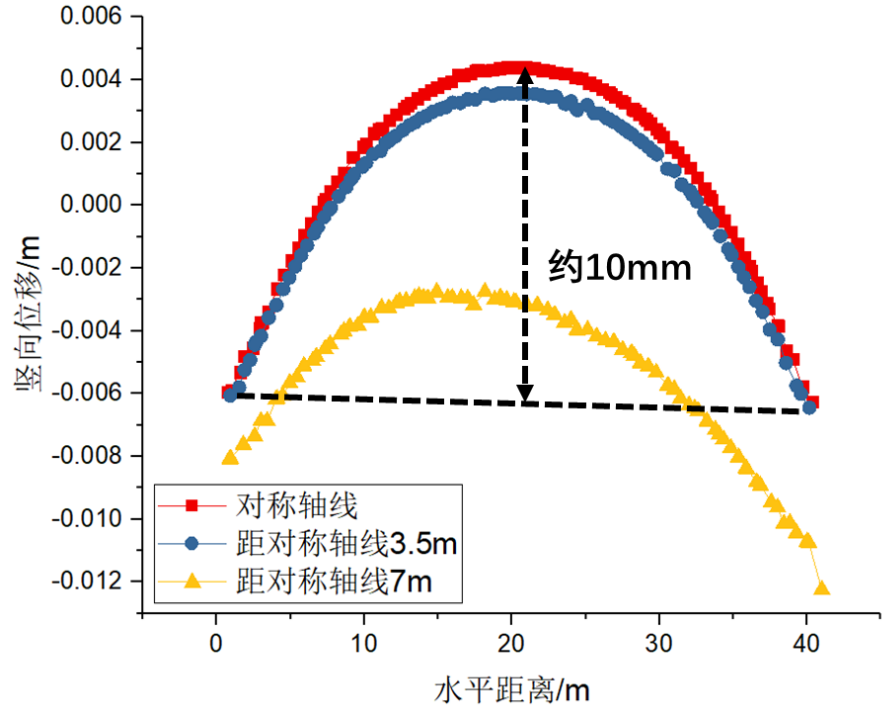


Figure 9. Vertical displacement curve of pit bottom along horizontal distance
图 9. 坑底竖向位移随水平距离变化曲线

在坑底对称轴线处，隆起最为明显，随着与基坑中心距离的增加，隆起值逐渐减小。由于开挖在水下进行，且下部土体中因降水而水头下降，土体有效应力增加，在一定程度上土体发生了固结，故四周靠近地下连续墙区域的土体，其竖向位移反而为负值。计算同一层土体最大最小竖向位移的差值，可以得出，当基坑水下开挖至底部时，最大的坑底隆起值约为 10 mm。

3.5.4. 素混凝土垫层受力分析

1) 素砼底板强度校核

将最不利情况(坑内抽水后)下，素砼底板的应力分布提取出来，可得如图 10 所示结果。

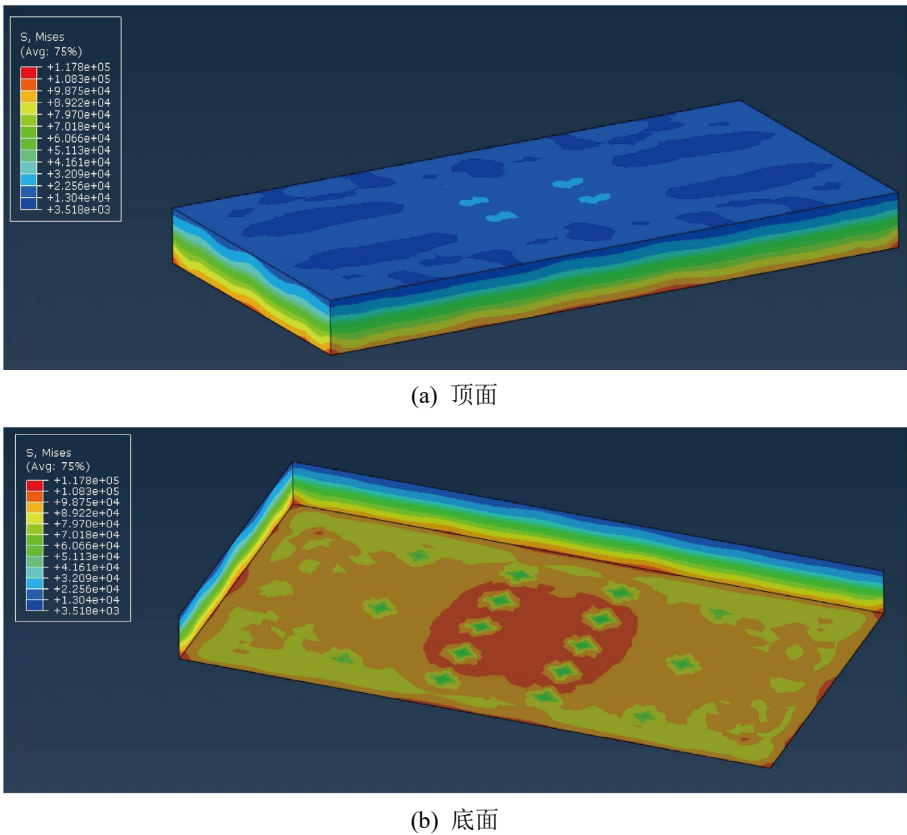


Figure 10. Stress distribution of the plain concrete base slab
图 10. 素砼底板应力分布

计算结果表明,素混凝土底板最大 Mises 应力为 0.118 MPa,远小于 C30 混凝土的设计强度,故其强度验算符合要求。

2) 素砼底板上浮位移

坑内排水后素砼底板竖向位移如图 11 所示,较刚浇筑后有上浮的趋势,最大上浮量约为 10 mm。从上浮量分布情况中可以得出,在中心部位,底板的上浮量较小。与此同时,两侧的上浮量较大。这说明中间部位的抗拔桩发挥出更好的抗拔效果。此外,从抗拔桩的分布数量上分析,两侧新增 12 根抗拔桩,其桩间距较大,分布较为稀疏,显然抗拔效果略逊于中间部位。

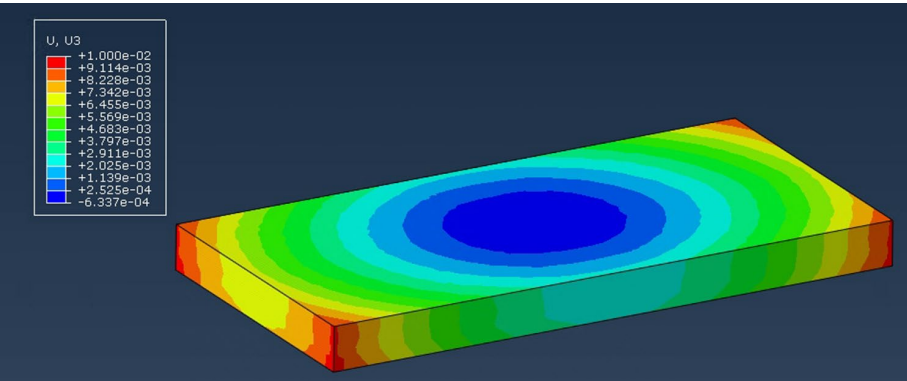


Figure 11. Vertical displacement of plain concrete base slab after pit dewatering
图 11. 坑内降水后素砼底板竖向位移

3) 素砼底板的净顶推力分布

图 12 展示了素砼底板的顶推力分布情况, 其峰值为 38.6 kN/m^2 , 小于理论计算所得的 63.6 kN/m^2 。且素砼底板仅在边缘处存在峰值, 中间大部分区域的底部均布力在 $22\sim 30 \text{ kN/m}^2$ 之间, 与理论计算中所给的底部净均布力 28.6 kN/m^2 接近。

3.5.5. 桩端受力分析

桩端受力图如图 13 所示, 周围抗拔桩所受拉力较大, 越靠近进坑中心, 其桩体所受拉力越小。中间两排抗拔桩的拉力较小, 约在 $1091\sim 1361 \text{ kN}$ 之间; 两侧补充抗拔桩的拉力较大, 约在 $1496\sim 2332 \text{ kN}$ 之间, 小于单桩承载力 2747 kN 。

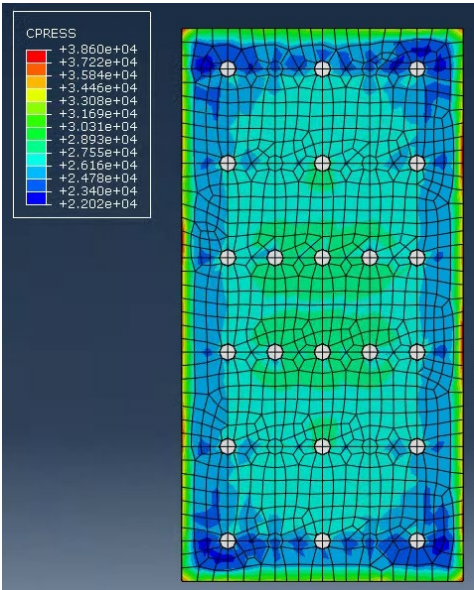


Figure 12. Net uplift pressure distribution of the plain concrete base slab

图 12. 素砼底板的净顶推力分布

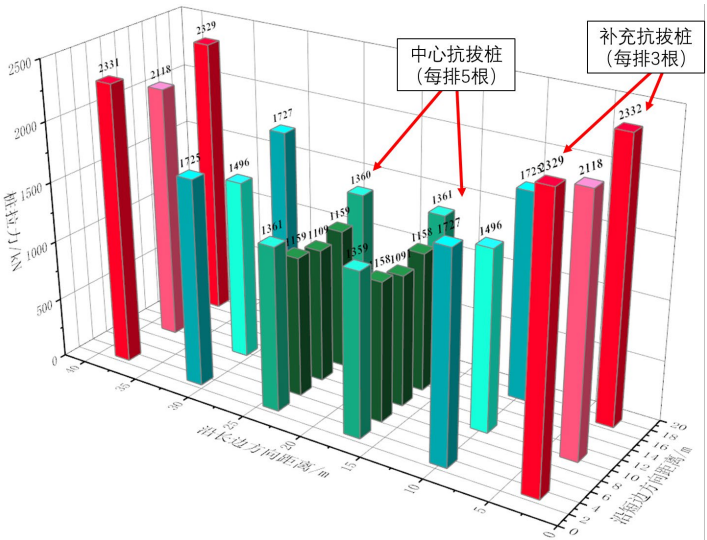


Figure 13. Force diagram at the pile tip

图 13. 桩端受力图

4. 结论

本文以上海吴淞口长江隧道超深基坑为研究对象, 通过构建三维数值模型, 对采用水下开挖技术的施工全过程进行了模拟分析, 重点研究了围护结构变形、坑底渗流与隆起、以及封底结构的受力特性, 得出以下主要结论:

- 1) 随着基坑开挖, 地下连续墙的侧向位移逐渐增加, 且其峰值点有向下移动的趋势。最终峰值点所在深度为 20 m 处左右, 略超过基坑深度的一半。最大侧向位移约为 28 mm。
- 2) 土体受到渗流力的作用增加, 有效应力降低, 呈现出膨胀或隆起现象。模拟结果表明, 流速等势面整体呈“山丘”式隆起状, 这与该层土体的隆起现象保持一致。
- 3) 在水下开挖至设计标高-38.1 m 且尚未浇筑底板的最不利工况下, 坑底中心最大隆起量约为 10 mm。
- 4) 素混凝土底板最大 Mises 应力为 0.118 MPa, 远小于 C30 混凝土的设计强度。底板呈现中间小、四周大的上浮趋势, 最大上浮值约 10 mm。底板大部分区域的压力分布处于 22~30 kN/m² 之间, 与理论计算中所给的底部净均布力 28.6 kN/m² 接近。
- 5) 周围抗拔桩所受拉力较大, 越靠近进坑中心, 其桩体所受拉力越小。中间两排抗拔桩的拉力较小, 约在 1091~1361 kN 之间; 两侧补充抗拔桩的拉力较大, 约在 1496~2332 kN 之间, 小于单桩承载力 2747 kN。

参考文献

- [1] 叶为民, 万敏, 陈宝, 王琼, 卢耀如. 深基坑承压含水层降水对地面沉降的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(S2): 1799-1805.
- [2] Goh, A.T.C., Zhang, R.H., Wang, W., Wang, L., Liu, H.L. and Zhang, W.G. (2019) Numerical Study of the Effects of Groundwater Drawdown on Ground Settlement for Excavation in Residual Soils. *Acta Geotechnica*, **15**, 1259-1272. <https://doi.org/10.1007/s11440-019-00843-5>
- [3] 宋建禹. 临江高承压水超深基坑支护方案研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(9): 1529-1537.
- [4] 胡云华. 临江高承压水超深基坑开挖抗突涌分析与对策——以南京纬三路长江隧道梅子洲风井基坑为例[J]. 隧道建设, 2015, 35(11): 1194-1201.
- [5] 杨建民, 郑刚. 基坑降水中渗流破坏归类及抗突涌验算公式评价[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 261-264.
- [6] 李耀良, 王理想, 余振栋, 袁芬. 超大面积港池基坑的陆上和水上开挖施工技术[J]. 建筑施工, 2008(10): 848-850.
- [7] 孙智勇. 水下开挖法在市政工程深基坑施工中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(3): 114-118, 137.
- [8] 赵宗智. 临江富水超深基坑施工关键技术[J]. 公路, 2017, 62(8): 338-342.
- [9] 张健. 超深竖井水下开挖施工关键技术[J]. 公路与汽运, 2011(2): 174-177.
- [10] 杨坤. 地铁区间中间风井超深基坑水上水下两级开挖施工关键技术[J]. 施工技术, 2018, 47(S1): 149-152.
- [11] 刘建伟, 卢致强, 付波, 许洋, 廖静宇. 地铁超深基坑水下混凝土封底施工技术[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(11): 83-89.
- [12] 陈扬勋, 徐巍, 桑运龙, 赵怡琳, 韩林芳. 富水区深基坑水下开挖工法的设计探索[C]//《施工技术(中英文)》杂志社, 亚太建设科技信息研究院有限公司. 2022 年全国工程建设行业施工技术交流会论文集(上册). 北京: 《施工技术(中英文)》杂志社, 2022: 103-107.
- [13] 李博, 王贵和, 吕高峰, 王运超. 深基坑水下开挖变形特性及坑底分仓优化[J]. 建筑科学与工程学报, 2019, 36(6): 95-103.
- [14] 邹志炎, 刘盛林, 张逸博, 傅旭东. 深基坑注水与水下开挖设计计算方法[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2025, 47(4): 28-36.
- [15] 黄应超, 徐杨青. 深基坑降水与回灌过程的数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(S2): 299-303.