



软土地区某超深圆形基坑变形特性及流固耦合分析

马 昕, 孙德安, 刘树佳

Deformation characteristics and fluid-solid coupled analysis of a super-deep circular foundation pit in soft soils

MA Xin, SUN Dean, and LIU Shujia

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202309064>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

深厚软土地区基坑墙底抗隆起稳定性Prandlt计算式的讨论

A discussion of the Prandlt calculation formula for anti-uplift stability of the bottom of a foundation pit wall in deep soft soil areas

阳吉宝 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 61–69

基于流固耦合的强震大型滑坡水力激发效应研究

A study of the pro-water pressure for initiation of a large landslide triggered by a strong earthquake based on fluid-structure coupling

时幸幸, 崔圣华, 裴向军, 朱凌, 杨晴雯 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 102–114

北京不同区域明挖基坑地表沉降变形特征研究

Characteristics of surface settlement and deformation of open cut foundation pit in different areas of Beijing

张建全, 张克利, 程贵方 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 131–139

武汉地区厚互层土中基坑抗突涌破坏评价方法研究

Study of evaluation method of anti-uprush stability of foundation pit with thick interbedded soil layers in Wuhan

熊宗海, 冯晓腊, 张红章, 范卫琴, 程华强 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 134–140

高岭土电渗固结特性及数值模拟研究

A study of the kaolin electro-osmotic consolidation characteristics and their numerical simulation

沈美兰, 周太全, 李吴刚 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 78–85

深厚黄土地基浸水湿陷变形及竖向土压力作用分析

Analysis of collapsible deformation and vertical soil pressure action of thick loess foundation

屈宏录, 刘德仁, 孙英萍, 闫炳舟, 徐硕昌, 张严 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 157–164



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: [10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202309064](https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202309064)

马昕, 孙德安, 刘树佳. 软土地区某超深圆形基坑变形特性及流固耦合分析 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(6): 74-85.
MA Xin, SUN Dean, LIU Shujia. Deformation characteristics and fluid-solid coupled analysis of a super-deep circular foundation pit in soft soils[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(6): 74-85.

软土地区某超深圆形基坑变形特性及流固耦合分析

马 昕¹, 孙德安¹, 刘树佳²

(1. 上海大学力学与工程科学学院, 上海 200444;
2. 上海建设管理职业技术学院市政工程学院, 上海 201702)

摘要: 软土地区超深圆形基坑工程具有复杂性、危险性和稀缺性等特点, 所以对其进行精确的模拟预测具有重要意义。以上海苏州河深隧工程中开挖深度 56.3 m 的超深圆形基坑为例, 建立基于 Biot 固结理论的水土双向耦合有限元分析模型, 结合实际监测数据研究了软土地区超深圆形基坑的受力与变形特性; 探讨比较了双向耦合分析与工程中常用的仅考虑渗流场对土骨架作用的单向耦合分析在机理上的区别, 以及 2 种分析计算结果与实际监测数据的差异。结果表明: (1) 圆形围护结构受大偏压荷载一侧比未受偏压荷载一侧的侧向位移增大 64.7%, 表现出明显的空间效应; (2) 双向耦合分析因为考虑了随时间的增加, 水逐渐从孔隙排出, 超孔隙水压力逐渐消散, 并伴随着土体体积变化的过程, 所以能够对土体以及围护结构的变形进行有效预测; (3) 对于围护结构最大侧向位移, 单向与双向耦合分析的计算值与实测值的误差分别为 42.35% 和 14.35%; (4) 关于最大环向轴力, 单向与双向耦合分析的计算值与实测值的误差分别为 14.30% 和 10.27%, 双向耦合计算得到的基坑围护结构内力和变形的结果优于单向耦合计算。研究成果可为软土地区圆形超深基坑的设计和施工提供参考。

关键词: 超深基坑; 流固耦合; 数值分析; 基坑变形; 时空效应

中图分类号: TU46 文献标志码: A 文章编号: 1000-3665(2024)06-0074-12

Deformation characteristics and fluid-solid coupled analysis of a super-deep circular foundation pit in soft soils

MA Xin¹, SUN Dean¹, LIU Shujia²

(1. School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. School of Municipal Engineering, Shanghai Construction Management Vocational College, Shanghai 201702, China)

Abstract: The characteristics of super-deep circular foundation pit project in soft soil area are complexity, dangers, and scarcity. It is of great significance to simulate and predict its deformation accurately. As to the super-deep circular pit with excavation depth of 56.3 m in the deep tunnel project of Suzhou River in Shanghai, a fluid-solid coupled finite element analysis model based on the Biot consolidation theory was established. The deformation and force characteristics of super-deep circular foundation pits in soft soil areas were investigated by combining the actual monitoring data. The difference in mechanism between the fluid-solid bidirectional coupling analysis (BCA) and the unidirectional coupling analysis (UCA) which is commonly used in engineering to consider the single effect of the seepage field on the soil skeleton, as well as the difference between the calculation

收稿日期: 2023-09-28; 修定日期: 2023-12-29

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 上海市社会发展科技攻关项目(21DZ1204200); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金项目(SKLG2019K016)

第一作者: 马昕(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事基坑工程方面的研究。E-mail: 1339351072@qq.com

通讯作者: 孙德安(1962—), 男, 教授, 博士, 从事非饱和土与特殊土力学的研究和教学工作。E-mail: sundean@shu.edu.cn

results of the two analysis and the actual monitoring data were analyzed. The results show that the lateral displacement on the side of the circular retaining structure subjected to large bias load increases by 64.7% compared with that on the side not subjected to bias load, indicating an obvious spatial effect. The fluid-solid coupling analysis can predict the deformation of the soil and the retaining structure effectively because it considers the process that water is gradually discharged from the pore with time, and then the excess pore pressure is gradually dissipated with the change of the volume of the soil. For the maximum lateral displacement of the retaining structure, the errors between measured and calculated values of the UCA and BCA are 42.35% and 14.35%, respectively. Regarding the maximum circumferential axial force, the errors between the measured and calculated values for UCA and BCA are 14.30% and 10.27%, respectively. The results of foundation deformation and internal force obtained from the BCA are better than UCA. This study can provide the basic information for the design and construction of circular super-deep foundation pits in soft soil areas.

Keywords: super-deep excavation; fluid-solid coupled; numerical analysis; foundation pit deformation; time-space effect

随着城市建设密集程度的增加与轨道交通建设的迅速发展,城市中的深基坑越来越多^[1]。软土地区的深基坑工程(一般认为深度在6 m以上的基坑即为深基坑^[2])会对原有的地下管线、建筑物与地铁车站等建构筑物产生不利影响甚至引发安全事故^[3~4]。对于敏感环境下的超深基坑工程,在设计阶段精确地模拟预测由于基坑开挖引起的围护结构受力和变形,并对周边环境产生的影响进行评估,是保证超深基坑工程经济合理以及周边复杂环境安全的重要措施。

随着计算机技术的快速发展,数值模拟已经成为基坑工程变形分析和预测的强大工具。潘涛^[5]、张向东等^[6]分析了基坑工程对坑外土体与周边建筑物的影响,并将数值模拟结果与实测数据对比,验证了数值模拟方法在基坑工程中的正确性与适用性。在地下水位较高的软土地区开挖深基坑时,涉及到开挖之前的预降水、分层疏干降水以及承压水降水等问题,郑刚等^[7]、胡长明等^[8]对深基坑降水过程中地连墙侧移以及地表沉降进行了研究。但这些研究并未将深基坑的降水与开挖过程耦合,忽略了基坑开挖对围护结构和地表变形的影响。同时随着基坑工程的发展,在软土地区已经出现了深度达50~60 m甚至以上量级的超深基坑工程^[9]。宗露丹等^[10]、Xu等^[11]对软土地区开挖深度超过50 m的超深基坑工程,在开挖与降水耦合作用下的受力变形特性进行了研究。但现有研究大多采用仅考虑渗流场对土骨架作用的单向耦合分析,较少考虑基坑分级降水与开挖时水土双向耦合的影响。基坑开挖实际上是应力场与渗流场共同作用、相互耦合的过程^[12],向朱锋等^[13]、郑启宇等^[14]、黄戡

等^[15]、Borges等^[16]、Wu等^[17]基于流固耦合理论,结合现场监测数据,对深基坑开挖降水过程中的变形特性进行了分析,得到围护结构变形、地表沉降、周边建筑物变形规律等。但是由于可参考的开挖深度大于50 m的超深基坑案例较少,因此目前基于流固耦合理论对挖深50 m以上超深基坑的双向耦合研究较少。基坑工程逐渐向规模更大、深度更深的方向发展,同时涉及更复杂的水文地质条件。对于上海等软土地区,其土体具有含水率高、强度低和变形模量小等特点,与上海常规深度(12~35 m)的软土基坑工程相比,超深基坑的环境影响明显偏大,表现出显著的时空分布特性^[18]。根据上海市基坑工程技术标准,当深基坑的环境保护等级为1级时,围护结构最大变形控制目标为1.8‰H(H为开挖深度)^[19],因此对软土地区复杂水文地质条件下的超深基坑工程精确的模拟预测具有重要意义。

本文依托上海苏州河深隧工程中开挖深度56.3 m的超深圆形竖井基坑,建立并验证了基于Biot固结理论的双向耦合有限元分析模型,探讨并分析双向耦合分析方法与工程中常用的仅考虑渗流场对土骨架作用的单向耦合分析方法在机理上的区别,以及2种分析计算的结果与实际监测数据的差异,以期为软土地区超深基坑工程的设计和施工提供参考。

1 工程简介

1.1 工程概况

苗圃竖井为内直径30.0 m的拟圆形井,设计挖深56.3 m,围护结构采用厚1.5 m、深103.0 m的地下连续墙。竖井周边外圈地下连续墙厚1.0~1.2 m、深103.0 m,

该道围护兼作为竖井基坑二次防渗墙, 见图 1。

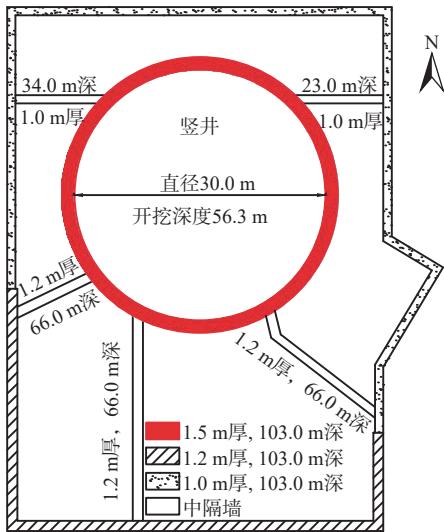


图 1 苗圃竖井地下连续墙布置图

Fig. 1 Layout of diaphragm wall of the Miaopu shaft

如图 2 所示, 苗圃竖井位于上海市长宁区福泉北路以东、临虹路以北; 场地南侧紧邻既有临虹路, 临虹路道路下方埋设有大量市政管线; 场地东侧紧邻既有苗圃泵房, 西侧为园林公司办公楼, 东北侧为森星高尔夫 1# 楼; 周围环境条件比较复杂。

1.2 地质和水文条件

根据勘察报告, 165.3 m 深度范围内土层主要由黏性土、粉性土和砂土组成, 详细土层分布及厚度见表 1。本场地浅层地下水属潜水类型, 主要赋存于①层填土、③—⑤层淤泥质黏土与粉质黏土中, 水位埋深 0.3~1.5 m。承压含水层主要包括: 水头埋深 4.0 m 的第 I 承压含水层(第⑦层); 水头埋深 5.0 m 的第 II 承压水层(第⑨层); 水头埋深 5.5 m 的第 III 承压水层(第⑩_A、⑪层)。

2 施工方案

苗圃竖井施工方案为顺作法, 竖向总共设置 1 道顶圈梁和 5 道环梁, 如图 3 所示。顺作方案采用“分层开挖、逐步施工各道环梁”的方式, 1—6 层土方开挖至环梁底标高后, 开始进行环梁施工, 而第 7 层开挖后浇筑底板再逐步施工内衬墙。顶圈梁及各道环梁的截面尺寸信息如图 3 所示。

3 竖井三维有限元模拟

3.1 模型建立

采用商业软件建立考虑基坑工程降水、开挖、浇筑结构构件等工序的三维有限元模型, 对基坑施工引起的超孔隙水压力与土压力的变化、围护结构的侧向变形、环向轴力以及坑外土体的沉降进行分析。

基坑的有限元计算模型如图 4 所示。本模型整体尺寸取为 250 m×250 m×140 m, 采用实体单元模拟土体、内衬墙与建筑物, 板单元模拟地下连续墙体系与建筑物筏板, 梁单元模拟环梁与建筑物筏板桩。整个模型共生成单元总数 88 849 个, 节点总数 46 424 个。地连墙与土体单元间建立界面单元模拟支护结构与土的共同作用, 同时设置渗透系数为 0 兼做止水帷幕。关于界面单元强度折减系数, 黏土取 0.65, 砂土取 0.70。

3.2 本构模型与模型参数

大量的统计资料表示, 岩土工程中的土体应变处于 0.01%~0.10%, 属于较小的应变范围^[20~21]。为准确地模拟土体的小应变特性, 本构模型采用小应变硬化(HS-Small)模型^[22]。

诸多学者对上海地区 HS-Small 本构模型的参数取值进行了研究, 梁发云等^[23]、王卫东等^[24]对上海地



图 2 苗圃竖井周边环境示意图

Fig. 2 Schematic of the surroundings of the Miaopu shaft

表1 各层土体 HS-Small 模型参数

Table 1 Model parameters of HS-Small model for each layer soil

土层号	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$G_0^{\text{ref}}/\text{MPa}$	c'/kPa	$\varphi'/(^{\circ})$	$\gamma_{0.7}/10^{-4}$	μ_{ur}	$P^{\text{ref}}/\text{kPa}$	m	K_0	R_f	厚度/m
①	18.8	4.02	4.54	27.88	102.00	6	36.0	2.7	0.2	100	0.8	0.55	0.9	3.81
③	17.0	3.01	3.61	24.05	79.36	3	29.6	2.7	0.2	100	0.8	0.53	0.6	6.30
④	17.0	2.41	2.89	19.30	54.03	4	27.9	2.7	0.2	100	0.8	0.53	0.6	8.70
⑤ ₁	17.6	3.38	4.05	20.25	52.65	5	30.5	2.7	0.2	100	0.8	0.49	0.9	6.70
⑤ ₃	17.8	4.63	5.55	27.76	72.17	5	31.6	2.7	0.2	100	0.8	0.48	0.9	15.40
⑤ ₄	19.5	5.74	6.89	34.45	89.58	16	32.4	2.7	0.2	100	0.8	0.46	0.9	3.80
⑦	19.5	11.58	11.58	46.32	138.96	0	34.5	2.7	0.2	100	0.5	0.38	0.9	4.60
⑧ ₁	18.0	4.75	5.70	28.51	67.50	8	32.4	2.7	0.2	100	0.8	0.46	0.9	4.20
⑧ ₂	18.5	5.63	6.75	33.75	89.59	8	33.1	2.7	0.2	100	0.8	0.45	0.9	18.90
⑨ ₁	19.4	14.66	14.66	58.64	146.60	0	37.5	2.7	0.2	100	0.5	0.36	0.9	3.50
⑨ ₂₋₁	20.2	15.69	15.69	62.76	156.90	0	37.5	2.7	0.2	100	0.5	0.33	0.9	8.60
⑨ ₂₋₂	19.1	17.21	17.21	68.84	172.10	0	36.5	2.7	0.2	100	0.5	0.31	0.9	13.90
⑩	19.9	10.42	12.51	62.53	135.69	19	31.6	2.7	0.2	100	0.8	0.5	0.9	4.10
⑩ _失	19.4	7.70	9.24	46.22	113.55	16	32.0	2.7	0.2	100	0.8	0.43	0.9	8.54
⑩ _A	19.3	12.37	12.37	49.48	138.54	0	37.0	2.7	0.2	100	0.5	0.36	0.9	15.70
⑪	21.0	15.40	15.40	61.60	172.48	0	36.0	2.7	0.2	100	0.5	0.32	0.9	26.00

注: γ 为重度; $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 为固结试验的参考切线模量; E_{50}^{ref} 为三轴固结排水剪切试验的参考割线模量; $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为三轴固结排水卸载再加载试验的参考卸载再加载模量; G_0^{ref} 为小应变刚度试验的参考初始剪切模量; c' 为有效黏聚力; φ' 为有效内摩擦角; $\gamma_{0.7}$ 为0.7倍的初始剪切模量时对应的剪应变; μ_{ur} 为泊松比; P^{ref} 为参考应力; m 为应力水平相关的幂指数; K_0 为正常固结条件下的静止侧压力系数; R_f 为破坏比。



图3 坚井支护体系剖面图及地层

Fig. 3 Section view of supporting system of vertical shaft and soil strata

注: 图中尺寸及高程单位均为 m; e_0 为孔隙比。

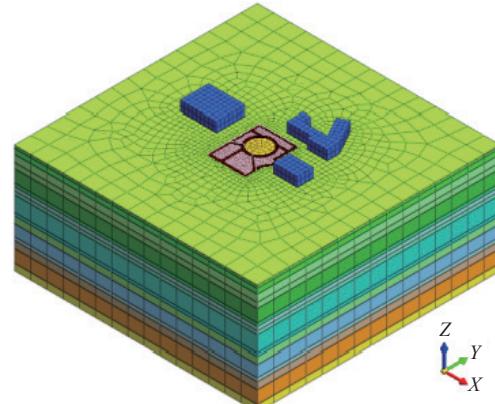


图4 基坑有限元模型图

Fig. 4 Finite element model of the foundation pit

区典型土体(黏土层②、淤泥质粉质黏土层③、淤泥质黏土层④和粉质黏土层⑤)的HS-Small模型参数进行了试验研究;陈贊等^[25]通过对现有试验成果的归纳分析,确定了上海地区③、④层土体的HS-Small模型参数取值。以上试验与统计结果为本工程所涉及的上海典型土体的模型参数取值提供了依据。由于上海地区典型土体下部的⑦、⑧、⑨、⑩和⑪层较深,试验取样比较困难,其参数取值依据顾晓强等^[26]基于大量试验数据提出并通过多个实际深基坑工程变形分析验证的上海土体HS-Small模型整套参数的取值方法确定。结合前述试验和统计分析结果,本研究的计算参数取值见表1。

考虑到实际工程中地下连续墙幅段接头的构造削弱并根据徐中华等^[27]对上海地区已经完成圆形基坑工程进行的反演分析结果, 圆形地连墙的刚度在C35的基础上折减, 折减系数环向取0.25, 坚向取0.80。围护结构的弹性模量环向取值 0.79×10^7 kPa, 坚向和径向取值 2.52×10^7 kPa。环梁采用弹性模型模拟, 弹性模量取 3.15×10^7 kPa, 混凝土泊松比均取0.20。

3.3 流固耦合理论

目前流固耦合理论主要分为单向耦合和双向耦合两类, 这两类理论的主要差别为水流连续方程与力学平衡方程之间是否完全地考虑耦合关系。Biot^[28]提出了全耦合的固结理论, 该理论可以反映固结过程中变形与孔隙压力的耦合特性。对于三维问题, 当岩土体采用弹塑性本构模型时, 土中任意一点的Biot固结有限元平衡微分方程可表示为:

$$-\partial D_{ep} \partial^T w + \partial M u = F \quad (1)$$

渗流连续性方程表示为:

$$\frac{\partial}{\partial t} M^T \partial^T w - \frac{1}{\gamma_w} M^T \partial^T K \partial M p = 0 \quad (2)$$

其中,

$$D_{ep} = D - \frac{D \frac{\partial g}{\partial \sigma'} \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma'} \right)^T D}{A + \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma'} \right)^T D \frac{\partial g}{\partial \sigma'}} \quad (3)$$

$$\partial = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: w —位移矢量, $w = [w_x, w_y, w_z]^T$;

F —体积力矢量, $F = [F_x, F_y, F_z]^T$;

u —超静孔隙水压力/kPa;

M —系数矩阵, $M = [1, 1, 1, 0, 0, 0]^T$;

D_{ep} —本构模型的弹塑性矩阵;

D —根据广义胡克定律建立的弹性矩阵;

f —屈服函数;

g —塑性势函数;

σ' —有效应力/kPa;

A —反映硬化特性的变量;

K —渗透系数矩阵;

γ_w —水的重度/(kN·m⁻³);

k_x, k_y, k_z — x, y, z 方向的渗透系数/(m·s⁻¹)。

将Biot固结方程以增量形式表示:

$$\begin{bmatrix} \bar{K} & K' \\ K'^T & -\Delta t K_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta R \\ \Delta S \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: \bar{K} —刚度矩阵;

K_c —渗流矩阵;

K' —应变渗流耦合矩阵;

$\Delta \delta$ —节点位移增量;

Δu —节点孔隙压力增量;

ΔR —节点荷载增量;

ΔS —流量增量。

3.4 施工工况模拟

在开挖土方之前, 将⑦层和⑨层承压水头设置为根据“按需减压的原则”计算出的安全水头。在第7层土方开挖之前进行两墙间⑨层辅助降水和⑩层敞开式减压降水。基坑开挖模拟施工工况如表2所示。

表2 基坑施工工况

Table 2 Foundation pit construction step

计算步	工况	开始日期	结束日期
Step0	初始渗流场计算		
Step1	初始应力场计算		
Step2	基坑周边主要建筑物施工		
Step3	地下连续墙施工		
Step4	表层土开挖(挖深1.80 m) 并施工顶圈梁	2020-10-16	2020-10-29
Step5	开挖第2层土方(挖深9.50 m) 并施工第1道环梁	2020-12-16	2021-01-04
Step6	开挖第3层土方(挖深18.00 m) 并施工第2道环梁	2021-02-28	2021-03-24
Step7	开挖第4层土方(挖深29.05 m) 并施工第3道环梁	2021-04-02	2021-04-24
Step8	开挖第5层土方(挖深39.50 m) 并施工第4道环梁	2021-05-07	2021-06-03
Step9	开挖第6层土方(挖深49.50 m) 并施工第5道环梁	2021-06-13	2021-07-17
Step10	开挖第7层土方(挖深56.30 m)	2021-07-29	2021-08-10
Step11	底板施工	2021-08-17	2021-09-05
Step12	内衬墙施工	2021-09-22	2022-02-24

4 计算结果与分析

4.1 土压力与孔隙水压力

图5和图6为2022年2月24日(基坑施工完成)基坑内外的水、土压力实际监测结果与双向耦合模拟计算结果的对比, 水、土压力以压为正。图中坑内(坑中心)压力画在左边, 坑外(围护结构外侧墙面处)压力画在右边。计算得到的结果与监测数据基本吻合。

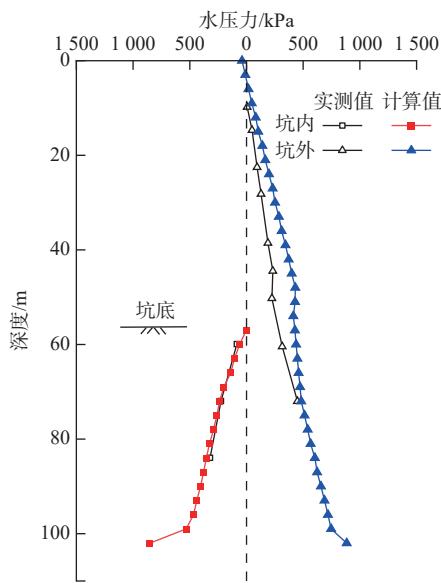


图 5 水压力的计算结果与实测结果对比

Fig. 5 Comparison of computational and measured pore-water pressures

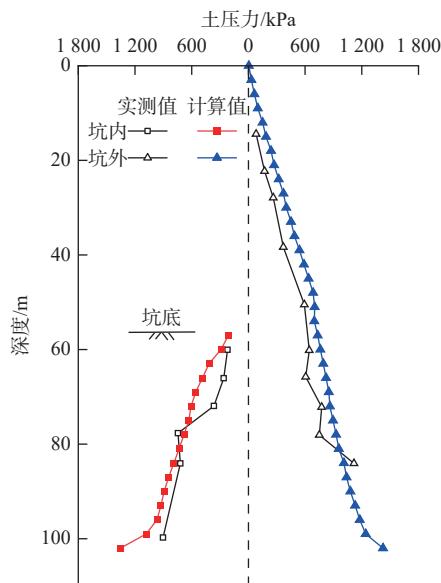
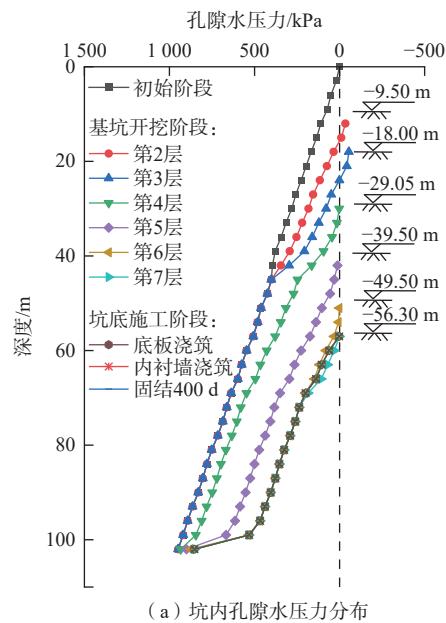


图 6 土压力的计算结果与实测结果对比

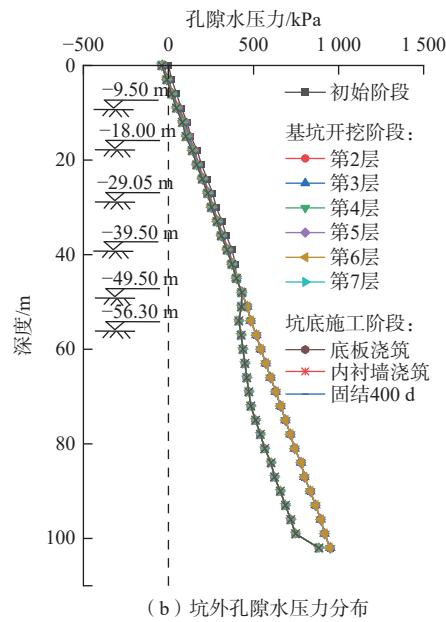
Fig. 6 Comparison of computational and measured earth pressures

合,说明了双向耦合分析的正确性。

基坑开挖属于卸载过程,产生超孔隙水压力,随着时间的增加,超孔隙水压力逐渐消散。图 7 表示各施工阶段下坑内外孔隙水压力分布图。从图 7(a)可以看出,在第 2 层与第 3 层土方开挖完成时,开挖面附近土体产生超孔隙水压力,这是因为开挖面下方的土体是③淤泥质粉质黏土和④淤泥质黏土,2 层土的渗透系数分别为 3×10^{-9} , 6×10^{-10} m/s, 超孔隙水压力消散需要较长时间;第 4—7 层土方开挖所暴露土体的渗透性



(a) 坑内孔隙水压力分布



(b) 坑外孔隙水压力分布

图 7 各施工阶段下坑内外孔隙水压力分布图

Fig. 7 Distribution of pore-water pressures inside and outside the pit at different construction steps

相对较大,较短时间内孔隙水压力达到稳定,在此期间深度 60 m 以下土体的孔隙水压力持续减小,这是坑内承压水降水的缘故。

图 7(b)为坑外孔隙水压力随施工阶段的变化。由于地下连续墙插入深度达 103.0 m,且施工止水帷幕,导致坑外向坑内渗流路径长;同时基坑工程涉及 3 层弱透水层,渗透性小,相对其他土层起到了隔水层的作用,这样基坑外的水不能很好地渗流到基坑内去,导致第 2—6 层土方开挖期间坑外的孔隙水压力几乎不发生改变。在第 7 层土方开挖之前开启了两墙

间承压水辅助降水, 导致两墙之间深度 50~100 m 的孔隙水压力下降。

图 8 表示坑内外土压力随施工阶段的变化, 坑内外土压力随基坑开挖不断减小(图 8a)。由于围护结构的侧向位移较小, 所以由围护结构侧向位移导致的坑外土压力减小量较小, 基本维持在静止土压力水平; 坑外土压力变化(图 8b)主要受降水的影响, 承压水降水导致孔隙水压力的减小从而导致了土压力的减小。

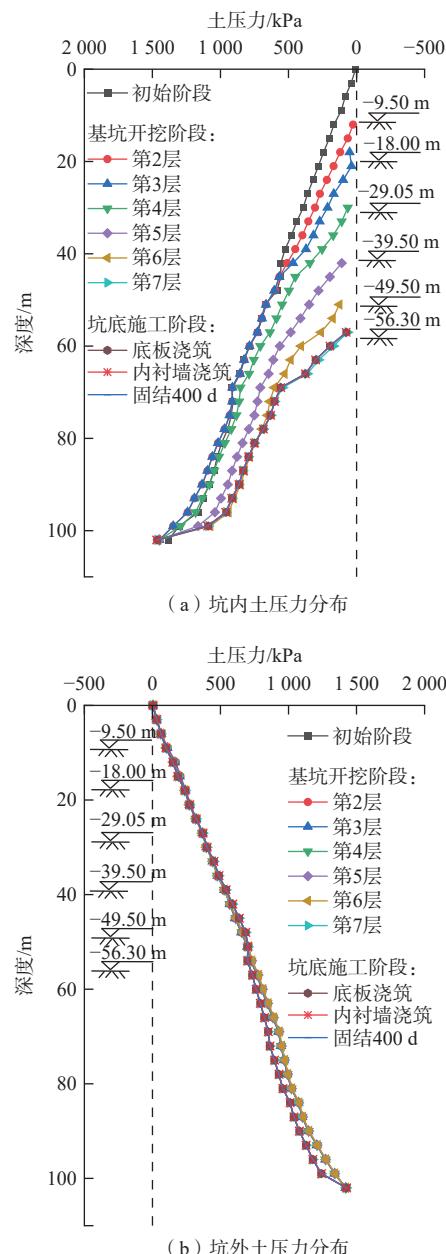


图 8 各施工阶段下坑内外土压力分布图

Fig. 8 Distribution of earth pressures inside and outside the pit at different construction steps

根据实际施工情况, 最终第⑨层承压水水位下降至地下 23.0 m, 其底板埋深为 98.4 m; 第⑩_A层承压水水位下降至地下 12.0 m, 其顶板埋深 110.0 m, 所以在深度 98.4~105.0 m 之间水压力与土压力变化斜率较大, 存在突变。

图 9 为不同施工阶段下单向与双向耦合分析计算得到的坑内孔隙水压力的对比。从图可知, 单向耦合分析计算出的孔隙水压力整体上大于双向耦合分析的结果。这是因为单向耦合分析无法计算出基坑开挖过程中产生的超孔隙水压力, 而是将渗流场分析得到的孔隙水压力叠加到下一步骤中的应力场分析中, 应力场分析产生的变形并不会反过来影响渗流分析。但实际上基坑的变形具有时间效应, 基坑的渗流场与应力场是相互影响相互作用的, 双向耦合分析与实际情况更相符。

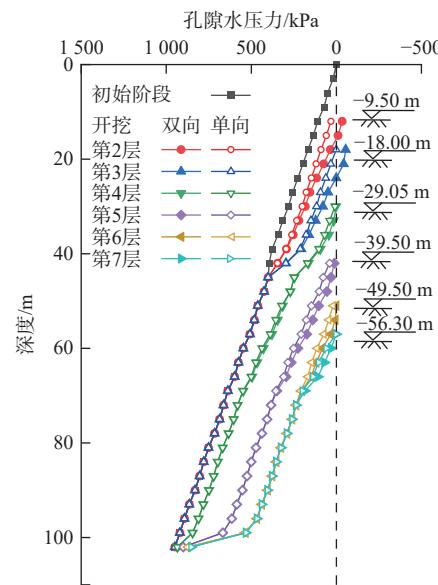


图 9 坑内孔隙水压力对比
Fig. 9 Comparison of pore-water pressure in pits

4.2 沉降对比分析

图 10 为沉降测量位置平面示意图, 图中的 T02 为深度 5 m 处的沉降测量点, DB3 为地表沉降测线。图 11 为 T02 测点处的土体历时沉降曲线, 双向耦合分析计算结果与实测结果吻合度较高, 故采用该方法对超深基坑开挖和降水的模拟能够较真实地反映土体变形的特性。从图 11 中可知, 随时间推移, 深度 5 m 处的土体沉降值随基坑开挖深度的增大而增大。在基坑开挖阶段, 沉降的增长速度较快, 受到地下连续墙上抬的影响, 土体沉降值有所减小, 并随着底板和内部结构的施工完成, 沉降逐渐趋于稳定。2021 年

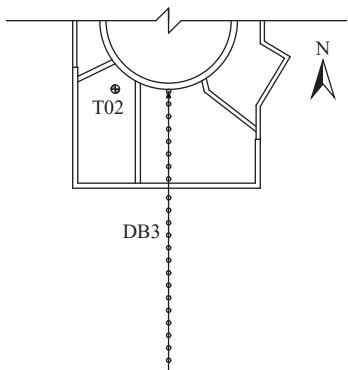


图 10 沉降测量点位置平面示意图

Fig. 10 Schematic diagram of soil settlement measurement location

7月29日,第7层土方开挖前沉降值增加显著,这是因为此时第⑨层和第⑩层承压水降水,引起土体大幅度沉降。2022年2月24日(基坑施工完成)之后的半年时间基坑的外荷载无变化,但是双向耦合分析能够计算得到的沉降有微小变化,这是由超孔隙水压力消散、土体有效应力增大引起的。双向耦合预测得到的沉降值与实测值基本一致,说明双向耦合分析能够对基坑施工完成后的沉降进行较为准确的预测,而单向耦合分析无法反映施工过程中土体沉降随时间的变化,也无法计算得到超孔隙水压力,故而无法对沉降进行预测,不能体现基坑开挖的时间效应。

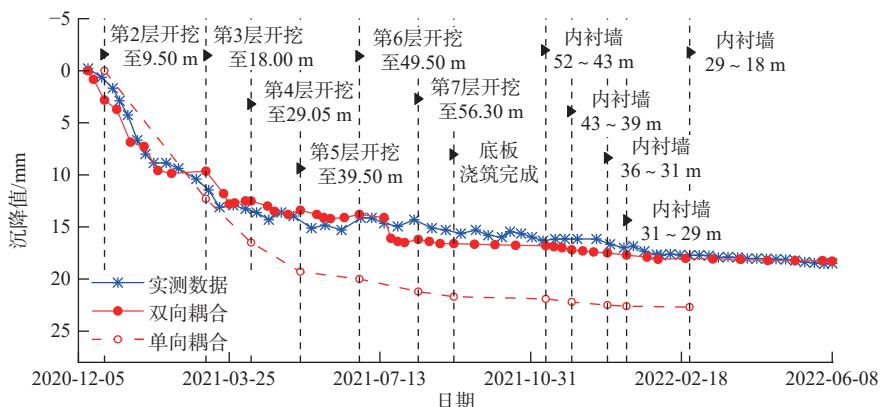


图 11 T02 测点(深度 5 m)处的沉降历时曲线

Fig. 11 Settlement curve of T02 at 5 m depth

图 12 为基坑开挖完成时地表 DB3 测线的沉降图。从图可知,基坑周边地表沉降沿基坑横向呈“凹槽”分布模式,因为本工程施工有 2 道地下连续墙,可以有效地控制基坑开挖引起的地表沉降,坑外地表沉降主要发生在防渗墙与围护结构之间,最大沉降值为 27.0 mm,防渗墙外的最大沉降值为 10.9 mm,双向耦合计算结果与实测数据曲线的吻合度比单向耦合计算结果要高。基坑开挖会引起开挖侧坑底土体隆起,开挖侧的土体与地下连续墙的相互作用(剪切应力)会引起地下连续墙在整个施工期间整体呈现上抬趋

势,进而带动围护结构周边的土体发生一定程度的隆起,所以在围护结构附近的沉降值接近 0。

4.3 围护结构的侧向变形

图 13 为基坑开挖完成时圆形围护结构的水平两方向变形云图,其中圆形围护结构指图 1 中红色填充部分,图 14 为基坑开挖完成时围护结构侧移平面分布图。从图中可知,由于受到周边建筑物的影响,围护结构侧向变形不均匀,围护结构最大侧向位移发生在建筑物荷载大的一侧,即园林办公楼一侧;最小侧向位移发生在无建筑物荷载的一侧。围护结构最大侧向位移比最小侧向要大 64.7%,呈现明显的空间效应。

图 15 为各施工阶段围护结构最大侧向位移沿深度的分布结果。从图可知,围护结构以向基坑内侧变形为主,侧向位移曲线形状为“凸肚形”抛物线形状,即地墙中部深度侧移大,上部与下部深度侧移小。随着开挖的进行,围护结构所受到的基坑内外应力差逐渐增大,最大侧移值发生在开挖面附近,围护结构插入土体深度较深,从而抑制了开挖面以下围护结构的

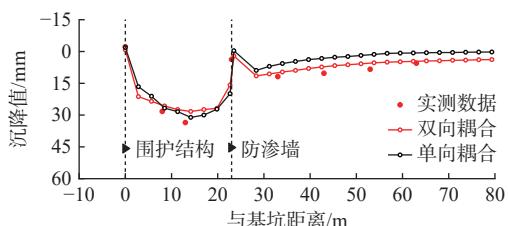


图 12 开挖完成时沿地表 DB3 测线沉降分布

Fig. 12 Surface settlement distribution along DB3 line at the end of excavation

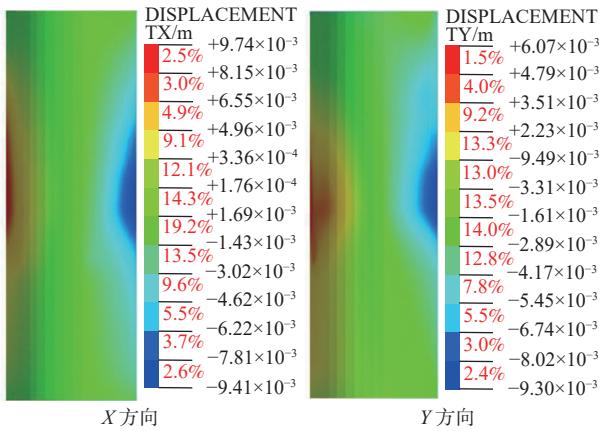


图 13 底板浇筑完成时圆形围护结构变形云图

Fig. 13 Deformation of circular retaining structure after finishing base plate pouring

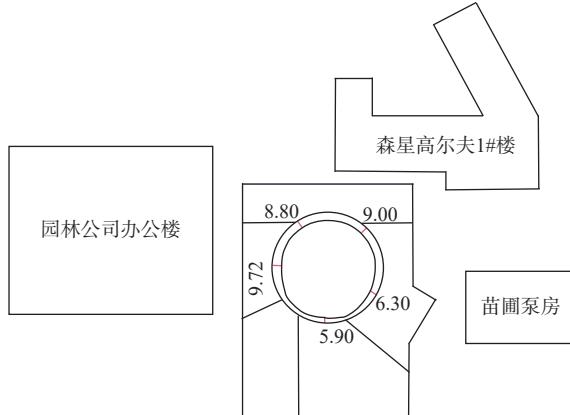


图 14 围护结构的最大侧移平面分布图(单位: mm)

Fig. 14 Maximum lateral displacement distribution of retaining structure (unit: mm)

变形。基坑底板浇筑完成时, 围护结构最大侧移实际监测值为 8.5 mm, 为开挖深度 H 的 0.15‰。这说明本工程圆形围护结构施工质量良好, 能充分发挥其“圆筒”效应, 减小基坑围护结构侧向位移量。

图 16 为基坑开挖至坑底时, 双向耦合与单向耦合分析得到的最大侧移量对比, 2 种分析方法最大侧移值分别是 9.72 mm 和 12.10 mm, 与实测数据的误差分别为 14.35% 和 42.35%。双向耦合分析模型计算值与实际监测数据吻合度较高。在实际工程中, 如果采用双向耦合分析, 能够更加精确地预测围护结构的变形值, 确定合理的围护结构刚度, 避免不必要的浪费。

图 17 为围护结构最大侧向位移计算值的历时曲线。从图中实际施工步骤曲线可知, 底板与内衬墙浇筑完成后, 围护结构的最大侧向位移在达到稳定的过程中有变形恢复的趋势。为了探讨坑底施工阶段围护结构最大侧向位移的影响因素, 分别研究坑底土体

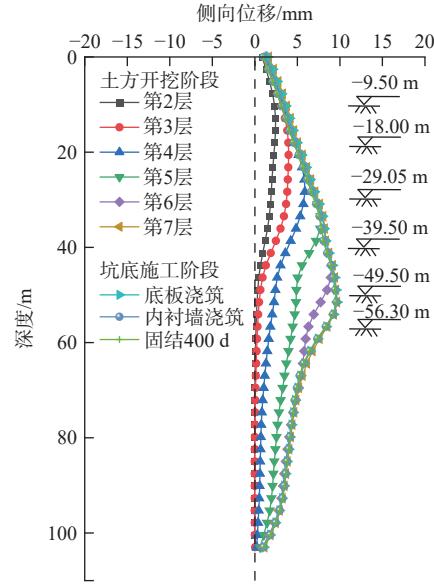


图 15 各施工阶段围护结构最大侧向位移

Fig. 15 Maximum lateral displacements of retaining structure at different construction steps

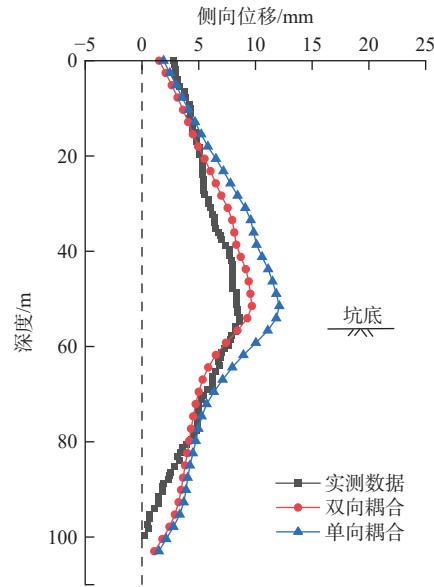


图 16 底板浇筑完成时围护结构侧向位移

Fig. 16 Lateral displacement of retaining structure after finishing base plate pouring

暴露、底板与内衬墙浇筑的影响。基坑开挖完成后坑底土体暴露时, 围护结构最大侧向位移随着时间的增长而逐渐增大, 开挖完成后 50 d 内增长速率较快, 后期逐渐趋于稳定。与坑底土体暴露的情况相比, 开挖完成后浇筑底板会使围护结构最大侧向位移值减小 2.68%, 浇筑底板后再浇筑内衬墙会使围护结构的最大侧向位移值减小 3.66%。混凝土底板能有效抑制超孔隙水压力的消散, 减少土体因开挖卸载导致的强度降低, 在一定程度上限制了土体体积膨胀, 有助于围

护结构最大侧移值的减小^[29]。底板与内衬墙的浇筑改变了围护结构的受力形式,对围护结构的侧移起到了限制作用。与单向耦合分析相比,双向耦合分析能够计算围护结构的动态变形,可预测围护结构在施工完成后趋于稳定的趋势,能较好地反映时空效应对围护结构变形的影响。

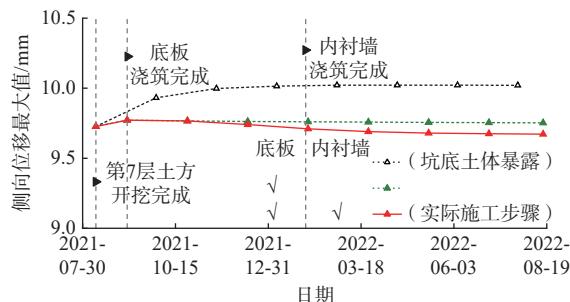


图 17 围护结构最大侧向位移计算值历时曲线

Fig. 17 Calculated curve of the maximum lateral displacement of the retaining structure

4.4 围护结构内力

图 18 是基坑开挖完成时圆形围护结构环向轴力云图。从图可知,圆形围护结构受力较均匀。图 19 是各施工阶段下围护结构环向轴力沿深度的分布结果。从图可知,随着基坑开挖深度增加环向轴力逐渐增大,最大值所在位置随着开挖的进行逐渐向坑底移动,围护结构的环向轴力和墙体的侧向位移所呈现的空间效应规律一致,在第 7 层土方开挖完成时单向耦合的计算结果整体大于双向耦合的计算结果。

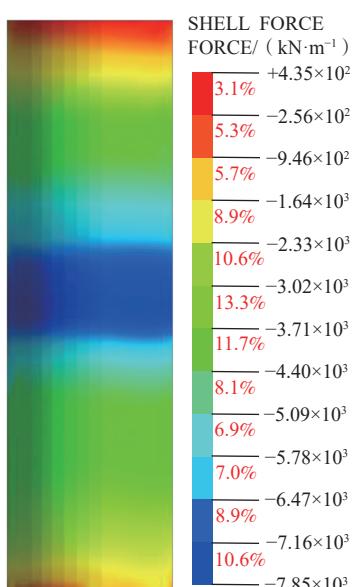


图 18 开挖完成时圆形围护结构环向轴力云图

Fig. 18 Circumferential axial force of circular retaining structure after finishing excavation

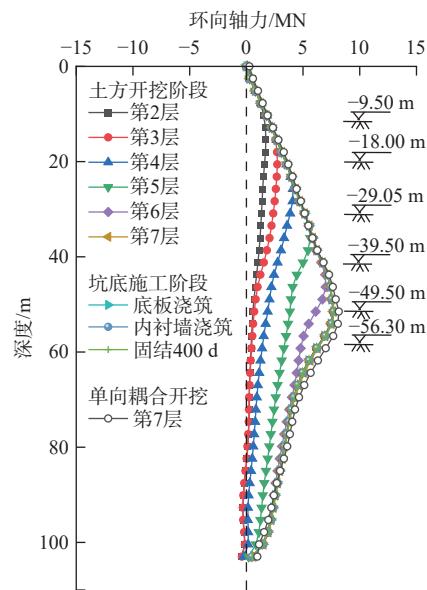


图 19 各施工阶段下围护结构环向轴力

Fig. 19 Circumferential axial forces of retaining structure at different construction steps

根据文献 [27] 的实测统计结果,基坑开挖完成时围护结构的最大环向轴力值为 7 120 kN。双向耦合分析计算得到的最大环向轴力 7 851 kN,与实测值的误差为 10.27%;单向耦合分析计算出最大轴力 8 138 kN,与实测值的误差为 14.30%。采用双向耦合分析得到的结果更接近实测值。

5 结论

(1) 圆形围护结构具有良好的受力性能,但由于受到偏压荷载作用,导致围护结构受大偏压荷载一侧比未受偏压荷载一侧的侧向位移增大 64.7%,体现出基坑工程明显的空间效应。

(2) 双向耦合分析能够对基坑开挖全过程的土体沉降进行准确分析计算,同时该分析方法考虑了超孔隙水压力随时间的消散,能够对施工完成后无外荷载变化情况下土体变形进行有效预测。

(3) 双向耦合分析可以预测围护结构浇筑底板与内衬墙后最大侧向变形趋于稳定时变形恢复的趋势,浇筑底板会使围护结构最大侧向位移值减小 2.68%,浇筑底板后再浇筑内衬墙会使围护结构的最大侧向位移值减小 3.66%。

(4) 对于围护结构最大侧向位移,单向与双向分析的计算值与实测值的误差分别为 42.35% 和 14.35%;关于最大环向轴力,单向与双向分析计算值与实测值的误差分别为 14.30% 和 10.27%。双向耦合分析计算得到的基坑位移和内力的结果优于单向耦合计算。

参考文献 (References) :

- [1] 宋广,宋二祥.基坑开挖数值模拟中土体本构模型的选取 [J].工程力学,2014,31(5): 86 – 94. [SONG Guang, SONG Erxiang. Selection of soil constitutive models for numerical simulation of foundation pit excavation[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(5): 86 – 94. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 林鸣,徐伟,杨玉泉,等.深基坑工程信息化施工技术 [M].北京:中国建筑工业出版社,2006: 1 – 2. [LIN Ming, XU Wei, YANG Yuquan, et al. Information construction technology of deep foundation engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006: 1 – 2. (in Chinese)]
- [3] 阳吉宝.深厚软土地区基坑墙底抗隆起稳定性 Prandtl 计算式的讨论 [J].水文地质工程地质,2021, 48(2): 61 – 69. [YANG Jibao. A discussion of the Prandtl calculation formula for anti-uplift stability of the bottom of a foundation pit wall in deep soft soil areas[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(2): 61 – 69. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 蒋涛,崔圣华,冉耀.开挖和降雨耦合诱发滑坡机理分析——以四川万源前进广场滑坡为例 [J].中国地质灾害与防治学报,2023, 34(3): 20 – 30. [JIANG Tao, CUI Shenghua, RAN Yao. Analysis of landslide mechanism induced by excavation and rainfall: A case study of the Qianjin Square landslide in Wanyuan City, Sichuan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(3): 20 – 30. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 潘涛.软土地区双线区间盾构隧道施工对周边地表以及建筑物沉降的影响 [J].水文地质工程地质,2022, 49(1): 101 – 108. [PAN Tao. Influences of double-track shield tunnel construction on settlements of adjacent ground and buildings in a soft soil area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 101 – 108. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 张向东,刘刚,李军.土岩组合地区基坑开挖对扩展基础桥墩沉降影响研究 [J].中国地质灾害与防治学报,2018, 29(2): 115 – 121. [ZHANG Xiangdong, LIU Gang, LI Jun. Study on influence of foundation pit excavation on settlement of spread foundation piers in soil-rock combined area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(2): 115 – 121. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 郑刚,曾超峰.基坑开挖前潜水降水引起的地下连续墙侧移研究 [J].岩土工程学报,2013, 35(12): 2153 – 2163. [ZHENG Gang, ZENG Chaofeng. Lateral displacement of diaphragm wall by dewatering of phreatic water before excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(12): 2153 – 2163. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 胡长明,林成.黄土深基坑潜水区降水诱发地面沉降的简化算法 [J].中国地质灾害与防治学报,2021, 32(3): 76 – 83. [HU Changming, LIN Cheng. Simplified calculation of settlement due to dewatering of phreatic aquifer in loess area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(3): 76 – 83. (in Chinese with English abstract)]
- [9] TAN Yong, LU Ye, XU Changjie, et al. Investigation on performance of a large circular pit-in-pit excavation in clay-gravel-cobble mixed strata[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 79(9): 356 – 374.
- [10] 宗露丹,王卫东,徐中华,等.软土地区 56 m 超深圆形竖井基坑支护结构力学分析 [J].隧道建设(中英文),2022, 42(7): 1248 – 1256. [ZONG Ludan, WANG Weidong, XU Zhonghua, et al. Mechanical properties of a 56-m deep circular shaft foundation pit support structure in soft soils[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(7): 1248 – 1256. (in Chinese with English abstract)]
- [11] XU Qianwei, XIE Jinlin, ZHU Hehua, et al. Supporting behavior evolution of ultra-deep circular diaphragm walls during excavation: Monitoring and assessment methods comparison[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 143(1): 105495.
- [12] 王春波,丁文其,陈志国,等.超深基坑工程渗流耦合理论研究进展 [J].同济大学学报(自然科学版),2014, 42(2): 238 – 245. [WANG Chunbo, DING Wenqi, CHEN Zhiguo, et al. Research progress on seepage coupling theory of super-deep foundation pit engineering[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(2): 238 – 245. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 向朱锋,徐金明.悬挂式止水帷幕条件下深基坑开挖变形特性研究 [J].水文地质工程地质,2023, 50(5): 96 – 106. [XIANG Zhufeng, XU Jinming. Deformation characteristics of deep foundation pit with suspended waterproof curtain during excavation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(5): 96 – 106. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 郑启宇,夏小和,李明广,等.深基坑降承压水对墙体变形和地表沉降的影响 [J].上海交通大学学报,2020, 54(10): 1094 – 1100. [ZHENG Qiuyu, XIA

- Xiaohe, LI Mingguang, et al. Influence of dewatering in confined aquifers on wall deformation and ground settlements in deep excavation[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2020, 54(10): 1094 – 1100. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 黄戡, 杨伟军, 马启昂, 等. 基于渗流应力耦合的基坑开挖受力特性及其对邻近地铁隧道的影响 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2019, 50(1): 198 – 205. [HUANG Kan, YANG Weijun, MA Qi'ang, et al. Influence of foundation excavation pit on adjacent metro tunnel using fluid-solid mechanics theory[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2019, 50(1): 198 – 205. (in Chinese with English abstract)]
- [16] BORGES J L, GUERRA G T. Cylindrical excavations in clayey soils retained by jet grout walls: Numerical analysis and parametric study considering the influence of consolidation[J]. *Computers and Geotechnics*, 2014, 55: 42 – 56.
- [17] WU Yongxia, SHEN Shuilong, LYU Haimin, et al. Analyses of leakage effect of waterproof curtain during excavation dewatering[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 583: 124582.
- [18] 李航, 李泽文, 廖少明, 等. 上海超深基坑环境变形时空分布特性实测分析 [J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(8): 1595 – 1604. [LI Hang, LI Zewen, LIAO Shaoming, et al. Field measurement of time-space distribution behaviors of environmental settlement of an ultra-deep excavation in Shanghai soft ground[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(8): 1595 – 1604. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 华东建筑设计研究院有限公司, 上海建工集团股份有限公司. 基坑工程技术标准: DG/TJ 508-61—2018 [S]. 上海: 同济大学出版社, 2018. [East China Architectural Design & Research Institute Co. Ltd., Shanghai Construction Group Co. Ltd. Technical code for excavation engineering: DG/TJ 508-61—2018[S]. Shanghai: Tongji University Press, 2018. (in Chinese)]
- [20] BURLAND J B. Ninth laurits bjerrum memorial lecture: “small is beautiful”—The stiffness of soils at small strains[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1989, 26(4): 499 – 516.
- [21] JARDINE R J, POTTS D M, FOURIE A B, et al. Studies of the influence of non-linear stress-strain characteristics in soil-structure interaction[J]. *Géotechnique*, 1986, 36(3): 377 – 396.
- [22] BENZ T. Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences[D]. Stuttgart: University of Stuttgart, 2007.
- [23] 梁发云, 贾亚杰, 丁钰津, 等. 上海地区软土HSS模型参数的试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(2): 269 – 278. [LIANG Fayun, JIA Yajie, DING Yujin, et al. Experimental study on parameters of HSS model for soft soils in Shanghai[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(2): 269 – 278. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 基坑开挖数值分析中土体硬化模型参数的试验研究 [J]. *岩土力学*, 2012, 33(8): 2283 – 2290. [WANG Weidong, WANG Haoran, XU Zhonghua. Experimental study of parameters of hardening soil model for numerical analysis of excavations of foundation pits[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(8): 2283 – 2290. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 陈赟, 罗敏敏, 夏能武, 等. 软土HSS模型参数现有试验成果统计分析 [J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(增刊2): 197 – 201. [CHEN Yun, LUO Minmin, XIA Nengwu, et al. Statistical analysis of existing test results of HSS model parameters for soft soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(Sup.2): 197 – 201. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 顾晓强, 吴瑞拓, 梁发云, 等. 上海土体小应变硬化模型整套参数取值方法及工程验证 [J]. *岩土力学*, 2021, 42(3): 833 – 845. [GU Xiaoqiang, WU Ruituo, LIANG Fayun, et al. On HSS model parameters for Shanghai soils with engineering verification[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(3): 833 – 845. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 徐中华, 李靖, 翁其平, 等. 超深圆形基坑计算分析方法及工程应用 [J]. *施工技术(中英文)*, 2022, 51(1): 13 – 20. [XU Zhonghua, LI Jing, WENG Qiping, et al. Analysis method of ultra-deep circular excavation and its application[J]. *Construction Technology*, 2022, 51(1): 13 – 20. (in Chinese with English abstract)]
- [28] BIOT M A. General theory of three-dimensional consolidation[J]. *Journal of Applied Physics*, 1941, 12(2): 155 – 164.
- [29] 刘国彬, 刘登攀, 刘丽雯, 等. 基坑坑底施工阶段围护墙变形监测分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(增刊2): 4386 – 4394. [LIU Guobin, LIU Dengpan, LIU Liwen, et al. Monitoring and analysis of lateral deformation of retaining wall during bottom excavation in deep pit[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(Sup 2): 4386 – 4394. (in Chinese with English abstract)]