

# 抽灌作用下止水帷幕应力应变研究

王 轩, 武永霞\*, 蒋星辰, 潘 凯

上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海

收稿日期: 2023年4月22日; 录用日期: 2023年7月4日; 发布日期: 2023年7月12日

## 摘 要

本文基于上海某基坑工程, 利用有限元分析软件Abaqus建立了三维流固耦合模型, 通过仿真结果分析了基坑降水及同时考虑基坑内抽水基坑外回灌作用下渗流场的变化情况以及止水帷幕的应力变化及变形规律。分析表明, 在抽水及抽灌作用下, 止水帷幕Mises应力大小随着止水帷幕埋置深度的增加逐渐增大。随着坑内降水的进行, 止水帷幕整体的应力在逐渐增大, 在抽水稳定后, 止水帷幕的应力达到最大值。回灌井的作用使得止水帷幕所受应力逐渐变小, 止水帷幕向基坑内侧的变形量减小。

## 关键词

抽灌地下水, 止水帷幕, 应力应变, 渗流场, 有限单元法

# Analysis of the Stress and Strain of Waterproof Curtain under Dewatering and Recharging

Xuan Wang, Yongxia Wu\*, Xingchen Jiang, Kai Pan

School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai

Received: Apr. 22<sup>nd</sup>, 2023; accepted: Jul. 4<sup>th</sup>, 2023; published: Jul. 12<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

In this paper, a three-dimensional fluid-solid coupling model is established by finite element analysis software Abaqus based on a foundation pit project in Shanghai. Through the simulation results, the change of seepage field and the stress change and deformation law of waterproof curtain under the action of foundation pit dewatering and external recharge of pumping foundation pit are analyzed. The analysis shows that the value of Mises stress of waterproof curtain increases

\*通讯作者。

gradually with the increase of the insertion depth of the waterproof curtain. The stress of the waterproof curtain increases gradually with dewatering. And when the pumping is stable, the stress of the waterproof curtain reaches its maximum value. The application of the recharging well makes the stress on the curtain gradually become smaller, and the deformation of the curtain to the inner side of the pit reduce.

## Keywords

**Pumping and Recharging Groundwater, Waterproof Curtain, Stress and Strain, Seepage Field, Finite Element Method**

Copyright © 2023 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

在基坑工程中,若基坑开挖时施工区域的地下水水位高于基坑底面,地下水会对基坑的安全造成不良影响[1]。因此,地下空间的开挖需要降低承压水水位,以保证基坑能够在安全、干燥的环境下施工,避免水位高导致的边坡失稳、基坑坑底突涌及地基的承载能力下降等现象[2]。实际工程中通常采用止水帷幕结合井点降水的方式来降低基坑内部承压水的水位[3],而长时间的水位下降会使砂层以及砂层上覆的粘土固结,进而导致土体沉降,严重时会造成地面塌陷、建筑物的不均匀沉降及倾斜等灾害[4],因此通常采取回灌的方式来使因降水而降低的地下水位得到回升,以减少基坑内部降水对周围环境的影响[5][6]。因此,基坑降水和回灌的过程中止水帷幕的受力与变形成了工程中备受关注的问题。

目前,国内外大量专家学者针对基坑抽水及回灌对周围环境的影响展开了研究。瞿成松[7]通过对上海陆家嘴地区某基坑工程进行地下水回灌试验,探究了地下水回灌引起的水位变化及地面沉降现象,以及地下水上升与地面回弹的关系;Liu等[8]基于三维有限差分模型并结合实测数据,以济南轨道交通R2线典型深基坑工程为基础,研究了抽灌和开挖共同作用下的岩土-围护结构-地下水的变化,并分析了回灌对围护结构和地下水的影响;Zheng等[9]在Hantush和Jacob模型的基础上,将Levenberg-Marquardt算法(LMA)和遗传算法(GA)相结合并应用到了天津市软土区的承压含水层回灌试验当中以估算水文地质参数,并依此准确地模拟地下水水位的变化。但现有的研究更多是针对抽灌作用对地下水水位及土体变形的影响,而鲜有对止水帷幕的受力及变形的变化规律的探究。

本文基于上海市某基坑工程的地层资料,通过数值分析法研究了基坑内抽水基坑外回灌作用下止水帷幕的应力状态及变形,分析了抽水及抽灌作用下渗流矢量的变化、止水帷幕的应力状态及变形,以期为其其它基坑工程的施工提供借鉴。

## 2. 有限元模型的建立

### 2.1. 模型背景

本文研究的区域地处上海市,位于长江三角洲滨海平原地带,地貌类型为滨海平原地貌,场地地势平坦,地层由浅到深有填土、砂质粉土、粉质粘土及粘土层等。模型所依托的上海某基坑工程所处的地层在85.38 m深度范围内均为第四纪松散沉积物,属第四系滨海平原地基土沉积层,主要由饱和粘性土、粉土组成,一般具有成层分布特点。研究区域的地质剖面如图1所示,土层分布自上至下土层依次为:

①<sub>1</sub> 回填土、②<sub>3,1</sub> 砂质粉土、②<sub>3,2</sub> 砂质粉土、⑤<sub>1,1</sub> 粘土、⑤<sub>1,2</sub> 粉质粘土、⑥粉质粘土、⑦<sub>1</sub> 砂质粉土、⑦<sub>2</sub> 层粉砂、⑧<sub>1</sub> 粘土、⑧<sub>2</sub> 粘土夹砂、粉砂互层、⑨<sub>1</sub> 粉砂夹粉质粘土。各土层的土性特点如表 1 所示。

本研究涉及的工程案例地下水类型有浅部土层中的潜水、第一和第二承压含水层中的承压水，而本文将重点关注浅部的潜水及第一承压含水层。潜水含水层赋存于②<sub>3,1</sub> 砂质粉土以及②<sub>3,2</sub> 砂质粉土层中，潜水与第一承压含水层间的相对隔水层隔水性好，相对隔水层由⑤<sub>1,1</sub> 层灰色粘土、⑤<sub>1,2</sub> 层灰色粉质粘土和⑥层暗绿~灰绿色粉质粘土组成。第一承压含水层赋存于⑦<sub>1</sub> 层砂质粉土和⑦<sub>2</sub> 层粉砂中。⑦<sub>1</sub> 和⑦<sub>2</sub> 层土性差别较大，因此在基坑工程水文地质计算中需要对第一承压含水层上下段按不同土性选取不同水文地质参数值。

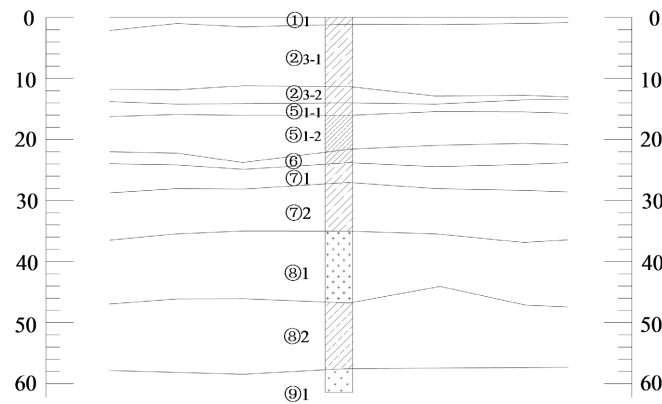


Figure 1. Hydrogeological profile of the study area  
图 1. 研究区地质剖面图

Table 1. Characteristics of soil layer in the study  
表 1. 研究区域土层特点

土层序号	土层名称	土层特点
① <sub>1</sub>	回填土	杂填土为主，下部以素填土为主，土质松散。
② <sub>3,1</sub>	砂质粉土	局部夹较多薄层粘性土，呈粘质粉土状，土质不均
② <sub>3,2</sub>	砂质粉土	含云母，夹薄层粘性土，局部砂性较重，呈粉砂状
⑤ <sub>1,1</sub>	粘土	夹少量薄层粉砂，局部以粉质粘土为主，呈软塑状态
⑤ <sub>1,2</sub>	粉质粘土	含云母、腐植物、钙质结核，局部下部夹薄层粉土
⑥	粉质粘土	含氧化铁条纹及铁锰质结核，土质较好。
⑦ <sub>1</sub>	砂质粉土	含云母，夹少量粉砂，土质较均匀
⑦ <sub>2</sub>	粉砂	土质较均匀
⑧ <sub>1</sub>	灰色粘土	含有机质，局部夹少量薄层粉砂，土质较均匀
⑧ <sub>2</sub>	粘土夹砂、粉砂互层	含云母、有机质，与粉砂互层，土质不均匀
⑨ <sub>1</sub>	粉砂夹粉质粘土	-

## 2.2. 模型建立

由于实际工况中的工程地质条件与水文地质条件相对较复杂，为了便于模型的建立与数值模拟求解，本次研究结合实际工况的水文地质条件将土层进行和合并、简化处理，对同时考虑抽灌作用的流固耦合

模型进行了简化,将原本的①<sub>1</sub>层、②<sub>3,1</sub>层及②<sub>3,2</sub>层简化为第一层;将原本的⑤<sub>1,1</sub>和⑤<sub>1,2</sub>层合并为第二层;将⑥层归为第三层;将⑦<sub>1</sub>层及⑦<sub>2</sub>层分别归为第四层和第五层;⑧<sub>1</sub>粘土层归为第六层,简化后建立的模型如图2所示。

本文所建立的三维有限元模型的基本尺度为 1200 m × 1000 m × 50 m,圆形基坑圆心位于模型中心沿水平方向偏置 100 m,半径为 40 m,止水帷幕厚度为 1 m,止水帷幕埋深为 42 m。基坑内设有三口抽水井,同时基坑外设置三口回灌井。整个模型共划分为 28,680 个单元,32,494 个节点,在网格划分时,考虑到虽然致密的网格会提高软件求解计算的精度,但过于致密的网格同样会降低计算的效率。因此,在基坑开挖及止水帷幕区域采用了均匀致密的网格划分;在止水帷幕外侧临近区域采用非均质网格,距止水帷幕由近至远的区域网格的划分也是由致密至稀疏的;在模型远离止水帷幕的区域网格划分较为稀疏,因为这部分区域受基坑开挖及抽灌的影响较小,且这样划分可以提高求解的效率。本文所建立的模型及其网格的划分如图3所示。由于本研究基于上海软土层地区的基坑工程,目标区域承压含水层与弱透水层互层,因此不同的土层采用不同的本构模型来计算。其中砂层基于摩尔-库伦模型来计算,粘土土层基于修正剑桥模型来计算。

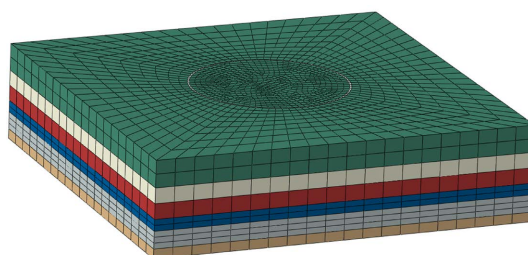


Figure 2. Simplified soil layer model

图2. 经简化后的土层模型

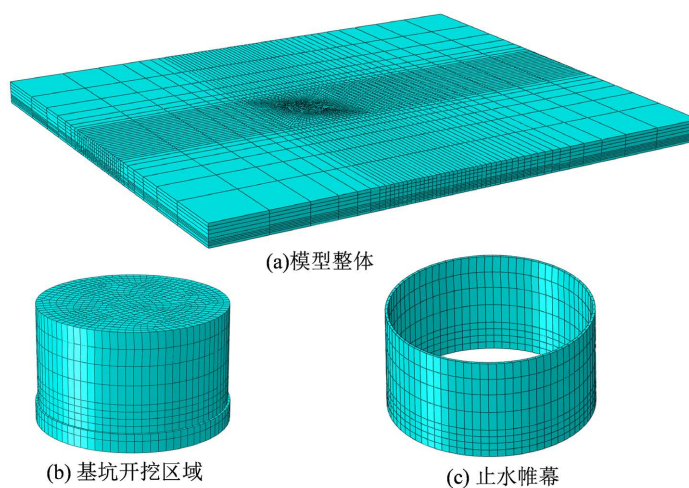


Figure 3. Model meshing

图3. 模型网格划分

### 3. 地下水渗流矢量分析

#### 3.1. 抽水阶段止水帷幕应力分析

图4为降水稳定后纵向剖面地下水渗流矢量图。从图中可以看出,在降水阶段,基坑内承压含水层

地下水均流向抽水井位置，且抽水井处的渗流速度最大。而由于止水帷幕的存在，基坑外承压含水层的地下水渗流矢量均流向基坑内止水帷幕下方，且止水帷幕下方位置的渗流速度高于止水帷幕两侧。

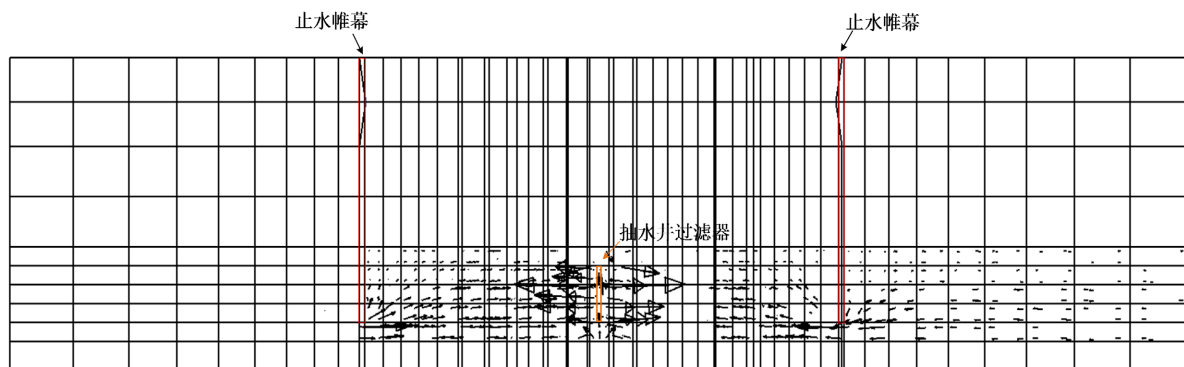


Figure 4. Groundwater flow vector of longitudinal profile of foundation pit after dewatering  
图 4. 降水稳定后纵向剖面地下水渗流矢量图

### 3.2. 抽灌阶段止水帷幕应力分析

图 5 为抽灌稳定后纵向剖面地下水渗流矢量图。从图中可以看出，在基坑内降水和基坑外回灌同时进行，基坑内承压含水层地下水均流向抽水井位置，且坑内抽水井处的渗流速度最大。坑外回灌的作用下，回灌地下水从井点向周围两侧渗流，而由于止水帷幕的存在，靠近止水帷幕一侧方向的地下水渗流矢量均流向基坑内止水帷幕下方，且止水帷幕下方位置的渗流速度高于止水帷幕两侧。此外，在坑内抽水产生的孔压差的作用下，回灌井向靠近止水帷幕一侧渗流速度明显高于远离回灌井一侧。

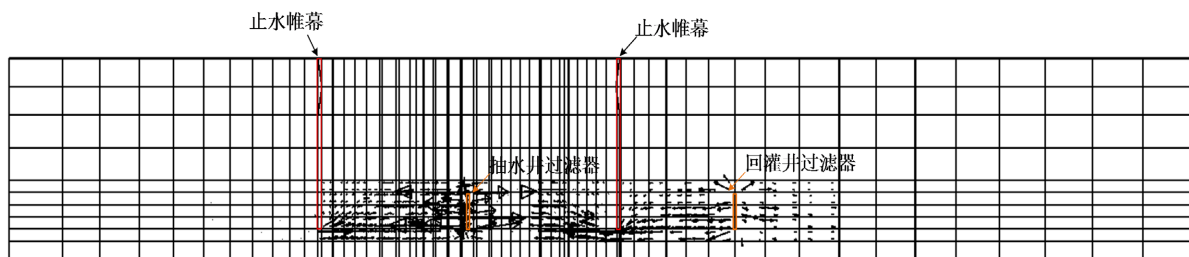


Figure 5. Groundwater flow vector of longitudinal profile of pit after dewatering and recharging  
图 5. 抽灌稳定后纵向剖面地下水渗流矢量图

图 6 为抽灌稳定后承压含水层 33 m 及 43 m (止水帷幕下侧) 平面地下水平面渗流矢量图。由图可知，由于回灌井的深度为 42 m，故仅在 33 m 深处可以看到回灌水流入含水层，而在 43 m 深处回灌的作用不太明显。

## 4. 止水帷幕应力分析

### 4.1. 抽水阶段止水帷幕应力分析

图 7 为降水阶段止水帷幕 Mises 应力分布云图。由图可知，止水帷幕整体的 Mises 应力分布在  $8.129 \times 10^4 \sim 1.845 \times 10^6$  Pa 之间，且应力大小随着止水帷幕埋置深度的增加逐渐增大。随着坑内降水的进行，止水帷幕整体的应力在逐渐增大，且在  $t = 80$  h 时在与第一土层接触的左右两侧的应力远小于其他位置。

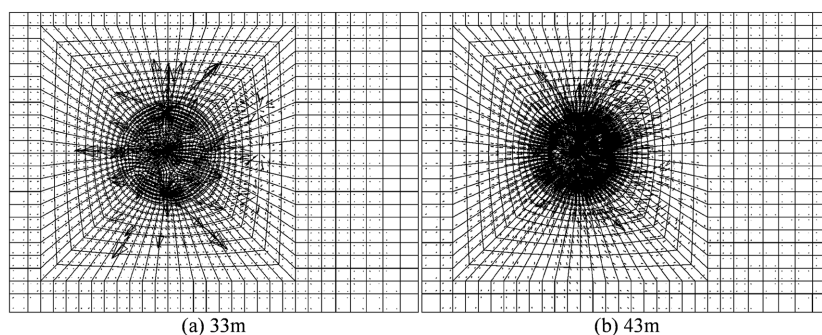


Figure 6. Groundwater flow vector of aquifer after dewatering and recharging  
图 6. 抽灌稳定后承压含水层地下水平面渗流矢量图

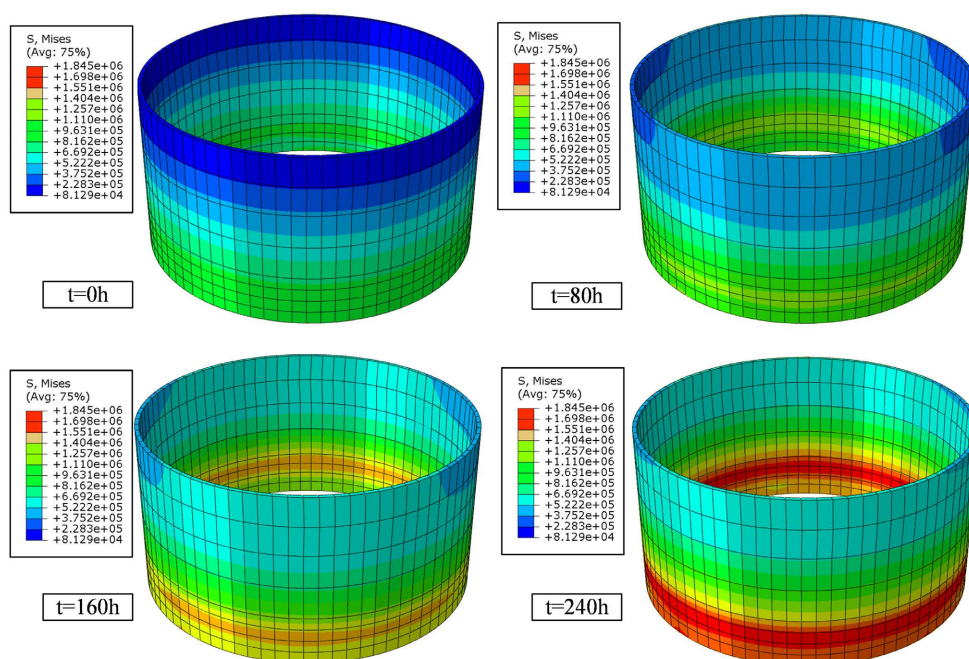


Figure 7. Mises stress distribution of cut-off barrier during dewatering (unit: Pa)  
图 7. 抽水阶段止水帷幕 Mises 分布云图(单位: Pa)

在抽水稳定后(即  $t = 240$  h), 止水帷幕的应力达到最大值, 且最大应力在承压含水层(约 36 m 处)接触的位置。这说明坑内水位的降低会使得止水帷幕承受的应力增大。在止水帷幕内侧, 由于基坑降水的进行, 承压含水层的土体会产生压缩固结的现象, 而后土体在自重应力的作用下发生沉降; 止水帷幕外侧, 土体的变形随着至基坑中心的距离的减小而增大。由于降水会导致的基坑内外土体发生的侧向位移, 止水帷幕的应力状态也会随之发生变化。

#### 4.2. 抽灌阶段止水帷幕应力分析

图 8 为抽灌阶段止水帷幕 Mises 应力分布云图。止水帷幕整体的 Mises 应力分布在  $4.001 \times 10^5 \sim 1.845 \times 10^6$  Pa 之间, 且应力大小随着止水帷幕埋置深度的增加逐渐增大。在  $t = 0$  时, 止水帷幕与承压含水层接触的位置处 Mises 应力最大。随着坑内降水及坑外回灌的进行, 止水帷幕整体的应力在逐渐减小, 但在这个过程中左右两侧与第一土层接触位置的应力为最小值  $4.001 \times 10^5$  Pa, 远小于其他位置。

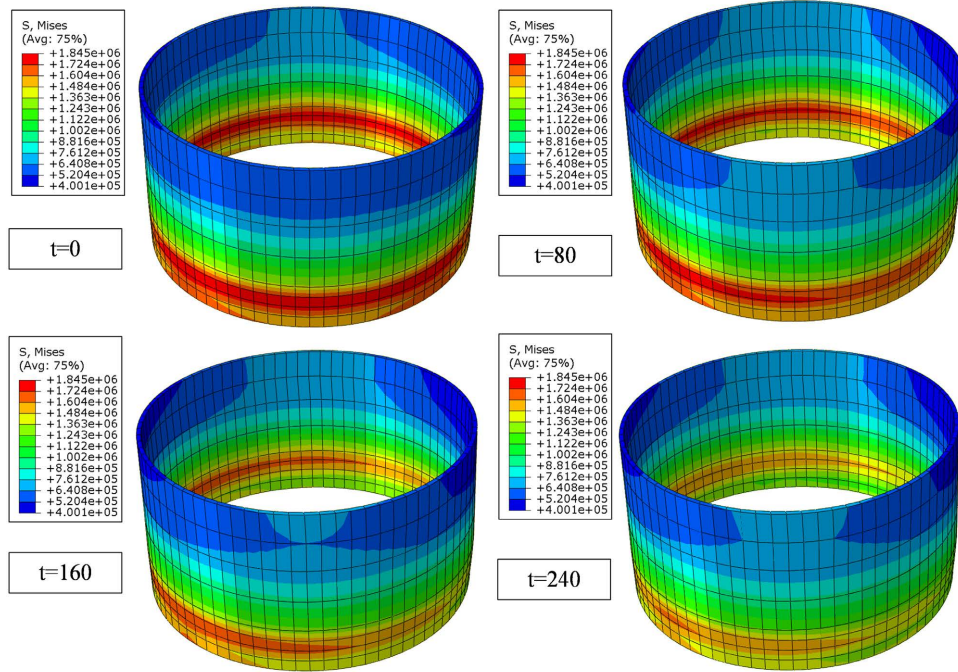


Figure 8. Mises stress distribution of cut-off barrier during dewatering and recharging (unit: Pa)  
 图 8. 抽灌阶段止水帷幕 Mises 分布云图(单位: Pa)

## 5. 止水帷幕变形分析

### 5.1. 抽水阶段止水帷幕变形分析

图 9 为降水稳定后止水帷幕水平方向位移云图。从图中可以看出，止水帷幕整体的变形方向是向基坑内部发生的，这是由于渗流的作用下土体在基坑中心方向发生侧向位移，力作用在止水帷幕墙体上因而发生水平方向的变形。止水帷幕的水平位移范围为 $-6.262 \times 10^{-3} \sim 6.104 \times 10^{-3}$  m。x 方向的变形(即 U1)沿 z 轴呈三角形状自上而下逐渐减小，且最大值出现在止水帷幕顶部左右两侧位置；而 y 方向的变形(即 U2)沿 z 轴从上至下逐渐增大，最大值出现在止水帷幕底部前后两侧位置。这是由于地下水位的变化导致原有的土体应力平衡被打破，基坑内外的土体产生水平方向的变形对止水帷幕造成了不均匀的横向挤压，从而导致了止水帷幕向基坑内侧的水平方向的位移。在实际的工程中，基坑内部采取水平支撑可以减小止水帷幕向基坑内侧的倾覆和变形。

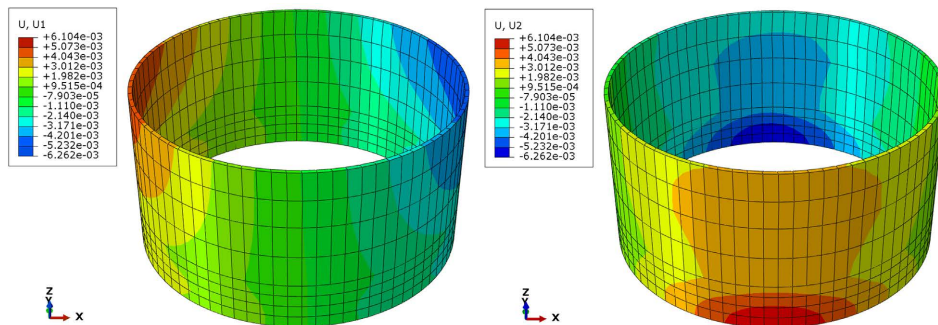


Figure 9. Horizontal displacement of cut-off barrier after dewatering (unit: m)  
 图 9. 降水稳定后止水帷幕水平位移云图(单位: m)

## 5.2. 抽灌阶段止水帷幕变形分析

图 10 为止抽灌稳定后止水帷幕水平方向位移云图。从图中可以看出, 止水帷幕的侧向位移范围为  $-1.467 \times 10^{-2} \sim 6.038 \times 10^{-3}$  m。x 方向(即 U1 方向), 远离回灌井一侧的变形沿 z 轴呈三角形形状自上而下逐渐增大, 且最大值出现在止水帷幕底部; 靠近回灌井一侧的变形沿 z 轴呈三角形形状自上而下逐渐减小, 且最大值出现在止水帷幕顶部。而 y 方向的变形(即 U2 方向)沿 z 轴从上至下逐渐增大, 最大值出现在止水帷幕前后两侧底部位置。

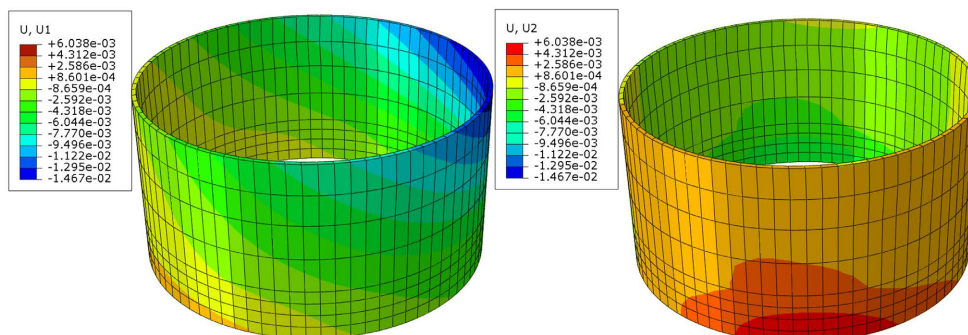


Figure 10. Horizontal displacement of cut-off barrier after dewatering and recharging (unit: m)  
图 10. 抽灌稳定后止水帷幕水平位移云图(单位: m)

## 6. 结论

1) 在基坑降水至稳定阶段, 止水帷幕 Mises 应力大小随着止水帷幕埋置深度的增加逐渐增大。随着坑内降水的进行, 止水帷幕整体的应力在逐渐增大, 在抽水稳定后, 止水帷幕的应力达到最大值, 且最大应力位于承压含水层上部。在抽水稳定后, 止水帷幕整体的变形方向为向基坑内部发生的。

2) 在基坑抽灌至稳定阶段, 止水帷幕 Mises 应力大小随着止水帷幕埋置深度的增加逐渐增大。由于回灌作用, 止水帷幕整体的应力随时间逐渐减小。与抽水时相比, 坑外回灌后, 止水帷幕向基坑内侧的变形量减小。

## 基金项目

国家自然科学基金青年科学基金项目: 抽灌引起的止水帷幕两侧地下水位差的形成机制与模型研究(2019~2021)(编号: 41807235)。

## 参考文献

- [1] Tan, Y., Fan, D. and Lu, Y. (2022) Statistical Analyses on a Database of Deep Excavations in Shanghai Soft Clays in China from 1995-2018. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, **27**, 04021067. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000646](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000646)
- [2] 郑刚, 朱合华, 刘新荣, 杨光华. 基坑工程与地下工程安全及环境影响控制[J]. *土木工程学报*, 2016, 49(6): 1-24.
- [3] 王建秀, 郭太平, 吴林高, 等. 深基坑降水中墙-井作用机理及工程应用[J]. *地下空间与工程学报*, 2010, 6(3): 564-570.
- [4] Loáiciga, H.A. (2013) Consolidation Settlement in Aquifers Caused by Pumping. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **139**, 1191-1204. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000836](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000836)
- [5] 郭景琢, 李钟顺, 龙燕武, 陈昊. 基坑工程地下水回灌技术基本特性的研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2022, 18(S2): 800-812.
- [6] Huang, Y., Yang, Y. and Li, J. (2015) Numerical Simulation of Artificial Groundwater Recharge for Controlling Land



Subsidence. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **19**, 418-426. <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0505-y>

- [7] 瞿成松. 上海陆家嘴地区回灌试验分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(2): 295-298.
- [8] Liu, F., Xing, H., Wu, B., *et al.* (2022) Study on the Effect of Dewatering-Recharge-Excavation of Deep Foundation pits on Soil-Structure-Groundwater under a Deep Confined Water Environment. *Arabian Journal of Geosciences*, **15**, Article No. 710. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09896-5>
- [9] Zheng, G., Li, Q., Cheng, X., *et al.* (2023) Study on the Hydraulic Parameter Differences between Pumping and Recharge in a Confined Aquifer of a Soft Soil Area. *Hydrogeology Journal*, **31**, 947-965. <https://doi.org/10.1007/s10040-023-02629-2>