

不均匀淤泥地层多室沉井挖土下沉方案研究

张乾辉¹, 邱海龙¹, 贺洁星^{2*}, 陈保国², 王程鹏²

¹中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都

²中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉

Email: *1641992485@qq.com

收稿日期: 2020年9月24日; 录用日期: 2020年10月12日; 发布日期: 2020年10月19日

摘要

合理的挖土下沉方案能够有效控制沉井下沉姿态及结构应力, 减小对周围环境的影响。以深圳市固戍水质净化厂沉井工程为背景, 结合现场施工条件, 设计12种不同挖土下沉方案, 通过数值模拟的方法, 得出了不均匀淤泥地层中多室沉井不同挖土下沉方案对沉井下沉姿态, 结构应力及周围管道的影响规律。结果表明: 不同挖土方案会导致沉井结构受力出现“简支效应”、“悬臂效应”和“扁担效应”; 研究发现“简支效应”对沉井结构受力最为有利; 对称挖土方案中先开挖中间区域土体对沉井下沉姿态控制效果最好, 沉井结构应力也能得到较好控制; 各挖土下沉方案对周围管道影响程度不同, 挖土方案B3对管道影响最小。

关键词

多室沉井, 不均匀淤泥地层, 挖土方案, 管道, 数值模拟

Study on Excavation Scheme of Multi Chamber Open Caisson in Uneven Silt Stratum

Qianhui Zhang¹, Hailong Qiu¹, Jiexing He^{2*}, Baoguo Chen², Chengpeng Wang²

¹Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu Sichuan

²Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan Hubei

Email: *1641992485@qq.com

Received: Sep. 24th, 2020; accepted: Oct. 12th, 2020; published: Oct. 19th, 2020

*通讯作者。

文章引用: 张乾辉, 邱海龙, 贺洁星, 陈保国, 王程鹏. 不均匀淤泥地层多室沉井挖土下沉方案研究[J]. 土木工程, 2020, 9(10): 1014-1023. DOI: 10.12677/hjce.2020.910106

Abstract

Reasonable excavation scheme of open caisson can effectively control the subsidence posture and structural stress of open caisson, and reduce the impact on the surrounding environment. Based on the open caisson project of Shenzhen Gushu water purification plant and the construction conditions, 12 excavation and subsidence schemes are considered. The influence law of different excavation schemes on the subsidence posture and structural stress of open caisson, as well as surrounding pipeline were obtained based on the numerical simulations. The results show that these excavation schemes probably induce the “simple support effect”, “cantilever effect” and “carrying pole effect” in the multi chamber open caisson. However, the “simple support effect” is beneficial to the stress states of the open caisson. In the symmetrical excavation, excavation of the middle area firstly is the best scheme for the subsidence posture and the structural stress of open caisson; each excavation scheme has different influence on the surrounding pipeline. The impact of scheme B3 on the surrounding pipeline is minimal.

Keywords

Multi Chamber Open Caisson, Uneven Silt Stratum, Excavation Scheme, Pipeline, Numerical Simulation

Copyright © 2020 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

陆地沉井在城市地下空间工程中使用越来越广泛，常被用做大型建筑物的基础或构筑物结构本体[1][2][3]。沉井通过挖除沉井下部土体，依靠沉井自重和荷载下沉。合理的挖土下沉工序能够有效的控制沉井几何姿态及其结构应力，对周围环境影响也能得到合理的控制。

诸多学者对沉井相关问题进行了研究，并取得诸多成果。邓友生[4]等结合现场监测数据与有限元数值模型，分析了沉井在下沉与封底过程中其结构自身的应力分布与变形情况，并探索了沉井在下沉过程中对周边邻近高层建筑与堤岸构筑物的影响。Yan [5]等基于滑移线理论，推导了刃脚极限土阻力的计算公式。Chavda [6]等通过模型试验，研究了不同刃口锥度对沉井抗侵彻能力的影响。梁穉稼[7]等基于极限平衡状态和平面滑裂面假定，推导出单一非黏性土层中沉井下沉时的土压力和侧壁摩阻力计算公式，并采用等效内摩擦角和等效自重应力的方法将其推广至成层黏性土层中。徐鹏飞[8]等结合工程实例，研究了软土中压入式沉井对周围环境的影响。钟永新[9]等为控制沉井下沉底部拉应力，采用预留核心土滞后开挖下沉工艺，取得较好效果。对于多室沉井的挖土下沉，理论上往往只注重对称、同时、均匀挖土，而实际工程中又难以准确实现。目前，关于多室沉井各室下部土体挖土顺序的影响规律尚无系统的研究成果，而不同挖土顺序对沉井结构及周围环境影响规律不同。

本文以深圳市固戍水质净化厂二期沉井工程为背景，通过设计不同的挖土下沉方案，采用数值模拟方法来研究不同挖土下沉方案对沉井几何姿态控制、沉井应力变化规律以及对周边管道的影响规律。以为类似工程提供参考。

2. 工程问题分析

固戍水质净化厂二期工程位于填海区，土层上至下依次为素填土，淤泥，粘土质粗砂，残积土，全风化混合花岗岩等，各土层厚度不均匀，具有各向异性，地下水埋深 1 m。距沉井东侧 5.4 m 处埋有一期工程回水管，管道直径为 1 m，壁厚 0.1 m，埋深 3.8 m。

沉井结构尺寸为 $33.4 \times 25 \times 22.15$ m，平面分为六室。采用三次制作两次下沉，三节沉井高度分别为 12.2 m、6.15 m、3.8 m，下沉高度分别为 12.2 m，6.15 m。沉井浇筑前会在底部预浇筑 0.3 m 厚的素混凝土底板，并在第一节沉井浇筑完成后破除下沉。沉井首次下沉前会在沉井四周进行培土，培土高度 10 m，培土底宽 15 m，培土顶宽 5 m。沉井采用井内挖土下沉，每次挖土下沉深度为 1 m。随着沉井下沉深度增加，井外需进行同步降土。

由于地层条件的不均匀性，且沉井周围存在管线，不同的挖土方式会对沉井和管道产生不同的影响。针对此工程问题，结合现场施工条件及地质情况，通过设计 12 个挖土下沉方案，综合分析沉井应力状态，沉井偏斜状态以及对管道的影响，从中优选出最合理的挖土下沉方式。

3. 数值方案

3.1. 数值模型及材料参数

采用 Abaqus 有限元软件进行多室沉井挖土数值模拟分析，模型土体尺寸为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ ，沉井侧壁厚 1.2 m，内部隔墙厚 0.8 m。土层采用 Mohr-Coulomb 理想弹塑性本构模型，沉井，管道采用弹性本构模型。模型底部约束竖向位移，侧面约束侧向位移。计算模型如图 1 所示。地层分布如图 2 所示。各材料参数如表 1 所示。

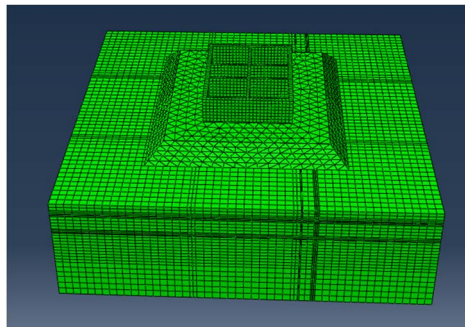


Figure 1. Numerical simulation analysis chart
图 1. 数值模拟分析图

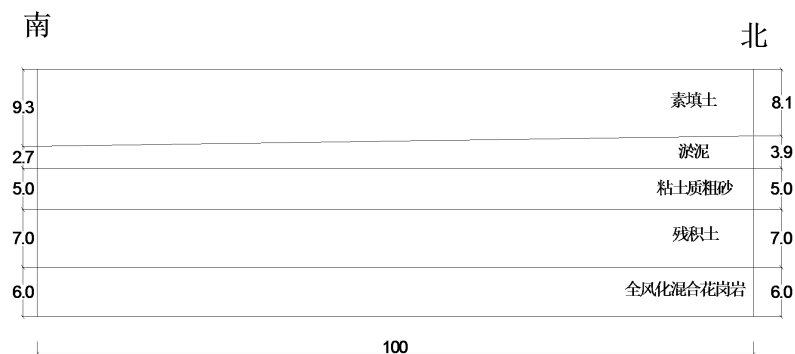


Figure 2. Schematic diagram of soil layer thickness
图 2. 土层厚度示意图

Table 1. Soil physical and mechanical parameters table
表 1. 土体物理力学参数表

| 材料 | 泊松比 | 密度 | 弹性模量 | 粘聚力 | 摩擦角 |
|----------|-------|-------------------|-------|------|------|
| | | kg/m ³ | /MPa | /kPa | /度 |
| 培土 | 0.25 | 1670 | 5.76 | 9 | 13.2 |
| 素填土 | 0.25 | 1670 | 9.6 | 15 | 22 |
| 淤泥 | 0.25 | 1710 | 7 | 6 | 1.8 |
| 粘土质粗砂 | 0.25 | 1820 | 26.5 | 22.1 | 20 |
| 残积土 | 0.25 | 1830 | 23 | 21 | 22.4 |
| 全风化混合花岗岩 | 0.25 | 1900 | 35 | 24 | 22.9 |
| 沉井 | 0.2 | 2500 | 32500 | - | - |
| 管道 | 0.269 | 7890 | 210 | - | - |

3.2. 下沉方案设计

根据沉井结构和现场施工条件，将沉井下部土体划分为 5 个区域，如图 3 所示。开挖方案见表 2。划分方案主要通过对称开挖与不对称开挖、先开挖中间土体与后开挖中间土体划分。方案 A1~A4 表示不对称开挖下，先开挖周围土体，后开挖中间土体；方案 B1~B4 表示不对称开挖下，先开挖中间土体，后开挖周围土体；方案 C1~C2 表示对称开挖下，先开挖周围土体，后开挖中间土体；方案 D1~D2 表示对称开挖下，先开挖中间土体，后开挖周围土体。

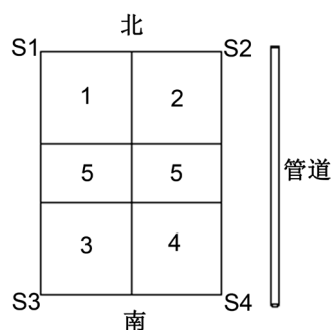


Figure 3. Schematic diagram of soil partition at the lower part of open caisson
图 3. 沉井下部土体分区示意图

Table 2. Excavation settlement scheme
表 2. 挖土下沉方案

| 挖土下沉方案 | 第一次开挖区域 | 第二次开挖区域 | 第三次开挖区域 |
|--------|---------|---------|---------|
| A1 | 3 + 4 | 1 + 2 | 5 |
| A2 | 1 + 2 | 3 + 4 | 5 |
| A3 | 1 + 3 | 2 + 4 | 5 |
| A4 | 2 + 4 | 1 + 3 | 5 |
| B1 | 5 | 3 + 4 | 1 + 2 |
| B2 | 5 | 1 + 2 | 3 + 4 |
| B3 | 5 | 1 + 3 | 2 + 4 |

Continued

| | | | |
|----|-----|-----|-----|
| B4 | 5 | 2+4 | 1+3 |
| C1 | 1+4 | 2+3 | 5 |
| C2 | 2+3 | 1+4 | 5 |
| D1 | 5 | 1+4 | 2+3 |
| D2 | 5 | 2+3 | 1+4 |

4. 不同挖土方案结果分析

本节内容着重分析不同挖土方案开挖过程中(前两次开挖)导致的沉井几何姿态变化,应力变化以及对旁边一期工程管道影响规律。

4.1. 沉井几何姿态变化

通过研究沉井四个角点的沉降来研究不同挖土下沉方案对沉井几何姿态的影响,角点位置如图 3 所示。第一次开挖完成后沉井各角点沉降如图 4 所示,第二次开挖完成后沉井各角点沉降如图 5 所示。

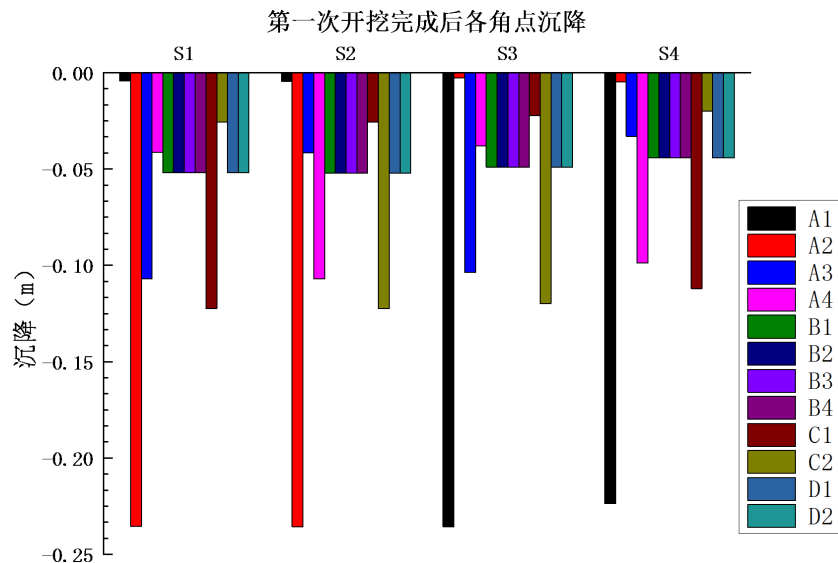


Figure 4. Settlement of each corner point of open caisson after the first excavation

图 4. 第一次开挖完成后沉井各角点沉降

由图 4 可知,第一次挖土完成后, A1~A4 方案由于采用不对称挖土,沉井表现为向该挖土区域方向倾斜,角点最大差异沉降达到 0.231 m, 0.233 m, 0.074 m, 0.069 m, 倾斜角度达到 0.441°, 0.444°, 0.188°, 0.176°。方案 A1 和 A2 之间的差异是由土层的不均匀性导致,表明在沉井下部存在淤泥地层时,先开挖淤泥地层薄的区域,对沉井下沉姿态控制有效果。方案 A3 和 A4 之间的差异是由沉井东侧的管道导致,管道的存在使得沉井右侧土体总体刚度相对较大,从而使得 A4 方案下沉井偏斜较小。方案 A1~A2 和 A3~A4 之间的差异主要是由于沉井北面侧壁面积较小,土体所提供的侧壁阻力较小,同时由于 A3~A4 方案下区域 5 的存在,使得 A1~A2 方案和 A3~A4 方案下的角点差异沉降出现较大变化。方案 C1~C2 由于采用对称挖土,沉井只出现两个对角点沉降增加,相邻角点最大差异沉降达到 0.100 m, 0.102 m,可认为沉井未倾斜。方案 B1~B4 和 D1~D4 由于先挖除中间土体,由于土层的不均匀性,表现为角点 S1 和角点 S2 沉降较大,角点最大差异沉降达到 0.008 m,沉井倾斜角度达到 0.015°。

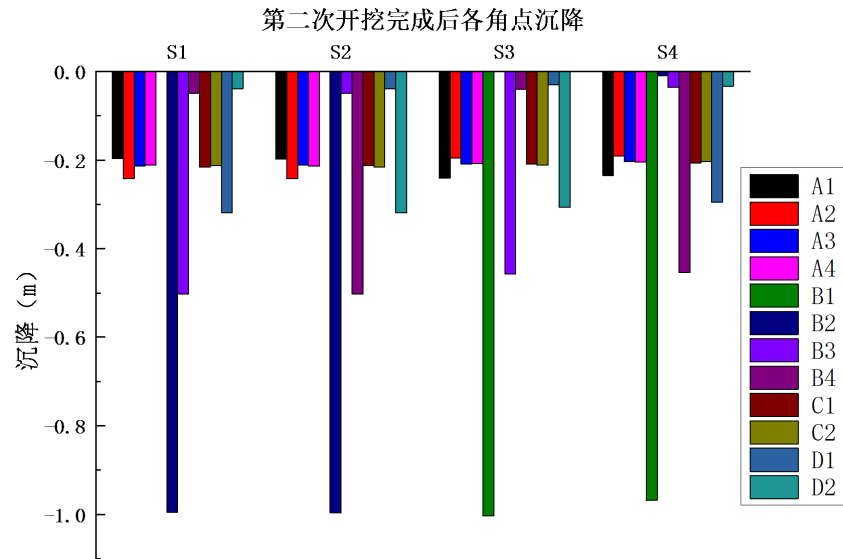


Figure 5. Settlement of each corner point of open caisson after the second excavation
图 5. 第二次开挖完成后沉井各角点沉降

由图 5 可知, 第二次挖土完成后, 方案 A1~A4 都表现出向北倾斜, 角点最大差异沉降达到 0.044 m, 0.050 m, 0.011 m, 0.009 m, 倾斜角度达到 0.083°, 0.096°, 0.020°, 0.017°。方案 B1~B4 表现为向第二次挖土区域方向倾斜, 角点最大差异沉降达到 1.007 m, 1.012 m, 0.467 m, 0.463 m, 倾斜角度达到 1.919°, 1.929°, 1.189°, 1.178°。方案 B1~B4 沉降变化规律与第一次挖土时方案 A1~A4 相同, 由于已经挖除中间区域土体, 使得沉井角点差异沉降与倾斜更大。方案 C1~C2 表现为向北倾斜, 角点最大差异沉降达到 0.009 m, 0.012 m, 倾斜角度达到 0.017°, 0.023°; 方案 D1~D4 由于对称开挖, 沉降只出现两个对角点沉降增加, 相邻角点最大差异沉降达到 0.290 m, 0.286 m, 沉井未倾斜。

4.2. 沉井应力变化

通过研究各方案下沉井最大拉应力来反映不同挖土下沉方式对沉井的影响。第一次开挖完成后沉井最大拉应力如图 6 所示, 第二次开挖完成后沉井最大拉应力如图 7 所示。

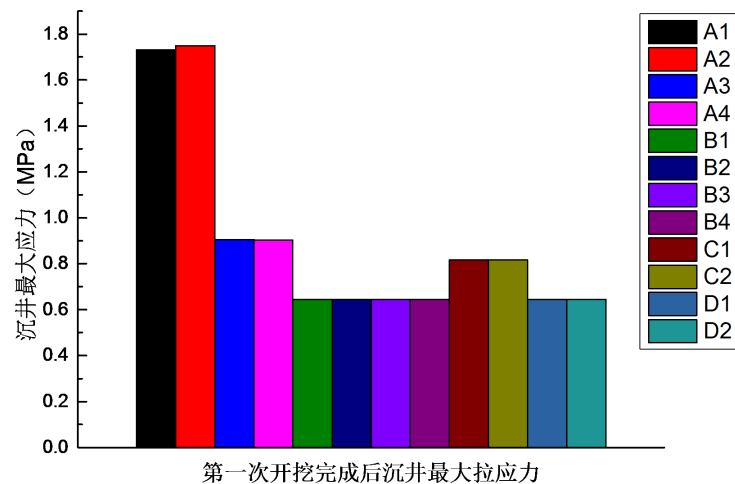


Figure 6. Maximum tensile stress of open caisson after the first excavation
图 6. 第一次开挖完成后沉井最大拉应力

由图 6 可知,第一次挖土完成后,方案 B1~B4 和 D1~D2 下沉井最大拉应力为 0.645 MPa;方案 A1~A2 沉井最大拉应力为 1.731 MPa, 1.75 MPa。先开挖沉井中间区域土体,方案 B1~B4 和 D1~D2,会使沉井结构下部受力出现“简支效应”,此时沉井最大拉应力出现在沉井下部中间位置;而先开挖周围沉井周围区域土体,如方案 A1~A4 和 C1~C2,则会使沉井结构下部受力出现“悬臂效应”,此时沉井最大拉应力出现在沉井上部靠近未开挖区域位置。方案 A1~A2 由于开挖区域侧壁面积较小,且无中间区域土体,相对于方案 A3~A4 结构应力会较大。

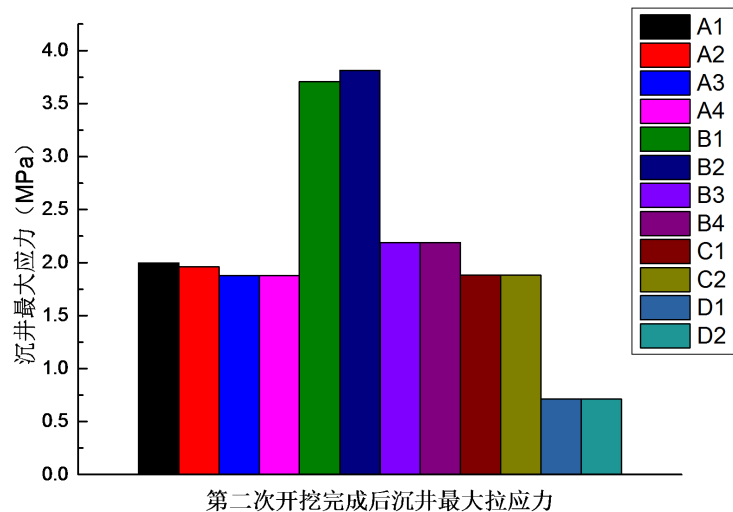


Figure 7. Maximum tensile stress of open caisson after the second excavation

图 7. 第二次开挖完成后沉井最大拉应力

由图 7 可知,第二次挖土完成后,方案 D1~D2 下沉井最大拉应力最小,为 0.714 MPa;方案 B1~B2 方案下沉井最大拉应力最大,为 3.707 MPa, 3.813 MPa,已经超出混凝土抗拉强度标准值。沉井四周区域土体开挖完成,保留中间区域土体,如方案 A1~A4 和 C1~C2,沉井结构下部受力出现“扁担效应”,此时最大拉应力出现在沉井上部中间位置。沉井开挖完一侧周围区域土体和中间区域土体,保留另一侧全部周围区域土体,如方案 B1~B2,若开挖区域沉井下沉仍未接触到下层土体,此时沉井结构下部受力出现“悬臂效应”,最大拉应力出现在沉井上部靠近未开挖区域位置;若开挖区域沉井下沉已接触到下次土体,此时沉井结构下部受力出现“简支效应”,最大拉应力出现在沉井下部靠近未开挖区域位置。沉井开挖完一侧周围区域土体和中间区域土体,保留另一侧部分周围区域土体,如方案 B3~B4,此时未开挖区域沉井结构下部受力出现“简支效应”,开挖区域沉井结构下部受力出现“悬臂效应”,最大拉应力出现在沉井下部靠近未开挖区域位置。沉井开挖完中间区域土体及四周部分土体,如方案 D1~D2,沉井结构下部受力出现“简支效应”,最大拉应力出现在沉井下部中间位置。

4.3. 对周围管道的影响

通过研究各方案下管道最大沉降和最大水平位移值来反映不同挖土下沉方式对管道的影响。不同挖土方案下管道最大沉降如图 8、图 9 所示,管道最大水平位移如图 10、图 11 所示。

由图 8 可知,第一次挖土完成后,方案 A1~A2 下管道沉降最大,为 104.5 mm,方案 A3 下管道沉降最小为 93.3 mm。各方案下管道最大沉降均出现在管道中部位置,向挖土区域方向略有偏移。方案 A3 由于挖除远离管道周围区域土体,沉井产生偏斜,在井壁-土共同作用下,使得管道沉降相对减小,同理方案 A4 则使得管道沉降相对增大。

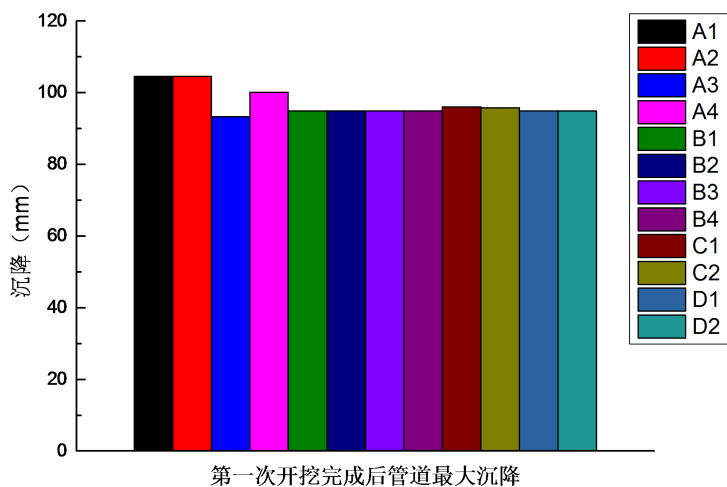


Figure 8. Maximum settlement of pipeline after the first excavation

图 8. 第一次开挖完成后管道最大沉降

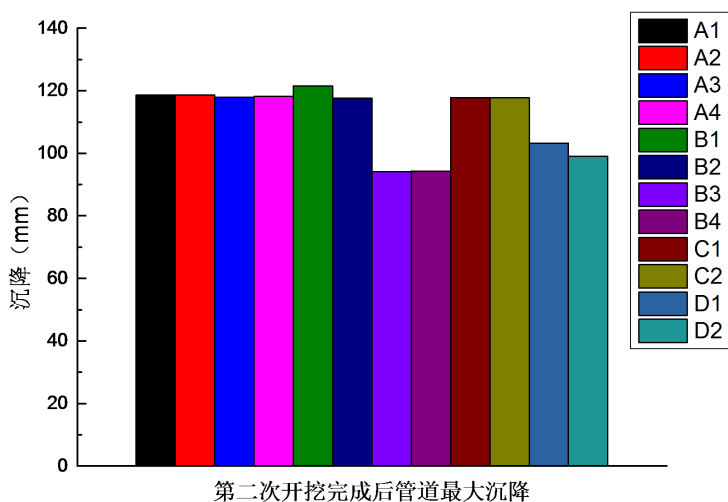


Figure 9. Maximum settlement of pipeline after the second excavation

图 9. 第二次开挖完成后管道最大沉降

由图 9 可知，第二次挖土完成后，方案 B3~B4 下管道沉降最小，为 94.2 mm，94.3 mm，方案 B1 下管道沉降最大，为 121.5 mm。除方案 B3~B4 外，各方案下管道最大沉降相对于第一次挖土完成时均有所增加。方案 B3~B4 由于开挖导致沉井出现倾斜，使得原本井壁与土之间的竖向摩阻力部分被转化为对土体水平向压力，从而使得管道沉降减少。

由图 10 可知，第一次挖土完成后，方案 A3 下管道水平位移最小，为 5.9 mm，方案 C2 下管道沉降最大，为 10.5 mm。由于挖除沉井下部土体，会使得沉井外壁土体向挖土区域移动，同时会使沉井产生偏转，通过井壁 - 土共同作用，导致管道产生水平位移。方案 C1~C2 下，由于土体的对称开挖，导致沉井两侧土压力受力不平衡，使得沉井出现一定程度的扭转，如方案 C1 表现为逆时针，方案 C2 表现为顺时针，从而使得管道水平位移增大。方案 A3 下，由于开挖区域为远离管道周围区域土体，对管道水平位移影响最小。同理方案 A4 下，管道水平位移较大。

由图 11 可知，第二次挖土完成后，方案 B3 下管道水平位移最小，为 7.5 mm，方案 B4 下管道水平位移最大，为 37.3 mm。方案 B3 下，由于未开挖区域为靠近管道周围区域土体，对管道水平位移影响最

小, 方案 B4 则相反。方案 D1~D2 由于对称开挖, 造成沉井产生偏转, 管道水平位移值较大。方案 B1~B2 由于只剩一侧周围区域土体, 相对于方案 A1~A4 和 C1~C2 只剩下中间区域土体, 管道水平位移值较大。

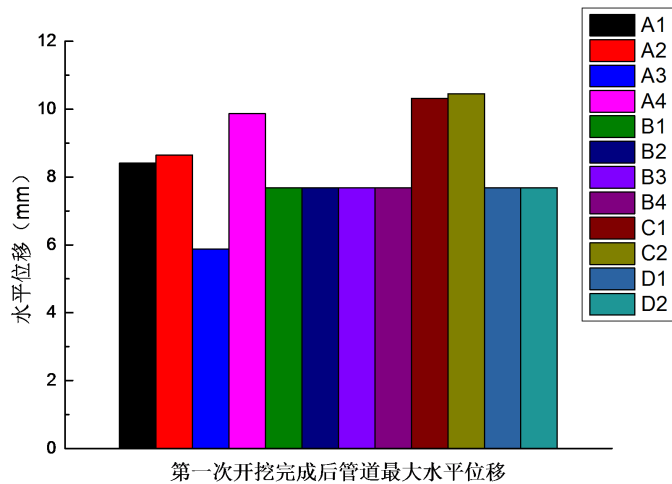


Figure 10. Maximum horizontal displacement of pipeline after the first excavation
图 10. 第一次开挖完成后管道最大水平位移

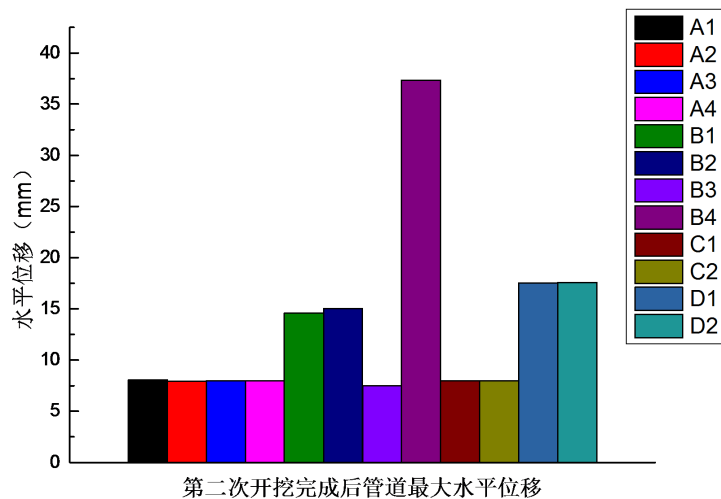


Figure 11. Maximum horizontal displacement of pipeline after the second excavation
图 11. 第二次开挖完成后管道最大水平位移

5. 结论

1) 不同挖土方案对沉井姿态控制效果不同。不对称挖土会显著加大沉井差异沉降, 沉降表现为向挖土区域方向倾斜; 对称挖土和先开挖中间区域土体则能有效控制沉井差异沉降, 防止沉井倾斜; 对称挖土下先开挖中间区域土体对沉井姿态控制效果最好, 但会是沉井产生平面内扭转, 不利于沉井在平面定位。

2) 不同挖土方案会导致沉井结构受力出现“简支效应”、“悬臂效应”和“扁担效应”; 其中“简支效应”对沉井结构受力最为有利。“悬臂效应”形式下沉井最大拉应力值最大。

3) 不同挖土方案对沉井旁边一期管道影响不同。各挖土方案对旁边一期管道沉降和水平位移控制效果不尽相同。方案 B3 在能控制管道沉降的同时又保证其水平位移可控, 方案 B4 虽能合理控制管道沉降, 但其水平位移却最大。

基金项目

国家自然科学基金(No. 51108434)。

参考文献

- [1] 高创奇, 赵青山. 某污水处理厂沉井的施工[J]. 四川水利, 2011, 32(3): 84-86.
- [2] 陈桂林. 某污水处理厂泵房工程沉井施工[J]. 安徽建筑, 2007(4): 124-126.
- [3] 白蓉. 沉井施工工艺在污水处理厂的应用[J]. 安徽建筑, 2005(3): 70-71.
- [4] 邓友生, 万昌中, 闫卫玲, 时一波, 肖本林, 赵明华. 大型圆形沉井结构应力及其周边沉降计算[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 502-508.
- [5] Yan, F.Y., Guo, Y.C. and Liu, S.Q. (2011) The Bearing Capacity Analyses of Soil Beneath the Blade of Circular Caisson. *Advanced Materials Research*, **250-253**, 1794-1797.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.250-253.1794>
- [6] Chavda, J.T., Mishra, S. and Dodagoudar, G.R. (2019) Experimental Evaluation of Ultimate Bearing Capacity of the Cutting Edge of Open Caisson. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 1-43.
- [7] 梁穉稼, 徐伟, 徐赞云. 沉井下沉时土压力和侧壁摩阻力分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(12): 1826-1832.
- [8] 徐鹏飞, 李耀良, 徐伟. 压入式沉井施工对环境影响的现场监测研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 1084-1094.
- [9] 钟永新. 超大沉井预留核心土开挖下沉施工技术[J]. 施工技术, 2018, 47(22): 112-116.