

沉井下沉诱发地层沉降规律试验研究

田锦辉, 张兴胜, 王嘉祥, 刘捷

华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2026年4月9日; 录用日期: 2026年4月29日; 发布日期: 2026年5月11日

摘要

沉井施工引起的地层扰动是其设计与施工关注的核心问题之一。为探究沉井下沉对周围土体的影响规律, 本文以河南省信阳市某圆形泵站沉井工程为依托, 开展了物理模型实验。本文首次通过全场PIV观测, 实现了对沉井下沉过程中周围地层位移的全场、非接触、高精度测量, 清晰捕捉了土体变形的连续演化过程, 揭示了沉井下沉过程中沉降影响范围的非线性扩展规律, 实现了对沉井下沉过程中周围地层位移的全场、非接触、高精度测量, 清晰捕捉了土体变形的连续演化过程。结果表明: 地层沉降随距沉井中心距离的增加而减小, 最大沉降量为15.3 mm, 显著影响范围为232 mm。该研究方法为揭示地下工程引起的隐蔽性土体变形问题提供了直观可行的技术途径, 实验结果可为类似工程提供参考。

关键词

沉井, 地表沉降, 粒子图像测速(PIV), 模型实验, 位移场

Experimental Study on the Mechanism of Strata Subsidence Induced by Caisson Sinking

Jinhui Tian, Xingsheng Zhang, Jiexiang Wang, Jie Liu

College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: April 9, 2026; accepted: April 29, 2026; published: May 11, 2026

Abstract

Ground disturbance induced by open caisson construction is a central concern in both the design and execution of such projects. To investigate the influence of caisson sinking on the surrounding soil, this paper presents a physical model study based on a circular pump station caisson project in Xinyang, Henan Province. For the first time, full-field particle image velocimetry (PIV) observations

were employed to achieve non-contact, high-precision, full-field measurement of ground displacement during the sinking process. This approach clearly captured the continuous evolution of soil deformation and revealed the nonlinear expansion pattern of the settlement influence zone as caisson sinking progressed. The results indicate that ground settlement decreases with increasing distance from the caisson center, with a maximum settlement of 15.3 mm and a significant influence range of 232 mm. The methodology developed in this study provides an intuitive and feasible technical approach for revealing concealed soil deformation problems induced by underground construction, and the experimental results can serve as a reference for similar engineering projects.

Keywords

Caisson, Ground Surface Settlement, Particle Image Velocimetry (PIV), Model Test, Displacement Field

Copyright © 2026 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

沉井施工法作为一种历史悠久且技术成熟的地下空间开发与深基础构筑技术，因其整体性好、承载力高、适用性广等特点，被广泛应用于桥梁锚碇基础、大型泵站、取水构筑物、越江隧道盾构工作井及高层建筑深基础等。该技术主要通过井筒内取土，使沉井在自重作用下克服井壁与周围土体的摩阻力及刃脚底部的端阻力，逐步穿越不同土层，下沉至工程要求深度。沉井下沉过程是一个复杂力学过程，通常伴随着对周边土体不同程度的扰动，在地质条件复杂条件下诱使井壁外侧土体产生向井内的移动，致使地层产生不同程度沉降。若对沉井诱发地层沉降控制不当，将对邻近的建筑物、地下管线及公共设施构成威胁，甚至引发工程事故。因此，有效控制沉井施工对周边环境的影响，已成为亟待解决的关键工程技术难题。

国内外学者通过理论计算、原位试验、数值模拟以及室内模型试验等多种手段对沉井进行了探讨与研究。在模型试验方面，有学者通过物理模型试验研究了不同刃脚切削角对沉井下沉阻力的影响，并借助图像变形测量技术分析了刃脚处的土壤流动机制[1]。周和祥通过离心机模型试验分析了沉井侧壁土压力、刃脚斜面土压力、刃脚踏面土压力以及沉井内外土面沉降的变化规律[2]。一些学者基于沉井下沉过程中的现场实测数据，分析了沉井的下沉过程及受力特性[3]，结合刃脚土压力监测，计算得到沉井底部不同区域的端阻力，揭示了端阻力在沉井下沉过程中的分布特征和变化规律[4]。蒋炳楠等通过现场监测试验确定了侧压力在沉井侧壁上沿深度的分布形式，建立了侧摩阻力计算模型[5]。理论分析方面，针对沉井突沉机理，一些学者开展了相关的理论及数值研究，采用显式动态求解方法揭示了沉井突沉过程中土体的扰动损伤行为[6]-[8]。闫富有等考虑刃脚形状和切土深度，建立了沉井下沉过程中极限土阻力的近似计算模型；基于 Prandtl 问题的滑移线场理论，构建了考虑刃脚切土深度和刃脚形状的近似滑移线场，并导出了平面应变和圆形沉井轴对称问题极限承载力系数的计算公式[9]。此外，梁穉稼基于极限平衡状态和平面滑裂面假定，推导了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，并通过等效内摩擦角和等效自重应力的方法推广至成层黏性土层，与工程实测数据研究土压力和侧壁摩阻力随土体内摩擦角的增大而减小，随土体与沉井壁外摩擦角的增大而增大[10]。在数值模拟方面，王正振运用数值模拟将沉井应力、位移的计算结果与实测数据进行对比，取得了良好的工程验证[11]。张中杰通过数值模拟结合现有实测拟合沉降曲线，对比分析了沉井外侧反力桩存在与否对地表沉降剖面的影响，分析了桩间距对地表沉降的调控作用[12]。谭国宏以大跨度公铁合建斜拉桥深大沉井基础为工程背景，采用摩尔 -

库仑模型(M-C)、土体硬化模型(HS)和小应变土体硬化模型(HSS)进行数值分析[13]。

粒子图像测速技术(PIV)作为一种非接触式的光学测量手段,主要用于流体力学领域中对流场的瞬时速度分布进行定量观测。其基本原理是通过追踪流场中示踪粒子的运动轨迹,进而反演计算出流体的速度矢量场。该方法因其能够提供高精度、全场无干扰的瞬态流动信息,已成为颗粒流实验分析研究的重要工具。

PIV 技术被引入岩土工程领域始于 21 世纪初。2001 年,该技术首次被应用于岩土体的变形测量,为土工物理模拟试验中的位移场分析提供了有效手段[14]。此后,国内学者通过自主开发相应的分析与后处理软件包,将 PIV 技术应用于侧向受荷桩周土体的位移场量测,验证了其在土体变形观测中的可行性,为该项技术在国内岩土工程领域的应用奠定了重要基础[15]。

随着图像处理技术的进步和试验手段的丰富,PIV 技术在岩土工程中的应用得到了快速发展。在动力试验方面,该技术被用于大型振动台模型试验,通过分析模型在动力作用下的位移场演化,探讨了边坡失稳的判别准则[16]。在离心模型试验领域,研究者利用 PIV 技术成功测量了砂土边坡在离心加速度增加及地下水位上升过程中的连续变形,展现了其在复杂应力路径下变形捕捉方面的优势[17]。此外,在基础工程问题研究中,PIV 技术也被用于观测锚板在上拔过程中周围土体的变形演化,结果表明该方法能够有效获取任意时刻土体的位移分布,为量化分析锚板周围土体的变形模式及破坏机理提供了重要的数据支撑[18]。近年来,PIV 技术在岩土工程中的应用进一步向三维化和复杂工况拓展。曹兆虎等通过结合透明土材料与 PIV 技术,对水平受荷桩周土体变形的三维位移场测量,突破了传统观测手段仅限于二维表面变形的局限[19]。在边坡工程领域,该技术被用于研究大型滑坡在开挖和降雨条件下的变形破坏过程,通过获取开挖面附近坡体的位移矢量场,可以较为准确地推测边坡潜在的滑裂面位置,从而为滑坡稳定性评价和防治设计提供科学依据。

在影响沉井诱发土体沉降的众多因素中,刃脚是沉井最先与土体接触并切入土体的关键构造。刃脚倾角角度为刃脚斜面与水平面的夹角,是决定刃脚切入土体模式、影响土体破坏机理的核心几何参数之一。刃脚倾角将直接改变刃脚下及内侧土体的应力状态、塑性区的发展范围以及土体流动的路径。现有研究多集中于沉井的下沉阻力、侧摩阻力变化规律,而对于沉井刃脚倾角在下沉过程中对周围土体影响规律尚缺乏系统性的深入研究。基于此,本研究主要以河南省信阳市某圆形泵站沉井工程为依托,开展 PIV 物理模型实验。对沉井下沉过程中周围地层位移的全场、非接触、高精度测量,研究土体变形的连续演化过程。

2. 工程背景

2.1. 工程概述

信阳供水工程泵站地下厂房埋深较大,且邻近交通干道、车流量密集,同时位于坝后位置,若采用常规基坑开挖工艺易引发显著的地面沉降与地下水位波动,进而威胁坝体结构安全及道路正常通行,选用沉井法施工。

2.2. 工程地质条件

场区地层上部壤土为第四系上更新统坡积及冲积的重粉质壤土,下覆基岩为砂质粘土岩,根据地层岩性、时代成因及其物理力学性质差异,将其划分为 5 个地层。①层:重粉质壤土黄褐色,可塑~硬塑状,见较多黑色锰质斑点,切面光滑有光泽;该层层厚 2.7~5.6 m,平均厚度 4.2 m,层底高程 90.0~93.9 m。②层:重粉质壤土黄褐色~红褐色,硬塑状,局部含砂粒斑点,切面光滑有光泽,该层厚 3.9~5.4 m,平均厚度 4.7 m,层底高程 80.2~81.5 m。③层:全风化泥质砂岩红褐色,全风化泥状,局部包裹砾石,砾石粒径 2 mm~5 mm,土质不均,该层厚 1.0~1.2 m,层底高程 78.7~80.6 m。④层:强风化泥质砂岩砖红色,强风化,细砂粒状结构,层状构造,矿物成分为石英,长石,泥质胶结较好。该层岩芯较破碎,短柱状,

该层强风化厚 5.1~6.2 m，平均厚度 5.6 m，层底高程 72.5~75.5 m。⑤层：中风化泥质砂岩砖红色，中风化，细砂粒状结构，层状构造，矿物成分为石英，长石，泥质胶结较好。该层岩芯较完整，长柱状，RQD = 79%~92%，该层未揭穿，最大揭露厚度为 6.50 m，图 1 为场区工程地质剖面图。

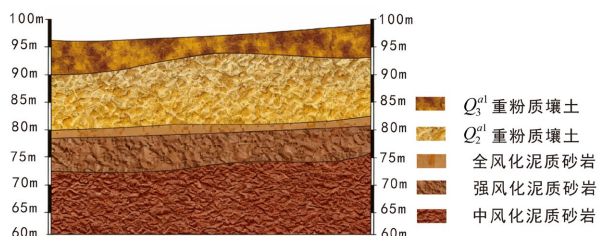


Figure 1. Engineering geological profile of the site area

图 1. 场区工程地质剖面图

3. PIV 沉井物理模型实验

3.1. PIV 基本原理

PIV 技术最早用于对流体的流场进行观测，在流体中播撒示踪粒子，用脉冲激光片光照射待测流场区域，通过高速相机连续拍摄两幅(或多幅)粒子图像，然后根据曝光时间和示踪粒子位移，通过粒子图像测速技术获得各示踪粒子的运动速度，从而获得流场的速度分布。已知时间间隔为两张照片曝光间隔时间 Δt ，通过比对两张图像的粒子位移，即可通过公式(1)计算得出：

$$\begin{cases} v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t} \approx \frac{x_2(t + \Delta t) - x_1(t)}{\Delta t} = \bar{v}_x \\ v_y = \frac{\Delta y}{\Delta t} \approx \frac{y_2(t + \Delta t) - y_1(t)}{\Delta t} = \bar{v}_y \end{cases} \quad (1)$$

式中， v_x 为示踪粒子在二维流场中 x 方向上的瞬时速度； v_y 为示踪粒子在二维流场中 y 方向上的瞬时速度； Δx 为示踪粒子在 Δt 时间内在二维流场中 x 方向上的位移； Δy 为示踪粒子在 Δt 时间内在二维流场中 y 方向上的位移； Δt 为设定两次照片曝光的时间间隔； $x_1(t)$ 、 $y_1(t)$ 为示踪粒子在 t_1 时刻在二维平面中的空间位置； $x_2(t)$ 、 $y_2(t)$ 为示踪粒子在 t_2 时刻在二维平面中的空间位置； \bar{v}_x 、 \bar{v}_y 为示踪粒子在二维流场中 x 方向和 y 方向的平均速度。

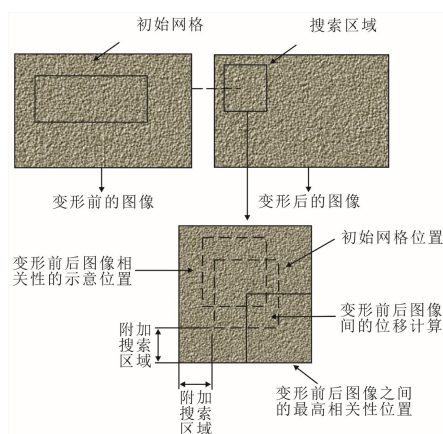


Figure 2. Schematic diagram of the PIV principle for soil

图 2. 土体 PIV 原理示意图

图 2 为土体 PIV 原理示意图, PIV 技术应用于岩土工程试验领域时, 需采用高分辨率图像采集设备对土体拍照, 获得试验对象在变形过程中的一组连续图像, 再采用粒子图像测速技术分析相邻的两张图像, 判别图像中颗粒的坐标变化量, 从而获得颗粒的速度矢量和位移矢量, 对所有图像进行分析后即可得到试验对象变形过程中的位移情况。

3.2. PIV 沉井模型装置

模型箱装置主要由箱体框架以及沉井模型装置两部分组成如图 3 所示。为了满足透光性和强度的要求, 箱体框架选用厚度为 10 mm 的透明钢化玻璃 8 mm 厚的钢板组成, 根据现场实际工程情况以及相似系数, 将箱体框架尺寸为 500 mm × 300 mm × 700 mm (长 × 宽 × 高)。为了更直观的观察沉井下沉对周围土体的影响, 将沉井模型放置在箱体中间, 距玻璃面 25 mm 处, 沉井外径 150 mm, 内径 110 mm, 总高 80 mm, 沉井分为四阶段下沉, 每阶段下沉 20 mm, 通过三条钢杆连接底座与沉井, 将沉井装置水平固定在距离箱底一定位置处, 同时钢杆也是沉井装置的预设滑道, 保证沉井装置能够水平稳定下沉。每条钢杆上部预留有螺纹, 从沉井内部掏出砂土的同时以相同旋转速度在三根钢杆上匀速旋转内置有螺纹的旋钮, 以保证沉井装置能正常下沉。

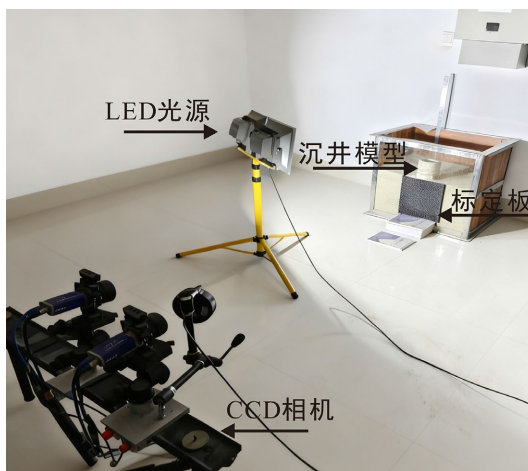


Figure 3. Model box setup diagram
图 3. 模型箱装置图

PIV 系统装置包括图像采集系统、光源、图像后处理系统。图像采集系统主要由 CCD 工业摄像机和数据分析系统组成, 能够通过高分辨率图像获取与解译, 实现对地层随时间变化的位移与运动特征的分析。PIV 模型试验的优势在于其非侵入式测量模式, 可在不干扰试验过程的前提下, 持续监测地表的沉降及内部变形情况。系统配备的高速相机具备极短的曝光时间, 每秒可采集超过 50 帧图像, 专为精确捕捉快速运动目标而设计, 具有结构轻便、抗磁场干扰、耐振动与冲击等特点, 能够完成光学影像至数字信号的高效转换与存储, 并支持数据导出至其他处理设备。

在粒子图像测速(PIV)系统中, 相机的成像质量直接决定了后续图像处理的精度与可靠性, 而成像效果在很大程度上依赖照明光源的性能。光源的光谱特性(包括颜色与波长)、发光稳定性、光照均匀性以及光照强度均对成像质量产生显著影响。因此, 在布置光源时, 应确保其具备波长单一、输出稳定、照明均匀及亮度充足等特点。采用较高的电源频率有助于抑制频闪效应, 提升成像稳定性; 均匀的光照条件可使目标区域内所有示踪粒子具有相近的亮度水平, 从而提高图像的整体清晰度。为确保实验过程中光源成分单一可控, 本试验在模型箱四周搭建摄影棚以隔绝外部杂散光, 并仅采用单一波长的 LED 光源进

行照明, 关闭所有其他光源。该措施有效减少有机玻璃表面的反射光干扰, 避免外界环境光照对成像效果产生不利影响。

4. PIV 沉井模型实验

本次模型试验重点观察沉井下沉过程中周围地层沉降量大小以及沉降影响范围, 分析沉井刃脚角度在沉井下沉过程中对周围地层沉降的影响规律。

由于沉井下沉施加荷载存在微幅偏心, 导致沉井下沉过程中轻微倾斜, 引发其与地层间力学作用的空间非均匀性: 倾斜方向的端承、侧摩阻力局部集中, 背离倾斜方向的界面应力相对弱化, 导致地层应力场呈现显著的不对称分布特征。而地层沉降是应力场驱动下的土体压缩变形响应, 应力集中区域的沉降量梯度显著高于应力弱化区域, 使地层沉降场沿沉井倾斜方向发生偏移。PIV 技术通过示踪粒子位移表征地层沉降, 其可视化云图呈现与沉降场一致的偏斜及轮廓不对称形态, 这一现象是沉井倾斜诱导的“力学作用 - 应力场 - 沉降场 - PIV 可视化”链式响应的直接体现。

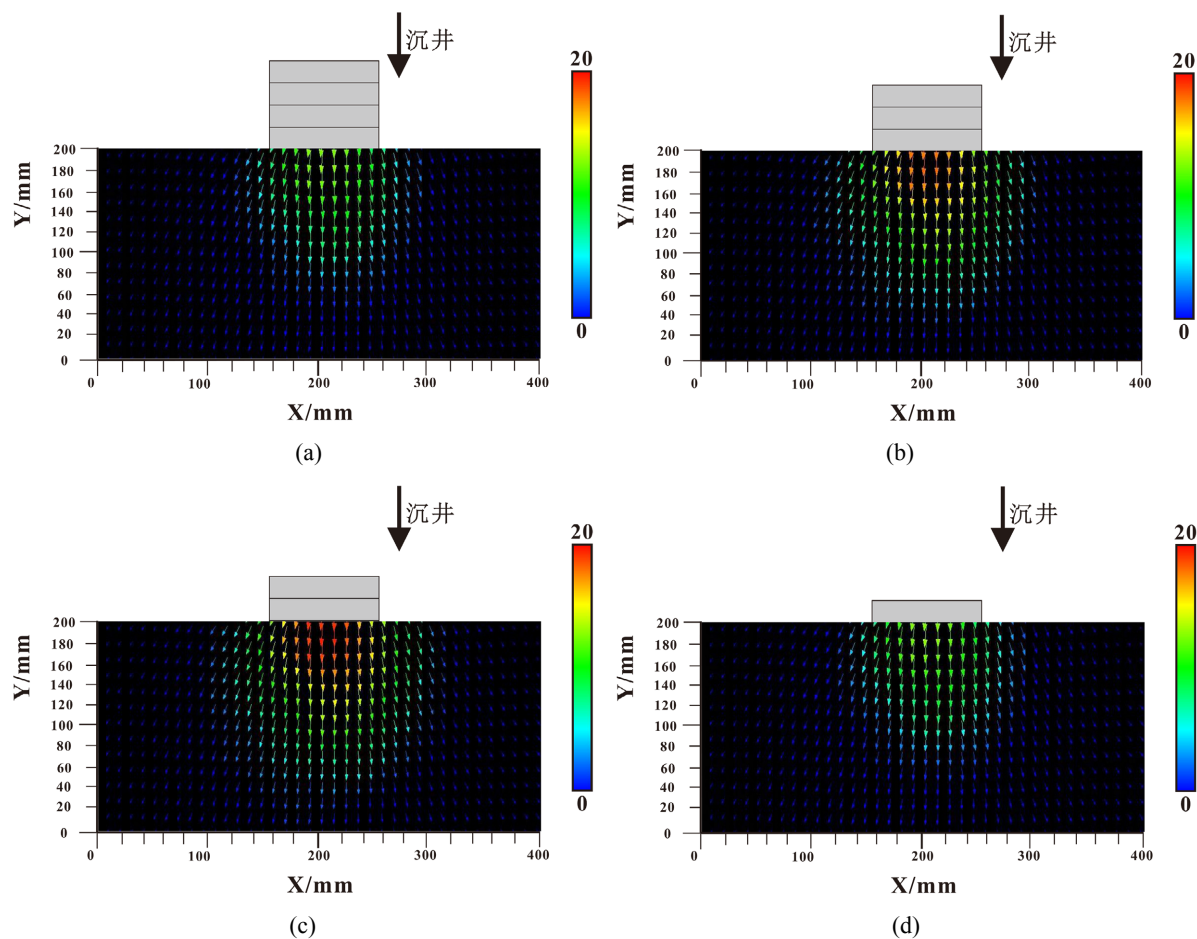


Figure 4. Vector diagram of ground displacement around the caisson cutting edge under a 75° working condition
图 4. 沉井刃脚 75° 工况下周围地层位移矢量图

图 4 为沉井下沉过程中周围地层位移矢量图, 矢量图中箭头方向代表沉井周围地层的位移方向, 箭头大小与箭头颜色深浅反应了沉井周围地层位移大小, 由图 4(a)可知, 下沉过程中沉井下部地层产生竖向沉降, 沉井侧壁两侧地层产生向下的运动趋势, 沉井两侧地层沉降量较小, 沉井第一次下沉结束后沉

井刃脚处地层沉降量最大，最大沉降量为 8 mm，沉降影响范围为 173 mm。这是因为下沉初期沉井侧壁与周围土体接触面较小，沉井侧壁与土体之间侧摩阻力较小，而沉井正下方土体因沉井自重产生的巨大垂直压力而产生较大竖向位移。由图 4(b)可知，沉井第二次下沉结束后最大沉降量为 10.4 mm，沉降影响范围为 198 mm。由图 4(c)可知，沉井第三次下沉结束后最大沉降量为 12.1 mm，沉降影响范围为 223 mm。这是因为随着沉井下沉深度的增加，其侧壁与周围土体接触面积逐渐增大，沉井与周围土体间侧摩阻力也逐渐增大，使沉井两侧土体产生向下并伴随左右的运动趋势，位于沉井正下方地层沉降量最大，沉降量由沉井中心向两侧逐渐减小。由图 4(d)可知，沉井下沉至设计高程后，其周围地层最大沉降量为 15.3 mm，沉降影响范围为 232 mm。

图 5 为沉井下沉过程中周围地层位移云图，其清晰地展示了沉井分阶段下沉时周围土体沉降的动态发展过程。由图 5(a)可知沉井下沉初始阶段，沉井与周围土体侧摩阻力较小，沉井两侧地层未产生较大沉降。由图 5(b)，图 5(c)，图 5(d)可知随着沉井进一步下沉，沉井下部土体沉降量逐渐增大，沉井两侧土体开始沉降，且沉降量随沉井下沉深度的增加而增加，因沉井下沉诱发地层沉降的影响范围也逐渐增大，沉井下沉至设计高程后沉井周围地层沉降范围为 232 mm，最大沉降量为 15.3 mm。

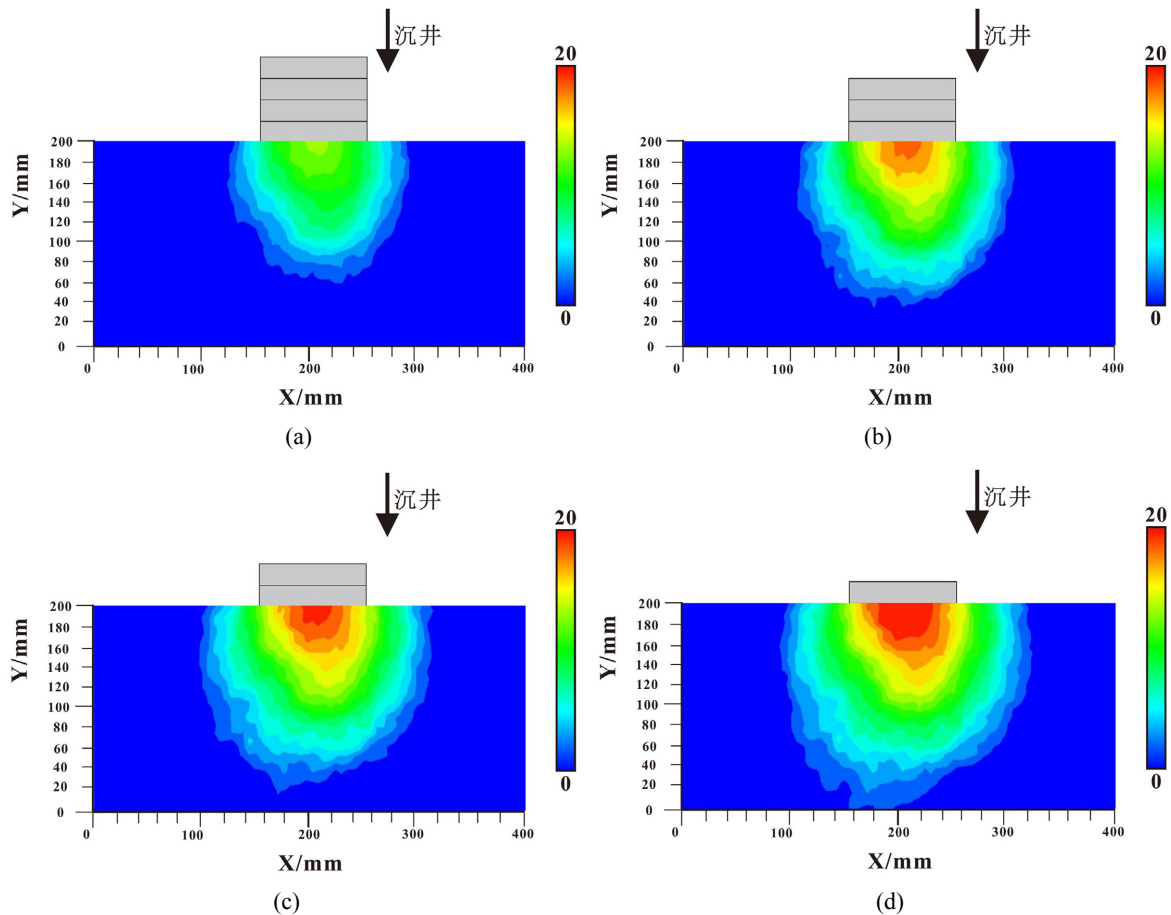


Figure 5. Nephogram of settlement induced during caisson sinking

图 5. 沉井下沉过程中诱发沉降云图

5. 结语

本文依托河南省信阳市某圆形泵站沉井工程，通过开展粒子图像测速物理模型实验，研究了沉井下

沉过程中对周围地层的扰动规律, 主要得出以下结论:

(1) 沉井下沉施工将引起周围地层产生显著的沉降变形。在本实验条件下, 测得的最大沉降量为 15.3 mm, 沉降显著影响范围约为 232 mm。

(2) 沉井下沉对周围地层的沉降影响呈现明显的空间衰减特征。随着距沉井中心距离的增加, 地层沉降量逐渐减小, 表明沉井施工的影响范围具有一定的局限性。

(3) 粒子图像测速技术应用于沉井下沉过程模拟, 实现了对周围地层位移场的全场、非接触、高精度测量, 清晰捕捉了土体变形的连续演化过程。该方法为研究地下工程引起的隐蔽性土体变形问题提供了一种直观可行的技术途径, 具有重要的推广应用价值。

参考文献

- [1] Chavda, J.T., Mishra, S. and Dodagoudar, G.R. (2020) Experimental Evaluation of Ultimate Bearing Capacity of the Cutting Edge of an Open Caisson. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, **20**, 281-294. <https://doi.org/10.1680/jphmg.18.00052>
- [2] 周和祥, 马建林, 张凯, 等. 沉井下沉阻力离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(10): 3969-3976.
- [3] 张治成, 邓燕羚, 郑锋利, 等. 深厚软土地区大型沉井突沉行为分析[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(3): 933-943.
- [4] 郭明伟, 董学超, 沈孔健, 等. 超大沉井基础取土下沉端阻力变化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(S1): 2976-2985.
- [5] 蒋炳楠, 马建林, 褚晶磊, 等. 水中超深大沉井施工期间侧压力现场监测研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(4): 1551-1560.
- [6] Zhou, S., Zhou, M., Tian, Y. and Zhang, X. (2022) Numerical Investigation of Caisson with Pad-Eye Stiffener Installation into Nonhomogeneous Clay. *Applied Ocean Research*, **121**, Article 103077. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2022.103077>
- [7] Baia, Z., Gaob, Y. and Yangc, B. (2023) Key Technologies for Construction Control of Large Double Sinking Wells in Urban Core Areas in Complex Environments. *International Core Journal of Engineering*, **9**, 113-119.
- [8] Liu, M., Sun, F., Gan, Q., Chi, E., Li, X. and Ge, G. (2022) Mechanical Performance of Deep Circular Caisson Sinking in Deep Layered Soft Soil. *Mathematical Problems in Engineering*, **2022**, 1-36. <https://doi.org/10.1155/2022/5918374>
- [9] 闫富有, 时刚. 沉井下沉过程刃脚的极限土阻力分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(S1): 80-87.
- [10] 梁樯稼, 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.
- [11] 王正振, 龚维明, 戴国亮. 某南锚碇沉井基础数值模拟分析[J]. 南京工程学院学报(自然科学版), 2017, 15(1): 16-22.
- [12] 张中杰, 王啸翔, 俞剑, 等. 压入式沉井与反力桩对地表沉降的耦合影响研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(S2): 119-123.
- [13] 谭国宏, 肖海珠, 杜勋, 等. 大跨度公铁合建斜拉桥主塔沉井基础沉降变形分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(3): 1113-1120.
- [14] White, D.J., Take, W.A. and Bolton, M.D. (2001) Measuring Soil Deformation in Geotechnical Models Using Digital Images and PIV Analysis. 2001 10th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics, Tucson, 7-12 January 2001, 997-1002.
- [15] 李元海, 靖洪文, 曾庆有. 岩土工程数字照相量测软件系统研发与应用[J]. 岩土力学与工程学报, 2006, 25(2): 3859-3866.
- [16] 刘君, 刘福海, 孔宪京, 等. PIV 技术在大型振动台模型试验中的应用[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 368-374.
- [17] 张敏, 吴宏伟. 颗粒图像测速技术在离心试验变形分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S2): 3858-3864.
- [18] 张昕, 乐金朝, 刘汉东. PIV 测量技术在锚板周土体变形场研究中的应用[J]. 郑州大学学报(工学版), 2011, 32(5): 20-23.
- [19] 曹兆虎, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 水平荷载桩室内模型试验系统研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1): 3468-3475.