

压入式沉井施工对环境影响的现场监测研究

徐鹏飞¹, 李耀良², 徐 伟¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海市基础工程集团有限公司, 上海 200002)

摘 要: 结合工程实例, 介绍软土中压入式沉井的施工技术并研究其对周边环境的影响。对沉井压沉过程中周边土体及管线的监测数据进行分析, 结果表明: 压沉施工能有效控制沉井的几何姿态, 保持下沉速度稳定, 但具有一定的挤土效应; 沉井下沉初期挤土效应占主导地位, 开挖效应随下沉深度的增加逐渐显著; 土体水平位移和地表沉降均随沉井下沉深度 H 的增加而增大; 地表沉降呈三角形分布, 影响范围约为 $1.7H$; 土体分层沉降中, 淤泥质粉质黏土的单位沉降量最大; 管线沉降可控制在毫米级。基于对无量纲化地表沉降数据的拟合分析, 提出了分别采用指数函数和二折线表示的压入式沉井周边地表沉降经验公式, 并用工程实例验证了其合理性。

关 键 词: 压入式沉井; 沉降; 管线; 现场监测; 环境控制

中图分类号: TU 433

文献标识码: A

Field measurement and analysis of influence of jacked open caisson construction on environments

XU Peng-fei¹, LI Yao-liang², XU Wei¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Foundation Engineering Group Co., Ltd., Shanghai 200002, China)

Abstract: Based on the engineering case of a pipe-jacking working shaft sunk with the aid of caisson jacks in soft clay, the construction technology is presented and the effects on surrounding environment are studied. According to analysis of the soil mass and pipeline monitoring data during the jacked sinking process, some conclusions are drawn as follows. The jacked open caisson construction method can control the attitude of the open caisson and stabilize the sinking speed effectively; but it also squeezes the soil. At the preliminary stage of open caisson sinking, the compacting effect is significant and the excavation effect becomes more notable as the open caisson sinking deeper. The subsurface horizontal displacements and surface settlements grow along with the increase of the sinking depth H . The ground surface settlement profile is of spandrel type with an influence zone of $1.7H$. Among layered settlements the unit settlement of the soft silty clay is the largest. The pipeline settlements are controlled in the millimeter level. Based on data fitting of the dimensionless surface settlements, an empirical method either in the form of exponential function or bilinear curve to predict the ground surface settlement caused by jacked open caisson construction is proposed, which is verified through two case studies.

Key words: jacked open caisson; settlement; pipeline; field measurement; environmental impact control

1 引 言

沉井因具有整体性强、稳定性好、节材效果佳、场地适用条件广等优点而在桥梁及市政工程中得到广泛应用。因土层的差异性分布, 传统下沉工艺存在沉井姿态纠偏困难、下沉缓慢、工期较长等弊端, 但压入式沉井借助反力装置, 通过千斤顶提供一个向下的压力, 在适当取土的同时, 将沉井压入土体, 可消除土层差异的不利影响, 实现沉井下沉全过程的有效控制。

压沉法作为一种新型工法, 在国外已有一些应用实例。Allenby 等^[1]详细介绍了苏格兰某污水处理工程中 4 个成功下沉的压入式沉井的施工方法, 并阐述了该工法的广泛适用性及其与传统方法相比的优点。Newman 等^[2]介绍了伦敦泰晤士环城水道的延伸隧道两端采用压入式沉井作为工作井的施工方法, 其中一个工作井内径为 11 m, 下沉深度为 62 m, 为英国最深的大直径压入式沉井。

类似于基坑工程等地下工程施工, 沉井在下沉过程中会不断扰动周围土体, 评估和预测压入式沉

收稿日期: 2013-07-31

第一作者简介: 徐鹏飞, 女, 1987 年生, 博士研究生, 主要从事深基础工程方面的研究工作。E-mail: pengfei.emily.xu@gmail.com

通讯作者: 徐伟, 男, 1954 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地下工程施工等方面的教学与研究工作。E-mail: gdsjy@online.sh.cn

井施工对周边环境的影响有助于保护相邻建筑物及地下管线等设施。压入式沉井属于沉井的一种特殊形式,由于在国内外的工程应用实例较少,计算理论和分析方法不是很成熟,可参考普通沉井的相关研究成果。国内外关于沉井施工对周边环境的影响的研究,在理论计算方面,孙更生等^[3]认为,沉井下沉时四周受影响土体在一个破坏棱体范围内,该破坏棱体范围尚无精确计算方法,一般可采用土坡稳定的计算方法;王红霞^[4]建立了大型沉井结构施工过程的静态和动态力学模型,并分析了井周空隙、沉井纠偏、井底流砂和井底承压水引起的土体移动。在工程实测方面,王海林等^[5]分析了国内首个采用自动化气压沉箱方法施工完成的隧道风井的监测方案及数据,包括地表沉降和土体深层水平位移;邓友生等^[6]通过将有限元模型计算结果与现场监测数据进行比较分析,研究武汉鹦鹉洲长江大桥北锚碇沉井下沉对邻近建筑物和构筑物沉降的影响。在数值模拟方面,崔泽旺^[7]采用平面有限单元法模拟沉井下沉开挖效应,通过土体水平位移、垂直位移、孔隙水压力和地表沉降结果分析沉井施工的影响;Zeinoddini 等^[8]通过建立三维有限元模型模拟吸力式沉箱在砂土中的穿透下沉过程,用试验数据证明了模型的正确性,并研究了土内摩擦、下沉速度、自适应网格方案等参数对沉井下沉的影响。

综上所述,目前研究沉井施工对周边土体的影响缺乏成熟的计算理论,有限元数值模拟和经验方法是两种常用的方法。由于较难模拟土体性状以及土体与墙体之间的接触特性,有限元方法预测周边土体变形的准确度不高^[9],且在沉井贯入土体的动态过程模拟中存在局限性。相较于数值模拟,经验方法基于实测数据,能考虑到各种影响因素,对相似工程条件下土体变形的预测比较合理、准确。

本文通过对国内首例压入式沉井施工的监测数

据进行分析,总结压入式沉井下沉过程中土体深层水平位移、地表沉降、分层沉降以及管线沉降的变化规律,以期压沉工法的推广应用提供借鉴。

2 工程概况

上海市污水治理白龙港片区南线东段输送干管采用顶管法施工,其中一个工作井采用钢筋混凝土结构,为国内首次采用压沉工艺施工的沉井。该沉井采用矩形平面,尺寸为 18.2 m×11.2 m,高度为 18.52 m(底部刃脚高为 3.6 m),沉井底部设置三道钢筋混凝土底梁,横向一道,纵向两道。沉井长边中部设置 1 道 0.5 m 厚中隔墙,并在井壁外侧设置 0.2 m 宽减摩台阶。沉井结构如图 1 所示。

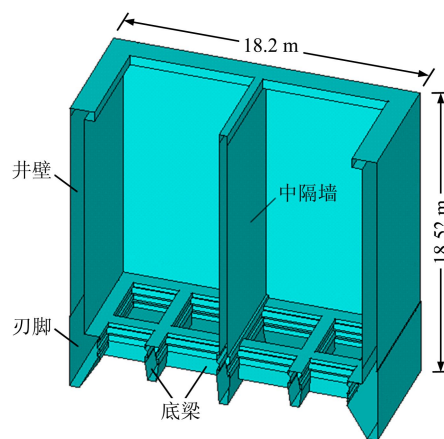


图 1 沉井结构图

Fig.1 Structure profile of open caisson

施工场地为古河道沉积区,根据地质勘察结果,场地土层自上而下划分为 5 个大层。其中,②₁层土呈可塑~软塑状,中压缩性,土质较好;③、④层土质较差,呈流塑状,高压缩性,高灵敏度;⑤₁层土质一般,呈软塑~流塑状,分布稳定,高压缩性。地下水位埋深为 0.3~2.6 m。各土层物理力学参数如表 1 所示。

表 1 土层物理力学参数
Table 1 Physico-mechanical parameters of soil layers

层号	土层名称	层底标高/m	厚度/m	$\gamma / (\text{kN/m}^3)$	E_{s1-2} / MPa	直剪 (固快)	
						c / kPa	$\varphi / (^\circ)$
① ₁	填土	2.48	1.80				
② ₁	褐黄~灰黄色粉质黏土	0.78	1.70	18.8		19.6	14.5
③	灰色淤泥质粉质黏土	-3.72	4.50	17.2	8.91		
④	灰色淤泥质黏土	-16.72	13.00	16.4	2.03	11.5	11.1
⑤ ₁	灰色粉质黏土	-21.72	5.00	17.7	2.97	14.0	13.9

注:沉井终止时刃脚底标高为-13.62 m。

沉井周边距井壁 2~30 m 范围内埋设有航油管、电力管线、通信管线、上水管线、中日美光缆等多条管线,对环境保护的要求较高,需监测沉井

下沉对其的影响。

综合考虑设计要求、工期及下卧层承载力,沉井分 3 节制作、两次下沉。第①₁层填土填料不均,

因此，在沉井结构浇筑前将此层土开挖清除，铺筑厚度为 1.5 m 的砂垫层。沉井 3 节制作高度分别为 4.60、7.92、6.00 m，前两节制作完成后进行第 1 次下沉，第 3 节制作完成后进行第 2 次下沉。下沉采用排水下沉，取土时利用高压水枪射出的高压水流冲刷土层，使其形成泥浆汇流至集泥坑，然后用泥浆泵将泥浆吸出，从排泥管排出井外，在沉井第 2 次下沉过程中采用压沉工艺。

3 压入式沉井施工工艺

在沉井外侧对称布置 4 根直径为 0.9 m 的钻孔灌注桩作为反力地锚，在沉井外壁对应钻孔灌注桩位置处设置 4 个钢筋混凝土牛腿作为穿心千斤顶的承压结构，沉井牛腿及地锚平面布置如图 2 所示。

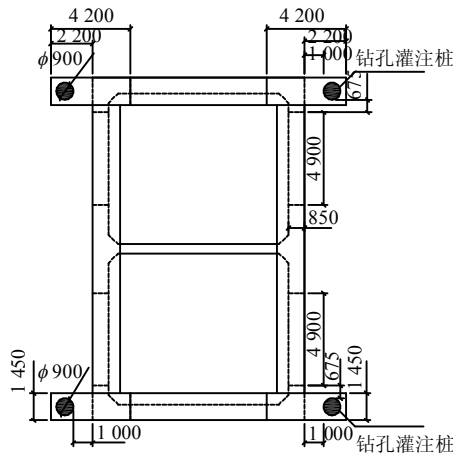


图 2 牛腿及地锚平面布置图 (单位: mm)
Fig.2 Layout of corbels and ground anchors (unit: mm)

压入式沉井的具体施工流程为：根据沉井下沉深度配置反力拉杆，从地面钻孔灌注桩顶相接至沉井承压牛腿。压沉过程中，千斤顶油缸顶住上端锚固螺母，反力拉杆传递拉力至灌注桩，同时牛腿受

到下压力，促使沉井下沉^[10]。当沉井下沉一个油缸行程（约 20 cm）后，千斤顶油缸缩回，将上端螺母下旋约 20 cm，如此往复。由于上、下探杆之间的连接螺母尺寸较大，不能穿过承压牛腿的拉杆预留孔，因此，在下沉约 1.7 m 深度后，需拆除一节替换拉杆（长度为 1.7 m），将上部工作拉杆与下段替换拉杆连接，开始下一个压沉循环，直至下沉至设计标高。图 3 所示为压入式沉井施工流程。

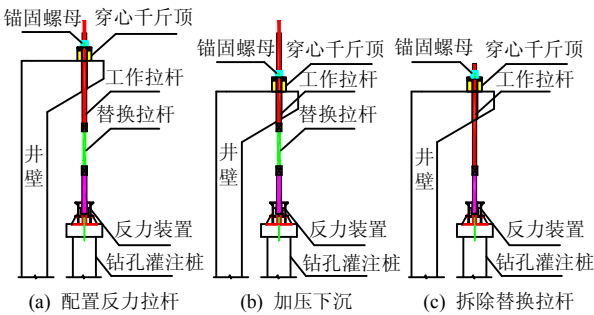


图 3 压入式沉井施工流程
Fig.3 Construction process of jacked open caisson

压沉的原则是“先压后取土”，保证井内一定的土塞高度。由于沉井下沉的不均匀性，需要依据沉井高差和倾斜的测量结果，调整每个千斤顶的压力大小，对沉井进行纠偏。

依据文献[11]，计算沉井下沉过程中各工况的下沉系数，结果见表 2。第 1 次下沉阶段工况 1 为刃脚、隔墙和底梁全截面支承情况，工况 2 为刃脚单独支承情况；第 2 次下沉阶段沉井内留置 2.0~2.5 m 高度土塞，两种工况均为全截面支承，工况 1 不施加下压力，工况 2 施加下压力上限值。由表 2 可知，通过采取不同措施，各阶段的下沉系数均能满足规范要求（1.00~1.25），压沉工艺能确保沉井在留置一定高度土塞的情况下仍具有足够的下沉系数。

表 2 各工况的下沉系数
Table 2 Sinking coefficients of open caisson under different working conditions

计算阶段	下沉深度/m	刃脚底所处土层	下沉系数		施工措施
			工况 1	工况 2	
第 1、2 节（12.52 m）制作完成， 第 1 次下沉	1.500	砂垫层	0.90	1.14	掏出底梁
	2.000	② ₁ 粉质黏土	0.80	1.00	掏出底梁
	6.000	③ 淤泥质粉质黏土	1.13	1.37	不掏底梁
	9.742	④ 淤泥质黏土	1.00	1.19	掏出底梁
第 3 节（6.00 m）制作完成， 第 2 次下沉	13.500	④ 淤泥质黏土	1.11	1.25	$F < F_{\max} = 3\,400\text{ kN}$
	15.500	④ 淤泥质黏土	1.02	1.25	$F < F_{\max} = 6\,100\text{ kN}$
	17.322	④ 淤泥质黏土	0.99	1.25	$F < F_{\max} = 7\,200\text{ kN}$

注：F 为千斤顶施加的下压力；F_{max} 为下沉系数达到 1.25 时的千斤顶下压力上限值。

可见，与传统下沉工艺相比，压沉工艺主要有如下优点：沉井姿态容易控制且精度很高；使得沉

井内能保持较高土塞，对周边土体影响小；增加沉井的下沉系数，可大幅提高下沉速度，缩短工期。

4 监测内容及监测点的布置

沉井施工对周边环境影响的监测点布置如图4所示, 监测的主要内容包括: ①土体深层水平位移监测(测斜)(测点号为CX1~CX4); ②土体地表沉降监测(测点号为T1-1~T1-5、T2-1~T2-4、T3-1~T3-3、T4-1~T4-5, 分别为T1方向、T2方向、T3方向、T4方向); ③土体分层沉降监测(测点号为FC1~FC4); ④周边管线位移监测(通信管线测点号为X1~X6、X11~X12, 上水管线测点号为S1~S4, 电力管线测点号为D1~D4)。

5 沉井下沉情况

沉井总下沉量为 17.322 m, 第1次下沉 9.742 m, 历时 5 d, 最小日下沉量为 1.397 m, 最大日下沉量为 2.774 m, 平均日下沉量为 1.948 m。沉井第1次下沉到位后, 接高制作第3节, 27 d后开始第2次下沉。第2次下沉 7.58 m, 历时 4 d, 最小日下沉量为 0.746 m, 最大日下沉量为 2.719 m, 平均日下沉量为 1.895 m。

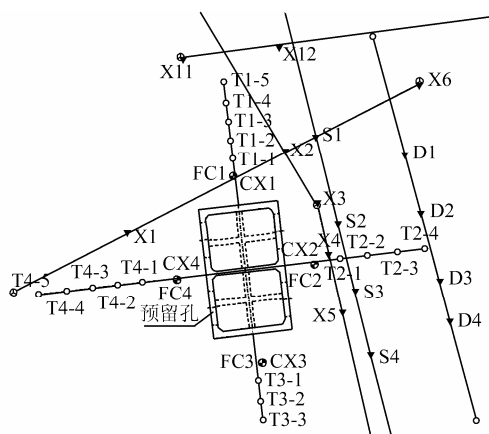


图4 监测点平面布置图

Fig.4 Layout of monitoring points

图5为沉井两次下沉的下沉曲线, 从总体上看, 两次下沉过程比较均匀稳定, 下沉速度变化不大, 并未出现突沉、停沉等状况。图6为沉井倾斜度随下沉深度的变化曲线, 可见沉井沿两个方向均在铅直位置附近不断倾斜摆动, 说明沉井整个下沉过程即是不断倾斜与纠偏的过程。

综合图5、6可以看出, 沉井第1次下沉大致分为3个阶段。在下沉初期, 由于重心较高且尚未形成稳定的下沉通道^[12], 沉井倾斜和纠偏的幅度均较大, 在整个下沉过程中沉井沿两个方向的最大倾斜度均发生在该阶段, 分别为横断面向 1/34.5、纵断面向 1/32.6, 因此, 为避免偏斜过大带来的纠偏困

难, 下沉初期应控制沉井的下沉速度。此外, 该阶段沉井刃脚穿过换填砂垫层和土质较好的②₁层粉质黏土, 下沉速度较慢。在下沉中期, 沉井已开始稳定下沉, 且刃脚进入土质较差、地基承载力较低的淤泥质黏土层, 下沉速度较快。在下沉后期, 当沉井接近预定标高时, 需对其几何姿态进行调整以便进行二次接高。在图5(a)中曲线在终点附近斜率趋近于0, 可看出此时沉井下沉速度明显减缓。第1次下沉到位时横断面向倾斜度为 1/1 400, 纵断面向倾斜度为 1/260, 均较小。

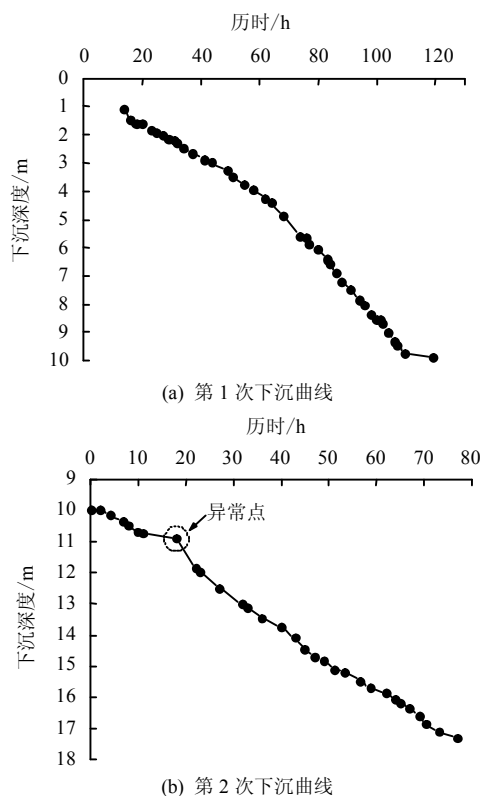


图5 沉井下沉曲线

Fig.5 Subsidence curves of open caisson

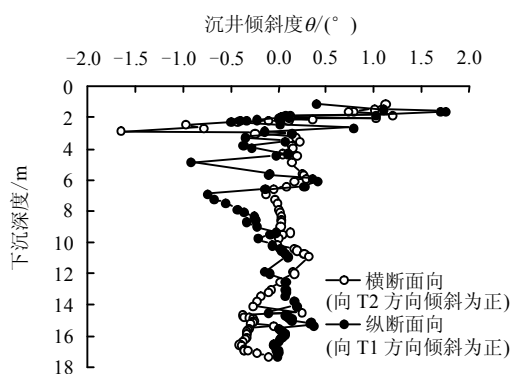


图6 沉井倾斜度曲线

Fig.6 Inclination curves of open caisson

沉井第2次下沉速度基本保持稳定, 仅在下沉深度达到 10.9 m 前后出现过短暂异常。对照图6进

行分析, 出现异常点可能是因为此时对沉井进行纠偏使其反向倾斜, 导致下沉速度减缓, 纠偏后由于沉井与原倾斜方向土体间产生空隙, 侧摩阻力略有降低, 下沉速度短暂增大。第2次下沉时沉井的倾斜度与第1次下沉相比较小, 最大倾斜度仅为 $1/138.3$ (横断面向) 和 $1/154.2$ (纵断面向)。刃脚接近终沉设计标高时需控制减缓下沉速度, 并调平沉井, 以保证顶管顶进时的使用性能, 最终下沉到位时横断面向倾斜度控制为 $1/533.3$, 纵断面向为 $1/6\ 066.7$ 。由以上分析可知, 在第2次下沉时采用压沉工艺能有效控制沉井的几何姿态, 保持下沉速度稳定。

6 实测分析

6.1 土体深层水平位移

在沉井四周距井壁 4.2 m 处共布置 4 个土体深层水平位移测点, 其中测点 CX3、CX4 测得的对应不同下沉深度的土体侧向位移曲线分别如图 7、8 所示。由图可知, 两测点处的土体深层水平位移变化规律基本一致, 均随沉井下沉深度的增加而增大。因沉井下沉稳定后沿纵断面向倾斜度总体上大于横断面向, 并且沿纵断面向摆动比较剧烈, 对 CX1、CX3 方向土体扰动比较大, 所以 CX3 测点的水平位移大于 CX4 测点。

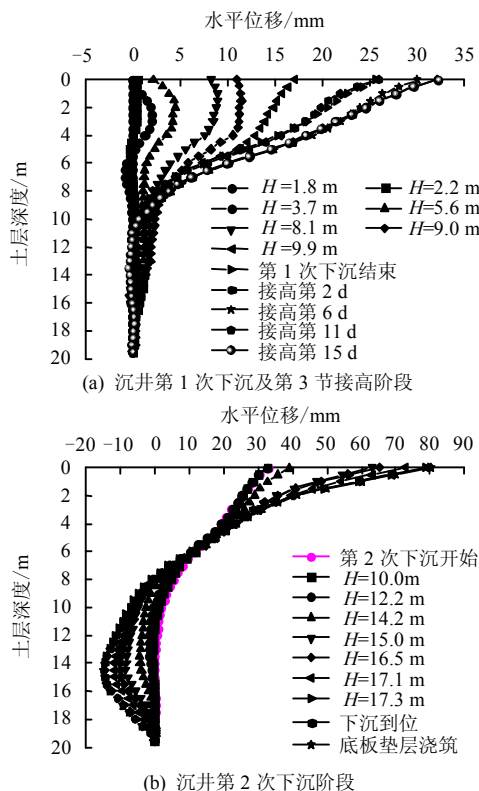


图7 CX3测点深层水平位移曲线

Fig.7 Subsurface horizontal displacement curves of CX3

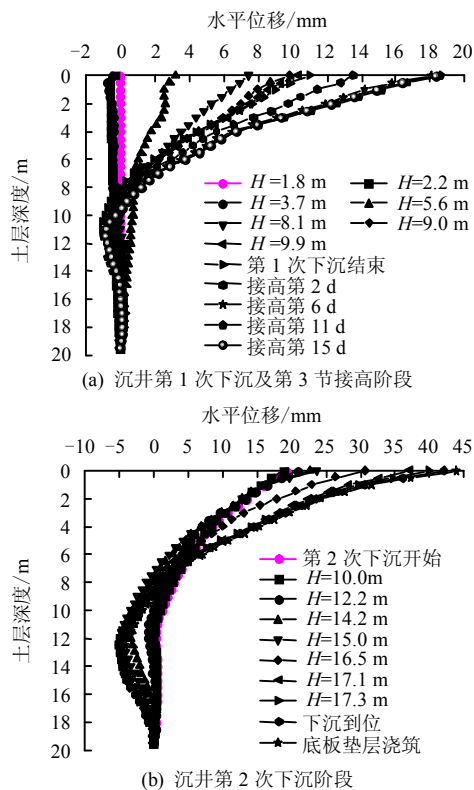


图8 CX4测点深层水平位移曲线

Fig.8 Subsurface horizontal displacement curves of CX4

沉井在下沉过程中, 最前端的刃脚不断破坏并向两侧挤压土体, 挤土效应明显。随着沉井下沉, 井内挖土深度增加, 井内外土体高差增大, 井外土体在自重作用下的滑移力超过刃脚底部土的极限承载力时, 沿刃脚底部涌入井内, 开挖效应开始显现。挤土效应使周边土体偏离沉井移动, 而开挖效应使其偏向沉井移动。

沉井第1次下沉阶段挤土效应占主导地位, 不同深度土体均偏离沉井移动, 土体水平位移随深度的增加而减小, 在地表处取得最大值, 当沉井下沉到位时, CX3 和 CX4 测点处最大水平位移分别为 79.48、42.09 mm。在接高期间, 由于停止下沉导致挤土效应减弱, 刃脚以下一定深度范围内土体开始偏向沉井移动。沉井第2次下沉期间, 开挖效应逐渐增强, 在侧移曲线上表现为在距地表某一深度 h 处 (h 在 7.3~10 m 范围内) 土体累计侧移量为 0, 表明开挖和挤土对此位置处土体侧移的影响大致相等, 在 h 以上土体仍偏离沉井移动, 在 h 以下土体位移为偏向沉井方向, 且随深度的增加而增大, 达到最大值后逐渐减小为 0, 此范围内开挖效应的影响大于挤土效应。由于在刃脚踏面处开挖和挤土效应均较大, 因此, 该深度处土体向沉井内位移并不为最大, 土体向内的最大水平位移发生在刃脚高度范围内。

6.2 地表沉降

6.2.1 地表沉降监测结果分析

在沉井四周沿垂直于井壁方向共布置 4 个地表

沉降监测断面。T1、T4 断面各测点地表沉降随时间变化曲线如图 9 所示, 图 10、11 分别为对应不同沉井下陷深度 T1、T4 断面的地表沉降分布图。

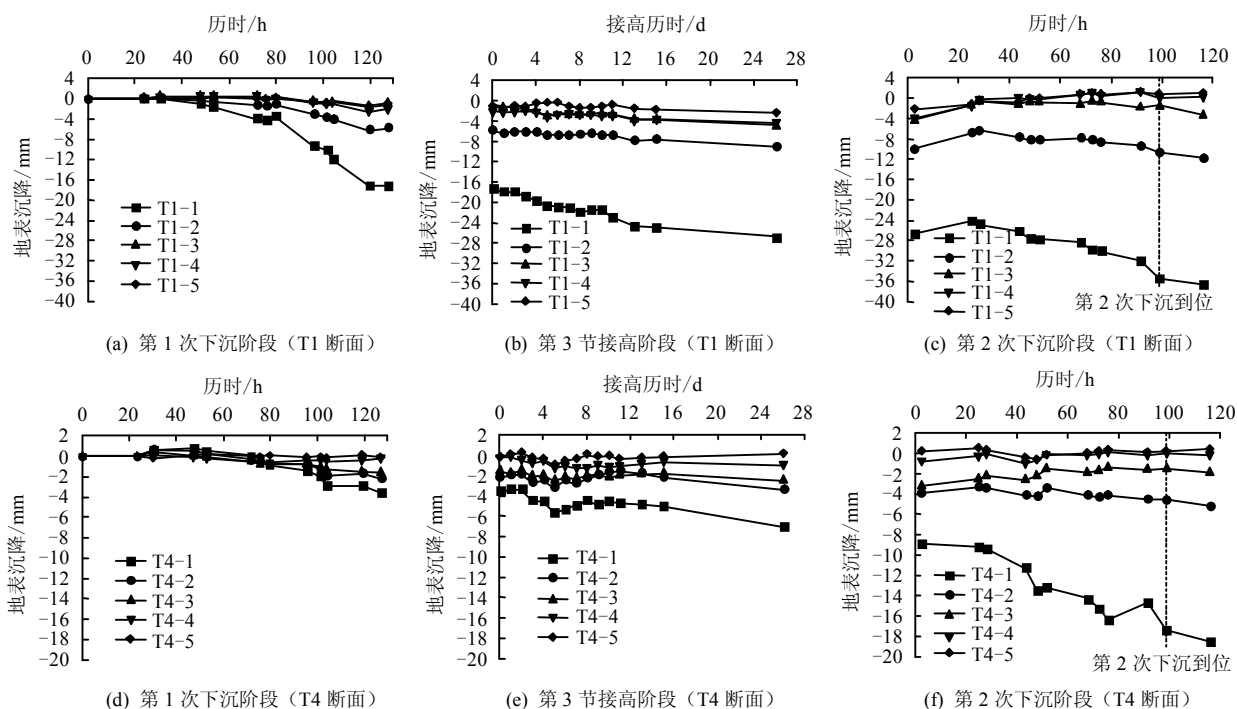
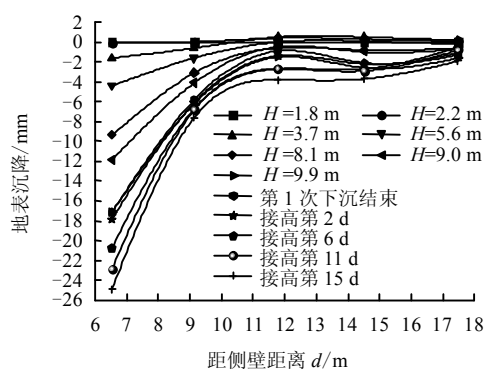
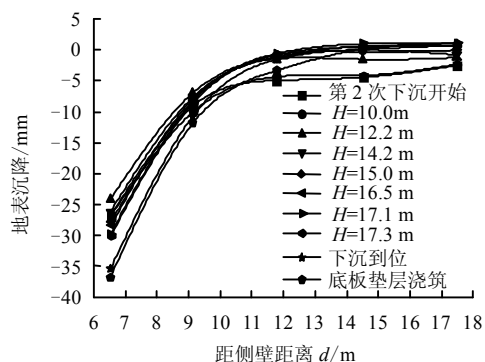


图 9 地表沉降-时程曲线

Fig.9 Curves of ground surface settlement with time

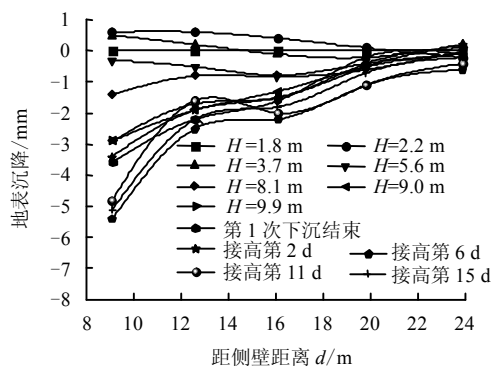


(a) 沉井第 1 次下沉及第 3 节接高阶段

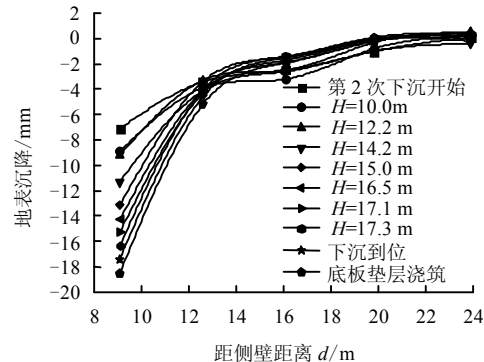


(b) 沉井第 2 次下沉阶段

图 10 T1 断面地表沉降分布
Fig.10 Ground surface settlement distributions of Section T1



(a) 沉井第 1 次下沉及第 3 节接高阶段



(b) 沉井第 2 次下沉阶段

图 11 T4 断面地表沉降分布
Fig.11 Ground surface settlement distributions of Section T4

沉井第1次下沉阶段(传统下沉工艺),周边地表土体呈现出先隆起后沉降的竖向位移变化趋势;在沉井接高阶段,地表沉降值继续增加,但增加速度较慢;第2次下沉(压沉工艺)开始后,距离沉井较近的测点(如T1-1、T1-2、T4-1和T4-2)经少量回弹后转为继续沉降,与第1次下沉趋势相同,而距离沉井较远的测点(如T1-4、T1-5、T4-4和T4-5)则逐渐缓慢隆起。两次下沉地表土体竖向位移变化趋势不一致的原因是:压沉施工时,沉井在千斤顶加压时段下沉速度较快,挤土效应明显,引起地表土体回弹,但距沉井较近的土体受到沉井下陷的拖拽作用,仍继续沉降。

沉井周边地表沉降随下沉深度的增加而增大,且各点的沉降值随着距侧壁距离的增大而减小,地表沉降呈三角形分布,最大值产生在侧壁处。

6.2.1 压入式沉井地表沉降特点及预测方法

将沉井下陷不同深度的地表沉降数据进行无量纲化处理,得到的地表沉降分布情况如图12所示,图中横坐标为地表某点离侧壁的距离 d 与沉井下陷深度 H 的比值,纵坐标为沉降量 δ_v 与下沉深度 H 的比值。从图中可以看出,沉井周边地表沉降远小于Wang等^[13]基于上海基坑工程案例统计数据提出的沉降包络线,与Clough等^[14]建议的硬黏土中基坑地表沉降分布曲线比较接近,说明软土中压入式沉井施工引起的地表沉降及其影响范围均小于基坑工程。

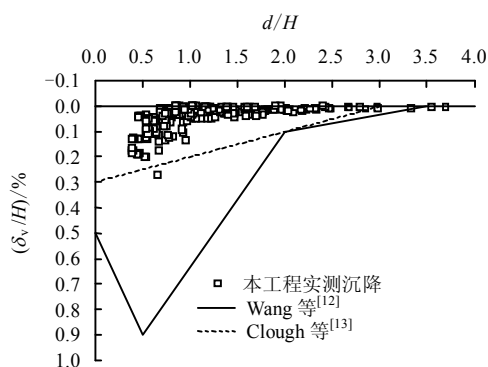


图12 采用下沉深度进行无量纲化的地表沉降分布
Fig.12 Distributions of ground surface settlement dimensionless by subsidence depth

井壁下沉时会对相邻土体产生很大的拖拽作用,紧贴井壁的一圈土体明显凹陷,又因沉井下陷时的偏斜与纠偏会不断破坏井壁附近土体,所以并未在井壁处布置地表沉降测点。一般情况下,任何函数在一定区域内都可用多项式任意逼近,且在因

变量与自变量之间函数关系不明确时,采用多项式逼近常可得到较好的结果^[15],因此,采用三次多项式对监测断面地表沉降分布曲线进行最小二乘拟合,求得侧壁处产生的最大地表沉降值。

图13为沉井的最大地表沉降 δ_{vm} 与下沉深度 H 的关系,由图可知 δ_{vm} 随 H 的增大而增大,二者基本呈线性关系。 δ_{vm} 基本介于 $0.063\%H$ 和 $1.360\%H$ 之间,平均值为 $0.715\%H$,在Wang等^[13]基于上海软土基坑统计结果的范围内($0.1\%H \sim 0.8\%H$),但大于统计平均值 $0.42\%H$ 。因沉井下陷对井壁附近土体有一定的拖拽作用,所以其最大地表沉降与基坑相比偏大。

δ_{vm} 与 H 的线性关系可表示为

$$\delta_{vm} = kH \quad (1)$$

式中 k 值可取图13所示的平均值,由于工程的差异性,建议其取值范围为 $0.4\% \sim 1.0\%$ 。

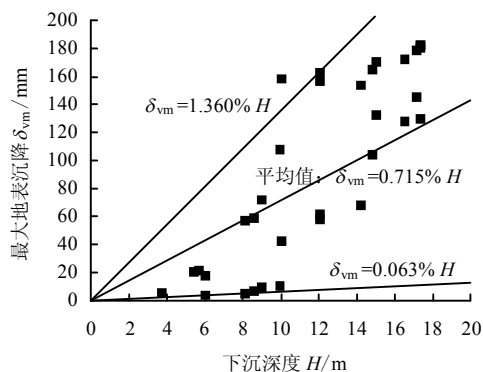


图13 最大地表沉降与下沉深度的关系

Fig.13 Relationships between maximum ground surface settlement and subsidence depth

将沉井第2次下沉阶段(即压沉阶段)T1、T4断面的地表沉降数据进行无量纲化处理,得到的地表沉降分布情况如图14所示,由图可知,当 H 发生变化时,地表沉降分布基本保持一致,可近似采用指数函数进行拟合,图中实线表示每组数据的拟合曲线,可以看出各拟合曲线之间比较接近。将图14中所有组数据用指数函数进行拟合,得到压入式沉井地表沉降分布曲线的方程为

$$\delta_v = \delta_{vm} e^{-4.3 \frac{d}{H}} \quad (2)$$

式中拟合的 R^2 值为0.99,说明拟合度较好。

为方便工程应用,对图14中所有组数据进行分段线性拟合,得到用二折线表示的地表沉降分布模式如图15所示,其表达式为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\delta_v}{\delta_{vm}} &= -1.727 \frac{d}{H} + 1 \left(0 \leq \frac{d}{H} < 0.55 \right) \\ \frac{\delta_v}{\delta_{vm}} &= -0.0435 \frac{d}{H} + 0.074 \left(0.55 \leq \frac{d}{H} \leq 1.7 \right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式(2)和(3)中, δ_{vm} 可由式(1)确定, 因此, 式(2)和(3)可用于预测软土中压入式沉井施工引起的周边地表沉降。

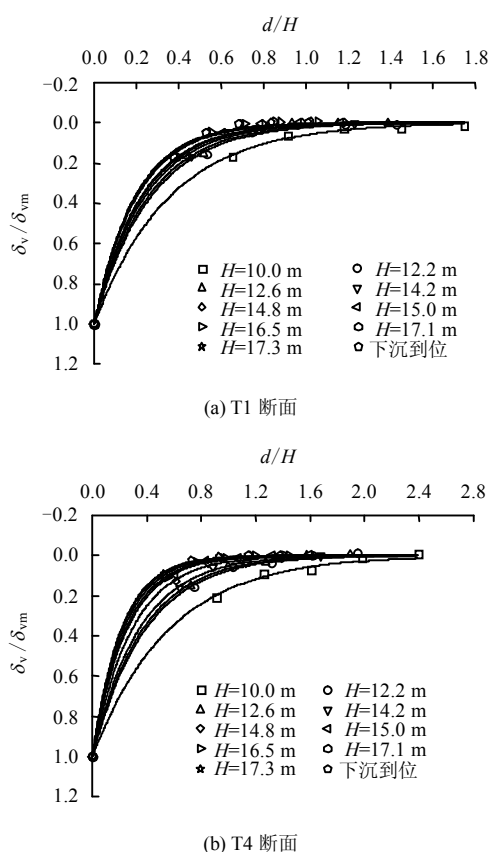


图 14 采用最大地表沉降进行无量纲化的地表沉降分布
Fig.14 Distributions of ground surface settlement dimensionless by corresponding maximum surface settlement

由图 15 可知, 压入式沉井施工时地表沉降的影

响范围为 $1.70H$: 沉井周边 $0.55H$ 范围内地表沉降随着距侧壁距离的增大而急剧减小, 在 $0.55H$ 处地表沉降仅为最大地表沉降的 0.05 倍, 此区域为主要影响区; 在距侧壁 $0.55H \sim 1.70H$ 范围内, 地表沉降值很小且降低缓慢, 为次要影响区。根据经验公式^[3]

$$L = H \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (4)$$

式中: L 为地表沉降范围; φ 为内摩擦角。

由式(4)计算的地表沉降影响范围为 $0.62H$, 与本文建议的主要影响区比较接近。

为了验证式(1)~(3)的准确性, 选取两个沉井工程实例的地表沉降监测数据, 对经验公式进行对比验证。

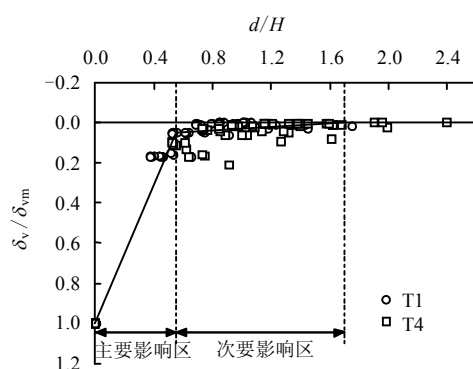


图 15 地表沉降分布预测方法
Fig.15 Proposed method for predicting ground surface settlement distribution

本污水治理输送干线工程中另有一圆形沉井也采用了压沉工艺, 该沉井外径为 24 m , 高为 18.68 m , 侧壁厚为 1.0 m , 下沉深度为 18.1 m 。由于圆形沉井周围设置了 SMW 工法桩围护, 地表沉降较小, 故 k 值取为 0.45% 。选取压沉过程中 3 组不同下沉深度的地表沉降数据与经验公式进行比较, 如图 16 所示, 可见经验曲线与实测值较为吻合。

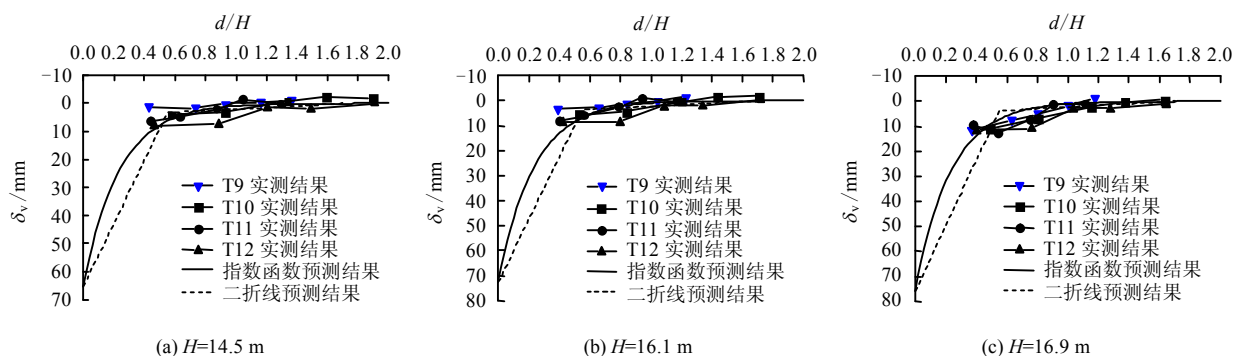


图 16 圆形沉井预测结果与实测结果对比
Fig.16 Comparisons between predicted and measured results of circular open caisson

Peng等^[16]对平面外包尺寸为25.24 m×15.60 m, 总下沉深度为29.06 m的气压沉箱周边地表沉降的监测数据进行了分析, 该气压沉箱下沉深度 H 分别为19.0、29.06 m时, 4个监测断面的监测值与预测值的对比曲线如图17所示, 其中 k 值取0.715%, 可见经验曲线与实测值较为吻合, 本文的经验预测公式应用于气压沉箱也具有较好的效果。

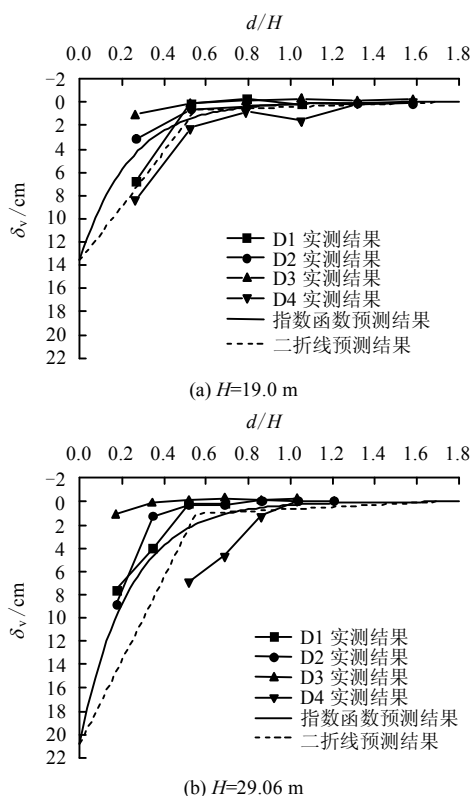


图17 气压沉箱预测结果与实测结果对比

Fig.17 Comparisons between predicted and measured results of pneumatic caisson

6.3 土体分层沉降

测点 FC1、FC4 土体分层沉降-时程曲线如图18所示。沉井第1次下沉开始后, 各层土体均逐渐隆起, 下沉历时80 h后除磁环1处土体开始沉降外, 其余各磁环处土体均保持隆起状态, 直至第1次下沉结束, 说明此阶段沉井的挤土效应比较显著。第1次下沉结束后, 由于挤土效应减弱, 且接高使沉井对土体的压力增加, 各层土体开始逐渐沉降并经过一段时间后趋于稳定。第2次下沉时, 由于千斤顶的压力作用以及开挖效应逐渐增强, 各层土体沉降量不断增加, 其中磁环1处土体沉降曲线变化最快。选取沉井终沉时的分层沉降数据进行计算分析, 结果见表3。由图18和表3可知, 磁环1、2之间土体的单位沉降量最大, 该部分土体位于淤泥质粉质黏土层, 压缩性高; 其他磁环间土体的单位沉降

量相差不大。沉井终沉时两测点处的最大单位沉降量分别为28.349、7.754 mm/m。由表3还可看出, 80%以上的土体沉降量发生在磁环1~3之间, 即地表以下11 m范围内。

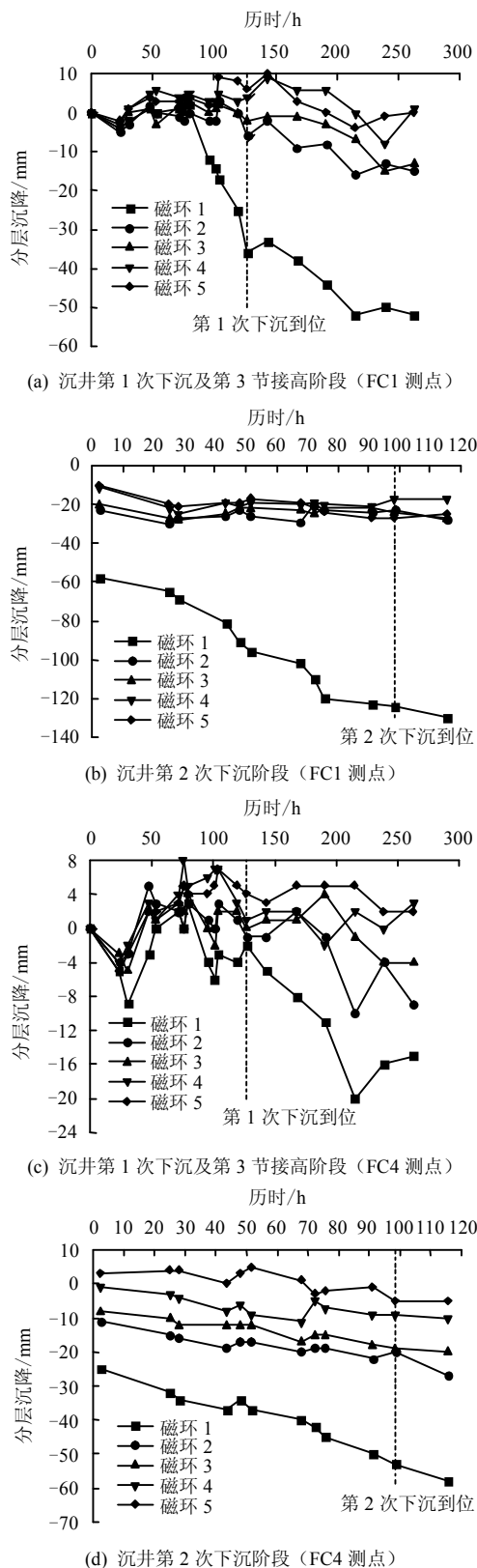


图18 土体分层沉降-时程曲线

Fig.18 Curves of soil layered settlement with time

表3 沉井分层沉降分析
Table 3 Analysis of layered settlement of open caisson

测点	总沉降量/mm	仪器	磁环初始标高 /m	磁环初始距离 /m	磁环下沉量 /mm	磁环间土体沉降量 /mm	单位沉降量 /(mm/m)	占总沉降量比例 /%
FC1	130	磁环 1	0.104	3.598	130	102	28.349	78.462
FC1	130	磁环 2	-3.494	3.089	28	1	0.324	0.769
FC1	130	磁环 3	-6.583	4.062	27	10	2.462	7.692
FC1	130	磁环 4	-10.645	3.961	17	-8	-2.020	-6.154
FC1	130	磁环 5	-14.606		25	25		19.231
FC4	58	磁环 1	0.399	3.998	58	31	7.754	53.448
FC4	58	磁环 2	-3.599	3.201	27	7	2.187	12.069
FC4	58	磁环 3	-6.800	3.871	20	10	2.583	17.241
FC4	58	磁环 4	-10.671	4.000	10	5	1.250	8.621
FC4	58	磁环 5	-14.671		5	5		8.621

注：单位沉降量 $(\text{mm}/\text{m}) = \frac{\text{磁环间土体沉降量}(\text{mm})}{\text{磁环初始距离}(\text{m})}$ 。

6.4 周围管线沉降

图 19 为距沉井最近、沉降最大的通信管线在沉井下沉全过程的沉降-时程曲线（其中测点 X1 的监测从沉井接高制作开始）。从图中可以看出，通信管线沉降曲线变化规律与 6.2 节地表沉降变化规律基本相似。

由图 19 可知，沉井第 1 次下沉阶段，通信管线各测点先产生向上的位移，随后逐渐沉降，最大上升位移为 0.9 mm，第 1 次下沉结束时各测点沉降值在 3.5 mm 以内；沉井接高阶段，管线继续沉降，第 2 次下沉前最大沉降值达到 6.7 mm；第 2 次下沉

阶段，距沉井最近的测点沉降值整体上呈增大趋势，而距沉井较远的测点则逐渐隆起，此阶段沉降曲线因各测点距沉井距离的不同而产生明显的分组现象。底板垫层浇筑时通信管线最大沉降值为 7.8 mm，最大隆起值为 2.2 mm，差异沉降为 10 mm。沉井终沉后管线位移仍延续原来的变化趋势，体现了软土中沉井下沉的蠕变效应。

通信管线位移变化速率小于 5 mm/d，累计位移小于 10 mm，符合文献[11]的有关规定，可见压沉工艺能有效保护周边管线。

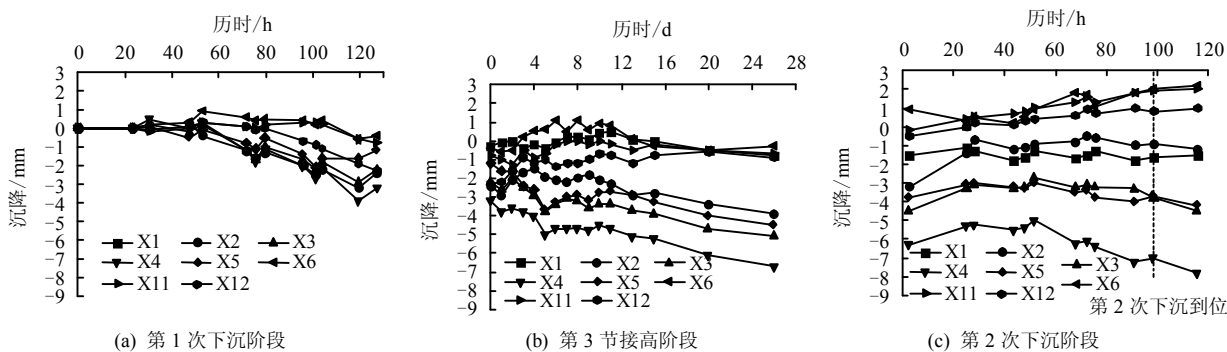


图 19 通信管线沉降-时程曲线

Fig.19 Curves of settlement of communication pipelines with time

7 结 论

(1) 采用压沉工艺能够有效控制沉井的几何姿态，保持下沉速度稳定。

(2) 沉井下沉在周边土体中同时产生挤土效应和开挖效应。当下沉深度较小时，挤土效应占主导地位；开挖效应随下沉深度的增加逐渐显著。

(3) 土体水平位移和地表沉降均随沉井下沉深度的增加而增大，且地表沉降呈三角形分布，最大

地表沉降约为 $0.715\%H$ 。软土中压入式沉井施工引起的地表沉降及其影响范围（约为 $1.7H$ ）均小于基坑工程。

(4) 基于对无量纲化地表沉降数据的拟合分析，提出了分别采用指数函数和二折线表示的地表沉降经验公式，并通过工程实例验证其合理性，该经验公式能有效预测软土中压入式沉井施工引起的周边地表沉降。

(5) 采用单位沉降量评估土体的分层沉降，以

淤泥质粉质黏土的单位沉降量最大。

(6) 压入式沉井周边土体位移和地下管线沉降均被控制在允许范围内, 说明压沉工艺能有效保护周边环境。

参考文献

- [1] ALLENBY D, WALEY G, KILBURN D. Examples of open caisson sinking in Scotland[J]. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering**, 2009, 162(1): 59—70.
- [2] NEWMAN T G, WONG H-Y. Sinking a jacked caisson within the London Basin geological sequence for the Thames Water Ring Main extension[J]. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, 2011, 44(2): 221—232.
- [3] 孙更生, 郑大同. 软土地基与地下工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984.
- [4] 王红霞. 大型沉井结构施工过程的力学模型及控制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2001.
- [5] 王海林, 彭芳乐, 徐正良, 等. 气压沉箱施工对周边地层环境影响的现场监测与数值模拟[J]. **岩石力学与工程学报**, 2010, 29(增刊 2): 3941—3951.
WANG Hai-lin, PENG Fang-le, XU Zheng-liang, et al. Field measurement and numerical simulation of ground deformation induced by pneumatic caisson construction[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(Supp.2): 3941—3951.
- [6] 邓友生, 熊浩, 刘荣, 等. 武汉鹦鹉洲长江大桥北锚碇施工变位分析[J]. **岩土力学**, 2013, 34(增刊 1): 241—246.
DENG You-sheng, XIONG Hao, LIU Rong, et al. Research on construction displacement of north anchorage caisson of parrot cay Yangtze River bridges in Wuhan [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(Supp.1): 241—246.
- [7] 崔泽旺. 某雨水泵房沉井施工对其桩基础的影响分析[J]. **武汉大学学报(工学版)**, 2005, 38(增刊): 220—223.
CUI Ze-wang. Effect analysis of open caisson construction to its pile foundation for rainwater pump room in Yuhuan Power Plant[J]. **Engineering Journal of Wuhan University**, 2005, 38(Supp.): 220—223.
- [8] ZEINODDINI M, MOUSAVI S A, ABDI M R. Simulation of suction caisson penetration in seabed using an adaptive mesh technique[C]//Proceedings of the 12th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, EASEC12. Oxford: Elsevier Ltd, 2011: 1721—1728.
- [9] HSIEH P G, OU C Y. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1998, 35(6): 1004—1017.
- [10] 黄丁, 李耀良, 徐伟. 压入式沉井侧摩阻力的监测及分析[J]. **建筑施工**, 2012, 34(10): 980—983.
HUANG Ding, LI Yao-liang, XU Wei. Monitoring and analysis of side frictional resistance of pressure-in type open caisson[J]. **Building Construction**, 2012, 34(10): 980—983.
- [11] 上海市基础工程有限公司. DG/TJ08—2084—2011 沉井与气压沉箱施工技术规范[S]. 上海: 上海市建筑建材业市场管理总站, 2011.
- [12] 朱建民, 龚维明, 穆保岗, 等. 南京长江四桥北锚碇沉井下沉安全监控研究[J]. **建筑结构学报**, 2010, 31(8): 112—117.
ZHU Jian-min, GONG Wei-ming, MU Bao-gang, et al. Sinking safety monitoring research on north anchorage caisson of the Forth Nanjing Yangtze-River Bridge[J]. **Journal of Building Structures**, 2010, 31(8): 112—117.
- [13] WANG J H, XU Z H, WANG W D. Wall and ground movements due to deep excavations in Shanghai soft soils[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2010, 136(7): 985—994.
- [14] CLOUGH G W, O'ROURKE T D. Construction induced movements of in situ walls[C]//Proceedings of Design and Performance of Earth Retaining Structures, ASCE. New York: [s. n.], 1990: 439—470.
- [15] 聂宗泉, 张尚根, 孟少平. 软土深基坑开挖地表沉降评估方法研究[J]. **岩土工程学报**, 2008, 30(8): 1218—1223.
NIE Zong-Quan, ZHANG Shang-gen, MENG Shao-ping. Surface settlement of deep foundation pits by excavation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(8): 1218—1223.
- [16] PENG F L, WANG H L, TAN Y, et al. Field measurements and finite-element method simulation of a tunnel shaft constructed by pneumatic caisson method in Shanghai soft ground[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2011, 137(5): 516—524.