

敏感环境压入式超深沉井施工技术

钱海波

上海铁能建设工程有限公司, 上海 201612

[摘要]传统沉井工艺通过取土下沉容易引起外部土体向内涌入,进而影响周边建筑物安全,因此传统沉井施工工艺很少用于敏感环境区域,且下沉深度较浅。此文基于上海市宝钢股份条钢旋流池工程沉井施工,采用 Midas Civil 软件进行体系受力的验算,并系统地阐述了临近建筑物敏感环境压入式超深沉井的设计、施工过程及重难点。得出如下结论:模型分析证实设计方案有效,能够确保结构安全稳定;压入式沉井施工工艺在宝钢条钢旋流池工程中展示出自动纠偏、土塞防护、干封作业和提升抗浮性等优势,为敏感环境中类似工程提供了重要经验和技術选择。该施工技术的应用较好地保护了临近建筑物,同时提高施工效率,节约成本,以期为类似工程提供借鉴。

[关键词]压入式沉井;沉井施工;敏感环境;超深沉井

DOI: 10.33142/ect.v2i9.13145

中图分类号: TU753.64

文献标识码: A

Construction Technology of Sensitive Environment Pressure Type Ultra Deep Open Caisson

QIAN Haibo

Shanghai Tieneng Construction Engineering Co., Ltd., Shanghai, 201612, China

Abstract: The traditional sinking well technology can easily cause external soil to pour in and affect the safety of surrounding buildings by taking soil for sinking. Therefore, the traditional sinking well construction technology is rarely used in sensitive environmental areas, and the sinking depth is relatively shallow. This article is based on the construction of the sinking well of Baosteel's strip steel swirl pool project in Shanghai. Midas Civil software was used to verify the system's stress, and the design, construction process, and key difficulties of the pressure type ultra deep open caisson in sensitive environments near buildings were systematically explained. The following conclusion can be drawn: the model analysis confirms that the design scheme is effective and can ensure the safety and stability of the structure; The construction technology of press in caisson has demonstrated advantages such as automatic correction, soil plug protection, dry sealing operation, and improved anti floating performance in the Baosteel's strip steel swirl pool project, providing important experience and technical choices for similar projects in sensitive environments. The application of this construction technology has effectively protected nearby buildings, improved construction efficiency, and saved costs, in order to provide reference for similar projects.

Keywords: press open caisson; construction of sinking well; sensitive environment; ultra deep open caisson

引言

沉井因其整体刚度大、稳定性好、抗渗能力强、施工深度深等优点广泛应用于盾构隧道工作井、竖井、桥梁工程等领域,但其下沉过程对环境的影响限制了沉井在敏感地段中的应用。然而城市中心区域的类深井基坑越来越多,为解决沉井在城区敏感地段的应用问题,压入式沉井施工工艺应运而生,该工艺通过主动施加下压力主导沉井下沉,变被动下沉为主动下沉,变切削脚部土体为挖除井内土塞部分土体,加快施工效率并减少对环境的影响。

关于压入式沉井的研究主要集中在环境影响、摩阻力、端阻力三个方面。徐鹏飞等^[1]介绍压入式沉井在软土中的施工技术并研究其对周边环境的影响,得出压入式沉井施工能有效解决倾斜、突沉和下沉困难问题。同时他还提出压入式沉井周边地表沉降经验公式。罗实瀚等^[2]基于某工

程提出地锚式沉井压入施工方案,并探讨其对周边环境的影响效应,得出该工艺下沉速度快、环境影响小。刘桂荣^[3]通过数值模拟分析压入式沉井内土塞高度对周边环境的影响,得出井内土塞能够限制沉井施工对土体的扰动,其合理厚度为1~2m。易琼等^[4]根据土塞形成机理推导出土塞高度的计算表达式,并探讨土塞效应对沉井下沉阻力的影响,得出土塞效应会使沉井侧摩阻力显著增大。黄丁等^[5]对上海白龙港污水处理厂2座沉井的侧摩阻力进行实测分析,提出总侧摩阻力的简化计算方法。孙睿泽等^[6]通过实测分析研究压入式沉井下沉过程中的刃脚踏面端阻、斜面端阻以及整体端阻力在下沉阻力中占比的变化特征,探究静压下沉与井内取土2个主要工序对端阻力的影响规律。

目前关于压入式沉井的研究有了一定的成果,但在具体工程应用中的应用情况总结仍不足。本文以宝钢股份条

钢旋流池工程背景, 阐述临近建筑物超深压入式沉井设计、施工技术及工程重难点, 以期为类似工程提供借鉴。

1 总体概况

1.1 工程概况

本旋流池工程位于宝钢条钢厂产品结构优化改造项目施工场地内, 北为初五路, 南为初二路, 东与拟新建主厂房相比邻, 西与新建的二号煤气加压站电控室相比邻。旋流池结构采用地下钢筋混凝土深基础圆形结构型式, 分内、外筒体。旋流池外筒体设计为沉井, 井壁厚度 1m, 外径 16m, 内径 14m, 沉井高度 22.5m。

由于本工程工期较紧, 周边环境较为复杂, 本旋流池采用压入式沉井方案。沉井为圆形钢筋混凝土结构, 混凝土强度等级为 C30, 抗渗等级不小于 P8。根据地质情况和规范要求, 经计算得, 沉井需要采取分 2 节浇筑、分 3 次下沉, 制作高度分别为 9.0m、13.5m, 刃脚下沉到达标高分别为 -8.500m、-15.250m、-22.000m。根据设计要求第 1 次和第 2 次下沉采用排水下沉, 第 3 次采用不排水下沉方式。

1.2 水文、地质条件

沉井下沉依次穿越①₁₋₁ 杂填土、①₁₋₂ 素填土、③₂ 粘质粉土、③₃ 淤泥质粉质黏土、④ 淤泥质黏土。

表 1 土层分布表

平均土层厚度 /m	土层名称	承载力特征值 /kPa	井壁摩阻力 /kPa
2.23	① ₁₋₁ 杂填土		
2.37	① ₁₋₂ 素填土		
3.6	③ ₂ 粘质粉土	90	35
3.3	③ ₃ 淤泥质粉质黏土	50	20
13.3	④ 淤泥质黏土	45	25

根据勘察报告, 旋流池底部为④层淤泥质黏土, 无承压含水层存在, 故本项目不考虑承压水对本工程影响。

1.3 周边环境

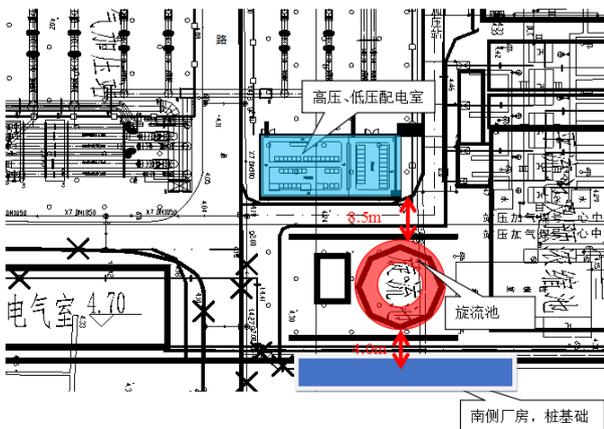


图 1 各建筑平面位置

旋流池外壁与新建主厂房基础相距 4m, 与新建的 2# 煤气加压站高低压配电室相距 8.5m。新建主厂房为单层

工业厂房, 独立柱基础, 桩基承重, 桩项标高-2.4m, 桩长 62m。2# 煤气加压站高低压配电室为天然地基, 条形基础, 基础底标高-2m, 室内为电缆沟, 对沉降较为敏感, 各建筑平面位置如图 2 所示。

2 压沉式沉井设计

压入式沉井的设计虽然与常规沉井设计相似, 但在压沉体系验算和沉井偏压验算方面具有其特殊要求。压沉体系验算重点在于确保沉井在下沉过程中的稳定性和承载力, 包括整体稳定性、桩身强度以及底部承载层的承载能力。而沉井偏压验算则关注沉井在不均匀土层或荷载作用下的稳定性, 以及偏压对结构的影响和承载能力。这两项验算是设计过程中确保工程安全性和可行性的关键步骤, 需要基于设计规范和实际工程情况进行细致的计算和分析, 以预测和避免潜在问题, 保证沉井的顺利下沉和稳定。

2.1 压沉体系静力分析

采用 Midas Civil 软件分别建立钢牛腿模型和环梁模型, 分析下压力作用下钢牛腿的受力情况和下沉反力作用下环梁的受力情况。

(1) 钢牛腿。根据设计文件建立单片牛腿模型如图 2 所示。H 型钢和加劲板采用板单元模拟, 材料为 Q355 钢, 弹性模量 $2.06 \times 10^5 \text{Mpa}$, 容重 $7.85 \times 10^4 \text{kN/m}^3$, 屈服强度 345Mpa, 许用强度 305Mpa。牛腿与井壁连接处边界条件为底部固定约束。

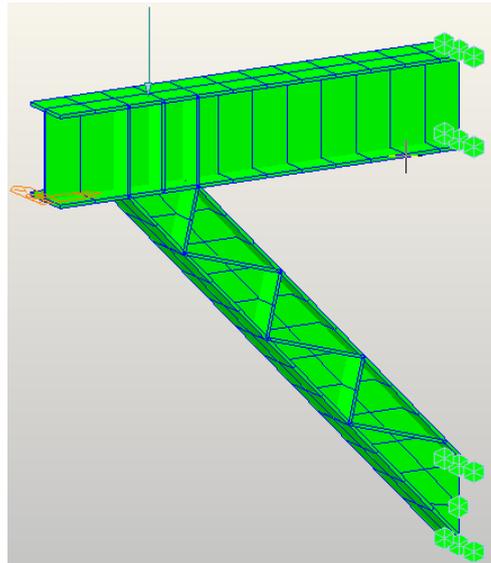


图 2 单片牛腿模型图

考虑两倍的压沉力储备, 实际每个加载点施加下压力取 3000kN, 加载点钢牛腿由两片间隔为 200mm 的单片牛腿组成, 故单片牛腿所承受的下压荷载 1500kN。

单片钢牛腿的变形和应力如图 3 和图 4 所示。由图可知, 钢牛腿最大变形为 3.1mm, 最大应力 274MPa < 305MPa, 满足要求。牛腿和井壁连接处最大拉力 1031.7kN, 最大压力 408kN。

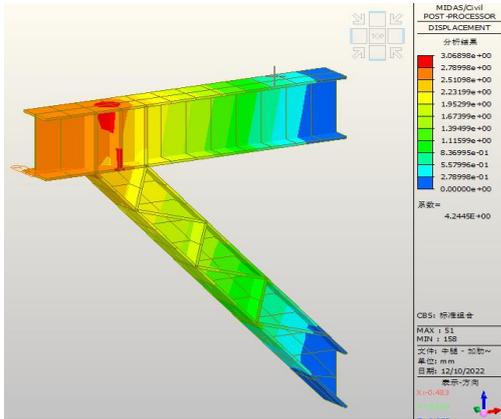


图3 牛腿变形云图

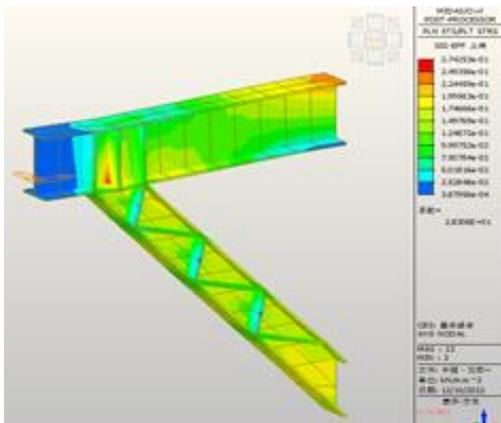


图4 牛腿应力云图

(2) 环梁。环梁截面 2.0m×1.0m (宽×高), 内径 17m, 外径 21m, 采用 C30 混凝土, 建立环梁模型如图 5 所示。环梁采用实体单元模拟, 各材料参数见表 2, 边界条件为环梁底部 D_x 、 D_y 、 D_z 约束。环梁沿环向均布 8 个抗拔点, 用于提供沉井下沉力, 每个抗拔点提供反力 3000kN。

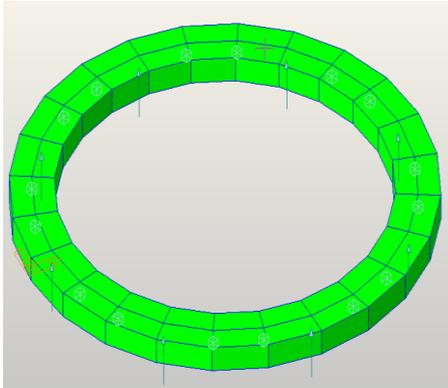


图5 环梁模型

环梁的变形、应力和内力如图 6 和图 7 所示。由图可知, 环梁最大变形为 0.6mm, 最大应力 6.19MPa < 14.3MPa, 满足要求。环梁底部最大下拉力 2116kN, 最大弯矩 1880kN·m, 最大剪力 1564kN。

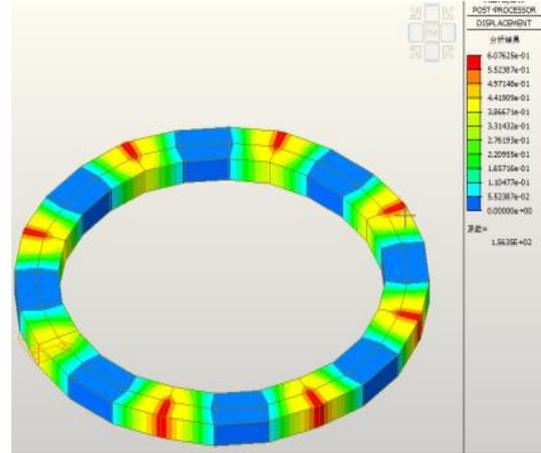


图6 环梁变形云图

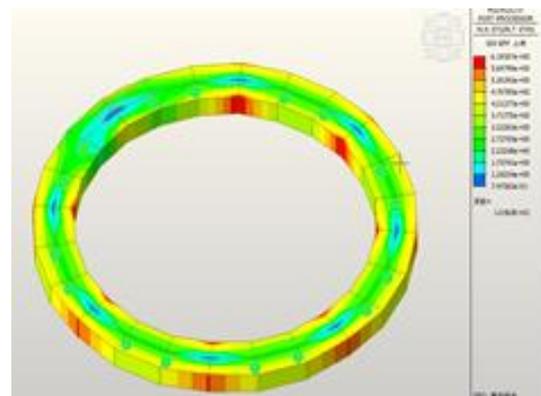


图7 环梁应力云图

2.2 沉井偏压受力分析

采用 Midas Civil 软件建立沉井整体模型, 井壁采用实体单元模拟, 井壁与土体接触部分设置土弹簧, 边界条件为底部 D_z 约束。

沉井所受的水土压力采用朗肯土压力计算, 以压力荷载作用于沉井上。沉井一侧为主动土压力, 另一侧为被动土压力的工况为最不利工况。假设主动和被动土压力作用面积各为沉井井壁总面积的 1/2。

偏压荷载作用下沉井受力及变形如图 8 所示。由图可知, 沉井侧壁最大变形为 6.2mm, 最大应力 7.98MPa < 14.3MPa, 满足要求。沉井侧壁最大弯矩 608kN·m, 最大剪力 687kN。

表2 主要材料特征表

材料类别	弹性模量/MPa	容重/(kN/m ³)	直径/mm	厚度/mm	屈服强度/MPa	抗压强度设计值/MPa	抗拉强度设计值/MPa	许用强度/MPa
混凝土	30000	24000	/	/	30	14.3	1.43	/
锚筋	200000	/	φ 25	/	/	360	360	/
预埋板	206000	/	/	30	345	/	/	305

3 压沉式沉井施工工艺

压入式沉井与常规沉井的主要区别在于引入了压沉体系，以增强其下沉过程的控制和效率。压沉体系的设计可以采用两种形式：一种是锚桩加穿心千斤顶反拉形式，另一种则是环梁加配重加穿心千斤顶反拉形式。在施工过程中，需要对千斤顶进行同步控制或局部控制，以确保沉井的稳定下沉。为了降低下沉过程中的阻力，施工中可以采用增加空气幕或使用泥浆减阻等辅助措施。这些方法的目的是优化沉井的下沉过程，减少所需的下沉力，从而提高施工效率和安全性。

3.1 压沉体系

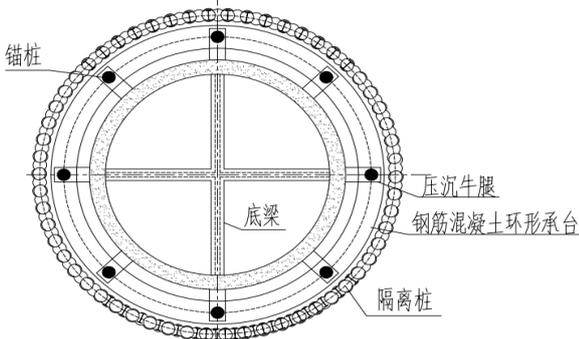


图9 反力系统位置图（永临结合）

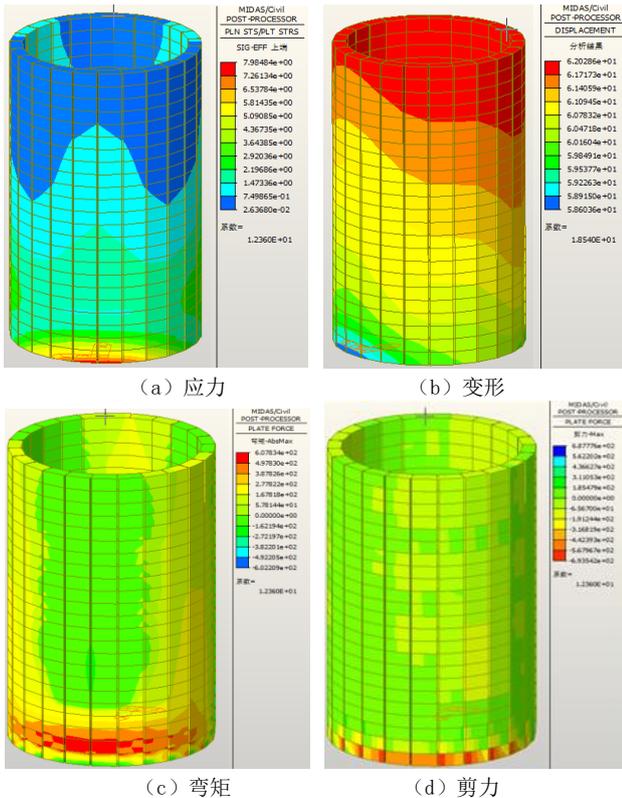


图8 沉井侧壁受力及变形云图

3.2 施工流程

该工艺施工流程如图10所示。

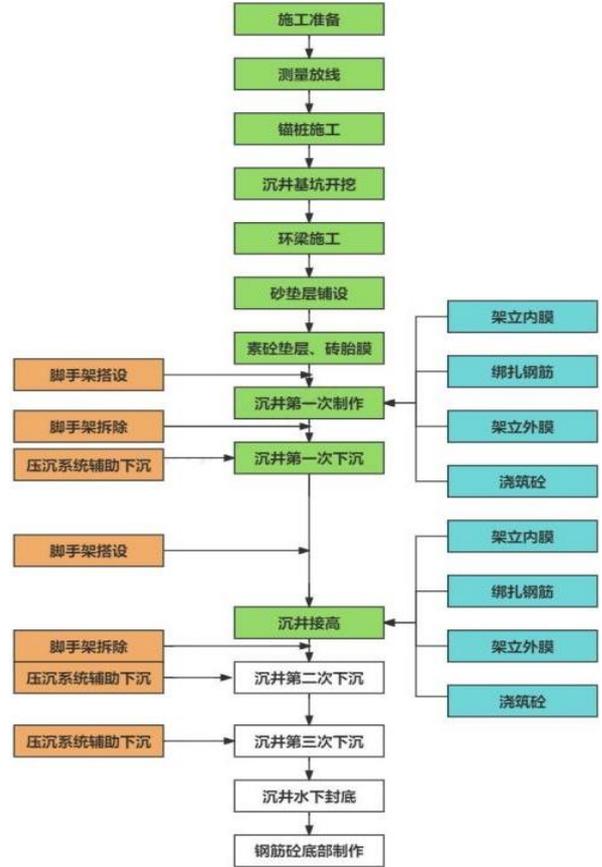


图10 压入式沉井施工工艺流程图

在沉井外围施作钻孔灌注桩作为锚桩。

沉井基坑开挖完成后，绑扎环梁钢筋及预埋锚桩，最后浇筑环梁，环梁施工如图11所示。



图11 环梁施工

场地铺设砂垫层及混凝土垫层。垫层达到强度后，绑扎刃脚及第一节沉井的钢筋，并在顶部预埋牛腿连接件，随后搭设脚手架和模板，浇筑刃脚，刃脚施工如图12所示。



图12 刃脚施工

第一节沉井达到强度后，拆除模板并安装钢牛腿、穿心千斤顶及钢棒，完成压沉反力系统的安装，反力系统如图 13 所示。



图 13 反力系统

凿除混凝土垫层。刃脚下部垫层分为 12 块区域，分 3 次对称凿除，具体区块划分见图 14。4 个小组第一次先凿除 1、4、7、10 区域，然后凿除 2、5、8、11 区域，最后凿除 3、6、9、12 区域。

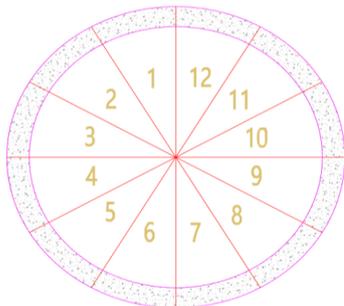


图 14 垫层破除顺序

沉井下沉的原则是“先压后取土”。压沉系统采用了自动化控制，控制面板如图 15 所示。下沉时千斤顶通过顶住固定的工具锚板对钢牛腿产生一个向下的压力，该力由钢牛腿传递到沉井，促使沉井下沉。千斤顶的有效行程为 18cm，每次在千斤顶顶升完毕后，调整工作夹片，继续进行压沉施工。



图 15 自动化控制系统

在顶力至设定值无法下沉时，开始井内取土并预留至少 4m 的土塞。土塞效应会使得刃脚底部产生一个向下的应力拱，阻断内外土体流动的情况，能够有效防止坑底突涌，减少对周围环境的影响。易琼等^[4]研究土塞的影响效应，结果如图 16 所示，其中 α 为下沉深度/沉井总高度。随着沉井下沉并壁与土塞的摩擦力随之增大，进而和自重一起阻碍周边土体进入井内。

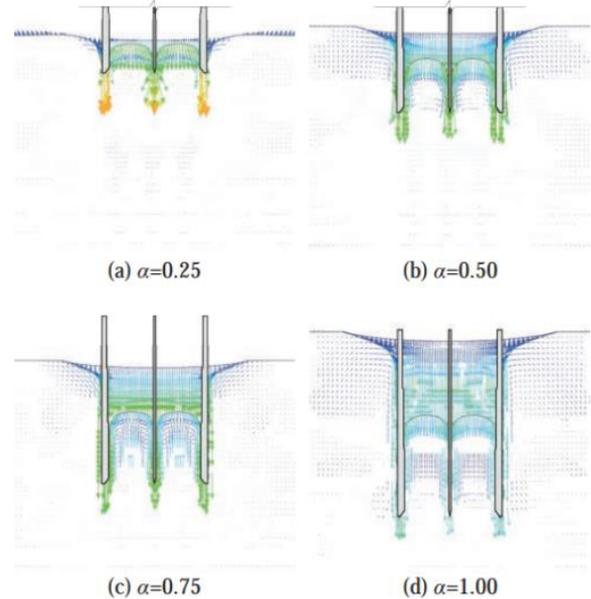


图 16 下沉过程中的土体速度场分布^[4]

压沉施工过程中，依据沉井高差和倾斜的测量数据，控制下沉速度较慢或高差较大区域穿心千斤顶的压力大小，对沉井进行纠偏作业，纠偏可以单点纠偏，也可以多点纠偏。

沉井下压至预定位置后，挖除土塞至十字梁顶下 500mm。由于井内水较少，故封底采用干封。笔者认为，这是由于刃脚及十字梁周边的土体在下压力的作用下被挤密，土的孔隙率和渗透系数发生了改变，水难以进入井内。

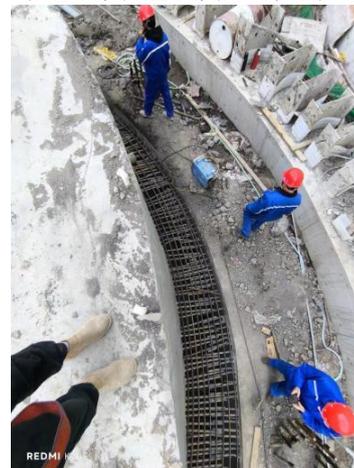


图 17 环梁与井壁钢筋绑扎

底板施工,同时绑扎环梁及沉井管壁钢筋,如图 17 所示。随后浇筑填充空隙,将环梁、钻孔灌注桩和沉井连成一个整体,实现永临结合,提高整体抗浮性。

4 工程重难点及针对措施

4.1 沉井距离现有构筑物较近

本工程沉井距离西侧配电房约 8.5m,距东侧主厂房柱基最近约 4m。沉井下沉深度深,后期沉井下沉系数小,存在对周边环境带来影响的风险。因此开展针对性措施:

旋流池外侧设置一圈三轴搅拌桩作为隔离桩,搅拌桩桩长 26.5m,东西两侧搅拌桩内插 H 型钢,桩长 24.5m,其中西侧型钢采用插一跳一的施工方式,东侧型钢采用插一跳一+部分密插的施工方式。施工中严格控制外围隔离桩的施工质量,能有效达到隔离保护的作用。

沉井下沉严格采取不排水下沉,加强周边建筑的沉降和位移监测,及时采取注浆加固等应急措施。加固隔离采用双排三重管高压旋喷桩,深度超过构建筑物基础下部 2m 以上。

4.2 倾斜、扭转现象

沉井穿越软硬不均地层,沉井下沉极易发生突沉、倾斜。此外,井内设置有十字梁,井壁有两个预留套管洞口,取土空间较小,易发生倾斜及扭转。针对性措施如下:

换填处理:采用中粗砂进行分层回填、夯实,分层换填厚度 20~30cm,压实度不得小于 97%,换填过程中连续降水至坑底以下 500mm,保证下卧层有足够的承载力。

沉井下沉控制:沉井混凝土浇筑采用层铺法,分区、分层、对称浇注,控制混凝土面高差不大于 0.5m,每浇筑 2m 暂停半小时。同时每半个小时测量一次沉降值,一旦出现不均匀沉降,停止混凝土浇筑,采取相应措施;初期下沉过程中容易出现倾斜,施工应严格控制垫层凿除顺序,按先后外后的方式凿除,以保证初期下沉的稳定;沉井下沉时,严格控制井内水位,防止管涌及井外土体塌陷现象发生。

4.3 下沉困难、滞沉现象

由于土层承载力、摩阻力、浮力等不利因素的累加,终沉阶段不仅施工难度大而且安全风险较高。采取如下针对性措施:

井内水位高度的确定和调整必须结合地质复勘以及井外各类沉降观测的变化情况,现场设置足量的水泵,在出现警情时迅速提升井内水位,确保安全。

在终沉阶段,加强施工机械设备的配置,加快出土效率。

设置泥浆减阻注射口。结合沉井下沉系数,沿井壁外侧圆周布设 34 只注射口。通过注射泥浆在沉井与土层之间形成一个的泥浆套(见图 18),泥浆套摩阻力单位标准值为 3~5kPa^[7],远远小于土体与井壁的摩阻力,从而减少了井壁上的摩阻力,使沉井能顺利下沉。

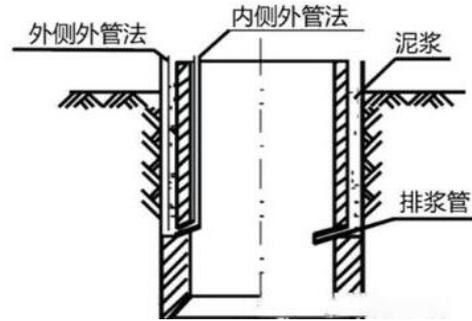


图 18 沉井泥浆套示意图

4.4 其它

下沉过程中由于换填的砂垫层和③₃淤泥质粉质黏土夹杂的含砂层,沉井下沉困难,现场将挖机吊放在十字梁上部,配合出土,提高出土效率。

在终沉阶段启用泥浆套减阻措施,其实施效果不佳,没有达到预期减少 20%阻力的目标。笔者认为是因为采取泥浆套减阻措施的时间较晚,应在刃脚入土 4~5m 开始全程注浆减阻。

5 效果评价

下沉过程中,沉井垂直度控制良好,终沉阶段未出现滞沉现象。根据监测结果,宝钢股份条钢旋流池沉井中心偏差小于 3cm,高程偏差小于 5cm,施工期间周边建(构)筑物最大沉降与位移均小于 6mm,实施效果非常良好。

相较于常规做法,压入式沉井施工工艺节约了 50% 的围护费用和 100% 的支撑费用,同时节省了围护施工的时间和支撑的制作、养护和拆除时间。相较于传统沉井施工工艺,压入式沉井施工工艺将土塞作为封底的一部分节省封底的混凝土。同时锚桩和沉井的永临结合,提高整体抗浮性。

6 小结

文章以宝钢股份条钢旋流池工程为依托,建立 Midas Civil 实体模型,分析了压沉体系的受力以及沉井偏压受力,总结压沉式沉井的施工工艺并结合工程实际中遇到的问题提出相应的针对性措施,得到以下结论:

通过模型分析,单片钢牛腿变形和应力均低于许用值,满足设计要求,具有足够的安全储备;环梁变形、应力远低于许用值,表明良好稳定性和承载力;沉井侧壁在偏压下亦满足设计要求,维持稳定性和承载力。整体分析结果证明设计方案的有效性,能够确保结构安全、稳定。

压入式沉井施工工艺在宝钢股份条钢旋流池工程中展现了显著优势:自动纠偏保证施工精度和沉井姿态可控;留置土塞防止土体流动和超沉,保障周边安全;压沉装置通过挤密土体实现干封;锚桩与沉井结合增强抗浮性。

本文对敏感环境压入式沉井施工技术作了一些总结,在后续压入式沉井的研究中可以从以下几个方面作进一步地改进:(1)自动拧螺帽的系统研发;(2)双壁钢板加工工肋灌无收缩自密实灌浆料替代传统钢筋混凝土。

压入式沉井施工工艺在宝钢股份条钢旋流池工程中的成功应用提高沉井整体抗浮性和下沉施工效率,节约施工成本,为类似敏感地区超深超大沉井工程的施工设计积累了宝贵经验,给地下各类调蓄池、立体停车库及盾构井等提供一个上佳的工艺选择。

本文受福建省住房和城乡建设厅科技计划项目(2023-K-36、2023-K-61、2023-K62)资助。

[参考文献]

- [1]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.
[2]罗实瀚,徐伟.地锚式沉井压入施工阶段对环境的影响监测成果分析[J].建筑结构,2016,46(8):100-105.
[3]刘桂荣.压入式沉井施工环境效应及其影响因素分析

[J].绿色建筑,2022,14(3):159-164.

[4]易琼,廖少明,朱继文,等.软土地层中压入式沉井下沉的土塞效应及其影响[J].浙江大学学报(工学版),2020,54(7):1380-1389.

[5]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.

[6]孙睿泽,廖少明,刘孟波,等.软土地层压入式沉井端阻力实测研究——以温州沉井式地下车库工程为例[J].隧道建设(中英文),2023,43(2):310-320.

[7]DG/TJ08-2084-2023.沉井与沉箱施工技术标准[S].

作者简介:钱海波(1977.2—),男,本科,毕业于江苏科技大学,就职于上海铁能建设工程有限公司,从事土木工程方向工作。