

Application countermeasures of caisson construction technology in port waterway engineering

Xiaoqing Meng

China Shipping Engineering Construction Administration Co., Ltd., Beijing, 100070, China

Abstract

Caisson construction is a key underwater structure construction technology in port waterway engineering, and its construction quality directly affects the safety and durability of the overall operation of the project. In recent years, with the rapid advancement of large-scale and complicated port and waterway projects, caisson construction faces new challenges in technical adaptability, on-site organization and management and construction equipment. Based on the application background and technical characteristics of caisson construction in port and waterway engineering, this paper deeply analyzes the current main construction difficulties and constraints, systematically sorts out typical problem types, and proposes effective technical countermeasures from the dimensions of measurement and control technology improvement, equipment optimization configuration, foundation reinforcement strategy and environmental adaptability. Through the comprehensive analysis of the whole process of caisson construction and countermeasures, the aim is to provide theoretical support and practical path for the construction technology improvement and high-quality development of port waterway engineering.

Keywords

port waterway engineering; Caisson construction; Technical difficulties; Optimize the path; Countermeasures and suggestions

港口航道工程沉箱施工技术的应用对策

孟小庆

中海工程建设总局有限公司, 中国·北京 100070

摘要

沉箱施工作为港口航道工程中关键的水下结构建造技术,其施工质量直接影响工程整体运行的安全性与耐久性。近年来,随着大型化、复杂化港口航道项目的快速推进,沉箱施工在技术适应性、现场组织管理及施工装备等方面均面临新挑战。本文围绕沉箱施工在港口航道工程中的应用背景与技术特征,深入分析当前主要施工难点与制约因素,系统梳理典型问题类型,并从测控技术提升、装备优化配置、地基加固策略与环境适应性等维度提出有效的技术对策。通过对沉箱施工全过程的综合分析与对策建议,旨在为港口航道工程的施工技术提升和高质量发展提供理论支撑与实践路径。

关键词

港口航道工程; 沉箱施工; 技术难点; 优化路径; 对策建议

1 引言

港口航道工程是支撑海上交通运输、港口物流枢纽功能运行的核心基础设施,其结构安全与功能完备性在很大程度上依赖于高效可靠的施工技术体系。沉箱作为重要的水下预制结构,在港池护岸、码头基础与航道防护工程中发挥着承重、挡水和稳定基底等多重作用,其施工技术日益受到工程界关注。在实际工程推进过程中,沉箱施工常面临海况变化频繁、水下施工精度要求高、地质条件复杂等技术难题,加之现有施工标准与装备手段滞后于工程需求,亟需通过系统性的技术应用对策加以应对。

【作者简介】孟小庆(1988-),男,中国山东潍坊人,本科,工程师,从事港口与航道施工技术与管理研究。

2 港口航道工程中沉箱施工技术概述

2.1 沉箱施工的基本原理与适用条件

沉箱施工是通过预制大型中空箱体,在水域中定位下沉并填充以形成结构基础的水工建筑方式。该工艺依靠浮力调控实现沉箱的浮运与精准就位,并结合水下导向装置与压载系统控制沉放过程。沉箱结构需与地基环境相适应,以确保受力均衡和结构稳定,其施工适用于岸坡较陡、水深较深、荷载要求较高的港口航道工程环境。施工区域需具备一定的水域宽度与流速条件,以保障沉箱运输与沉放作业的连续性和安全性,地质条件应满足承载力与沉降控制的要求,从而实现沉箱与基础有效结合并确保使用寿命。

2.2 港口航道工程中沉箱的结构类型

港口航道工程中常用沉箱结构包括重力式沉箱、筒式沉箱与分节式沉箱等类型,依据工程功能、地质条件与水深

要求进行选用。重力式沉箱多用于码头与护岸工程,其整体结构体积大、底部设有隔仓以增强稳定性;筒式沉箱适用于管道涵洞与引水构筑,具备施工简便与调整灵活的特点;分节式沉箱适合超大尺寸结构,通过分段预制、拼装沉放以应对施工运输与安装限制。不同类型沉箱在结构受力、安装方式与功能适配上具有差异性,需结合具体水工设计方案进行结构选型与布置优化,以确保施工效率与工程性能的协同提升。

2.3 沉箱施工的主要工艺流程及技术要点

沉箱施工一般包括预制制造、运输浮运、现场定位、下沉安装与填充固结等工艺流程,技术环节紧密衔接以确保结构安装精度与工程稳定性。预制阶段需控制混凝土强度与结构尺寸,保证箱体完整性与浮力匹配;运输与浮运环节依赖驳船、牵引设备及导向缆系完成水域内平稳移动;定位施工通过水下测控系统配合导向装置实现三维空间精准就位;下沉过程中采用灌水压载控制沉速,并通过导向框架修正偏差;填充固结则利用砂砾、混凝土等材料填充空腔形成结构闭合,确保沉箱与基础结合紧密、受力均匀,从而形成可靠的水下基础结构。

3 港口航道工程沉箱施工的典型应用现状

3.1 港口护岸与码头建设中的沉箱应用

沉箱结构广泛应用于大型港口护岸与码头前沿结构的基础构建,具有承载能力强、施工周期短、适应水深范围广的优势。在我国沿海重点港口中,超过70%的深水泊位采用沉箱基础进行结构构筑,以天津港南疆港区为例,其2号泊位沉箱结构总长达396米,单体沉箱长度为18米,高度达13米,总沉放周期控制在90天以内。在上海港洋山深水港一期工程中,沉箱用于护岸结构,采用C30高性能混凝土,保障抗渗性能与长周期服役要求。沉箱施工在保障港口岸线稳定性的同时,具备良好的抗波浪与抗冲刷性能,在承受20千牛/平方米以上岸壁荷载的同时仍能保持结构变形小于5毫米的技术标准,充分体现其工程适配性。

3.2 航道疏浚与整治中的沉箱功能

在航道疏浚与整治工程中,沉箱常被用于边坡稳定、岸滩护脚及航道边界构筑,保障航道走向与断面稳定性,防止水流冲刷引发边坡失稳。据调查,长江中下游疏浚整治项目中约38%的航段采用沉箱结构加固边坡,单体沉箱宽度控制在3.5米至5米之间,高度不超过10米,通过梯形布设提高抗冲击能力。以珠江三角洲整治工程为例,施工过程中投放沉箱总量超过280个单体,平均单箱重量达750吨,有效抵御年均水流速超过2.3米/秒的水力冲击。沉箱结构可将局部流速降低30%以上,在泥沙冲淤频繁区域中实现对航道轮廓的长期稳定控制,降低后期维护疏浚频次与强度,提升航道使用效率与工程经济性。

3.3 不同区域沉箱施工技术实施差异

沉箱施工在不同区域表现出明显的技术适应差异,主

要体现在地质条件、海况环境与施工组织方面的技术响应方式差别。东南沿海地区因水深较大、风浪频繁,采用大型整体浇筑沉箱结构居多,平均沉箱高度达14米,浮运距离普遍超过3公里,需配置双向牵引系统与复合测控装置保障沉放精度;华北港区因岸线稳定性要求高,常使用分节预制拼装式沉箱以适应较高冰冻荷载影响,单节沉箱拼装误差控制在10毫米以内;西南内河港口则因流速变化大、地基软弱,更多采用轻型填充式沉箱并辅以高压注浆固结,施工周期普遍缩短至45天以内。不同地区沉箱技术路径在结构选型、工艺节点与施工装备上存在20%以上的差异,反映出港口航道工程沉箱施工需因地制宜灵活调整。

4 港口航道工程沉箱施工面临的技术问题

4.1 水下安装定位控制难度大

沉箱施工过程中水下定位误差控制直接关系到结构拼接精度与承载性能,目前多数项目仍依赖水下人工引导与声呐定位系统进行三维就位,受水流、能见度与水压变化影响显著。在某类水深超过15米、流速大于1.5米/秒的作业环境中,沉箱就位偏差普遍超过50毫米,部分工程甚至出现偏移超100毫米的问题。激光与声呐复合定位虽可将误差控制至20毫米以内,但成本增加超过40%,设备运维复杂度上升2倍以上。部分港口项目在大潮汐区或低能见度水域中,水下沉放过程需多次修正定位,平均调整次数高达4次以上。施工效率因此下降约35%,严重影响沉箱之间的结构密封性与后续填充作业连续性,亟需提升精准测控手段以应对复杂水下定位要求。

4.2 地基承载力不足对沉箱稳定性的影响

港口航道区域普遍存在软弱地基,沉箱基础承载力偏低直接导致结构不均匀沉降与失稳风险。在典型淤泥质或粉质粘土地层中,原状地基承载力常不足50千帕,远低于沉箱单位荷载需求的80~120kPa标准。在某南方港口项目中,沉箱施工完成后60天内出现沉降大于80毫米的异常状况,导致结构纵缝开裂与下部回填层失稳,修复费用占比超过工程造价的12%。地基加固处理虽可提升承载力至100kPa以上,但需使用高压注浆或砂桩处理技术,施工周期延长约25天,成本增长幅度约18%。地基沉降的滞后性与不可预测性增加了沉箱结构监测与维护的难度,对工程后期运行安全构成长期威胁,成为制约施工区域扩展的关键问题。

4.3 大型沉箱浮运与下沉精度控制问题

大型沉箱在浮运与下沉阶段面临复杂流体动力影响,精度控制难度随着结构尺度与重量的提升显著上升。在某北方深水码头项目中,单体沉箱长达22米,重量超过1100吨,浮运过程中受侧向波浪与流速干扰,航迹偏移量超过1.2米,需多点拖拽与分段校正。下沉作业中因压载不均或沉速失控,易引发结构倾斜与非同步着底现象,部分项目沉放过程中出现倾角超3度的问题,导致安装对接失败。工程实践表明,当沉箱长宽比大于2.5时,水下姿态控制难度增加70%

以上,常规双泵压载系统无法满足平衡调控需求,需引入多点同步调压装置并配置双向纠偏系统。由于设备调试复杂、控制参数实时响应要求高,实际沉放周期延长约30%,严重影响施工计划与工程节点控制。

5 港口航道工程沉箱施工技术的优化措施

5.1 高精度测绘与控制系统的集成应用

在沉箱施工中,精准测绘与实时控制系统的集成应用已成为提升结构安装精度与作业效率的关键手段。通过引入多源数据融合的测控系统,结合差分GPS、惯性导航、超短基线水声定位与三维建模技术,可实现施工区域的高分辨率地形扫描与实时动态跟踪。工程实例表明,应用精度优于10毫米的测控系统后,沉箱安装偏差可降低至15毫米以内,较传统声呐定位方案提升约60%。在浮运与沉放过程中,系统可实时反馈沉箱姿态变化,自动修正拖移航向与压载配重,显著减少人工干预频次并提升作业连贯性。作业人员通过可视化平台进行状态监控与数据判读,结合模拟仿真平台进行施工路径优化与沉放方案比选,有效应对复杂水流扰动与非规则地貌结构。在多个深水码头建设项目中,综合测控系统的投入使施工效率提高约35%,工程误差率下降至3%以下,为大型沉箱结构在高精度安装条件下的广泛推广提供了坚实的技术支撑。

5.2 施工装备与辅助装置的技术升级

随着沉箱尺寸与重量的不断增大,传统施工装备在承载能力、控制精度与环境适应性方面暴露出较多限制,推动施工装备的系统升级已成为保障工程安全与效率的重要方向。当前主流港口工程已逐步采用双向同步牵引装置、多点压载协调系统及浮运稳定装置,配合高刚度导向框架与可调节支撑平台,实现对沉箱在空间六自由度内的精准控制。多功能浮运平台可实现拖带路径纠偏、速度调节与姿态调平,其推进效率较常规驳船提升40%以上。辅助装置方面,水下遥控机械臂与智能调整浮筒已投入实际工程使用,能够完成导向插销安装、箱体姿态修正与沉底位置微调,降低水下作业人员暴露风险。部分项目引入可回收式沉放底座与液压吸附定位器,实现沉箱就位后的快速脱离与重复使用,降低设备损耗率并节约施工成本约15%。装备升级不仅提升了操作自动化水平,也为沉箱在极端海况及复杂地形中的高效

施工提供了关键支撑。

5.3 软基区域沉箱基础处理技术创新

在软弱地基区域进行沉箱施工,基础处理技术直接决定沉箱结构的稳定性与后期变形控制能力。近年来,多种新型地基加固与预处理方法逐步应用于港口航道工程中,包括复合地基技术、高压旋喷注浆法与真空预压联合处理等工艺。复合地基通过CFG桩与砂垫层联合形成高承载力结构体系,地基承载力可从原始30千帕提升至120千帕以上,有效抑制不均匀沉降发展。高压旋喷注浆可在沉箱预定安装区域形成规则加固体,对地基变形模量提升幅度超过3倍,沉箱下沉后90天的沉降量控制在20毫米以内。真空预压联合堆载法在沿海滩涂与淤泥质土中展现出良好效果,可在60天内完成固结,地基强度提高70%以上。软基处理过程中辅以分层回填与滤排系统设计,有效控制孔压消散与边坡稳定,增强沉箱基础整体性与抗冲刷能力。新型处理方案的推广应用大幅度降低结构维修率并延长使用寿命,为复杂地基条件下的沉箱施工提供可行路径。

6 结语

沉箱施工作为港口航道工程中关键的结构构建技术,其在深水码头、航道整治及岸线稳定中发挥着不可替代的作用。面对复杂海况与软弱地基等技术挑战,施工过程中的精度控制与结构稳定性要求不断提高,传统工艺难以满足工程高质量发展的实际需求。通过测控系统、施工装备、基础处理与安全保障等方面的技术优化,沉箱施工效率与工程可靠性得到显著提升。未来应进一步推动标准化作业流程、智能化设备应用与区域适应性技术集成,为港口航道工程建设提供更加稳固的技术支撑与持续发展的施工体系。

参考文献

- [1] 舒春龙.港航工程项目中的沉箱预制施工技术要点[J].中国高新科技,2023,(04):125-127.
- [2] 焦珂文.港口航道工程沉箱施工技术[J].珠江水运,2022,(01):55-57.
- [3] 杨磊.港口航道工程建设中的沉箱预制施工技术[J].中国水运(下半月),2019,19(22):154-155.
- [4] 徐河.港口航道工程沉箱施工技术要点分析[J].珠江水运,2017,(02):72-73.