

大型沉箱预制、出运与安装施工关键技术研究

白宝强

中交水运规划设计院有限公司 北京 100007

DOI: 10.32629/ems.v8i4.19681

[摘要] 大型沉箱已是重力式码头的主要结构形式,具有单体尺度大、重量重、施工环节多等特点,受海洋环境影响显著。工程实践中存在以下问题:预制阶段,大体积混凝土裂缝控制与精度保证;出运阶段,多种移运方式协同,应保证稳定性与安全;出运后浮运安装则面临稳性控制、基床适应性及高精度沉放定位等问题。本文系统梳理大型沉箱结构形式与典型受力特点,重点分析预制场地选型与混凝土工艺优化、出运气囊移运/滑道顶推/滚装上驳等关键工法、浮运拖航稳性计算与沉放纠偏技术,以及全过程主要风险辨识与防控措施。通过针对性技术集成与过程精细控制,可有效提高大型沉箱施工可靠性,缩短关键节点工期,降低海洋条件下作业风险。

[关键词] 大型沉箱;重力式码头;出运移运;浮运安装;稳性控制

我国海岸线漫长,港口吞吐量持续位居世界前列,但天然深水岸线资源日趋紧张,多数新建泊位不得不向外海扩展,水深加大、波浪增大、海况复杂是常态。基于此背景,重力式沉箱码头凭借结构整体性好、承载力强、耐久性高、施工相对集约等优势,在深水港区前沿结构中被广泛应用。特别是单体重量数千吨至上万吨的大型沉箱,在海外开敞式码头、人工岛护岸、跨海通道接岸等工程。大型沉箱施工全链条高度依赖预制-出运-浮运-安装的连续性,任何一个环节失控均可能导致整体失效。有鉴于此,优化大型沉箱预制、出运与安装关键技术,是适应港口深水化、规模化发展趋势的实际需求。

1 大型沉箱结构形式与受力特点

大型沉箱分为方形沉箱(矩形或方格隔舱式)和圆筒沉箱两大类,前者以多隔舱薄壁箱体为主,典型尺度单体长20~30m、宽15~25m、高15~30m以上,底板带前趾、后踵,内设纵横隔墙分舱以提高抗扭刚度并便于浮运稳性控制;后者多为大直径薄壁圆筒,胸墙跨度大、悬臂长,常用于需较大消波或特殊受力场合。受力特点上,沉箱整体属重力式挡土结构,主要抵抗船舶靠泊力、波浪力、土压力、水压力及地震动荷载,其中波浪力以立波压力为主,作用于前壁呈三角形或梯形分布,峰值常集中于静水位附近,导致前趾基床应力显著增大且分布不均;后壁承受主动土压力与剩余水压力,底板则承受基床反力及自重偏心引起的局部高应力,易出现前趾应力集中与后趾脱空风险。沉箱大型化后,自重达数千至上万吨,浮运阶段浮心与重心位置敏感,稳性裕度需严格校核;安装就位后,胸墙承受上部荷载与悬臂弯矩,隔

墙主要抗剪并协调变形,而整体稳定性依赖抗滑、抗倾覆与基床承载力平衡,设计中常需关注不均匀沉降诱发的附加应力及疲劳累积损伤,确保耐久性与长期服役安全^[1]。

2 大型沉箱预制关键技术

2.1 预制场地规划与布置

大型沉箱预制场地的规划与布置,对后续出运效率、箱体质量与整体工期有较大影响。场地选址宜优先利用既有港区后方陆域或邻近深水岸线改造的预制场,避免远距离陆路转运风险;场地需具备坚硬持力层地基,以承受单体数千吨沉箱自重及施工荷载,同时满足排水畅通、避免积水软化基底。总体布置采用分区流水作业模式:底模区按沉箱数量与生产节拍设置多条平行活动底模轨道,钢筋加工区、混凝土搅拌站与泵送管线集中布置于场地一侧,便于短距离运输;存放区采用多层叠放或单层扩大布置,预留出运滑道或气囊/台车移运通道,通道坡度控制在1:50~1:100以确保平稳过渡;出运端头设置过渡段与下水滑道或半潜驳靠泊码头衔接,配备门式起重机覆盖底模与移运区。场地四周设排水沟与集水井,配备临时围堰防潮水倒灌。

2.2 钢筋制作、绑扎与安装技术

钢筋宜采用HRB400或HRB500级热轧带肋钢筋,主筋直径多在 $\Phi 25 \sim \Phi 40$ mm,箍筋与分布筋 $\Phi 12 \sim \Phi 20$ mm,考虑到大体积混凝土收缩与温差应力,设计常加密抗裂构造钢筋网,底板、侧壁、前后壁交接处设附加斜筋或U型筋加强抗剪与抗扭。绑扎以底板先行、侧壁后跟的顺序进行,采用双层双向钢筋网,底板下层筋置于垫块上保持保护层厚度,上层筋用马凳或钢筋支架固定;侧壁竖筋与水平筋交叉点用双股

22#铁丝双扣绑扎, 加密区间距减至 100~150mm。安装时先整体吊装预制钢筋笼入模, 采用塔吊+人工辅助定位, 底模上预埋定位钢筋或角钢导轨确保笼体居中不偏; 浇筑前全面检查保护层、间距与锚固长度, 重点校核底板前趾、后踵及隔墙根部钢筋位置, 避免浇筑过程中上浮或偏移。

2.3 混凝土分层浇筑工艺

大型沉箱混凝土分层浇筑, 能有效抑制大体积混凝土温度应力, 防止贯穿裂缝, 进而保证结构密实与抗渗性。大型沉箱分层浇筑主要工艺参数如表 1 所示:

表 1 大型沉箱分层浇筑主要工艺参数

参数项目	推荐控制值	底板特殊要求	侧壁/隔墙要求	备注说明
每层浇筑厚度	300~500 mm	400~600 mm	300~400 mm	过厚易产生冷缝
层间间隔时间	≤2~4 h	≤3 h	≤4 h	视气温与初凝时间调整
浇筑推进方式	对称辐射/分圈提升	中央→四周	下→上分圈	减小不均匀沉降与侧压力
混凝土入模温度	15~28℃	18~25℃	15~25℃	高温季节宜加冰或晚间浇筑
芯表温差限值	≤25℃	≤20℃	≤25℃	超限需加强覆盖或暂停浇筑
降温速率	≤1.5℃/h	≤1.0℃/h	≤1.5℃/h	后期可放宽至 2.0℃/h
表面养护方式	蓄水+覆盖	蓄水 20cm 以上	薄膜+喷淋	保持湿润≥7d, 防干缩裂缝
单层浇筑时间	4~8 h	6~10 h	3~6 h	视方量与泵送能力

2.4 预制过程质量控制与变形防控

质量控制采用全过程“三检制”+关键节点旁站: 原材料进场双控, 钢筋笼安装后全面复核保护层厚度与间距, 混凝土浇筑前检查模板平整度、支撑刚度与脱模剂涂刷; 浇筑中实时监测入模温度、振捣密实度与表面泌水, 芯表温差埋设多点热电偶, 限值≤25℃, 超标即启动应急覆盖或暂停。变形防控重点针对大体积混凝土早期收缩与温差应力: 底板与侧壁交接处设后浇带或加强带, 预留沉降缝宽 20~30mm; 模板体系采用整体钢模板+可调支撑, 确保脱模前箱体平面度≤5mm/10m、垂直度≤H/1000; 浇筑完成后立即覆盖塑料薄膜+湿麻袋或喷淋养护, 底板顶面蓄水≥150mm 保持湿润 14d 以上, 侧壁外模拆除后及时包裹保温被, 控制早期表面降温速率≤1.0℃/h^[2]。

3 大型沉箱出运关键技术

3.1 气囊移运技术

气囊移运技术适用于预制场至出运滑道或半潜驳过渡段的短距离纵横移位。其工作原理基于高压橡胶气囊的承载滚动特性: 通常布置 8~16 条直径 0.8~1.2m、长度 20~30m 的圆柱形或椭圆形气囊, 平行置于沉箱底板下预留沟槽或直接垫底; 充气顶升至沉箱脱离台座 0.3~0.8m, 底面与气囊接触形成滚动支撑, 再由前端卷扬机或后端绞车同步牵引/制动, 实现匀速前进, 移运速度一般 0.2~0.5m/min。气囊布置强调对称均匀, 间距 1.5~2.5m, 首尾错位布置防偏斜; 顶升过程分级缓慢充气, 实时监测各囊压力差≤0.02MPa 与

沉箱姿态; 移运路径需预铺平整砂垫层或钢板轨道, 坡度控制≤3%, 遇坡道或过渡段采用气囊接力或辅助台车过渡。

3.2 滑道/轨道顶推与牵引技术

滑道系统通常采用钢轨+混凝土基础或钢结构滑轨, 轨道宽轨距 1.2~2.0m, 长度视移运距离而定, 坡度控制在 1:50~1:100 以平衡顶推力和自重分力; 沉箱底板下设多组滑靴, 滑靴与轨道间涂抹减摩油脂或铺设不锈钢板+聚四氟带, 摩擦系数可降至 0.05~0.08。顶推采用多台千斤顶或液压步进式顶推器分组同步作用于沉箱后端牛腿或专用顶推梁, 分级加载, 推进速度 0.1~0.3m/min; 牵引端设卷扬机或绞车辅助同步或制动, 防止溜车。轨道布置强调高精度测量与校平, 基础沉降差≤2mm/10m, 轨面平整度≤3mm/5m; 移运过程中实时监测沉箱姿态、各千斤顶压力均衡与滑靴磨损, 遇转弯或坡度变化段采用弧形过渡轨道或辅助转向装置。

3.3 滚装上驳与浮吊出运技术

滚装上驳法是在预制场末端设置过渡滑道或滚装桥, 沉箱底板下安装多组滚轮组或低摩擦滑块; 通过前端绞车牵引或后端顶推器推进, 沉箱沿滚装桥缓慢滚装上驳, 过程控制倾角≤2°、推进速度 0.1~0.3m/min, 驳船同步压载调整吃水与纵倾, 确保沉箱重心始终落在驳船中心线附近; 上驳完成后固定沉箱于驳船甲板, 采用钢丝绳+花篮螺栓或液压夹紧装置防滑移。该法移运距离可达数公里, 适应性强, 驳船可直接拖至安装点附近。浮吊出运则适用于沉箱单体重但数量少或场地狭窄场合: 选用起重量≥沉箱自重 1.2~1.5 倍的大

型浮吊,在预制场预留吊点牛腿或专用吊耳,吊钩采用四点或六点平衡吊具,起吊前全面检查吊索具与吊点焊缝;起吊过程分级缓慢提升,严控沉箱姿态,空中短距离回转或平移后下放至驳船或直接浮运。

3.4 出运过程稳定性与重心控制

沉箱自重达数千至上万吨,重心高度通常位于箱体中上部,出运时因脱离台座、气囊顶升或滑靴支撑,底面支撑条件从面接触转为点/线接触,重心投影极易偏离支撑多边形,导致倾角迅速放大。稳定性控制以“重心投影始终落在支撑多边形内”为原则;气囊移运时需对称布置气囊群,首尾错位、间距均匀,实时监测各囊压力差与沉箱四角高差,倾角限值 $\leq 0.5^\circ$;滑道/轨道顶推强调多点同步加载,千斤顶分组压力均衡,滑靴接触面均匀,轨道基础沉降差 $\leq 2\text{mm}/10\text{m}$ 。重心控制措施包括:预制阶段精确计算并调整配重,使重心纵向偏后、横向居中;出运前用全站仪或激光水准仪实测重心位置,偏差超标即现场加配重或调整吊点;移运中设多点位移传感器与倾角仪,数据实时反馈至控制中心,超限自动报警并暂停推进。滚装上驳或浮吊吊装时,驳船压载与吊具平衡尤为关键,需预先模拟重心转移路径,确保上驳瞬间驳船纵倾 $\leq 1^\circ$ 、横倾 $\leq 0.5^\circ$ 。

4 大型沉箱浮运与安装关键技术

4.1 拖航技术

拖航技术的重点是拖带体系配置、航线组织与航行过程控制。针对大型沉箱自重大、受风浪影响显著的特点,拖航前需结合沉箱尺度、吃水状态及海域气象海况条件,对拖轮功率配置、拖缆长度及拖带方式进行专项论证,一般采用单拖或双拖组合形式以保证拖带稳定性。在拖航过程中,应重点控制沉箱浮态稳定与纵横倾变化,通过合理压载调节使沉箱保持适宜吃水与稳性裕度;同时结合潮汐、水流及风场条件优化航线与航速,避免横浪及强流对结构稳定的不利影响。对于远距离或复杂航道拖航,还需实施全过程监测与动态指挥,通过定位系统实时掌握沉箱姿态与航行状态,并在关键海域设置护航拖轮以增强操控能力。

4.2 基床准备与整平技术

基床准备与整平对沉箱受力状态影响很大,同时决定着结构整体稳定性。施工前需依据设计高程与承载要求,对基床范围内海床进行清淤与整形处理,并通过抛石或碎石铺设形成具有一定厚度与级配的基床层,以提高地基承载力并减少不均匀沉降^[3]。在施工过程中,通常采用定位船配合抛石

船进行分区抛填,并利用多波束测深或水下测量系统对基床高程进行实时检测;对局部高差区域则通过补抛或抓斗整形方式进行修整。基床整平阶段多采用整平船配合整平耙或整平梁作业,通过反复拖耙实现碎石层表面的均匀化与密实化,使基床高程控制在允许偏差范围内。对于高精度安装工程,还需在整平完成后开展复测与局部精调,以保证基床表面平整度与设计标高满足沉箱安装要求,从而为沉箱稳定就位创造良好的基础条件。

4.3 沉箱下水与就位定位技术

沉箱下水与就位定位技术的关键是浮态控制与空间定位精度的协调。沉箱下水通常采用滑道下水或浮船坞出坞方式,通过分阶段注排水调节压载,使沉箱平稳进入设计浮态,并保证结构在下水过程中的纵横稳性。进入安装海域后,依托定位船及多点锚泊系统建立稳定作业平台,通过差分定位系统对沉箱平面位置进行实时监控,并结合拖轮辅助调整沉箱姿态与移动轨迹。在沉箱接近设计位置时,通过控制压载水逐步增加吃水,使沉箱缓慢下沉并接触基床,同时利用测量系统对平面位置与转角偏差进行动态校核,必要时通过拖轮微调实现精确对位。为防止沉箱着床瞬间产生偏移或冲击,需严格控制下沉速率与姿态变化,并在沉箱稳定落床后及时复测其平面位置与顶面高程,以确保安装精度满足设计要求。

5 结语

通过优化预制阶段的结构质量控制,强化浮运拖航过程中的稳性管理,并在基床整平与沉箱定位安装环节实施高精度测控技术,可有效降低施工风险,提高沉箱安装精度与结构稳定性。随着港口工程向深水化与大型化发展,沉箱尺度不断增大,施工环境也日趋复杂,未来应持续推进施工工艺优化与技术集成,为大型沉箱结构在现代港口工程中的安全、高效实施提供技术支持。

[参考文献]

- [1] 刘晓慧,刘涛,吕俊峰.重力式码头沉箱水上出运与安装施工技术[J].中国水运(上半月),2022(11):122-125.
- [2] 李重.港航工程建设中大型沉箱预制及安装施工技术研究[J].精品,2022(7):162-163.
- [3] 王靖.重力式码头沉箱结构施工关键技术[J].江西建材,2017(21):75-76.

作者简介:白宝强(1980.5.7—),男,汉族,陕西宝鸡人,大学本科学历,工程师,研究方向:重力式码头施工技术。