



# 洋山港深水建港技术

洋山同盛港口建设有限公司

**摘要:** 依托外海岛礁的港口选址及大顺岸平面布局; 在三类海区使用 DGPS 定位系统、ADCP 测流、多波束测深声纳系统和多普勒测流验潮等技术; 具有自主知识产权的多因素耦合海洋动力模型试验体系; 泥沙问题多手段综合研究; 斜顶桩板桩墙承台结构、大直径砂桩软基加固、大直径嵌岩桩、深水倒滤层、深海造堤、粉细砂无填料振冲软基加固、深水航道技术等; 这些技术创新, 具有广阔的应用前景。

**关键词:** 深水筑港 选址及平面布局 码头和接岸结构

建设洋山深水港区是为了顺应世界经济发展, 解决目前上海港缺乏大型深水泊位矛盾的需要。工程 2002 年 6 月开工, 相继建成投产了一期、二期工程共 3km 岸线 9 个大型集装箱泊位。2006 年一期工程完成集装箱吞吐量 323 万 TEU, 第一年即超过设计能力 46% 以上。三期工程建设也已全面展开, 至此上海国际航运中心建设已取得重要的阶段性胜利。

洋山深水港区的开发建设举世瞩目, 开创了我国乃至世界建港史上在高流速、高含沙量海域, 离大陆 30km 的外海孤岛建设大型集装箱港区的先例。工程自然条件之复杂、工程量之大、工期之短、技术难度之高在我国乃至世界建港史上实属罕见。工程建设突破了多项关键技术难题, 形成了外海深水开敞水域孤岛建设大型港口工程设计施工成

套技术, 全面提升了我我国筑港科技水平。

## 高流速、高含沙量、岛群海域建港关键技术

### 1. 外海勘测新设备、新技术的广泛应用

首次在多岛屿、多汊道、高流速、高含沙量三类海区大规模同步运用星站差分双频 GPS 定位系统、声学多普勒流速剖面仪 (ADCP) 测流技术、多波束测深声纳系统和多普勒测流验潮等技术, 准确掌握了洋山海域潮位的比降、相位、潮差和潮时的差异; 克服了高浑浊度水体对声波吸收和衰减, 较好解决了测量非恒定流的技术难题, 准确反映了各潮汐通道的全断面流速和潮量。其中, 成功采用 150kHz ADCP 设备完成 90m 水深、最大测点流速达 3.22m/s 的洋山深水港东口门全断面流速、流态和地形测量, 创全

国之最。

2. 自主知识产权的多因素耦合海洋动力模型试验体系的建立

运用“综合模拟型”方法研究工程实施前后的潮流变化特征、泥沙运动过程。大范围嵌套数值模型提供物理模型边界条件,潮流和泥沙物理模型首次采用四面开放模型边界,二模型互为验证、互为补充。同时,首次采用了无网格算法的平面二维 Boussinesq 波浪数学模型计算港内泊稳条件,达到了工程实用水平。首次建立分级细化的三维潮流数学模型,补充了变态物理模型和二维数学模型难以反映的工程局部影响。

自主开发和建立的洋山深水港区潮流、泥沙、波浪等海洋动力耦合数学模型和物理模型,为港区海洋动力环境研究、港区的建设和运行提供了技术支撑。

3. 全面提升外海高含沙强潮流群岛建港工程泥沙问题研究水平

国内首次采用物理模型、数学模型、遥感技术分析、泥沙特性理论研究和外海实测资料汇总分析等方法 and 手段,探寻洋山深水港区海域泥沙来源、长江口和杭州湾对海域的泥沙贡献、悬浮泥沙空间分布、时间分布和输移方向,以及其随风、浪、流等动力条件的变化规律,预测了港池和航道的年淤积强度和年疏浚维护量,丰富了现行行业标准《海港总平面设计规范(JTJ211-99)》有关内容,提升了外海港口建设泥沙研究的理论水平。

4. 依托外海岛礁地形的港口选址以及大顺岸的平面布局,积累了岛礁群深水岸线开发经验

洋山深水港区依托大、小洋山南、北两条岛链所形成的东口窄(宽约1000m)而水深深(平均约50m)、西口宽(宽约7000m)而水深浅(平均约10m)的喇叭型地形,以及复杂海域流态和高含沙量水体等特征,依靠科学试验、现场监测、专家论证等方式,形成了“封堵汉道、归顺水流、减少淤积、安全靠泊”的洋山深水港区平面形态布置的总体原则,开创了我国乃至世界建港史上的先例。

## 外海深水码头及接岸结构关键技术

1. 首次采用斜顶桩板桩承台新结构,解决了深厚软土地基对码头结构的影响等问题

码头主体采用顺岸满堂式高桩梁板结构,后方需大面积吹填造陆,其回填厚度一般为20-26m,最大约40m。大量回填土和陆域堆货荷载的作用,造成软弱土层压缩沉降并产生侧向变形,对承台和码头桩基产生不利影响。为此提出了斜顶桩板桩承台接岸结构设计方案。该结构由斜顶桩、板桩、支承桩和承台组成。斜顶桩板桩承台结构作为接岸结构,替代了挡土围堰,可以阻隔后方高填土对码头结构的影响。通过采用数值分析与现场监测相结合的方法,解决了这一新型结构的设计关键技术问题,填补了我国的技术空白。

2. 防腐技术的全面应用,提高了结构耐久性

水工码头结构采用高桩梁板式码头结构,上部结构采

用预拌胶凝材料的C45高性能混凝土,预制构件表面还采用硅烷浸渍喷涂进行防腐以增加结构耐久性。钢管桩采用壁厚预留、防腐蚀涂料、牺牲阳极、局部灌混凝土芯等综合防腐措施,确保结构50年使用寿命。

3. 首次在外海深水区采用大直径砂桩进行地基加固

该方法主要是利用砂桩形成竖向排水通道,在上覆荷载的作用下,使软土层快速排水固结并获得强度增长;并通过砂桩部分置换原软土构成复合地基,增强地基抗剪强度,同时也产生挤密作用。施工中砂桩置换率为25%~30%,直径为1.0m,施工区域水深大于15m,入土深度一般在15~20m。通过对一期工程砂桩的施工与检测,形成了《水下砂桩质量检验评定标准(试行)》,为在后续工程中推广应用奠定了基础。

4. 首次大面积采用直径大于1.5m的钢管桩

设计大量采用直径1.7~2.0m的钢管桩。关于大直径钢管桩承载力问题,尤其对于大直径开口桩,现行规范没有明确规定。设计结合试桩确定桩长度、沉桩控制标准、桩的承载力等,为完善规范提供了实践资料。施工单位开发了国内一流的桩船设备进行施工,随船配备最先进的DM-125柴油锤和GPS沉桩定位系统,定位精度达到5cm;采用定位桩施工工艺,很好地控制了桩间距。

5. 大批量采用大直径嵌岩桩及人造基床稳桩技术

局部地区基岩裸露或覆盖层较薄,设计采用了直径2.2m大直径嵌岩桩数百根,较好地协调了打入桩段的变形问题,为在岩基上建造深水桩基码头提供了经验。对于覆盖层缺损或太薄而无法满足嵌岩桩钢管套管在水流等荷载作用下的稳定时,施工期采用人造基床的稳桩技术,与原来采用的钢筋砼套箱和灌砂振冲稳桩方案相比,在技术上安全可靠,可简化工艺,减少大型船机的使用,避免水下作业,可缩短工期、节约费用。经过施工与检测,形成了《嵌岩桩质量检验控制标准(试行)》和《嵌岩桩水下抛石(砂)基床质量检验控制标准(试行)》,为后续工程提供了技术支撑。

6. 首次在外海深水区域,结合内棱体设计开创了深水倒滤层铺设技术

在水深达20多米且横流作用下,在斜坡上铺设土工布排体及混合倒滤层有很大技术难度,该项施工为国内首创。研制合理有效的排头固定技术既避免了排体下滑,又保证排头横向尺度、减少横向收缩。选择合适的铺排时机并采用排体纵向加筋和压排技术,有效防止了排体翻折。

## 外海深水筑堤造陆关键技术

1. 首次采用外海深水大型软体排铺设施工技术

为适应洋山外海水深(10.0m以上,最深处23m左右)、流急(最快达2.2m/s)、浪大的工况和最大铺排长度200m的特点,对专用大型铺排船的锚机设备和泥浆泵充灌系统进行改进,实现大型软体排铺设过程的实时GPS动态定位监控。

2. 首次开发并应用深水袋装砂抛填施工技术



一期工程筑堤长度达到近 5.0km, 袋装砂堤心工程量达 200 万 m<sup>3</sup>, 其中深水抛填量高达 130 万 m<sup>3</sup>, 抛填强度日均 7000m<sup>3</sup>左右, 是国内以前没有的, 如采用传统水下充灌袋装砂工艺无法实施。因此通过工艺攻关和研发, 在国内首次成功应用了翻板侧翻抛袋、吊机网络抛袋、吊装预制大砂袋等施工工艺, 有效解决了粉细砂回填成陆区的防漏砂难题。

### 3.新建、改造大型耙吸挖泥船用于高回填量成陆工程

一期工程港区陆域吹填量达 2355 万 m<sup>3</sup>, 吹填最大厚度约 47.0m, 平均吹填厚度 21.0m。-8.0m 以下工程量近 1200 万 m<sup>3</sup>, 如采用常规吹填方法几乎不可能。通过方案论证和优化, 采用大型耙吸式挖泥船集中高强度抛砂, 分区、分阶段抛填技术。这是洋山一期陆域吹填工程全面完成的关键之一。

### 4.大型耙吸挖泥船艏吹和艏喷新型吹填工艺

大型耙吸船无法在水深 8m 以下施工, 因此“新海龙”由边抛改为艏喷。施工方法是利用右泥泵通过抽舱管线将泥砂输送到左泵, 再由左泵通过排泥管线从安装在船艏的口径 400mm 喷咀将泥砂喷射到吹填区。两泥泵采用低-高串联组合, 能够喷射 130m 距离。采用在水上定点、用快速接头对接的方式, 通过浮管和岸管对吹填区进行吹砂。浮管总长 550m, 到吹砂作业后期, 岸管总长约 700m, 吹砂作业最大扬程为 8.5m。大型耙吸挖泥船艏吹和艏喷工艺在国内为首次采用。

### 5.填补了深厚吹填粉细砂地基无填料振冲密实加固技术空白

洋山港区地质复杂, 吹填厚度和变化大都属国内外罕见, 而且吹填砂层多为粉细砂。建筑地基规范规定, 不加填料振冲密实法仅适用于粘粒含量小于 10% 时中粗砂地基。为此成立了课题组, 通过技术创新将无填料振冲法推广应用至粉细砂地基, 创立了无填料振冲法双点共振施工技术。

## 深水航道关键技术

### 1.航道平面设计

洋山海域唯一可开辟大型深水航道的水域为黄泽洋海域, 但存在距中日海底光缆近、水流复杂、风浪较大以及岛礁多、部分区段水深不足等制约因素。经综合比选和评估, 确定了一条航程短、工程量小、转向点少、航线顺直的进港航线, 完全满足大型集装箱船舶航行的要求。

由于现行标准《海港总平面设计规范 (JTJ211-99)》中航迹带经验公式是少量实船 (0.2~7.4 万吨) 观测所得, 本工程主设计船型比规范原实测船型大, 同时船体外形、受风面积等条件均和规范经验公式有一定差别。为此, 充分利用了船舶模拟操纵试验方法, 对船舶航迹带宽度、航行下沉量等数据进行量测, 同时参照采用国内外规范、经验公式等进行计算比对, 并广泛听取经验丰富的船长、引航员等的意见和建议, 确定了合理的航道尺度。

### 2.对疏浚区回淤机理进行科学判断, 设计淤强取值合理可信

采用经验公式、潮流泥沙模型以及对杭州湾试挖槽实

测资料分析等多种手段, 确定正常情况下洋山进港主航道淤强 1.1m/a, 一期港内水域淤强 1.76m/a。根据 2005 年 10 月验收至 2007 年 1 月的观测资料, 进港主航道累积淤积 1.27m, 和原设计取值一致。

### 3.充分应用计算机辅助决策系统, 精细化疏浚施工

充分利用传感器、自动控制、DGPS 定位系统、计算机和网络信息等技术, 耙吸挖泥船成功运用计算机辅助决策系统实现了精细施工, 减少了超挖工程量, 提高了施工精度。

### 4.导航系统性能指标优越, 助航航标链系统完整可靠

6 个雷达站、1 个 VTS 中心站完整覆盖整个洋山海域, 为国内规模最大、管辖范围最广的 VTS 系统, 且有足够的雷达重叠覆盖区, 系统可靠性高。该系统检测能力、分辨率、定位精度、跟踪能力等各项性能优越, 采取了雷达、AIS 目标融合、对外开放接口以及移动终端获取中心信息方式等新技术, 实现了 MIS 与 VTS 间、MIS 与海事局及和港口管理部门、引航站等的数据交换。

建立了一个满足不同船舶需求的视觉航标链系统, 外航道起点处设置了灯光射程 10 海里的 200 吨级大型灯船; 人工疏浚段两侧设置灯浮标示边线; 航道沿程岛礁上设置灯塔或灯桩, 确保船舶夜间和能见度较低时的航行安全; 锚地、抛泥区等水域也配布了相应助航设施。助航标志性能可靠、维护方便; 同时采用雷达应答器标示港口口门、航道转向点、危险物等, 形成完善的无线电航标链; 并采用遥测遥控技术对航标进行全面监控和管理, 可及时发现、修复航标故障。

## 经验总结

洋山深水港区一、二期工程的顺利投产及使用效果证明, 洋山深水港区建设中形成的技术创新成果不仅产生了较大经济效益, 而且推广应用前景广阔。

### 1.对新工艺、新技术开展课题研究, 进行典型施工

根据工程实际情况和建设需要, 通过组织设计、施工、监理、科研等单位形成课题攻关小组, 开展典型工程施工, 并结合模型试验, 探索符合洋山实际的施工技术和施工方案, 为后续工程积累宝贵经验。

### 2.借助“外脑”, 开展技术论证和科研攻关

洋山深水港建设, 仅仅依靠指挥部和设计、施工单位的力量是有限的, 必须开展多层面、全方位、多学科的科研工作, 重大问题咨询专家, 才能发挥无穷的创造力。洋山深水港工程从开工建设至今 4 年多时间, 组织有 100 多家专业研究机构 and 高校近 4000 人次参与科研工作, 参加各专题成果评审和咨询的专家达 1500 人次以上。专家和科研机构的介入有力地推动了工程建设顺利实施。

通过科研攻关, 攻克了一系列技术难题, 形成了一批专利, 为一期工程顺利实施提供了保证; 同时, 也形成了洋山深水港建设特有的高流速、高含沙量、岛群海域建港关键技术、外海深水码头及接岸结构关键技术、外海深水筑堤造陆关键技术和深水航道关键技术四大关键技术。