

# 中国疏浚

**热烈祝贺  
港珠澳大桥主体工程正式交工验收**

**港珠澳大桥岛隧工程技术创新和实践**  
The Technical Innovations and Practice in Island & Tunnel  
Engineering Works of Hongkong-Zhuhai-Macau Bridge Project

**贯彻绿色发展新理念 谱写流域治理新篇章**  
Implement the New Concept of Green Development  
and Write a New Chapter of Watershed Governance

**与自然共建：红树林海岸的可持续保护**  
Build with Nature: Sustainable Conservation of Mangrove Coast

疏浚创建生态  
更多疏浚动态尽在“中国疏浚”



微信号：中国疏浚  
欢迎关注留言和点赞  
官网：[www.chida.org](http://www.chida.org)

编印单位：中国疏浚协会  
发送单位：各会员单位及相关联企业、院（所）  
印刷单位：都市印工场（北京）印刷科技有限公司  
印刷日期：2018年3月16日  
印数：1100册



中国疏浚协会  
CHIDA

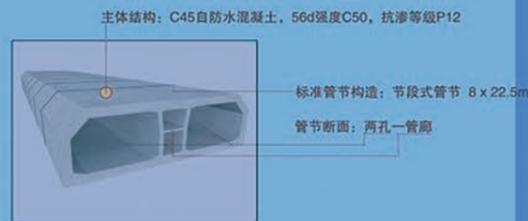
# 工程科技全面突破 筑就世界级超级工程

——中交股份联合体港珠澳大桥岛隧项目

岛隧工程的修建是世界公认施工环境最复杂、技术难度最高和建设规模最大的桥隧组合跨海通道工程。目前，国外已建成的均为浅埋式海底沉管隧道，岛隧工程不仅是我国首次建设外海海底沉管隧道，更是世界上第一次建设海底深埋沉管隧道，国际国内根本没有成熟的技术与施工经验可遵循，其综合技术难度和复杂程度已远远超越了业已建成的日本东京湾横断路（桥、岛、隧组合）、韩国釜山-巨济岛跨海通道（桥、岛、隧组合）、丹麦-瑞典厄勒海峡隧道以及土耳其博斯普鲁斯海底隧道等国际同类工程，在世界范围内可借鉴和参考成熟技术与施工经验为数不多且难以匹配。中国交建集成了国内外多方优势资源，在工程实施过程中通过不断研究论证、试验验证，开发并应用了多项具有国际领先水平的设计理论、施工方案、工艺、工法，形成了一整套成熟的海底沉管隧道设计与施工技术标准和规范，研发和制造了多项大型专用施工装备，完成了大量的技术创新，不仅填补了我国在海底沉管隧道建设领域的空白，同时也大大完善和提高了世界范围内海底沉管隧道的建设技术水平。



2011年12月21日，东人工岛副格全部振沉完毕，创造了“当年开工，当年成岛”的奇迹。岛隧项目创新提出深插钢圆筒快速成岛技术，钢圆筒直径22米，高40-50米，共120个，插入海床20-30米。单个钢圆筒的重量超过500吨。在世界第一次采用八锤联动液压振动锤快速施工，一天可以完成3-4个钢圆筒的振沉。仅用221天实现了成岛，形成开工后18个月具备沉管对接条件。



中国交建港珠澳大桥岛隧项目部世界首创了“半刚性”沉管新结构，开发了基于材料断裂力学特性的“记忆接头”。“半刚性”沉管的创新，从表面上仅仅就是保留了节段式沉管的临时预应力，仅此就已经改变了这个沉管的结构机理，融合了柔性 and 刚性沉管的优点。

由于“半刚性”沉管不再需要剪断临时预应力，这就大为提高了这一创新的性价比。因此，几乎没有花费额外的代价，就为沉管深埋找到了出路，实现了沉管深埋的技术突破。假如没有这一创新技术，就需要采用轻质材料回填，或维护性疏浚的方案，代价是十多亿人民币，再加上一年以上的工期投入。



2013年5月6日，首节外海深埋沉管E1安装成功，与西人工岛顺利对接，完成“深海初吻”。

日本沉管隧道专家花田先生指挥过水深61米的博斯普鲁斯海峡沉管隧道的安装。他认为，港珠澳的沉管安装“采用了世界上最先进的设备，沉管安装船性能非常高，应该说是世界第一的安装船。达到了世界最高水平。”



中国交建工程师随后开展了3年多的研究和攻关，创新提出了可折叠主动止水结构理念，发明了整体式主动止水最终接头技术。港珠澳大桥沉管最终接头长12米，重量超过6000吨，主体采用“钢-混三明治”结构，液压主动压接系统止水。利用12000吨全回转浮吊整体安装。在国外，按照传统的方法，完成这项安装至少需要8到10个月，但在新方法的指导下，港珠澳大桥沉管隧道最终接头实现贯通，仅用1天。

# 中交生态环保投资有限公司

CCCC ECOLOGICAL ENVIRONMENTAL PROTECTION INVESTMENTS CO.,LTD.



中交生态环保投资有限公司举行成立大会

中交生态环保投资有限公司（以下简称“中交生态环保”）是由中交疏浚（集团）股份有限公司与中交机电工程局有限公司、中和物产株式会社共同出资成立的一家从事生态环保投资业务的专业化公司。



与中国环境科学研究院共建实验室

中交生态环保借助中交动能，延伸疏浚优势，整合社会资源，把“区域和流域环境治理综合开发服务商和整体解决方案提供商”作为发展定位；坚持“资源整合、投资驱动、技术引领、运营支撑、产融结合”的发展策略；明确业务方向以水环境治理、传统水务及固废处置等为核心，联动湿地土地整理、海绵城市、海水淡化、文化旅游、现代农业、新能源等领域。



与桑德签约战略合作协议

历经一年多的快速发展，中交生态环保提出了“以投资主体一体化带动流域治理一体化”的投资新模式；构建了“四观十面两始终”流域治理体系、“五位一体”的资源支撑体系等两个新体系；探索了流域治理从单一治理向综合开发、多重价值提升式治理转变，从分段、局部治理向全生命周期、全流程治理转变，从单纯依靠治理技术向为政府和客户提供成套解决方案转变等三个新转变，推动了流域治理的商业模式创新、技术研发创新、管理创新、产品和服务提供方式创新等四个新创新；成功实施了永定河、成都市锦江和沱江等流域综合治理项目，在流域治理领域获得了较高的市场关注度和行业认知度，树立了“中交生态环保”品牌形象。



锦江绿道工程项目

## 中国疏浚，争当创新驱动发展先行军

### China's Dredging Industry Pioneering the Innovation-Driven Development

苏俊

2018 全国两会期间，习近平总书记在参加重庆代表团审议时强调，创新驱动是国策，只有新旧动能真正实现历史性转换，中国才能真正强大起来。习近平总书记还强调，创新是引领发展的第一动力，抓创新就是抓发展，谋创新就是谋未来。习近平总书记关于创新驱动发展的战略思想，对加快建设创新型的中国疏浚行业，以科技创新引领、支撑中国疏浚高质量发展具有重大指导意义。

大量史实证明，经济社会发展是以技术进步为条件。作为疏浚业的先行军，中国疏浚先祖们就是用超凡智慧和先进治水技术为世界水利、疏浚史开创了新纪元。新世纪之前的百年里，中国疏浚与世界疏浚先进方阵却拉开距离，兴起于欧洲的工业革命，催生了机械疏浚的技术发展，融合先进疏浚技术和装备研制技术的一代代挖泥船由欧洲驰向全球疏浚市场的同时，也建树了疏浚强国、强企的地位。

近十多年，中国强劲发展的大潮推

动我国疏浚跃上潮头。声名鹊起的“新海虎”、“通途”和“天鲸号”“天鲲号”等一大批自主研发的“大国重器”，成为中国疏浚技术创新进步的重要标志，反映出中国疏浚秉持创新驱动发展战略、加快提升建设现代化强国的正确路径选择。正是在众多工况复杂、充满挑战、极富创新内涵与意义的重大工程的经历中，我国疏浚企业不断发展疏浚工程的新理念、新技术和新装备，在建成一大批世界瞩目的疏浚工程的同时，也不断强化创新的信念和能力。

堪称“超级工程”的港珠澳大桥岛隧工程是我国疏浚行业登攀创新高峰的有力例证。历时七年，中国交建总工程师林敏和他所率领的团队，勇敢应对超强挑战，攻克快速成岛、精细化疏浚等众多技术难题，申报了五百余项技术专利，创造了诸如“百万方混凝土浇筑无裂缝”、6.7 公里沉管隧道“滴水不漏”等众多工程建设史上的“奇迹”。2017 年 12 月 31 日，中国国家主席习近平在 2018 年新年贺词中谈到科技创新、重

大工程建设捷报频传时提到，港珠澳大桥主体工程全线贯通，复兴号奔驰在祖国广袤的大地上……“我为中国人民迸发出来的创造伟力喝彩！”。

当今，全球疏浚正在深化转型升级，其动因既有市场需求质量内涵的提升，又主要是新一轮科技革命和产业变革孕育兴起的作用。在信息技术、人工智能、新材料、新能源的创新势能的冲激之下，疏浚行业内也必将展开“竞速跑”，中国疏浚能否抢占新手，赢得主动，这肯定是行业能否实现可持续发展的必答题。

创新是新时代的主旋律。毫无疑问，创新的进度、程度、深度和强度等，是决定新时代中国疏浚能否实现“强国梦”的基石和保障。在认可我国疏浚新世纪以来取得显著进步的同时，要清醒地看到疏浚核心技术尚存不少短板、总体创新质量并不是很高、把握前沿技术的认识不够、重大课题技术研发投入尚需加大力度等问题依然存在。当前，要切实把握创新驱动的主动权，首要环节是全行业、特别是创新体系中的决策、组织、推进的各层面，要切实系统地提高创新价值的认识，并宏观、中观到微观，先要形成共识，由此而去亲力亲为，解决制约重大关键技术创新上的人为障碍，补好短板，珍惜积极性，做好统筹组织的大文章。

重大、关键技术创新是系统工程，需要全环节融汇起来、协同而动。尤其骨干企业要发挥“动车车头”的作用，其他方面要相互呼应，主动尽责。今年以来，中国疏浚协会正在通过汇集资源、搭建平台、构建机制、促进互动等方面的工作，充分调动全新产业链的整体联动创新的积极性。

本期期刊刊登了《港珠澳大桥岛隧工程技术创新和实践》（林鸣）、《贯彻绿色发展新理念，谱写流域治理新篇章》（康学增）、《与自然共建：红树林海岸的可持续保护》（IADC 推荐）等要文，力图从创新理念、创新途径、创新实践等角度，给中国疏浚的同行们以启迪，使之进一步坚定创新的信念和信心。

2015 年 5 月 26 日，习总书记在浙江杭州高新区视察时指出的“企业持续发展之基、市场制胜之道在于创新，各类企业都要把创新牢牢抓住，不断增加创新研发投入，加强创新平台建设，培养创新人才队伍，促进创新链、产业链、市场需求有机衔接，争当创新驱动发展先行军。”

无论是着眼施工生产改进效率和质量，还是面向下一个十年中国疏浚的“新跃升”，中国疏浚都必须牢牢抓紧创新这一根本抓手，为此，中国疏浚应当也必须“争当创新驱动发展先行军”。

# 目录 CONTENTS

## 中国疏浚

CHINA DREDGING

(6期/年)

2018年第1期

(总第35期)

内部发行

主办单位：中国疏浚协会

支持单位：中交天津航道局有限公司

编委会主任：王海怀

副主任：周静波 顾明 钱献国

委员：(按姓氏笔画排序)

王良 王世峰 王柏欢

王毅 朱连宇 刘开进

李海军 肖乾 张鸿文

林懿翀 金国亮 钟文炜

侯晓明 徐德贵 黄启灶

康学增 随守信 葛新兴

霍胜勇

主编：钱献国

副主编：朱宇光 高伟 胡保安

陈晓敏 张波

责任编辑：张林 韩晓喆 陈琦

李廷跃 谢浩瀚 严杭

编辑出版发行：《中国疏浚》编辑部

地址：北京市朝阳区西坝河西里

28号英特公寓C2~603室

## 卷首语 Preface

中国疏浚，争当创新驱动发展先行军 / 苏俊  
China's Dredging Industry  
Pioneering the Innovation-Driven Development 01

## 特别策划 Special Planning

一隧联通 横亘伶仃 让世界看到中国工程奇迹 / 颜文  
One Tunnel to Connect the Lingdingyang Sea  
One Chinese Miracle to Charm the World 05

港珠澳大桥岛隧工程技术创新和实践 / 林鸣  
The Technical Innovations and Practice in Island & Tunnel  
Engineering Works of Hongkong-Zhuhai-Macau Bridge Project 06

沉管隧道结构与施工概论 / 林巍等  
Overall Discussion on Design and Structure of Immersed Tunnel 23

外海深水基槽复合边坡精确清淤技术研究 / 陈林等  
Study on Precise Dredging for Composite Slope of Deep Water  
Trench in Open Seas 30

港珠澳大桥西人工岛工程监测检测技术及应用 / 于健等  
Engineering Monitoring and Detection Technology and Application  
of the West Artificial Island of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge 35

## 管理聚焦 Management Highlights

贯彻绿色发展新理念 谱写流域治理新篇章 / 康学增  
Implement the New Concept of Green Development and Write a  
New Chapter of Watershed Governance 41

积极提高疏浚装备竞争力 助力中国疏浚创新发展 / 朱连宇  
Actively Improve the Competitiveness of Dredging Equipment to  
Facilitate an Innovative Development of China's Dredging Industry 44

## 精英风采 Member Profile 46

## 青年才俊

### Outstanding Young Talents

十年磨一剑，砺得梅花香  
——记“2017年度中国疏浚青年才俊”胡保安  
Ten Years of Hard Working To Harvest Fruitful Achievements— Hu  
Baoan: 2017 Outstanding Young Talent of China's Dredging Industry 50

## 国际视野 International Perspective

IADC 秘书长贺词 / René Kolman  
Speech of Congratulation from General Secretary of IADC 52

与自然共建：红树林海岸的可持续保护  
Build with Nature: Sustainable Conservation of Mangrove Coast 53

## 学术论坛 Academic Forum

多系统联合精测水下铁磁性小目标 / 陈存扩  
Multi system Jointly and Precisely Detecting Subsea Ferromagnetic Small Targets 60

SMW工法桩相关工程造价问题探讨 / 张坤  
Discussion on Construction Cost of SMW Pile Construction Method-Related Project 64

处理机搅拌翼数量对海上深层水泥搅拌桩成桩质量及施工速度的影响 / 高光辉  
The Influence of the Number of Wings on the Quality and Construction Speed of Deep Cement  
Mixing Clusters at Sea 68

高大薄壁砼结构防渗漏分析及治理 / 杨生朋等  
The Analysis and Management of Tall and Thin Wall Concrete Structure's Anti Leakage 72

长兴岛临港工业区葫芦山湾南岸环境治理及配套一期  
——疏浚及围堰工程大型绞吸船防石优化研究 / 周承涛  
Environmental Management and Supporting Phase of South Bank of Hulu Bay in Lingang Industrial  
Area of Changxing Island—The Large Cutter Suction Dredger Dredging and Anti Stone Cofferdam  
Project Optimization Research 79

设备管理信息化(EMIS)的应用实践与对策 / 黄伟明等  
The Application Practices and Countermeasures of Equipment Management Information System (EMIS) 84

疏浚工程中的射流冲刷研究进展 / 顾磊等  
Research Development of Water Jets Scouring in Dredging Engineering 88

## 百年百典 Centennial Classics

疏浚创建新生态——2017年度十大新闻  
Dredging Creating New Ecology—Top 10 News of 2017 93

## 征稿启事 Notice of Inviting Contributions

为做好编辑工作，中国疏浚协会秘书处向广大会员单位长期征稿。稿件一经录用即付稿酬，其版权归中国疏浚协会所有并有权在所属微信公众号和网站等转载使用。

征稿要求：文章条理清晰、简明严谨、资料数据正确可靠，稿件通过电子邮箱发送。除论文外，稿件字数一般为2000-2500字。来稿以Word录入排版。来稿须附作者(或第一作者)简介，即作者姓名、毕业院校、单位职务(职称)、个人联系电话(电子邮箱)和作者正装两寸彩色照片一张；来稿可附图片2-3张并有文字说明。

论文除上述要求外，必须有中英文摘要和关键词；计量单位和符号等一律使用国际通用标准或国家法定计量单位；文中引用参考文献应依照先后顺序用阿拉伯数字加方括号在右上角标出，并在论文末尾按标注顺序给出引用参考文献的作者名、引用文题名、出版单位以及出版日期。论文字数一般为3000-5000字，由作者单位推荐至中国疏浚协会秘书处并出具推荐信(不含约稿)。推荐信必须有作者单位技术总负责人签署同意推荐的意见；论文作者对文章内容的真实性、可靠性和学术性等负全责。论文收到后，中国疏浚协会秘书处指定专家负责审核。

# 一隧联通 横亘伶仃 让世界看到中国工程奇迹

One Tunnel to Connect the Lingdinyang Sea,  
One Chinese Miracle to Charm the World

栏目策划人 颜文

“一隧连东西，汪洋变通途，此国之华也。”2018年2月6日，港珠澳大桥岛隧工程及整个主体工程正式交工验收。倘若把这项历时七年，被英国《卫报》称为“现代世界七大奇迹”的超级工程比作一项皇冠，岛隧工程恰似皇冠上的一颗明珠，其技术复杂性、施工难度、施工风险都极具挑战性，自开工之日就备受世人瞩目。

“要用中国人自己的勇气和智慧，去攻克世界级难题，在‘唯一’中创造‘第一’。”面对国外公司的技术封锁，中国交建总工程师、港珠澳大桥岛隧工程项目部总经理林鸣带领团队攻坚克难，勇攀技术高峰。数年时间里，林鸣总所在的团队创新采用了复合基床+复合地基的基础设计方案，构建了沉管基础施工监控管理体系，研制了深水抛石整平船、双体式沉管安装船、定深精挖船、清淤船、沉管精调系统、拉合系统、沉管沉放水下测控系统等十几项国内首创、世界领先的先进技术和大型专用设备，为港珠澳大桥岛隧项目的建设提供强有力的支撑。

本期特别策划栏目，我们将聚焦这项世纪工程。我们邀请到林鸣总为我们讲述港珠澳大桥岛隧工程技术创新和实践，并从沉管隧道结构与施工、外海深水基槽复合边坡精确清淤、工程监测及检测技术等方面选取技术论文，与大家深入探索港珠澳大桥岛隧项目的“科技密码”。



林鸣

中国交通建设股份有限公司总工程师，  
港珠澳大桥岛隧工程项目总经理、总工程师，  
教授级高级工程师

Lin Ming

Mr Lin Ming is chief engineer of China Communication Construction Company, general manager and chief engineer of Hongkong-Zhuhai-Macao Island and Tunnel Project, and a professorate senior engineer.

## 港珠澳大桥岛隧工程技术创新和实践

### The Technical Innovations and Practice in Island & Tunnel Engineering Works of Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge Project

#### 1 工程概述

##### Project Overview

港珠澳大桥跨越伶仃洋，连接香港，珠海和澳门，全长超过 50 公里，设计寿命 120 年，双向六车道 100 公里高速公路标准。港珠澳大桥采用桥、岛、隧组合方案，全桥包括四个人工岛、四条隧道和三十多公里的桥梁。由广东、香港、澳门和海中桥隧多个主体分别建设。

Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge, spanning lingdinyang sea, links Hongkong, Zhuhai and Macau and is of total length of over 50 km, design life of 120 years and applies standard of dual six-lane expressway with design speed 100 km. Hongkong-Zhuhai-Macao bridge, a combination of bridges, islands and tunnels, consists four man-made islands, four tunnels and over 30 km long bridges, which are constructed respectively as the link lines in Guangdong, Hongkong and Macau and the marine crossing bridges and tunnels.

为同时满足香港机场航空限高要求，以及广州港通航 30 万吨级航道要求，大桥穿越伶仃西航道和铜鼓航道段约 6.7km 采用沉管隧道方案。为实现桥隧转换和设置通风井，在隧道两端各设置一个长 625m 人工岛，除人工岛和隧道

之外的其余路段约 22.9km 采用桥梁方案。

In order to meet the requirements on the aviation limit of the international HK airport and the demand of navigation channel to accommodate 300000 tonnage vessel at Guangzhou Port, approximately 6.7km immersed tunnel solution is applied to cross Lingdinx Channel and Tonggu Channel to replace the bridge section. To achieve the interchange between the bridge and the tunnel and to build ventilation shaft, one 625m man-made island is provided at each entrance of the tunnel. The remainder of link is all bridges of 22.9km in length except for the man-made islands and the tunnel.



图 1-1 港珠澳大桥总平面布置示意图

Fig. 1-1 Schematic of General Plane Layout of Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge

港珠澳大桥最有特色的部分是岛隧工程，该工程也是大桥的控制性工程，主要包括2个面积10万 $m^2$ 的人工岛和一条6.7km的沉管隧道。人工岛的软土厚度达到30~50m，采用深插钢圆筒技术实现快速成岛。沉管隧道由33个节段式半刚性预制管节组成，标准管节长180m，自重约76000吨。为了预留30万吨级航道，沉管隧道在世界上第一次被埋入海床下超过20米深处，管节沉放水深也达到了约50米。

The most characteristic attraction of Hongkong-Zhuhai-Macau Bridge is the island and tunnel works which is also the controlling part of the whole project. The scope of the island and tunnel construction comprises two man-made islands with each in areas of 100000  $m^2$  and one 6.7km long immersed tunnel. The weak soil at the man-made island is of depth up to 30~50m and the constructional technique is used that large steel cylinders are driven to depth to form the island in high speed. The immersed tunnel is made of 33 elements of segmental, semi-rigid and precast type with each standard element of 180m in length and dead weight around 76000 tons. To reserve the navigation Channel for 300000 tonnage vessels the immersed tunnel is, for the first time in the world, placed at such a deep location over 20m below the seabed and the element is immersed at the location where water depth is up to around 50m.



图 1-2 港珠澳大桥岛隧工程效果示意图

Fig.1-2 Schematic of image of the island & tunnel works

港珠澳大桥沉管隧道创造了四项第一：最长、最大跨径、最大埋深和最大体量。项目规模庞大，一国两制三地共建，建设管理协调难度大；120年设计使用寿命，技术难度和质量标准高；外海作业环境困难，安全风险高；国内首次

实施先铺法长大沉管隧道，未知因素多而复杂，总体设计施工风险极大。

Four world records have been achieved in the construction of the immersed tunnel of HZMB: namely the longest span, the deepest embedment and the greatest weight. This project is of mega scale, is jointly constructed by the Three Regions implementing different two systems in one Country, which brings big challenge to constructional management in addition to 120 years' design life, technical challenge and applied more strict quality standard, hardship of marine works at open sea and high safety risks, first use of initial pavement method to long and large immersed tunnel in China. Uncertainties are many and complex which result in extremely high risks in the design and construction generally.

具体来讲，工程的主要特点和面临的风险挑战包括如下几个方面：

Specifically, the main salient features and risk challenges are following aspects:

### 1.1 外海环境条件恶劣

Adverse open sea conditions

施工现场距大陆30km，典型的外海无掩护和孤岛作业，受台风、热带气旋、短时雷暴等恶劣天气影响大，施工周期长，需跨越多个台风季节。

The jobsite is 30km offshore and typical shelter-less open sea operation and isolated island work are required which are highly vulnerable to extreme weathers as typhoon, tropical cyclone and instant thunder storms in addition to lengthy construction period experiencing many typhoon seasons.

施工中多次遭遇因上游采砂等原因导致的异常高强度回淤，以及不明原因引起的最大波高为2m的异常波浪，给施工质量、进度和安全带来极大的威胁。

During the construction period, extremely high sediment induced by sand mining in the upper stream and the abnormally high waves up to 2m for unknown reasons were encountered and threatened the works quality, progress and safety.

### 1.2 独特的“四深”条件

The unique four exploratory investigations

深埋、深厚软土、深水 and 深槽特点是本工程有别于其他沉管隧道的最大的不同，沉管顶部最大覆土埋深约30m，施工最大水深近50m，基槽最大高度约40m，隧道坐落于30m的深厚软基上，结构设计和施工难度极大。Deep embedment, deep and thick layers of weak soil; deep water and deep foundation trench are four salient features which distinguish mostly this project from other immersed tunnel projects. In the given immersed tunnel the greatest depth of the backfilled soil cover on top of the tunnel roof reaches up to around 30m and works is carried at the maximum water depth of 50m; the foundation trench is of maximum depth around 40m. The tunnel sits on ground of weak soil as deep as 30m. Thus, the tunnel design and construction are highly challenging.

### 1.3 通航安全风险极高

Extremely high safety risk of navigation

施工水域位于珠江口航道运输繁忙的水域，日船舶交通量达4000艘次，属水上交通安全事故频发敏感区，水上安全风险极大。

The construction site at sea is located at Pearl River estuary, the water areas of busy waterborne traffic with daily vessel traffic volume up to 4000 vessel time and this water area is traffic accident sensitive and safety risk at sea is extremely high.

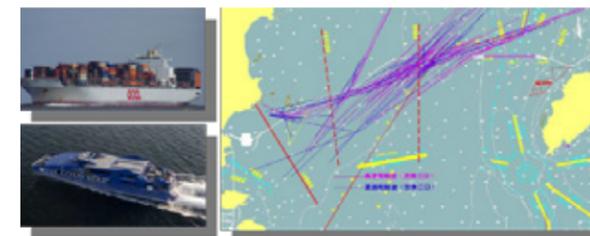


图 1-3 港珠澳大桥岛隧工程所在水域交通示意图

Fig.1-3 Schematic of waterborne traffic at the jobsite of island & tunnel

### 1.4 环境保护要求极严

High demand for environmental protection

工程地处中华白海豚核心保护区，环保要求极为严格。The site is located at the China White Dolphin

Conservation Zone which demands highly environmental protection.



图 1-4 中华白海豚自然保护区

Fig.1-4 China White Dolphin Natural Conservation Zone

### 1.5 专用设备研发挑战极大

High challenge to special plant development

国内第一例、世界第二例实施工厂法管节预制，预制工厂耗资10个亿，特别是曲线管节的工厂法预制更是世界首例，预制难度和质量保证风险极高。

The technique of factory-based precast element is applied to the immersed tunnel prefabrication first time in China and second time in the world. The prefabricating factory costs 1 billion. In particular, the method of prefabricating curve element in the factory set the first example in the world due to high difficult level of the prefabrication and extremely high risk in quality assurance.

需要自主开发包括基槽、基础、预制、安装和回填等工序所需的全部水上专用船机设备和专项系统，设备研制费用30个亿，其中所蕴含的技术挑战前所未有。

All the waterborne special vessels, plant, machines and special systems required by construction procedures including the foundation trench, foundation, prefabrication, installation and backfill need independently proprietary development and the plant development and manufacture cost 3 billions and contain unprecedented challenges.

### 1.6 先铺基础质量标准极高

Extremely high quality standard for initial placement of gravel bed

国内首条先铺法基础沉管隧道，6km范围内地质条件复杂，差异沉降控制难度大，50m水深碎石基床铺设精度要求小于4cm，质量标准高，技术挑战和风险大。

The earlier placement of gravel bed is first time

applied to the foundation of the immersed tunnel in China. The ground conditions within range of 6km are complex and differential settlements are hard to control. The tolerance of the gravel placement at water depth of 50m is required to be less than 4cm thus the high quality standard is applied and, high technical challenge and risks are imposed.

### 1.7 巨型沉管安装难度极大

Extremely high challenge in mega element installation

33个长180m宽38m高11.4m排水量为8万吨的巨型沉管,要求在外海复杂波流条件和50m水下安装精度达到厘米级,技术难度和安全风险可谓空前。

Total 33 large elements with each 180m long, 38m high, displacement 80000 tons are required to be placed under conditions of complex clutter waves and water depth 50m and the accuracy of installation shall reach order of centimeter. It technical challenge and safety risk are unprecedented.

一般沉管隧道的建设工期都在5-6年以上,而港珠澳大桥的6.7公里沉管隧道再加上两个人工岛,总工期才只有七年时间,极具挑战性。为了应对这些挑战,工程建设期间,一百多项试验研究被完成,500多项技术专利被创造,多项设计和施工技术取得了突破。

Generally, the immersed tunnel construction period is over 5-6 years. However, the 6.7km long immersed tunnel plus two man-made islands take only seven years in total, which is a high challenge. To cope with these challenges over 100 tests and studies are completed during works construction time; over 500 technical patented innovations are achieved and many design and constructional technical breakthroughs are achieved.

下面简要介绍人工岛和隧道建设当中取得的几项技术突破和创新实践情况。

The technical breakthroughs and innovative practices achieved in man-made islands and tunnel construction are briefly introduced hereinafter.

## 2 快速成岛技术突破

### Technical breakthrough of fast island formation

常规的抛石斜坡堤和沉箱直立堤筑岛方式存在开挖方量大、岛内止水和深基坑支护难度大、工期长、环保问题突出等诸多不足,无法满足本工程的安全、环保和进度要求,为此,创造性提出了大直径深插钢圆筒快速成岛技术。采用的钢圆筒直径22米,高40-50米,两个岛共计使用120个,插入海床20-30米,单个钢圆筒的重量超过500吨。钢圆筒之间采用宽榫槽与弧形钢板组合“刚柔并济”的副格结构相连,通过钢圆筒和副格,构筑安全、可靠的施工期隧道深基坑止水围护结构,实现快速成岛止水的同时,避免了传统围护结构的内部支撑结构,扩大了岛上隧道施工的作业面,并为岛内、外同步施工提供了条件。

Traditional methods of using riprap slope embankment and caisson vertical embankment for island reclamation have many disadvantages as large excavation volume, difficult water stop in island and difficult support to deep trench, long works period and environmental problems and cannot satisfy requirements in connection with the given project safety, environmental protection and works progress. For this purpose the technique of fast island formation by use of deeply driven large cylinders is innovatively proposed. By the innovative technique, the applied steel cylinder of diameter 22m, height of 40-50 meters is applied and total 120 cylinders are used in the two islands. These cylinders are driven deeply into places 20-30m below the seabed and individual cylinder weighs over 500 tons. Wide mortise grooves are connected with arc shaped steel plate composed deputy lattice structure of both rigidity and flexibility. Both the steel cylinder and the assistant lattice structure compositely form a safe, reliable waterproof fencing structure of deep foundation trench during construction period. Meanwhile achieving rapid formation of island and waterstop it eliminates internal strut structure of fence structure in tradition and extends tunnel operation space and also provides condition for construction in and out of island.

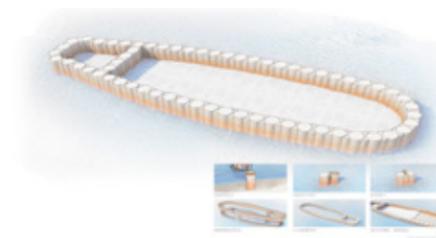


图 2-1 深插钢圆筒快速成岛技术

Fig.2-1 Technique of fast island formation by driven cylinder

在世界上第一次采用八锤联动液压振动锤快速施工,一天可以完成3-4个钢圆筒的振沉。其中,快速成岛的效率受制于钢圆筒的制造和运输效率,为了保证工效,振华重工上海长兴岛基地被选择用来制造钢圆筒,每个月制造25个,该基地的二十多艘70000到90000t的远洋运输船保证了钢圆筒的运输。两个岛的成岛建设时间不到7个月,创造了当年开工、当年成岛的奇迹。

The first time in the world hydraulic vibratory hammer consisting of eight-hammer interconnected is used to speed up construction. 3-4 cylinders can be driven in one day. The working efficiency of fast island formation is limited by manufacture and transport efficiency. To ensure working efficiency ZPMC is selected to produce the steel cylinder in Shanghai Changxing Island, where 25 cylinders are produced every month. Over 20 ocean-going vessels of tonnage 70000 to 90000t each completed transportation. The total construction time of the two islands is less than 7 months, creating miracle of works commencement and island formation in the same year.



图 2-2 首个钢圆筒

Fig.2-2 the first cylinder



图 2-3 最后一个钢圆筒

Fig.2-3 the last cylinder

相比于传统工法,钢圆筒快速成岛技术让工期提前了两年,避免了大量船机设备、人员长期海上作业产生的高

能耗和对环境的污染;大幅减少了水下开挖和抛填土方量,将对海洋的污染降到了最低,最大程度地维护了中华白海豚保护区内的海洋和生态环境,真正体现了绿色、节能、环保的设计施工理念。

Compared with traditional methods, the technique of fast island formation by driven cylinder shortened two years, eliminates high energy consumption and environmental pollution caused by use of a lot of vessel and equipment and long-term marine operation, greatly reduces submarine dredging and reclamation earthwork, which minimizes marine pollution and greatly protects the marine and ecological conditions of China White Dolphin conservation zone. The concept of green, energy economical and environmental protection design and construction is achieved in the true sense.

### 3 精细化疏浚技术突破

#### Technical breakthrough in accurate dredging

沉管隧道基槽最深处标高约-46m,最大开挖厚度约35m,挖泥总量约2900万m<sup>3</sup>。基槽的纵横向皆设计有多种坡率组合,开挖难度较大。按照施工顺序划分为粗挖、精挖及清淤三道工序,其中边坡稳定性、槽底标高和平整度和清淤是基槽施工的关键控制点。

The lowest level of the immersed tunnel foundation trench is about -46m with maximum dredged depth around 35m and total dredging volume around 29million m<sup>3</sup>.The trench is designed to have combinations of various grades longitudinally and transversally. Thus the dredging is a challenge. The three dredging procedures are divided into rough dredging, accurate dredging and sediment removal. Of the above procedures slope stability, trench bottom level and flatness and sediment removal are critical to trench works.

#### 3.1 基槽粗挖技术

Technique of rough dredging of trench

基槽粗挖是指自然泥面至离设计底标高约2m间泥层的开挖。选用舱容10000m<sup>3</sup>以上具有高精度施工能力和特定功能的大型自航耙吸挖泥船施工。

The rough dredging of trench refers to removing

the mud between the mud surface to the level around 2m above the design bottom level. Large self-propelled suction dredgers with hold capacity above 10000 m<sup>3</sup>, with high accuracy construction capacity and special function are selected for construction.

利用船舶动力定位、动力跟踪功能 (DP/DT), 预先设定边坡开挖线, 船舶智能化系统根据风、流等外力因素自动控制各种动力设备, 确保耙头始终沿设定边坡开挖线施工, 施工平面精度比人工模式提高一倍。

The slope dredging line is set in advance by vessel dynamic positioning, DP/DT. The vessel intellectual system automatically controls dynamic equipment by external factors as wind and currents to ensure the suction head always heads along preset dredging line of slope resulting in plane accuracy of excavation doubly higher than result by hands.

利用船舶耙管绞车自动控制系统 (SPWC), 控制波浪补偿器的位置, 使耙头处于安全角度范围, 并控制在期望的疏浚深度; 通过设定分层开挖深度, 利用超深报警系统预防超深开挖, 保证施工的垂直精度。

The SPWC on board vessel controls the wave compensator position to enable the suction head to be in the range of safety angle and controlled in the desired dredging depth; The vertical dredging accuracy is assured by setting dredging depth layer by layer and use of super depth alarming system to prevent over depth dredging.

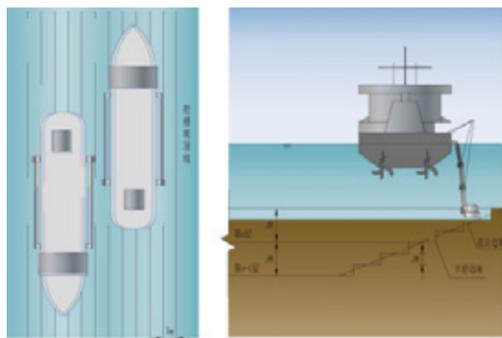


图 3-1 耙吸挖泥船边坡作业图

Fig. 3-1 Suction dredger's work on side slope

### 3.2 基槽精挖技术

The technique of accurate dredging in foundation trench

精挖是指粗挖完成后至设计底标高间泥层的开挖。配备了 30m<sup>3</sup> 大型抓斗船进行基槽精挖, 该船具备钢桩定位和锚缆定位功能, 配备海底地形声纳实时探知系统, 实时显示开挖过程中水下地形, 新开发了定深、平挖功能, 在 50m 水深条件下基槽开挖精度可以控制在约 ±50cm 以内。The accurate dredging refers to the dredging of mud to the design bottom level after completion of the initial rough dredging. Large grab dredger with capacity 30m<sup>3</sup> is used in accurate dredging of the trench. This vessel possesses functions of steel pile positioning and anchor chain positioning in addition to sonar real-time exploring system for sea bed terrain detection showing in real time the submarine terrain during dredging process. Newly developed depth positioning and horizontal dredging function allows to control the dredging accuracy within around ±50cm of accurate dredging of trench under water depth of 50m.



图 3-2 抓斗式挖泥船定深平挖示意图

Fig. 3-2 Schematic of grab dredger's horizontal dredging at fixed depth

突破传统抓斗挖泥船挖掘控制模式, 研发了新的高程控制模式, 采用 RTK-GPS 控制高程基准, 通过计算机与设备微调系统, 增加了超深限制、综合偏差调整等功能, 实时控制抓斗吊缆长度、抓斗闭合轨迹, 消除在船舶施工时受潮位、风浪流、斗重变化、船舶吃水等因素影响, 实现自动定深和闭斗过程斗唇轨迹线水平移动平挖功能, New level control mode is developed by breaking through the traditional grab dredger's control mode. RTK-GPS is used to control the level of reference and the system is micro adjusted by computer and equipment thus increasing functions of the limit of

excessive depth, comprehensive error adjustment by real time control the sling length of grab and trace of opening and closing of the grab. Such influences of tide position, the wave induced current, change of grab weight and vessel draft on vessels in construction are eliminated. Thus, the function of automatic depth fixing and horizontal dredging by horizontal moving of the grab closing and opening trace is achieved.

### 3.3 基槽清淤技术

The technique of sediment removing from the trench

清淤是指粗挖结束后至精挖前对基槽淤积泥沙的清除, 以及精挖后对基槽底和基床面回淤的浮泥层的清除。通过研制深基槽和基床面专用清淤装备, 具备了在深槽高边坡、块石基床面和碎石基床面的组合式高效清淤能力, 可以做到 50m 水深精确清淤而不扰动已铺设的碎石基床面。

The sediment of removing refers to removing the mud and sand sediment on trench after end of rough dredging before accurate dredging and also the removing the surface mud on the trench bottom and trench surface after end of accurate dredging. The developing special dredging equipment for special use of deep trench and foundation bed surface this equipment possess capacities of high efficiency dredging on both a high slope of deep trench and block rock foundation bed surface and gravel bed surface and can make accurate dredging under 50m depth without disturbing finished gravel bed surface.

对大面积大量的槽底和边坡回淤, 在国内首次成功应用具有动力定位和动力跟踪功能的大型耙吸船完成清淤, 在保证边坡稳定的前提下实现了清淤的高效率。

For the mass volume of sediment in large area on trench bottom and side slope, the first time the large suction dredger with dynamic positioning and dynamic tracing function is successfully used to complete sediment removal and achieves high efficiency in dredging under the precondition of ensuring the stability of the side slope.

对块石基床面上的清淤采用专用定点清淤船“捷龙”轮完成, 该船充分考虑了对基床面的保护, 具备先进的定点吸淤能力和高效的清淤效率, 满足 50m 水深精确清淤要求, 通过音叉式高精度密度仪、产量计、高清摄像头实现清淤效果的实时监测, 对高差相对较大的块石基床面清淤和板结程度较高的稠密淤泥等工况下的清淤工况适应性良好, 同时可以有效避免清淤施工中对已安沉管钢封门造成破坏等重大风险的发生。

For sediment dredging of block rock bed surface, the special position fixing dredger named "Jie Long" is used to complete the dredging work. The dredger possesses advanced dredging capacity at fixed point and high efficiency of dredging after taking full consideration of protection of the gravel bed surface and meets the requirement on accurate dredging under 50m water depth. By sound fork high accuracy and density instrument, production meter and high resolution camera head real time monitoring on dredging result can be realized and it has sound adaptability to the dredging loading cases including: the dredging of the block rock with the greater level distance and dense sediment of plate structure. Meanwhile it can effectively eliminate the major risks of damaging to steel bulkhead of element installed during construction of dredging.



图 3-3 港珠澳专用清淤船示意图

Fig. 3-3 The schematic of special dredger for HZMB

对碎石基床面上的清淤则采用新研制的平台式外海深水先铺碎石基床面清淤装备完成, 该装备集定位测控、深水定点高精度清淤、碎石铺设整平等多功能为一体, 实现了在不扰动先铺基床碎石情况下高效清除回淤物, 可以清除水深 10-50m 范围内管节碎石垫层上淤淤泥, 具有一天清除一个船位碎石垫层上淤泥的能力, 解决了碎石基床面上的清淤难题。

For the sediment removing on the gravel bed, newly developed platform style gravel bed surface dredging at deep water of open sea is used to complete the work. This equipment integrates multiple functions as high accuracy of sediment removing at fixed water depth and leveling and placing gravel bed. Thus realizing high efficiency in sediment removing without disturbing the gravel bed placed previously and can remove the sediment on gravel bed surface within range of water depth between 10-50m and this said equipment is capable of removing the sediment on the gravel bed surface in space of one vessel berth thus resolving the challenge of sediment removing on the gravel bed surface.



图 3-4 碎石基床面无损清淤装备

Fig. 3-4 The dredging equipment with damage-free on gravel bed surface

此外，还在深水基础淤积和控淤的研究方面取得了领先的成果。通过研究先铺碎石基床的淤积机理，提出了回淤环境下组合基床的淤积设计流程及方法；通过创造性地将全断面深水防污屏应用于沉管碎石基床的防淤工作，减淤效果达到 50%，成功解决了人工岛岛头段基础防淤控淤

难题，为沉管安放提供了重要保障。

Furthermore, leading achievements in study of accommodating and controlling sediment on deep water foundation are obtained. By studying mechanism of sediment accommodating on the previously placed gravel bed the design flow and method of sediment accommodating on composite foundation bed under sediment condition is proposed. By innovative application of full-section pollutant preventing screen to the sediment regulation on the gravel bed of immersed tunnel, the sediment reduction effect reaches 50% thus successfully solving the challenge of sediment prevention and control on the foundation of head of the island and then providing important indemnity for placement of tunnel.



图 3-5 现场防淤屏安放及工作状态

Fig. 3-5 The installation and working situation of sediment screen on site

通过研发回淤预警预报系统，解决了深槽中出现的异常回淤问题。基于现场回淤精细化观测大数据，创新性研发了多因素复合型基槽回淤预报模型系统，预报精度达到厘米级，极大地提升了回淤预报的精确度和时效性，为沉管浮运和安放提供了重要保障。

Through developing sediment alarming system, abnormal sediment problem arising in deep foundation is solved. Based on the large data of observation of site sediment, multi-factor compound trench sediment forecasting model system is innovated, which enables forecasting accuracy up to magnitude of centimeter, thus greatly improving the accuracy and real time effectiveness of sediment forecasting and then providing important assurance

for tunnel transportation and installation.

#### 4 深水基础技术突破

##### Technical breakthrough in deep water foundation

在港珠澳大桥岛隧项目之前，在软土地基上建沉管隧道，已有的工程经验是隧道沉降量值约为 20~30cm。考虑港珠澳大桥沉管隧道最深 30~50m 的软土地基条件（并且受到回淤影响），超过 20m 的上覆荷载，以及基础施工的水深 50m，沉降风险是难以预测的。

Before the advent of island and tunnel project of HZMB, the immersed tunnel is founded on weak soil foundation by which the available engineering experience shows that the tunnel settlement value is around 20-30 centimeters. Taking into consideration of the 30-50cm soil ground condition (and subject to sediment influence) at the maximum depth at the location of the tunnel, the covering load above 20m and 50m water depth for works construction the risks of settlement can hardly predicted.

为了本工程隧道基础的可控，创新提出了床+复合地基的方案，采用 PHC 刚性桩、高喷柔性桩、挤密砂桩 (SCP) 复合地基逐渐过渡到天然地基的沉管隧道组合地基，以及基于块石夯平基层与垄沟相间碎石整平面层的沉管隧道新型组合基床的全新地基基础设计方案，实现了深水软土沉管隧道沉降均匀过渡。同时，开发了外海深水基础施工成套技术和装备，形成了沉管基础施工质量管理体系，使绝大部分管节差异沉降控制在设计要求的低水平之内。一系列有针对性的研究和创新，推动了深水基础沉降控制技术的进步，取得了 33 节沉管的实测沉降在 5cm 左右，差异沉降小于 1cm 的重大成果和突破。

To be able to control the tunnel foundation, the solution of gravel bed + composite foundations is innovatively proposed. According to the brand new foundation design, the compound foundations containing PHC rigid pile, sprayed flexible pile, SCP transits gradually to natural ground and the brand new composite bed is based on block rock level compacted base course and groove and embankment alternating gravel bed leveled, thus

realizing uniform transition of tunnel settlement founded on weak soil in deep water. Meanwhile the complete set of constructional technique and equipment for deep water foundation located at the open sea is developed and immersed tunnel construction quality management system is established, by which the differential settlement of majority elements is controlled at the lower level of the design. A series of purposeful studies and innovations push forward the technique of settlement control of the foundations at deep waters. Accordingly, the significant result and breakthrough of measured settlement around 5cm for the total 33 elements and differential settlement less than 1cm are achieved.

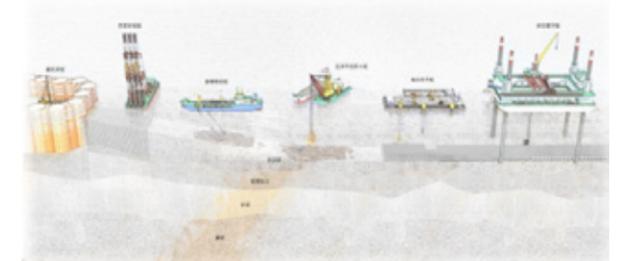


图 4-1 沉管基础和施工装备

Fig. 4-1 The IMT foundation and constructional equipment

#### 4.1 复合地基处理技术

Compound foundation treatment techniques

人工岛部分地基处理采用了插排水板联合井点降水堆载预压方案，基于上述快速成岛技术提供的封闭钢圆筒围堰，创新提出了利用深井降水快速密实回填砂、同步大超载比预压加固 50m 厚软土的技术，通过深井降水产生的渗透力密实饱和和回填砂的同时，实现了对下卧软土地基的大超载比预压加固。该方法经济性好，大规模缩短了施工工期，显著减少了工后沉降，使工后残余沉降从 50cm 减至 20cm 以内。

The man-made island foundation treatment adopts the solution of driven drain plate coupled with dewatering at well points plus superimposed loading. Based on above-mentioned fast island formation technique by use of enclosed cylinder cofferdam the technique is raised by which 51m thick underlying weak soil is

consolidated by large overloading ratio and pre-compressing simultaneously and use of deep well for dewatering to rapidly densely compacting the backfilled sand thus achieving the consolidation of underlying weak soil foundation through over loading and pre-compressing. This method is well economical, greatly shortens the constructional period, dramatically reduces post-work settlement and reduces post residual settlement from 50cm to 20cm.

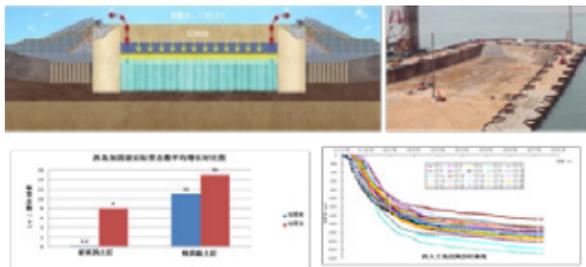


图 4-2 深插排水板 + 深井降水地基处理示意图

Fig.4-2 The schematic of foundation treatment by deeply driven drain plates + dewatering at deep wells

沉管隧道地基处理采用复合地基和天然地基相结合的方案。沉管隧道中间段采用开挖后的天然地基，与中间段相邻的沉管隧道海上部分采用变置换率的挤密砂桩复合地基，沉管隧道岛上段采用高喷柔性桩复合地基，隧道暗埋段采用 PHC 刚性桩复合地基。其中西人工岛过渡段隧道和东人工岛过渡段隧道采用挤密砂桩 + 水下堆载预压复合地基，挤密砂桩复合地基方案典型断面示意如图。

The IMT foundation treatment is the combination of compound foundations and natural ground. The middle section of the tunnel is founded on natural ground dredged and its adjacent parts at sea are founded on composite foundation containing SCP with variable replacement rate while the island section is founded on sprayed flexible piled foundation and the cut and cover section is founded on PHC rigid piled compound foundation. The transition section on West Island and the transition tunnel section in East Island are founded on SCP + submarine over loading and pre-compressing compound foundation. The typical section of SCP compound foundation is shown in schematic figure.

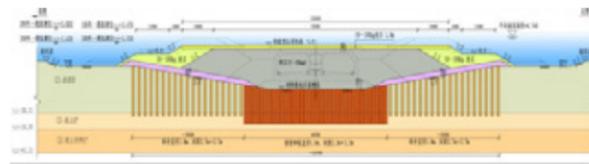


图 4-3 挤密砂桩 + 堆载预压地基处理断面图

Fig.4-3 Section of foundation treatment by combined SCP + over loading and pre-compressing

海上挤密砂桩 (SCP) 是一种地基加固新技术，它通过振动设备和管腔增压装置把砂强制压入软弱地基中形成扩径砂桩，从而增加地基强度，加快地基固结，减少结构物沉降，提高地基的抗液化能力，具有施工周期短、加固效果明显，工序可控性好的特点。可广泛应用于对砂性土、黏性土、有机质土等几乎所有土质的地基加固处理。与一般砂桩相比挤密砂桩桩体的密实性高，加固的置换率可达 60 ~ 70%。

SCP at sea is new technique of foundation improvement by which the sand is forced into weak soil to form sand pile with enlarged diameter by vibratory equipment and the pressure increasing device in tube chamber so as to increase ground strength, accelerate foundation consolidation, reduce settlement of the structure, improve the anti-liquefaction power of the soil. This method is of such advantages of short constructional period, notable consolidating effect and sound controllability of constructional procedures. Compared with common sand piles, SCP is of high density with replacement rate up to 60 ~ 70% in improvement.



图 4-4 挤密砂桩船

Fig. 4-4 SCP vessel

#### 4.2 组合基床技术

The technique of composite foundations

为了提高基础施工的容错性及基础纳淤能力，解决并控制沉管隧道深基槽基础不均匀沉降控制问题，沉管隧道基础隧道基础采用先铺法组合基床施工，在开挖完成的基槽内抛填 2.0m 厚的 10 ~ 50kg 块石，进行水下夯平后再铺设 1.3m 厚的碎石基床。碎石基床采用横向垄沟形式，标准垄顶面宽度为 1.8m，垄与垄之间沟宽度为 1.05m。标准段沉管隧道基础结构如图所示。

To improve the compatibility of the foundation construction and sediment accommodating ability of the foundation and solve and control the differential settlement of the foundation below the trench, the IMT foundation adopts previous bed placement. Namely 10 ~ 50kg rocks are filled in the dredged trench to depth 2.0m which is compacted in level underwater before placing the 1.3m depth gravel bed. The placed gravel bed is in form of horizontal furrow with typical ridge surface width of 1.8m and ditch width 1.05m between the ridges. The foundation structure of typical tunnel section is shown in figure.

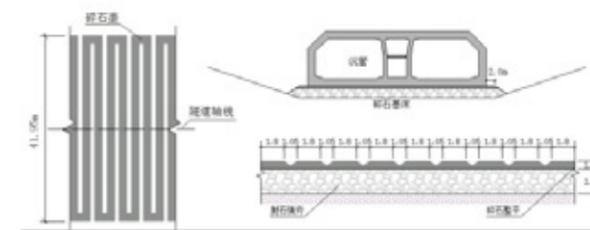


图 4-5 标准段沉管隧道基础结构图

Fig. 4-5 Typical IMT foundation structure

采用块石夯平和碎石垄的新型复合基床结构，利用抛填平整块石层调节地层分布与基槽开挖施工造成的不均匀性，起到承上启下的关键作用，利用垄沟相间的碎石层为管节结构提供了更进一步的协调支撑，同时块石层与垄沟相间的碎石层均具有吸纳落底淤泥的能力，使得沉管隧道基床成为一个平顺协调、刚柔并济的支撑体系，有效控制不均匀的过大差异沉降量，降低沉管隧道结构受力及接头张开量。此外，利用块石层和碎石层的有效纳淤能力，既解决了回淤带来的沉降隐患，也创造了较好的基槽清淤条

件；同时也大幅减少了清淤方量。

New type compound foundation bed structure made of compacted block rock and gravel bed is used. The stratum distribution is adjusted by filling and compacting block rock layers and the unevenness caused by trench dredging is eliminated and suck key function to continue with previous placement and start new placement is realized. The gravel bed between the grooves provides further coordinating support to the tunnel structure. Meanwhile the block rock layer and gravel bed between the grooves are capable of absorbing and accommodating the sediment on bottom, which make the tunnel foundation bed smooth flat and rigid and flexible supporting system. This way the uneven excessive differential settlement is effectively controlled, thus reducing the force on IMT structure and opening of the joint. Furthermore, the effective use of block rock layer and gravel bed can effectively absorb and accommodate, which eliminate the settlement potential risk and also create a better condition for trench cleaning and as the same time, sediment cleaning volume is reduced in great margin.

##### (1) 抛石基床夯平技术

(1) Rock filled foundation compacting and leveling technique

为解决外海深水块石基床抛石和夯实的难题，研发了深水抛石夯平一体化装备，采用溜管式定点定量抛填工艺抛填 2.0m 厚块石，利用 APE600 液压振动锤进行夯平密实，实现了夯平面 ±30cm 平整度要求，大幅提升了施工质量及施工效率。

To solve technical challenge of rock bed compaction at deep water at open sea, the integrated equipment is developed to drop and compact rocks at deep water. Drop pipe style is used to drop rocks at fixed position in fixed quantity to drop and fill rock layer of 2.0m in thickness, and then APE600 hydraulic vibratory hammer compacts and make density of the rock layer up to the flatness requirement on ±30cm of the compacted surface thus greatly improving the construction quality and efficiency.



图 4-6 抛石夯实船俯视图

Fig. 4-6 The overview of the rock dropping and compacting vessel

(2) 碎石基床整平技术

(2) The gravel bed leveling technique

碎石基床宽度 42m，每节沉管的整平面积达到 7680m<sup>2</sup>，整个工程的整平面积达 24.2 万 m<sup>2</sup>，整平水深在 15 ~ 45m 之间，且所有基础均有 0.30% ~ 2.98% 的纵坡，整平精度要求达到 ±40mm，整平测控精度是关键点。

The gravel bed is 42m wide, and the leveling area for each tunnel element reaches 7680m<sup>2</sup>, and whole leveling area for entire works reaches up to 242 thousand m<sup>2</sup>, and the leveling operation is made at water depth between 15 ~ 45m, and all the foundations have longitudinal slope gradient 0.30% ~ 2.98%. the leveling accuracy is required to reach ±40mm, and controlling and measuring of the accuracy of leveling is critical.



图 4-7 自升式平台整平船

Fig. 4-7 Automatic lifting platform leveling vessel

采用自升式平台方案通过抛石管完成碎石垫层的铺设作业，集抛石、整平和检测三道工序为一体，有效减少浪、流的影响，保证质量的同时也提高了工效。抛石整平施工管理系统采用实时检测、自动控制等先进技术，保证在 50m 作业水深时施工精度达到 ±40mm 的要求。作业效率满足 8 个有效工作日内完成单节沉管碎石基床的整平施工。

The automatic lifting platform is used to drop stones through the dropping pipe to complete the placement of gravel bed. This plant is integrated the three construction procedures as stone dropping leveling and testing, which effectively reduce influences of wave and current and ensure the works quality and improve working efficiency. The rock dropping and leveling construction management system adopts such advanced technologies as real time checking and testing and automatic control etc. to ensure the works accuracy to meet required ±40mm when operating below 50m water depth. The operating efficiency completed the gravel bed placement and leveling for single element within 8 effective working days.

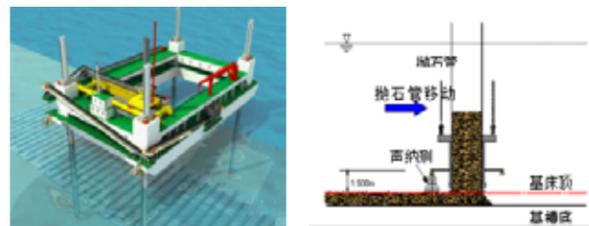


图 4-8 平台式碎石基床整平船施工原理

Fig. 4-8 Working principle of the platform style gravel bed leveling vessel

4.3 密闭结合腔压浆基础技术

Enclosed immersion chamber grouting to foundation technique

针对 E32-E31 管节接头处存在的异常沉降现象，创新性提出了沉管密闭腔压浆预压基床、抬升管节的构想并成功实施，利用管节接头部位的沉管隧道基槽、锁定回填碎石、管节接头底部自然形成的空腔，通过压浆形成密闭腔，起到了协调差异沉降、预压密实基床、调控沉降形态的目的。

利用该创新密闭腔压浆工法，将 E32 抬升了 3.5cm，创造了一种调控沉管沉降的新方法。

Aiming at the abnormal settlement phenomenon existing at the immersion joint between elements E32-E31, the enclosed immersion chamber grouting and pre-compression foundation bed is proposed as an innovation and the idea of lifting up the element is successfully realized. By use of the IMT trench at the immersion joint, the lock backfill gravel and the void naturally formed at bottom of the immersion joint, an enclosed chamber is formed by pressing grouting, which realize the goal of adjusting differential settlement, pre-compressing to density of the bed and adjusting controlling settlement situation. By using this innovative construction technique of enclosed chamber pressurized grouting the E32 is lifted up by 3.5cm, thus creating a type of new method for adjusting and controlling tunnel settlement.

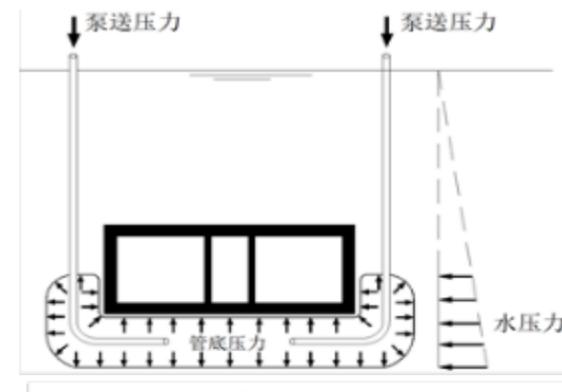


图 4-9 密闭结合腔压浆基础施工原理

Fig.4-9 The working principle of enclosed chamber pressurized grouting foundation

5 外海沉管技术突破

Technical breakthrough of IMT construction at opening sea

5.1 沉管深埋技术

IMT deep embedment technique

沉管的埋深，通常在 2m 左右。将沉管隧道埋入 20m 海床，此前在世界上还没有先例。港珠澳沉管段中约 4km 长区段的埋深达到了 20m。为解决深埋问题，创造性提出

了“半刚性”管节的结构概念，开发了适合于沉管结构的永久预应力体系，以及基于金属材料断裂力学特性的“记忆接头”。

Generally IMT embedment is about 2m, and it is unprecedented to bury the IMT deeply at 20m below the sea bed in the world. In HZMB IMT immersion section of 4 km in length is deeply embedded at 20m below seabed. To meet the challenge of the deep embedment the concept of "semi-rigid" tunnel element structure is proposed as the innovation and permanent prestress system suitable for the IMT structure and the "memory joint" based on the metal material fracture mechanical property are developed.

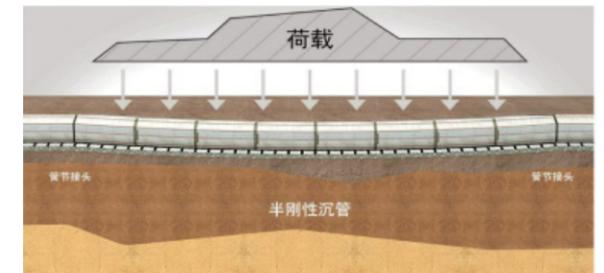


图 5-1 半刚性沉管示意图

Fig. 5-1 Schematic of the semi-rigid element

“半刚性”沉管的创新，就是将节段式沉管的临时预应力改变为永久预应力；使得沉管的结构力学机理完全改变，将整体式（刚性）管节和节段式（管节）的优点相结合。为了证明这一点，工程花费了两年的时间，经历了岛隧工程建设中最为曲折的过程。

对此，该工程的业主咨询公司 Hans De Wit 的评价是：“中国工程师是被迫的，甚至是痛苦的实现了真正意义上的创新”。“半刚性”管节结构创新的性价比非常高——除了验证所进行的试验与数模分析，在工程上的花费是负数，因为所需要的工作仅仅是不剪断预应力。因此，工程几乎没有花费额外的代价，就为沉管深埋找到了出路，实现了沉管深埋的技术突破。

相反地，如果没有该创新，该隧道上方的荷载就需要被控制在浅埋隧道的荷载量级：采用轻质材料回填，或运营期维护性疏浚。两者的工程造价均是十多亿人民币，再加上一年的额外工期投入和和对白海豚生活环境的严重影响。

The innovation of semi-rigid element means changing the temporary prestress to permanent prestress of segmental IMT to completely change the structural mechanical mechanism of IMT and to combine the advantages of monolithic (rigid) element and segmental element. 2 years are spent on verifying this point, which witness the most cumbersome process in island tunnel construction. The Mr. Hans De Wit from the consultant company of the project employer appraises "Chinese engineers are forced to realize the innovation in real meaning even in the painful way". The innovation of semi-rigid element structure is highly cost-effective — except the cost on the test and numerical model analysis for verifying the cost on works is negative, for the work required to do is only not to cut the prestress tendon. Therefore there is almost no additional cost on works and this is the way to deep embedment of IMT. The technical breakthrough of deep embedment of IMT is thus achieved. Conversely, should there be no this innovation, the loads acting on tunnel shall be controlled to the load magnitude for shallow embedment tunnel. Light material is backfilled or maintenance dredging is carried out in operation period. The cost of both engineering amounts to over billion in RMB in addition to additional one year working time and serious impact on living environment of white dolphins.

### 5.2 工厂法沉管预制技术

Technique IMT prefabrication on factory basis

在距离隧道 11km 的珠海桂山岛，建设了世界上第二例工厂法沉管预制厂，投资 10 亿人民币。厂址的选择为一个废弃的采石场，利用采石坑地形，工厂被布置成 L 形，解决了 33 节沉管外海存放问题。预制厂建设历时 14 个月。预制厂建设包括对 2 条沉管生产流水线的研发，每条生产线预制一个质量约 80000t 的沉管的周期是 70 天，将沉管隧道的预制工效提高到常规沉管工程的 2 倍。

The IMT prefabrication factory is built on Guishan Island in Zhuhai 11km away from the tunnel site, which is second example of IMT prefabrication on factory basis in the world. This factory costs 1 billion in

RMB and factory site is an abandon quarry yard. The factory is laid out in L shape by taking advantage of the quarry terrain and can accommodate 33 elements to be placed at open sea. The construction of the prefabrication factory took 14 months and contains the development of production stream lines, each of which is capable of producing 1 element of mass around 80000t in cycle period of 70 days, the prefabrication working efficiency is double of average IMT works.

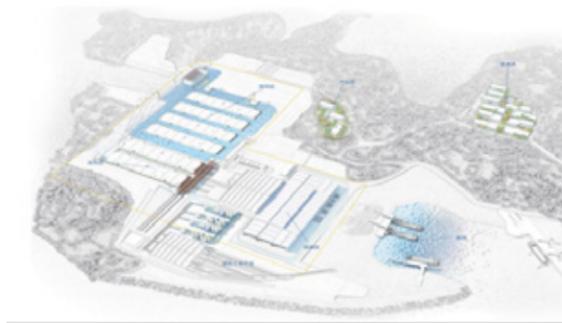


图 5-2 沉管预制工厂总体效果图

Fig. 5-2 General image of IMT prefabrication factory

预制厂建设还包括对液压模板的研发，对于 11.4m 高沉管侧墙的浇筑，为了获得更好的结构耐久性，实现了免对拉螺杆的模板方案。而且，世界首次开发了 80,000t 沉管分散顶推技术；攻克了曲线沉管工厂法预制技术；研发了水泥用量为常规用量 60% 的环保、低热混凝土配合比，在取消了冷却水管的情况下，做到了一百万方混凝土浇筑无一裂缝。

The factory construction also comprises the development of hydraulic form work. As for the casting of the side wall of 11.4m high element, to achieve better durability the formwork free of tie bar is achieved. The disintegrated jacking technique for 80,000t element is also developed first time in the world; the factory-based prefabrication technique for curve element is developed; the environmental and low-heat concrete mix ratio, which consumes only 60% of regular consumption of cement is developed. Under the condition that the cooling water pipe is eliminated, 1 million cubic meter crack-free concrete cast is achieved.

采用工厂法预制管节，所有预制作业在厂房内 24 小时连续进行，创造了标准化的全室内工厂预制环境，免除了气象的干扰，浇筑温度可控性强，养护环境好，有效保障预制的品质，同时钢筋、模板、混凝土施工在流水生产线上进行，各环节标准化程度高，施工连续性好且效率高，为工程整体工期的实现提供了有力的保障。

By factory-based prefabrication of element all the prefabrication work is carried out in the factory around the hour and standardized whole factory fabrication surroundings is created, which eliminate the climatic interference and the cast temperature is well controlled. Curing condition is effective, which effectively assure the quality of prefabrication product. Meanwhile, the steel work, formwork and concrete cast are carried out on the production line. All the stages are highly standardized and the constructional continuity is good with high efficiency, which provide guarantee for meeting the whole works schedule.



图 5-3 工厂法沉管预制工艺流程效果图

Fig. 5-3 Image of the workmanship and procedure for factory-based element prefabrication

### 5.3 外海沉管安装技术

Technique of IMT installation at open sea

港珠澳大桥的沉管质量世界最大，要在水下近 50m 以及海洋工况条件下，连续进行 33 节沉管安装，并要达到苛刻的精度要求，还需要面对大径流、回淤、深槽等特有的问题，工程的风险和挑战极大。

The Hongkong-Zhuhai-Macau Bridge IMT is of maximum mass in the world. Total 33 elements shall be installed consecutively under marine condition

and under water of 50m and the installation accuracy is highly required. In addition, special problem as large running water, sediment, deep trench are encountered and they impose high risk and challenge to works.

通过开展自主攻关，自主研发了外海沉管安装成套技术和装备；创新了深水沉管免调整高精度定位技术；攻克了巨型沉管在受限海域拖航、锚泊定位、作业窗口管理诸多的难题，形成了具有中国自主知识产权的外海沉管安装成套技术方案。

Through proprietary and independent addressing the difficult problems, The technique of high accuracy positioning of IMT without adjustment at deep water is innovated. Such difficult problems as towing mega element in restricted sea areas, anchor mooring positioning and operation windows management have been solved, a complete set of technique and equipment for IMT installation at open sea is developed, which has Chinese proprietary intellectual property rights.



图 5-4 外海沉管安装工艺流程效果图

Fig. 5-4 Image of workmanship and flow for element installation at open sea

新研发的双驳杠吊法水下无人沉放定位系统，在传统双驳杠吊工艺的基础上实现了多项突破，具有如下特点：系统数字化集成度高，遥控遥测技术大量应用，沉放和对接过程中管内实现无人值守和操作，所有操作均在安装船控制室内完成，可将隧道管节精确沉放至指定深度，管节水下定位精度可以达到厘米级。

The double catamaran for IMT unmanned placement and positioning system in deep water is newly developed. Based on the traditional double catamaran technique many technical breakthroughs

have been achieved and bear following salient futures, such as high digital integration of system, extensive application of remote control and survey techniques. In the process of immersion and connection no man is on duty and operates inside the tube and all the operations are completed in the control room on board vessel. This system can place the element accurately to the appointed depth and the underwater positioning accuracy element can reach up to magnitude of centimeter.



图 5-5 深水沉管对接示意图

Fig. 5-5 Schematic of connection of element at deep water

港珠澳大桥沉管安装是一次从零基础起步的、高风险的工程经历，特别艰难。工程历时 4 年完成了 33 节沉管的安装，在 2015 年创造了一年安装十节沉管的“中国速度”，期间多次做到 1 个月内连续安装 2 节沉管。

The IMT installation of HZMB starts from nothing and the high risky works experience is particularly. Total 33 elements are installed in 4 years and further in year 2015 "Chinese speed" of installation of 10 elements within 1 year was created and intermediate time 2 elements are continuously installed within 1 month.

#### 5.4 最终接头技术

Technique of closure joint

与大跨径桥梁极其类似，沉管隧道也存在一个合龙作业，而且该作业要在水下进行。沉管隧道的“合龙段”被称作最终接头。港珠澳大桥沉管隧道最终接头，施工水深接近 30m。并且施工暴露于海洋环境和回淤环境，施工难、风险大。按原设计方案，最终接头工期超过半年。

Similar to long span bridge immerse tunnel also requires closure operation, which is performed under water. The closure section of IMT is also called "the

final joint". In the HZMB IMT the final joint is executed in deep water close to 30m and the work execution is exposed to marine environment and large sediment, which makes work more difficult and high risky. By original design solution the works time for installation of the final joint will be more than 6 months.

通过 3 年多的研究和攻关，在世界范围内首次提出了可折叠、主动止水的结构新理念，创造了整体式主动止水最终接头技术。该工程最终接头段 12m，重量超过 6000t，主体采用钢混三明治结构，液压主动压接系统止水，利用 12000t 全回转浮吊整体安装。

Through over 3 years' study and solving difficult problems the new concept of foldable, proactive waterproof structure is proposed first time in the world, based on which the technique of monolithic proactive waterproof final joint is created. In this given project, the closure joint section is 12m long and weighs over 6000t and the main body is steel-concrete sandwich structure and the hydraulic proactively stops water by compression. The final joint is installed as a whole body by use of full swing floating crane.

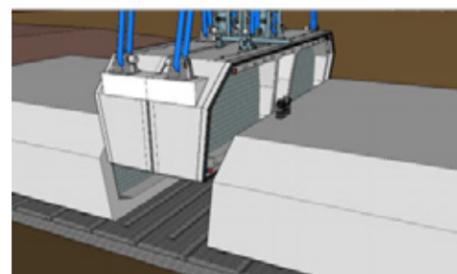


图 5-6 梯形块整体式预制安装最终接头示意图

Fig.5-6 The Schematic of final joint installation of the trapezoidal block as a whole

高流动性混凝土浇筑、大体量楔形块水下龙口受限空间（10cm）内精确安装、小梁顶推止水、刚接头焊接等诸多施工工艺均为国内外首次实施，施工难度很大。最终接头总体施工工序如下：钢壳结构在上海振华工厂内制造完成后，采用驳船运输至桂山沉管预制厂；在工厂内进行高流动性混凝土浇筑、舾装件安装及调试；待现场碎石基础

施工完成后，选择合适气象窗口采用 12000 T 起重船进行最终接头沉放安装；沉放到位后，进行接头临时止水并与 E29、E30 刚性连接，实现隧道贯通并完成后续管内管外作业。

Such construction techniques as high flow concrete placement, accurate insertion of mass wedge shaped block into the final gap underwater in restricted space (10cm), small nose jacking for water stopping, welding of rigid joint are initially applied at home and abroad and the constructional challenges are high. The general constructional procedures of final joint works are as followed: the high flow concrete placement, out-fitting and commissioning are carried out in the factory. After the end of the gravel bed works suitable weather windows are chosen to immerse and install the final joint by use of 12000t crane barge. After the final joint is placed in position temporary water stopping and connecting in rigid manner with E29 and E30 are carried out so as to achieve the tunnel holing-through and then the completion of work inside and outside the subsequent elements.

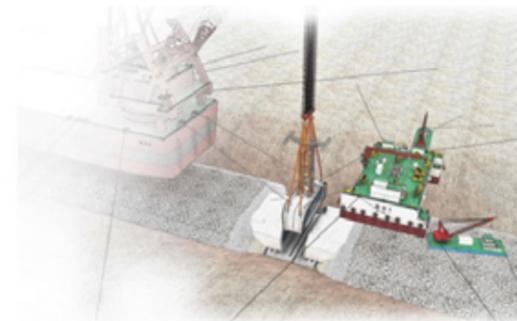


图 5-7 最终接头块安装示意图

Fig.5-7 The schematic of installation of the final joint

该创新工艺带来的效率是：2017 年 5 月 2 日，日出时开始安装，到日落就实现了海底隧道的贯通。随后，还对最终接头进行了脱开与再对接的尝试，将最终接头的轴线对接精度调节到了毫米级。该工艺可能是世界第一次，将最终接头水密性做到了滴水不漏。

This technical innovation results in high efficiency: on May 2, 2017 we set out to final joint installation at

sunrise and achieved the immersed tunnel holing-through at sunset the same day. Subsequently, we also conducted test on the final joint by detaching and then re-connecting the final joint and adjusted the alignment of the final joint to magnitude of mm. This given constructional technique probably the first time in the world makes the final joint 100% watertight.

## 6 结语

### Conclusion

通过践行崭新的环保理念，工程取得的环境综合效果显著。中华白海豚是中国的海上大熊猫，根据官方发布的伶仃洋中华白海豚种群数量信息，在 2010 年工程开工时，中华白海豚的数量大约为 1200 头左右，经过 6 年的建设以后，这一数量超过了 2000 头。

By practicing brand new environmental ideas and concepts outstanding comprehensive environmental achievements have been gained. The China White Dolphin is regarded as the sea panda in China. In accordance with the reported quantity of China white dolphins in Lingdinyang sea, at the works commencement in 2010 the there are around 1200 China White Dolphins and after 6 years' construction the number of the China White Dolphin increased to 2000.

以创新的理念为指引，最终取得跨越外海固定通道综合能力的突破，以钢圆筒快速成岛、半刚性沉管结构体系和新型最终接头为代表的创新技术，完善和发展了外海人工岛和沉管隧道工程体系，希望可以为世界范围内同类工程所借鉴。

Guided by innovative concepts we finally have achieved breakthrough in comprehensive power of building fixed link at open sea. The technical innovations represented by the technique of speedy island formation with cylinder, semi-rigid immersed tunnel structural system and new typed final joint have completed and developed the engineering systems of the man-made island and immersed tunnel at open sea and are expected to set examples for similar engineering works worldwide.

林巍<sup>1</sup>, 王晓东<sup>2</sup>

1. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088

2. 中交四航局第二工程有限公司, 广州 510300

Lin Wei<sup>1</sup>, Wang Xiaodong<sup>2</sup>

1.CCCC Highway Consultancy Co. Ltd., Beijing 100088

2.No.2 Eng. Co., Ltd. Of CCCC Fourth Harbor Engineering, Guangdong 510300



## 沉管隧道结构与施工概论

### Overall Discussion on Design and Structure of Immersed Tunnel

**摘要:** 沉管隧道经过 100 多年的发展, 已形成多种结构构造形式与施工工法可供选择。本文讨论选取最适宜的结构构造方案与施工方法的原则和关键点。首先确定总结横截面几何特征及其有关的主要结构形式, 从管节预制、接头构造、基槽疏浚、基础与垫层等方面, 论述其中的关键问题及其相互制约; 最后将问题联系汇总, 提出从结构构造与施工工法综合统筹考量进行方案比选以确定最适宜的方案的方法。

**关键词:** 沉管隧道; 结构; 基础; 基床; 预制; 安装

**Abstract :** With over 100 years development, various structural configuration and construction method had been formed. The paper aimed at discussion the principle and the key points for the selection of the most appropriate structure and construction method. The geometry patter and the main structure type can be determined at the first, then discussions were made to the relevant aspects such as the tunnel element prefabrication, joint configuration, trench dredging. All those elements were connected and summarized in the end, so as to propose the methodology of the scheme selection by comprehensive comparison and overall consideration in terms of structural and constructional aspects.

**Key words :** Immersed tunnel, structure, foundation, foundation bed, prefabrication, installation

## 1 引言

沉管隧道工法作为水底隧道建设工法, 在 1893 年~ 1894 年波士顿港内的下水管铺设工程中首次使用。最初用于铁路隧道是美国在 1906 年施工的底特律海底隧道, 用于道路隧道是 1925 年在加利福尼亚施工的波西隧道<sup>[1]</sup>。其后以美国、荷兰、日本为中心, 在道路、铁路和下水道等方面被不断采用。

随着近年来机电一体化、施工机械的发展以及使用材料性能的提高, 沉管隧道施工性、经济性、工期以及环境对策等都得到了很大改善, 工法日渐成熟, 成为水底隧道的代表性施工方法。

与此同时, 沉管隧道的适用范围逐渐走向大断面与深埋<sup>[2]</sup>。这给沉管隧道的结构构造及施工都带来了挑战。

本文旨在通过对沉管隧道结构构造与施工关键点以及它们相互影响因素的讨论, 提出应将沉管隧道结构构造与施工作为一个整体来把握, 在提高对方案选择的全面认识基础上确定最适宜的结构构造与施工方案的思想, 为沉管最适宜构造与施工方法的确定提供决策参考。

基于这个目标, 第 2 节总结了沉管隧道的不同类型与适用条件。第 3 节将结构构造、施工工法细分为主体结构、基槽疏浚、接头构造、基础以及回填、安装作业, 从施工需求及构造特点方面剖析沉管隧道工程中的关键问题。第 4 节作了总结。

## 2 横截面特征与主要工法分类

沉管隧道宜从两方面分类描述: 横断面的布置形式及主体结构的施工工法。对于横断面布置形式, 欧洲、日本的沉管隧道以采用矩形截面为主, 美国等国家则以多边形截面、圆形截面为主, 眼镜形的截面也很多。从施工工法来分, 大体可分为混凝土式、钢壳式、及钢壳混凝土合式三大类。特征分别叙述。

### 2.1 钢筋混凝土沉管

钢筋混凝土沉管在干船坞内连续进行绑扎钢筋、浇筑混凝土、安装舾装设备, 是目前使用最多的构造形式。但干船坞一般都不在隧道的建设地点, 制作好的沉管需要用拖船等拖运至施工地点。钢筋混凝土沉管一般在其四周安装钢板、橡胶垫用于防水。

在钢筋混凝土沉管的基础上为了混凝土防裂、提高地震时的强度及韧性, 对沉管施加预应力, 即又称为预应力

钢筋混凝土沉管。由于增加了预应力, 提高了结构水密性的同时, 沉管混凝土结构即使在地震时产生裂缝, 地震后也可以自行封闭裂缝。沿管体轴向设置预应力钢束, 通过油压千斤顶导入  $1 \sim 2 \text{ N/mm}^2$  的预应力。使用的混凝土也是强度为  $35 \sim 40 \text{ N/mm}^2$  的高标号混凝土。另外, 也有少量在横向导入预应力的案例。

节段式沉管是在混凝土沉管工法上发展出来的一种构造与工法。受力方面更能适应地基变形, 同时也方便在陆地工厂制作分段的节段, 然后将节段依次接合, 并使用预应力钢束连接成为一个整体管节。这种工法在陆上实施, 占地面积小, 行成了生产线, 可缩短与控制制作工期, 是一种高效的制作方法。连接丹麦与瑞典的厄勒海峡的沉管隧道是第一个采用这种工法的沉管隧道<sup>[3]</sup>。港珠澳大桥的沉管预制场突破了工厂法只生产直线管节的技术挑战, 将节段式沉管的应用领率拓宽至更普遍的形式。图 1 为港珠澳大桥预制场曲线式节段式管节预制照片。



图 1 港珠澳大桥预制场及预制中的曲线管节 (黄育波拍摄)

Fig.1 Immersed tunnel curved element in prefabrication factory (Photo by Huang Yubo)

### 2.2 钢壳结构沉管

钢壳式沉管是在干船坞内进行钢壳制作, 下水后系泊在岸边, 再进行绑扎钢筋、浇筑混凝土、安装用于沉放、拖运、接合的各种舾装设备。钢壳作为临时结构使用, 混凝土硬化完成后, 整体仍然作为钢筋混凝土结构考虑, 钢壳则用于防水。钢壳的钢板可通过加劲材增加强度, 刚性较低时, 也可使用桁架结构进行临时补强。顶板钢板有封闭式和开放式。闭合时钢壳的刚度大, 但是向管内搬运资材比较困难。沉管制作完成后, 钢壳主要用于防水, 对于地震时的短期荷载, 也可以考虑由钢壳和钢筋混凝土共同承受。

### 2.3 钢混三明治结构沉管

上文所述的钢壳式及混凝土式沉管外侧的钢板一般不

作为承载结构考虑。而钢混三明治结构的沉管则是将防水钢板与混凝土一体化制作，钢壳既作为承载结构考虑，又在混凝土浇筑时作为模板。总体上可分为全三明治结构及开放式（半）三明治结构两类。

全三明治结构的两侧为钢板，在钢板内侧填充混凝土，但不配置横向钢筋的施工工法。钢与混凝土这两种材料通过焊钉及型钢形成力学上的合成结构。钢壳内部填充高流动性混凝土。这种混凝土具有自填充性，不振捣。日本神户港岛隧道、那霸港海底隧道等均采用了这种结构形式。钢壳结构大多在造船厂制作。有时也将钢壳浮在海上浇筑。

开放式（半）三明治结构一侧为钢混结合构造，另一侧为钢筋混凝土构造。如日本的大阪咲州隧道以及衣浦港海底隧道。

表 1 总结了横断面布置形式可对应的施工工法、力学与空间特点，以及在不同环境下的适用条件。

表 1 横断面几何特征与施工工法综合比较

Table 1 General comparison of geometrical pattern of cross-section and construction method

横截面几何形式	圆形、眼镜形	矩形
结构形式及工法	钢壳结构	钢筋混凝土、钢壳结构、三明治结构
适用用途	纵向较长的铁路隧道	横向较宽的道路隧道
力学特性	一般受控于截面的轴力	一般受控于截面的弯矩
基础	较易施工：一、底面宽度相比截面最大宽度小，从水上投入回填土砂时，易于充实基础范围制作基础；二、钢结构相比混凝土的开裂特性，对基础平整度要求低。	结构底面较宽，需要采用吹砂工法、管底灌浆工法及灌注混凝土等特殊工法制作基础
空间	隧道管体较高，造成隧道整体长度增加，基槽疏浚深度也有所增加	与圆截面相比，在隧道长度、基槽疏浚方面较有利

宽度	圆形的直径有限，一般为 10m 左右，对于多车道道路宜采用眼镜形截面	适用于多车道的宽幅道路隧道；可用于道路、铁道共用的隧道
----	------------------------------------	-----------------------------

### 3 构造与施工

上文讨论了沉管隧道的不同断面布置形式，对应的主要施工工法的区别，及各自的适用条件与结构特征。确定构造形式及主要施工方法以后，需进一步细化方案，下面从本体结构、基槽疏浚、基础与回填、安装这四个部分讨论。

#### 3.1 管节预制

以钢壳沉管隧道方式为例，管节制作施工包括制作钢壳（以及防水板），向钢壳内部搬入钢筋、模板等资材，浇注混凝土，最后进行舾装。

##### 3.1.1 钢壳制作

通常是在工厂或造船厂将钢壳制作完成。然后曳航至舾装场系泊，在浮置状态浇注内部混凝土完成制作。

对于钢筋混凝土方式的沉管，变截面构造时拼装模板比较复杂，而钢壳方式则不存在这个问题。但是采用钢壳方式，由于四周都是被钢板覆盖的状态，只能从上面的开口部搬入资材、浇筑混凝土，对舾装作业造成很大制约。为了回避该问题，考虑了上部为开放形式的钢壳构造，案例如日本川崎港海底隧道。采用上部开放形式构造截面不闭合，施工时易产生变形，可以通过在横截面采用桁架结构不强等方法增大钢壳的刚性。另外，在造船厂等钢壳制作场所也可以浇筑混凝土，顶板混凝土浇筑完成后在现场焊接钢板，为了确保焊接部的防水，需加强对焊接作业的质量管理。

由于钢壳内部配置有加强刚度的加劲肋，而且所用钢筋的直径一般都比较粗，所以钢筋绑扎作业比较复杂且效率较低。因此，需要提醒的是对于主筋与抗剪钢筋、轴向配力筋等的绑扎顺序，事先需要有周详的计划。为钢壳沉管管体钢筋配置的示例。对于合成构造方式，钢壳作为承载结构考虑，所以钢筋的配置量可以减少。全三明治结构则不需要配置钢筋。

##### 3.1.2 浇筑混凝土

###### (1) 浇注顺序

钢壳式相比钢筋混凝土式沉管，混凝土浇注顺序及模

板都不相同。钢壳式沉管制作上最重要的环节就是混凝土的浇注顺序。钢壳在浮置状态会由于承受部分混凝土的重量而产生变形，该变形随着混凝土的浇筑逐渐累积而达到最终的变形状态。所以，需要认真调整每次的浇筑量、浇筑位置以及浇筑顺序，使得浇筑完成时变形最小，而且在浇筑过程中，钢壳应力的最大值也最小。侧墙、中墙的混凝土在横截面上可作为集中荷载考虑，浇筑较难时多采用分段浇筑。对厚壁大跨钢壳的混凝土浇注目前还缺少案例及经验，甚至会存在有待研究的工程盲区。

###### (2) 浇注方量

浇筑规模受到可以浇筑的混凝土量的限制，对于墙体混凝土，为了防止温度裂缝以及干燥收缩裂缝，在长度方面也要有所限制，一般不超过 20m。另外还要结合每一区块钢筋绑扎、拼装模板的工期确定浇筑长度。

对于混凝土沉管隧道，为了提高施工效率，采用移动式模板。根据沉管的制作个数以及工期要求确定模板的套数，普遍采用的是两个工作面使用一套模板。

###### (3) 材料选择

对于沉管浇筑的混凝土需要有大体积混凝土的相关考虑，预应力混凝土管体采用的是高强度混凝土，需要通过调整配比防止温度裂缝。由于管节主体结构厚度在 1m 左右，而且还有在暑期浇筑的情况，所以由于浇筑初期混凝土内部温度不均以及约束条件等原因，可能会产生裂缝。有使用冷却管、液氮、冰等进行降温的处理方法，但工程费用较高且不易于施工管理。所以采用了减少水泥用量、添加高性能减水剂、使用低热水泥、加强混凝土养护等对策。

为了确保沉管在浮运时的干舷高度（10 ~ 20cm）以及设定沉管用压舱水箱、浮船的容量，对混凝土必须进行严格的比重管理。所以需确保骨料的选择以及用量，尽量减少混凝土比重的浮动。

###### (4) 高流动混凝土

合成结构沉管的三明治构造，必须保证钢壳内混凝土充分填充，所以采用了具有很好的自填充性的高流动混凝土。这种混凝土基本上不需要振捣。高流动混凝土对水量、水泥量非常敏感，所以在混凝土配比及施工上需要特别注意。同时，对于混凝土的填充程度也要进行确认，一般采

用敲击法、放射线同位素法等。如果有未填充的地方，检查后可使用树脂或者砂浆进行修补，但是缺陷较难发现，修补质量也较难检验。

##### 3.1.3 端部钢壳

沉管两端的钢壳称为端部钢壳，其对沉管的走线起到决定性作用。因此一般刚度及制作要求更高。

##### 3.1.4 舾装工程

沉管钢壳及混凝土结构完成后，还需进行舾装。目的是拖航、沉放、临时放置所需的各种设备。在制作船坞内安装沉管内的压舱水箱，电气及通风设备，系泊用的系缆柱，人孔井，密封橡胶止水带的防护等舾装工程。在临时放置场所则进行安装控制塔、测量设施、端面探查装置、牵引及位置修正用的千斤顶，沉放浮船的组装等工程。舾装场所一般设在隧道建设地点附近，选择可以安全系泊沉管，便于资材搬运的平静稳定的水域。舾装场也需要有一定的水深，所以多选择距离护岸较近处，并设置栈桥。

#### 3.2 接头构造

接合部位于沉管管节之间，沉管管节和通风塔或暗埋段之间，最终接头与管节之间，对于地震、温度变化及不均匀沉降等情况需要有足够的强度和水密性。接合部可分为刚性接合和柔性接合两类。刚性接合要求接合部具有与沉管本体结构同等程度的刚性。柔性接合则是通过使用密封橡胶、预应力钢棒等，使接合可以吸收沉管的运动。柔性接合构造可加强不均匀沉降的适应性，降低地震时管体的应力，但同时对接头部的强度、变形及水密性提出要求。

#### 3.3 基槽疏浚

预制管节结构的同时，为了具备安装的条件，需同时在隧道位置进行基槽开挖，一般对沉管隧道基槽的挖掘深度比航道疏浚的深度大，且对底面的平整的精度要求较高。使用的疏浚船可以为泵式疏浚船、耙吸式疏浚船，抓斗式疏浚船等。根据土质、挖掘深度、精度、污浊程度、搬运方法等选定疏浚方法。疏浚土量一般较大，关系到航道的使用，在施工上会受到制约，所以远在沉放前就要开始疏浚的施工。施工时考虑伴随挖掘底面地基的反弹，强度下降以及回淤，分成粗挖和精挖两步进行。与管节沉放的工期相对应，采用高精度的挖掘方法，在沉放前如有必要，还要将堆积的沉泥吸出。对于疏浚断面的斜面坡度，除了

土质,还要考虑存放期间、流速、波浪的影响等因素来决定,以确保斜面稳定。对于基槽底面,考虑地基表面变动以及吸收沉泥等问题,可能采用投入砾石、砂岩,使用疏浚船前面的装有叶片的基础平整装置,对基础底面进行平整。

基槽疏浚与3.1节的管节构造关联,因为沉管基槽的疏浚方量不仅取决于坡度的设计,而且取决于挖深、挖宽有关,后者与管节的高、宽有关。

### 3.4 基础与垫层

基槽疏浚完成后,为了控制沉降,避免(不均匀)沉降或局部硬点对管节本体结构造成过大的应力,需要在管节结构下方施工一层垫层,必要时还应对基础进行处理。图2给出了沉管隧道的基础与垫层形式。下面讨论基础与垫层的确定原则与选择的关键点。



图2 沉管隧道基础与垫层施工工法

Fig. 2 Immersed tunnel foundation and foundation layer

#### 3.4.1 基础构造

为了使地基沉降可控,确定基础构造的原则是避免出现不均匀刚度的风险,并易于施工。后者对于海上作业尤其重要。

桩基础是常见的处理办法,对于桩的构造,通常在于选择适合(海上)作业的桩的种类、打设方法、桩顶高度及平面位置精度。对于海上工程,桩的构造通常取决于最便于施工的形式,例如钢管桩。因为桩从基槽的底面向下打入,施工位置的水深大,所以施工时对于位置的确定、桩顶高度的要求很高。如果桩顶高度不一致可能会造成局部突起,导致沉管基底的刚度不均匀,引发额外内力。并且,地震或温度变化时宜造成管节结构的应力集中于桩头部,因此应采用适宜的工法以使桩与管底均匀接触,例如图3示意。

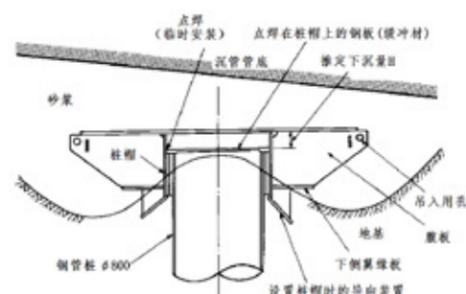


图3 桩头构造示意

Fig.3 Pile cap illustrative sketch

基础构造解决绝对沉降和不均匀沉降的问题,然而垫层平整度也会对结构造成局部应力集中,尤其对于无外包钢板的混凝土式沉管隧道,混凝土开裂将引起钢筋腐蚀,进而影响结构使用寿命;对于钢壳结构沉管,钢壳的意外损坏对结构的耐久影响更为敏感,因而确保沉管隧道下方的垫层均匀,无局部硬点极为重要。下面重点比较几种垫层的施工特点、限制条件及优缺点。

#### 3.4.2 临时支撑台方式

临时支撑台方式是对沉管进行临时支撑,并向管底与地基间的间隙填充基础材料的基础工法,也被称为后铺法。对沉管进行临时支撑需要设置临时支撑台。沉管的既有管侧,可在沉管端面上设置临时支撑托架相互支撑,所以只需要在新放管侧设置临时支撑台。临时支撑台一般使用混凝土块,根据地质情况,可以直接设置在碎石置换的基础上,对于软弱地基,沉降的影响较大等情况时,也可采用摩擦桩。

沉管沉放后需要对标高进行调整,在临时支撑的位置设置调整标高用的千斤顶,千斤顶的顶杆伸到管底,承受临时支撑台的反力。沉管得到临时支撑后,接头部接合时如果发生轴向移动,会有巨大的反力作为集中荷载作用于荷重点上,所以在临时支撑台的表面埋入高硬度的钢材,用以减小摩擦、分散支座压力。

竖向标高调整完成后,管节基础垫层需要完成由临时支撑到永久支撑的转换。总体上可分为两种施工工法:

##### (1) 吹砂法垫层

荷兰 mass 隧道于1942年首次采用这种工法,以后对于宽幅的长方形截面的沉管隧道,以欧洲为中心被广泛使用。这种工法的原理是由设置在沉管上的龙门吊支撑三

根管道,通常3根一组,从中间的管道将砂和水一起喷出,其他的两根吸入等量的水,管底和地基之间的空隙由砂填充。这种工法的不利面是,需要从沉管外提供填充用的砂,作业易受气象条件影响,另外对于砂的填充程度也不能完全确认。另外对于地震时发生液化化的情况,这种工法的使用应加以注意。

##### (2) 注浆法垫层

相比吹砂方式,注浆法的优点在于可以从管内施工,不受气象条件、航道的影,可以从灌注孔确认砂浆的填充度。这种工法在日本广泛应用。

注浆方式的基础工法是预先在管底连续设置尼龙袋,沉管沉放并得到临时支撑后,用软管连接沉放作业船上搭载的砂浆灌注装置和尼龙袋,向尼龙袋中注入砂浆的方法以及从沉管内部直接向管底空隙注入砂浆的方法。采用前者的实例有地古斯塔隧道(瑞典)、衣蒲港隧道;采用后者的工程是东京港隧道(首都高速道路公团),在沉管底板按一定间距预埋砂浆灌注孔,沉放后从管内通过灌注孔,用略高于水压的压力注入流动性强的砂浆,形成连续的基础。

采用临时支撑台方式,管节着床后的临时支撑近似简支梁,进而可能限制管节的长度发展,增加沉管管节及管节接头的数量,增加安装次数。先铺法垫层不存在该问题。此外,先铺碎石垫层具备一定的纳淤能力,也是解决回淤问题的一种方案<sup>[5]</sup>。

#### 3.4.3 整平方式

整平方式是将沉管直接放置在平整后的基础上,所以又经常被称为先铺法。美国早期的沉管隧道,仅据作者所知,都采用的是先铺法,原因是隧道均为钢结构,跨度小(一般只用于输水、排废水等,非交通隧道),不存在大跨度混凝土沉管隧道的开裂耐久性问题,因而对垫层的铺设精度的要求较低。随着欧洲混凝土沉管隧道的普及,精确地进行基础整平变得尤为重要。刮铺法碎石垫层,因为满铺,局部易出现硬点;相比而言,用落石管方法施工的碎石垫层,成型的垫层垄沟相间;管节沉放着床时,垄顶凸出的碎石在与管节底部接触时,较容易被挤入与周边垄顶的石块同等的高度,而避免成为结构底部的硬点。这是因为由于沟的存在,周边的石块较易往没有碎石的临空面移动。

另外需注意,基础整平的方法也与沉放方法相关,因为可以利用海上架台或者沉放作业船进行整平作业。

### 3.5 管节安装

完成管节结构、基槽开挖、基础处理与整平后,通常使用拖船将沉管管节拖运至沉放现场。沉放作业时,对漂浮的沉管加载,将其沉放至海底预定的基槽位置。加载通过向管内水箱注入水荷重来完成。沉放方法需调查现场的潮流、波浪,航行船舶等情况后研究确定。沉管隧道沉放地航行船舶较多时,需要封闭航道一段时间。从被系泊索固定住的沉放驳船上,一般通过4个吊点,将沉管徐徐沉放。沉放过程中新安管节与已安管节的相互位置关系,使用例如超声波测距仪的手段进行实时测量。通过操控沉放船上的卷扬机对沉管位置进行修正。使用经纬仪或GPS卫星定位系统来确定坐标。如果基础垫层采用后铺法,将新安管节放置在已安管节端部的临时支撑托架上和基面的临时支撑台上,再进行沉管的接合作业。

沉放方式有固定架式、浮箱方式、双体型作业船方式等。这些沉放方式各有所长,可根据沉管的规模、现场的作业条件、可用的施工设备等选用适当的沉放方式。根据沉放方式,进而确定沉管的舾装、浮运时的重量。因为浮运的重量对干舷有影响,如图4所示,所以需要尽早确定沉放方式。

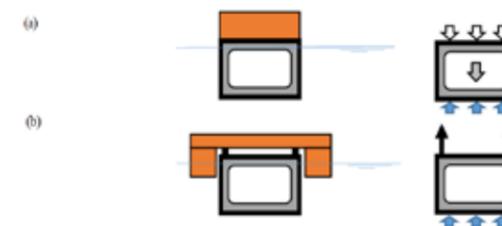


图4 不同沉放方式的对管节重量影响

(a) 浮箱方式增加管节浮运时的重量;

(b) 沉放驳方式有可能减少管节浮运时的重量

Fig.4 Weight influence during transportation by different immersion methods

(A) Caisson increases the weight of tunnel element

(B) Catamaran method might reduce the weight of tunnel element

已安管节与新安管节一般先通过油压千斤顶拉近，在水中初步接合。二次接合是利用静水压力，通过等效于作用于接合面的数百吨乃至数千吨的静水压力，使密封橡胶充分压缩。

需要注意到一点，第 3.1 节、3.2 节中的施工作业是管节安装的先决条件，但是对于管节数量较多的工厂法预制的沉管管节，管节的安装进程还会影响管节预制的进程，因为后续预制的管节需要已预制好的管节腾出位置后才能有管节预制的作业面。

### 3.6 回填

沉放作业完成后，立即用砂砾、碎石等对沉管周边进行回填。为了防止抛锚、沉船等对沉管造成损伤，并且为了避免沉管上浮，沉管的上部一般应确保有一定厚度的覆土。在回填材料的选择上，对于可能发生地震的位置，应选用地震时不产生流动化的材料，另外还要考虑防冲刷的问题。回填自身又是沉管结构的永久荷载。

### 4 讨论

沉管隧道经过 100 多年，已发展出可供选择的各种不同的工法与结构构造形式。找到最适宜方案的关键在于结合项目环境特点。然而该工作的难点在于，沉管隧道的构造与施工紧密关联。第 3 节证明了该观点，例如，沉管基础决定了结构沉降与相对沉降量，进而影响管节的整体结构受力。从另一方面说，管节的结构形式以及横断面布置的选择决定了基础设计沉降与平整度的要求，从而影响到基础形式的选择。对于沉管隧道的构造与施工，如何找到最适宜的方案？也许只有全面了解与分析有关因素，以及一些特殊条件，才能作出适宜的决定。随着机械设备、使用材料的不断开发和研究，沉管隧道的可施工性与经济性也得到了较大提升，沉管隧道的应用范围逐渐增加，今

后宜在借鉴本文所述的各种成熟经验的基础上，选择或创新适应工程条件的方案与技术。

致谢：孙亮为本文的写作提供了一些日本沉管方面的技术信息。

### 参考文献：

- [1] Gursoy, A. (1997). Chapter 1 introduction. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 12(2), 83-86.
- [2] Lunniss, R., and J. Baber. 2013. Immersed Tunnels. Immersed Tunnels: 1-486.
- [3] Badcock, M. S. 1997. The design of the Oresund Tunnel casting facility. Immersed tunnel techniques 2. Proc conference, Cork, 1997: 185-196.
- [4] 法人沿岸技研究センター. 沈埋函トンネル技術マニュアル（改版）[M]. 平成 14 年 8 月. SONOD KEIITIROU. Immersed tube tunnel technical manual [M]. Revised version. Tokyo: Juridical Foundation Coast Development Technical Study Centre, 2002.
- [5] Immersed tunnel techniques. (1990) Tunnelling and Underground Space Tech. Incorporating Trenchless Technology Research, 5(1), 157.
- [6] 林巍. 港珠澳大桥沉管隧道管节压舱水系统 [J]. 中国港湾建设 2014(2): 2. Lin Wei. Ballast tank system of immersed tunnel element for Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge [J]. China Harbour Engineering, 2014(2).



陈林<sup>1</sup>，何波<sup>2</sup>，喻明杰<sup>3</sup>

1. 陈林，中交广州航道局有限公司，广东 广州 510221
2. 何波，中交广州航道局有限公司，广东 广州 510221
3. 喻明杰，中交广州航道局有限公司，广东 广州 510221

Chen Lin<sup>1</sup>, He Bo<sup>2</sup>, Yu Mingjie<sup>3</sup>  
CCCC Guangzhou Dredging Co.,Ltd

## 外海深水基槽复合边坡精确清淤技术研究

### Study on Precise Dredging for Composite Slope of Deep Water Trench in Open Seas

**摘要：**针对港珠澳大桥岛隧工程隧道基槽 E15 管节边坡上淤积物滑塌事件，通过发现问题 - 分析问题 - 解决问题的思路，在高风险、高标准要求又没有成熟工艺技术或施工设备的情况下，研讨了采用耙吸式挖泥船精确而安全地处置深水基槽复合边坡上淤积物的工艺技术，在国内首次成功实施，并不断总结经验改进技术和成熟应用，填补了我国外海深水基槽复合边坡精确清淤施工工艺技术的空白，为今后类似工程提供经验借鉴和推广应用具有重大意义。

**关键词：**港珠澳大桥岛隧工程；深水基槽复合边坡；精确清淤；施工工艺

**Abstract :** For collapse of the silt on The E15 segment side slopes of The island & immersed tube project for the HZMB, by discovering problems – analysing problem - solving problem ideas, discussing the technique of using trailing suction hopper dredger to accurately and safely dispose the silt on compound side slope of deep water foundation trench in the case of high risk, high standard and without mature process technology or construction equipment., the first successful implementation in the domestic, and constantly summarize the experience, improve technology and apply maturely, fill the blank of the precise dredging construction technology for the silt on compound side slope of deep water foundation trench in our country, it can provide experience and application for similar projects in the future.

**Key words :** the island & immersed tube project for the HZMB, compound side slope of deep water foundation trench, precise dredging, The construction technology

作者简介：

林巍，（1986-），高级工程师。中交公路规划设计院有限公司，从事隧道工程咨询设计工作。2008 年长沙理工大学隧道与地下工程工学学士；2016 年爱丁堡大学与格拉斯哥大学结构工程与力学理学硕士。

### 1 概述

港珠澳大桥岛隧工程，起于粤港分界线，穿越珠江口铜鼓航道、伶仃西航道，止于西人工岛结合部非通航孔桥西端<sup>[1]</sup>，全长7440m，其中沉管隧道基槽长5664m，底宽41.95m，底标高-16.3~-48.5m；纵向采用3.098%、2.996%、1.613%、1.49%、0.3%等多种坡率组合，呈W型布置，纵断面如图1所示，横向按1:2、1:2.5、1:3、1:5、1:7等不同坡比放坡，横断面如图2所示。基槽土质自海床面往下，大致为淤泥及淤泥质土、粘性土、砂性土。

2015年2月，E15管节在安装过程中，突然发现沉管隧道E15~E16管节基槽北侧边坡上的淤积物出现了局部滑塌现象，破坏了已铺设碎石垫层，如下图3、4所示，导致该管节安装不得不再次被迫推迟，并对岛隧工程整体项目工作直接造成了重大影响。因此，为规避边坡回淤物滑塌的风险，有必要在沉管安放前采取必要措施对基槽边坡上可能处于不稳定状态的淤积物进行合理处置：修坡或清淤。

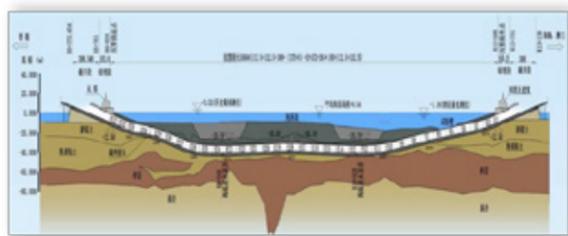


图1 港珠澳大桥沉管隧道基槽纵断面布置示意图

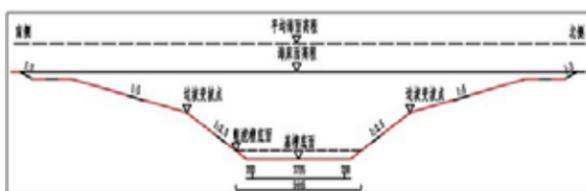


图2 沉管隧道基槽横断面图

(1) 修坡方案，如新设置纳淤沟或纳淤平台，或重新开挖边坡减缓边坡坡度，以增加边坡纳淤能力，但此方案会增大工程量，延长施工工期，且采用抓斗船开挖工艺并不能彻底清除回淤物，淤积物滑塌的风险仍然存在。

(2) 清淤方案，清除边坡已累积淤积物后，通过监测由设计评估是否再清淤。如采用定点“盖章式”工艺专用

清淤船“捷龙”轮对复合边坡上淤积物进行高精度清淤，则远超出了该船原设计于深水平底基槽清淤作业的能力，超大面积的边坡及边坡上的“崎岖不平”，会造成其施工效率很低，不能满足每一个管节须短时间内高效清淤的节点要求，且施工过程中，易造成吸淤头和桥梁架碰撞边坡面而导致折断风险。

经综合比选，最终我们提出了采用具有DPDT（动态定位和动态跟踪）与DTPS（挖泥轨迹显示）操作系统的大型耙吸式挖泥船进行复合边坡精确清淤的技术方案，并开展试验及典型施工。

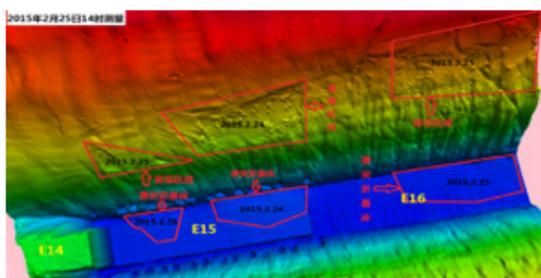


图3 E15~E16管节基槽北侧边坡淤积物局部滑塌示意图

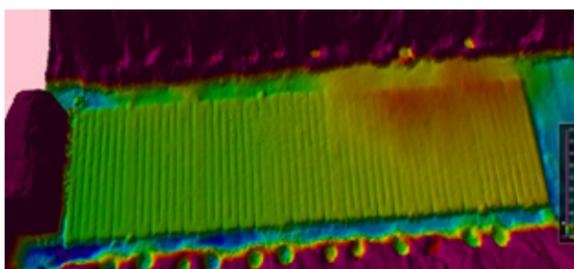


图4 沉管安放前E15基床例行检测三维效果图（异常淤积）

### 2 清淤要求

基槽边坡上的回淤物土质与基槽边坡的土质不同，虽然基槽边坡稳定，并具备了一定的纳泥功能，但是当1:5及1:2.5边坡上的回淤物厚度积累到一定厚度后仍存在滑塌的风险，直接影响沉管隧道基础及管节安装<sup>[2]</sup>。边坡上超过一定面积和一定厚度的淤积物是一个重大隐患，需对边坡回淤物进行处置，对此，设计部门明确了边坡清淤要求，如表1所示。

表1 基槽边坡清淤要求<sup>[3]</sup>

序号	工序安排	淤泥清除标准	检测时机及频次	检测方法
1	碎石垫层铺设前基槽边坡清淤	回淤物平均厚度 < 0.5m	碎石垫层铺设前 15天、7天各一次	采用多波束测深仪测量

### 3 风险分析

鉴于采用大型耙吸式挖泥船在外海深水深槽复合边坡上进行精确清淤施工，在国内尚属首次，即使在国外也没有成熟的施工经验可借鉴，清淤作业不能破坏边坡原状土且不能对相邻管节隧道基槽基础施工作业造成影响等高标准要求，因此该施工工艺技术具有较大的施工风险，必须做好施工风险分析。其主要施工风险和难点包括：

(1) 边坡原状土扰动风险：边坡清淤时需避免对边坡原状土的破坏，否则可能造成大面积边坡滑塌风险，尤其是耙吸船航行中清淤作业所可能产生的这种风险更大；

(2) 清淤尾水扩散风险：由于沉管隧道多个管节基槽的不同基础施工工序同步展开，应严格控制清淤尾水对相邻区域回淤影响；

(3) 斜坡作业风险：缺乏耙吸船在斜坡上精确施工作业的经验，存在较大的人为误操作风险。

### 4 典型施工

为防范以上施工风险，须通过典型施工，认真研究耙吸船在边坡上精确清淤的施工工艺技术和工效，关键在于严格控制耙头的平面定位和深度的精度及其稳定性。为此，我们利用E15~E17管节基槽北侧1:5边坡区域，采用具有DPDT系统、DTPS轨迹显示系统的大型耙吸式挖泥船“浚海5”轮，开展复合边坡淤积物清除处置的典型施工，“浚海5”技术参数如表2所示。

表2 “浚海5”性能参数

船舶总长	131.3m	常用挖深	28m
形宽	25.4m	加长挖深	39m
型深	9.8m	最大挖深	46m
平均型吃水	7.0m	吸泥管内径	900mm
满载吃水	8.45m	主机功率	5780KW×2
舱容(吃水8.45m时)	10288m <sup>3</sup>	侧推功率	441KW×2



图5 万方耙吸船“浚海5”轮

耙吸式挖泥船DPDT系统，是利用各类传感器测船的运动状态及风浪流等环境力，通过计算机的实时计算来控制艏侧推、CPP及舵产生适当的推力和转矩，以抵消环境力的影响，使得挖泥船尽可能在设定的船位、艏向或预定航迹进行疏浚施工，从平面上进行控制，保证对边坡区域全面覆盖，减少漏清风险。由中交广航局自行研发的DTPS挖泥轨迹显示系统，能够显示疏浚矩阵、差异矩阵，可对水深测量文件色块视需要进行调整，施工过程中动态显示挖泥断面，且耙头与船体的比值图物完全相同。操耙手可根据断面显示控制下耙深度，经过多日上百次反复操练，耙头动态控制逐步熟悉，使得清淤后断面控制在目标深度范围内。

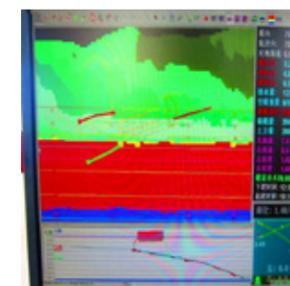


图6 DTPS系统显示界面图



图7 DPDT系统控制台

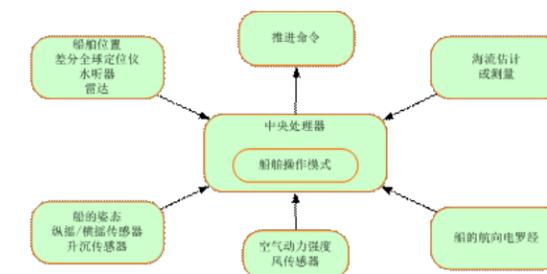


图8 DPDT系统基本原理图

通过边坡淤积物处置典型施工效果分析表明，利用 DPDT 系统测试出来的航行轨迹线与目标航行轨迹线基本吻合，说明耙吸船船体定位动态控制达到精度要求，能达到全覆盖、均匀布线清淤目的（见图 9）。通过 DTPS 挖泥轨迹显示系统分层控制耙头深度，可以有效清除基槽边坡淤积物（见图 10），这说明耙头的动态控制也达到了预期精度要求。

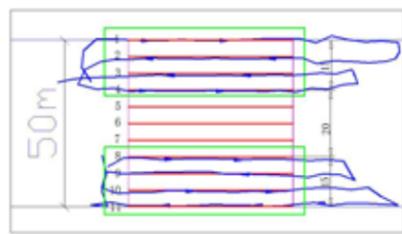


图 9 DPDT 试验航迹图

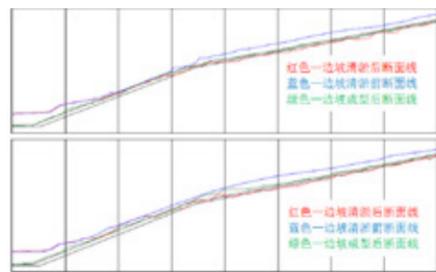


图 10 典型断面对比图

### 5 施工方法

通过以上典型施工，耙吸式挖泥船边坡精确清淤施工方法总结归纳如下：

(1) 根据设计标准断面，利用 AutoCAD 软件编制高差为 2m 的台阶式施工导航文件，将边坡清淤范围均匀分隔成不同标高的台阶，参见图 11，仔细校验施工文件，确保准确无误。

(2) 耙吸式挖泥船采用动态 DT 挖泥模式，具体步骤：1) 根据开挖区域和施工作业条件合理布设耙吸船迹线，在系统的预设航迹点表中输入航迹线各控制点坐标；2) 按预设航迹线路进行试航作业，根据现场风、浪、流、涌等环境力影响，合理调整船艏向、偏航角和航速，控制耙头以与预定的航迹最小的偏差航行，经多次试航作业综合选取合适的船艏向和航速并输入系统参数设置；3) 由船员人工控制耙吸船以合适的船艏向和航速，航行至 DPDT 试验

区预定航迹线的起点上，然后切换到 DPDT 控制模式，系统将自动开始操作船舶，控制耙吸船按预定航迹线航及耙头设定标高开始疏浚过程；4) 船舶到达航迹线终点时停止吸淤，将耙头提升至安全高度，船航行至下一条航迹线；5) 再次放下耙头，重复进行精确清淤作业。

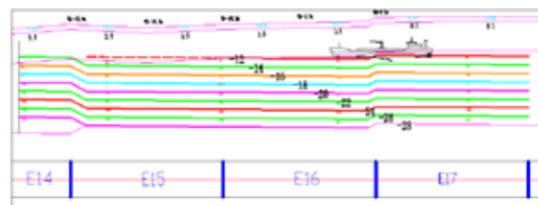


图 11 施工背景文件示意图

(3) 施工过程中同时通过 DTPS 导航系统清晰获得开挖情况，实时调整下耙深度，进行分层精确清淤施工，如图 12 所示。船舶在施工中合理控制对地航速，由西往东以 0.5 ~ 1.0knt 航速匀速前进，考虑到清淤过程中可能会有淤积物受扰动从坡顶向下滑落，总体施工顺序一般从坡顶向坡脚进行。采取不溢流、不开高压冲水作业方式，对复合边坡上淤积物进行精确清淤施工，装满舱容即停止施工<sup>[4]</sup>。作业过程中，根据涨退潮流节变化，及时调整船舶姿态：平缓潮期间采用顺槽清淤法；涨退潮流速较大期间采用顶流清淤法<sup>[5]</sup>，如图 13 所示。耙吸船精确清淤作业流程图如图 14 所示。

为防止清淤过程中被搅动的淤积物随潮水进入槽中，利用潮流方向合理调整清淤作业安排，涨潮时一般清北侧边坡，退潮时清南侧边坡（岛隧工程施工现场涨潮方向为由南往北，退潮方向为由北往南）。

施工中加强检测，边坡清淤施工期间每天进行检测，分析不同施工阶段、不同施工环境条件下的施工效果，掌握基槽清淤情况，及时更新施工文件，以指导下一步的施工。

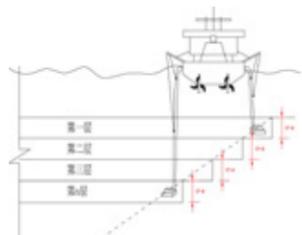


图 12 耙吸式挖泥船复合边坡精确清淤分层施工示意图



图 13 耙吸船平缓潮时段顺槽、退潮时段顶流清淤、涨潮时段顶流清淤示意图

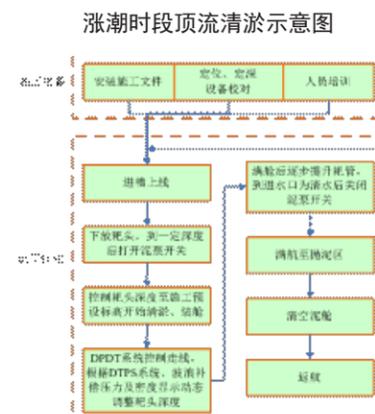


图 14 耙吸式挖泥船复合边坡精确清淤施工工艺流程图

### 6 结语

在高风险、高标准要求又没有成熟工艺技术或施工设备的情况下，耙吸式挖泥船在复合边坡上精确清淤施工技术，经过技术人员和船员们在施工现场不断的研究、操练和改进，在港珠澳大桥岛隧工程沉管隧道后续 E15~E30 管节的基槽施工中得以成功应用，并取得了良好的施工效果和达到预期要求的施工工效，为沉管浮运安装顺利安放提供了强有力的保证。该工艺在国内首次成功实施，填补了我国外海深水基槽复合边坡精确清淤施工技术的空白，为今后类似工程提供经验借鉴和推广应用的具有重大意义。

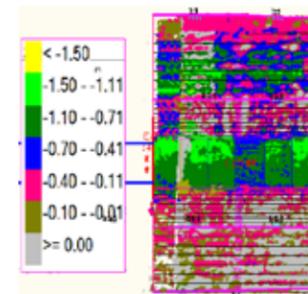


图 15 E15 管节基槽边坡回淤后水深值与基槽理论水深值色差对比图（负值表示回淤物厚度，正值表示未回淤）

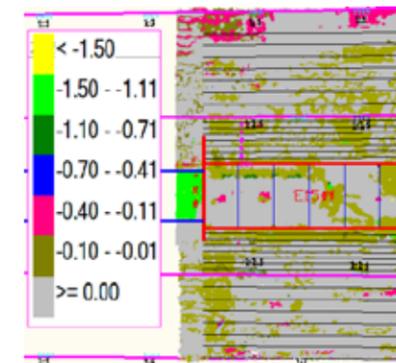


图 16 E15 管节基槽边坡清淤后水深值与基槽实际水深值色差对比图（负值表示回淤物厚度，正值表示回淤物已清除）

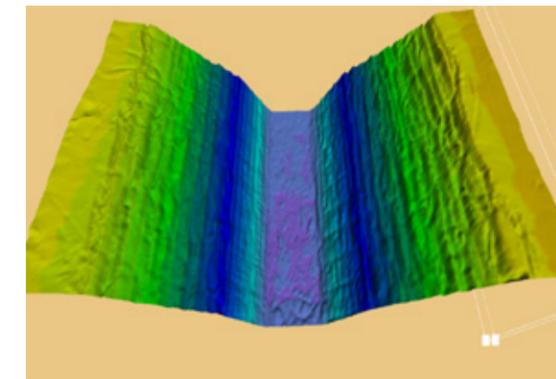


图 17 耙吸式挖泥船边坡清淤后实测效果图

### 参考文献：

- [1] 曹湘波, 陈林, 何波. 港珠澳大桥沉管隧道基槽的回淤控制 [A]. 2016.
- [2] 中交股份联合体港珠澳大桥岛隧工程第 IV 工区项目经理部 QC 小组. 深水基槽复合边坡精确清淤 [R]. 2016.
- [3] 港珠澳大桥岛隧工程专项质量验收标准 [S].
- [4] 中交股份联合体港珠澳大桥岛隧工程第 IV 工区项目经理部. 港珠澳大桥岛隧工程施工技术总结 [R]. 2016.
- [5] 张琦, 朱淋淋. 港珠澳大桥岛隧工程沉管隧道基槽开挖及清淤施工的质量控制 [J]. 中国港湾建设, 2016(7):97-100.

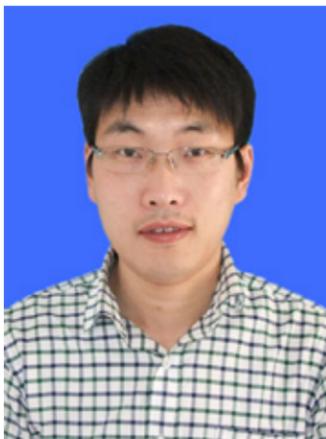
### 作者简介：

陈林, 高级工程师, 中交广航局总工程师、党委委员

于健<sup>1</sup>, 胥新伟<sup>2</sup>, 侯晋芳<sup>3</sup>

中交天津港湾工程研究院有限公司, 港口岩土工程技术交通行业重点实验室,  
天津市港口岩土工程技术重点实验室, 天津 300222

Yu Jian<sup>1</sup>, Xu Xinwei<sup>2</sup>, Hou Jinfang<sup>3</sup>  
Tianjin Port Engineering Institute Co.,Ltd.  
of CCCC First Harbor Engineering Co.,Ltd.



## 港珠澳大桥西人工岛工程监测检测技术及应用

### Engineering Monitoring and Detection Technology and Application of the West Artificial Island of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge

**摘要:** 港珠澳大桥岛隧工程国内首次采用了钢圆筒围堰成岛工艺, 在设计施工上欠缺这方面的工程经验, 并且工程存在较厚的软弱土地基, 而上部结构使用要求高, 因此软土地基处理效果是确保整个岛隧工程质量的关键, 而软基处理工程监测及检测技术又是确保软土地基处理效果的关键技术。本文介绍了该项目的工程监测及检测技术, 为以后类似工程的开展提供一些借鉴。

**关键词:** 港珠澳大桥; 钢圆筒; 软土地基; 监测; 检测

**Abstract:** The island technology of the steel cylinder cofferdam was adopted at home for the first time in Hong Kong Zhuhai Macao Bridge Island tunnel project, and we lack of the design and construction experience. There is a thick soft soil foundation in the Hong Kong Zhuhai Macao Bridge Island tunnel project, and the application requirements of superstructure is high, so the effect of soft soil foundation treatment is the key to ensure the quality of the whole island tunnel project, and the monitoring and detection technology of soft foundation treatment engineering is the key technology to ensure the effect of soft soil foundation treatment. This paper introduces the monitoring and detection technology in this project, and provides some reference for the development of similar projects in the future.

**Key words:** Hong Kong Zhuhai Macao Bridge, steel cylinder, soft soil foundation, monitoring, test

## 1 引言

港珠澳大桥西人工岛位于珠江口内, 人工岛的基本功能是实现海上桥梁和隧道的顺利衔接, 满足岛上建筑物布置需要, 并提供基本掩护功能。人工岛位于外海无遮挡海域, 水深、浪大、流急, 水文气象条件差; 地基为较厚的高压缩性、低强度的淤泥及淤泥质软土。成岛工艺国内首次采用大直径插入式钢圆筒振沉工艺, 岛内软基处理采用大超载比降水堆载预压地基处理工艺。恶劣的水文气象条件, 成岛和地基处理等新工艺的应用都给人工岛建设质量带来挑战, 而人工岛位于桥隧转换的节点位置上, 使用要求极高, 因此为确保工程质量, 在工程实施过程中必须进行科学、合理的工程监测及检测。

## 2 工程概况

### 2.1 工程简介

港珠澳大桥西人工岛平面呈椭圆形, 采用“蚝贝”主题设计, 总面积 97962m<sup>2</sup>, 其基本功能是实现海上桥梁和隧道的顺利衔接, 满足岛上建筑物布置需要, 并提供基本掩护功能, 保障主体工程(岛上隧道)的顺利建设和正常运营。

### 2.2 工程地质条件

上部土层主要地质条件如下:

淤泥(Q<sub>4</sub><sup>m</sup>): 灰色, 流塑状, 标贯击数小于1击, 原位十字板抗剪强度为 6.9kPa, 平均厚度约 3.8m。

淤泥(Q<sub>4</sub><sup>m</sup>): 灰色, 流塑状, 标贯击数小于1击, 原位十字板抗剪强度为 14.9kPa, 平均厚度约 6.5m。

淤泥质粘土(Q<sub>4</sub><sup>m</sup>): 褐灰色, 流塑~软塑状, 标贯击数为 1.8 击, 原位十字板抗剪强度为 29.1kPa, 平均厚度约 12.8m。

粉质粘土(Q<sub>3</sub><sup>ol</sup>): 灰黄色, 可塑状, 平均标贯击数 N=8.6 击, 平均厚度约 3.1m。

粉细砂(Q<sub>3</sub><sup>ol</sup>): 褐黄色, 饱和, 稍密, 局部中密, 夹较多层状粘土。平均标贯击数 N=12 击, 平均厚度约 3.0m。

### 2.3 人工岛设计方案

#### (1) 人工岛成岛围堰

成岛围堰采用插入式钢圆筒及钢圆筒之间的副格, 钢圆筒直径为 22m, 壁厚 16mm, 筒顶标高 +3.5m, 筒底标高为 -37.0m ~ -43.0m, 筒重 445t ~ 507t。圆筒

间标准净距 2.0m, 圆筒间副格仓采用弧形钢板通过止水锁口连接, 西岛副格仓底标高为 -26.5m。钢圆筒采用 8 台 APE600 液压振动锤联动振动下沉, 钢圆筒之间的副格靠重力沿钢圆筒上的榫槽压入至泥面停止后, 采用 2 台 APE200-6T 振动锤振沉至设计标高。



图 1 钢圆筒围堰成岛施工图

#### (2) 岛内软土地基处理工程

根据场地的场区平面布置将整个场区分为岛内区和圆筒区。岛内区指圆筒围闭的区域, 根据工期的要求, 岛内区又分为小岛区和大岛区; 圆筒区指圆筒自身及连接圆筒的格仓的区域。分区示意图见图 2。

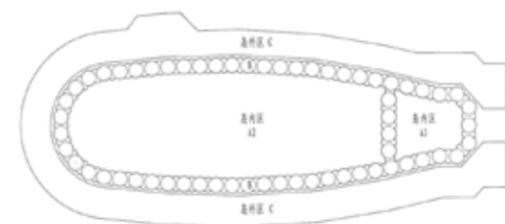


图 2 分区示意图

岛内区软土地基较厚, 淤泥层平均底标高为 -18.2m, 平均厚度为 10.3m, 淤泥质粘土平均底标高为 -31.5m, 平均厚度为 13.2m, 地基处理方案如下:

- ①基槽开挖淤泥至标高 -16.0m;
- ②回填中粗砂至标高 -5.0m;
- ③降水到 -6.0m, 并施打塑料排水板(排水板间距为 1.0~1.2m);
- ④埋设降水井, 并开始降水到 -16.0m, 同时堆载中粗砂到 +5.0m。

## 3 工程监测、检测实施情况

成岛围堰所用钢圆筒直径为 22m, 高度超过 40m,

采用 8 台 APE600 型振动锤联动振动下沉，如此规模的钢圆筒振沉施工在国内尚属首次，在国际上也不多见。为验证设计施工参数，积累相关工程经验，需对振沉过程中的筒身应力、周边土阻力、振锤激振力以钢圆筒频谱等参数进行监测，为后期的分析计算提供依据。

岛内区地基的软土厚度超过 20m，采用了大超载比堆载预压地基处理工艺进行处理，其地基处理质量关系重大，为了确保预压过程中相关施工参数能够满足设计要求，科学评价地基处理质量，确定合理的预压卸载时间，在地基处理过程中需进行地基表层、地基分层沉降观测、地下水位和孔隙水压力观测等监测项目，并在地基处理后进行原状土室内土工试验、原位十字板剪切试验、标准贯入试验和静力触探试验等试验检测项目。

### 3.1 钢圆筒振沉监测

#### 3.1.1 测点布置

在典型施工的 X36# 钢圆筒布置测点 92 个，其中用于振动下沉过程测试的测点共 48 个。其中用于分析振动过程中振动锤下方钢圆筒竖向应力的测点 24 个，用于分析振动锤下方钢圆筒环向应力的测点 10 个，用于分析振动过程中土阻力变化的测点 14 个。

#### 3.1.2 监测设备

钢圆筒应力测试采用无线应变桥路传感器测试系统。系统由无线应变桥路传感器节点、接收网关及节点控制采集监控设备组成。该系统与常规有线动态应变仪相比，仪器轻巧，设备连接快，受场地限制小，可实现无线控制、无线传输及监测。

共使用了 12 个传感器节点，48 个测试通道。采用 4 个网关同时收集数据。各通道之间实现数据同步采集，同步性误差小于 1ms。40 个测点采样频率采用 320Hz，无线传输频率 320Hz；8 个测点采样频率 1000Hz，无线传输频率 1Hz。



图 3 无线网关及监测用电脑

#### 3.1.3 监测数据

钢圆筒应力测点布置位置不同、布置方式不同，在振动下沉过程中采集到的信号曲线形状也不相同。典型的测试曲线见图 4~图 7。

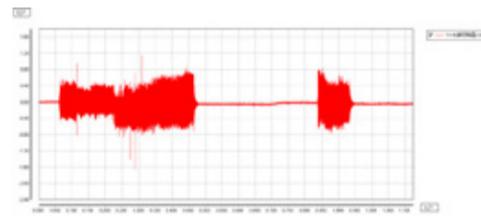


图 4 振锤下方钢圆筒竖向应力测点典型测试曲线

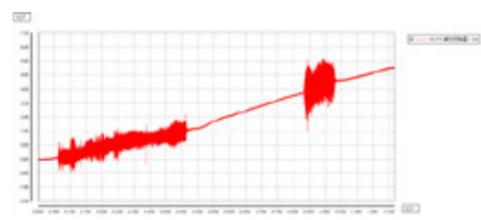


图 5 振锤下方钢圆筒环向应力测点典型测试曲线



图 6 土阻力典型测试曲线



图 7 典型波形细部图形

#### 3.1.4 监测数据分析

根据对钢圆筒振动下沉过程监测数据进行分析：

(1) 测得钢圆筒最大拉应力 100.62MPa，最大压应力 113.44MPa。最大应力发生在钢圆筒底部入土测点位置处。

(2) 振动锤激振力根据计算最大约在 38000kN~42000kN 之间。

(3) 实测钢圆筒振动频率与振动锤输出频率不一致，实测振动频率约为 13.7Hz，振动锤理论振动频率为 23.3Hz。分析认为可能由于振动锤夹紧钢圆筒后，改变了钢圆筒振动锤体系的振动频率。

### 3.2 岛内地基处理监测检测

#### 3.2.1 地基表层沉降监测

地基沉降主要包括两方面：打设塑料排水板过程中的沉降量和预压处理过程中的沉降量。通过用水准仪测量塑料排水板打设前后的砂面标高得到插板过程中的沉降量；测完插板后的地面标高后立即开始放置沉降盘，并测量沉降盘的标高得到初值。

在堆载过程中要及时接高沉降盘的接高管，并且要尽量保持接高管垂直，垂直偏差不大于 2%。严格按照《工程测量规范》(GB50026-2007) 中的有关要求执行。部分地基沉降监测结果见图 8。

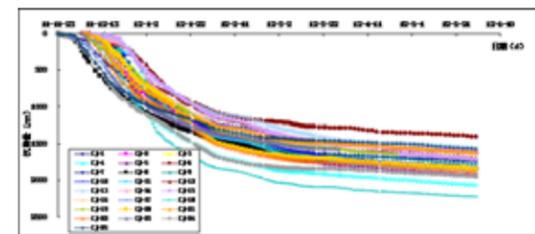


图 8 部分地基沉降监测曲线图

采用经验双曲线法可计算上述地基的固结度和最终沉降量。在恒载作用下，可以近似认为地基固结沉降量和时间存在如下关系：

$$S_t = S_0 + \frac{t}{\alpha + \beta t} \quad (1)$$

在  $t \rightarrow \infty$  时求极限，得下式：

$$S_\infty = S_0 + \frac{1}{\beta} \quad (2)$$

式中：时间  $t$  从满载开始的时间起算； $S_0$  为满载时，即  $t = 0$  (假定) 时的地基固结沉降量； $S_\infty$  为地基的最终固结沉降量；

由表达式 (1)，进行表达式变换，可得到一个直线表达式：

$$\frac{t}{S_t - S_0} = \beta(t - t_0) + \alpha \quad (3)$$

根据式 (3)，由实测沉降观测资料可以得到拟合直线，此直线的斜率即为  $\beta$ ，代入式 (2)，可以得到最终固结沉降量。根据地基处理期间已发生的沉降量可以推算处固结度。经计算，大岛区地基最终固结沉降量平均为 2.6m，平均固结度约为 94.2%，残余沉降量约为 0.15m。

#### 3.2.2 地基分层沉降监测

监测仪器采用电测钢尺和分层沉降磁环 (见图 9)，分别埋设在不同的土层位置。根据土层的分布情况大约 3m 设置一个测头，每组共布置 8~12 个测点。

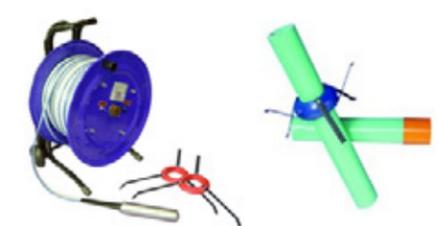


图 9 电测钢尺和磁环

仪器埋设前，按照沉降环设计标高将每一个沉降环的固定环固定在连接好的引导管上用灯草纸将环与引导管栓紧。引导管最下端比最深的沉降环深 60cm~80cm，顶端高出地面 40cm~50cm。每个沉降环下端距引导管接头距离大于该沉降环的预估沉降量，上下相邻两个沉降环距离大于两个沉降环间土体预估压缩量。

部分地基分层沉降监测结果见图 10，对监测结果进行分析见表 1。

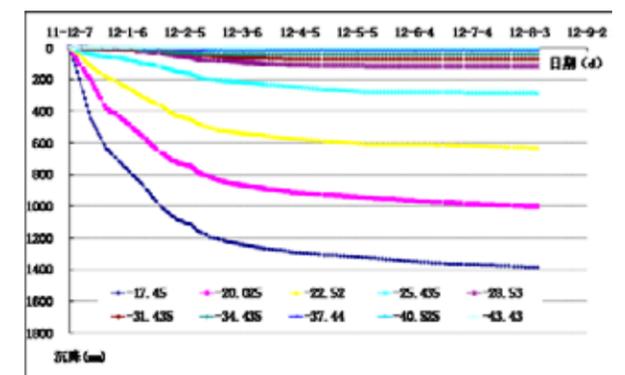


图 10 F9 地基分层监测曲线图

表 1 F9 分层沉降统计

编号	埋设标高 (m)	沉降量 (mm)	土层名称	标高 (m)	土层厚度 (m)	单位压缩量 (mm/m)	固结度 (%)
1	-17.5	1384	淤泥① <sub>2</sub> 及淤泥质粘土① <sub>3</sub>	-17.5~34.4	17.0	78.9	93.3
2	-20.0	999					
3	-22.5	627					
4	-25.4	286					
5	-28.5	117					
6	-31.4	73					
7	-34.4	43					
8	-37.4	19	粉质粘土② <sub>1-1</sub> 、粘土③ <sub>3</sub> 及局部粉细砂夹层				
9	-40.5	9					
10	-43.4	0					

3.2.3 孔隙水压力监测

根据土层分布大约 3m 设置一个测头，每组共计布置 8~10 个孔隙水压力测头，孔深要大于排水板底标高 2m。

测试孔隙水压力设备采用振弦式孔隙水压力计，由测头（孔隙水压力传感器）、接收仪表和导线组成。孔隙水压力传感器透水石在埋设前预先煮沸，以充分排出透水石中的气泡，并在煮后始终将其置于水中；成孔后，孔隙水测头置于砂袋中，一起埋设到设计位置，砂袋由无纺布或纱布缝制并装填中粗砂；采用钻孔法埋设孔隙水压力计，并用膨润土或高液限粘土泥球分段封孔密闭，以隔离上下土层。

部分地基孔隙水压力监测结果见图 11。

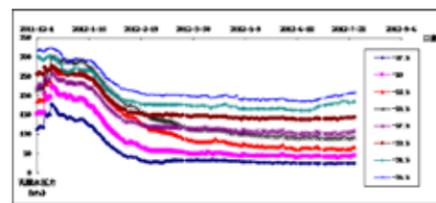


图 11 K7 地基孔隙水压力监测曲线图

3.2.4 地下水位监测

采用钻机钻孔，套管跟进，直钻至设计水位以下 3m 深度处，钻孔垂直偏差不大于 1.5%；将下端封口的花管放入钻孔中，花管上的透水孔成梅花形布置，间距不大于

10cm，花管周边用中粗砂回填；水位管理设后，用水位仪逐日连续观测水位并取得稳定的初始值；进行水位测量时，先测量孔口的标高，再进行水位测量；观测精度不应小于 10mm。

典型地下水位监测结果见图 12。

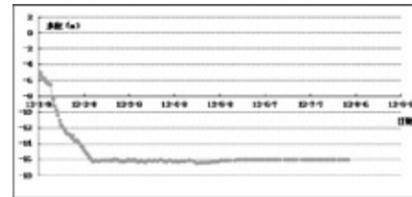


图 12 地下水位监测曲线图

3.2.5 地基处理效果检测

卸载后对大岛地基的加固土层进行了一系列检测，包括取原状土及标准贯入、静力触探、现场十字板剪切试验等原位测试。

对于下部土层（标高 -35m~-18m），为方便对比，选取勘察报告相关钻孔资料与加固后检测孔对比有以下几点：

(1) 与勘察孔相比，主要加固土层的淤泥和淤泥质土（原标高 -16m~-32.7m）标贯击数由原来的 1.8 击增大到 8 击，下部粉质粘土的标贯击数由原来的 11 击变为 15 击，平均增大了 4 击，对比结果见表 2。

表 2 加固前后主要加固土层标贯击数对比表

原土层	加固前	加固后	击数增长
淤泥和淤泥质土	1.8	8	6.2
粉质粘土	11	15	4

(3) 静力触探试验结果

经测定，回填中粗砂的锥尖阻力平均为 7.56MPa，淤泥质土和粘土为 1.33MPa，粉质粘土为 1.80MPa。其他指标见表 3。

表 3 加固后静力触探测试结果

原土层	锥尖阻力 (MPa)	侧摩阻力 (kPa)	摩阻比
淤泥质粘土和粘土	1.33	18.26	1.38
粉质粘土	1.80	31.55	1.76
粉细砂	4.90	170.79	3.49

(4) 室内试验结果可以看出主要加固土层淤泥和淤泥质土预压加固后土体含水率、孔隙比明显变小，而密度和剪切强度均有一定提高，土体压缩系数变小，压缩模量增大，土体压缩性得到显著的改善，加固前后土体的物理力学指标对比见表 4。

4 结论

(1) 港珠澳大桥人工岛工程中所采用的监测检测技术科学合理，实现了施工质量控制、验证设计施工参数的目的。

(2) 通过钢圆筒振沉施工监测获得钢圆筒身的最大、最小应力，便于设计验证设计参数；测得振锤激振力约在 40000kN，与振锤设备厂家提供的 38000kN 接近；并获得钢圆筒的振动频率。

(3) 通过地基处理的监测及检测获得地基土层的物理力学指标，并用于分析评价地基强度和刚度，保证了地基处理质量，同时验证了地基处理设计参数。

5 结束语

钢圆筒振沉过程中工程监测获得了大量宝贵的工程数据，有力地验证了设计、施工参数，为该工艺的应用推广积累了丰富的工程经验。

港珠澳大桥工程建设标准高，软基处理工程中的监测

检测工作能够全方位地评价地基的物理力学性质指标，是地基处理的施工质量控制和上部结构沉降控制的关键，也是直接关系到整个人工岛地基处理和岛隧地基刚度过渡是否成功的关键技术。

通过科学合理的工程监测及检测手段，为设计、施工提供合理的设计计算参数和施工控制标准，过程中及时反馈监测数据，达到了动态设计，信息化施工的目的。

参考文献：

- [1] 中交公路规划设计院有限公司，中交第一航务工程勘察设计院有限公司．港珠澳大桥主体工程施工图设计阶段工程地质勘察报告（西人工岛）[R]．2009 年 7 月．
- [2] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司，中交公路规划设计院有限公司．港珠澳大桥主体工程岛隧工程补充地质勘察（西人工岛区）岩土工程勘察报告[R]．2011 年 6 月．
- [3] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司．港珠澳大桥主体工程岛隧工程施工图设计[R]．2011 年．
- [4] 中交天津港湾工程研究院有限公司．港珠澳大桥人工岛现场监测、检测技术分析与应用研究[R]．2013 年 9 月．

表 4 加固前后土体物理力学性质指标对比统计表

地层	土的物理性质					直剪快剪		固结快剪		三轴 (UU)		三轴 (CU)				无侧限抗压	Es	av	
	含水率 ω	土粒比重 Gs	湿密度 ρ	干密度 ρd	孔隙比 e	凝聚力 c	摩擦角 φ	凝聚力 c	摩擦角 φ	凝聚力 cu	摩擦角 φu	凝聚力 c <sub>cu</sub>	摩擦角 φ <sub>cu</sub>	凝聚力 c'	摩擦角 φ'	原状 qu	100~200 kPa	100~200 kPa	
—	%	—	g/cm <sup>3</sup>	—	—	kPa	°	kPa	°	kPa	°	kPa	°	kPa	°	kPa	MPa	MPa <sup>-1</sup>	
淤泥质粘土及粘土层	加固前	49.3	2.69	1.71	1.15	1.342	25.7	2.2	13.5	15.1	24.4	1.2	14.5	14.3	8.6	26.1	40.4	1.735	1.477
	加固后	35.1	2.72	1.85	1.37	0.995	38.5	7.9	37.4	16.0	51.1	4.7	40.2	16.4	26.5	26.2	127.1	5.270	0.409
	变化量	-14.2	0.03	0.14	0.22	-0.347	12.8	5.7	23.9	0.9	26.7	3.5	25.7	2.1	17.9	0.1	86.7	3.535	-1.068
粉质粘土或粉土层	加固前	27.5	2.71	1.93	1.52	0.790	28.4	10.1	25.4	21.8	26.8	4.6	34.5	18.6	20.4	27.0	59.5	5.785	0.313
	加固后	28.5	2.71	1.94	1.52	0.786	38.5	15.6	34.3	20.8	55.6	6.9	55.0	17.6	27.4	26.7	110.9	7.109	0.269
	变化量	1.0	0.00	0.01	0.00	-0.004	10.1	5.5	8.9	-1.0	28.8	2.3	20.5	-1.0	7.0	-0.3	51.4	1.324	-0.044

作者简介：

于健（1984-），男，工程师，从事岩土工程监测监测工作

康学增

中交疏浚（集团）股份有限公司副董事长 中交生态环保投资有限公司董事长



## 贯彻绿色发展新理念 谱写流域治理新篇章

### ——中交疏浚流域综合治理纪实

## Implement the New Concept of Green Development and Write a New Chapter of Watershed Governance

“生态兴则文明兴，生态衰则文明衰”。党的十九大报告指出，人与自然是生命共同体，人类必须尊重自然、顺应自然、保护自然，报告将坚持人与自然和谐共生明确为新时代坚持和发展中国特色社会主义的基本方略之一，并对生态文明建设作出了具体部署，强调“要加快水污染防治，实施流域环境和近岸海域综合治理”，一场关乎亿万人民福祉、中华民族永续发展的绿色变革，已经开启征程。

向生态环保产业进军，向流域综合治理挺进，既是中交疏浚在习近平总书记“保护生态环境就是保护生产力、改善生态环境就是发展生产力”的重要论断引领下，

履行央企责任担当的重要举措，更是自身转变发展方式、优化产业结构、转换增长动力的内生需求。疏浚行业发端于河流治理，兴盛于城市发展，始终与人类生存发展相伴随，与改善人居环境息息相关，作为环保疏浚业务的引领者，中交疏浚承载着数千年来治水浚河、改善人居环境的使命，蕴蓄着 120 余年近代民族工业化进程的积淀，凭借自身装备、技术优势，完整的产业链优势和融资能力优势，以流域治理综合开发服务商和整体解决方案提供商的自身定位，以水环境（流域）治理、传统水务及固废处理等为核心业务方向，联动湿地土地整理、文化旅游、现代农业、新能源等领域，秉承资源整合、

投资驱动、技术引领、运营支撑、产融结合五位一体的发展策略，开创了流域综合治理“一二三四”的创新实践，即：

**一种模式：**商业模式技术方案管理路径 - 投资主体一体化带动流域治理一体化 - 社会效益经济效益环境效益。

**两个体系：**四观十面两始终，即流域观、自然观、整体观、系统观**四观统一**，生产、生活、生态，第一产业、第二产业、第三产业，社会、人文、经济、环境**十方面结合**，生态修复和智慧管理**贯穿始终**的治理思路体系；策划咨询团队、战略合作团队、金融机构、行业协会、专家团队“五位一体”的资源支撑体系。

**三个转变：**“单一治理”向“综合开发、多重价值提升式治理”转变；“分段、局部治理”向“全生命周期、全流域综合治理”转变；“单纯依靠提供治理技术”向“为社会和人民提供基于自然的整体解决方案”转变。

**四大成果：**白洋淀流域治理项目；永定河流域治理项目；成都锦江流域治理项目；成都沱江流域治理项目。其中，成都锦江绿道及锦江流域综合治理项目即是中交疏浚进军流域综合治理领域率先启动的成功范例。

成都锦江流域覆盖面积 2000 平方公里，人口 1100 万，经济总量 8500 亿元，哺育着蓉城大地，目睹了古蜀文明的璀璨繁荣，见证了天府文化的源远流长，是成都平原重要的水路商道和经济动脉，享有“成都母亲河”的美誉。但近年来，锦江流域存在诸如防洪体系不完善，水资源短缺，水质总达标率低，河渠黑臭效应突出，污水处理效能低，水生态系统破坏严重，生态景观质量及亲水性较差，水文化彰显不足，水产业体系不完善等诸多问题，严重威胁着成都地区的生态安全。

2017 年 12 月 1 日，由中交疏浚所属中交环保、中交天航局与成都文旅集团、锦江沿线 10 个区县联合运作，总投资额约为 300 亿元的成都锦江绿道及流域综合治理项目正式启动建设，标志着中交疏浚在大型流域治理领域又向前迈进了一步。

成都锦江绿道及流域综合治理项目以建设“水、岸、

绿、景、城”五位一体的锦江绿道为目标，以碧水长流、生机盎然的世界级宜居滨水廊道为定位，按照“统一规划、流域治理、集中收储、分项建设、公司运营”的原则，遵循“治水、筑景、添绿、畅行、成势”的路径，按照“一年治污、两年筑景、三年成势”的时序要求，从六大策略着手，共同探索水道、绿道和发展之道：

### 策略一 清水立轴

通过统筹实施全线截污、淤泥清除、初雨收集、闸坝改造、堤岸整治、再生水厂建设、环境配水、生态修复等措施，对锦江流域水环境进行综合治理，实现一江四季清水。

#### 1 水源保护

绿道开发与环境治理相结合，统筹水生态涵养、灌区治理，提升水环境质量，使锦江流域水质不低于 IV 类标准。

#### 2 截污—清淤—补水

开展全流域 120 段黑臭水体治理工程。完成锦江流域 434 万立方米河道清淤工程；建设 13 个再生水厂进行水资源回补，沿河敷设再生水利用管网 371.4km。

#### 3 沟渠恢复

改造 3 处沟渠，新建及改造 4 处湖泊，改造 9 处控制性节点。

#### 4 水利工程

堤岸整治：新建护岸工程 6 公里，城区段堤岸提升改造河段 24.98 公里；防洪排涝工程：治理防洪未达标河段 60 公里，排涝工程治理河段 172.6 公里；闸坝提升改造工程，沿线拦河闸坝 10 座，枢纽提升改造工程 5 座，拦河闸坝提升改造 11 座；拦渣清淤工程：建设府河及清水河拦漂闸，新建 3 处下河马道。

#### 5 局部游船

建设 6 段可通游船河道、7 处中心码头、9 处停靠码头。

#### 6 智慧水务

硬件：（1）新建光纤 160 公里：紫坪铺水库至黄龙溪古镇；（2）数字化河道监控视频：800 处，沿锦江布设；（3）沿河智慧灯杆：458 处，沿绿道布设；（4）数据中心：城区 1 个，其他地区 4 个；（5）会商中心：河道处 1 个，河道处下辖 6 个；（6）水质监控：125 套；（7）智慧水

务其他设备：共计 250 套 / 台。

软件：智慧水务管理系统大平台。

## 7 湿地公园及海绵城市

建设占地 305 万 m<sup>2</sup> 的湿地公园 8 座，绿色屋顶 6 万 m<sup>2</sup>，下凹式绿地 62 万 m<sup>2</sup>，雨水花园 64 万 m<sup>2</sup>，植草沟 71km，透水铺装 130 万 m<sup>2</sup>。

### 策略二 绿道为脉

规划约 240 公里主干绿道，实现水、岸、绿、景、城有机融合；串联沿线城镇村和特色资源，增加交通便利性，提高生态宜居性。

### 策略三 景观营造

全线景观化、景区化，通过乡村振兴、塑景营园、实现四季有景、全时可游，做强“文、商、旅”融合的景观功能。

### 策略四 文化筑魂

设置 269 处驿站，建成伏龙开源、古蜀乡愁、千年画卷、创意天府、绿色郊野五大文化主题展示段；构建锦江全线 36 景；提升 9 个特色小镇；打造 240 处川西林盘

### 策略五 产业重构

都江堰：

主导产业：遗产观光、山林度假；

辅助产业：绿色农业、山地运动

郫都区：

主导产业：都市休闲农业、田园度假

辅助产业：特色文创、特色餐饮、养生养老

五城区及高新区：

主导产业：文化旅游、文化创意

辅助产业：高端商业、时尚设计、教育科研

天府新区直辖区：

主导产业：艺术文创、时尚运动

辅助产业：创新服务、科技服务、商务会展

双流区：

主导产业：体育运动、郊野休闲

辅助产业：智慧农业、健康服务、养生休闲

## 策略六 智慧管理

通过流域监测指挥与决策支持平台、生态空间质量管理信息图、智慧管理大数据中心和流域立体化智能感知和传输网，实现管建一体、人景互动、服务共享

实践证明，流域综合治理以“山、水、林、田、湖”组成的有机生命体为载体，以水资源、水生态承载力为约束，在对各生产要素统筹的基础上全面规划、科学实施，合理安排产业布局、城乡居民建筑、矿产开发、生产生活垃圾处理设备的投放等等，从而优化社会经济生活的结构，进而实现保障流域生态文明建设的可持续性。“流域综合治理”已成为水生态文明建设最为重要的措施和手段。

除了锦江绿道及流域综合治理项目外，中交疏浚在成都地区同时推进的还有沱江流域综合治理项目，锦江、沱江“两江”项目是中交疏浚顺应成都市政府需求与市民夙愿进行高端对接的成果，是践行中国交建“五商中交”发展战略、承接中交疏浚转型升级发展任务的新实践，同时，“两江”项目对成都市生态环境发展、打造绿色生态廊道也具有极其重要的意义，是实现经济效益、社会效益、生态效益统一发展，社会资源优化配置和多方共赢的系统性工程，得到市场的检验和政府的认可。“两江”项目的成功推进，势必树立起综合性、复杂性和系统性流域综合治理的典范，形成可供复制借鉴的经验模式。

继往不平凡，开启新时代！走过 120 余年光辉历程的中交疏浚，正以新时代绿色环保永续发展理念为指引，以奋发、昂扬之姿向流域治理的新目标大步前进，为建设天蓝、地绿、水清、景美的美丽中国提供源源不断的高质量供给。一场人、水、城共融共生融合发展的生态文明协奏曲，已恢弘奏响！



朱连宇

上海振华重工党委书记、董事长

# 积极提高疏浚装备竞争力 助力中国疏浚创新发展

## Actively Improve the Competitiveness of Dredging Equipment to Facilitate an Innovative Development of China's Dredging Industry

中国疏浚行业近十几年来发展非常迅速，无论是疏浚施工水平还是疏浚装备研制在国内相关施工单位、设计院、生产企业的努力下，相继攻克了一系列的技术、工艺制造难关，逐步让中国疏浚这一历史悠久的产业，在新时代下焕发出了全新的活力。

上海振华重工以港口机械制造起步，在短短十余年间，成长为全球最大的港机制造商。2006 年公司开启多元化发展道路，结合自身多年积累的起重技术优势，从陆上走向海洋，开始进军海洋工程装备，并以高技术含量的大型起重船、铺管船叩开了海洋重型装备的大门。十余年来，在海工业务拓展中掌握了如铺管设备、升降系统等一批海工装备核心技术，走了一条既造“壳”更造“芯”的发展

道路，填补了多项国内空白。2008 年振华重工在海工装备业务领域又添新支，涉足疏浚船舶制造，迄今已先后承建了抓斗船、绞吸船、耙吸船等系列挖泥船，目前正在建造我国最大最先进的自航绞吸挖泥船“天鲲号”，并承担了工信部 200 方级超大型自航抓斗挖泥船的研发任务。

最近两年，全球经济下行压力巨大，油气价格处于低位徘徊，码头基建投资总量明显下降，振华重工港机和海工两大主业面临着严峻的市场形势。对此公司也在积极开展内部调整和转型升级，在发展中寻求变革，在发展中解决问题。发展的动力引擎是什么？那就是创新能力，创新商业模式，从而提高产品竞争力，拓宽产业链布局。可以说振华重工的发展离不开公司始终坚持自主创新和科

技术进步，ZPMC 品牌的建立与传播，更是行业大众对我们创新工作的肯定。在本轮世界经济新形势、行业发展新格局下，振华持续发展的钥匙，依旧是依靠创新创效，依靠对现代高新技术的把握，依靠对行业前瞻技术的捕捉。

疏浚工程装备是振华大海工装备发展战略项下的重要业务。随着中国疏浚逐步走向国际市场，不同国家地区的疏浚需求呈现明显差异，疏浚区域由沿海走向深海，疏浚类型由传统业务向海工基建、矿业开采等新兴业务延伸；全球范围对环境整治的重视，传统的疏浚产业面临着日益严峻的生态环保新要求；新一轮科技革命，如 LNG 燃料、人工智能等正在彻底改变原有的技术模式。“工欲善其事，必先利其器”，针对这些新趋势、新变化，振华重工作为海洋工程装备集成制造商，必须从疏浚企业的施工需求出发，拓宽疏浚装备研发思路。

首先，要从疏浚施工全生命周期管理的角度，进行疏浚装备研发，在研发过程中重视价值工程分析，在多用途和专用性方面统筹考虑。提高了产品价值，自然就提高了市场竞争力。2013 年，振华重工向 BOSKALIS 公司交付两艘动力定位多用途船，该两艘船可进行疏浚、岩块输送安放、固体压载及海工结构件安装等多种形式作业，同时可作为铺缆船使用，其设计创新性和多用途性使其获得了 2016 年度 IHS 疏浚和港口建设（DPS）疏浚船舶类创新大奖，也给国内的疏浚企业以启示，要在施工需求的前端，做好船型设置的充分论证。

其次，从生态疏浚、环保疏浚要求入手，将研究低碳、节能、环保船型纳入主要研发课题，以满足国际疏浚市场

的要求。当前以振华重工为牵头单位，正在推进中交海洋工程船舶技术研究中心的建设工作，该中心通过几年来的不懈努力，打造了一支高水准船舶设计队伍，具备了工程船舶自主设计能力，后续要结合市场要求，加强工程船舶型开发和优化，形成自主知识产权，积极为中交集团疏浚船舶发展提供技术支持。

第三，抓住疏浚装备高效化、智能化的发展趋势，提高疏浚核心装备研发和制造能力，依托振华重工海工发展造“芯”的科技创新优势，对关键疏浚装备和控制系统开展研究。振华的海工装备研发，在机电液研发团队的长期努力下，目前在特机、电气集成控制等方面形成了一定优势，如何将这些在海工装备方面积蓄的技术力量，更好引入到当前疏浚装备研发上来，是振华重工进一步开展设计研发资源整合的重要工作。

最后，注重对制造工艺，尤其是疏浚特种装备施工工艺的研究，依靠振华在大型起重、机加工方面积累的优势，做强疏浚船舶制造一环。对于重要的安装工艺及施工控制，逐步形成标准规范文件，提高疏浚船舶标准化、系列化建造水平。通过研发、设计、配套、制造的有机结合，形成总体打包能力，优化船舶性能，提升疏浚船舶整体建造品质。

“咬定青山不放松，立根原在破岩中”，面对疏浚行业的新一轮发展契机，振华重工将聚焦行业前沿，加大科研创新力度，加强总包能力建设，携手国内优秀设计、生产单位，合作共赢，共同提升我国疏浚装备的国际竞争力，为中国疏浚创新发展，为振兴民族疏浚产业贡献最大力量！

# 中交海洋建设开发有限公司

CCCC MARINE CONSTRUCTION&DEVELOPMENT CO., LTD.



中交海洋建设开发有限公司（简称中交海建）坐落于中国（天津）自由贸易试验区，为世界500强企业中国交建（CCCC）旗下新增的专门从事海洋资源开发、油气开采及配套工程等海洋经济产业的专业化公司，同时也是全球规模最大的疏浚公司——中交疏浚（集团）股份有限公司（CCCC-CDC）拓展海洋业务投资、建设、运营的责任主体和核心平台。公司拥有较为丰富管理经验和大型项目实践经验的高素质团队，拥有业内具有代表性的大型先进海工特种装备，包括国内独有的多艘双型重处理机水泥搅拌机（DCM）、全球最大的改装半潜船“创新之路”等。业务领域主要包括：综合性海洋开发工程、土木工程、水利水电、市政公用、基础建设等工程；海洋综合治理与投资建设、海洋资源开发与利用及配套工程、海洋综合智能检测与运维；物流综合性服务业务、物流及仓储业务；特种航运业务、海上拖带、守护及应急业务、大宗散杂货贸易物流等。

中交海建秉持并践行“全球海洋经济共同开发”的理念，依托集团公司的资源统筹、金融支撑、营销网络和全产业链背景等综合优势，将专业化技术、标准化服务与中国交建先进成熟的施工经验以及大型项目的高端运作实力相融合，为全球用户提供专业、优质、诚信、满意的增值服务。



# 大连巅峰集团

DALIAN DIANFENG GROUP

大连巅峰集团是集研发、生产、销售、服务四位一体的集团化企业，始建于1956年，总占地40万平方米，固定资产近7亿元，现有职工近1000人，集团下设五个子公司：大连巅峰橡胶机带有限公司、大连巅峰输送带有限公司、大连巅峰化学橡塑有限公司、大连巅峰投资管理有限公司、大连大友新材料有限公司。2009年5月集团作为大连市八家企业之一参与发行的“集合债券”在深圳交易所成功上市，为集团发展补充了动力。

公司主要产品：疏浚胶管、橡胶护舷、输送带、塑胶场地等，畅销海内外，已远销到澳大利亚、南非、德国、智联、印度、日本、伊朗、巴基斯坦、英国、法国等40多个国家和地区。公司连续多年荣获“中国橡胶制品行业十强企业”、是中国橡胶工业协会胶管胶带分会和橡胶制品分会的“副理事长单位”、中国疏浚协会副理事长单位、辽宁省企业技术中心、大连市民营企业50强，公司董事长荣获全国中小企业优秀企业家、中国橡胶制品行业优秀企业家、大连市优秀企业家等光荣称号。

大连巅峰集团拥有一支技术力量雄厚的博士、硕士研发团队，对疏浚胶管及橡胶护舷等产品不断进行创新，在疏浚胶管弯曲变形、耐磨、密封及法兰端部易磨损方面进行深入研究和改进，已获得多项专利，在天津航道局、广州航道局、上海航道局、中水电集团等诸多项目及国外多项工程中广泛使用，2017年，公司给荷兰客户研发生产的特殊胶管—连接胶管、升降胶管、锥形胶管等，得到了客户很好的评价。



# 湖南百舸水利建设股份有限公司

HUNAN BESTALL WATER CONSERVANCY CONSTRUCTION CO., LTD.

斐济疏浚项目



湖南省株洲市攸县  
苏洲水闸除险加固  
工程项目



洞庭1号挖泥船



湖南百舸水利建设股份有限公司隶属于湖南省交通水利建设集团有限公司，承担湖南交水建集团水利建设核心业务板块。公司拥有水利水电工程施工总承包壹级、河湖整治工程专业承包壹级、水利行业设计丙级资质，注册资本5亿元，现有职工400余人，是一家集“投资融资、设计研发、运营管理、水利建设、生态修复”五位一体全产业链的省属国有企业。

公司具备承接水利水电工程、疏浚吹填工程、河湖整治工程、航道工程等施工项目的总承包和专业承包的施工能力，经营范围还包括水利水电产业投资、管理，疏浚设备维修，加工、销售疏浚设备配件及其它金属结构件，开发、销售新型建筑材料等。

公司通过了中国质量认证中心认证的质量、环境、职业健康安全管理体系认证，荣获了全国水利建设市场主体信用等级AAA企业、全国优秀水利企业、湖南省“守合同重信用”单位等多项荣誉。公司一直秉承“综合疏浚求效益，治理洞庭为人民”的理念，在历年来的洞庭湖治理和湖南的防汛、抢险、救灾中发挥了巨大的社会效益。多年来共承接水利工程项目430余项，施工足迹遍及国内20多个省、市，其中多个项目评为水利项目示范性工程。

斐济疏浚项目

自强不息、厚德载物、追求卓越、领先时代

大连巅峰集团  
DALIAN DIANFENG GROUP

强交通畅行天下·兴水利润泽四方

湖南百舸水利建设股份有限公司  
HUNAN BESTALL WATER CONSERVANCY CONSTRUCTION CO., LTD.

# 浙江建中海洋工程装备有限公司

ZHEJIANG JIANZHONG MARITIME ENGINEERING EQUIPMENT CO., LTD.

浙江建中海洋工程装备有限公司建于2005年，是由原乌镇蒋氏吸油材料厂、桐乡市晓英污染控制技术有限公司改制而成的股份制企业，2008年公司与交通部水运科学研究所共同承担交通部“八、五”科技攻关项目进入水上溢油回收环保行业，是集设计、生产、安装、服务于一体的溢油应急设备的生产商，是国内规模最大的环保企业之一。

公司的主要产品已经形成了淤泥屏障、收油机、围油栏、存储设备、溢油监测系统、浮油回收船等六大类产品。收油机系列产品主要有带式、侧挂式、堰式、绳式、真空式、转盘式收油机；围油栏系列产品主要有充气式、固体浮子式、防火围油栏、PVC、快布放、岸滩围油栏等；辅助设备主要有溢油应急卸载泵、储油罐、收油网、喷洒装置、清洗机、吸油拖栏、吸油绳、吸油毡、消油剂、浮动油囊、定位浮筒等；溢油监测系列主要有水上溢油智能监控报警系统、水上溢油监测浮标、溢油监测雷达、溢油漂移模型、溢油应急预案管理与指挥系统；浮油回收船系列主要有单体和双体浮油回收船。



## 十年磨一剑，砺得梅花香 ——记“2017年度中国疏浚青年才俊”胡保安 Ten Years of Hard Working To Harvest Fruitful Achievements--- Hu Baoan: 2017 Outstanding Young Talent of China's Dredging Industry

2017年11月29日，“2017年度中国疏浚青年才俊”颁奖仪式在中国第五届国际疏浚技术发展会议上隆重举行，中交天津航道局有限公司环保技术中心主任（现任中交（天津）生态环保设计研究院有限公司执行董事、总经理、法人代表）胡保安获此殊荣，这是对他十年来在环保疏浚领域不俗工作业绩的最好褒奖。



胡保安是长期从事环保疏浚机理、技术、工艺研究、参与过大量工程实践、拥有多项行业首创经历的专家，近年来主持完成了3项“国家水专项”子课题、10多项省部级科技研发课题，获得省部级以上科技奖8项，授权专利16项，发表国内外核心期刊学术论文10余篇，EI收录3篇。做为技术负责人参与完成3项国家水专项子课题研究，10项国家科技计划项目、财政部资金支持项目和中交集团科研立项，做为第一完成人或主要完成人已获得十多项省部级以上科技成果奖

会议上，大会主办方安排胡保安在会议上作为年度“青年才俊”的代表进行发言，他这样说：“疏浚产业不但能在‘一带一路’战略下的基础设施建设中成为重要角色，

而且在生态文明建设中必将发挥不可替代的作用。”

2008年，胡保安离开了校园，来到了天航局。作为天津大学的博士生，在周围的同学们纷纷选择高校和科研院所的时候，他选择了企业。那时，中国的环保产业仍处于发展阶段，环保业务在公司里也只占了很小的份额，不少人对他的选择提出了质疑，他只是笑笑，不为所动，坚定地走自己的路，从基层做起，从技术员做起，塌下身子，潜心于科研与工程应用的结合。

初到工作岗位，胡保安就被安排到生产一线学习了解情况，看到员工们一身水一身泥在疏浚现场摸爬滚打，胡保安曾动摇过。尤其是结束一天野外勘测、完成一天的试验回到宿舍，简陋的工地宿舍条件与干净整洁的实验室形成鲜明的对比。但是胡保安还是坚持下来了，他说：“作为一名工技术人员，就是应该在生产第一线。我们的工作脏是累，可我们承担的是疏通江河湖泊，建设美丽家园的重任。”理论需要落地，真理来源于实践，只有知行合一，才能成就一番事业。面对工作的困难和劳累，胡保安不断压低心志，踏实做事，求真务实，工作越来越严谨，越来越接地气，在长达十年为天航乃至中国疏浚业奋斗拼搏的历程里，不断超越，不曾停歇。

十年来，胡保安不忘初心，始终致力于环保疏浚产业链发展延伸，致力于区域环境改善业务的探索。先后开展

了《面向海洋基建工程的悬浮物防扩散装置研究与开发》、《淤泥快速处理及尾水净化技术研究》、《污染场地修复新技术、新设备追踪及设备消化吸收》、《高盐高度高浓度有机废水超临界水氧化处理技术产业化示范研究》、《黑臭水体整治成套关键技术集成研究》等多项课题的研究。多次获得中国施工企业管理协会、中国水运建设行业协会颁发的科技进步奖，并获得了 20 余项国家专利。其本人也获得中国交建共青团创先争优工作优秀青年、全国疏浚行业技术专家、天津市“131”创新型人才培养工程第一层次人选、中国施工企业管理协会科学技术奖、科技创新先进个人等荣誉称号。



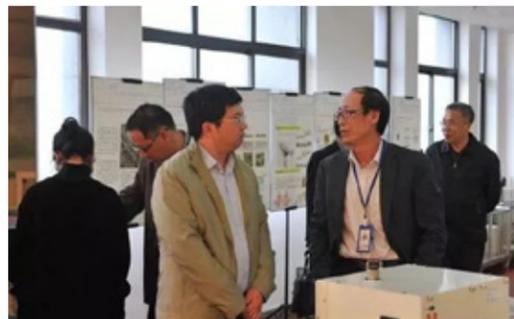
在面向河湖治理的环保疏浚技术与应用中，参与 3 项国家水专项子课题研究，推进研究环保疏浚集成技术，包括精确疏挖技术、污染物防扩散技术、余水净化技术、疏浚底泥脱水减容技术、疏浚土资源化利用技术等，形成了环保疏浚成套技术与工艺，其中，河湖污染底泥分类与取样技术，获得了国家专利并形成相关标准。疏浚土制备建筑材料与种植土再利用技术形成了产业化应用基础。自清洁防污帷幕技术达到国际先进水平，在“一带一路”海外疏浚项目中陆续展开应用。

胡保安在担任海南生态岛建设与维护项目部总工程师期间，顶着酷暑，与技术人员共同实地考察人工岛气候环境，形成了针对人工岛高温、高盐、高湿、高辐射、大风的“四高一”的恶劣环境的“人工岛生态环保建设成套技术”，为避免人工岛建设及发展过程中造成环境污染，对污水及生产生活垃圾处理设备开展全方面调研，并结合人工岛实际情况，形成了基于 3R 原则的“移动式、壳装化、零排放、资源化、全覆盖”的污染治理成套技术，实现了人工岛生产生活垃圾的资源化利用和零排放。

近年来，在重污染水土修复与治理领域，胡保安带领

团队进行了开拓性的工作，担任天津武清污水坑塘环境治理改善工程项目经理期间，针对化工厂苯系有机污染土，采用热解处理工艺；针对高浓度有机废水，采用高级氧化与活性炭吸附再生处理技术组合工艺，相关工艺达到国际先进水平。依托中新生态城污水库治理工程，研究并推进污染土固化稳定化处理处置应用技术的发展。针对高毒高盐高浓度化工废水，与上海交通大学及江苏省环科院共同开展超临界水氧化、高温湿式氧化等废水处理工艺研究。

随着业务水平的步步攀升，胡保安肩负的责任也越来越重。2016 年 7 月，胡保安受命担任中交天津航道局环保技术中心总经理一职。胡保安带领科研团队承担起了天航局环保科研与技术服务职能。作为课题负责人，胡保安对工作一丝不苟，精益求精，创新点抓的准，提的高，科研成果丰富，对科研立项严格把关，努力使科研成果最大化。



2017 年胡保安担任中交天津航道局有限公司雄安新区开发建设指挥部副总指挥后，面对国家特大建设工程，按照“世界眼光、国际标准、中国特色、高点定位”的总体原则，胡保安带领研发团队全力支持雄安新区白洋淀环境治理项目，不分白天黑夜连轴转，参加工作营，成立实验中心，参与治理方案制定等，为推动天航局雄安新区建设工作做出了积极贡献。

胡保安表示：“十九大报告中明确指明了生态文明建设，千载难逢，我们天航局的生态环保转型战略与国家战略高度契合，我们要把握机遇，加速转型发展，助推生态建设科学化、合理化、实用化。”目前，天航局环保业务已涵盖环保疏浚，河湖治理，传统水务，土壤修复，固废处置，流域性、区域性水环境综合整治等多个方面，先后高质量支撑了一系列环保工程。未来，胡保安也将继续坚持并始终牢记“共建绿水青山”的光荣使命，不断前行。

## René Kolman 国际疏浚企业联合会 秘书长



IADC wishes all of CHIDA's members a Happy New Year!

This year, IADC focuses its ambition on sharing the concept of sustainable dredging with the publication of IADC and CEDA's new book *Dredging for Sustainable Infrastructure*.

Containing contributions from leading specialists in the field, the new publication is an authoritative guide on delivering dredging projects that enhance the natural and socio-economic systems.

The book will be an invaluable resource for those responsible for delivering projects with longevity which need to do more than just the basics.

Project owners, regulators, consultants, designers and contractors looking for an up-to-date reference should find it to be a useful tool.

IADC looks forward to a harmonious year of collaboration with CHIDA.

Harmony brings wealth! May a river of gold flow into your pocket!

IADC wishes you every success in dredging!

Sincerely,

René Kolman

Secretary General IADC

国际疏浚企业联合会 (IADC) 祝愿中国疏浚协会 (CHIDA) 所有成员新年快乐!

随着 IADC 和中部疏浚协会 (CEDA) 的新书《面向可持续基础设施开发的疏浚工程》的出版，IADC 将今年的工作重点放在宣传和分享“可持续性疏浚”这一理念上。

包含了该领域顶尖专家的文章，新书是指导疏浚工程，让其与自然和社会 - 经济系统更和谐的权威指南。

对于交付长期疏浚工程的负责人而言，仅掌握基础知识是不够的，这本书将是非常宝贵的资源。

对于寻求最新工程参考和指导的项目业主、监理单位、咨询机构、设计师和承包商而言，都将会发现这本书是一个有用的工具。

IADC 期待与中国疏浚协会 (CHIDA) 今年合作和谐。

和谐带来财富！愿中国疏浚协会成员财源广进！

IADC 祝您在疏浚工作中一切顺利！

# 与自然共建：红树林海岸的可持续保护

## Build with Nature: Sustainable Conservation of Mangrove Coast

摘要：本文首次发表于2016年7月在巴厘举行的第5届国际研讨会(HATHI)。经许可并修改后，在此转载。

后文描述的恢复被侵蚀红树林-泥滩海岸的创新方法，称为与自然共建。该方法将基于生态系统的工程和可持续的土地利用解决方案结合起来，在当地建造一个多产且稳定的海岸线。

为了说明上述方法，本文重点介绍了目前在印度尼西亚爪哇中部的德马克县，沿着退化的海岸线正在进行的与自然共建项目。2014年，为了有助于建立一个将工程和生态相结合的综合管理设计，首先对该项目进行了先进的系统分析。这包括建造可渗透堤坝，防止沿岸淤泥流失，随后在淤泥底质上修复了红树林防护带。此外，项目组建议采用更可持续的水产养殖制度，防止土壤沉降对现有生态系统的干扰和破坏，从而解决侵蚀的根源问题。

作为适应性总体规划过程的一部分，上述设计正在与印度尼西亚政府、当地社区和其他利益相关者合作实施。基于广泛的监测工作，项目组也在逐步扩大干预措施，从而稳步向着爪哇北部沿海地区多产和可持续的经济道路发展。德马克县7万人的沿海安全状况从而将得到改善，并有可能为更多的人提供长期的安全保障。此外，积极的干预措施将有助于避免爪哇中部地区进一步遭受沿海洪灾和侵蚀，并提供一个长期的可持续发展前景。

项目组认为，与自然共建综合方法提供了一种可持续的、具有成本效益和适应气候的解决方案，这可能会改变工程界解决热带区域泥质海岸线侵蚀问题的方式。



印度尼西亚爪哇中部德马克县被侵蚀和淹没的海岸线，以及为修复该区域而建造的可渗透堤坝的鸟瞰图。



图1. 爪哇中部区域当前沿海脆弱性

和生态系统及其服务的消失使得沿海居民极易受到侵害。

泥质海岸线通常是动态变化的，自然会受到侵蚀和淤积。红树林数量的变化、不可持续的土地使用和基础设施的建设改变了多种因素，包括细粒沉积物的平衡、水文和土壤结构。这些变化可能会导致原本应当沉积的海岸线朝着相反方向发展，即发生净侵蚀。

政府和当地居民已经意识到，是红树林的减少和土地使用的变化导致了大面积的侵蚀。迄今为止，已经采用了传统的缓解手段来防止侵蚀。

### 2 与自然共建方法 (BwN)

上述海岸保护措施失败的一个主要原因是没有充分考虑到当地的物理、生态和社会条件。因此，项目组决定评估“与自然共建方法”（一种包罗性很广的沿海区域管理方法，基于对广阔的沿海系统功能的深入了解）的适用性（见方框）。

根据项目组对系统的初步理解，定义了这一概念：恢复被侵蚀的热带泥滩需要恢复健康的红树林带。这可以通过建立防止沉积物流失的可渗透堤坝来恢复细粒沉积物的平衡，从而为红树林的生长和海岸的支撑提供底质。

这些包括：

1. （重新）在损失的地方种植红树林。

关于“与自然共建”（BwN）：

2. 用刚性结构保护现有红树林的外围。

3. 用堤坝、护岸和其他类似结构保护腹地。

不幸的是，根据 Winterwerp et al., 2005, 2013 一文，这些措施都大规模的失败了。世界各个区域的红树林修复工作成功率都较低。例如，在菲律宾，在44000公顷土地上，红树林造林存活率通常只有5%到10%。由于红树苗很容易被海水冲走，沿着被侵蚀的海岸线进行的修复已经被证明是几乎不可能的。

同样，刚性结构在很大程度上也无法解决侵蚀问题，因为它们淤积在土壤上无法稳定，反而会对沉积物的平衡造成进一步的干扰。此外，刚性结构可能会对生态系统及其重要服务—鱼类、木材、燃料用木材、海岸保护和净化（可为数百万人提供服务）—产生负面影响。

### 3 关于“与自然共建”（BwN）：

与自然共建是一种沿海区域综合治理方法，通过将智能工程和生态修复相结合，同时引入可持续的土地使用策略，提供海岸带恢复力。相较于传统的硬件基础设施建设，与自然共建提供了另一种解决方案。相对于建造堤坝来对抗“自然”，与自然共建方案提出跟随自然的变化一起

工作。例如，让河流和海流流通，水流带来了泥沙从而加固了海岸线。另外一种修复生态系统，使其再次提供保护，防止极端灾害的发生，并以贝类、木材和康乐场地的形式提供宝贵的“自然资本”。“与自然共建”方法具有气候适应性，与静态基础设施解决方案相比，其建造和维护成本通常较低。

环境效益促使了更多多产和多功能的土地使用。当地利益相关者—包括处于不利地位的团体—参与到解决手段的设计、施工和维护中。这使得该方法在经济上、制度上、环境上、技术上以及社会性上都具有高度的可持续性。同时还缩短了审批程序，并解决了通常与大型基础设施项目相关的人权问题。与自然共建解决方案可以通过多种方式应用。沿海区域解决方案可以包括建造堤坝，同时在内侧建造湿地前滩，并沿岸建造牡蛎礁。解决河流灾害，同时恢复河漫滩，河漫滩能够蓄积城市周边的洪水。

本文中描述的是一个来自印度尼西亚的案例，是与自然共建创新计划的一部分，是一个公私合作项目，由 Ecoshape 联合会进行协调。该项目探讨了荷兰和海外沿海区域可持续发展的工程方法。

该方法通过恢复养护海滩的自然过程和解决人为干扰，优化了大自然带来的好处，并最大限度地降低了工程施工和维护的成本。

与自然共建是一种不会后悔的做法，因为干预是可逆的。这允许“边干边学”的做法：如果发生错误，这不会变得有害，因为干预措施可以被逆转和改变。因此 BwM 项目具有灵活性和适应性，并经常根据吸取的经验教训而不断改进。当然，这也意味着监测 BwM 的工作结果和评估海岸系统的恢复至关重要。

在世界许多地方，红树林海岸正在遭受侵蚀，并且近几十年来一直被侵蚀，导致大量的泥沙从这些沿海系统中流失。通过自然过程带回流失的泥沙需要时间。因此，红树林可能需要数年甚至数十年才能恢复。因此 BwN 项目必须采用阶段性的、长期的总体规划。这样的规划通常包含以下要素：

· 对（原始）生态系统和沿海地貌上发生的社会和

生物-物理过程的详细描述。

- 描述由于人为干扰而发生的变化。
- 描述自然过程如何用于修复沿海系统。这包括在设计和工程计划中，确定适当的工程和生态系统修复措施。
- 一个监测计划，需要为自适应和边干边学的 BwN 方法提供数据。
- 一个建筑结构维护计划，使其能长时间维持功能。
- 由于 BwN 方法仍然很新颖，需要制定一个培训和能力建设计划，使得当局和社团能熟悉这种方法。
- 针对修复后的海岸可持续使用，制定一个社会-经济计划。

## 4 了解物理和生态系统

### 4.1 未受侵蚀的红树林-泥滩海岸

热带地区的淤积海岸通常是泥质的，覆盖着红树林。红树林通常生长在热带、亚热带低能海岸平均海面（或稍上）与回归潮平均高潮位（或大潮平均高潮位）之间，虽然有时红树林也会生长在低海拔区域（Lewis III, 2005）。有恢复力的红树林是具有生物多样性的，有高产物种之间的深刻演替。例如，更靠近水边的海茄苳，以及顶级植被，比如高于岸滩的红树，尽管也可以出现许多其他物种。与腹地的连通对红树林的水文功能十分重要，可以引入淡水和 / 或排出过量的水。

沿着河岸、三角洲、泻湖、潮流入口和沿海开放海岸处，容易出现这些高度多样性的红树林。本文侧重于泥质开放海岸，因为这些与德马克县的工作相关。泥滩沉积物来自于陆地侵蚀，由河流携带至海岸。这些沿海矿床通常有数百至数千年的历史。今天，虽然细粒沉积物被带入沿岸区域，但与遗迹沉积物相比，数量通常较少。因此，在较短的时间内，这些开放海岸的沉积物仍来自于海洋。

由于淤泥粒径非常细，只能在非常平静的水动力条件下淤积，形成十分宽阔和坡度平缓（1:1000—1:1500）的滩床。由于这些平缓宽阔的坡度，潮汐运动很大程度上垂直于海岸线，潮流速度很低。风浪和海浪在柔软的泥床上减弱了，并向着海岸线折射。因此，风浪引起的沿岸输

沙率输通常较低。

红树林泥滩不是一成不变的。潮汐和海浪会导致沉积物的淤积和侵蚀。波浪起着双重作用。即使是最小的波也会侵蚀红树根之间的沉积物，因为这些沉积物太细了。此外，大浪也会侵蚀这些沉积物，但也会从泥滩上卷起细粒沉积物。

因此，小波浪只会带走泥沙，但大波浪不仅会带走泥沙也会带来泥沙。因此，与海岸平行的防波堤会起到相反的作用，因为他们会消灭掉细粒沉积物的岸上补给。

在雨季，由于径流和周边支流的影响，沿海水域变得更加淡水化。因此，形成了跨岸盐度梯度。在回流的作用下，这个梯度驱动着跨岸重力循环，与潮汐运动一起带着沉积物到岸上。在每一天的涨潮期间，沿着爪哇北海岸，大量的泥沙沉积在泥滩上。然而，大部分这些沉积的泥沙在退潮时又会遭受侵蚀，并被带离海岸线。沉积与侵蚀之间的净差异决定了实际海岸是增长还是退化。净差异远小于总沉积速率或侵蚀速率。

图 2 显示了南美洲北部沿岸系统的一些数据（Winterwerp et al., 2015）。净沉积速率、侵蚀速率和总沉积速率之间的巨大差异，意味着总沉积率的轻微变化将会产生显著影响。



图 2. 苏里南 (Suriname) 沿海总的和净海岸泥沙沉积时间平均为 50 年。例如，海岸总沉积量减少 1% 可能导致 1400 万吨 / 年的净海岸沉积物被侵蚀，该侵蚀规模较大且无法控制。

总沉积率和侵蚀率的轻微变化决定了海岸线是增长还是退化。

### 4.2 受干扰的红树林-泥滩海岸

在全球范围内，由于各种原因，红树林海岸正被侵蚀或退化。侵蚀的主要原因为：

1. 为了各种目的，比如生产木材和木炭，大规模地砍伐红树林。
2. 基础设施建设比如道路、港口和其他人为因素比如城市化进程，往往会影响沿海系统的水文和 / 或沉积物对沿海系统的补给。
3. 沉降、自然减少或通过地下水而减少，这是雅加达、三宝垄和爪哇其他区域上存在的一个主要问题。
4. 土地使用的变化，即，将红树林大规模转化为农田或水产养殖塘，尤其是这些距离水边太近。

Winterwerp et al. (2005, 2013) 一文从上述的泥沙总量变化和净沉积变化之间的巨大差异中推断出，基础设施工程、沉降和土地利用会在很大程度上扰乱沿海系统的总沉积速率和侵蚀率，从而将早期稳定或淤积的海岸系统变为侵蚀模式。换言之，这些不利的人为干预扰乱了沿海系统细粒沉积物的平衡。

### 4.3 案例分析：德马克区域的初步研究成果

印度尼西亚海事与渔业部选定了爪哇中部的德马克区域为目标研究区，自本世纪初，该地区的海岸线退缩了 1-1.5 公里。德马克县约有 7 万人遭受沿海洪灾和侵蚀，海水吞噬了整个村庄。许多人收入都因此遭受重大损失，在部分村庄收入损失高达 60%-80%。另外，作为印度尼西亚的经济支柱产业—农业和水产养殖业遭受了数十亿美元的损失。沿爪哇北部的整个海岸线，有 3000 万人正面临失去房屋、道路、耕地和生计的风险。

这个小规模的试点项目于 2013 年启动，

在五年计划（2015-2019）中，扩大了项目规模。

针对该区域的战略是恢复沉积物的平衡，并通过建造可渗



图 3. 在项目组的监督下，当地承包商正在建造可渗透堤坝。在职培训是 BwN 方法的重要组成部分。

（照片来自：Tom Wilms）

透的灌木丛堤坝来恢复红树林栖息地（图 3）。在面积约 100×100 平米的格栅内，设置可渗透坝，从而形成泥沙可沉积的静水池，加大了总沉积速率。因此，适宜红树林生长的淤泥底质得以恢复。因此，当地沉积物变化的总效应和净效应之间的巨大差异正在得到最佳利用。

在不久的将来，红树林将会生长并超过这些堤坝。这些堤坝是暂时的，稳定的红树林带一旦形成，就会接替这些堤坝，可以缓冲海浪，并自行固定泥沙。因此，可渗透堤坝需要维持足够长的时间来等待红树林成长到可以接替它们，维持时间为泥沙沉积速率（2-5 年）和红树林恢复期（3-5 年）的总和。一旦建立了第一道防线，在后续步骤中，可能需要沿海岸边建立几道新的可渗透堤坝防线，直到恢复稳定的泥岸滩。

这种方法只能是恢复被侵蚀海岸沉积物平衡的一种手段，强调这一点非常重要。因为这种方法绝不应该用于改造天然红树林泥滩、海草床和其他生态系统。这些生态系统是保护海岸线的重要组成部分，支撑当地渔业，并具有重要的生物多样性价值。

针对德马克县的这一项目，为其量身定做了一个优先方案。该方案主要包括：

1. 通过在战略地点建造临时可渗透堤坝，保护房屋和基础设施（道路）不受进一步侵蚀。
2. 恢复当地的红树林生境，使红树林边缘带可以成长为最终的海滨防御线。
3. 恢复可持续发展的红树林，红树林要建造和修复到边缘带（如第 2 点所述），同时也要建立与腹地的连接。
4. 开展可持续的社会经济活动，为海岸恢复提供资金。

BwN 项目开展至今（2013 到 2016 年）的三个目标，为：

1. 对社区和基础设施建设重要的地点，防止这些地点的水土流失。
2. 证明 BwN 方法对海岸保护是可行的。
3. 从德马克县的试点项目中积累经验，以便在别处扩大升级。

作为首个试点项目，2013 年 11 月建成了 3 处网点，

包括在特定位置进行的早期红树林再植（如图 4a 中所示的一处），使得净沉积率在 12 个月内达到约 0.5 米。

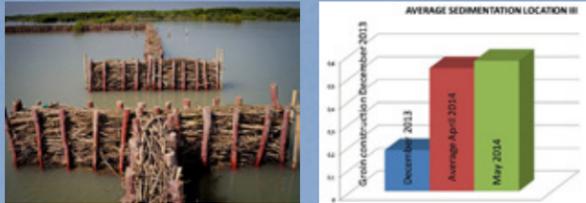


图 4a. 2013 年建造的一个可渗透的交叉拱形坝。  
图 4b. 2013–2014 年雨季积累的沉积物。



图 5. 德马克地区在 2015 年和 2016 年建造的可渗透堤坝布局，以及最终配置的草图。

尽管从水文-泥沙沉积学（图 4b）的角度来看，这个试点项目非常成功，但是让项目组非常惊讶的是，船蛆会摧毁可渗透堤坝。

由于在 2013 年项目取得的良好结果，因此计划在德马克县建造更大规模的新型可渗透堤坝。2015 年开始了这项工程。图 5 展示了这些计划，其中已经实施了大部分内容。布置这些可渗透堤坝旨在恢复已消失的水产养殖塘中的红树林边缘，以实现可持续的海岸保护。由于遇到了船蛆问题，2015/2016 年的工作包括了对各种建筑材料的试验。这种“边干边学”的方法也是 BwN 方法的一个固有特性。

除了施工之外，还进行了维护和监测项目。此外，根据项目组的经验，还起草了关于设计、施工和监理的详细说明。这些说明和获得的经验教训与当地所有利益

相关方共享，包括各部委、这些部委的本地分局、本地社区和承包商。以课程和培训的形式开展能力建设活动，通过这些活动，学员可以学习“与自然共建”理念，并应用这一理念。

此外，正在制定位于堤坝之后的有关生产系统的可持续经济活动计划，这一计划最终会产生经济效益，为扩大和维持目标区域（德马克县）和更远的沿海地区的海岸恢复提供资金。通过沿海户外学校，当地渔民将学习应用可持续的水产养殖模式，为红树林的恢复提供空间，并减少化学品的使用。

“生物权力”是一种财务激励机制，可以让当地社区参与到“与自然共建”项目中。作为积极参与保护和恢复措施的回报，社区可以获得（财政）支持以发展可持续的谋生之道，从而获得收入。就德马克地区而言，这可以变为沿海安全活动，比如对 BwN 建筑结构的检查、小规模维护和监测工作、以及对可持续水产养殖发展的支持。

目前在德马克地区的 BwN 项目结果令人振奋。结果显示确实固定住了泥沙，恢复了当地沿岸沉积物的平衡及红树林的生境。第一批红树苗已经自然生长了。这是重建健康红树林生态系统的第一步。与社区一起，项目组正在制定一个计划来维护缓冲区，并可持续地管理其中的自然资源（木材、鱼等）。随着试点项目如火如荼地进行中，项目组希望当获得更多的实践经验和结果时，能够分享更多的成果和经验。

据了解，这种做法并不总是可行的，例如在有限土地上承受了高度发展压力的城市区域。在这种情况下，只能采取更传统的沿海保护措施。这种传统措施的费用很可能从 1 百万美元/公里—1 千万美元/公里之间变化，尽管传统措施造价可能要高得多，比如环堤，但仍建议使用环堤保护雅加达免遭洪水。德马克地区目前建造的可渗透堤坝成本约为 10 万美元/公里。预计在获得更多经验时，成本可能会大幅下降。尽管这仍然是一笔可观的资金投入，但是避免经济活动遭受灾害和带来的收入增加，以及修复的自然资本价值比这笔投入要大得多。因此，预计 BwN 将会提供一个强有力的商业案例，特别是在农村，这些地

区无法获得大量的发展预算。BwN 是一能个适应气候变化影响的方法，只要这些影响不超出红树林应对海平面和水文变化的自然能力。由于 BwN 方法具有成本效益，且能带来多重利益，因此投资无后顾之忧。而且，由于它是一种边干边学的方法，项目解决方案也可以灵活多变。与此相比，硬件基础设施方案是无法达到此效果的，因为硬件设施是静态的，只提供一种功能，而且造价昂贵。

## 5 致谢

印度尼西亚“与自然共建”项目来自以下单位之间的合作：代表印度尼西亚政府的海事与渔业部（MMAF）、公共工作与人类定居部（PURR）以及 EcoShape 联合会，EcoShape 联合会由疏浚承包商、工程公司、科研机构、大学及政府部门组成，是实施“与自然共建”创新性项目的基础。

国际湿地组织协调了以下机构之间的合作参与：Witteveen+Bos 咨询公司、荷兰三角洲水力学所（Deltares）、瓦赫宁根大学、IMARES、联合国教科文组织水教育学院（UNESCO-IHE）蓝色森林（Blue Forest）、印尼蒂博尼哥罗大学。

该项目得到了中爪哇和德马克区政府、以及当地社区的支持。

通过荷兰可持续水资源基金会、滑铁卢基金会、奥特基金会、荷兰研发与创新联合会、以及未来红树林组织之间的合作，得以成功地在印度尼西亚开展“与自然共建”项目。

## 6 结论

在全世界，数千公里的热带红树林海岸面临着人为干扰造成的剧烈侵蚀。沿海管理人员经常试图通过单方面的传统措施，比如刚性结构，来解决海岸侵蚀问题。

如果能有规模的实行这些措施（例如在城市环境下），这些措施可能会有效，但这会扰乱泥沙的沉积和流失之间的平衡，也因此可能会造成进一步的侵蚀。另外，由于红树苗很容易被海水冲走，沿着被侵蚀的海岸大规模（再）植红树林已经失败了。

为了获得红树林的成功恢复，重建天然红树林再生的

自然条件是必须的。这通常涉及到恢复水文和沉积物的平衡，从而确保良好的土壤高度。它还需要积极的干预措施，如恢复河流，或沿侵蚀海岸固定沉积物。

此外，必须制定可持续的经济活动计划，将造成红树林消失的经济方式转变为气候智能型经济，最终还可以为农村地区的海岸恢复提供资金。

本文重点介绍了 BwN 方法，该方法提供了一种可持续的、具有成本效益的、且能适应气候的解决方案，这一方法可能会改变工程界解决热带泥岸滩侵蚀问题的方式。

BwN 方法基于对广泛沿海系统功能的深入了解，是一个全面的沿海地区管理方法。

它旨在恢复生物-物理条件，这些条件是修复退化的沿海系统所必需的，同时也旨在促进可持续的社会-经济发展方式。目前在爪哇中部德马克地区进行的 BwN 项目结果是令人振奋的，并表明恢复红树林边缘带来保护内陆、现存的许多社区和基础设施是可能的。

项目组认为对沿海区域管理者和施工单位的水力工程师而言，必须对成本、利益和风险进行评估，从而了解到与传统的基础设施方案相比，BwN 方法的表现如何。

当考虑采用 BwN 方法时，采用阶段性的、长期总体规划是必需的，其中包括对以下情况的充分了解与掌握：自然、社会经济和制度环境；会导致失败的过程；可用于恢复沿海系统的自然过程；以及这些措施的维护措施和成本。

BwN 项目应采取边干边学的策略，以便能扭转和改变干预措施。这意味着对 BwN 工程的结果进行监测，并评估沿海系统的恢复情况必须是项目计划的关键部分，以便项目能够经常根据吸取的经验教训而进行更新。这样的策略是可行的，因为 BwN 项目的灵活性和适应性都很强。

最后，为了 BwN 项目能得到恰当的规划和设计，确保利益相关者对 BwN 概念有充分的了解、对目标区域系统有了解、获得过一定的设计指导和具备相关的经验至关重要。这可以通过技术指导、课程和实践培训方式来达到。应当强调的是，BwN 项目的成功很大程度上取决于社区在规划和实施过程中的积极参与。因此，当地社区也需要具备知识和资金，与其政府和承包商并肩工作。



**HAN WINTERWERP 教授**

地貌动力学和泥沙运输领域的专家，也是荷兰三角洲水力学所 (Deltares) 黏性泥沙运输研究的资深专家。作为项目负责人，在全球进行了多个流体动力学、水热和水文形态学相关的项目。他是多学科交叉项目团队中的专家，比如印度尼西亚的“与自然共建”项目。他发表（或联名发表）了 120 多篇期刊文章和参考书籍。



**TOM WILMS**

在荷兰代尔夫特理工大学土木工程专业获得硕士学位。2006 年毕业后，他加入了 Witteveen+Bos 公司，担任沿海和河流项目的工程师。曾在哈萨克斯坦、俄罗斯和塞尔维亚工作过，并参与了 Delflandse kust 项目和 IJssel 湖的 BwN 项目。2014 年，去了印度尼西亚参与了雅加达湾的造陆项目和德马克地区的 BwN 项目。



**HENDRA YUSRAN SIRI**

印度尼西亚海事和渔业部 (MMAF) 海岸减灾和气候变化适应部门的副主任。在海岸带管理方面有二十年的经验。目前所在的职位要求他成为负责在印度尼西亚实施的 BwN 项目的技术人员，该项目旨在减少爪哇北部的沿海海岸侵蚀。同时拥有沿海区域管理的博士学位。



**JAAP VAN THIEL DE VRIES**

于 2003 年毕业于代尔夫特理工大学流体力学系。曾在 Deltares 担任高级顾问 / 研究院。之后，于 2013 年加入波斯卡利斯的海洋环境与工程组，担任海洋环境与地貌学的高级工程师。Jaap 代表波斯卡利斯，成为协调 BwN 计划的 Ecoshape 管理团队中的一员。是印度尼西亚 BwN 项目的项目经理。



**YUS RUSILA NOOR**

自 1987 年以来一直与印尼湿地国际机构合作。于 2001 年毕业于荷兰海洋研究所 (NIOZ)。曾专门接受过水鸟生态和保护的教育，从事过有国际重要性的湿地清查工作，及保护濒临灭绝水鸟的工作。目前负责监理国际湿地的恢复项目，包括在印度尼西亚的 BwN 项目。



**BREGJE VAN WESENBEECK**

专注于沿海和湿地生态系统的评估专家。在过去的五年内，一直致力于水管理领域以生态系统服务为目标的国际项目。同时负责协调 Deltares 对 BwN 工程（生态工程）的营销和研究活动，并为荷兰政府实施这些创新性的方法。



**KATHERINE CRONIN**

荷兰 Deltares 生态系统和泥沙动力学的顾问。在沿海和海洋项目方面有超过 10 年的国际经验。最近的工作主要集中在海岸恢复、疏浚对环境的影响和被污染堆场的解决方案。



**PIETER VAN ELJK**

负责“湿地国际”机构的风险降低和气候适应项目，提高湿地的作用，从而保护人们免受洪水、干旱和风暴等灾害的影响。在开发基于生态系统的恢复解决方案时，与开发机构和土木工程部门紧密合作。



**FEMKE TONNELJCK**

在“国际湿地”机构中领导沿海湿地保护相关的项目。目前的工作重点是通过激发良好的红树林管理来提高沿海抗灾能力。她的个人动力是将科学、政策和实践联系起来，从而引发大规模的变革。红树林因为对社会提供的许多服务而引起了她的兴趣，她认为红树林对迈向真正的可持续发展道路至关重要。



**陈存扩**

中交（天津）生态环保设计研究院有限公司，天津 300456

**Chen Cunkuo**

CCCC (Tianjin) Eco-Environmental Protection Design & Research Institute Co., Ltd.

Tianjin 300456, China

## 多系统联合精测水下铁磁性小目标

### Multisystem Combined Precision Measurement of Underwater Ferromagnetic Small Targets

**摘要：**针对水下铁磁性小目标的特点，体积小，磁性弱，不易被发现和存在的不确定性的问题，通过磁力仪、侧扫声呐和多波束三种海洋探测设备的联合应用，充分研究发掘各系统的作业特点，研究总结水下铁磁性小目标精测方法，为水下铁磁性小目标探测提供方案思路。

**关键词：**多系统；联合精测；铁磁性小目标

**Abstract:** According to the characteristics of ferromagnetic small underwater targets has the advantages of small size, weak magnetism, not easy to be found and the uncertainty of the problem, through the magnetometer, side scan sonar and multibeam three marine combined detection equipment, the operation characteristics of the system fully explored, refined iron magnetic measurement method of small target of total water, provide ideas for the ferromagnetic target underwater detection.

**Key words :** multisystem, combined precision measurement, ferromagnetic small target

#### 1 前言

水下铁磁性小目标（如炸弹、水雷、铁锚、浮鼓坠）探测广泛应用于航道锚地海底调查、奥运水上项目水域危险物探测等项目，但相关的专门研究工作还没有得到足够的重视，相关技术还不太成熟。随着我国海洋事业的发展，航道的使用更加频繁，为保证海上船舶航行安全和港口经济建设的平稳、快速发展，完善快速定位搜寻水下铁磁性

小目标的研究很有现实意义。

近年来，磁力仪、侧扫声呐和多波束测深系统在海底地形地貌描绘、锚鼓沉船打捞、铁磁性障碍物探测、水下工程设施监测和 underwater 管道电缆定位等方面得到快速推广应用，对水下大目标的探测取得了较好的成效<sup>[1]</sup>，对于水下铁磁性小目标的探测并未能很好解决，本文依托中缅油航道海底调查项目以铯光泵磁力仪 G882、

Edge Tech 4200MP 型侧扫声呐和 R2Sonic 2024 型多波束测深系统为例来说明他们如何联合精细探测水下铁磁性小目标。

## 2 原理及比较

### 2.1 磁力仪

铯光泵磁力仪是用于地磁测量、工程地质勘探、地质调查、水下潜艇探测等方面的高精度、高灵敏度的海洋探测设备<sup>[2]</sup>。当外界环境的磁场不太强时,对于金属元素 Cs 来讲,它的电子跃迁频率 (f) 和地磁场 (H) 有如下关系:

$$f = 3.49828H$$

经过转换得:

$$H = 1/3.49828f$$

H 表示地磁场强度,单位为 (nT),由上述公示可见,只要准确地测定 f,就能测出 H<sup>[3]</sup>。

光泵磁力仪灵敏度可达 0.01 nT 或更高,采样速率可达 10 Hz 或更高,梯度容忍度远大于质子旋进式磁力仪<sup>[4]</sup>。对于光泵磁力仪,主要具有如下优点:

- 1) 将测磁场转为测频率,可达很高精度;
- 2) 没有温度和零点漂移影响;
- 3) 对外磁场变化响应快;
- 4) 可连续测量,实现海洋航空磁力测量;
- 5) 不需要严格定向<sup>[5]</sup>。

### 2.2 侧扫声呐

侧扫声呐换能器发射声脉冲时,声波以球面波方式向海底方向传播,碰到海底或者水中物体后,反射波或反向散射波(也叫回波)沿原传播路线返回到换能器中,经转换成一系列电脉冲。由于距离远近不同,回波信号到达换能器的时间也不同,距离近的先到达,距离远的后到达,所以收到的回波实际是一个有一定时间跨度的脉冲串<sup>[6]</sup>。

侧扫声呐分辨率高,主要有如下用途:

- 1) 显示微地貌形态和分布;
- 2) 得到连续的有一定宽度的二维海底声图;
- 3) 发现锚鼓、水雷等小目标;
- 4) 发现沉船,显示沉船的坐卧海底姿态和破损情况。

### 2.3 多波束测深系统

多波束测深系统的突出特点是高精度,高效率。多波束测深系统可以同时发射上百条波束并接收相应的回波进行处理,延航向方向生成一条一定宽度的全覆盖水深条带,加上本身高精度的定位系统和姿态系统,能够快速、精

确地测出该条带内地貌的高低、大小和形状。经过处理生成的数据可以形成目标区域的三维 3D 图形,可以直观形象地观察目标区域海底地形地貌的精细特征。多波束测深系统为研究海底的地形地貌、航道码头岸线的测量、疏浚工程的土方计算,寻找沉没的飞机船舰、水下考古、海底管线的铺设等一系列工作提供了更加可靠的手段<sup>[7-9]</sup>。

### 2.4 各系统特点分析

磁力仪采用拖曳方式通过探测目标物引起周边的磁场异常来确定其性质和位置,成本较低、作业速度较慢、目标物定位精度低,但适用于埋藏在海底的目标物的探测。侧扫声呐系统拥有很好的成像效果,通过拖鱼的深拖,使其接近海底从而获得更高分辨率的海底声呐图像。由于拖曳作业方式限制,使得它生成的图像中的目标位置不够精确和判定高度的能力相对较差,且仅适合目标裸露于河床或海底之上;多波束测深系统可获得精确的平面位置和深度,但由于分辨率不如侧扫声呐高,对海底反映的细节度相对较差且也只能反应海面以上的地形地貌<sup>[10]</sup>。

## 3 多系统联合应用

以磁法探测为主线,通过磁异常信号确定水下目标是多系统联合作业的基本思想,结合侧扫声呐测量和多波束测量获得的海底异常地形对目标的存在进行验证和排除,并进行确定性分析,识别确认目标的精确位置和形态,最终达到最大限度获取水下目标信息的目的。其联合作业图如下:

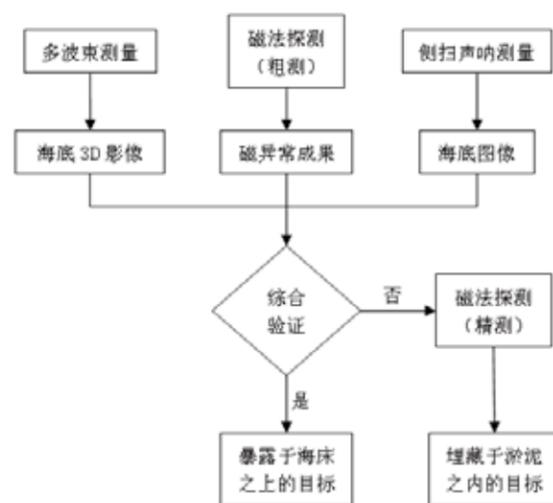


图1 联合作业技术路线图

磁力仪、侧扫声呐、多波束测深仪系统分别采用 Hypack、SonarWiz、QINSy 等软件进行数据后处理。

### 3.1 多波束测量

运用多波束测深系统对任务区域进行高分辨率全覆盖数据采集,建议生成不大于 0.2\*0.2 数据格网,通过 Surfer 软件构建海底地形的 3D 影像图。图 2 为试验测区内绞吸式挖泥船施工区域的水下地形 3D 数值模型,从图中可以看出,施工船的施工痕迹清晰可见,原始海底表面的纹理细腻、逼真。如果局部存在异常特征,可以很方便地进行识别和准确定位。

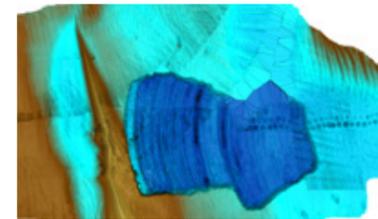


图2 多波束数据生成的海底3D模型

### 3.2 侧扫声呐测量

对任务区域进行声呐探测,获取水下地形图像。根据多波束水深数据,确定拖缆长度和拖曳速度,一般速度应低于 4Kn,确保拖鱼安全下,保证图像分辨率。在线采集时保证 TVG 的稳定,避免由于它的突变引起的图像灰度变化,并且做好记录方便位置解算。

侧扫声呐影像的处理采用 SonarWiz 软件进行,分别进行底跟踪、增益调整、图像纠正、斜距改正、数字化特征采集、条带拼接等一系列处理内容,最终形成海底影像的条带镶嵌图。同时利用 Hypack 软件可将磁力仪测定的异常目标点显示于整体镶嵌图之中。

### 3.3 磁力仪探测

对于海底铁磁性物体,首先使用磁力仪进行探测:

#### 1) 粗测阶段

对整个测区进行系统的探测调查,测线间距为磁力仪对该常见目标的典型探测距离的 2 倍。如目标物的典型探测距离为 5m,则测线间距为 10m。目标物的典型探测距离因每台设备的灵敏度不同而有所不同。

#### 2) 精测阶段

对粗测阶段信号异常区域进行加密探测,将可疑区域分成 100\*100m 的格网布设纵横加密测线,测线间距为目标物的典型探测距离。为保证对小目标(或沉溺于海床面)的有效探测,应使磁力仪有足够小的离地高度;可通

过以下措施保证拖鱼入水深度的稳定、可调:

#### a、改变拖缆长度

通过释放、回收磁力仪拖缆可以实现拖鱼离地高度的上下改变。

#### b、控制船速

由于浮力与海水动力的相互作用,拖鱼入水深度与测量船的航速是反相关的关系,即航速变大,拖鱼入水深度变小;反之航速变小,拖鱼入水深度会变大。

#### c、改变配重

如果在正常航行的情况下磁力仪拖鱼无法达到理想的离地高度,可以通过增加、减小配重的方法进行调整,但在增加配重的同时要采用相应的措施,防止拖鱼下沉速度过快而威胁到仪器的安全。

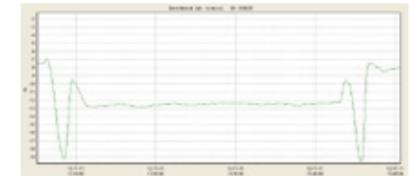


图3 使用 50m 拖缆、20kg 配重的入水深度

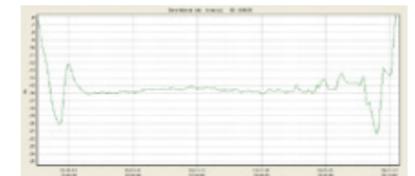


图4 使用 65m 拖缆、25kg 配重的入水深度

在测试环境下,使用 30kg 配重、拖缆长 65m、船速 3kn 时,磁力仪入水深度可控制在 17.5±0.5m(如下图),相对于试验测区 19~20m 的水深,其离地高度小于 3m,保证了目标物的有效探测。

## 4 数据处理与综合分析

### 4.1 磁力仪、侧扫声呐拖鱼的定位

利用 Hypack 软件中拖鱼位置推算设计模型,根据测量船的运行轨迹、拖缆长度、船艏向等条件推算拖鱼在拖带条件下的平面位置,相对直接概算有效提高定位精度。

因此,使用 Hypack 拖鱼定位程序进行定位,可以大幅提高磁力仪、侧扫声呐拖鱼定位的精度和可靠性。

### 4.2 磁异常信号形态与目标体相对位置间的关系

对于感磁为主的点状磁化物体,其磁场分布特征在北半球为南正北负,因此磁异常信号在特征上会呈现与目标体相对位置相关的特征:即目标体在测线南侧会出现负异常信

号(波谷),目标体在测线北侧会出现正异常信号(波峰)。

在进行水下离散目标的探测工作时,仅通过异常信号的强弱往往不能准确确定异常点的坐标。如果在测量过程中布设一定数量的东西向测量线,根据获得的磁异常信号形态即可确定异常点所在的方向,再结合异常信号的强弱进行综合判断,则可以较为准确地对异常点进行定位。

对海底目标点的确定,通过3种成果数据生成的磁异常分布图、声呐图像以及海底数字3D影像进行相互验证,能够得到验证的确定为存在的水下目标,不能得到验证的则通过加密重复探测的方式进行重新确认或予以排除。

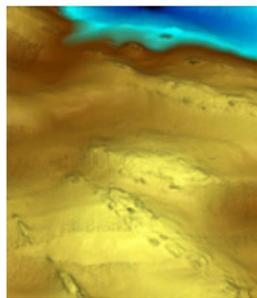


图5 多波束3D数字影像

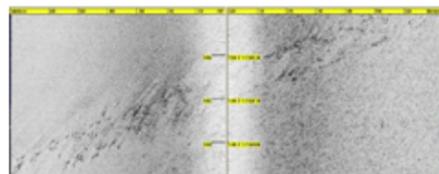


图6 与磁异常点相重合的目标分布图像

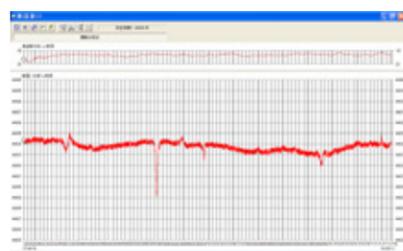


图7 同一条测线上多个磁异常信号

## 5 结语

磁力仪、侧扫声呐和多波束测深系统在海底铁磁性小目标探测中的联合应用,增强了不同设备之间的互补性,大幅提高对水底铁磁性障碍物的搜索能力。合理的流程安排应先以多波束测深系统进行当前海域的水深测量,获得精准的水深数据及3D数字影像图,在了解当前海域的水深情况下,再采用侧扫声呐和铯光泵磁力仪进行大范围搜寻,综合验证之后,再采用铯光泵磁力仪进行精测,直至确定海底铁磁性障碍物的位置。

## 参考文献:

- [1] 王久,周健.侧扫声呐和多波束系统在失事沉船扫测中的综合应用,中国水运,2010,vol10, No.8.
- [2] 吴水根,谭勇华,周建平.铯光泵磁力仪(G880)在海洋工程勘探方面的应用,实验与技术.
- [3] 史歌.地球物理学基础[M]北京:北京大学出版社,2002.4.
- [4] 裴彦良,梁瑞才,刘晨光,韩国忠,李正光.海洋磁力仪的原理与技术指标对比分析,实验与技术.
- [5] G-882 CESIUM MARINE MAGNETOMETER 25919-OM REV. D.
- [6] 许枫,蒋立军,杜文萍.侧扫声呐回波信号增益控制,中科院声学所.
- [7] 陈正荣,王正虎.多波束和侧扫声呐系统在海底目标探测中的应用,海洋测绘,Vol. 33, No. 4, Jul. 2013.
- [8] 黄谟涛,翟国君,管铮等.多波束测深技术研究进展与展望[J]海洋测绘,2000,(3):2~7.
- [9] 王琪,刘雁春,暴景阳.关于多波束与侧扫声呐回波检测方法探讨[J].海洋技术,2003,(3):70~73.
- [10] 董庆亮,欧阳永忠等.侧扫声呐和多波束测深系统组合探测海底目标.海洋测绘,Vol129, No15 Sep, 2009.



张坤

上海交通大学总承包有限公司,上海 200120

Zhang Kun

Shanghai Communications Construction Co.,Ltd. Shanghai, 200120

## SMW 工法桩相关工程造价问题探讨

### Discussion on Construction Cost of SMW Pile Construction Method-Related Project

**摘要:** SMW 工法桩近年来广泛应用于房屋建筑与地铁等工程基坑支护与地基加固等方面,文章以昆明巫家坝片区土地一级开发整理项目中的春城路下穿地道基坑工程为例,探讨了 SMW 工法桩涉及的工程计量、计价、现场签证等工程造价问题并针对存在的问题提出了几点建议。

**关键词:** SMW 工法; 三轴搅拌桩; 插拔型钢; 工程计量; 工程计价

**Abstract:** SMW pile is widely used in foundation ditch supporting and foundation reinforcement in architectural engineering and subway engineering, this article, taking the project of foundation engineering of underpass in the Spring City Road in Kunming Wujiaaba Area land development & arrangement as an example, discusses the problems of engineering cost such as engineering measurement, valuation, site visa, which relates to SMW pile, and puts forward some suggestions to solve these existing problems.

**Key words :** SMW pile, triaxial mixing pile, pluggable steel, engineering measurement, engineering valuation

作者简介:

陈存扩(1974-),男,高级工程师,主要从事海洋测绘和工程测量领域工作。

## 引言

SMW 工法桩又称型钢水泥土搅拌墙，是指通过三轴搅拌桩机械将以水泥为主的固化剂和地基土强制搅拌，各施工单元之间采用重叠搭接施工，再将 H 型钢插入搅拌桩体内，使软土与型钢硬结成具有整体性、水稳定性和一定强度的桩体。该工艺目前在我国房屋建筑与地铁等工程施工中得到广泛应用，主要用于基坑围护结构和止水帷幕。

2013 版云南省消耗量定额中列入了三轴搅拌桩、插拔型钢桩等子目及相关规定与工程量计算规则，但在实践应用中关于 SMW 工法桩的工程造方面依然存在一些问题与争议。结合春城路下穿地道基坑工程中 SMW 工法桩的具体案例，分析相关工程造价若干问题，并提出有助于施工管理的几点建议。

## 1 工程概况

春城路下穿地道全长 1160m，本次实施起止点里程 CCK1+780~CCK2+000，长度 220m，基坑宽度 30.9m~32.1m，基坑深度 1.9m~7.9m，支护采用了 SMW 工法桩（Φ850mm@600mm 三轴搅拌 + 内插 HN700×300×13×24 型钢）作为围护结构，并兼作止水帷幕。SMW 工法桩采用套接一孔方法施工，四喷四搅工艺，水泥掺量不小于 25%。施工要求符合《型钢水泥土搅拌墙技术规程》JGJ/T 199-2010。

## 2 SMW 工法桩的施工内容和工艺流程

SMW 工法桩施工的主要内容有：①场地清理与平整；②测量放线与定位；③开挖导槽；④铺设导架；⑤制浆；⑥三轴搅拌桩机孔位定位、钻孔、搅拌、提升、重复下沉、搅拌、提升成墙、泥浆场内堆放；⑦型钢进场及堆放、刷减摩剂、插入型钢、拔出型钢、型钢堆放及退场；⑧泥浆外运与弃置。具体工艺流程如图 1 所示：

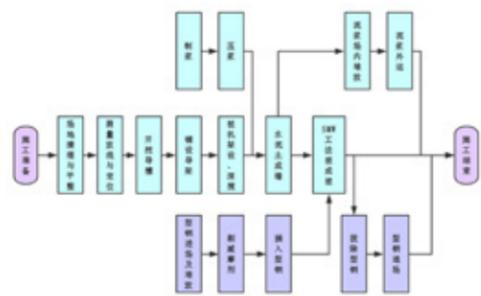


图 1 SMW 工法桩施工工艺流程图

## 2.1 SMW 工法桩相关工程造价问题及建议

SMW 工法桩即型钢水泥土搅拌墙作为一项新的施工工艺，施工工艺相对复杂，涉及水泥土墙施工与型钢插拔等多道工序，且型钢作为临时周转性材料须事后回收。各地近年新修编的预算定额大多已列入 SMW 工法桩相关定额子目，但在实践应用中，亦存在不少问题与争议。结合施工经验与文献资料整理，关于 SMW 工法桩相关的工程造价问题主要包括以下两个方面，一是对选用清单项目所涵盖范围理解不一致导致的争议，二是对清单与定额工程量计算原则与方法不一致导致的争议，以下将结合春城路下穿地道基坑工程具体案例，分析问题所在症结并提出解决的建议。

## 2.2 SMW 工法桩的清单列项问题

通过对 SMW 工法桩的施工内容及工艺流程的梳理与分析，可以判断 SMW 工法桩主要包括相对独立的两部分施工内容，即“水泥土墙”与 H 型钢，其中“水泥土墙”单位为 m<sup>3</sup>，H 型钢的单位为 t，SMW 工法桩即型钢水泥土搅拌墙可直接套用市政工程工程量计算规范（以下简称“市政清单规范”）的 040302005 型钢水泥土搅拌墙，计量单位：m<sup>3</sup>，如表 1 所示：

表 1 工程量清单 040302005 型钢水泥土搅拌墙

项目编码	项目名称	项目特征	计量单位	工程量计算规则	工作内容
040302005	型钢水泥土搅拌墙	1. 深度 2. 桩径 3. 水泥掺量 4. 型钢材质、规格 5. 是否拔出	m <sup>3</sup>	按设计图示尺寸以体积计算	1. 钻机移位 2. 钻进 3. 浆液制作、运输、压浆 4. 搅拌、成桩 5. 型钢插拔 6. 土方、废浆外运

清单列项时，应特别注意该项清单的“工作内容”一列，与明确清单项目规格、型号与尺寸等的“项目特征”一列不同的是，“工作内容”一列明确清单项目包含的工作内容范围，即“项目特征”限定清单项目的细节，“工作内容”限定清单项目的涵盖范围，针对 040302005 型钢水泥土搅拌墙，“工作内容”1—5 包含了 SMW 工法桩即型钢水泥土搅拌墙的两大部分内容即“水泥土墙”和 H 型钢，同时 6 特别列明了土方、废浆外运，该部分很容易被忽略、遗漏，但实际施工时必然产生，由此发生的施工内容往往与业主方产生争议，因此在清单列项时应予以充分考虑。

## 2.3 SMW 工法桩清单工程量计算问题

根据表 1 的计算规则，清单工程量应按设计图示尺

寸以体积计算，即按清单工程量的计算原则所谓“图纸净量”计算，而不是施工工程量。对于“图纸净量”的理解，在工程实践中施工方与业主方往往从自身立场出发，做有利于自己一方的解读。就春城路下穿地道基坑工程而言，SMW 工法桩截面形式如图 2 所示

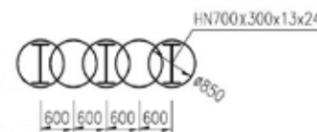


图 2 SMW 工法桩截面图

如图 2 所示，SMW 工法桩有其特殊的情况，三轴搅拌形成水泥土墙为重叠咬合的形式，才能起到止水帷幕的作用。三轴搅拌桩机有三个钻轴，同时下沉钻进、搅拌，三轴之间互相咬合，形成连续的水泥土墙体。此外，根据设计图纸的要求，本工程采用套接一孔法工艺施工，即三个连续桩为一组，相邻每组之间有一个桩孔为重叠，即所谓“套打”或“复打”。本工程有两种方式，如图 3 所示

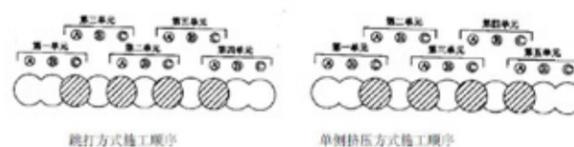


图 3 SMW 工法桩两种“套打”方式示意图

图 3 中阴影填充的桩孔即为“套打”部分，每个套打桩孔重复施工了一次。

以上所述“咬合”与“套打”情况的存在，就是施工方与业主方在计算清单工程量中常产生争议的部分。业主方认为应遵循工程量计算规范，扣除“咬合”、“套打”，只计算“图纸净量”，施工方要求计入“咬合”、“套打”，或者至少计入“套打”，否则该部分施工内容的工料机损失难以弥补，因此工程实践中双方往往就此产生争论。

按工程量计算规范，SMW 工法桩按设计图示尺寸以体积计算，即所谓“图纸净量”。实际上施工方对“咬合”、“套打”部分所产生的工料机消耗增加，可以在综合单价中予以考虑。这样处理既符合工程量计算规范的一般原则，

亦考虑到三轴搅拌桩施工的特殊情况，可以避免因工程量计算方法不同产生的争议以致影响到进度款结算与支付。

按此原则计算清单工程量，如下

$$V_1 = \left[ \pi \left( \frac{0.85}{2} \right)^2 \times \left( \frac{M}{0.6} + 1 \right) - 0.1 \times \left( \frac{M}{0.6} \right) \right] \times H \quad (1)$$

式中，M 为 SMW 工法桩设计平面布置延米长度，本工程单侧 220m，两侧共 440m；H 为 SMW 工法桩设计桩长，本工程 H 为 14.9m，清单量不计设计超深 0.5m，超深部分应考虑在综合单价中；0.1 为单个“咬合”截面积，可由几何图形计算或 AutoCAD 制图快速求得。

## 2.4 SMW 工法桩定额子目套用及定额含量换算问题

查 2013 版云南省消耗量定额，市政工程专业中无三轴搅拌桩及插拔型钢相关定额子目，其中“深层搅拌水泥桩”若干子目只有单管机、双管机，与三轴搅拌桩在施工工艺、机械消耗等方面有较大不同，不宜选用。SMW 工法桩应借用房屋建筑定额的三轴搅拌桩与插拔型钢子目，此外城市轨道交通定额水泥土搅拌围护桩相关子目与房屋建筑差别不大，但在云南地区工程实践中一般借用房建定额子目较为普遍。

在借用房建定额相关子目时，结合清单“项目特征”与“工作内容”，须注意以下几个问题：

### (1) 三轴搅拌桩定额工程量计算问题

“水泥土墙”套取子目 01020075 三轴搅拌桩 水泥掺量 12% 四喷四搅，春城路下穿地道基坑工程 SMW 工法桩设计要求水泥掺量不少于 25%，可套取 13× 子目 01020076 三轴搅拌桩 水泥掺量 ±1% 予以调整；定额子目计量单位为 10m<sup>3</sup>，需要注意的是定额工程量计算规则与清单的不同。

清单工程量为“图纸净量”，不考虑由于施工措施及操作损耗产生的额外工程量，但定额与之不同，定额反映的是社会平均情况下工料机的消耗水平，必须真实反映施工现场情况，以此才能起到指导编制施工预算、组织现场生产以及确定工料机真实消耗的作用，因而必须考虑由于施工措施及操作损耗产生的额外工程量。具体到 SMW 工

法桩的问题上,查相关定额说明,三轴搅拌桩的体积按桩长(桩长=设计桩长+超灌高度,超灌高度设计无规定时取0.5m)乘以成桩截面面积以立方米计算,不扣除相互咬合及重叠部分体积。即桩长为设计桩长 $H+0.5m$ ,成桩截面面积为图示外缘净面积+相邻两桩“咬合”面积+“套打”桩整圆面积。

按此原则计算定额工程量,如下

$$V_2 = \left[ \pi \left( \frac{0.85}{2} \right)^2 \times \left( \frac{M}{0.6} + 1 \right) \times 1.5 \right] \times (H + 0.5) \quad (2)$$

式中,  $M$ 、 $H$  同式 1,  $H$  须加设计超深 0.5m;

经过计算可知,三轴搅拌桩的定额工程量与清单工程量  $V_2/V_1=1.56$ , 即三轴搅拌桩子目的定额含量系数为 GDL (清单量)  $\times 1.56$ , 前述“咬合”与“套打”问题已全部考虑计入综合单价中。

#### (2) 插拔型钢租赁费用问题

SMW 工法中插拔型钢套取子目 01020077 插拔型钢桩(SMW 工法桩), 定额计量单位为 t, 查定额工程量计算规则, 按设计图示重量以吨计算, 故须换算定额含量, 经计算可知, 插拔型钢桩定额工程量与清单工程量  $W/V_1=0.19$ , 即插拔型钢桩的定额含量系数为 GDL (清单量)  $\times 0.19$ 。

另外, 定额规定, SMW 工法桩中插拔型钢租赁日期自首批(50t 为一批)型钢施工完成日起计算, 定额租赁时间暂按 90 天计算, 超过 90 天的租赁费按实际发生的租赁时间计算, 如果型钢不能剥除回收按现场实际发生的数量计算型钢材料费。即定额默认 SMW 工法桩在正常施工情况下型钢自施工完成日(打入日)至拔除回收日平均为 90 天, 如果因为业主方指令或不可抗力原因导致暂停施工以致实际型钢租赁日期超过 90 天的情况下, 施工方

作者简介:

张坤(1989—), 男, 助理工程师, 从事港口航道与市政工程管理工

可向业主方申请另外计量型钢租赁费用, 单位为 t·天。因此施工方在现场管理时应做好施工记录并及时按合同约定程序向监理方递交现场签证材料, 否则签证材料缺陷会导致难以拿到这部分费用, 进而造成不必要的损失。

#### (3) 废浆外运与导槽开挖问题

由表 1 可知, SMW 工法桩即型钢水泥土搅拌墙的工作内容包含了废浆外运, 但查定额可知, 三轴搅拌桩子目包含泥浆制作但不含泥浆外运, 现场发生时按泥浆外运相应定额子目执行, 因此如果业主方明确指示或当地安全文明施工标准要求泥浆外运, SMW 工法桩计价时应根据实际运距套取 01010115 泥浆运输运距 1km 以内、01010116 泥浆运输运距每增加 1km, 运输排放工程量按钻孔体积即  $\times 0.3$  系数以立方米计算; 导槽开挖与之类似, 可套取地下连续墙导槽开挖相关定额子目, 不再细述。

### 3 结束语

结合春城路下穿地道基坑工程实践案例, 通过对施工工艺与清单规范、定额的梳理与对比, 探讨了 SMW 工法桩即型钢水泥土搅拌墙这一新型基坑支护工艺所涉及工程计量、计价、现场签证等相关工程造价问题, 并对施工管理人员提出了几点建议, 希望为今后同类工程施工实践提供借鉴与参考。

#### 参考文献:

- [1] JGJ/T199-2010 型钢水泥土搅拌墙技术规程.
- [2] GB50500-2013 建设工程工程量清单计价规范, GB50854-2013 房屋建筑与装饰工程工程量计算规范, GB50857-2013 市政工程工程量计算规范.
- [3] DBJ53/T-61-2013 云南省房屋建筑与装饰工程消耗量定额, DBJ53/T-59-2013 云南省市政工程消耗量定额.



高光辉

中交天和机械设备制造有限公司, 常熟市 215557

Gao Guanghui

Tianhe Mechanical Equipment Manufacturing Co., Ltd. Changshu, 215557

## 处理机搅拌翼数量对海上深层水泥搅拌桩成桩质量及施工速度的影响

### The Influence of the Number of Wings on the Quality and Construction Speed of Deep Cement Mixing Clusters at Sea

**摘要:** 海上深层水泥搅拌工法在国内应用的工程及相关的理论体系较少, 本次通过香港机场第三跑道对海上深层搅拌工法的应用, 结合我司研制的两艘重型双处理机深层搅拌船, 通过对搅拌翼的改造, 研究搅拌翼数量对海上水泥搅拌桩的成桩质量及施工速度的影响。通过将搅拌翼由 6 片增加至 10 片, 提高施工速度 20% 左右, 大大提高了施工效率, 降低了施工成本。

**关键词:** 深层搅拌船; 搅拌翼; DCM; 搅拌次数

**Abstract:** Deep Cement Mixing method at sea is used few in China and the related theoretical system is less, this time we through the Three Runway System Project at Hong Kong airport and combined with our company developed Double Heavy Processor Ship. Through to reform the wings, research on the sea the Deep Cement Mixing clusters construction speed and quality. By increasing the mixing wing from 6 to 10 pieces, the construction speed is increased by about 20%, which greatly improves the construction efficiency and reduces the construction cost.

**Key words:** deep cement mixing ship, wing, DCM, stirring numbers

进入 21 世纪以来，人们对环境保护的重视程度越来越高，对海洋的开发需求也越来越大，海上深层水泥搅拌工法（DCM-Deep Cement Mixing Method）是未来海洋地基处理的趋势<sup>[1]</sup>。海上深层搅拌工法在施工过程中，成桩质量和施工时间与很多参数相关，比如叶片切土次数、输浆设备、输浆量、喷浆方式等<sup>[2]</sup>。本文通过现场施工过程中对搅拌翼数量的改变，以此研究搅拌翼数量对成桩质量和施工速度的影响。

### 1 工程概况

香港国际机场自 1998 年在赤鱮角启用以来，一直跻身全球最繁忙机场之列。2016 年，机场的客运量达 7,050 万人次，货运量共 452 万吨，飞机起降量 412,000 架次。香港国际机场的现有双跑道系统即将饱和，加上亚洲邻近机场（包括深圳宝安、广州白云、上海浦东、新加坡樟宜及首尔仁川机场）均积极扩建设施，因此香港国际机场有迫切需要扩建成为三跑道系统，以维持竞争力。其规模差不多等于在现时机场旁兴建一个新机场，其基础用地为在有机场岛以北填海拓地约 650 公顷（如图 1 所示）。



图 1：香港国际机场三跑道项目

考虑到施工成本、施工质量、环保等因素，业主方明确要求采用海上 DCM 工法对本工程的地基加固进行施工。经过多次试验桩的施工和检测，香港第三跑道项目对深层水泥搅拌桩的搅拌要求如下：

- a：深入坚硬的冲积粘土层 8m；
- b：在一般情况下，对于 DCM 中的标准搅拌叶片旋转数应为每穿透 1 米长度不少于 450 转，在拌合桩的上端和下端 8m 转数应加倍；
- c：DCM 拌合的钻入速度取决于施工方的设备。在规定的叶片旋转数基础上，DCM 处理机的钻入和提升速度应在 0.3m/min 和 1.0m/min 之间。
- d：DCM 拌合叶片切土次数通过如下公式计算：

$$T = M \times \left[ \left( \frac{Nd}{Vd} \right) + \left( \frac{Nu}{Vu} \right) \right] \quad (1)$$

其中，  
 T：切土次数（次/米）；  
 M：搅拌叶片的总数；  
 Nu：在提升过程中叶片的旋转速度（r/min）；  
 Vu：搅拌叶片提升速度（m/min）；  
 Nd：在钻入过程中叶片的旋转速度（r/min）；  
 Vd：搅拌叶片钻入速度（m/min）。

### 2 处理机性能

本次设备采用的是中交天和机械设备制造有限公司研发的重型双处理机深层搅拌船。整船性能如下：

船长：74m  
 船宽：32m  
 型深：5m  
 总高：49.82m  
 装机功率：1200kW×3

处理机的方案为四轴同步搅拌形式，如图 2 所示，单处理机处理面积为 4.64m<sup>2</sup>，额定扭矩 4250kN.m，功率 4×160kW，最大转速 60r/min，最大起升速度 1.6m/min。

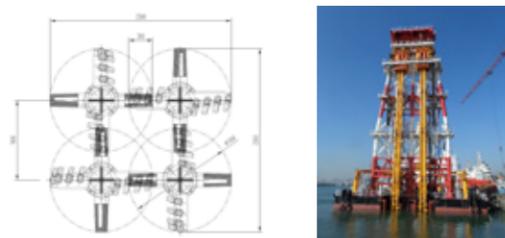


图 2：处理机方案及实物

### 3 三层搅拌翼方案

因无相关理论体系及数据支撑，考虑到施工的安全性，保证设备可以正常施工，最初采用的是 3 层搅拌翼方案，图纸及实物照片如图 3 所示。



图 3：三层搅拌翼图纸及实物

经过现场试验桩的施工，设计三层搅拌翼的处理机的施工曲线见下图，桩长 19m，根据香港方面施工要求拌合桩的上端和下端 8m 的搅拌次数需达到 900 次，由于搅拌桩最长是 19m，扣除上端和下端的 8m 中间只剩 3m，所以本次曲线设计均按搅拌次数 ≥ 900 次设计，最终曲线图见图 4



图 4：三层搅拌翼施工曲线图

从曲线图中可以看出前两次探底均只注入清水，未注入水泥浆，搅拌次数不算在总搅拌次数内，第三次探底时开始注入水泥浆，转速 50r/min，下降速度 0.7m/min，则 17m 至 24m（搅拌桩 12m 至 19m）阶段钻入时的搅拌次数为：

$$T_{(17-24)下} = M \times \left[ \left( \frac{Nd}{Vd} \right) + \left( \frac{Nu}{Vu} \right) \right] = 6 \times \left( \frac{50r/min}{0.7m/min} \right) = 428 \text{ 次/米}$$

由于搅拌桩最低一米只有 4 片搅拌翼在搅拌，为了对最底下 1m 进行充分的搅拌，在最底下进行上下两次的往复运动，转速 50r/min，上升及下降速度均为 0.5m/min，则搅拌桩最低端的搅拌次数为：

$$T_{(24)} = M \times \left[ \left( \frac{Nd}{Vd} \right) + \left( \frac{Nu}{Vu} \right) \right] = 2 \times 4 \times \left( \frac{50r/min}{0.5m/min} + \frac{50r/min}{0.5m/min} \right) = 1600 \text{ 次/米}$$

在 24m 至 19m 阶段（搅拌桩 19m 至 14m），处理机向上提，转速 50r/min，提升速度 0.6m/min，则 24m 至 19m 阶段提升时的搅拌次数为：

$$T_{(24-19)上} = M \times \left[ \left( \frac{Nd}{Vd} \right) + \left( \frac{Nu}{Vu} \right) \right] = 6 \times \left( \frac{50r/min}{0.6m/min} \right) = 500 \text{ 次/米}$$

在 19m 至 5m 阶段（搅拌桩 13m 至 1m），处理机向上提，转速 50r/min，提升速度 0.33m/min，则 19m 至 5m 阶段提升时的搅拌次数为：

$$T_{(19-5)上} = M \times \left[ \left( \frac{Nd}{Vd} \right) + \left( \frac{Nu}{Vu} \right) \right] = 6 \times \left( \frac{50r/min}{0.33m/min} \right) = 909 \text{ 次/米}$$

则 DCM 搅拌桩的搅拌次数见下表：

桩长	1m	...	13m	14m	...	18m	19m
搅拌次数	909 次/m		928 次/m				1600 次/m

以上为理论曲线图，根据此曲线图经过实际施工，取 2017 年 5 月 1 日施工的一组搅拌桩为例，实际施工曲线见图 5，得到以下实际曲线图，从图中可以看出，实际施工搅拌桩长为 18.01m，施工时间约为 142min。



图 5：三层搅拌翼实际施工曲线

### 4 五层搅拌翼方案

从三层搅拌翼的实际施工曲线中可以看出，正常施工时的电流值平均在 500A 左右，处理机使用的实际扭矩只达到我们设计的一半左右，为了提高施工进度，设计五层搅拌翼方案，搅拌叶片数量从 6 片增加至 10 片，图纸及实物照片见图 6

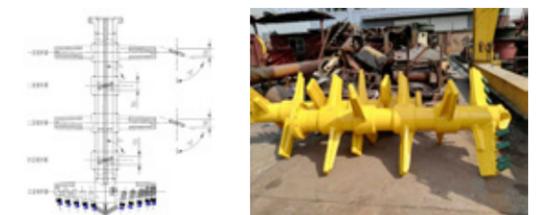


图 6：五层搅拌翼图纸及实物

针对五层搅拌翼的方案，经过现场试验桩的施工及检测，最终形成五层搅拌翼施工曲线图，如图 7 所示。

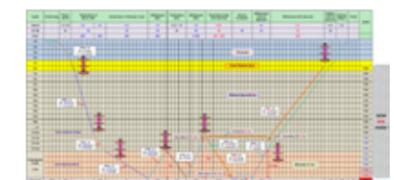


图 7：五层搅拌翼施工曲线图

同样以 19m 搅拌桩为例，从第三次探底时开始注入水泥浆，转速 40r/min，下降速度 0.65m/min，则 17m 至 24m（搅拌桩 12m 至 19m）阶段钻入时的搅拌次数为：

$$T_{(17-24)下} = M \times \left[ \left( \frac{Nd}{Vd} \right) + \left( \frac{Nu}{Vu} \right) \right] = 10 \times \left( \frac{40r/min}{0.65m/min} \right) = 615 \text{ 次/米}$$

对最底下 1m 的搅拌同样进行了上下两次的往复运动，搅拌叶片数量也为 4 片，转速 40r/min，上升及下降速度均为 0.5m/min，则搅拌桩最底下 1m 的搅拌次数为：

$$T_{(24)} = M \times \left[ \left( \frac{Nd}{Vd} \right) + \left( \frac{Nu}{Vu} \right) \right] = 2 \times 4 \times \left( \frac{40r/min}{0.5m/min} + \frac{40r/min}{0.5m/min} \right) = 1280 \text{ 次/米}$$

在 24m 至 19m 阶段（搅拌桩 19m 至 14m），处理机向上提，转速 40r/min，提升速度 0.65m/min，则 24m 至 19m 阶段下降时的搅拌次数为：

$$T_{(24-19)上} = M \times \left[ \left( \frac{Nd}{Vd} \right) + \left( \frac{Nu}{Vu} \right) \right] = 10 \times \left( \frac{40r/min}{1m/min} \right) = 400 \text{ 次/米}$$

在 19m 至 5m 阶段（搅拌桩 13m 至 1m），处理机向上提，转速 50r/min，提升速度 0.5m/min，则 19m 至 5m 阶段下降时的搅拌次数为：

$$T_{(19-5)上} = M \times \left[ \left( \frac{Nd}{Vd} \right) + \left( \frac{Nu}{Vu} \right) \right] = 10 \times \left( \frac{50r/min}{0.5m/min} \right) = 1000 \text{ 次/米}$$

则 DCM 搅拌桩的搅拌次数见下表：

桩长	1m	...	13m	14m	...	18m	19m
搅拌次数	1000 次/m		1015 次/m				1280 次/m

以上为理论曲线图，根据此曲线图经过实际施工，

取 2017 年 10 月 5 日施工的一组搅拌桩为例，实际施工曲线见图 8，从图中可以看出，实际施工搅拌桩长为 17.78m，施工时间约为 112min，且电机电流均在 700A 以下，在正常的使用范围内。

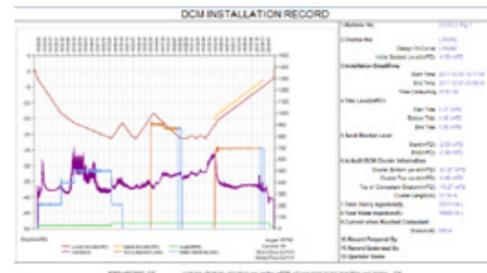


图 8：五层搅拌翼实际施工曲线图

### 5 结论

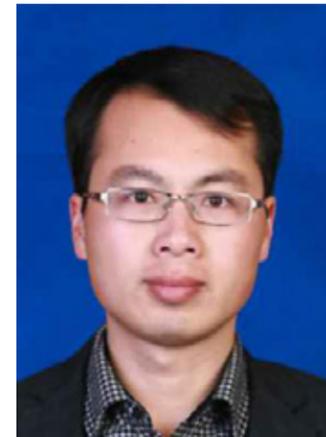
经过以上两种搅拌翼方案在实际施工中的使用，可以得出，通过将搅拌翼由三层增加至五层，完成一根 18m 长左右的搅拌桩的施工时间从 142min 降低至 112min，施工效率提高了 26.8%，从而可以得出，在保证施工质量的前提下，如果处理机扭矩配置足够大，可以通过增加搅拌翼的数量来提高施工效率，从而加快工程进度，降低施工成本。

### 参考文献：

- [1] 周骏, 张新. 重型双处理机深层搅拌船 [J]. 工程机械, 2017(10):6-12.
- [2] 刘翔. CDM 工法加固软基施工工艺研究及加固效果分析 [D]. 天津大学. 2002.

作者简介：

高光辉（1968-），男，高级工程师，学士，研究方向：海洋工程、工程机械。



杨生朋<sup>1</sup>，冯贝贝<sup>2</sup>

疏浚技术装备国家工程研究中心创新能力建设项目，上海 201208

Yang Shengpeng<sup>1</sup>，Feng Beibei<sup>2</sup>

CCCC National Engineering Research Center of Dredging Technology and Equipment, Innovative Capability Development Program, Shanghai, 201208

## 高大薄壁砼结构防渗漏分析及治理

### The Analysis and Management of Tall and Thin Wall Concrete Structure's Anti-Leakage

**摘要：**高大薄壁砼结构的防渗漏设计是个关键问题，而建设过程中如何做好防渗漏工作是重点控制项。笔者以国家疏浚研发中心泥舱、水槽等结构为例，从设计、施工角度剖析国家级试验室砼结构工程防渗漏施工中项目管理方的质量控制内容。

**关键词：**国家疏浚研发中心；地下结构；防渗漏；施工；质量控制

**Abstract:** The leak-proof designing of and thin wall concrete structure is a key issue. and the anti-leakage is also a crucial control item when it comes to the construction process. The author takes the mud tank water trough and the anti-leakage as examples to analyse the quality control content of the project manager in the anti-leakage construction of the concrete structural engineering of the national laboratory from the perspectives of designing and construction.

**Key words :** national dredging research and development center, underground structure, anti-leakage, construction, quality control

前言

随着国内经济的快速发展，各类建筑物已由地上发展的现状转向地下要空间的风格转变，因此使得各类建筑物施工深度不断加深，在收获征迁成本、运营环保等方面优势的同时，其建筑物地下部分的防渗漏难度也越来越大，在众多的涉地下结构建筑物中，有部分对其渗漏有着苛刻的要求，如各类试验平台、车站通道、人防空间等。上海交建作为总承包单位承建了国家疏浚研发中心项目，项目中的试验平台结构包含地上地下砼结构，体现了一次性浇筑立面高、面积大、墙身薄等特点，其对砼结构防渗漏有较高的要求。笔者以国家疏浚研发中心试验平台结构为例，剖析砼防渗漏结构工程管理中的质量控制内容。

1 工程概况

国家疏浚研发中心项目由疏浚过程与设备试验平台、多功能疏浚机具波浪水槽试验平台、泥舱模型试验平台及附属水库、沉淀池储料池等公用设施组成。

疏浚过程与设备试验平台、多功能疏浚机具波浪水槽试验平台位于水槽试验室，包括疏浚水槽、风浪流水槽、1# 水库、2# 水库、造流泵室、室内管道沟、储料泥等构筑物，为一层（局部二层）半地下钢筋混凝土水池结构。底板顶标高 -4.50m，壁板顶标高 2.5m。泥舱模型试验平台位于泥舱试验室，包括进料仓、进水室、泥泵室、沉沙池等构筑物，为一层（局部二层）半地下钢筋混凝土水池结构。底板顶标高 -4.50m，壁板顶标高 3.5m。沉淀池、3# 水库位于室外，为二层半地下钢筋混凝土水池结构。底板顶标高 -4.50m，壁板顶标高 6.4m。储料池位于室外，为一层半地下钢筋混凝土水池结构。底板顶标高 -4.50m，壁板顶标高 1.0m。

结构中一次浇筑净高上限 7m、一次浇筑单边面积上限 200m<sup>2</sup>、一次浇筑砼方量上限 600m<sup>3</sup>。

建筑物防水等级为 2 级，设计抗渗等级为 P6。（以上坐标数据均为相对标高，本工程 ±0.000 相当于吴淞高程系统绝对标高 4.30m）。上述试验平台地下地上结构属于试验工作空间，均需达到砼结构无渗漏的项目建设要求。

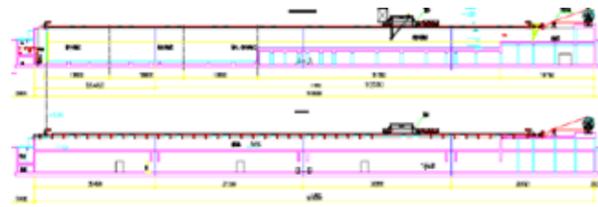


图 1 疏浚过程与设备试验平台、多功能疏浚机具波浪水槽试验平台

2 试验平台结构防渗漏分析

针对试验平台结构防渗漏问题，笔者认为需从以下几方面进行控制。

2.1 技术交底

2.1.1 在熟悉建筑设计图纸时，应检查试验平台防水等级、防水措施、沉降缝伸缩缝留设距离是否符合防水规范要求；建筑材料的选用是否充分考虑了防水抗渗要求。

2.1.2 熟悉结构在突变部位的处理方法，应注意刚度满足防开裂设计的具体施工要求。施工时尽量避免同作业区内出现结构突变。施工阶段应根据设计要求开展砼防裂缝专题计算，提前控制。

2.2 组织阶段

2.2.1 钢筋模板施工方案影响结构防水的基础要素。如模板的造型及支撑，钢筋定位等。若处理不好就会产生渗漏。模板是防水的重点把控部位，施工前必须采取有针对性的防范措施，做到安装模板严密，支撑牢固，严格按确定的施工方案及相关施工规程操作。钢筋做好保护层控制，杜绝支撑筋的外露使用，不得出现定位筋与模板相互作用的现象。

2.2.2 混凝土作业是影响结构防水的关键要素。如砼配比的确定、施工过程控制及养护等。采用适量的磨细粉煤灰或矿粉、加入具有补偿收缩功能的膨胀剂及渗入抑制收缩开裂的纤维、浇筑连续振捣密实、养生过程中喷洒养护剂、对成品采取外涂防水层保护等方法来保证结构自防渗漏的效果。其中膨胀剂的使用要规范，主要保证限制膨胀率与限制收缩率指标符合要求，如条件允许，笔者认为尽量不用或慎用。

表 1 疏浚项目防水砼配比参数与其它

		防渗漏高标准项目对比									
项目	设计要求	技术条件	水胶比	坍落度 (mm)	砂率 (%)	含气量 (%)	抗渗		强度 (MPa)		
			0.46	140	42	/	符合	7d:34.2, 28d:43			
疏浚中心	砼试验平台箱体 C35, P6	材料选用 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥	砂	石	水	外加剂		掺合料		
			P.042.5	中砂	5-25mm		减水剂	膨胀剂	粉煤灰	矿粉	纤维
			257	738	1019		181	4.54	31	59	79
某隧道项目	设计要求: 管片 C60, P12	技术条件	水胶比	坍落度 (mm)	砂率 (%)	含气量 (%)	抗渗		强度 (MPa)		
			0.3	70	34	/	符合	7d: 60,28d: 73			
			材料选用 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥	砂	石	水	外加剂		掺和料	
P. II 52.5	中砂	5-25mm	减水剂	膨胀剂	粉煤灰	矿粉		纤维			
			363	623	1209	150	5	/	60	74.7	1.5

2.3 工序实施阶段

2.3.1 沉降缝的防水该缝设置在与主体结构分段处或不同结构连接处，工程中使用外贴式止水带、可注浆型中埋式止水带和内装可卸式止水装置。外贴式止水带的要求与诱导缝处理相同，可注浆型中埋式止水带应注意必须在结构沉降达到稳定后，再进行注浆处理。对内装可卸式止水装置的预埋件安装，应检查螺母与预埋件铁板焊接的严密性，以及防锈处理是否到位，内装可卸式止水带内的排水管是否预留好。止水带安装前，表面必须清除浮渣，并保持表面平顺，上紧压板螺杆使止水带能紧贴表面。（图 2 与图 3 为处理较坏与较好的沉降缝对比）



图 2 防渗处理差

图 3 防渗处理好

2.3.2 施工缝的防渗漏

(1) 水平纵向施工缝使用镀锌止水钢板，若处理不当将是防渗水的薄弱环节。因此要求在焊接止水钢板时要保证严密；浇筑混凝土面应控制在止水带高度的一半；绑扎竖向钢筋前必须凿毛表面，封侧模前应将墙体下部的杂物清理干净，浇筑混凝土前先浇水湿润，并在其交接表面铺设一层水泥砂浆。

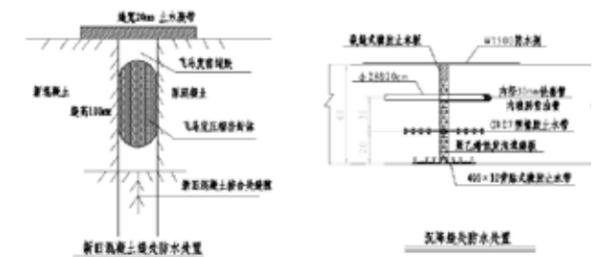
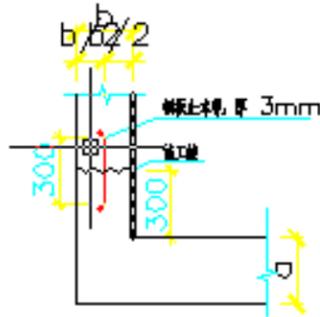


图 4 新旧混凝土缝处防水处置 图 5 沉降缝处防水处置

(2) 横向施工缝的防水使用中埋式止水带和遇水膨胀橡胶腻子止水条两道防线。前者与诱导缝处的处理要求相同，后者应注意粘贴的基面尽可能平整，必须保证连续

布置，其搭接长度不少于 50mm。不宜过早粘贴，并在基面干燥状态下进行。



图一：底板与外墙施工缝做法

图 6 结构与外墙施工缝做法

(3) 砼体材料使用中的防渗漏

温湿度变化原因产生裂缝是施工技术准备的关键。混凝土具有热胀冷缩性质，当外部环境或结构内部温度发生变化，混凝土将发生变形（混凝土温度膨胀系数约为  $1 \times 10^{-5}$ ，即温度升高  $1^{\circ}\text{C}$ ，每 m 膨胀 0.01mm）。若变形遭到约束，则在结构内将产生应力，当应力超过混凝土抗拉强度时即产生温度裂缝。在某些大跨径砼结构中，温度应力可以达到甚至超出活载应力。温度裂缝区别于其它裂缝最主要特征是将随温度变化而扩张或合拢。影响温度变形的形式有年温差、日照、骤然降温、水化热、养护不当。

2.4 成品保护

2.4.1 砼裂缝的防渗漏：正确对待裂缝处理裂缝，才能有效地做好防渗漏工作。裂缝形成的原因很多，在试验平台砼结构中主要存砼结构伸缩变形裂缝、表面收缩裂缝、受力扩展裂缝、新老砼面接茬裂缝。处理方法分为表面处理法、填充法、结构补强法。出现裂缝并不可怕，但需要施工人员选用正确的方法对应处理。

2.4.2 隐蔽结构的防渗漏：对于地下或其它隐蔽结构的防渗漏处理上，可以采取防水层设计等方案进行加强。结构表面在混凝土达到强度后，可以进行防水涂料作业或结构隔离层作业。防水涂料作业时，要对基层的低凹部位，使用聚合物防水水泥砂浆修补平整，转角部位做到圆顺，阳角应打磨其尖角，并采取必要的加强措施。保持基面干燥清洁，均匀交错涂刷防水涂料。重点控制诱导缝、施工缝、

平面与垂直面交接部位、顶板上有突出构筑物及预留孔洞部位等。在完成顶板附加防水层后及时做好隔离保护层。要求在施工时做到成品保护措施到位，避免损坏已完成的附加防水层，保证结构的抗渗防漏性能。

3 试验平台结构防渗漏治理

针对试验平台结构防渗漏问题，笔者结合本工程中发生的一些案例进行阐述。

3.1 方案治理

3.1.1 保护层大小治理

设计时出于保护钢筋的目的，将保护层设置值取大，设计迎水面 50mm，但出于砼抗拉及收缩防裂的目的，需将保护层设置值取小。这两者需进行调和，设计文件中提到保护层超出 50mm 加设混凝土保护层内设置  $\phi b4@250$  双向钢筋网或其它抗裂措施。

本工程设计中采用房建框架为主，填充处采用剪力墙考虑。因而存在了保护层偏大、结构配筋间距疏松、设计补救措施宽松的特点，在现场砼首件中出现了规律性表面裂缝产生。经过调整，在 50mm 的保护层内增设  $\phi b4@250$  的双向钢筋网（图示），实质是通过钢筋网变相地减小了砼结构保护层，有效地控制了规律性裂缝产生。



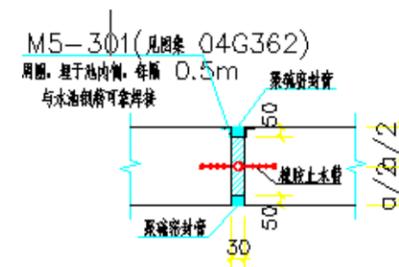
图 7

3.1.2 伸缩缝间距治理

按钢筋砼国家地下室结构伸缩缝设置可知室内或土中设置上限为 30m 室外设置上限为 20m，按钢筋砼剪力墙

结构伸缩缝设置可知室内或土中设置上限为 45m 室外设置上限为 30m。

本设计考虑试验防渗的要求，在室内设计中的伸缩缝设置间距取值 31m，显然游走于地下室结构与剪力墙结构、室内或土中条件与室外条件之间。但出于防渗漏的目的，当然伸缩缝间距取值取低为上策，这也是互相矛盾的一面。施工起初以设计伸缩缝为砼浇筑分段依据，过程中调整方案，在 31m 的设计伸缩缝间增加垂直向施工缝，释放了早期收缩应力，施工缝注意设置于结构变化段，保证了同段结构收缩应力的自由性，起到了一定的裂缝控制效果。如因结构原因不能调整伸缩缝与临时施工缝，可以进行后浇带的设置，同样起控制控制防渗漏的目的。（图示疏浚研发中心项目采用的后浇带、伸缩缝处设计图）



图四：伸缩缝止水带节点

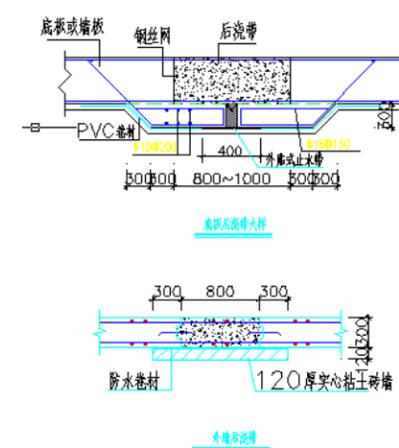


图 8 伸缩缝及后浇带设计

3.1.3 砼强度与钢筋工作同步治理

为了保护结构受力时钢筋与砼共同受力，需要二者搭配使用，不能出现一强一弱的现象，这是结构受力的主要

原则。但目前结构上早已提出耐久性的要求，使用阶段受力仅是结构设计时的考虑指标之一，而不能作为唯一标准，这是从业者需要接受的理念，本项目中砼结构作为试验平台的一部分，其防渗漏性能是结构使用性能要求，也是结构耐久性的指标。

为了保证防渗漏性能，可以在方案中提高砼性能或优化钢筋布局或两者共同考虑，方案中墙面厚 350mm，钢筋布局为竖筋  $\phi 16@200$  或  $\phi 18@200$ ，水平分布筋  $\phi 16@200$ ，笔者认为设计中钢筋分布疏松有优化的空间，或者可单独增加网眼不大于 100mm 的防裂钢丝网设计。

3.2 组织阶段治理

3.2.1 模板方案优化。固定墙身模板的拉结筋是易渗水的部位，在安装前应选择技术水平好的工人，专门进行螺杆中部止水片的焊接检查工作，止水片的宽度不小于 3 倍螺杆直径。按照结构的板厚采用市场定制的专用新型螺杆（两端螺丝接口 + 塑料垫块 + 限位片，方便后期拆除封堵，塑料垫块厚度不小于最小保护层厚度要求）。拉杆应尽量与墙面保持垂直，不与内衬结构钢筋接触。具备条件的部位尽量采用无拉杆法施工。



图 9 可拆卸止水螺杆

3.2.2 砼配比参数选定。设计时对防水砼的组成已有一些说明，如选用坚固耐久洁净的最大、粒径不超出 40mm、泵送粒径不超出管径的 1/4、吸水率不大于 1.5% 的石子，设计抗渗 P6 等级、内掺适量膨胀剂与聚丙烯纤维的要求。但施工中出于泵送、延时长、施工和易性的考虑，对坍塌度控制不严，砼坍塌度偏大极易引发收缩裂缝。需要作业方在砼配比参数选定中，把砼单位体积用水量和坍塌度指

标严格控制在下限，必要时增加高效减水剂的使用掺量。

**3.2.3 施工方案优化。**设计对于底板与侧墙的浇筑要求中，提出侧墙 300mm 砼与底板一同浇筑，这是建筑行业的通行做法，目的是施工中常有不规范的行为，从设计角度出发减少最大剪力部位的质量通病发生机率。在首件施工后，笔者发现墙体与底板连接处的 300mm 先浇段存在湿斑，经过分析得知现场施工班组在现有的施工方案下对此 300mm 的振捣密实无法保证，设计单位在保证最大剪力部位的同时放弃了砼密实控制。在分析结果后及时调整了施工方案并组织了试验段，将 300mm 墙体从底板中剥离，经设计监理施工联合检查效果明显砼结构无湿斑，此项成果也在公司其它防渗项目上进行了推广运用。

### 3.3 工序实施阶段治理

#### 3.3.1 预埋件的防渗漏措施治理

疏浚试验平台砼结构中存在较多的预埋件，可分为柔性和刚性，柔性如橡胶止水带、各类塑料性管道等，刚性如钢板止水带、刚套管、预埋螺栓等。由于柔性物质有热胀冷缩、易破损的特点，在防渗漏项目中应避免为佳。

止水带在施工过程中，一是由于各种原因造成止水片的破损；二是外来压力水沿止水片部位砼缺陷部位形成的绕渗。刚性预埋件如底板浇筑时的预留钢格构柱、试验管道穿越墙体结构的管道套管等。预留钢支撑的防水，因部分钢支撑在浇筑底板混凝土前不能拆除，在清理干净格构柱的同时可设置隔板条。隔板条角度向下。对于管道套管，应在套管中部范围内设一道止水环。定位钢筋须牢固可靠，浇筑过程中注意振捣，使得密实的混凝土填充洞体四周。

目前项目上均能正常地使用止水环和止水带设施，尤其在一些细节上提高注意力，如止水环的焊接质量、止水带的材料保护与闭合封口角度方向摆设、材料使用前的除锈清理等。

#### 3.3.2 杂物清理工序治理

砼浇筑前由专人进行认真检查，对施工中出现的泥块、垃圾、铁木砼块废弃物进行清理，同时还须清理施工过程中存在的临时支撑件，如定位工具钢件、临时支撑件等。笔者在施工中发现，墙体钢筋架定位筋容易出现偏位超限的现象，乃至模板施工中也利用定长钢筋作为模板限位的手段之一，在墙体养生过程中就出现了锈点或渗漏的个

别现象，这些都可归依于杂物清理不干净对结构防渗漏功能造成隐患。

#### 3.3.3 砼作业温度的控制、砼养护湿度的治理

这点在防渗漏的工序实施阶段（等同于施工阶段）中是重点，在项目的周期中也是仅次于设计原因后的研究重点。

根据大体积混凝土裂缝产生的机理，在抗裂验算的基础上通过控制混凝土的温差、控制降温速率、充分利用混凝土的应力松弛特性延长养护期等几个方面综合安排技术措施，可以减少温湿度作用在裂缝方面的影响。各类规范标准中也给出了一定的限定，如砼体表面温度与砼体中心温度不得超出 25℃ 等等，归根结底各种提出的要求最终是在满足一个条件，即砼抗拉强度超过砼最大温度收缩应力，这就提醒施工管理者要注意两方面的问题，一是浇筑过程中温度差，二是养护过程中的温度差。目前施工机械化程度高，浇筑过程时间较短，温度差主要从砼与外界环境作对比；养护过程中掌握水化热的特点，通常采用保温法控制为主；而施工中习惯性的洒水养护只是养护的一个方法，其原因是控制砼结构表面的水份散失，保证砼结构表面不出现干缩裂缝。疏浚研发中心开工于 2014 年 9 月，地下砼墙施工处于 2015.1-2015.6 期间，期间昼夜温度大、3 月份内出现寒潮 3 次，对砼结构温度控制形成了极不利的局面，我们在做好预案的同时对砼浇筑时段精挑细选，确保万无一失，现场各类保温措施一应俱全，将防渗漏作为结构施工的重点控制项，在全部裂缝的分析中，因温度原因产生的裂缝不足总量的 20%，收到了很好的效果。

#### 3.4 成品保护治理

根据项目的需要选定防水涂层作业，可以作为结构防渗漏的保障。疏浚中心项目砼结构作为试验平台，在试验过程中受抓斗、耙吸机具等作用下，砼墙体受到不同程度的冲击与碰撞，项目处于上海地区，地下水位较高，为了达到结构使用防渗，我们在管理中对地下隐蔽不易处理的结构外墙采用了防水涂层设计。砼结构成品防渗漏专项预收合格后开展作业，防水涂料采用 2 层 2mm 厚聚氨酯防水涂料进行涂刷，涂刷前基准面清理干净、含水率不大于 9%，涂刷时方向一纵一横交错。防水涂料的保护层采用 40 厚聚苯板进行满铺。



图 10 防水涂层及过渡保护层

### 3.5 引发渗漏的裂缝专项治理

裂缝是混凝土结构病害的最终形式，一般可分为两类，其一为荷载裂缝（由混凝土结构在常规静、动荷载及次应力下产生的裂缝）；其二为非荷载裂缝：由变形变化引起的裂缝，包括混凝土结构因温度湿度变化、收缩、膨胀、不均匀沉降等原因引起的裂缝。

**3.5.1 设计要求：**砼结构存在渗漏是很正常的事，建筑地下工程防水标准分为 4 个等级，明确了渗漏现象的存在是客观的，本项目设计指出防水 2 级的要求，如何正确地防治是关键。

#### 3.5.2 分析及处理：



图 11 化学灌浆施工

本项目在试验件的施工中因温度原因产生两种裂缝形式，一是表面不规则收缩裂缝；二是贯穿温差应力裂缝，此两类裂缝对结构的防渗漏有着重要影响。我们采用了不同的方法进行了处理，对表面不规则收缩裂缝采用表面处理法，等裂缝稳定后采用开槽贴片修补法；对温差应力裂缝采用填充法，采用化学灌浆法，采取打斜孔（灌浆

孔深根据裂缝类型、深度确定，其与缝面相交一般不少于裂缝深度的一半）、使用较高的灌浆压力进行高压灌浆的方法进行施工（图示），最大灌浆压力约为砼抗压强度的 1/10，灌浆材料为单组分聚氨酯发泡堵漏剂 SL-WPU，质量稳定，在试验件的裂缝处理运用中，采用植孔化学灌浆法的裂缝一次处理合格率达到 95% 以上，效果显著。

同时施工中的不规范行为也会给成品产生损伤，导致渗漏现象的发生。如我们在试验件验收时发现，个别的模板定位筋位置发生细小渗斑出现，有规则地出现在结构浇筑底面向上 1 米左右的范围内，经分析，发现并不是定位筋的两端封闭不紧密的原则，而是在拆除模板外支撑中，作业人员利于定位筋位置作为作业受力点，过早地搅动了定位筋周边砼，形成了细微的砼结构松动层所致，采取了植孔化学注浆法进行了密实处理。

**3.5.3 专项总结：**本项目为疏浚试验平台砼结构，在施工过程中主要会引发非荷载裂缝形式，在施工中将非荷载裂缝作为主要控制方向进行技术管理。高大薄壁结构施工前，我们通过试验件的施工，暴露了问题也进行了有效地处理，在主体砼作用中成功地规避了裂缝的发生。

### 4 结束语

国家疏浚研发中心砼结构防渗漏控制是一项系统工程，涉及设计、施工、监理、运营等单位。而项目管理是贯穿各个阶段的重要控制内容，作为本项目的总承包单位责无旁贷。除首先自身全面了解渗漏原因，掌握抗渗堵漏的方法外，还严格把好各道工序的质量关，落实到施工过程的监督管理中，并积极参与协调，使各方配合密切，最终验收结果满足设计要求，实现了防水 2 级防渗 P6 标准，成功创造出优质的国家疏浚研发中心项目。

#### 参考文献：

- [1] 江正荣. 建筑施工计算手册 [M]. 中国建筑工业出版社, 2001: 601-644.
- [2] 周水兴. 路桥施工计算手册 [M]. 第 1 版. 人民交通出版社, 2004: 284-288.
- [3] 王广柱, 宋福来. 工民建中防渗漏技术探讨 [J]. 黑龙江科技信息, 2010 (19): 266-266.

#### 作者简介：

杨生朋 (1981-), 男, 工程师, 从事交通市政工程项目管理工作

周承涛

中交天航（大连）浚航工程有限公司，辽宁 大连 116031

Zhou Chengtao

CCCC-TDC(Dalian)Channel Dredging Engineering Co., Ltd.

Liaoning Dalian 116031



# 长兴岛临港工业区葫芦山湾南岸环境治理及配套一期 ——疏浚及围堰工程大型绞吸船防石优化研究

## Environmental Management and Supporting Phase of South Bank of Hulu Bay in Lingang Industrial Area of Changxing Island

### ——The Large Cutter Suction Dredger Dredging and Anti Stone Cofferdam Project Optimization Research

**摘要：**长兴岛疏浚及围堰工程施工区块石、贝壳含量较高，导致施工时频繁发生堵口堵泵现象，严重影响生产效率。本文通过运用仿真模拟分析多种防石设备的水利性能，选取水力损失最小的单防石环设备，并将上述研究结果应用于施工，表明试验方案确实大大提高了生产效率。

**关键词：**防石设备；基本参数；效率

**Abstract:** The content of stone and shell in Changxing Island dredging and cofferdam construction project is high, which leads to frequent plugging and clogging phenomenon during construction, which seriously affects the production efficiency. By using the simulation of water conservancy performance analysis of various anti-stone equipment, select the hydraulic loss of the smallest single anti-stone ring device, and the above research results are applied to construction, shows that the test program does greatly improve production efficiency.

**Key words :** anti-stone equipment, basic parameters, efficiency

## 1 工程概况

### 1.1 基本介绍

长兴岛濒临渤海，具备发展海洋经济，走向国际市场的特殊地理位置。大连长兴岛临港工业区葫芦山湾南岸环境治理及配套一期一疏浚及围堰工程（第二标段）疏浚合同总工程量为 1247.7 万 m<sup>3</sup>，疏浚面积 124.4 万 m<sup>2</sup>，疏浚底标高 -8.6m，主要疏浚土质为松散粉细砂，含有部分淤泥质粉质粘土及粉质粘土。

#### (2) 工程要求

工程质量达到交通部颁布的《水运工程质量检验标准》（JTS257-2008）的合格等级：疏浚吹填工程：开挖断面不应小于设计开挖断面，设计底线以内水域严禁出现浅点。

### 1.2 土质情况

根据现场情况，本区域土质主要为淤泥、松散粉细砂及粉质粘土，局部区域含亚粘土，施工区块石、贝壳含量较高。土质随区域变化较大，根据船舶开挖情况，施工区由东向西粉细砂含量增加，施工区北侧靠近航道区域粘土含量明显增多。疏浚土主要土层物理力学指标见下表：

表 1-1

土层名称	重度 (g/cm <sup>3</sup> )	含水量 (%)	标准贯入试验标准值 (击)	直剪抗剪强度		备注
				Cq	Φq	
粉细沙、粉土		21.94	7.7			松散~稍密、饱和状态
粉质粘土、淤泥质土	1.85	37.4	2.6	11.9	4.2	土质软，呈软~流塑状态
粉质粘土	1.96	28.7	4.6	39.9	9.3	土质较软，呈软~可塑状态

## 2. 基本施工情况及产能限制因素

### 2.1 投入施工船情况

本工程投入的船舶为我公司天滨号绞吸挖泥船，绞刀功率 1100KW，泥泵排量 11000m<sup>3</sup>/h，工程生产率 3500m<sup>3</sup>/h。天滨船如图 2.1 所示：



图 2.1 “天滨”绞吸挖泥船

(2) 通过天滨船现场施工情况对根据天滨船设备运转情况统计施工基本参数如表 2-1 所示：

### 2.2 施工产能限制因素分析

“天滨”于 2013 年 6 月 29 日投入施工，施工时该船采用一般防石设备，石块与下层粘土一起开挖，导致平均每天堵口、堵泵时间长达 6~7 小时，造成船舶经常性的停工，严重降低船舶的时利率及生产率。取 2013 年 7 月 20 日施工日生产情况如表 2-2：

表 2-2

施工船舶	工程量 (万方)	运转时间	故障	堵口堵泵	管线	时利率 (%)	生产率 (m <sup>3</sup> /h)
天滨	950	16:05	0:45 (3.1%)	6:40 (27.8%)	0:30 (2.1%)	67	59.4

表 2-1

挖深 m	原泥面 m	水下泵		一号舱内泵		二号泵转速		绞刀			横移		
		泵机转速 / 额定转速	排压 Bar	泵机转速 / 额定转速	排压 Bar	泵机转速 / 额定转速	排压 Bar	压力 / 额定压力 bar	转速 rpm	横移拉力额定	横移速度 m/s		
-8.6	-7.0	245/258	2.82	270/340	8.5	310/340	14.4	90/190	25	80	10		
摆宽 m	进尺 m	吸入真空 bar			密度 t/m <sup>3</sup>		流速 m/s			总排压 bar			施工方式
		最大值	最小值	平均值	最大值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	
110	1.2	-0.9	-0.3	-0.7	1.25	1.10	5	4.2	4.5	14.9	14.3	14.6	一层开挖，桥梁下放 9.3 米，台车每步进尺 1.2 米

防石环改造前生产情况统计:

表 2-3

施工日期	堵口、堵泵时间	生产率	时利率
7-01	10:35	900	14%
7-02	0:20	414	30%
7-03	0:25	689	79%
7-04	0:20	807	80%
7-05	8:45	511	64%
7-06	10:40	388	48%
7-07	10:00	393	34%
7-08	1:15	580	84%
7-09	3:40	721	64%

由上表可知, 由于施工区土中含有较多的块石, 安装了防石设备, 但是防石设备的安装反而导致频繁的堵口堵泵现象, 生产率大大降低, 为了克服该难题, 亟需对绞刀及防石设备进行相关研究。

### 3 解决方案

#### 3.1 合理选用绞刀

D40 绞刀的刀臂厚, 刀齿能保护齿座, 适合磨损量较大的土质, 齿座与刀臂焊接部位为管状结构, 有一定的抗冲击性, 安装尖齿时也能挖掘较软的风化岩。但是其具有的缺点是刀臂厚, 开档小, 挖粘土时容易糊绞刀。电天牛系列船舶在开挖粘土时可用五臂 D40 绞刀

3G 绞刀是美国 ESCO 公司设计的绞刀, 适合绞刀功率 1400KW 以下的船舶。它的刀臂结构较薄挖泥过程中入土效果较好。D40 绞刀和 38DS 挖岩绞刀如下图所示。



图 3.1 D40 绞刀

图 3.2 3G 绞刀

针对长兴岛疏浚工程施工区土质条件下, 对这两种型号的绞刀进行现场施工试验, 结果如下表所示。

表 3-1

绞刀型号	电流 (A)	生产率 (m³/h)
D40	450	1036
3G	500	1625

综合上述分析, 3G 绞刀为开挖粘土专用绞刀, 并且在电流基本相同的情况下, 生产率相对较高, 所以选取 3G 型号的绞刀为施工设备。

#### 3.2 防石设备研究

##### 3.2.1 绞吸船防石设备

由于施工区块石含量较高, 为了防止发生堵口堵泵现象, 需要安装防石设备, 在此情况下, 为了实现较高的生产效率, 对防石设备对水利性能的影响进行研究。

目前在工程中常用的 6 种防石设备 (图 3.3)



a) 普通格栅 b) 马蹄形格栅 c) 犬牙式格栅



d) 单防石环 e) 双防石环 f) 防石网

图 3.3 防石设备图

表 3-2 防石设备优缺点

防石设备	优点	缺点
普通格栅	结构简单, 焊接快速, 防堵泵效果好	黏土、块石容易造成堵吸口
马蹄形格栅	对粘性土的适应性好, 杂物容易掏出	突出的弧形板受力不好, 容易被挤断
犬牙式格栅	能减小的吸入排挤面积	容易受杂物缠绕, 强度较弱, 易断裂脱落
单防石环	不易引起糊绞刀, 对黏土适应性较好	石块较多时防石效果差, 结构强度弱
双防石环	防石效果好, 结构相对简单	开挖亚黏土时容易糊绞刀
防石网	结构坚固、防石效果好	结构复杂、易糊堵绞刀

##### 3.2.2 计算模型

###### 1. 数学模型理论依据

本文中采用了雷诺时均 N-S 方程 [3], 具体形式如下:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho \bar{F}_i - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i u_j} \right) \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u_i u_j} \quad (3)$$

$$-\frac{\tau_{ij}}{\rho} = \nu_i \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (4)$$

$$\nu_i = \mu_i / \rho \quad (5)$$

$$\mu_i = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

采用下面输运方程求解:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (7)$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (c_1 P_k - c_2 \rho \varepsilon) \quad (8)$$

###### 2. 数值模型

以海水作为计算介质。由于计算域较复杂, 采用了适应性强的四面体网格离散计算域, 计算网格数 100 万左右。边界条件在椎体前面采用速度进口, 周围采用全滑移壁面, 吸管末端采用 Neumann 边界条件, 其他采用无滑移壁面 (图 3.4)。采用 SIMPLEC 方法对速度和压力进行解耦。空间采用二阶迎风格式离散, 计算残差设定为 10<sup>-4</sup>。

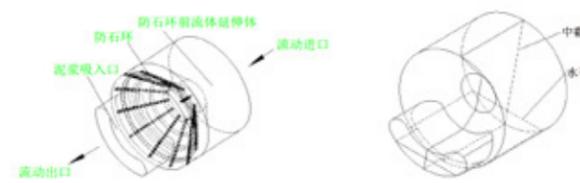
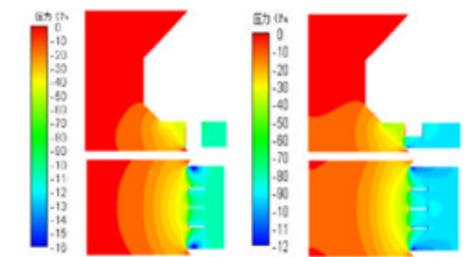


图 3.4 边界条件示意图 图 3.5 截面位置

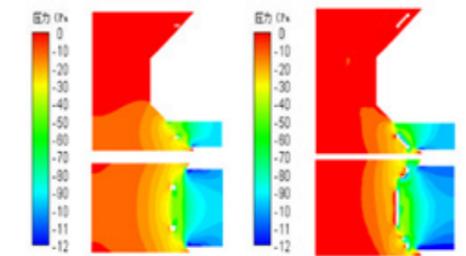
###### 3. 结果分析

对绞吸船进口流场的 7 种情况进行了模拟, 分别是无防石设备、普通格栅、马蹄形格栅、犬牙式格栅、单防石环、双防石环、防石网, 现取两个典型截面以便后续分析 (图 3.5)。

从图 3.6 可以看到, 在流体从椎体前进入吸入管时, 过流面积减小使得流体速度增加, 压力有较大的下降; 防石设备迎流动方向都出现了局部高压, 这是由于流体冲击防石设备并在防石设备前缘形成驻点造成的, 在这些区域会有较大的水力冲击损失; 在犬牙式格栅中由于流体冲击面小于普通格栅, 在流体经过格栅后压力下降小于普通格栅; 在双防石环的计算结果中, 防石环结构造成了非常大的局部高压区域, 说明这种防石设备引起了更大的流动扰动; 单防石环布置在相对流动速度较低的区域, 因此引起了较小的局域高压区, 对流动的扰动较小。



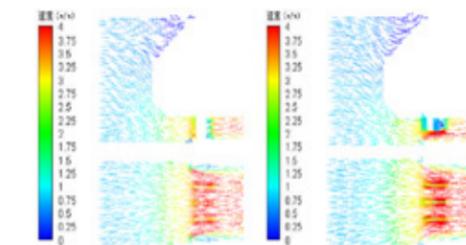
a) 普通格栅 b) 犬牙格栅



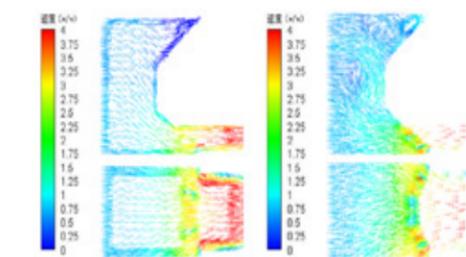
c) 单防石环 d) 双防石环

图 3.6 防石设备压力分布

图 3.7 为安装不同防石设备绞吸船进口区域在中截面和水平截面上的速度矢量。在装有格栅的两种情况中, 由于格栅结构对吸入管内的流体有较大的扰动作用, 形成了非常不均匀的速度分布, 两种格栅的情况中犬牙式格栅对流动的扰动最小; 两种防石环结构中, 防石环是有一定旋转速度的, 因此导致了较大的流场扰动, 双防石环对流动的扰动远远大于单防石环的扰动。



a) 普通格栅 b) 犬牙格栅



c) 单防石环 d) 双防石环

图 3.7 防石设备速度矢量

通过流场模拟, 统计分析了由于防石设备而造成水力损失(表5), 为了分析结果的普遍性, 采用无量纲的局部水力损失系数作为衡量各种防石结构造成水力损失大小的依据。水力损失系数定义如下式:

$$\xi = \frac{\Delta H}{v^2/2g} \quad (9)$$

从表5可以看到犬牙式格栅和单防石环引起的水力损失最小, 防石网引起的水力损失最大。本文的模拟是以介质为海水开展的, 在泥浆中的水力损失可以通过清水到泥浆的水力损失换算方法得到。从表5可以看出, 在满足防石要求的情况下, 最好采用单防石环或犬牙式格栅; 若考虑到旋转防石环的拨石效果, 一定要用较密的防石环时, 双防石环优于防石网, 但是两个差别不大。

表3-3 防石设备水力损失

防石环类型	局部阻力系数
双防石环	0.67
单防石环	0.15
防石网	0.69
格栅	0.25
马蹄	0.27
犬牙	0.15

#### 4 结论

本文总结了目前常用的防石设备形式, 采用CFD方法对加装不同防石设备前后绞吸船吸入口附近流场进行模拟, 计算加装防石设备前后绞吸船的吸入段水力损失, 确定了由于加装防石设备造成的局部水力损失系数。得到如下结论:

1) 格栅形式的防石设备对进入吸入管的流动扰动较小, 犬牙式格栅引起的水力损失最小; 2) 双防石环和防石网对进入吸入管前的流动扰动较大, 都会引起较大的水力损失, 双防石环较防石网引起水力损失较小, 但是差别不大; 3) 从水力损失角度考虑, 推荐优先使用单防石环和犬牙式格栅。

##### 4.1 防石环改造后生产情况

在上述关于绞刀选取及防石设备仿真实验的基础上, 选取3G绞刀和单防石环进行施工, 大大减少了由于堵口堵泵发生的次数, 时利率大大提高, 生产效率也有明显增

长。“天滨”现采用水下泵+2#舱内泵两泵串联施工, 绞刀3G型号, 使用凿齿, 绞刀头加焊单防石环, 如下图4.1所示。



图4.1 绞刀和单防石环现场图片

“天滨”现施工区原泥面为+0.0~+1.0米, 泥层较厚, 船舶分两层拉抽屉施工。采用上层进两台车, 下层退三台车的施工方法, 减少抗桥现象。具体的施工参数如表4-1所示。

表4-1

施工层	前移距(m)	切厚(m)	横移速度(m/min)
第一层	1.5	6	11~13
第二层	1.2	3	11~13

天滨船更换绞刀与防石装备后生产情况如下表所示:

表4-2

施工日期	堵口、堵泵时间	生产率	时利率
5-7	-	1227	91%
5-8	1:20	1620	61%
5-9	2:50	1250	87%
5-10	0:50	1165	77%
5-11	0:25	1128	71%

#### 5 小结

长兴岛疏浚及围堰工程施工区块石、贝壳含量较高, 导致施工时频繁发生堵口堵泵现象, 严重影响生产效率, 为了解决这一问题, 本文通过现场试验确定了同样情况下生产效率较高的3G绞刀。为了在一定程度上减少堵口堵泵的次数, 安装防石设备, 通过运用仿真模拟分析多种防石设备的水利性能, 选取水力损失最小的单防石环设备, 并将上述研究结果应用于施工, 表明上述方案确实大大提高了生产效率。



黄伟明<sup>1</sup>, 缪袁泉<sup>2</sup>

1 中交上海航道局有限公司, 上海 200002

2 中交疏浚技术装备国家工程研究中心有限公司, 上海 201208

Huang Weiming<sup>1</sup>, Miu Yuanquan<sup>2</sup>

1 CCCC Shanghai Dredging Co., Ltd. Shanghai, 200002;

2 CCCC National Engineering Research Center of Dredging Technology and Equipment, Shanghai, 201208

## 设备管理信息化 (EMIS) 的应用实践与对策 The Application Practices and Countermeasures of Equipment Management Information System (EMIS)

**摘要:** 借助计算机及信息技术来促进管理成效的提升已成为共识。作为设备管理信息扁平化管理的一种大胆尝试, 中交上海航道局有限公司设备管理信息化系统(以下本文简称为EMIS)自2011年8月起应用至今, 涵盖所有疏浚船舶和部分辅助船舶。本文通过对EMIS的开发由来、特点和应用介绍, 对应用过程中的存在问题和现象进行了分析, 提出进一步深化应用的思考与对策。

**关键词:** 设备管理; 信息化; EMIS; 应用; 对策

**Abstract:** Using the help of computer and information technology to improve management effectiveness has become a common practice. As a bold attempt to manage information of equipment, the equipment management information system of CCCC-SDC (in the following text it is simply referred to as EMIS) has been applied since August 2011, covering all dredging vessels and some auxiliary ships. This paper introduces the origin, characteristics and application of EMIS, analyzes the existing problems and phenomena in the application process, and puts forward some further thoughts and countermeasures.

**Key words:** equipment management, informatization, EMIS, application, countermeasures

作者简介:

周承涛(1978-), 男, 工程师, 毕业于中国海洋大学港口航道及治河工程专业, 从事港航、航道工程的设计、施工工作。

随着互联网的发展以及计算机辅助管理应用的不断深入,借助网络提升管理水平,促进企业管理模式从传统向现代化的转型,已逐渐成为企业管理者的共识。作为一种新兴管理模式,扁平化管理是伴随着现代信息技术发展,特别是计算机管理信息系统出现而兴起。相对于金字塔式多层级结构,扁平化管理的幅度相对宽而管理层级相对少,可以更有效地实现资源与信息共享,提高管理效率,避免了传统管理模式中信息传递不对称、业务交叉割裂、沟通协调不畅、管理效率低下弊端[1]。

信息化已成为企业提升管控能力、降低成本消耗、防范风险的有效手段[2]。作为一家具有百年历史的疏浚企业,中交上海航道局有限公司(以下简称为公司)既有航运企业的特征,又有传统施工企业的属性。如何在信息技术高速发展的当下,将传统设备管理模式与信息化应用相结合,积极探索疏浚企业设备管理的扁平化模式,这是值得设备部门探究和思考的课题。

## 1 EMIS 的由来

近十年来“SMIS”(Ship management information system 的缩写)应用已从少数大型航运企业开始走向普及,相比较而言,疏浚企业在这方面的应用并不多。公司管理层认识到在信息化高速发展的大环境下,利用信息技术来实现设备管理信息的扁平化,促进设备管理绩效提升的重要性。并为此先后组织了相关工作的调研,观摩了主流船舶管理应用软件的演示,在此基础上,经过多轮次的研究、分析,决定选择对疏浚企业有所了解的软件公司进行合作,在成熟 SMIS 软件基础上定制开发出一套既满足安全管理体系(以下简称 SMS)对航运企业船舶管理的通用性要求,又体现出疏浚企业疏浚装备管理特点的设备管理信息化系统(Equipment management information system,简称“EMIS”),该系统已于 2011 年 8 月上线运行至今。

## 2 EMIS 主要结构特点及功能

### 2.1 系统的结构框架

系统主要由网络传输环境、基础软件平台(包括网络操作系统、桌面操作系统、关系型数据库管理系统等)和业务逻辑应用服务器等构成[3]。整个系统采用 B/S+C/S 混合客户端操作模式,这主要是由于船端带宽无法满足

Web 基本使用条件,故采用 C/S 结构,岸端则使用 B/S 结构,利用浏览器直接访问服务器。

岸端系统的主要有:数据库服务,逻辑业务处理应用服务、接口导入/导出应用系统、Web 服务、客户端应用(.Net 程序, B/S 浏览器)[3]。

船端系统主要结构包括:数据库服务、PB 应用程序、船岸数据交换处理系统[3]。

### 2.2 系统的设计原则及总体功能

**2.2.1 船舶维护保养体系**(以下简称为 CWBT)是航运企业普遍采用的一种现代管理模式,其设备循环维护保养的理念较为科学、合理。由于 CCS 对疏浚工程船舶没有这方面的强制性要求,故在做需求分析时,对是否应用 CWBT 也有过犹豫,但最终还是决定采用 CWBT 模式,一方面是该模式更有利于岸基对船舶设备维护保养情况进行远程监管,另一方面将 CWBT 拓展应用到疏浚装备管理上,还可以进一步促进公司疏浚装备管理水平的提升。为此我们组织力量,对 CWBT 的设备编码体系进行了有效的拓展和扩充,使疏浚工程船舶专用系统及设备都有一一对应的码号,同时还结合以往工作实践和管理经验,详细编写了这些设备维修保养的内容、周期和要求,作为 CWBT 工单管理的有效组成部分,这是 EMIS 中的一个创新,具有挑战性。

**2.2.2 依照疏浚企业的特点**,系统集成公司各项设备管理制度中工作规范和工作流程,涵盖了设备管理工作的全过程,各项业务操作均能在系统中进行,并可按需对各类业务操作环节进行追溯。

**2.2.3 实现了设备管理作业现场的数据采集、船岸数据双向传输、自动存取/生成设备档案、自动汇总、统计主要经济技术指标。**系统还具备自动工作提醒、预警、业务定期提示等功能。

### 2.3 系统的主要功能模块

**2.3.1 能耗**是疏浚船舶主要成本之一,也是分析和管控的重点。根据疏浚企业的特点,在能源管理模块中设置了船舶每日动态、日/月消耗、工程项目、存量统计及船舶油品检验等功能。在燃油、水、滑油消耗查询界面中,除了可按单船、按公司查询外,还增加了按工程项目查询,这是因为疏浚企业施工管理的特点,在某项工程中可能会有

多个子/分公司参与,船舶进、出相当频繁,增设这一分类查询,极大方便了这类数据的统计,既有利于对项目成本分析和经济核算,同时也兼顾近年来节能减排管理需求。

**2.3.2 修理、备件、物料管理**是设备部门的主要业务,从船端提交各类申请开始,经设备部门审核、领导审批、下达定单到船端签认,形成闭环。考虑到子/分公司各自的管理特点,在流程设计中兼顾各子/分公司的管理需求,在满足公司相关管理要求的基础上,按照“求大同存小异”的原则,对这三个管理模块部分审批流程进行了定制。

**2.3.3 维持船舶各类证书有效**是船舶正常运营的前提,系统除了可以在线查看每张证书的扫描件外,还可以按黄色、红色分别对三个月到期和一个月到期证书发出预警,避免由于工作上的疏忽,造成船舶证书失效。

**2.3.4 在安全管理模块中**,船端可以将 SMS 的日常检查结果和整改落实情况,通过系统进行填报,方便岸端职能部门及时了解或协助处理船舶安全检查中发现的“不符合项”,确保船舶的营运安全。

## 3 应用实践中的问题和现象

历经二年多的调研、需求分析和应用软件的设计、开发,2011 年 8 月 EMIS 在 6 艘疏浚船舶上正式进行应用试点,并逐渐扩大至公司境内外所有耙吸船、绞吸船、抓斗船等工程船舶和主要辅助船舶共计 50 余艘,船舶应用覆盖面达到 70% 以上,船舶设备管理信息获取渠道增加了,扁平化管理的优势逐渐显现,对促进和提升公司船舶设备管理水平起到了积极的推进作用。但随着应用的不断推进,一些制约设备管理信息化进一步深入的问题开始显现出来。

### 3.1 信息化的认知度较低

虽然大家现在都习惯用电脑办公和编辑文件、用 Email 收发邮件,用微信来互致问候和交流,但对设备管理使用电子流程这一管理模式却有一种自发性的抵触,习惯于拿“时间紧”、“单子多”、“供应商不配合”等各种理由和借口,以消极的态度进行应付或用纸质文档在系统外走流程。产生这种现象固然有系统自身“死板”因素,只有当完成当前操作才能走下一步,无法跳跃,确实没有用纸质文档操作那么方便、灵活,但这样流转正是体现了管理的严谨性。所以系统使用者的惰性还是主要原因,要

改变这种习惯、观念和认知,从习惯性抵触到被动性接受,这需要一过程,而这个过程的时间长短则取决于管理层的意志和决心。

### 3.2 “信息孤岛”现象犹在

按照 EMIS 的操作要求,船舶设备的修理、备件供应、物资供应三大主业务模块,均需要在系统内按流程完成相关的操作。但由于传统管理思维的根深蒂固,系统各业务操作所形成的电子数据、报表、电子审批单只能在设备系统内部打转,其他相关管理部门以制度、文件条文规定为由不予承认和接受,各管理系统的业务数据无法实现共享,形成了既阻碍大量业务数据互联互通,又增加了额外工作量的这一尴尬局面。

### 3.3 基础管理欠扎实

EMIS 的应用,可以使设备管理各项业务操作在网上进行流转、跟踪和查询。譬如:岸端可随时查看每艘船舶各类备件的存量及存放位置,船端也能在备件到船并完成电子签收后自动入库(自动加减库存量的),但前提条件是各船舶基础数据必须齐全、完整、准确。由于各种原因和因素,各船舶基础管理水平存在着明显差异,先天的不足又没有通过后天的勤奋来弥补,使得一些船舶的基础信息、船存信息失真,这势必会影响系统效能的发挥,也会误导岸基管理部门。

### 3.4 船岸通讯有“瓶颈”

目前 EMIS 的船、岸数据交换主要通过 3G、4G 通讯网络实现。由于公司承接的疏浚吹填等工程项目大都处于通讯设施建设欠发达的地区,施工船舶经常处于网络信号微弱甚至没有覆盖的区域,船、岸数据交换经常无法实现,或交换不畅通、不连续,同步效果不甚理想,信息滞后使得 EMIS 应有的亮点逊色不少。

## 4 系统长效应用的思考与对策

设备管理信息化的理念是先进的,所具有的功能也是强大的,这毋庸置疑。但要长效应用并真正发挥作用,离不开各级管理者的支持和呵护,也需要每个使用者的理解和努力。

### 4.1 强化应用考核机制

从管理角度来说,EMIS 只是一个工具,它是以现行管理文件(如体系文件、规章、标准等)为依据,借助所

编制的程序、逻辑去约束执行者的操作行为。与各类管理软件一样, EMIS 有严密的逻辑和操作规则, 在很大程度上阻止了随意性和规避制约行为的发生, 给倒走流程、补登 / 记录者平添了很多困难, 应用中必然会引起抵触。必须要以有效的考核制度为手段, 强化应用考核机制, 才能保障 EMIS 的长效应用。目前公司《设备管理信息化系统 (EMIS) 运行、维护管理实施细则》已经颁布, 考核办法正在修订和完善中。

#### 4.2 实现数据的互联互通

管理软件是为管理实践而存在的, 其本身就有持续改进的需求, 只要实践证明是烦琐、不切合实际的地方就应该简化、改进和完善, 唯有如此才能不断提升使用者的体验感受和使用满意度, 实现管理的终极目标。因此搭建好系统持续改进和完善的平台, 才能确保系统能够真正达到“好用”要求。这“好”字体现在系统简单易学、操作便捷、界面友好; “用”字则更突出在让使用者喜欢用、乐意用、勤于用, 而要使这“用”达到一定的高度, 则必须实现各管理软件间的数据共享。只有消除了信息“孤岛”, 实现 EMIS 与公司其他业务管理系统数据的互联互通, 才能真正发挥管理软件的巨大作用。目前公司正在进行 EMIS 升级改版, 进一步提升使用者操作体验感, 同时正在筹划以“数据共享”为目标的数据交换平台。

#### 4.3 重视船舶基础管理

基础管理是一切管理实践的源头和前提, 基础工作的质量往往会影响到管理工作的成效, 管理软件的应用尤其如此。船舶基础信息数据的缺失或不准确, 不但会降低设备管理信息扁平化的效果, 也会给主管部门的业务及管理工作带来影响。因此必须加大力度, 强化船舶基础信息的管理, 依照船舶各岗位分工, 将各岗位分管设备的基础信息修正、补充、完善的责任落实到人, 并与其绩效考核及岗位 / 职务晋升挂钩, 才能有效保证船舶基础数据信息的准确、完整。

#### 4.4 稳定通畅的船岸数据交换渠道

EMIS 的各种基础信息和数据均来自于船舶, 需要借助数据通信这一桥梁才能与岸端服务器相连, 实现船岸数据的交换。公司疏浚船舶施工区域的岸基通讯设施往往不完善, 这决定了采用卫星宽带是解决船岸数据传输“瓶颈”问题一种较为实际的有效手段。但由于卫星通讯所需投入不菲, 全面采用势必增加公司的财务支出, 需要统筹兼顾, 综合考量。一方面可通过采用团购形式, 以公司或集团的数量优势来换取代理商的优惠价格。另一方面, 根据重要性原则, 优先保障境内外主要疏浚船舶的船岸数据交换, 同时根据传输信息重要性和船所在不同地域制订合理的数据传输策略, 从而实现投入 / 产出效能的最大化。

#### 4.5 建立适宜的权限管理构架

对采用电子流程的管理应用软件而言, 构建适宜的权限管理构架显得尤为重要。系统涉及到的审核、审批环节越多, 势必会对办事效率产生影响。因此必须对设备管理的各个业务环节进行全面梳理, 依据重要性原则, 通过对相关岗位的逐级授权, 实现既满足公司内部风控管理的要求, 又不会影响系统业务操办正常进行的目的, 达到风控与效率“双赢”的局面。

#### 5 结语

管理信息化是管理发展的趋势、也是信息化技术与应用的必然结果。作为公司在设备管理模式方面的一种大胆尝试, EMIS 的应用成功势必助力公司设备管理水平迈上一个新台阶。但要持续深入推进下去, 既需要不断总结和完善系统的使用体验, 更需要各方的理解与支持, 只有这样才能使管理软件真正发挥其应有的作用。

#### 参考文献:

- [1] 张妙平. 扁平化管理模式在国际工程项目中的实践与探索 [J], 《福建建筑》, 2014 年第 10 期.
- [2] 邓和平. 如何驾驭信息化的力量 [J], 《四航》, 2016 年第 3 期.
- [3] 中交上航局设备管理信息化系统项目验收材料 [Z], 2011 年.

作者简介:

黄伟明 (1962—), 男, 工程师, 现从事设备信息化管理和统计分析工作



顾磊<sup>1</sup>, 倪雁<sup>2</sup>, 倪福生<sup>1</sup>

1 河海大学疏浚技术教育部工程研究中心, 常州 213022

2 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120

Gu Lei<sup>1</sup>, Ni Yan<sup>2</sup>, Ni Fusheng<sup>1</sup>

1 Engineering Research Center of Dredging Technology of Ministry of Education, Hohai University, Changzhou, 213022;

2 Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd. Shanghai, 200120

## 疏浚工程中的射流冲刷研究进展

### Research Development of Water Jets Scouring in Dredging Engineering

**摘要:** 射流冲刷为诸多疏浚工程问题提供了解决方案, 提高了疏浚破土切削效率。本文就淹没射流相关研究成果进行总结, 概述了疏浚工程中射流冲刷的应用成效, 并提出了有待深入研究的相关问题。

**关键词:** 射流理论; 疏浚过程; 工程应用

**Abstract:** To increase the efficiency of cutting process in dredging, water jets could provide possible solutions in engineering use. Relevant research findings concerning submerged water jets scouring are summarized. An overview about water jets applications in dredging engineering and its effects are discussed. In addition, some follow-up research problems have been raised.

**Key words:** water jets theory, dredging process, engineering application

#### 1 引言

中外学者对射流的研究已持续上百年, 纯射流理论和技术方面的研究已日趋成熟, 如射流的基本方程、射流结构、速度分布、扩展规律等等。射流最早应用于水力开采煤矿, 后进一步在清洗、切割、破碎、钻探、挖掘等众多领域得以发展, 并衍生出磨料射流、空化射流、掺气射流和自激振荡射流等新的技术。水射流冲刷也可应用在疏浚工程。如港口航道疏浚中常用的耙吸挖泥船, 几乎都配

有高压水射流装置, 水射流辅助机具破土效率可提高 90% 左右<sup>[1]</sup>。在粘土、密实沙土的疏浚工程中, 引入射流可有效增加耙吸船耙头入土深度并预防耙头堵塞现象, 从而增加疏浚产量。

#### 2 研究现状

##### 2.1 射流基本特性

冲击水射流可分为三个区域: 自由射流区、冲击区和附壁射流区<sup>[2]</sup>, 如图 1 所示, 图中 H 为冲击靶距,  $d_0$  为

喷嘴出口半径， $u_0$  为喷嘴出口流速， $u_m$  为各射流截面的中线流速。

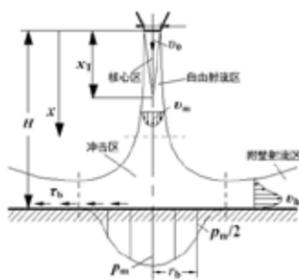


图1 冲击射流结构

在自由射流区，其流动特性不受冲击壁面的影响，但周边流体因卷吸掺入射流束会使射流速度有所衰减。保持射流出口速度  $u_0$  的区域（称为射流核心区）不断缩小，核心区长度  $x_1$  约为 6 倍喷嘴直径。在核心区外，中线速度在距离喷嘴出口  $x$  处衰减为：

$$u_m = u_0 \frac{6.3d_0}{x} \quad x \geq x_T \quad (1)$$

由于中线速度随距离增大的衰减速度极快，所以靶距对冲刷效果会存在较大影响。当相对靶距  $H/d_0 > 8.3$  ( $H$  为靶距， $d_0$  为喷嘴直径) 时，在土体上产生的作用主要与靶距  $H$  有关，只有在核心区内，喷嘴直径  $d_0$  才会发挥关键作用 [3]。

对土体的破坏主要发生在冲击区。在该区域，射流动能逐渐转化为压力能，其压力分布如图 1 所示。其压力分布可表示为：

$$p = p_m \exp[-0.693(r/r_0)^2] \quad (2)$$

式中， $p_m$  为床面的中线动压； $r$  为所求压力所处半径， $r_0$  为压力为  $p_m/2$  处的半径值。

冲击后垂直运动的射流也逐渐变为沿壁面方向，成为附壁射流，从而在壁面产生一定切应力，该切应力引起床面颗粒起动亦会导致床面破坏，可采用下式进行计算 [4]：

$$\tau_b = C_f(1/2 \rho u_h^2) p_m \quad (3)$$

式中， $\rho$  为射流流体密度， $u_h$  为附壁流动的最大流速， $C_f$  为切应力系数，与流动雷诺数和床面粗糙度均有关。目前对于表征床面粗糙度的特征粒径并无统一结论，常用有  $D_{50}$ 、 $D_{90}$ 、 $D_{65}$ 、 $D_{84}$  等。

冲击区和附壁射流区是射流与土体相互作用的区域，但究竟是冲击压力还是表面切削力导致床面土体的破坏，

还尚不明确，可能与土体性质、射流强弱等都有关系。不过这两个区域的能量均来源于自由射流区，因此射流系统设计时如何降低自由射流区的能量衰减甚为关键。

### 2.2 定点冲刷

为探索水工建筑物周围的绕流和下游泄水所导致的河道冲刷，国内外许多学者进行了射流冲刷松散沙床的研究。研究涵盖多种射流类型，包括：水平射流、垂直射流与带角度射流，淹没射流与非淹没射流，气体射流、纯水射流与含沙射流，二维平面射流与圆柱射流，单喷嘴射流与交叉喷嘴射流，贴底与离开床面的射流，双股多股射流等等 [5-7]。数值模拟主要采用 FLUENT 和 FLOW-3D 软件，其中 FLOW-3D 软件因内含泥沙冲刷模型而模拟更为方便。诸多研究均发现射流冲刷松散沙的坑形具有相似性，并分别获得了冲坑深度的预测模型，Rajaratnam 的结果得到广泛认可：

$$\frac{h}{H} = 1.26 E_C^{0.11} - 1 \quad (4)$$

式中， $h$  为冲坑深度， $H$  为喷射靶距， $E_C$  为射流无量纲特征参数，其定义是：

$$E_C = \frac{v_0(d_0/H)}{\sqrt{gD(\rho_s-\rho)/\rho}} \quad (5)$$

式中， $v_0$  为射流速度， $d_0$  为喷嘴直径， $D$  为沙粒直径， $\rho$  表示沙粒密度， $E_C$  综合反映了射流参数和泥沙粒径的影响，表征射流到达床面的射流速度与松散沙床颗粒的沉降速度之比 [8]。

射流定点冲刷粘性床面的研究同样大多集中在河床冲刷方面 [9-10]，Mazurek 等进行了系列定点射流冲刷粘土的实验，获得了粘土的射流冲刷深度经验公式 [11]：

$$\frac{h}{H} = 0.19 \left( \frac{X-X_c}{X_c} \right)^{0.74} \quad (6)$$

式中， $X = \rho v_0^2(d_0/H)^2$ ，反映了射流冲刷在床面产生的切应力大小， $X_c$  则为粘土起动临界的  $X$  值。粘土床面的临界状态可通过观测床面颗粒的起动进行判断，有少量动和普遍动之分。应用于疏浚工程中的射流以破土为目的，床面颗粒的普遍动才会产生显著效果，故应采用普遍动作为粘土床面临界状态的判断标准。

### 2.3 移动冲刷

疏浚工程中，射流随船体一起移动。目前针对移动射流冲刷的研究相对较少。Shusen 等采用表面刷蚀理论对冲沟形状进行了分析 [12]。唐立志通过实验指出圆形喷嘴

比扇形喷嘴更适用于开沟，分析了在不同靶距下几种强度土体临界破坏射流压力值 [13]，并未给出具有普遍价值的经验公式。Yeh 等进行了移动射流冲刷沙床的实验，获得了射流冲刷松散沙土的冲坑深度预测公式（式 7） [14]，式中  $u_s$  表示喷嘴移动速度。

$$\frac{h}{H} = \frac{v_0/v_s - 4.0}{305.4 + 3(v_0/v_s - 4.0)} \quad (7)$$

沈伟平等对移动喷嘴冲刷黄骅港板结粉土进行了实验，指出横移速度对于破土效果的影响较大，获得了的冲刷深度拟合公式（式 8），该式主要适用于黄骅港的具体土质 [4]。

$$h = 0.276 v_0^{\frac{1}{3.578}} \frac{0.027}{0.027 + v_s^{0.493}} \quad (8)$$

上述两个公式均来自于实验数据的拟合，式中常量对实验装置具有一定的依赖性。

## 3 射流冲刷的疏浚应用

### 3.1 内河清淤

当河床泥沙较易起动且水动力条件足够时，可考虑采用射流方式进行清淤。射流冲击沙床促使沙粒悬浮，在射流与河床作用产生的漩涡下形成水沙混合层，由于泥沙沉降速度较慢而逐渐扩散，在水流挟带作用下被输送至河流下游，从而实现了特定区域的淤积清理。由于无需提供专门动力和机具进行输送和抛投，其运行能耗就相对较低，有效地节约了成本。

射流清淤方式在黄河潼关河段得到了较好的应用，由于黄河淤积泥沙颗粒较小，而该河段的水动力条件足够，为采用该方式施工提供了良好的天然条件。采用该方式进行清淤，除了上述直接冲起泥沙使得水流含沙量提高外，更为重要的是，可以促使河段河槽趋于窄深形态，从而提高河道的输沙能力。研究显示，后者对河流挟沙能力的提高可达前者的 1.6 倍左右 [15]。

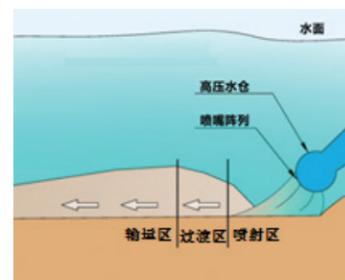


图2 射流扰动清淤过程

### 3.2 辅助水库调沙

上游河道的泥沙在进入水库后会发发生淤积，从而导致库容淤损。我国近十万座水库每年的泥沙淤积量超过 40 亿立方米 [16]，调水调沙是恢复库容的有效手段，但单纯利用天然水流带动的泥沙量非常有限，往往造成水资源的巨大浪费。采用射流冲刷的方式使底床泥沙的大量悬浮，再利用水流的巨大能量将其携带至排沙口或闸口排放，可以增加下泄水中的含沙量。因此，射流辅助水动力调水调沙，可大幅提高水资源的利用率，使得调沙效果倍增。我国黄河流域的水库如小浪底水库等采用这种方式时，效果显著，经济效益可观 [17]。

### 3.3 水工构筑物淤积清理

在灌溉渠道、航道闸室以及码头、船坞、堤坝等水工物附近，长年运行会带来较多泥沙淤积，影响了这些水工构筑物的运行功能。由于空间有限、构筑物安全等原因，不宜采用机械工具进行泥沙清理，射流冲刷则表现出独特的优势。采用射流冲刷使泥沙悬浮后再抽吸走可安全高效地清理受限空间内的泥沙，从而保障水工构筑物的正常使用。

### 3.4 航道维护疏浚

航道内新淤的泥沙往往较易悬浮和挟带，采用射流清淤的方式就非常经济，常被应用于航道的维护疏浚施工。图 3 为一条由拖轮改造而成的射流清淤船，压力流体通过前部并列排布的喷嘴组喷出，冲刷床沙，使之悬浮进而被水流带走。

出于来源便捷、处理方便等考虑，通常将纯水作为压力流体。但当淤积粒径较小时，为了增加清淤效果，可在压力流体中采用掺气方式，利用压缩气体在水中的上浮力和紊动效应，扩大泥沙的悬浮高度和范围，从而提高清淤浓度和下泄距离。图 4 所示为一种掺气耙结构。在我国多个入海口航道的水深维护中，掺气射流清淤获得了成功应用，效果显著 [18]。

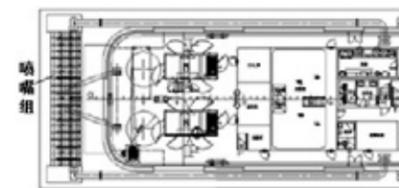


图3 射流清淤船结构

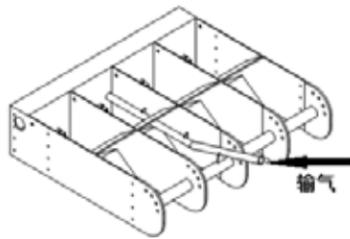


图4 掺气耙结构

### 3.5 硬质土挖掘

挖掘铁板沙、硬粘土等密实硬土时，由于土体快速变形时固相颗粒间的孔隙负压以及粘性土的粘附等原因，机械刀具的施工效果较差，而射流方式则展现出独特的优势，因此常采用射流切削辅助刀具进行挖掘施工（图5）。如图5所示，在前进方向上由射流先冲击床面，再进行耙齿切削。射流的作用表现在三个方面：①预切削提高产量，②降低土壤强度和耙齿切削阻力，③提高泥泵入口压力和抗汽蚀性能，有利于增加挖掘深度，④减少耙头堵塞几率。

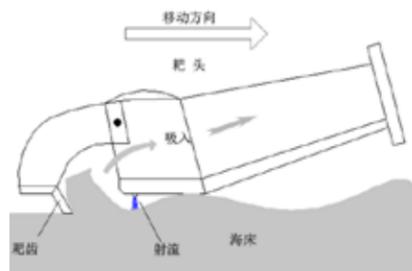


图5 含喷嘴的耙头结构

随着疏浚工艺研究的不断深入以及现场经验的不断丰富，射流切削方式在硬质土挖掘中的作用日益得到重视。比利时国际疏浚公司为疏浚硬粘土研制了超高压射流系统 DRACULA，最大射流压力高达 38MPa，在粘土挖掘时增产效果显著<sup>[19]</sup>。高压射流系统已成为大型耙吸挖泥船的基本配置，高压冲水泵的流量可达主泥泵流量的 40-50%。

## 4 亟待研究的问题

尽管射流在疏浚施工中已获得广泛应用并取得了显著成效，但仍存有一些实际施工甚至机理层面的问题，有待进一步深入研究和实践探索。

### 4.1 快速移动射流切削硬质土的机理

硬质土与松散沙土不同，其颗粒间相互作用较大，射流在破土过程中必须克服这种内在作用，其切削就可能不

是单纯的泥沙起动问题。普遍认为粘性土颗粒间的粘结作用是其抗切削阻力的根本原因，但对破坏机理的解释并不统一。大多研究结果认为表面冲刷形式使粘土在射流作用下失效，即表面颗粒被水流起动和挟带。部分研究观测到大体量冲刷现象，将射流看作整体载荷，将射流切削看作土基在载荷作用下的剪切滑移破坏<sup>[20]</sup>。此外，还有研究观察到射流冲击下土体表面出现大量裂纹，指出在该过程中水力劈裂破坏也不容忽视。但目前仍未获得一致的结论。疏浚过程中，射流随船体一起移动，耙吸挖泥船施工时移动速度可达 1.0-1.5m/s。那么，快速移动射流作用下，硬质土会产生何种破坏形式？对硬质土射流切削机理的探索，将为射流系统的设计和使用提供理论指导。

### 4.2 射流参数的选取

射流冲刷效果取决于射流与土质两方面。在式 7、式 8 所示移动射流冲刷深度的经验公式中，仅仅包含射流参数，缺少反映土质特性影响的参数。实际工程土质是复杂多样的，即使同一施工区域土质也会有差异。不同土质特性下射流参数的选取不尽相同。因此，在建立射流冲刷的起始条件、冲刷深度与体积、产能比等模型时，应该将土质的抗冲刷性能作为关键参数。

影响冲刷效果的射流参数众多，包括射流强度、喷射角度、流量、移动速度、喷嘴间距等等。诸多因素如何匹配以及诸多参数如何设置才能综合获得最佳冲刷效果是一个复杂问题，其中射流压力与射流流量的合理匹配是关键。从挖掘过程看，射流压力是射流强度的体现，决定了射流破土的能力；射流流量是冲刷范围的体现，影响土方产量。单纯增加压力只会增加破土深度，却无法提供足够的悬浮和挟带泥沙的能量；单纯增加流量而压力不足会造成切割冲刷的深度达不到要求。当船舶射流装置的功率有限时，合理分配压力与流量显得更为重要。

### 4.3 射流与挖掘刀具、输送系统的配合

对于硬质土疏浚，需要射流切割冲刷与挖掘刀具的密切配合。射流冲刷可以将整块土体分割，同时提高土体内部含水率，从而降低机械刀具的切削阻力。因此，应以总切削比能作为衡量标准，对射流系统及挖掘刀具进行优化设计。在实际施工中，针对特定土质，应合理地使用射流压力、流量辅助破土，实现挖掘产量最大化或单方总能耗

最小（射流能耗与刀具挖掘能耗之和）。但是目前这方面的研究成果较少。

此外，对于耙吸挖泥船，射流参与耙头挖掘过程会影响泥泵吸入系统的性能，如泥泵入口压力或真空度、泥浆浓度等。射流参数与泥泵参数的匹配关系有待深入研究。

## 5 结语

综上所述，射流冲刷在内河清淤、水库调沙、航道维护疏浚、硬质土挖掘等疏浚工程中都得到了卓有成效的应用，现有淹没射流相关理论和研究成果可以为射流冲刷的应用提供一定参考。但是，在疏浚施工复杂土质条件下，仍存在许多基础性、工程性问题，需要进一步的深入研究，才可为疏浚工程中射流冲刷应用提供理论指导。

## 参考文献：

- [1] 沈伟平, 孙雪梦, 赵学, 罗大伟, 任云. 耙头高压冲水改进技术 [J]. 水运工程, 2012, (3): 159-162.
- [2] 董志勇. 射流力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [3] Beltao S, Rajaratnam N. Impinging of axisymmetric developing jets [J]. Journal of Hydraulics Research, 1977, 15(4): 311-326.
- [4] Rajaratnam N, Mazurek K A. Impingement of circular turbulent jets on rough boundaries [J]. Journal of Hydraulic Research, 2005, 43(6): 689-695.
- [5] 李文学, 张隆荣, 姜乃迁, 张翠萍. 射流冲刷试验研究 (之二) [J]. 泥沙研究, 2000, 5: 22-27.
- [6] 顾磊, 倪福生, 李雯, 徐立群. 喷嘴间距对双股平面射流冲刷的影响 [J]. 泥沙研究, 2016, (6): 32-37.
- [7] Qian Z D, Hu X Q, Huai W X, et al. Numerical simulation of sediment erosion by submerged jets using an Eulerian model [J]. Sci. China Tech Sci., 2010, 53: 3324-3330.
- [8] Aderibigbe O O, Rajaratnam N. Erosion of loose beds by submerged circular impinging vertical turbulent jets [J], J Hydraul Res, 1996, 34: 19-33.

## 作者简介：

顾磊, 男, (1983-), 讲师, 从事疏浚技术与设备研究工作。

倪雁, 男, (1988-), 助理工程师, 从事港口航道设计与研究工作。

倪福生, 男, (1962-), 教授, 从事疏浚技术与设备研究工作

- [9] 宗全利, 夏军强, 张翼, 等. 荆江段河岸粘性土体抗冲特性试验 [J]. 水科学进展, 2014, 25 (4) : 567-574.
- [10] 马志敏, 邹先坚, 赵小红, 等. 基于 B 超成像的泥沙起动流速测量方法 [J]. 水科学进展, 2015, 26(1): 59-65.
- [11] Mazurek K A, Rajaratnam N, Sego D C. Scour of cohesive soil by submerged circular turbulent impinging jets [J]. Journal of hydraulic engineering, 2001, 127(7): 598-606.
- [12] Shusen Z, Min Z, Tong G, et al. Experimental research on trenching in stiff clay by submerged vertical traveling jets [J]. Journal of Coastal Research, 2016, 32(2): 365-373.
- [13] 唐立志. 适用于硬质黏土的淹没射流物理模型 [J]. 油气储运, 2016, 35 (4): 432-438.
- [14] Yeh P. H., Chang K. A., Henriksen J., 等. Large-scale laboratory experiment on erosion of sand beds by moving circular vertical jets [J]. Ocean Engineering, 2009, 36: 248-255.
- [15] 张原锋, 侯素珍, 林秀芝, 等. 射流清淤对提高潼关河段输沙能力的作用 [J]. 人民黄河, 2004, 26 (6): 29-30.
- [16] 田海涛, 张振克, 李彦明, 等. 中国内地水库淤积的差异性分析 [J]. 水利水电科技进展, 2006, 26 (6): 28-33.
- [17] 曹慧群, 李青云, 黄苗, 等. 我国水库淤积防治方法及效果综述 [J]. 水力发电学报, 2013, 32 (6): 183-189.
- [18] 周志勇, 朱国贤, 项明. 复合型喷水掺气动力耙的清淤机理与应用 [J]. 江苏水利, 2012 (8): 25-26.
- [19] Stefaan V. Dredging Stiff to Very Stiff Clay in the Wielingen Using the DRACULA® System on a Hopper Dredger [C]. The 30th PIANCAIPCN Congress, Sydney, Australia, 2002.
- [20] Nobel, A J, Talmon A M, and Vlasblom W J. Cavitating jets for dredging clay. The 17th International Conference of the Hydraulic Transport of Solids, Cape Town, South Africa, Baggermaatschappij Boskalis bv and Van Oord, 2007, 531-549.

# 疏浚创建新生态

## ——2017 年度中国疏浚十大新闻

### Dredging Creating New Ecology ——Top 10 News of 2017

#### 一、中交天航局荣获中国土木工程詹天佑大奖

2017年4月14日，在第十四届中国土木工程詹天佑奖颁奖大会上，中交天津航道局有限公司（以下简称：中交天航局）荣获中国土木工程詹天佑大奖。这是中交天航局第三次获此殊荣。

本届中国土木工程詹天佑大奖从128个申报的优秀项目中，评选出29个获奖项目。中交天航局再获大奖，体现了国家和土木工程行业对该司科技创新能力、创新成果转化和应用能力及施工组织管理能力的高度认可。



#### 二、国内最大内河整治工程——荆江河段航道整治工程通过竣工验收

2017年4月15日，长江航道局承建的长江中游荆江河段航道整治工程正式通过竣工验收，航道水深提高到3.8米，实现了由3000吨级货船组成的万吨级船队可昼夜双向通航。

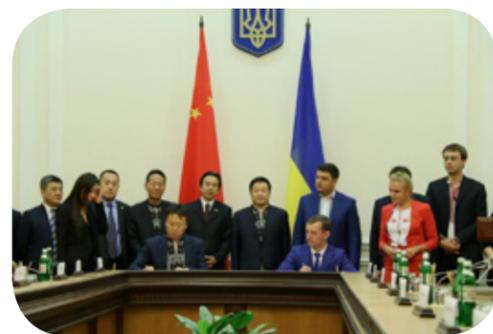
长江中游荆江河段航道整治工程是贯彻落实国家长江经济带建设战略的重点工程，起于枝城，止于洞庭湖出口处的城陵矶，全长280.5公里，工程投资近40亿元。它的成功整治，不仅提高了荆江河段航道尺度，推动了长江船舶大

型化发展，也有效降低能耗，减少污染物排放，降低沿江地区环境污染，实现了良好的生态效益。



#### 三、乌克兰南方港疏浚项目合同签约仪式在乌总理府举行

2017年5月18日，在乌克兰总理格罗伊斯曼、中国驻乌克兰大使杜伟、中国交建副总裁文岗和中交疏浚总裁康学增共同见证下，中交疏浚参建的乌克兰南方港粮食码头航道疏浚工程项目成功签约。该项目合同造价共计约6167.9万美元，总工期约30个月。作为中企在乌承揽的首个基建项目，是中国疏浚实施“走出去”战略、推动“一带一路”建设在欧洲落地的一次成功实践。当年，该工程被DredgingToday网站评为2017疏浚业最受读者关注新闻。



#### 四、中交疏浚承建的巴拿马史上最大中方投资项目——巴拿马 PCCP 项目开工

2017年6月7日，在巴拿马总统胡安·卡洛斯·巴雷拉见证下，中交疏浚（集团）股份有限公司承建的巴拿马史上最大中方投资项目——巴拿马 PCCP 工程开工。该工程位于西半球最大自由贸易区——科隆自由贸易区，合同额约3.16亿美元，合同工期34个月，主要施工内容为设计、航道港池疏浚、吹填造地、地基处理和水工工程等。该工程的建设，将对中巴友好和两国政治经贸合作产生积极推动作用。



#### 五、港珠澳大桥海底隧道正式贯通

2017年7月7日，港珠澳大桥海底隧道正式贯通，标志着历经四年34次的“深海之吻”，港珠澳大桥核心控制性工程——海底沉管隧道全线贯通。港珠澳大桥岛隧工程是大桥的控制性工程，是迄今世界长度最长、埋入海底最深、单个沉管体量最大、设计使用寿命最长、隧道车道最多、综合技术难度最高的沉管隧道工程。中交广州航道局有限公司承担东、西两个人工岛基槽开挖、伶仃洋临时航道与沉管拖运航道开挖，沉管隧道基槽开挖与维护等任务。其中，深基槽高精度挖泥关键技术与设备研发成果填补了国内精确挖泥施工技术与设备研究的空白，深水清淤关键技术与设备研发成果填补了国内深水高精度清淤施工技术与设备研究的空白。



#### 六、世界最大钢圆筒振沉工程——深中通道西人工岛钢圆筒振沉工程完工

2017年9月18日，中交一航局第一工程有限公司参建的深中通道西人工岛最后一个钢圆筒成功振沉，标志着这一超级工程已然驶入建设快车道。世界最大钢圆筒、世界最大振动锤、世界首例软土地基处理等高难度技术在这个超级工程中的突破性应用，让世界看到了中国建造者们的能力与智慧。



#### 七、亚洲最大自航绞吸式挖泥船“天鲲号”下水

2017年11月3日，中交天津航道局有限公司投资并联合设计的亚洲最大、中国首艘重型自航绞吸挖泥船“天鲲号”在江苏启东成功下水。该船绞刀功率为6600千瓦，适应恶劣海况能力全球最强，输送系统能力世界第一，挖掘能力亚洲第一。该船真正实现了大型挖泥船设计、研发、建造全周期的“中国化”，代表着中国疏浚船舶工业制造的最高水平，意味着中国在疏浚装备高端制造领域进入世界先进行列，将引领中国民族疏浚业迈向强盛发展的新时代。日前，该船已入选国际知名船舶杂志《MARITIME REPORTER AND ENGINEERING NEWS》评出的“2017年世界名船”，国资委新闻中心联合国资委网站、《国资报告》杂志、环球网、今日头条、一点资讯评出的“2017年度网友最关注的央企十大国之重器”。



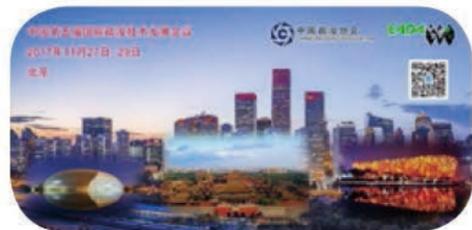
### 八、中国第五届国际疏浚技术发展会议暨中国疏浚成就展在京隆重举行

2017年11月28日，为纪念中国疏浚业120周年，中国第五届国际疏浚技术发展会议暨首个中国疏浚历史专题成就展在京举行。大会以“疏浚·生态·可持续”为主题，来自世界各地的400余名行业精英，聚焦智能疏浚、生态疏浚等重大课题，共同商讨世界疏浚界新时期行业创新发展大趋势。

同时，中交疏浚集团、中国疏浚协会与中交天航局共同推出《中国梦 新时代 新征程——纪念中国疏浚、中交疏浚、天航局诞生120周年主题成就展暨海上丝绸之路精品文物展》，展览回顾了中国疏浚数千年的发展历程，着重展示了近百年来中国疏浚业尤其是天航局的发展成就，突出了中国疏浚业对经济、社会、民生的贡献。

为表彰中交天航局的突出贡献，推动亚洲疏浚业发展，世界疏浚协会联合会、东部疏浚协会向中交天航局颁发了“亚洲疏浚业特殊贡献奖”。这是东部疏浚协会首次颁发的奖项。中华全国总工会还向中交天航局授予“全国五一劳动奖状”。

会上，中国疏浚行业首次评选的“新世纪以来十大创新工程和十大创新科技成果”正式揭晓，中国交通建设股份有限公司“长江口深水航道治理一期、二期、三期工程疏浚工程/整治工程”、中国铁建港航局集团有限公司“珠海横琴新区高新技术产业区土地一级开发场地填筑工程”等10项工程，疏浚技术装备国家工程研究中心“挖泥船疏浚自动化监控系统自主研发”、天津普友机电股份有限公司“疏浚潜没电动机”等10项科技成果获选。



### 九、中交上航局、振华重工参建的全球单体最大、综合自动化程度最高码头开港

2017年12月10日，上海国际航运中心洋山深水港区

四期工程开港大会在洋山举行。中交上海航道局有限公司自2002年起承担了包括洋山四期在内的洋山深水港区100%陆域吹填和100%航道疏浚建设。其中陆域吹填通过挖泥船、运砂船、吹砂船总共回填了将近2.2亿吨砂土，从深海里“造”出8平方公里土地，相当于1000多个标准足球场大小，新大陆海拔11米，海底打桩最深可达39米，是国内外罕见的深海陆域吹填。上海振华重工（集团）股份有限公司等单位共同研发了洋山港四期软件系统，并提供全自动化设备。

洋山深水港区四期工程的开港，对扩大上海港集装箱吞吐能力、巩固提升上海港国际枢纽地位、推进上海国际航运中心建设将发挥十分重要的作用，更好服务“一带一路”建设、长江经济带发展和长三角一体化，更好服务全国。



### 十、中交天航局总工程师顾明获评2017中国科学年度新闻人物

2017年12月31日，由《中国科学报》、科学网、《医学科学报》和《科学新闻》杂志共同主办的“2017中国科学年度新闻人物”评选正式揭晓，全国疏浚行业资深专家、中交天津航道局总工程师顾明当选“2017中国科学年度新闻人物”。

“中国科学年度新闻人物”评选活动至今已经成功举办七届，因评审的权威严谨和公众的广泛参与，在科技界具有良好的口碑和影响力。本届评委会由十一届全国政协副主席王志珍院士担任主任，“嫦娥之父”欧阳自远等众多院士和资深媒体人出任评委。



# 中交(天津)生态环保设计研究院有限公司

CCCC (TIANJIN) ECO-ENVIRONMENTAL PROTECTION DESIGN & RESEARCH INSTITUTE CO., LTD.



天府锦江生态绿道示范段清淤工程



星云湖污染底泥疏挖及处置工程



白洋淀治理项目

中交(天津)生态环保设计研究院有限公司(简称中交天航院)是一家从事水环境综合治理与设计、水运工程设计、工程测绘、工程勘察等业务的综合性设计企业,主要业务涉及环保疏浚与底泥处理资源化、黑臭水体整治与流域综合治理、污染土壤修复、区域环境治理与海岸带修复、河道治理、生态修复、疏浚和吹填工程、港口、码头、航道、人工岛、助航设施、水工结构建筑物、海洋测绘、扫海测量、工程测量及障碍物探测、海洋地质调查、水文地质勘察、岩土工程勘察、工程地质室内土工试验与原位测试等多个方向。

中交天航院拥有工程勘察综合甲级、水运行业工程设计甲级、测绘甲级、环境工程(污染修复工程)设计乙级等资质,是国家级高新技术企业。拥有一支300余人的科研团队;水深测绘业务国际一流,水环境治理设计业务国内领先;拥有一批具有自主知识产权的先进技术、专利和科研成果。

中交天航院拥有多波束测深技术与长距离LRK定位技术集成应用、基于潮汐调和分析及余水位差分的潮位推算技术、水底铁磁性物体精细探测技术及侧扫声呐与多波束相结合的水下软体排检测技术等核心技术,在国内勘察测量业务的处于领先地位。中交天航院在雄安新区白洋淀生态综合整治工程、成都锦江流域水环境综合治理等项目中彰显了院水环境治理规划设计领域的强大实力,受到业主和社会各界一致好评。

中交天航院将继续秉持“科技领先 创新发展”的理念,为把院建设成为中交集团最具实力的“生态环境综合治理技术服务商”,集团内首家以生态环保业务为核心业务的创新型设计研究院而努力奋斗。



## 科技领先·创新发展

中交(天津)生态环保设计研究院有限公司  
CCCC (TIANJIN) ECO-ENVIRONMENTAL PROTECTION DESIGN & RESEARCH INSTITUTE CO., LTD.