

# DCM 深层水泥拌合船舶发展及前景分析

邹春晓, 付院平

(中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461)

**摘要:** 深层水泥拌合船舶由日本研发建造, 简称 DCM 船, 广泛应用于海上软基加固工程。目前该技术主要应用于日本、韩国, 其中日本 DCM 船专业化程度高, 均为单处理机; 韩国 DCM 船绝大部分为挤密砂桩船改造, 多为三处理机。国内 DCM 技术在陆上使用已有 40 多年历史, 但在海上工程应用极少, 直至 2015 年香港机场第三跑道扩建工程开建, 才购置、改造及新建了一批 DCM 船, 并开始大规模应用。随着工程发展需要, DCM 船舶逐渐向大型化、智能化、多元化发展, 并在未来具有光明前景。

**关键词:** 深层水泥搅拌; DCM 船舶; 制供浆系统; 施工管理; 控制系统

**中图分类号:** U674.33 **文献标志码:** C **文章编号:** 2095-7874(2020)06-0070-05

**doi:** 10.7640/zggwjs202006016

## Development and prospect analysis of deep cement mixing ship

ZOU Chun-xiao, FU Yuan-ping

(CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China)

**Abstract:** The deep cement mixing ship is developed and built by Japan, referred to as DCM ship, which is widely used in offshore soft foundation reinforcement engineering. At present, this technology is mainly applied in Japan and South Korea, among which the Japanese DCM ship has a high degree of specialization and all of them are single processor. Most of the DCM ships in South Korea are modified by extruded sand pile ships, mostly with three processors. China's DCM technology has been used on land for more than 40 years, but it has rarely been used in offshore engineering. It was not until the third runway expansion project of Hongkong Airport was started in 2015 that a batch of DCM ships were purchased, rebuilt and newly built, and began to be applied on a large scale. With the need of engineering development, DCM ships are gradually becoming large-scale, intelligent and diversified, and have bright prospects in the future.

**Key words:** deep cement mixing; DCM ship; slurry system; construction management; control system

### 1 DCM 工艺简介及海上应用

#### 1.1 DCM 工艺概述

深层水泥拌合船简称 DCM 船, 是应用 DCM 工法将水泥浆注入软土地基中, 并在原位与软土充分搅拌形成水泥土, 水泥硬化后使土体得到加固的一种软基改良施工船舶。

DCM 工法系日本在深层石灰拌合法的基础上进行的研究, 在日本应用非常广泛, 自投入使用以来, 海上、陆上工程合计施工 5 242 项, 总处

理土方量达 8 419 万  $\text{m}^3$ , 海上处理达 3 542 万  $\text{m}^3$ 。在地域分布上, 根据日本 DCM 研究会 2019 年发布的 DCM 项目地域分布图可知, DCM 项目自北海道至冲绳遍布整个日本, 其中沿海地区是 DCM 技术应用的重点区域, 最多为东京, 达 1 842 万  $\text{m}^3$ , 海外 DCM 达 318 万  $\text{m}^3$ 。

DCM 技术在工程领域的应用, 根据土质分类有黏性土、砂性土、有机质土、黏性和砂性互层土等; 根据土层深度分类有浅层土、深层土、超深超厚层土等; 依据作用分类有提高地基承载力、减少地基沉降变形、提高结构整体稳定性、防止砂性土液化、提高土体抗渗能力、基坑护壁护底

收稿日期: 2019-12-10 修回日期: 2020-02-27

作者简介: 邹春晓 (1982—), 男, 天津市人, 工程师, 主要从事船舶机设备建造及技术管理工作。E-mail: zoucx@cccchj.com

等, 应用灵活多变, 应用范围持续扩大<sup>[1]</sup>。

DCM 处理技术的优缺点如表 1 所示。

表 1 DCM 工艺优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of the DCM process

优点	通过调整水泥的掺入量和标号高低可获得相应强度
	装置可穿入硬层, 使处理的基础获得可靠支撑
	处理环节采用机械操作, 施工管理更加可靠
	可处理的软基范围广
	处理后的地基沉降和变形小
	获得同样强度时改善体积比其他方法小, 相对经济
	相对需要较长时间时效处理的方法而言工期较短
	软土原地固化, 无海水污染和二次公害
	低噪音、低振动, 对周围构筑物无不利影响
缺点	通过改良形状的优化, 可达到经济的目的
	改善强度不高时, 相对其他方法效率较低、费用较高
	单位时间内比一般施工装备耗能大

1.2 DCM 船舶应用领域

DCM 船舶目前已广泛应用于海上软基加固工程, 如人工岛海底地基加固、桥墩基础地基加固、岸壁码头地基加固、护岸及防波堤地基的加固等诸多海上工程领域。具体应用包括沉箱基础加固、抛石斜坡堤深厚淤泥层处理、钢桩结构基础加固、人工岛中岛隧结合部的处理、增大被动/减小主动土压力、护底、护壁、防渗等工程项目<sup>[2]</sup>。

2 国内外 DCM 船舶发展情况

2.1 国内 DCM 船舶发展

国内 DCM 工法在海上工程的应用, 最早为 1987 年天津港东突堤南侧码头工程, 首次采用深层水泥拌和法加固岸坡, 由日本拌合船舶进行了施工。

国内第一艘 DCM 船为 1992 年利用自有打桩船“打桩 5 号”改装而成, 该船通过引进日本关键设备并与国内有关单位协作研制了微波自动定位装置, 进行了接高桩架、更换主机、改进锚机等一系列改装工作。在船体前上方设中控室, 可对处理机的拌合过程逐次进行 6 项参数(处理机贯入拔出速度、拌合头转速、钻杆扭矩、拌合贯入深度、输浆流量及钻杆倾斜度)的控制和监测, 这些参数以模拟表和数字显示, 同时以笔式记录仪记录。1993 年该船进行了烟台港西港池二期工程的基础施工, 之后重新改回打桩船<sup>[3-4]</sup>。

自 1993 年以来, 直至 2015 年香港机场第三跑道扩建工程建设, 国内一直没有 DCM 船舶, 海上软基处理主要依靠抛石、挤密砂桩等工艺。香港机场第三跑道扩建工程为国内首次大规模使用海上 DCM 桩处理软弱地基。为参与香港机场施工, 投资引进、改造及建造了 6 艘 DCM 船舶, 分别为一航津固 1、砂桩 2 号、砂桩 6 号、四航固基、DCOC1、DCOC2<sup>[5]</sup>。船舶主要性能参数如表 2 所示。

表 2 国内 DCM 船舶主要性能参数

Table 2 Main performance parameters of DCM ships in China

船名	DCOC1/DCOC2	DCM1	砂桩 6 号	砂桩 2 号	四航固基
几何尺寸/(m×m×m)	74×32×5	60×26×4.1	70×30×4.5	70×30×4.5	72×30×4.8
最大吃水/m	3.8	3.6	2.5	3	3.2
最小吃水/m	2.5	2.3	2	2.5	2.4
处理机数量/台	2	3	3	3	3
钻杆数量/根	4	4	4	4	4
桩架高度/m	42.7	48.6	49	47	46.2
最大处理深度/m	33.2	45	45	45	45
单次处理面积/m <sup>2</sup>	4.65×3 台	4.64×3 台	4.64×3 台	4.64×3 台	4.64×3 台
电机功率/kW	160×4 台	175×2 台	132×4 台	132×4 台	132×4 台

2.2 国外 DCM 船舶发展

国外拥有 DCM 船舶的水工公司主要集中在日本, 其次是韩国。日本从事 DCM 施工的企业有 40 多家, 拥有专用 DCM 施工船舶 60 余艘, 主要

大型水工公司为东亚建设工业、五洋建设、竹中土木和东洋建设等。韩国从事 DCM 施工的企业主要为殷圣基础设施建设株式会社等, 拥有专用 DCM 施工船舶 10 余艘, 绝大部分是由挤密砂桩船改造

而成。

日本 DCM 船舶最小的排水量约 400 t, 最大的排水量约 6 400 t。小吨位船舶居多, 大吨位船舶总计有十几艘。近 10 年来, 日本新建了 20 多艘 DCM 专用船。日本无论新造还是利用其它船舶改造的 DCM 船舶, 都是加工制造 DCM 处理机专用桩架和导架, 处理机只有 1 套。日本 DCM 船舶技术比较成熟, 可靠性较高。

日本 DCM 船舶的来源主要有 3 种: 一是利用起重船改造, 如 CMC8 号; 二是利用打桩船改造, 如 DCM8 号; 三是专门为工程设计和建造, 如 DCM3 号, 此类船舶处理机与船体、桩架、制浆系统和监控系统匹配合理, 处理能力强。改造的 DCM 船处理机一般位于船首, 可适应无障碍海区作业, 也可适应在水下建筑物附近进行加固施工; 专为软基处理设计建造的 DCM 船, 处理机一般在船中, 仅适应敞开水域大面积作业。

日本 DCM 船舶按处理能力进行分类, 处理能力指的是一次搅拌加固面积, 分 3 个等级: 2.2 m<sup>2</sup> 级、4.6 m<sup>2</sup> 级、5.7 m<sup>2</sup> 级。处理能力最强的 DCM 船舶一次处理面积高达 5.7 m<sup>2</sup>, 处理深度水面下 70 m, 每小时处理能力为 80~150 m<sup>3</sup>。

东亚建设工业株式会社 DCM7 号处理机采用 8 个钻头, 贯入能力强, 自动化程度高, 施工控制参数自动采集和处理, 代表了日本 DCM 船舶的综合发展水平。主要技术参数如表 3 所示。

表 3 DCM 7 主要性能参数

Table 3 Main performance parameters of DCM 7

部位	项目	数据
船体	船长/m	63
	船宽/m	30
	型深/m	4.5
	吃水/m	3.2
	桩架高度/m	69.5
处理机	处理面积/m <sup>2</sup>	5.7
	处理深度/m	水面下 70, 泥面下 50
	处理能力/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	90 以上
	功率/kW	3 590
	型式	8 轴

韩国 DCM 船主要由挤密砂桩船改造而成, 保留利用原挤密砂桩船的导架、桩架和振动锤提升卷扬系统等, 最大限度的降低了改造成本, 也为将来恢复挤密砂桩船施工功能保留了条件。殷圣

基础建设改造的 DCM 船拥有 3 组 DCM 处理机, 最大一次处理面积可达 9 m<sup>2</sup>, 超过了日本的 5.7 m<sup>2</sup>。韩国改造 DCM 船舶的基本思路是保留砂桩船的桩架、导架、绞车及控制系统等部分, 拆除供砂料斗、振动锤和砂桩管, 将每套振动锤更换为 1 套 4 轴 DCM 处理机; 拆除供砂料舱和输送皮带机等部分, 增加水泥舱、水泥输送装置、泥浆拌和装置、泥浆泵、供水冲水装置、DCM 控制系统等。韩国 DCM 船改造最大程度上保留了挤密砂桩船的结构, 大大降低了改造费用, 但专业性较差。殷圣基础建设改造的 DCM 船主要设备及参数如表 4 所示。

表 4 韩国改造 DCM 船主要性能参数

Table 4 The main performance parameters of DCM ships rebuilt in South Korea

部位	项目	数据
处理机	型式	4 轴×3 组
	功率/kW	120×2 台×3 组
	处理面积/m <sup>2</sup>	3×3 组=9
	处理深度/m	42
	处理能力/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	80

### 3 DCM 船舶技术和装备发展趋势

#### 3.1 向大型化发展趋势

近 40 年来, 日本 DCM 船舶技术发展的主线为提升处理能力, 扩大应用范围, 逐步将处理深度提升到水面下 70 m 或泥面下 50 m, 以解决海底超深、软弱土层超厚的处理问题, 而随着处理机性能的提升, 桩架高度、船舶尺寸必然向大型化发展。近年来日本仍在建造新的高性能 DCM 船, 以适应不断扩大的 DCM 施工市场的需要。东亚建设工业新建造的黄鹤号 DCM 船, 船长已达 70 m, 船宽 32 m, 为目前日本最大尺寸 DCM 船。

韩国及国内近几年来新建、改造的 DCM 船舶在船舶主尺度、处理机数量及处理能力方面均已超越日本, 大部分船舶采用 2 套或 3 套处理机, 处理面积及处理深度均已大幅提升<sup>[6]</sup>。

#### 3.2 智能化发展趋势

随着信息技术的日益发展, 越来越多的新型科学技术应用于 DCM 船舶。为了快速、精确定位, 所有 DCM 船都配有 GPS 定位系统, 同时配有监测、记录 and 控制系统, 以保证施工质量。DCM 船施工管理系统主要由 GPS 定位系统、处理

机控制系统、制供浆控制系统、CCTV 监控系统、报警系统等组成。

施工管理系统主要由中央计算机收集深度发信器、吃水计发信器、旋转方向、电磁流量计、潮位计、注浆泵等设备的信号,经过计算,在工作界面显示钻头深度(m)、钻头速度(m/min)、吃水(m)、水位(m)、旋转速度(r/min)、旋转方向(正/反)、瞬间流量(L/min)、累计流量(L)、水泥比重等相关数据,可对注浆流量控制、水泥配比等一系列工作进行自动化控制,实现对船舶施工的信息化管理<sup>[7]</sup>。

随着自动化技术的日益发展,DCM 船舶的智能化程度得到了极大的提高。为降低劳动负荷,减少人员配置,保证施工精度,提高施工效率,DCM 船舶必将越来越智能化,目前中交一航局 DCM 船舶在地质状况良好的区域,已实现一键自动制桩。

### 3.3 功能多元化发展趋势

之前改造的 DCM 船未配备水泥舱、水泥输送装置、泥浆拌和机、泥浆搅拌器、泥浆泵等设备,只能进行单一的软基处理作业,需要另外配套制浆船、水泥运输船,而为香港机场改造的 DCM 船集储灰、制浆、拌合系统于一身,功能实现了多元化,能独立完成海上施工作业。

为满足更为苛刻的海上施工条件,提高作业效率,未来 DCM 船舶不论是改造还是新建,都需要具备更完善的功能,功能多元化的发展也必将成为趋势。

## 4 DCM 船舶的前景分析

### 4.1 市场前景分析

DCM 技术在日本已得到广泛应用,其中沿海区域是 DCM 技术应用的重点区域。在国内,由于水运行业的不断发展和环保要求的不断提高,必将推动 DCM 工法在软基基础施工领域的绽放。同时,国内水工工程建设市场总量较日本大得多,初步推算,DCM 工法平均加固土体量可达每年 3 000 万 m<sup>3</sup> 以上。截止 2019 年年底,香港机场第三跑道扩建工程、深中通道人工岛均采用了 DCM 技术进行海底软基处理,处理面积约 280 万 m<sup>2</sup>,平均处理深度约 30 m,处理方量约 8 400 万 m<sup>3</sup>,为 DCM 工法的推广应用提供了重大契机。

随着我国国民经济的快速发展、人民生活水平的不断提高,国内对海上环境污染控制严格的

区域、传统换填施工作业给海上养殖业带来严重影响的海域以及挖泥弃土难的区域,以 DCM 工法代替置换法施工已成为水工建设发展的趋势。同时采用 DCM 工法也可以有效解决防波堤、管道、涵洞等地基处理问题。

### 4.2 经济性分析

国外许多 DCM 船舶通过现有船舶进行改造,具有良好的经济性,现阶段国内起重船、打桩船、砂桩船等船舶闲置率较高,可借鉴国外经验进行相关改造。目前国内船厂任务不饱和,钢材价格相对较低,DCM 船无论是利用现有起重船、打桩船及挤密砂桩船进行改造,还是新建,成本费用都能得到良好的控制。

DCM 船舶的关键设备为处理机系统,核心技术为施工管理系统,日本经过多年的发展应用,具有成熟的设备和技术,但日本 DCM 管理协会对其进行了行业技术封锁,购置成本极高。目前国内陆用 DCM 处理机在借鉴日本技术的基础上得到了极大的发展,相关厂家也具有较高的技术研发能力,4 轴式处理机已装船使用,且已开发出自主的施工管理控制系统,打破了日本封锁,能够有效降低船舶建造及改造费用。

## 5 展望

从 1973 年到 2019 年 40 多年来,日本采用 DCM 技术加固土体得到了大量运用,1977 年到 1986 年是起步期 10 年,年均加固土体约 100 万 m<sup>3</sup>;1987 年到 1996 年是发展的 10 年,每年加固土体的工程量由 100 万 m<sup>3</sup> 上升到约 330 万 m<sup>3</sup>,增加了 230%;1996 年后进入稳定发展期,年均加固土体 300 多万 m<sup>3</sup>,其中 2003 年创出历史高点,当年加固土体的工程量为 395 万 m<sup>3</sup>。这些数据表明 DCM 技术在日本的应用规模较大,应用前景及发展趋势良好。

我国 DCM 技术在陆上使用已有 40 多年的历史,但在海上工程的应用极少,近年来,随着对海上工程环保、工后防沉降、防渗漏要求的不断提高,从业主、设计单位到施工单位对使用 DCM 船舶进行 DCM 施工的要求越来越强,再加上日本在高水平应用 DCM 工法方面的强烈示范作用,目前已逐步形成了应用 DCM 工法、使用 DCM 船舶的浓厚氛围,随着国内香港机场第三跑道扩建工程、深中通道等工程的大量应用,DCM 船舶应用已展现出非常光明的前景。

## 参考文献:

- [1] 海上施工中的深层搅拌法技术手册[M]. 东京:大光社印刷株式会社,2008.  
Technical manual of deep mixing method in offshore construction [M]. Tokyo: Big Light Agency Printing Co., Ltd., 2008.
- [2] JTJ/T 259—2004, 水下深层水泥搅拌法加固软土地基技术规程[S].  
JTJ/T 259—2004, Technical specification for offshore cement deep mixing technique to consolidate soft soils[S].
- [3] 董艳刚. 我国第一代深层水泥拌和(CDM)船[J]. 港口工程, 1993(1):1-5.  
DONG Yan-gang. First deep mixing barge(CDM) in China[J]. Harbour Engineering, 1993(1): 1-5.
- [4] 李孔哲. 海上深层水泥拌和船组的改造与技术引进[J]. 港口工程, 1994(4):23-29.  
LI Kong-zhe. Transformation and technology introduction of off-shore deep cement mixing ship group[J]. Harbour Engineering, 1994(4): 23-29.
- [5] 刘亚平. 海上 CDM 船施工中的几个技术问题[J]. 中国港湾建设, 2009(4):42-45.  
LIU Ya-ping. Technical problems for the construction of maritime CDM method[J]. China Harbour Engineering, 2009(4): 42-45.
- [6] 冯波, 缪袁泉, 陶润礼, 等. 双处理机海上深层搅拌(DCM)船施工控制技术[J]. 中国港湾建设, 2018, 38(12):55-58.  
FENG Bo, MIAO Yuan-quan, TAO Run-li, et al. Control technology of offshore deep cement mixing (DCM) ships with dual-processors [J]. China Harbour Engineering, 2018, 38(12): 55-58.
- [7] 卢普伟, 吴晓峰, 洗嘉和, 等. 深层水泥搅拌船自动化控制系统开发[J]. 中国港湾建设, 2019, 39(12):25-30.  
LU Pu-wei, WU Xiao-feng, XIAN Jia-he, et al. Development of automatic control system for deep cement mixing (DCM) ship[J]. China Harbour Engineering, 2019, 39(12): 25-30.
- of irregular deep foundation pit[J]. China Harbour Engineering, 2017, 37(9): 11-15.
- [2] 孙文怀, 裴成玉, 邵旭. 圆形基坑地连墙支护结构监测分析[J]. 中国港湾建设, 2007, 27(1):11-14.  
SUN Wen-huai, PEI Cheng-yu, SHAO Xu. Monitoring and analysis of retaining structure of circular foundation pit[J]. China Harbour Engineering, 2007, 27(1): 11-14.
- [3] 罗耀武, 凌道盛, 陈云敏, 等. 环形超深基坑围护结构受力变形特性分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(2):617-622.  
LUO Yao-wu, LING Dao-sheng, CHEN Yun-min, et al. Mechanical and deformation characteristics of enclosure structure for annular extra-deep excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 617-622.
- [4] 尹骥, 管飞, 李象范. 直径 210 m 超大圆环支撑基坑设计分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(S1):1 596-1 599.  
YIN Ji, GUAN Fei, LI Xiang-fan. Design and analysis of a 210 m-diameter circular strutted foundation pit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(S1): 1 596-1 599.
- [5] 王为, 唐忠德. 基坑工程圆环支撑优越性及其问题分析[J]. 上海地质, 2000(4):30-33.  
WANG Wei, TANG Zhong-de. An analysis of the advantages and disadvantages of arch brace in excavation[J]. Shanghai Geology, 2000(4): 30-33.
- [6] 赵升峰, 范钦建. 超大混凝土圆环内支撑在深基坑工程中的应用[J]. 岩土工程技术, 2013, 27(1):17-20, 28.  
ZHAO Sheng-feng, FAN Qin-jian. Application of super-large ring concrete bracing system in deep foundation pit engineering [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2013, 27(1): 17-20, 28.
- [7] 李象范, 尹骥, 刘有才, 等. 超大深基坑钢筋混凝土圆环桁架内支撑设计[J]. 施工技术, 2006, 35(6): 69-72.  
LI Xiang-fan, YIN Ji, LIU You-cai, et al. Design of internal support of reinforcement loop truss in super-large deep foundation pit [J]. Construction Technology, 2006, 35(6): 69-72.
- [8] 张戈, 毛海和. 软土地区深基坑围护结构综合刚度研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(5): 1 467-1 474.  
ZHANG Ge, MAO Hai-he. A new system stiffness of retaining structure of deep foundation pit in soft soil area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(5): 1 467-1 474.
- [9] 何世秀, 韩高升, 庄心善, 等. 基坑开挖卸荷土体变形的试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(1): 17-20.  
HE Shi-xiu, HAN Gao-sheng, ZHUANG Xin-shan, et al. Experimental researches on unloading deformation of clay in excavation of foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(1): 17-20.
- [10] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.  
LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation engineering manual [M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [11] 龚晓南. 深基坑工程设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.  
GONG Xiao-nan. Design and construction manual of deep foundation pit[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1998.

(上接第 18 页)