

深层搅拌船施工管理系统在施工中的应用

高光辉，张连昊^{*}

(中交天和机械设备制造有限公司，江苏 常熟 215500)

摘要：通过深层水泥拌和法进行的海底地基改良的效果和沉桩质量有很大关系，沉桩质量不仅和水泥配比、水泥注入量的调节有关系，还与成桩的垂直度有很大的关系，而这些都需通过施工管理系统控制解决。深层搅拌船施工管理系统是一个高度集成的控制系统，能监测与控制整个施工过程，实现各个分系统之间的数据共享、功能集成、联动控制等功能。针对海上使用DCM工法进行深层搅拌船的研制工作，利用施工管理系统设置的各项参数及施工流程，满足了海底软基加固的要求，达到了所需强度，整个施工管理系统设计符合施工设计要求。

关键词：深层水泥拌和法；深层搅拌船；施工管理系统；强度

中图分类号：U662.9 文献标志码：B 文章编号：2095-7874(2018)06-0070-04

doi:10.7640/zggwjs201806016

Application of construction management system for deep mixing ship in construction

GAO Guang-hui, ZHANG Lian-hao^{*}

(CCCC Tianhe Mechanical Equipment Manufacturing Co., Ltd., Changshu, Jiangsu 215500, China)

Abstract: The improved effect of submarine foundation by cement deep mixing method is closely related to the quality of sinking pile. The quality of sinking pile is related to the cement injection rate and proportioning, also has a great relationship with the verticality of the pile, and all of these factors can be solved through the control of construction management system. The construction management system of deep mixing ship is a highly integrated control system, can monitor and control the whole construction process, achieving the data sharing, functional integration, coordinated control among every subsystem. We developed the research of deep mixing boat by DCM method, set up every parameter and construction process by the construction management system, which has met the need of reinforcing subsea soft foundation, and reached the objective strength. The whole design of construction management system meets the requirements of the construction design.

Key words: deep cement mixing method; deep mixing ship; construction management system; strength

0 引言

随着港口建设规模的扩大，软土地基处理成为工程中经常遇到的重大技术课题。过去，对较厚的软土地基经常采用桩基结构，当软土土层较薄时则常采用置换法，即“大挖大填”。但是当软土土层“不薄不厚”时，若采用桩基则桩基入土深度

不够；采用置换法，则往往因软土层太厚致使工程造价倍增。针对这类地基，近年来，重点探索了排水砂井加荷固结法和深层水泥拌和加固法^[1]，有效地解决了这一难题。深层水泥拌和法^[2](DCM工法—Deep Cement Mixing Method)施工方法是通过处理机自身重力不断向下搅拌，当触及到地基强度高的地层后，继续下钻一定深度，确保地基稳固后处理机开始提升回一定高度，再次下降至桩端，同时从下部喷浆口不断喷出按一定配比搅拌好的水泥浆，通过搅拌翼的搅拌和海底砂土混合

收稿日期：2018-04-03

作者简介：高光辉（1968—），男，天津市人，高级工程师，总经理，
海洋工程专业。

*通讯作者：张连昊，E-mail：zhanglh@cccceth.net

均匀, 到达桩端后再次提升, 同时上部喷浆口喷浆, 形成一个个的加固桩, 不断循环往复施工可以形成海底连续墙及海底加固桩等加固地基。海底地基改良的效果和沉桩质量有很大关系, 沉桩质量不仅和水泥配比、水泥注入量的调节有关系, 还和搅拌翼的搅拌次数以及成桩的垂直度有很大关系, 而这些都通过施工管理系统控制解决。

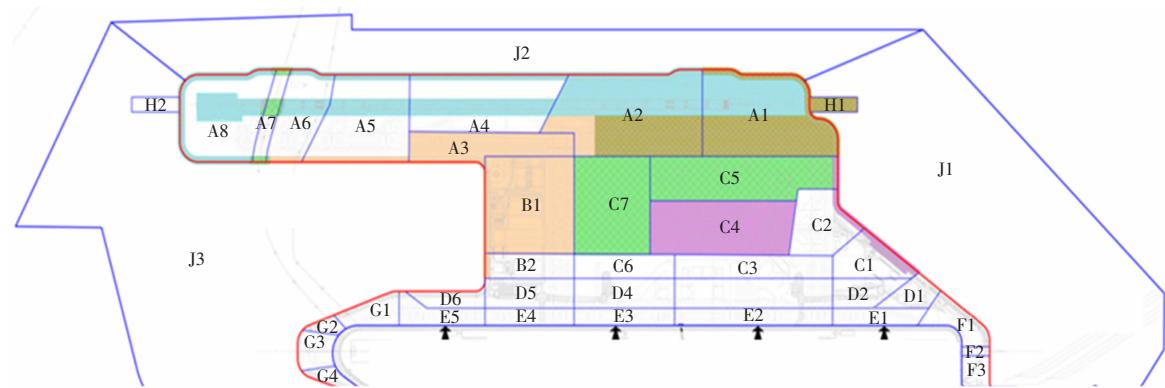


图 1 香港国际机场三跑道改造工程图

Fig. 1 Renovation project of the three runway at Hongkong International Airport

DCM 技术在香港地区处理深海软基尚属首次。香港第三跑道项目中海床普遍存在成分复杂的污染质淤泥, 为了更好地达到处理效果, 研发了国内首艘重型双处理机深层搅拌船^[3], 如图 2, 并根据施工技术要求开发研制了整套全自动施工管理系统。



图 2 重型双处理机深层搅拌船

Fig. 2 Deep mixing ship with heavy double rigs

2 施工参数曲线设计

首先根据施工要求的水泥配合比, 如表 1 所示(以下施工参数计算均以 1 000 kPa 强度, W/C=0.9 为例), 以及设备能力如表 2 所示, 计算施工各个阶段满足要求的升降速度、处理机旋转速度以及喷浆量。

1 设计背景

2016 年 8 月 1 日启动香港国际机场三跑道系统建造工程, 工程区域图如图 1 所示。预计三跑道系统工程需时 8 a, 新跑道将于 2022 年启用, 而整项建造工程将于 2024 年完成。为保护环境, 三跑道系统项目将使用深层水泥拌合法等免挖方法拓地。

表 1 不同成桩强度的水泥掺量

Table 1 Cement content for different pile strength

不同地质水泥强度/ kPa	不同地层水泥掺量/(kg·m ⁻³)	
	软土层	持力层
800	210	240
1 000	240	240
1 200	240	240
1 400	260	260

表 2 设备能力

Table 2 Equipment capability

设备名称	工作能力	备注
水泥搅拌罐 $q_{单}/m^3$	2.5	
注浆泵 $Q/(L\cdot min^{-1})$	350	上下喷浆口各 4 个
处理机升降速度 $V/(m\cdot min^{-1})$	0~2.4	
搅拌翼旋转速度 $v/(r\cdot min^{-1})$	0~60	
搅拌翼叶片数 $n/片$	6	

为了满足如表 1 所示每米喷浆量要求, 且达到良好的搅拌效果, 每米的搅拌次数需在 900 次以上。由于搅拌翼最大转速为 60 r/min, 为保护设备且达到最大工作能力, 施工时旋转速度保持在 50 r/min。4 台注浆泵总流量 $Q_{总}=Q\times 4=350\times 4=1 400 L/min$; 为保证泵能力有余量, 喷浆总流量控制在 1 000 L/min 以下, 避免长期使用泵磨损后

流量降低，影响正常施工。

2.1 下喷浆口喷浆阶段验证计算

假定处理机下喷浆下降速度 $V_{\text{下}} = 0.7 \text{ m/min}$ ；根据表 1，持力层以下和软土层水泥每米水泥掺量均为 $C=240 \text{ kg/m}^3$ ，水灰比为 0.9；处理面积 $S=4.6277 \text{ m}^2$ （设备处理能力，固定值），水泥比重 $\rho_{\text{水泥}}=3.15 \text{ g/cm}^3$ ，海水比重 $\rho_{\text{海水}}=1.025 \text{ g/cm}^3$ 。

$$Q_{\text{C下}} = \frac{C \times V_{\text{下}} \times S}{\rho_{\text{水泥}}} + \frac{C \times 0.9 \times V_{\text{下}} \times S}{\rho_{\text{海水}}} = 929.5 \text{ L/min}$$

下喷浆口喷浆流量 $929.5 \text{ L/min} < 1000 \text{ L/min}$ ，满足泵使用要求。

搅拌站制浆能力为：

$$q_{\text{总}} = \frac{q_{\text{单}} \times 2}{t} = \frac{2.5 \times 2}{2.5} = 2000 \text{ L/min} > 929.5 \text{ L/min}$$

综上所述，下降喷浆过程下降速度设定为 0.7

m/min ，喷浆量为 929.5 L/min ，满足施工要求及设备能力。

2.2 上喷浆口喷浆阶段验证计算

由于上喷浆口喷浆时搅拌次数限制，所以提升速度计算如下：

$$V_{\text{上}} < \frac{v \times n}{900} = \frac{50 \times 6}{900} \approx 0.3333 \text{ m/min}$$

提升速度设定为 0.33 m/min ，所以：

$$Q_{\text{C上}} = \frac{C \times V_{\text{上}} \times S}{\rho_{\text{水泥}}} + \frac{C \times 0.9 \times V_{\text{上}} \times S}{\rho_{\text{海水}}} = 438.2 \text{ L/min}$$

且 $q_{\text{总}} > Q_{\text{C上}}$ ，综上计算，上升喷浆过程提升速度 0.33 m/min ，喷浆量 438.2 L/min ，满足施工要求及设备能力。

根据以上计算，设计施工曲线如图 3 所示。

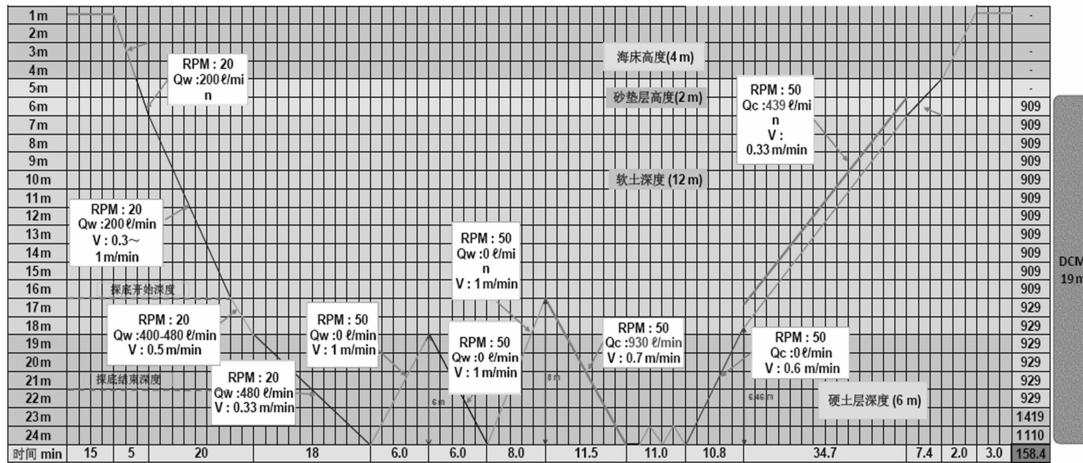


图 3 施工设计曲线

Fig. 3 Design curve of construction

3 施工管理系统简介

3.1 参数设定

根据不同施工桩位深度及水泥掺量要求设计不同施工曲线，在控制台上位机中设置施工相关参数，以适应各种不同工况。

3.2 船舶调倾定位

各参数设置完成后，当船舶横纵倾大于 0.08° 时，利用自动调倾系统，将船舶横纵倾自动调整到 0.03° 倾斜范围内，在处理机下钻过程到达泥面以下之前，自动调倾系统一直处于内循环状态，当船舶倾斜大于 0.08° 后，调倾系统自动工作，使船舶横纵倾调整到 0.03° ，确保处理机钻入泥面前船舶始终处于平浮状态；调倾结束后进行自动移船定位，当船舶距离目标桩位 10 m ，角度在 $\pm 10^\circ$

范围内时，启动自动移船，使船的定位精度控制在 $\pm 0.1 \text{ m}$ ，角度在 $\pm 0.2^\circ$ 以内，以上两个系统均能够采用一键自动模式，全自动完成调倾及移船定位^[4]控制。高质量的定位精度及垂直度，使施工质量得以保证，更好的满足施工要求。

3.3 施工控制系统

整个施工控制系统，对设备状态、施工数据进行显示，根据不同的施工阶段对应相应语音播报提醒，并且对相应故障报警进行实时提醒。

整个施工过程可根据地质情况不同，可采用手动和自动两种模式，手动控制模式，即根据施工设计曲线及控制界面参考数据操作相关设备，进行手动操作打桩；自动控制模式^[5]，根据设置的相关数据，实现一键全自动打桩。

图4 为施工管理系统流程图。

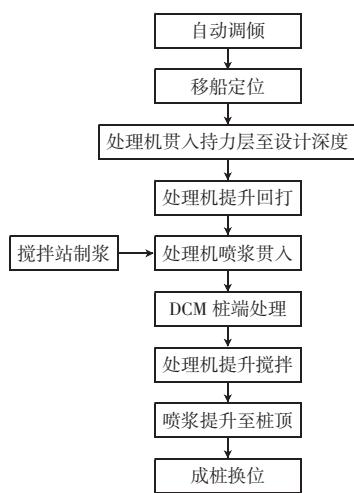


图4 施工管理系统流程图

Fig. 4 Flow chart of construction management system

4 施工结果展示与分析

4.1 施工实时数据显示

通过施工管理系统, 施工过程中能实时显示定位状态、施工桩位以及施工相关主要数据的反馈曲线, 直观的三维实时显示^[6]功能, 能反映已完成桩部分与未完成桩部分, 并且在施工过程中能实时显示处理机下放动态。

4.2 施工曲线报表

施工完成后, 服务器自动记录各项施工数据, 施工曲线报表自动生成, 直观全面的记录整根桩在打桩过程中各个系统反馈的实时数据, 更直接的判断成桩质量, 曲线报表如图5所示。

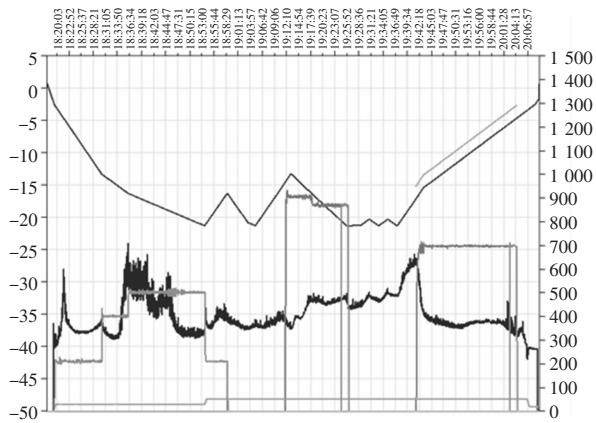


图5 施工报表

Fig. 5 The report of construction

4.3 加固效果

通过测试28 d龄期的抗压强度, 经统计分析^[7], 强度值95%分布在2~4 MPa之间, 满足设计要求。从取芯结果看, 整根桩芯样连续, 自上而下水泥浆搅拌均匀。

5 结语

结合数据曲线报表以及取芯结果, 通过施工管理系统设置的各项参数及施工流程满足海底软基加固的要求, 达到了所需的强度, 整个施工管理系统设计符合施工设计要求, 移船定位精度满足±0.1 m的要求, 完成的深层水泥搅拌桩, 成桩强度高, 可满足香港机场第三跑道的承载要求。

参考文献:

- [1] 彭瑞. 水泥深层搅拌技术的发展现状及展望[J]. 中国港湾建设, 2009(2):77-82.
PENG Rui. Status quo and trends of CDM technology[J]. China Harbour Engineering, 2009(2): 77-82.
- [2] 沿岸技术研究中心. 海上施工中的深层搅拌法[M]. 修订版. 2008.
Coastal Technical Research Center. Deep mixing method in the construction of sea[M]. Revised ed. 2008.
- [3] 周骏, 张新. 重型双处理机深层搅拌船[J]. 工程机械, 2017, 48(10):6-12.
ZHOU Jun, ZHANG Xin. Deep mixing ship with heavy double rigs [J]. Construction Machinery and Equipment, 2017, 48 (10): 6-12.
- [4] 吴德渊. 海上深层水泥拌和船自动定位测距与跟踪的研制与开放[J]. 港口工程, 1994(2):16-22.
WU De-yuan. Development and opening of automatic positioning and tracking of deep sea cement mixing ship[J]. Harbour Engineering, 1994(2): 16-22.
- [5] 中交疏浚技术装备国家工程研究中心有限公司. 把吸挖泥船浅水抛泥自动控制系统: 中国, ZL201520437070.3[P]. 2015.
CCCC National Engineering Research Center of Dredging Technology and Equipment Co.,Ltd. Automatic control system of shallow water throwing mud for the trailing suction hopper dredger: China, ZL 2015 2 0437070.3[P]. 2015.
- [6] 中交疏浚技术装备国家工程研究中心有限公司. 绞吸挖泥船施工位置水下3D地形的制作系统: 中国, ZL201520250240.7[P]. 2015.
CCCC National Engineering Research Center of Dredging Technology and Equipment Co.,Ltd. Underwater 3D terrain making system for the construction position of the cutter suction dredger: China, ZL 2015 2 0250240.7[P]. 2015.
- [7] PORBAHA A. State of the art in quality assessment of deep mixing technology[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Ground Improvement, 2002, 6(3): 95-120.