

陆上四轴深层水泥搅拌桩机研制及 施工关键技术

郑少河, 陈 越, 周小科

(上海强劲地基工程股份有限公司, 上海 201806)

摘 要: 基于围海填地陆上深层水泥搅拌桩的工程实践, 本文对陆上四轴 DCM 桩的施工设备和施工关键技术进行了系统研究和总结。以香港机场第三跑道填海工程为依托, 对陆上四轴 DCM 桩机的动力头、钻杆和钻头等进行改进, 开发了 DCM 智能施工控制系统。结合海上四轴 DCM 桩的施工经验, 对复杂地质条件下的水泥掺量、叶片切割次数、“一喷一搅”施工工艺、桩底标高的确定、障碍物桩认定标准等成套施工关键技术进行了研究, 其中根据设计桩长和油压值大小确定桩底标高的双指标控制方法, 很好解决了地层起伏造成的 DCM 桩长不够的情况。文中对成桩后的验收标准进行了介绍, 并对成桩质量进行了分析, 指出桩底、桩顶和软硬地层交界面是薄弱部位, 并提出改进意见。实践证明, 上述设备和施工工艺可有效提高围海填地的地基加固效果, 提高成桩质量及施工工效, 可为类似工程提供借鉴和技术参考。

关键词: 四轴深层水泥搅拌桩; 动力头; 智能施工控制系统; 水泥掺量; 叶片切割次数; “W” 施工曲线
中图分类号: TU73 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7195(2023)03-0238-10

Development of land four-shaft deep cement mixing rig and key construction technology

ZHENG Shao-he, CHEN Yue, ZHOU Xiao-ke

(Shanghai Qiangjin Foundation Engineering Co., Ltd., Shanghai 201806, China)

Abstract: Based on the engineering practice of land deep cement mixing (DCM) piles of land reclamation, the construction equipment and key construction technologies of land four-shaft DCM piles were systematically studied and summarized in this work. Relying on the reclamation project of the third runway of Hong Kong Airport, the dynamic head, drilling rod and bit of the land four-shaft DCM pile driver have been improved, and the DCM intelligent construction control system has been developed. Combined with the construction experience of marine DCM piles, the relevant key technologies for complete construction were studied, including the cement dosage, blade cutting number, ‘one jet grouting and one mixing’ construction technology, determination of toe level, and identification standard of obstruction DCM cluster under complex geological conditions. Among them, the double index control method of determining DCM toe level according to the design pile length and oil pressure value can well solve the problem that DCM pile length is not enough due to stratum fluctuation. The acceptance criteria of DCM piles is introduced and the quality is also analyzed. It is pointed out that the pile bottom, pile top and the interface between soft and hard strata are weak areas, and suggestions for improvement are put forward. Practice has proved that the above equipment and construction technologies can effectively improve the foundation reinforcement effect of reclaimed land, improve the pile quality and construction efficiency, and provide technical reference for similar projects.

Key words: land four-shaft deep cement mixing; dynamic head; intelligent construction control system for DCM construction; cement dosage; blade rotation number; ‘W’ construction curve

收稿日期: 2022-05-09

作者简介: 郑少河 (1972—), 男, 河北唐山人, 博士, 高级工程师, 国家注册土木工程师 (岩土), 主要从事软土地基处理领域的设计与施工工作。E-mail: geo_design@126.com。

0 引言

深层水泥搅拌桩技术(Deep Cement Mixing)简称 DCM 技术,是一种通过专业设备将水泥等固化材料与地基土原位强制搅拌混合,利用化学固结作用在地基中形成坚固桩体的地基处理技术^[1]。由于其具有强度高、结构物不易沉降、弃土少、对周围环境影响少等优点而被广泛应用。

在港口建设、海上机场和人工岛屿等围海造地的地基处理工程中,四轴 DCM 技术较早应用于海上施工。日本学者 KITAZUME 等^[2]对设计、施工、检测等方面进行了综合介绍,但对具体施工过程与关键技术缺乏深入分析。刘亚平^[3]对水泥土配合比、地基隆起、桩端硬土层施工工艺、冷缝处理等几个技术问题进行了分析。徐超等^[4]、贺迎喜等^[5]通过室内配合比试验研究水泥土强度影响因素,并对比现场工艺试桩桩体检测结果。刘志军等^[6]针对香港机场项目海上 DCM 施工技术进行了研究。夏可强等^[7]对海上四轴 DCM 桩的钻头结构及施工工艺进行了分析总结。此外,不少学者在海上 DCM 复合地基承载特性、破坏机理、水泥土强度增长机理、试验检测等方面开展研究^[8-10]。

目前关于四轴 DCM 技术的研究主要集中在海上施工,由于陆上四轴 DCM 施工与海上施工在施工环境、设备要求、施工工艺等方面有很大区别,但针对陆上四轴 DCM 施工的研究相对较少,因此基于海上四轴 DCM 技术在香港机场第三跑道项目和香港综合废物处理设施项目成功应用的经验,香港机场三跑项目陆域形成后,通过对施工设备、施

工工艺以及相关检测手段等方面进行系统改造与研发,在后期地基处理中采用陆上四轴 DCM 技术。

本文以香港机场第三跑道填海工程 3206 标段为例,介绍了陆上四轴 DCM 技术在复杂地质条件下的应用,并对其施工关键技术进行总结分析。

1 工程概况

香港国际机场第三跑道位于香港现有机场北侧,香港口岸人工岛项目西北侧^[11]。第三跑道填海项目填海面积约 650 万 m²,回填工程量约 9 500 m³。主要工作内容包括陆域形成、陆域外侧海堤修筑以及地基处理等。地基处理工程主要包括水上塑料排水板、水上深层水泥搅拌桩、陆上深层水泥搅拌桩、高压旋喷桩和振冲密实等工艺,其中陆上 DCM 桩累计约 64 500 根,合计方量约 485 万 m³。

施工区域原始海床面标高为-7.1~-3.5 mPD,按设计要求在海床上铺设厚 2.0 m 砂垫层后,上覆吹填砂或回填公共填料至+3.0 mPD,作为施工作业面。陆上四轴 DCM 桩为正方形布置,间距 4.8 m,最深入土深度 35 m,有效桩长 15~28 m。

陆上 DCM 桩分布在跑道区、航站楼及南部功能区等大部分陆域形成区域,主要加固对象为海相沉积淤泥层(MD 层),其物理力学参数见表 1。部分加固区域为污染泥料弃置坑(CMP),组成成分极为复杂。上覆填料为吹填砂和公共填料。

吹填施工作业以及公共填料的复杂成分,造成部分施工区域地下有废旧轮胎、钢丝绳、块石等障碍物,尤其是污染泥料弃置坑(CMP)区域,地下障碍物众多,对 DCM 桩施工安全和施工质量造成严重影响。

表 1 海相淤泥的物理力学特性

Table 1 Physical and mechanical properties of marine deposit

项目	土颗粒级配/%				液限 ω_L /%	塑限 ω_P /%	天然含水量 w /%	孔隙比 e	干密度 ρ_d /(g·cm ⁻³)
	砾石	砂粒	粉粒	黏粒					
最小值	0	2	18	21	49	32	46	1.26	0.86
最大值	18	26	68	56	63	43	93	2.94	1.35
平均值	3	15	43	38	57	36	65	2.34	1.12

2 陆上四轴 DCM 桩机

陆上四轴 DCM 桩机主要包括动力头、钻杆钻头、桩架以及智能施工控制系统四部分组成。4 根钻杆正方形布置,单轴搅拌叶片直径为 1 300 mm,搭接 300 mm,主要加固型式为单桩或桩墙型式,见图 1。

2.1 DCM 动力头

四轴 DCM 动力头配置 4 台独立电机,根据地质情况及桩长不同,每个动力头配置的电机功率不等。以配置 4×132 kW 电机的动力头为例,技术参数见表 2。

2.2 钻杆与钻头

每组动力头配有 1 根中心杆和 4 根钻杆,如图

2所示。

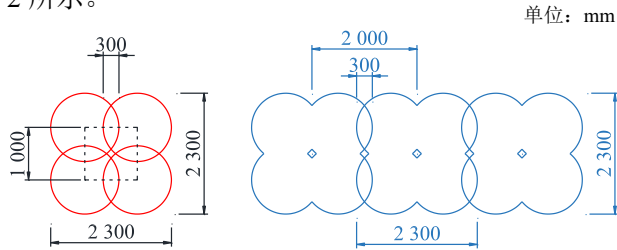


图1 四轴DCM典型平面布置图
Fig. 1 Typical layout of land DCM

表2 动力头技术参数

Table 2 Technological parameters of dynamic head

轴数	直径/mm	轴间距/mm	电机功率/kw	单轴扭矩/(kN·m)	转速/(r·min ⁻¹)	重量/t
4	4× Φ1 300	1 000	4× 132	61.5	0~45	32



图2 四轴动力头

Fig. 2 Dynamic head of four-shaft DCM plant

在中心杆和钻杆上合计设有8个喷浆口。中心杆底部设置4个上喷浆口，每根钻杆底部有设置下喷浆口，共计4个下喷浆口。钻杆上提时上喷浆口喷浆或喷水，下钻时下喷浆口喷浆加固土体，如图3所示。喷浆口直径为65 mm，上下喷浆口间距为3.6 m。喷浆口制作成单向阀进行封闭处理，单向阀由钢压板、加衬板、橡胶板组成。为适用于不同土质下喷浆控制和负压保护，可采用对开式或整体式单向阀结构。

钻杆规格为 $\Phi 299 \times 30$ mm，钻杆心对心间距为1.0 m。单个钻头长3 600 mm，叶片直径1 300 mm。钻杆和钻头材质均为16 Mn。搅拌叶片15片，中心杆规格为 $\Phi 406 \times 25$ mm。钻杆长度依据施工桩长拼接确定。按40 m钻杆长度计算，钻杆和中心杆总重约62 t。

2.3 桩架

海上DCM桩施工，动力头挂在固定于A字架的钢结构桁架上。陆上DCM桩施工参考了目前常用的桩架。根据设计桩长不同，主要采用步履式和履带式

2种桩架。步履式桩架采用JB180、JB220和JB280这3种型号，见图4。履带式桩架主要采用DH758-170M、DH768-170M、DH868-230M等型号，履带式桩架通常带钢板行走。桩架高度根据设计桩长确定。

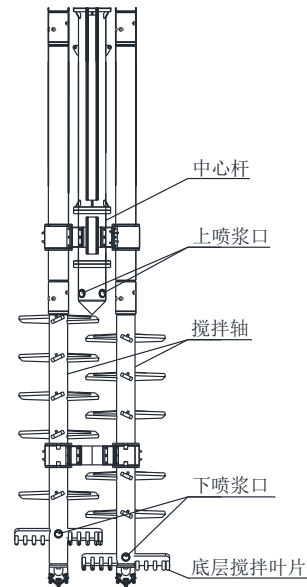


图3 带上下喷浆口的4轴钻头

Fig. 3 Four-shaft drill bit with upper and lower slurry nozzle



图4 步履式陆上四轴DCM桩机

Fig. 4 Land four-shaft DCM plant with walker pilling frame

2.4 陆上DCM智能施工控制系统

DCM桩施工是通过“DCM智能施工控制系统”来实施的。该系统有施工控制、信号数据采集、数据分析汇总及备份、施工管理等各种功能。在DCM成桩过程中，可实时监测和显示的内容如下：

- (1) DCM桩的编号；
- (2) 桩的设计顶标高、设计底标高和实时钻进标高；
- (3) 桩的设计坐标、实际坐标；
- (4) 钻进和提升时，钻头的旋转速度，rev/min；
- (5) 钻头的钻进和提升速率，m/min；
- (6) 单根实时注浆速率，L/min；
- (7) 单根实时总注浆量，m³；

- (8) 动力头电机运行的电流值, A;
- (9) 钻头正反转状态显示;
- (10) 注水/注浆喷浆口状态显示。

3 陆上四轴 DCM 施工关键技术

3.1 水泥掺量确定

大面积施工的水泥掺量和水灰比是通过室内试验和现场试桩确定的。施工前现场取土样进行室内试验, 确定初步掺量和水灰比。在此基础上进行现场试桩, 取芯复核无侧限抗压强度 UCS 是否满足设计要求, 最后确定大面积施工时的技术参数^[5]。

(1) 室内试验方法

室内试样的制作对确定合适的水泥掺量和水灰比非常重要, 其中试样搅拌的均匀性和制作的密实性是核心步骤, 见图 5。实践表明, 高度 10 cm、直径 5 cm 的试样, 制成后的比重控制在 1.60±0.01 标准是合适的。

确定搅拌桩水泥掺量的室内试验具体步骤如下:

- a) 检测土样含水量;
- b) 根据设计配合比, 称量海水、土样、水泥;
- c) 将海水与水泥混合 5 min, 制备水泥浆;
- d) 将制备的水泥浆倒入按设计确定的一定重量的土样中, 机械搅拌 5 min, 然后根据土壤条件手动搅拌 5~12 min, 并进一步机械搅拌 5 min;
- e) 将制备好的水泥土样放入 EP 模具中, 并将 EP 模具固定在振动台上;
- f) 水泥土样分 3 层放入 EP 模具中, 每层振动 100 次, 总共振动 300 次;
- g) 制备完成后, 在模具中分别称量每个试样, 试样与所有试样的平均重量不应相差±0.02 g/cm³;
- h) 密封试样以防止水分损失, 并将试样放入温度在 20°~50°之间、相对湿度至少为 95% 的环境室内;
- i) 养护 28 d 后进行无侧限抗压强度试验, 以确定满足设计强度的水泥掺量和水灰比组合。

(2) 现场试桩

根据室内试验结果进行现场试桩试验, 验证大面积施工的水泥掺量和水灰比。香港机场三跑填海项目陆上 DCM 桩施工使用了普通硅酸盐水泥 (OPC) 和矿粉水泥 (PBFC) 两类固化剂, 其中矿粉水泥配比为 52.5 水泥:S95 矿粉=58:42, 水灰比采用 0.9~1.0, 水泥品牌以海螺和华润为主。综合地基处理效果及材料费用, 矿粉水泥比 OPC 水泥在性价比上更具优势。

各施工区域的强度要求不同, 地质情况也有差

异, 所采用的水泥掺量汇总见表 3 和表 4。



(a) 水泥土搅拌



(b) 振动台

图 5 水泥土搅拌与试块制作

Fig. 5 Soil-cement mixing and sample making

表 3 普通硅酸盐水泥 (OPC) 掺量汇总

Table 3 Cement dosage using OPC

施工区域	水泥规格	UCS/MPa	水泥掺量/(kg·m ⁻³)
A 区	CEMI52.5	1.4	260
C4/C5/C7 区	CEMI52.5	1.2	260
PMI062	CEMI52.5	1.2/1.4	260

表 4 矿粉水泥 (PBFC) 掺量汇总

Table 4 Cement dosage using PBFC

施工区域	水泥规格	UCS/MPa	水泥掺量/(kg·m ⁻³)
A 区	CEMIII52.5L	1.4	220
C4/C5/C7 区	CEMIII52.5L	1.2	180 (桩顶标高以下 1.0 m 范围内的水泥掺量是 200 kg/m ³)
PMI062	CEMIII52.5L	1.4	220

3.2 叶片切割次数

影响 DCM 桩施工质量的关键参数除了被加固土体性质、固化剂种类与掺量、水灰比等工艺参数外, 被加固土体的搅拌均匀程度尤为重要。而搅拌的均匀程度可以通过每米土体切割搅拌次数 BRN (Blade Rotation Number) 定量表达。BRN 是一个综合性的工艺参数, 体现了处理机贯入速度、提升

速度、搅拌轴转速的相关关系,是陆上 DCM 施工的一项重要控制指标。

依据欧洲标准 EN14679:2005 对 BRN (叶片切割次数)的定义,DCM 施工时叶片切割次数为“钻杆竖向运动 1.0 m 内(包含下钻+提升),所有达到桩直径大小的叶片对土体切割的总次数”,BRN 计算公式为:

$$BRN = \sum M_B \left(\frac{N_d}{V_d} + \frac{N_u}{V_u} \right) \quad (1)$$

式中:BRN 为叶片切割次数, r/m; $\sum M_B$ 为钻头上总的叶片个数; N_d 为钻头在下钻过程中的转速, r/m; V_d 为钻头下钻速度, m/min; N_u 为钻头在上提过程中的转速, r/min; V_u 为钻头上提速度, m/min。

香港机场三跑填海项目陆上 DCM 的叶片切割次数(BRN)标准为每米叶片切割次数(BRN)不小于 450 次,桩上部及下部各 8.0 m 范围不小于 900 次;桩长小于 8.0 m 的桩体,全桩切割次数不小于 900 次。由于采用下钻不喷浆提升喷浆的施工工艺,所以 BRN 只计入了喷浆阶段及其后的切割搅拌次数。

工程设计中通常会给定 BRN 最小值。要想提高切割次数,在保持水泥掺量不变的前提下,可将施工工艺调整为下钻与提升过程中均喷浆的方式,被加固土体存在两次浆后搅拌的机会,水泥石拌合应更为均匀。但实施下来后发现,下钻喷浆时,浆液外溢情况严重,间接造成水泥掺量不足,强度难以得到保证。因此现场通常采用上提喷浆,保持提升速度不变,提高钻杆转速,或者保持转速不变,降低提升速度的方法提高被加固土体的切割次数。

合理确定 BRN 是在保证施工质量的前提下,尽量提高施工效率。在正式施工前,需要进行现场试桩,建立设备及工艺参数与地层之间的关系,分析不同地质情况下动力头扭矩、转速、下钻提升速度、喷浆速率等参数的合理范围,进而确定适用的 BRN 取值区间。

3.3 “一喷一搅”施工工艺

与两轴或三轴深层水泥搅拌桩“几喷几搅”的施工工艺相比,四轴 DCM 桩机具有上下喷浆口喷浆、钻杆正方形布置及多叶片设计的特点,所以陆上四轴 DCM 桩采用“一喷一搅”施工工艺,其施工曲线简称为“W”曲线。

“W”施工曲线各段参数主要取决于地质条件、设计水泥掺量、上下喷浆口位置、喷浆速度以及 BRN 等因素。

下钻过程:整个下钻过程不喷浆,不计切割次

数,以加快施工工效为原则,越快越好。根据地质情况不同,适当喷水或加气以加快下钻进度。在吹填砂层中,喷水下钻,速度为 0.2~1.0 m/min,转速为 15~25 rpm;在淤泥层,不喷水,下钻速度 ≥ 1.0 m/min,转速为 15~25 rpm;在硬土层,喷水下钻,速度为 0.2~1.0 m/min,转速为 20~25 rpm。

需要指出的是,土体总含水量对 DCM 桩体强度影响很大,总含水量为水泥土中总含水量与干土质量的比值。总含水量包括土体自身含水量、钻杆喷水量和水泥浆液中的含水量。随着总含水量增大,水泥石强度先增大后减小;当总含水量接近土样液限时水泥石强度最大,搅拌加固效果最好^[10]。因此在 DCM 施工中,基于被加固土层物理性质,以及既定的水泥掺量与水灰比,可确定下贯过程中的合理喷水量,从而使加固效果最佳。

桩底复搅:桩底复搅最重要的过程是钻头至桩底标高后提钻,同时下喷浆口喷浆,提钻高度为上下喷浆口间距(3.6 m)加搭接长度 0.2~0.5 m,然后再下钻至桩底标高,同时保持下喷浆口喷浆。这一过程前后增加的多个小“W”的主要目的是排除浆管内的水,以及保证桩底附近的搅拌次数 BRN 满足设计要求。

提钻过程:完成桩底复搅后,打开上喷浆口喷浆,开始提钻成桩。提钻速度、转速及喷浆速率,以满足切割次数 BRN 及设计喷浆量为原则。

图 6 为采用 OPC 水泥掺量 260 kg/m³,水灰比 1:1,强度要求 1.2 MPa 的“W”施工曲线。实践表明,采用“一喷一搅”施工工艺,以桩长 25 m 的四轴 DCM 为例,单根完成时间约 100 min 左右。

3.4 桩底标高的确定

香港机场三跑填海项目在原海床面上回填 2.0 m 砂垫层,陆上 DCM 桩顶标高以进入砂垫层 1.0 m 为准,而桩底标高的确定则采用双指标控制,一是设计桩长,二是进入硬土层时的电机电流值。

(1) 设计桩长的确定

桩顶标高以进入砂垫层 1.0 m 为设计标准。桩底标高是基于 CPT 数据,以 $Q_{net} \geq 1.0$ MPa 为标准定义硬土层顶,绘制硬土层(CS 层)顶标高云图,根据设计要求确定进入硬土层的嵌入深度 2.0 m 或局部区域 1.0 m 来计算设计桩长。

(2) 试插电流

试插不同于传统工程中的试桩,它是香港机场三跑项目中的一项特别要求,其目的是验证在某一施工区域 DCM 桩机的穿透能力,确定在该施工小区的试插电流,从而确定硬土层顶标高位置。

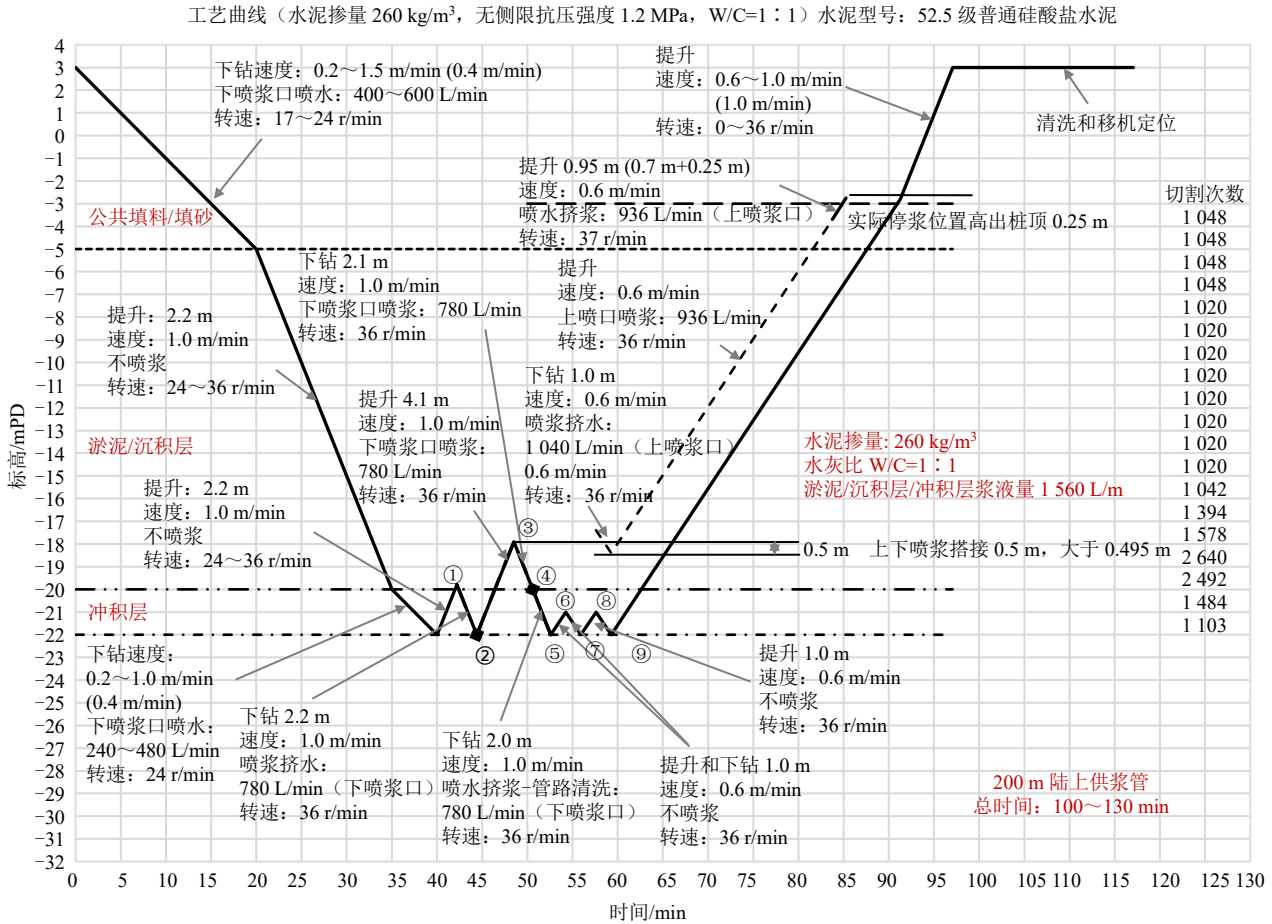


图 6 陆上 DCM 桩施工的典型“W”施工曲线

Fig. 6 Typical 'W' construction curve for land DCM construction

根据试插结果, 确定进入硬土层的试插电流值, 方法如下:

a) 每台设备每 6 周进行 1 次试插, 以确定在某特定施工区域 DCM 桩机施工的能力及技术参数;

b) 在试插的位置周围, 做 3 个静力触探, 位置如图 7 所示;

c) 分析 3 个试插静力触探的数据, 确定硬土层顶面, 并以 3 个静力触探确定的硬土层最深者作为试插硬土层顶面;

d) 确定试插工艺参数, 在试插桩位进行试插。当钻头快下钻至硬土层顶面以上 1.0 m 左右时将下钻速度下调至 0.2~0.5 m/min, 转速下调至 21~24 r/min 左右, 然后持续下钻穿过硬土层顶直至设计桩底;

e) 确定进入硬土层的电流值。根据试插施工记录和静力触探资料整理下钻的深度-电流曲线。在硬土层顶部开始电流发生突变, 即为进入硬土层的试插电流。

(3) 桩底标高确认

正式施工时, 钻机在到达设计硬土层顶面以上

1.0~2.0 m 位置时, 调整下钻速度至 0.2~0.5 m/min, 转速下调至 21~24 r/min。如果电机电流值达到试插电流值的时间不少于 20 s, 即认为该位置为硬土层顶面标高, 然后按硬土层嵌入深度的设计要求, 继续下钻至桩底标高为止。

如果实际桩底标高在设计桩底标高-1.5 m 或 +3.0 m 的范围内, 均认为是合格的。如果超出了这个范围, 则需要重新进行试插确定施工参数或校验设备传感器。

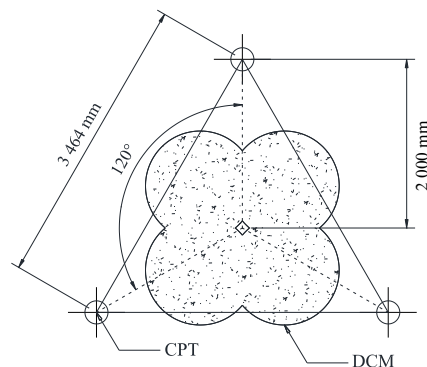


图 7 试插的 CPT 点位布置

Fig. 7 Layout of CPT for trial insertion

3.5 障碍物桩处理

DCM 桩施工区域地质情况复杂,有吹填砂区域,回填公共填料区域以及部分吹(回)填层下的废泥弃置坑区域(CMP),土层内分布大量废弃钢丝绳、破轮胎、旧土工布、断锚、钢筋混凝土块等地下障碍物,埋设深度在3~20 m不等,施工遇到时严重威胁施工安全,影响施工质量。

(1) 障碍物的定义

下钻过程中如果进尺0.5 m用时超过5 min,即下钻平均速度小于0.1 m/min,同时动力头电流大于试插电流时,即认为遇到地下障碍物。

(2) 障碍物桩的处理

根据遇到地下障碍物的位置,障碍物桩的处理分3种情况:

a) 地表-海床标高-3.0 m

第1次下钻时遇到障碍物,提钻至地表,检查钻头上是否有钢丝绳、废旧轮胎等杂物,清理钻头后第2次下钻。连续尝试3次下钻之后,如果还是无法钻进,认定为障碍物桩,整个过程中没有喷浆,如图8所示。补救方案是在障碍物桩周围实行1:1或1:2补桩。

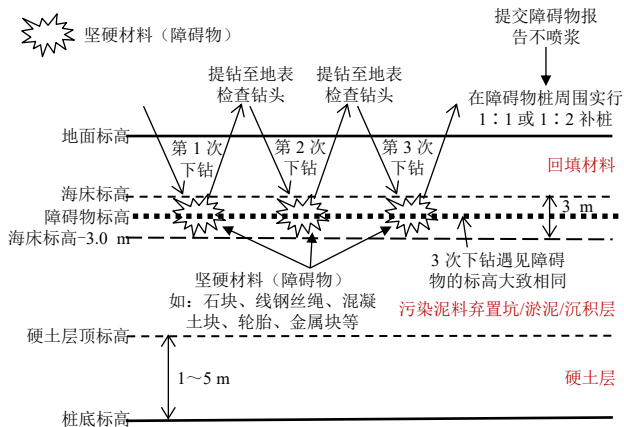


图8 a类障碍物的处理

Fig. 8 Treatment for obstruction case a

b) 海床标高-3.0 m-硬土层暂定顶面标高

第1次下钻及上提工艺同a)。第3次下钻至原位仍无法钻进后,认定为障碍物桩,但需要喷浆上提至设计桩顶标高,如图9所示。补救方案是在障碍物桩周围实行1:1或1:2补桩。

c) 硬土层暂定顶面标高-暂定桩底标高

这种情况指钻头已经进入硬土层,但没有达到暂定设计桩底标高,此时按正常工艺进行桩底复搅及喷浆至桩顶标高,认定为正常桩,不需要补桩,如图10所示。

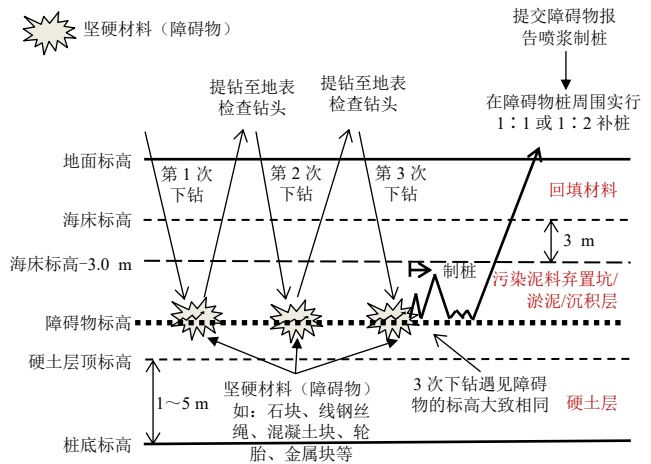


图9 b类障碍物的处理

Fig. 9 Treatment for obstruction case b

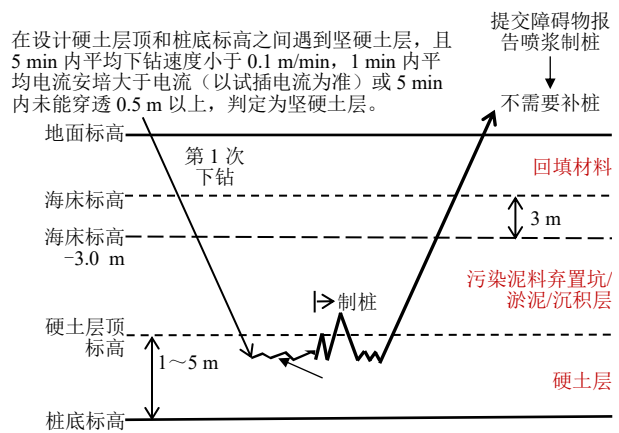


图10 c类障碍物的处理

Fig. 10 Treatment for obstruction case c

4 成桩质量验收

4.1 验收标准

合格的陆上四轴DCM桩,应满足下列条件:

- (1) 总喷浆量不得小于总设计喷浆量;
- (2) 每米喷浆量不得小于90%设计喷浆量;
- (3) 桩顶标高进入砂垫层不得小于1.0 m;
- (4) 总取芯率不得小于芯样总长度的95%,每米取芯率不得小于80%;

(5) 90%以上的28 d无侧限抗压试验结果满足设计要求。

第(1)和(2)条为施工过程控制标准,第(3)、(4)和(5)条为成桩后的检测内容。本文主要介绍桩顶标高、取芯及强度检测方法。

4.2 桩顶标高检测

桩顶标高检测采用静力触探(CPT)方法,锥尖阻力 q_c 不小于1.2 MPa或总锥尖阻力 q_t 不小于

1.5 MPa 时, 认定为成桩的桩顶标高。

检测频率是前 100 根桩, 检测 20 根。如果合格率达到 90%及以上, 检测频率降至 1%, 如果不合格, 则选取下一个 100 根桩进行检测, 以此类推。

4.3 成桩取芯

根据设计要求, 每 2 500 m² 加固区随机选取 1 根 DCM 桩进行钻芯取样, 取芯采用三重管取芯设备, 如图 11 所示。取芯位置在 DCM 桩四轴搭接处的中心位置, 见图 12。每根桩有 4 个取芯点位, 取芯深度至桩底标高以下 1.0 m, 以验证实际桩长, 芯样直径不小于 100 mm。芯样取出后, 以 1.0 m 长度为标准, 放入 PVC 管中, 置入专用箱。无侧限抗压强度试件的选取, 原则上每 1.0 m 范围内选取 3 个 10~20 cm 的芯样^[11], 标准芯样试件的高径比为 2:1, 非标准芯样试件的测试结果应进行尺寸修正, 1 个进行 UCS 抗压试验, 2 个备用。



图 11 三重管取芯桶
Fig. 11 Triple core barrels

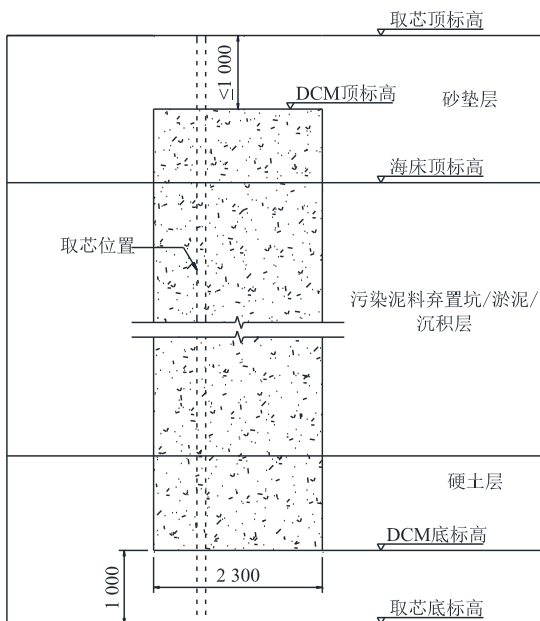
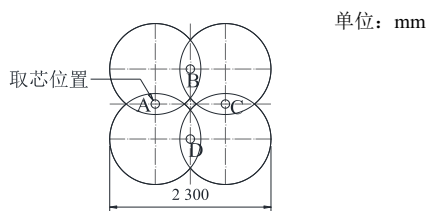


图 12 取芯位置及深度

Fig. 12 Location and depth of coring

香港机场三跑填海项目的海上和陆上四轴 DCM 桩取芯实践均表明, 在海上或围海形成的陆域上施工, DCM 成桩 28 d 取芯, 大部分芯样较软, 基本不成形, 效果较差。根据现场多次取芯验证, 成桩 56 d 左右取芯, 芯样提取率及成型率较好, 在试验室选择完成后, 根据式 (2) 计算 28 d 的强度^[12]。

$$UCS(28) = \frac{UCS(t)}{[0.187 \times \ln(t) + 0.375]} \quad (2)$$

式中: UCS(28) 为 28 d 无侧限抗压强度; UCS(t) 为尺寸修改后的龄期 t d 的无侧限抗压强度; t 为龄期。

图 13 为水泥掺量采用 260 kg/m³, 取芯实测的无侧限抗压强度 UCS 随深度和地层变化的关系图。28 d 强度要求为 1.2 MPa。

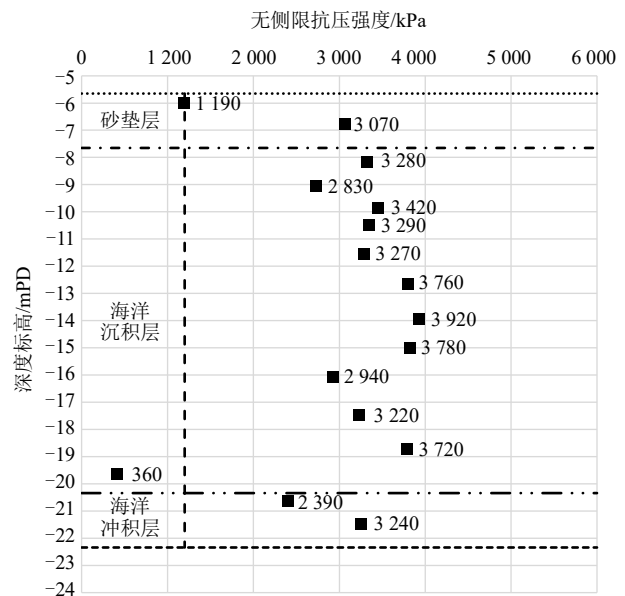


图 13 无侧限抗压强度与地层关系图

Fig. 13 Relationship between UCS and layers of soil

4.4 成桩质量分析

成桩质量受地质条件、固化剂类型及掺量、施工工艺及取芯设备等诸多因素影响。陆上 DCM 累计施工约 64 500 根, 合计方量约 485 万 m³。设计取芯 851 根, 实际取芯次数约 1 100 次。

芯样重取的原因, 绝大部分是桩底、桩顶以及软土层与硬土层交界面位置强度低于设计标准, 见图 13。

桩顶强度较弱的主要原因是施工的水泥浆上翻, 造成事实上的水泥掺量不足。桩底强度较弱的原因是桩底处于硬土层, 强度较高, 下钻时辅助喷水, 造成该段土体的总含水量较高, 使成桩后的强度较低。而软硬交界面位置强度低, 除了因在硬土层喷水影响外, 上下喷浆搭接长度不足也是引起强度低的主要原因。因此在进行 DCM 施工时, 对桩

顶、桩底要适当增加水泥掺量,控制在硬土层中的喷水量,在软硬交界面位置严格控制施工工艺,适当增大上下喷浆的搭接长度。

5 结 论

本文主要对香港机场三跑项目填海工程中的陆上深层水泥搅拌桩(DCM)地基加固关键技术进行研究,并从设备选型与研制以及水泥掺量、桩底标高确定、施工工艺、障碍物桩处理、质量验收等方面进行重点介绍,主要结论如下:

(1) 陆上四轴深层水泥搅拌桩(DCM)在香港机场三跑项目中的大面积应用,证明陆上四轴DCM工艺用于加固污泥和海相淤泥等软土地基是完全可行的。

(2) 针对陆上深厚吹填砂及回填公共填料的地质情况,研制开发了带上下喷浆口的中心杆式陆上四轴DCM设备。

(3) 开发了陆上四轴DCM智能施工控制系统,可全自动控制施工过程,实时监控钻进标高、钻杆转速、下钻及提钻速度、电机电流以及喷浆量等重要施工参数,实现了施工质量的过程控制。

(4) 通过室内试验和现场试桩,确定了满足强度要求的普通硅酸盐水泥(OPC)和矿粉水泥(PBFC)的掺量,矿粉水泥在性价比上更具优势。

(5) 基于施工电流值的DCM桩底标高判别标准,结合依据CPT数据的设计桩长,提出了陆上四轴DCM桩底标高确认的双控指标控制标准。

(6) 研究了陆上四轴DCM遇到地下障碍物的判别标准,以及地下障碍物桩的处理方法。

(7) 基于设备结构、设计喷浆量、BRN等因素,建立了陆上四轴DCM施工的“一喷一搅”施工工艺,成功应用于香港机场第三跑道3206标段工程中,提高了DCM施工工效和成桩质量。

参考文献

- [1] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 第三版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
GONG Xiao-nan. Composite Foundation Theory and Engineering Application[M]. Third Edition. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [2] KITAZUME M, TERASHI M. The Deep Mixing Method[M]. London: Taylor and Francis Group, 2013.
- [3] 刘亚平. 海上CDM施工中的几个技术问题[J]. 中国港

湾建设, 2009, 29(4): 42-45.

LIU Ya-ping. Technical problems for the construction of maritime CDM method[J]. China Harbour Engineering, 2009, 29(4): 42-45.

- [4] 徐超, 董天林, 叶观宝. 水泥土搅拌桩法在连云港海相软土地基中的应用[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 495-498.
XU Chao, DONG Tian-lin, YE Guan-bao. Application of cement deep mixing method in Lianyungang marine soft soil foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(3): 495-498.
- [5] 贺迎喜, 李汉渤, 张克浩, 等. 水泥加固海相淤泥室内配比试验与现场工艺试桩[J]. 水运工程, 2018(7): 35-40, 76.
HE Ying-xi, LI Han-bo, ZHANG Ke-hao, et al. Experiment of laboratory mixing and site trial for marine deposit stabilized with cement[J]. Port and Waterway Engineering, 2018(7): 35-40, 76.
- [6] 刘志军, 胡利文, 卢普伟, 等. 海上深层水泥搅拌法关键施工技术与试验研究[J]. 施工技术, 2019, 48(20): 100-104, 112.
LIU Zhi-jun, HU Li-wen, LU Pu-wei, et al. Key construction technology and experimental study of marine deep cement mixing method[J]. Construction Technology, 2019, 48(20): 100-104, 112.
- [7] 夏可强, 王伟. 海上复杂地质条件下深层水泥搅拌桩地基加固技术[J]. 中国港湾建设, 2020, 40(7): 25-29.
XIA Ke-qiang, WANG Wei. Foundation reinforcement technology of deep cement mixing pile under complex geological conditions at sea[J]. China Harbour Engineering, 2020, 40(7): 25-29.
- [8] 潘树杰, 张伟, 陈小强. 海上深层水泥搅拌技术在香港的应用[C]//中国土木工程学会2019年学术年会. 中国土木工程学会2019年学术年会论文集. 上海, 2019.
PAN Shu-jie, ZHANG Wei, CHEN Xiao-qiang. Marine based deep cement mixing in Hong Kong[C]//China Civil Engineering Society 2019 Academic Annual Conference. Proceeding of 2019 Annual Conference of China Civil Engineering Society. Shanghai, 2019.
- [9] 宁华宇. 香港国际机场扩建工程水下深层水泥搅拌桩的试验检测[J]. 工程建设, 2019, 51(2): 60-65.
NING Hua-yu. Testing of deep sea cement mixing pile for Hong Kong International Airport expansion project[J]. Engineering Construction, 2019, 51(2): 60-65.
- [10] 何洪涛, 王征亮, 林佑高, 等. 海上深层水泥搅拌法在香港国际机场第三跑道填海工程的应用[J]. 中国港湾建设, 2022, 42(2): 38-42.

