



水下 DCM 法加固软基关键参数优化

汪海洋^{1,2,3}

- 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230;
- 中交交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230;
- 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519000)

摘要: 陆上和软基深层水泥搅拌桩施工参数通常通过试桩确定, 水下 DCM 多为四轴, 施工参数难以确定。以某填海工程 DCM 桩为背景, 对水下 DCM 桩进行试桩, 对水泥搅拌桩搅拌切土次数、底部 W 施工曲线、喷浆工艺等关键参数进行研究, 并通过三重管取芯对水泥土强度进行检测。结果表明, 淤泥中水泥掺量由 320 kg/m^3 优化为 300 kg/m^3 , 固化 28 d 水泥土搅拌桩无侧限抗压强度大于 1.0 MPa , 满足设计要求。底部硬黏土层增加 2 个小 W 施工曲线进行复搅可以提高水泥桩的强度。为充分将黏土搅散, 下贯速度不宜大于 0.3 m/min , 提升速度不宜大于 1.0 m/min 。搅拌叶片的旋转速度应与钻头下贯或提升速度匹配, 以提高搅拌效果, 进而提高成桩质量。

关键词: 深层水泥搅拌法; 软基; 施工参数; 无侧限抗压强度

中图分类号: U655; TU47

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)12-0238-07

Optimization on key parameters of soft foundation reinforcement by underwater DCM

WANG Haiyang^{1,2,3}

- CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;
- CCCC Key Lab of Environmental Protection&Safety in Foundation Engineering of Transportation, Guangzhou 510230, China;
- Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519000, China)

Abstract: The construction parameters of deep cement mixing (DCM) on land and underwater soft foundation are usually determined by test pile, and the underwater DCM is mostly four-axis, so the construction parameters are difficult to determine. In this paper, the DCM piles in reclamation project is studied, the key parameters of the cement mixing pile, such as BRN, W-shaped construction curve at the bottom and cement slurry jet technology are studied, and the cement soil-cement strength is tested through triple tube coring. The results indicate that the cement content in the silt is optimized from 320 kg/m^3 to 300 kg/m^3 , and the unconfined compressive strength of the cement-soil mixing pile is greater than 1.0 MPa after 28 days curing, which meets the design requirements. The pile's strength can be improved by adding two W-shaped curve to remix the hard clay layer at the bottom. To fully stir the clay, the penetration speed should not be greater than 0.3 m/min and the withdraw speed should not be greater than 1.0 m/min . The stirring blade rotation speed should match the drill penetration or withdrawing speed to improve the mixing effect and the quality of pile.

Keywords: deep cement mixing; soft foundation; construction parameter; unconfined compressive strength

深层水泥搅拌法 (deep cement mixing, DCM) 是一种用水泥或其他固化剂与软土在原位搅拌混合,

利用固化剂的化学作用在地基中形成坚固稳定土的施工方法, 具有对周边构筑物沉降影响小、无

收稿日期: 2024-04-01

作者简介: 汪海洋 (1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水利水电工程软基设计和施工相关工作。

污染、施工周期短等诸多优点^[1]。DCM 工法的适用范围包括陆地和水下各种建/构筑物地基加固。2016 年 DCM 工法首次在香港机场扩建工程中得到应用。滕超等^[2]基于喷水量、喷浆量、每米切土次数 (blade rotation number, BRN) 等施工参数, 对影响水下深层水泥搅拌桩成桩质量的因素进行了分析。殷天军等^[3]依托深中通道沉管基础水下深层水泥搅拌桩工程, 从设计方案、施工技术、工后检测及沉降监测等方面对水下 DCM 应用全过程进行了研究和探讨。刘志军等^[4-5]对水下深层水泥搅拌施工及检测技术和室内配合比进行研究, 对钻孔取芯、振动取样、湿抓取样、静力触探、平板载荷试验等可行的地基检测方法进行系统性分析和比较, 并对永久桩和试验桩复合地基检测方法的选择给出了建议。何洪涛等^[6]对搅拌桩壁式、柱式和块式布置形式、置换率设计与施工关键参数进行研究, 提出块式 DCM 布置地基稳定性最好但造价也最高的结论。夏可强等^[7]、潘树杰等^[8]结合香港国际机场第三跑道填海工程中海上深层水泥搅拌应用案例, 对 DCM 施工曲线设计及低压等量注浆等技术进行创新, 有效解决了海上复杂地质条件下深层水泥搅拌桩地基加固效果差的技术难题, 提高了成桩质量及施工效率。钟国辉^[9]对水泥搅拌桩机钻头进行改造, 在钻头下部加装切削刀片组, 克服了土工材料、塑料排水板等缠绕的难题。乔杨^[10]对深层水泥搅拌连续稳定注浆系统进行改进, 通过改进变频调速与 PLC 程序内置功能模块, 显著改善了注浆效果。虽然不少学者对海上深层水泥搅拌法设计和施工等相关工艺进行了研究, 但关于水下 DCM 施工参数优化的研究不多。目前海上 DCM 水泥掺量普遍较高, 根据抽芯检测的结果, 28 d 无侧限抗压强度 q_c 值分布较为离散, 抽芯检测出的抗压强度有较大富余。周清泉^[11]采用不同置换率的 DCM 桩对深厚软土地基板桩码头变形控制进行研究, 提出码头前墙及锚定墙之间的 DCM 置换率统一取 55% 可以减小码头前墙变形且经济合理。

本文以某填海造地工程为例, 对海堤典型断面进行工艺试桩, 对每延米叶片搅拌总次数 T_{bm} 、底部 W 施工曲线、喷浆工艺和水泥掺量等关键参数进行优化, 并通过三重管取芯对水泥土 28 d 无侧限抗压强度进行检测, 进而验证设计和施工参数的可行性和合理性。

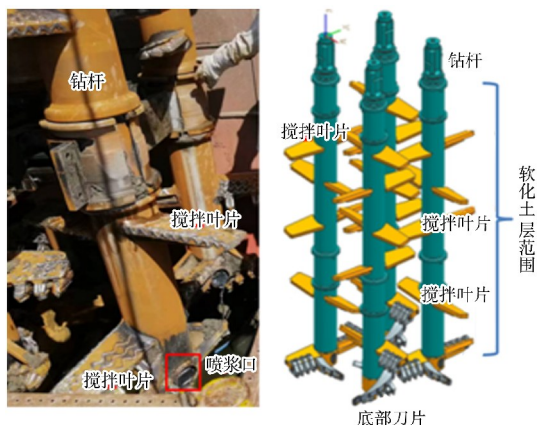
1 四轴 DCM 软基加固技术

1.1 平面布置

海上深层水泥搅拌法单个搅拌处理机一般为多轴联动, 多轴搅拌形成水泥土桩簇。以水下四轴搅拌桩为例, 每个桩簇有 4 根搅拌桩组成, 每个桩簇的面积可达 $4 \sim 7 \text{ m}^2$, 最大加固深度可达水下 70 m。图 1 为“四航固基号”四轴水下 DCM 施工船的整体和钻头结构^[12], 图 2 为桩式 DCM 平面布置, 图 3 为单轴直径为 1.3 m、搭接 0.3 m 组成的四轴水泥搅拌桩壁式平面布置, 单个桩簇面积 4.63 m^2 、直径 2.3 m。DCM 法加固软基的平面布置主要有桩式、壁式、块式和格栅式等形式。何洪涛^[13]对 DCM 法加固软基不同特点和破坏机理进行研究, 揭示桩式和壁式深层水泥搅拌桩的破坏机理不同, 其中桩式 DCM 破坏形式为弯曲破坏和压缩-剪切模式, 水平位移较大, 整体稳定安全系数较低; 壁式 DCM 破坏形式主要表现为整体剪切破坏模式, 水平位移较小, 整体稳定安全系数较高。

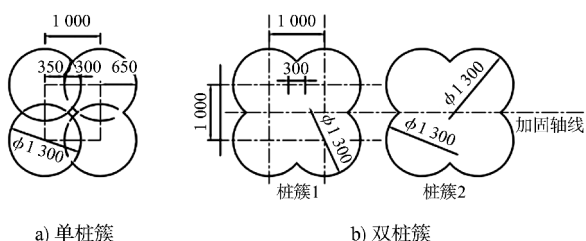


a) DCM 施工船整体



b) DCM搅拌叶片和钻头

图1 “四航固基号”四轴水下DCM施工船



a) 单桩簇

b) 双桩簇

图2 桩式布置 (单位: mm)

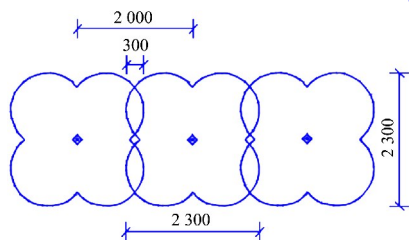


图3 壁式布置 (单位: mm)

1.2 置换率

通过承载力计算确定搅拌桩加固地基的置换率 m , 该参数是地基设计的重要参数, m 过高或过低对搅拌桩的承载力均产生不利影响。根据工程经验, 软土地基 m 通常为 0.3~0.8。 m 可由式(1)计算求得:

$$f_{spk} = \frac{mR_a}{A_p} + \beta f_{sk}(1-m) \quad (1)$$

$$m = (f_{spk} - \beta f_{sk}) / (R_a / A_p - \beta f_{sk}) \quad (2)$$

式中: f_{spk} 为复合地基承载力特征值, kPa; R_a 为单

桩竖向承载力特征值, kN; A_p 为桩的截面积, m^2 ; f_{sk} 为处理后桩间土承载力特征值, kPa; β 为桩间土承载力折减系数。

1.3 最大承载力

水泥搅拌桩的桩长直接影响桩的承载力和工程投资。桩身承载力与桩长、桩间距和单桩桩身强度有关。增加桩长可提高桩的承载力, 但桩身强度增长是有一定限制的, 基于承载力理论, 水泥土桩存在一个有效桩长, 单桩承载力一定程度上并不随桩长的增加而增大。根据上海地区大量的单桩静载荷试验结果, 直径 500 mm 单头搅拌桩的单桩承载力一般为 100 kN 左右, 双头搅拌桩的单桩承载力为 250 kN 左右。湖北省地方标准 DB 42/242—2003《建筑地基基础技术规范》^[14] 中规定, 水泥土搅拌桩复合地基承载力特征值不宜大于 180 kPa, 桩径 500 mm 水泥土搅拌的单桩承载力特征值不大于 120 kN。

2 四轴 DCM 工程实例

2.1 某填海造地工程概况

2.1.1 水工建筑物布置

某填海造地工程主要建筑物有新建海堤和排洪渠道等。新建码头防波堤、排洪渠、海堤等构筑物均直面大海。海堤及泄洪通道护岸下部的淤泥具有含水率高、承载力低的特点。海堤基础采用水下 DCM 法进行加固, 海堤总长约 1 km。DCM 采用四轴形式, 分为 2 行 2 列, 桩直径 1 300 mm, 咬合 300 mm, 1 个桩簇面积为 4.63 m^2 。海堤顶高程 5.9 m, 防浪墙顶高程 7.0 m, 堤身由 200~500 kg/m^3 开山石抛填而成, 迎海侧采用 5 t 扭王块护面, 海堤横断面见图 4。海堤主要施工顺序为先通过水下 DCM 法进行软基加固, 然后由船驳水下抛石形成堤身, 最后吊装约 5 t 的扭王块形成护面。

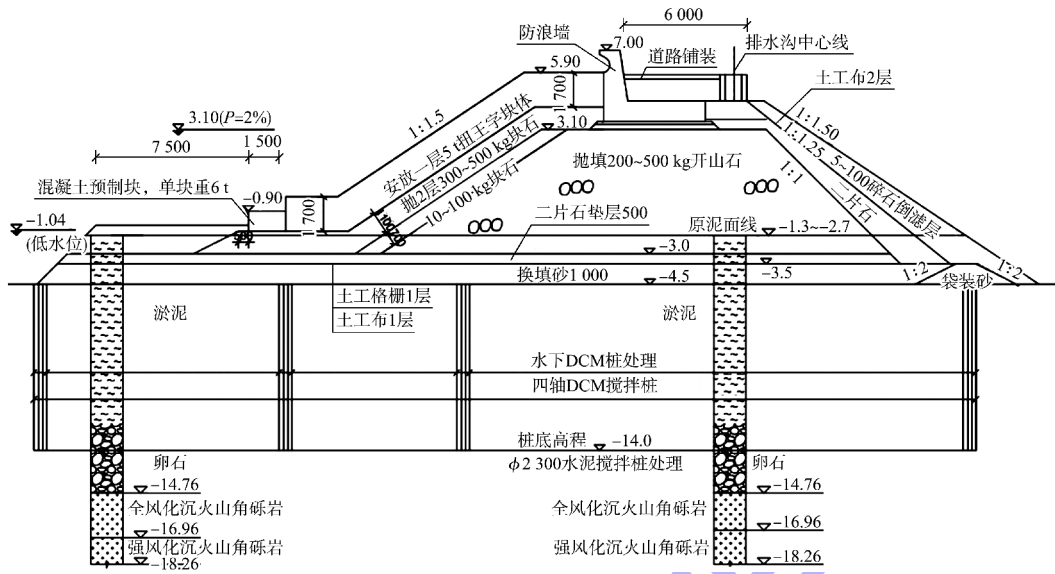


图 4 淤泥地层 DCM 法加固海堤断面 (高程: m; 尺寸: mm)

2.1.2 水文、地质

依托工程特征水位：极端高水位(50 a 一遇) 3.10 m，设计高水位 1.63 m，设计低水位-0.42 m，极端低水位(50 a 一遇)-1.04 m。以 1956 年黄海高程起算，最高潮位 1.94 m，平均海平面 0.35 m，最低潮位-0.59 m，平均潮差 1.28 m。

海堤基础主要为海相淤泥，厚 8.5 ~ 10.0 m，含水率为 87%，塑性指数 I_p 为 18.7，液性指数 I_L 为 1.3。

2.2 施工工艺参数

2.2.1 水灰比

根据香港第三跑道工程和深中通道工程 DCM 施工经验，海上水下水泥搅拌桩水灰比为 0.9，比

陆上搅拌桩的水灰比要大很多，其主要原因是水下搅拌桩比陆上桩长许多。陆上干法水泥搅拌桩最大桩长为 15 m，湿法最大桩长为 20 m；“四航固基号”DCM 船施工桩长可达 50 m。增大水灰比可以降低水泥浆液的密度，防止水泥浆液堵塞泥浆管道。

2.2.2 施工顺序

根据日本、韩国、新加坡等国采用 DCM 加固软土的工程实例，确定 DCM 工艺流程及相关工艺参数，采用钻头下贯阶段不注浆、提升阶段注浆工艺。陆上 DCM 施工顺序主要分 4 步：①钻机就位→②预搅下沉→③喷浆提升→④破桩头。根据地质条件和设计参数不同，可以重复步骤②和③。DCM 施工顺序见图 5。

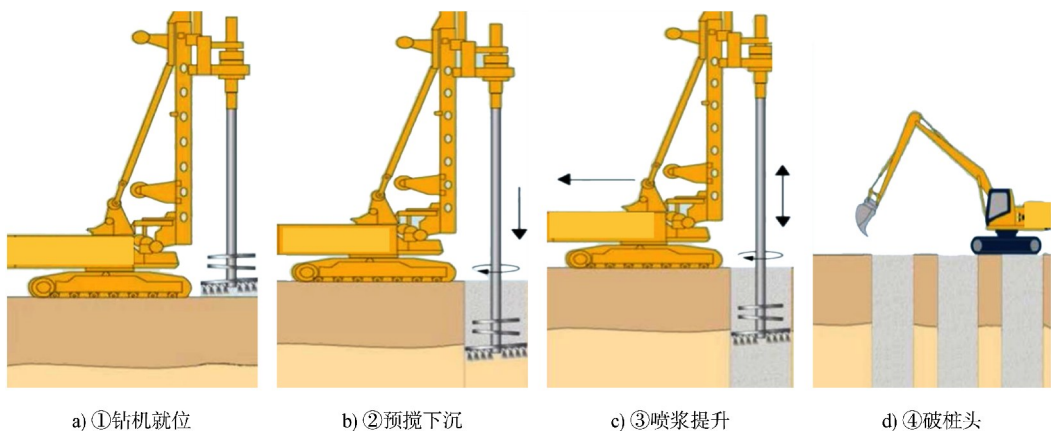


图 5 DCM 施工顺序

2.2.3 泥浆生产系统和注浆压力

“四航固基号”DCM 船单套制浆系统最大制浆能力为 120 m³/h, 拌浆桶最大出料容量为 3 m³/罐, 储浆桶最大容量为 12 m³。船上共安装 15 台泥浆泵、3 个处理机, 每台处理机配置 4 台泥浆泵, 剩余 3 台泥浆泵备用。泥浆泵喷浆压力可达 0.2 ~ 0.5 MPa, 输浆管直径为 65 mm, 喷浆速度最大达 500 L/min。

3 DCM 优化及结果分析

3.1 优化思路

3.1.1 搅拌次数优化

每延米叶片搅拌总次数与水泥土搅拌效果和成桩质量密切相关^[15-16], 计算公式为:

$$T_{bm} = \sum M \times (N_u / v_u + N_d / v_d) \quad (3)$$

式中: T_{bm} 为每延米叶片旋转总次数, r/m; $\sum M$ 为搅拌叶片总数量; N_u 为提升阶段搅拌叶片转数, r/min; N_d 为下贯阶段搅拌叶片转数, r/min; v_u 为钻杆提升速率, m/min; v_d 为钻杆下贯速率, m/min。

DCM 桩上下 8 m 桩体的单米搅拌次数(BRN)不低于 900 r/min, 中间部分桩体则不低于 450 r/min。在搅拌桩上下 8 m 的硬质黏土层应进行充分搅拌, 以保证搅拌次数。对于透水性差的硬质黏土层, 可以将施工参数设置为高转速, 同时慢速钻进和提升, 可以提高 BRN, 充分搅拌土体, 提高水泥土的搅拌均匀性, 从而提高水泥桩桩身强度。

3.1.2 水泥掺量优化及喷浆优化

目前水下 DCM 单桩喷浆有两种方法: 下贯喷浆和提升喷浆。喷浆口喷浆路径包括两部分, 一是桩底硬土层底部处理时采用位于钻头底部的下部喷浆口下贯喷浆; 二是钻头提升过程中采用上部喷浆口喷浆搅拌处理。下贯喷浆易造成浆液外溢, 水下 DCM 多采用提升喷浆的施工工艺, 仅在底部处理时采用下贯喷浆。DCM 船 1 个桩簇有 4 根搅拌轴, 每个搅拌轴有 2 个喷浆口, 1 个桩簇共有 8 个喷浆口。“四航固基”号施工船 DCM 处理机上、下部喷浆口的距离为 3.68 m。对于黏土等难

以搅散的土层, 可以提高搅拌次数。根据日本和韩国水下 DCM 施工经验, 拟采用 320、300 kg/m³ 两种不同水泥掺量进行试桩。

3.1.3 底部 W 施工曲线优化

DCM 施工路径曲线指施工过程中处理机钻头(底端)运行路径及喷浆口喷浆路径所形成的时程曲线, 因其总体性状呈 W 形, 亦被称为 W 施工工艺曲线。搅拌中遇有硬土层、搅拌钻进困难时, 启动加压装置, 或边输入浆液边搅拌钻进成桩, 或采用冲水下贯搅拌。对于上部桩体强度较差特性, 可以在底部增加搅拌次数, 形成 2~3 个小 W。优化前 W 施工曲线见图 6a), 施工步骤为①~⑥; 优化后 W 施工曲线见图 6b), 施工步骤为①~⑧, 优化后底部处理增加 W 施工曲线, 图 6b)中④→⑤。一个大的 W 型底部嵌套 1~2 个小 W, 可有效增加底部黏土层的搅拌次数, 进而提高黏土层水泥土的搅拌均匀性。

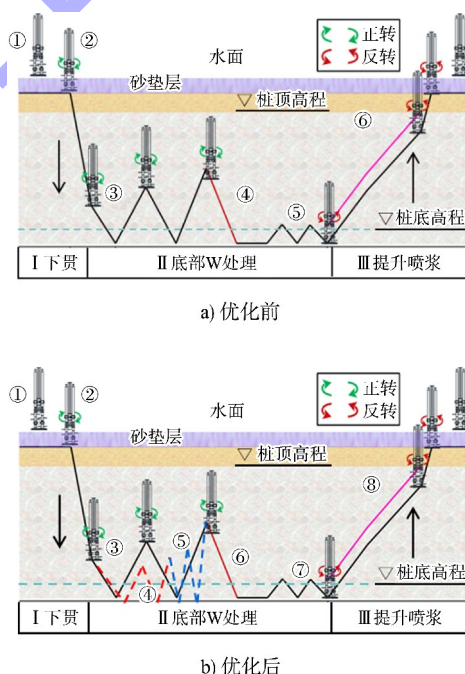


图6 优化前后 W 施工曲线

3.2 优化后现场试桩

3.2.1 试桩

DCM 正式施工前需进行现场初始试桩与工艺试桩, 建立设备特征参数与地层条件及深度之间的关系, 分析不同地层条件下转速、下贯/提升速

度等参数的合理范围，进而确定适用的 BRN 取值区间。试桩桩长约 8 m，所在地层上部为约 5 m 的淤泥，下部为约 3 m 的黏土，试桩编号为 S₁ 和 S₂。采用不同的水泥掺量进行试桩，试桩参数见表 1，试桩采用优化后的 W 施工曲线，试桩完成后取芯

照片见图 7。

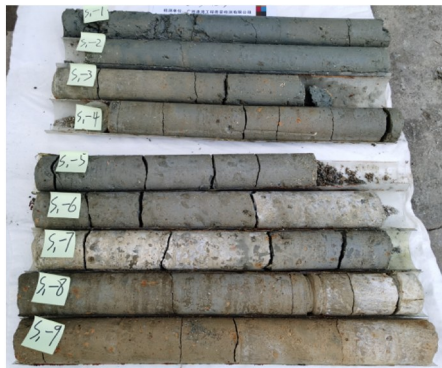
桩底硬土层处理时采用位于钻头底部的下部喷浆口喷浆，钻头提升过程中采用上部喷浆口喷浆搅拌处理，“四航固基”号施工船 DCM 处理机上、下部喷浆口的距离为 3.68 m。

表 1 DCM 试桩施工参数

| 阶段 | | $v_u/(m \cdot \min^{-1})$ | $v_d/(m \cdot \min^{-1})$ | $N_d/(r \cdot \min^{-1})$ | 水泥掺量/($kg \cdot m^{-3}$) | $T_{bm}/(r \cdot m^{-1})$ |
|-----|------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 优化前 | 下贯阶段 | - | 0.4 | 23 | 320 | 900 |
| | 提升阶段 | 0.6~1.0 | - | 40 | 320 | 900 |
| 优化后 | 下贯阶段 | - | 0.3 | 30 | 300 | 700 |
| | 提升阶段 | 0.6~0.8 | - | 40 | 300 | 700 |

表 2 不同 BRN 不同水泥掺量的无侧限抗压强度

| 土类 | 阶段 | 水泥掺量/ ($kg \cdot m^{-3}$) | $T_{bm}/$ ($r \cdot m^{-1}$) | 28 d 平均 q_c/MPa |
|----|-----|--------------------------------|-----------------------------------|----------------------|
| 黏土 | 优化前 | 320 | 900 | 2.16 |
| | 优化后 | 300 | 900 | 1.85 |
| 淤泥 | 优化前 | 320 | 700 | 1.60 |
| | 优化后 | 300 | 700 | 1.40 |



a) S₁ 桩

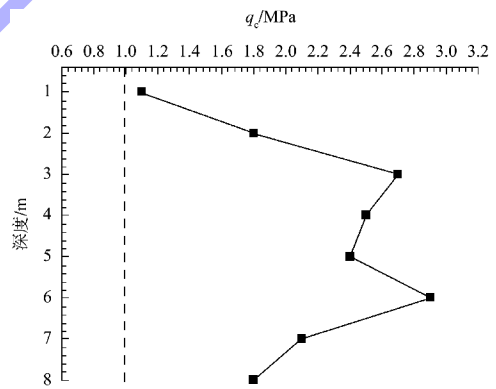


b) S₂ 桩

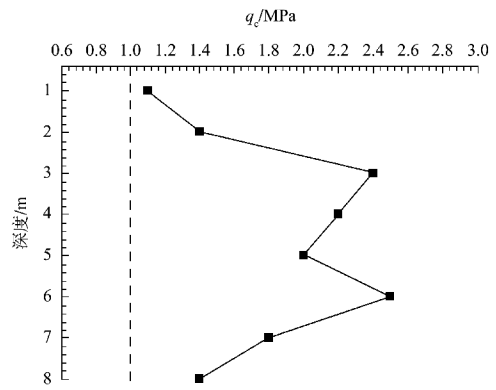
图 7 试桩取芯照片

3.2.2 UCS 试验

原位养护 28 d 后，采用三重管法取芯，测得 28 d 后水泥土 q_c 值见表 2， q_c 和深度的关系曲线见图 8。由表 2 可知， T_{bm} 为 900 r/m，水泥掺量为 320 kg/m^3 和 300 kg/m^3 的 DCM 28 d 平均 q_c 值分别为 2.16、1.85 MPa，均大于设计强度 1.0 MPa，满足设计要求。



a) 水泥掺量为 320 kg/m^3 ， $T_{bm}=900$ r/m



b) 水泥掺量为 300 kg/m^3 ， $T_{bm}=700$ r/m

图 8 不同水泥掺量的 28 d 无侧限抗压强度

由图 8 可知, T_{bm} 为 900 r/m, 水泥掺量为 320 kg/m^3 对应 28 d 的 q_c 最小值为 1.2 MPa, 位于桩顶上部; 最大值为 2.9 MPa, 位于 3/4 桩长位置。图中 q_c 值均表现出沿桩长方向相似的分布规律: 水泥土桩上部和底部 q_c 值较低, 中部最大, 这与水泥土桩桩身强度沿着桩长方向分布规律一致。上部强度较低, 主要原因是由于水泥浆的外溢和上部覆土压力较小造成, 下部桩的强度偏低主要是底部黏土层难以搅拌均匀, 叠加喷浆压力减小导致。

4 结论

1) 由于水下 DCM 搅拌叶片为 4~5 层, 叶片数目多, BRN 大, 无侧限抗压强度比传统的陆上深层水泥搅拌桩高。

2) 淤泥中水泥掺量由 320 kg/m^3 优化为 300 kg/m^3 , 优化后 28 d 水泥土搅拌桩无侧限抗压强度大于 1.0 MPa, 水泥掺量大小可以通过调整喷浆流速来实现。

3) 对于底部硬黏土层施工曲线进行优化, 优化后底部处理增加 2 个小 W 曲线, 可以提高搅拌次数, 进而提高无侧限抗压强度。为充分将黏土搅散, 下贯速度可适当减慢, 下贯速度和提升速度应与叶片转速匹配, 转速不宜低于 30 r/min。

4) 底部处理下贯采用下喷浆口喷浆, 上拔时采用上喷浆口喷浆, 这样上下两喷嘴之间的水泥土会得到更多的搅拌机会, 成桩质量更有保障。

参考文献:

[1] 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.
 [2] 滕超, 刘志军, 王雪刚. 基于施工数据的水下深层水泥搅拌桩成桩质量影响因素分析[J]. 水运工程, 2020(7): 217-222.

[3] 殷天军, 宁华宇, 寇晓强. 深中通道沉管基础水下深层水泥搅拌桩应用全过程探讨[J]. 中国港湾建设, 2022, 42(7): 11-16.
 [4] 刘志军, 陈平山, 胡利文, 等. 水下深层水泥搅拌法复合地基检测方法[J]. 水运工程, 2019(2): 155-162.
 [5] 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(20): 155-162.
 [6] 何洪涛, 王征亮, 林佑高, 等. 不同加固形式下海上深层水泥搅拌桩复合地基海堤的三维数值模拟分析[J]. 中国港湾建设, 2022, 42(2): 32-37.
 [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.
 [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. 中国土木工程学会 2019 年学术年会论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019: 661-670.
 [9] 钟国辉. 填海区地基加固中搅拌桩钻头改良技术研究与应用[J]. 广东土木与建筑, 2018, 25(6): 36-38.
 [10] 乔杨. 深层水泥搅拌注浆量控制技术改进及应用[J]. 中国港湾建设, 2018, 38(4): 57-60.
 [11] 周清泉, 尤坛洪, 江义. 深厚软土地基深水板桩码头变形控制优化设计[J]. 水运工程, 2024(3): 32-37.
 [12] 吕卫清, 董志良, 王婧, 等. 软弱地基加固理论与工艺技术创新应用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2022.
 [13] 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.
 [14] 湖北省建筑科学研究设计院. 建筑地基基础技术规范: DB 42/242—2014[S]. 武汉: 湖北省建设工程标准定额管理总站, 2014.
 [15] MASAKI K, MASAAKI T. The deep mixing method[M]. London: Taylor & Francis Group, 2013.
 [16] MASAKI K. Recent development and future perspectives of quality control and assurance for the deep mixing method[J]. Applied sciences, 2021(11): 1-15.

(本文编辑 王传瑜)