

# 水下深层水泥搅拌桩在岛壁结构基础处理中的应用

鄢智<sup>1</sup>, 刘永胜<sup>1</sup>, 王刚<sup>1</sup>, 宋博文<sup>2</sup>

(1. 中交一航局第一工程有限公司; 2. 中交天津港湾工程研究院有限公司)

**摘要:**粤港澳大湾区某人工岛岛壁中的部分区域首次采用水下深层水泥搅拌桩技术来加固软土地基, 通过对岛壁处的水下深层水泥搅拌桩进行现场取芯检测, 发现水下深层水泥搅拌桩桩身质量整体分布较为均匀, 部分水下深层水泥搅拌桩存在桩顶和桩端成桩质量较桩中间差, 但桩体 60 d 的无侧限抗压强度能够满足设计要求。综合分析, 水下深层水泥搅拌桩在该人工岛岛壁工程中的应用是可行的, 为今后类似工程的地基处理设计和施工提供了可靠的参考依据。

**关键词:** 水下深层水泥搅拌桩; 岛壁结构; 软基处理; 应用

## 0 引言

水下深层水泥搅拌桩(简称 DCM 桩)是一种深海地基软土加固的重要技术, 它主要是利用海上施工船机将水泥等固化材料和待改性的土体拌和而成, 经过一段时间的养护, 形成具有一定强度的复合地基, 该技术具有加固范围广、加固深度大、施工工期短、施工质量高、环保无污染等一系列优点<sup>[1-2]</sup>。日本在该技术领域处于领先地位, 拥有世界上最大的 8 轴联动 DCM 施工设备, 一次性可以处理 7 m<sup>2</sup>, 施工效率可达 150 m<sup>3</sup>/h<sup>[3]</sup>。日本对该技术有着广泛的应用研究, 目前该技术被广泛地应用于沿海护岸、港口码头、防波堤、跨海大桥基础、海上人工岛等工程的软土地基加固, 来提高地基强度, 防止过大沉降变形、滑动及砂土液化等。韩国也具有一定成品的 DCM 施工设备, 但核心技术被日本掌控, 未能真正掌握 DCM 施工的核心技术<sup>[4]</sup>。国内早期在天津港和烟台港也曾进行过 DCM 处理技术的探索, 但是由于技术原因, 一直未能大面积推广。近几年来, DCM 开始在中国香港进行大规模的应用, 例如香港机场第三跑道扩建工程、香港综合废物处理设施项目、香港东涌填海项目等。随着施工经验的不断积累, 我国对 DCM 施工技术有了一定的掌握, 自行打造了一批 DCM 桩施工船舶, 例如一航局的砂桩 2 号, 四航局的四航固基号等。虽然近几年来, 我国在 DCM 施工技术方面有了很大的提升, 但是由于水下 DCM 桩复合地基相关理论研究滞后于工程

实践, 且仍处于探索阶段, 因此研究水下 DCM 桩的特点及其加固效果非常必要。

## 1 项目概况

粤港澳大湾区某人工岛工程, 采用钢圆筒形成临时围堰, 内部填砂筑岛的方案。人工岛的设计使用年限为 100 a, 结构安全等级为一级; 设计高水位 1.89 m, 设计低水位 -0.73 m, 平均海平面 0.52 m; 抗震按照 100 a 超越概率 10% 地震加速度进行设计, 地表峰值加速度为 0.13g。人工岛地基处理的允许工后沉降 ≤ 50 cm。人工岛总体施工工序包括基槽开挖及换填、岛壁结构(插入式钢圆筒结构+抛石斜坡结构)、陆域形成和地基处理。

## 2 工程地质条件

岛壁区域范围地层分为六大岩层, 下面介绍各岩层的工程地质特征。

1) 第 2 大单元层全新统海相沉积物(Q<sub>4</sub><sup>m</sup>): 岩性为淤泥、淤泥质土和淤泥质黏土夹砂等, 连续分布。

②<sub>1</sub> 淤泥: 灰黑色, 流塑, 质较均, 有腥臭味, 顶部为浮泥, 取芯较为困难, 该地层为新近沉积, 欠固结。全区均有分布。

②<sub>2</sub> 淤泥: 深灰色, 流塑, 大部分质均, 局部富集贝壳碎片, 多显水平层理, 有腥臭味, 该地层为新近沉积, 欠固结。场区局部分布。

②<sub>3</sub> 淤泥质粉质黏土: 深灰色, 流塑~软塑, 质较均, 显水平层理, 部分段夹粉砂。

2) 第 3 大单元层晚更新世晚期陆相沉积物

4) 第6大单元层燕山期侵入岩(晚期): 为燕山期细~粗粒花岗岩、花岗闪长岩( $\gamma_5^{2(3)}$ 、 $\gamma_{85}^{2(2)}$ ), 基

某人工岛岛壁结构总长 1 622.08 m, 岛壁结构采用插入式钢圆筒结构+抛石斜坡式结构方案。岛壁外侧沿轴线分成 11 个区进行不同类型的复合地基处理, 其中部分区域进行深层水泥搅拌桩 (DCM 桩) 复合地基处理。在钢圆筒外侧 3.5~58.5 m 范围内进行水下深层水泥搅拌桩施工, 水泥搅拌桩单桩直径 1.3 m, 搭接 0.3 m, 四桩一簇直径 2.3 m, 矩形布置, 沿岛壁轴线方向间距 4.8 m, 垂直岛壁轴线方向间距 2.6 m, 置换率为 35%。该区域共布置 366 根 DCM 桩, 桩顶标高为 -13.00 m, 桩底标高 -31.00~-31.50 m, 桩间距 4.80 m×2.60 m, 单桩截面积 4.63 m<sup>2</sup>, 单桩处理方量为 84.72 m<sup>3</sup>, 总处理方量 30 854.34 m<sup>3</sup>。桩底标高为原地基淤泥质黏土和粉质黏土底标高。桩体 60 d 无侧限抗压强度设计值要求达到 1 200 kPa。桩身强度变异小于 0.35。在钢圆筒外侧抛填碎石、二片石和 10~100 kg 块石, 抛石堤身外侧坡度为 1:1.5, 外侧设置 800~1 000 kg 块石垫层, 采用 8 t 扭王字块护面 (局部为 14 t 扭王字块护面)。DCM 桩地基处理断面图见图 1, DCM 桩位布置图见图 2。

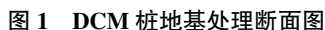


图 1 DCM 桩地基处理断面图

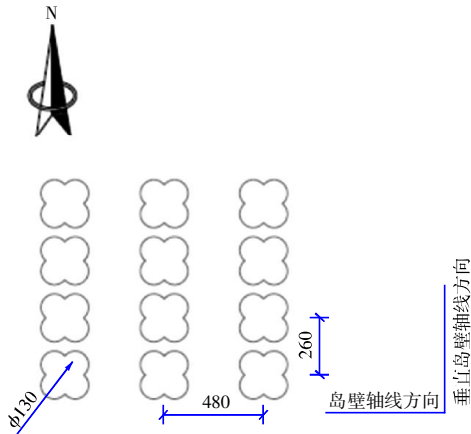


图 2 DCM 桩位布置图

4 主要施工工艺

DCM 桩通过专用船舶进行施工。船舶施工系统主要包括处理机系统、水泥制浆、输浆系统、自动化控制系统、船舶测量定位系统等。首先通过测量定位系统对船舶进行精确定位, 然后通过自动化控制系统控制处理机系统进行贯入作业, 通过自动化控制系统反馈的标高、电流变化、贯入速度变化等数据判断是否达到判底标准, 完成判底后通过水泥制浆系统制作合适的水泥浆, 自动化控制系统在需要喷浆阶段通过喷浆系统进行自动喷浆作业, 以完成 DCM 桩的制作。施工步骤见表 1 所示。具体的施工曲线见图 3 所示。

表 1 施工曲线步骤说明

序号	阶段	说明
Step1	移船定位	根据测量定位软件指示, 移船至指定施工位置, 检查完毕, 下放钻头。
Step2	处理机入水	处理机按照指定的速度下放入水。
Step3	处理机入泥 5 m	处理机入泥前 5 m 低速搅拌, 不喷水, 实时监测、记录处理机的钻头搅拌轴的转速和扭矩, 贯入深度、绞车负载等, 记录处理机进入泥层的贯入速度、处理机电流, 扭矩, 并绘制相应施工曲线图。
Step4	泥层处理	按照设定曲线要求, 对处理深度范围内的原土进行搅拌破碎, 钻入过程根据电流值变化适当调整贯入速度和喷水流量。自动控制系统全过程记录钻头搅拌轴的转速扭矩、喷水量及电流值变化情况。
Step5	硬层处理	钻头即将钻入至砂层或全风化岩层中时, 降低贯入速度, 增大喷水流量, 确保加固土层搅拌均匀。自动控制系统全过程记录钻入过程中钻头搅拌轴的转速扭矩、喷水量及电流值变化情况。
Step6-Step7	底部搅拌	考虑到桩底部黏土及沙层强度较高, 一次切土搅拌不均匀, 复绞一次。
Step8-Step9	处理机上提、贯入喷浆	处理机再次上提, 贯入过程中将管路内的水置换成水泥浆, 下喷浆口喷浆贯入至桩底。
Step9A	底部处理	处理机钻头在桩底原地旋转对加固土体进行搅拌。对下喷浆管路进行清洗, 避免管路堵塞。
Step10-Step13	底部复绞	按照施工曲线, 在底部取消两个 1 m 复绞过程, 改为 1 个 2 m 复搅, 在底部减水的同时增加搭接部分的喷浆量, 提高底部加固土搅拌效果。
Step14	水泥浆置换	本阶段将上喷浆管路内水置换成水泥浆。
Step15	喷浆提升	根据设定的水泥掺量、切土次数要求, 控制处理机的上拔速度、处理机钻头搅拌轴的转速和水泥浆喷入量之间的关系并进行记录。
Step16	绞刀离开桩顶	桩顶采用上喷口喷浆完成, 搅刀上部分逐渐离开桩顶直至下喷口也离开桩顶, 下喷口离开桩顶 1 m 以上后进行洗罐。
Step17	提出加固区	处理机继续上提, 提出加固区后进行管路清洗。

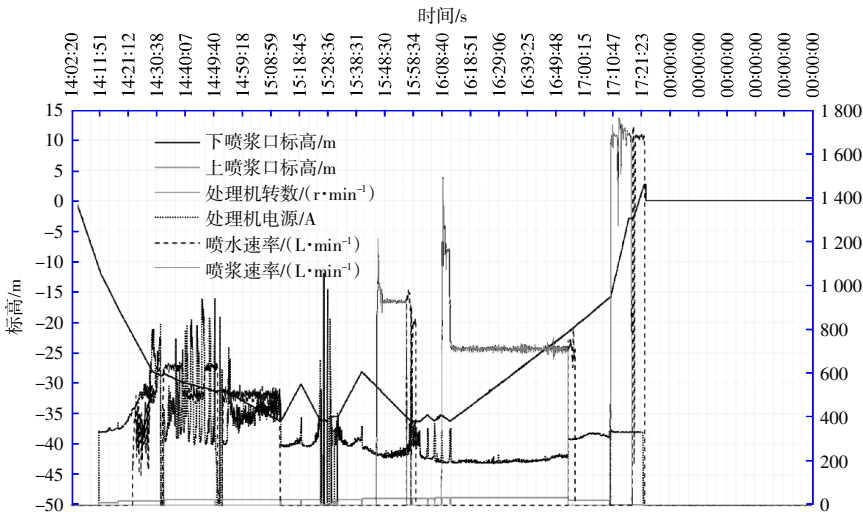


图 3 DCM 施工曲线

## 5 检测与评述

### 5.1 检测方法

DCM 桩施工结束 28 d 后, 对 DCM 桩进行检测。本次检测在该区域选取了 6 根 DCM 桩, 桩号为 L14、M18、L28、D5、I10 和 J12。检测工作分为现场钻孔取芯、桩底标准贯入试验以及试样室内无侧限抗压强度试验三部分。现场取芯采用三管单动取芯器, 取芯过程中, 每米芯样随机选取连续完整部分制取一个试样, 按照 JGJ 340—2015《建筑地基检测技术规范》, 按高径比宜为 1:1 的要求制样, 切样后立即放入样箱进行现场养护, 运输途中确保样箱平稳, 送至试验室后进行标准养护直至无侧限抗压强度试验。取芯至桩底标高后, 进行桩端持力层的标准贯入试验检测, 标贯试验采用自动脱钩的自由落锤法进行锤击, 落锤质量 63.5 kg, 落距 76.0 cm, 贯入器为对开管, 贯入器打入 15 cm 后, 开始记录每打入 10 cm 的锤击数, 累计打入 30 cm 的锤击数为标准贯入试验击数, 若实际标贯击数大于 50 击, 则停锤并记录实际贯入深度。

本次检测试样无侧限抗压强度为试验龄期强度, 试样 28 d、90 d 无侧限抗压强度需要估算取得。按照 JTS 147—2017《水运工程地基设计规范》对试样试验龄期强度换算成 60 d 龄期强度, 按试验龄期 28~60 d、28~90 d、90~180 d 之间的龄期强度关系, 如式(1)~式(3)所示, 龄期系数关系如图 4 所示。由图 4 可知, 规范中经验系数与龄期间呈线性关系, 因此可通过逐级内插法求得实际龄期与 60 d 龄期芯样强度关系。

$$f_{cu60} = 1.46f_{cu28} \quad (1)$$

$$f_{cu90} = 1.80f_{cu28} \quad (2)$$

$$f_{cu180} = 1.25f_{cu90} \quad (3)$$

式中:  $f_{cu28}$ 、 $f_{cu60}$ 、 $f_{cu90}$ 、 $f_{cu180}$  分别为 28 d、60 d、90 d、180 d 龄期混凝土抗压强度。

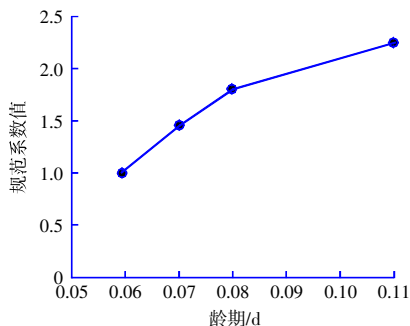


图 4 混凝土龄期~规范系数值关系图

对于桩体试件抗压强度, 根据式(4)~式(6)计算无侧限抗压强度变异系数。

$$\bar{q} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{n} \quad (4)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{q} - q_i)^2} \quad (5)$$

$$\delta = \frac{\sigma}{\bar{q}} \quad (6)$$

式中:  $\bar{q}$  为试样平均强度, MPa;  $q_i$  为第  $i$  ( $i=1 \sim n$ ) 个试样的抗压强度, MPa;  $n$  为参与统计的试样个数;  $\sigma$  为标准差;  $\delta$  为变异系数。

### 5.2 检测

根据现场取芯检测结果发现, DCM 桩桩身连续、完整, 表面坚硬, 偶见含泥现象, 均匀性良好。由于篇幅限制, 只列出 M18 的现场取芯照片, 见图 5 所示。



图 5 M18 现场取芯照片

在桩底进行原位标贯试验, 试验发现桩底均位于标贯击数  $\geq 37$  击的密实中粗砂层。DCM 桩芯样的室内无侧限抗压强度试验检测结果分别见图 6 所示, 由于桩的数量较多, 故分两图呈现。综合分析图 6 发现, 桩身强度随着深度的增加, 强度变化整体较为均匀, 桩身强度平均值在 1.35~1.64 MPa 之间, 能够满足设计要求的 60 d 龄期无侧限抗压强度不小 1.2 MPa 的要求。部分 DCM 桩的桩身强度随着深度的增加表现先增大后减小的趋势, 既 DCM 桩的桩顶和桩端强度较小, 桩体中间的强度较高, 既 DCM 桩的中间段成桩质量较好, 而桩体两端的成桩质量较差。桩顶成桩质量较差的原因是由于处理机在进行 DCM 桩施工完成后, 桩顶部分受潮流等作用, 导致桩顶部分水泥



浆流失, 导致桩底成桩质量较差。桩端部分位于中砂层或强风化层, 该土层的标贯击数虽然较大, 但是在处理机搅拌叶的扰动下, 砂土容易发生液化, 导致原来均匀沉积的砂土在强力搅拌的作用下成为悬浮颗粒, 然后在重力作用下重新发生自由分层沉淀, 容易形成夹砂层, 导致成桩质量较差<sup>[1]</sup>。由此可见, 桩头和桩端的施工质量是水下深层水泥搅拌桩施工技术的薄弱环节, 因此在今后的施工过程中, 应加强桩顶和桩端的施工质量控制, 对于桩顶问题可以采取以下措施: 处理机提升至距设计桩顶高程下 1 m 时, 应采用慢速提升, 到达桩顶高程时, 停止提升, 慢速搅拌数秒, 保证桩头均匀密实; 对于桩端问题可以采取以下措施: 当处理机下降至设计桩底 1 m 上时, 应慢速下降和提升, 降低处理机的搅拌速度, 并减少处理机的搅拌次数, 进而降低砂土液化的程度。

桩身强度变异系数在 0.24~0.33 之间, 满足 DCM 桩质量控制标准中变异系数 $\leq 0.35$ 的要求。DCM 桩检测结果汇总如表 2 所示。

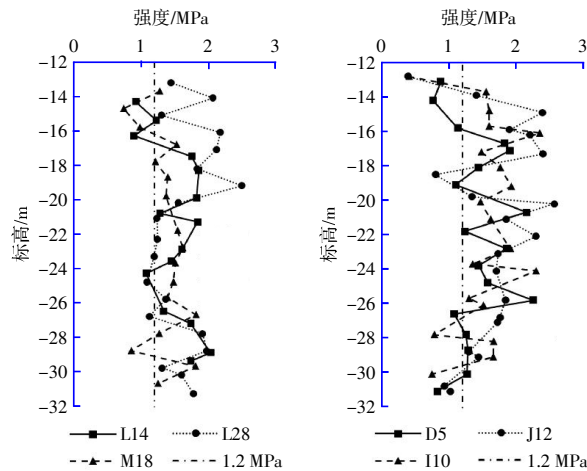


图 6 DCM 芯样无侧限抗压强度曲线

表 2 无侧限抗压强度结果及变异系数统计表

桩号	试验龄期/d	综合取芯率/%	桩身均匀性描述	估算 60 d 强度平均值/ MPa	变异系数	桩底持力层	
						土性	标贯击数/击
L14	118	100.00	均匀性良好	1.40	0.27	中粗砂	>50
M18	121	99.50	均匀性良好	1.32	0.24	中粗砂	>50
L28	135	100.00	均匀性良好	1.62	0.24	中粗砂	>50
D5	149	100.00	均匀性良好	1.35	0.33	中粗砂	47
I10	141	100.00	均匀性良好	1.52	0.31	中砂夹粉黏	37
J12	147	100.00	均匀性良好	1.64	0.29	中粗砂	40

5.3 检测结果

各桩体外观质量比较好, 搅拌比较均匀。抽芯检测反映桩的有效桩长、桩体的抗压强度试验值均满足设计要求。桩身水泥分布大部分均匀, 胶结良好, 桩身较为完整、连续, 桩体质量满足设计要求。

6 结语

1) 现场取芯质量检测可见, 水下深层水泥搅拌技术处理过后的软土地基, 其强度和变形模量提高, 地基稳定性增强, 复合地基承载力明显提高, 达到了控制沉降, 稳定地基的目的, DCM 桩在岛壁结构地基处理是有效可行的;

2) 现场取芯后进行无侧限抗压强度试验发现, 部分 DCM 桩的桩顶和桩端的成桩质量较差, 桩体中间段的成桩质量较好, 再加上海上 DCM 施工属于隐蔽工程, 在施工过程中更要严格控制,

确保工程质量, 并应重点加强桩顶和桩端的施工质量控制;

3) 对于 DCM 桩处理软土地基的长期研究较少, 桩体周围的软土在长期作用下会产生大与桩体的沉降位移, 容易导致 DCM 桩受到负摩阻力的作用, 对桩体产生不利影响。因此, 水下 DCM 桩复合地基在软基处理中的应用, 还需进一步深入研究。

参考文献:

[1] 岑文杰, 吕黄, 周红星, 等. 基于悬浮颗粒物沉淀理论 DCM 桩浅表砂层成桩问题分析及应对策略[J]. 施工技术, 2018, 47(S1): 178-181.

[2] 吴加武. DCM 桩在岛体斜坡式围堰地基加固中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(3): 164-167, 193.

[3] 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.

[4] 刘亚平. 海上 CDM 施工中的几个技术问题[J]. 中国港湾建设, 2009(4): 42-45.