

DOI: 10.11779/CJGE2024S10023

# 深层水泥搅拌法加固软基模型试验研究

汪海洋<sup>1,2,3</sup>, 陈平山<sup>1,2,3</sup>, 何丽平<sup>1,2</sup>

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230; 2. 中交交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230;  
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519000)

**摘要:** 为确定水下深层水泥搅拌各种施工参数, 现场试桩需花费较多的时间和成本。依托中交集团 DCM(Deep Cement Mixing) 法加固软基课题, 研发了 DCM 模型试验装置, 开展了 DCM 加固软基叶片改造、土层识别和成桩强度物理模型试验。结果表明: 增加自由叶片后可有效防止水泥搅拌桩在黏土中糊钻问题。不同土层界面处扭矩会发生突变, 通过不同深度处扭矩的变化可以感知不同土层。相同水泥掺量前提下不同土样水泥搅拌桩 14, 28, 60, 90 d 无侧限抗压强度 (UCS) 规律为淤泥质土<黏土<砂土, 在砂土中水泥土强度较大且增长速度较快, 砂层中可以适当减少水泥喷浆量。模型试验研究成果, 可对深层水泥搅拌桩施工提供参考。

**关键词:** 深层水泥搅拌法; 糊钻; 软基; 模型试验

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)S1-0170-05

作者简介: 汪海洋(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水利水电工程软基加固和抽水蓄能地下洞室群相关工作。E-mail: 79303633@qq.com。

## Model tests on consolidation of soft foundation by deep cement mixing method

WANG Haiyang<sup>1,2,3</sup>, CHEN Pingshan<sup>1,2,3</sup>, HE Liping<sup>1,2</sup>

(1. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China; 2. CCCC Key Lab of Environmental Protection & Safety in Foundation Engineering of Transportation, Guangzhou 510230, China; 3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519000, China)

**Abstract:** In order to determine various construction parameters of underwater deep cement mixing, the field tests needs more time and cost. Based on the (deep cement mixing) DCM method of China Communications Group, the DCM model test devices are developed, and a series of tests are carried out including the blade upgrading, soil layer identification and unconfined compressive strength (UCS) tests. The tests results indicate that adding free blades can effectively prevents blade wrapping issues in clay soils using the DCM method. The torque at the interface of different soil layers changes abruptly, and different soil layers can be identified by the change of torque at different depths. Under the same cement content conditions, the UCS of the cement mixing piles with different soil samples cured 14, 28, 60 d and 90 d is that silt soil < clay < sandy soil. In sandy soil, the compressive strength of the cement soil is larger and the growth rate is faster than that of clay, and the amount of cement grouting in sand layer can be reduced. The results of model tests may provide reference for deep cement mixing piles.

**Key words:** deep cement mixing; wrapping drilling; soft foundation; model test

## 0 引言

物理模型试验具有操作简便、成本低、可模拟工况多等诸多优点而得到广泛应用。深层搅拌法是以水泥或石灰等固化剂为原材料, 通过搅拌机械与土体原位搅拌达到加固地基的目的。DMM (deep mixing method)<sup>[1]</sup>从日本和韩国引进, 具有对周边构筑物沉降影响小、施工周期短和泥浆零排放等诸多优点<sup>[2]</sup>。中国习惯称之为深层水泥搅拌法 (deep cement mixing, 简称“DCM”)<sup>[3]</sup>。DCM 工法适用范围包括陆地和水上建/构筑物地基。该工法于 1975 年在日本

得到推广<sup>[4]</sup>。

岩土工程中糊钻现象十分普遍, 糊钻严重影响成桩强度。搅拌桩在钻进中的糊钻现象见图 1。沈海姣等<sup>[5]</sup>通过改进三翼钻头及施工工艺, 解决了糊钻问题。大量学者对水泥搅拌桩进行了模型试验, 大多模型试验局限于在室内配合比试验基础上开展, 研究重点集中在不同龄期、不同含水量和外添加剂对水泥土力学特性 (抗压强度、渗透性和弹性模量等) 的影响。搅拌

过程是在室内搅拌机进行的, 搅拌过程不能模拟实际叶片搅拌的成桩过程。很少有学者对考虑搅拌过程的水下软基加固开展模型试验研究, 对随钻过程土层识别研究较少。Ahdyeh 等<sup>[6]</sup>采用大小 2 种不同搅拌设备和 3 种不同养护条件(潮湿条件、水养、不同含盐量密封容器吸入条件)对水泥土进行了室内试验, 得出搅拌方式和养护条件对水泥土强度有显著影响的结论。Masaki<sup>[7]</sup>对搅拌叶片的糊钻现象进行研究, 提出了喷雾化水泥浆和添加分散剂可以提高水泥土的流动性, 减轻叶片糊钻现象。

基于此, 依托中交集团 DCM 法加固软基课题研发了一套模型试验装置, 开展了搅拌叶片改造试验, 并在下贯过程中开展了土层识别试验研究, 探究了不同水泥掺量、不同龄期对水泥土成桩强度影响规律。



图 1 淤泥质土和黏土糊钻  
Fig. 1 Paste drilling of silty soil and clay

## 1 物理模型试验装置简介

### 1.1 DCM 试验系统及试验装置

根据搅拌桩特点及试验需求, 设计物理模型试验装置由搅拌、喷水、喷浆装置、架立及行走装置、记录装置、控制装置等组成, 试验装置具有搅拌、下贯、喷浆、提升和左右移动等功能。搅拌装置安装有扭矩传感器, 可以实时测定和记录搅拌和下贯过程土层的扭矩。物理模型试验装置总体结构及配套装置如图 2 所示, 其参数见表 1。



图 2 物理模型试验装置图  
Fig. 2 Physical model test devices

表 1 模型与原型关键参数的对比表

Table 1 Comparison of key parameters of model and prototype

序号	关键参数	原型	模型
1	单桩直径/mm	1300~1600	160
2	每米切土次数/ (r·m <sup>-1</sup> )	450~1500	300~1500
3	钻杆转速/(r·min <sup>-1</sup> )	20~60	10~50
4	下贯及提升速度/ (m·min <sup>-1</sup> )	0.3~1.0	0~0.5

### 1.2 物理模型试验参数及相似比

相似比的选择是物理模型试验中的一个关键环节。相似比主要包括结构的几何形状、模型尺寸、桩的长径比等。为模拟实际桩体大小, 同时为在钻头和钻杆中连接相关管道及设备预留足够的空间, 本文原型与模型的尺寸相似比取 10:1。模型中钻杆直径 50 mm, 单叶片长度 55 mm, 宽度 20 mm, 厚度 3 mm。室内模型试验模拟水泥搅拌桩成桩直径为 160 mm。为简化模型, 叶片设计为一层。

## 2 DCM 模型试验

### 2.1 试验准备及制样

试验土样从项目现场取回, 试验前通过室内试验测得淤泥的天然含水率为 83.9%, 黏聚力 1.43 kPa, 内摩擦角 5.9°。淤泥质土的液限  $W_L$  为 49, 塑限  $W_P$  为 24.9, 塑性指数  $I_P$  为 24.1。采用石井牌硅酸盐水泥 R32.5, 水灰比为 0.9。土样分层装入模型筒。筒的直径为 50 cm, 高为 50 cm, 模型筒材料为铸铁。每层土的厚度控制在 15 cm, 每装入一层土样, 用木板压实, 接着装另一层土样直至装完所需土样, 土样装完后静置 2 d 再开始试验。

根据模拟土样深度的不同, 模型筒设置为 1~3 节。

### 2.2 叶片改造试验

搅拌桩钻头在黏结力较强的土层容易糊钻。地质条件和钻头结构是影响糊钻的主要原因。在叶片上方增加一组不随钻杆转动的自由叶片, 自由叶片通过两个半圆环安装在钻杆上。自由叶片比搅拌叶片长 5 mm, 便于刮土, 自由叶片长 60 mm, 钻杆转动时, 自由叶片和底部的搅拌叶片形成变化的相对角度, 切削黏在叶片上的泥土, 防止糊钻。安装好的自由叶片见图 3。

通过加装自由叶片后对黏土保持相同转速和下贯速度进行搅拌, 对比加装自由叶片前后试验过程, 发现加装自由叶片后, 黏土地层中糊钻现象得到明显改善。图 4 是黏土试样加自由叶片搅拌完成后提升钻杆搅拌叶片露出泥面的情景。



图 3 搅拌头上方自由叶片

Fig. 3 Free blade above head



图 4 黏土加自由叶片搅拌完提升

Fig. 4 Increase of clay adding free blades after mixing

### 2.3 土层识别试验

#### (1) 试验原理

利用埋设在钻杆里的扭矩传感器，在下贯过程记录不同深度的扭矩，通过扭矩的变化来识别土层。在两种不同土层分界面处，由于土性差异不同土样的抗剪强度有较大的不同，其外部表征为在两种不同土层界面处扭矩会发生突变。

#### (2) 试验过程

土层识别试验按试验前准备装样、下贯搅拌、提升和数据处理 4 步进行。

##### a) 装样

对复合土层，设计 2 种不同土样组合，第 1 种组合为 2 种不同土样，从上至下依次为淤泥（厚度为 40 cm）和砂（厚 30 cm）；第 2 种组合为 3 种不同土样，从上至下依次为淤泥质土（厚度为 40 cm）、黏土（厚 30 cm）和砂土（厚 30 cm）。

##### b) 下贯搅拌

为了研究下贯过程扭矩变化，下贯速度、转速和提升速度都设置为常量，下贯和提升速度均为 0.1 m/min，转速为 30 r/min，叶片数为 3 个，计算叶片切土次数为 900 r/m。

##### c) 提升

搅拌完成后，提升钻杆，提升速度为 0.1 m/min。

##### d) 数据处理

试验结束后，通过读取下贯过程的扭矩和深度等数据，进行绘图。试验获得复合土层不同下贯深度和扭矩的关系曲线见图 5, 6。

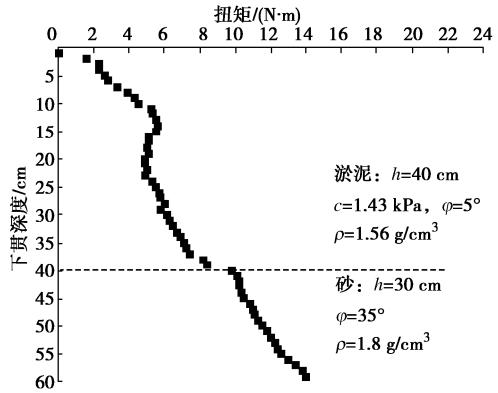


图 5 淤泥和砂下贯深度和扭矩的关系

Fig. 5 Relationship between depth and torque of silt and sand

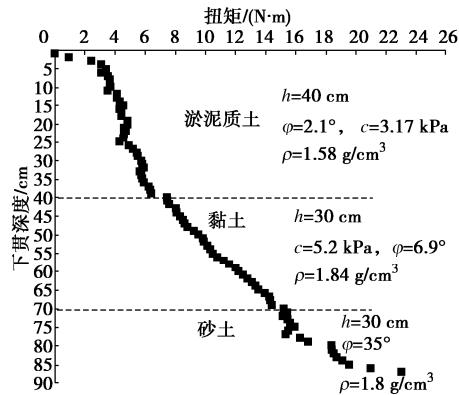


图 6 淤泥质土+黏土+砂土不同下贯深度和扭矩关系

Fig. 6 Relationship between depth and torque of silty soil, clay and sand

从图 5 可知，随着深度增加，扭矩随之增加。在 0~0.4 m 淤泥深度范围内，最大扭矩为 8 N·m，在 0.4~0.6 m 砂层范围内，最大扭矩为 16 N·m，由淤泥层进入砂层，在界面处扭矩发生突变，主要原因是砂的抗剪强度比淤泥大，搅动砂比搅拌淤泥需要克服土体做功，需要更大的能量。

从图 6 可知，0~0.4 m 淤泥质土范围内，最大扭矩为 7.8 N·m。在 0.4~0.7 m 黏土层范围内，最大扭矩为 15 N·m，扭矩增幅为 48%。在 0.7~0.9 m 砂土层范围内，最大扭矩为 24 N·m，扭矩增幅为 9 N·m，砂土中每延米扭矩增幅比黏土层约大 50%。

### 2.4 成桩强度试验

#### (1) 试验过程及养护条件

针对室内模型试验，分别对淤泥质土、黏土及砂土设计 3 种不同的水泥掺量 170, 220, 270 kg/m<sup>3</sup>（水泥掺量定义：每立方原状土中掺入水泥的重量），水灰比为 0.9，并测试 4 种不同的养护龄期（14, 28, 60, 90 d）对应的水泥土无侧限抗压强度（简称“UCS”）。主要工艺参数：转速为 30 r/min，下贯速度和提升速度为 0.1 m/min，注浆速率为 4~6 L/min。水泥土搅拌完成后，采用湿抓法<sup>[8]</sup>取样，将试样装入模具，放在

20+5° 试验室静置 48 h 后拆模。每种水泥掺量、每种龄期各制备 6 个水泥土试样。

养护条件按《水泥土配合比试验规程》推荐的放入养护室的水槽中, 水面高出试件表面不应小于 20 mm。养护室通过温度调节器控制室内温度在 20+1°。将水泥土试件养护至规定龄期, 分别测试不同龄期的无侧限抗压强度。试验采用微机控制电液伺服万能试验机, 采用应变控制方式加载, 加载速率为 0.03 kN/s, 加载直至试件破坏并记录破坏荷载。主要步骤为①制备土样→②配置水泥浆→③刷脱模剂→④搅拌成桩⑤湿抓取样→⑥水中养护→⑦达到设计龄期 UCS 强度试验。无侧限抗压强度试验见图 7。

试验完成后, 取每组中 6 个试样抗压强度的平均值作为水泥土的抗压强度值。



图 7 水泥土芯样 UCS 实验

Fig. 7 UCS tests on cement soil mixing core

### (2) 成桩强度试验施工工艺参数

通过调研日本、韩国、新加坡等国应用水泥搅拌桩加固软土的工程实例, 分析确定了模型试验工艺流程及相关工艺参数, 采用钻头下贯阶段不注浆, 在提升阶段注浆。龄期、外添加剂、养护方式和搅拌方式等对水泥土强度有较大影响。

本文将淤泥质土和砂土作为研究对象。水泥掺量分为 3 组, 分别为 170, 220, 270 kg/m<sup>3</sup>, 水灰比为 0.9, 下贯和提升速率均为 0.1 m/min, 搅拌叶片转速为 30 r/min。

### (3) 水泥掺量、龄期对水泥土 UCS 的影响

试件养护龄期达到规定要求后, 从水中取出擦干水分, 分别测试 14, 28 d 室内无侧限抗压强度。无侧限抗压强度 (UCS 试验) 见图 7, 不同土样不同水泥掺量、不同龄期无侧限抗压强度见图 8, 9。

由图 8 可知, 当水泥掺量为 170 kg/m<sup>3</sup> 时, 淤泥质土地层中水泥搅拌桩 14, 28, 60, 90 d 无侧限抗压强度 (UCS) 平均值分别 0.2, 0.25, 0.31, 0.48 MPa, 相对于 14 d 无侧限抗压强度增幅分别为 25%, 55%, 140%; 水泥掺量为 270 kg/m<sup>3</sup> 时水泥土搅拌桩 UCS 14, 28, 60, 90 d 平均值分别为 0.35, 0.52, 0.54, 0.7 MPa, 相对 14 d 无侧限抗压强度增幅分别为 48.6%, 54.3%, 100%。

由图 9 可知, 当水泥掺量为 170 kg/m<sup>3</sup> 时, 砂土中水泥土搅拌桩 14, 28, 60, 90 d UCS 平均值分别为 4.4, 5.3, 5.4, 5.8 MPa, 相对 14 d UCS 增幅分别为 20.5%, 22.7%, 31.8%。当水泥掺量为 270 kg/m<sup>3</sup> 时, 砂土中水泥土搅拌桩 28, 60, 90 d UCS 平均值分别为 10.8, 11.6, 13 MPa, 相对 14 d 无侧限抗压强度增幅分别为 28.6%, 38.1%, 54.8%。

砂土中水泥搅拌桩 UCS 值较大, 水泥掺量为 170 kg/m<sup>3</sup>, UCS 在 4 MPa 以上。

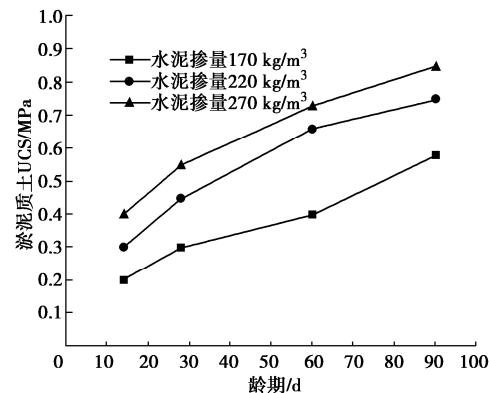


图 8 淤泥质土不同水泥掺量不同龄期抗压强度

Fig. 8 Compressive strengths of silty soil with different cement contents cured at different ages

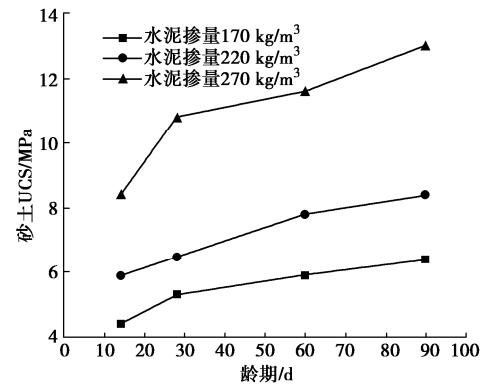


图 9 砂土不同水泥掺量不同龄期抗压强度

Fig. 9 Compressive strengths of sand with different cement contents cured at different ages

原状淤泥质土含水率为 83.9%, 水泥掺量对浅层淤泥质土的无侧限抗压强度 UCS 的影响不明显。这可能与淤泥质土中含水率较高, 且浅表层土体上覆土压力较小有关。高含水率的淤泥质土的水泥土的无侧限抗压强度随水泥掺量的增加有限。

## 3 结 论

本文采用深层水泥搅拌法加固软基方案开展模型试验, 对黏土糊钻现象、土层识别和成桩强度进行了研究。结合模型试验获得的数据, 探究了搅拌叶片下

贯过程中扭矩和下贯深度的关系, 得到 5 点结论。

(1) 在黏结力较强的黏土层及含水率较高的黏土层中, 在搅拌叶片上方增加自由叶片可有效防止糊钻。

(2) 搅拌桩下贯过程中扭矩和下贯深度、土的类别关系密切, 在不同土层界面处扭矩会发生突变, 砂土中每延米扭矩增幅比黏土层约大 50%。

(3) 水泥土搅拌桩强度模型试验表明: 加固体抗压强度和在水泥掺量、龄期正相关。龄期在 28 d 前, 加固体抗压强度有明显的增长。

(4) 高含水率的淤泥质土采用水泥搅拌桩加固时, 成桩强度较低。

(5) 相同龄期相同水泥掺量情况水泥土搅拌桩桩身强度规律是, 淤泥质土<黏土<砂土。水泥掺量为 170 kg/m<sup>3</sup> 砂土中水泥搅拌桩 UCS 值在 4 MPa 以上, 在砂土中可适当减少水泥掺量。

#### 参考文献:

- [1] PARK J M, JO Y S, JANG Y S. Reliability assessment of geotechnical structures on soils improved by deep mixing method i: data collection and problem setting[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, **23**(1): 63-73.
- [2] LIN K Q, WONG I H. Use of deep cement mixing to reduce settlements at bridge approaches[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, **125**(4): 309-320.
- [3] KITAZUME M, GRISOLIA M, LEDER E, et al. Applicability of molding procedures in laboratory mix tests for quality control and assurance of the deep mixing method[J]. Soils and Foundations, 2015, **55**(4): 761-777.

- [4] 日本沿岸技术研究中心. 海上施工中的深层搅拌法技术手册(修订版) [M]. 东京: 日本沿岸技术研究中心, 2008. (Japan Coastal Technology Research Center. Technical Manual of Deep Mixing Method in Offshore Construction (Revised Version) [M]. Tokyo: Japan Coastal Technology Research Center, 2008. (in Chinese))
- [5] 沈海姣, 王恩. 气举反循环工艺施工过程中发生糊钻的钻头改进研究[J]. 城市建筑, 2021, **18**(24): 157-159. (SHEN Haijiao, WANG En. Study on the improvement of bailed drill bits during the construction of gas lift reverse circulation[J]. Urbanism and Architecture, 2021, **18**(24): 157-159. (in Chinese))
- [6] MOSADEGH A, SZYMKIEWICZ F, NIKRAZ H. An experimental investigation of the impact of specimen preparation and curing conditions on cement-treated material strength (deep mixing method)[J]. Australian Journal of Civil Engineering, 2017, **15**(1): 49-60.
- [7] KITAZUME M. Recent development and future perspectives of quality control and assurance for the deep mixing method[J]. Applied Sciences, 2021, **11**(19): 9155.
- [8] 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. (LIU Zhijun, CHEN Pingshan, HU Liwen, et al. Testing methods for underwater composite ground with deep cement mixing[J]. Port & Waterway Engineering, 2019(2): 155-162. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)