

DOI: 10.11779/CJGE201910018

# 絮凝剂和缓凝剂对水泥固化疏浚淤泥浆效率的影响研究

章荣军<sup>1</sup>, 董超强<sup>1</sup>, 郑俊杰<sup>\*1</sup>, 陆展<sup>2</sup>

(1. 华中科技大学岩土与地下工程研究所, 湖北 武汉 430074; 2. 中南建筑设计院股份有限公司, 湖北 武汉 430064)

**摘 要:** 在疏浚淤泥浆堆场表面形成硬壳层工作平台往往是进行堆场地基处理、缩短堆场周转期限的必要环节, 但既有途径大多都涉及到在极端不利环境(泥沼)下的人力劳作, 机械化程度低且施工速度极慢。鉴于此, 基于常规水泥固化法(简称CCSM), 提出了采用絮凝-固化联合法(简称FSCM)处理表层疏浚淤泥浆形成硬壳层的新思路, 通过开展一系列室内模型试验, 探讨了在处理疏浚淤泥浆时用FSCM代替CCSM(即引入絮凝剂和缓凝剂)的可行性和必要性, 并重点分析了絮凝剂和缓凝剂剂量对水泥固化淤泥浆效率的影响规律。结果表明: FSCM能“飞跃式”提升水泥对疏浚淤泥浆的固化效率, 在最优絮凝剂剂量条件下可将不排水抗剪强度提高至CCSM的4.8倍以上; 另外, 向FSCM中引入缓凝剂还能明显强化颗粒物理沉积/固结程度, 进一步促进中晚期的强度发展, 且在最优缓凝剂剂量条件下, 不排水抗剪强度比不掺入缓凝剂时的不排水抗剪强度高35%以上。

**关键词:** 疏浚淤泥浆; 固化; 絮凝; 缓凝; 抗剪强度; 含水率

中图分类号: TU449

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)10-1928-08

**作者简介:** 章荣军(1983—), 男, 博士, 副教授, 主要从事疏浚淤泥固化与再生利用方面的研究工作。E-mail: ce\_zhangrj@hust.edu.cn。

## Influences of flocculant and retarder on solidification efficiency of cement in treatment of dredged mud slurry

ZHANG Rong-jun<sup>1</sup>, DONG Chao-qiang<sup>1</sup>, ZHENG Jun-jie<sup>1</sup>, LU Zhan<sup>2</sup>

(1. Institute of Geotechnical and Underground Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Central-South Architectural Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430064, China)

**Abstract:** It is usually necessary to build a working platform on the surface of the dumping site of dredged mud slurry for the purpose of rapid improvement of the dumping site so as to shorten the period of land occupation. Nevertheless, most of the existing methods for building the working platform need cumbersome manual work under extremely adverse conditions, and thus show very low construction automation and speed. To resolve this problem, a new method is proposed, i.e., the flocculation-solidification combined method (FSCM) for building the working platform based on the conventional cement stabilization method (CCSM). A series of laboratory model tests are performed to demonstrate the feasibility and necessity to substitute CCSM for FSCM in treatment of dredged mud slurry at extra high water content. Effort is also made to gain an insight into the influences of flocculant dosage and retarder dosage on the solidification efficiency of cement in treatment of mud slurry. The results indicate that FSCM is able to dramatically enhance the solidification efficiency of cement in treatment of mud slurry. When the optimal dosage of flocculant is added, the undrained shear strength produced by FSCM is at least 4.8 times larger than that produced by the corresponding CCSM. Moreover, introducing retarder into FSCM can further intensify the physical sedimentation/consolidation process, and thus promote the strength development at later curing age. In comparison with a FSCM case without adding retarder, the corresponding FSCM case with the optimal dosage of retarder shows a much higher undrained shear strength.

**Key words:** dredged mud slurry; solidification; flocculation; retardation; undrained shear strength; water content

## 0 引 言

为了治理水域环境、扩大蓄水容积或升级航运线路, 中国每年需要从江河湖库海等水域疏浚数亿方(水下方)底泥, 且大多采用水力疏浚(绞吸或水力冲挖)

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2016YFC0800200); 国家自然科学基金项目(51678266)

**收稿日期:** 2019-01-26

**\*通讯作者** (E-mail: zhengjj@hust.edu.cn)

方式进行施工, 最终每年会产生数十亿方不能直接资源化利用的超高含水率淤泥浆 (含水率甚至可能高达 500% 以上), 其弃置问题给管理部门带来了沉重的经济负担和环境压力<sup>[1-2]</sup>。目前一种常见的处置方式是: 将疏浚淤泥浆放置于由耕地、鱼塘等形成的大面积堆场内, 让其自然沉积及风干固结。但通常疏浚底泥浆中细颗粒 (黏粒和胶粒) 含量高, 自然沉积及排水固结速度缓慢, 堆场占地周期极长<sup>[3]</sup>, 再加上新型城镇化不断深入带来的土地资源日益短缺困局, 堆场占地问题逐渐成为相关管理部门不可承受之“痛”。所以, 工程界不断尝试采用各种地基处理方法 (如真空预压法、电渗法) 来加速疏浚淤泥浆的颗粒沉积和排水固结过程, 进而缩短堆场的周转期限或复耕时间。然而, 新近疏浚的淤泥浆堆场呈泥沼状态, 几乎没有承载能力, 不管采用何种方法, 地基处理施工设备都难以进场, 致使处理进度严重滞后或成本显著增加。

工程界已尝试了多种途径在疏浚淤泥浆堆场表层形成硬壳层<sup>[4-6]</sup>, 但都涉及到在极端不利环境 (泥沼) 下的人力劳作, 机械化程度低且施工速度极慢。相比之下, 分区块加入水泥等固化剂并就地搅拌形成硬壳层的方法机械化程度更高, 已引起工程界的广泛关注。但从文献报道的工程案例来看<sup>[7-8]</sup>, 常规水泥固化法 (以下简称 CCSM) 目前仅用于处理含水率相对较低 (<180%) 的淤泥, 未见直接处理疏浚淤泥浆的实例。事实上, 大量关于水泥固化淤泥强度发展的试验结果已经表明, CCSM 的固化效率随淤泥含水率升高而急剧降低<sup>[9-12]</sup>。对于新近疏浚的淤泥浆 (含水率通常 >300%) 而言, CCSM 的固化效率微乎其微<sup>[13]</sup>, 有必要采取措施降低待固化层的有效含水率。

鉴于上述原因, 笔者构想了絮凝-固化联合法 (以下简称 FSCM) 在大面积疏浚淤泥浆堆场表层形成硬壳层 (工作平台) 的新思路, 实施流程如图 1 所示。其核心思想是: 在水力冲填堆场表层淤泥浆时向泵管内先后加入固化剂 (缓凝剂) 和絮凝剂; 利用缓凝剂抑制固化剂的早期水化速率, 推迟固化反应进程<sup>[14-16]</sup>; 利用絮凝调理技术促使土颗粒和固化剂颗粒在固化反应大量进行之前迅速凝聚沉积<sup>[17-19]</sup>, 降低沉积层有效含水率和孔隙比, 形成更密实的土骨架; 其后固化反应在沉积层内充分进行, 胶结作用在更密实的土骨架中变得更为突出; 此外, 因固液分离而产生的上清液 (因少量固化成分的早期水化而呈碱性) 可通过碳化

中和后排放<sup>[20]</sup>。

本文目标是: 通过开展室内模型试验, 从岩土工程的角度验证 FSCM 的可行性。具体研究内容包括两个方面: ①测试 FSCM 和 CCSM 处理疏浚淤泥浆的物理力学指标变化过程, 辨析 FSCM 相对于 CCSM 的优越性, 并揭示絮凝剂对水泥固化淤泥浆效率的影响规律和内在机理; ②探究缓凝剂对 FSCM 处理效率的影响程度及其内在原因。

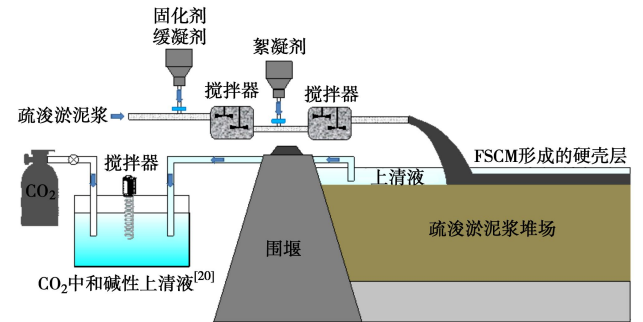


图 1 利用 FSCM 在堆场表层形成硬壳层流程图  
Fig. 1 Implementation process for forming a platform on dumping site surface via proposed FSCM

### 1 室内模型试验

由于提出 FSCM 的主要目的是在疏浚淤泥浆堆场表面形成承载工作平台, 抗剪强度是 FSCM 处理淤泥浆所形成的人工材料的最重要性能指标, 所以本文室内模型试验重点关注经过不同方法处理淤泥浆的强度发展规律。考虑到早期不同方法处理淤泥浆试样的强度很低, 且制样过程中 FSCM 处理淤泥浆的固液分离现象非常明显, 制备常规三轴试样颇为困难, 所以本文通过在模型箱内制备试样并待养护后开展十字板剪切试验 (VST) 来获取试样的不排水抗剪强度  $s_u$  发展规律。另外, 为进一步揭示絮凝剂和缓凝剂对水泥固化疏浚淤泥浆效率的影响机理, 在每次 VST 完成后, 还测定了相应测点位置处试样的养护后含水率  $w_{ac}$  (定义为养护后试样所含水质量与固体颗粒 (包括土颗粒、未反应的固化剂颗粒和胶结产物) 质量之比, % )。

#### 1.1 试验材料

试验所用泥样有两种, 分别记为 Mud I 和 Mud II, 其基本特性见表 1, 颗粒级配曲线如图 2 所示, 图中显示 Mud I 的砂粒、粉粒、黏粒和胶粒分别为 0.5%, 79.4%, 20.1%, Mud II 的砂粒、粉粒、黏粒和胶粒分别为 2.2%, 45.8%, 52%。显然 Mud II 相比 Mud I 平均粒径更小, 且黏粒和胶粒含量更高。

表 1 试验泥样的基本特性

Table 1 Basic properties of two types of muds used in laboratory experiments

指标	土粒相对密度 $G_s$	液限 $w_l/\%$	塑限 $w_p/\%$	有机质含量 $m_o/\%$	砂粒 (0.075~2 mm)/%	粉粒 (0.002~0.075 mm)/%	黏粒和胶粒 (< 0.002 mm)/%
Mud I	2.69	53.7	26.5	4.41	0.5	79.4	20.1
Mud II	2.66	81	34	4.20	2.2	45.8	52



试验所用固化剂为 425 标号普通硅酸盐水泥, 其中  $\text{CaO}$  含量为 59.71%,  $\text{SiO}_2$  含量为 22.92%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 6.09%。所用絮凝剂为浓度 0.1% 的 AN926SH 型聚丙烯酰胺 (PAM) 溶液 (由 PAM 颗粒与水按质量比 1:1000 配置而成)。所用缓凝剂为浓度 5% 的焦磷酸钠溶液。

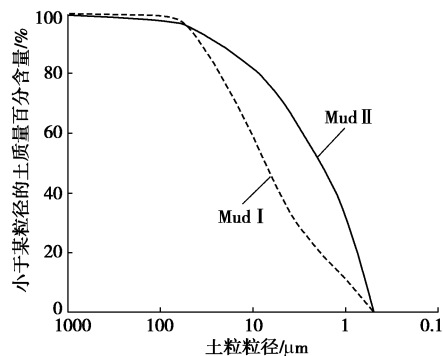


图 2 试验所用泥样的颗粒级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curves of two types of muds used in laboratory experiments

## 1.2 试样准备及测试流程

开展 VST 的试样是在可拆卸的刚性透明有机玻璃模型箱 (如图 3 所示) 内制备而成。模型箱采用透明材料是为了便于观察絮凝调理后固液分离过程; 而设计为可拆卸式的原因是: FSCM 处理的淤泥浆固液分离显著, 但实验室高精度十字板剪切仪板头的贯入距离有限, 待固液分离完成后可拆除上半部分, 仅对底座泥样开展 VST。

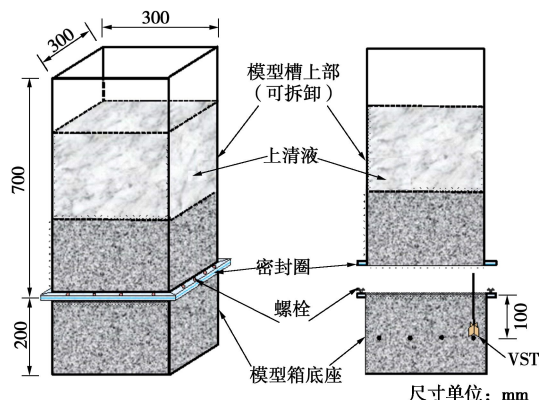


图 3 试验所用可拆卸模型箱示意图

Fig. 3 Configuration and dimensions of detachable model container

试样制备和测试的具体流程如下:

(1) 制备浓度 0.1% 的 PAM 溶液 (絮凝剂) 和浓度 5% 的焦磷酸钠溶液 (缓凝剂) 备用。

(2) 采用大型搅拌机 (80 L 容量) 制备具有设定含水率的淤泥浆试样备用。

(3) 依照设定的配合比, 依次添加一定量的固化剂和缓凝剂 (部分工况不必添加缓凝剂), 并按照统一

流程充分搅拌制备成固化剂-淤泥混合浆液。统一的搅拌流程共耗时 10 min, 包括 5 min 机械搅拌、2 min 手工搅拌 (去除机械搅拌的“死角”) 和 3 min 的二次机械搅拌。

(4) 向固化剂-淤泥混合浆液中加入设定剂量的絮凝剂 (少部分工况不必添加絮凝剂), 并以 90 r/min 的速度开始搅拌, 当开始出现絮团后逐渐降低搅拌速度, 直至絮团大小和形态达到了稳定状态。

(5) 将混合浆液注入可拆卸模型箱内, 用塑料薄膜盖住模型箱顶部, 并将模型箱置于标准养护室 (温度  $=20 \pm 3^\circ\text{C}$ , 湿度  $\geq 90\%$ ) 内养护。

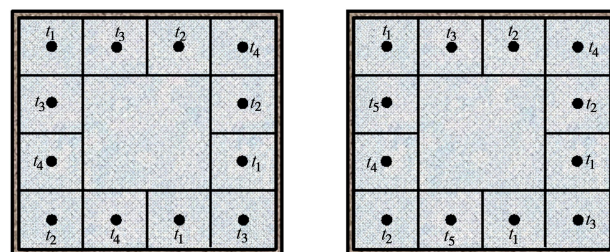
(6) 当养护至第一个目标龄期后, 抽出模型箱内的上清液、清除模型箱上部 (可拆卸段) 范围内的土样、拆卸模型箱上部、刮平模型箱底座表面 (如图 4 所示)。

(7) 按照规定的测点布置方案开展该目标龄期的 VST 试验测定其不排水抗剪强度  $s_u$ 。规定的测点布置方案如图 5 所示 (图中  $t_1 \sim t_5$  分别表示第 1~5 个目标养护龄期), 每个测点处 VST 板头的贯入深度为 10 cm。



图 4 所制备的典型试样照片

Fig. 4 Typical specimen prepared in this study



(a) 4个目标龄期工况

(b) 5个目标龄期工况

图 5 VST 测点布置方案图

Fig. 5 Arrangement of VST measuring points

(8) 在步骤 (7) 的 VST 测点处取样测定试样养护后含水率  $w_{ac}$ 。

(9) 该目标龄期测定完毕后, 在模型箱底座表面铺设湿润土工布 (定时洒水保持其湿润状态), 覆盖保鲜膜, 确保土样始终处于近似饱和状态, 并继续置于

标准养护室内养护。

(10) 当达到下一个设定养护龄期后, 重复步骤 (7)~(9), 直至所有目标龄期的物理力学指标均测定完毕。

1.3 试验工况

为了充分揭示絮凝剂和缓凝剂对水泥固化疏浚泥浆强度特性的影响程度和规律, 本文考虑 3 个试验组 (A、B 和 C) 共计 14 种试验工况。A 组 (4 种工况) 为 CCSM 处理疏浚泥浆工况组 (对照组); B 组 (6 种工况) 和 C 组 (4 种工况) 都是 FSCM 处理疏浚泥浆工况组, 但 B 组不添加缓凝剂、C 组添加缓凝剂。14 种试验工况具体所采用的淤泥浆类型、配合比及目标养护龄期汇总列于表 2。其中,  $w_{ei}$  表示等效初始含水率, 定义为初始状态下混合浆液中水的总质量 (包括絮凝剂和缓凝剂溶液中的水, 但不计固化剂化学反应所消耗水量) 与干土颗粒质量 (不包括固化剂质量, 下同) 之比;  $w_c$  表示固化剂掺量, 定义为水泥质量与干土颗粒质量之比;  $w_f$  表示絮凝剂剂量, 定义为 PAM 干粉质量与干土颗粒质量之比;  $w_r$  表示缓凝剂剂量, 定义为焦磷酸钠干粉质量与水泥质量之比。每种试验工况考虑 4~5 个目标养护龄期。

表 2 本文试验工况汇总表

Table 2 Testing programs in this study							
试验组	试验工况	淤泥类型	$w_{ei}$ /%	$w_c$ /%	$w_f$ /%	$w_r$ /%	$t$ /d
A	A <sub>1</sub>	I	457	30	0	0	7, 14, 28, 68
	A <sub>2</sub>	II	650	40	0	0	7, 14, 21, 28
	A <sub>3</sub>	II	550	40	0	0	7, 14, 21, 28
	A <sub>4</sub>	II	450	30	0	0	7, 14, 21, 28
B	B <sub>1</sub>	I	457	30	0.157	0	7, 14, 28, 68
	B <sub>2</sub>	II	650	40	0.157	0	7, 14, 21, 28
	B <sub>3</sub>	II	550	40	0.157	0	7, 14, 21, 28
	B <sub>4</sub>	II	450	30	0.157	0	7, 14, 21, 28
	B <sub>5</sub>	II	450	30	0.137	0	7, 14, 21, 28
	B <sub>6</sub>	II	450	30	0.197	0	7, 14, 21, 28
C	C <sub>1</sub>	I	557	30	0.157	0.0	3, 7, 14, 21, 28
	C <sub>2</sub>	I	557	30	0.157	0.2	3, 7, 14, 21, 28
	C <sub>3</sub>	I	557	30	0.157	0.4	3, 7, 14, 21, 28
	C <sub>4</sub>	I	557	30	0.157	0.6	3, 7, 14, 21, 28

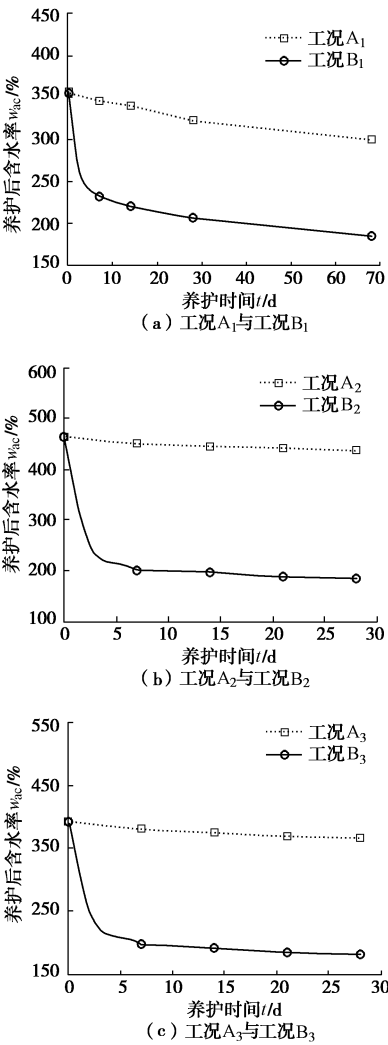
表 2 所列的 14 种试验工况中, 工况 A<sub>1</sub>~A<sub>4</sub> 和工况 B<sub>1</sub>~B<sub>4</sub> 为 4 对具有可比较性的工况, 旨在辨析添加絮凝剂与不添加絮凝剂条件下水泥固化疏浚泥浆强度特性的差异; 工况 A<sub>4</sub>、B<sub>4</sub>~B<sub>6</sub> 之间的区别仅在于絮凝剂剂量不同, 旨在揭示絮凝剂剂量对水泥固化疏浚泥浆强度特性的影响规律; 而工况 C<sub>1</sub>~C<sub>4</sub> 旨在论证缓凝剂剂量对 FSCM 处理疏浚泥浆强度特性的影响规律。

2 试验结果分析

2.1 絮凝剂对水泥固化淤泥浆效率的影响

如前所述, 在 CCSM 中引入絮凝剂的初衷是利用

絮凝剂的电荷中和、桥联吸附和卷扫等作用, 大大压缩淤泥浆中黏粒的双电层厚度, 致使土粒团粒化并显著提升淤泥浆脱水性能, 进而促使土颗粒和固化剂颗粒在固化反应大量进行之前迅速凝聚沉积, 降低沉积层有效含水率和孔隙比, 形成更密实的土骨架。为直接证实这一点, 图 6 对比了工况 A<sub>1</sub>~A<sub>4</sub> (CCSM 工况, 未添加絮凝剂) 和工况 B<sub>1</sub>~B<sub>6</sub> (FSCM 工况, 添加絮凝剂但未添加缓凝剂) 中养护后含水率  $w_{ac}$  随养护时间的发展曲线。结果表明, 对于所有 CCSM 工况, 固液分离现象并不明显, 养护后含水率  $w_{ac}$  随养护时间只是略有减小, 这是由水泥水化反应消耗水分所致; 然而, 絮凝剂的掺入却让固液分离现象变得十分显著, 所有 FSCM 工况 (B<sub>1</sub>~B<sub>6</sub>) 的养护后含水率  $w_{ac}$  在养护初期急剧降低, 并远小于对应的 CCSM 工况的  $w_{ac}$ 。这充分说明, 在 CCSM 法处理超高含水率淤泥浆时引入絮凝剂确实能显著降低沉积层有效含水率和孔隙比, 形成更密实的土骨架。当然, 从图 6 (d) 还可以发现, 对于给定淤泥浆类型、等效初始含水率和固化剂掺量, 不同絮凝剂剂量下水泥固化淤泥浆的养护后含水率  $w_{ac}$  发展曲线不尽相同, 这一点稍后详述。





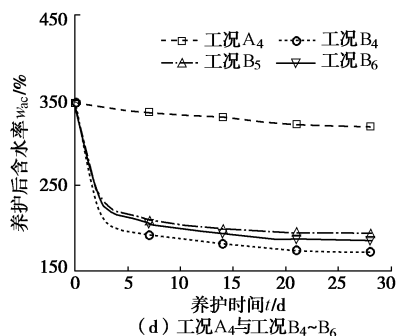
图6 不同絮凝剂剂量下水泥固化淤泥浆  $w_{ac}$  发展对比图

Fig. 6 Comparison among  $w_{ac}$  development curves of cement-stabilized mud slurry samples with various  $w_f$

众多试验结果已经表明,水泥固化淤泥的养护后含水率  $w_{ac}$  越低,不排水抗剪强度往往越高,所以理论上讲絮凝剂的掺入也是有助于水泥固化淤泥浆强度发展的。为了定量描述这一点,图7对照了工况  $A_1 \sim A_4$  (CCSM 工况,未添加絮凝剂)和工况  $B_1 \sim B_6$  (FSCM 工况,添加絮凝剂但未添加缓凝剂)中不排水抗剪强度  $s_u$  随养护时间的发展曲线。由图7可知,对于所有CCSM 工况,各个目标龄期的不排水抗剪强度都不超过 6 kPa,这说明对于超高含水率淤泥浆而言,CCSM 的固化效率极低。但是,引入絮凝剂后,水泥对疏浚淤泥浆的固化效率得到了“飞跃式”的提升,所有 FSCM 工况的不排水抗剪强度达到了其对应的 CCSM 工况的不排水抗剪强度的 4.8 倍以上。这充分论证了在处理超高含水率淤泥浆时 FSCM 相对于 CCSM 的优越性。同样,图7(d)还表明,对于给定淤泥浆类型、等效初始含水率和固化剂掺量,不同絮凝剂剂量下水泥固化淤泥浆的不排水抗剪强度  $s_u$  的发展曲线也不尽相同。

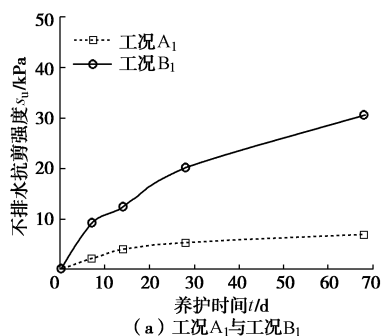
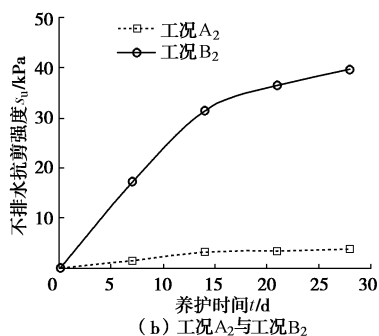
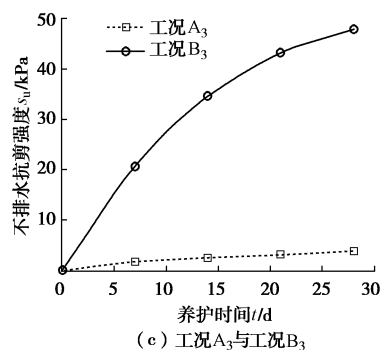
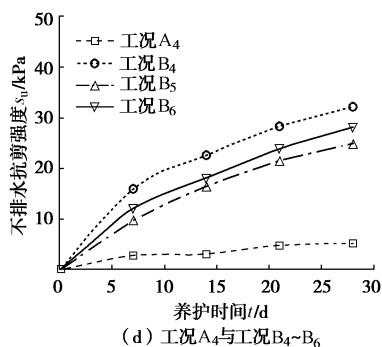
(a) 工况  $A_1$  与工况  $B_1$ (b) 工况  $A_2$  与工况  $B_2$ (c) 工况  $A_3$  与工况  $B_3$ (d) 工况  $A_4$  与工况  $B_4 \sim B_6$ 图7 不同絮凝剂剂量下水泥固化淤泥浆  $s_u$  发展对比图

Fig. 7 Comparison among  $s_u$  gain curves of cement-stabilized mud slurry samples with various  $w_f$

为了进一步阐明絮凝剂剂量对水泥固化淤泥浆养护后含水率  $w_{ac}$  及不排水抗剪强度  $s_u$  的影响规律,将图6(d),7(d)所示的试验结果重新绘制成图8(a)和(b)。从图8(a),(b)中可以清楚地看到,随着絮凝剂剂量的增加,水泥固化淤泥浆养护后含水率  $w_{ac}$  先明显减小然后又慢慢上升,相对应地不排水抗剪强度  $s_u$  先显著增加然后又逐渐下降;养护后含水率  $w_{ac}$  和不排水抗剪强度  $s_u$  同时在 0.157% 处达到极值,这意味着 FSCM 处理疏浚淤泥浆时存在一个最优絮凝剂剂量。从物理机制方面阐述:当絮凝剂剂量超过该最优值后,存在大量絮凝剂分子吸附在颗粒表面,由于絮凝剂分子间距较近,其分子间作用力表现为斥力,进而附着大量絮凝剂分子的颗粒(包括土颗粒、水泥颗粒、缓凝剂颗粒)之间也产生斥力,抑制交联作用,减少产生空间的网状结构;从化学机制方面阐述:由于过量的絮凝剂导致颗粒间交联作用产生空间的网状结构减少,从而减少颗粒之间的有效接触,也即抑制了胶结产物的生成,继而在一定程度上弱化了水泥骨架的强度,宏观表现为过量的絮凝剂会造成 FSCM 处理淤泥强度的降低。因此,缓凝剂超过该最优剂量不仅不能进一步提高水泥对疏浚淤泥浆的固化效率,反而会起削弱作用。

## 2.2 缓凝剂对水泥固化淤泥浆效率的影响

前文已经证实,CCSM 处理的疏浚淤泥浆基本不

会发生固液分离现象, 其强度增长过程可以简单地看成是固化剂化学反应推进过程。相比而言, FSCM 处理的疏浚淤泥浆的固液分离现象颇为显著, 其强度增长过程既与固化剂化学反应进程密切相关, 还受颗粒的物理沉积/固结过程影响。换句话说, 絮凝剂的掺入将水泥固化淤泥浆的强度发展过程变成了固化剂化学反应和颗粒物理沉积/固结的耦合过程。由于固化剂化学反应生成的胶结产物会抑制颗粒物理沉积/固结过程, 所以如果能向 FSCM 中加入一定剂量缓凝剂来延缓固化剂化学反应速率, 则势必会强化颗粒物理沉积/固结程度, 这可能会促进中晚期的强度发展。鉴于此, 本节重点关注缓凝剂对水泥固化淤泥浆效率的影响。

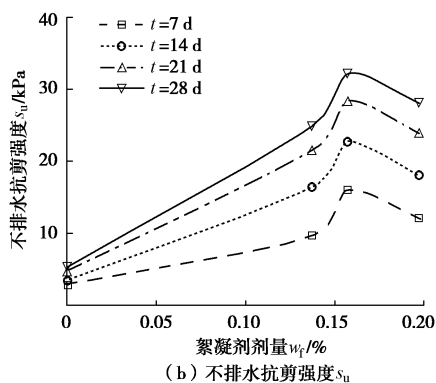
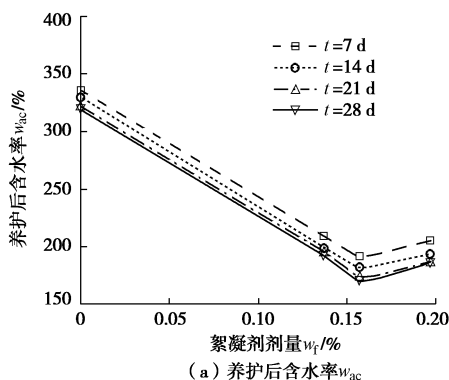


图 8 絮凝剂剂量对水泥固化淤泥浆性质的影响规律

Fig. 8 Effects of flocculant dosage on properties of cement-stabilized mud slurry

图 9 显示了不同缓凝剂剂量下 FSCM 处理淤泥浆的养护后含水率  $w_{ac}$  发展曲线, 图 10 显示了不同缓凝剂剂量下不排水抗剪强度  $s_u$  发展曲线。由图 9, 10 可知, 在 FSCM 中引入缓凝剂不会明显改变养护后含水率  $w_{ac}$  和不排水抗剪强度  $s_u$  的曲线形状, 但却能进一步降低养护后含水率  $w_{ac}$  和进一步提高不排水抗剪强度  $s_u$ 。这表明通过缓凝剂延缓固化剂化学反应速率的确会促进颗粒物理沉积/固结发展程度, 也的确会促进中晚期的强度发展。当然, 不同缓凝剂剂量条件下  $w_{ac}$  和  $s_u$  的发展曲线之间存在较为明显的差异。

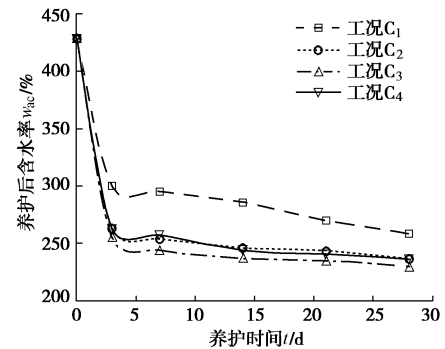


图 9 不同缓凝剂剂量下 FSCM 处理淤泥浆  $w_{ac}$  发展对比图

Fig. 9 Comparison among  $w_{ac}$  development curves of FSCM-treated mud slurry samples with various  $w_f$

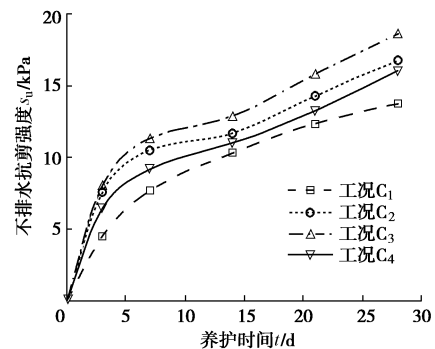
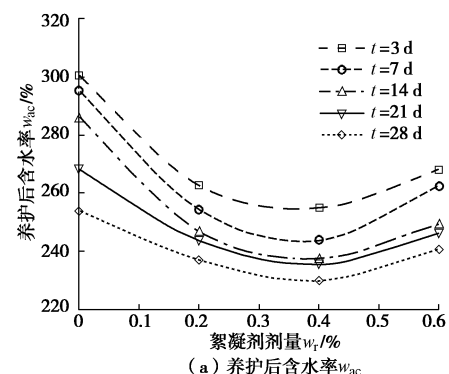


图 10 不同缓凝剂剂量下 FSCM 处理淤泥浆  $s_u$  发展对比图

Fig. 10 Comparison among  $s_u$  gain curves of FSCM-treated mud slurry samples with various  $w_f$

图 11 (a), (b) 分别绘制了养护后含水率  $w_{ac}$  和不排水抗剪强度  $s_u$  随缓凝剂剂量的变化曲线。结果显示, 随着缓凝剂剂量的增加, FSCM 处理淤泥浆的养护后含水率  $w_{ac}$  先明显减小然后又慢慢上升, 而不排水抗剪强度  $s_u$  先逐渐增加然后又逐渐下降; 养护后含水率  $w_{ac}$  和不排水抗剪强度  $s_u$  同时在 0.40% 处达到极值。这说明向 FSCM 中引入缓凝剂存在一个最优剂量 0.40%; 在最优缓凝剂剂量条件下, FSCM 处理淤泥浆的不排水抗剪强度比不掺入缓凝剂时的不排水抗剪强度高 35% 以上; 超过该最优剂量不能进一步提高 FSCM 对疏浚淤泥浆的固化效率, 反而会起抑制作用。这可能是由于过量缓凝剂的使用从一定程度上改变了固化剂化学产物——钙基磷酸盐 (磷酸钙、羟基磷灰石等) [21-23]。



(a) 养护后含水率  $w_{ac}$

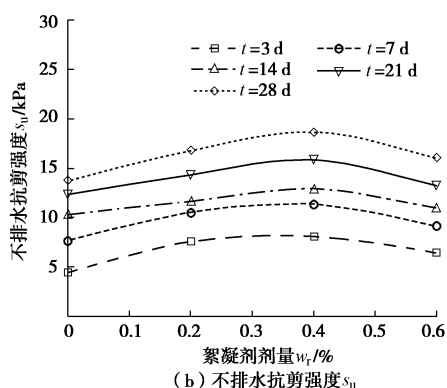


图 11 缓凝剂剂量对 FSCM 处理淤泥浆性质的影响规律

Fig. 11 Effects of retarder dosage on properties of FSCM-treated mud slurry

### 3 结 论

本文着眼于新提出的 FSCM 处理疏浚淤泥浆技术,通过开展一系列室内模型试验,探讨了在 CCSM 处理疏浚淤泥浆的基础上引入絮凝剂和缓凝剂的可行性和必要性,并重点分析了絮凝剂和缓凝剂剂量对水泥固化淤泥浆效率的影响规律和内在机理。得到的主要结论包括:

(1) FSCM (即在 CCSM 处理疏浚淤泥浆时引入絮凝剂)能显著降低沉积层有效含水率和孔隙比,形成更密实的土骨架,从而“飞跃式”提升水泥对疏浚淤泥浆的固化效率(不排水抗剪强度提高至 CCSM 的 4.8 倍以上)。所以,在处理超高含水率淤泥浆时, FSCM 相对于 CCSM 有明显的优越性。

(2) 随着絮凝剂剂量增加,水泥固化淤泥浆养护后含水率先明显减小后慢慢增大,而不排水抗剪强度先显著增加然后逐渐下降,且二者同时达到极值。因此, FSCM 处理疏浚淤泥浆时存在一个最优絮凝剂剂量,超过最优剂量不仅不能进一步提升水泥对疏浚淤泥浆的固化效率,反而会起削弱作用。

(3) 在 FSCM 中引入缓凝剂来延缓固化剂化学反应速率,可以明显强化颗粒物理沉积/固结程度,进一步降低沉积层养护后含水率和孔隙比,进而能够促进中晚期的强度发展。

(4) 随着缓凝剂剂量的增加, FSCM 处理淤泥浆的养护后含水率先明显减小然后又慢慢上升,而不排水抗剪强度先逐渐增加然后又逐渐下降,且二者同时达到极值。所以,向 FSCM 中引入缓凝剂存在一个最优剂量,在最优缓凝剂剂量条件下, FSCM 处理淤泥浆的不排水抗剪强度比不掺入缓凝剂时的不排水抗剪强度高 35% 以上。

### 参考文献:

[1] 张和庆, 谢 健, 朱 伟. 疏浚物倾倒现状与转化为再生

资源的研究——中国海洋倾废面临的困难和对策[J]. 海洋通报, 2004, 23(12): 54 - 60. (ZHANG He-qing, XIE Jian, ZHU Wei. Present situation of dredged materials dumping and the study of transforming dredged mud into regenerative resources——Difficulties of refuses dumping in China seas and countermeasures to deal with these problems[J]. Marine Science Bulletin, 2004, 23(12): 54 - 60. (in Chinese))

[2] 胡兰文, 陈 明, 杨 泉, 等. 底泥重金属污染现状及修复技术进展[J]. 环境工程, 2017, 35(12): 115 - 118. (HU Lan-wen, CHEN Ming, YANG Quan, et al. Present situation of heavy metal pollution in sediments and its remediation technologies[J]. Environmental Engineering, 2017, 35(12): 115 - 118. (in Chinese))

[3] 朱 伟, 闵凡路, 吕一彦, 等. “泥科学与应用技术”的提出及研究进展[J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3041 - 3054. (ZHU Wei, MIN Fan-lu, LÜ Yi-yan, et al. Subject of “mud science and application technology” and its research progress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3041 - 3054. (in Chinese))

[4] 杨茯苓, 董志良, 鲍树峰, 等. 新近吹填淤泥地基新型大面积砂被工作垫层工艺技术研发[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(2): 66 - 75. (YANG Fu-ling, DONG Zhi-liang, BAO Shu-feng, et al. Technology research and development of new type of large area sand-quilt-cushion for newly hydraulic reclamation mud foundation[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2018, 37(2): 66 - 75. (in Chinese))

[5] 熊 明, 安建新. 现场绑扎“竹格栅”在吹填造陆工程中的应用[C]// 全国超软土地基排水固结与加固技术研讨会. 天津, 2010: 86 - 90. (XIONG Ming, AN Jian-xin. The application of “bamboo grille” on the spot in landfill engineering[C]// National Symposium on Drainage Consolidation and Reinforcement of Soft Soil Foundation. Tianjin, 2010: 86 - 90. (in Chinese))

[6] LIU Han-long, CHEN Yong-hui. Ground treatment of sea embankment by vacuum preloading with PVDs[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2004, 20(1): 96 - 101.

[7] 刘青松, 于 健. 上覆硬壳层的淤泥堆场极限承载力计算[J]. 中国港湾建设, 2017, 37(9): 32 - 37. (LIU Qing-song, YU Jian. Calculation of ultimate bearing capacity of the man-made crust over dredged wastes dump sites[J]. China Harbour Engineering, 2017, 37(9): 32 - 37. (in Chinese))

[8] 刘青松, 张春雷, 汪顺才, 等. 淤泥堆场人工硬壳层地基极



- 限承载力室内模拟研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(增刊): 667 - 670. (LIU Qing-song, ZHANG Chun-lei, WANG Shun-cai, et al. Laboratory simulation study of the ultimate bearing capacity of the man-made crust over dredged wastes dump sites[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(S0): 667 - 670. (in Chinese))
- [9] ZHANG R J, SANTOSO A M, TAN T S, et al. Strength of high water-content marine clay stabilized by low amount of cement[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, **139**(2): 2170 - 2181.
- [10] KANG G, TSUCHIDA T, ATHAPATHTHU A M R G. Engineering behavior of cement-treated marine dredged clay during early and later stages of curing[J]. Engineering Geology, 2016, **209**: 163 - 174.
- [11] JONGPRADIST P, YOUWAI S, JATURAPITAKKUL C. Effective void ratio for assessing the mechanical properties of cement-clay admixtures at high water content[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, **137**(6): 621 - 627.
- [12] HORPIBULSUK S, RACHAN R, SUDDEEPPONG A. Assessment of strength development in blended cement admixed Bangkok clay[J]. Construction and Building Materials, 2011, **25**(4): 1521 - 1531.
- [13] WU D Q, XU W Y, ZHU D P. The chemical-physical combined method for improving clay slurry in land reclamation[J]. Geotechnical Special Publication, 2013, **232**: 308 - 315.
- [14] CHEUNG J, JEKNAVORIAN A, ROBERTS L, et al. Impact of admixtures on the hydration kinetics of Portland cement[J]. Cement and Concrete Research, 2011, **41**(12): 1289 - 1309.
- [15] MOSCHNER G, LOTHENBACH B, FIGI R, et al. Influence of citric acid on the hydration of Portland cement[J]. Cement and Concrete Research, 2009, **39**(4): 275 - 282.
- [16] PANG X, BOONTHEUNG P, BOUL P J, et al. Dynamic retarder exchange as a trigger for Portland cement hydration[J]. Cement and Concrete Research, 2014, **63**(9): 20 - 28.
- [17] WEI H, GAO B, REN J, et al. Coagulation / flocculation in dewatering of sludge: a review[J]. Water Research, 2018, **143**: 608 - 631.
- [18] HE J, CHU J, TAN S K, et al. Sedimentation behavior of flocculant-treated soil slurry[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2016, **35**(5): 593 - 602.
- [19] WANG J, NI J, CAI Y, et al. Combination of vacuum preloading and lime treatment for improvement of dredged fill[J]. Engineering Geology, 2017, **227**: 149 - 158.
- [20] YOO J, SHIN H, JI S. An eco-friendly neutralization process by carbon mineralization for Ca-rich alkaline wastewater generated from concrete sludge[J]. Metals, 2017, **7**(9): 371.
- [21] 孔祥明, 路振宝, 石 晶, 等. 磷酸及磷酸盐类化合物对水泥水化动力学的影响[J]. 硅酸盐学报, 2012, **40**(11): 1553 - 1558. (KONG Xiang-ming, LU Zhen-bao, SHI Jing, et al. Impacts of phosphoric acid and phosphates on hydration kinetics of Portland cement[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2012, **40**(11): 1553 - 1558. (in Chinese))
- [22] 谭洪波, 林超亮, 马保国, 等. 磷酸盐对普通硅酸盐水泥早期水化的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2015, **37**(2): 1 - 4. (TAN Hong-bo, LIN Chao-liang, MA Bao-guo, et al. Effect of phosphate on the hydration of Portland cement at early age[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2015, **37**(2): 1 - 4. (in Chinese))
- [23] TAN H, ZOU F, LIU M, et al. Effect of the adsorbing behavior of phosphate retarders on hydration of cement paste[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, **29**(9): 1 - 8.