

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.200

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 絮凝-固化联合真空预压处理高含水率淤泥(浆)试验研究

徐志豪, 章荣军, 郑俊杰, 屠林伟

(华中科技大学 岩土与地下工程研究所, 武汉 430074)

**摘要:**絮凝-固化联合法(FSCM)是超高含水率疏浚泥浆(EHW-MS)处理和循环利用的合理选择。然而,面向对填料力学性能要求较高的资源化利用情形时,FSCM在固化效率上仍存在一定的局限性。在FSCM的基础上,引入低位真空预压技术(VP),对EHW-MS用作路堤填料提出一套新的技术方法——真空预压-絮凝-固化联合法(VP-FSCM),以达到淤泥浆深度脱水、提高固化效率的目的。通过室内模型试验确定VP-FSCM的优越性,并探究其处理优势随等效初始含水率的变化规律;结合微观测试手段,分析和论证VP-FSCM的内在机理和可行性。结果表明:采用VP-FSCM能使试样的不排水抗剪强度最高提高至FSCM的1.65倍,并且强度优势稳定在1.2倍以上。其处理优势在微观层面上表现为C(A)SH凝胶、钙矾石等水化产物数量及发育程度得到明显提升,能进一步填充与密实土体结构。

**关键词:**疏浚淤泥浆;固化;絮凝;真空预压;抗剪强度;含水率

**中图分类号:**TU432 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2021)05-0010-09

## Experimental study on flocculation-solidification combined with vacuum preloading treatment of dredged mud with high moisture content

XU Zhihao, ZHANG Rongjun, ZHENG Junjie, TU Linwei

(Institute of Geotechnical and Underground Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, P. R. China)

**Abstract:** Flocculation-solidification combined method (FSCM) is a reasonable choice for the treatment and recycling of extra-high water content dredged mud slurry (EHW-MS). However, FSCM still has certain limitations in curing efficiency when the treated EHW-MS is recycled as filling material with high requirement on mechanical properties. In order to achieve the purpose of deep dehydration of dredged mud slurry and improve the efficiency of solidification, low-position vacuum preloading technology (VP) is introduced on the basis of FSCM, and a new technical method for EHW-MS used as embankment filler has been proposed—vacuum preloading-flocculation-solidification combined method (VP-FSCM). A series of indoor model tests had been carried out to verify the advantages of the VP-FSCM, and to explore the law of its processing advantages with the equivalent initial moisture content; In addition, combined with microscopic testing methods (e. g. XRD and SEM), the internal mechanism and feasibility of VP-FSCM

**收稿日期:**2020-09-18

**基金项目:**国家重点研发计划(2016YFC0800200);国家自然科学基金(51678266,51978303)

**作者简介:**徐志豪(1997-),男,主要从事岩土工程研究,E-mail: xuerman722@hust.edu.cn。

郑俊杰(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail: zhengjj@hust.edu.cn。

**Received:**2020-09-18

**Foundation items:** National Key Research and Development Program (No. 2016YFC0800200); National Natural Science Foundation of China (No. 51678266, 51978303)

**Author brief:** XU Zhihao (1997-), main research interests: geotechnical engineering, E-mail: xuerman722@hust.edu.cn.

ZHENG Junjie (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: zhengjj@hust.edu.cn.

have been analyzed and demonstrated. The results show that the undrained shear strength of the VP-FSCM treated EHW-MS can be increased to 1.65 times than that of FSCM, and the strength advantage is maintained at least 1.2 times. On the micro level, the processing advantage of VP-FSCM is that the quantity and development of hydration products such as C(A)SH gel and ettringite are significantly improved, and the soil structure are further filled and compacted.

**Keywords:** dredged mud slurry; solidification; flocculation; vacuum preloading; shear strength; water content

近年来,随着基础设施与生态工程建设的推进,大量港口码头不断扩建、湖泊河流也相继开展生态治理。各类工程建设中会产生大体量的高含水率疏浚淤泥(Mud Slurry at Extra High Water Content,以下简称 EHW-MS)<sup>[1-2]</sup>。这些疏浚产生的淤泥往往呈流塑态泥浆状,存在细粒土占比过大、有机质与重金属离子污染程度较高等不良性质<sup>[3]</sup>,不适于直接利用和弃置处理<sup>[4]</sup>。目前,针对大体量 EHW-MS 采用的主要处理方式仍为堆场处理<sup>[5]</sup>。其主旨是将淤泥浆泵送至堆放场地,待一定时间自然风干或采用真空和堆载预压等人工干化技术<sup>[6-7]</sup>进一步脱水处理后再结合固化剂改性处理进行减量资源化利用。然而,堆场处理后淤泥含水率虽然有所降低<sup>[1]</sup>,但部分堆场区域仍处于较高含水率水平(>150%)是比较常见的现象,从而大大限制了传统水泥固化方法(PCSM)的固化效率<sup>[8-9]</sup>,无法在兼顾经济性的同时满足相关资源化利用标准。

为了提高 EHW-MS 处理中的固化效率,弥补 PCSM 在 EHW-MS 处理中的局限性,笔者此前提出了一种基于 PCSM 的絮凝-固化联合处理方法(FSCM)<sup>[10-13]</sup>。其主旨是在 EHW-MS 中先后加入固化剂(如水泥)和絮凝剂(如聚丙烯酰胺(PAM)),通过絮凝调理来强化固化剂化学胶结作用,从而大幅提高强度。实验结果表明,FSCM 处理的 EHW-MS 的强度至少是 PCSM 处理后的 5.7 倍<sup>[13]</sup>。然而,值得注意的是,FSCM 工法中其固体颗粒不受其他外部荷载作用,而仅依靠自重沉积完成固结固化过程,因此,仍具有相对较高的含水量和孔隙率。而面对要求填料力学性能优良的资源化利用情形下(如路堤填料),其经济效益虽然远高于 PCSM,但仍存在较大的提升空间。相关研究表明,真空预压(VP)可以有效改善泥浆的力学性能<sup>[14]</sup>,并且发现絮凝剂在真空预压处理淤泥浆过程中能够显著缓解排水板淤堵问题<sup>[15]</sup>,从而进一步实现淤泥浆的深度脱水。因此,在 FSCM 中引入 VP 可能是进一步提高 FSCM 固化效率的合理选择。

笔者在综合水泥固化、絮凝调理技术的基础上引入低位真空预压技术,对 EHW-MS 的资源化处理利用以作路堤填料提出了一套新方法:真空预压-絮凝-固化联合法(Vacuum Preloading-Flocculating-Solidification Combined Method,简称 VP-FSCM),如图 1 所示。其主旨是在疏浚淤泥浆中先后加入固化剂与絮凝剂,待混合均匀后泵送至分层铺设的特质土工织物(兼做加筋层)进行分区块分层填筑施工,各个区块浇筑完成后开展 40 min 至 1 h 的低位真空预压。VP-FSCM 的优势在于协同发挥絮凝剂与低位真空预压的高效脱水功效,从而显著降低淤泥含水率,并随之提升固化剂的固化效率。从可行性上分析,固化剂的初凝时间一般在 2~3 h,而絮凝剂在 10 min 内即可发挥稳定的絮凝效果,另外,40 min 至 1 h 的低位真空预压也不会影响固化剂的水化进程,所以,VP-FSCM 在进行时间上可行。

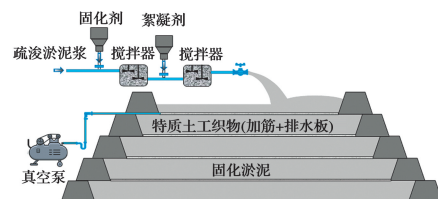


图 1 VP-FSCM 处理淤泥浆筑堤原理图

Fig. 1 Schematic diagram of VP-FSCM treated EHW-MS for embankment construction

笔者旨在通过室内试验确定提出的 VP-FSCM 的可行性和机理,具体工作包括:研究等效初始含水率对 VP-FSCM 处理 EHW-MS 后沉积特性与力学特性的影响;探究 VP-FSCM 的可行性以及其处理优势随等效初始含水率的变化规律;采用 XRD 和 SEM 测试手段从微观层面探析 VP-FSCM 的内在机理。

## 1 试验内容

### 1.1 试验材料

试验所用淤泥取自温州某堆场,土样基本物理特性如表 1 所示。试验淤泥比重为 2.69,天然含水

率在 90%~110%, 约为 2 倍液限, 土样中含有少量有机质。采用激光粒度分析仪对土样进行了粒径分析, 得到其粒度组成, 如表 2 所示。根据《土的分类标准》(GBJ 145—90), 将其分类为高液限粉土。

表 1 试验用淤泥基本特性

Table 1 Basic properties of mud used in laboratory experiments

比重	天然含水率/%	液限/%	塑限/%	有机质含量/%
2.69	90~110	53.7	26.5	4.41

表 2 试验用淤泥颗粒级配组成

Table 2 Grain size distribution of the mud

土类	粒径分布范围/mm	含量/%
砂粒	90~110	14.9
粉粒	0.002~0.075	79.5
黏粒和胶粒	<0.002	5.6

试验选用的固化剂为 42.5# 普通硅酸盐水泥, 所用絮凝剂溶液为阴离子 AN926SH 型有机高分子聚丙烯酰胺(PAM)的水溶液。具体配制方法是将 PAM 颗粒与水以 1:1 000 的比例(质量分数为 0.1%)经人工搅拌 60 min(转速为 90 r/min)配制而成。

## 1.2 模型实验装置

真空预压模型试验装置主要由带通气口的防护盖板、塑料排水板和模型箱组成(如图 2(a)所示)。模型箱采用厚度为 1 cm 的有机玻璃材料制成, 尺寸为 60 cm×12 cm×40 cm(长×宽×高)。其中, 通气口主要是将固化淤泥浆与大气相通, 从而依靠其自身水体密封隔绝空气的方式进行自密封处理(低位真空预压工艺), 防护盖板与模型箱采用可拆卸式螺栓连接。试验中水平排水板放置于模型箱底部, 对排水板一端进行密封, 另一端通过抽滤接口将排水软管连接至抽滤瓶, 抽滤瓶滤口通过转换接头将软管与真空泵源进行连接。另外, 在模型箱外壁粘贴有一次性塑料刻度条, 用于观测土体沉降。

## 1.3 实验流程

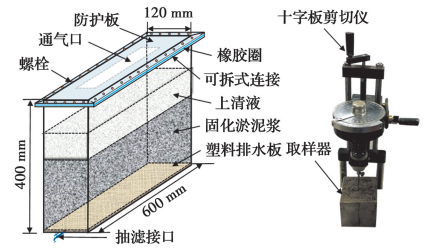
1) 进行制样工作。利用搅拌器匀速搅拌 5 min, 制备一定含水率的均匀淤泥浆, 再加入计算所需质量水泥, 经搅拌均匀后制成水泥-淤泥混合浆液。然后加入所需的 PAM 溶液并手动搅拌至出现明显上清液及稳定絮团后, 倒入图 2(a)所示模型箱内。

2) 开展真空预压工作。将真空泵压力设定为 50 kPa, 对 VP-PCSM 与 VP-FSCM 实验组进行 50 min 低位真空预压。期间监测试样沉降情况, 记录试样边

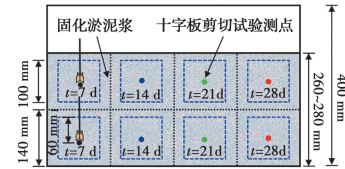
缘高度变化并测定排入抽滤瓶中水的质量。

3) 开展力学特性试验。养护至指定龄期后, 利用取土器按图 2(c)所示龄期布置取样并刮平, 采用图 2(b)所示十字板剪切仪测定不排水抗剪强度  $s_u$ , 每个龄期测 3 个点取平均值, 并测定试样养护后含水率  $w_{ei}$ 。重复前述步骤, 直至 28 d 龄期完成。

4) 开展微观试验。待 28 d 龄期后, 按上述区域取距表层一定深度土样分别做 X 射线衍射试验和场发射扫描电子显微镜试验。



(a) 模型箱示意图 (b) 十字板剪切试验



(c) 龄期布置图

图 2 真空预压模型试验示意图

Fig. 2 Schematic diagram of vacuum preloading model test

## 1.4 实验工况

为充分揭示等效初始含水率对采用 VP-FSCM 固化疏浚淤泥的处理效率的影响规律, 并识别其处理优势随等效初始含水率的变化规律, 设定 3 个试验组, 共计 12 组工况。其中 A 组为 VP-PCSM 工况, B 组为 VP-FSCM 工况, C 组为 FSCM 工况。此外, 各组按 60% 的梯度调配 4 种不同等效初始含水率的淤泥浆试样。具体工况汇总于表 3 中。其中,  $w_{ei}$  表示等效初始含水率, 定义为水泥-淤泥浆-絮凝剂混合试样中水的质量(淤泥浆中水质量和 PAM 溶液中水质量之和)与干土颗粒质量(不含水泥质量)之比;  $w_p$  表示 PAM 掺量, 定义为 PAM 颗粒质量与混合试样中干土颗粒质量之比;  $w_c$  表示水泥掺量, 定义为水泥质量与混合试样中干土颗粒质量之比。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 沉积特性

为证实上述絮凝剂与真空预压处理的协同效益, 图 3 对比了 VP-PCSM 与 VP-FSCM 两种工法

处理不同等效初始含水率 EHW-MS 的沉降量曲线。

表 3 室内试验工况

Table 3 Program for the laboratory experiments

组别	编号	$w_{ei}$ / %	$w_p$ / %	$w_c$ / %	压力/ kPa	处理方法	龄期/d
A	A1	260	0	15	50	VP-PCSM	7、14、21、28
	A2	320					
	A3	380					
	A4	440					
B	B1	260	0.157	15	50	VP-FSCM	7、14、21、28
	B2	320					
	B3	380					
	B4	440					
C	C1	260	0.157	15	0	FSCM	7、14、21、28
	C2	320					
	C3	380					
	C4	440					

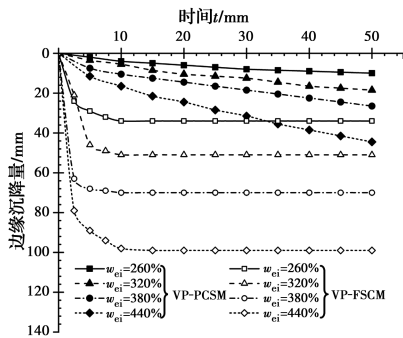


图 3 VP-PCSM 或 VP-FSCM 试样边缘沉降量变化曲线  
Fig. 3 Variation curve of edge settlement of VP-PCSM or VP-FSCM treated specimens

结果显示,VP-FSCM 处理后试验组的沉降速度显著提升,短时间内即可完成沉降,并且随着等效初始含水率  $w_{ei}$  的增加,VP-FSCM 沉降量及沉降速率也越大。

### 2.2 脱水特性

图 4 为 VP-PCSM 或 VP-FSCM 处理不同等效初始含水率 EHW-MS 的排水量变化曲线。图中显示,VP-FSCM 处理后试样的排水量与排水速度相比 VP-PCSM 都存在明显提高,并且其排水量与排水速度均随着等效初始含水率  $w_{ei}$  的上升而增长,这一定程度上是因为含水率越高越有利于土颗粒间絮体形态的改善及数量的提升,促进了絮团间大孔隙的生成,从而进一步提高脱水效率。

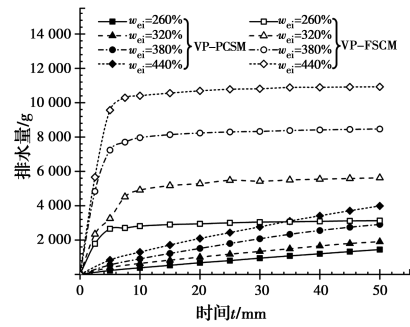


图 4 VP-PCSM 或 VP-FSCM 处理试样排水量变化曲线  
Fig. 4 Variation curve of water discharge of VP-PCSM or VP-FSCM treated specimens

### 2.3 力学特性

#### 2.3.1 等效初始含水率对不排水抗剪强度的影响

为充分揭示等效初始含水率对采用 3 种工法 (VP-PCSM、VP-FSCM 与 FSCM) 固化疏浚淤泥的强度特性的影响规律,图 5 对比了 3 种工法处理后试样各龄期不排水抗剪强度。结果显示,相较于其余两种工法,EHW-MS 经 VP-FSCM 处理后抗剪强度更高。表明絮凝剂的脱水作用、真空预压的物理压实作用以及固化剂的化学粘结作用三者可以共同发挥协同耦合效应优势。此外,总体来看,VP-FSCM 与其余两种工法的强度差异与等效初始含水率存在着一定相关性,表现为随着等效初始含水率的增大,VP-FSCM 与 VP-PCSM 的强度差异越来越显著,但同 FSCM 对比,其强度差异却逐步缩小。

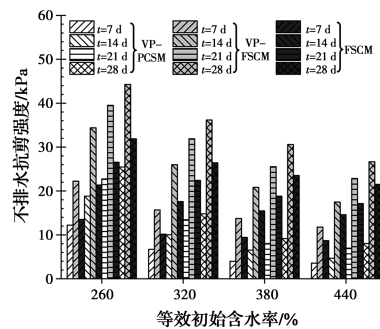


图 5 3 种工法处理不同  $w_{ei}$  的 EHW-MS 后各龄期不排水抗剪强度  $s_u$  对比图

Fig. 5 Comparison of undrained shear strength of EHW-MS with different  $w_{ei}$  treated by three methods at different ages

图 6 给出了 3 种工法处理 EHW-MS 后不排水抗剪强度随等效初始含水率  $w_{ei}$  的变化曲线。显然,随着等效初始含水率的增大,3 种工法抗剪强度均表现出衰减的趋势。不同的是,VP-FSCM 与 FSCM 衰减速率缓慢,即使在等效初始含水率为 440% 的情况下,也有较高的不排水抗剪强度。这表

明应用 FSCM 与 VP-FSCM 处理淤泥浆后的强度特性等效初始含水率影响,但其“敏感性”远不及 VP-PCSM 工法。由此可以推测,在极高含水率下结合 FSCM 相比于结合 PCSM 处理淤泥浆具有更为显著的强度特性优势。此外,也可以明显发现,相较于 FSCM 与 VP-PCSM,VP-FSCM 处理后试样不同龄期间强度差异明显,表明 VP-FSCM 的强度增长受龄期的影响较大。

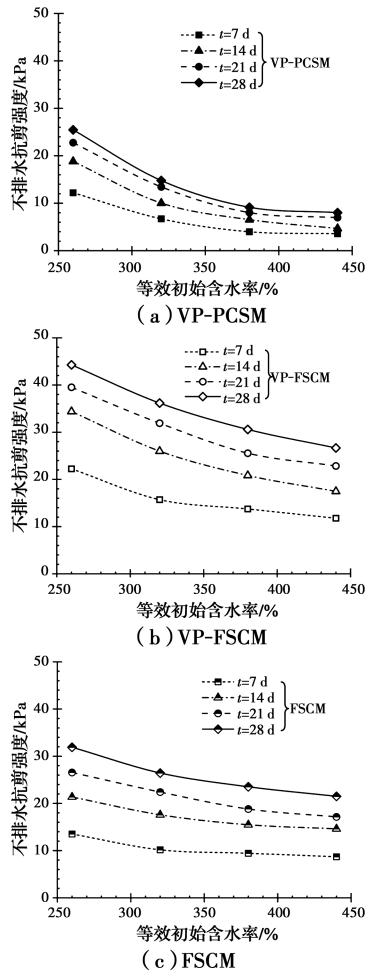


图 6 VP-PCSM 或 VP-FSCM 或 FSCM 处理 EHW-MS 后不排水抗剪强度  $s_u$  随  $w_{ei}$  的变化曲线

Fig. 6 Variation of  $s_u$  versus  $w_{ei}$  for VP-PCSM, VP-FSCM and FSCM treated EHW-MS at different curing ages

为深入了解其强度与龄期的关系,分析 3 种工法的强度增长差异,图 7 给出了 3 种工法处理 EHW-MS 后不排水抗剪强度随龄期的变化曲线。图中显示,3 种工法处理后,试样强度增长模式仍为早期快速增长中后期增速减缓。但与之不同的是,VP-FSCM 在整个强度发展过程中强度增速明显高于 VP-PCSM 与 FSCM。以等效初始含水率为 260% 的泥浆为例,VP-FSCM 试样强度 7 d 可达到

约 22 kPa,而同等情况下,VP-PCSM 与 FSCM 处理后均在 13 kPa 左右,相比提高了 69.23%。另外,VP-FSCM 后期强度增速也明显较大。

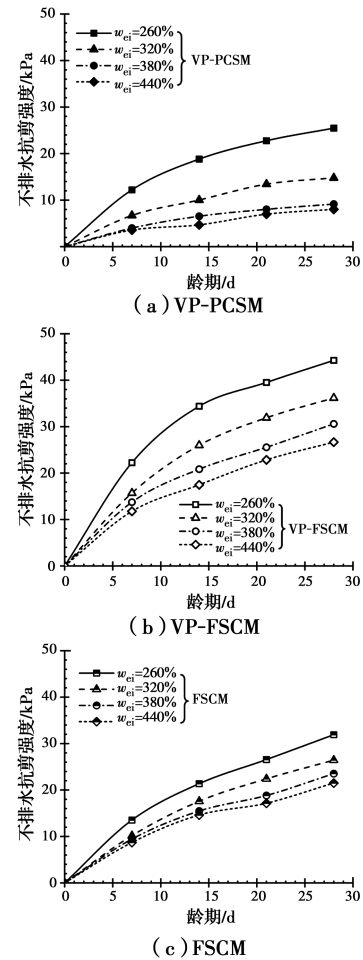


图 7 VP-PCSM 或 VP-FSCM 或 FSCM 处理 EHW-MS 后不排水抗剪强度随龄期的变化曲线

Fig. 7 Variation of  $s_u$  versus curing ages for VP-PCSM, VP-FSCM and FSCM treated EHW-MS

### 2.3.2 等效初始含水率对养护后含水率的影响

众多研究表明,固化淤泥浆后的含水率  $w_{ac}$  越低,其不排水抗剪强度越高。养护后含水率  $w_{ac}$  不仅能印证前述 VP-FSCM 强度优势,而且也作为表征淤泥固化效率的一个重要指标。图 8 对比了 3 种工法处理不同等效初始含水率  $w_{ei}$  的 EHW-MS 各龄期养护后含水率  $w_{ac}$ 。

图 8 显示,EHW-MS 经 VP-FSCM 处理后的养护后含水率明显低于 VP-PCSM 与 FSCM。这较好地解释了强度差异的结果,也在一定程度上说明养护后含水率决定了不排水抗剪强度的大小。此外,等效初始含水率不同,3 种工法处理的养护后含水率差异也不尽相同。

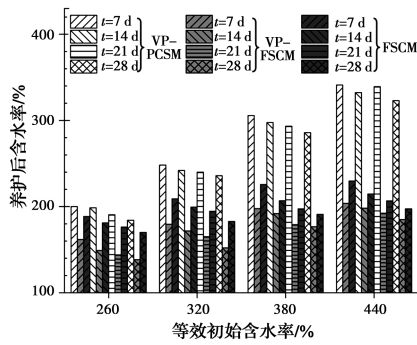


图 8 3 种工法处理不同  $w_{ei}$  的 EHW-MS 后各龄期养护后含水率  $w_{ac}$  对比图

Fig. 8 Comparison of  $w_{ac}$  of EHW-MS with different  $w_{ei}$  by three treatment methods at different ages

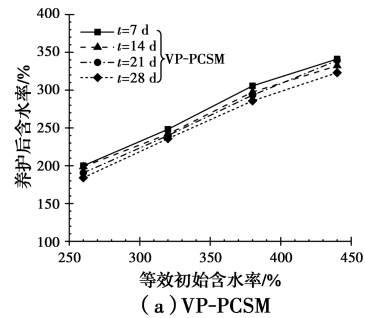
图 9 绘制了 VP-PCSM、VP-FSCM、FSCM 处理 EHW-MS 后养护后含水率  $w_{ac}$  随等效初始含水率  $w_{ei}$  的变化曲线。总体来看,3 种工法处理后,养护后含水率  $w_{ac}$  均随着等效初始含水率  $w_{ei}$  的增长呈增长趋势。其中 VP-PCSM 呈线性增长趋势,而 VP-FSCM 与 FSCM 则表现出先快后慢的增长趋势。此外,可以发现随着等效初始含水率  $w_{ei}$  的增长,VP-FSCM 与 VP-PCSM 的养护后含水率  $w_{ac}$  差异越来越大,但与 FSCM 逐渐接近。

为了进一步阐明等效初始含水率对固化淤泥浆养护后含水率  $w_{ac}$  随龄期的影响规律,图 10 给出了 3 种工法处理 EHW-MS 的养护后含水率随龄期的变化曲线。图 10 表明,VP-FSCM 的养护后含水率衰减主要在早期阶段进行,后续随着水化反应的持续进行而略有下降,这与 VP-PCSM 及 FSCM 的发展模式相近,也印证了上述强度增长规律为早期快速增长而中后期缓速增长的模式,但 VP-FSCM 早期衰减速率明显快于 VP-PCSM 与 FSCM。以等效初始含水率为 440% 的泥浆为例,VP-FSCM 的试样 7 d 养护后含水率为 203.75%,而同等情况下 VP-PCSM 与 FSCM 分别为 341.17% 与 229.73%,分别降低了约 40.28% 与 11.31%。

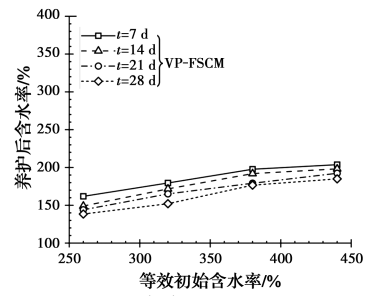
### 2.4 微观机理探析

为了解 VP-FSCM 处理 EHW-MS 的微观固化成分,对两组典型含水率工况  $w_{ei} = 260\%$  与  $w_{ei} = 440\%$  的 EHW-MS 经 3 种工法处理 28 d 后的土样进行了 XRD 分析,组分谱图如图 11 所示。

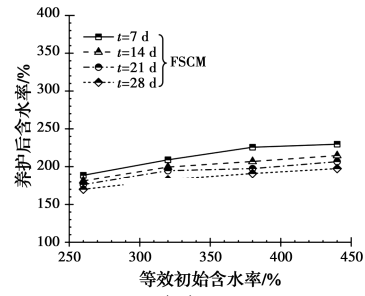
图 11 表明,VP-FSCM 处理的 EHW-MS 固化产物中,CSH 与 CASH 凝胶含量较 VP-PCSM 与



(a) VP-PCSM



(b) VP-FSCM



(c) FSCM

图 9 3 种工法处理后养护后含水率  $w_{ac}$  随  $w_{ei}$  的变化曲线

Fig. 9 Variation of  $w_{ac}$  versus  $w_{ei}$  for three methods treated EHW-MS

FSCM 显著提升,并且含水率越低,效果越显著。CSH 与 CASH 起着填充孔隙,胶结土颗粒的作用,促进了固化泥浆强度的发展<sup>[16]</sup>,从而在微观层面给予了 VP-FSCM 强度较高的合理解释。

为了进一步探析 VP-FSCM 处理 EHW-MS 的固化微观机理,采用场发射扫描电镜对固化淤泥试样的微观形貌进行微观测试。图 12 为典型工况  $w_{ei} = 260\%$  与  $w_{ei} = 440\%$  的 EHW-MS 经 3 种工法处理后的 10 000 倍 SEM 照片。可以发现,相同等效初始含水率下的 EHW-MS 经 VP-FSCM 处理后水化产物钙矾石与 C(A)SH 凝胶发育形态突出、数量较多。其中,钙矾石已发育成密集的棒簇状聚集体,C(A)SH 凝胶也呈团簇状联结着土颗粒,在固化过程中填充于颗粒之间的大孔隙中,使得土体内部大孔隙逐渐缩小甚至填充闭合,两者的共同作用使得土颗粒间更加致密,土体强度增加<sup>[17]</sup>。同时,从整体来看,VP-FSCM 处理 EHW-MS 后,虽在早期絮

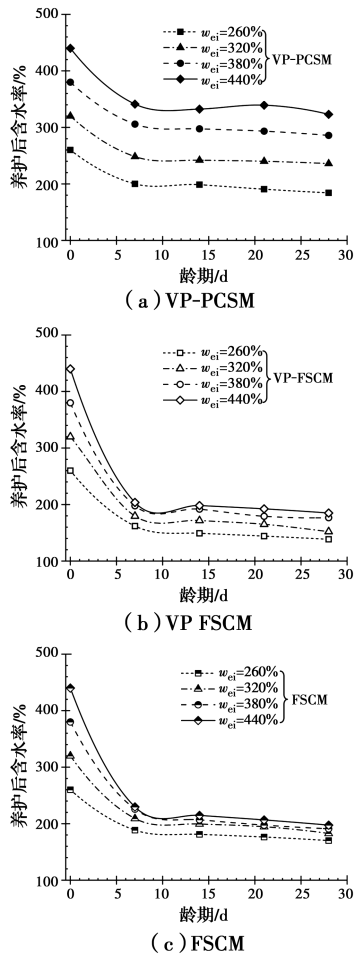


图 10 VP-PCSM 或 VP-FSCM 或 FSCM 处理 EHW-MS 的养护后含水率  $w_{ac}$  随龄期的变化曲线

Fig. 10 Variation of  $w_{ac}$  versus curing ages for VP-PCSM, VP-FSCM and FSCM treated EHW-MS

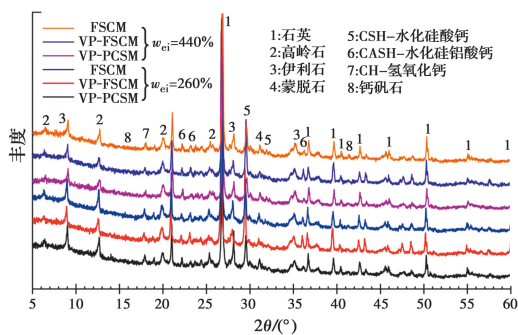


图 11  $w_{ei}=260\%$  与  $w_{ei}=440\%$  的 EHW-MS 经 VP-PCSM 或 VP-FSCM 或 FSCM 处理后 XRD 谱图

Fig. 11 XRD spectrums of VP-PCSM, VP-FSCM, FSCM treated EHW-MS specimens with  $w_{ei}=260\%$  and  $w_{ei}=440\%$

凝脱水过程中形成较大孔隙,但在养护过程中已经被C(A)SH、钙矾石填充密实,孔隙大大减少,以致强度明显高于 VP-PCSM 与 FSCM。对比 VP-FSCM 处理等效初始含水率为 260% 和 440% 的

EHW-MS 后 SEM 照片发现,在等效初始含水率为 260% 时,EHW-MS 固化后的钙矾石与 C(A)SH 凝胶发育程度较高,且孔隙更小、更少,结构更加紧凑致密,强度更高。出现此现象的原因是在等效初始含水率为 260% 的情况下,水泥水化反应所需的水分已经充足,而当等效含水率逐渐增大时,除水化反应所需的水之外,多余部分会分布于土体颗粒的孔隙之中,使得 C(A)SH 凝胶及其他胶凝材料在单位体积中的数量较少<sup>[16]</sup>,不足以提供有效的胶结土颗粒、填充孔隙、支撑土骨架作用<sup>[18]</sup>,因而强度随等效含水率有明显的下降趋势。

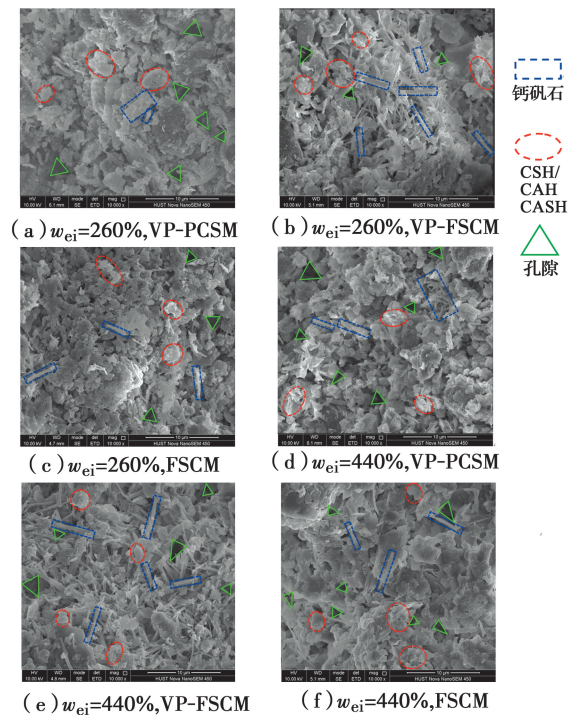


图 12  $w_{ei}=260\%$  与  $w_{ei}=440\%$  的 EHW-MS 经 VP-PCSM, VP-FSCM 或 FSCM 处理后养护 28 d 的 10 000 倍 SEM 照片

### 2.5 VP-FSCM 的适用性探究

为深入评估 VP-FSCM 在强度特性上的优越性及其随等效初始含水率的变化规律,引入强度比参数  $\lambda$  与  $\mu$ ,定义分别见式(1)、式(2)。将强度比参数  $\lambda$  与  $\mu$  分别作为定量衡量 VP-FSCM 相比于 VP-PCSM、FSCM 在强度特性方面展现处理效率优势的一个重要参数。

$$\lambda = \frac{S_{uVF}}{S_{uVP}} \quad (1)$$

$$\mu = \frac{S_{uVF}}{S_{uF}} \quad (2)$$

式中: $\lambda$ 为 VP-FSCM 与 VP-PCSM 不排水抗剪强度之比; $\mu$ 为 VP-FSCM 与 FSCM 不排水抗剪强度之比; $S_{uVF}$ 、 $S_{uVP}$ 、 $S_{uF}$ 分别为 VP-FSCM、VP-PCSM 与 FSCM 处理后固化淤泥的不排水抗剪强度, kPa。

图 13 给出了不同等效初始含水率的 EHW-MS 各龄期下的  $\lambda$  值与  $\mu$  值。图中显示,  $\lambda$  值与  $\mu$  值主要受等效初始含水率  $w_{ei}$  的影响, 与龄期关系不大。其中,  $\lambda$  值随着等效初始含水率  $w_{ei}$  的增长呈递增趋势, 最高可达到 3.73 倍。  $\mu$  值随着等效初始含水率的增长呈递减趋势, 高含水率下最低可降至 1.2 倍。结合  $\lambda$  值与  $\mu$  值的意义来看, 表明在高等效初始含水率下, VP-FSCM 相比于 VP-PCSM 的强度优越性越显著, 而相比于 FSCM 的强度优越性渐不明显。

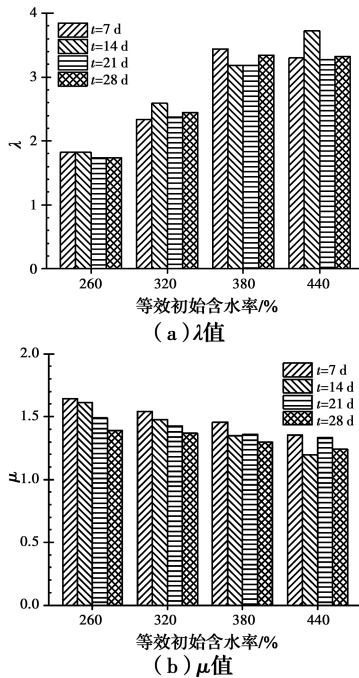


图 13 不同  $w_{ei}$  的 EHW-MS 各龄期下的  $\lambda$  值与  $\mu$  值

Fig. 13  $\lambda$  and  $\mu$  of EHW-MS with different  $w_{ei}$  at various ages

### 3 结论

基于室内模型试验研究了等效初始含水率对 VP-FSCM 处理 EHW-MS 后物理力学特性的影响, 探究提出的 VP-FSCM 的可行性和机理, 得到以下主要结论:

1) 采用絮凝-固化联合真空预压处理方法 (VP-FSCM) 可以协同发挥絮凝剂与低位真空预压的高效脱水功效, 从而显著降低淤泥含水率并提升固化剂的固化效率。相较于 VP-PCSM 与 FSCM, 其在高含水率下脱水优势与力学特性优势更为显著, 证明絮凝-固化联合真空预压法可用于处理高含水率

的淤泥浆。

2) 结合 XRD 与 SEM 试验, VP-FSCM 的强度特性优势在微观层面上体现为其 C(A)SH 凝胶、钙矾石等水化产物数量及发育程度得到明显提升, 结构的填充与密实效应显著, 宏观上体现为加固后的十字板强度明显提高, 土体整体得到了有效加固。

3) 随着等效初始含水率的增长, VP-FSCM 相比于 VP-PCSM 的处理效率优势逐渐显著, 而相比于 FSCM, 虽仍具有一定优势, 但优势逐渐弱化。

### 参考文献:

[1] 汪顺才, 张春雷, 黄英豪, 等. 堆场疏浚淤泥含水率分布规律调查研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2823-2828.  
WANG S C, ZHANG C L, HUANG Y H, et al. Study of diversification of water contents in dredged sediment storage yard [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2823-2828. (in Chinese)

[2] 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 W, MIN F L, LÜ Y Y, 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)

[3] 张春雷, 管非凡, 李磊, 等. 中国疏浚淤泥的处理处置及资源化利用进展[J]. 环境工程, 2014, 32(12): 95-99.  
ZHANG C L, GUAN F F, LI L, et al. The progress in the reutilization treatment and disposal of dredged sediments in China [J]. Environmental Engineering, 2014, 32(12): 95-99. (in Chinese)

[4] 陈萌, 杨国录, 刘广容, 等. 污泥中重金属的处理[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(3): 92-95, 100.  
CHEN M, YANG G L, LIU G R, et al. Research progress on heavy metals treatment of sludge [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(3): 92-95, 100. (in Chinese)

[5] 黄英豪, 董婵. 淤泥处理技术原理及分类综述[J]. 人民黄河, 2014, 36(7): 91-94.  
HUANG Y H, DONG C. Principles and classifications for treatment of dredged material [J]. Yellow River, 2014, 36(7): 91-94. (in Chinese)

[6] 吉锋, 邓东升, 洪振舜, 等. 高含水率疏浚淤泥透气真



- 空防淤堵模型[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(1): 26-31.
- JI F, DENG D S, HONG Z S, et al. Anti-clogging model of dredged clays dewatering with ventilating vacuum method [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2013, 35(1): 26-31. (in Chinese)
- [7] 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(Sup1): 667-670.
- LIU Q S, ZHANG C L, WANG S C, 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(Sup1): 667-670. (in Chinese)
- [8] 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(12): 2170-2181.
- [9] WU D Q, XU W Y, ZHU D P. The chemical-physical combined method for improving clay slurry in land reclamation [C]//Second International Conference on Geotechnical and Earthquake Engineering. October 25-27, 2013, Chengdu, China. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2013: 308-315.
- [10] 郑耀林, 章荣军, 郑俊杰, 等. 絮凝-固化联合处理超高含水率吹填淤泥浆的试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 3107-3114.
- ZHENG Y L, ZHANG R J, ZHENG J J, et al. Experimental study of flocculation-solidification combined treatment of hydraulically dredged mud at extra high-water content [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(8): 3107-3114. (in Chinese)
- [11] 章荣军, 董超强, 郑俊杰, 等. 絮凝剂和缓凝剂对水泥固化疏浚淤泥浆效率的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(10): 1928-1935.
- ZHANG R J, DONG C Q, ZHENG J J, et al. Influences of flocculant and retarder on solidification efficiency of cement in treatment of dredged mud slurry [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(10): 1928-1935. (in Chinese)
- [12] ZHANG R J, DONG C Q, LU Z, et al. Strength characteristics of hydraulically dredged mud slurry treated by flocculation-solidification combined method [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 228: 116742.
- [13] ZHANG R J, ZHENG Y L, ZHENG J J, et al. Flocculation-solidification combined method for treatment of hydraulically dredged mud at extra high water content [J]. *Acta Geotechnica*, 2020, 15(6): 1685-1698.
- [14] SUN H L, WENG Z Q, LIU S J, et al. Compression and consolidation behaviors of lime-treated dredging slurry under vacuum pressure [J]. *Engineering Geology*, 2020, 270: 105573.
- [15] 武亚军, 牛坤, 唐海峰, 等. 药剂真空预压法处理工程废浆中生石灰的增渗作用[J]. 岩土力学, 2017, 38(12): 3453-3461.
- WU Y J, NIU K, TANG H F, et al. Enhanced permeability of calcium lime in construction waste slurry improvement by vacuum preloading with flocculation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(12): 3453-3461. (in Chinese)
- [16] 张春雷, 汪顺才, 朱伟, 等. 初始含水率对水泥固化淤泥效果的影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(Sup1): 567-570.
- ZHANG C L, WANG S C, ZHU W, et al. Influence of initial water content on cement solidification effect of dredged material [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(Sup1): 567-570. (in Chinese)
- [17] 刘飞禹, 张志鹏, 王军, 等. 分级真空预压联合间歇电渗法加固疏浚淤泥宏观分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(9): 1893-1901.
- LIU F Y, ZHANG Z P, WANG J, et al. Macro and micro analyses of stepped vacuum preloading combined with intermittent electroosmosis for treating dredger slurry [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(9): 1893-1901. (in Chinese)
- [18] 张春雷. 基于水分转化模型的淤泥固化机理研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- ZHANG C L. Study of dredged sediments solidification mechanism based on water transfer model [D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese)