

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.124



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



絮凝-固化-真空预压联合处理废弃淤泥(浆) 试验研究

韩超¹, 俞越中¹, 柏彬¹, 董超强², 章荣军², 范舟¹, 吴巍¹, 孙科¹

(1. 国网江苏省电力有限公司建设分公司, 南京 210000; 2. 华中科技大学土木与水利工程学院, 武汉, 430074)

摘要: 絮凝调理和化学固化改性处理能改善高含水率淤泥初始不良工程特性, 将废弃淤泥(浆)资源化利用为路堤填料对淤泥强度有一定要求。已有研究证实了絮凝-固化-真空预压联合法(VP-FSCM)可以有效处理高含水率淤泥浆(含水率 $>300\%$), 且处理后的淤泥强度满足路堤填料需求。通过室内模型箱试验探索 VP-FSCM 工艺处理废弃淤泥(含水率约为 $150\% \sim 300\%$)的可行性和高效性; 优化 VP-FSCM 工艺在处理淤泥中的外加剂配方(类型和掺量等)。试验结果表明: VP-FSCM 处理废弃淤泥后土体 28 d 不排水抗剪强度为絮凝-固化法(FSCM)处理废弃淤泥后的 2.76 倍, 证实了 VP-FSCM 处理废弃淤泥的高效、可行性。沉降脱水和力学等特性分析结果表明, VP-FSCM 工艺处理废弃淤泥的最佳外加剂种类为水泥(OPC)、高炉矿渣(GGBS)、生石灰(CaO)和聚丙烯酰胺(PAM), 且最优掺量分别为 5.0% 、 5.0% 、 1.5% 、 0.12% ; 在最佳外加剂类型和掺量条件下, 真空压力越高, 处理后的废弃淤泥不排水抗剪强度越高, 养护后含水率越低。

关键词: 废弃淤泥; 絮凝; 固化; 真空预压; 抗剪强度; 含水率

中图分类号: TU472.5 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2025)01-0027-09

Experimental study on flocculation-solidification combined with vacuum preloading treatment of waste mud

HAN Chao¹, YU Yuezhong¹, BAI Bin¹, DONG Chaoqiang², ZHANG Rongjun²,
FAN Zhou¹, WU Wei¹, SUN Ke¹

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Construction Branch, Nanjing 210000, P. R. China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, P. R. China)

Abstract: After flocculation conditioning and chemical solidification, the engineering characteristics of high-water-content mud can be improved. If waste mud is to be recycled into embankment filler, it is bound to have certain requirements on the strength of the treated mud. In recent years, the authors have explored and proved that the vacuum preloading-flocculation-solidification combined method (VP-FSCM) can effectively treat mud

收稿日期: 2022-08-14

基金项目: 国网江苏省电力有限公司科技项目(J2020070)

作者简介: 韩超(1984-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事输变电工程研究, Email: hanchaohust@126.com。

董超强(通信作者), 男, 博士生, E-mail: Tungcq027@hust.edu.cn。

Received: 2022-08-14

Foundation item: Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. (No. J2020070)

Author brief: HAN Chao (1984-), PhD, senior engineer, main research interest: power transmission and transformation project, E-mail: hanchaohust@126.com.

DONG Chaoqiang (corresponding author), doctoral candidate, E-mail: Tungcq027@hust.edu.cn.

slurry with high water content ($>300\%$), and the strength of the treated mud can meet the demand for embankment filler utilization. This study has carried out a series of laboratory model tests to explore the feasibility and high efficiency of VP-FSCM process for treating waste mud (water content is about $150\%-300\%$); and to optimize the formulation (type, dosage, etc.) of VP-FSCM process in waste mud treatment. The test results show that: (1) The undrained shear strength of the waste mud treated by VP-FSCM after 28 days is 2.76 times that of the waste mud treated by the flocculation-solidification combined method (FSCM), which proves the high efficiency and feasibility of VP-FSCM. (2) The results of dehydration / settlement characteristics and mechanical characteristics show that the optimal additives for treating waste mud by VP-FSCM process are cement (OPC), ground granulated blastfurnace slag (GGBS), quicklime (CaO) and polyacrylamide (PAM), and their optimal contents are 5% , 5% , 1.5% and 0.12% respectively. (3) Under the optimal additive type and dosage, higher vacuum pressure results in greater undrained shear strength of the treated waste mud and lower moisture content after curing.

Keywords: waste mud; flocculation; solidification; vacuum preloading; shear strength; water content

随着经济的高速发展、城乡一体化建设进程加快,生态治理及配套基础设施建设持续推进。各类工程施工必然会带来巨量的废弃淤泥(浆)(含水率为 $150\%\sim 300\%$)^[1-2]。这些废弃淤泥以深色为主,含较多黏土细颗粒,具有强度低、承载力小、压缩性高、渗透系数小、有机质含量高等不良工程特性,难以直接被资源化利用^[2-3]。考虑到各大城市的淤泥堆场逐渐超负荷,且中粗砂石等理想填料日益短缺,一种合理的双赢处理方式应运而生——通过掺入外加剂将巨量废弃淤泥进行改性处理,转化成路堤填料,近距离消纳,以达到资源化利用目的。具体实施过程为:将废弃淤泥泵送至堆场中脱水,经过一段时间的自然风干或人工干化技术(如真空预压、堆载预压或电渗固结等)^[4-5]进一步脱水处理后,掺入固化剂进行改性处理,使其成为具有一定强度的路堤填料^[6],最终实现大体量废弃淤泥的减量化与资源化。

既有研究表明,纯水泥固化法处理高含水率淤泥浆的固化效率较低^[7-8],处理后的淤泥难以满足路堤填料强度标准,需要寻求更为合适的外加剂类型,以改进传统纯水泥固化工艺。鉴于此,基于污泥常规絮凝调理技术^[9-10]、传统水泥固化技术^[11-12]和传统真空预压技术^[13-14],提出一种有效处理高含水率疏浚淤泥浆的新方法,即絮凝-固化-真空预压联合法(VP-FSCM)^[6,15]。该方法实施流程为:在淤泥浆中先后加入固化剂(如水泥 OPC)和絮凝剂(如聚丙烯酰胺 PAM),并结合真空预压处理淤泥。其中,絮凝剂的絮凝调理作用改变土体与水泥颗粒结构排布,并使得土体与水泥颗粒接触更为紧密,宏观上促进淤泥的物理沉积/固结过程;随后伴随着土体与水泥颗粒的紧密排列,水泥的化学胶结作用变得更有效;最后联合真空预压促进淤泥中“物理沉

积/固结-化学固化耦合过程”向更有利的方向发展,从而大幅提高处理淤泥的晚期强度。前期试验结果已经证实了 VP-FSCM 处理高含水率疏浚淤泥浆的可行性和高效性^[6,15]。从本质上讲,VP-FSCM 处理淤泥包含絮凝剂的絮凝调理、固化剂的化学胶结和真空预压的加速脱水三重耦合作用。为更好地协同促进这三方面作用,在实际工程中应用 VP-FSCM 工艺处理淤泥时,本着高效廉价理念,需要优化外加剂(絮凝剂和固化剂)配方和确定合适的真空预压施工参数。

固化剂的配方优化主要考虑固化成本、固化效率和环境成本。近年来,学者们尝试利用工业废渣等固体废弃物替代传统固化剂(水泥和石灰等),并就此开展研究。例如,孙秀丽等^[16]试验结果表明,用碱激发高炉矿渣替代部分 OPC 固化淤泥,不仅可以显著提升其力学性能,还能稳定固化重金属污染物;Jongpradist 等^[17]研究表明,改性粉煤灰掺入或替代部分水泥后,固化软土的无侧限抗压强度和弹性模量均有所提高。絮凝剂的配方优化也主要考虑絮凝成本、絮凝调理效率和环境成本。常见絮凝剂类型包括:无机类($AlCl_3$ 、CaO 等)、合成高分子类(聚丙烯酰胺 PAM 等)、天然高分子类(壳聚糖等)和微生物类^[18-19],其中应用最广泛的是 $AlCl_3$ 、CaO 等无机絮凝剂和 PAM 类有机絮凝剂。例如,孙雨涵等^[20]利用阳离子聚丙烯酰胺(CPAM)和聚合氯化铝(PAC)处理天津、连云港两地高浓度淤泥质土,发现 CPAM+PAC 组合能有效使吹填混合淤泥形成胶体物质并沉降,泥水分离界限明显;He 等^[21]针对不同类型和剂量 PAM 对疏浚泥浆进行脱水试验,结果表明,阴、阳离子聚丙烯酰胺(APAM 和 CPAM)的脱水处理效果都较好;Cai 等^[22]和 Wang 等^[23]将絮凝调理和真空预压相结合,在竖直排水板

保持一定的真空压力时向疏浚淤泥中添加 APAM 和氢氧化钙组成的复合絮凝剂,将结合水转化为游离水,达到脱水目的。

笔者拟通过室内模型箱试验探索 VP-FSCM 工艺处理废弃淤泥(含水率为 150%~300%)的可行性和高效性,优化 VP-FSCM 工艺在处理淤泥中的外加剂配方(类型和掺量等),并在试验优选出的最佳外加剂类型和掺量条件下,设置不同真空压力梯度,探究其对处理后淤泥的沉降脱水特性和力学特性产生何种影响。

1 试验内容

1.1 试验材料

试验土样取自苏州常熟某生态环保清淤工程中的废弃淤泥,室内测定的废弃淤泥基本物性参数如表 1 所示,其天然含水率为液限的 2 倍,处于流塑状态。根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[24]塑性图分类,淤泥液限 $w_L < 50\%$ 且 $I_p < 0.73(w_L - 20)$,同时,有机质含量 $m_o < 5\%$,该废弃淤泥属于低液限粉土(ML)。表 2 给出了废弃淤泥的粒径特征值,淤泥的砂粒、粉粒、黏粒和胶粒分别为 4.24%、84.45%、11.31%,由于淤泥级配指标不均匀系数 $C_u > 5$,曲率系数 C_c 位于 1~3 范围内,因此,本试验废弃淤泥属于级配良好的土质^[25]。

表 1 废弃淤泥基本物性参数

Table 1 Main physical properties of the waste mud

天然含水率 $w_0/\%$	土粒相对密度 G_s	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 $I_p/\%$	有机质含量 $m_o/\%$
78.94	2.72	35.68	26.46	9.22	4.57

表 2 废弃淤泥粒径特征值

Table 2 Characteristic values of the waste mud particle size

砂粒(0.075~2 mm)/%	粉粒(0.002~0.075 mm)/%	黏粒和胶粒 (<0.002 mm)/%	有效粒径 $d_{10}/\mu\text{m}$
4.24	84.45	11.31	1.86
$d_{30}/\mu\text{m}$	限制粒径 $d_{60}/\mu\text{m}$	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c
6.91	19.37	10.41	1.33

试验所用固化剂共 3 种:水泥(OPC)、高炉矿渣(GGBS)、粉煤灰(FA)。水泥为 425 标号的普通硅酸盐水泥,其化学组成以 CaO、SiO₂ 和 Al₂O₃ 为主,占比分别为 59.71%、22.92%、6.09%。高炉矿渣为上海微神新型建材有限公司生产的 500 目粒化高炉矿渣粉,其化学组成同样以 CaO、SiO₂ 和 Al₂O₃ 为主,占比分别为 36.88%、30.64%、15.28%。粉煤灰来自河北灵寿县某发电厂,为灰褐色,其化学组成以 SiO₂

和 Al₂O₃ 为主,占比分别为 57.98%、30.42%。

根据前期对 10 余种无机絮凝剂和有机高分子絮凝剂综合比选结果^[6,15],试验絮凝剂选择 2 种无机絮凝剂(生石灰 CaO、聚合氯化铝 PAC)和 1 种有机絮凝剂(聚丙烯酰胺 PAM)。生石灰采用精细石灰粉,含钙量为 95% 左右。聚合氯化铝为白色,是介于 AlCl₃ 和 Al(OH)₃ 之间的一种水溶性无机高分子聚合物。聚丙烯酰胺选用分子量为 1 600 万~1 800 万的 AN926SHUC 型法国爱森阴离子聚丙烯酰胺。

1.2 试样制备与强度测定

开展 VP-FSCM 处理废弃淤泥室内模型试验,如图 1 所示。其制备试样、养护试样和测定强度、测定排水量和测定养护后含水率操作流程与文献^[15]中一致。详细步骤为:

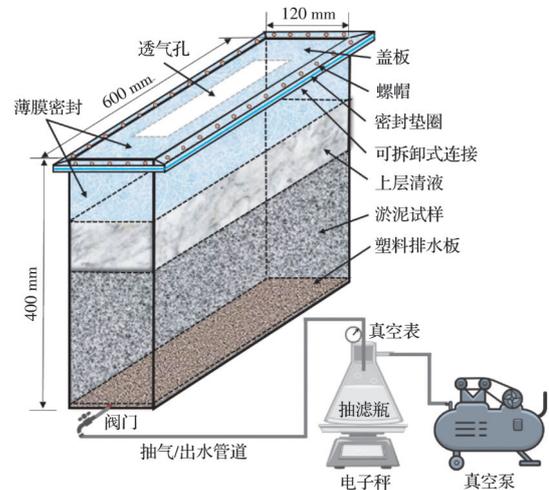


图 1 VP-FSCM 处理废弃淤泥室内模型试验

Fig. 1 Laboratory model test of VP-FSCM treatment of waste mud

1) 淤泥试样制备前,将 PAM 固体颗粒与水按质量比 1:500 混合溶解,配成 PAM 溶液待用。

2) 取适量废弃淤泥置于搅拌机内,按照淤泥的天然含水率和设计配合比计算出需要添加的水加入其中,机械均匀搅拌 3 min,配制成淤泥浆备用。其中搅拌设备采用 B80 大型搅拌机,基本参数:料桶容量 80 L,转速 288 r/min,额定输入功率 3.0 kW。

3) 将称量完成的设定剂量的固化剂(OPC、GGBS 或 FA)和絮凝剂(CaO 和 PAC(如有需要))加入淤泥浆试样中,机械快速搅拌 2 min,然后人工使用刮刀清除桶壁等“搅拌死角”,再机械搅拌 1 min,制备成“淤泥-固化剂-无机絮凝剂”混合浆液。

4) 如有需要,取设定剂量的有机絮凝剂 PAM 溶液加入“淤泥-固化剂-无机絮凝剂”混合浆液中,以 90 r/min 的速度机械匀速搅拌,直至开始出现絮团。然后以 60 r/min 的速度人工匀速搅拌,待产生

大量絮团且上层清液基本无黏性时(表明 PAM 大部分已与土颗粒发生反应)停止搅拌,制备成“淤泥-固化剂-絮凝剂”混合浆液。

5)将步骤 4)制备的“淤泥-固化剂-絮凝剂”混合浆液缓慢倒入真空预压模型箱(见图 1)中,使用刮刀将试样表面修整抹平,以减小不均匀自重应力产生的误差。

6)将真空预压模型箱与抽滤瓶、真空泵组连接(见图 1),然后按设定的真空压力进行真空预压试验,持续抽满 4 h 为止。在此步骤中需要同时记录每组工况试样排水量随抽滤时间的变化和试样表面沉降量随抽滤时间的变化。

7)达到预定养护龄期后,使用自制小型取样器分层取样,每组试验工况均有一组平行试样,每个养护龄期均设 4 个测点^[15],最后使用十字板剪切仪测定试样的不排水抗剪强度,并取样测定试样养护后的含水率。

1.3 试验工况

取废弃淤泥的等效初始含水率 w_{ci} (指淤泥所含水质量和 PAM 溶液所含水的质量之和与干土质量之比)为 180%。控制固化剂(OPC、GGBS、FA)总量与干土质量之比为 10%。控制无机絮凝剂 CaO

总量为 1.5%,将无机絮凝剂 PAC 和有机絮凝剂 PAM 分别与 CaO 搭配,择优选出复合絮凝剂类型,其中,PAC 和 PAM 掺量分别固定为 1% 和 0.12%。此外,真空压力 w_p 设置了 0、20、40、60 kPa 不同梯度,拟探究不同真空压力对 VP-FSCM 工艺处理后淤泥的沉降脱水特性和力学特性产生何种影响。除了对照组工况 A_0 和 D_1 外,其余工况均采用薄膜密封的方式进行密封(见图 1)。所有试验工况的养护龄期均为 7、14、21、28 d。

废弃淤泥试样工况配比试验方案如表 3 所示,其中工况 A_0 和 D_1 为絮凝-固化联合法(FSCM)处理组,旨在通过分别与工况 A_1 和 D_4 试样对比论证 VP-FSCM 相比 FSCM 处理废弃淤泥的可行性和高效性;工况 $A_1 \sim A_2$ 、 $B_1 \sim B_2$ 、 $C_1 \sim C_2$ 为 VP-FSCM 处理组,6 组工况中选用了 3 种固化剂搭配和 2 种絮凝剂搭配,旨在寻找出处理废弃淤泥的最佳外加剂种类和最优掺量,也即拟进一步优化 VP-FSCM 工艺在处理淤泥中外加剂的配方;工况 $D_1 \sim D_4$ 中真空压力不同,分别为 0、20、40、60 kPa,拟探究不同真空压力对 VP-FSCM 工艺处理后淤泥的沉降脱水特性和力学特性产生何种影响。

表 3 室内模型试验工况

Table 3 Program of the laboratory model tests

组号	编号	$w_{ci}/\%$	w_p/kPa	固化剂/ $\%$			絮凝剂/ $\%$			龄期/d
				OPC	GGBS	FA	CaO	PAC	PAM	
A	A_0	180	0	10	0	0	1.5	0	0.12	7、14、 21、28
	A_1	180	60	10	0	0	1.5	0	0.12	
	A_2	180	60	10	0	0	1.5	1	0	
B	B_1	180	60	5	5	0	1.5	0	0.12	
	B_2	180	60	5	5	0	1.5	1	0	
C	C_1	180	60	5	0	5	1.5	0	0.12	
	C_2	180	60	5	0	5	1.5	1	0	
D	D_1	180	0	5	5	0	1.5	0	0.12	
	D_2	180	20	5	5	0	1.5	0	0.12	
	D_3	180	40	5	5	0	1.5	0	0.12	
	D_4	180	60	5	5	0	1.5	0	0.12	

2 试验结果与分析

2.1 VP-FSCM 工艺处理废弃淤泥的可行性分析

2.1.1 VP-FSCM 相比 FSCM 处理淤泥强度的优势

室内模型试验证实了 VP-FSCM 工艺可以高效处理高含水率淤泥浆(含水率 $> 300\%$),并将其转化为路堤填料,进行资源化利用。尚需论证 VP-FSCM 工艺处理废弃淤泥(含水率为 $150\% \sim 300\%$)的可行性。图 2 显示了采用 FSCM(工况 A_0 和 D_1)或 VP-FSCM(工况 A_1 和 D_4)处理废弃淤泥的

不排水抗剪强度随养护龄期的变化曲线。图 2 表明:1)FSCM(工况 A_0 和 D_1)处理废弃淤泥不排水抗剪强度随养护龄期的增加增长不明显,发展趋势较为缓慢,28 d 养护龄期下强度最高不超过 25 kPa。2)试验工况 A_1 和 D_4 采用 VP-FSCM 工艺处理废弃淤泥,其不排水抗剪强度随养护龄期增长显著增加,28 d 养护龄期下的不排水抗剪强度约为 FSCM(工况 A_0 和 D_1)处理组的 2.76 倍,强度达 65 kPa,再次证实了 VP-FSCM 工艺处理废弃淤泥的可行性和高效性,与前期试验结论一致^[6, 15]。

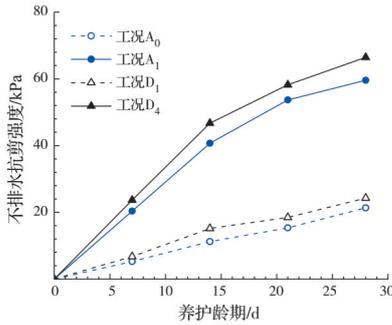


图 2 FSCM 和 VP-FSCM 处理废弃淤泥不排水抗剪强度随养护龄期变化规律

Fig. 2 Undrained shear strength of FSCM and VP-FSCM treated waste mud was changed with curing age

2.1.2 VP-FSCM 相比 FSCM 处理淤泥养护后含水率的优势

试样的含水率是影响强度发展的重要指标,通过测定研究试样的养护后含水率,也可以侧面解释上述强度发展规律。图 3 显示了 FSCM 和 VP-FSCM 处理废弃淤泥养护后含水率随养护龄期变化规律曲线,从图 3 可以看出:1)相比 FSCM,VP-FSCM 处理废弃淤泥可以显著降低其养护后含水率,主要与前期 4 h 的真空预压作用有关,抽滤 4 h 结束后,试样的含水率出现悬崖式降低,主要归因于真空预压协同絮凝调理作用排出了大量水分。2)FSCM(工况 A₀和 D₁)处理组养护后含水率变化规律基本一致;VP-FSCM(工况 A₁和 D₄)处理组养护后含水率变化规律也相差不大。由于 A 组和 D 组试验工况固化剂种类不一样,分别为“10% 掺量的 OPC”和“5% 掺量的 OPC+5% 掺量的 GGBS”,说明试样的养护后含水率与废弃淤泥的处理工艺相关性较大,与固化剂的种类相关性较小。

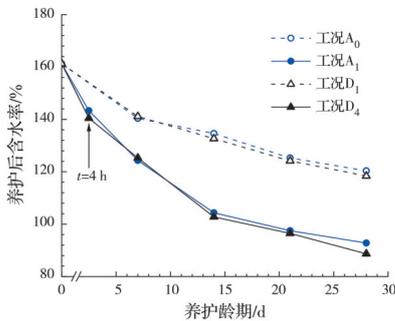


图 3 FSCM 和 VP-FSCM 处理废弃淤泥养护后含水率随养护龄期变化规律

Fig. 3 After-curing water content of FSCM and VP-FSCM treated waste mud was changed with curing age

结合图 2 和图 3 结果分析,为促使废弃淤泥的资源化利用,可以在 FSCM 工艺基础上引入真空预压(VP),即利用 VP-FSCM 工艺处理废弃淤泥可以满足路堤填料的需求。其内在机理在于真空预压

固结脱水作用协同促进了絮凝剂调理作用和固化剂水化凝结作用,进而提高了处理后废弃淤泥的不排水抗剪强度。

2.2 VP-FSCM 工艺中固化剂组合配方优选

2.2.1 不排水抗剪强度

图 4 为不同固化剂组合下 VP-FSCM 处理废弃淤泥不排水抗剪强度随养护龄期变化规律曲线,从图 4 可知:1)在相同絮凝剂组合“1.5% 掺量的 CaO+0.12% 掺量的 PAM”条件下,工况 A₁、B₁、C₁ 处理废弃淤泥的不排水抗剪强度随养护龄期变化趋势保持一致,工况 B₁ 对应最高不排水抗剪强度,工况 A₁ 其次,工况 C₁ 对应的不排水抗剪强度最低,说明这 3 种固化剂组合中最优的固化剂种类和掺量为“5% 掺量的 OPC+5% 掺量的 GGBS”。2)在相同絮凝剂组合“1.5% 掺量的 CaO+1% 掺量的 PAC”条件下,工况 A₂、B₂、C₂ 处理废弃淤泥的不排水抗剪强度随养护龄期变化规律与 1) 一致,即最优的固化剂种类和掺量同样为“5% 掺量的 OPC+5% 掺量的 GGBS”。表明相较于传统的硅酸盐水泥,水泥碱激发矿渣复合固化剂在应用 VP-FSCM 处理废弃淤泥时有着显著的固化优势。

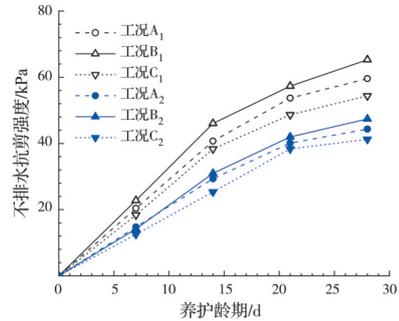


图 4 不同固化剂组合下 VP-FSCM 处理废弃淤泥不排水抗剪强度随养护龄期变化规律

Fig. 4 Undrained shear strength of VP-FSCM treated waste mud was changed with curing age under different solidification component combination

2.2.2 养护后含水率

图 5 为不同固化剂组合下 VP-FSCM 处理废弃淤泥养护后含水率随养护龄期变化规律,由图 5 可看出:1)6 组试验工况中养护后含水率变化趋势保持一致。在进行真空预压 4 h 抽滤后,所有试样的含水率陡降,随着养护龄期的增长,养护后含水率降低速率放缓。2)在相同絮凝剂组合“1.5% 掺量的 CaO+0.12% 掺量的 PAM”条件下,工况 A₁、B₁、C₁ 处理废弃淤泥的 28 d 养护后含水率分别为 92.77%、87.66%、95.23%,结合图 4,最优的固化剂种类和掺量为“5% 掺量的 OPC+5% 掺量的 GGBS”。3)在相同絮凝剂组合“1.5% 掺量的 CaO+1% 掺量的 PAC”条件下,工况 A₂、B₂、C₂ 处理

废弃淤泥养护后含水率随养护龄期变化规律与 2) 一致。

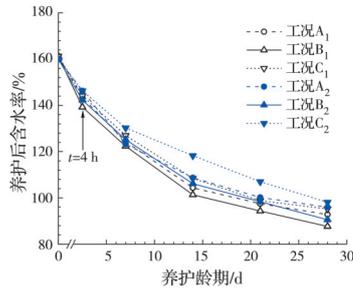


图 5 不同固化剂组合下 VP-FSCM 处理废弃淤泥养护后含水率随养护龄期变化规律

Fig. 5 After-curing water content of VP-FSCM treated waste mud was changed with curing age under different solidification component combination

2.3 VP-FSCM 工艺中絮凝剂组合配方优选

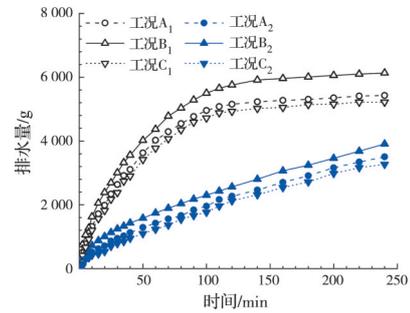
2.3.1 沉降脱水特性

在真空预压过程中,通过电子秤实时称量抽滤瓶质量变化并记录实时沉降值(见图 1),绘制排水量和表面沉降量与抽滤时间变化关系曲线。图 6 为不同絮凝剂组合下 VP-FSCM 处理废弃淤泥的沉降脱水特性变化规律。

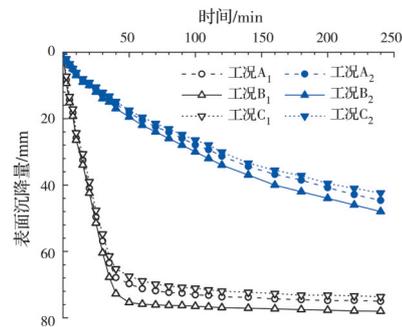
从图 6(a)可以看出:1)工况 A₁、B₁、C₁(或工况 A₂、B₂、C₂)处理废弃淤泥的排水量随抽滤时间变化规律趋势基本保持一致,说明不同组合的复合絮凝剂对其产生较大影响。具体来说,在絮凝剂组合“1.5% 掺量的 CaO+0.12% 掺量的 PAM”下,在抽滤早期(0~120 min)土体总排水量增长较快,在抽滤晚期(120~240 min)趋于平稳,说明此时土体中大部分自由水已经被排出;在絮凝剂组合“1.5% 掺量的 CaO+1% 掺量的 PAC”条件下,处理后废弃淤泥的排水量随抽滤时间基本以恒定速率增加,说明此时需要更长时间的真空抽滤。2)不同固化剂组合对处理后废弃淤泥的排水量随抽滤时间变化趋势影响不大。

从图 6(b)可以看出:1)工况 A₁、B₁、C₁(或工况 A₂、B₂、C₂)处理废弃淤泥的表面沉降量随抽滤时间变化规律趋势基本保持一致,说明不同组合的复合絮凝剂对其产生较大影响。具体来说,在絮凝剂组合“1.5% 掺量的 CaO+0.12% 掺量的 PAM”条件下,在抽滤早期(0~50 min)土体表面沉降量增长较快,在抽滤晚期(50~240 min)趋于平稳,说明在真空预压作用下,前 50 min 基本完成了土体的进一步加压固结,4 h 后表面沉降量约为 75 mm;在絮凝剂组合“1.5% 掺量的 CaO+1% 掺量的 PAC”条件下,处理后废弃淤泥的表面沉降量随抽滤时间基本以恒定速率增加,说明此时需要更长时间的真空抽

滤,4 h 后表面沉降量约为 44.6 mm。2)不同固化剂组合对处理后废弃淤泥的表面沉降量随抽滤时间变化趋势影响不大。



(a) 排水量随时间的变化



(b) 表面沉降量随时间的变化

图 6 不同絮凝剂组合下 VP-FSCM 处理废弃淤泥的沉降脱水特性

Fig. 6 Sedimentation and dehydration characteristics of VP-FSCM treated waste mud under different flocculant combination

从试验结果可以看出,真空预压不仅起到提高排水速率的作用,也能在试样自重沉积的基础上进一步促进淤泥中“物理沉积/固结-化学固化耦合过程”向更有利的方向发展,从而提高固化淤泥强度。VP-FSCM 处理淤泥包含絮凝剂的絮凝调理、固化剂的化学胶结和真空预压的加速脱水三重耦合作用,真空预压的作用协同促进了前两者作用的发挥。

2.3.2 不排水抗剪强度

为进一步证实 VP-FSCM 工艺在处理废弃淤泥中最佳絮凝剂种类和最优掺量为“1.5% 掺量的 CaO+0.12% 掺量的 PAM”。将图 4、图 5 分别绘制成柱状图,见图 7 和图 8。图 7 为不同絮凝剂组合下 VP-FSCM 处理废弃淤泥在不同龄期下的不排水抗剪强度柱状图,图 7 表明:1)固定固化剂组合条件下,分别分析工况 A₁与 A₂、工况 B₁与 B₂、工况 C₁与 C₂处理废弃淤泥的不排水抗剪强度,发现絮凝剂组合为“1.5% 掺量的 CaO+0.12% 掺量的 PAM”的工况组强度总高于絮凝剂组合为“1.5% 掺量的 CaO+1% 掺量的 PAC”。2)在絮凝剂组合为“1.5% 掺量的 CaO+0.12% 掺量的 PAM”条件下,

固化剂组合为“5% 掺量的 OPC+5% 掺量的 GGBS”的工况 B₁ 试样不排水抗剪强度最高。

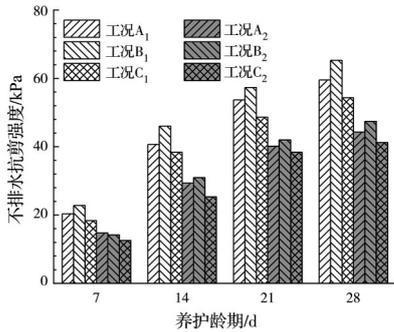


图 7 不同絮凝剂组合下 VP-FSCM 处理废弃淤泥在不同龄期下的不排水抗剪强度柱状图

Fig. 7 Histogram for undrained shear strength of VP-FSCM treated waste mud at different curing ages under different flocculant combination

2.3.3 养护后含水率

图 8 为不同絮凝剂组合下 VP-FSCM 处理废弃淤泥在不同龄期下的养护后含水率柱状图,图 8 表明:1)固定固化剂组合条件下,分别分析工况 A₁ 与 A₂、工况 B₁ 与 B₂、工况 C₁ 与 C₂ 处理废弃淤泥的养护后含水率,发现絮凝剂组合为“1.5% 掺量的 CaO+0.12% 掺量的 PAM”的工况组含水率总低于絮凝剂组合为“1.5% 掺量的 CaO+1% 掺量的 PAC”。2)在絮凝剂组合为“1.5% 掺量的 CaO+0.12% 掺量的 PAM”条件下,固化剂组合为“5% 掺量的 OPC+5% 掺量的 GGBS”的工况 B₁ 试样养护后含水率最低。

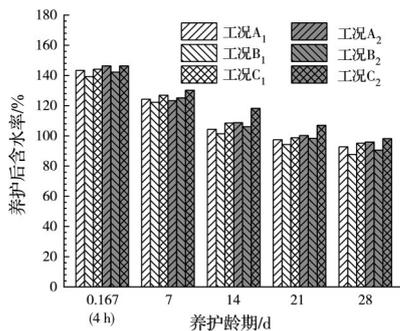


图 8 不同絮凝剂组合下 VP-FSCM 处理废弃淤泥在不同龄期下的养护后含水率柱状图

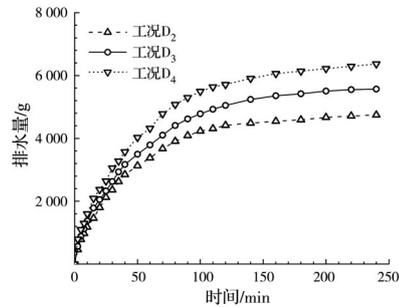
Fig. 8 Histogram for after-curing water content of VP-FSCM treated waste mud at different curing ages under different flocculant combination

2.4 真空压力对 VP-FSCM 处理废弃淤泥效率的影响分析

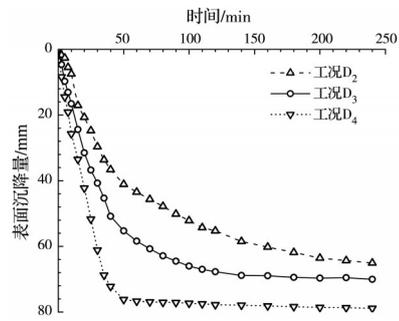
2.4.1 沉降脱水特性

在传统的真空预压处理吹填地基中,真空压力一直是众多学者研究的重点。为了更好地将 VP-

FSCM 工艺应用于工程中,在最优外加剂种类和掺量条件下,将真空压力作为控制变量,研究真空压力对 VP-FSCM 处理废弃淤泥效率的影响。图 9 为不同真空压力下 VP-FSCM 处理废弃淤泥的沉降脱水特性。



(a) 排水量随时间的变化



(b) 表面沉降量随时间的变化

图 9 不同真空压力下 VP-FSCM 处理废弃淤泥的沉降脱水特性 Fig. 9 Sedimentation and dehydration characteristics of VP-FSCM treated waste mud under different vacuum pressure

从图 9(a)可以看出:1)工况 D₂、D₃、D₄ 处理废弃淤泥的排水量随抽滤时间变化规律趋势基本保持一致,说明真空压力不会改变排水量随时间变化规律趋势。在抽滤早期(0~150 min)土体总排水量增长较快,抽滤晚期(150~240 min)趋于平稳,说明此时土体中大部分自由水已经被排出。2)不同真空压力对土体排水量排出速率和总量产生较大影响,真空压力越高,土体排水速率越快,总排水量越大,这一规律与传统真空预压法处理淤泥保持一致^[6, 13-15]。

从图 9(b)可以看出:1)工况 D₂、D₃、D₄ 处理废弃淤泥的表面沉降量随抽滤时间变化规律趋势虽然基本相同,但达到平稳态的时间不一致,分别为 240、110、50 min,且最终的表面沉降量数值也不一致。2)不同真空压力对土体表面总沉降量有较大影响,真空压力越高,土体表面沉降越大,说明真空预压产生的加压固结越明显,因此,在实际工程应用中,尽可能提高真空压力,以促进土体的排水固结,也即高真空压力可以提升 VP-FSCM 处理废弃淤泥的效率。

2.4.2 不排水抗剪强度

图 10 为不同真空压力下 VP-FSCM 处理废弃淤泥不排水抗剪强度随养护龄期变化规律,图 10 表明:1)除对照组工况 D_1 外,不同真空压力不改变不排水抗剪强度随龄期变化规律趋势,所有趋势均为缓慢增长。2)真空压力越高,不排水抗剪强度越大,例如养护 28 d 后工况 $D_2 \sim D_4$ 的不排水抗剪强度分别为 50.21、59.62、66.47 kPa。这一规律与传统真空预压法处理淤泥保持一致^[6, 13-15]。

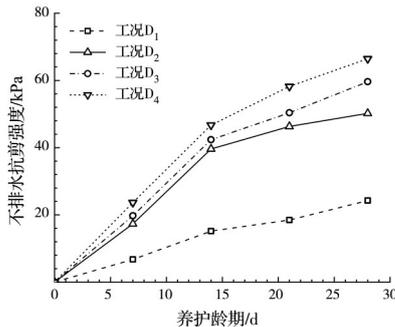


图 10 不同真空压力下 VP-FSCM 处理废弃淤泥不排水抗剪强度随养护龄期变化规律

Fig. 10 Undrained shear strength of VP-FSCM treated waste mud was changed with curing age under different vacuum pressure

2.4.3 养护后含水率

事实上,真空压力不仅对 VP-FSCM 处理废弃淤泥的不排水抗剪强度有影响,对试样的养护后含水率也存在影响。图 11 为不同真空压力下 VP-FSCM 处理废弃淤泥养护后含水率随养护龄期变化规律曲线。从图 11 可以看出,随着真空压力的提升,试样的养护后含水率也逐渐降低,说明真空压力的提升有利于促进淤泥排水。通过对比工况 $D_2 \sim D_4$ 与工况 D_1 发现,处理后的废弃淤泥养护后含水率明显降低,证实了 VP-FSCM 处理废弃淤泥的可行性与有效性。

结合图 10 和图 11 可以发现,进行真空预压时

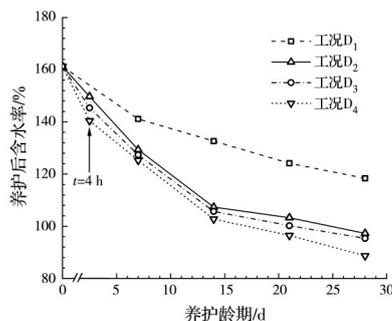


图 11 不同真空压力下 VP-FSCM 处理废弃淤泥养护后含水率随养护龄期变化规律

Fig. 11 After-curing water content of VP-FSCM treated waste mud was changed with curing age under different vacuum pressure

设定的真空压力越高,养护后含水率越低,不排水抗剪强度越高,这与一般情况下淤泥的含水率越低强度越高的规律一致,原因在于提高真空压力可以促进淤泥絮凝调理而快速脱水,进一步发挥固化剂功效,进而提高土体的后期强度^[6, 13-15]。

3 结论

通过室内模型箱试验,探索了 VP-FSCM 工艺处理废弃淤泥(含水率为 150%~300%)的可行性和高效性;优化了 VP-FSCM 工艺在处理淤泥中的外加剂配方(类型和掺量等),得到以下结论:

1) VP-FSCM 处理废弃淤泥后土体 28 d 不排水抗剪强度为 FSCM 处理废弃淤泥后的 2.76 倍。

2) 通过分析各种试验工况的沉降脱水特性和力学特性,得出用 VP-FSCM 工艺处理废弃淤泥的最佳外加剂种类为水泥(OPC)、高炉矿渣(GGBS)、生石灰(CaO)和聚丙烯酰胺(PAM),且最优掺量分别为 5%、5%、1.5%、0.12%。

3) 在最佳外加剂类型和掺量条件下,真空压力越高,处理后的废弃淤泥不排水抗剪强度越高,养护后含水率越低。

4) 实际工程中应用 VP-FSCM 工艺处理废弃淤泥时,可优选出外加剂配方,并适当提高真空压力,以提高其处理效率。

参考文献

- [1] 前瞻产业研究院. 2017—2022 年中国疏浚工程行业发展前景与投资战略规划报告[R]. 广东 深圳: 前瞻产业研究院, 2017.
- Forward Business Information Co., Ltd. Report of prospects and investment strategy planning on China dredging project industry (2017—2022) [R]. Shenzhen, Guangdong: Forward Business Information Co., Ltd., 2017. (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] WANG J, NI J F, CAI Y Q, et al. Combination of vacuum preloading and lime treatment for improvement of dredged fill [J]. Engineering Geology, 2017, 227: 149-158.

- [5] WU J, XUAN Y J, DENG Y F, et al. Combined vacuum and surcharge preloading method to improve Lianyungang soft marine clay for embankment widening project: A case [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2021, 49(2): 452-465.
- [6] 徐志豪, 章荣军, 郑俊杰, 等. 絮凝固化联合真空预压处理高含水率淤泥(浆)试验研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2021, 43(5): 10-18.
XU Z H, ZHANG R J, ZHENG J J, et al. Experimental study on flocculation-solidification combined with vacuum preloading treatment of dredged mud with high moisture content [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(5): 10-18. (in Chinese)
- [7] 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.
- [8] KHALID U, LIAO C C, YE G L, et al. Sustainable improvement of soft marine clay using low cement content: A multi-scale experimental investigation [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 191: 469-480.
- [9] 孙志涛, 李军, 王秀杰, 等. 吸附架桥机理主导下 APAM 的多级絮凝效能[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(1): 31-39.
SUN Z T, LI J, WANG X J, et al. Multi-stage flocculation efficiency of APAM led by adsorption and bridging mechanism [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(1): 31-39. (in Chinese)
- [10] WEI H, GAO B Q, REN J, et al. Coagulation/flocculation in dewatering of sludge: A review [J]. *Water Research*, 2018, 143: 608-631.
- [11] 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.
- [12] YAGHOUBI M, ARULRAJAH A, DISFANI M M, et al. Effects of industrial by-product based geopolymers on the strength development of a soft soil [J]. *Soils and Foundations*, 2018, 58(3): 716-728.
- [13] 王东星, 唐弈锴, 伍林峰. 疏浚淤泥化学絮凝-真空预压深度脱水效果评价[J]. *岩土力学*, 2020, 41(12): 3929-3938.
WANG D X, TANG Y K, WU L F. Evaluation on deep dewatering performance of dredged sludge treated by chemical flocculation-vacuum preloading [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(12): 3929-3938. (in Chinese)
- [14] WANG J, CAI Y Q, FU H T, et al. Experimental study on a dredged fill ground improved by a two-stage vacuum preloading method [J]. *Soils and Foundations*, 2018, 58(3): 766-775.
- [15] ZHANG R J, ZHENG Y L, DONG C Q, et al. Strength behavior of dredged mud slurry treated jointly by cement, flocculant and vacuum preloading [J]. *Acta Geotechnica*, 2022, 17(6): 2581-2596.
- [16] 孙秀丽, 童琦, 刘文化, 等. 碱激发粉煤灰和矿粉改性疏浚淤泥力学特性及显微结构研究[J]. *大连理工大学学报*, 2017, 57(6): 622-628.
SUN X L, TONG Q, LIU W H, et al. Study of microstructure and mechanical properties of dredged silt solidified using fly ash and slag stimulated by alkali [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2017, 57(6): 622-628. (in Chinese)
- [17] JONGPRADIST P, JUMLONGRACH N, YOUWAI S, et al. Influence of fly ash on unconfined compressive strength of cement-admixed clay at high water content [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2010, 22(1): 49-58.
- [18] 裘慧珺. 絮凝剂对市政污泥脱水性能的影响[J]. *环境与发展*, 2018, 30(5): 227-229.
QIU H J. Effect of flocculant on dewatering performance of municipal sludge [J]. *Environment and Development*, 2018, 30(5): 227-229. (in Chinese)
- [19] WANG S, MA C, ZHU Y, et al. Deep dewatering process of sludge by chemical conditioning and its potential influence on wastewater treatment plants [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(33): 33838-33846.
- [20] 孙雨涵, 周晓朋, 李怡, 等. 滨海淤泥质吹填土泥浆絮凝脱水试验研究[J]. *水道港口*, 2015, 36(4): 345-349.
SUN Y H, ZHOU X P, LI Y, et al. Experiment study of dredger fill mud flocculation dehydration in seaside [J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2015, 36(4): 345-349. (in Chinese)
- [21] HE J, CHU J, TAN S K, et al. Sedimentation behavior of flocculant-treated soil slurry [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2017, 35(5): 593-602.
- [22] CAI Y Q, WANG J, MA J, et al. A new method to improve the effectiveness of vacuum preloading on the consolidation of dredged fill in Wenzhou [J]. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2016, 2(51): 1794-1797.
- [23] WANG J, HUANG G, FU H T, et al. Vacuum preloading combined with multiple-flocculant treatment for dredged fill improvement [J]. *Engineering Geology*, 2019, 259: 105194.
- [24] 公路土工试验规程: JTG 3430—2020 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
Test methods of soils for highway engineering: JTG 3430—2020 [S]. Beijing: China Communications Press, 2020. (in Chinese)
- [25] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)