

钙质絮凝剂对高含水率吹填淤泥自重沉积特性的影响

宋苗苗¹,王正宏²,徐桂中¹,张 丹¹,翁佳兴³,唐 鹏⁴

(1. 盐城工学院土木工程学院,江苏 盐城 224051;2. 江苏省工程勘测研究院有限责任公司,江苏 扬州 225000;
3. 江苏鸿基水源科技股份有限公司,江苏 扬州 225002;4. 江苏科技大学土木工程与建筑学院,江苏 镇江 212003)

摘要:利用量筒沉积试验研究钙质絮凝剂处理高含水率吹填淤泥的自重沉积特性,探讨不同初始含水率下添加钙质絮凝剂对泥浆自重沉积特性的影响。试验结果表明,含钙质絮凝剂泥浆的自重沉积过程可分为絮凝阶段、阻碍沉降阶段和自重固结阶段。钙质絮凝剂预处理将引起泥浆达到自重沉积稳定的时间减少,而对泥浆自重沉积稳定沉降量的影响则随絮凝剂性质不同而变化。当絮凝剂为CaCl₂时,主要通过Ca²⁺的离子交换作用和电中和作用影响泥浆自重沉积特性。和CaCl₂不同,Ca(OH)₂的添加对泥浆自重沉积特性的影响,随沉积时间增加逐渐由絮凝作用为主转变为火山灰反应为主,故Ca(OH)₂预处理将引起泥浆自重沉积稳定沉降量的大幅度降低。

关键词:吹填淤泥;钙质絮凝剂;高含水率;自重沉积

中图分类号:TU433 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2021)05-0022-06

Effects of calcareous flocculants on self-weight sedimentation characteristics of dredged slurry with high water content//SONG Miaomiao¹, WANG Zhenghong², XU Guizhong¹, ZHANG Dan¹, WENG Jiaxing³, TANG Peng⁴
(1. School of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China; 2. Jiangsu Province Engineering Investigation and Research Institute Co., Ltd., Yangzhou 225000, China; 3. Jiangsu Hongji Water Source Technology Co., Ltd., Yangzhou 225002, China; 4. School of Civil Engineering and Architecture, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: Sedimentation model testes were carried out on dredged slurry treated by calcareous flocculants at high initial water content. The influences of calcareous flocculants on the self-weight sedimentaiton characteristics of dredged slurry were discussed based on the test results. The results show that the settling of dredged slurry with calcareous flocculants undergoes flocculation, hindering settling and self-weight consolidation. The addition of calcareous flocculant would result in a decrease of the settling time, while the stable settlement amounts induced by self-weight sedimentation vary with the properties and dosages of calcareous flocculants. For the CaCl₂, it mainly affects the self-weight sedimentation characteristics of dredged slurry by the ion exchange and electrical neutralization. Unlike the CaCl₂, the effects of Ca(OH)₂ on the self-weight sedimentation characteristics of dredged slurry is primarily controlled by flocculation at the earlier stage, and then by the pozzolanic reaction, resulting in a substantial reduction of the stable self-weight settlement value for dredged slurry pretreated with Ca(OH)₂.

Key words: dredged slurry; calcareous flocculant; high water content; self-weight sedimentation

近年来随着我国沿海地区经济的快速发展,土地资源紧张的现状越发严重。填海造陆和海涂围垦是解决这一问题的有效途径^[1-3]。随着环境和生态保护要求的提高,河沙、山石料等的开采日益受到限制,使得这类工程常面临理想填料资源短缺的难题。另一方面,为保证水质及通航能力,港口、河道每年都要进行疏浚清淤,同时围海造陆、人工岛修筑、航道建设等工程也涉及海底清淤,这些清淤处理每年将产生数亿方以上的高含水率疏浚淤泥^[2-6]。疏浚

出的淤泥一般以黏土颗粒为主,呈流动状态,在工程上难以直接利用而常作为废弃物处理^[4-7]。传统的吹填和抛泥处置方法,不仅需占用大量土地,还易污染周边环境^[4]。因此,近年来国内外一些工程开始将疏浚淤泥用于填海造陆、港口等工程^[1-3,5],不仅可以很好地解决土地资源不足、砂石料短缺、疏浚泥处置等问题,还实现了疏浚淤泥的资源化利用,符合资源节约型、环境友好型社会建设要求。

已有研究表明,高含水率淤泥的自重沉积特性

基金项目:国家自然科学基金(51978597);江苏省水利科技项目(2018012);江苏省高等学校自然科学研究面上项目(20KJB560030)

作者简介:宋苗苗(1987—),女,讲师,博士研究生,主要从事软土地基处理及疏浚泥处置等研究。E-mail:songmiaomiaol2@126.com

通信作者:徐桂中(1982—),男,副教授,博士研究生,主要从事疏浚泥处置及资源化利用等研究。E-mail:guizhongxu@163.com

对吹填工程设计与施工、吹填场地沉降计算、场地地基处理等都具有重要的影响^[7-10]。张先伟等^[8]通过研究天津滨海新区吹填泥浆的自重沉积固结特性,提出了吹填工程设计的控制指标,并给出了含水率临界值的经验计算公式。此外,国内外学者通过试验研究和理论分析,认为高含水率泥浆自重沉积过程一般包括絮凝阶段、沉降阶段和固结阶段,且初始含水率、砂粒含量、土体液限等都将影响其自重沉积特性^[11-15]。由于吹填淤泥初始含水率和黏粒含量都比较高,其自重沉积通常需要经历几个月甚至数年^[15-16]。为缩短吹填淤泥自重沉积历时,改善后续堆载预压、真空预压、固化处理等的效果,一些学者尝试采用絮凝剂对吹填淤泥进行预处理^[17-24]。研究表明,添加絮凝剂可加速泥浆的自重沉积过程,提高真空预压处理效果,固化淤泥强度等。

针对目前工程常用的各种无机絮凝剂,詹良通等^[25]认为在泥浆中添加高价阳离子(如 Ca^{2+})可提高泥浆自重固结速率和固结后密实度。倪俊峰^[26]对初始含水率分别为 125% 和 155% 的石灰处理吹填淤泥开展自重沉积试验,发现添加石灰对吹填淤泥自重沉积特性的影响随初始含水率的增加而显著。为进一步明确钙质絮凝剂对高含水率吹填淤泥自重沉积特性的影响,本文将分别以 CaCl_2 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 处理吹填淤泥(初始含水率大于 200%)为例,开展一系列的量筒沉积试验,探讨初始含水率、絮凝剂掺量和絮凝剂性质对泥浆自重沉积特性的影响。

1 试验方案

1.1 试验材料

试验所用高含水率吹填淤泥取自安徽蚌埠某疏浚泥堆场,液限为 58.3%,塑限为 26.3%,相对密度为 2.70 g/cm^3 ,大于 $75\text{ }\mu\text{m}$ 的砂粒质量分数为 3.5%, $5\sim75\text{ }\mu\text{m}$ 的粉粒质量分数为 48.3%,小于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的黏粒质量分数为 48.2%。其中,相对密度采用比重瓶法测定,土颗粒粒径分布采用密度计法测定,通过液塑限联合测定仪法获得土样的液限和塑限。由土体液限(58.3%)和塑限(26.3%)可知,试验所用土样为高液限黏土。

试验所用钙质絮凝剂为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 CaCl_2 ,分别购自天津市大茂化学试剂厂和天津市北方天医化学试剂厂,其中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 为白色粉末, CaCl_2 为白色固体。两种钙质絮凝剂主要化学成分质量分数均超过 95%,杂质均低于 1.0%。

1.2 试验方案

为明确钙质絮凝剂对高含水率吹填淤泥自重沉积特性的影响,分别以不含絮凝剂吹填淤泥、含

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 吹填淤泥和含 CaCl_2 吹填淤泥为研究对象,改变泥浆初始含水率和絮凝剂掺量,开展了 24 组量筒沉积试验,具体试验方案见表 1。其中,试验所用量筒规格为 1 000 mL,絮凝剂掺量为外加絮凝剂质量和泥浆中干土质量之比。

表 1 量筒沉积试验方案

吹填淤泥类型	泥浆初始含水率/%	絮凝剂掺量/%
不含絮凝剂吹填淤泥	232,348,464	0
含 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 吹填淤泥	232,348	0.5,1.0,2.0
含 CaCl_2 吹填淤泥	232,348,464	0.25,0.5,1.0,2.0,4.0

试验前,首先配制不同初始含水率的泥浆。之后,称取满足 1 000 mL 量筒沉积试验要求的泥浆放入烧杯内,并依据表 1 中的絮凝剂掺量计算需外加絮凝剂的质量,放入大烧杯内并使用小型搅拌器搅拌均匀。最后,将搅拌均匀的泥浆快速移入沉积试验所用量筒中,边移入边用细铁丝进行振捣,以避免移入过程中泥浆中产生大量的气泡和发生沉积。待泥浆量达到预定高度后,停止倒入泥浆并记录试验开始时间和泥水分界面出现时间。不同时刻泥水分界面的沉降量则通过沿量筒外侧竖直粘贴的刻度尺测定。需要注意的是整个试验过程中室温保持在 $(20\pm2)\text{ }^\circ\text{C}$,并在量筒敞口段覆盖密封膜,以避免温度变化和蒸发作用对泥浆自重沉积的影响。

2 试验结果与分析

2.1 泥水分界面沉降时程曲线

图 1 和图 2 为不同絮凝剂处理泥浆典型的泥水分界面沉降时程曲线,图中图例为泥浆中絮凝剂掺量。可以看出,泥水分界面沉降量随沉积时间的增加,呈先快速增加再逐渐趋于稳定的变化趋势,曲线形状与常规固结试验测定的沉降时程曲线类似。根据已有研究可知^[6-7],试验泥浆的沉降曲线为沉积沉降类型,即钙质絮凝剂处理后吹填淤泥泥浆的自重沉积过程也可分为絮凝阶段、阻碍沉降阶段和自重固结阶段。絮凝阶段的存在使得泥水分界面的出现需要一定的时间。在阻碍沉降阶段,泥浆自重沉降量较大。之后,随着沉积时间进一步增加,沉降逐渐减缓并进入自重固结阶段,该阶段泥浆自重沉降量整体较小。这和徐桂中等^[7,8,17-19,25]学者获得的吹填淤泥及絮凝剂处理吹填淤泥泥浆的泥水分界面沉降时程曲线变化规律基本一致。

当絮凝剂为 CaCl_2 时,泥水混合物中的 Ca^{2+} 可通过离子交换作用和电中和作用,使黏土颗粒表面的扩散双层厚度减小,相应的黏土颗粒间斥力降低,使微小土颗粒更易絮凝形成大的团聚体^[24-25],故含絮凝剂泥浆更快地出现泥水分界面,且在阻碍沉降阶

段泥水分界面沉降时程曲线都位于不含絮凝剂泥浆的下方。此外,由图 1 还可以发现泥浆自重沉积进入自重固结阶段时,泥水分界面沉降量随絮凝剂掺量的增加呈先增加后减小并逐渐趋于稳定的变化趋势。这主要是由于随着絮凝剂掺量的增加,黏土颗粒表面所带负电荷全部被中和,此时絮凝剂的絮凝效果达到最佳。之后,随着絮凝剂掺量的进一步增大,黏土颗粒表面开始带正电荷,颗粒间的斥力重新开始增大,絮凝效果开始减弱。当黏土颗粒表面所带正电荷达到饱和后,絮凝剂掺量的进一步增加将不再影响其絮凝效果。

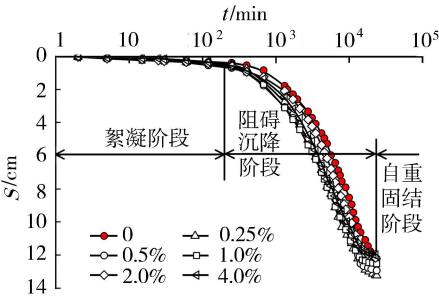


图 1 CaCl₂处理高含水率泥浆典型的泥水分界面

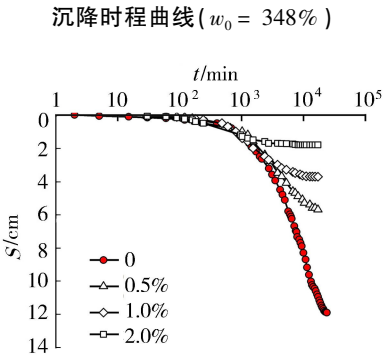


图 2 Ca(OH)₂处理高含水率泥浆典型的泥水分界面
沉降时程曲线 ($w_0 = 348\%$)

已有研究表明^[27],采用 Ca(OH)₂加固土体时,Ca²⁺首先通过交换黏土颗粒表面的低价阳离子促进土颗粒的絮凝,之后再与黏土颗粒表面溶解的活性二氧化硅和氧化铝发生火山灰反应。由此可知,在沉降初期(絮凝阶段),Ca(OH)₂也主要通过离子交换作用和电中和作用,促进土颗粒间絮凝形成尺寸较大的团聚体。之后,随着沉积时间进一步增加,Ca(OH)₂与土中的二氧化硅和氧化铝发生火山灰反应,生成具有凝胶作用的水化硅酸钙和水化铝酸钙,使土颗粒、土颗粒团聚体等进一步胶结形成稳定的土体结构。同时,由于团聚体内部包含一定量的自由水并吸附了大量的结合水,故和 CaCl₂不同,在阻碍沉降阶段和自重固结阶段,Ca(OH)₂的添加将引起泥浆阻碍沉降阶段持续时间及沉降量的大幅度降低,且泥浆进入自重固结阶段所需时间随絮凝剂掺量的增加逐

渐减小(图 2)。尽管 Ca(OH)₂处理泥浆的自重沉降量均显著小于未加絮凝剂的泥浆,但 Ca(OH)₂的添加可改变泥浆的渗透性、强度特性等,对后续真空预压处理、流动固化等具有重要的促进作用^[17, 24-26, 28-29]。

已有研究表明^[14-15],吹填淤泥的自重沉积特性和其初始含水率是密切相关的。因此,有必要对不同初始含水率下絮凝剂对泥浆自重沉积特性的影响进行分析。图 3 为不同初始含水率下含絮凝剂泥浆的泥水分界面沉降时程变化曲线。相同絮凝剂掺量下,初始含水率高的泥浆泥面沉降时程曲线始终位于初始含水率低的泥浆下方。这与已有不含絮凝剂高含水率泥浆自重沉积试验结果一致。对于含 CaCl₂泥浆,不同初始含水率泥浆泥面沉降量间的差异随初始含水率的增加逐渐减小。而对于含 Ca(OH)₂泥浆,相同沉积时间下初始含水率对泥浆泥面沉降量的影响随絮凝剂掺量的增加而增大。此外,相同初始含水率和絮凝剂掺量下,Ca(OH)₂处理泥浆的沉降量都小于 CaCl₂处理泥浆。

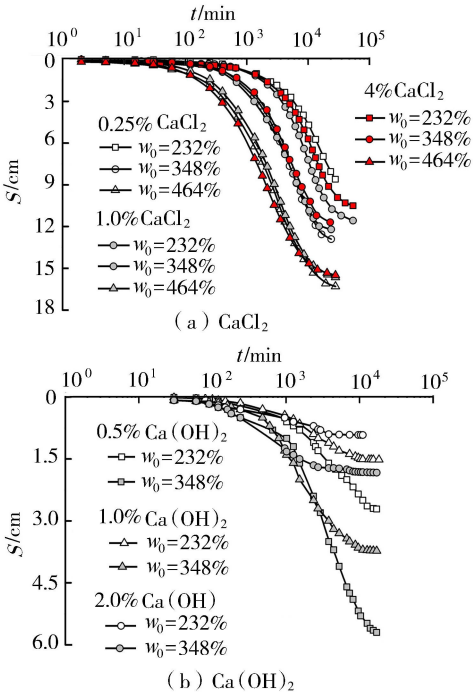


图 3 不同初始含水率下絮凝剂处理泥浆典型的
泥水分界面沉降时程变化曲线

2.2 泥面沉降速率

除泥水分界面沉降量外,沉降速率 v 也是评价泥浆自重沉积特性的一个重要指标,其主要用于表征泥浆自重沉积的快慢。Xu 等^[15]的研究表明采用公式(1)计算泥浆的泥面沉降速率是合适的。

$$v = \frac{S_{i+1} - S_i}{t_{i+1} - t_i} \tag{1}$$

式中 S_{i+1} 、 S_i 分别为 t_{i+1} 和 t_i 时刻泥水分界面的沉降量。

为进一步探讨钙质絮凝剂对高含水率泥浆自重沉积特性的影响,对不同絮凝剂掺量下泥浆沉降速率进行分析,结果如图 4 所示。在泥水分界面刚出现时,泥浆沉降速率比较大,这主要是由于不同泥浆泥水分界面出现的时间不同造成的。之后泥浆的沉降速率快速降低到一个稳定范围内。随着沉积时间的进一步增加,当泥浆自重沉积趋于稳定时,泥浆的沉降速率将接近零。絮凝阶段,添加两种钙质絮凝剂都将引起泥浆自重沉积速率的增加。由此可见, Ca^{2+} 的絮凝作用在该阶段起主导作用;而在阻碍沉降阶段,两种絮凝剂对泥浆沉降速率的影响规律并不完全相同,这和前述添加絮凝剂对泥浆泥面沉降时程曲线的影响相一致。该阶段 CaCl_2 对泥浆自重沉降速率的影响受絮凝剂掺量的影响,这可能是由于只有在适宜掺量下絮凝剂的絮凝效果才能达到最佳。而当絮凝剂为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 时,和未添加絮凝剂的泥浆相比,阻碍沉降阶段泥浆沉降速率随絮凝剂添加表现出降低的变化趋势,且沉降速率相对较快地趋近于零。这进一步表明阻碍沉降阶段 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 主要通过火山灰反应影响泥浆的自重沉积特性。

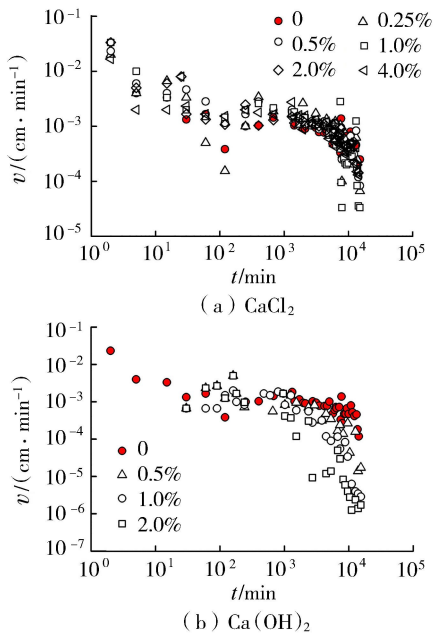


图 4 不同絮凝剂掺量下泥浆典型的沉积速率
随时间变化曲线 ($w_0 = 348\%$)

2.3 自重沉积稳定时间及沉降量

需要注意的是,沉积过程中泥水分界面并不是

匀速下沉的。已有研究表明,对数坐标系下泥面沉降量随时间呈先逐渐增加再趋于平稳的变化趋势(图 1 和图 2)。即当沉积达到一定时间后,泥浆在自重作用下沉降达到稳定。此时泥浆中的超静孔隙水压力消散完毕,自重沉积结束。故参考 Imai^[11]对泥浆自重沉积稳定时间的定义,根据泥水分界面沉降随时间在半对数坐标系下的变化曲线,计算泥浆自重沉积稳定时间 t_c ,结果见表 2。由表 2 可知,高含水率泥浆的自重沉积稳定时间随初始含水率的增加基本都是逐渐减小的。和未掺絮凝剂泥浆相比,相同初始含水率下含 CaCl_2 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的泥浆将更快达到自重沉积稳定。需要注意的是,含 CaCl_2 泥浆自重沉积稳定时间随絮凝剂掺量的增加并不总是减小的。由此可见,只有掺入适量的 CaCl_2 才能使泥浆较快地达到自重沉积稳定。和 CaCl_2 不同,泥浆的自重沉积稳定时间随 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 掺量的增加而减小,故需要根据实际工程情况进一步设计 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 掺量。

图 5 为不同初始含水率下泥浆自重沉积稳定时的沉降量 S_c 随絮凝剂掺量的变化规律。相同初始含水率下 S_c 随 CaCl_2 掺量的增加呈先增大后减小并逐渐趋于稳定的变化趋势,但整体而言,添加 CaCl_2 引起高含水率泥浆 S_c 的变化量较小,基本上都在 $(-1.0\text{ cm}, 0.5\text{ cm})$ 范围内变化。由此可知, CaCl_2 主要影响高含水率泥浆达到自重沉积稳定的时间,对其自重沉积稳定时的沉降量基本不产生影响。结合泥浆自重沉积泥水分界面沉降时程曲线、自重沉积稳定时间和自重沉积稳定时的沉降量可知,当 CaCl_2 掺量超过 2.0% 后,泥浆的自重沉积稳定时间和自重沉积稳定时的沉降量基本相同,而掺量增加将使工程造价提高。故对于本文研究所用泥浆,

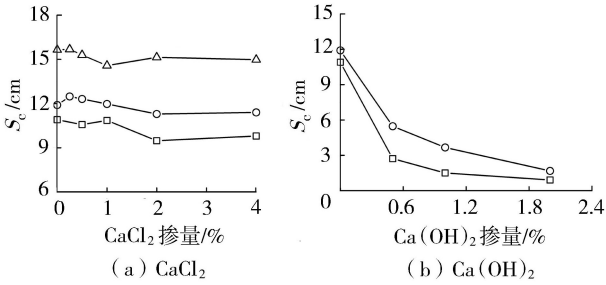


图 5 不同初始含水率下泥浆自重沉积稳定
沉降量随絮凝剂掺量变化规律

表 2 不同絮凝剂掺量下泥浆自重沉积稳定时间

$w_0/\%$	t_c/d								
	未掺絮凝剂	$w_1 = 0.25\%$	$w_1 = 0.5\%$	$w_1 = 1.0\%$	$w_1 = 2.0\%$	$w_1 = 4.0\%$	$w_2 = 0.5\%$	$w_2 = 1.0\%$	$w_2 = 2.0\%$
232	54.4		9.8	18.0	19.3	20.0	12.4	6.2	4.7
348	16.5	10.5	10.6	10.3	10.3	10.5	8.8	6.1	1.7
464	12.3	10.7	9.9	7.9	10.6	9.5			

注: w_1 、 w_2 分别为 CaCl_2 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的掺量。

CaCl₂的掺量以不超过 2.0% 为宜。

前述分析表明,和 CaCl₂不同,Ca(OH)₂对泥浆自重沉积特性的影响还包括火山灰反应。通过火山灰反应生成的水化硅酸钙和水化铝酸钙,一方面使土颗粒、土颗粒团聚体等进一步胶结形成稳定的土体结构,且团聚体内部包含一定量的自由水并吸附了大量的结合水;另一方面该化学反应还将一部分的自由水转化为结晶水,使得相同初始含水率下泥浆 S_c 随 Ca(OH)₂ 掺量的增加而显著减小,且减小幅度随 Ca(OH)₂ 掺量的增加而降低(图 5(b))。如对于初始含水率为 348% 的泥浆,当 Ca(OH)₂ 掺量由 0 逐渐增大到 0.5%、1.0% 和 2.0% 时,S_c 则由 11.9 cm 依次减小为 5.5 cm、3.7 cm 和 1.7 cm。对于含 Ca(OH)₂ 的泥浆,不同初始含水率泥浆 S_c 间的差异随 Ca(OH)₂ 掺量的增加逐渐减小。此外,和未加絮凝剂泥浆类似,含絮凝剂泥浆的 S_c 随其初始含水率的增加也是增大的。

综上可知,絮凝剂类型、絮凝剂掺量及泥浆初始含水率等因素都会影响钙质絮凝剂处理吹填淤泥的自重沉积特性。因此,采用絮凝-真空联合、絮凝-固化联合等方法处理高含水率吹填淤泥时,需根据实际工程需要,综合各方面影响因素确定絮凝剂类型和掺量,以使疏浚泥的自重沉积与后续工程处理措施相配套。

3 结 论

a. 和未加絮凝剂泥浆类似,含絮凝剂泥浆泥水分界面沉降时程曲线也可分为絮凝阶段、阻碍沉降阶段和自重固结阶段。相同初始含水率下,含 CaCl₂ 泥浆的泥水分界面沉降时程曲线基本都位于不含絮凝剂泥浆的下方,而含 Ca(OH)₂ 泥浆的泥水分界面沉降时程曲线基本都位于不含絮凝剂泥浆的上方。添加钙质絮凝剂对泥浆絮凝阶段和阻碍沉降阶段的影响更显著。

b. 絮凝阶段和阻碍沉降阶段,相同沉积时间下添加 CaCl₂ 将引起泥浆泥水分界面沉降量和沉降速率的增加。这主要是由于 Ca²⁺ 的出现促进了黏土颗粒间的絮凝。此外,还将引起高含水率泥浆自重沉积稳定时间的减少,对其自重沉积稳定时的沉降量则基本不产生影响。

c. 沉积初期,Ca(OH)₂ 主要通过离子交换作用和电中和作用影响泥浆自重沉积性状,故含 Ca(OH)₂ 泥浆和原泥浆泥水分界面沉降曲线间差异较小;而和含 CaCl₂ 泥浆不同,添加 Ca(OH)₂ 将引起泥浆自重沉积稳定时间及其所对应沉降量的大幅度减小,且不同初始含水率泥浆自重沉降稳定时的沉

降量的差距随 Ca(OH)₂ 掺量的增加逐渐减小,这主要是由于含 Ca(OH)₂ 泥浆中存在火山灰反应。

参考文献:

[1] 尚金瑞,杨俊杰,孟庆洲,等. 围海造陆填土技术及其应用研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2015,45(6):100-107. (SHANG Jinrui, YANG Junjie, MENG Qingzhou, et al. Filling technology and application of reclamation project[J]. Periodical of Ocean University of China,2015,45(6):100-107. (in Chinese))

[2] 武冬青,董志良,徐文雨. 化学-物理复合法在海底淤泥填海造地工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(9):1779-1784. (WU Dongqing, DONG Zhiliang, XU Wenyu. Application of chemical-physical combined method to land reclamation using seabed marine clay [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2013,32(9):1779-1784. (in Chinese))

[3] 董志良,张功新,李燕,等. 大面积围海造陆创新技术及工程实践[J]. 水运工程,2010(10):54-67. (DONG Zhiliang, ZHANG Gongxin, LI Yan, et al. Innovation of large-area reclamation engineering and practice in projects [J]. Port & Waterway Engineering,2010(10):54-67. (in Chinese))

[4] 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 Fanlu, LYU Yiyan, 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))

[5] WU S L, ZHU W, LU Y Y, et al. Quality control indexes and curing agent values for submerged poured solidifying-silt island: case study of the artificial island of Dalian Bay, China [J]. Construction and Building Materials, 2018,190:664-671.

[6] 赵含梅,赵仲辉,胡孝彭,等. 固化淤泥持水特性试验[J]. 水利水电科技进展,2014,34(1):57-60. (ZHAO Hanmei, ZHAO Zhonghui, HU Xiaopeng, et al. Experimental study on water retention characteristics of solidified dredged materials[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2014,34(1):57-60. (in Chinese))

[7] 徐桂中,吉锋,翁佳兴. 高含水率吹填淤泥自然沉降规律[J]. 土木工程与管理学报,2012,29(3):22-27. (XU Guizhong, JI Feng, WENG Jiaxing. Sedimentation behavior of dredged slurry at high water contents[J]. Journal of Civil Engineering and Management,2012,29(3):22-27. (in Chinese))

[8] 张先伟,杨爱武,孔令伟,等. 天津滨海吹填泥浆的自重沉降固结特性研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(5):769-776. (ZHANG Xianwei, YANG Aiwu, KONG

- Lingwei, et al. Self-weight sedimentation and consolidation characteristics of hydraulic-dredged slurry in Tianjin Binhai District [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(5): 769-776. (in Chinese)
- [9] CARRIER W D, BROMWELL L G, SOMOGYI F, et al. Design capacity of slurried mineral waste ponds [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 109(5): 699-716.
- [10] 张楠, 朱伟, 王亮, 等. 吹填泥浆中土颗粒沉降-固结规律研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1681-1686. (ZHANG Nan, ZHU Wei, WANG Liang, et al. Study of sedimentation and consolidation of soil particles in dredged slurry [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1681-1686. (in Chinese))
- [11] IMAI G. Experimental studies on sedimentation mechanism and sediment formation of clay materials [J]. Soils and Foundations, 1981, 21(1): 7-20.
- [12] BEEN K, SILL G. Self-weight consolidation of soft soil: an experimental and theoretical study [J]. Géotechnique, 1981, 31(4): 519-535.
- [13] 曹玉鹏, 吉锋. 吹填淤泥沉积规律室内试验 [J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(3): 36-39. (CAO Yupeng, JI Feng. Model tests on sedimentation behavior of dredged sludge [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(3): 36-39. (in Chinese))
- [14] 武亚军, 魏星, 唐晶. 初始含水率和掺砂量对吹填土沉降的影响 [J]. 上海大学学报(自然科学版), 2018, 24(2): 278-286. (WU Yajun, WEI Xing, TANG Jing. Effect of initial water content and sand content on dredger fill settlement [J]. Journal of Shanghai University (Natural Science), 2018, 24(2): 278-286. (in Chinese))
- [15] XU G Z, GAO Y F, HONG Z S, et al. Sedimentation behavior of four dredged slurries in China [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2012, 30(2): 143-156.
- [16] ZENG L L, HONG Z S, TIAN W B, et al. Settling behavior of clay suspensions produced by dredging activities in China [J]. Marine Geoscience & Geotechnology, 2017, 36(1): 30-37.
- [17] 赵森, 曾金芳, 王军, 等. 絮凝-真空预压加固吹填淤泥试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(6): 1291-1296. (ZHAO Sen, ZENG Jinfang, WANG Jun, et al. Experimental study of flocculation combined with vacuum preloading to reinforce silt foundation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(6): 1291-1296. (in Chinese))
- [18] HE J, CHU J, TAN S K, et al. Sedimentation behavior of flocculant-treated soil slurry [J]. Marine Geoscience & Geotechnology, 2017, 35(5): 593-602.
- [19] 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.
- [20] LEI H Y, XU Y G, LI X, et al. Effects of polyacrylamide on improvement of dredger fill with vacuum preloading method [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(9): 04019193.
- [21] 蒲河夫, 潘友富, KHOTEJA D, 等. 絮凝-水平真空两段式脱水法处理高含水率疏浚淤泥模型试验研究 [J]. 岩土力学, 2020, 41(5): 1502-1509. (PU Hefu, PAN Youfu, KHOTEJA D, et al. Model test on dewatering of high-water-content dredged slurry by flocculation-horizontal vacuum two-staged method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(5): 1502-1509. (in Chinese))
- [22] 邢伟, 王东星. 石灰改性淤泥的抗压和抗剪强度试验研究 [J]. 人民长江, 2016, 47(24): 84-87. (XING Wei, WANG Dongxing. Experimental study on compressive and shear strength of lime-modified sludge [J]. Yangtze River, 2016, 47(24): 84-87. (in Chinese))
- [23] 陈宏, 刘胜宇, 陈绍文, 等. 吹填泥浆的混凝沉降特性研究 [J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(5): 69-72. (CHEN Hong, LIU Shengyu, CHEN Shaowen, et al. Laboratory study on coagulation-sedimentation behaviors of hydraulic-dredged mud [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(5): 69-72. (in Chinese))
- [24] 武亚军, 顾赛帅, 骆嘉成, 等. 无机药剂对工程废浆药剂真空预压的影响 [J]. 中国公路学报, 2018, 31(9): 34-42. (WU Yajun, GU Saishuai, LUO Jiacheng, et al. Effect of inorganic chemicals on vacuum preloading with flocculation of construction waste slurry [J]. China Journal of Highway Transportation, 2018, 31(9): 34-42. (in Chinese))
- [25] 詹良通, 童军, 徐洁. 吹填土自重沉积固结特性试验研究 [J]. 水利学报, 2008, 39(2): 201-205. (ZHAN Liangtong, TONG Jun, XU Jie. Laboratory study on self-weight sedimentation and consolidation behaviors of Hydraulic-dredged mud [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(2): 201-205. (in Chinese))
- [26] 倪俊峰. 石灰絮凝联合真空预压加固吹填淤泥试验研究 [D]. 温州: 温州大学, 2017.
- [27] SALEHI M, SIVAKUGAN N. Effects of lime-clay modification on the consolidation behavior of the dredged mud [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2009, 135(6): 251-258.
- [28] BOARDMAN D I, GLENDINNING S, ROGERS C D. Development of stabilization and solidification in lime-clay mixes [J]. Géotechnique, 2001, 50(6): 533-543.
- [29] 刘娉慧, 肖树芳, 王清. 外掺剂加固吹填泥浆的机理分析 [J]. 工程地质学报, 2005, 13(2): 285-288. (LIU Pinghui, XIAO Shufang, WANG Qing. Mechanism of improvement of dredger fill serous fluid with additive [J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(2): 285-288. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-04-06 编辑: 骆超)