文章编号：1673-9469（2017）03-0050-06　doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2017.03.011

吹填泥浆絮凝沉降规律研究

张 涛[1]，艾英钵[2]，范志浩[1]，沙学军[1]

（1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室，江苏 南京 210098；2. 河海大学 岩土工程研究所，江苏 南京 210098）

摘要：以温州洞头吹填泥浆为研究对象，利用沉降柱试验，考察吹填泥浆的絮凝沉积规律。结果表明，CPAM 的加入显著提高了泥浆的沉降速率，可有效提高泥水分离速率，并使上覆水澄清，一定程度上可增加沉积土的密度、降低沉积土的孔隙比；同时，根据吹填泥浆的絮凝沉积规律，提出以CPAM作为絮凝剂处理吹填泥浆的絮凝沉积模式，将其分为絮凝沉降、快速沉降、慢速沉降、稳定四个阶段。

关键词：吹填泥浆；絮凝沉降；CPAM；孔隙比

中图分类号：TU411　**文献标志码**：A

Study on the flocculation sedimentation law of hydraulic-dredged Slurry

ZHANG Tao[1]，AI Yingbo[2]，FAN Zhihao[1]，SHA Xuejun[1]

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing, 210098, China; 2. Research Institute of Geotechnical Engineering, ohai University, Jiangsu Nanjing, 210098, China)

Abstract：By using the sedimentation column test, the flocculation sedimentation law of the hydraulic-dredged slurry is investigated with the case of Dongtou of Wenzhou. The results show that the addition of CPAM can increase the settling rate of slurry, improve the separation rate of slurry, and make the overlying water clear, which can increase the density of sedimentary soil in some extent, and reduce the void ratio of sedimentary soil; At the same time, according to the flocculation sedimentation law of hydraulic-dredged slurry, the flocculation sedimentation model of CPAM as flocculant to treat the dredger filled slurry is put forward, which is divided into four stages of flocculation sedimentation, rapid settling, slow settling and stabilization.

Key words：hydraulic-dredged slurry; flocculation sedimentation; CPAM; void ratio

我国沿海经济发达地区，土地的需求量持续增加，其供求矛盾日渐突出。填海造陆和海涂围垦是解决沿海城市土地稀缺的有效途径[1]，为此我国每年开展很多吹填工程项目。由于吹填泥浆含水率高、透水性差、富含粘粒，在吹填工程结束后需要很长时间的自然晾晒，待表面形成硬壳层后才能进行后续的地基处理，这无疑给工程建设带来了施工周期长的问题[2-5]。为此，有学者参考水处理行业中污泥絮凝沉降的方法，对正在吹填的泥浆同步进行处理，通过改变泥浆土颗粒的带电性质，减弱粘土矿物的吸水性，以及通过絮凝机理来增大絮团粒径，加速泥水分离，以节省时间和便于后续的排水固结处理[6-7]。本文以吹填泥浆现场实测含水率为依据，按照含水率500%配置试验泥浆。通过在吹填泥浆中添加150 mg/L的絮凝剂CPAM[8]，利用室内沉降柱试验[9]，考察了其不同沉积时间对泥浆沉降的影响，探究了自然沉降和絮凝沉降两种沉降模式下泥浆的沉降曲线、沉积土的性质（含水率、密度、孔隙比）、

收稿日期：2017-07-06
基金项目：中央高校基本科研业务费专项基金资助项目（2015B17714）
作者简介：张涛（1992-），男，山西临汾人，硕士，从事环境岩土方面的研究。

上覆水的浊度及絮体的粒度组成，明确了吹填泥浆的絮凝沉积规律，提出了絮凝沉积模式，为吹填工程的设计及后续的地基处理工程提供技术指导。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

试验所用的吹填淤泥取自浙江省温州市洞头县海涂围垦吹填区，淤泥从吹填区取出后迅速装入蓝色塑料大桶，桶口双层密封以保持其原始含水率，然后运至研究所，储存于地下室，温度和湿度相对稳定，防止水分流失和由于光照发生的有机质发酵。试验前，将吹填淤泥中的贝壳等杂质挑出，并过 0.1 mm 的筛。试验用泥按照国家标准 [10] 进行各项基本物理性质指标的测定。根据试验结果，洞头吹填淤泥的主要物理指标如表 1 所示。试验用絮凝剂 CPAM 的配置方法：称 3 g 的 PAM，先加少量的蒸馏水，搅拌溶解后，再加蒸馏水至 1 000 g，配制成质量浓度为 0.3%的溶液。

表 1 试验用淤泥的基本物理性质指标
Tab.1 The basic physical property index of test sludge

取泥地	比重 G_s	液限 ω_L /%	塑限 ω_P /%	粘粒含量 (粒径 <5 μm)/%
温州洞头	2.72	56.7	25.4	49

1.2 试验方法

将试验用淤泥加入适量水调配成含水率为 500%的泥浆，并搅拌均匀，取 10 L 注入内径 13 cm、高 100 cm 的有机玻璃沉降柱中，加入 150 mg/L 的絮凝剂溶液，搅拌均匀后静置，观测记录泥面的下沉量。本试验另设平行样，在预测时间点开阀取样，进行含水率和粒组的测定，取样时间分别为 5、10、20、30 min、4 h、1、2……7 d。

2 试验结果与分析

2.1 泥面的絮凝沉降曲线

吹填泥浆的絮凝沉降曲线如图 1 所示，从图中可以看出，CPAM 添加前后，沉降曲线形状发生了显著变化。CPAM 添加前，曲线形状与常规压缩试验中 S-lg*t* 曲线相似，呈反“S”型；添加 CPAM 后，沉降初期的直线段变得极短，沉降中期的曲线斜率增大，泥浆相对较早地进入沉积稳定阶段。从图中也可以看出，自然沉积和絮凝沉积两种沉积情况下，最终的沉降量不一致，絮凝沉积下的沉降量要大于自然沉积下的。这是因为絮凝剂 CPAM 的分子链上带有正电荷活性基团，它可与带负电荷的有机物发生电中和、吸附架桥作用，从而使部分有机物得到去除 [11]。另外，相较于自然沉积形成的絮团，吹填泥浆絮凝沉积形成的絮团孔隙要小，絮团密度要大，所以在底部堆积而成的沉积土的高度要小。因此，两种沉积情况下的沉降量表现出不一致。

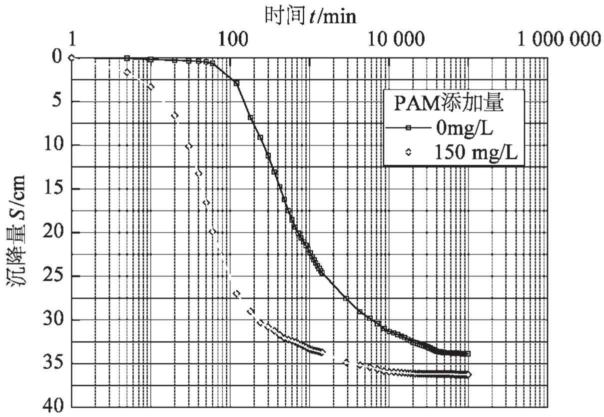


图 1 吹填泥浆絮凝沉降曲线
Fig.1 Flocculation settlement curve of hydraulic-dredged slurry

2.2 沉积土性质

根据多孔同时取样测试得到含水率的数据，换算成相应的密度、孔隙比。由于泥浆的自然沉积固结过程均在水中运动，可假设泥浆的饱和度 S_r=100%，则泥浆可看作为固、液两相体。含水率与孔隙比的关系为 $e = \omega \cdot G_s$，密度与含水率的关系为 $\rho = \dfrac{G_s(1+\omega)}{1+\omega \cdot G_s}\rho_w$，式中：$e$ 为孔隙比；ω 为含水率；G_s 为土粒比重；ρ_w 为水的密度，g/cm^3；ρ 为泥浆的密度，g/cm^3 。

泥浆自然沉积和絮凝沉积两种沉积模式下，不同深度处沉积土的含水率、密度、孔隙比随时间的变化情况如图 2 到图 4 所示。从图中可以看出，自然沉积和絮凝沉积两种情况下，沉积淤泥土均存在明显的含水率分层分布现象。越靠近沉降柱底部，含水率越低，这是由于泥浆颗粒自由沉降中，大颗粒的沉降速率快于小颗粒的沉降速率，沉降结束后，将在沉积柱底部形成以粗颗粒为主的高密度淤泥沉淀层，由于颗粒之间的孔隙较大，自由水能够比较容易地排出，因而含水率比较低，沉积层比较密实。而沉速较慢的小颗粒，在沉降结束后，将停留在大

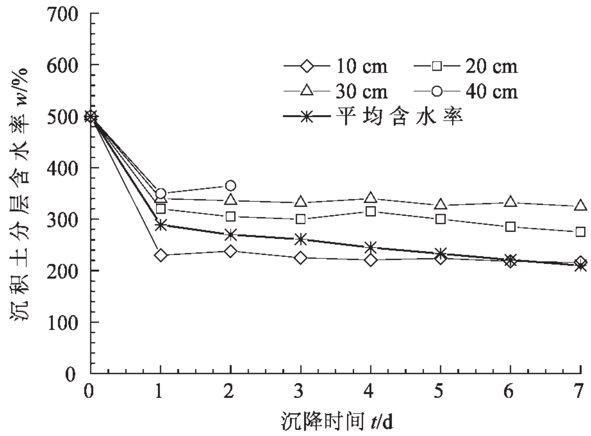
颗粒沉积层的上部，由于颗粒太细，颗粒之间孔隙较小，自由水排除困难，造成了上部含水率明显地高于下部。这和前人研究得到的泥浆含水率沿沉降柱垂直方向梯级分布规律一致。

与自然沉积分层现象相比，由于絮凝作用的影响，添加 PAM 后泥浆含水率的分层现象减小，各层含水率比较接近。这是因为在添加 PAM 后，由于其吸附架桥作用，使得淤泥颗粒更易凝聚成大絮团，絮团之间又相互粘结，致使泥浆絮团体成为一个结构稳定的整体而下沉，各分层的孔隙相差较小，含有较少的自由水，因而泥浆分层含水率也相差较小。

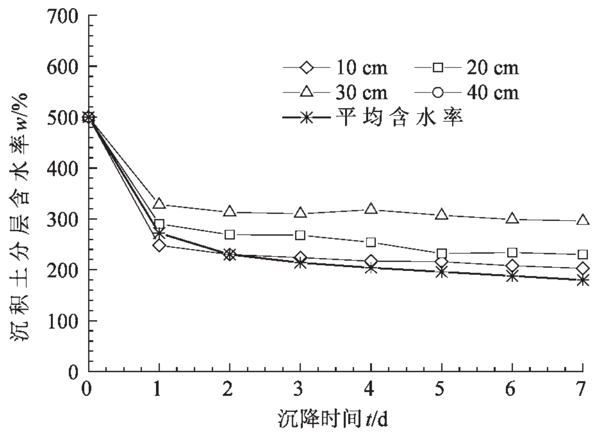
通过泥面的高度变化，计算出沉降柱中泥面以下泥浆的平均含水率，与各分层的含水率进行比较，可以得知：在沉降第 1 d，泥浆的平均含水率下降迅速，基本可降至初始含水率的一半，随着沉降的继续而减缓，但是相对于各层的含水率变化幅度，仍然较大，表现在图中为含水率变化曲线斜率大于各分层含水率的斜率。同时，对图中平均含水率和分层含水率进行比较可以看出，在自然沉积刚开始时，泥浆的平均含水率介于最下方两个取泥口的含水率之间，随着沉降进行，逐渐低于最低取泥口的含水率。絮凝沉积时，其平均含水率已接近或低于最低取泥口的含水率直到沉降结束。

从图 3 可以看出，CPAM 絮凝剂的添加，能在一定程度上减小吹填泥浆的孔隙比。吹填泥浆的孔隙比在快速沉降阶段迅速减小，随着时间的推移，最终趋于稳定。在自由沉积时，吹填泥浆未能形成足够的絮凝体，因而沉降缓慢，沉积土孔隙比达到稳定状态需要的时间较长，最终孔隙比较大；而当添加絮凝剂 CPAM 后，其通过吸附架桥、电中和作用使泥浆颗粒聚集成团，泥水分离速度加快，沉积土的孔隙比能更快地达到稳定状态，最终孔隙比较小。

从图 4 可以看出，絮凝剂 CPAM 的加入，一定程度上可以增加吹填泥浆的密度。吹填泥浆的密度



（a）自然沉积



（b）絮凝沉积

图 2 泥浆沉积土含水率随时间的变化关系

Fig.2 Relationship between water content and time of mud-deposited soil

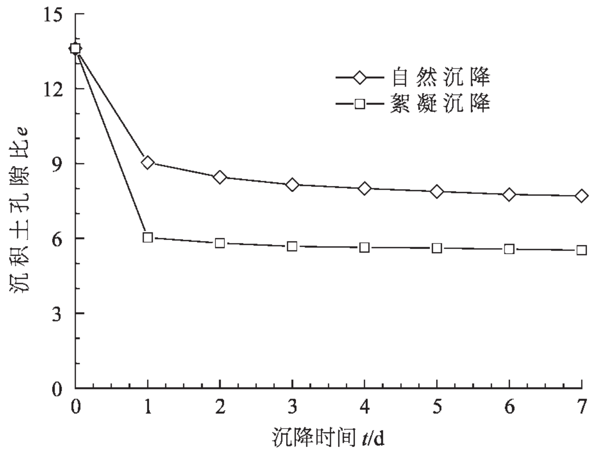


图 3 泥浆沉积土孔隙比随时间的变化关系

Fig.3 Relationship between void ratio and time of mud-deposited soil

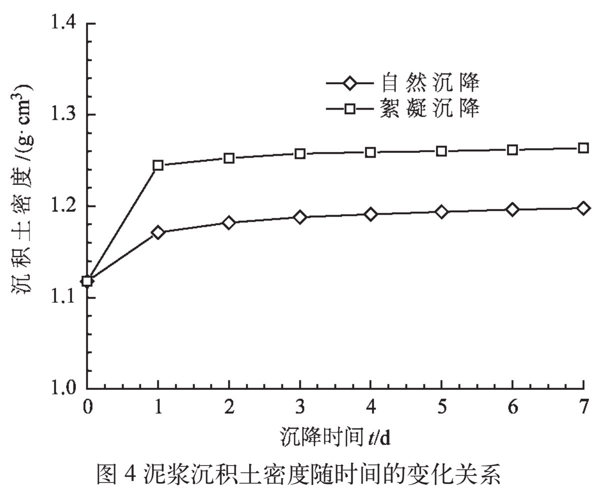


图 4 泥浆沉积土密度随时间的变化关系

Fig.4 Relationship between density and time of mud-deposited soil

在快速沉降阶段迅速增加，随着时间的推移，最终趋于稳定。在自由沉积时，吹填泥浆未能形成足够的絮凝体，因而沉降缓慢，沉积土密度达到稳定状态需要的时间较长，最终密度较低；而当添加絮凝剂 CPAM 后，其通过吸附架桥、电中和作用使泥浆颗粒聚集成团，泥水分离速度加快，沉积土的密度更快达到稳定状态，最终密度较高。

2.3 吹填泥浆絮凝沉积过程中的粒组变化

利用多孔分层取样测得含水率的同时，为测得不同时间各个沉积深度处泥浆土颗粒的体积含量粒度组成变化提供了条件。取沉积层高度为 10、20、30、40、50 cm，绘制吹填泥浆在自然沉降和絮凝沉降两种条件下，试验前 15 min 的粒组变化如图 5、图 6 所示。

由图 5 可以看出，初始含水率为 500% 的吹填泥浆自然沉积时，图中对应高度处 5 个沉积层中泥浆土颗粒变化量的粒度组成变化在不同高度和不同时间上均无明显变化。这是因为温州吹填泥浆的黏粒含量较高，多数泥浆土颗粒的重力小于沉降阻力，颗粒之间在较长时间内处在絮凝悬浮状态。另外，其它少数自重大于沉降阻力的泥浆土颗粒粒组，其沉速基本相同，颗粒之间无明显分选现象，每层泥浆中土颗粒增加量的粒度组成基本相同。

当向泥浆添加 150 mg/L 的 CPAM 时，泥浆土颗粒向下沉积趋势明显，上部沉积层的土颗粒含量减少，底部沉积层的土颗粒含量增加。由图 6 可以看出，试验在沉积进行的整个过程中，最底部沉积层的土颗粒增加量一直以 30 ~ 200 μm 的颗粒为主，原因是 CPAM 添加量的进一步增加，使泥浆中大量 5~30 μm 的土颗粒在沉降 15 min 内也在发生絮凝，絮凝现象相对更加广泛，絮凝作用相对更强，絮凝成团的粒径也更大。然而，由于粗颗粒的快速堆沉积，产生较强的向上回流作用阻碍了 30~75 μm 的土颗粒沉积。因此，形成沉积物的底部沉积层的粗颗粒含量较大，而 30~75 μm 的土颗粒有滞后现象。

从图 5、图 6 中可以看出，在沉降 15 min 内，自然沉积和絮凝沉积两种条件下，均发生了不同程

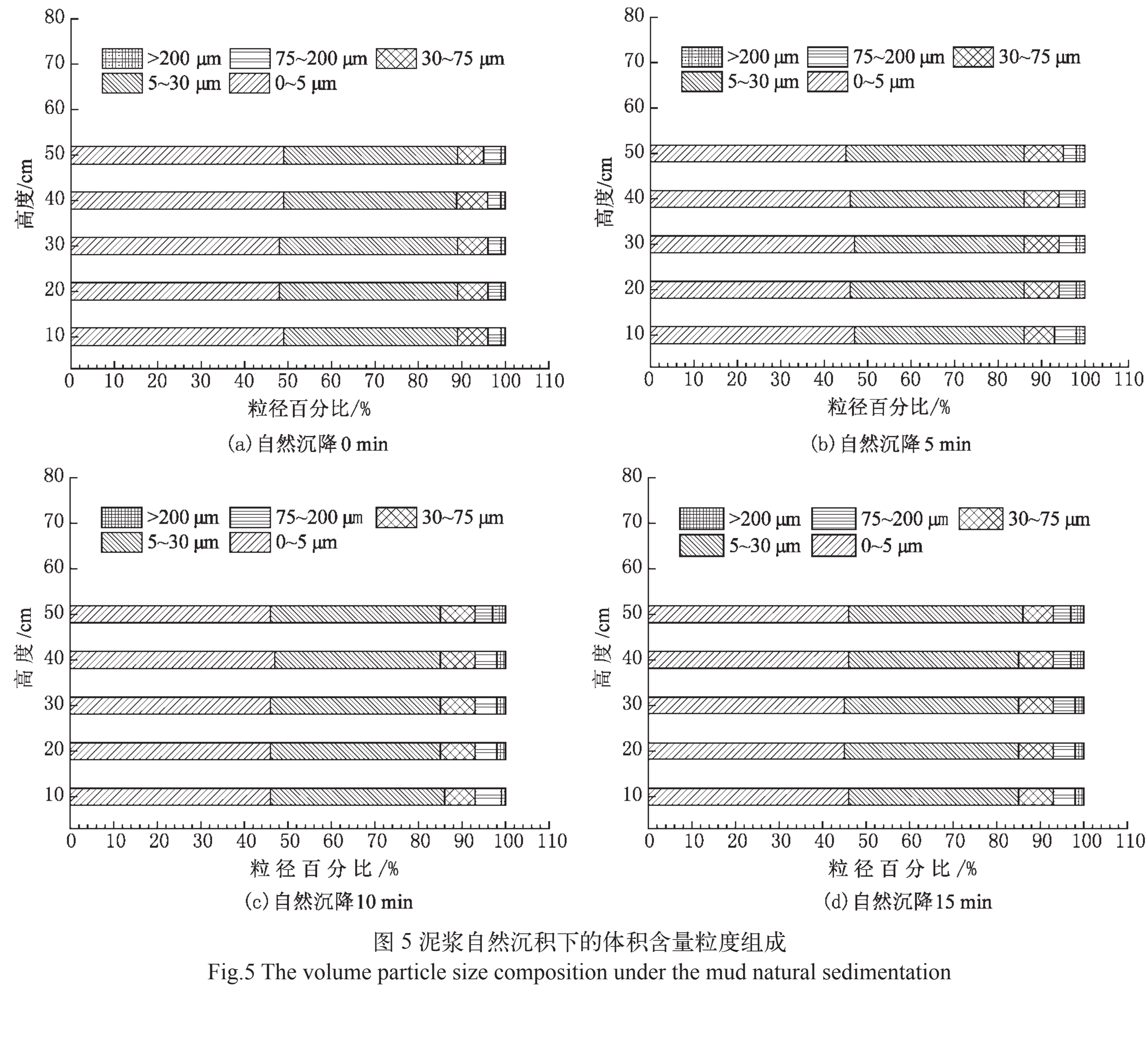


图 5 泥浆自然沉积下的体积含量粒度组成

Fig.5 The volume particle size composition under the mud natural sedimentation

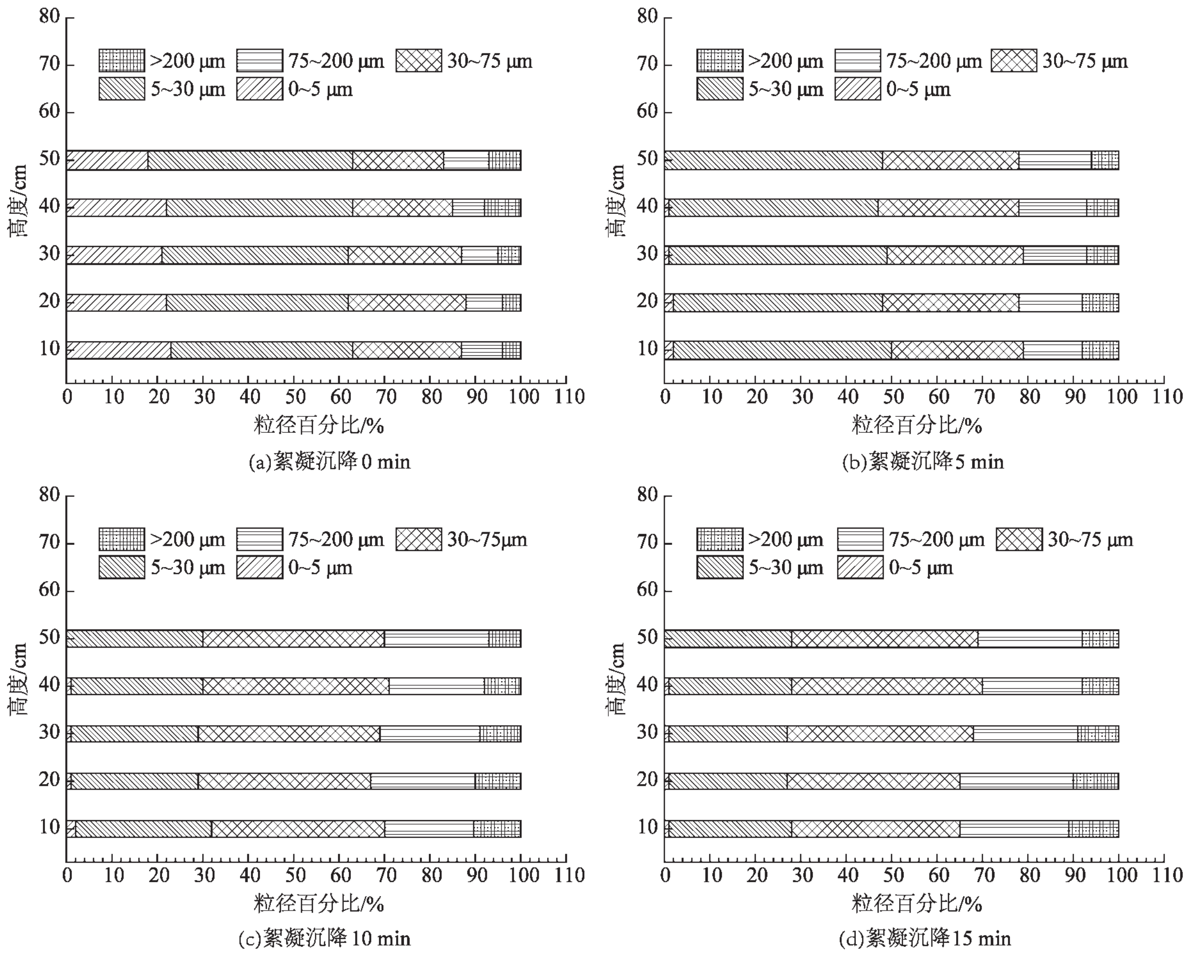


图 6 泥浆絮凝沉积下的体积含量粒度组成

Fig.6 The volume particle size composition under the mud flocculation sedimentation

度的絮凝，但自然沉降粒径分布变化相对絮凝沉积要小很多。这是因为温州吹填泥浆的黏粒含量很高，絮凝剂 CPAM 恰恰又对细粒径的泥浆土颗粒的作用效果很好。因此，在絮凝剂 CPAM 的吸附架桥和吸附电中和作用下，细小土颗粒不断凝聚成团，不断形成粗颗粒，继而粗颗粒不断下沉。由于不同沉积深度处絮凝效果略有差异，且粗颗粒的下沉会产生向上回流，所以沉降过程中产生了微弱的颗粒分选现象。

2.4 吹填泥浆上覆水浊度的变化

两种沉降模式下，吹填泥浆上覆水浊度的变化如表 2 所示。结果显示：吹填泥浆在自然状态下沉降 30 min 后，上覆水的浊度远远高于 同期絮凝沉降上覆水浊度 94.8 NTU，在沉降 1 d 时亦是如此，说明 CPAM 絮凝剂的加入，能有效改变泥水状态，使吹填泥浆颗粒聚集成团，与水快速分离，使上覆水更快澄清。根据上覆水的浊度，泥浆的界面沉降可以分为混泥界面沉降和清泥界面沉降两个阶段。当上覆水中仍有细颗粒以悬浮状态存在时，界面的沉降属于混泥界面沉降。相较于自然沉降，添加量为 150 mg/L 时的絮凝沉降在 1 d 时，其浊度去除率就已达到 67.4%，絮凝沉降在时间上能够更快地进入清泥界面沉降阶段。

表 2 不同沉降模式下上覆水的浊度

Tab.2 Turbidity of overlying water under different sedimentation modes

沉降类型	浊度 /NTU			
	0 min	30 min	1 d	7 d
自然沉降	1 000	187	121.3	4.1
絮凝沉降	1 000	94.8	65.2	3.4

2.5 吹填泥浆的絮凝沉积模式

根据温州吹填泥浆的絮凝沉降规律，提出以 CPAM 作为絮凝剂处理吹填泥浆时的絮凝沉积模式。与自然沉积情况不同的是，CPAM 高分子的加入大

大促进了土颗粒的絮凝阶段，且试验前的强烈搅拌给予颗粒之间更多的碰撞接触机会，CPAM 分子与吹填泥浆颗粒的反应迅速且充分，凝聚成较大的絮团，絮团又相互作用形成更大的絮体。在试验开始后，伴随着土颗粒的絮凝，泥浆开始进入沉降阶段，吹填泥浆在絮凝沉降模式下可分为四个阶段：絮凝沉降阶段、快速沉降阶段、慢速沉降阶段、稳定阶段。

絮凝沉降阶段：当试验前的搅拌结束后，泥浆土颗粒的絮凝并未停止，絮团之间的凝聚现象仍在发生。该阶段水中的淤泥颗粒受到自重、水的阻力和絮凝剂的絮凝作用影响，当淤泥土颗粒受到的自重力、水的阻力和絮凝作用力达到平衡时，淤泥土颗粒做悬浮运动，否则，土颗粒进入低速启动沉降状态。

快速沉降阶段：该阶段的主要特点是等速率沉降。斜长直线段的出现主要是由于 CPAM 絮凝剂形成的絮团较大，絮体浓度较低，在沉降过程中，颗粒之间互不碰撞，絮体呈单颗粒状态，各自独立的完成沉降过程，此时能看到清晰的泥水分界面，颗粒以整体状态下沉，水分被排挤至上层，泥面表现上为等速率沉降现象。

慢速沉降阶段：随着时间的推移，吹填泥浆经过等速沉降后，速度降低。该阶段的主要特点为：速率降幅大，泥面沉降高度变化小。经过长时间的沉降过程，絮体颗粒之间开始接触，并相互支撑，形成网状结构，并相互堆积形成无数絮体。由于絮体在颗粒重力的作用下逐渐压缩、絮体位置重新排列，颗粒之间相互关系不再发生大的变化，但是此时絮体的压缩不会增加颗粒之间的接触应力。

稳定阶段：颗粒之间、颗粒与水之间达到稳定平衡状态，絮体颗粒间传递有效应力，由于自重的影响，形成的土中产生超孔隙水压力，随着超孔隙水压力的消散，有效应力增加，絮凝土表现为一个整体，以整体的形式发生固结并下沉，在短时间内的位移非常小。此时，泥浆分为上下两个部分，上部泥浆仍处在慢速沉降阶段，下部泥浆进入稳定阶段，也就是泥浆转化为土的开始。

3 结论

1）CPAM 在促进泥浆沉降和泥水快速分离方面有很好的效果，能够在短时间内形成较大、较密实的絮体，更快地进入稳定状态，为硬壳层的快速形成提供了条件，从而更快地进入吹填工程后期的排水固结处理阶段。

2）自然沉积和絮凝沉积两种模式下，上覆水的浊度和沉积土的性质表现出较大的差异。相比自然沉积，吹填泥浆在相同沉降时间的絮凝沉积模式下，上覆水的浊度减小得更快，沉积土的含水率会更低，密度更小，孔隙比更大，土体的性质相对较好。

3）在充分搅拌下，吹填泥浆与 CPAM 高分子发生絮凝反应。搅拌结束后，泥浆迅速沉降，土颗粒与水分离，沉降过程分为四个阶段，分别为：絮凝沉降阶段、快速沉降阶段、慢速沉降阶段、稳定阶段。

参考文献：

[1] 彭 涛，葛少亭，武 威，等 . 吹填淤泥填海造陆技术在深圳地区的应用 [J]. 水文地质工程地质，2001，28(1)：68-70.

[2] 文海家，严春风，汪东云 . 吹填软土的工程特性研究 [J]. 重庆建筑大学学报，1999，21(2)：79-83.

[3] 彭 涛，武 威，黄少康，等 . 吹填淤泥的工程地质特性研究 [J]. 工程勘察，1999(5)：1-5.

[4] 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.

[5] 刘 莹，肖树芳，王 清 . 吹填土室内模拟试验研究 [J]. 岩土力学，2004，25(4)：518-521.

[6] 郭宏宇，严 驰，凌光懋 . 外用改良剂改善吹填土工程性质的试验研究 [J]. 港工技术，2005(1)：50-51.

[7] 张春雷，汪顺才，黄高亮 . 利用 PAM 促进吹填泥浆快速沉降的试验研究 [C]// 全球华人科学家环境论坛 . 2010.

[8] 刘 宏，黄小红，孙 策，等 . 有机高分子污泥脱水絮凝剂的研究进展 [C]// 中国环境科学学会，北京：中国环境科学出版社，2006：597-601.

[9]MERCKELBACH L M. Consolidation and strength evolution of soft mud layers[J]. Civil Engineering & Geosciences，2000.

[10]GB/T 50123-1999，土工试验方法标准 [S].

[11] 李凤亭，张善发，赵 艳 . 混凝剂与絮凝剂 [M]. 北京：化学工业出版社，2005.