

DOI: 10.11779/CJGE2017S2036

# 絮凝加速吹填土沉积的试验研究

郑爱荣<sup>1, 2, 3</sup>, 朱洪满<sup>1, 2, 3</sup>

(1. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222; 2. 港口岩土工程技术交通行业重点实验室, 天津 300222;  
3. 天津市港口岩土工程技术重点实验室, 天津 300222)

**摘要:** 水力吹填疏浚土后, 上部泥浆需要一定时间沉积排水晾晒才能加固处理。通过室内试验, 对比了疏水剂和高分子絮凝剂、排水条件、泥浆浓度和土体自重对沉积过程的影响, 并进行了十万平方米的现场试验。研究表明, 加入化学药剂后, 泥浆前期沉降速度明显提高, 泥水分离时间缩短; 后期沉积速度变缓, 沉积物强度低; 配合一定排水条件可提高泥浆的后期沉积速度和沉积物强度; 提高泥浆浓度和土体自重对沉积有一定的作用; 利用絮凝技术的化学法加固施工具有可操作性。

**关键词:** 吹填土; 疏浚; 疏水剂; 絮凝; 沉积

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)S2-0145-04

作者简介: 郑爱荣(1981-), 女, 高级工程师, 主要从事软土地基及土工合成材料的检测及科研工作。E-mail: airong717@163.com。

## Experimental study on flocculation-accelerated deposition of dredger fill

ZHENG Ai-rong<sup>1, 2, 3</sup>, ZHU Hong-man<sup>1, 2, 3</sup>

(1. CCCC Tianjin Port Engineering Institute Ltd., Tianjin 300222, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical Engineering, Ministry of Communications, PRC, Tianjin 300222, China; 3. Key Laboratory of Geotechnical Engineering, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** After hydraulic reclamation of the dredger fill, the mud needs some time to deposit. The reinforcement treatment cannot be carried out until the sludge-water separation is completed and the separated water is drained. Through laboratory tests, the effects of chemical agents, drainage condition, slurry concentration and soil weight on the sludge deposition process are investigated. The field tests on one hundred thousand square meters are carried out. The results show that the early-stage deposition velocity of sludge increases obviously, and the sludge-water separation time is shortened after water hydrophobing agents and polymeric flocculants are added. However, the later-stage deposition velocity is slow and the deposition strength is low. Thus, certain drainage conditions are required to increase the later-stage deposition velocity and deposition strength of sludge. Improving the weight of soil and mud concentration has a certain effect on the deposition of the construction site. The chemical reinforcement method is feasible.

**Key words:** dredger fill; dredging; hydrophobic agent; flocculation; deposition

## 0 引言

在陆地面积需求急剧增大和港口航道疏浚底泥海洋倾废影响环境的双重矛盾下, 中国沿海城市多采用航道疏浚土和近海海底淤泥作为吹填料。吹填泥浆中的土颗粒经沉降、沉积、固结后形成吹填软基, 具有含水率高、孔隙比大、渗透性差、压缩变形量大的特点。吹填软基加固以真空预压法为主, 经泥水分离排水晾晒后进行加固处理<sup>[1]</sup>, 加固完成后, 黏性土液性指数仍接近 1, 很难排出土中的弱结合水。荷兰、法国和日本等国家对环保疏浚、软基加固技术和淤泥高效资源化利用进行了大量的研究, 开发出许多环保疏浚、软基加固和疏浚物资源化再利用等方面的技术<sup>[2-3]</sup>。

中国对水泥、生石灰等固化剂改良吹填土技术进行了研究<sup>[4-5]</sup>, 通过加入絮凝剂等化学药剂改良吹填土以加速固结过程的研究较少<sup>[6-8]</sup>。本研究对疏水剂和高分子絮凝剂在吹填土沉积方面的影响进行了分析。

## 1 试验原理

疏水剂和高分子絮凝剂可发生水解和聚合反应, 生成高价聚羟阳离子, 与水中的胶体压缩双电层, 电中和脱稳吸附架桥并辅以沉淀物网捕、卷扫作用, 沉淀泥浆中的土颗粒。

试验将土和水按照一定比例(土 200 g:水 1000 g)搅拌成泥浆,加入疏水剂和高分子絮凝剂,充分混合形成絮体并沉降,记录泥水分界面随时间的变化,并对沉积物的物理力学性能进行试验。

## 2 试验方案

### 2.1 土的制备与物理力学特性

土样取自天津港吹填区 0~0.5 m 深度处,黏土的黏粒含量高达 52.5%,物理特性见表 1。

表 1 土样的初始物理性质

Table 1 Parameters of soils in tests

土样 类型	颗粒组成/%							比重 $G_s$
	2~ mm	0.25 ~ mm	0.075 ~ mm	0.05 ~ mm	0.01 ~ mm	<0.005 mm	<0.002 mm	
	0.25 mm	0.075 mm	0.05 mm	0.01 mm	0.005 mm	mm	mm	
黏土		0.8	29.3	18.8	52.5	30.7	2.76	
粉质 黏土	8.5	25.6	7.0	38.8	7.8	12.3	8.7	2.71

### 2.2 试验设计

#### (1) 1 L 量筒沉积试验

1 L 量筒沉积试验设计了 4 种不同的化学药剂掺量见表 2。量筒中加入疏水剂和高分子絮凝剂,翻转量筒使药剂与泥浆混合,发生絮凝反应。

表 2 化学药剂添加量

Table 2 Additive amounts of chemical agents (mL/L)

试样 编号	黏土				粉质黏土			
	A10	A11	A12	A13	B10	B11	B12	B13
疏水剂	0	1.2	1.2	1.4	0	0.6	0.4	0.3
絮凝剂	0	22	18	25	0	6	4	2

#### (2) 大量筒沉积对比试验

大量筒 LA、LB 内径为 9.9 cm, 高为 100 cm。大量筒 LA 底部法兰处放置一层无纺布作为试样底部的排水层。试验用土为黏土,絮凝后的泥浆倒入大量筒,上部液体清澈后排放,继续倒入泥浆,共倒入 22 L。

#### (3) 大体积沉积试验

有机玻璃水槽长 100 cm, 宽 15 cm, 高 50 cm。试验方法同大量筒试验,共加入泥浆 216 L,不排水。

## 3 试验结果

### 3.1 量筒沉积试验结果

疏水剂、高分子絮凝剂与泥浆充分混合后,土颗粒迅速凝聚成絮状的集粒下沉,并相继和周围的絮状集粒接触,形成类似蜂窝的絮凝结构下沉。絮凝结构增加了沉降单元的直径和重量,前期沉降速度明显高于未添加药剂的试样,1 min 时出现清澈水体,形成明显的泥水分界面,如图 1 (a),这是与自然沉降试

样的最大区别。沉降速度逐渐变得稳定,絮凝结构的大孔隙被压缩破坏,土颗粒重新胶结。沉积稳定时,由于土颗粒接触点的原始抗压强度与联结键所反映的抗压强度超过了上部荷重,不再产生进一步的压密,泥水分界面不再变化。沉积稳定时下部的絮团结构被破坏,并重新胶结压密,上部沉积物由于上覆压力小,仍然呈疏松的大孔隙絮凝结构,如图 1 (b)。

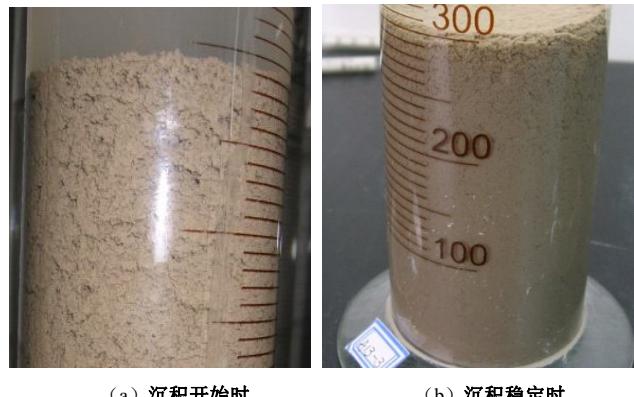


图 1 添加疏水剂 HC 及高分子絮凝剂的试样

Fig. 1 Sample with hydrophobic agent and polymer flocculant

泥水界面变化率(上部清液与泥浆总体积比值)随沉积时间的变化关系曲线如图 2,3, 疏水剂和高分子絮凝剂的加入量有个最优值,应通过试验确定。试验前 8 h,絮凝后的试样体积压缩速度明显高于自然沉积试样,之后趋于一致,说明疏水剂和高分子絮凝剂的加入对泥浆的前期泌水有一定作用。

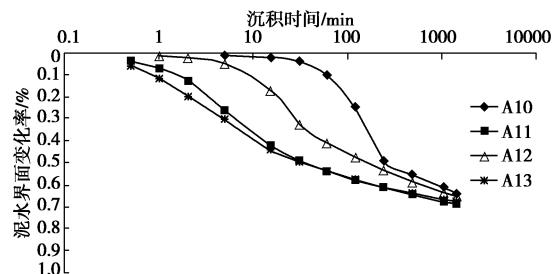


图 2 黏土沉降曲线

Fig. 2 Settlement curves of clay

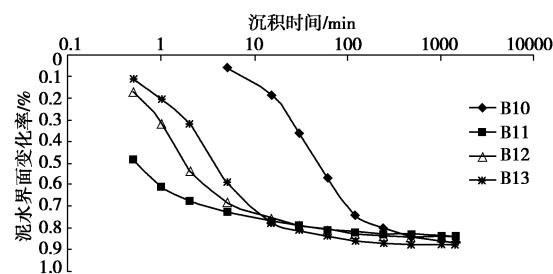


图 3 粉质黏土沉降曲线

Fig. 3 Settlement curves of silty clay

210 d 后沉积物的物理特性见表 3,含水率明显降低。加入化学药剂的黏土试样比自然沉积试样含水率

降幅和密度增幅小, 是因为絮凝结构中孔隙的进一步压密破坏比自然沉积土颗粒所形成的孔隙需要更大的力, 粉质黏土则不存在此问题。颗粒组成方面, 黏粒、胶粒含量有了一定程度降低, 一方面是因为絮凝的卷扫效应使黏土中的细小颗粒吸附到絮团上, 另一方面是由于部分胶粒悬浮于上部清液中。

表 3 沉积物的物理特性

Table 3 Physical properties of sediment

试样 编号	密度 $\rho$ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	含水率 $w$ /%	初始含 水率 $w_0$ /%	颗粒组成/%		
				粉粒 0.05~ 0.005 mm	黏粒 <0.005 mm	胶粒 <0.002 mm
A10	1.29	143.7	857.9	50.7	41.8	24.4
A11	1.26	166.2	836.5	55.3	35.3	14.6
A12	1.25	173.0	840.6	52.2	37.4	19.3
A13	1.24	179.1	834.2	51.2	37.7	15.4
B10	1.42	107.9				
B11	1.45	91.0				
B12	1.53	88.1				
B13	1.49	93.0				

### 3.2 大量筒沉积对比试验

底部排水的 LA 沉积物体积一直小于 LB, 在 LB 试样沉积稳定后, LA 沉积物体积仍继续减小, 3 个月时沉积物体积变化率见表 4。

表 4 沉积物体积变化率

Table 4 Volume change rates of sediment

试样 编号	泥浆体 积/L	沉积开始 体积/L	沉积物 体积/L	总体积 变化率/%	相对沉积开始时 体积变化率/%
LA	22	6.24	3.69	83.23	40.9
LB	22	6.86	4.88	77.80	28.8

一年后, 试样如图 4。LA 表层水分蒸发, 收缩成含水率 27% 的坚硬土柱。LB 上部有覆水, 土的絮凝结构没有完全压密破坏, 含水率 155%~166%, 孔隙比 4.311~4.582, 微型十字板剪切强度 0.40~1.87 kPa。因此在不排水的外部条件下, 加入脱水剂和絮凝剂, 吹填土的物理力学性能没有明显提高。



图 4 LA 和 LB 的沉积物

Fig. 4 LA and LB sediment

为进一步验证排水条件及化学药剂的添加对吹填土沉积的影响, 将添加化学药剂的泥浆和空白样分别倒入滤布中, 见图 5。未添加药剂的试样黏土颗粒紧密地黏附在滤布上, 形成一层光滑的涂抹层; 添加药剂的试样因为有较大的孔隙结构利于水的排出, 且由

于药剂的加入降低了泥浆的黏性, 土颗粒不黏附在滤布上, 水的排出速度快, 含水率降低快, 短期即具有一定强度。



图 5 排水条件对沉积的影响

Fig. 5 Influences of drainage condition on deposition

试验证明: 配合一定的排水条件时, 疏水剂和高分子絮凝剂的添加才能对吹填土的后期沉积过程及强度形成起到加速的作用。

### 3.3 大体积沉积试验

沉积物体积变化规律同 LB, 相对体积变化率为 30.4%, 比 LB 略高, 说明土体自重压力的增大对试样的沉积有一定的作用。将沉积物分为上下两部分, 物理力学特性见表 5, 十字板剪切为 0.40~0.67 kPa。

表 5 搅拌桶沉积物的物理特性

Table 5 Physical properties of sediment

部位	含水率 $w$ /%	湿密度 $\rho$ / $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	孔隙比 $e$	液限 $w_L$ /%	塑限 $w_p$ /%
上	125.0	1.39	3.468	51.3	23.5
下	121.0	1.40	3.357	50.2	23.1

试验说明, 泥浆浓度提高, 沉积物的含水率明显降低, 密度提高, 试验证明提高泥浆浓度对沉积物的物理性能的提高有利。对比 LB, 水槽沉积物的不排水抗剪强度未有提高, 不同深度处的抗剪强度很小, 且相差不大。这说明吹填土沉积所形成的软黏土具有触变性。吹填土沉积前期呈流塑状态, 所形成的结构是一种易变结构, 具有不稳定性, 对外界条件变化反映敏感, 稍加扰动即呈现触变现象。其实质是当土体被扰动时, 土颗粒间静电引力、分子引力连结及水胶连结被破坏, 使土粒相互分散成流动状态, 因而土体强度降低; 当外力去除, 上述粒间连结力又在一定程度上重新恢复。

### 3.4 pH 值测定

取少量沉积土样根据不同的土水比例加入蒸馏水 ( $\text{pH}=6.20$ ), 取上清液测定  $\text{pH}$  值, 结果见表 6, 加入药剂后土样的  $\text{pH}$  值略有降低, 但是幅度不大。

表 6 沉积物  $\text{pH}$  值

Table 6 pH values of sediment

土水比例	1:3	1:4	1:5	1:6
未加药剂土样	8.33	8.45	8.57	8.62
加入药剂土样	8.25	8.38	8.45	8.56

## 4 现场试验

### 4.1 现场试验

在天津港临港工业区进行了现场试验研究, 试验面积十万平方米。在吹填管道接近吹泥口一定距离处设置了两个化学药剂投放站, 分别加入疏水剂 HC 和高分子絮凝剂。

### 4.2 试验结果及分析

在两个吹泥口中间进行了十字板剪切试验, 如图 6, 试验孔孔深为 6 m, 试验结果如表 7。试验深度范围内强度成层分布, 十字板剪切强度 2.3~19.2 kPa, 平均值为 10.7 kPa, 高于室内沉积试验结果。可以结合水平或者垂直排水, 或者结和其他软土加固措施, 进行更深入的试验。



图 6 十字板试验

Fig. 6 Vane shear tests

表 7 十字板试验结果

Table 7 Results of vane shear tests (kPa)

钻孔编号	S1 (BC)	S2 (BC)	S3 (BC)	S4 (BC)
抗剪强度均值	9.0	11.3	10.0	12.6

## 5 结论与建议

(1) 疏水剂和高分子絮凝剂的加入可以加快泥水分离速度, 加速吹填区上部覆水的排出。药剂的加入量应通过实验确定最优化。

(2) 不排水条件下, 吹填土沉积所形成的软黏土属于未完成自重固结的超软土, 抗剪强度低, 具有触变性; 配合排水条件时, 土的沉积效率和强度明显提高。因此, 化学法加固吹填土须配合一定的排水条件, 才能对吹填土的后期沉积过程及强度形成起到加速的作用。

(3) 提高泥浆浓度对沉积物的物理性能的提高有利。

(4) 现场试验证明, 化学法加固吹填土具有施工可行性, 土体具有一定的强度。建议配合一定的排水措施, 进行更深入的现场试验。

## 参考文献:

- [1] 杜冬菊, 杨爱武, 刘举, 等. 天津滨海吹填土[M]. 北京: 科学出版社, 2010. (DU Dong-ju, YANG Ai-wu, LIU Jiu, et al. Tianjin coastal dredger fill[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese))
- [2] 陶桂兰, 江小寒, 施晓霖, 等. 法国的一种疏浚污泥资源化处理技术[J]. 中国水运, 2015, 15(2): 125~127. (TAO Gui-lan, JIANG Xiao-han, SHI Xiao-lin, et al. Reclamation technology of dredged sludge in France[J]. China Water Transport, 2015, 15(2): 125~127. (in Chinese))
- [3] 五洋建设株式会社. 有关应用疏水剂进行疏浚水质改良的实验及解析报告书[R]. 东京: 五洋建设株式会社, 2007. (Penta-Ocean Construction Co., Ltd. Experimental study of improving properties of dredged sludge by using hydrophobic agent[R]. Tokyo: Penta-Ocean Construction Co., Ltd., 2007. (in Chinese))
- [4] 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 Ping-hui, XIAO Shu-fang, WANG Qing. Mechanism of improvement of dredger fill serous fluid with additive[J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(2): 285~288. (in Chinese))
- [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. (LIU Ying, XIAO Shu-fang, WANG Qing. Research on indoor scale-down test of dredger fill[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(4): 518~521. (in Chinese))
- [6] 赵森, 曾芳金, 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 Fang-jin, 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))
- [7] 刘禹杨, 吴燕, 胡保安, 等. 疏浚底泥掺外加剂真空预压脱水技术研究[J]. 水利水运工程学报, 2013(3): 78~82. (LIU Yu-yang, WU Yan, HU Bao-an, et al. Research on dehydration technology of dredged sludge by admixture and vacuum preloading[J]. Hydro-Science and Engineering, 2013(3): 78~82. (in Chinese))
- [8] 张骞. 真空预压联合化学作用加固吹填疏浚土室内模型试验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013. (ZHANG Qian. The study on indoor model test of vacuum preloading associate with chemical agent[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)