

# 曹妃甸区固化吹填土的固化机理及其工程性质

郭玉良<sup>1</sup>, 曹丽文<sup>1</sup>, 冯雪寒<sup>2</sup>, 韩 科

(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 2. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司 南京分公司, 江苏 南京 210000)

**摘要:** 在对曹妃甸区吹填土进行了室内物理化学性质检测的基础上, 测试研究了三种固化吹填土的工程性质, 探讨了养护龄期、 $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  掺比、PAM 的掺比 3 个控制因素对吹填土工程性质影响的显著性水平, 并从微观角度揭示了固化机理。研究表明: 曹妃甸区吹填土为细粒土(粉土), 级配不良土, 成分以石英为主, 并含有一定量黏土矿物; PAM +  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  固化吹填土的工程性质要好于  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  固化吹填土和 PAM 固化吹填土; 对吹填土工程性质影响的显著性水平由强到弱依次为养护龄期、 $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  掺比、PAM 掺比; PAM 在吹填土颗粒间产生吸附作用和架桥作用,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  在土颗粒间产生吸附作用并与土体发生化学反应。在两种固化剂的联合固化作用下, 吹填土可获得更好的工程性质。

**关键词:** 吹填土; 固化土; PAM;  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ; 机理

中图分类号: TU448

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)06-0869-04

## Engineering properties and solidification mechanism of solidified dredger fill in Caofeidian Area

GUO Yuliang<sup>1</sup>, CAO Liwen<sup>1</sup>, FENG Xuehan<sup>2</sup>, HAN Ke<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Jiangsu Xuzhou 221116, China;

2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Nanjing Company, Nanjing 210000, China)

**Abstract:** Based on the indoor physical and chemical properties of dredger fill in Caofeidian area, the engineering properties of three kinds of solidified dredger fill were tested and studied. The significance of three curing factors, such as curing age,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  mixing ratio and PAM ratio, on the engineering properties of dredger fill were discussed, and the curing mechanism was revealed from a micro perspective. Results show that the dredger fill in Caofeidian area is fine-grained soil (silt), poorly graded soil, with quartz as the main component and a certain amount of clay minerals. The engineering properties of PAM +  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  solidified dredger fill are better than  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  solidified dredger fill and PAM solidified dredger fill. The significant level of influence on the engineering properties of dredger fill from strong to weak is curing age,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  incorporation ratio and PAM incorporation ratio. PAM adsorbs and bridges between dredger fills,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  adsorbs between soil particles and reacts with soil chemically. Under the combined solidification of two solidifying agents, dredger fill can obtain better engineering properties.

**Key words:** dredger fill; solidified soil; PAM;  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ; mechanism

随着沿海地区工程建设速度的加快和规模的扩大, 围海吹填造陆已成为解决建设用地缺乏问题的有力手段, 但围海造陆形成的吹填土属欠固结土, 具有“三高二低”的特殊性质, 一般呈软塑到流塑状态<sup>[1-2]</sup>, 寻找一种高效、经济的吹填土地基加固方法, 对实际工程建设具有重要的现实意义。

半个多世纪以来各国学者从不同角度对吹填土加固展开了研究, 尽管取得了一定成果, 但仍待完善。目前, 对吹填土加固的研究主要集中在真空预

压、电渗等物理加固方法上, 且均为对吹填土体的后处理<sup>[3-5]</sup>, 而对利用固化剂对吹填过程中的土体进行预加固处理的化学加固方法的研究相对薄弱, 一些学者试图通过掺加传统的固化剂(如水泥、石灰、粉煤灰等)来改善吹填土的工程特性<sup>[6-7]</sup>, 尽管可提高强度, 却降低了吹填土原有的变形能力而呈现出脆性破坏的特点<sup>[8-10]</sup>, 仍不能满足工程的要求。因此, 不断寻找新的固化剂加固吹填土十分必要。

收稿日期: 2020-04-24

修改稿日期: 2020-09-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41972281, 41372326, 41072236)

第一作者: 郭玉良(1992—), 男, 博士生, 主要从事工程地质与环境岩土工程方面的研究. E-mail: guoyuliang@cumt.edu.cn

通信作者: 曹丽文(1969—), 女, 博士, 教授, 主要从事工程地质与环境岩土工程方面的研究. E-mail: caoliwen@cumt.edu.cn

本文以曹妃甸区吹填土为研究对象,以聚丙烯酰胺(PAM)和水玻璃( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )为固化剂,通过三轴剪切试验、扫描电镜试验等手段,以内聚力和内摩擦角为评价指标,来探究固化前后吹填土强度的变化规律,确定各影响因素的主次关系,进而揭示固化吹填土的固化机理。

## 1 曹妃甸区吹填土的物理化学性质

### 1.1 曹妃甸区吹填土的基本物理性质

按照《土工试验规程》(SL239-1999)的标准,对曹妃甸区吹填土基本物理性质进行测试,测试结果见表 1。曹妃甸区吹填土塑性指数  $I_p$  为  $8.27 < 10$ ,属于粉土,液性指数  $I_L$  为  $0.87$ ,处于软塑状态。

表 1 曹妃甸区吹填土的基本物理性质

Tab. 1 Basic physical properties of Caofeidian district dredger fill

$w/\%$	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$G_s/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	$e$
27.3	1.91	2.71	0.807
$w_L/\%$	$w_p/\%$	$I_p$	$I_L$
28.38	20.11	8.27	0.87

利用筛分法和沉降法得到土体颗粒级配曲线,如图 1 所示。细粒占  $88.19\%$  (其中,粉粒占  $81.68\%$ ,黏粒占  $6.51\%$ ),属细粒土,不均匀系数  $C_u=3.27 < 10$ ,曲率系数  $C_c=0.18 < 1$ ,土粒均匀,属级配不良土。通过标准轻型击实试验,确定最优含水率  $15.38\%$ ,最大干密度  $1.74\text{ g/cm}^3$ 。

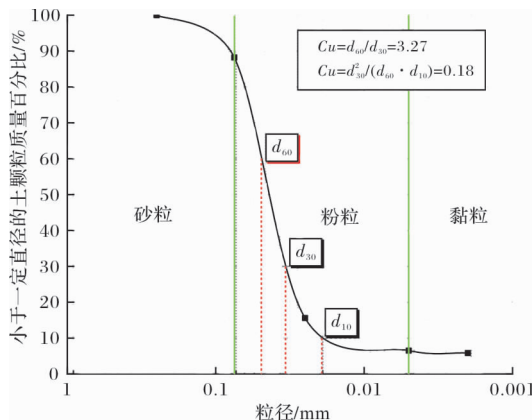


图 1 曹妃甸区吹填土颗粒级配曲线

Fig. 1 Grading curve of Caofeidian district dredger fill

### 1.2 曹妃甸区吹填土的基本化学性质

利用 BRUKER S8 TIGER 型 X 射线荧光光谱仪进行化学成分分析(表 2),发现吹填土以  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为主,含有大量的石英和一定量黏土矿物。

表 2 XRF 检测结果

Tab. 2 Test results of XRF

$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	S	$\text{SiO}_2$
2.70	2.66	0.21	64.81
MgO	CaO	Cl	Ti
1.95	2.61	0.74	0.37
$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	P	Mn
11.98	3.38	$5.9 \times 10^{-2}$	$4.9 \times 10^{-2}$

## 2 曹妃甸区固化吹填土的工程性质

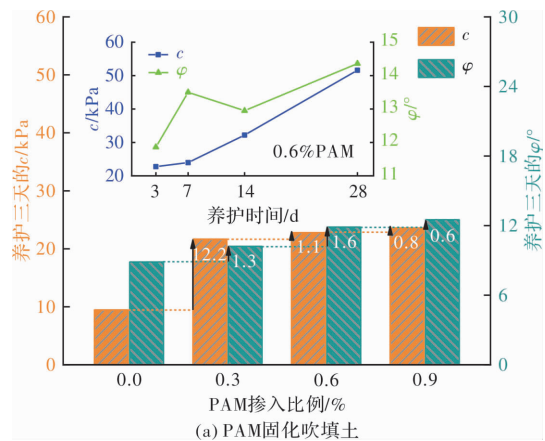
### 2.1 吹填土固化试验方案设计

采用 PAM 单掺、 $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  单掺和 PAM +  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  混合的三种加固方式对吹填土进行化学加固试验;设置  $0$ 、 $0.3\%$ 、 $0.6\%$ 、 $0.9\%$  四种 PAM 掺比和  $0$ 、 $2\%$ 、 $4\%$ 、 $6\%$  四种  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  掺比;按最优含水率  $15.5\%$  采用分层击实法制备标准三轴试样( $\Phi 39.1\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ ),参考《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T50081-2002)的标准养护条件(温度  $25 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度  $95\%$ )对试样进行养护,并设置  $3\text{ d}$ 、 $7\text{ d}$ 、 $14\text{ d}$ 、 $28\text{ d}$  四个养护时间。

### 2.2 固化吹填土的强度特征

PAM 固化吹填土、 $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  固化吹填土的力学性质指标(内聚力和内摩擦角)与固化剂掺比及养护时间的关系如图 2 所示。

通过分析图 2 可得到以下三点结论:(1)随着固化剂掺量和养护时间的增加,PAM 和  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  两种固化吹填土的抗剪强度均不断提高;(2)PAM 固化吹填土早期  $j$  增长较快,后期  $c$  增长较快,说明固化初期主要增加土颗粒的粗糙程度,而固化后期主要增加土体胶结程度;(3)  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  固化吹填土的  $c$  和  $j$  均表现为固化初期增长较快。



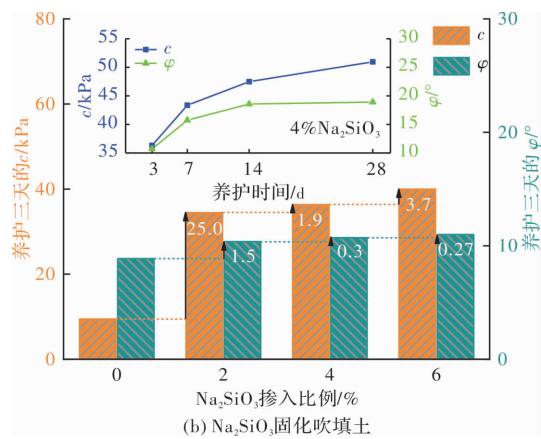


图 2 PAM 和  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  单掺固化吹填土力学性质指标  
Fig. 2 Mechanical properties of PAM and  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  solidified dredger fill

将固化吹填土的内聚力、内摩擦角绘制成图(图 3), 来对比分析三种类型的固化吹填土的力学性质差异. 可以发现, 吹填土中加入 PAM 和  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  均可提高土体强度, 且固化吹填土各强度指标由强到弱依次为 PAM +  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  联合固化吹填土、 $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  单掺固化吹填土、PAM 单掺固化吹填土.

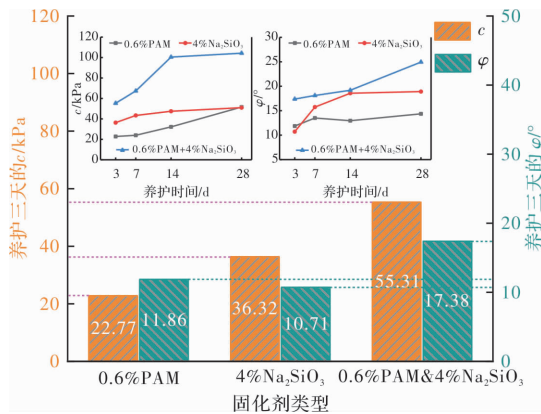


图 3 三种固化吹填土力学性质指标对比  
Fig. 3 Comparison of mechanical properties of three solidified dredger fills

2.3 固化吹填土工程性质影响因素的主次关系

按照  $L_{16}(4^3)$  正交表设计了 3 因素 4 水平的正交实验来探究 PAM 掺比(A)、 $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  掺比(B)和加固时间(C)三个控制因素对吹填土工程性质影响的主次关系. 采用极差分析法处理正交试验数据, 见表 3. 其中,  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 、 $k_4$  为因素 A、B、C 各水平所对应的试验指标( $c$ 、 $j$ )的平均值.

从表 3 中可以发现, 两个指标的极差大小排序相同, 由大到小依次为 C、B、A, 说明 3 个控制因素对吹填土工程性质影响的显著性由强到弱依次为养护龄期、 $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  掺比、PAM 掺比.

表 3 固化吹填土正交试验极差分析结果

Tab. 3 Range analysis results of orthogonal test of solidified dredger fill							
指标	因素	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	极差	显著水平
$c/\text{kPa}$	A	39.49	63.57	70.13	69.17	30.64	●○○○
	B	32.75	67	70.61	72	39.25	●●○○
	C	38.21	58.32	63.39	82.44	44.23	●●●●
$\varphi/^\circ$	A	14.78	18.71	18.27	17.59	3.93	●○○○
	B	14.51	17.83	20.22	18.73	5.71	●●○○
	C	13.85	15.78	18.54	23.11	9.26	●●●●

注:  $c$  为土体内聚力,  $\text{kPa}$ ;  $\varphi$  为土体内摩擦角,  $^\circ$ .

3 曹妃甸区吹填土的微观结构及固化机理

利用扫描电镜(FEI Quanta TM 250, USA)对固化吹填土进行拍照, 得到放大 1000 倍的电镜图像(图 4), 并利用 MATLAB 软件对图像进行二值化处理, 计算土体表观孔隙比.

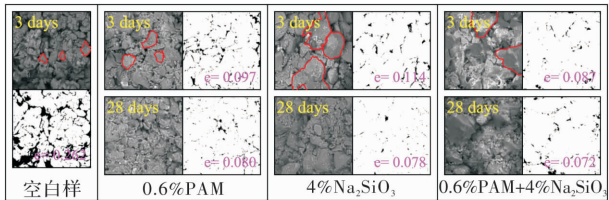


图 4 固化吹填土微观结构图像

Fig. 4 Images of microstructure of solidified dredger fill

3.1 曹妃甸区吹填土的微观结构特征

通过对比加入不同固化剂吹填土的微观图像发现: ①无固化剂的空白样吹填土的颗粒分布较为分散, 均匀性一般, 颗粒较小, 颗粒表面较为破碎, 孔隙较为发育, 具有分布广、数量多的特点, 孔隙大小不一, 存在多个架空孔洞及小裂隙. ②与空白样吹填土相比, 固化吹填土的排列更加紧密, 按照空白样、0.6% PAM、4%  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 、0.6% PAM + 4%  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  的顺序, 孔隙数量与孔径减小, 土体更密实, 土颗粒变大聚集成块, 颗粒排列愈加紧密. ③随加固时间的增加, 土体逐渐均匀, 孔隙减少, 土颗粒接触方式从点接触逐渐向线、面接触过渡.

3.2 曹妃甸区吹填土固化机理

(1) PAM 固化吹填土的固化机理

PAM 是由单体丙烯酰胺聚合而成的高分子有机物, 支链的酰胺基团( $-\text{CONH}_2$ )是其吸附架桥的主要官能团, 由于曹妃甸区吹填土地下水偏碱性, 在吹填土中加入 PAM 后发生水解、缩聚



- bodies[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(11): 2003-2008.
- [11] 毕忠伟, 孙其诚, 刘建国, 等. 双轴压缩下颗粒物质剪切带的形成与发展[J]. 物理学报, 2011, 60(3): 376-385.
- BI Zhongwei, SUN Qicheng, LIU Jianguo, et al. Development of shear band in a granular material in biaxial tests[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 63(3): 376-385.
- [12] 刘恩龙, 陈生水, 李国英, 等. 循环荷载作用下考虑颗粒破碎的堆石体本构模型[J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 1972-1978.
- LIU Enlong, CHEN Shengshui, LI Guoying, et al. Constitutive model of rockfill considering particle breakage under cyclic loading[J]. Geotechnical mechanics, 2012, 33(7): 1972-1978.
- [13] EINAV I. Breakage mechanics-part I: theory[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2007(55): 1274-1297.
- [14] 迟世春, 贾宇峰. 土颗粒破碎耗能对罗维剪胀模型的修正[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 1266-1269.
- CHI Shichun, JIA Yufeng. Rowe's stress-dilatancy model modified for energy dissipation of particle breakage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2005, 27(11): 1266-1269.
- [15] 王乃东, 姚仰平. 粒状材料颗粒破碎的力学特性描述[J]. 工业建筑, 2008, 38(8): 17-20.
- WANG Naidong, YAO Yangping. Mechanical description for granular materials exhibiting particle crushing[J]. Industrial Construction 2008, 38(8): 17-20.
- [16] 孔德志, 张丙寅, 孙逊. 人工模拟堆石料颗粒破碎应变的三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3): 464-469.
- KONG Dezhi, ZHANG Bingyin, SUN Xun. Triaxial tests on particle breakage strain of artificial rockfill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2009, 31(3): 464-469.
- (编辑 吴海西 沈 波)
- 
- (上接第 872 页)
- [6] 刘莹, 王清. 水泥与生石灰处理吹填土对比试验研究[J]. 工程地质学报, 2006, 14(3): 424-429.
- LIU Ying, WANG Qing. Laboratory model tests on consolidation of hydraulic fills treated with lime or cement additives[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(3): 424-429.
- [7] 谢海澜, 王清. 粉煤灰加固处理吹填泥浆的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 24(10): 1811-1816.
- XIE Hailan, WANG Qing. Experimental study on consolidation of dredger fill slurry with fly ash[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 24(10): 1811-1816.
- [8] JO A N, HAFEZ M A, NORBAYA S. Study of bearing capacity of lime-cement columns with pulverized fuel ash for soil stabilization using laboratory model[J]. Electr J Geotech Eng, 2011, 16: 1595-1605.
- [9] 李海龙, 刘科, 沈扬, 等. 水泥-生石灰固化吹填土路用特性试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(2): 51-57.
- LI Hailong, LIU Ke, SHEN Yang, et al. Experimental research on road-used performance of dredger fill with cement-lime curing[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2014, 12(2): 51-57.
- [10] 刘科, 沈扬, 刘汉龙. 水泥-生石灰固化吹填土无侧限抗压强度试验研究[J]. 土木工程与管理学报, 2012, 29(3): 94-98.
- LIU Ke, SHEN Yang, LIU Hanlong. Experimental study on unconfined compressive strength of hydraulic fill consolidated by adding cement and lime[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2012, 29(3): 94-98.
- (编辑 桂智刚)