

# 河道及湖泊疏浚淤泥的改性研究

裴启梦, 王兆伟, 张义祝, 徐静静

(连云港市市区水工程管理处, 江苏 连云港 222000)

**摘要:** 本研究以水泥、矿渣粉煤灰为固化剂, 通过使用硫酸盐和氢氧化钠来激发矿渣、粉煤灰改性疏浚淤泥, 按照控制变量的方法设计两种激发剂占淤泥含量的不同比例, 进行固化然后抗剪试验, 得出在各种配比下的  $c$ 、 $\phi$  值。比较两种激发剂激发矿渣粉煤灰对淤泥改性后的抗剪强度影响。发现在碱性环境下粉煤灰和矿渣的激发效果更好, 改性后的淤泥各项指标均有所提高。以期为提高疏浚淤泥利用率提供一条途径。

**关键词:** 疏浚淤泥; 粉煤灰; 矿渣; 力学特性

**中图分类号:** X70; TV14    **文献标识码:** B    **文章编号:** 1007-7839 (2017) 03-0014-07

## Study on the sludge modification of the riverway and lake

PEI Qimeng, WANG Zhaowei, ZHANG Yizhu, XU Jingjing

(Water Engineering Management Division of Lianyungang, Lianyungang 222000, Jiangsu)

**Abstract:** Cement, fly ash and slag are used as firming agent, which can change the nature of the sludge when they excited by NaOH or sulfate. We design several mixture ratio of the two excitant (weight percentage of the sludge) 0.28%、0.35%、0.6%、0.9%、1.2%. Then we have a straight snips experiment when the sludge solidified. After the experiment we obtain the date of  $c$  and  $\phi$  at different mixture ratio of the two excitant. We can compare the two excitant by investigating these datum to find out which have a better impact at the sludge modification. We find that it is better excited by the alkalescency environment. The indexes of the sludge modification have been improved. A way to improve the utilization rate of dredged sludge is provided by this paper.

**Key words:** dredged silt; fly ash; slag; mechanical property

## 1 研究背景

我国的自然河流及湖泊资源较为丰富, 在经济发达的平原地区更是开拓了密如织网的人工河道, 但随着经济的快速发展与自然生态的破坏, 河道湖泊普遍淤积, 河道行洪和调度水能力减弱, 也造成水环境恶化。长江南京以下的下游江段每年需要投资数十亿元为主航道进行清淤; 连云港市大浦河新浦闸以下 600 m 长河段就清淤土方达

1.32 万  $m^3$ ; 连云港市猴嘴闸迁建工程建设完成后多出淤泥质土超过 3 万  $m^3$ , 需要超过 20 亩土地进行堆积等。疏浚淤泥的初始含水率一般在 80% 以上, 黏粒含量高达 20%, 这需要大面积堆场供其沉积固结, 既占用宝贵的土地资源又容易对环境造成二次污染, 因此淤泥的有效利用问题是一个亟待解决的问题。

## 2 国内外淤泥研究现状

收稿日期: 2017-01-09

第八届江苏水论坛优秀青年论文

作者简介: 裴启梦 (1988-), 男, 本科, 助理工程师, 主要从事水利工程建设及管理工作。

淤泥处理方法一般有堆场、焚烧、海洋倾倒及综合利用。河道及湖泊疏浚出来的淤泥, 一般进行堆场处理, 处理后的淤泥堆场往往可以用来绿化或者复耕。受污染后的淤泥特别是含有重金属的淤泥, 一般的方法是使用水泥、石灰、石膏等胶泥材料与疏浚污泥混合、固化、阻止毒害物渗透, 然后卫生填埋<sup>[1]</sup>。也有将淤泥脱水后进行焚烧的, 但焚烧淤泥受到设备、技术等条件限制, 运用并不广泛, 而且焚烧时容易造成大气污染等问题。沿海国家也会利用海洋处理淤泥, 但会造成海洋污染问题。

这三种做法虽说都有优点, 但都不能符合现在的实际情况。目前, 我们处理淤泥的最好的办法是资源化利用, 将其变废为宝。例如可以将淤泥进行改性固化处理, 可以作为工程用土; 也可以高温烧结加工成建筑材料、陶瓷、陶粒工艺品等; 也可以利用淤泥制作有机肥料, 提供给市民养花养草或城市绿化所用。

3 研究目标和内容

本文通过氢氧化钠和硫酸钙激发矿渣、粉煤灰改性太湖淤泥的抗剪研究, 以水泥、矿渣粉煤灰为固化剂, 按照控制变量的方法设计配比 0.28%、0.35%、0.6%、0.9%、1.2%, 进行固化然后抗剪试验。得出在各种配比下的  $c$ 、 $\phi$  值。通过对试验数据的研究, 比较了氢氧化钠和硫酸钙激发矿渣粉煤灰改性淤泥的抗剪强度影响, 以及对淤泥改性后的显微结构进行比较。

4 粉煤灰活性及碱激发矿渣机理

4.1 粉煤灰活性

粉煤灰的化学活性指粉煤灰的火山灰性质, 它来源于煤粉在高温燃烧后收缩成球状液珠后迅速冷却而形成的玻璃体中可溶性的  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 活性  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  与石灰和水混合后能生成水化硅酸钙 (C-S-H) 和水化铝酸钙 (C-A-H)<sup>[2]</sup>。

4.2 矿渣活性

矿渣的主要成分是  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 可与吸附在其表面的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  进行水化反应生成水化硅酸钙、水化铝酸钙<sup>[3]</sup>。颗粒内部进行深化反应后, 生成更多的水化物并不断充填其空隙, 使土体更密实。水化产物中的主要成分水化硅酸钙呈杆件状、网络状以及混合型分布, 增强了颗粒间的胶结咬合作用<sup>[4]</sup>。

5 实验

5.1 试验材料及仪器

试验用的原料土取自无锡太湖疏浚淤泥, 试验过程中具体涉及的材料有: 矿渣、粉煤灰、水、淤泥、氢氧化钠、硫酸钙。试验主要为土的含水量、界限含水量、直剪试验, 涉及的仪器有: 烘箱、电子天平、液塑限联合测定仪、直剪仪及其他配套仪器等。

试验淤泥物力性质测得数据见下表 1。

粉煤灰取自无锡望亭热电厂, 其部分指标见下表 2。

表 1 淤泥各项指标

天然含水量	湿密度	黏粒含量	液限	塑限	塑性指数	液性指数
<i>I</i> %	<i>I</i> g · cm <sup>-3</sup>	<i>I</i> %	<i>I</i> %	<i>I</i> %	<i>I</i> %	<i>I</i> %
68.89	1.26	17.94	44.32	28.94	15.38	2.6

表 2 试验用粉煤灰指标

项目	技术要求 <i>I</i> %	产品指标 <i>I</i> %	产品验收
细度, 45 μm 方孔筛筛余 (%)	≤ 12.0	1.2	合格
需水量比 (%)	≤ 95	82	合格
烧失量 (%)	≤ 5.0	1.9	合格
三氧化硫 (%)	≤ 3.0	1.7	合格
含水量 (%)	≤ 1.0	0.1	合格

5.2 试验配比

试验我们设计了数组配比, 配比如下表, 并且在搅拌土样时严格按照设计配比来添加固化材料。试验工况按式“S2”来表示, 其中字母 C、F、S、N、Ca 分别表示水泥、粉煤灰、矿渣、氢氧化钠、硫酸钙; 数字则表示相对 35000g 淤泥所加的固化材料质量的百分数, 即“S22”则表示: 在 35000g 中添加 22% 矿渣, 同理“N0.28”表示 NaOH 占淤泥的 0.28%, Ca0.28 表示 CaSO<sub>4</sub> 占淤泥含量的 0.28%。试验配比分分为加水泥组与不加水泥组, 不加水泥

工况中粉煤灰和矿渣含量相应改变, 详见下表 3。

5.3 改性淤泥的抗剪强度

直剪试验是在 50kpa、100kPa、200kPa 和 300kPa 的围压下进行, 通过直剪试验测出试验数据后, 用 Origin8.0 软件对其进行拟合, 得到  $\tau$ - $\sigma$  直线关系图, 见图 1、2。其中直线与横坐标的夹角即为土的内摩擦角  $\phi$ , 在纵坐标上的截距为土的黏聚力  $c$ , 直线方程可用库伦公式表示(如下式):

$$\tau=c+\sigma \tan \phi$$

5.3.1 纯淤泥的抗剪强度试验

表 3 试验工况配比

组号	工况	Sludge%	Fly ash %	Slag%	Cement %	NaOH %CaSO <sub>4</sub> %
1	S22F22C18N0	61.8	13.65	13.65	10.9	0——
2	S22F22C18N0.28	61.62	13.56	13.56	11.09	0.17——
3	S22F22C18N0.35	61.60	13.55	13.55	11.09	0.22——
4	S22F22C18N0.6	61.50	13.53	13.53	11.07	0.37——
5	S22F22C18N0.9	61.39	13.50	13.50	11.05	0.55——
6	S22F22C18N1.2	61.28	13.48	13.48	11.03	0.74——
7	S26F26N0	65.79	17.10	17.10	——	0——
8	S26F26N0.28	65.67	17.07	17.07	——	0.18——
9	S26F26N0.35	65.64	17.07	17.07	——	0.23——
10	S26F26N0.6	65.53	17.04	17.04	——	0.39——
11	S26F26N0.9	65.40	17.00	17.00	——	0.59——
12	S26F26N1.2	65.28	16.97	16.97	——	0.78——
13	S26F26Ca0.28	65.67	17.07	17.07	——	—— 0.18
14	S26F26Ca0.35	65.64	17.07	17.07	——	—— 0.23
15	S26F26Ca0.6	65.53	17.04	17.04	——	—— 0.39
16	S26F26Ca0.9	65.40	17.00	17.00	——	—— 0.59
17	S26F26Ca1.2	65.28	16.97	16.97	——	—— 0.78

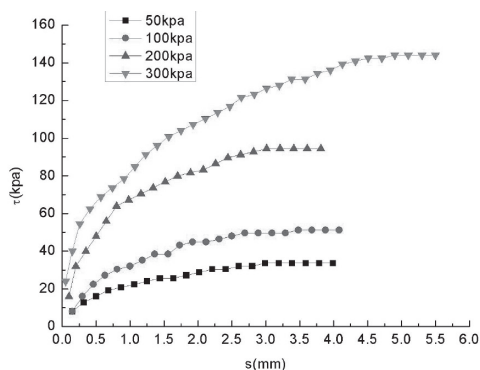


图 1 剪切位移 - 剪应力曲线

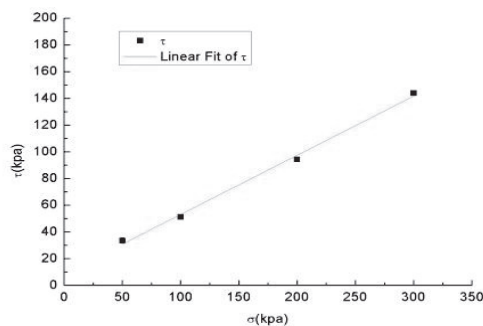


图 2 强度包线

纯淤泥的内摩擦角  $\phi$  为  $23.09^\circ$ , 粘聚力为  $8.7\text{ kpa}$ , 其抗剪强度很低。

5.3.2 有水泥的工况抗剪强度试验

工况 S22F22C18N0 至 工况 S22F22C18N1.2 的直剪结果如下, 见表 4。

根据各工况试验处理数据可得黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\phi$ , 以 NaOH 的百分含量为横坐标, 以黏聚力  $c$  为纵坐标, 得到 NaOH(%)— $c$  关系图, 见图 3。

5.3.3 无水泥的工况抗剪强度试验

工况 S26F26N0 至 工况 S26F26N1.2 的直剪结果如下, 见表 5、图 4。

5.3.4 无水泥加硫酸钙的工况抗剪强度试验

工况 S26F26Ca0.28 至 工况 S26F26Ca1.2 的直剪结果如下, 见表 6、图 5。

5.4 SEM 图像分析

从图 6 原状淤泥的显微结构可以清楚的看到

表 4 加了水泥的工况在 28 d 龄期下  $c$ 、 $\phi$  与  $\tau_f$

NaOH%	0	0.28	0.35	0.6	0.9	1.2
$c$	195.3	248.9	259.9	185.5	199.8	191.9
$\phi$	40.2	50.4	63.7	57.3	56.9	54.3
$\tau_1$	227.2	300.8	344	265.6	272	256
$\tau_2$	292.8	384	476.8	348.4	368	339.2
$\tau_3$	358.4	483.2	678.4	480	488	468.8
$\tau_4$	444.8	612.8	856	664	668	609.6

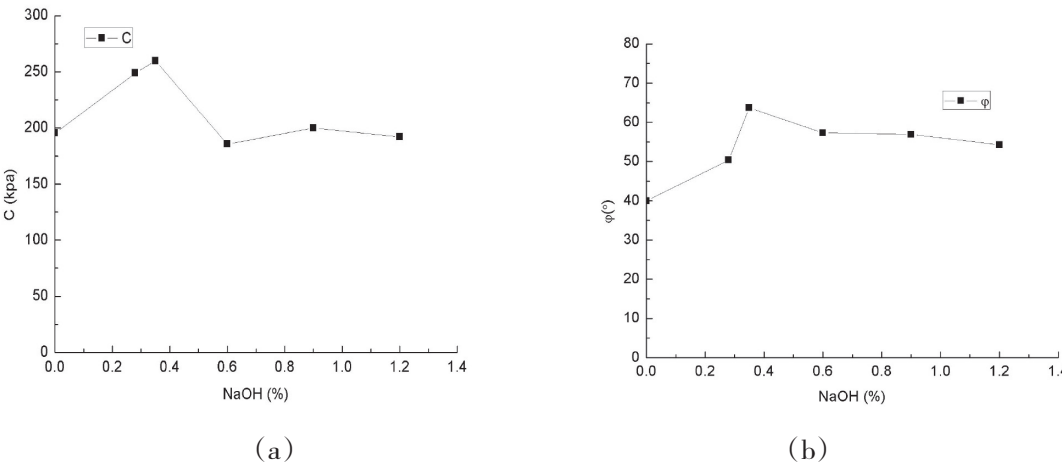


图 3 28 d 龄期 NaOH (%)— $c$  (a) 与 NaOH (%)— $\phi$  (b) 关系图

表 5 无水泥含 NaOH 工况在 28 d 龄期下  $c$ 、 $\phi$  与  $\tau_f$

NaOH%	0	0.28	0.35	0.6	0.9	1.2
$c$	70.3	83.2	102.4	96.49	111.2	51
$\phi$	44	47.2	48.5	40.8	38	48.2
$\tau_1$	116.8	110.4	126.4	131.2	152	107.2
$\tau_2$	174.4	156.8	238.4	192	192	155.2
$\tau_3$	252.8	230.4	364.8	272	256	289.6
$\tau_4$	364.8	377.6	416	352	350.4	379.2

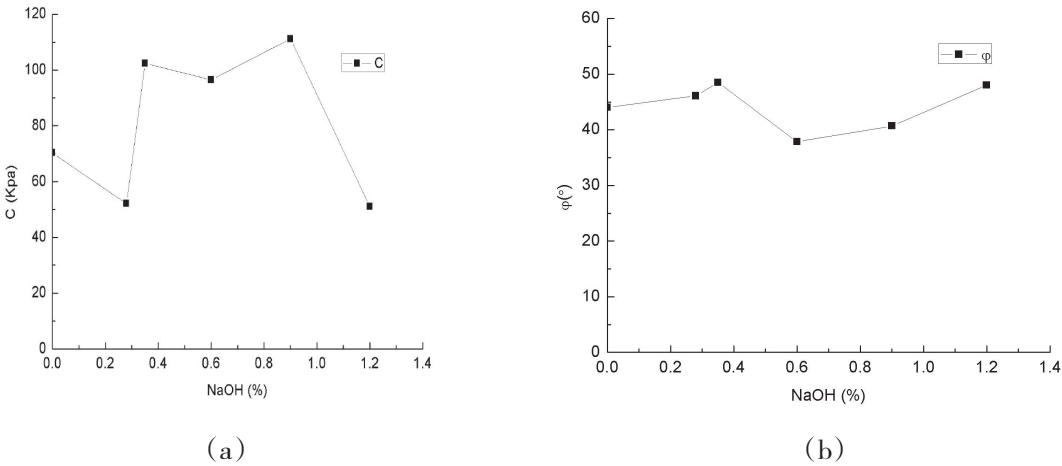


图 4 28 d 龄期 NaOH (%)—c (a) 与 NaOH (%)— $\phi$  (b) 关系图

表 6 无水泥含  $\text{CaSO}_4$  工况在 28 d 龄期下 c、 $\phi$  与  $\tau_f$

$\text{CaSO}_4\%$	0.28	0.35	0.6	0.9	1.2
c	66.4	74.3	72.4	104.3	70.9
$\phi$	23.7	26.9	31.5	19.6	27.8
$\tau_1$	83.2	96	96	112	84.8
$\tau_2$	112	128	144	152	137.6
$\tau_3$	163.2	179	176	192	179.2
$\tau_4$	192	224	208	256	224.4

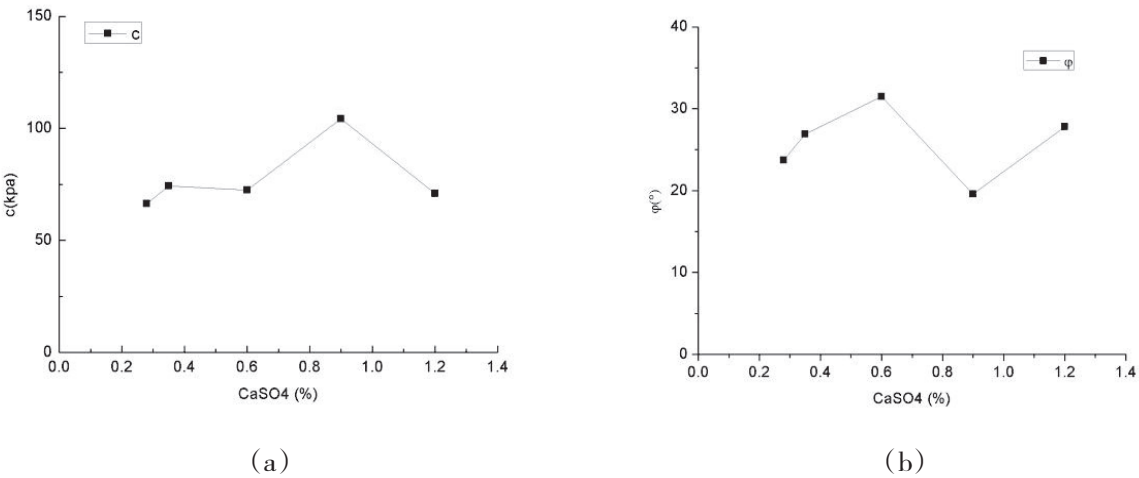


图 5 28 d 龄期  $\text{CaSO}_4$  (%)—c (a) 与  $\text{CaSO}_4$  (%)— $\phi$  (b) 关系图

片状粘土矿物, 土壤颗粒松散, 土体存在的孔隙较多, 且比较大。这可以解释出原状淤泥力学性质差的原因。

图 7, NaOH 的掺入量是 0.28% 可以观察到固化淤泥的微观图像, 相比于图 6 改性淤泥表面已经发生了一定程度的水化反应, 无定型的凝胶体



占较大的数量。淤泥的结构有明显的改变, 淤泥的基本单元之间有水化产物相互连接, 表明呈现凹凸不平的状况。但是颗粒之间有更多的孔隙, 水化反应发生的较小, 水化产物还没有完全填充孔隙。

图8中可以看到许多棒状的水化产物, 与土颗粒胶结在一起, 增强了土颗粒间的机械咬合力,

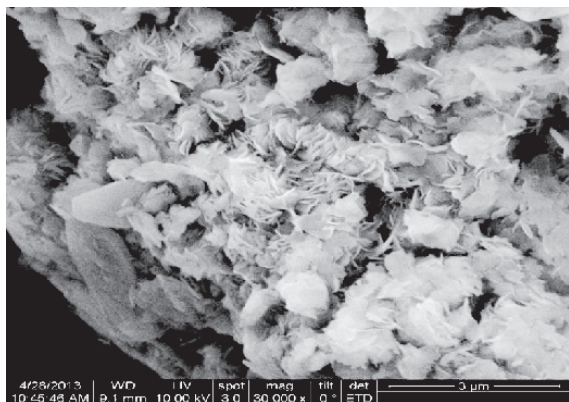


图6 原状土 SEM 图像

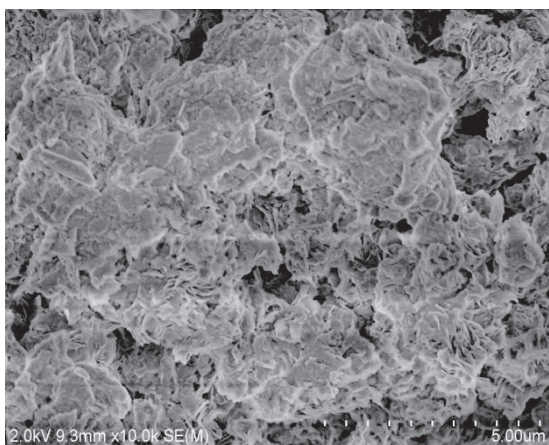


图7 NaOH 掺量为 0.28% 的 SEM 图像

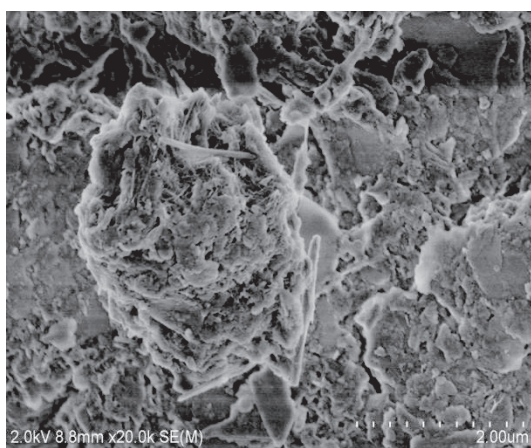


图8 NaOH 掺量为 0.35% 的 SEM 图像

土的力学性质有所提高, 从试验数据上也可以看出此点。

NaOH 掺量为 0.6% 时, 见图9。改性淤泥表面也发生了一定程度的水化反应, 淤泥的结构亦没有明显的改变。颗粒之间有更多的孔隙, 且比较大, 水化反应没有 NaOH 掺量为 0.28% 和 0.35% 时的。

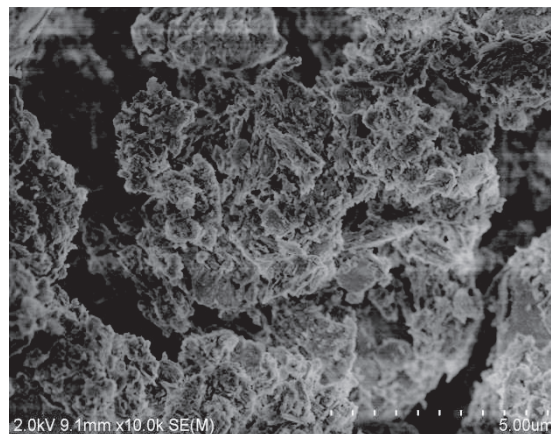


图9 NaOH 掺量为 0.6% 的 SEM 图像

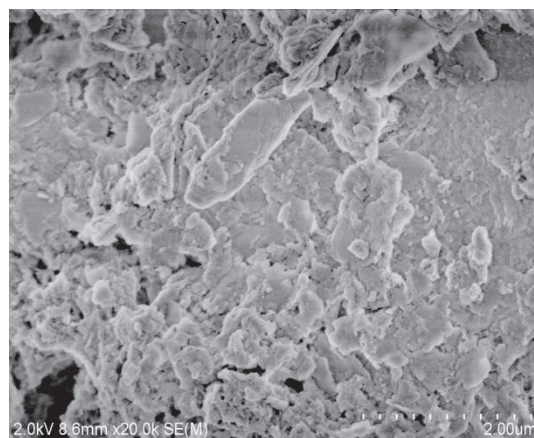


图10 NaOH 掺量为 0.9% 的 SEM 图像

图11已看不到片状的黏土矿物质, 淤泥土表面已生成较多水化产物, 土体因水化产物的填充而变密实, 土体空隙减少很多。

## 6 结论与研究意义

### 6.1 结论

对各工况的直剪试验数据和显微图片的分析, 可以得出以下结果:

(1) 有水泥工况抗剪强度随着 NaOH 含量的增加呈先增大后减小的趋势, 在 NaOH 含量为 0.35% 时达到最大值。无水泥工况在 NaOH 含量

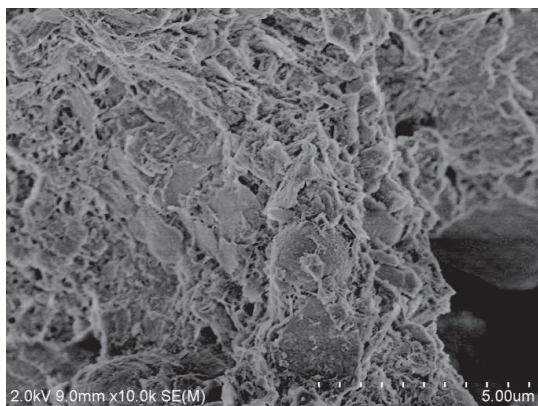


图 11 NaOH 掺量为 1.2% 的 SEM 图像

为 0.35% 时其剪应力在工况组中数值也是最大。

(2) 无水泥加硫酸钙的工况中, 随着硫酸钙含量的变化, 强度总体是先上升后下降的, 在硫酸钙含量占淤泥 0.9% 时, 淤泥的抗剪强度高于其他含量的抗剪强度, 28 d 的抗剪强度达到了 256 kpa。但从数据整体来看, 试验效果并不理想。

(3) 在不加水泥的情况下, 用碱激发粉煤灰和矿渣要比用硫酸钙效果好。

(4) 改性后的淤泥, 其力学各项指标均有较大提升, 可以满足某些工程建设用土要求。

## 6.2 研究意义

(1) 疏浚淤泥往往需要大量土地堆积, 而土地资源对于快速发展中的中国变得越来越重要, 能有效利用疏浚淤泥可以节约大量土地资源。

(2) 将工业废弃物和淤泥相结合生产出建筑材料, 即可以保护环境又可以带来经济效益, 符合我国的可持续发展理念。

(3) 水利工程建设过程中会产生大量的淤泥, 如能有效的利用这些淤泥将为水利工程建设带来便利。如连云港市猴嘴闸迁建工程建设过程中多出了大量淤泥, 就利用部分做了水泥回填土。

## 参考文献:

- [1] 梁启斌, 邓志华, 崔亚伟. 环保疏浚底泥资源化利用研究进展 [J]. 中国资源综合利用, 2010 (12).
- [2] 樊恒辉, 高建恩, 吴普特. 土壤固化剂研究现状与展望 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2006, 34 (2):141-152.
- [3] 张月星, 陆文雄, 王律, 乔燕. 复合矿物掺合料在水泥中水化机理的试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2006 (3):15-17.
- [4] 郭印, 徐日庆, 邵允铖. 淤泥质土的固化机理研究 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2008, 6 (42-6):1071-1075.

(责任编辑: 华智睿)