

# 固化脱水过程对淤泥固化效果影响研究

Influences of Solidifying and Absorbing Process on the Solidification Effect of Dredged Sludge

吴鸿昇<sup>1</sup>, 刘勇<sup>1</sup>, 蔡辉敏<sup>1</sup>, 李斌<sup>1</sup>, 李方林<sup>1</sup>, 吴跃东<sup>2</sup>, 刘坚<sup>2</sup>

(1. 国网江苏省电力工程咨询有限公司, 江苏 南京 210036;  
2. 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)

**摘要:** 现有疏浚淤泥化学固化的处理方法是在淤泥中先添加吸水剂再使用固化剂。该方法虽然减少了固化剂的用量, 但是在制备固化土时固化剂难以拌和, 进而影响固化效果, 且减缓工程进度, 不利于工程应用。为此, 提出先固化后吸水的淤泥固化处理方法, 并通过滴定试验、无侧限抗压强度试验和压汞试验, 对比分析先吸水后固化和先固化后吸水这两种处理方法的固化效果和机理。结果表明: 相较于先吸水后固化, 先固化后吸水处理方法所制备的固化土  $Ca^{2+}$  含量更大, 无侧限抗压强度更高, 表明该方法的固化效果更好。这是因为先固化后吸水的处理方法所制备固化土小孔径的孔隙含量更大, 土体结构更加紧密。该研究为淤泥固化土的工程制备提供了新思路和技术参考。

**关键词:** 淤泥固化土; 固化方法; 无侧限抗压强度; 微观试验

中图分类号: TU43 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 06-0073-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.06.014

WU Hongsheng<sup>1</sup>, LIU Yong<sup>1</sup>, CAI Huimin<sup>1</sup>, LI Bin<sup>1</sup>, LI Fanglin<sup>1</sup>, WU Yuedong<sup>2</sup>, LIU Jian<sup>2</sup>

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Engineering Consulting Co., Ltd., Nanjing 210036, China;

2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering,  
Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The existing treatment method for chemical solidification of dredged sludge is to first add water absorbent and then solidifying agent to the sludge. Although this method reduces the amount of solidifying agent used, the solidifying agent is difficult to mix when preparing the solidified soil. This behavior weakens the solidification effect and slows down the engineering progress, which is not conducive to engineering applications. Therefore, a sludge solidification treatment method that first solidifies soil and then absorbs water was proposed. By conducting titration tests, unconfined compressive strength tests and mercury intrusion tests, the solidification effects and mechanisms of the two treatment methods, viz first water absorbent and then solidifying agent, first solidifying agent and then water absorbent, were compared and analyzed. The experimental results show that, compared with that of the method of first water absorbent and then solidifying agent, the solidification effect of the method of first solidifying agent and then water absorbent is better, the solidified sludge soil with a higher  $Ca^{2+}$  content and unconfined compressive strength. This is because the method of first solidifying agent and then water absorbent produces solidified soil with

作者简介: 吴鸿昇 (1989—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 岩土工程与结构工程。

通信作者: 吴跃东 (1969—), 男, 博士, 教授, 研究方向: 基础工程与地基处理。

收稿日期: 2023-03-05

## 岩土力学

a larger pore content in small pore size, indicating a much denser soil structure. A new idea and technical references for the engineering preparation of solidified sludge soil can be provided.

**Keywords:** solidified sludge soil; solidification method; unconfined compressive strength; microcosmic experiment

### 0 引言

近年来,随着水域治理需求的增加,疏浚工程也不断增加<sup>[1]</sup>。根据相关数据,我国每年由疏浚工程产生的疏浚淤泥总量已达到9亿m<sup>3</sup>,其中珠三角地区每年产生的疏浚淤泥就高达800万m<sup>3</sup><sup>[2]</sup>。这些疏浚淤泥具有高含水率和强流动性,若未经处理,容易造成堆积,进而提高河床水位,降低河湖的泄洪能力。在严重情况下,还可能导致管道淤积并污染水体<sup>[3]</sup>。因此,针对疏浚淤泥的高效处理已成为当务之急。

目前对河湖疏浚淤泥的处理,主要利用挖泥设备将淤泥外运排放,或置于堆场中晾晒固结,或运至大型的淤泥处理厂进行机器压滤或高温处理<sup>[4]</sup>。由于疏浚淤泥体量大、含水率高,堆积晾晒需占用大量的土地资源,运输处理也需要消耗大量的人力财力<sup>[5]</sup>。另外,由于疏浚淤泥强度低、压缩性高,工程性质较差,绝大多数疏浚淤泥会放置于堆场中掩埋固结,很少一部分用于城市建设,造成资源的浪费<sup>[6]</sup>。

面对疏浚淤泥资源化处理的难题,工程界和学术界已尝试多种方案<sup>[7-8]</sup>。化学固化法<sup>[9]</sup>是处理疏浚淤泥的一种有效方法,该方法向淤泥中加入固化剂,包括水泥、粉煤灰等,以改善淤泥的工程性质,提高淤泥的强度,使淤泥能够应用于实际工程。但当淤泥含水率过高(超过3倍液限)时,需要消耗大量的固化剂才能有效固化淤泥<sup>[10]</sup>。为了减小固化剂的用量,节约成本,现有的研究普遍先采用絮凝剂,如聚丙烯酰胺(PAM),以降低淤泥的初始含水率,再加入吸水剂,如高分子吸水树脂(SAP),来进一步减少淤泥中的水分<sup>[11-12]</sup>。此时,淤泥中的水分含量已经大幅下降,含水率较低。然而,在较低含水率的淤泥中加入固化剂,不但很难拌和均匀,导致所制备的固化土各向异性高,物理力学性质差异大,而且在实际应用时,需要耗费大量的人工与机械设备搅拌,造成工程进度慢,处理成本不易控制

等问题。

为此,提出先固化后吸水的淤泥固化处理方法,即在高含水率的淤泥土中使用絮凝剂进行固液分离后,先加入固化剂让其在淤泥中混合均匀,再加入吸水剂减少土中含水率,以提高固化剂的固化效能。为了探究固化和吸水顺序对淤泥的固化效果,提出了先吸水后固化和先固化后吸水两种淤泥固化处理方式,通过对比分析相应固化土的Ca<sup>2+</sup>含量、无侧限抗压强度和孔隙特征,探究两种处理方式的固化效果与机理。为淤泥固化土的工程制备提供新思路和技术参考。

### 1 试验方案

#### 1.1 试验设计

为了探究添加固化剂和吸水剂顺序对淤泥的固化效果和机理,分别设置先固化后吸水(CS)和先吸水后固化(SC)两种淤泥土固化处理方式,并控制水泥掺量分别为4%、6%、8%和10%进行对比试验。先通过乙二胺四乙酸(EDTA)滴定试验和无侧限抗压强度试验,测定各组固化土中Ca<sup>2+</sup>含量和无侧限抗压强度,分析两种淤泥土固化处理方式的固化效果;再通过压汞试验,从微观角度揭示两种处理方式的固化机理,并分析其差异。

#### 1.2 试验材料

试验所用的淤泥土为341省道无锡马山至宜兴周铁段工程的疏浚淤泥,其基本物理性质见表1。由于疏浚淤泥含水率较高,淤泥中含有植物、贝壳和塑料等杂质,因此需要对淤泥先进行脱水预处理,将底泥置于空地中平铺晾晒,待自然风干后,用木槌敲击并过2mm土工筛,去除土样中的大直径土颗粒和杂质。再将风干后的土样放入干燥的塑料袋中密封保存,以便试验取用。

表1 淤泥土的基本物理性质  
Table 1 Basic physical properties of dredged sludge

液限 /%	塑限 /%	有机质 含量/%	粒组级配/%		
			砂粒	粉粒	黏粒
62.7	4.4	4.4	0.3	79.1	20.6

相较于其他类型的絮凝剂, 有机絮凝剂阳离子聚丙烯酰胺 (CPAM) 的脱水速度较快, 泥水分离效果较好且价格低廉。需要注意的是, CPAM 的絮凝效果受掺量的影响。根据文献 [13] 可知, 当 CPAM 的掺量为 0.4‰ 时, 絮凝效果较好, 适用于淤泥脱水。因此试验使用絮凝剂 CPAM 掺量为 0.4‰。

固化剂采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥, 水泥 3 d 的抗折强度为 5.5 MPa, 抗压强度为 27.2 MPa, 主要化学成分及含量见表 2。吸水剂采用高分子吸水树脂 (SAP), 其参数见表 3。

表 2 普通硅酸盐水泥主要化学成分

SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
43.8	41.6	7.9	4.4	2.3

表 3 SAP 性质参数

Table 3 Property parameters of SAP

粒度/ $\mu\text{m}$	pH 值	堆积密度/ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	清水中的 吸水倍数/( $\text{g}/\text{g}$ )
38~74	6.2	0.84	165

### 1.3 固化土制备

将风干的疏浚淤泥土配置成初始含水率为 5 倍液限的泥浆, 放入 180 mm × 140 mm × 150 mm 的玻璃缸, 并使泥浆高度为 90 mm。随后向泥浆中加入 0.4‰ 的 CPAM 溶液, 用玻璃棒充分搅拌, 静置 24 h 后抽取上层清液, 留下底层淤泥。

采用先固化后吸水的方式制备固化土时, 向淤泥中加入适量的水泥固化剂, 搅拌均匀后放入 SAP 吸水剂。为了保证均匀吸水, 先称取一定质量的 SAP 平均放入多个土工袋中, 再将土工袋分两层放入淤泥中, 并加压 3 kPa 让 SAP 充分吸水, 在水泥初凝前取出 SAP 土工袋。

采用先吸水后固化的方式制备固化土时, 先向淤泥中分层放入与 CS 方式同等质量的 SAP 吸水剂, 并开始计时, 达到 SAP 吸水饱和的时间后取出 SAP 土工袋, 再加入水泥并搅拌均匀。

将两种方式制备的固化土制成高 80 mm, 直径 39.1 mm 的圆柱样, 放入恒温恒湿 (温度为 20 ℃, 湿度为 97%) 养护箱中养护 7 d。

### 1.4 试验方法

将养护 7 d 后的样本取出, 采用应变控制式无侧限抗压强度仪进行无侧限抗压强度试验, 加载速率为 1 mm/min。

收集破坏后的土样, 用木槌将其碾碎成细颗粒粉末后, 进行 EDTA 滴定试验。称取 30 g 土样和 60 ml 的 10% NH<sub>4</sub>Cl 溶液放入烧杯中充分搅拌 3~4 min (每分钟搅拌 110~120 次), 放置沉淀 10 min, 让 Ca<sup>2+</sup> 充分溶出, 然后用吸管将上部清液转移至 100 mL 烧杯内, 搅拌均匀。用大肚移液管抽取上层悬浮液 1 mL 放入三角瓶中。同时, 量取 1.8% NaOH 溶液 5 mL, 放入三角瓶中, 用精密试纸检测, 待测液的 pH 为 13。然后, 加入钙红指示剂 0.02 g, 溶液呈玫瑰红色。记录滴定管中 EDTA 溶液的初始读数为 V<sub>1</sub>, 用 EDTA 溶液滴定待测液, 边滴定边摇匀, 当溶液变为蓝色时, 停止滴定, 记录滴定管中 EDTA 溶液的体积为 V<sub>2</sub>, 最终滴定液的消耗量为 V<sub>1</sub>-V<sub>2</sub>, 用滴定液的消耗量来表示固化土中水泥“结合量”的大小。

压汞试验仪器为 Auto Pore IV 9600 型高性能全自动压汞仪。试验的压力范围为 0.5~33 000 psi。取一定质量的固化土, 放入烘箱干燥至恒重, 取出后密封。然后对土样进行称重、充汞、进汞、退汞等步骤后记录试验数据。

## 2 固化效果分析

淤泥土的固化效果可分别通过固化土中 Ca<sup>2+</sup> 含量, 即水泥的“结合量”, 以及固化土的抗压强度来评价, 而水泥的“结合量”又可以用 EDTA 消耗量来反映。图 1 展示的是两种处理方式后固化土试件的 EDTA 消耗量。可以看出, 随着水泥固化剂用量的增大, EDTA 消耗量均有所增长。这是因为水泥掺量越大, 土中 Ca<sup>2+</sup> 含量越多。相较于 SC 固化土, 相同水泥掺量下, CS 固化土试件所消耗的 EDTA 量更大, 表明 CS 固化土试件中的 Ca<sup>2+</sup> 含量更多, 水泥“结合量”更大。究其原因, 加入相同掺量的水泥时, 由于先吸水后固化的处理方式中前期吸水减少了试件中的含水率, 试件不能提供水泥足够的水量进行水化反应, 从而降低了土中 Ca<sup>2+</sup> 含量, 减小固化土的水泥“结合量”。此外, 将两种处理方式获得试件的 EDTA 消耗量进行比值 (V<sub>CS</sub>/V<sub>SC</sub>), 可以发现, 随着水泥掺量的增大, 比值逐渐减小, 意味着两种处理方式获得的固化土试件中 Ca<sup>2+</sup> 含量逐渐相接近。这是由于水泥掺量增大时, 水泥更能够均匀混合在土体中, 两种处理方式所获得的 Ca<sup>2+</sup> 含量差异逐渐减小, 因而比值呈

## 岩土力学

下降趋势。这就表明,水泥掺量越大,固化土中水泥的“结合量”受固化过程的影响越小。

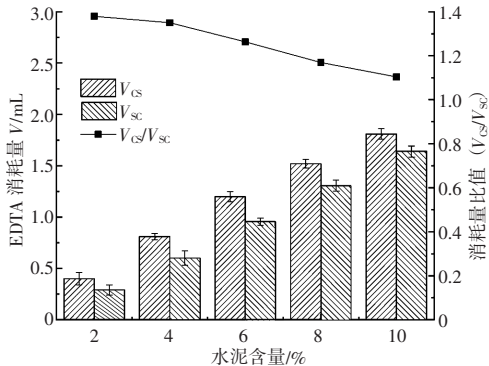


图1 不同处理方式固化土试件的 EDTA 消耗量及其比值  
Fig. 1 EDTA consumption and its ratio of solidified soil samples treated with different methods

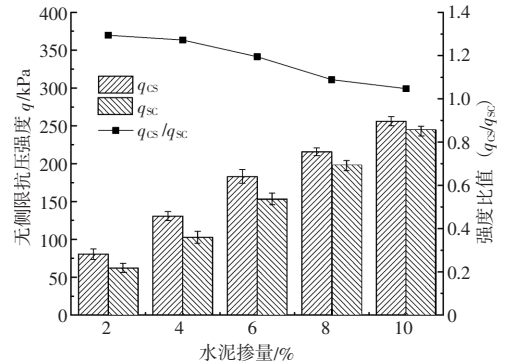


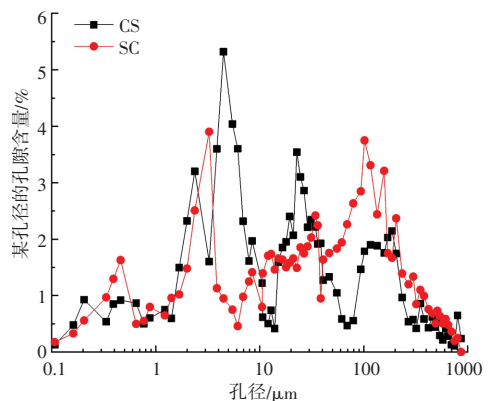
图2 不同处理方式固化土试件无侧限抗压强度及其比值  
Fig. 2 Unconfined compressive strength and its ratio of solidified soil samples treated with different methods

图2为两种处理方式对固化土试件的无侧限抗压

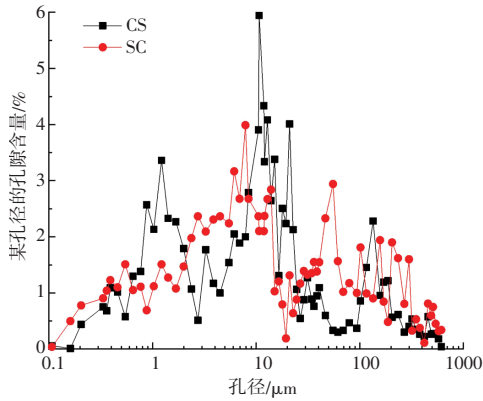
强度的影响。可以观察到,随着水泥掺量的增加,无侧限抗压强度也随之增加。主要是由于使用较高掺量的水泥可以增加土体的黏聚力,而且水化反应生成的硬化产物可以填充土颗粒之间的空隙,使土体结构更加紧密,从而提高了土体的强度。与SC固化土相比,相同水泥掺量下,CS固化土试件的无侧限抗压强度更高。这是因为先吸水后固化的处理方式中,前期吸水减少了试件中的含水率,降低了土体的和易性,使得后续加入的水泥难以均匀混合在土体中。混合均匀的水泥更能够在土中形成均一的结构,抵抗更强的外力,这与汤怡新等<sup>[14]</sup>在其研究中发现的结论相一致,即水泥拌和得越充分,水泥土强度越高。另外,前期减少试件中的水量容易造成试件不能提供水泥足够的水量进行水化反应。这会导致水泥未充分水化,不能形成足够的硬化产物,从而影响固化土的强度和耐久性。同时,水量不足会使固化土干燥时发生收缩,这种收缩会导致固化土的龟裂和变形,进而降低固化土的强度。将两种处理方式获得试件的无侧限抗压强度进行比值( $q_{cs}/q_{sc}$ ),可以发现,随着水泥掺量的增加,比值逐渐减小,意味着两种处理方式获得的固化土试件的无侧限抗压强度逐渐接近。这是由于水泥掺量越大,试件中水泥混合得越充分,所生成的水化产物能够将孔隙填满,使得土样结构差异减小,因而强度差异越小。可见,在选择水泥固化剂用量和处理方式时,需要权衡这些因素以便获得最佳强度的固化土。

### 3 固化机理分析

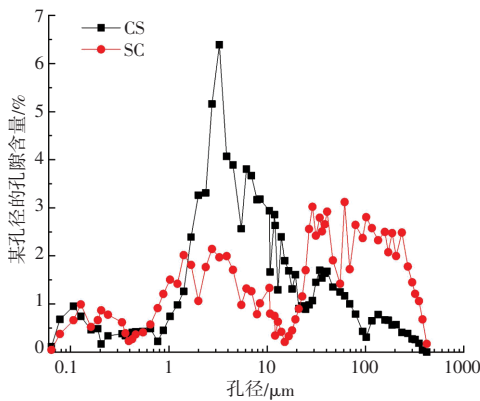
两种固化处理方式所获得固化土的水泥“结合量”和强度存在一定差异,可以进一步从微观角度探究原因。图3展示的是不同处理方式固化土试件孔隙含量随孔径的发展曲线。可以看到,在相同水泥掺量下,相较于SC固化土,CS固化土试件曲线的峰值所对应的孔径较小,这意味着CS固化土试件中较小孔径的孔隙含量更高,试件结构更紧密,因而试件在无侧限抗压强度试验中能够承受更大的外力作用。究其原因,CS固化土试件中水泥的均匀性较好,水泥中矿物成分水化反应更加充分,形成更多的水化产物填充进孔隙之间。随着水泥掺量的增大,某孔径的孔隙含量曲线向左偏移,表明两种方式所获得固化土试件其孔隙尺寸均逐渐减小。这是由于较高掺量的水泥会形成大量的水化产物,填充了土粒孔隙,同时这些水化产物还会包裹土颗粒,进一步减小了土颗粒间的空隙。



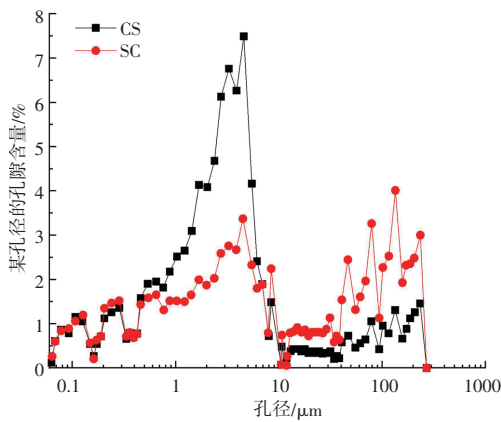
(a) 水泥掺量 4%



(b) 水泥掺量 6%



(c) 水泥掺量 8%

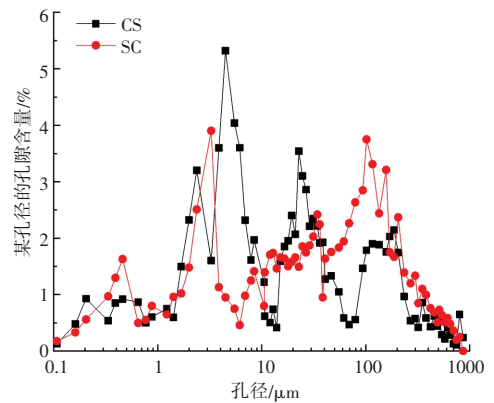


(d) 水泥掺量 10%

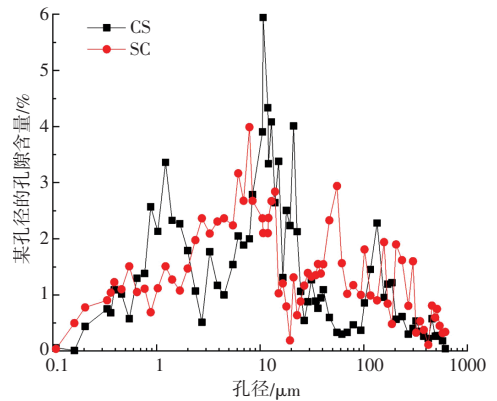
图 3 不同处理方式固化土试件某孔径的孔隙含量  
Fig. 3 Pore content of a certain pore size of solidified soil samples treated with different methods

将两种处理方式获得的固化土试件的每个孔径范围内的孔隙含量进行对比, 结果如图 4 所示。可以看出, 相同水泥掺量下, 相较于 SC 固化土, CS 固化土试件的小孔径的孔隙含量更大。例如, 当水泥产量为 10% 时, 两种处理方式获得的固化土试件中 0.01~0.1 μm、0.1~1 μm 的孔隙含量较为接近, 而

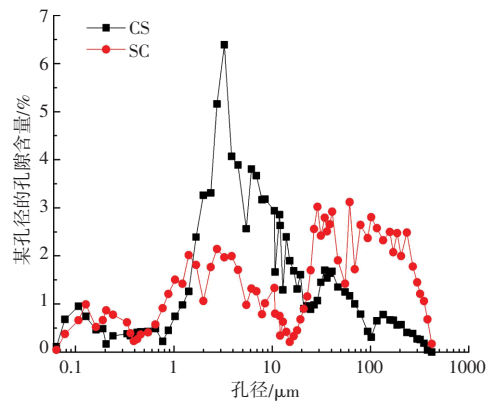
1~10 μm 孔径的孔隙含量差异较大, CS 固化土是 58.45%, SC 固化土是 30.96%, 该孔径范围内 CS 固化土孔隙含量是 SC 固化土的 1.9 倍。在孔径为 10~100 μm 和 100~500 μm 范围内, SC 固化土的孔隙含量远大于 CS 固化土。此外, 随着水泥掺量增大, 大孔径范围内的孔隙含量逐渐减小, 小孔径范围内的孔隙含量增大, 并出现更小孔径范围的孔隙。这很好的解释了水泥掺量增大使得试件结构更紧密,



(a) 水泥掺量 4%

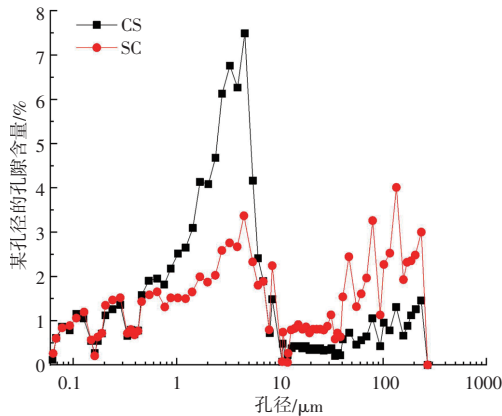


(b) 水泥掺量 6%



(c) 水泥掺量 8%

## 岩土力学



(d) 水泥掺量 10%

图 4 不同处理方式固化土试件孔隙分布  
Fig. 4 Pore distribution of solidified soil  
samples treated with different methods

强度更高这一现象。所以在工程应用中,建议优先采用先固化后吸水这种处理方式对淤泥土进行固化,以充分发挥水泥的胶结和填充作用,从而获得强度较高的土样。

## 4 结论

为了探究加固和吸水顺序对淤泥固化土的固化效果和机理,分别采用先固化后吸水和先吸水后固化两种处理方式制备淤泥固化土,通过 EDTA 滴定试验和无侧限抗压强度试验,对比分析两种处理方式的固化效果,再通过压汞试验,从微观角度揭示固化机理,得到主要结论如下:

(1) 添加固化剂和吸水剂的顺序会影响淤泥土的固化效果。先吸水后固化的处理方式降低了水泥“结合量”和固化土的强度。而先固化后吸水的处理方式的固化土强度更高。

(2) 随着水泥掺量的增大,先吸水后固化和先固化后吸水这两种处理方式所制备的固化土水泥“结合量”和强度差异减小。在选择水泥固化剂用量和处理方式时,需要权衡这些因素来获得最佳强度的固化土试件。

(3) 从微观角度揭示淤泥固化机理,发现先吸水后固化的处理方式,其固化土的孔隙尺寸较大,随着水泥掺量的增大,孔隙尺寸逐渐减小。为了确保水泥充分水化,获得良好的固化效果,可以采用先固化后吸水的处理方式制备淤泥固化土。

## 参 考 文 献

- [1] 李丽华, 杨星, 裴尧尧, 等. 稻壳灰水泥固化淤泥土试验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18 (5): 1547-1555.
- [2] 吴自强. 建筑垃圾和淤泥处理现状及综合利用研究 [J]. 江苏建材, 2018 (2): 44-48.
- [3] 谢军, 边疆, 刘静静. 基于室内试验河道淤泥固化建筑材料力学性能研究 [J]. 水利技术监督, 2023, 185 (3): 224-227.
- [4] 陈瑞敏, 简文彬, 张小芳, 等. CSFG-FR 协同作用改良淤泥固化土性能试验研究 [J]. 岩土力学, 2022, 43 (4): 1020-1030.
- [5] 吕海波, 曾召田. 膨胀土强度干湿循环试验研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30 (12): 3797-3802.
- [6] 吴晓翔, 史燕南, 衡阳, 等. 固化海积淤泥土强度发展规律试验研究 [J]. 水电能源科学, 2021, 39 (11): 163-165.
- [7] 王东星, 陈政光. 氯氧镁水泥固化淤泥土力学特性及微观机制 [J]. 岩土力学, 2021, 42 (1): 77-85, 92.
- [8] 王文军, 袁飞飞, 蒋建良, 等. 高含水率吹填淤泥固化土强度特性及预测模型 [J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17 (2): 461-467.
- [9] 冯忠民. 大连湾海底淤泥流动固化土室内试验研究 [D]. 保定: 河北大学, 2020.
- [10] 孙海超. 低水泥掺量淤泥固化土力学性能及微观结构特征研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [11] 章荣军, 蒋达飞, 郑俊杰. 絮凝调理对淤泥(浆)固结特性的影响 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49 (7): 1-6.
- [12] 陈雪萍, 翁志学, 黄志明. 高吸水性树脂的结构与吸水机理 [J]. 化工新型材料, 2002, 30 (3): 19-21.
- [13] 刘鉴雯, 孙永军, 马江雅, 等. 阳离子聚丙烯酰胺对黑臭河水的絮凝效果研究 [J]. 环境科学与技术, 2018, 41 (增刊1): 152-155.
- [14] 汤怡新, 刘汉龙, 朱伟. 水泥固化土工程特性试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2000, 22 (5): 549-554.