

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240206002

工业固废基地聚物固化河道疏浚土力学特性 试验研究*

吴维江¹, 谷雷雷², 王盛年¹, 吴志坚¹, 张强³, 朱枫⁴, 海同⁴

(1. 南京工业大学交通运输工程学院, 江苏 南京 211816; 2. 中交一公局海威工程建设有限公司, 北京 101119;
3. 中国水利水电科学研究院 水利部水工程建设与安全重点实验室, 北京 100038;
4. 中国安能集团第三工程局有限公司重庆分公司, 重庆 401329)

摘要: 河道疏浚土具有含水率高、强度低、组成成分复杂等特点, 难以直接再用于工程建设。为实现高含水河道疏浚土工程再利用, 以钢渣粉和高炉矿渣粉为前驱体, 生石灰和硅酸钠为碱激发剂, 制备工业固废基地聚物凝胶材料, 通过系列力学性能试验, 研究了地聚物中各组分最佳配比关系, 探讨了初始含水率、养护龄期对地聚物固化河道疏浚土强度的影响规律, 对比评价了地聚物固化疏浚土的力学性能, 并通过微结构观测分析了地聚物固化河道疏浚土的内在机制。结果表明: 工业固废基地聚物中生石灰、硅酸钠、钢渣粉、高炉矿渣粉四者的最佳质量掺比为 280:350:729:405; 地聚物固化疏浚土强度随初始含水率提高呈非线性下降, 随养护龄期增加呈非线性增加; 地聚物固化疏浚土抗压强度远低于水泥固化疏浚土, 但却具有更高的内摩擦角; 随养护龄期增加, 大量无定形凝胶的生成以及氢氧化钙的消失提高了河道疏浚土整体性, 因而改善了河道疏浚土的力学性能。

关键词: 疏浚土; 地聚物材料; 配合比设计; 力学性能; 固化机理

中图分类号: TU442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)03-0643-09

Mechanical Properties of River Dredged Soils Stabilized with Industrial Solid Waste-based Geopolymer Binder

WU Weijiang¹, GU Leilei², WANG Shengnian¹, WU Zhijian¹, ZHANG Qiang³,
ZHU Feng⁴, HAI Tong⁴

(1. College of Transportation Science & Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;
2. CCCC First Highway Engineering Bureau Co., Ltd, Beijing 101119, China;
3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;
4. Anneng Chongqing Construction Development Co., Ltd, Chongqing 401329, China)

Abstract: River dredged soils exhibit high moisture content, low strength, and complex composition, making them difficult to reuse directly in engineering construction. To achieve the engineering reuse of high-moisture river dredged soils, an industrial solid waste-based geopolymer binder was prepared us-

* 收稿日期: 2024-02-06; 修回日期: 2024-04-09

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(42330704)、国家自然科学基金青年基金项目(41902282)、江苏省碳达峰碳中和科技创新专项(BE2022605)、南京市科技计划发展项目(202211011)资助

作者简介: 吴维江(2000—), 男, 硕士研究生。主要从事特殊土资源化再利用方面的研究。E-mail: weijiang@njtech.edu.cn

通信作者: 王盛年(1987—), 男, 副教授, 博士。主要从事特殊岩土体静动力特性及工程应用方面的研究。

E-mail: shengnian.wang@njtech.edu.cn

ing steel slag powder and blast furnace slag powder as precursors, and quicklime and sodium silicate as alkali activators. Through a series of mechanical tests, the optimal mass mixing ratio of each component in the geopolymer was investigated, and the effects of initial water content and curing age on the strength of geopolymer-stabilized river dredged soils were studied. The mechanical properties of geopolymer-stabilized dredged soils were compared and evaluated, and the inherent mechanism of geopolymer-stabilized river dredged soils was analyzed through microstructure observation. The results indicated that the optimal mass ratio of quicklime:sodium silicate:steel slag powder:blast furnace slag powder in the industrial solid waste-based geopolymer was 280 : 350 : 729 : 405. The strength of geopolymer-stabilized dredged soils nonlinearly decreased with higher initial water content and nonlinearly increased with prolonged curing age. The compressive and tensile strength of geopolymer-stabilized dredged soils was significantly lower than that of cement-stabilized dredged soils, whereas their internal friction angle was notably higher. With increasing curing age, the formation of abundant amorphous gels and the consumption of calcium hydroxide enhanced the integrity of dredged soils, leading to improved mechanical properties. This study provides a reference for the resource recycling of high-water-content soft soils.

Keywords: dredged soil; geopolymer material; mix design; mechanical properties; stabilization mechanism

0 引 言

疏浚土具有含水率高、强度低、组成成分复杂等特点,难以直接再用于工程建设^[1-2]。传统的露天堆存虽在一定程度上缓解了疏浚土的处置难题,但也带来了土地占用、水体污染等次生环境问题^[3-4]。疏浚土本质上为高含水率软弱土,如处理得当,依旧具备再次工程利用的巨大潜力。从节能减排的角度来看,实现疏浚土资源化再利用也是当前社会发展的现实需求。因此,如何科学有效的改善其性能、使之最大效益的实现资源再利用是处置高含水率疏浚土的关键。

当前,国内外对疏浚土资源化利用技术的研究主要集中于物理固结和化学固化^[5]。常见的物理固结方法包括离心分离法和压滤法^[6-8],虽能在一定程度上对疏浚土进行脱水处理,但其自身成本高昂、效率低下的问题大大限制了在工程中的应用,同时,物理固结方法不能去除疏浚土中的污染物,因此对于某些高污染性淤泥而言,仍需二次处理。化学固结是指在疏浚土中掺入固化剂,在经历了吸水、水化等反应后,土体颗粒表面产生的胶凝物质会使疏浚土具有一定的水稳定性和强度稳定性。化学固结不仅可在固结过程中形成的硬化外壳、包裹土颗粒,其在一定程度上也降低了污染物的活

性^[9]。许多研究表明,水泥、石灰等传统无机黏结剂可用于固化疏浚土。如 O. Q. Jan 和 B. A. Mir^[10]指出,疏浚土抗压强度与石灰掺量有关;A. Gupta 等^[11]通过将不同比例水泥和疏浚土混合,得出了改善疏浚土的最佳掺料配比。然而,水泥、石灰是高能耗、高碳排放工业品,受政策及市场影响,近年来价格不断攀升。因此,如何在改善高含水率疏浚土力学性能同时降低固化成本是当前工程界普遍面临的问题。

复合固化剂是利用硅铝酸盐材料代替水泥的新型固化方式,其可在不降低相同水泥掺量稳定疏浚土性能前提下,节约水泥用量或不使用水泥,从而降低工程建设成本。如 J. Ding 等^[12]提出了水泥-磷石膏双掺固化处理高含水率疏浚淤泥的方法;R. Zentar 等^[13]研究了硅铝粉煤灰和水泥固化疏浚土的效果,发现掺入水泥和粉煤灰的疏浚土抗拉、抗压强度均有所提高;X. H. Kong 等^[14]探讨了氧化镁与脱硫石膏、钢渣结合用于土体固化的配合比设计;J. S. Li 等^[15]利用垃圾焚烧污泥灰与水泥结合固化疏浚土,扫描电镜和 X 射线衍射结果表明:水合硅酸钙水合物(C-S-H)/铝酸钙水合硅酸钙水合物(C-A-S-H)等水合胶凝化合物的形成是固化土强度提升的主要原因。硅铝酸盐矿物经碱激发形成共价聚合凝胶,是当前复合固化剂研究的一个重要方向。周恒宇等^[16]利用煤系偏高岭土基地聚物固

化淤泥,并探讨了地聚物配合比、养护龄期、养护温度对固化土强度的影响;D. Wang等^[17]探讨了偏高岭土地聚物固化粉质黏土的力学特性和强度形成机理。这些研究为复合固化剂稳定高含水率疏浚土再生利用提供了有利借鉴。

在疏浚土固化机理研究方面,W. T. Li等^[18]发现了内部微观结构的显著差异会导致固化黏土浆的强度差异;N. Yoobanpot等^[19]利用扫描电镜和X射线衍射试验对硅酸盐水泥和粉煤灰稳定疏浚物进行了微观结构分析,发现生成的硅酸钙水合物是使固化疏浚土强度增强的原因;张小芳等^[20]研究了水泥-矿渣-粉煤灰固化淤泥力学强度的演变规律,并指出随养护龄期增加,土体孔隙水减少,水化物充分裹挟、胶结土颗粒,形成致密空间网状结构,从而使土体强度提升。

本文基于工业工程固废综合再利用思想,以矿渣和高炉矿渣为前驱体,生石灰和硅酸钠为激发剂,制备地聚物材料,通过大量宏观力学试验,研究了地聚物组分配比、初始含水率和养护龄期对固化疏浚土强度的影响,对比分析了疏浚土、地聚物固化疏浚土及水泥固化疏浚土三者的力学性能差异,并从微观结构角度出发,探讨了地聚物固化疏浚土的强度形成机理。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

(1) 试验用土

试验所用淤泥质土取自京杭运河浙江段 III 级航道地下深 2.0~4.0 m 范围内,采样土体处于可塑状态,无流动性,粒径分布均匀,整体呈黑褐色,无有机杂质等。级配曲线和基本物理指标如图 1 和表 1 所示。

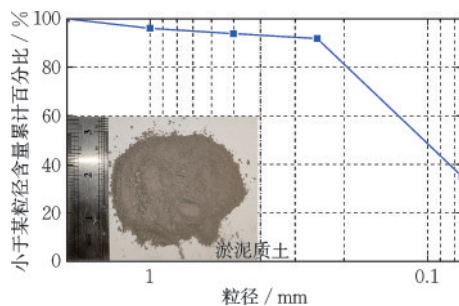


图 1 淤泥质土级配曲线

Fig.1 Gradation curve of silty soil

表 1 淤泥质土基本物理指标

Table 1 Basic physical indicators of silty soil

土样	天然含水率/%	比重	液限/%	塑限/%	塑性指数/%
淤泥质土	25.68	2.66	37.91	17.98	20.02

(2) 前驱体

试验所用钢渣粉产自华英净化材料有限公司,规格为 S100 级钢渣粉,粒度为 300 目(见图 2(a)),其具体化学成分及含量见表 2。

试验所用高炉矿渣产自巩义市龙泽净水材料有限公司,S105 级高炉矿渣,粒度为 325 目(见图 2(b)),其具体化学成分及含量见表 3。

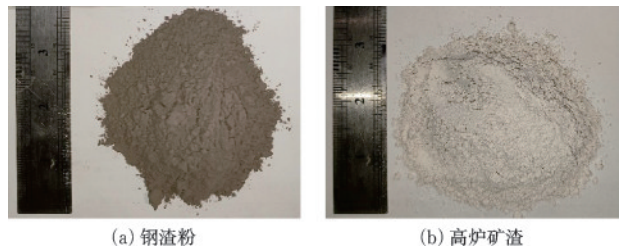


图 2 前驱体样品图

Fig.2 Photographs of precursor materials

表 2 钢渣粉化学成分及含量

Table 2 Chemical composition and content of steel slag powder

化学成分	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O
含量/%	37.35	13.24	4.35	3.6	25.12	2.65

表 3 高炉矿渣化学成分及含量

Table 3 Chemical composition and content of blast furnace slag powder

化学成分	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃
含量/%	53.79	28.01	10.31	6.01	1.03	0.85

(3) 碱激发剂

试验所用生石灰产自天津市北联精细化学品开发有限公司,白色粉末状,纯度为 99.7%(见图 3(a)),主要成分为 CaO,含量达 95% 以上,其水

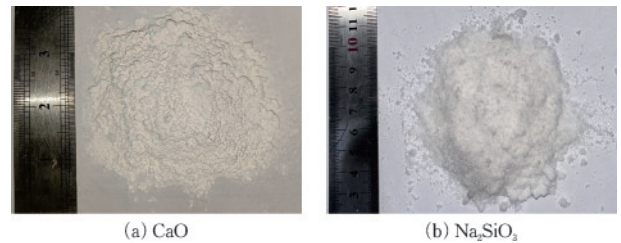


图 3 碱激发剂样品图

Fig.3 Photographs of alkali activator materials

化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 用于营造碱性环境,并促进水化硅铝酸钙形成。

试验所用硅酸钠产自福晨(天津)化学试剂有限公司,白色颗粒状,纯度为 99.7%(见图 3(b)),是良好的碱激发剂,有助于营造碱性环境。

1.2 试验仪器

(1) 电子万能试验机

采用济南力领试验机有限公司生产的 WDW-300M 型微机控制电子万能试验机进行无侧限抗压强度试验和巴西劈裂试验。该系统设计工最大试验力为 300.0 kN; 试验调速范围为 0.05~500.0 mm/min。

(2) 直剪仪

采用南京中岩公司生产的 ZJ 型应变控制直剪仪(四联)测定土的抗剪强度。该设备最大垂直荷载为 400 kPa, 杠杆比为 1.0: 1.2, 土样体积为 $30.0 \text{ cm}^2 \times 2.0 \text{ cm}$ 。

(3) 扫描电镜仪

采用日本电子公司生产的 JSM-6510 型电镜扫描仪进行试样表面结构形态观察。该设备加速电压范围为 0.3~30.0 kV, 分辨率 3.0 nm; 放大倍数为 18.0~300 000.0, 成像信号通过二次电子、背散射电子和特征 X 射线方式实现。

1.3 试验方案

试验研究包括 4 个部分:(1)探究最佳凝胶材料配比,即生石灰与硅酸钠的配比(试验 I)、钢渣粉与高炉矿渣的配比(试验 II)以及碱激发剂与前驱体的配比(试验 III);(2)地聚物稳定淤泥质土敏感性分析,即初始含水率(试验 IV)和养护龄期(试验 V)对其强度性能的影响;(3)评价淤泥质土、地聚物固化淤泥质土和水泥固化淤泥质土的力学性能;(4)揭示地聚物固化淤泥质土的机理。试验研究具体方案见表 4。试验流程如图 4 所示。

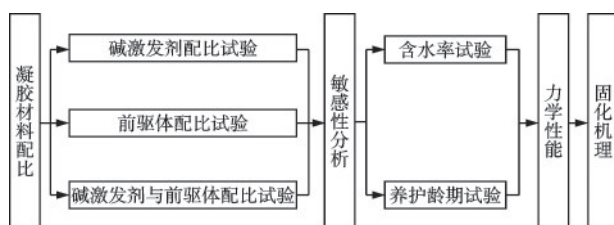


图 4 试验流程

Fig.4 Flow chart of experimental procedures

1.4 试样制备

(1) 强度测试

将河道淤泥质土土样烘干、碾压并过 2.0 mm 筛。然后,根据试验方案称取相应质量的河道淤泥质土、水泥以及钢渣,充分混合后加水搅拌均匀。

由于直接拉伸试样夹持的困难性,抗拉强度通常采用间接法测定,试验规程推荐采用巴西劈裂法测定抗拉强度。巴西劈裂圆盘试样和单轴压缩试验标准试样尺寸分别制成 $39.1 \text{ mm} \times 40.0 \text{ mm}$ 及 $39.1 \text{ mm} \times 80.0 \text{ mm}$ 圆柱体试样,直剪试验试样尺寸制成 $61.8 \text{ mm} \times 20.0 \text{ mm}$ 圆柱体试样。

试模内壁在制样前应洗擦干净,涂一薄层凡士林,制样时模具内土样应高于试模顶面。试模装满后,轻微敲击试模至土体无气泡冒出,用平口刀沿试模顶面刮平试件,并用保鲜膜覆盖,完成制样。试样制备控制在 25 min 内成型,在 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的环境中静置一昼夜,拆模后立刻放入 $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$ 、相对湿度不低于 90% 的养护室中养护至目标龄期。养护室内的试样应置于支架上,彼此间隔 10~20 mm,试件表面应保持潮湿,并不得被水直接冲淋。龄期从搅拌加水开始计时,每种规格试样制备 6 个平行样,选取质量偏差较小的 3 个试样开展强度试验。养护的成品固化土样如图 5 所示,加载破坏后的固化土样如图 6 所示。



图 5 成品固化试样

Fig.5 Cured stabilized soil specimens



图 6 加载破坏后的试样

图 6 加载破坏后的试样

Fig.6 Failed specimens after loading

表4 试验方案

Table 4 Experimental schemes

试验	生石灰:硅酸钠	钢渣粉:高炉矿渣	碱激发剂:前驱体	掺量/%	初始含水率/*Ll	温度/°C	养护龄期/d
I	0.6:1.0	1.0:1.0	2.0:1.0	15	1.75	20	7
	0.7:1.0						
	0.8:1.0						
	0.9:1.0						
	1.0:1.0						
II	0.8:1.0	1.6:1.0	2.0:1.0	15	1.75	20	7
		1.8:1.0					
		2.0:1.0					
		2.2:1.0					
		2.4:1.0					
III	0.8:1.0	1.8:1.0	1.0:2.4	15	1.75	20	7
			1.0:2.2				
			1.0:2.0				
			1.0:1.8				
			1.0:1.6				
IV	0.8:1.0	1.8:1.0	1.8:1.0	15	1.50	20	7
					1.60		
					1.70		
					1.75		
					1.80		
V	0.8:1.0	1.8:1.0	1.8:1.0	15	1.75	20	3
							7
							14
							28

注:*Ll为X倍液限,文中1.75*Ll即1.75倍液限=1.75×37.91%=66.34%

(2) 微观检测

对于微观结构试验中的扫描电镜试验,需将达到龄期的试样干燥、打磨、抛光、分别整平成约10.0 mm×10.0 mm×3.0 mm的小样开展SEM试验。

2 试验结果与分析

2.1 碱激发剂配比

图7为不同生石灰和硅酸钠配比下固化高含水率淤泥质土的7d单轴抗压强度结果。由图可知,随生石灰与硅酸钠配比的增加,试样单轴抗压强度先升后降。进一步分析发现,生石灰:硅酸钠为0.8:1.0时,钢渣粉高炉矿渣固化高含水率淤泥质土7d单轴抗压强度达到峰值状态。这是因为当硅酸钠相对含量较多时,硅铝酸根离子的析出速率要小于水合反应的消耗速度,从而影响硅铝酸钙等凝胶物质的形成,导致试样强度发展缓慢;反之,硅酸钠相

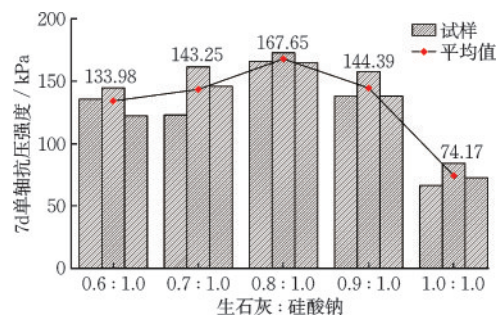


图7 不同生石灰与硅酸钠配比下的固化淤泥质土强度变化

Fig.7 UCS of silty soils stabilized with different ratios of quicklime to sodium silicate

对含量越少,代表着氧化钙的含量越大,此时高浓度的OH⁻虽有利于硅铝酸根离子的快速析出,但是过量生石灰产生的Ca(OH)₂是引起固化土开裂的主要原因,从而导致强度降低。故生石灰与硅酸钠的最佳配比为0.8:1.0。

2.2 前驱体配比

图8为不同钢渣粉与高炉矿渣配比下固化高含水率淤泥质土的7d单轴抗压强度结果。由图可知,随着钢渣粉与高炉矿渣配比的增加,试样的7d单轴抗压强度呈先升后降发展趋势。进一步分析发现,钢渣粉:高炉矿渣为1.8:1.0时,钢渣粉高炉矿渣固化高含水率淤泥质土7d单轴抗压强度达到峰值状态。这是因为高炉矿渣中的硅铝氧化物总量高于钢渣粉中的硅铝氧化物总量,当钢渣粉:高炉矿渣小于1.8:1.0时,高炉矿渣的相对含量较高,形成的水化凝胶产物较多,强度有所提升,但同时高炉矿渣中的CaO含量较高,其与钢渣粉、生石灰中所含的CaO总量除供应硅铝成分形成水化凝胶产物外,剩余CaO形成Ca(OH)₂,引发土体开裂、强度降低;而当钢渣粉:高炉矿渣大于1.8:1.0时,高炉矿渣的相对掺量越低,使得钢渣粉与高炉矿渣中硅铝氧化物总量越少,形成的水化凝胶产物较少,强度降低。

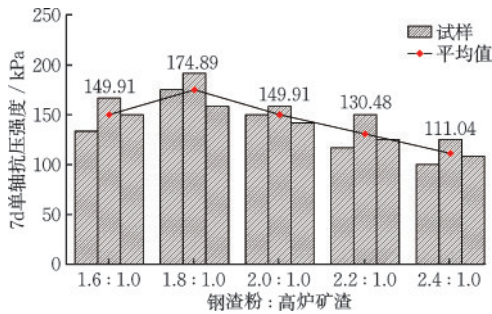


图8 不同钢渣粉与高炉矿渣配比下的固化淤泥质土强度变化
Fig.8 UCS of silty soils stabilized with different ratios of steel slag to blast furnace slag

2.3 碱激发剂与前驱体配比

图9为不同碱激发剂与前驱体配比下固化淤泥质土的7d单轴抗压强度结果。由图可知,当碱激发剂与前驱体的总掺量恒定为15%时,随碱激发剂与前驱体配比的增大,试样7d单轴抗压强度呈先升后降的发展趋势,进一步分析发现,碱激发剂:前驱体为1.0:1.8时,钢渣粉高炉矿渣固化高含水率淤泥质土7d单轴抗压强度增长很明显且达到峰值状态。这是由于前驱体相对掺量过高时,有限的碱激发剂不足以使硅铝矿物发生解聚反应和地质聚合反应,进而无法生成足够的凝胶产物,大大降低了

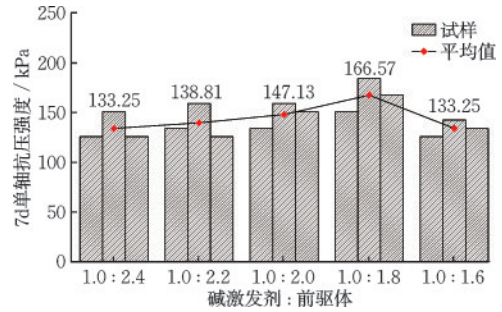


图9 不同碱激发剂与前驱体配比下的固化淤泥质土强度变化
Fig.9 UCS of silty soils stabilized with different ratios of alkali activator to precursor

土体强度;而当前驱体相对掺量过低时,碱激发剂相对过量,足够的激发剂虽能确保前驱体充分发生水合反应和聚合反应,但也导致更多的Ca(OH)₂留在了土壤中,造成强度降低。因此,碱激发剂(硅酸钠与生石灰的混合物)与钢渣粉高炉矿渣固化高含水率淤泥质土中前驱体(钢渣粉和高炉矿渣的混合物)之间的最佳配比为1.0:1.8。

综上,钢渣粉:高炉矿渣粉、生石灰:硅酸钠、碱激发剂:前驱体的最佳配比分别为1.8:1.0、0.8:1.0和1.0:1.8,经连比化整计算后可知,地聚物中生石灰、硅酸钠、钢渣粉、高炉矿渣粉四者的最佳质量掺比为280:350:729:405。

2.4 初始含水率试验

图10为最优配比下不同初始含水率钢渣—矿渣基地聚物固化高含水率淤泥质土的7d单轴抗压强度结果。可知,随初始含水率从1.50倍液限增加至1.80倍液限,钢渣粉高炉矿渣固化高含水率流塑性土抗压强度不断减小,且下降速度逐渐放缓。1.75倍液限后固化土强度减小速度更缓,表明更高

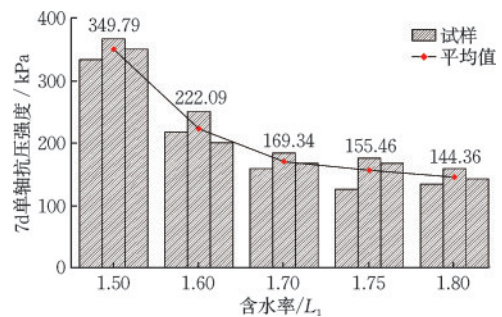


图10 不同初始含水率地聚物固化高含水率淤泥质土强度变化
Fig.10 UCS of geopolymer-stabilized silty soils with different initial water contents

含水率下地聚物固化效果将受到更显著影响,因此,为保证疏浚土固化效果,建议控制初始含水率在1.75倍液限以下。

2.5 龄期试验

图 11 为最优配比下不同养护龄期钢渣—矿渣基地聚物固化高含水率淤泥质土强度变化。可知,钢渣—矿渣基地聚物固化高含水率淤泥质土抗压强度随养护龄期发展呈非线性提升。龄期 3 d 时,高含水率淤泥质土强度提高到 119.37 kPa,显然,在养护初期,疏浚土中地聚物反应形成的凝胶物质已使土体性能开始快速提升。随着养护龄期增长,土体强度提升变缓,这个可能是由地聚物反应环境碱性降低所导致。

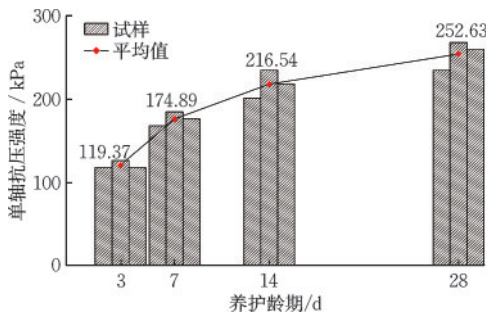


图 11 不同养护龄期地聚物固化淤泥质土强度变化

Fig.11 UCS of geopolymer-stabilized silty soils with different curing ages

3 力学性能评价与固化机理分析

3.1 力学性能评价

表 5 给出了养护龄期为 7 d 情况下的淤泥质土、地聚物固化淤泥质土和水泥固化淤泥质土的平均抗拉强度和抗压强度。可知,高含水率淤泥质土几乎没有强度,地聚物固化淤泥质土抗压、抗拉强度则均低于水泥固化淤泥质土。

表 5 三类试样平均抗拉/压强度

Table 5 Average tensile and compressive strengths of three specimen types

试样	抗拉强度/kPa	抗压强度/kPa
淤泥质土	—	2.45
地聚物固化淤泥质土	92.94	158.24
水泥固化淤泥质土	166.7	331.64

表 6 给出了养护龄期为 7 d 情况下的淤泥质土、地聚物固化淤泥质土和水泥固化淤泥质土抗剪强度(纯淤泥质土在直剪试验中,施加垂直压力后试样即发生破坏,无法得到有效的黏聚力与内摩擦角)。可知,地聚物固化疏浚土黏聚力要远低于水泥固化土,但内摩擦角高于水泥固化土。

表 6 三类试样抗剪强度

Table 6 Shear strength parameters of three specimen types

试样	黏聚力/kPa	内摩擦角/°
淤泥质土	—	—
地聚物固化淤泥质土	14.2	28.71
水泥固化淤泥质土	95.55	23.87

值得注意的是,虽然地聚物固化淤泥抗压强度低于水泥固化情形,但在 28 d 时地聚物固化土抗压强度已达到 252.63 kPa,满足江苏省南京市发布的《流态固化土填筑应用技术导则(试行)》要求“当固化土的抗压强度大于 0.2 MPa 时即可用于孔洞回填”^[21]。此外,《预拌流态固化土(PFSS)填筑工程技术标准》规定:当预拌流态固化土的 28 d 的抗压强度为 0.4 MPa 时,即可用于除城市快速路、高速公路、一级路、主干路以外的其他公路的路基回填^[22]。根据不同初始含水率试验结果可知,当初始含水量为 1.5 倍液限时,固化淤泥 7 d 抗压强度已达 350 kPa,接近规范规定值,后续随着养护龄期发展,强度进一步提升,必然可满足规范要求。因此,通过降低初始含水率或增加地聚物掺量等途径亦可有效提升固化土性能,满足工程需求。

3.2 固化机理分析

图 12 为不同养护龄期下的钢渣粉高炉矿渣固化高含水率淤泥质土微观检测结果。由图可知,在各龄期 1 000 倍镜下,随着养护龄期发展,钢渣粉高炉矿渣固化高含水率淤泥质土体内孔洞尺寸不断减小,颗粒团簇效应越来越显著,至 28 d 时,土体内绝大部分孔洞已经消失,仅残余有一些微小孔隙,结构密实性提升明显。在各龄期 5 000 倍镜下,3 d 时土颗粒表面正在形成大量棉絮状和蜂窝状硅铝酸钙凝胶物质以及六方板状氢氧化钙,这表明地聚反应正在快速进行;至 7 d 时,地聚反应持续进行,棉絮状及蜂窝状硅铝酸钙凝胶物质不断向周边大孔隙内部延伸生长并填充胶结缩小大孔隙,硅铝酸盐凝胶的团簇现象更加显著,氢氧化钙逐步消

失;养护至 28 d 时,钢渣粉高炉矿渣地聚反应已基本完成,团絮状凝胶物质增多形成大块硅铝酸盐凝胶物质、包裹土颗粒并封闭孔隙,大孔隙基本消失,仅留存一些小孔隙。这表明钢渣粉高炉矿渣确实可起到固化高含水率淤泥质土的效果。

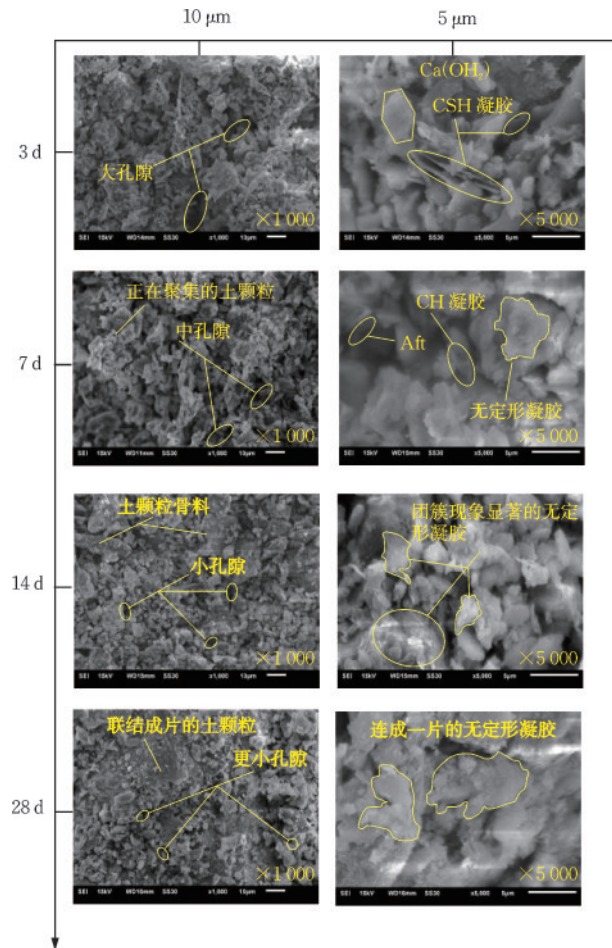


图 12 不同养护龄期地聚物固化淤泥质土微结构电镜图
 Fig.12 SEM images of geopolymer-stabilized silty soils with different curing ages

4 结 论

通过系列宏、微观试验,研究了钢渣-矿粉基地聚物中各组分最佳配比关系,探讨了初始含水率、养护龄期对地聚物固化河道疏浚土强度的影响规律,对比评价了地聚物固化疏浚土的力学性能,并通过微结构观测分析了地聚物固化河道疏浚土的固化机制。结论如下:

(1) 地聚物材料中生石灰、硅酸钠、钢渣粉、高炉矿渣粉 4 者的最佳质量掺比为 280:350:729:405。

(2) 地聚物固化高含水率河道疏浚土抗压强度随初始含水量增加呈非线性减低。有效控制疏浚土初始含水量对于提升固化疏浚土强度意义重大。

(3) 地聚物固化高含水率河道疏浚土抗压强度随养护龄期发展而增强,但增幅越来越小。添加钢渣和矿粉对于疏浚土养护早期抗压强度提升有利。

(4) 地聚物固化疏浚土性能虽弱于相同掺量水泥固化疏浚土,但仍能满足工程需要,此外,由于地聚物原材料为工业固体废弃物,因此相较于水泥基固化剂,其固化成本更低。

(5) 随养护龄期增加,大量无定形凝胶的生成以及氢氧化钙的消失提高了河道疏浚土整体性,因而改善了河道疏浚土的力学性能。

参考文献:

- [1] Develioglu I, Pulat H F. Compressibility behaviour of natural and stabilized dredged soils in different organic matter contents [J]. Construction and Building Materials, 2019, 228:116787.
- [2] 徐杨, 曹磊, 阎长虹, 等. 城市河道淤泥固化土干湿耐久性试验研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(5): 1028-1035.
 Xu Y, Cao L, Yan C H, et al. Experimental study on drying-wetting durability of solidified urban river sludge [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(5): 1028-1035. (in Chinese)
- [3] Zhang C, Xie Y P, Yang J S, et al. The novel vegetation concrete blocks for embankment protection incorporating the light aggregates recycled by lake-dredged sediments [J]. Construction and Building Materials, 2023, 381:131282.
- [4] 刘青云, 李华安, 孙信誉, 等. 钢渣型复合基材在浅层软土固化中的应用 [J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(5): 811-817.
 Liu Q Y, Li H A, Sun X Y, et al. Application of steel slag composite in in-situ solidification of shallow soft soil [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(5): 811-817. (in Chinese)
- [5] Mulligan C N, Yong R N, Gibbs B F. An evaluation of technologies for the heavy metal remediation of dredged sediments [J]. Journal of Hazardous Materials, 2001, 85(1-2): 145-163.
- [6] 路洋, 乐绍林, 柴培宏, 等. 大型卧螺离心机用于疏浚淤泥处理试验研究 [J]. 工业用水与废水, 2021, 52(5): 51-54.

- Lu Y, Le S L, Chai P H, et al. Experimental research on large horizontal screw decanter centrifuge used for dredged silt treatment[J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2021, 52(5): 51-54. (in Chinese)
- [7] 詹锐生. 高压压滤脱水固结一体化处理河道淤泥的技术应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- Zhan R S. Application of high pressure filtration dewatering and consolidation integration technology in river silt treatment[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [8] 付冠杰, 雷国辉, 范明桥, 等. 堆载吹填淤泥并同步真空预压地基固结解析分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2017, 37(6): 945-950.
- Fu G J, Lei G H, Fan M Q, et al. Analysis of consolidation due to preloading by vacuum and surcharge of hydraulically-filled mud subjected to synchronous vacuum-preloading[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2017, 37(6): 945-950. (in Chinese)
- [9] 龙开荃, 方祥位, 申春妮, 等. 复合型早强土壤固化剂固化淤泥强度特性研究[J]. *岩土力学*, 2023, 44(增1): 309-318.
- Long K Q, Fang X W, Shen C N, et al. Strength characteristics of sludge solidified by composite rapid soil stabilizer [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(Sup 1): 309-318. (in Chinese)
- [10] Jan O Q, Mir B A. Strength and micro structural behavior of lime stabilized dredged soil [C] // *Thoughts on Ground Improvement Techniques*. Egypt: GeoMEast2018, 2019: 132-152. (in Egypt)
- [11] Gupta A, Arora V K, Biswas S. Contaminated dredged soil stabilization using cement and bottom ash for use as highway subgrade fill[J]. *International Journal of Geo-Engineering*, 2017, 8(1): 1-13.
- [12] Ding J, Zhang S, Hong Z, et al. Experimental study of solidification of dredged clays with high water content by adding cement and phosphogypsum synchronously [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(9): 2817-2822.
- [13] Zentar R, Wang D X, Abriak N E, et al. Utilization of siliceous-aluminous fly ash and cement for solidification of marine sediments[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 35: 856-863.
- [14] Kong X H, Zhang Z B, Liang Y P, et al. Experimental study on solidified dredged sediment with MgO and industrial waste residue [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 366: 130105.
- [15] Li J S, Zhou Y F, Chen X, et al. Engineering and microstructure properties of contaminated marine sediments solidified by high content of incinerated sewage sludge ash[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2021, 13(3): 643-652.
- [16] 周恒宇, 王修山, 胡星星, 等. 地聚合物固化淤泥强度增长影响因素及机制分析[J]. *岩土力学*, 2021, 42(8): 2089-2098.
- Zhou H Y, Wang X S, Hu X X, et al. Influencing factors and mechanism analysis of strength development of geopolymer stabilized sludge [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(8): 2089-2098. (in Chinese)
- [17] Wang D, Xiao J, Xiao H, et al. Experimental study of carbonated-solidified sludge in east lake [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(5): 1805-1812.
- [18] Li W T, Yi Y L, Puppala A J. Comparing carbide sludge-ground granulated blastfurnace slag and ordinary Portland cement: Different findings from binder paste and stabilized clay slurry[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 321: 126382.
- [19] Yoobanpot N, Jamsawang P, Poorahong H, et al. Multiscale laboratory investigation of the mechanical and microstructural properties of dredged sediments stabilized with cement and fly ash [J]. *Engineering Geology*, 2020, 267: 1105491.
- [20] 张小芳, 陈瑞敏, 简文彬. 水泥-矿渣-粉煤灰固化淤泥的水分转化规律及其固化机理研究[J]. *工程地质学报*, 2020, 31(1): 102-112.
- Zhang X F, Chen R M, Jian W B. Study on water conversion law and solidification mechanism of cement-slag-fly ash solidified silt [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 31(1): 102-112. (in Chinese)
- [21] 流态固化土填筑应用技术导则(试行)[S]. 南京: 南京市城乡建设委员会, 2023.
- [22] 预拌流态固化土(PFSS)填筑工程技术标准: T/CECS 1037—2022[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.

(本文编辑: 赵霞)