

工业废渣复合固化淤泥路用性能研究

安浩东, 郭思瑶*, 王 坤, 吕换军, 吴玉林, 岳志豪

(青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525)

摘要:为解决淤泥力学性能差无法直接用于路基填筑以及大量工业废渣无法资源化利用的问题,基于以废治废理念,选取粉煤灰、微硅粉和电石渣 3 种工业废渣为固化原材料,对青岛胶州湾地区近海沉积淤泥进行固化。以掺水泥固化的淤泥为对照组,通过无侧限抗压试验、直剪试验、干湿循环试验和冻融循环试验一系列试验研究,评估 S-FSC(工业废渣固化淤泥)的路用性能;采用 X 射线衍射和扫描电镜试验方法对 S-FSC 固化淤泥进行微观分析,揭示其固化机理。试验结果表明,粉煤灰、微硅粉和电石渣 3 种废渣之间的火山灰反应生成的水化硅酸钙、水化铝酸钙等产物,会将土颗粒紧密联结起来,填充土体孔隙,使固化淤泥的力学性能和耐久性得到显著提高。

关键词:淤泥;工业废渣;固化机理;力学性能;耐久性

中图分类号: TU447 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2024)06-0034-09

Study on the road performance of industrial waste composite solidified silt

AN Haodong, GUO Siyao*, WANG Kun, LÜ Huanjun, WU Yulin, YUE Zhihao

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: In order to solve the problems that poor mechanical properties of silt cannot be directly used for roadbed filling and a large amount of industrial waste cannot be utilized as resources, based on the concept of waste to waste, this study selects three kinds of industrial waste as raw materials, namely, fly ash, microsilica fume and calcium carbide slag, to solidify the silt deposited in Qingdao's Jiaozhou Bay area. The cement-mixed solidified silt is used as a control group. A series of experimental studies are conducted to evaluate the road performance of S-FSC (industrial waste solidified silt) through the unconfined compressive strength test, direct shear test, wet and dry cycle test and freeze-thaw cycle test. The X-ray diffraction and scanning electron microscope test methods are used to conduct microanalysis of the S-FSC solidified silt and to reveal its solidified mechanism. The test results indicate that products such as hydrated calcium silicate and hydrated calcium aluminate, generated by the volcanic ash reaction between fly ash, microsilica fume and calcium carbide slag, can tightly associate the soil particles and fill the pores of the soil at the same time, which leads to a significant improvement in the mechanical properties and the durability of the

收稿日期: 2023-09-08

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2020YQ43)

作者简介: 安浩东(1998—), 男, 山西晋中人。硕士, 研究方向为岩土材料。E-mail: 2278721391@qq.com。

* 通信作者: 郭思瑶(1983—), 女, 山东青岛人。博士, 教授, 主要从事土木工程材料方面的研究。E-mail: guosy@qtech.edu.cn。

solidified silt.

Key words: silt; industrial waste; solidified mechanism; mechanical properties; durability

淤泥基本物理和力学性能很差^[1-2],且运输困难,不仅占用城市空间,也带来了一定的环境污染。传统固化剂水泥和石灰^[3-4]用于淤泥固化,会产生大量温室气体,污染环境;新型固化材料,如离子类、高分子类以及生物酶类固化剂^[5-7],价格昂贵且使用范围受限。随着“碳达峰、碳中和”这一概念被提出,工业废渣资源化成为近几年的研究热点,据统计,我国每年新增工业废渣堆放量超过了 30×10^9 t,累计堆放量高达 600×10^9 t,综合利用率仅为 55%^[8],因此可以考虑采用工业废渣固化的淤泥进行路基的填筑。

当前,国内外众多研究者在工业废渣固化淤泥方面取得了一定的成果。唐孝林等^[9]利用高炉矿渣、粉煤灰、硅灰和电石渣 4 种工业废渣制备地质聚合物胶凝材料,发现通过硫酸盐激发,形成了大量的钙矾石,填充了土颗粒间的孔隙,固化淤泥抗压强度提高。徐日庆等^[10]以粉煤灰、磷石膏和电石渣为原材料,通过混料试验得到最佳质量配比是粉煤灰:磷石膏:电石渣为 21.6:26.8:51.6,发现该配比固化的淤泥在 7 d 时无侧限抗压强度可满足大型机械上机施工要求。杨振甲等^[11]发现矿渣-粉煤灰地质聚合物水化硅酸钙等填充了固化淤泥土体孔隙,增强了土体强度和耐久性。朱坤垆^[12]选择矿渣、粉煤灰和电石渣作为淤泥质土的固化材料,并对固化淤泥进行了无侧限抗压强度和耐久性试验,发现相比石灰、粉煤灰固化淤泥,该固化淤泥有着较高的强度和较优的耐久性能,是用于路基填筑的较优选择。PHETCHUAY 等^[13]研究了电石渣和粉煤灰固化淤泥作为路基材料的可行性,研究发现 Na_2SiO_3 与 H_2O 的质量比为 0.6,粉煤灰掺量为 15%,电石渣掺量为 2%时,固化淤泥具有更高的强度,符合泰国农村道路部规定的路基材料强度要求。

基于前人已有的研究工作,本文对粉煤灰、微硅粉和电石渣 3 种工业废渣固化的淤泥进行无侧限抗压强度试验、直剪试验、干湿循环试验以及冻融循环试验,与掺水泥(15%和 20%)的固化淤泥进行对比,以验证工业废渣复合固化淤泥的路用性能。同时,对固化淤泥进行 X 射线衍射(XRD)和扫描电镜(SEM)试验,分析工业废渣对固化淤泥力学和耐久性能的影响。

1 试验设计

1.1 试验材料

1.1.1 淤泥

本试验选取的青岛胶州湾地区近海沉积淤泥基本参数见表 1,淤泥颗粒级配曲线如图 1 所示。

表 1 淤泥基本物理性质

含水率/%	天然密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	比重	液限/%	塑限/%	孔隙比
57	1.78	2.71	46	22	1.36

1.1.2 固化材料

本试验选取的粉煤灰、微硅粉和电石渣 3 种固化材料比表面积分别为 400、24 000、692.41 m^2/kg ,对照组所用水泥为 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,固化材料的化学组成及质量分数如表 2 所示。

1.2 试样制备

实际工程中,为了达到更好的路用性能,通常会将淤泥脱水处理后再固化^[12]。本次试验将取回的淤泥 60 $^{\circ}\text{C}$ 烘干碾碎后,选取 35%的含水率配制试验原料土。

根据表 3 的配比方案称量试验材料,与

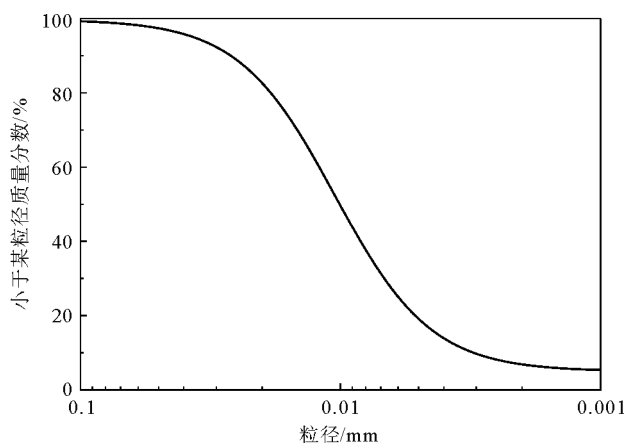


图 1 淤泥颗粒级配曲线

水混合后用净浆搅拌机搅拌 5 min,采用静压法制备圆柱体试样,每种配合比均制备 3 个平行试样以降低试验误差。在常温环境下养护 24 h 后拆除模具取出试样,用保鲜膜将试样包裹密封;将试样放入温度为 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、湿度为 $(95 \pm 1)\%$ 的标准养护室中进行相应龄期的养护。其中 S-FSC 为掺量为 20% 的工业废渣固化淤泥, S-C15 和 S-C20 分别为水泥掺量为 15% 和 20% 的水泥固化淤泥。试验所用含水率以及掺量均为占烘干淤泥的质量分数。

表 2 固化材料的化学组成及质量分数

原材料	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	%
粉煤灰	58.73	26.47	4.15	1.68	0.21	4.87	
微硅粉	55.62	4.54	29.22	1.88	2.46	3.68	
电石渣	3.30	1.54	72.22	0.00	0.45	0.50	
水泥	18.11	7.13	56.42	5.66	4.21	6.82	

表 3 固化淤泥试样配比方案

试验编号	质量比
S-FSC	$m(\text{淤泥}) : m(\text{粉煤灰}) : m(\text{微硅粉}) : m(\text{电石渣}) : m(\text{水}) = 100 : 1.8 : 12 : 6.2 : 35$
S-C15	$m(\text{淤泥}) : m(\text{水泥}) : m(\text{水}) = 100 : 15 : 35$
S-C20	$m(\text{淤泥}) : m(\text{水泥}) : m(\text{水}) = 100 : 20 : 35$

注: m 为质量。

1.3 试验方法

1.3.1 力学性能试验

无侧限抗压强度试验:制备 $\phi = 50 \text{ mm}$ 、 $h = 100 \text{ mm}$ 的试样,根据《公路土工试验规程》(JTJ 3430—2020)^[14],采用 SHT4305 型微机控制电子万能试验机对养护至相应龄期(7、14、28、60 和 90 d)的试样进行试验,加载速率为 0.1 kN/s。对养护龄期为 7 d 的固化淤泥进行应力应变特性分析,通过仪器导出的荷载和变形数据,计算对应的应力和应变。

应力计算:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

式中: σ 为应力,MPa; F 为受力大小,N; A 为受力面积,mm²。

应变计算:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

式中: ϵ 为应变,%; ΔL 为长度变化量,mm; L 为原始长度,mm。

除了分析固化淤泥应力、应变特性外,还需考虑固化淤泥长期的固化效果,分析固化淤泥无侧限抗压强度与不同养护龄期的关系。

直剪试验:根据《公路土工试验规程》(JTJ 3430—2020)^[14],制备 $\phi = 61.8 \text{ mm}$ 、 $h = 20 \text{ mm}$ 的试样,对养护至相应龄期(1、3、5 和 7 d)的试样进行直剪试验,4 级垂直荷载分别为 100、200、300 和 400 kPa,以 6 r/min 转速匀速加荷,使试样在 3~5 min 内剪坏。根据式(3)计算固化淤泥的黏聚力和内摩擦角。

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c \quad (3)$$

式中: τ 为固化淤泥的抗剪强度,kPa; σ 为垂直荷载,kPa; φ 为固化淤泥内摩擦角,(°); c 为固化淤泥的黏聚力,kPa。

1.3.2 耐久性能试验

干湿循环试验参考美国试验与材料学会(ASTM)D4843—1988 的试验方法^[15]。每组试样制备 7 个

平行试样(1个参照样、3个试验样、3个控制样),试样尺寸为 $\phi = 50 \text{ mm}$, $h = 100 \text{ mm}$ 。待试样养护至 28 d 后,将装有试验样和控制样的烧杯分别在 $(60 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$ 的烘箱内和标准养护室(温度为 $(20 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$,湿度大于 95%)中放置 24 h,取出后在室温状态下静置 1 h,加满去离子水,在 $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ 的室内环境中放置 23 h,试样取出后,测定烧杯中残余固体部分的质量,即完成 1 次干湿循环;重复上述过程,直至 12 次干湿循环结束。干湿循环作用下试样的平均累积相对质量损失率 S_n 计算如式(4)所示, S_n 越小,试样耐久性越优。

$$\bar{S}_n = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\bar{W}_{i,t}}{\bar{M}_t} - \frac{\bar{W}_{i,c}}{\bar{M}_c} \right) \quad (4)$$

式中: $\bar{W}_{i,t}$ 为试验样第 i 次循环的平均干质量损失, g; $\bar{W}_{i,c}$ 为控制样第 i 次循环的平均干质量损失, g; \bar{M}_t 为试验样的平均干质量, g; \bar{M}_c 为控制样的平均干质量, g。

冻融循环试验参考美国试验与材料学会(ASTM)D560/D560M-15 的试验方法^[16],制备 $\phi = 50 \text{ mm}$ 、 $h = 100 \text{ mm}$ 的圆柱体试样,待试样养护至 28 d 龄期后,对固化淤泥进行冻融循环试验。试样在低温养护箱($-20 \text{ }^\circ\text{C}$)中放置 24 h 后,再放入温度为 $(20 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ 、湿度大于 95%的养护室中养护 24 h,此过程为 1 次冻融循环;对试样分别进行 0、3、5、7、9 和 12 次冻融循环试验。冻融循环试验中固化淤泥的质量损失情况采用质量损失率 W_k 进行评价。

$$W_k = \frac{M_k - M_0}{M_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中: M_k 为试样第 k 次冻融循环后的质量, g; M_0 为试样的初始质量, g。

对不同次数冻融循环作用下的固化淤泥进行无侧限抗压强度试验,对测得的试验结果进行计算得到耐冻系数。

$$D_n = \frac{R_n}{R_0} \times 100\% \quad (6)$$

式中: D_n 为耐冻系数,%; R_n 为 n 次冻融循环后试样无侧限抗压强度, MPa; R_0 为未经冻融循环试验的无侧限抗压强度, MPa。

1.3.3 微观分析

抗压强度试验完成后取中心具有代表性的破碎试块,在 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱中烘干 12 h 后用 XRD 和 SEM 分析矿物组成和微观形貌,XRD 扫描角度 2θ 为 $5 \sim 70^\circ$,步长为 $5 \text{ }^\circ/\text{min}$,在测试前将试块粉碎研磨成粉状,通过 0.01 mm 孔径的筛网。SEM 放大倍数为 10 000 倍,取规格为 $20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的碎块。

2 结果与讨论

2.1 力学性能试验

2.1.1 无侧限抗压强度试验结果分析

由图 2 应力-应变(σ - ϵ)曲线可知,3 种固化淤泥 7 d 的抗压强度均达到了《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)^[17]中规定的极重、特重高速公路的强度要求($\geq 1.1 \text{ MPa}$),可作为路基基层填筑用土。3 种固化淤泥应力-应变曲线均包含初始阶段、线性阶段、塑性阶段和破坏阶段 4 个阶段。初始阶段,应力的增长和应变的增加呈正相关,在压力的作用下,固化淤泥内部土颗粒被挤压,土体密实,试样内部结构重新调整;线性阶段,固化淤泥应力增长最快;塑性阶段时,固化淤泥应力增速缓慢降低,直到应力-

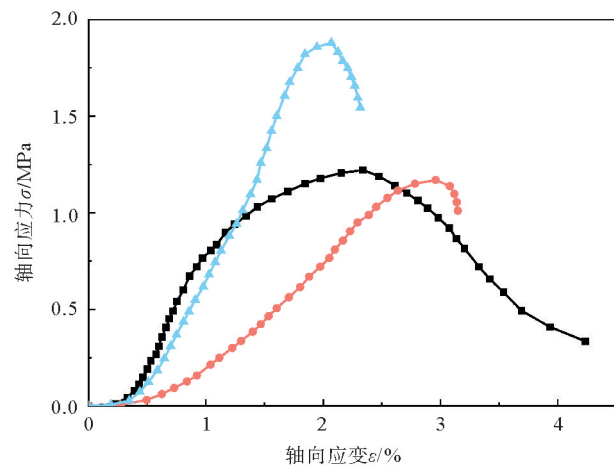


图 2 固化淤泥应力-应变曲线
—■— S-FSC; —●— S-C15; —▲— S-C20

应变曲线出现峰值强度,此时,S-C20的强度最高,为1.88 MPa,S-FSC次之,为1.22 MPa,S-C15最低,为1.17 MPa。峰值强度过后,应力随应变的增加而逐渐降低,从峰值强度后的下降趋势可以看出,2种水泥固化淤泥应力-应变曲线急剧下降,而S-FSC下降较为缓慢。水泥掺量的增加,提高了固化淤泥的强度,但是相比于工业废渣固化淤泥,还是表现出了明显的脆性破坏方式,S-FSC固化淤泥因为微硅粉的添加,可有效降低试样的裂缝长度、裂缝开口位移等断裂参数,增强了固化淤泥的韧性,峰值前刚度更小,峰值荷载下挠度更大,有效地抵抗了裂缝的扩展^[18]。在实际中,工业废渣复合固化淤泥具有的良好塑性,更适合工程应用。

图3为3种固化淤泥无侧限抗压强度随龄期变化曲线,可以看出,3种固化淤泥早期强度上升较快,后期强度增长缓慢,反映到图中为曲线呈上凸状。水泥固化淤泥14 d内强度的增长值达到了总强度的80%左右,而到了后期,强度增长不明显,考虑路用性能的长期性,S-FSC固化淤泥表现出了更明显的强度优势和强度增长潜力,强度的增长与3种工业废渣固化淤泥内部的火山灰反应有关。

2.1.2 直剪试验结果分析

图4和图5为固化淤泥直剪试验结果,由图可知,S-FSC固化淤泥在大部分龄期黏聚力 c 和内摩擦角 φ 都比S-C15固化淤泥有较大的优势。1、3 d时,黏聚力优于S-C20固化淤泥,在其他龄期,两种固化淤泥的黏聚力和内摩擦角相差不大,综合考虑1~7 d的固化效果,S-FSC固化淤泥优于水泥固化淤泥。这是因为S-FSC固化淤泥在固化前期,粉煤灰、微硅粉和电石渣由于比表面积的差异,会与淤泥形成良好的颗粒级配^[19],提高土体密实度,同时由于微硅粉粒径细小,比表面积大,会吸附大量的水分,使得固化淤泥流动性降低,黏度提高^[20];到了后期,工业废渣和淤泥的协同作用,会发生火山灰反应以及少量的碳化反应生成水化硅酸钙、水化铝酸钙、碳酸钙等胶凝物质,而且由于固化淤泥中的离子交换作用,使得土颗粒表面低价离子如 Na^+ 、 K^+ 等被固化材料中 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 等高价阳离子所替换,提高了土颗粒间的静电作用,增强了土颗粒间的胶结作用以及土颗粒间的咬合作用^[21],所以工业废渣固化淤泥始终保持着较优的黏聚力和内摩擦角。

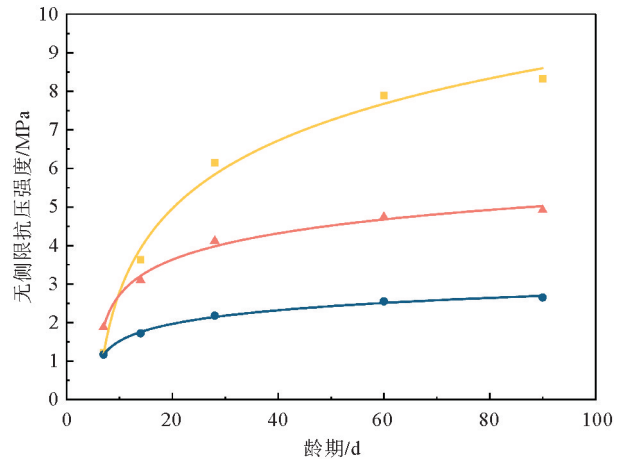


图3 固化淤泥无侧限抗压强度随龄期变化的曲线

■ S-FSC; ● S-C15; ▲ S-C20

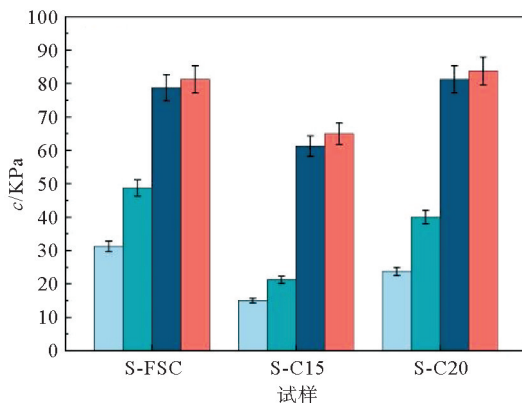


图4 固化淤泥黏聚力随养护龄期的变化

■ 1 d; ■ 3 d; ■ 5 d; ■ 7 d

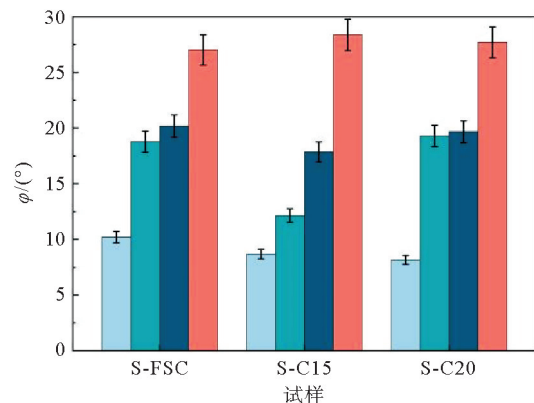


图5 固化淤泥内摩擦角随养护龄期的变化

■ 1 d; ■ 3 d; ■ 5 d; ■ 7 d

2.2 耐久性能试验

2.2.1 干湿循环试验结果分析

固化淤泥平均累积相对质量损失率 \bar{S}_n 随干湿循环次数 n 的变化曲线如图 6 所示,可以看出,不论是掺 15% 还是掺 20%,水泥固化淤泥的 \bar{S}_n 都明显大于 S-FSC 固化淤泥,在干湿循环初期,S-FSC 固化淤泥 \bar{S}_n 增长较快,3 次循环后变化趋于平缓, \bar{S}_n 在 12 次循环结束后仅为 2.64%,较 S-C20 固化淤泥的 \bar{S}_n 低 1.96%,且远低于 30%^[15],微硅粉的添加增加了最佳含水率并降低了最大干单位质量,导致膨胀压力和膨胀潜力降低^[22]。

12 次干湿循环结束后,测定的 3 种固化淤泥试验样和控制样以及参照样的无侧限抗压强度结果如图 7 所示,可以看出,S-C15 固化淤泥试验样和控制样的无侧限抗压强度均小于参照样的强度值,分别降低了 55% 和 24.8%,试验样强度值最低,仅为 0.98 MPa,已经不满足高速公路基层填土强度要求;S-C20 固化淤泥试验样强度值略高于参照样,提高了 3.2%,控制样强度值远低于参照样,降低了约 20%;而 S-FSC 固化淤泥,与参照样相比,试验样强度值提高了 5.4%,控制样强度值仅降低了 4.1%,S-FSC 固化淤泥干湿循环作用下强度变化情况优于水泥固化淤泥;S-C20 固化淤泥和 S-FSC 固化淤泥试验样在干燥过程中,温度的升高加快了水泥水化反应和工业废渣火山灰反应的速率,该过程对强度的提升作用大于干湿循环对强度的抑制作用,从而使得试验样的强度有所提高,S-C15 固化淤泥试验样强度值没有提高是因为掺量为 15% 的水泥固化效果有限;S-FSC 固化淤泥中温度的升高加快了电石渣的溶解,同时使得粉煤灰、微硅粉和电石渣的火山灰反应增强^[23],火山灰原料可在电石渣与试样中的水反应创造的碱性环境中剧烈反应生成火山灰产物,火山灰产物的生成对强度的提高有积极作用。

2.2.2 冻融循环试验结果分析

图 8 为固化淤泥质量损失率 W_k 与冻融循环次数 n 的关系,可以看出,随着冻融循环次数的增加,S-FSC、S-C15 和 S-C20 3 种固化淤泥的 W_k 逐渐增大。在 0~5 次冻融循环时,3 种固化淤泥的 W_k 相差不大,增长速率接近,5 次循环之后,差距拉开,S-FSC 固化淤泥的 W_k 逐渐平缓,S-C15 固化淤泥的 W_k 明显增大,S-C20 固化淤泥的 W_k 在 7 次循环以后逐渐变大,12 次循环之后,S-FSC、S-C15 和 S-C20 3 种固化淤泥的 W_k 分别为 1.18%、3.75%、2.55%,S-FSC 固化淤泥表现出了更优异的抗冻融特性。

固化淤泥耐冻系数 D_n 随冻融循环次数 n 的变化曲线如图 9 所示,由图可知,3 种固化淤泥受冻融循环的影响都较大,S-FSC、S-C15 和 S-C20 3 种固化淤泥耐冻系数随着冻融循环次数的增加都呈逐渐下降的趋势,12 次冻融循环后,S-FSC、S-C15 和 S-C20 3 种固化淤泥的耐冻系数分别为 71.5%、45.7% 和

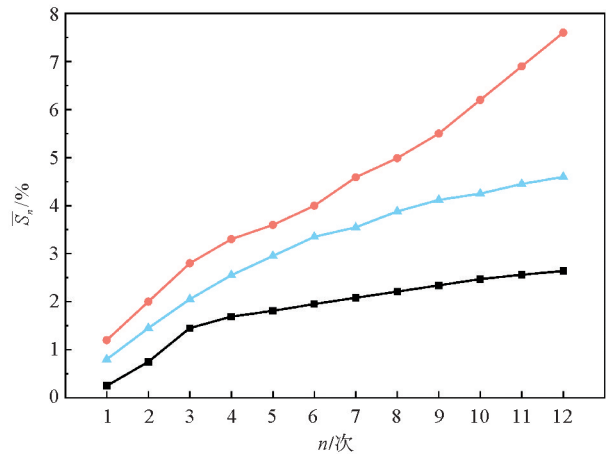


图 6 固化淤泥平均累积相对质量损失率随干湿循环次数变化的曲线
— S-FSC; — S-C15; — S-C20

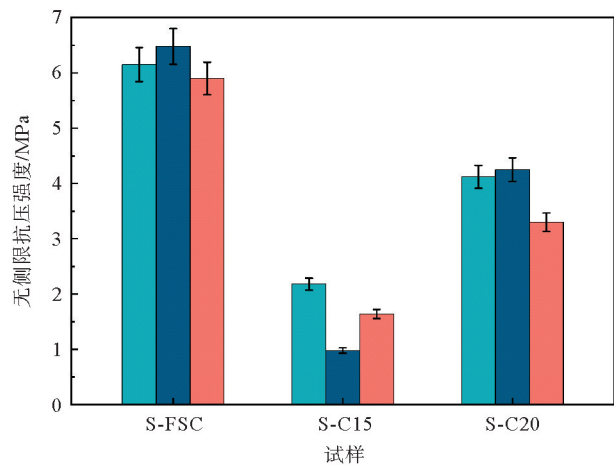


图 7 干湿循环试样的无侧限抗压强度
■ 参照样; ■ 试验样; ■ 控制样

58.3%, S-FSC 固化淤泥表现更优, 微硅粉的添加削弱了固化淤泥早期冻融循环的膨胀潜力, 使得土体结构受到的破坏较小。

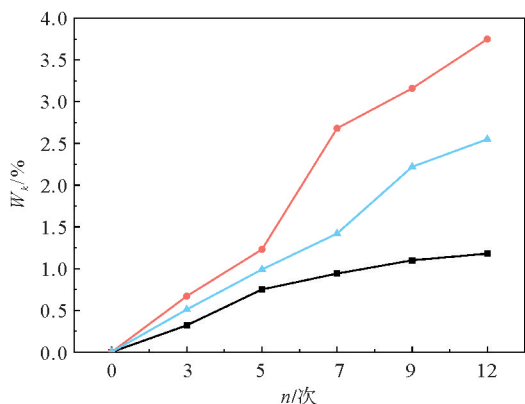


图8 固化淤泥质量损失率随冻融循环次数变化的曲线

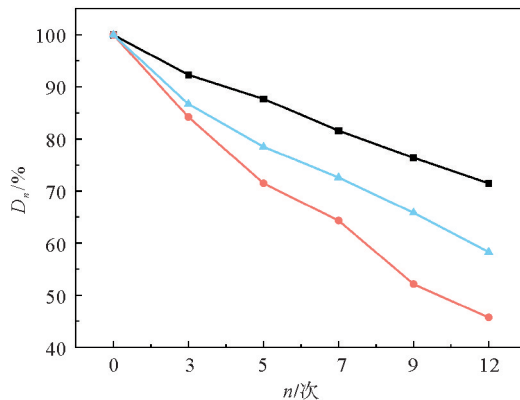


图9 固化淤泥耐冻系数随冻融循环次数变化的曲线

2.3 微观分析

2.3.1 矿物组成

图10为未固化淤泥(S-0)和工业废渣固化淤泥的X射线衍射图谱,可以看出,添加工业废渣复合固化剂后,S-FSC固化淤泥的X射线衍射图谱中产生了一些特征峰,如水化硅酸钙(C-S-H)、氢氧化钙(Ca(OH)₂)和水化铝酸钙(C-A-H),同时某些原有的特征峰得到加强,如方解石(CaCO₃),随着龄期的增长,4种衍射峰的强度明显提高,电石渣含有大量的CaO,粉煤灰和微硅粉可在电石渣中的CaO和H₂O反应创造的碱性条件下发生火山灰反应,生成大量的火山灰产物——水化硅酸钙和水化铝酸钙,在满足火山灰反应所需的碱性条件后,淤泥中多余的Ca(OH)₂会吸收空气中的CO₂,发生碳化反应,生成不溶于水的CaCO₃,C-S-H、Ca(OH)₂、C-A-H、CaCO₃4种产物的逐渐增多提高了固化淤泥的力学和耐久性能。

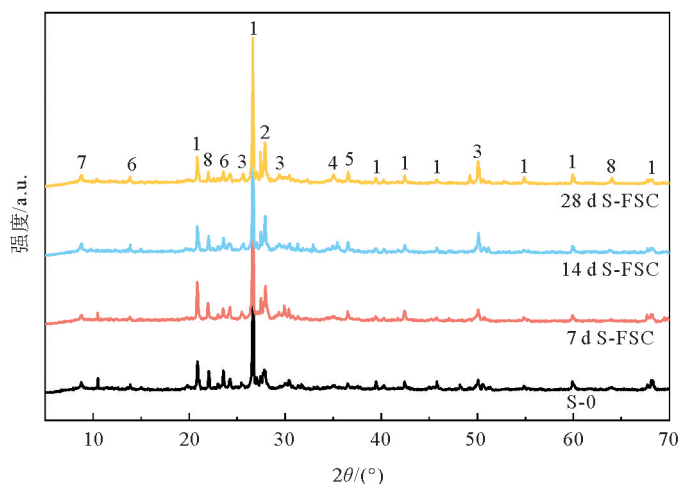


图10 固化淤泥 XRD 图谱

1—石英; 2—方解石; 3—水化硅酸钙; 4—氢氧化钙; 5—水化铝酸钙; 6—高岭石; 7—白云母; 8—伊利石

2.3.2 微观形貌

图11为未固化淤泥(S-0)和不同养护龄期下 S-FSC 固化淤泥放大 6000 倍后的 SEM 微观结构图。

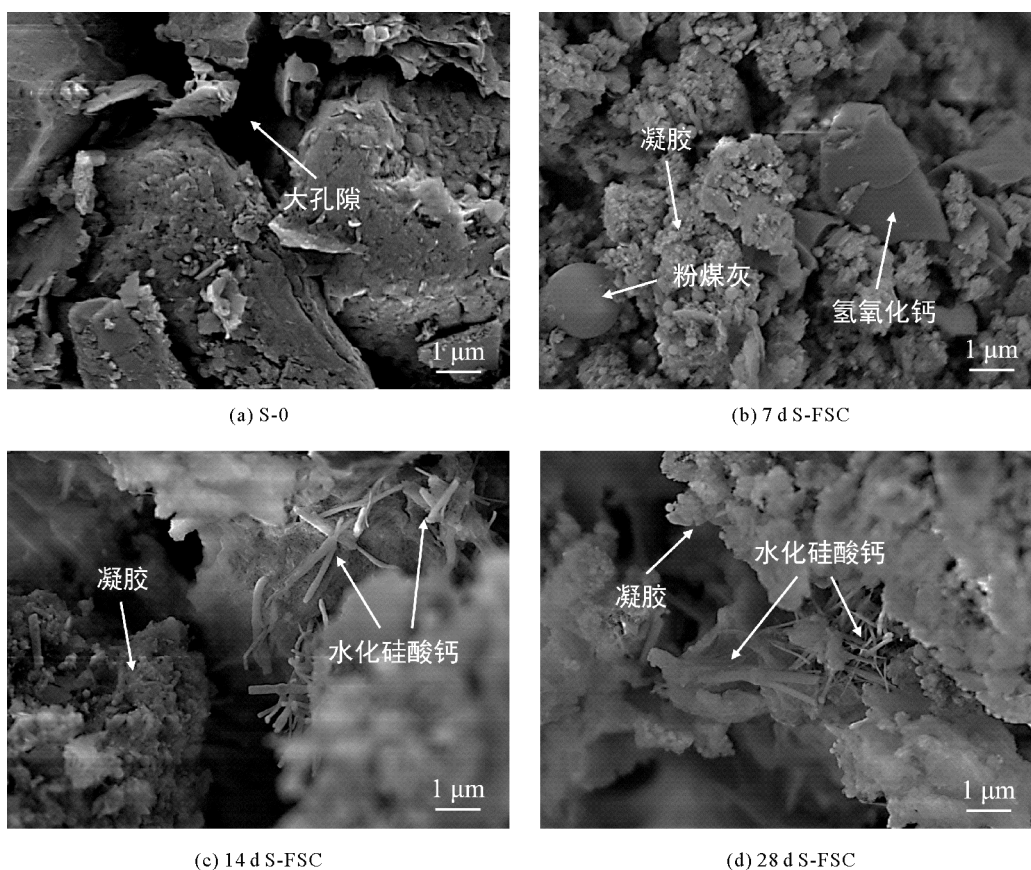


图 11 S-FSC 固化淤泥不同养护龄期下的 SEM

从图 11(a)可以看出,未加固淤泥内部有明显的大孔隙,土体结构分散,缺少联系。从图 11(b)容易看到,在养护龄期为 7 d 时,S-FSC 固化淤泥土颗粒在离子交换吸附和火山灰产物的胶凝作用下发生土颗粒团聚,孔隙被添加的 3 种固化材料紧密填充,3 种固化材料与淤泥形成的良好颗粒级配可有效提高固化淤泥的密实度。从图 11(c)可以看出,在养护龄期为 14 d 时,固化淤泥除了有土颗粒团聚现象外,可明显看到针状胶凝物附着在土颗粒表面,水化产物明显增多。图 11(d)中,水化产物交错絮凝成团,穿插在各个孔隙当中,土颗粒团聚更紧密,土体的孔隙进一步减少,力学性能及耐久性能显著提高。

前期 S-FSC 固化淤泥中工业废渣火山灰反应和离子反应较慢且不是很明显,但是此时 3 种固化材料由于比表面积差异,可与淤泥形成良好的颗粒级配,从而填充土体孔隙,增加土体密实度,可补充火山灰反应的不足,提高早期强度;到了中后期,火山灰反应逐步进行且持续时间较长,有很大的强度发展潜力,填充在孔隙中的火山灰原料持续反应,在孔隙中生成水化硅酸钙、水化铝酸钙、碳酸钙和氢氧化钙等产物,同时,淤泥中含有的火山灰材料(SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3)也会在碱性环境下发生反应生成胶凝物质^[24],两种作用协同会形成致密的微观结构,有效填充土体孔隙,增强土颗粒间的联结力,这是固化淤泥强度提升的主要来源,也保障了 S-FSC 固化淤泥良好的稳定性和耐久性。

3 结论

本文对粉煤灰、微硅粉和电石渣 3 种工业废渣复合固化的淤泥与水泥固化淤泥对比,进行了力学和耐久性的路用性能验证,并分析了其固化机理,主要结论如下:

1) S-FSC 固化淤泥较水泥固化淤泥表现出了更大的强度优势和强度发展潜力,且未表现出明显的脆性破坏。S-FSC 固化淤泥在任何龄期黏聚力和内摩擦角都比 S-C15 固化淤泥有较大的优势;在 1、3 d 时,黏聚力优于 S-C20 固化淤泥,在其他龄期,两种固化淤泥的黏聚力和内摩擦角相差不大。

2) 干湿循环试验后,S-FSC 固化淤泥平均累积相对质量损失率仅为 2.64%,与参照样相比,试验样强

度值提高了 5.4%，控制样强度值仅降低了 4.1%。冻融循环试验后，S-FSC 固化淤泥的质量损失率和强度衰减程度均小于水泥固化淤泥，质量损失率仅为 1.18%，耐冻系数为 71.5%。

3) 随着龄期的增长，S-FSC 固化淤泥火山灰反应生成的水化硅酸钙(C-S-H)、水化铝酸钙(C-A-H)等胶凝产物会增强土体联结力，填充土体孔隙，形成致密的微观结构，使得工业废渣复合固化淤泥在力学及耐久性方面较水泥固化淤泥具有显著的优势。

参考文献(References):

- [1] 丁慧,孙秀丽,刘文化,等. 固化疏浚淤泥作路基材料工程特性试验研究[J]. 土木建筑与环境工程,2017,39(2):11-18.
DING Hui,SUN Xiuli,LIU Wenhua,et al. Experimental analysis of engineering properties of solidified sludge as roadbed filling material[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering,2017,39(2):11-18.
- [2] 项伟,唐辉明. 岩土工程勘察[M]. 北京:化学工业出版社,2012:176-178.
XIANG Wei,TANG Huiming. Geotechnical engineering investigation[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2012:176-178.
- [3] POONI J,ROBERT D,GIUSTOZZI F,et al. Performance evaluation of calcium sulfoaluminate as an alternative stabilizer for treatment of weaker subgrades[J]. Transportation Geotechnics,2021,27:100462.
- [4] NGUYEN T T M,RABBANIFAR S,BRAKE N A,et al. Stabilization of silty clayey dredged material[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2018,30(9):04018199.
- [5] MIRZABABAEI M,ARULRAJAH A,HORPIBULSUK S,et al. Stabilization of soft clay using short fibers and poly vinyl alcohol[J]. Geotextiles and Geomembranes,2018,46(5):646-655.
- [6] AL-DAKHEELI H,AREFIN S,BULUT R,et al. Effectiveness of ionic stabilization in the mitigation of soil volume change behavior[J]. Transportation Geotechnics,2021,29:100573.
- [7] WANG X R,LI C,HE J. A highly effective strain screened from soil and applied in cementing fine sand based on micp-bonding technology[J]. Journal of Biotechnology,2022,350:55-66.
- [8] 中国发改环资[2021]381号,关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见[EB/OL]. (2021-03-18)[2023-09-01]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk10/202103/t20210326_826255.html.
China Development and Reform Environmental Capital [2021] No. 381,Guidance on the comprehensive utilization of bulk solid waste in the 14th Five-Year Plan[EB/OL]. (2021-03-18)[2023-09-01]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk10/202103/t20210326_826255.html.
- [9] 唐孝林,蒲隆进,王子帅,等. 单组分地聚合物固化淤泥强度及微观结构研究[J]. 人民长江,2022,53(10):169-174.
TANG Xiaolin,PU Longjin,WANG Zishuai,et al. Research on strength and micro-structure of single-component geopolymer solidified sludge[J]. Yangtze River,2022,53(10):169-174.
- [10] 徐日庆,文嘉毅,董梅. 工业废料固化浅层淤泥质土研究[J]. 长江科学院院报,2020,37(5):85-91.
XU Riqing,WEN Jiayi,DONG Mei. Solidifying shallow sludge soil using industrial waste[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2020,37(5):85-91.
- [11] 杨振甲,何猛,吴杨,等. 矿渣-粉煤灰地聚物固化淤泥力学性能和路用性能研究[J]. 硅酸盐通报,2022,41(2):693-703.
YANG Zhenjia,HE Meng,WU Yang,et al. Mechanical properties and road performance of slag-fly ash geopolymer stabilized sludge[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2022,41(2):693-703.
- [12] 朱坤垅. 淤泥质土固化及路用性能试验研究[D]. 杭州:浙江大学,2021:37.
ZHU Kunlong. Study on solidification of mucky soil and road performance[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2021:37.
- [13] PHETCHUAY C,HORPIBULSUK S,SUKSIRIPATTANAPONG C,et al. Calcium carbide residue: Alkaline activator for clay-fly ash geopolymer[J]. Construction and Building Materials,2014,69:285-294.
- [14] JTG 3430—2020,公路土工试验规程[S].
JTG 3430—2020, Test methods of soils for highway engineering[S].
- [15] ASTM D4843-1988,Standard test method for wetting and drying test of solid wastes[S]. West Conshohocken,PA:ASTM International,2016.
- [16] ASTM D560/D560M-15,Standard test methods for freezing and thawing compacted soil-cement mixtures[S]. West Conshohocken,PA:ASTM International,2016.
- [17] JTG/T F20—2015,公路路面基层施工技术细则[S].
JTG/T F20—2015, Technical guidelines for construction of highway road base[S].
- [18] SUKONTASUKKUL P,CHINDAPRASIRT P,PONGSOPHA P,et al. Effect of fly ash/silica fume ratio and curing condition on mechanical properties of fiber-reinforced geopolymer[J]. Journal of Sustainable Cement-Based Materials,2020,9(4):1-15.