

大宗固废材料固化太湖淤泥的路用性能试验研究

杨 炜¹ 赵冬冬² 陈 新² 夏 涛³ 何继宏² 张 勇³

¹ 无锡市城市重点建设项目管理中心, 江苏 无锡 214000

² 华昕设计集团有限公司, 江苏 无锡 214000

³ 纳思同(江苏)高科技发展有限公司, 江苏 无锡 214000

[摘要]针对太湖淤泥资源化利用难题, 本研究提出以 CFB 脱硫灰、钢渣、陶瓷粉和复合激发剂制备 GFS 固化剂。试验表明: 在 10% 掺量下, GFS 固化土的 28 d 无侧限抗压强度、水稳定系数及劈裂强度分别较同掺量水泥固化土提高 15.8%、11.2% 和 28%。该技术以工业固废资源化利用为核心, 兼具高强度、高水稳性及低碳特性, 为淤泥路基加固提供经济环保的解决方案, 契合绿色基础设施建设需求。

[关键词]淤泥; 固废; 固化剂; 路用性能

DOI: 10.33142/ucp.v2i4.17324

中图分类号: U414

文献标识码: A

Experimental Study on Road Performance of Solidified the Taihu Lake sludge with Bulk Solid Waste Materials

YANG Wei¹, ZHAO Dongdong², CHEN Xin², XIA Tao³, HE Jihong², ZHANG Yong³

1. Wuxi Urban Key Construction Project Management Center, Wuxi, Jiangsu, 214000, China

2. Huaxin Design Group Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu, 214000, China

3. Leistung (Jiangsu) High-tech Development Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu, 214000, China

Abstract: In order to solve the problem of resource utilization of the Taihu Lake sludge, this study proposes to prepare GFS curing agent with CFB desulfurization ash, steel slag, ceramic powder and composite activator. The experiment showed that at a dosage of 10%, the 28 day unconfined compressive strength, water stability coefficient, and splitting strength of GFS stabilized soil increased by 15.8%, 11.2%, and 28% respectively compared to cement stabilized soil with the same dosage. This technology focuses on the resource utilization of industrial solid waste, and combines high strength, high water stability, and low-carbon characteristics to provide an economical and environmentally friendly solution for the reinforcement of silt roadbeds, which meets the needs of green infrastructure construction.

Keywords: sludge; solid waste; stabilizer; road performance

太湖作为我国长江三角洲地区重要的淡水湖泊, 在长期水文循环与人类活动共同作用下, 流域内沉积形成了巨量淤泥资源^[1]。据测算, 太湖底泥年淤积量达 800~1200 万 m³, 现有淤泥堆积面积超过 300 万 m²。如何实现此类高含水率淤泥的高效资源化利用, 已成为长三角地区生态环境治理与固废资源循环的重大课题。当前, 固化/稳定化技术因其处理效率高、工程适应性强的特点, 被广泛应用于疏浚淤泥处置领域^[2,3]。然而, 传统水泥基固化剂在实际应用中面临显著瓶颈^[4]: 一方面, 淤泥的高含水率导致水泥水化所需有效水灰比失衡, 胶凝产物生成受阻; 另一方面, 有机质分子对水泥水化产物的包裹作用会抑制强度发展, 相关研究表明, 当有机质含量超过 8% 时, 水泥固化体 28d 无侧限抗压强度降幅可达 40% 以上。这迫使工程中不得不通过超量添加水泥(掺量 > 20%) 来满足强度要求, 显著提高了处理成本并加剧碳排放。

与此同时, 我国工业固废年产生量已突破 10 亿 t, 其中循环流化床(CFB)脱硫灰、钢渣、陶瓷粉等大宗固废

的综合利用率长期低于 50%^[5,6]。基于“以废治废”的生态治理理念, 本研究创新性地提出以 CFB 脱硫灰、钢渣、陶瓷粉三类固废为主体, 复配微量化学激发剂构建新型固化体系。其中, CFB 脱硫灰是燃煤电厂脱硫过程产生的富含 CaCO₃、Ca(OH)₂、CaSO₄、f-CaO 的粉体材料, 具备显著的自胶凝特性^[7]; 钢渣作为炼钢工业副产品, 含有 C₂S、C₃S 等硅酸盐矿物及 Fe₂O₃ 等活性成分, 但其水化活性需通过碱激发得以释放^[8]; 陶瓷粉则来源于建筑陶瓷生产过程中的抛光废料, 主要成分为 SiO₂ (60%~70%) 和 Al₂O₃ (15%~25%), 兼具微集料填充效应与火山灰活性^[9]。通过三者的协同作用, 可在实现固废资源增值利用的同时, 显著降低传统水泥掺量, 契合“双碳”战略对建材行业低碳转型的要求。

本研究通过对比普通硅酸盐水泥, 系统开展 CFB 脱硫灰-钢渣-陶瓷粉基固化剂对太湖淤泥的固化试验, 评估固化土的路用性能指标, 旨在为疏浚淤泥-工业固废协同资源化提供理论依据与技术路径。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

太湖淤泥取自江苏东方生态清淤工程有限公司,其基本物理性质如表 1 所示。

表 1 太湖淤泥基本参数

最佳含水率/%	最大干密度/ (g/cm ³)	塑限/%	液限/%	塑性指数 I _p	不同粒径 (μm) 质量百分比/%		
					<2	2~75	>75
21.3	1.66	24.1	52.4	28.3	46.1	32.5	21.4

固化材料选用 P·O42.5 普通硅酸盐水泥和以 CBF 脱硫灰、钢渣、陶瓷粉为主要材料的固废基固化剂 (GFS) 开展对比试验。原材料外观形貌如图 1 所示。GFS 的配比为 CBF 脱硫灰:钢渣:陶瓷粉:激发剂=50:16:27:7。水泥和三种固废材料的氧化物组成见表 2。

表 2 水泥和固废材料的氧化物组分 (%)

材料	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	LOI
水泥	63	21.1	4.1	2.3	3.2	2.1	5.9
CBF 脱硫灰	9.1	55.3	21.4	3.9	1.1	3.1	4.2
钢渣	41	12.6	4.7	25.8	8.8	0.2	1.6
陶瓷粉	6.5	63.6	24.4	1.2	1.7	0.1	2.3

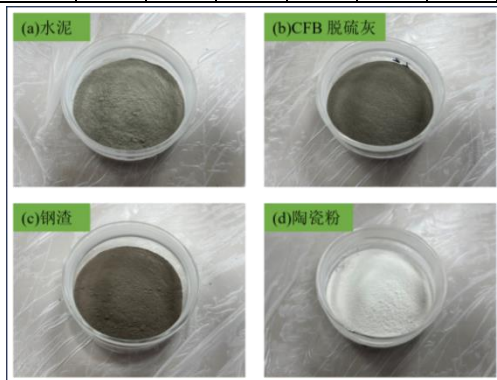


图 1 原材料外观形貌

1.2 试验方案

为了探究 GFS 固化太湖淤泥的路用性能,以掺入 10% 水泥为对照组,探究了不同 GFS 掺量和不同养护龄期对太湖淤泥固化土性能的影响。参照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG 3441—2024)^[10]对试件进行制备、养护和路用性能试验,包括无侧限抗压强度试验、水稳定性试验、劈裂强度试验。具体试验配比如表 3 所示。

表 3 试验配比

组号	干淤泥	水泥	GFS
C-10	1	10%	0
GFS-6	1	0	6%
GFS-8	1	0	8%
GFS-10	1	0	10%
GFS-12	1	0	12%

无侧限抗压强度试验:根据太湖淤泥的最大干密度和最佳含水率,掺入固化材料 (6%、8%、10%、12%) 后采用静压法制备 Φ100mm×100mm 圆柱体试件,每组制备 9 个试件,成型后放入标准养护箱中进行养护,养护至 3d、7d、14d、28d 进行无侧限抗压强度测试,加载速率为 1mm/min。

水稳定性试验:根据太湖淤泥的最大干密度和最佳含水率,分别掺入 10%水泥和 10%的 GFS 固化剂后采用静压法制备 Φ100mm×100mm 圆柱体试件,每组制备 9 个试件,成型后放入标准养护箱中进行养护,养护至 6d 和 27d 并泡水 1d 后测试其无侧限抗压强度,加载速率为 1mm/min。根据试件泡水前后的强度比计算其水稳定系数。

劈裂强度试验:根据太湖淤泥的最大干密度和最佳含水率,掺入固化材料 (6%、8%、10%、12%) 后采用静压法制备 Φ100mm×100mm 圆柱体试件,每组制备 9 个试件,成型后放入标准养护箱中进行养护,养护至 6d、13d、27d 并泡水 1d 后进行劈裂强度测试,采用压条的弧面半径为 50mm、宽度为 12.7mm,加载速率为 1mm/min。

2 结果与讨论

2.1 无侧限抗压强度试验结果

不同龄期的水泥固化土和 GFS 固化土的无侧限抗压强度结果如图 2 所示。从图 2 中可以看出,各组固化土的无侧限抗压强度随着养护龄期的增长而提高,前 3d 的无侧限抗压强度增长迅速,约为 28d 强度的 50%, 14d 之后固化土强度增长速度明显变缓。此外,与对照组 C-10 相比, GFS-6 组的无侧限抗压强度低于水泥对照组, GFS-8 组的无侧限抗压强度与 C-10 相当。随着 GFS 的掺量进一步提升, 10%和 12%掺量的 GFS 组的各龄期无侧限抗压强度明显高于对照组。GFS-10 组的 3d、7d、14d、28d 的无侧限抗压强度分别比 C-10 组的强度高出 15.8%、9.5%、11.8%、15.8%。

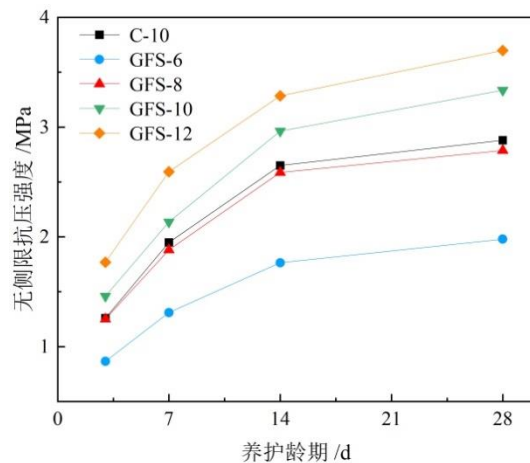


图 2 无侧限抗压强度与龄期的关系

2.2 水稳定性试验结果

固化土水稳定性试验结果如图3所示。图3中6+1d是指标准养护6d并泡水1d,水稳定系数为对应龄期泡水后强度与泡水前强度之比。从图3可以看出,随着养护龄期的增加,固化土的水稳定系数逐渐增加,C-10组的28d水稳定系数比7d高6.1%,GFS-10组的28d水稳定系数比7d高4.9%。此外,掺入GFS固化剂后的水稳定系数明显高于水泥组GFS-10组固化土的7d水稳定系数高于85%,28d水稳定系数高于90%,而掺入10%水泥的固化土的水稳定系数较低。

2.3 劈裂强度试验结果

各组固化土的劈裂强度试验结果如图4所示。由图4可知,固化土的劈裂强度随着养护龄期的增长而增长,其中7d~14d期间固化土的劈裂强度增长迅速;而14d之后固化土的劈裂强度增幅较小。此外,与对照组C-10相比,GFS-6组的各龄期劈裂强度略低于C-10。但是从GFS掺量提高到8%以后,GFS-8,GFS-10,GFS-12的各龄期劈裂强度均高于C-10。以GFS-10为例,其7d、14d、28d的劈裂强度分别比C-10组高出29%、25%、28%。

综上可知,采用CFB脱硫灰、钢渣以及陶瓷粉复合少量激发剂制备的GFS固化剂对于太湖淤泥的固化效果

果远超水泥,在同等掺量下(10%),GFS固化土的28d的无侧限抗压强度、水稳定系数、劈裂强度分别比水泥固化土高15.8%、11.2%、28%。这是由于多元氧化物互补激发的协同作用:脱硫灰提供主要钙源和硅源,其中CaO与水反应生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,形成碱性环境,激活其他活性成分; Fe_2O_3 可促进胶凝产物的晶核形成,加速反应进程。钢渣补充CaO并引入MgO,增强碱性环境稳定性,同时 Fe_2O_3 与脱硫灰中的 Fe_2O_3 协同促进铁酸盐相生成,提升早期强度。陶瓷粉提供硅铝酸盐活性物质,在碱性条件下与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成C-S-H凝胶和钙矾石(Aft),形成致密网络结构,显著提高抗压强度和耐久性。复合的激发剂对活性组分具有定向调控作用:(1)碱性激发:提供 OH^- 离子,破坏 SiO_2 和 Al_2O_3 的玻璃体结构,释放活性硅铝,促进火山灰反应。(2)硫酸盐激发:与 Al_2O_3 反应生成钙矾石(Aft),其膨胀特性可填充孔隙,增强密实度,同时缓解固化土收缩开裂。

3 太湖淤泥资源化利用示范应用

根据以上试验结果,决定采用GFS-12组配比作为示范应用试验段配合比。现场施工情况如图5~图9所示。经无锡市市政工程质量检测中心检测,检测结果如表4所示,用太湖淤泥做道路基层均满足设计指标。

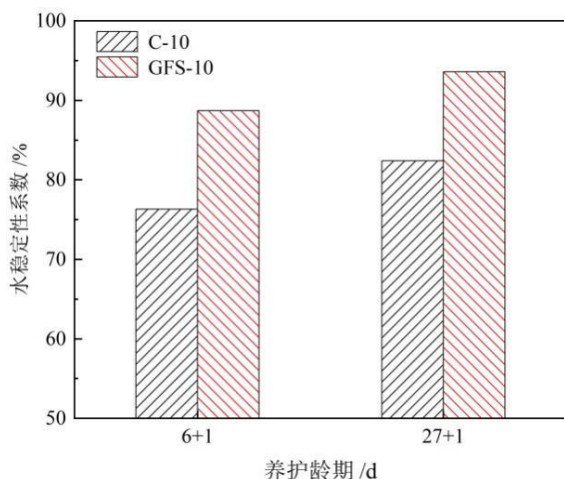


图3 固化土水稳定系数对比

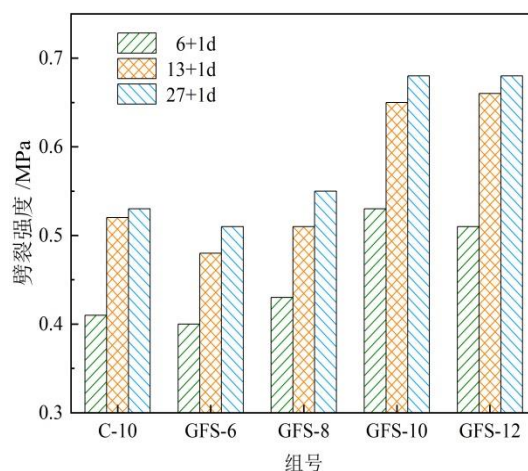


图4 劈裂强度试验结果



图5 撒布 GFS 粉体固化剂并与淤泥拌合



图6 平地机平整场地



图7 单钢轮压路机震动碾压



图8 三钢轮压路机碾压收面



(a)



(b)

图9 (a)压实度检测; (b)弯沉检测

表4 太湖淤泥道底基层性能检测

检测项目	7d 无侧限抗压强度/MPa	压实度	弯沉值 (0.01mm)
设计值	2.5	95.0%	90
检测值	2.8	95.2%	47.65
检测结果	符合设计要求	符合设计要求	符合设计要求

4 结语

本研究通过系统试验与理论分析,揭示了 CFB 脱硫

灰-钢渣-陶瓷粉复合激发剂(GFS 固化剂)在太湖淤泥固化中的显著优势。与传统水泥固化相比,GFS 固化剂通过多元活性组分协同作用与激发剂定向调控机制,实现了淤泥固化土力学性能与耐久性的全面提升。试验结果表明:

(1) 10%掺量 GFS 固化土的 28 d 的无侧限抗压强度、水稳定系数及劈裂强度分别较 10%掺量水泥固化土提高 15.8%、11.2%和 28%,显著优化了路用性能;(2) GFS

固化剂的协同效应(如多元氧化物互补激发、胶凝产物多尺度致密化)赋予固化土优异的长期稳定性,其高承载能力与抗裂特性可有效降低路基结构损伤风险,而增强的水稳性则为延长道路服役寿命提供了关键保障。(3)工程实践表明,GFS 固化剂作为一种以工业固废(脱硫灰、钢渣、陶瓷粉)为主体的绿色材料,兼具高强度特性、稳定水稳性及环境友好性,不仅契合废弃资源循环利用的可持续发展理念,更为太湖淤泥的大规模资源化处置提供了创新性解决方案。本研究结果可为区域性淤泥路基工程的技术革新与低碳化发展提供理论支撑与实践参考。

[参考文献]

- [1]丁瑞,范子武,王晓宇,等.太湖生态清淤及底泥资源化利用建议[J].江苏水利,2024(11):16-20.
- [2]程强强,姚越,崔胥阳,等.高掺量粉煤灰淤泥固化土无侧限抗压强度试验研究[J].新型建筑材料,2023,50(10):117-120.
- [3]王柳江,臧耀辉,江后根,等.基于改性矿渣水泥的高含水率淤泥固化土强度特性试验研究[J].中国水

运,2024,24(16):134-136.

- [4]舒本安,陈伟忠,任彦飞,等.固废基固化剂固化淤泥质土性能及机理研究[J].新型建筑材料,2024,51(12):108-111.
- [5]仲维华.工业废渣协同水泥固化淤泥压缩特性[J].长江科学院院报,2024,41(1):121-127.
- [6]戴蕾,李战国,黄新.利用工业废渣制备软土固化剂的可行性探讨[J].中国工程科学,2010,12(3):56-60.
- [7]刘安稳.CFB 脱硫灰复合基软土固化机理及力学性能研究[D].辽宁:沈阳建筑大学,2023.
- [8]沈建生,徐亦冬,方建柯.新型废渣软土固化剂的试验研究[J].硅酸盐通报,2018,37(10):3332-3337.
- [9]徐禹佳.多固废复合基软土加固机理及力学性能分析[D].辽宁:沈阳建筑大学,2023.
- [10]JTG3441—2014 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].北京:人民交通出版社,2024.

作者简介:杨炜(1969—),男,汉族,江苏无锡人,大学本科,副总工程师,研究方向:新型建造材料与施工技术。