

· 地基与基础 ·



舟山区域高含水率淤泥固化试验研究*

罗奇¹, 毕洪武¹, 王梓奥¹, 汪学正², 李凯^{2,3}, 姬贺飞²

(1. 中交第三航务工程局有限公司宁波分公司, 浙江 宁波 315299;

2. 天津中岩大地材料科技有限公司, 天津 300380; 3. 北京中岩大地科技股份有限公司, 北京 100043)

摘要: 海相淤泥是水运工程建设中的常见地基材料, 但其高含水率特性常导致传统固化材料的效果不理想。对舟山地区高含水率海相淤泥开展室内固化试验, 研究水泥与固化剂对淤泥加固的力学性能与微观机制; 系统比较水泥和固化剂的掺量、龄期对固化效果的影响, 并通过扫描电镜观察微观结构, 探讨其固化机制。结果表明: 固化土表现为应变软化型; 随着龄期和固化剂掺量的增加, 其无侧限抗压强度、黏聚力和压缩模量均显著提高, 分别为相应水泥土的1.70~2.12倍、1.50~2.20倍和1.79~2.23倍。固化剂的综合固化效果优于水泥, 主要原因在于其生成的水化胶凝物质更多, 对土体胶结作用更强, 同时形成较多的膨胀性产物(钙矾石), 有效填充高含水率淤泥中的空隙, 从而提高了固化土的结构密实度。

关键词: 高含水率; 海相淤泥; 固化剂; 固化土; 力学性能; 固化机制

中图分类号: U654; U655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)02-0206-07

Experiment on solidification of high moisture content silt in Zhoushan area

LUO Qi¹, BI Hongwu¹, WANG Zi'ao¹, WANG Xuezheng², LI Kai^{2,3}, JI Hefei²

(1. CCCC Third Navigation Engineering Co., Ltd. Ningbo Branch, Ningbo 315299, China;

2. Tianjin Zhongyan Dadi Material Technology Co., Ltd., Tianjin 300380, China;

3. Beijing Zhongyan Dadi Technology Co., Ltd., Beijing 100043, China)

Abstract: Marine silt is a common foundation material in port and waterway engineering projects, but its high moisture content often leads to unsatisfactory effectiveness when traditional solidifying materials are used. Indoor solidification experiments are conducted on high moisture content marine silt from the Zhoushan area to investigate the mechanical properties and micro-mechanisms of cement and solidifying agents in reinforcing the silt. The effects of the admixture amount of cement and solidifying agents and the curing age on the solidification effectiveness are systematically compared, and the microscopic structure is observed by scanning electron microscopy to analyze the solidification mechanism. The results indicate that the solidified soil exhibits strain-softening behavior. With an increase in curing age and admixture amount of solidifying agents, the unconfined compressive strength, cohesion, and compression modulus significantly improves, reaching 1.70–2.12 times, 1.50–2.20 times, and 1.79–2.23 times those of cement-stabilized soil, respectively. The overall solidification performance of the solidifying agent is superior to that of cement, primarily because it produces more hydrated cementitious materials, resulting in stronger soil bonding. Additionally, it generates a higher content of expansive product (ettringite), which effectively fills the void in the high moisture content silt, thereby enhancing the compactness of the solidified soil structure.

Keywords: high moisture content; marine silt; solidifying agent; solidified soil; mechanical property; solidification mechanism

收稿日期: 2025-07-30 录用日期: 2025-09-12

*基金项目: 中交第三航务工程局有限公司 A 类科技研发项目 (PR2024042639)

作者简介: 罗奇(1986—), 男, 高级工程师, 从事固化土施工研究和施工技术管理工作。

我国沿海地区淤泥资源丰富,是重要土地后备资源,可为临海陆地建设提供重要的地基基础。然而,海相淤泥成分复杂,具有含水率高、压缩性强、强度低、颗粒细等特点^[1-3],开发利用前需要进行处理。常见的处理方法包括物理法、加热烧结法和化学固化法^[4]。其中,化学固化法因具有处理效率高、固化效果好、稳定性强等优点而被广泛应用^[5]。

化学固化法常采用水泥、石灰等传统材料作为固化剂^[6],按一定比例搅拌添加到土体中,以提高软基的工程特性。金裕民等^[7]和黄英豪等^[8]以水泥为主固化剂,研究龄期、掺入比和外加剂类型对淤泥(含水率<70%)固化性能的影响;刘鑫等^[9]和王东星等^[10]通过试验分别研究淤泥(含水率<70%)固化后的压缩特性和添加集料砂对于固化强度的影响;吴跃东等^[11]则重点分析水泥材料固化土动应力-动应变关系及阻尼比的影响;王国才等^[12]探讨在水泥基固化材料中添加功能性

外加剂对其力学性能的影响。

综上可知,当前国内淤泥固化研究主要集中于中低含水率(<80%)的淤泥,且固化材料主要集中在传统水泥改善研究上,但考虑到其生产能耗和工程经济性,需要增加工业副产物提高固化材料的环保性。本文针对舟山大宗商品国家储运基地工程(衢山基地)区域高含水率淤泥开展室内固化试验,对比固化剂与水泥的固化效果,并总结固化机制,旨在为高含水率海相淤泥合理选择最优固化材料提供理论和技术支撑。

1 试验设计

1.1 试验材料

本文试验所用淤泥土取自舟山大宗商品国家储运基地工程(衢山基地)的吹填未固结海相淤泥。矿物成分主要为石英、伊利石和蒙脱石等。淤泥土的物理力学性质参数见表1。

表1 淤泥土物理力学性质

Tab.1 Physical and mechanical properties of silt soil

基本物理性能									颗粒组成/%			
天然含水率/%	密度/(g·cm ⁻³)	土粒相对密度	液限/%	塑限/%	压缩模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)		>0.25 mm	0.075~0.25 mm	0.005~0.075 mm	<0.005 mm
97	1.47	2.73	57.9	31.0	1.50	4.5	2.8		1.8	4.5	33.1	60.6

本文试验所用固化材料分别为P·O 42.5水泥和ZYDD-C固化剂,固化材料的性能参数见表2。固化材料中P·O 42.5水泥为北京金隅集团股份有

限公司生产,ZYDD-C固化剂为天津中岩大地材料科技有限公司根据海洋淤泥特性开发的固化材料。

表2 不同固化材料的性能参数

Tab.2 Physical performance parameters of different solidifying materials

固化材料	比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)	细度(80 μm 筛余量)/%	初凝时间/min	终凝时间/min	含水率/%
P·O 42.5 水泥	326	4.5	178	237	0.14
ZYDD-C	421	1.1	201	285	0.12

1.2 试验方案

选取代表性现场土样,开展海相高含水率淤泥室内固化试验。固化材料选用P·O 42.5水泥和ZYDD-C固化剂,掺入比(固化材料干质量与淤泥湿质量之比)分别为6%、8%和10%,水灰比为0.8:1。P·O 42.5水泥与淤泥形成水泥土,ZYDD-C固化剂与淤泥形成固化土。水泥土和固化土试样在标准养护不同龄期后,测试其相关性能。

1.3 试验步骤

依据配合比试验方案及GB/T 8077—2023《混凝土外加剂匀质性试验方法》^[13]制备试样。首先,将称量好的固化材料置于搅拌锅内,按水灰比0.8:1加入水,搅拌90~120 s形成均匀的固化材料浆液。随后,加入称量好的淤泥,立即进行慢速搅拌(120 s),静置(15 s),再进行快速搅拌(120 s),充分拌和形成固化土体。将拌和均匀的固化土体

分别装入边长为 70.7 mm 的立方体试模(用于无侧限抗压强度测试)和直径 61.8 mm、高 20 mm 的环刀试模(用于压缩/剪切测试)中。启动振动机振捣 120~250 s,使固化土体密实填充模具。固化土体的搅拌与试样成型见图 1。



图 1 固化土体的搅拌和试样成型

Fig.1 Mixing of solidified soil and sample formation

将制备的水泥土和固化土试模置于标准养护箱(温度 $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$,相对湿度 $\geq 95\%$)中养护,48 h 后拆模,然后继续在标准养护箱中养护至 3、7、14 和 28 d。到达指定龄期后,分别测试水泥土和固化土试样的无侧限抗压强度、应力-应变关系、抗剪强度、压缩模量等力学性能指标。同时,选取代表性试样,借助扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)观测其微观形貌变化。

2 海相淤泥固化性能

2.1 无侧限抗压强度

无侧限抗压强度是体现固化效果的最佳指标之一,水泥土和固化土在不同掺入比和龄期下与

无侧限抗压强度见图 2。由图 2a)可看出,水泥土的无侧限抗压强度随水泥掺入比和龄期的增加而持续增长。在 6%、8% 和 10% 掺入比下,其 7 d 强度分别达到 28 d 强度的 51.8%、53.9% 和 58.0%,占比均超过 50%。这表明水泥土的早期强度($\leq 7 \text{ d}$)增长较快,而后期(14~28 d)增长趋缓。由图 2b)可看出,固化土无侧限抗压强度同样随龄期和掺入比的增加而增大。在 6%、8% 和 10% 掺入比下,固化土 7 d 强度分别为其 28 d 强度的 34.2%、40.1% 和 48.3%,占比均低于 50%,表明固化土的早期($\leq 7 \text{ d}$)强度增长较慢,后期(14~28 d)增长较快。其主要原因在于:固化剂主要由工业副产物组成,早期活性较低,早期强度增长缓慢;随着水化反应进行,产生的 OH^- 和 Ca^{2+} 激活了工业副产物的后期活性^[14],促使固化强度随龄期持续稳定增长。同时,在相同条件下,固化土无侧限抗压强度明显高于水泥土,在 6%、8% 和 10% 掺入比下固化土的 28 d 固化强度分别为水泥土的 1.70、2.13 和 2.12 倍。

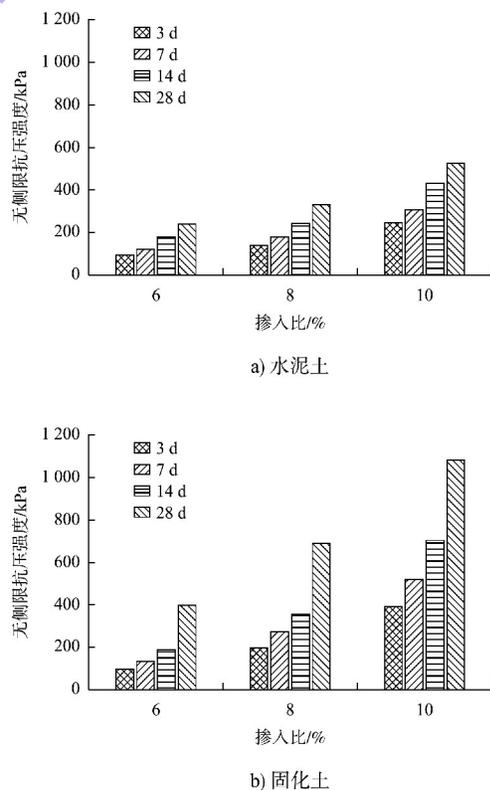


图 2 不同掺入比和龄期下无侧限抗压强度
Fig.2 Unconfined compressive strength at different admixture proportions and ages

2.2 应力-应变曲线

不同掺入比下的应力-应变曲线见图 3。由图 3a) 可看出, 当水泥掺入比为 6% 和 8% 时, 水泥固化土应力水平较低, 应力-应变曲线呈硬化型^[15], 即应力随着应变的不断增大, 没有明显的下降拐点; 当水泥掺入比增至 10% 时, 曲线由硬化型转变为软化型, 峰值后应力急剧下滑, 出现明显拐点。由图 3b) 可看出, 固化剂掺入比为 6% 时, 曲线仍呈硬化型; 当掺入比提高到 8% 和 10% 时, 曲线同样转为软化型。在同等掺入比条件下, 28 d 龄期水泥土的最大应力始终低于固化土, 说明固化剂的固化效果优于水泥, 这个趋势与无侧限抗压强度结果一致。

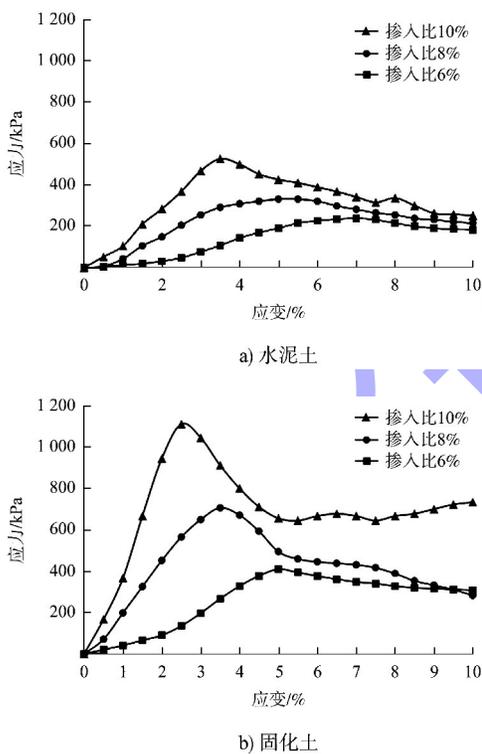


图 3 不同掺入比下应力-应变曲线
Fig. 3 Stress-strain curves under different admixture proportions

2.3 抗剪强度

固化土的抗剪强度由黏聚力和内摩擦角共同构成。不同掺入比下的水泥土和固化土的黏聚力见

图 4。可以看出, 随固化材料掺入比增加及龄期延长, 水泥土与固化土的黏聚力均呈显著上升趋势; 7 d 龄期时, 6%、8% 和 10% 掺入比下固化土黏聚力分别为水泥土的 1.2、1.4 和 1.5 倍; 28 d 龄期时变为 1.5、2.0 和 2.2 倍。由此可见, 随着龄期和掺入比的增加, 固化土黏聚力优势愈发突出, 最高可达 93.1 kPa, 与固化前淤泥土的 4.5 kPa 相比, 固化后黏聚力大幅提升。相同试验条件下, 固化土黏聚力始终高于水泥土。

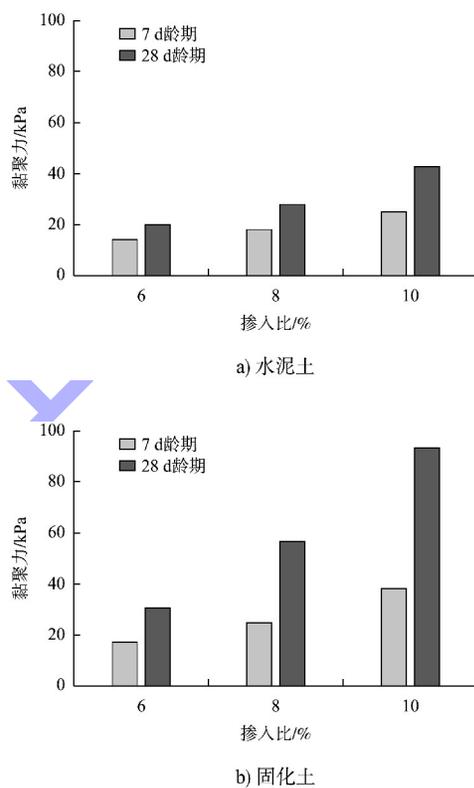


图 4 不同掺入比下的黏聚力
Fig. 4 Cohesion force under different admixture proportions

不同掺入比下的水泥土和固化土的内摩擦角见图 5。可以看出, 相同条件下, 水泥土的内摩擦角略高于固化土。水泥土与固化土的内摩擦角均较原始淤泥土(2.8°)显著提高, 说明内摩擦角主要受土体内部颗粒特征控制, 与固化形成的结构关联度较低。

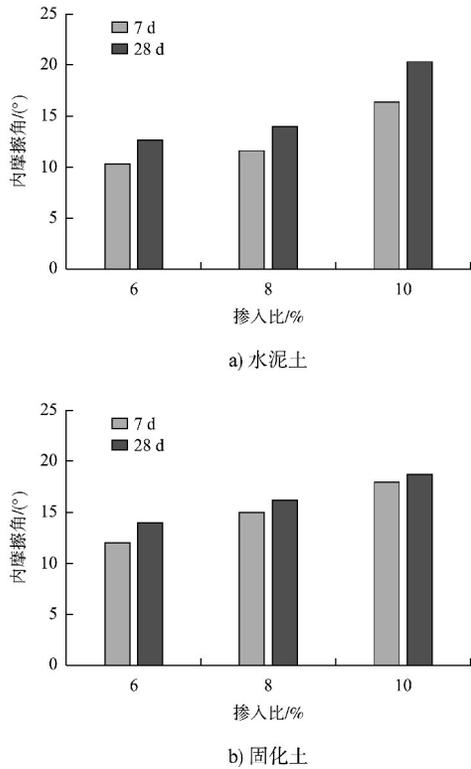


图 5 不同掺入比下内摩擦角
Fig. 5 Internal friction angle under different admixture proportions

2.4 压缩模量

不同固化材料在 6%、8% 和 10% 掺入比下 7 和 28 d 的压缩模量见表 3。可以看出，随掺入比增加，固化土 7、28 d 的压缩模量均单调递增；与原始淤泥土的 1.5 MPa 相比，提升幅度显著，10% 掺量时最高可达 30.59 MPa。6%、8% 和 10% 掺入比下，固化土的 28 d 压缩模量分别为水泥土的 1.83、1.79 和 2.23 倍。在相同掺入比与龄期条件下，固化土压缩模量始终高于水泥土，且两者差值随掺入比增加而扩大，这个变化趋势与抗剪强度和无侧限抗压强度的测试结果完全一致。

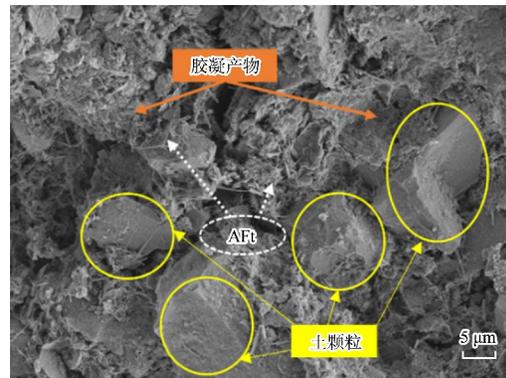
表 3 不同固化材料和掺入比下固化土体的压缩模量

Tab. 3 Compressive modulus of solidified soil under different solidification materials and admixture proportions

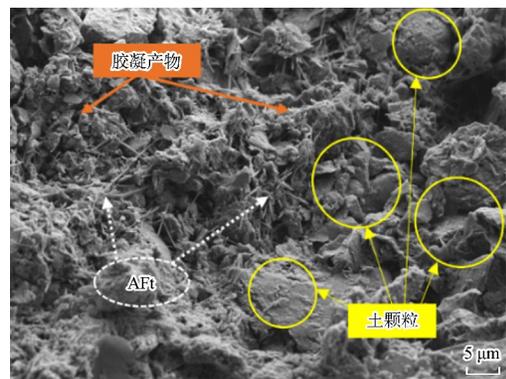
固化材料 掺入比/%	固化土体类型	压缩模量/MPa	
		7 d	28 d
6	水泥土	3.58	5.93
	固化土	6.94	10.85
8	水泥土	4.68	9.72
	固化土	7.84	17.39
10	水泥土	7.72	13.50
	固化土	15.72	30.59

3 固化机制分析

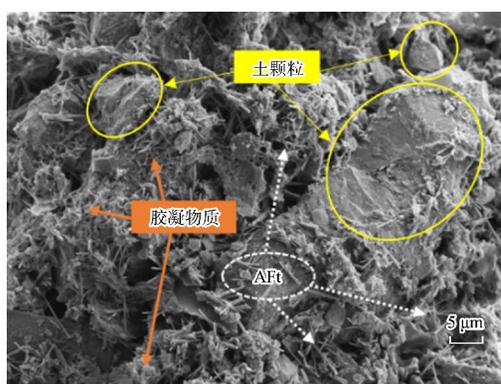
10% 固化材料掺入比下水泥土和固化土 7 和 28 d 的 SEM 图像见图 6。由图 6a) 可看出，7 d 龄期的水泥土内已生成水化胶凝物质(水化硅酸钙、水化硅铝酸钙等) 包覆土颗粒，并由少量钙矾石 (AFt) 晶体穿插其间，但仍有较多土颗粒表面未被水化产物充分包裹。由图 6b) 可看出，28 d 龄期时水泥土的水化胶凝物质与 AFt 晶体相较于 7 d 有所增加，大多数土颗粒表面被致密胶凝层覆盖，仅局部裸露，说明增加龄期促进了水化反应，水化产物的生成量增多，进而提高了无侧限抗压强度及其他力学性能。由图 6c) 可看出，7 d 龄期的固化土已形成更大的团聚体，土颗粒被新生水化产物大部分包裹，仅少量裸露。由图 6d) 可看出，28 d 龄期的固化土内部呈蜂窝状，水化胶凝物质和 AFt 晶体交织，进一步包裹小颗粒并生成更大的团块，土颗粒几乎不可见；相较于水泥土，固化土空隙更少，结构更加密实，土颗粒之间的化学连接更强。



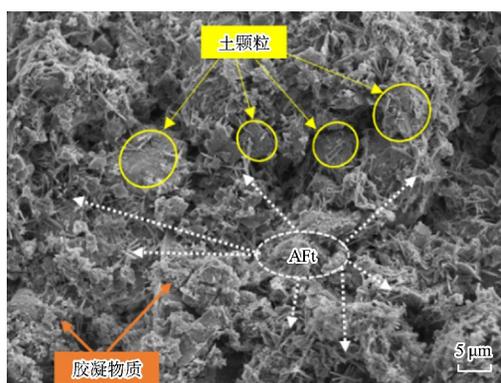
a) 7 d 水泥土



b) 28 d 水泥土



c) 7 d 固化土



d) 28 d 固化土

图6 10%掺入比下水泥土和固化土7和28 d的SEM图像

Fig. 6 SEM images of cemented soil and solidified soil with 10% admixture proportion at 7 and 28 d

高含水率淤泥主要由水和土颗粒组成,土颗粒之间以点-面接触为主,颗粒之间存在大量孔隙。固化材料通过一系列水化反应,产生有胶凝性的水化产物,前期数量较少,彼此相互搭接较少;随着养护龄期增加,水化产物不断生长发育,产物之间搭接明显,逐渐形成三维网状产物,使得土颗粒间的团聚效应增强,三维网状结构的C-S-H凝胶覆盖在土颗粒表面,填充了颗粒间的裂隙^[16]。

相同条件下,固化土相较于水泥土生成的水化胶凝物质更多、分布更均匀,胶结土颗粒更强;同时,固化土水化产物中AFt晶体数量明显多于水泥土,AFt晶体对于填充空隙有重要作用,固化土密实度更高,这是固化土综合性能优于水泥土的根本原因。

固化材料的固化效果与固化材料类型、掺入

比、龄期等因素有关,固化效果的提高程度取决于水化反应中胶凝物质与AFt晶体的生成量。

4 结论

1) 固化土表现为应变软化型。固化土无侧限抗压强度随龄期和掺入比增加,14~28 d强度增长速率大于0~7 d。相同龄期和掺量下,固化土与水泥土的无侧限抗压强度比在1.70~2.12。

2) 固化土的无侧限抗压强度与黏聚力、压缩模量存在线性关系,固化土与水泥土的黏聚力之比为1.50~2.20,压缩模量之比为1.79~2.23。

3) 对于海相高含水率淤泥,固化剂的固化效果优于水泥的微观机制在于:固化土中土颗粒被胶凝产物包裹程度更高,且生成的水化产物总量更大,尤其是AFt晶体含量,固化土中孔隙更少,密实度更高。

参考文献:

- [1] 黄朝焯. 淤泥搅拌固化法在海堤工程基础处理中的应用[J]. 施工技术, 2017, 46(S1): 105-109.
HUANG C X. Application sludge stirring and curing method in foundation treatment of seawall project [J]. Construction technology, 2017, 46(S1): 105-109.
- [2] 李文斌. 海砂-淤泥混合物在福州某防潮工程堤身填筑中的运用[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(3): 93-98, 103.
LI W B. Application of sea sand-silt mixture in embankment filling of a tide-proof project in Fuzhou [J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2020, 18(3): 93-98, 103.
- [3] 许大鹏, 练文文, 屈丹妮, 等. 滩涂淤泥固化剂配合比优化及其强度研究[J]. 新型建筑材料, 2024, 51(4): 63-67, 140.
XU D P, LIAN W W, QU D N, et al. Optimization of mixture design of solidification admixtures for beach silt and its strength study [J]. New building materials, 2024, 53(4): 63-67, 140.
- [4] 朱伟, 张春雷, 刘汉龙, 等. 疏浚泥处理再生资源技术的现状[J]. 环境科学与技术, 2002(4): 39-41, 50.

- ZHU W, ZHANG C L, LIU H L, et al. The status quo of dredged spoils utilization [J]. *Environmental science & technology*, 2002(4): 39-41, 50.
- [5] 黄雨, 周子舟, 柏炯, 等. 石膏添加剂对水泥土搅拌法加固软土地基效果影响的微观试验分析[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(8): 1179-1183.
- HUANG Y, ZHOU Z Z, BAI J, et al. Micro-experiments on a soft ground improved by cement-mixed soils with gypsum additive [J]. *Chinese journal of geotechnical engineering*, 2010, 32(8): 1179-1183.
- [6] 张辉, 杨黎, 陈永辉, 等. 连云港海相固化软土抗拉强度特性及预测方法[J]. *水运工程*, 2023(6): 192-198, 225.
- ZHANG H, YANG L, CHEN Y H, et al. Tensile strength characteristics and prediction method of solidified marine soft soil in Lianyungang [J]. *Port & waterway engineering*, 2023(6): 192-198, 225.
- [7] 金裕民, 郑旭卫, 蔡纯阳, 等. 水泥粉煤灰固化滩涂淤泥的强度与固化机理研究[J]. *科技通报*, 2014, 30(7): 66-71.
- JIN Y M, ZHENG X W, CAI C Y, et al. Study on the strength and curing mechanism of beach silt stabilized soil using cement-fly ash [J]. *Bulletin of science and technology*, 2014, 30(7): 66-71.
- [8] 黄英豪, 朱伟, 周宣兆, 等. 固化淤泥压缩特性的试验研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(10): 2923-2928.
- HUANG Y H, ZHU W, ZHOU X Z, et al. Experimental study of compressibility behavior of solidified dredged material [J]. *Rock and soil mechanics*, 2012, 33(10): 2923-2928.
- [9] 刘鑫, 范晓秋, 洪宝宁. 水泥砂浆固化土三轴试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(6): 1676-1682.
- LIU X, FAN X Q, HONG B N. Triaxial test study on cement mortar solidified soil [J]. *Rock and soil mechanics*, 2011, 32(6): 1676-1682.
- [10] 王东星, 徐卫亚. 固化淤泥长期强度和变形特性试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2013, 44(1): 332-339.
- WANG D X, XU W Y. Experimental study on long-term strength and deformation properties of solidified sediments [J]. *Journal of Central South University (science and technology)*, 2013, 44(1): 332-339.
- [11] 吴跃东, 杨博文, 顾建玲, 等. 疏浚淤泥固化土路基动力特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(S1): 34-38.
- WU Y D, YANG B W, GU J L, et al. Dynamic characteristics of dredged silt-solidified soil subgrade [J]. *Chinese journal of geotechnical engineering*, 2023, 45(S1): 34-38.
- [12] 王国才, 吴旻炯. 滩涂淤泥固化土力学特性试验研究[J]. *浙江工业大学学报*, 2015, 43(4): 468-472.
- WANG G C, WU M J. An experimental study on the mechanical properties of solidified beach silt soil [J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2015, 43(4): 468-472.
- [13] 混凝土外加剂匀质性试验方法: GB/T 8077—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- Methods for testing uniformity of concrete admixtures: GB/T 8077-2023[S]. Beijing: China Standard Press, 2023.
- [14] 畅帅, 徐日庆, 李雪刚, 等. 基于响应面法的淤泥质土固化配方优化研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(1): 105-111.
- CHANG S, XU R Q, LI X G, et al. Optimization of formula for stabilizing muddy soil using response surface methodology [J]. *Rock and soil mechanics*, 2014, 35(1): 105-111.
- [15] 杨黎, 张辉, 陈永辉, 等. 连云港徐圩港区海相软土固化特性及强度劣化机理研究[J]. *水运工程*, 2023(3): 157-164.
- YANG L, ZHANG H, CHEN Y H, et al. Solidification characteristics and strength deterioration mechanism of marine soft soil in Xuwei Port, Lianyungang [J]. *Port & waterway engineering*, 2023(3): 157-164.
- [16] 张顶飞, 刘涛, 郝琪, 等. 固废地质聚合物固化沿海软土的力学机理与劣化性能研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2024, 32(6): 1582-1596.
- ZHANG D F, LIU T, HAO Q, et al. Investigation of mechanical mechanisms and deterioration properties of geological polymers from solid waste for stabilizing coastal soft soils [J]. *Journal of basic science and engineering*, 2024, 32(6): 1582-1596.