

GS 固化剂加固海底淤泥力学特性与微观机理

张振^{1*}, 李光耀¹, 叶观宝¹, 单卫良², 舒欢³

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 上海宝粉材料科技有限公司, 上海 201908;
3. 金茂苏皖企业管理(天津)有限公司, 江苏 南京 320100)

摘要: 海底淤泥具有特殊的土性特点, 比如含水率高、强度低、有机质含量高、含盐量高等。随着工程建设向海洋进军, 海底淤泥固化越来越受到人们关注。GS 固化剂是一种以工业固废为主要原料的绿色固化材料, 常用于软土的加固处理当中。本文以香港某海底淤泥地基处理工程的海底淤泥为加固对象, 研究 GS 固化剂加固海底淤泥时的力学特性及微观机理。对比分析了 GS 固化剂和水泥的掺量、龄期对固化土无侧限抗压强度的影响。同时, 借助背散射电子显微镜获得固化土的背散射电镜(BES)图像, 通过物象识别分析得到灰度直方图, 对固化剂的固化机理进行讨论分析。研究表明, GS 固化土表现为应变软化规律, 无侧限抗压强度随龄期增加, 增长速率逐渐减小。相比于普通水泥, GS 固化土的早期强度更高、强度增长更快, 强度提高比在 2.03~2.81。GS 固化土 E_{50} 与 q_u 的关系与水泥土基本一致。与水泥土相比, GS 固化土的水化产物含量明显更高, 水化程度好, 孔隙含量相对较低, 结构更加稳定。

关键词: GS 固化剂; 海底淤泥; 无侧限抗压强度; 工业固废; 土体固化

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)S-0001-05

Mechanical characteristics and microscopic mechanism of submarine silt stabilized by GS agent

ZHANG Zhen^{1*}, LI Guang-yao¹, YE Guan-bao¹, SHAN Wei-liang², SHU Huan³

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Baofen Material Technology Co., Ltd., Shanghai 201908, China;

3. Jinmao Jiangsu Anhui Enterprise Management (Tianjin) Co., Ltd., Nanjing 320100, Jiangsu, China)

Abstract: Submarine silt has special soil characteristics, such as high water content, low strength, high organic matter content and high salt content. With the ocean engineering construction, the solidification of submarine silt has attracted attention. GS curing agent is a kind of green curing material with industrial solid waste as the main raw material, which is often used in the reinforcement of soft soil. In this paper, the mechanical properties and microscopic mechanism of submarine silt stabilized by GS curing agent were studied by taking the sea-bed silt of a sea-bed silt foundation treatment project in Hong Kong as the reinforcement object. The effects of the content of GS curing agent, cement and age on the unconfined compressive strength of solidified soil were compared and analyzed. Similarly, the backscatter electron microscopy (BES) test was conducted to analyze the object image recognition and microscopic mechanism through the obtained gray histogram. The results show that GS solidified soil demonstrates a strain-softening behavior, the unconfined compressive strength increases with curing age, and the growth rate decreases gradually. Compared with common cement, GS solidified soil provides higher early strength and faster strength growth, with a strength improvement ratio of 2.03 to 2.81. The relationship between GS solidified soil E_{50} and q_u is basically consistent with that of cement soil. Compared with cement soil, GS solidified soil has significantly higher hydration product content, better hydration degree, lower pore content and more stable structure.

Key words: GS curing agent; submarine silt; unconfined compressive strength; industrial solid waste; soil solidification

0 引言

水泥作为最常用的土体固化剂^[1-2],能有效提高土体的强度和抗渗性能、减少土体变形。然而,水泥工业消耗着大量自然资源,同时,排放的粉尘和废气严重影响环境和健康。因此,研发新型固化剂以减少或替代水泥一直是研究的热点,具有重要的工程价值和社会意义。

近年来,众多学者将土体固化剂的研发思路投向以工业固废为主要原料,是将工业固废资源化利用有效途径^[3-4]。方祥位等^[5]研究了GT型土体固化剂在加固土体时的工程性质。JIA等^[3]通过混合一定比例的脱硫石膏、钢渣和炉渣形成一种新型固化剂。

GS固化剂是一种以炼钢产生的工业废渣为主要原料(固废含量达70%以上),采用碾磨工艺,经过材料适应性试验而研制的应用于软土加固的绿色固化材料,并已成功应用工程实践^[6-7]。叶观宝等^[8]、YE等^[9]研究了GS固化剂加固上海第③层、第④层软土的工程力学特性。研究表明,在相同掺量和龄期下,GS固化土的室内无侧限抗压强度是水泥土的1.3~2.1倍,现场标贯击数是水泥土的1.8~2.3倍。海底淤泥具有特殊的土性特点,其固化研究尚处于起步阶段。

本文以香港某工程海底淤泥为加固对象,对GS固化剂和水泥的掺量、龄期对固化土无侧限抗压强度的影响进行分析,同时通过背散射试验探究其微观机理。

1 试验材料及方案

1.1 试验材料

试验土取自香港某工程海相沉积土,土样呈流塑状态,含水量高,含有很少量的细砂并夹杂着一些贝壳碎片。采用GS固化剂和P.O42.5水泥作为土体固化剂。土性指标及固化剂详细参数见表1和表2。

1.2 试验方案与试样步骤

试验中GS固化剂和水泥的掺量为15%和20%,试验龄期选择14d、28d、56d以及90d(其中90d龄期试样用于背散射试验),水灰比确定为1.0。立方体试件选用50mm×50mm×50mm以及10mm×10mm×10mm两种尺寸,分别用于无侧限抗压试验以及背散射试验。

将试验土风干捣碎后,与指定的固化剂充分混合,将混合浆液倒入立方体模具中,振动密实后抹平,封上塑料薄膜,如图1所示。试块在成型24h后拆模,养护到所需要的龄期。

表1 海底淤泥土性指标

Table 1 Soil properties of submarine soft soil

| 项目 | 参数 |
|------------------------------|-------|
| 含水率/% | 44.3 |
| 天然重度/(kN/m ³) | 17.9 |
| 孔隙比 | 1.086 |
| 液限/% | 44.5 |
| 塑限/% | 25.1 |
| 压缩模量/MPa | 2.3 |
| 黏聚力/kPa | 9.6 |
| 内摩擦角/(°) | 11.2 |
| 渗透系数/(10 ⁻⁷ cm/s) | 0.891 |

表2 GS固化剂与水泥性能指标

Table 2 Performance indices of GS agent and cement

| 项目 | GS 固化剂 | 水泥 |
|---------------------------|--------|-------|
| 0.8 mm 筛余量/% | 1.2 | — |
| 细度/% | — | 1.25 |
| 初凝时间/h | 04:34 | 02:10 |
| 终凝时间/h | 06:36 | 03:10 |
| 标准稠度/% | 25.8 | — |
| 密度/% | 2.99 | — |
| 比表面积/(m ² /kg) | 489 | — |
| SO ₂ /% | — | 2.25 |
| 烧失量/% | — | 1.07 |
| MgO/% | — | 2.27 |
| 28 d 抗压强度/MPa | 41.2 | 48.9 |



图1 封膜的固化土试件

Fig. 1 Solidified soil specimen with sealing film

借助压式万能试验机进行无侧限抗压强度试验,采用应力控制,以0.15kN/s的速度均匀连续施

加荷载。每组 6 个试件，取测试强度的算术平均值作为该组试块的无侧限抗压强度值。为探究其微观机理，采用扫描电子显微镜 QUANTA 200(荷兰 FEI 公司生产) 搭载的背散射电子显微镜探头，在工作距离为 10~15 mm 的高真空条件下获得固化土的背散射电镜 (BES) 图像，之后通过物相分析获得灰度直方图。

为便于辨识，试验组采用 C/GSX-Yd 标注，其中 C 代表水泥，GS 代表 GS 固化剂，X 代表掺量，Yd 代表龄期。例如，GS15-14d 即为 GS 固化剂掺量 15%、龄期 14 d 的试验组。

2 试验结果与分析

2.1 固化土应力-应变关系

图 2 为不同龄期下固化土的应力-应变曲线。由图可知，无论何种固化剂及掺量，海底淤泥固化土的应力-应变曲线主要分为 3 个阶段：第 1 阶段，应力随着应变线性增长；第 2 阶段，随应变增加，应力的增长速率逐渐减缓，直至应力达到峰值（抗压强度）；第 3 阶段，应力随应变增加迅速降低，并渐趋近于稳定值（残余强度）。从图中可知，GS 固化土强度明显高于水泥土。

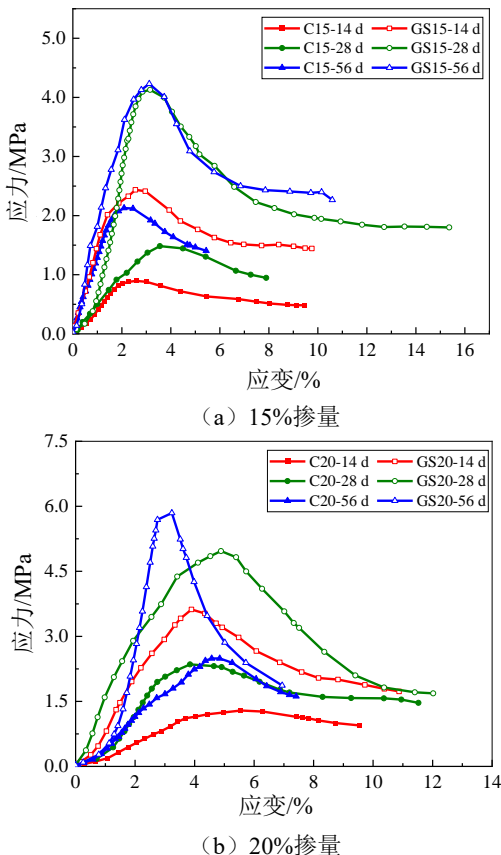


图 2 固化土应力-应变关系曲线图
Fig. 2 Stress-strain curves

2.2 无侧限抗压强度

图 3 为固化土无侧限抗压强度随龄期的变化曲线。由图可知，两种固化土的强度随龄期增加变化趋势基本一致且呈非线性增长。在固化早期，两者无侧限抗压强度有着显著的增加，之后强度增加变缓，但是 GS 固化土的强度提高相比于水泥土更加明显。经过计算，GS 固化土与水泥土的无侧限抗压强度比在 2.03~2.81 之间。分析表明，GS 固化剂加固海底淤泥的早期强度高、强度增长快。

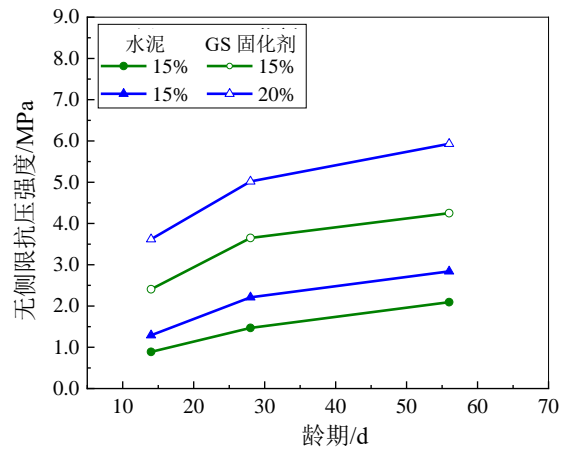


图 3 无侧限抗压强度变化规律
Fig. 3 Changes of unconfined compressive strength

2.3 弹性模量

已有研究发现加固土的无侧限抗压强度 q_u 与弹性模量 E_{50} 存在线性相关关系^[10]。如图 4 所示，两种不同固化剂加固土的数据点大体分布在三角区域内，且上、下限范围如公式 (1)、(2)。GS 固化土 E_{50} 与 q_u 的关系与水泥土基本一致。

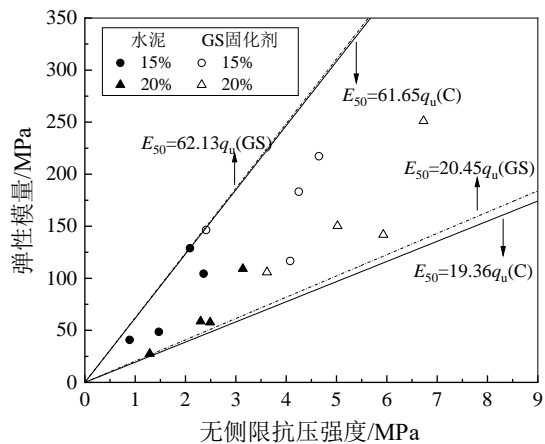


图 4 弹性模量与无侧限抗压强度关系
Fig. 4 Relationship between elastic modulus and unconfined compressive strength

水泥土:

$$E_{50}=(19.36\sim 61.65)q_u \quad (1)$$

GS 固化土:

$$E_{50}=(20.45\sim 62.13)q_u \quad (2)$$

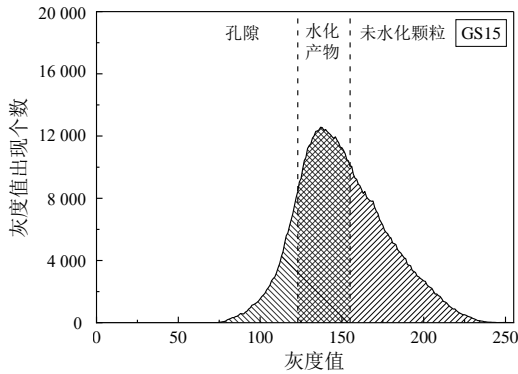
2.4 微观机理

通过对 BES 图像进行物象识别分析,得到灰度直方图,如图 5 所示。

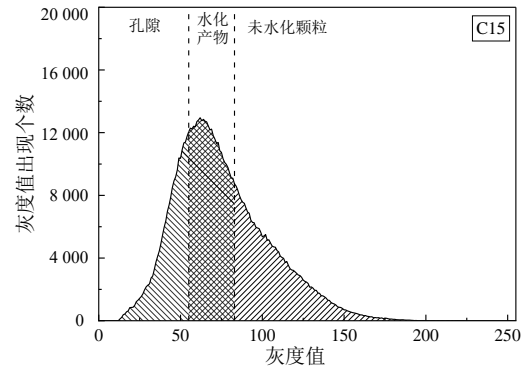
图中 GS 固化土和水泥土灰度分布的主峰为水

化产物,GS 固化土还有两个较小的未水化颗粒以及孔隙分布峰,但是基本不太明显,而水泥土仅有一个灰度峰,各个物相识别之间的灰度界限不清晰。

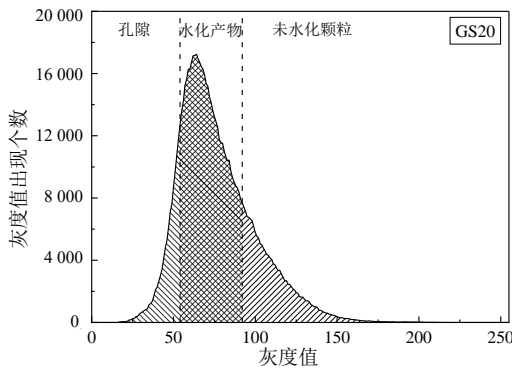
水泥固化土的水化反应不够明显,使得生成的水化产物不够多,从而造成了 BSE 成像过程中信号的相对均匀的反射。GS 固化土的水化产物含量明显高于水泥土,孔隙含量相对较低。



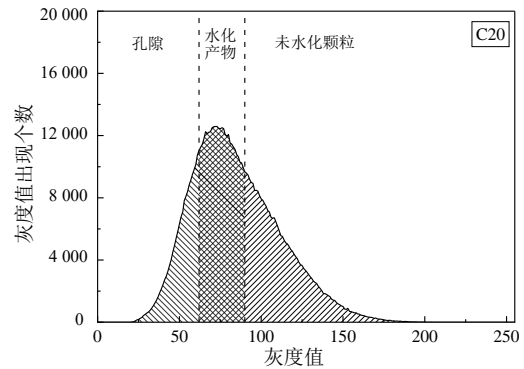
(a) GS15



(b) C15



(c) GS20



(d) C20

图 5 固化土灰度分布直方图

Fig. 5 Gray histogram of solidified soil

3 结论

本文以香港某工程海底淤泥为加固对象,对比分析了 GS 固化剂和水泥的掺量、龄期对固化土无侧限抗压强度的影响以及其微观机理。得到的主要结论如下:

(1) GS 固化土表现为应变软化规律。固化土无侧限抗压强度随龄期增加,增长速率逐渐减小。相同龄期和掺量下,GS 固化土与水泥土的无侧限抗压强度比在 2.03~2.81。

(2) 加固土的无侧限抗压强度 q_u 与弹性模量 E_{50} 存在线性相关关系,GS 固化土 E_{50} 与 q_u 的关系

与水泥土基本一致。

(3) 与水泥土相比,GS 固化土的水化产物含量明显更高,水化程度好,孔隙含量相对较低,结构更加稳定。

参考文献

- [1] 杨玉婷,黄英,金克盛,等.水泥加固红土的受力特性及其微结构特征[J].水文地质工程地质,2012,39(4):80-87.
YANG Yu-ting, HUANG Ying, JIN Ke-sheng, et al. Mechanical properties and microstructure of laterite reinforced with cement[J]. Hydrogeology and Engineering

- Geology, 2012, 39(4): 80–87.
- [2] 王许诺, 杨平, 鲍俊安, 等. 冻结水泥土无侧限抗压试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(3): 79–83.
WANG Xu-nuo, YANG Ping, BAO Jun-an, et al. Experimental study on unconfined compression of frozen soil-cement[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2013, 40(3): 79–83.
- [3] JIA Y S, XIE J. A novel soft soil curing agent using waste residue[J]. Advances in Cement Research, 2015, 27(1): 22–27.
- [4] BIBAK H, KHAZAEI J, MOAYEDI H. Investigating the effect of a new industrial waste on strengthening the soft clayey soil[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2020, 38(2): 1165–1183.
- [5] 方祥位, 孙树国, 陈正汉, 等. GT 型土壤固化剂改良土的工程特性研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1545–1549.
FANG Xiang-wei, SUN Shu-guo, CHEN Zheng-han, et al. Study on engineering properties of improved soil by GT soil firming agent[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(9): 1545–1549.
- [6] 张沈裔, 康明, 胡家栋. GS 土体硬化剂对软土地基土壤加固土力学性能影响的研究[J]. 工程建设与设计, 2020(14): 56–58.
ZHANG Shen-yi, KANG Ming, HU Jia-dong. Study on the effect of GS soil stabilizer on the mechanical properties of reinforced soils of soft soil foundation[J]. Construction & Design for Project, 2020(14): 56–58.
- [7] 陈鑫, 俞峰, 洪哲明, 等. 新型 GS 固化土与水泥土的力学特性对比研究[J/OL]. 工程地质学报: 1–11[2022-01-19]. DOI:10.13544/j.cnki.jeg.2020–172.
CHEN Xin, YU Feng, HONG Zhe-ming, et al. A comparable study on the mechanical properties of soils stabilized by GS agent and cement[J/OL]. Journal of Engineering Geology: 1–11[2022-01-19]. DOI:10.13544/j.cnki.jeg.2020–172.
- [8] 叶观宝, 康帅, 张振, 等. 新型固化剂搅拌桩桩身质量试验研究[J]. 低温建筑技术, 2015, 37(12): 119–122.
YE Guan-bao, KANG Shuai, ZHANG Zhen, et al. Experimental study on pile quality of new type hardener mixing pile[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2015, 37(12): 119–122.
- [9] YE G B, SHU H, ZHANG Z, et al. Solidification and field assessment of soft soil stabilized by a waste-based binder using deep mixing method[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(6): 5061–5074.
- [10] 董邑宁, 徐日庆, 龚晓南. 固化剂 ZDYT-1 加固土试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 472–475.
DONG Yi-ning, XU Ri-qing, GONG Xiao-nan. The experimental research of the clay stabilized with solidified agent ZDYT-1[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 472–475.