

新型土体固化剂加固海底淤泥力学特性研究

李光耀, 张 振, 叶观宝, 单卫良, 舒 欢

Mechanical characteristics of submarine silt stabilized by a novel agent

LI Guangyao, ZHANG Zhen, YE Guanbao, SHAN Weiliang, and SHU Huan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202201039>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

电镀场地重金属铬污染土固化率及稳定性研究

A study of the curing rate and stability of heavy metal chromium contaminated soil at electroplating sites

王露艳, 刘干斌, 周晔, 陈航, 陈斌 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 183-189

侵蚀环境中碱渣-矿渣固化淤泥的力学性质

Mechanical properties of the soft soil stabilized with soda residue and ground granulated blast furnace slag under the erosion environment

何俊, 栗志翔, 石小康, 王小琦 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 83-89

含裂隙膨胀土无侧限抗压强度特征试验研究

An experimental study of the unconfined compressive strength characteristics of the expansive soil with cracks

李关洋, 顾凯, 王翔, 施斌 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 62-70

稻壳灰-地聚物固化土力学特性及机理分析

Mechanical properties and mechanism analyses of rice husk ash geopolymer solidified soil

易富, 管茂成, 李军, 杜常博 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 94-101

粉煤灰基地聚物加固土的强度及抗冻融性能试验研究

Laboratory investigation on the strength and freezing-thawing resistance of fly ash based geopolymer stabilized soil

陈忠清, 朱泽威, 吕越 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 100-108

冻融循环作用下黄土无侧限抗压强度和微观规律的试验研究

Effect of freezing-thawing cycles on mechanical properties and microscopic mechanisms of loess

刘乐青, 张吾渝, 张丙印, 谷遇溪, 解邦龙 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 109-115



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202201039

李光耀, 张振, 叶观宝, 等. 新型土体固化剂加固海底淤泥力学特性研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 106-111.

LI Guangyao, ZHANG Zhen, YE Guanbao, *et al.* Mechanical characteristics of submarine silt stabilized by a novel agent[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 106-111.

新型土体固化剂加固海底淤泥力学特性研究

李光耀¹, 张 振¹, 叶观宝¹, 单卫良², 舒 欢³

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 上海宝粉材料科技有限公司, 上海 200000; 3. 金茂苏皖企业管理(天津)有限公司, 江苏 南京 210003)

摘要: 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。GS 固化剂是一种以工业固废为主要原料的适用于软土加固的绿色固化材料。本文开展了 GS 固化剂加固海底淤泥的应用研究。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。研究表明, 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 ~ 2.91。同时, 建立了回归模型, 提出了 GS 固化剂加固海底淤泥的强度预测方法。研究成果有助于指导工业固废的资源化处置和建筑行业绿色发展。

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: TU411.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)05-0106-06

Mechanical characteristics of submarine silt stabilized by a novel agent

LI Guangyao¹, ZHANG Zhen¹, YE Guanbao¹, SHAN Weiliang², SHU Huan³

(1. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Baofen Material Technology Co. Ltd., Shanghai 200000, China; 3. Jinmao Jiangsu Anhui Enterprise Management (Tianjin) Co. Ltd., Nanjing, Jiangsu 210003, China)

Abstract: Due to the special soil properties of submarine silt, studies of its stabilization are still in its infancy. GS (Gypsum-Slag) agent is a novel green agent for stabilizing soft soil, which is produced mainly based on industrial solid wastes. This paper presents an application study of GS agent for stabilizing submarine silt. The submarine silt was sampled from a certain project in Hongkong. Unconfined compressive test is conducted to investigate the influence of binder content and curing age on the stabilized soil by GS agent and ordinary cement. The results show that as compared with ordinary cement, the GS agent stabilized soil has higher early strength and faster growth rate, with a strength improvement ratio ranging from 2.03 to 2.91. The regression model is established and the strength prediction method of submarine silt stabilized by GS agent is proposed. The research results are beneficial to guide the resource utilization of industrial solid waste and green development of construction industry.

Keywords: GS agent; submarine silt; unconfined compressive strength; industrial solid waste; soil stabilization

收稿日期: 2022-01-21; 修订日期: 2022-03-09

投稿网址: www.swdzgdz.com

第一作者: 李光耀(1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事软基处理研究。E-mail: 2032255@tongji.edu.cn

通讯作者: 张振(1984-), 男, 工学博士, 副教授, 主要从事软基处理与教学科研工作。E-mail: zhenzhang@tongji.edu.cn

将化学固化剂与土体进行原位或异位搅拌形成固化土可有效改善土体工程性质,如提高土体的强度和抗渗性能、减少土体变形^[1-2]。迄今为止,水泥仍是最常用的土体固化剂^[3-4]。然而,水泥工业不仅需要消耗大量石灰石和黏土等自然资源,而且生成过程中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了以工业固废为主的原料,这是将工业固废充分资源化利用的有效途径^[5-6]。方祥位等^[7]研究了 GT 型土体固化剂在加固土体时的工程性质。Sun 等^[5]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。王子帅等^[8]通过相关试验对工业废渣协同水泥加固土体的抗硫酸盐侵蚀性能进行了研究。张小芳等^[9]研究揭示了水泥-矿渣-粉煤灰的固化机理。

GS 固化剂是一种以炼钢产生的工业废渣为主要原料(固废质量分数达 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,并已成功应用于工程实践中^[10-11]。叶观宝等^[12]、Ye 等^[13]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。随着我国海洋强国战略的实施,基础设施建设也向海洋进军。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。

本文开展了 GS 固化剂加固海底淤泥的应用研究。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,并建立了回归模型,提出了 GS 固化剂加固海底淤泥的强度预测方法。

1 试验材料及方案

1.1 试验材料

试验用土取自香港某工程海相沉积土(海底淤泥),现场取土、密封管密封后运输至实验室。土样呈流塑状态,含水量高,灰黑色,含有很少量的细砂并夹杂着一些贝壳碎片,有异味。其主要物理力学和化学参数指标见表 1。试验采用 GS 固化剂和 P·O42.5 水泥作为土体固化剂,两者的主要性能指标见表 2。

1.2 试验方案与试验步骤

采用无侧限抗压强度试验研究固化剂掺量和龄

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 ⁻¹)	0.891
有机质质量分数/%	2.0
硫酸盐质量分数/%	0.06
水溶性硫酸盐质量分数/%	0.17
水溶性氯化物质量分数/%	0.42
pH 值	7.6
碳酸盐质量分数/%	1.33

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	04:34	02:10
终凝时间	06:36	03:10
安定性	合格	合格
标准稠度/%	25.8	-
相对密度/%	2.99	-
比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)	489	-
SO ₂ /%	-	2.25
烧失量/%	-	1.07
MgO/%	-	2.27
抗压强度/MPa	3 d: 22.7 28 d: 41.2	3 d: 26.7 28 d: 48.9

期对固化土加固效果的影响。依据《水泥土配合比设计规程》(JGJ/T 233—2011)^[14],一般工程中固化剂的掺量在 10%~20%,因此试验中 GS 固化剂和水泥的掺量选择 10%、15%、20%,试验龄期选择 14, 28, 56, 90 d。参考工程实践,并通过室内流动度试验,水灰比确定为 1.0。

将试验土风干、人工捣碎、过 5 mm 筛网,使用搅拌棒将过筛后的土粉与指定的固化剂(GS 固化剂或水泥)充分混合,添加所需的水到混合物中并用电动搅拌机快慢交替搅拌 10 min 后,将浆液倒入 50 mm×50 mm×50 mm 的立方体试件模具中,放在振动台上振动密实去除气泡和气穴,振动密实后的固化土混合料应高出试模的上部沿口;试模上部沿口多余的固化土用刮刀刮除并抹平,然后盖上塑料薄膜。试块应在成

型 24 h 后利用在试模底部留出的气孔处使用气枪拆模,放入养护室(室温 $25\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和湿度大于 95%)中养护到所需要的龄期(14, 28, 56, 90 d)。

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 0.15 kN/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,GS10-14d 即为 GS 固化剂掺量 10%、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 1 为不同龄期下固化土的应力-应变曲线。由图 1 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)。同时,在龄期较小时(14, 28 d),固化土需应变增至 $4\% \sim 5\%$ 达到峰值应力,且峰值后的残余阶段应力下降幅度较小且平缓;随着龄期的增长,固化效果逐渐显著,试样在应变 $2\% \sim 3\%$ 达到峰值应力,且峰值后的残余阶段应力大幅快速下降。在相同的固化剂掺量下,随着龄期增长固化土趋于脆性破坏。从图中可知,GS 固化土强度明显高于水泥土。

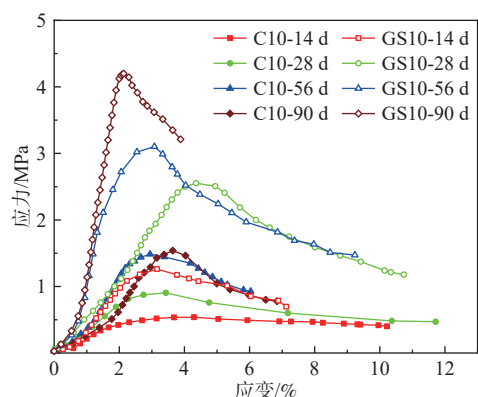
2.2 无侧限抗压强度

图 2 为固化土无侧限抗压强度随龄期和固化剂掺量的变化曲线。由图 2(a)可知,2 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。如图 2(b)所示,GS 固化土的无侧限抗压强度随掺量的增加逐渐增大,增长趋势与水泥土类似,但增长速率更大。

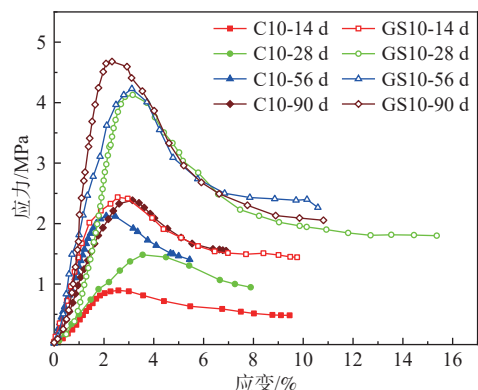
为进一步分析 GS 固化剂的加固效果,计算相同龄期、相同掺量下,GS 固化土与水泥土的无侧限抗压强度比。从表 3 可知,强度提高比在 $2.03 \sim 2.91$ 之间。通过以上分析表明,GS 固化剂加固海底淤泥的早期强度高、强度增长快,达到相同强度用量更少,其加固效果优于水泥。

2.3 弹性模量

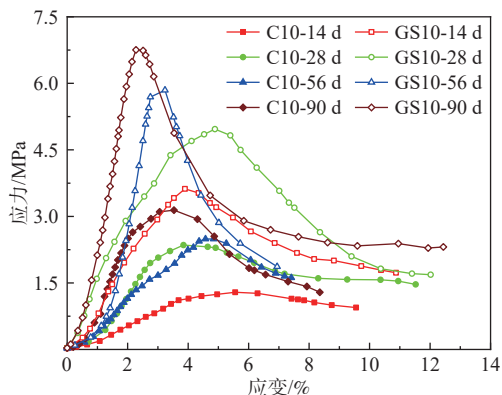
无论是水泥土还是 GS 固化土,应力-应变曲线都



(a) 固化剂掺量10%



(b) 固化剂掺量15%



(c) 固化剂掺量20%

图 1 不同固化剂掺量下固化土应力-应变关系曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of the stabilized soil in different binder contents

表现为非线性,通常取 E_{50} ,即原点与无侧限抗压强度的一半的连线斜率评价固化土的弹性模量。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^[15]。如图 3 所示,2 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、下限范围如式(1)(2)所示。GS 固化土 E_{50} 与 q_u 的关系与水泥土基本一致。

水泥土:

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

GS 固化土:

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

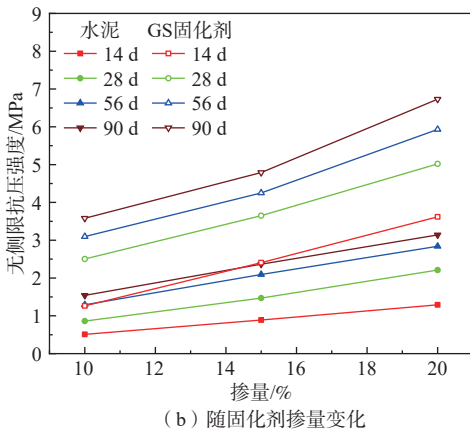
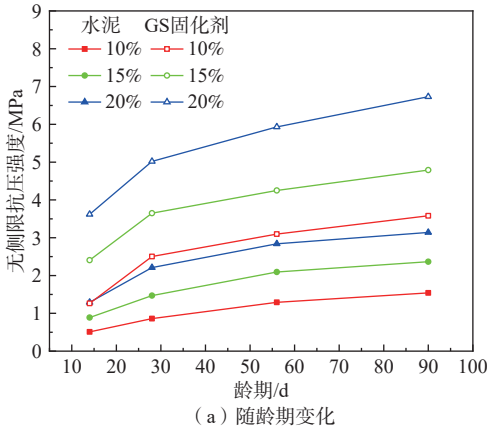


图 2 无侧限抗压强度变化规律

Fig. 2 Changes of the unconfined compressive strength

表 3 无侧限抗压强度提高比

Table 3 Improvement ratio of the unconfined compressive strength

龄期/d	掺量/%		
	10	15	20
14	2.47	2.71	2.81
28	2.91	2.78	2.18
56	2.17	2.03	2.38
90	2.71	1.97	2.14

3 力学性能预测方法

3.1 方法的建立

已有文献及经验公式表明^[16-17], 2 个不同条件下的水泥土无侧限抗压强度之比与其龄期之比和掺量之比呈幂函数的关系:

$$(q_{u1}/q_{u2}) = (a_{w1}/a_{w2})^\alpha \cdot (T_1/T_2)^\beta \quad (3)$$

式中: q_u ——无侧限抗压强度;

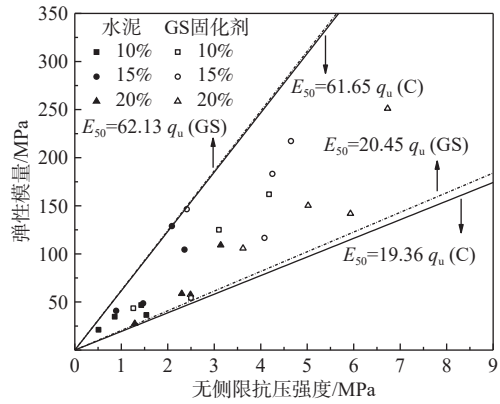


图 3 弹性模量与无侧限抗压强度关系

Fig. 3 Relationship between the elastic modulus and unconfined compressive strength

a_w ——固化剂掺量;

T ——龄期, 下标 1 和 2 表示 2 种条件;

α, β ——待确定的参数。

由前文可知, GS 固化土和水泥土的无侧限抗压强度曲线关系变化趋势一致, 本文通过对式(3)取两边的自然对数转换为线性函数等式之后, 使用线性拟合确定参数 α 和 β 分别为 1.08 和 0.40, 相关系数为 0.96。图 4 为线性拟合结果。

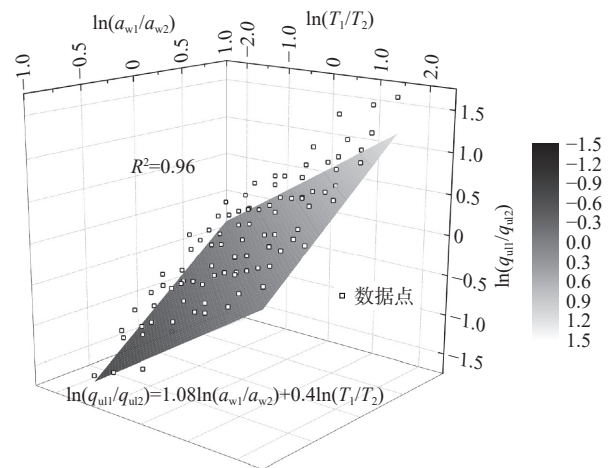


图 4 无侧限抗压强度的数据拟合结果

Fig. 4 Fitting results of the unconfined compressive strength

为在实际工程中便于设计使用, 将式(2)转换为图 5 所示的设计图表。当已知某特定掺量和龄期的 GS 固化土无侧限抗压强度时, 可根据以下步骤快速预测任一掺量和龄期的 GS 固化土无侧限抗压强度:

步骤 1: 从实验室试验或先前的研究中获得 GS 固化剂掺量为 a_{w2} 、龄期为 T_2 的 GS 固化土的 q_{u2} 。

步骤 2: 根据设计要求, 确定考查龄期 T_1 , 初步确定 GS 固化土的设计掺量 a_{w1} 。

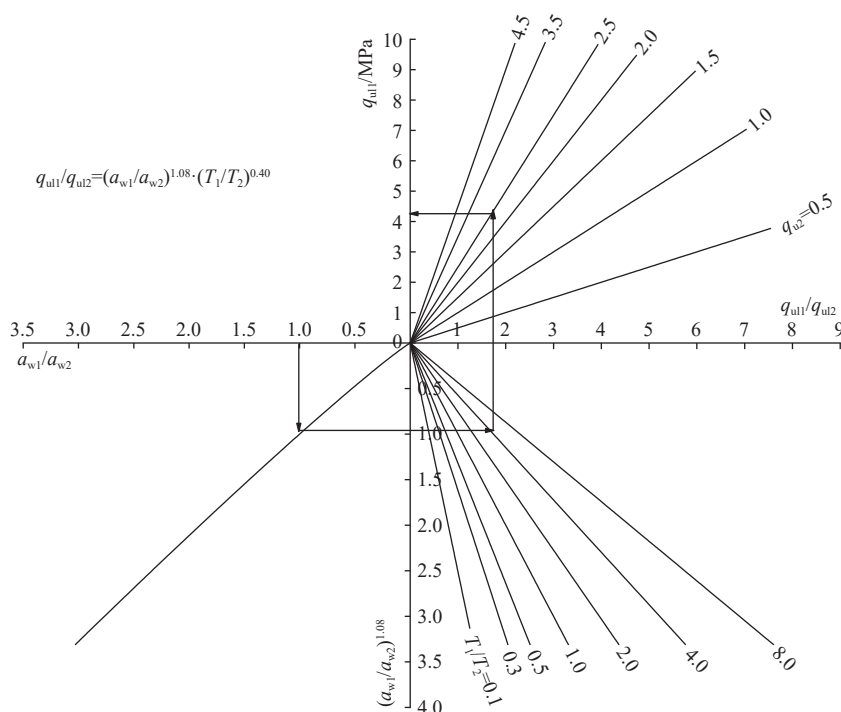


图 5 设计图表
Fig. 5 Design chart

步骤 3: 计算 a_{w1}/a_{w2} 和 T_1/T_2 。

步骤 4: 借助设计图表(图 5), 计算 q_{u1} 。

步骤 5: 如不满足设计的强度要求, 改变固化剂掺量, 重复步骤 2~4。

3.2 方法的验证与应用

由图 6 可知, 预测的无侧限抗压强度与试验值均在 45°线附近, 说明式(3)的预测结果具有较好的可靠性。

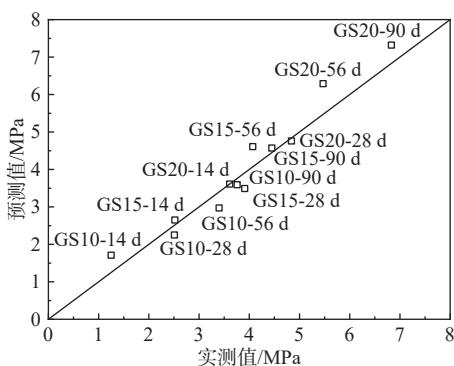


图 6 计算结果与实测结果对比

Fig. 6 Comparison of the predicted and measured values

根据试验结果, 已知龄期 14d、掺量 15% 的 GS 固化土无侧限抗压强度 q_{u2} 为 2.41 MPa。如采用设计图法预测龄期为 56d、掺量为 15% 的 GS 固化土无侧限抗压强度 q_{u1} , 通过设计图可以得到 q_{u1} 为 4.25 MPa。

将 $a_{w1}=15\%$ 、 $a_{w2}=15\%$ 、 $T_1=56$ d、 $T_2=14$ d、 $q_{u1}=2.41$ MPa 代入式(3)中, 计算得到 q_{u1} 为 4.20 MPa。因此, 借助设计图可快速地确定 GS 固化土的无侧限抗压强度。

4 结论

(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, 随掺量增加强度呈线性增加。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 2.03~2.91。

(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)通过建立回归模型提出了 GS 固化剂加固海底淤泥的强度预测方法, 并绘制了设计图, 通过与试验数据对比验证了方法的可靠性。借助设计图可快速地确定 GS 固化土的无侧限抗压强度。

参考文献 (References) :

[1] 苏群, 徐渊博, 张复实. 国际以及国内土壤固化剂的研究现状和前景展望 [J]. 黑龙江工程学院学报, 2005, 19(3): 1-4. [SU Qun, XU Yuanbo, ZHANG Fushi. The present research and foreground expectation of soil stabilizer[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Technology, 2005, 19(3): 1-4. (in Chinese with English

- abstract)]
- [2] 许军, 汪展翅, 易卫锋, 等. 新型聚合物固化剂工程防护性能试验研究[J]. 公路, 2018, 63(12): 252 - 257. [XU Jun, WANG Zhanchi, YI Weifeng, et al. Experimental study on engineering protection performance of new polymer hardener[J]. Highway, 2018, 63(12): 252 - 257. (in Chinese)]
- [3] 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 Yuting, HUANG Ying, JIN Kesheng, et al. Mechanical properties and micro-structure characteristic of laterite mixed with cement[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(4): 80 - 87. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 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 Xunuo, YANG Ping, BAO Junan, et al. Test research on unconfined compressive strength of freezing cement soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(3): 79 - 83. (in Chinese with English abstract)]
- [5] SUN J Y, XIE J L. A novel soft soil curing agent using waste residue[J]. *Advances in Cement Research*, 2015, 27(1): 22 - 27.
- [6] 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.
- [7] 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 - 1548. [FANG Xiangwei, SUN Shuguo, CHEN Zhenghan, et al. Study on engineering properties of improved soil by GT soil firming agent[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(9): 1545 - 1548. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 王子帅, 王东星. 工业废渣-水泥协同固化土抗硫酸盐侵蚀性能[J/OL]. 岩土工程学报, (2021-12-24) [2022-01-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20211213.0918.002.htm>. [WANG Zishuai, WANG Dongxing. Performance of industrial residue-cement solidified soils in resisting sulfate erosion[J/OL]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, (2021-12-24) [2022-01-15]. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 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/OL]. 工程地质学报, (2020-12-30) [2022-01-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/10.13544/j.cnki.jeg.2020-378>. [ZHANG Xiaofang, CHEN Ruimin, JIAN Wenbin. Study on water conversion law and solidification mechanism of cement-slag-fly ash solidified silt[J/OL]. *Journal of Engineering Geology*, (2020-12-30) [2022-01-15]. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 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 Shenyi, KANG Ming, HU Jiadong. Study on the effect of GS soil stabilizer on the mechanical properties of reinforced soils of soft soil foundation[J]. *Construction & Design for Engineering*, 2020(14): 56 - 58. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 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, (2020-09-09) [2022-01-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/10.13544/j.cnki.jeg.2020-172>. [CHEN Xin, YU Feng, HONG Zheming, et al. A Comparable study on the mechanical properties of soils stabilized by GS agent and cement [J/OL]. *Journal of Engineering Geology*, (2020-09-09) [2022-01-15]. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 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 Guanbao, 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. (in Chinese)]
- [13] 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.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 水泥土配合比设计规程: JGJ/T 233—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Specification for mix proportion design of cement soil: JGJ/T 233—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)]
- [15] 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 Yining, XU Riqing, GONG Xiaonan. The experimental research of the clay stabilized with solidified agent ZDYT-1[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(4): 472 - 475. (in Chinese with English abstract)]
- [16] TAN T S, GOH T L, YONG K Y. Properties of Singapore marine clays improved by cement mixing[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2002, 25(4): 422-433.
- [17] YAO K, PAN Y T, JIA L, et al. Strength evaluation of marine clay stabilized by cementitious binder[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2020, 38(6): 730 - 743.