

# CaO-GGBS 固化土压缩特性的试验研究

徐家俊<sup>1,2</sup>, 傅勇<sup>1,2\*</sup>, 陈洋彬<sup>1,2</sup>

(1. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511458; 2. 南方科技大学 海洋科学与工程系, 广东 深圳 518055)

**摘要:** 地基处理化学固化法如水泥土搅拌法已经被广泛应用到实际工程中, 研发绿色、低碳、环保的新型胶凝材料来部分或完全取代水泥, 对于实现“碳中和·碳达峰”目标具有重要意义。本文通过一维固结压缩试验, 探究了初始含水量、固化材料类型及其掺量、掺砂率以及养护时间等因素对生石灰激发粒化高炉矿渣(生石灰-CaO, 粒化高炉矿渣-Ground granulated blastfurnace slag, GGBS)固化土和水泥(Portland cement, PC)固化土压缩特性的影响规律。研究发现, CaO-GGBS 固化土与水泥土类似, 具有明显的结构性, 存在明显的结构屈服点和屈服应力, 当竖向压力小于屈服应力时固化土的压缩性很小, 而当压力超过屈服应力时其压缩性会突增, 转变为高压压缩性土体。CaO-GGBS 固化土的屈服应力随着初始含水量的降低、固化材料掺量和养护龄期的增加而逐渐增大。CaO-GGBS 对于高含水量软土的固化效果优于水泥。

**关键词:** 化学固化法; 碱激发材料; CaO-GGBS 固化土; 结构屈服应力; 压缩特性

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)S-0014-08

## Experimental study of compressibility characteristic of CaO-GGBS stabilized soil

XU Jia-jun<sup>1,2</sup>, FU Yong<sup>1,2\*</sup>, CHEN Yang-bin<sup>1,2</sup>

(1. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, Guangdong, China;

2. Department of Ocean Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, Guangdong, China)

**Abstract:** Chemical stabilization method of ground treatment, such as cement-soil mixing method, has been widely used in practical engineering. It is of great significance to develop green, low-carbon and environment-friendly new cementing materials to partially or completely replace cement in soil stabilization to achieve the goal of “carbon neutrality · carbon peak”. This study conducted a series of one-dimensional consolidation compression tests to investigate the influence of initial water content, type and dosage of cementing material, sand mixing rate and curing time on the compression characteristics of stabilized soils. It is found that CaO-activated Ground granulated blastfurnace slag (GGBS) stabilized soil is similar to Portland cement (PC) stabilized soil in that it has obvious structural yield point and yield stress. When the vertical stress is smaller than the yield stress, the compressibility of CaO-GGBS stabilized soil is very small, while when exceeding the yield stress, the compressibility of CaO-GGBS stabilized soil would increase rapidly with high compressibility performance. The decrease of initial water content, the increase of cementing material content and the curing age would lead to the increase in the yield stress of CaO-GGBS stabilized soil. The curing effect of CaO-GGBS on soft soil is better than that of cement.

**Key words:** chemical stabilization method; alkali-activated materials; CaO-GGBS stabilized soil; structural yield stress; compression characteristic

## 0 引言

我国沿海地区存在大量地质不良的软土如淤泥

质土, 而软土地基一直以来都是基础设施建设的主要挑战之一。近年来, 随着我国经济建设的飞速发展, 对沿海地区的港口码头、公路、铁道及机场等

收稿日期: 2022-02-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52001157)。

作者简介: 徐家俊(1996—), 男, 广东清远人, 硕士研究生, 主要从事软土化学加固方面的研究工作。E-mail: 2372389228@qq.com。

\*通信作者: 傅勇(1987—), 男, 广东深圳人, 博士, 助理教授, 主要从事海洋岩土工程方面的研究工作。E-mail: fuy3@sustech.edu.cn。

重大基础设施的建设需求逐年增加。因此软土地基处理技术也得到了快速发展, 化学固化法为其中一种常见的软土加固改良方法。采用化学固化法对天然软土和疏浚淤泥等进行固化改良时, 目前使用最广泛的固化材料为低成本及性能稳定的普通硅酸盐水泥<sup>[1-3]</sup>, 但是水泥在其生产过程中存在严重的环境问题, 主要表现在: (1) 自然矿产资源和能源消耗巨大; (2) 二氧化碳排放量大。除此之外, 生产硅酸盐水泥的过程中, 还会排放大量的粉尘、烟尘以及二氧化硫、氮氧化物等污染物, 对自然环境造成严重污染<sup>[4]</sup>。在“碳中和·碳达峰”时代背景下, 研发绿色、低碳、环保的新型胶凝材料来部分或完全取代水泥意义重大。

全球工业化进程的加速推进产生了大量的工业副产品, 如高炉矿渣和粉煤灰等, 如何高效处置这些工业副产品已经成为全球研究热点。碱激发胶凝材料是指具有潜在活性的原材料在碱激发剂激发下形成的具有与硅酸盐水泥类似, 水硬活性的胶凝材料, 是当前绿色建材最重要的研究内容之一<sup>[5-6]</sup>。目前国内外学者对碱激发材料开展了许多研究工作。PURDON<sup>[7]</sup>进行了矿渣和碱激发剂组成的碱激发水泥的研究, 推进了该方法的商业化。随后, DAVIDOVITS<sup>[8]</sup>推广了偏高岭土基碱激发材料在工程中的应用。近些年, 学者们深入地探究了碱激发矿渣的水化反应、强度发展及其内在机理<sup>[9-10]</sup>, 进一步促进了碱激发矿渣在工程中的应用。

此外, 碱激发矿渣也逐渐被应用于软土的固化处理中, 并取得了较好的固化效果。采用石灰和 GGBS 的混合物对含硫土体进行固化处理时, 石灰能够有效激发 GGBS 的活性, 促进胶凝产物的生成, 同时可以抑制膨胀性钙矾石的生成, 显著降低固化土的膨胀量, 有效提高其力学强度<sup>[11-12]</sup>。易耀林等<sup>[4]</sup>指出 NaOH-GGBS 对海相软土的固化效果最优, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-GGBS 的固化效果次之。另外, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、NaOH 和 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 均可促进电石渣-矿渣固化效果的发挥, 可以改良固化土的长期强度<sup>[4,13]</sup>。相较于强碱等溶液 (具有成本高、腐蚀性强等特点), 石灰、电石渣以及活性氧化镁 (MgO) 等固体物质激发剂具有更好的适用性和经济价值, 有助于推广碱激发材料在软土化学固化中的应用。GGBS 自身的水化反应活性较低, 但在石灰或电石渣营造的碱性环境其活性会被激活, 从而可以快速生成更多的胶凝产物, 提高固化土的力学强度<sup>[14]</sup>。于博伟等<sup>[15]</sup>和 YU 等<sup>[16]</sup>则发现: 与水泥土相比

MgO-GGBS 固化土在硫酸钠溶液浸泡后具有更好的表面完整性、更小的质量损失和更高的抗压强度。

综上, CaO-GGBS 是一种低碳环保的新型材料, 将其应用于软土固化处理中可以有效降低能耗, 减少 CO<sub>2</sub> 排放。目前关于 CaO-GGBS 固化土的研究主要集中在力学强度及微观结构等方面, 对于其压缩特性研究较少, 土体的压缩特性作为主要的力学性能指标之一, 具有较高的研究价值, 因此亟须开展 CaO-GGBS 固化土压缩特性相关研究。

本文选取了 CaO-GGBS 和水泥两种固化材料, 开展了一系列一维固结压缩试验, 探究初始含水量、固化材料的类型及其掺量、掺砂率和养护龄期等因素对固化土压缩特性的影响。此外, 基于成本、能耗和碳排放量 3 个方面, 本文对这两种固化方法的经济性和环保性进行了对比分析。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

本文采用马来西亚高岭土进行土样制作, 其基本物理指标见表 1。高岭土具有如下特点: (1) 组成成分均匀, 有机质含量极低, 矿物学特性稳定; (2) 阳离子交换能力低; (3) 可获取性强<sup>[15-16]</sup>。采用的粒化高炉矿渣微粉 (GGBS), 属于 S105 矿渣微粉, 实测活性约为 115; 氧化钙 (CaO) 其纯度大于 98.0%; 水泥 (PC), 其标号为硅酸盐水泥 PI 52.5。腐殖酸钠, 外观呈黑色, 粉末状; 细砂采用福建厦门标准砂, 其粒径级配良好。

表 1 高岭土的基本特性

Table 1 Properties of kaolin

液限 wL/%	塑限 wP/%	比重/ G <sub>s</sub>	内摩擦角 φ/(°)	有效重度 γ' (kN/cm <sup>3</sup> )
80.0	35.0	2.60	23	6.0

### 1.2 试验方法

固化土试样制备的主要过程如下: (1) 分别称取预先计算好的高岭土、腐殖酸钠、水、固化材料等; (2) 将高岭土、腐殖酸钠和水混合, 采用室内小型搅拌机搅拌 30 min, 然后静置 30 min; (3) 加入固化材料, 使用搅拌机搅拌 10 min; (4) 将搅拌均匀的固化土拌合物装入直径为 50 mm、高度为 20 mm 的环刀内, 使用插捣棒, 震捣排出试样内的气泡; (5) 将试样置于密封养护袋中内养护至预定的龄期, 养护条件为室内温度 (24 °C)、封闭的湿

润环境。所制备的一维固结压缩试样如图 1 所示。

本文主要考虑的影响因素包括：初始含水量、固化材料的类型及其掺量、掺砂率和养护龄期等。具体方案见表 2。一维固结压缩仪器如图 2 所示，为常规重力加载式固结仪。若采用常规固结试验，每级荷载加载 24 h，加载历时周期过长，与固化土 7 d 和 14 d 的养护龄期不符，不能较好探究养护龄期对固化土压缩特性的影响。因此采用快速固结方法，邵玉芳等<sup>[17]</sup>和丁建文等<sup>[18]</sup>在探究固化土的压缩特性时，同样也采用了快速固结方法。所施加的垂直压力为 25、50、100、200、400、800、1 600 和 3 200 kPa 共 8 级，记录每级荷载 1 h 时的压缩量，其中最后一级荷载需要记录 1 h 和 24 h 的压缩量。进行固结压缩试验时同时进行两组平行试验，以降低试验操作误差以及仪器误差的影响。

表 2 试验方案  
Table 2 Testing program

固化材料	掺量/ %	初始含 水量/%	掺砂率/ %	养护时 间/d
PC	12, 14, 16	100	—	7, 14
CaO-GGBS	12, 14, 16	100	—	7, 14
CaO-GGBS	14	100	—	7, 14, 28
CaO-GGBS	14	80, 90, 100	—	7, 14
CaO-GGBS	14	100	10, 20, 30	14

注：掺量为固化材料与干土的质量百分比；掺砂率为标准砂与 CaO-GGBS 混合物的质量百分比。

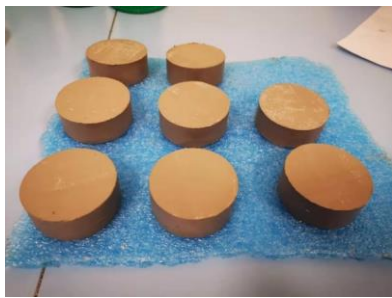


图 1 固结试样

Fig. 1 Specimens of compression test

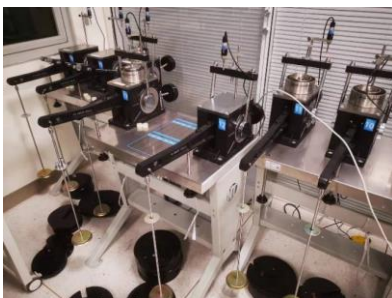


图 2 固结仪

Fig. 2 Consolidometer

## 2 试验结果与分析

### 2.1 未处理土的压缩特性

为了更好地评价化学固化法的固化效果，本文同时开展了初始含水量为 60% 的未处理高岭土的一维固结压缩试验。当含水量过高时试样呈流塑态，难以测试，因此采用了 60% 含水量。压缩曲线为土体孔隙比与竖向压力的关系曲线，是一维固结压缩试验的重要成果<sup>[18-19]</sup>。图 3 和图 4 分别展示了未固化高岭土的竖向压力和孔隙比的单对数  $e$ -lg $P$  曲线和双对数  $\ln(1+e)$ -lg $P$  曲线。由图可知，固化土的孔隙比随竖向固结压力的增加而大致呈线性减小趋势，并未出现显著的屈服应力，此现象有别于已有研究中固化土的压缩行为。

压缩系数  $a_c$  和压缩指数  $C_c$  常用于评价土体的压缩特性。其中压缩系数可用  $e$ - $P$  曲线的切线斜率来表征，压缩系数越大，土的压缩性越高，通常采用 100~200 kPa 范围的压缩系数来评价土体的压缩性。压缩指数则是  $e$ -lg $P$  压缩曲线上近似直线段的斜率，压缩指数越大，土体的压缩性越高。通过计算获得未固化土体的压缩系数和压缩指数分别为  $1.1 \text{ MPa}^{-1}$  和 0.343，由土的压缩性评价标准可确定该土为高压缩性土体。

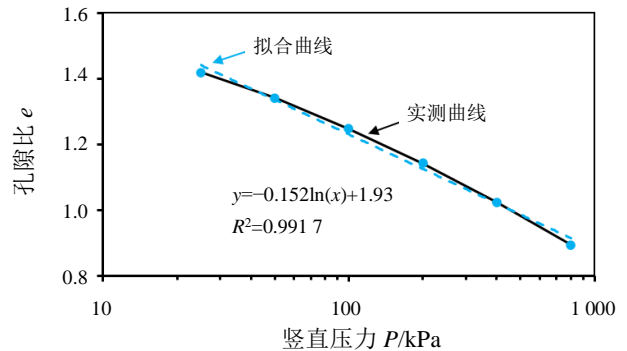


图 3 未处理土的  $e$ -lg $P$  曲线

Fig. 3  $e$ -lg $P$  curve of untreated soil

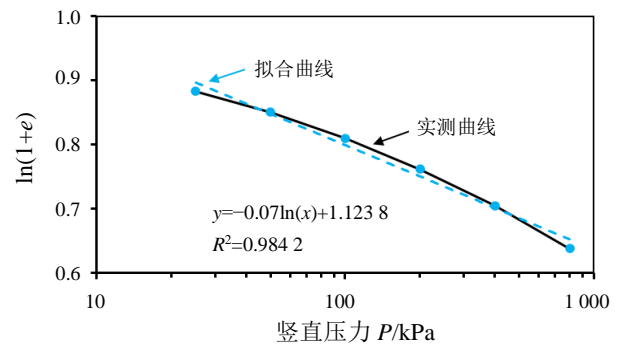


图 4 未处理土的  $\ln(1+e)$ -lg $P$  曲线

Fig. 4  $\ln(1+e)$ -lg $P$  curve of untreated soil

### 2.2 固化土的压缩特性

固化土与天然结构性土类似, 具有明显的结构屈服应力, 其屈服前阶段与屈服后阶段的力学性能具有很大差异<sup>[17-18]</sup>。BUTTERFIELD<sup>[20]</sup> 首次提出双对数压缩曲线 ( $\ln(1+e)-\lg P$  曲线) 用于确定土体的屈服应力  $P_y$ , 此后得到广泛应用<sup>[17-18]</sup>。此外, 固化土的屈服应力与无侧限抗压强度  $q_u$  存在一定的关系, 近似为  $P_y=(1.2\sim 1.3)q_u$ <sup>[18]</sup>。本研究中每组两个平行试验得到的结果大致相同, 因此在后续分析中仅取其一进行分析。

#### (1) 初始含水量的影响

初始含水量对土体的初始状态具有重要影响, 对其固化改良处理的成本影响较大。本部分采用 14% 掺量的 CaO-GGBS, 主要研究 80%、90% 及 100% 初始含水量对固化土压缩性的影响。

图 5 和图 6 分别展示了养护龄期为 7 d 和 14 d 龄期时不同初始含水量下的双对数压缩曲线。由图可知, 未固化软土压缩曲线基本呈一条直线, 而固化土的压缩曲线由两段斜率不同的直线组成, 两直线的交点即为土体的结构屈服点, 对应的应力为屈服应力  $P_y$ , 屈服点之前的直线较平缓, 屈服点之后的直线则突然变陡。由图可知, 固化土屈服前后的两段直线的斜率差异很大, 说明其压缩性在屈服前后均差异很大, 固化土在屈服前的压缩性很小, 但在屈服后骤增, 甚至比未固化处理高岭土的压缩性还大。基于  $e-\lg P$  压缩曲线, 可以得到固化土屈服前的压缩指数 (记为  $C_s$ ) 和屈服后的压缩指数 (记为  $C_c$ )。因此, 由图 7 可以得到不同含水量固化土在 14 d 养护龄期时的屈服前压缩指数  $C_s$  和屈服后压缩指数  $C_c$ 。综上, 在固化土的实际应用中, 设计时应当确保竖向压力小于其屈服应力。

固化土的结构性源自土体中生成的胶凝产物, 这些产物可起到胶结作用和填充作用。据 YI 等<sup>[21]</sup> 研究报道, CaO-GGBS 固化土的主要水化产物为水化硅酸钙和水化硫酸钙, 与水泥土的主要水化产物类似。虽然各固化土的初始含水量不一样, 但 14% 掺量的 CaO-GGBS 可产生足够的胶凝产物, 使得固化土中的土颗粒胶结在一起而形成具有结构性的土体。由图 8 可看出, 固化土的屈服应力随初始含水量增加而迅速降低, 说明固化土所能抵抗的外荷载的能力随着含水量的增加而逐渐下降, 固化土屈服前的压缩系数远小于未固化土, 说明此时为低压缩性土体, 可作为良好的地基土体。

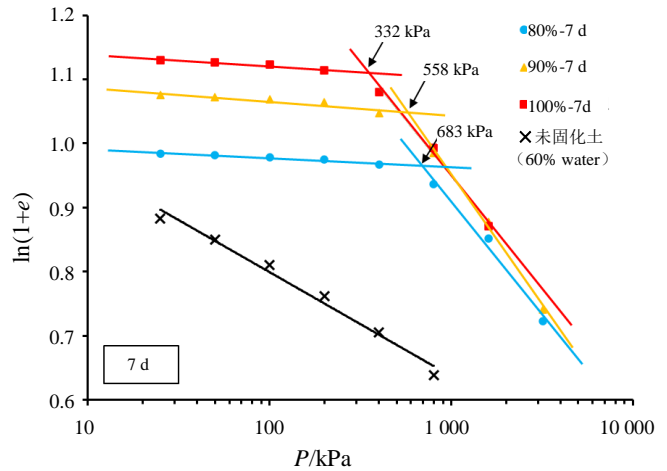


图 5 不同含水量固化土  $\ln(1+e)-\lg P$  曲线 (7 d)

Fig. 5  $\ln(1+e)-\lg P$  curve of CaO-GGBS stabilized soil with different initial water content (7 d)

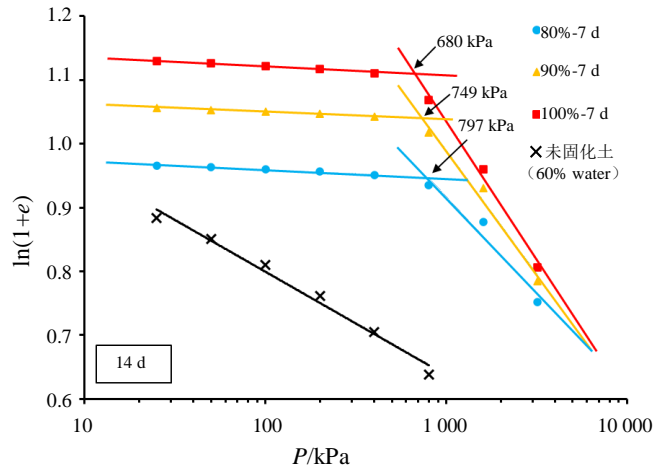


图 6 不同含水量固化土  $\ln(1+e)-\lg P$  曲线 (14 d)

Fig. 6  $\ln(1+e)-\lg P$  curve of CaO-GGBS stabilized soil with different initial water content (14 d)

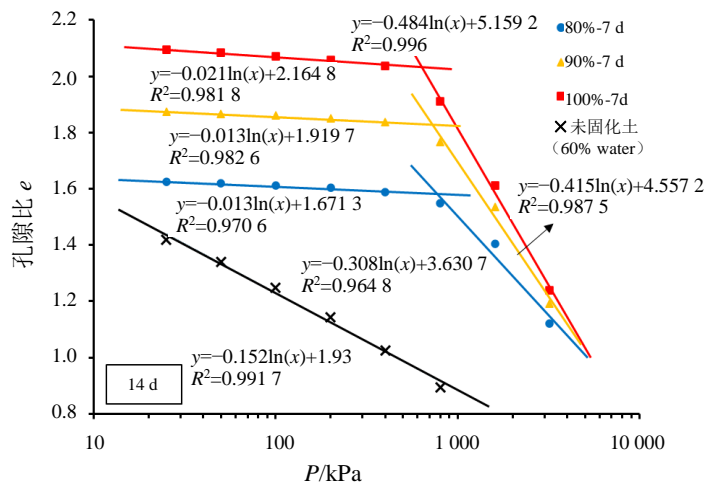


图 7 不同含水量固化土  $e-\lg P$  曲线 (14 d)

Fig. 7  $e-\lg P$  curve of CaO-GGBS stabilized soil with different initial water content (14 d)

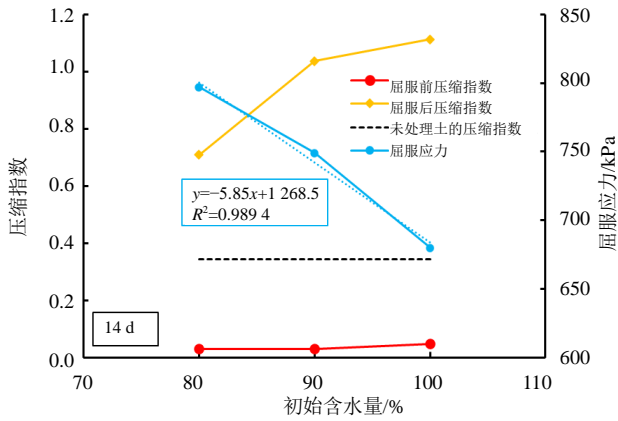


图8 含水量对屈服应力和压缩指数的影响 (14 d)

Fig. 8 Effect of water content on yield stress and compression index (14 d)

(2) 固化材料及其掺量的影响

不同固化材料水化反应生成的胶凝产物类型及其生成量具有较大差异, 因此其固化效果存在较大差异。本部分探究固化材料类型及其掺量对固化土压缩特性的影响。图9和图10分别展示了水泥土和CaO-GGBS固化土的双对数压缩曲线。由图可知, 两固化土均具有明显的结构性。采用水泥固化处理时, 随着掺量的增加, 固化土初始孔隙比逐渐降低, 屈服前压缩曲线逐渐下移, 但屈服后压缩曲线出现了相反的现象, 这与黄英豪等<sup>[3]</sup>观察到的一致。水泥土在屈服前压缩指数分布在0.03~0.06之间, 属于低压缩性土体, 随着水泥掺量增加, 屈服应力也显著增加。当采用CaO-GGBS进行固化处理时, 随着CaO-GGBS掺量增加, 固化土的初始孔隙比也会逐渐降低, 同样的屈服前的压缩曲线也会逐渐下移, 屈服前压缩指数分布在0.03~0.05之间, 属于低压缩性土体。

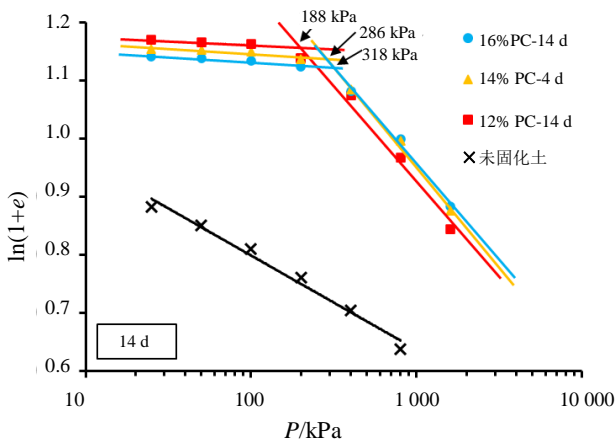


图9 不同掺量水泥土 ln(1+e)-lgP 曲线

Fig. 9 ln(1+e)-lgP curve of cemented soil with different dosage of cement

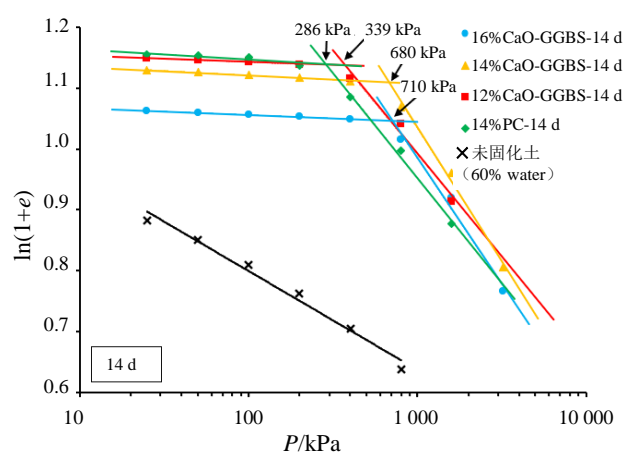


图10 不同掺量 CaO-GGBS 固化土 ln(1+e)-lgP 曲线

Fig. 10 ln(1+e)-lgP curve of CaO-GGBS stabilized soil with different dosage of CaO-GGBS

图11展示了屈服应力和压缩指数随固化材料掺量的变化规律。由图可知, 两固化土的屈服应力均随着掺量的增加而显著提高。水化反应生成的胶凝产物随着掺量的增加而增加, 进而增强了固化土的结构性, 抵抗外荷载的能力得到了相应提高。相同掺量下, CaO-GGBS 固化土的屈服应力显著高于水泥土, 屈服前压缩指数均小于水泥土, 说明CaO-GGBS 碱激发材料的固化效果优于水泥, 这与YI等<sup>[21]</sup>的结论一致。YI等<sup>[21]</sup>指出, 当CaO与GGBS比值合适时, 相同情况下, CaO-GGBS 固化土的孔隙率小于水泥土的, 且前者的无侧限抗压强度 $q_u$ 为水泥土 $q_u$ 的1.7倍。

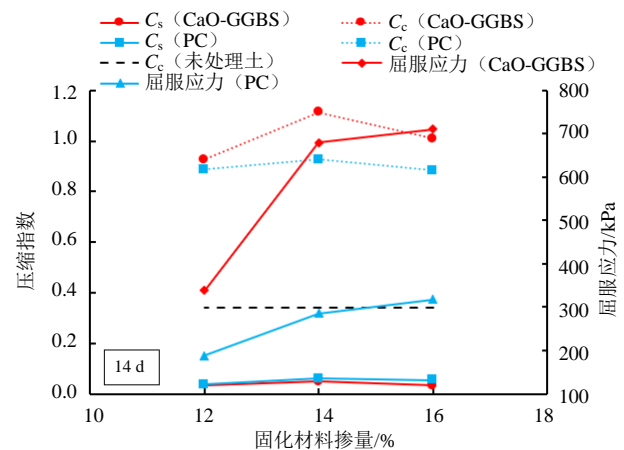


图11 固化材料及其掺量对屈服应力和压缩指数的影响

Fig. 11 Effect of dosage of cementing materials on yield stress and compression index

(3) 掺砂率的影响

石英砂作为一种来源广泛和价格低廉的掺合料, 适量的应用于化学固化法中, 可有效提高固化土的强度特性<sup>[22]</sup>。本部分探究了标准砂的掺入对CaO-GGBS 固化土压缩特性和屈服应力的影响。

图 12 展示了 14 d 养护龄期时 CaO-GGBS 固化土在不同掺砂率情况下的双对数压缩曲线。由图可知, 掺砂率高的固化土屈服前压缩曲线主要位于图形的下方。这说明随着掺砂量的增加, 固化土的含水量逐渐减小, 从而其初始孔隙比降低, 使得固化土的压缩曲线下移。含水量试验也表明随掺砂率的增加, 固化土含水量下降。由图 13 可知, 掺入标准砂对固化土屈服前压缩特性影响较小, 标准砂的掺入, 屈服应力减小, 屈服后压缩性减小。

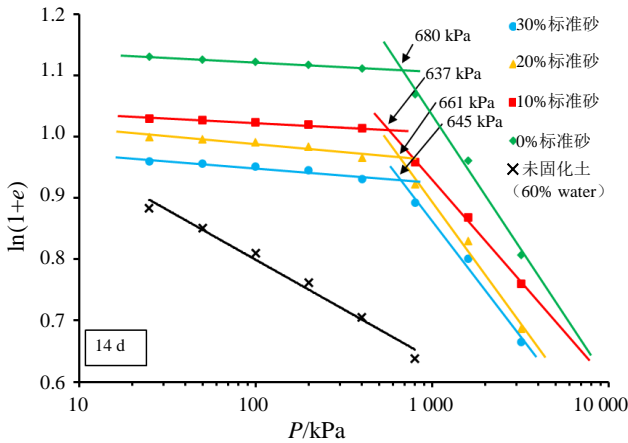


图 12 不同掺砂量 CaO-GGBS 固化土  $\ln(1+e)$ - $\lg P$  曲线  
Fig. 12  $\ln(1+e)$ - $\lg P$  curve of CaO-GGBS stabilized soil with different dosage of sand

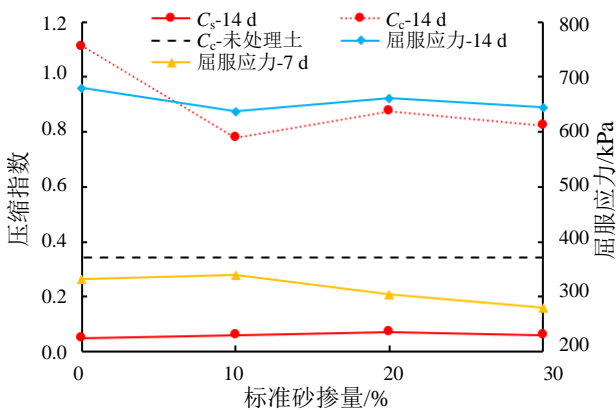


图 13 标准砂掺量对屈服应力和压缩指数的影响  
Fig. 13 Effect of standard sand content on yield stress and compression index

(4) 养护龄期对固化土压缩性的影响

向软土中加入固化材料, 可使土中低势能的自由水转向高势能的矿物和结合水, 土体发生胶结固化作用, 形成具有一定强度和稳定性的固化土, 这种水分从低势能向高势能的转化是需要时间的, 即养护时间<sup>[3]</sup>。经过一定时间的养护, CaO-GGBS 固化土会生成了大量 C-A-H 等胶凝产物。本部分选取 14% 掺量 CaO-GGBS, 对高含水量高岭土进行固化处理, 探究养护龄期对固化土压缩特性的影响。

图 14 展示了不同龄期下 CaO-GGBS 固化土的双对数压缩曲线。由图 14 可知, 不同龄期固化土在屈服前的曲线基本在同一直线上, 说明龄期对初始孔隙比影响较小, 且对屈服前的压缩指数的影响比较小。固化土屈服后的压缩曲线随着养护龄期的增加而逐渐向右移动, 表现为屈服应力的逐渐增加。图 15 展示了 CaO-GGBS 固化土的屈服应力和压缩指数随着龄期改变的变化趋势。由图可知, 当龄期从 7 d 增加至 14 d 时, 固化土的屈服应力从 332 kPa 增长至 680 kPa, 增加了 104%; 增加至 28 d 时, 屈服应力增长至 774 kPa, 较 14 d 的仅增长了 13%。可见, 固化土的屈服应力随龄期的增加趋势呈现为“先快后慢”, 7~14 d 养护龄期内固化土强度和结构性的发展速率大于 14~28 d 龄期内。

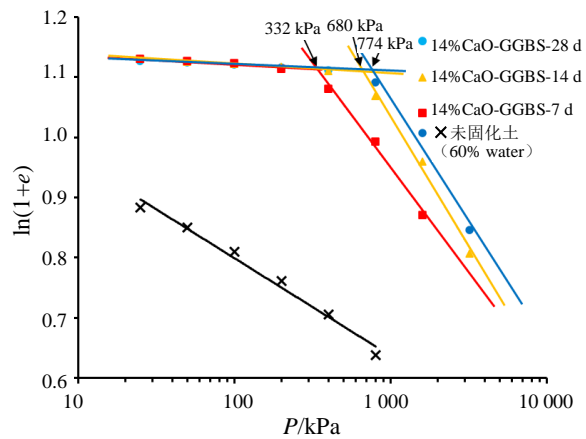


图 14 不同养护龄期 CaO-GGBS 固化土  $\ln(1+e)$ - $\lg P$  曲线  
Fig. 14  $\ln(1+e)$ - $\lg P$  curve of CaO-GGBS stabilized soil at different curing ages

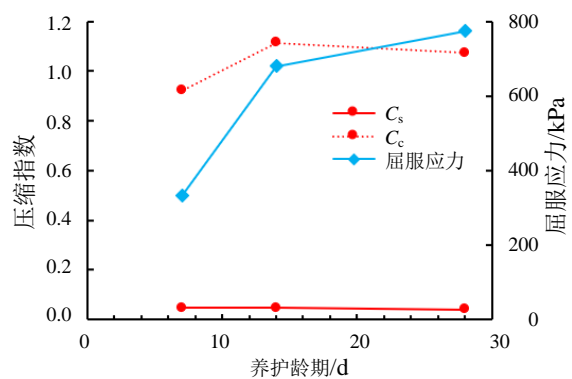


图 15 养护龄期对屈服应力和压缩指数的影响  
Fig. 15 Effect of curing age on yield stress and compression index

2.3 化学固化法的经济性和环保性

已有研究表明, 每生产 1 t 的水泥需要消耗 5 000 MJ 能量并产生 950 kg CO<sub>2</sub>, 而生产 1 t 的 GGBS 需要消耗 1 300 MJ 能量同时产生 70 kg CO<sub>2</sub>, 另外生产 1 t 的 CaO 需要消耗 3 200 MJ 能量和产生

790 kg CO<sub>2</sub><sup>[13,21]</sup>。另外,根据市场相关调研及询价得到:水泥的价格一般为750元/t, GGBS的价格为500元/t,石灰的价格为680元/t。

选取相同掺量的PC和CaO-GGBS对一定量的软土进行固化处理时,计算所采用的材料背后所涉及的经济成本、能源消耗和碳排放量,可以定性分析该固化方法的经济性以及环保性。以下以14%掺量PC及CaO-GGBS对2t初始含水量为100%的软土进行改良处理为例。此案例为本文研究中的配比之一,其中CaO-GGBS固化土的压缩性比PC固化土的要低。

PC:

$$0.14 \times 750 = 105 \text{ 元};$$

$$0.14 \times 500 = 700 \text{ MJ 能源};$$

$$0.14 \times 950 = 133 \text{ kg CO}_2.$$

CaO-GGBS:

$$0.028 \times 680 + 0.112 \times 500 \approx 56 \text{ 元};$$

$$0.028 \times 3200 + 0.112 \times 1300 \approx 235 \text{ MJ 能源};$$

$$0.028 \times 790 + 0.112 \times 70 \approx 30 \text{ kg CO}_2.$$

将水泥固化处理对应的3个指标归一化处理, CaO-GGBS固化处理时乘上相同的系数,可以得到如图16所示的关于经济成本、能源消耗和碳排放量的参数指标图。从图中可以看出,采用CaO-GGBS取代PC对该软土进行固化处理时,可降低28.6%的成本,可以减少66.4%的能源消耗及77.4%的碳排放,可实现经济和环保双重效益。

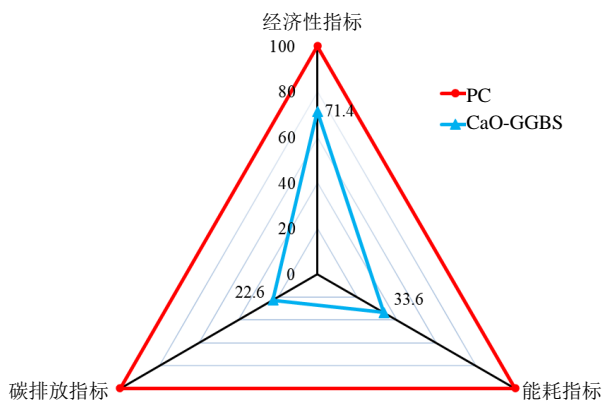


图 16 PC 和 CaO-GGBS 的参数指标图

Fig. 16 Parameter indicator chart of PC and CaO-GGBS

### 3 结论

本文通过一维压缩固结试验,探究了固化材料类型及其掺量、养护龄期、初始含水量及掺砂率等对固化软黏土压缩特性的影响,得出结论如下:

(1) 60%含水量高岭土为高压缩性的土体,在

竖向压力的作用下其孔隙比基本呈对数线性减小,未出现明显的结构屈服点;采用CaO-GGBS或者PC对高含水量高岭土进行固化处理,可以降低其含水量,增加土体的结构性,有效降低其压缩性,得到的固化土均存在明显结构性。固化土的压缩性在屈服前后变化显著,在屈服之前很小,为低压缩性土体;而在屈服之后会突增,压缩性变得比未固化处理高岭土还大。

(2) CaO-GGBS 固化土的结构屈服应力随着初始含水量的降低而显著增大,随着固化材料掺量和养护龄期的增加而逐渐增大。标准砂的掺入虽然可以降低CaO-GGBS固化土的初始孔隙比,但是对于提升其结构性的贡献较小。另外,在相同情况下,采用CaO-GGBS的固化效果优于水泥。

(3) 基于对固化材料的经济成本、能源消耗和碳排放量的计算,对比了水泥和CaO-GGBS两种固化材料,验证了CaO-GGBS碱激发材料用于软土固化处理中的经济性和环保性。

### 参考文献

- [1] LEE F H, LEE Y, CHEW S H, et al. Strength and modulus of marine clay-cement mixes[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(2): 178-186.
- [2] 朱伟,张春雷,高玉峰,等.海洋疏浚泥固化处理土基本力学性质研究[J].浙江大学学报:工学版,2005,39(10):1561-1565.  
ZHU Wei, ZHANG Chun-lei, GAO Yu-feng, et al. Fundamental mechanical properties of solidified dredged marine sediment[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2005, 39(10): 1561-1565.
- [3] 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(2):2923-2928.  
HUANG Ying-hao, ZHU Wei, ZHOU Xuan-zhao, et al. Experimental study of compressibility behavior of solidified dredged material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 2923-2928.
- [4] 易耀林,李晨,孙川,等.碱激发矿粉固化连云港软土试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(9):1820-1826.  
YI Yao-lin, LI Chen, SUN Chuan, et al. Test on alkali-activated ground granulated blast-furnace slag (GGBS) for Lianyungang soft soil stabilization[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,

- 2013, 32(9): 1820–1826.
- [5] PROVIS J L, BERNAL S A. Geopolymers and related alkali-activated materials[J]. *Annual Review of Materials Research*, 2014, 44: 299–327.
- [6] 郑文忠, 邹梦娜, 王英. 碱激发胶凝材料研究进展[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(1): 28–39.  
ZHENG Wen-zhong, Zou Meng-na, WANG Ying. Literature review of alkali-activated cementitious materials[J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(1): 28–39.
- [7] PURDON A O. The action of alkalis on blast-furnace slag[J]. *Journal of the Society of Chemical Industry*, 1940, 59(9): 191–202.
- [8] DAVIDOVITS J. Geopolymers and geopolymeric materials[J]. *Journal of Thermal Analysis*, 1989, 35(2): 429–441.
- [9] WANG S D, SCRIVENER K L. Hydration products of alkali activated slag cement[J]. *Cement and Concrete Research*, 1995, 25(3): 561–571.
- [10] SHI C, ROY D, KRIVENKO P. *Alkali-activated Cements and Concretes*[M]. Boca Raton: CRC Press, 2003.
- [11] WILD S, KINUTHIA J M, JONES G I, et al. Effects of partial substitution of lime with ground granulated blast furnace slag (GGBS) on the strength properties of lime-stabilised sulphate-bearing clay soils[J]. *Engineering Geology*, 1998, 51(1): 37–53.
- [12] WILD S, KINUTHIA J M, JONES G I, et al. Suppression of swelling associated with ettringite formation in lime stabilized sulphate bearing clay soils by partial substitution of lime with ground granulated blastfurnace slag (GGBS)[J]. *Engineering Geology*, 1999, 51(4): 257–277.
- [13] YI Y L, LI C, LIU S Y, et al. Alkali-activated ground-granulated blast furnace slag for stabilization of marine soft clay[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2015, 27(4): 1–7.
- [14] LANG L, CHEN B, LI N. Utilization of carbide slag-activated ground granulated blast-furnace slag for dredged sludge stabilization[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2021, 39(6): 659–669.
- [15] 于博伟, 杜延军, 刘辰阳, 等. 活性 MgO 碱性激发粒化高炉矿渣固化黏土的抗硫酸盐侵蚀试验研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(增刊 2): 64–72.  
YU Bo-wei, DU Yan-jun, LIU Chen-yang, et al. Study of durability of reactive magnesia-activated ground granulated blast-furnace slag stabilized soil attacked by sulfate sodium solution[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(S2): 64–72.
- [16] YU B W, DU Y J, JIN F, et al. Multiscale study of sodium sulfate soaking durability of low plastic clay stabilized by reactive magnesia-activated ground granulated blast-furnace slag[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016, 28(6): 1–10.
- [17] 邵玉芳, 徐日庆, 刘增永, 等. 一种新型水泥固化土的试验研究[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2006, 40(7): 1196–1200.  
SHAO Yu-fang, XU Ri-qing, LIU Zeng-yong, et al. Experimental study on new variety of cement-stabilized soil[J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2006, 40(7): 1196–1200.
- [18] 丁建文, 吴学春, 李辉, 等. 疏浚淤泥固化土的压缩特性与结构屈服应力[J]. *工程地质学报*, 2012, 20(4): 627–632.  
DING Jian-wen, WU Xue-chun, LI Hui, et al. Compression properties and structural yield stress for solidified soil composing of dredged clays[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2012, 20(4): 627–632.
- [19] 丁建文, 万星, 冯旭松, 等. 高含水率疏浚淤泥固化土的压缩模型[J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2019, 49(2): 369–374.  
DING Jian-wen, WAN Xing, FENG Xu-song, et al. Compression model for solidified soil of dredged clays with high water content[J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2019, 49(2): 369–374.
- [20] BUTTERFIELD R. A natural compression law for soils[J]. *Géotechnique*, 1979, 29(4): 469–480.
- [21] YI Y, GU L, LIU S. Microstructural and mechanical properties of marine soft clay stabilized by lime-activated ground granulated blastfurnace slag[J]. *Applied Clay Science*, 2015, 103: 71–76.
- [22] 范晓秋, 洪宝宁, 胡昕, 等. 水泥砂浆固化土物理力学特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(4): 605–610.  
FAN Xiao-qiu, HONG Bao-ning, HU Xin, et al. Physico-mechanical properties of soils stabilized by cement mortar[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(4): 605–610.