



# 氧化镁-高炉矿渣改良淤泥质土的湿-载循环力学特性

陆勇<sup>1</sup>, 姜雨欣<sup>1</sup>, 刘俊江<sup>1</sup>, 冯义<sup>2</sup>, 陈育民<sup>1</sup>

(1. 苏州科技大学 土木工程学院, 江苏 苏州 215011; 2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 西安 710043)

**摘要:** 氧化镁-高炉矿渣(MgO-GGBS)改良技术能使淤泥质土表现出更高的早期强度, 在环境可持续性和特殊问题土(如有机质土、污染土)处理方面有着巨大的工程应用潜力, 掌握其在干湿循环与荷载循环作用下的力学响应, 是进行实际工程应用的前提。首先开展不同固化剂掺量(5%~15%)、养护龄期(7~90 d)及养护温度(10~20 °C)下 MgO-GGBS 改良淤泥质土的无侧限抗压强度试验, 分析养护环境对其抗压强度的影响。在此基础上, 针对确定养护环境下的 MgO-GGBS 改良淤泥质土, 进行干湿循环、荷载循环两种路径下的力学行为试验分析。结果表明: 随着固化剂掺量、养护龄期、养护温度的增加, 试样无侧限抗压强度表现出不同程度的增长(最优固化剂掺量约为8%), 且峰值剪应力对应的轴向应变逐渐减小, 破坏模式由剪切带破坏(延性软化)向崩裂破坏(脆性软化)转变; 干湿循环作用下, 试样强度呈明显的非线性衰减趋势, 表明此改良方法适合相对稳定的使用环境, 对于存在干湿循环的环境仍待优化; 荷载循环作用下, 试样存在累积压缩变形趋势, 表现出明显的状态相关性, 受循环荷载等级、试样初始密实状态的共同影响; MgO-GGBS 改良淤泥质土强度提升的微观机制是 C-S-H、C-A-H、M-S-H 等水化产物形成了致密胶结结构。

**关键词:** 氧化镁-高炉矿渣改良土; 淤泥质土; 干湿循环; 循环载荷; 力学特性; 微观机制

**中图分类号:** TU472.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-11

## Mechanical behavior of MgO-GGBS improved silty clay subjected to cyclic wetting and loading

LU Yong<sup>1</sup>, JIANG Yuxin<sup>1</sup>, LIU Junjiang<sup>1</sup>, FENG Yi<sup>2</sup>, CHEN Yumin<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, Jiangsu, P. R. China; 2. China Railway First Survey and Design Institute Group Co. Ltd, Xi'an 710043, P. R. China)

**Abstract:** The MgO-GGBS stabilization technique can impart higher early strength to silty clay. This method demonstrates significant potential for engineering applications, particularly in terms of environmental sustainability and the treatment of problematic soils, such as organic soils and contaminated soils. A comprehensive understanding of its mechanical response to the coupled action of wet-dry cycles and loading cycles is essential for its engineering application. This study begins by conducting unconfined compressive strength tests on MgO-GGBS improved silty clay under varying binder dosages (5%-15%), curing periods (7-

收稿日期: 2025-10-15

基金项目: 江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究项目(22KJB170020)

作者简介: 陆勇(1987-), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程、地下工程研究, E-mail: cumtluyong@163.com。

Received: 2025-10-15

**Foundation items:** Natural Science Foundation of Jiangsu Higher Education Institutions of China(No.22KJB170020)

**Author brief:** LU Yong (1987-), PhD, associate professor, main research interests: geotechnical engineering and underground engineering, E-mail: cumtluyong@163.com.

90 d), and curing temperatures (10-20 °C). The influence of the curing environment on the development of compressive strength is then examined. Subsequently, a series of mechanical tests were performed on the MgO-GGBS improved silty clay under specified curing conditions to investigate its response to two different paths: wet-dry cycles and loading cycles. The study revealed that: (1) With the increase in binder dosage, curing period, and curing temperature, the unconfined compressive strength of the specimens exhibited varying degrees of enhancement (with an optimal binder dosage of approximately 8%). Concurrently, the axial strain corresponding to the peak shear stress gradually decreased, and the failure mode transitioned from shear band failure (ductile softening) to splitting failure (brittle softening). (2) Under the action of wet-dry cycles, the specimen strength exhibited a distinct nonlinear decrease trend. This indicates that while this stabilization method is suitable for relatively stable service environments, it requires further optimization for applications involving wet-dry cycles. (3) Under cyclic loading, the specimens exhibited a trend of accumulative compressive deformation, demonstrating significant state-dependent behavior, which was influenced by the cyclic load level and the initial compaction state of the specimens. (4) The strength gain in MgO-GGBS improved silty clay is due to a dense cementitious structure formed by hydration products, including C-S-H, C-A-H, and M-S-H.

**Keywords:** MgO-GGBS improved soil; silty clay; wetting-drying cycles; cyclic loading; mechanical properties; micro-mechanism

沿海城市基础设施建设往往面临具有强度低、压缩性高、渗透性差等显著缺点的淤泥质土<sup>[1]</sup>,对其进行改良并加以利用极具价值。水泥等传统固化材料存在能源消耗大且大气污染严重等问题,可采用高活性氧化镁(MgO)作为激发剂提升高炉矿渣微粉(GGBS)的水化效率,赋予淤泥质土更优良的物理力学性能<sup>[2]</sup>。相较水泥改良土,氧化镁-高炉矿渣(MgO-GGBS)改良土早期强度高、抗硫酸盐侵蚀能力强,且拥有良好的环境友好性与可持续性<sup>[3-6]</sup>。因此,掌握 MgO-GGBS 改良土在实际工程应用环境下的力学特性显得十分必要。

针对该改良土的力学特性,诸多学者开展了试验研究,取得了丰富的研究成果。有学者通过水化动力学与微观分析证实,利用 MgO 的激发和碳化特性与 GGBS 碱激发相结合,可实现软土加固与 CO<sub>2</sub> 封存且有效控制材料成本<sup>[7]</sup>。通过控制 MgO-GGBS 改良土的养护温度、颗粒粒径、龄期等变量,能显著提升试样的无侧限抗压强度,其强度发展源于 MgO 水化提供早期强度与碱性环境,进而激发 GGBS 反应生成填充孔隙、主导强度的水化硅酸镁(M-S-H)凝胶<sup>[8-13]</sup>。大量研究证实,改良土强度发展与掺量呈现明显依赖性,存在一个最优区间可使其最终强度超越传统水泥固化土<sup>[14-18]</sup>。在一定干湿循环条件下,MgO-GGBS 改良土比水泥固化土具有更大的干密度和抗压强度以及更低的质量损失<sup>[19]</sup>。在耐久性方面,MgO 水化的微膨胀效应能有效降低压缩性,抑制开裂,改善土体完整性与耐久性<sup>[20]</sup>。GGBS 的引入降低了土体含水率变化的敏感性,从而缓解了浸水与冻融循环导致的强度劣化<sup>[21-22]</sup>。

MgO-GGBS 改良土在硫酸盐侵蚀条件下,水化硅酸钙含量显著增加,生成的钙矾石数量明显少于水泥土,这使得 MgO-GGBS 改良土的抗硫酸盐侵蚀能力明显强于水泥固化土<sup>[23-24]</sup>。采用剑麻纤维增强的 MgO-GGBS 碳化固化技术可进一步改善粉质黏土的力学性能与抗裂性能<sup>[25]</sup>。除此之外,研发的 MgO-GGBS 基竖向阻隔屏障材料(MSBS)在铅离子污染环境中呈现出稳定的膜效应特性,使其在污染阻隔领域同样展现出广阔应用前景<sup>[26]</sup>。综上所述,针对改良后淤泥质土在单调荷载条件下的力学行为特性已开展诸多工作,在掌握其基本力学特性的基础上也进行了不同应用场景的探索。然而,考虑到改良土的实际应用环境,对于改良土在复杂条件下(周期荷载、地下水位升降等)力学行为演化规律的相关研究还较为缺乏,限制了其在实际工程环境中的应用效果评估。

以苏州某工地的淤泥质土为对象,开展不同养护环境下 MgO-GGBS 改良土的无侧限抗压强度试验,揭示其在多因素影响下的强度演化规律;选择最优养护方案开展干湿循环与载荷循环两种路径下的力学试验,探究实际复杂工程环境下 MgO-GGBS 改良土的应用效果。

## 1 试验方案

### 1.1 试验材料

试验选用淤泥质土取自苏州市吴江区某工地(天然密度为 1.67 g/cm<sup>3</sup>,含水量为 47%,)。经室内试验测定,按《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)和《土的工程分类标准》(GB/T 50145

—2007)确定该淤泥土为流塑状态的低液限粉质黏土,其基本物理特性见表1。试验选用高炉矿渣(GGBS)作为土体改性材料(活性指数84.2%,天然密度为3.1 g/cm<sup>3</sup>),并使用氧化镁(MgO)促进水化过程(粒度区间1.2 μm),基本物理特性见表2、表3。

表1 淤泥土基本物理特性指标  
Table 1 Physical parameters of silty clay

| 名称   | 比重   | 塑限/%  | 液限/%  | 塑性指数  |
|------|------|-------|-------|-------|
| 淤泥质土 | 2.51 | 25.36 | 36.93 | 11.57 |

1.2 试验规划

MgO-GGBS改良土的胶结性能会受到固化剂掺量、龄期、温度等养护条件的影响。研究中需首先观测不同养护条件下试样的强度演化趋势,在此基础上综合考虑经济、环保等因素,选择合适的固

表4 试验规划

Table 4 The test plan

| 试验名称    | 不同养护环境下的无侧限抗压强度试验 | 干湿循环无侧限抗压强度试验 | 荷载循环侧限压缩试验  |
|---------|-------------------|---------------|-------------|
| 孔隙比     | 0.8               | 0.8           | 0.8/1.0/1.2 |
| 养护龄期/d  | 1~90              | 28            | 28          |
| 固化剂掺量/% | 5、8、10、15         | 8             | 8           |
| 养护温度/℃  | 10、20             | 20            | 20          |

1.2.1 试样制备及养护

根据胶结结构性土等效三相示意图(图1),使用试验规划中的预设孔隙比 $e$ 、固化剂掺量比 $r_r$ 和试样体积 $V$ 三个指标,通过式(1)、式(2)计算单元试样所需的干土和固化剂质量,按照饱和试样计算所需用水量,采用湿法加入材料并搅拌制成泥浆状态。

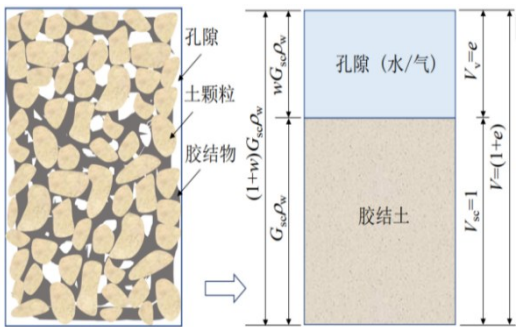


图1 胶结土的等效三相计算图

Fig.1 Equivalent three-phase calculation diagram of cemented soil

$$m_s = \frac{\rho_d \cdot V}{1 + r_r}, m_c = \frac{r_r \cdot \rho_d \cdot V}{1 + r_r} \quad (1)$$

$$\rho_d = \frac{G_{sc} \cdot \rho_w}{1 + e}, G_{sc} = \frac{(1 + r_r) \cdot G_s}{1 + r_r \cdot G_s / G_c} \quad (2)$$

式中: $G_s$ 、 $G_c$ 分别为土颗粒以及固化剂颗粒比重(两

表2 S95粒化高炉矿渣粉物理特性指标  
Table 2 Physical parameters of S95 granulated blast furnace slag powder

| 名称    | 比重   | CaO/% | SiO <sub>2</sub> /% | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /% | 其他/%  |
|-------|------|-------|---------------------|-----------------------------------|-------|
| 高炉矿渣粉 | 2.53 | 34.00 | 34.53               | 17.72                             | 13.75 |

注:除表格中列出主要成分外,其他成分有MgO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>等微量元素。

表3 MgO物理特性指标

Table 3 Physical parameters of MgO

| 名称  | 比重   | 纯度/%  | 烧失量/% | 含碳量/% |
|-----|------|-------|-------|-------|
| 氧化镁 | 2.29 | ≥99.5 | 0.002 | 0.001 |

化剂掺量和养护龄期,进行后续复杂路径(干湿循环、载荷循环)下的力学特性试验,试验规划见表4。对试验前、后的试样采用SEM电镜扫描,继而观测分析其改良微观机制。

种固化剂的加权比重); $G_{sc}$ 为胶结土的等效颗粒比重; $r_r$ 为固化剂与干土质量之比; $e$ 为试样的孔隙比; $\rho_w$ 为水的密度; $\rho_d$ 为胶结土的干密度; $V$ 为试样体积; $m_s$ 与 $m_c$ 分别为试样所需干土以及固化剂的质量。试样中的MgO与GGBS的质量比控制在1:3;初始含水率控制在47%。

试样制备及养护方法如下:

无侧限抗压强度试样:将泥浆材料分4层装入内表面涂抹凡士林的PVC模具内(直径39.1 mm、高度80 mm),手动击实,待试样表面不再泛出气泡后用刮土刀将试样表面刮平。

侧限压缩试样:将泥浆材料分3层装入内表面涂抹凡士林的环刀模具(直径61.8 mm、高度20 mm),下方垫好透水石和滤纸。手动击实,待试样表面不再泛出气泡后用刮土刀将试样表面刮平。在土体表面覆盖一层透水石和滤纸后,放置在叠式饱和器中固定。

最后,将试样放置于温度10、20℃的水中养护,试样的制作流程见图2。

1.2.2 试验过程

不同养护环境下无侧限抗压强度试验:固化剂掺量分别为5%、8%、10%、15%;养护龄期分别为1、3、5、7、14、21、28、35、42、49、56、63、70、80、90 d

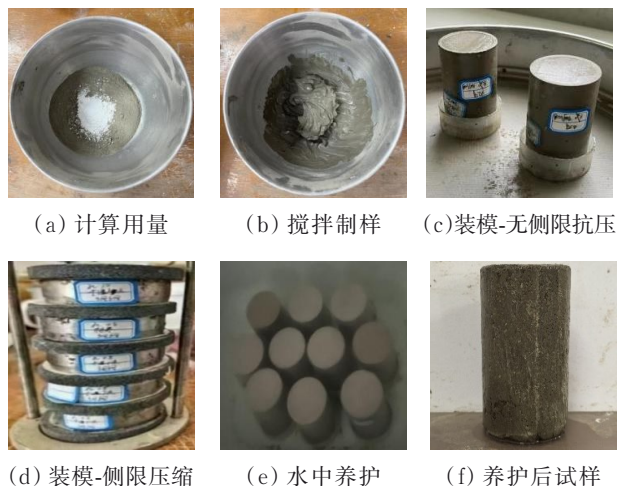


图2 试样制作流程

Fig.2 Specimen preparation process

(为观测加固土早期强度变化趋势,养护前期观察间隔期较短);温度分别为10、20℃。

干湿循环下无侧限抗压强度试验:选用最优固化剂掺量8%、养护龄期28 d的试样。试验中,一次完整的干燥过程和湿润过程各占24 h。干湿循环方式分为两种:一种是将试样从水中取出放入30℃的恒温烘箱以模拟快速干燥环境,湿润过程则将干燥后试样重新浸泡于20℃的蒸馏水中;另一种是进行养护水位的人工调控模拟地下水位升降的干湿环境。试验共进行10次循环,经历一定次数干湿循环后,各取3个平行试样进行无侧限抗压强度试验。

载荷循环下侧限压缩试验:选用最优固化剂掺量8%、养护龄期28 d以及不同初始孔隙比状态(0.8、1.0、1.2)的试样。首先进行一维单调压缩试验,根据压缩屈服荷载确定循环荷载等级。在此基础上,进行加、卸载循环试验,荷载等级依次为12.5、25、50、100、200、400、600、900、1 200 kPa,然后再逐级卸载至12.5 kPa,按此方式进行20次循环。

SEM电镜扫描试验:在无侧限抗压强度试验结束后,保留试样碎块进行烘干、碾碎、过筛并重新制样(重塑土样)。如此可采用SEM电镜扫描分别对天然淤泥土样、改良土样、重塑土样进行观测,通过对比揭示改良微观机制。

## 2 不同养护环境下的无侧限抗压强度特性

针对4种固化剂掺量的改良土,开展不同养护龄期(1~90 d)下的无侧限抗压强度试验,得到相应的应力-应变曲线结果、试样破坏模式以及峰值强度受固化剂掺量及养护龄期的影响趋势,见图

3~图5。

由图3可以看出,固化剂掺量5%的试样的应力-应变曲线呈现延性软化现象。该掺量试样因早期强度过低、无法成形,故其有效强度数据从7 d开始获取。在养护28 d后峰值剪应力仅为210 kPa,故不进行后续龄期试验。固化剂掺量8%、10%的试样在养护超28 d后,试样应力-应变曲线由延性软化转变为明显的脆性软化,峰值剪应力均超1 000 kPa。固化剂掺量15%的试样,在养护超14 d后的应力-应变曲线即由延性软化转变为明显的脆性软化,峰值剪应力超2 000 kPa。由此表明,固化剂掺量越大、养护龄期越长,改良土内部结构性越强,使得其无侧限抗压强度显著提升。与此同时,试样达到峰值剪应力时,对应的轴向应变逐渐变小。

从图4试样破坏形态可以看出,随着固化剂掺量与养护龄期的增长,试样逐渐从剪切带破坏模式(延性软化)向崩裂破坏模式(脆性软化)转变,后者试样主要呈现垂直劈裂和崩裂形态,破坏试样两端出现圆锥体。

图5为4种固化剂掺量下试样的无侧限抗压强度随龄期的增长趋势。由图5可以看出,MgO-GGBS改良土的无侧限抗压强度受固化剂掺量、养护龄期影响显著。固化剂掺量8%、10%、15%的试样在标准养护条件下养护7 d即可达到400 kPa以上的强度,并在28 d龄期时分别达到1 000、1 400、2 500 kPa。相较传统硅酸盐水泥改良土,MgO-GGBS改良土的早期强度提升显著,且28 d龄期强度足以满足多数工程需要。综合考虑实际地基承载力要求以及施工经济性要求,可将8%作为工程应用的最优固化剂掺量。后续干湿循环、载荷循环等复杂条件下的力学特性试验即采用8%固化剂掺量、28 d养护龄期的试样进行。

MgO-GGBS改良土的内在机制是水化产物形成颗粒间的胶结并填充土体孔隙,而温度因素则会显著影响水化作用过程。鉴于此,试验过程中也进行了温度影响分析,观察4种固化剂掺量的试样,在10、20℃两个养护温度下的无侧限抗压强度随龄期的演化趋势,结果如图6所示。由图6可以看出,4种固化剂掺量的改良土试样均表现出:养护温度20℃的强度相较养护温度10℃的强度有着明显提升,28 d龄期下能够提升近400 kPa。由此表明,提高养护温度可以显著促进MgO-GGBS的水化反应程度,加快形成胶凝产物可显著加快改良土强度增长。

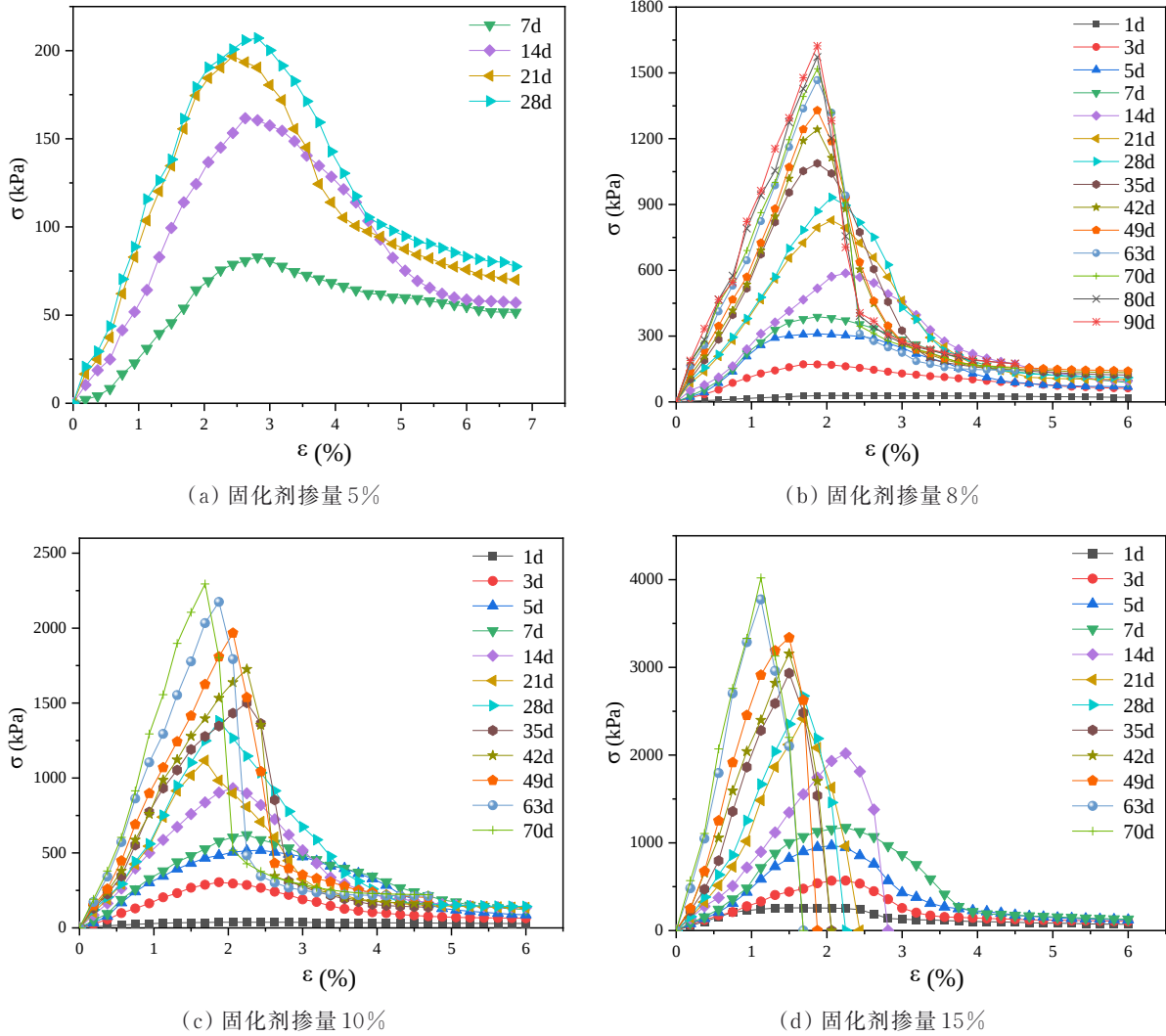


图 3 不同固化剂掺量、不同养护龄期下改良土应力-应变曲线

Fig.3 Stress-Strain curves of improved soil at different binder contents and curing ages

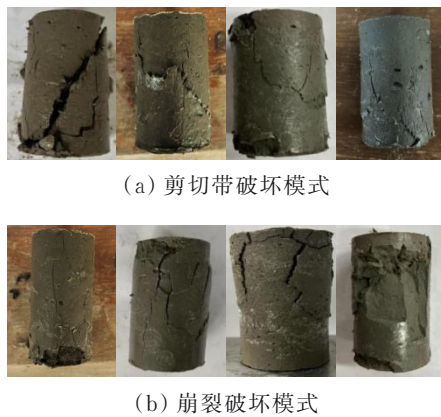


图 4 试样破坏形态

Fig.4 Failure pattern of the specimen

### 3 干湿循环下无侧限抗压强度特性

#### 3.1 试样形态演变规律

图 7 为 MgO-GGBS 改良土试样在两种干湿循环方式下的形态演变规律。由图 7 可以看出, MgO-

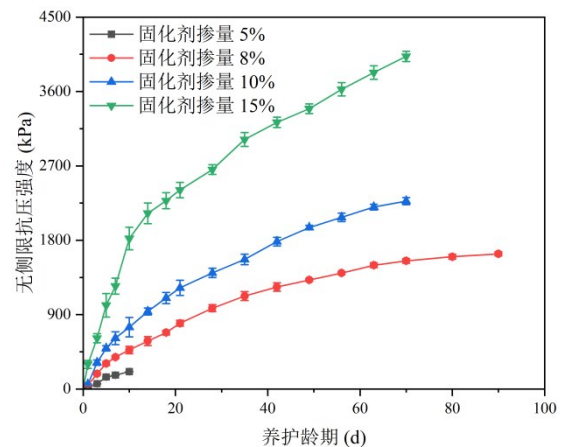


图 5 4 种固化剂掺量下无侧限抗压强度随龄期增长趋势

Fig.5 Development of unconfined compressive strength with curing age under four different binder contents

GGBS 改良土抗干湿循环的性能尚有不足,在经历一定次数干湿循环后,试样呈现出明显结构性损伤,表面产生不同程度的剥落。同时,两种干湿循环下的损伤特征有所不同:烘箱干燥的试样表面脱

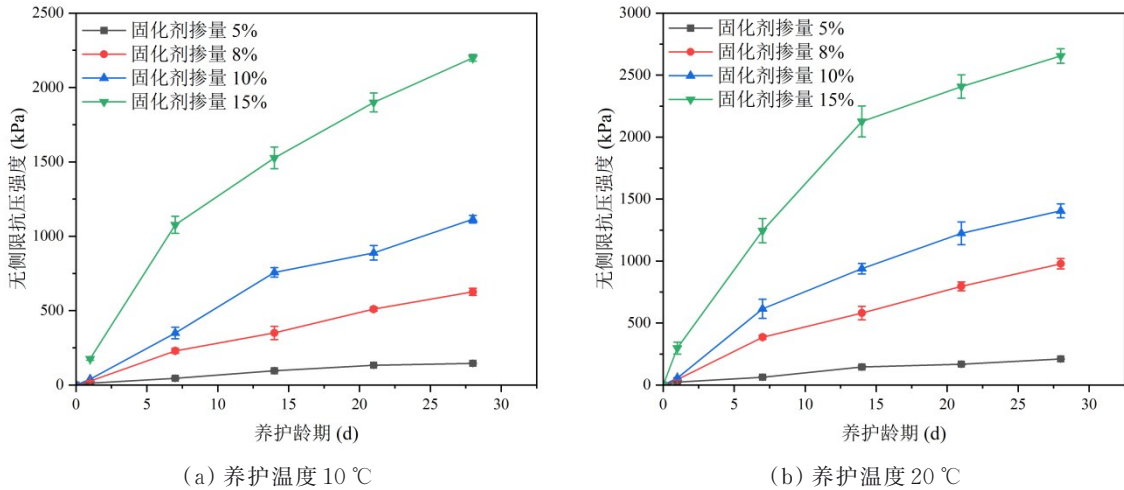
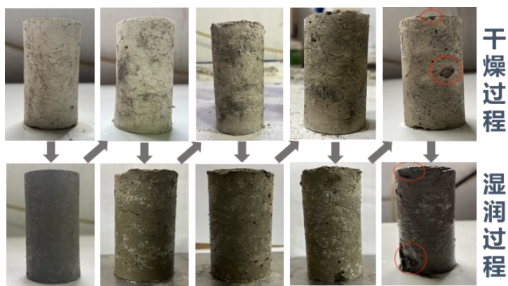


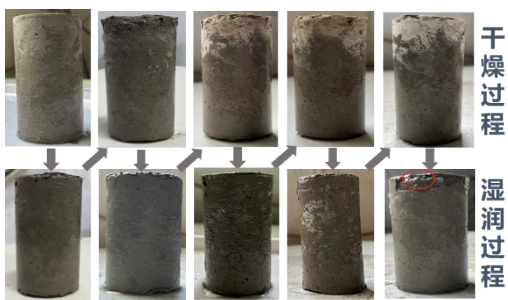
图6 温度对改良土强度增长趋势的影响

Fig.6 Effect of temperature on the strength development of improved soil

落及裂纹扩展程度明显高于水位下降风干的试样。尽管试样出现明显劣化,但整体结构仍保持完整,未发生崩解现象,表明改良土仍有一定的残余强度。



(a) 干湿循环方式一(烘箱)



(b) 干湿循环方式二(水位调控)

图7 两种干湿方式下试样外观形态演变

Fig.7 Evolution of sample appearance under two wetting-drying cycles

### 3.2 无侧限抗压强度试验结果

图8为MgO-GGBS改良土在经历不同次数干湿循环后进行无侧限抗压强度试验获得的应力-应变曲线及强度演化结果。由图8可以看出,两种干湿循环方式下,试样峰值剪应力均随干湿循环次数增加呈现非线性衰减趋势,由第1次骤降逐渐过渡至趋稳。此外,两种干湿循环方式下的试样,在经

历10次循环后的峰值剪应力分别为150、380 kPa,可见干湿循环方式一(烘箱)对试样内部胶结结构的破坏更为明显。

初步分析试样无侧限抗压强度随干湿循环次数出现明显降低的原因是:MgO-GGBS改良土内部的Ht(水滑石-硅酸镁水合物胶凝)具有很强的亲水性及胀缩性,使得试样内部孔隙和胶结结构在干湿循环过程中持续变化,经历了吸水膨胀、脱水收缩,继而引起胶结结构损伤,无侧限抗压强度降低。

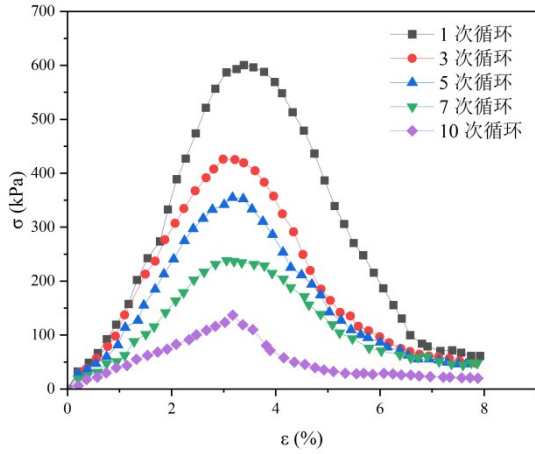
## 4 荷载循环下侧限压缩特性

### 4.1 单调压缩试验结果

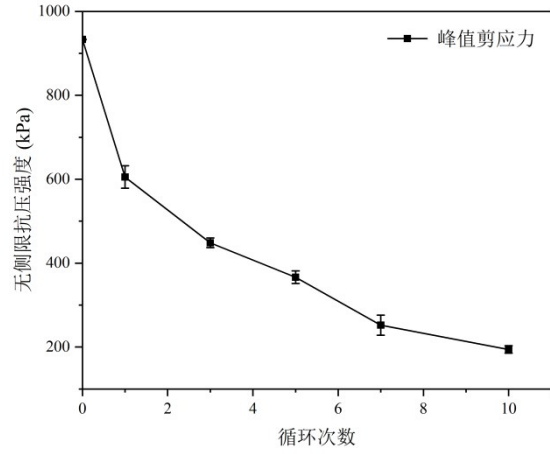
针对3种不同初始孔隙比(0.8、1.0、1.2)的MgO-GGBS改良土(8%固化剂掺量、28 d养护龄期),首先开展单调侧限压缩试验,结果如图9所示。从 $s-p$ 曲线可以看出,试样初始孔隙比 $e_0$ 越大,压缩沉降量越大,且压缩曲线呈现出明显的“双段式”,从快速压缩沉降(0至400 kPa)逐渐过渡至稳定压缩沉降(400至1 600 kPa),并在1 600 kPa处出现明显拐点,再次由快速压缩沉降过渡至稳定压缩沉降。这表明MgO-GGBS改良土相较天然土体会存在着明显的压缩屈服现象,试样内部的胶结结构在高压下会出现快速损伤,引起抗压缩能力迅速下降,这在工程应用中须予以重视。

### 4.2 循环压缩试验结果

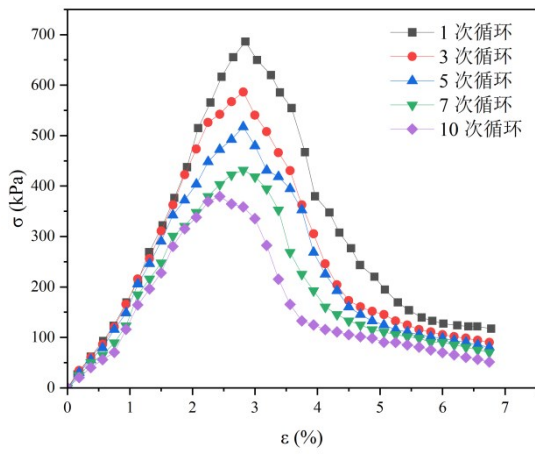
针对3种不同初始孔隙比(0.8、1.0、1.2)的MgO-GGBS改良土,开展3种循环荷载等级(600、900、1 200 kPa)的循环压缩试验,得到 $e-\ln p$ 曲线如图10所示。由图10可以看出:伴随着荷载循环次数加大,试样存在压缩变形累积量逐渐增大的趋势,并且压缩滞回曲线由稀疏逐渐转变为密集直至



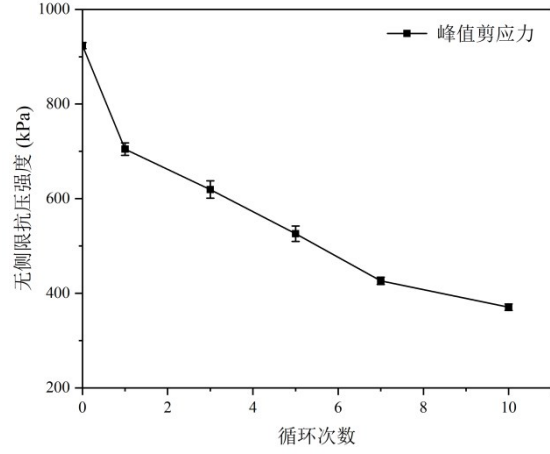
(a) 应力应变曲线(干湿循环方式一)



(b) 无侧限抗压强度演化(干湿循环方式一)



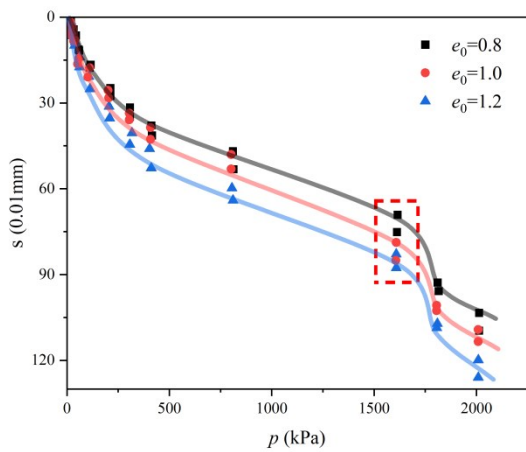
(c) 应力应变曲线(干湿循环方式二)



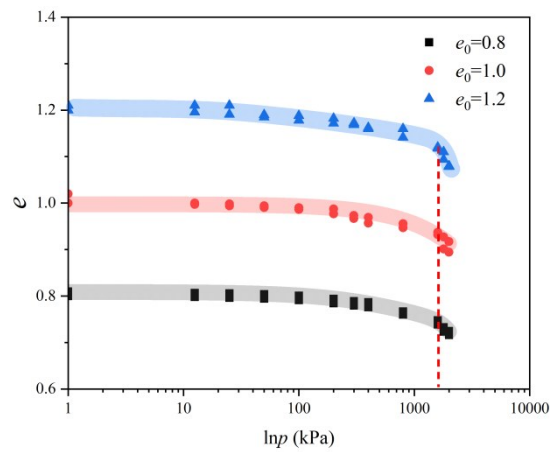
(d) 无侧限抗压强度演化(干湿循环方式二)

图 8 干湿循环下的应力-应变曲线及无侧限抗压强度演化

Fig.8 Stress-Strain curves and evolution of unconfined compressive strength during wetting-drying cycles



(a) 不同初始孔隙比试样 s-p 曲线



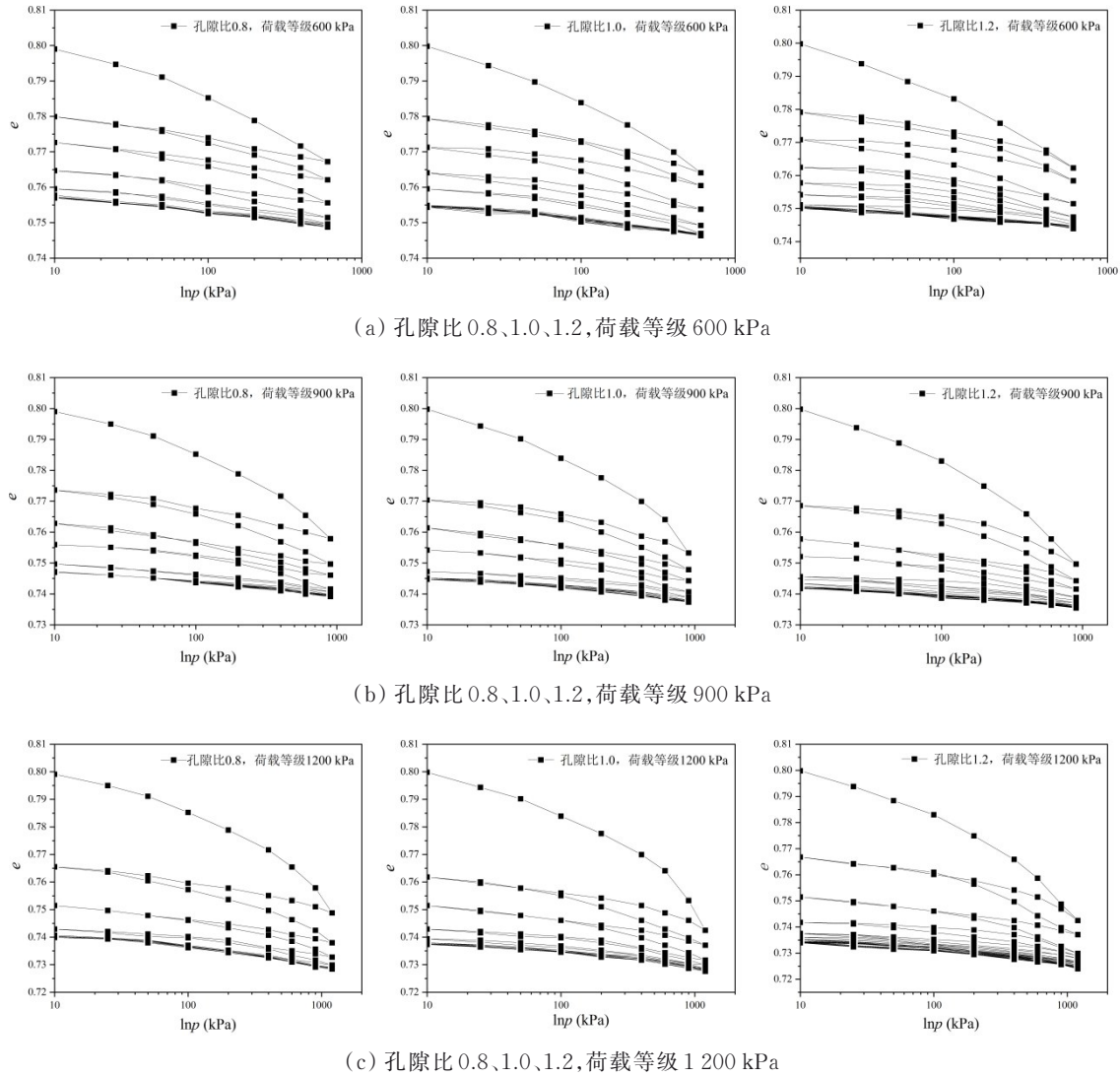
(b) 不同初始孔隙比试样 e-lnp 曲线

图 9 单次加压过程 s-p、e-lnp 曲线

Fig.10 s-p and e-lnp curves during a single loading process

重叠,即试样的抗变形能力随着压缩变形累积(孔隙比逐渐减小)而得以持续增强;在相同循环荷载等级下,初始孔隙比 $e_0$ 越大,试样压缩变形累积量越大,达到稳定所需循环次数越多;在相同初始孔隙

比 $e_0$ 条件下,循环荷载等级越大,试样压缩变形累积量越大。上述结果表明荷载循环下的累积压缩变形表现出明显的状态相关性,受循环荷载等级、试样初始密实状态共同影响。

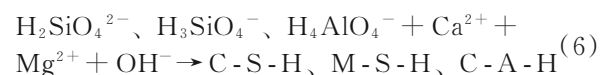
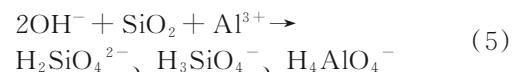
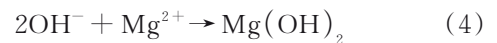
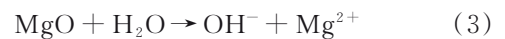
图 10 循环压缩  $e$ - $\ln p$  曲线Fig.10  $e$ - $\ln p$  curves during cyclic Loading

## 5 改良微观机制

对天然淤泥土样、改良土样、重塑土样(改良土样经重新烘干、碾碎、过筛)进行 SEM 电镜扫描试验,放大倍数分别为 5000、20 000 倍,从微观角度观察土样内部水化产物形态、分布以及结构变化,如图 11 所示。由图 11 可以看出,天然淤泥土样内部孔隙较多,颗粒间杂乱无序,这是其压缩性大、承载力差的内在机制。改良土样内部呈现胶结物填充内部孔隙,颗粒间形成链接,使结构更加致密。重塑土样的内部胶结链接被破坏,孔隙结构再次明显。

从物质成分可知,相较于天然土样,改良土  $Mg^{2+}$ 、 $Al^{3+}$ 、 $Ca^{2+}$  显著增加,这是因为使用  $MgO$  对 GGBS 进行激活, $MgO$  提供的  $OH^-$ ,加快 GGBS 颗粒表面  $Si-O$  键、 $Al-O$  键以及  $Ca-O$  键断裂,并以  $H_2SiO_4^{2-}$ 、 $H_3SiO_4^-$ 、 $H_4AlO_4^-$  以及  $Ca^{2+}$  的形式进入水

中,形成  $C-S-H$ 、 $C-A-H$ 、 $M-S-H$ 、 $Ht$  等无定型水化产物,见式(3)~式(6)。这些水化产物填充土样内孔隙,是  $MgO$ -GGBS 改良淤泥质土早期强度的主要来源。



## 6 结论

为探究  $MgO$ -GGBS 改良土在实际工程应用环境下的性能,在分析养护环境对其抗压强度的影响基础上,开展干湿循环、荷载循环两种复杂路径下的力学行为试验,分析其性能演化规律。主要结论有:

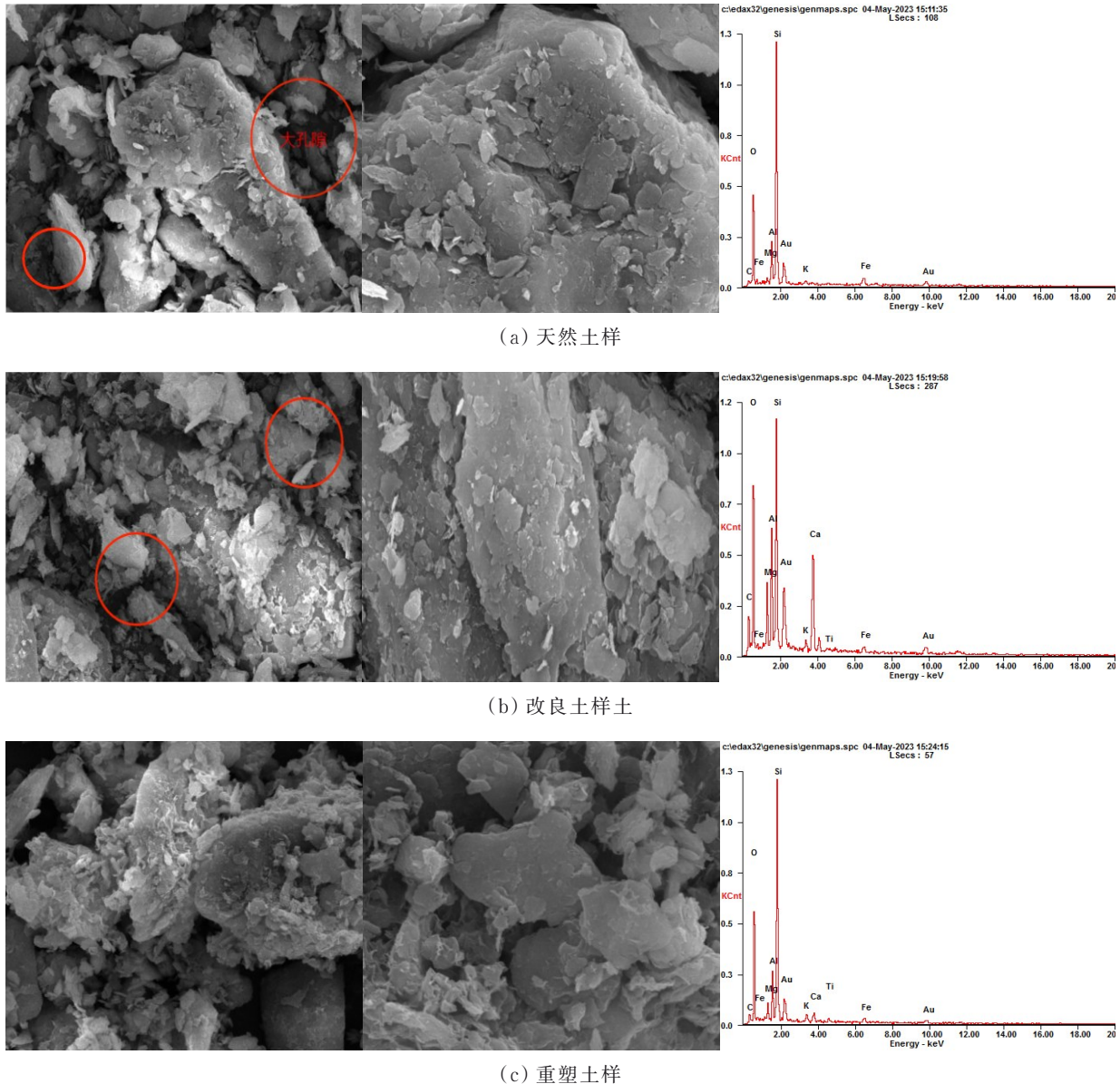


图 11 SEM 电镜扫描结果

Fig.11 SEM scanning results

1) 改良土试样的无侧限抗压强度随着固化剂掺量、养护龄期、养护温度的提高而逐渐增长,并且破坏模式由延性软化破坏向脆性软化破坏转变(峰值剪应力对应的轴向应变减小)。

2) 干湿循环作用下, MgO-GGBS 改良土内部的 Ht 吸水膨胀、失水收缩, 导致原有胶结结构损伤, 试样无侧限抗压强度呈现显著的非线性衰减。在实际工程应用中须针对干湿循环环境做进一步优化。

3) 荷载循环作用下, MgO-GGBS 改良土试样存在累积压缩变形趋势, 滞回曲线从稀疏转向紧密, 并且表现出明显的状态相关性, 即受循环荷载等级、试样初始密实状态共同影响, 在改良土工程中应作为重要控制参数。

4) MgO-GGBS 显著提升淤泥质土强度的微观机制是 MgO 对 GGBS 起到激活作用, 生成大量 C-

S-H、C-A-H、M-S-H 等水化产物, 填充土样内孔隙, 使颗粒间形成链接结构致密。

值得注意的是, 试验中针对干湿与荷载的循环次数有限, 且未考虑干湿循环与荷载循环的耦合效应。后续研究应增加循环次数以考虑长周期问题, 同时建立多因素耦合试验体系以考虑复杂应用场景, 以系统评估该改良土的应用效果。

## 参考文献

- [1] 王东星, 王宏伟, 邹维列, 等. 活性 MgO-粉煤灰固化淤泥耐久性研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(12): 4675-4684.
- WANG D X, WANG H W, ZOU W L, et al. Study of durability of dredged sludge solidified with reactive MgO-fly ash [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(12):

- 4675-4684. (in Chinese)
- [2] 易耀林, 卿学文, 庄焱, 等. 粒化高炉矿渣微粉在软土固化中的应用及其加固机理[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊2): 829-833.
- YI Y L, QING X W, ZHUANG Y, et al. Application of granulated blast furnace slag powder in soft soil solidification and its reinforcement mechanism [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35 (Sup 2): 829-833.
- [3] 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 Y L, LI C, SUN C, 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. (in Chinese)
- [4] 薄煜琳, 于博伟, 杜延军, 等. 淋滤条件下 GGBS-MgO 固化铅污染黏土强度与溶出特性研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2877-2891, 2906.
- BO Y L, YU B W, DU Y J, et al. Strength and leachability of lead contaminated clay stabilized by GGBS-MgO [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36 (10): 2877-2891, 2906. (in Chinese)
- [5] 王东星, 高向云, 邹维列, 等. 高温效应下 MgO-矿粉/粉煤灰固化土强度预测[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(6): 92-97.
- WANG D X, GAO X Y, ZOU W L, et al. Study on strength predication of reactive MgO-slag/fly ash stabilized clay considering high temperature effect [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(6): 92-97. (in Chinese)
- [6] 张亭亭, 李江山, 王平, 等. 磷酸镁水泥固化铅污染土的力学特性试验研究及微观机制[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊2): 279-286.
- ZHANG T T, LI J S, WANG P, et al. Experimental study of mechanical and microstructure properties of magnesium phosphate cement treated lead contaminated soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Sup 2): 279-286.
- [7] JIN F, GU K, AL-TABBAA A. Strength and hydration properties of reactive MgO-activated ground granulated blastfurnace slag paste [J]. Cement and Concrete Composites, 2015, 57: 8-16.
- [8] YI Y L, LISKA M, UNLUER C, et al. Carbonating magnesia for soil stabilization [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(8): 899-905.
- [9] 张丙树. 氧化镁基碱激发高炉矿渣改性下蜀土的力学性质及其抗侵蚀性试验研究[D]. 南京: 南京大学, 2020.
- ZHANG B S. Experimental study on mechanical properties and chemical resistance of Xiashu soil modified by magnesia-based alkali-activated ground granulated blastfurnace slag [D]. Nanjing: Nanjing University, 2020. (in Chinese)
- [10] YI Y L, LISKA M, AKINYUGHA A, et al. Preliminary laboratory-scale model auger installation and testing of carbonated soil-MgO columns [J]. Geotechnical Testing Journal, 2013, 36(3): 384-393.
- [11] JIN F, GU K, ABDOLLAHZADEH A, et al. Effects of different reactive MgOs on the hydration of MgO-activated GGBS paste [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(7): B4014001.
- [12] ZHANG R J, LU Y T, TAN T S, et al. Long-term effect of curing temperature on the strength behavior of cement-stabilized clay [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(8): 04014045.
- [13] OUF M E A R. Stabilization of clay subgrade soils using ground granulated blastfurnace slag [D]. Leeds: University of Leeds, 2001.
- [14] 陆加越, 白坤, 张成君, 等. 氧化镁矿粉复配加固砂土的强度特性[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2025, 47(3): 36-40.
- LU J Y, BAI K, ZHANG C J, et al. Strength characteristics of sand treated by magnesium oxide activated granulated blast furnace [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2025, 47(3): 36-40. (in Chinese)
- [15] 邵艳, 马士雨. 合肥滨湖新区软土固化最优配比的试验研究[J]. 安徽建筑大学学报, 2022, 30(3): 18-24.
- SHAO Y, MA S Y. Experiment on optimum mixing ratio for soft soil solidification in Binhu New Area of Hefei [J]. Journal of Anhui Jianzhu University, 2022, 30 (3): 18-24. (in Chinese)
- [16] 陈金洪, 贺瑶瑶, 胡亚风. 粒化高炉矿渣-氧化镁固化连云港软土的力学特性试验[J]. 林业工程学报, 2019, 4(2): 133-138.
- CHEN J H, HE Y Y, HU Y F. Experimental study of mechanical and microstructural properties of Lianyungang soft soil solidified by granulated blast-furnace slag-magnesium oxide [J]. Journal of Forestry Engineering, 2019, 4(2): 133-138. (in Chinese)
- [17] WANG D X, WANG H W, JIANG Y Z. Water immersion-induced strength performance of solidified soils with reactive MgO: A green and low carbon binder [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2019, 47(2): 1569-1585.
- [18] 王东星, 刘丹阳, 徐学勇, 等. 活性 MgO-粉煤灰固稳铅污染土冻融和温度效应研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(7): 609-617.
- WANG D X, LIU D Y, XU X Y, et al. Freeze-thaw

- cycle and temperature effect of reactive MgO-fly ash stabilized Pb-contaminated soils [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54(7): 609-617. (in Chinese)
- [19] DU Y J, BO Y L, JIN F, et al. Durability of reactive magnesia-activated slag-stabilized low plasticity clay subjected to drying-wetting cycle [J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2016, 20(2): 215-230.
- [20] 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(增刊2): 64-72.  
YU B W, DU Y J, LIU C Y, et al. Experimental study on sulfate attack resistance of activated MgO alkaline-activated granulated blast furnace slag solidified clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015(Sup 2): 64-72. (in Chinese)
- [21] 方秋阳, 柴寿喜, 李敏, 等. 冻融循环对固化盐渍土的抗压强度与变形的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(5): 1041-1047.  
FANG Q Y, CHAI S X, LI M, et al. Influence of freezing-thawing cycles on compressive strength and deformation of solidified saline soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(5): 1041-1047. (in Chinese)
- [22] 王东星, 徐卫亚. 大掺量粉煤灰淤泥固化土的强度与耐久性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3659-3664.  
WANG D X, XU W Y. Research on strength and durability of sediments solidified with high volume fly ash [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3659-3664. (in Chinese)
- [23] 孙道胜, 叶哲, 刘开伟, 等. 碱矿渣胶凝材料的固砂特性及抗硫酸盐侵蚀性能[J]. 材料导报, 2020, 34(10): 10061-10067.
- SUN D S, YE Z, LIU K W, et al. Consolidation characteristics and sulfate resistance of alkali-activated slag cementitious materials [J]. Materials Reports, 2020, 34(10): 10061-10067. (in Chinese)
- [24] 薄煜琳, 杜延军, 魏明俐, 等. 干湿循环对GGBS+MgO改良黏土强度影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊1): 134-139.  
BO Y L, DU Y J, WEI M L, et al. Effect of wetting-drying cycles on strength properties of ground granulated blast-furnace slag and magnesium oxide-stabilized soft clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(Sup 1): 134-139. (in Chinese)
- [25] 蔡光华, 李纪, 王俊阁, 等. 剑麻纤维改良MgO-GGBS碳化粉质黏土物理力学性质与微观机制[J]. 林业工程学报, 2024, 9(5): 161-168.  
CAI G H, LI J, WANG J G, et al. Physical and mechanical properties and microscopic mechanisms of MgO-GGBS carbonated silty clay improved by sisal fiber [J]. Journal of Forestry Engineering, 2024, 9(5): 161-168. (in Chinese)
- [26] 李双杰, 伍浩良, 傅贤雷, 等. 氧化镁碱激发矿粉-膨润土-土竖向屏障材料阻隔铅污染物的化学渗透膜效应[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(6): 1078-1086.  
LI S J, WU H L, FU X L, et al. Experimental study on chemico-osmotic membrane behaviors of reactive MgO-activated slag-bentonite backfill in vertical cutoff walls exposed to Pb-laden groundwater [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(6): 1078-1086. (in Chinese)

(编辑 XXX)