

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.022



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



氧化镁矿粉复配加固砂土的强度特性

陆加越^{1,2}, 白坤³, 张成君⁴, 叶强^{1,2}

(1. 江苏省建筑科学研究院有限公司, 南京 210008; 2. 高性能土木工程材料国家重点实验室, 南京 210008;
3. 中铁十四局集团有限公司, 济南 250101; 4. 中铁十四局集团大盾构工程有限公司, 南京 211899)

摘要:砂土是一种常见的岩土工程材料,为满足工程对强度的需求以及绿色环保的理念,钢铁工业排放的固体废弃物粒化高炉矿粉(GGBS)可用作土体固化剂。以 GGBS 作为固化剂、氧化镁(MgO)作为激发剂,对砂土进行加固,通过无侧限抗压强度试验,分析不同养护龄期(3、7、14、28、56 d)、不同固化剂掺量(8%、10%、12%)、不同氧化镁掺量(0%、5%、10%、15%、20%、40%)对固化土强度发展规律的影响。结果表明:在相同固化剂掺量条件下,当养护龄期小于 7 d 时,固化剂掺量与试样的无侧限抗压强度没有明显关联;当养护龄期大于 7 d 时,固化剂掺量与强度呈明显正相关,龄期越长,砂土的无侧限抗压强度越高;固化剂掺量与砂土的无侧限抗压强度呈正相关;氧化镁掺量虽然能促进无侧限抗压强度的提升,但过量的氧化镁反而会抑制砂土无侧限抗压强度的提升。

关键词:氧化镁;砂土;无侧限抗压强度;粒化高炉矿粉

中图分类号: TU441 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2025)03-0036-05

Strength characteristics of sand treated by magnesium oxide activated granulated blast furnace

LU Jiayue^{1,2}, BAI Kun³, ZHANG Chengjun⁴, YE Qiang^{1,2}

(1. Jiangsu Research Institute of Building Science Co., Ltd., Nanjing 210008, P. R. China; 2. State Key Laboratory of High Performance in Civil Engineering Materials, Nanjing 210008, P. R. China; 3. China Railway 14th Bureau Group Corporation Limited, Jinan 250101, P. R. China; 4. China Railway 14th Bureau Group Mega Shield Construction Engineering Co., Ltd., Nanjing 211899, P. R. China)

Abstract: Sandy soil is a common geotechnical material. To satisfy the mechanical and environmental requirements in engineering, the granulated blast furnace powder (GGBS) as a solid waste discharged by steel industry could replace cement as a soil curing agent. In this study, GGBS was used as curing agent and magnesium oxide (MgO) was used as stimulating agent to reinforce the sand. The influence of curing durations (3, 7, 14, 28, 56 days) and the mixing amount of curing agents (8%, 10%, 12%) as well as the amounts of magnesium oxide (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 40%) on the strength development were analyzed. The results showed that under the same amount of curing agent, the unconfined compressive strength (USC) of cemented sand has no obvious relation with curing age less than 7 days. However, when the curing age was longer than 7

收稿日期: 2022-12-09

基金项目: 国家自然科学基金(52108218)

作者简介: 陆加越(1981-), 高级工程师, 主要从事混凝土外加剂及盾构渣土绿色应用研究, E-mail: 93335534@qq.com.

Received: 2022-12-09

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 52108218)

Author brief: LU Jiayue (1981-), senior engineer, main research interests: application of concrete admixtures and shield sediment, E-mail: 93335534@qq.com.

days, the longer the age period, the higher of the sand soil USC. Furthermore, the amount of curing agent is positively correlated with the unlimited compressive strength of sand. Finally, although magnesium oxide dosage could promote the improvement of the unlimited compressive strength, excessive magnesium oxide would inhibit the increase of the unlimited compressive strength in sand.

Keywords: magnesium oxide; sandy soil; unconfined compressive strength; granulated blast furnace powder

沿海和沿江地区分布较多砂土地基,为使砂土地基在静荷载作用下有足够的强度并改善砂土的不良工程特性,通常使用固化剂对砂土进行固化处理。

目前常通过硅酸盐水泥和石灰对砂土进行固化处理^[1-3],王志刚等^[4]通过水泥基固化剂对中牟地区的细粒土砂进行研究发现,固化后砂土的无侧限抗压强度和抗压回弹模量均有较大提升。郭晓峰等^[5]采用水泥固化剂对某高速公路沿线的砂土进行固化,通过室内试验研究固化土的路用性能,结果表明,固化后的砂土能够满足施工要求。但水泥固化砂土存在资源消耗量大,二氧化碳排放量大,环境污染大等问题,因此,需寻找一种绿色环保的固化剂。

近年来,有学者对 MgO-GGBS(氧化镁活化高炉矿渣)进行了研究,发现 MgO-GGBS 不仅能够有效固化土体,同时具有绿色环保等优势^[6-8]。刘松玉^[9]指出,相比水泥固化土,MgO-GGBS 固化土在抗硫酸盐侵蚀和抗干湿循环的耐久性方面具有显著优势。Wang 等^[10]和 Jin 等^[11]通过试验发现,经处理后的试样中铬、镉、铅、锌的浸出浓度均低于英国饮用水标准,无侧限抗压强度达 3.5 MPa 以上,渗透系数小于 10^{-10} m/s。李晨等^[10]、蔡光华等^[11]通过粒化高炉矿渣微粉对固化土特性影响的研究发现,其也能有效提高固化土抗压强度。李晨等^[12]在针对

GGBS 对高龄土抗压强度的研究中发现,当固化剂掺入 GGBS 后,高岭土的 28 d 抗压强度从 0.35 MPa 提高到 0.85 MPa。蔡光华等^[13]对香港地区的海相沉积物进行固化发现,含有 GGBS 的固化剂在 10% 掺量下的抗压强度值是同样条件下水泥抗压强度值的 2 倍。但由于对 MgO-GGBS 固化的研究通常是针对黏土、软土,对砂土的固化研究较少。笔者通过无侧限抗压强度试验,分析固化剂掺量、龄期、MgO 掺量等对砂土无侧限抗压强度的影响规律,为解决砂土的实际工程应用问题提供依据。

1 试验方案与方法

1.1 试验材料

试验采用的固化剂为 MgO-GGBS。MgO 作为常见的无机非金属材料,具有难溶于水及有机溶剂的物理化学特性,与水反应生成 Mg^{2+} 和 OH^- 的能力较强,能够加速 GGBS 水化,又能够反应生成水滑石等产物^[14]。粒化高炉矿粉(GGBS)则是以一种工业废渣,其主要成分是以硅酸钙和铝酸钙为主的融合物(包含 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 等),是一种玻璃态的粒状活性材料。与水接触后,GGBS 颗粒中 Ca^{2+} 溶于水,GGBS 颗粒所带负电荷与水中 H^+ 生成胶体,在 MgO 碱激发剂情况下,可以促进这一反应进行,还能够生成水滑石(CSH)等物质,可以提高固化土强度。GGBS-MgO 化学成分见表 1。

表 1 氧化镁 GGBS 成分表
Table 1 Chemical composition of MgO and GGBS

材料	成分/%									
	MgO	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Cl	sulfate	K ₂ O	TiO ₂	灼烧失重
GGBS	9.46	32.32	35.69	0.83	15.83	1.11	0	1.09	1.58	0.70
MgO	98.2	0.80	0.35	0.15	0.10	0.35	0.05	0	0	1.70

试验用土是来自某地区的砂土,其级配曲线见图 1。

1.2 试验方案

采用无侧限压缩试验测得的强度值来评估固化土的强度特性,试样采用直径为 50 mm、高度为 100 mm 的圆柱体。固化剂由 MgO-GGBS 组成,分别采用 8%、10%、12% 三种固化剂掺量(固化剂质量与干土质量的比值),固化剂和水按比例 1:1.6 进行混合,并对其进行编号。具体配比见表 2,表 2 中水、固

化剂、砂土质量分别用 w 、 b 、 s 表示,表中编号 B10-M05 表示固化剂掺量为 10%,MgO 占固化剂的 5%,其余编号含义以此类推。

1.3 试验步骤

- 1)将土体粉碎后过 2 mm 筛,去除较细颗粒后置于 105 °C 烘箱内烘干,质量稳定后取出备用。
- 2)用天平称取各配比所需要的 300 g 干土、固化剂和水,将其混合搅拌均匀。
- 3)搅拌后的混合土样分 3 层装入内径为 50 mm、

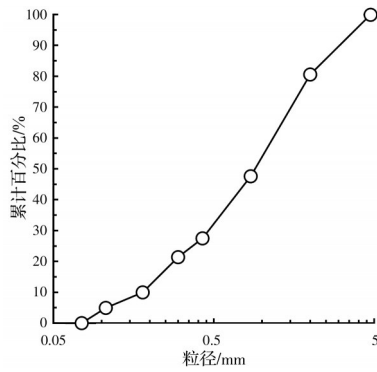


图 1 砂土分级曲线

Fig. 1 The particle size distribution curve of sand

表 2 MgO-GGBS 固化土配比设计试验方案

Table 2 MgO-GGBS stabilized soil mix design and test scheme

编号	MgO 含量/%	GGBS 含量/%	w/b	b/s	龄期/d
B10-M00	0	100	1.6	10	3、7、14、28、56
B10-M05	5	95	1.6	10	3、7、14、28、56
B10-M10	10	90	1.6	10	3、7、14、28、56
B10-M15	15	85	1.6	10	3、7、14、28、56
B10-M20	20	80	1.6	10	3、7、14、28、56
B10-M40	40	60	1.6	10	3、7、14、28、56
B08-M20	20	80	1.6	8	3、7、14、28、56
B12-M20	20	80	1.6	12	3、7、14、28、56

高度为 100mm 的圆柱 PVC 模具中,对土样进行分层击实并振捣排除气泡。

4) 将试样放入 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对空气湿度 95% 以上的标准养护室进行标准养护,待养护至相应龄期后脱模。

5) 脱模后,使用游标卡尺测量试样的高度、直径,称取试样质量并对试样进行无侧限抗压强度测试。

2 试验结果

2.1 养护龄期对强度的影响

固化土的 UCS 随龄期的变化规律如图 2 所示。当固化土养护龄期小于 3 d 时,试样最大 UCS 约为 0.25 MPa,在第 7 天,所有试样的 UCS 值均小于 1 MPa。随着养护龄期的增长,当龄期为 14 d 时,掺加 MgO 的固化剂试样 UCS 增长显著,UCS 大于 1 MPa。从图 2 可以看出,经 3 d 养护的 B10-M20 固化土初期强度仅为 0.11 MPa,而养护至第 7 天,试样 UCS 增长到 0.47 MPa,当养护时间到达 14 d 时,试样的 UCS 为 2.3 MPa。

在养护 28 d 后,有 MgO 参与的固化土 UCS 的变化范围在 2.85~4.77 MPa 之间,B10-M15 试样的

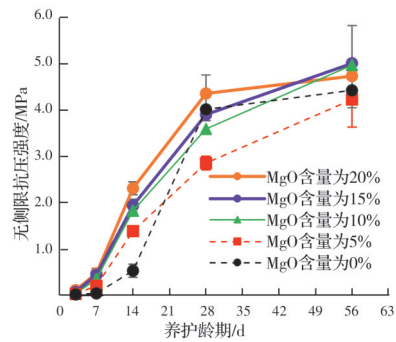


图 2 不同养护龄期下强度的变化趋势

Fig. 2 The UCS of cemented sand under different curing time

UCS 最大,为 4.77 MPa。在养护 56 d 后,试样的 UCS 可达到 4.00~5.07 MPa,其中 B10-M15 试样的 UCS 最大,为 5.0 MPa。以上试验结果表明,在养护龄期超过 28 d 的情况下,固化土 UCS 仍然会随着固化时间增长而增长,但是强度增长并不明显。其原因是,在 28 d 后,固化剂的水化反应已经完成很大一部分,随着养护时间的继续增加,水化反应不如固化前期剧烈,水化产物生成放缓,导致固化土强度增长并不显著。

2.2 固化剂掺量对强度的影响

图 3 为不同固化剂掺量对试样 UCS 的影响。从图中可以看出,在养护龄期为 7 d 时,固化剂掺量为 8% 时试样的 UCS 为 0.1 MPa,固化剂掺量为 10% 时,试样的 UCS 为 0.48 MPa,固化剂掺量为 12% 时,试样的 UCS 为 0.88 MPa。在养护龄期为 14 d 时,当固化剂掺量为 8% 时,试样的 UCS 为 1.03 MPa,固化剂掺量为 10% 时,试样的 UCS 为 2.33 MPa,固化剂掺量为 12% 时,试样的 UCS 为 2.91 MPa。从以上数据可以看出,无论是 7 d 还是 14 d 龄期下,同龄期下,与固化剂掺量为 8% 时相比,固化剂掺量为 12% 时试样的 UCS 增长了 200% 以上。这是因为随着固化剂掺量的增加,MgO-GGBS 所生成的水化产物,如 CSH 也会随之增加,对试样的强度增长有促进作用。

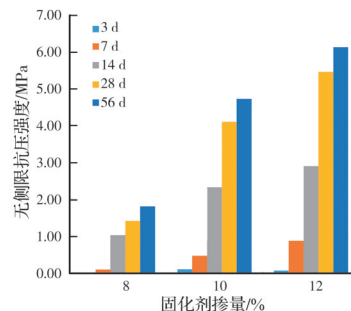


图 3 固化土强度和固化剂掺量之间的关系

Fig. 3 The relationship between UCS and mass ratio of curing agent

2.3 MgO 掺量对强度的影响

以固化剂掺量为 10% 的试样为例, UCS 随 MgO 在固化剂中比例的变化规律如图 4、图 5 所示。随着 MgO 掺量的增加, 当养护龄期介于 0~14 d 时, UCS 随 MgO 掺量增加而增加, 然而当养护龄期达到 28 d 时, 可以看出, 试样 B10-M0 的 UCS 有明显增长趋势, 甚至高于 MgO 掺量为 5%、10%、15% 的试样。尽管 B10-M00 试样中没有掺入 MgO, 但仍然表现出一定的强度, 这是由于 GGBS 中本身已包含多种金属氧化物, 这些金属氧化物也可以作为碱激发剂促进 GGBS 的水化反应。当进一步延长养护龄期至 56 d 时, 试样 B10-M20 会低于试样 B10-M10、B10-M15 的 UCS。综上所述, 在相对较短的养护龄期内 (0~14 d), MgO 作为添加剂有助于增加 GGBS-MgO 固化土的 UCS, 在较长的养护龄期下, 固化土 UCS 的提升不明显。

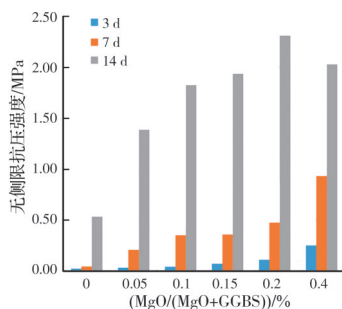


图 4 不同 MgO 掺量下的 UCS (养护龄期: 3、7、14 d)

Fig. 4 The UCS of cemented sand with different MgO contents (curing age: 3, 7, 14 days)

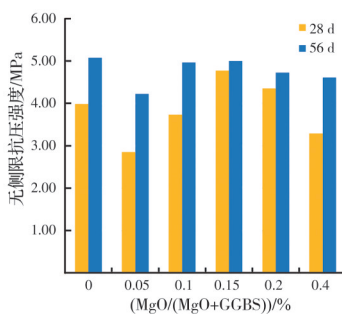


图 5 不同 MgO 掺量下的 UCS (养护龄期: 28、56 d)

Fig. 5 The UCS of cemented sand with different MgO contents (curing age: 28, 56 days)

3 分析与讨论

1) 根据试验结果发现, 固化土的 UCS 与养护龄期、固化剂掺量、固化剂中 MgO 掺量密切相关。随着养护龄期的增长, 固化土的 UCS 随养护龄期提升较小; 在 MgO 掺量过多时, 固化土 UCS 的提升受到抑制。通过分析 MgO-GGBS 的固化机理可知, 在 MgO-GGBS 固化土的过程中, GGBS 颗粒水化生成

纤维状凝胶粒子 C-S-H-I 型溶胶^[15], 与溶液中的 Mg^{2+} 等金属离子和 CO_3^{2-} 反应生成水滑石碳酸钙等物质, 从而使固化土强度得到提升, 随着固化时间的增长, GGBS 逐渐水化完成, 固化土的 UCS 增长放缓。而 MgO 则是作为激发剂, 在水中生成 Mg^{2+} 和 OH^- 。在 GGBS 颗粒水化过程中, 溶液中 Ca^{2+} 和 OH^- 浓度会上升, GGBS 颗粒表面会被 -Si-OH 等胶体覆盖, 阻止进一步水化, MgO 水化后的 OH^- 会使溶液 pH 值升高, 与覆盖在 GGBS 颗粒表面的胶体反应, 促使 GGBS 进一步水化, 直到水化反应完成。所以, 加入 MgO 有助于固化土强度的提高。但随着 MgO 掺量的增加, 水化产物中更多的水滑石生成, 进而导致固化土中水滑石含量过大, 使固化土受到膨胀应力, 这也可能导致高 MgO 掺量下的固化土 UCS 下降^[15]。

2) 评价固化土加固效果最直观的参数是 UCS, 在实际工程应用中, UCS 也是评价路基土路用性能的一个重要指标。正是基于此, 笔者对影响固化土 UCS 的多种因素展开研究, 以为后续工程应用提供充足的理论依据。

4 结论

1) 总体而言, 固化土的 UCS 随着养护龄期的增加而提高, 28 d 后 UCS 增长放缓。MgO-GGBS 的水化产物主要是在养护第 7~28 d 生成, 随着养护时间的增长, 水化反应逐渐放缓, 水化产物生成速度下降, 固化土强度趋于稳定。

2) 养护龄期小于 7 d 时, 固化剂的掺量与试样的 UCS 并没有明显关联。养护龄期大于 7 d 后, 固化剂的掺量和强度呈明显正相关。

3) 当养护龄期小于 14 d 时, 固化土的 UCS 随着 MgO 掺量的增加而提高。当养护龄期较长时 (>14 d), 如果 MgO 掺量超过一定数值, 固化土的 UCS 有所减弱。

参考文献

- [1] DUPAS J M, PECKER A. Static and dynamic properties of sand-cement [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1979, 105(3): 419-436.
- [2] TARIQ K A, MAKI T. Mechanical behaviour of cement-treated sand [J]. Construction and Building Materials, 2014, 58: 54-63.
- [3] ISLAM M S, TAUSIF-E-ELAH, SHAHRIAR A R, et al. Strength and durability characteristics of cement-sand stabilized earth blocks [J]. Journal of Materials in

- Civil Engineering, 2020, 32(5): 04020087.
- [4] 王志刚, 乐旭东, 崔慧丽, 等. 土壤固化剂稳定砂土应用研究[J]. 路基工程, 2012(4): 75-76, 81.
WANG Z G, LE X D, CUI H L, et al. Study on application of soil stabilizer for sandy soil stabilizing [J]. Subgrade Engineering, 2012(4): 75-76, 81. (in Chinese)
- [5] 郭晓峰, 陈晓光. 水泥固化剂稳定砂土路用性能试验研究[J]. 绿色环保建材, 2018(11): 18-19.
GUO X F, CHEN X G. Experimental study on road performance of cement curing agent stabilized sandy soil [J]. Green Environmental Protection Building Materials, 2018(11): 18-19. (in Chinese)
- [6] 王泽鑫. 基于 GGBS 固化芜湖软土配方优化研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2018.
WANG Z X. Optimization of Wuhu soft soil formulation based on GGBS solidification [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2018. (in Chinese)
- [7] HAN X L, JIANG N J, JIN F, et al. Effects of biochar-amended alkali-activated slag on the stabilization of coral sand in coastal areas [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(3): 760-772.
- [8] 徐家俊, 傅勇, 陈洋彬. CaO-GGBS 固化土压缩特性的试验研究[J]. 地基处理, 2022, 4(Sup 1): 14-21.
XU J J, FU Y, CHEN Y B. Experimental study of compressibility characteristic of CaO-GGBS stabilized soil [J]. Journal of Ground Improvement, 2022, 4(Sup 1): 14-21. (in Chinese)
- [9] 刘松玉. 污染场地测试评价与处理技术[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(1): 1-37.
LIU S Y. Geotechnical investigation and remediation for industrial contaminated sites [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(1): 1-37. (in Chinese)
- [10] WANG F, JIN F, SHEN Z T, et al. Three-year performance of in situ mass stabilised contaminated site soils using MgO-bearing binders [J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 318: 302-307.
- [11] JIN F, WANG F, AL-TABBAA A. Three-year performance of in situ solidified/stabilised soil using novel MgO-bearing binders [J]. Chemosphere, 2016, 144: 681-688.
- [12] 李晨, 孙川, 刘松玉. 粒化高炉矿渣微粉对固化土特性影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(Sup 2): 1827-1832.
LI C, SUN C, LIU S Y. The effects of GGBS on the engineering properties of stabilized soil [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9 (Sup 2): 1827-1832. (in Chinese)
- [13] 蔡光华, 周伊帆, 潘智生, 等. 生石灰激发 GGBS 固化高含水率香港海相沉积物的物理力学性质研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(2): 327-336.
CAI G H, ZHOU Y F, POON C S, et al. Physical and mechanical performance of quicklime-activated GGBS stabilized Hong Kong marine sediment at high water content [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(2): 327-336. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] 刘松玉, 曹菁菁, 蔡光华. 活性氧化镁碳化固化粉质黏土微观机制[J]. 岩土力学, 2018, 39(5): 1543-1552, 1563.
LIU S Y, CAO J J, CAI G H. Microstructural mechanism of reactive magnesia carbonated and stabilized silty clays [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(5): 1543-1552, 1563. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)