

DOI: 10.11779/CJGE2021S2052

GGBS-活性 MgO 碳化/稳定化锌污染土的强度及电导率特性试验研究

钟煜清¹, 蔡光华^{*1, 2}, 王俊阁¹, 王 中¹, 宋龙广¹

(1. 南京林业大学土木工程学院, 江苏 南京 210037; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 采用工业废弃物粒化高炉矿渣(GGBS)-活性氧化镁(MgO)复合固化剂对锌(Zn)污染土进行碳化/稳定化处理, 开展了碳化/稳定化 Zn 污染土的无侧限抗压试验和电导率测试试验, 并与自然养护 28 d 的未碳化 Zn 污染土进行对比。研究了 Zn²⁺浓度、固化剂掺和比对碳化/稳定化 Zn 污染土的无侧限抗压强度(q_u)和孔隙液电导率特性的影响规律。试验结果表明: ①当固化剂掺和比一定时, 碳化固化 Zn 污染土的 q_u 随 Zn²⁺浓度的增加呈现先上升后降低趋势, 而电导率呈持续上升趋势; ②当 Zn²⁺浓度一定时, 碳化固化土的 q_u 随复合固化剂中活性 MgO 含量的提高而上升, 但其电导率却略有下降; ③与自然养护 28 d 的未碳化 Zn 污染土相比, 碳化后 Zn 污染土的 q_u 更高, 但电导率几乎不变。研究成果为工业废弃物和二氧化碳的再利用及其在重金属 Zn 污染土的绿色处理提供了新途径, 对加速“碳达峰”具有重要的理论意义。

关键词: GGBS; 活性 MgO; 锌污染土; 无侧限抗压强度; 电导率

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)S2-0221-04

作者简介: 钟煜清(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事环境岩土及特殊土处理研究。E-mail: yqzhong_njfu@163.com。

Strength and electrical conductivity characteristics of zinc contaminated soil carbonated/stabilized with GGBS-reactive MgO

ZHONG Yu-qing¹, CAI Guang-hua^{1, 2}, WANG Jun-ge¹, WANG Zhong¹, SONG Long-guang¹

(1. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and

Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: In this study, the compound binder of ground granulated blast furnace slag (GGBS)-reactive MgO is used for the carbonization/stabilization treatment of zinc (Zn)-contaminated soil. The unconfined compression and electrical conductivity tests on the carbonated/stabilized Zn-contaminated soil are conducted, and the uncarbonated Zn-contaminated soil after 28-day standard curing is used for comparison. The effects of Zn-ion concentration and binder mixing ratio on the unconfined compressive strength (q_u) of the carbonated/stabilized soils and the conductivity of the pore fluid are investigated. The test results indicate that: (1) When the mixing ratio of curing agent is fixed, the q_u of the carbonated Zn-contaminated soil first increases and then decreases with the increase of Zn ion concentration, while the conductivity increases. (2) When the content of Zn-ion concentration is fixed, the q_u of the carbonated Zn-contaminated soil increases with the increase of reactive MgO content in the binder, but its conductivity decreases slightly. (3) The q_u of the carbonated zinc contaminated soil is higher compared with that of the noncarbonated Zn-contaminated soil (28-day standard curing), but the conductivity is almost the same. This study will provide a new approach for the reuse of industrial wastes and carbon dioxide as well as the low-carbon treatment of Zn-contaminated soil, and be of important significance for accelerating the “carbon peak”.

Key words: GGBS; active MgO; zinc-contaminated soil; unconfined compressive strength; electrical conductivity

0 引 言

中国的工程建设中常遇到重金属污染土, 而目前多采用高能耗、高污染的水泥进行固化/稳定化处理。在重金属污染土处理领域, 固化/稳定化技术(solidification/stabilization, 即 S/S)因其既能提高修

复土体的强度, 又能降低重金属离子的迁移率, 而被

基金项目: 国家自然科学基金项目(41902286); 岩土力学与工程国家重点实验室开放基金课题项目(Z019026); 大学生科研创新项目(201910298123Y)

收稿日期: 2021-08-15

***通信作者** (E-mail: ghcai@njfu.edu.cn)

表 1 试验土样的物理化学指标
Table 1 Physical and chemical indexes of soil samples

天然含水率/%	液限/%	塑限/%	最优含水率/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	相对质量密度	pH 值
26.1	33.8	22.9	14.2	1.64	2.71	8.78

科研工作者所青睐^[1]。在特殊土改良处理过程中，普通硅酸盐水泥是 S/S 技术的首选固化剂，国内外学者对其进行了大量研究^[2-3]。但普通硅酸盐水泥具有许多无法忽视的缺点：生产过程中资源消耗严重，并伴随 CO₂ 的大量排放和环境污染，且由于水泥水化过程缓慢而导致其固化效率较低，同时水泥固化土的耐久性也较差^[4]。因此，亟需探索一种绿色环保的固化材料和方法来处理重金属 Zn 污染土。

近年来，碱激发固化技术受到了国内外学者的关注，矿渣是一种具有潜在胶凝特性且含有较低火山灰活性的工业废弃物，经碱激发后可以加速其水化反应，发挥胶结作用^[5]。Yi 等^[6]研究发现，相比 Ca(OH)₂，活性 MgO 能更有效地激发矿渣中的火山灰成分。Du 等^[7]研究表明，在一定干湿循环条件下，GGBS-MgO 固化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。然而活性 MgO 等碱激发材料的掺合比对固化效果有较大影响，如掺合比选用不恰当会导致碱激发材料或矿渣的浪费。

针对这一问题，活性 MgO-CO₂ 碳化技术在碱性材料固化利用方面具有一定优势。Cai 等^[8]使用活性 MgO 和 CO₂ 作为固化剂碳化固化处理了粉土，研究表明，当活性 MgO 含量小于 25%且碳化时间低于 10 h 时，碳化土样将获得显著的强度增长。刘松玉等^[9]研究了活性 MgO 碳化固化粉质黏土的微观机制，提出了相应碳化反应微观模型，确定最高强度的临界碳化时间为 6 h。

综上所述，本文结合当下探究工业废渣再利用的热点和正在逐渐兴起的活性 MgO-CO₂ 碳化技术，提出使用 GGBS-活性 MgO 对 Zn 污染土进行碳化固化/稳定化处理，并使用土体的无侧限抗压强度和电导率指标评价处理效果。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

本试验所用土样为粉土，取自徐明高速公路徐州段的施工现场，其基本物理化学指标如表 1 所示。氧化镁 (MgO) 为高活性 MgO，由邢台镁神化工有限公司生产；所用矿渣为工业矿渣 (GGBS)，取自安徽马鞍山钢厂。本试验采用的重金属是锌，主要通过向土样内加入不同含量的分析纯级硝酸锌来达到所需含锌量。

1.2 试验方案

根据已有的试验研究结果^[10]及现有实验室条件，设定初始含水率为 20%，固化剂掺量设为 15%，碳化时间为 6 h，碳化 CO₂ 通气压力为 200 kPa，并设有两个变量，分别为重金属离子浓度和固化剂掺和比 (MgO : GGBS)。同时，设置一组未碳化且自然养护 28 d 的试样进行对照，具体试验组编号及变量值如表 2 所示。

表 2 不同条件影响下的试验方案
Table 2 Test schemes under different conditions

编号	重金属离子 浓度/%	固化掺合比	是否碳化
0d-25:75	0.5/1.0/2.0	25 : 75	√
0d-50:50	0.5/1.0/2.0	50 : 50	√
0d-75:25	0.5/1.0/2.0	75 : 25	√
28d-25:75	0.5/1.0/2.0	25 : 75	×
28d-50:50	0.5/1.0/2.0	50 : 50	×
28d-75:25	0.5/1.0/2.0	75 : 25	×

在碳化固化/稳定化及自然养护 28 d 结束后，对处理后的土样进行无侧限抗压强度和电导率测试以评价固化后土体的强度和孔隙液中的金属离子含量。

2 试验结果

2.1 无侧限抗压强度测试结果

处理土样的无侧限抗压强度结果如图 1 所示。由图 1 (a) 可以看出，对于碳化土，当固化剂中活性 MgO 与 GGBS 的掺和比一定时，其 q_u 值随土中 Zn²⁺ 浓度的提高而呈先升高后降低趋势；当土中 Zn²⁺ 浓度为 1% 时，碳化土样获得最高的 q_u 值。同时，当土中 Zn²⁺ 浓度一定时，碳化土的 q_u 值随固化剂中活性 MgO 含量的提升而升高，且当活性 MgO 掺量大于 50% 时，固化剂对于碳化土的强度提升更为显著。对比图 1 (b) 可以看出，未碳化且自然养护 28 d 固化土的 q_u 值显著低于同固化剂掺和比和同离子浓度的碳化土 q_u 。当固化剂掺和比一定时，随着土中 Zn²⁺ 浓度增加，28 d 固化土的 q_u 值仅小幅上升，表明增大土中 Zn²⁺ 浓度对自然养护 28 d 固化土的 q_u 影响要显著小于其对碳化土的影响。

2.2 电导率测试结果

处理土样的孔隙液电导率结果如图 2 所示。由图 2 (a) 得出，当固化剂中活性 MgO 与 GGBS 掺和比一定时，随着 Zn²⁺ 浓度的增加，碳化前土体的

孔隙液电导率显著提升, 但当土中 Zn^{2+} 浓度一定时, 其孔隙液电导率随固化剂中活性 MgO 含量的提高而轻微降低。对比图 2 (b) 可以发现, 几乎所有碳化后土体的孔隙液电导率均大于其同离子浓度和同固化剂掺和比的未碳化土孔隙液电导率。

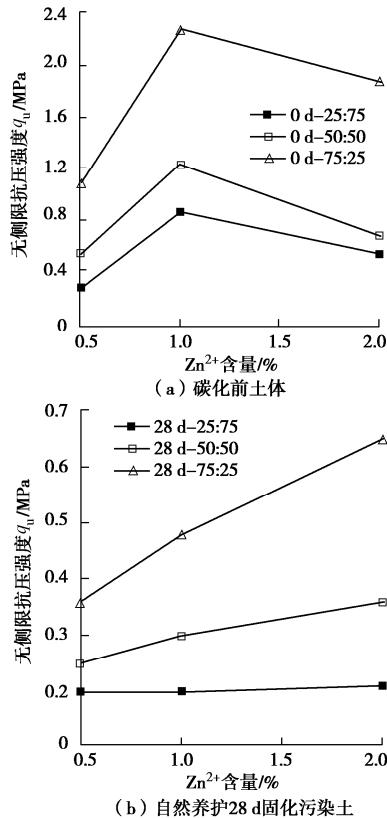


图 1 无侧限抗压强度试验结果

Fig. 1 Results of unconfined compressive strength tests

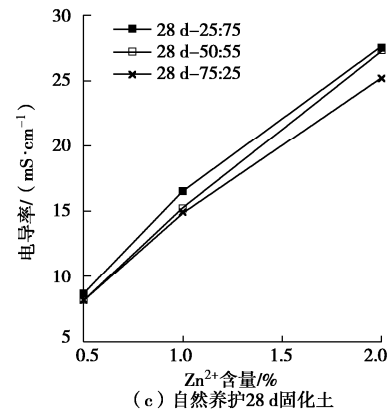
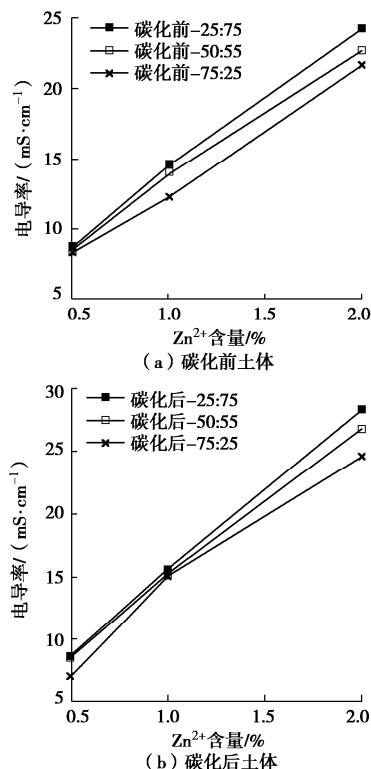


图 2 电导率试验结果

Fig. 2 Results of conductivity tests

如图 2 (c) 所示, 对于自然养护 28 d 的固化土来说, 仅从数值上来看, 其孔隙液电导率与碳化 6 h 后的碳化土没有显著的差距。同时, 与碳化前和碳化后土体一样, 当土中 Zn^{2+} 浓度一定时, 自然养护 28 d 固化土的孔隙液电导率也随固化剂中活性 MgO 含量的增加而出现了轻微的降低。

3 讨 论

基于本研究的测试结果, 对碳化/稳定化 Zn 污染土的强度和电导率进行进一步讨论。

(1) GGBS-活性 MgO 碳化/稳定化锌污染土的 q_u 值表明, 碳化/稳定化对于 Zn^{2+} 浓度为 1% 的重金属污染土处理效果最佳。其原因是: 当土中 Zn^{2+} 含量较低时, 土体的孔隙率较大, 矿渣水化及活性 MgO 碳化后产生的胶凝产物将更多地填充了土体孔隙, 并未很好地胶结土颗粒, 导致碳化土的整体强度不高; 而当 Zn^{2+} 浓度较高时, 大量的 Zn^{2+} 会在一定程度上阻碍矿渣水化, 减少胶凝产物的形成, 使土体强度较 Zn^{2+} 浓度为 1% 时有所下降。当土中 Zn^{2+} 浓度一定时, 随着固化剂中活性 MgO 掺量的提升, 碳化土的 q_u 值也有较大幅度的升高, 这可能是由于当活性 MgO 含量较低时, 几乎所有的活性 MgO 都被用于激发矿渣水化反应以生成胶凝物质水化硅酸钙和水滑石^[11], 而用于碳化反应的活性 MgO 较少; 当活性 MgO 含量较高时, 便既能激发 GGBS 水化生成上述胶凝物质, 又可以有较多的活性 MgO 被用于碳化反应从而生成三水碳镁石、球碳镁石等新的胶凝物质以更一步地包裹和胶结土颗粒使得重金属污染土的整体强度有所提高^[9]。

(2) GGBS-活性 MgO 碳化/稳定化锌污染土的孔隙液电导率表明, 碳化后土体的孔隙液电导率较碳化前有轻微的提升。其可能原因是: GGBS 水化和活性 MgO 碳化后的胶凝产物对土中的 Zn^{2+} 进行了包裹, 这可能会导致土体的孔隙液电导率较碳化前有所降

低,但同时在 GGBS 和活性 MgO 的水化过程中又会产生大量的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ,而正是这些新阳离子的出现导致了土体的孔隙液电导率的升高。此外,在 Zn^{2+} 浓度一定时,无论是碳化前、碳化后的土体还是自然养护 28 d 固化土,其孔隙液电导率都表现出随固化剂中活性 MgO 掺量的升高而降低。其可能原因是:逐渐增加的活性 MgO 促使了矿渣中火山灰成分的水化,使土中水分减少,含水率降低;从而活性 MgO 的水化作用减弱使得土中的 Mg^{2+} 含量减少,因此降低了高 MgO 含量土的孔隙液电导率。

4 结 论

本文使用 GGBS-活性 MgO 复合固化剂对 Zn 污染土进行碳化/稳定化处理,并得出了以下 3 点结论。

(1) 当固化剂中活性 MgO 与 GGBS 的掺和比不变时,随着土中 Zn^{2+} 浓度的提高,碳化土体的无侧限抗压强度呈现先上升后降低趋势,且在土中 Zn^{2+} 浓度为 1% 时达到最高强度;同时碳化土体的孔隙液电导率随着土中 Zn^{2+} 浓度的提高呈现持续上升趋势。

(2) 当土中 Zn^{2+} 离子浓度不变时,随着固化剂中活性 MgO 掺量的增加,碳化土体的无侧限抗压强度表现出显著上升的现象,且当固化剂中活性 MgO 掺量大于 50% 时,碳化土的强度上升幅度明显增大;但同时碳化土的孔隙液电导率却有轻微的降低。

(3) 在同离子浓度和同固化剂掺量的情况下,碳化土的无侧限抗压强度要明显高于自然养护 28 d 的固化土,但其孔隙液电导率却几乎持平。

参考文献:

- [1] CHEN Q Y, TYRER M, HILLS C D, et al. Immobilisation of heavy metal in cement-based solidification/ stabilisation: a review[J]. Waste Management, 2009, **29**(1): 390 - 403.
- [2] VOGLAR G E, LEŠTAN D. Solidification/stabilisation of metals contaminated industrial soil from former Zn smelter in Celje, Slovenia, using cement as a hydraulic binder[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **178**(1/2/3): 926 - 933.
- [3] LIU J J, ZHA F S, XU L, et al. Strength and microstructure characteristics of cement-soda residue solidified/ stabilized zinc contaminated soil subjected to freezing- thawing cycles[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, **172**: 102992.
- [4] 曹菁菁. 活性氧化镁碳化固化土微观机理及应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2016. (CAO Jing-jing. The Application and Micro-mechanism of Carbonated Reactive Magnesia Solidified Soils[D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese))
- [5] 陈金洪, 贺瑶瑶, 胡亚凤. 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 Jin-hong, HE Yao-yao, HU Ya-feng. 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))
- [6] YI Y L, LISKA M, AL-TABBAA A. Properties and microstructure of GGBS-magnesia pastes[J]. Advances in Cement Research, 2014, **26**(2): 114 - 122.
- [7] 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.
- [8] CAI G H, LIU S Y, DU Y J, et al. Strength and deformation characteristics of carbonated reactive magnesia treated silt soil[J]. Journal of Central South University, 2015, **22**(5): 1859 - 1868.
- [9] 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 - 1563. (LIU Song-yu, CAO Jing-jing, CAI Guang-hua. Micromechanism of carbonation and solidification of silty clay with activated magnesium oxide [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(5): 1543 - 1552, 1563. (in Chinese))
- [10] YI Y L, LISKA M, AL-TABBAA A. Properties of two model soils stabilized with different blends and contents of GGBS, MgO , lime, and PC[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, **26**(2): 267 - 274.
- [11] 薄煜琳. 粒化高炉矿渣和氧化镁固化稳定化铅污染黏土的强度、溶出及微观特性的研究[D]. 南京: 东南大学, 2015. (BO Yu-lin. The Strength, Leaching and Microscopic Mechanism of Ground Granulated Blast Furnace Slag and Magnesium Oxide Stabilized Lead-Contaminated Soils[D]. Nanjing: Southeast University, 2015. (in Chinese))

(编校: 孙振远)