

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.11.003

活性 MgO 碳化固化土的抗硫酸盐侵蚀性研究

刘松玉^{1,2}, 郑旭^{1,2}, 蔡光华^{1,2}, 曹菁菁^{1,2}

(1.东南大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210096; 2.东南大学 江苏省城市地下工程与环境安全重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘 要: 既有研究表明, 活性 MgO 固化土经 CO₂ 碳化几小时后其强度能达到甚至超过 28 d 的水泥固化土强度, 碳化反应生成镁的碳酸化合物能有效降低固化土的含水率和孔隙率, 提高土颗粒胶结能力。通过室内试验进一步研究碳化固化土的抗硫酸盐侵蚀特性。采用硫酸钠溶液、硫酸镁溶液浸泡碳化固化土, 对浸泡不同龄期后的碳化固化土进行无侧限抗压强度试验和微观测试 (XRD, SEM 和 MIP), 并与硫酸盐侵蚀后的水泥固化土进行试验对比。结果表明: 活性 MgO 固化粉土碳化 3 h, 试样的无侧限抗压强度可达 5 MPa 左右, 经硫酸盐溶液浸泡 28 d 后其强度基本保持不变, 试样质量变化也不大; 而水泥土试样的早期强度 (7 d) 则有一定增长, 随龄期增长, 强度大大降低, 质量则明显增长。通过对硫酸盐侵蚀前后的碳化土的微观机制分析, 发现活性 MgO 碳化固化土中的镁碳酸化合物的化学成分并未发生明显变化, 孔隙结构也未明显改变, 从而保证其强度稳定。因此, 活性 MgO 固化粉土碳化后具有比水泥固化土更强的抗硫酸盐侵蚀能力。

关 键 词: 土体固化; 活性 MgO; 碳化; 水泥土; 硫酸盐

中图分类号: TU 472

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2016) 11-3057-08

Study of resistance to sulfate attack of carbonated reactive MgO-stabilized soils

LIU Song-yu^{1,2}, ZHENG Xu^{1,2}, CAI Guang-hua^{1,2}, CAO Jing-jing^{1,2}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China

2. Jiangsu Key Laboratory of Urban Underground Engineering & Environmental Safety, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: It has been shown that reactive MgO-stabilized soils carbonated by CO₂ after a few hours have almost the same or even more strength of 28-day curing cemented soils. The predominant products of the carbonated reactive MgO-stabilized soils are the hydrated magnesium carbonates, which can significantly reduce the water content and porosity of stabilized soils, and increase the binding strength between soil particles. The sulfate resistance of carbonated reactive MgO-stabilized soils is further studied through laboratory tests. The sodium and magnesium sulfate solutions are selected respectively for soaking the carbonated soil samples and contrasting to cemented soil samples. After soaking different days, the unconfined compressive strength of these samples are measured, and then the microstructure characteristics are analyzed by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and Mercury intrusion porosimetry (MIP) tests. The results show that the unconfined compressive strength of the MgO-stabilized soils can reach about 5 MPa after the carbonation of 3 hours. It remains almost the same strength and mass after the sulfate attack of 28 days, while the strength of the cemented soil decreases greatly after sulfate attack with its mass significantly increasing, though it increases slightly at the shorter attacking time (7 days). The microstructure analysis reveals that the hydrated magnesium carbonates generated by carbonation and its pore structure do not change significantly after the sulfate attack, thus ensuring its stable strength. Therefore, it can be concluded that the carbonated reactive MgO-stabilized soil has better resistance to the sulfate attack compared to the cemented soil.

Keywords: soil stabilization; reactive MgO; carbonation; cemented soil; sulfate

1 引 言

水泥土搅拌法广泛应用于软土地基的加固处

理^[1], 但使用水泥作为固化剂存在高能耗、高 CO₂ 排放和不可再生资源消耗、环境污染和固化速率较慢等问题^[2-5]。寻找可以替代水泥的低碳、环保的新

收稿日期: 2014-12-22

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No. 41330641); 国家自然科学基金项目 (No. 51279032); “中央高校基本科研业务费专项资金资助”和“江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目” (No. KYLX_0147)。

This work was supported by the Major Program of National Natural Science Foundation of China (41330641), the National Natural Science Foundation of China (51279032), and the Central University Special Funding for Basic Scientific Research Business Expenses and Graduate Student Scientific Research Innovation Program of Jiangsu Province (KYLX_0147).

第一作者简介: 刘松玉, 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事土力学理论、桩基工程、特殊地基和路基稳定、地下空间技术、原位测试技术等方面的研究工作。E-mail: liusy@seu.edu.cn

型土壤固化剂或固化方法对于工程建设可持续发展具有重要意义。

2001 年, 澳大利亚科学家 Harrison^[6]发明了一种以活性 MgO 和普通硅酸盐水泥混合的新型水泥 (Eco-Cement), 并认为该水泥具有优良的工程力学性质和环境效益。

活性 MgO 能够快速水化成 $Mg(OH)_2$, 并与 CO_2 发生反应, 生成镁的碳酸化合物, 其具有较高的胶结强度。2004 年, 英国剑桥大学 Al-Tabbaa 课题组对活性 MgO 水泥的应用进行了研究, 研究表明, 仅以活性 MgO 作为固化剂而不添加波特兰水泥的砌块, 经强制碳化能达到 2~3 倍波特兰水泥砌块的强度, 同时可吸收与 MgO 几乎相同质量的 CO_2 ^[7-8]。

2011 年, 东南大学岩土工程研究所研制了碳化固化的相关室内试验设备, 采用国内常用的建材活性氧化镁, 以徐州粉质土作为加固对象, 对碳化搅拌桩技术进行了初步试验研究^[9-10]。前期研究表明, 氧化镁固化土能在 3 h 内完成主要强度增长, 其强度则为相同配比 28 d 普通硅酸盐水泥 (32.5 级) 固化土的 2~3 倍, CO_2 吸收量可达理论值的 90%^[11]。目前, 市场工业级活性 MgO 价格为 400 元/吨左右, 袋装 42.5 级水泥约为 380~400 元/吨, 两者单价基本相当。综合比较, 碳化搅拌桩比波特兰水泥搅拌桩减少约 90% 的工期、65% 的生产能耗、77% 的 CO_2 排放^[12]。

已有研究表明, 在对含有硫酸盐的土壤进行固化时, 会产生很大程度的体积膨胀, 从而使水泥固化土发生破坏^[13-14], Liska 等^[15]对碳化氧化镁水泥试块的抗盐酸和硫酸镁溶液侵蚀的能力进行了研究, 结果表明, 碳化砌块抗硫酸镁侵蚀的能力明显优于水泥试块。本文通过室内模拟试验, 对比分析粉土+MgO 碳化试样和水泥试样分别在清水养护和在两种硫酸盐溶液中不同养护龄期的抗压强度等力学特性指标, 并通过 XRD (X 射线衍射)、SEM (电镜扫描) 和 MIP (压汞) 对其微观机制进行研究, 为评价碳化固化土的抗硫酸盐侵蚀性能提供依据。

2 试验方案和方法

2.1 试验材料

试验采用粉土, 取自江苏徐明高速公路徐州段工地, 取土深度为地表以下 4~5 m, 颗粒级配曲线如图 1 所示, 其主要物理指标如表 1 所示; 活性 MgO 购自邢台市镁神化工有限公司生产的轻质 MgO, 水泥使用南京产“海螺牌” 32.5 普通硅酸盐水泥。试验材料的主要化学成分如表 2 所示。

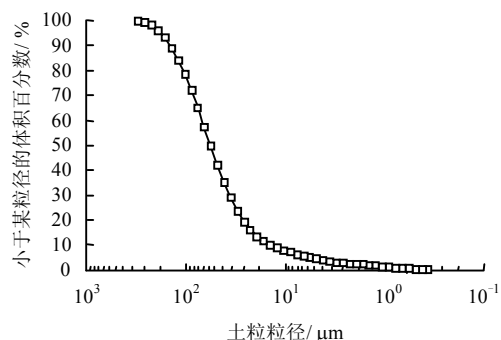


图 1 粉土的颗粒级配曲线

Fig.1 Grain size distribution curve of silt

表 1 粉土主要物理指标

Table 1 Basic characteristics of silt

土粒相对密度 G_s	液限 w_L / %	塑限 w_p / %	塑性指数	pH
2.7	33.8	23.9	9.9	8.78

表 2 试验材料的主要化学成分 (单位: %)

Table 2 Chemical compositions of test materials (unit: %)

成分	活性 MgO	水泥	粉土
MgO	91.80	1.16	1.22
SO ₃	0.40	3.28	0.27
CaO	1.26	48.80	6.41
SiO ₂	3.91	27.40	71.80
Al ₂ O ₃	0.30	11.50	10.20
Fe ₂ O ₃	0.30	3.43	3.57
P ₂ O ₅	0.31	0.13	0.51

2.2 制样方法

试样均采用静压法进行制备。为了保证平行试样的均匀性, 控制试样干密度与天然土体干密度相近, 均为 1.375 g/cm^3 。为了能够顺利制样并成功脱模, 选定试样土体初始含水率 ($m_w/m_{\text{干土}}$) 为 25%, 氧化镁干粉掺量 ($m_{\text{MgO}}/m_{\text{干土}}$) 为 15%。通气时间为 3 h。同时采用静压法制备水泥固化土对比样, 控制干密度为 1.40 g/cm^3 , 土体初始含水率、水泥掺量如上所述。

试验前先将粉土晾晒、粉碎后过 2 mm 筛, 再将过筛后的土放入烘箱烘干。在实验室内调配出初始含水率 ($m_w/m_{\text{干土}}$) 为 25% 的拟加固土。拟加固土调配完毕后, 将其放入搅拌机, 在机械搅拌的同时向土中缓慢均匀地加入预先称量好的氧化镁。待混合物搅拌均匀后采用静压法进行制样。

静压法制样过程如下: (1) 称取每一个试样需要的混合料质量, 分 3 次将土填入模具中并分层人工压实。(2) 当最后 1/3 的土样装入模具中后, 用油压千斤顶进行压实, 至所有土样被均匀压实。 (3) 压实后将辅助模具卸下, 使用脱模仪器

进行脱模出样。

本次试验中采用静压法制成直径为 50 mm、高为 100 mm 的圆柱形试样。静压法制成试样后, 测量试样直径、长度和质量后, 立即装入碳化装置进行通气碳化。

2.3 碳化方法

试样采用三轴碳化装置进行通气碳化, 三轴碳化室具体构造见图 2。通气装置由 TSS-2 型柔性壁三轴渗透仪改装, 将其渗透压力管与 CO₂ 气瓶相连接, CO₂ 出气阀采用压力控制式气阀以控制 CO₂ 通气压力。改装后的通气装置如图 3 所示。碳化过程中控制 CO₂ 气体压力为 200 kPa, 围压为 300 kPa。通气 3 h 后取出试样, 即完成碳化试样的制备。

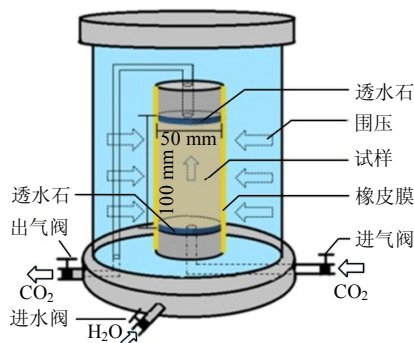


图 2 碳化装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of carbonation device



图 3 CO₂ 通气装置

Fig.3 CO₂ air-breather device

2.4 硫酸盐溶液的配制

硫酸盐溶液浓度参考 ASTM C1012/C1012M - 10^[16], 选用 50 g/L 的 Na₂SO₄ (0.347 mol/L, pH=7.92) 溶液和 MgSO₄ (0.416 mol/L, pH=7.25) 溶液。

2.5 试验方案

将碳化完成的试样放入养护室(温度 20±2 °C, 相对湿度 ≥95%) 中养护 1 d 后进行硫酸盐浸泡试验。水泥石试样制好后直接放入养护室中进行养护, 28 d 后进行硫酸盐浸泡试验。试验制备了碳化土试样和水泥石试样各 30 个, 每 3 个分为一组, 试样代

号见表 3。

表 3 试样代号

Table 3 Codes for samples

	浸泡前	蒸馏水 浸泡	Na ₂ SO ₄ 溶液浸泡	MgSO ₄ 溶液浸泡
碳化土	CB	CW	CN	CM
水泥石	PB	PW	PN	PM

注: C 代表碳化试样; P 代表水泥石试样; W、N、M 分别代表蒸馏水、Na₂SO₄ 溶液和 MgSO₄ 溶液。

在试样浸泡过程中, 要使其完全浸没在溶液中。溶液每周更新一次。先对碳化土养护 1 d (CB) 和水泥石养护 28 d (PB) 试样进行测试, 作为硫酸盐浸泡试验的试样初始值, 然后经过 7、14、28 d 后分别对不同条件的试样进行测试, 测试内容有试样尺寸、质量和无侧限抗压强度。

试样质量测试方法: 试样浸泡到测试龄期后将试样小心从溶液中取出, 用毛巾轻轻擦去试样表面的溶液, 然后小心将试样整个一起放在精度为 0.01 g 的电子天平上测试此时试样质量, 记录完毕后, 将试样放入更新过溶液的容器中继续进行侵蚀试验。

无侧限抗压强度试验设备采用南京宁曦土壤有限公司 2009 年 6 月出厂的 YSH-2 型石灰土无侧限压力仪, 压力传感器系数为 21 N/0.01mm, 试样承压台上升速率为 1 mm/min。

3 试验结果

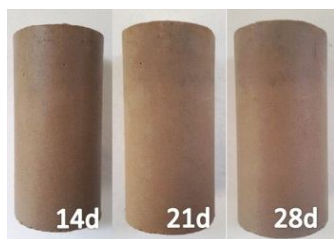
3.1 试样外观和质量变化

通过观察发现, 在硫酸盐溶液中浸泡的试样由于受到硫酸盐侵蚀作用表面都有不同程度的变化, 从图 4 可以看出, 在两种硫酸盐溶液中浸泡的水泥石试样主要表现为膨胀开裂, 并且浸泡到 28 d 时已经出现严重的膨胀破坏, 并且 MgSO₄ 溶液中水泥石试样的破坏最为严重。相同情况下, 碳化试样在硫酸盐溶液中浸泡外观所表现的变化为轻微的起皮和孔洞, 到 28 d 时也能够保持试样的完整性。

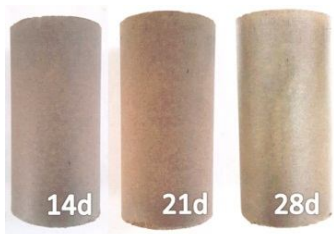
图 5 是不同试样在不同溶液中浸泡的质量变化率图, 其中质量变化率的计算公式为

$$w_n = \frac{m_n - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: w_n 为每个试样浸泡时间后的质量变化率; m_n 为每个浸泡时间后试样的平均质量; m_0 为浸泡试验开始前试样的平均质量 (碳化样取碳化完成后标准养护 1 d 的平均质量, 水泥样取标准养护 28 d 后试样的平均质量)。



(a) 粉土+MgO 碳化 3 h 试样清水浸泡



(b) 粉土+水泥试样清水浸泡

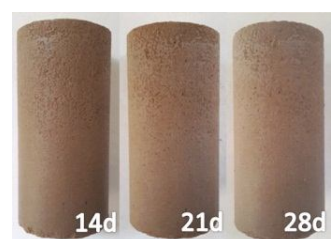
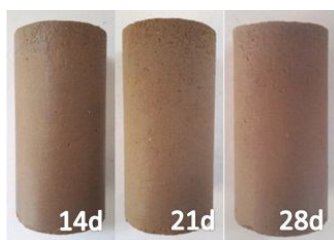
(c) 粉土+MgO 碳化 3 h 试样 Na_2SO_4 溶液浸泡(d) 粉土+水泥试样 Na_2SO_4 溶液浸泡(e) 粉土+MgO 碳化 3 h 试样 MgSO_4 溶液浸泡(f) 粉土+水泥试样 MgSO_4 溶液浸泡

图 4 试样表面变化照片

Fig.4 Photos of variation of sample surface

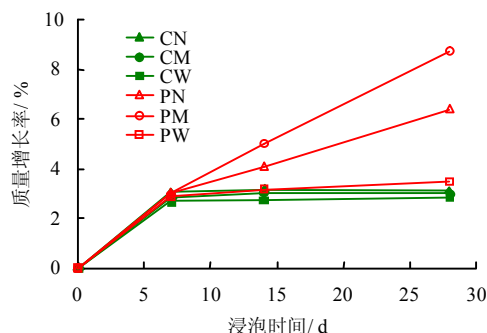


图 5 试样质量变化率变化图

Fig.5 Changes in weight of samples

从图 5 中可以看出, 浸泡 7 d 之前, 各个环境中的试样质量增加程度相近, 之后开始出现差异, 在硫酸盐溶液中浸泡的水泥土试样质量增长率继续增加, 而水泥土清水浸泡试样和在 3 种溶液中浸泡的碳化土试样质量增长率开始趋于平缓。碳化土试样在硫酸盐和清水中变化相近, 对比水泥土试样可以推测碳化土试样受硫酸盐溶液影响较小。

3.2 无侧限抗压强度

试样浸泡相应龄期后将试样从溶液中取出, 擦拭表面水分, 测试试样尺寸和质量后进行无侧限抗压强度测试, 测试结果见图 6。

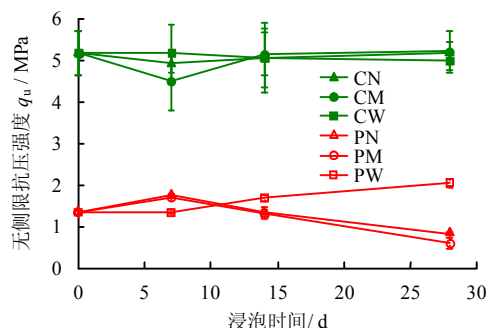


图 6 无侧限抗压强度

Fig.6 Unconfined compression strengths

从图 6 中可以看出, 水泥土试样清水养护条件下随着内部水泥水化反应的继续进行而不断提高, 在 Na_2SO_4 和 MgSO_4 溶液中浸泡 7 d 时水泥土试样强度略高于在清水中浸泡试样, 到 14 d 时试样强度开始明显下降, 从表面上观察到的裂缝也说明了硫酸盐溶液对水泥土试样造成了严重的影响, 并且在 MgSO_4 溶液中的影响要大于 Na_2SO_4 溶液。与水泥土试样相比, 碳化土试样浸泡 28 d 后强度都基本保持不变。

为更清楚表现硫酸盐对试样强度的影响, 对不同试样在硫酸盐溶液中的强度与在清水环境中试样的强度的比值进行对比, 如图 7 所示。从图中可以

看出, 碳化试样经过硫酸盐浸泡后, 强度比始终保持在 1 左右, 而水泥土经过 28 d 浸泡后强度只能达到清水浸泡的 40% 左右, 说明了碳化试样比水泥土试样具有良好的抗硫酸盐侵蚀性能。

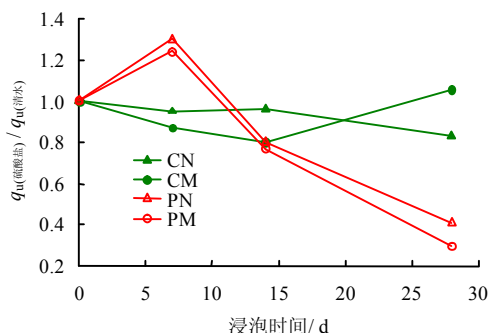


图 7 硫酸盐浸泡与清水浸泡试样的无侧限抗压强度比
Fig.7 Unconfined compressive strength ratios of samples soaked by sulfate and water

3.3 变形模量 (E_{50})

根据无侧限抗压强度试验结果计算了试样的变形模量 E_{50} 。图 8 是试样在不同龄期不同溶液中的 E_{50} 变化情况, 从图中可以看出, 在硫酸盐溶液中浸泡的水泥土试样 E_{50} 下降明显, 而碳化试样则基本保持稳定。与无侧限抗压强度变化有类似的规律。

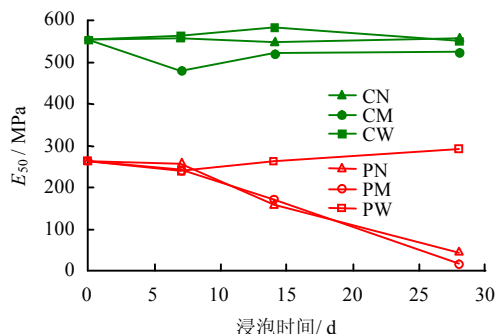


图 8 试样变形模量 E_{50} 值变化图
Fig.8 Variations of E_{50} in different samples

3.4 微观机制分析

国内外对水泥土抗硫酸盐侵蚀特性已有不少研究。宁宝宽等^[17]通过对水泥土和硫酸盐的矿物成分的物理化学分析, 探讨了水泥土硫酸盐侵蚀的机制: 水泥土固化强度主要来源于土中矿物与水泥的水化作用。侵蚀溶液中的 SO_4^{2-} 与水泥土中的钙离子反应生成石膏, 石膏又与水化铝酸钙反应生成钙矾石, 使一部分自由水转化成结晶水而减少水的含量, 同时体积增大 1.5 倍。因此, 本文中水泥土试样经过硫酸盐浸泡, 试样内部不断生成新的产物, 质量不断增加。

在浸泡初期, 由于水泥土中孔隙较多, 土粒有较大的可压缩性, 允许一定量的膨胀, 膨胀压密有利于土体的固化, 水泥土试件的强度较清水浸泡有所增加; 随着侵蚀地进行, 侵蚀生成的产物随时间的增加并在水泥土的孔隙中积累, 直到完全充满孔隙后将会对水泥土产生膨胀力, 从而使水泥土开裂, 强度降低^[17]。

韩鹏举等^[18]对 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 相互影响对水泥土强度影响进行了试验研究, 提出水泥土在 MgSO_4 溶液中浸泡过程中, 除 SO_4^{2-} 对水泥土试样的影响外, Mg^{2+} 与水泥土反应生成 $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 分散于水化硅酸钙 ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, C-S-H) 凝胶中, 会使 C-S-H 的凝胶性变差, 从而影响水泥土强度特性。

碳化试样的固化机制是 MgO 与水发生水化反应, 水解生成 Mg^{2+} 和 OH^- , 当达到饱和以后, 沉淀析出 $\text{Mg}(\text{OH})_2$, $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 晶体为疏松多孔的微观结构, 其物理胶结能力远弱于 C-S-H。 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 与 CO_2 发生反应 (碳化), 生成镁的碳酸化合物碳酸镁石 (Nesquehonite: $\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) 和水碳镁石 (Hydromagnesite: $\text{Mg}_5(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)、球碳镁石 (Dypingite: $\text{Mg}_5(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), 其具有很高的胶结强度^[19], 从微观结构上来看, 碳酸镁石为棱柱状晶体, 水碳镁石、球碳镁石为花骨状和片状结构。

图 9 为在不同溶液中浸泡 28 d 及浸泡前碳化固化土试样的 X 射线衍射结果, 图中碳化反应各物质所对应的物相峰值已用竖线标出。

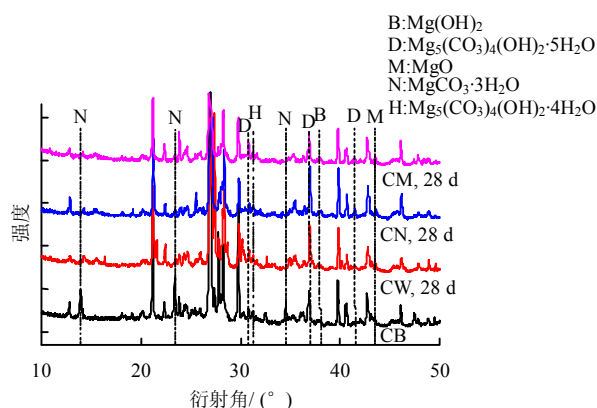
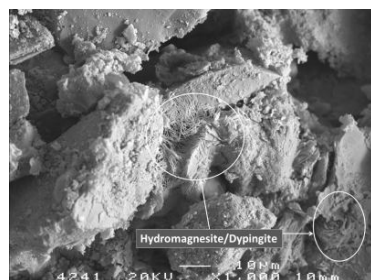


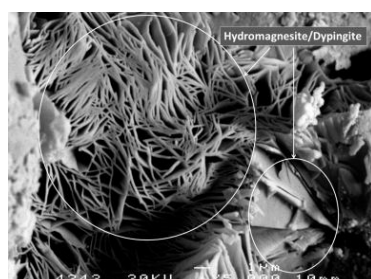
图 9 硫酸盐侵蚀对碳化固化土成分的影响
Fig.9 Effect of sulfate attack on composition of carbonated silt

从图 9 中对比可以看出, 在溶液中浸泡的试样各碳化产物变化不大, 但与碳化试样浸泡前相比, 碳酸镁石 (Nesquehonite: $\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) 的峰值有比较明显的降低, 水碳镁石 (Hydromagnesite: Mg_5

$(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)、球碳镁石 (Dypingite: $\text{Mg}_5(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 的峰值有少量的提高。图 10、11 分别为经过 28 d 硫酸盐侵蚀后碳化试样的内部的碳化产物水碳镁石、球碳镁石和碳酸镁石的电镜扫描图片,说明经过 28 d 的浸泡,硫酸盐溶液并没有对碳化产物造成大的影响。



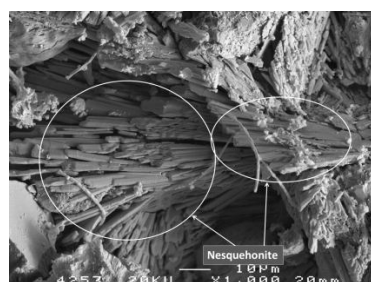
(a) 放大倍率 1 000 倍



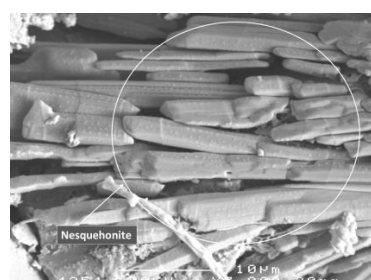
(b) 放大倍率 5 000 倍

图 10 硫酸盐溶液中浸泡 28 d 碳化固化土中的水碳镁石和球碳镁石的电镜扫描图片

Fig.10 SEM pictures of hydromagnesite and dypingite after sulfate attack for 28 days



(a) 放大倍率 1 000 倍



(b) 放大倍率 5 000 倍

图 11 硫酸盐溶液中浸泡 28 d 的碳化固化土中碳酸镁石的电镜扫描图片

Fig.11 SEM pictures of nesquehonite after sulfate attack for 28 days

图 12 是刘辰阳^[20]对在硫酸钠溶液中浸泡 90 d 的水泥固化土试样进行了电镜扫描 (SEM) 试验,发现受到硫酸钠侵蚀后的水泥固化土中存在较多的针状钙凡石晶体 (Aft), 并且水泥固化土中生成的 Aft 体积较大, 呈团聚散射状生长在颗粒团聚体与团聚体之间, 从而产生膨胀应力, 破坏水泥土结构, 造成其强度的降低。

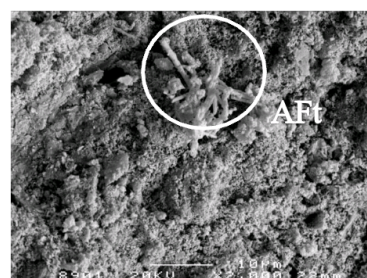
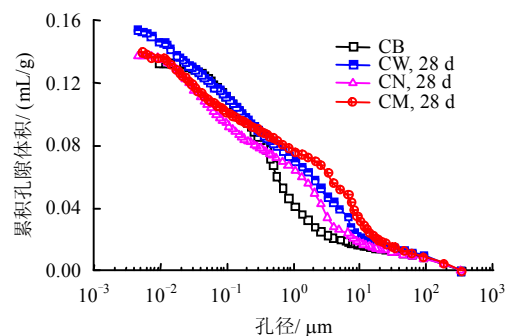


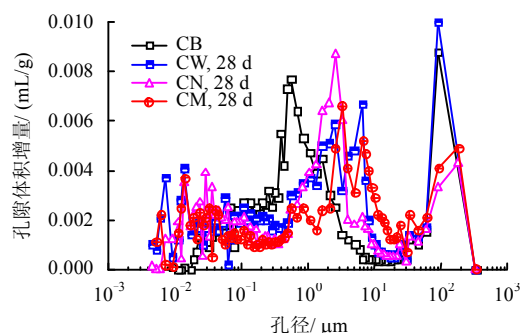
图 12 硫酸钠浸泡 90 d 的水泥固化土电镜扫描图片^[17]

Fig.12 SEM pictures of cemented soil after sodium sulfate attack for 90 days

图 13 是碳化固化土的孔隙特征曲线,从累计孔隙分布曲线来看,在硫酸盐溶液中浸泡 28 d 后的碳化试样和碳化之前相比,累计孔隙基本保持不变。说明碳化固化土在浸泡过程中内部结构没有发生明显变化,在宏观上表现为强度基本不变。



(a) 累计孔隙分布曲线



(b) 孔隙孔径分布频率

图 13 硫酸盐侵蚀对碳化固化土孔隙特征的影响
Fig.13 Effect of sulfate attack on pore distribution of carbonated silt

从以上微观分析综合来看, 硫酸盐没有对碳化固化土试样中的碳化产物产生明显的影响, 也没有生成具有破坏性影响的膨胀性化合物, 因此, 抗硫酸盐侵蚀性能要优于相同配比水泥土试样。

4 结 论

(1) 硫酸盐溶液中浸泡的水泥土试样质量相比清水浸泡试样质量有明显增长, 而硫酸盐溶液中浸泡的 MgO 碳化试样质量变化不大。

(2) 活性 MgO 固化粉土碳化 3 h 试样的无侧限抗压强度可达 5 MPa 左右, 经硫酸盐溶液浸泡 28 d 后基本保持不变; 而水泥土试样则表现出早期 (7 d) 有一定增长, 随龄期增长则由于试样膨胀, 导致强度大大降低, 且 Na_2SO_4 影响稍强于 MgSO_4 溶液。 E_{50} 也表现出类似的规律;

(3) 微观机制分析表明, 活性 MgO 固化土经 CO_2 碳化生成的镁碳酸化合物, 经硫酸盐侵蚀后不会发生明显变化, 孔隙结构不会明显改变, 从而保证其强度稳定。因此, 活性 MgO 固化粉土碳化后具有比水泥固化土更强的抗硫酸盐侵蚀能力。

参 考 文 献

- [1] 刘松玉, 钱国超, 章定文. 粉喷桩复合地基理论与工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 18—21.
LIU Song-yu, QIAN Guo-chao, ZHANG Ding-wen. The principle and application of dry jet mixing pile composite foundation[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2006: 18—21.
- [2] 李涛平. 中国水泥工业能效现状和节能潜力报告[J]. 水泥工程, 2004, (4): 1—10.
LI Tao-ping. China's cement industry energy efficiency and energy saving potential situation report[J]. **Cement Engineering**, 2004, (4): 1—10.
- [3] 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): 2878—2891.
BO Yu-lin, YU Bo-wei, DU Yan-jun, et al. Strength and leachability of lead contaminated clay stabilized by GGBS-MgO[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(10): 2878—2891.
- [4] World Business Council for Sustainable Development. The cement sustainability initiative-our agenda for action[C]//WBCSD. Switzerland: Conches-Geneva, 2002.
- [5] 张涛, 蔡国军, 刘松玉, 等. 工业副产品木质素改良路基粉土的微观机制研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(6): 1665—1672.
- [6] ZHANG Tao, CAI Guo-jun, LIU Song-yu, et al. Research on stabilization microcosmic mechanism of lignin based industrial by-product treated subgrade silt[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(6): 1665—1672.
- [7] HARRISON A J W, FCPA B S B E. The case for ramifications of blending reactive magnesia with Portland cement[J]. **Foundations**, 2002, 175(2351).
- [8] VANDEPERRE L J, AL-TABBAA A. Accelerated carbonation of reactive magnesia cements[J]. **Advances in Cement Research**, 2007, 19(2): 67—79.
- [9] LISKA M, VANDEPERRE L J, AL-TABBAA A. Influence of carbonation of magnesia-based pressed masonry units[J]. **Advances in Cement Research**, 2008, 20(2): 53—64.
- [10] 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.
- [11] CAI G H, DU Y J, LIU S Y, et al. Physical properties, electrical resistivity and strength characteristics of carbonated silty soil admixed with reactive magnesia[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2015, 52(11), 1699—1713.
- [12] 刘松玉, 李晨. 氧化镁活性对碳化固化效果影响研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1): 148—155.
LIU Song-yu, LI Chen. Influence of MgO activity on stabilization efficiency of carbonated mixing method[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(1): 148—155.
- [13] 易耀林. 基于可持续发展的搅拌桩新技术与理论[D]. 南京: 东南大学, 2013.
YI Yao-lin. Sustainable novel deep mixing methods and theory[D]. Nanjing: Southeast University, 2013.
- [14] 宁宝宽, 陈四利, 丁梧秀, 等. 环境侵蚀下水泥土的强度及细观破裂过程分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2215—2219.
NING Bao-kuan, CHEN Si-li, DING Wu-xiu, et al. Analysis of meso-fracture process of cemented soil under environmental erosion[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(8): 2215—2219.
- [15] 傅小茜, 冯俊德, 谢友均. 硫酸盐侵蚀环境下水泥土的力学行为研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(增刊): 659—662.
FU Xiao-qian, FENG Jun-de, XIE You-jun. Mechanical

- behavior of soil cement under ambient with sulfate conditions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(Supp.): 659—662.
- [15] LISKA M, AL-TABBAA A. Performance of magnesia cements in porous blocks in acid and magnesium environments[J]. **Advances in Cement Research**, 2012, 24(4), 221—232.
- [16] American Society for Testing and Materials (ASTM). C1012/C1012M-10(2010) Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution[S]. US: ASTM International, 2010.
- [17] 宁宝宽, 陈四利, 郑楠. 硫酸盐对水泥土的侵蚀作用研究[C]//第九届全国岩石力学与工程学术大会论文集. 出版地不详, 2006: 717—721.
- NING Bao-kuan, CHEN Si-li, ZHENG Nan. Study the effects of sulfate erosive to cement-mixed soil[C]// Proceedings of the Ninth National Rock Mechanics and Engineering Conference. [S. l.]: [s. n.], 2006: 717—721.
- [18] 韩鹏举, 白晓红, 赵永强, 等. Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 相互影响对水泥土强度影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31: 72—76.
- HAN Peng-ju, BAI Xiao-hong, ZHAO Yong-qiang, et al. Experimental study on strength of cement soil under Mg^{2+} and SO_4^{2-} interaction influence[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31: 72—76.
- [19] LISKA M. Performance of reactive magnesia cement and porous construction products[D]. UK: University of Cambridge, 2009.
- [20] 刘辰阳. GGBS+MgO 固化软土的力学特性、耐久性能与机制研究[D]. 南京: 东南大学, 2013.
- LIU Chen-yang. Mechanical characteristics, durability characteristics and micro-structure mechanism of GGBS+MgO solidified soil[D]. Nanjing: Southeast University, 2013.
-
- 上接第 3047 页
- [8] 刘建国, 孙其诚, 金峰. 光弹法检测颗粒物质体系中的力链结构[C]//中国力学学会学术大会 2009 论文摘要集. [S. l.]: [s. n.], 2009.
- LIU Jian-guo, SUN Qi-cheng, JIN Feng. Photoelastic method in detecting the force chain structure of particle aggregates[C]//Abstract set of the 2009 Chinese Society of Mechanics Academic Conference. [S. l.]: [s. n.], 2009.
- [9] XIE H, WANG J A, XIE W H. Photoelastic study of the contact mechanics of fractal joints[J]. **Int. J. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.**, 1997, 34(5): 865—874.
- [10] 孙其诚, 王光谦. 静态堆积颗粒中的力链分布[J]. 物理学报, 2008, 8: 4667—4674.
- SUN Qi-cheng, WANG Guang-qian. Force distribution in static granular matter in two dimensions[J]. **Acta Physica Sinica**, 2008, 8: 4667—4674.
- [11] 杨荣伟, 程晓辉. 光弹颗粒材料的直剪试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊 1): 104—109.
- YANG Rong-wei, CHENG Xiao-hui. Direct shear experiments of photoelastic granular materials[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(Supp.1): 104—109.
- [12] 杨荣伟. 光弹颗粒材料直剪试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- YANG Rong-wei. Direct shear experiments of photoelastic granular materials[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
- [13] 刘建国. 颗粒物质局部化行为的细观研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- LIU Jian-guo. Mesoscale study on localization in granular matter[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.
- [14] 王金安, 庞伟东, 梁超, 等. 一种双向颗粒流动光弹实验装置[P]. 北京: CN204556449U, 2015.08.12.
- WANG Jin-an, PANG Wei-dong, LIANG Chao, et al. Photoelastic experiment apparatus of aggregates with bilateral flowing[P]. Beijing: CN204556449U, 2015.08.12.
- [15] 谭伯聪. 光弹性试验[J]. 钢铁研究, 1986, 1: 75—80.
- TAN BO-cong. Photoelastic experiment[J]. **Research on Iron and Steel**, 1986, 1: 75—80.
- [16] HERTZ H. Ueber die Berührung fester elastischer Körper (On the contact of elastic solids)[J]. **J. Reine und Angewandte Mathematik**, 882, 92: 156—171.
- [17] 房营光, 侯明勋, 谷任国, 等. 桩承式路堤中土拱效应产生过程可视化分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 9: 1678—1684.
- FANG Ying-guang, HOU Ming-xun, GU Ren-guo, et al. Visual analysis of initiation of soil arching effect in piled embankments[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 9: 1678—1684.