

DOI: 10.11779/CJGE2017S2034

# 活性氧化镁碳化搅拌桩模型试验研究

刘松玉<sup>1, 2</sup>, 蔡光华<sup>1, 2</sup>, 杜广印<sup>1, 2</sup>, 王 亮<sup>1, 2</sup>

(1. 东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210096; 2. 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:** 软弱土须经适当的人工处理才能满足建筑和基础设施的承载需要, 而 MgO 碳化搅拌桩法是一种创新型的地基处理技术, 即将 CO<sub>2</sub> 气体通到拌有活性 MgO 的搅拌桩体中, 通过一系列物理化学反应, 形成稳定性好、承载力高的复合地基。基于此, 采用人工挖孔制桩法, 开展了不同初始含水率和不同 CO<sub>2</sub> 通气压力下室内搅拌桩模型试验, 碳化过程中进行桩体温度监测, 碳化后对桩体进行无侧限抗压强度和含水率测试。结果表明: 搅拌桩温度在不足 2 h 碳化时间可达到最高, 且峰值温度在初始含水率为 20% 时最高、在 15% 时次之、在 30% 时最低; 峰值温度随 CO<sub>2</sub> 通气压力增加而增加。碳化搅拌桩强度随初始含水率增加而减小, 随 CO<sub>2</sub> 通气压力增加而增加, 且强度随含水率呈指数形式递减。碳化搅拌桩模型试验将为 MgO 碳化技术在软土地基加固工程中的应用提供理论指导。

**关键词:** 活性氧化镁; 碳化; 搅拌桩; 模型试验; 无侧限抗压强度

**中图分类号:** TU472      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000 - 4548(2017)S2 - 0136 - 04

**作者简介:** 刘松玉(1963 - ), 男, 教授, 主要从事软土地基加固的研究工作。E-mail: liusy@seu.edu.cn。

## Model tests on carbonated reactive MgO mixing piles

LIU Song-yu<sup>1, 2</sup>, CAI Guang-hua<sup>1, 2</sup>, DU Guang-yin<sup>1, 2</sup>, WANG Liang<sup>1, 2</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Urban Underground Engineering & Environmental Safety, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The soft soils can meet the bearing needs of the constructions and infrastructures through the appropriate artificial treatment, and the carbonated MgO-mixing pile method is an innovative foundation treatment technology, which is that the reactive MgO-mixing pile takes a series of physical and chemical reactions with CO<sub>2</sub> gas, forming a composite foundation with good stability and high bearing capacity. On this basis, the indoor mixing pile model tests are carried out under different initial water contents and different CO<sub>2</sub> ventilation pressures by use of the artificial dig-hole pile method, and the temperature of mixing piles is monitored during the carbonation process, as well as these tests are performed after carbonation including unconfined compressive strength and water content. The results indicate that the pile temperature can reach the highest in less than two hours' carbonation, and the temperature peak is the highest at the initial water content of 20%, the second at 15% and the lowest at 30%. The temperature peak increases with the increase of CO<sub>2</sub> ventilation pressure. The strength of carbonated piles decreases with the increase of the initial water content while increases with the increase of the CO<sub>2</sub> ventilation pressure, and the strength decreases with the water content of the carbonated soils in the form of exponential function. The carbonated mixing-pile model tests will provide theoretical guidance for the MgO-carbonation technology in the engineering application of soft soil foundation reinforcement.

**Key words:** reactive magnesia; carbonation; mixing pile; model test; unconfined compressive strength

## 0 引 言

随着城市化进程的发展, 大部分城市建筑和基础设施需要在软弱土层上进行施工, 软弱土层具有分布广、含水率高、孔隙率和压缩性大、渗透性和稳定性差等特点, 由于软土地基这些不良的物理力学特性, 需要对这些软弱土层进行适当的人工处理才能承受相应的荷载。搅拌桩法是地基处理方法中常用且较成熟的方法之一, 即通过专用机械用将水泥或石灰等固化

材料以粉雾或浆液形式喷到地基中, 同时借助钻头旋转搅拌, 使固化剂与原位地基土均匀混合, 并进一步发生固结和水化反应, 引起软黏土硬结, 形成整体性强、水稳性好和承载力高的柱体<sup>[1]</sup>。在搅拌施工过程中

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279032, 41330641, 41372308);  
国家重点研发课题(2016YFC0800201)  
收稿日期: 2017 - 08 - 02  
\*通讯作者 (E-mail: caiguanghua@seu.edu.cn)

中, 搅拌叶片的切削搅拌和喷粉或喷浆压力均会引起土体扰动。粉喷桩和浆喷桩存在一定的相似性, 但两者在原位适用性、施工扰动性、桩体及整个复合地基的强度增长等方面也存在一定差异。Miura等<sup>[2]</sup>和Shen等<sup>[3]</sup>研究了粉喷桩加固对桩周土强度的影响, 认为施工过程虽引起桩周土扰动和土体天然结构破坏, 但粉喷桩施工对桩间土强度提高有促进作用。

传统搅拌桩所用固化剂主要为水泥和石灰, 这些固化材料存在环境效益差、能源消耗高、固化时间长等弊端。为此, 东南大学利用活性氧化镁 (MgO) 和二氧化碳 (CO<sub>2</sub>) 气体作为联合固化剂, 提出了碳化搅拌桩法并申请相关发明专利<sup>[4-5]</sup>, 该方法是将CO<sub>2</sub>通入拌有活性MgO的地基土中, 通过一系列物理化学反应, 形成稳定性好、承载力高的新型加固方法<sup>[4]</sup>。

YI等<sup>[2]</sup>用改进的三轴装置对掺5%活性MgO的砂土进行了室内碳化, 得出3~6 h内完成碳化, 其无侧限抗压强度达到28 d水泥固化土强度的2倍, 且CO<sub>2</sub>吸收量为理论值的90%。相比于水泥土搅拌桩, 碳化搅拌桩可减少约90%的工期、65%的能耗和77%的CO<sub>2</sub>排放<sup>[4]</sup>。刘松玉等<sup>[6]</sup>用三轴碳化装置研究了MgO活性对粉土和淤泥质黏土碳化固化效果的影响, 结果表明: 碳化粉土2小时后达到最高强度, 碳化粉质黏土在24小时内达到最高强度, 且活性越高, 碳化度越高、孔隙体积越小。碳化后所形成的系列水化镁式碳酸盐对强度的提高有较大贡献, 如: 三水碳镁石、水菱镁石和球碳镁石。CAI等<sup>[7-8]</sup>研究了MgO掺量和通气时间对碳化土强度的影响及水灰比对碳化土力学和微观特性研究, 分别得出MgO的临界掺量 (20%~25%)、临界碳化时间 (8~10 h) 及强度预测方程。

前期研究主要为室内单元体试验, 尚未开展MgO碳化搅拌桩研究。本课题组采用室内搅拌桩机进行碳化搅拌桩试验, 但由于桩机转速、模型深度和喷粉压力的限制, 搅拌过程中, 喷粉的均匀性和地基土的密实性较差, 难以形成完整的搅拌桩体。因此, 本研究内容是: 在室内模型桶中采用人工挖孔法制取MgO搅拌桩, 然后采用插管封膜进行通气碳化, 最后对MgO碳化搅拌桩进行无侧限抗压强度试验和含水率试验。

## 1 试验方案和方法

### 1.1 试验材料

模型粉土取徐明高速徐州段地下2.5~3.5 m处, 其天然含水率为26.1%, 液限和塑限分别为33.8%和22.9%, 相对密度为2.71, pH值为8.78。固化剂为河北邢台镁神化工公司生产的活性MgO, 其活性值为163 s、比表面积为7.22 m<sup>2</sup>/g。用马尔文2000激光粒度仪和溶剂为无水酒精, 测出MgO和土体的颗粒级

配曲线如图1所示。用X-射线荧光法测得材料化学成分见表1。CO<sub>2</sub>气体购于南京三桥特种气体有限公司。

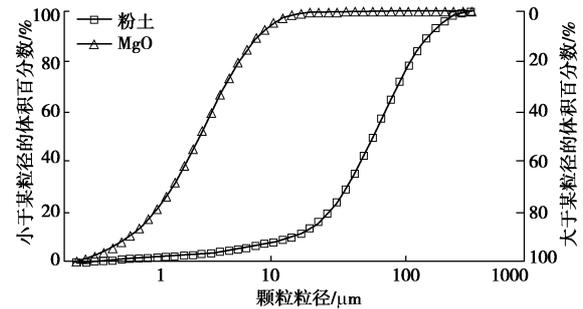


图1 材料颗粒分析结果

Fig. 1 Grain-size distribution curves of materials

表1 材料的化学成分分析结果

Table 1 Chemical composition of materials (%)

成分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>
粉土	71.8	10.2	3.57	6.41	1.22	3.10	0.51	0.27
MgO	3.91	1.43	0.30	1.26	91.8	0.02	0.31	0.40

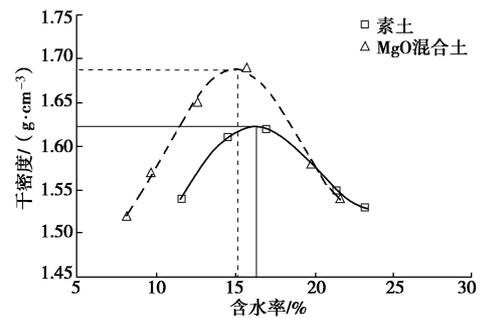


图2 击实曲线

Fig. 2 Compaction curves

### 1.2 试验方法

根据水泥搅拌桩施工过程中常用固化剂掺量范围, 按照ASTM D698-12对素土和掺20% MgO混合土进行击实试验, 其击实曲线如图2所示, 可知MgO混合土的最优含水率15.5% (以干混合料为基础), 换算为以干土为基础, 其含水率约为20%。根据前期单元体试验, 拟选MgO掺量15%和20%两种, 初始含水率 (水质量/干土质量) 为15%, 20%, 25%和30%, CO<sub>2</sub>通气压力为25, 50, 100, 200 kPa, 其中MgO掺量和含水率以干土质量为基础。

模型桶材料为有机玻璃, 其直径为400 mm、高度为900 mm。首先对现场土样进行晾晒、粉碎、过筛 (<2 mm) 等处理, 按最优含水率拌合, 并将拌合土分层压入模型桶内, 然后用木棒锤击, 每层锤击次数相同, 直至达目标高度, 最后用塑料膜覆盖养护24 h。模型试验前, 揭开塑料膜, 用直径50 mm的手动螺旋钻进行挖孔, 缓慢旋转取土成孔, 孔深约300 mm, 每组模型挖4个孔, 模型孔的分布情况如图3(a)所

示。按预设固化剂掺量和初始含水率来计算称量干土、MgO 和蒸馏水质量，将干土与 MgO 和水依次拌合，然后将 MgO 拌合土分层填入桩孔中并进行分层压实，压实也采用木棒振捣，直至填满桩孔。然后在 MgO 桩体上表面插入温度传感器，温度传感器为 Pt100 热电阻式传感器（如图 3 (b)）；在压实地基中插入细塑料管并用密封膜覆盖，在密封膜和塑料管间用密封胶粘封（如图 3 (c)）；最后，在密封地基上堆放砝码，以防密封膜鼓起；通气压力越高，堆载量可适当增加（如图 3 (d)）。模型试验的碳化时间均为 3.0 h。



图 3 模型图

Fig. 3 Model charts

碳化过程中，用 Datataker 采集仪监测桩体温度。碳化后，挖出碳化桩，不同工况下的碳化桩如图 4 所示。对碳化桩进行修整，然后进行无侧限抗压强度试验，试验采用 YSH-2 型应变控制式无侧限压力仪，控制轴应变速率为 1%/min。强度测试后，将破坏样压碎磨细，进行含水率测试，分析强度与含水率的关系。



图 4 碳化桩图

Fig. 4 Carbonated mixing piles

## 2 结果与分析

### 2.1 碳化桩温度

图 5 描述了 MgO 搅拌桩碳化过程中的温度变化，从图 5 (a) 中看出，MgO 搅拌桩温度随碳化时间呈先升高而降低变化，基本在 4000 s 左右达到最高；此外，碳化桩的最高温度在初始含水率为 20% 时最大，初始含水率为 15% 时次之，初始含水率为 30% 时最低。

从图 5 (b) 中可以看出，碳化桩的最高温度随 CO<sub>2</sub> 通气压力增加而增加，基本上在 3000~6000 s 达到最高。

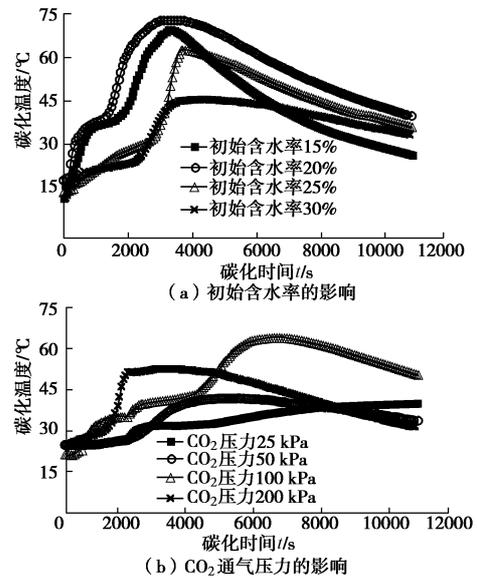


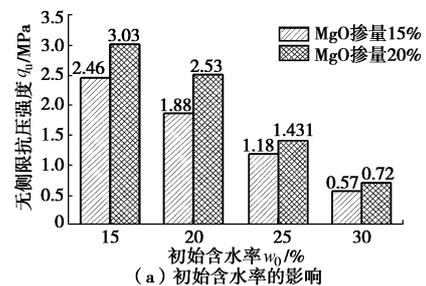
图 5 搅拌桩温度随碳化时间的变化

Fig. 5 Change of temperature of mixing piles with carbonation time

碳化桩温度变化的主要原因归于：①搅拌桩中活性 MgO 与水发生水化反应，生成氢氧化镁，氢氧化镁又与 CO<sub>2</sub> 发生碳化反应，生成系列水化镁式碳酸盐。②水化和碳化均是剧烈的放热反应，碳化效果越好、温度越高。③含水率越高，水化反应越充分，但碳化越受影响，反之，含水率越低水化越不充分，碳化效果越好，故 30% 含水率下的温度最低，15% 含水率下的温度次之。④通气压力越高，桩体越容易碳化，使温度越高。

### 2.2 无侧限抗压强度

图 6 (a)、(b) 分别为不同初始含水率和 CO<sub>2</sub> 通气压力影响下 MgO 碳化搅拌桩的无侧限抗压强度结果。从图 6 可以看出，碳化搅拌桩强度随初始含水率的增加而降低，且 MgO 掺量越高，强度越高。其原因是：MgO 掺量越高，碳化产物越多；而初始含水率越高，CO<sub>2</sub> 气体越难渗入至 MgO 搅拌桩内<sup>[10]</sup>，使 CO<sub>2</sub> 气体很难与氢氧化镁发生碳化反应，使碳化桩的强度较低。



(a) 初始含水率的影响

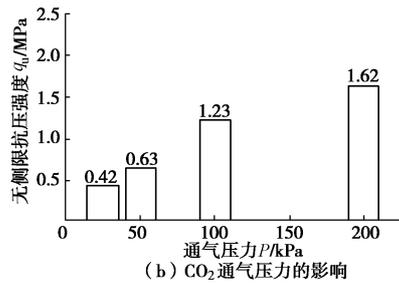


图 6 碳化搅拌桩的无侧限抗压强度结果

Fig. 6 Unconfined compressive strengths of carbonated mixing piles

图 7 给出了碳化搅拌桩无侧限抗压强度与含水率之间的关系, 从图 7 可以看出, 碳化搅拌桩强度随碳化土含水率增加而减小, 且强度与含水率的关系可用指数函数进行拟合。碳化土含水率越高, 碳化效果越差, 无侧限抗压强度越低; 而低含水率下碳化效果越充分, 可吸收越多的水形成水化镁式碳酸盐或结晶体, 使碳化土的含水率降低较多、强度增加越快。

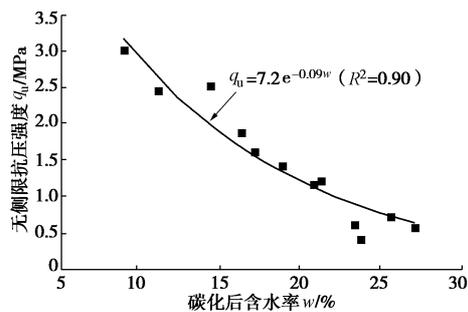


图 7 碳化搅拌桩无侧限抗压强度与含水率的关系

Fig. 7 Relationship between unconfined compressive strength of carbonated mixing piles and water content

### 3 结 论

(1) 碳化不足 2 h, MgO 搅拌桩温度可达最高, 且峰值温度在初始含水率为 20% 时最大, 在 15% 时次之, 在 30% 时最低; 峰值温度随 CO<sub>2</sub> 压力增加而增加。

(2) MgO 碳化搅拌桩的无侧限抗压强度大体上随初始含水率的增加而减小, MgO 掺量为 20% 的碳化桩强度要高于 MgO 掺量为 15% 的碳化桩强度; MgO 碳化搅拌桩强度随 CO<sub>2</sub> 通气压力的增加而增加。

(3) MgO 碳化搅拌桩的无侧限抗压强度与碳化土含水率呈负相关关系, 且可用指数函数进行拟合。

本研究不足之处在于: 采用挖孔桩代替搅拌成桩, 进行了粉土单一碳化时间下的 MgO 碳化桩试验。下一步研究将改善条件进行室内黏土碳化桩和整体碳

化模型试验, 提出可行有效的碳化参数和方案, 为 MgO 碳化技术在软土地基加固中的应用提供指导。

### 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. (LIU Song-yu, QIAN Guo-chao, ZHANG Ding-wen. The principle and application of dry jet mixing composite foundation [M]. Beijing: China Architecture & Building Press. 2006. (in Chinese))
- [2] MIURA N, SHEN S L, KOGA K, et al. Strength change of the clay in the vicinity of soil cement column[J]. Journal of Geotechnical Engineering, Japanese Society of Civil Engineers, 1998, **556**(53): 209 - 221.
- [3] SHEN S L, HAN J, HUANG X C, et al. Laboratory studies on property changes in surrounding clays due to installation of deep mixing columns[J]. Marine Georesources and Geotechnology, 2003, **21**(1): 15 - 35.
- [4] 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. (in Chinese))
- [5] 易耀林, MARTIN Liska, ABIR Al-Tabbaa, 等. 一种土壤的碳化固化方法及其装置: 中国, Z.L.201010604013.1[P]. 2010. (YI Yao-lin, LISKA M, AL-TABBAA A, et al. A kind of soil carbonation curing method and device: China, Z.L. 201010604013.1[P]. 2010. (in Chinese))
- [6] 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 the stabilization efficiency of carbonated mixing method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(1): 148 - 155. (in Chinese))
- [7] 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.
- [8] 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.