

DOI: 10.11779/CJGE20230545

碳化复合桩(MCP)原理与应用试验研究

刘松玉^{1,2,3}, 王亮^{1,2}, 刘宜昭^{*1,2}, 杜广印^{1,2}, 蔡光华⁴, 孙鹤⁵, 单彦贤⁵

(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; 3. 南京现代综合交通实验室, 江苏 南京 211100; 4. 南京林业大学土木工程学院, 江苏 南京 210037; 5. 江苏省交通工程建设局, 江苏 南京 210004)

摘要:介绍了一种基于MgO碳化固化软弱土技术的碳化复合桩(MCP),通过透气管桩向MgO搅拌桩注入CO₂气体进行碳化形成新型复合桩。进行了室内模型试验,通过对碳化过程和碳化后的温度、物理、力学等特性的分析,论证了该技术在粉土和淤泥质土中的适用性,结果表明,在MgO充分水化的条件下,不同深度的碳化反应较为均匀;在透气管桩外围存在有效碳化距离和最大碳化距离,在有效碳化距离内可获取良好的碳化效果,揭示了MCP的形成机理与影响因素。在室内试验基础上开展了现场应用试验,结果表明,MCP施工工艺方便、成桩效果好且桩身强度均匀,碳化桩体标贯击数均值为39;其单桩竖向极限承载力为1920 kN,相对于PHC管桩提升37%。室内与现场试验表明,MCP复合桩兼具固碳与加固效果,对岩土工程低碳化发展具有重要意义。

关键词:碳化复合桩;氧化镁;碳化距离;现场试验;工程特性

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)07-1359-09

作者简介:刘松玉(1963—),男,教授,主要从事特殊地基与路基稳定、原位测试等方面的研究工作。E-mail: liusy@seu.edu.cn。

Experimental study on mechanisms and applications of MgO-carbonated composite pile

LIU Songyu^{1,2,3}, WANG Liang^{1,2}, LIU Yizhao^{*1,2}, DU Guangyin^{1,2}, CAI Guanghua⁴, SUN He⁵, SHAN Yanxian⁵

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Urban Underground Engineering & Environmental Safety, Nanjing 210096, China; 3. Nanjing Modern Multimodal Transportation Laboratory, Nanjing 211100, China; 4. School of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 5. Jiangsu Provincial Transportation Engineering Construction Bureau, Nanjing 210004, China)

Abstract: A kind of MgO-carbonated composite pile (MCP) is proposed based on the MgO-carbonation solidification technology for soft soil improvement. The MCP is formed by injecting CO₂ gas into the MgO-mixing column through a gas-permeable concrete pile (inner core) to achieve carbonation. The laboratory model tests are conducted to analyze and demonstrate the application effectiveness of this technology in silt and silty soils, including the temperature, physical and mechanical characteristics during and after carbonation. The model test results indicate that under the full hydration of MgO in the mixing column, the carbonation reaction is relatively uniform at different depths. There are effective and maximum carbonation distances around the gas-permeable concrete pile, and satisfactory carbonation effects can be achieved within the effective carbonation distance. Then the formation mechanisms and influencing factors of the MCP are summarized. Field trials are carried out to confirm the engineering applicability of the MCP. The results demonstrate that the MCP exhibits good pile formation performance with high pile strength, with an average *N*-value of 39 for standard penetration tests. The ultimate vertical bearing capacity of the MCP is 1920 kN, which is 37.1% higher than that of the PHC (prestressed high-strength concrete) piles. The laboratory model tests and field trials have demonstrated that the MCP possesses both carbon fixation and reinforcement effects, which are of great significance for the low-carbon development of geotechnical engineering.

Key words: MgO-carbonated composite pile; magnesia; carbonation distance; pilot project; engineering property

0 引言

水泥是目前软弱土固化处理中应用最广泛的固化

基金项目: 国家自然科学基金项目(42277146); 江苏省研究生科研创新计划项目(KYCX22_0273); 江苏省交通运输科技项目(HTSQ(B)2021-249)

收稿日期: 2023-06-14

*通信作者(E-mail: 230209176@seu.edu.cn)

剂之一，但是其生产与使用过程中存在耗能高、污染大、CO₂ 排放严重、养护龄期长等缺点。因此，寻找碳排放量更小，生产耗能更低的水泥替代材料成为软弱土固化领域的热点议题之一。作为水泥的替代性材料，活性 MgO 的煅烧温度为 700℃~800℃，显著低于水泥的 1450℃，能耗低^[1]。此外，活性 MgO 在土体中经过 CO₂ 气体快速碳化，生成多种镁式碳酸盐（HMCs），能有效提高固化土强度^[2]，同时具有良好的环境效益^[1,3]。由此，发展了一种基于活性 MgO 碳化固化软弱土的技术，该技术具有固化速度快、吸收 CO₂ 气体和固碳利用等优点^[4-5]。

国内外学者对活性 MgO 碳化固化软弱土技术展开了系列研究，明确了碳化过程的主要影响因素和碳化固化土的工程力学特性。MgO 发生碳化并填充胶结土颗粒的过程受到多种因素的影响，包括固化土土体种类：MgO 活性、碳化通气时间、碳化通气压力、CO₂ 气体浓度、初始含水率等^[5-9]。整体而言，试验环境越有利于 CO₂ 气体在土体中的运移，越益于增加反应活性，碳化就越完全。在 CO₂ 加速固化条件下，活性 MgO 碳化固化土相较于水泥固化土可以获得更高的无侧限抗压强度，弹性模量和密度^[5, 10-11]。此外，现有研究还验证了 MgO 碳化固化土具有良好的耐久性^[12-13]，其抗干湿循环性能和抗冻融性能与水泥固化土接近^[14-15]，抗硫酸盐侵蚀特性则显著优于水泥固化土^[16]。然而，该技术目前仅应用于浅层软弱土加固^[17]。

对于深层软弱土加固需要，提出了一种碳化复合桩（MCP）的软弱地基处理技术^[18]，即将透气管桩压入 MgO 搅拌土中，再注入 CO₂ 气体使之扩散进行快速碳化，形成具有较高强度的碳化复合桩。

本文以粉土和淤泥质土为处理对象，先采用室内模型试验，通过温度变化等定性分析碳化反应进程，结合理化性能及力学特性论证了碳化复合桩的有效性及其基本规律。在此基础上开展了现场应用试验，介

绍碳化复合桩施工工艺、成桩质量及单桩承载力特性，进一步论证了碳化复合桩的工程应用有效性。

1 室内模型试验

1.1 试验材料和方法

（1）试验材料

试验所用粉土取自江苏省宿迁市某高速公路施工现场，位于地表下 2.5~3.5 m 处，属于古黄河沉积土；试验所用淤泥质土取自宜兴市某高速公路施工段。试验用土的主要物理化学指标和化学成分如表 1、2 所示，粒径分布如图 1 所示。试验所用的活性 MgO 为邢台市镁神化工有限公司生产的轻质 MgO。透水混凝土桩所用石料的粒径处于 3~5 mm，所用固化剂为南京欧泰建材生产的专用透水混凝土固化剂。试验所用的 CO₂ 气体为南京三桥特种气体有限公司生产的高浓度工业气体（> 99.9%）。

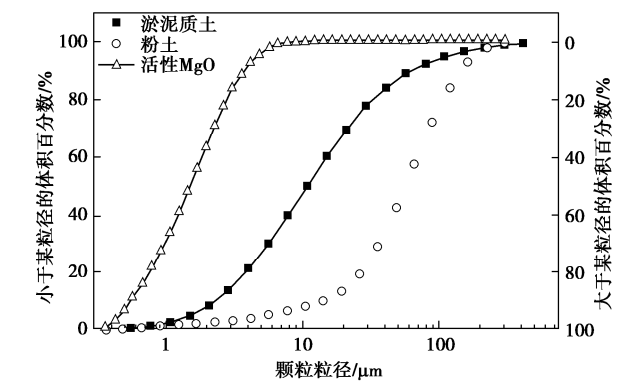


图 1 材料的颗粒分析结果

Fig. 1 Grain-size distribution curves of materials

透气管桩由透水混凝土制成，所用石料的粒径处于 3~5 mm，水泥：石子：添加剂：水的质量比为 22.4：103：1：8.6。透气管桩模具由内外两个不同直径的 PVC 管组合而成，两者圆心位置重合。外侧选用高 400 mm，直径为 110 mm 的 PVC 管，内侧选用

表 1 试验土样的主要理化指标

Table 1 Main physicochemical indexes of test soils

土样来源	土类	含水率/%	相对质量密度	pH	塑限 w _p /%	液限 w _L /%
宿迁	粉土	26.1	2.71	8.78	23.9	33.8
宜兴	淤泥质土	63.0	2.72	7.26	20.3	48.9

表 2 材料的化学成分

Table 2 Chemical compositions of materials

单位：%

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	TiO ₂	MnO ₂	其他
粉土	71.80	10.20	3.57	6.41	1.22	0.05	3.10	0.51	0.27	—	—	—
淤泥质土	69.79	17.84	5.34	1.11	1.04	2.05	—	—	—	1.00	—	1.83
氧化镁	3.91	1.43	0.30	1.26	91.80	—	—	0.31	0.40	0.13	0.02	0.40
水泥	25.74	10.96	3.14	48.24	—	—	—	6.16	4.03	—	—	1.73

注：化学成分由 X 射线荧光光谱仪测得，“—”表示未测出。

直径为 40 mm 的 PVC 管。透气管桩长度设为 40 cm。制备透气管桩时采用振捣法和插捣法, 制备结束后将试样置于标准养护室(相对湿度 95±3%, 温度 20±3℃)养护 3 d, 如图 2 所示。

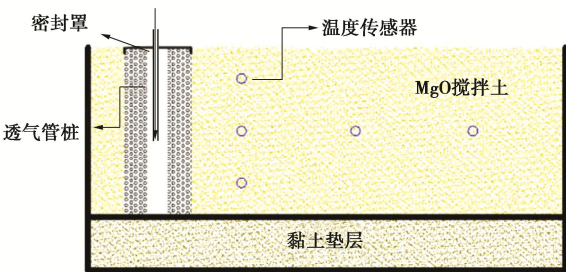


图 2 透气管桩

Fig. 2 Ventilata pipe pile

(2) 模型设计

室内碳化模型由模型槽、温度监测系统、CO₂ 供给系统三部分构成。模型槽为上侧开口的立方体, 其余部分由高强有机玻璃制成, 尺寸为 100 cm×50 cm×75 cm。因采用轻型动力触探和动回弹模量测试, 为避免模型槽底部受损, 在底部用压实黏土铺设垫层, 后覆盖隔离膜。模型试验设备及示意图如图 3 所示。



(a) 模型槽内部示意图



(b) 模型试验设备组成

图 3 模型试验设备示意图

Fig. 3 Schematic diagram of model test equipments

(3) 试验方案

基于前期对氧化镁碳化加固软弱土的研究, 本文模型试验中采用的土体初始含水率、活性 MgO 掺量、通气压力和土体压实情况如表 3 所示。模型试验步骤如下: ①制备透气管桩, 养护至 3 d 后取出。②粉土

模型中, 按配合比要求先将土体与活性 MgO 搅拌均匀。淤泥质土模型中, 将 MgO 与测定含水率的淤泥质土直接搅拌。③在模型槽中预先铺设好隔离塑料膜, 将透气管桩置于距模型槽左侧 10 cm 处, 后加入 MgO 搅拌土, 视试验方案决定是否压实。④在距离透气管桩外边缘水平距离 10, 40, 70 cm 处分别放置温度传感器, 在距透气管桩 10 cm 的竖向剖面深度为 10, 20, 30 cm 处分别放置温度传感器, 如图 3 (a) 所示。⑤通气碳化, 待温度监测值降低至室温附近时停止通气。

表 3 模型试验方案

Table 3 Plans of model tests

试验编号	土类	MgO 掺量/%	初始含水率/%	通气压力/kPa	压实情况
#1	粉土	10	20	200	分层压实
#2	粉土	10	20	100	分层压实
#3	粉土	10	20	100	未压实
#4	淤泥质土	20	63	200	未压实
#5	淤泥质土	20	63	100	未压实

(4) 试验内容与方法

碳化完成后在模型槽距透气管桩不同距离处分别进行轻型动力触探试验、动回弹模量测试, 并将不同区域的土体取出进行无侧限抗压强度等指标的测定。

轻型动力触探试验采用落锤质量为 10 kg, 探头锥角为 60°, 落锤自由下落高度为 50 cm。定义探头贯入土体中 30 cm 时的锤击次数为贯入指标 N_{10} , 获得贯入度与贯入曲线。

动回弹模量通过 EVD 轻型落锤弯沉仪测量, 计算得到动回弹模量 E_{vd} 。

待轻型动力触探测试结束后, 对粉土模型, 钻孔取出整块试样, 进行无侧限抗压强度试验。而淤泥质土固化后依旧处于较为松散的状态, 难以从中取出规则棱柱体, 故未进行无侧限抗压强度试验。

1.2 试验结果与分析

(1) 水化过程温度变化分析

活性 MgO 水化为放热反应, 可以通过水化过程温度变化判断活性 MgO 是否已经充分水化。

图 4 所示为 3 组粉土模型试验中水化阶段的温度变化图。#1、#2 试验条件相同, 中部区域温度升幅接近 15℃, 高于上部区域的 10℃。压实度更高、室温较低的#3 模型试验, 中部区域温度升幅为 8℃。可见, 环境温度低时水化反应受到一定的抑制。MgO 搅拌土完全水化所需时间会随土体种类、初始含水率、活性 MgO 掺量等因素发生改变, 实际工程中能通过温度监测数据进行具体判断, 可以认为温度不再上升时, 大部分活性 MgO 已完成水化。因此, 本试验对粉土进行碳化前需要保证至少 18 h 左右的水化时间。

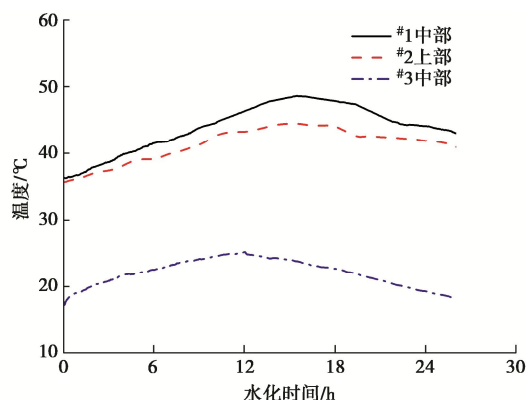


图4 粉土水化温度变化图

Fig. 4 Diagram of hydration temperature of silty soil

(2) 碳化过程温度变化分析

a) 不同深度

图5所示为200 kPa (#1)、100 kPa (#2)两种通气压力下,距透气管桩桩边水平距离10 cm处不同深度的碳化过程中温度变化情况。200 kPa 通气压力下,中部区域(20 cm深度处)土体温度升幅为39℃,略高于上部和下部区域(10, 30 cm深度处)土体的31℃和33℃。100 kPa 通气压力下,各深度土体温度增幅差异不大,均处于40℃~43℃之间。两种通气压力下固化土体达到峰值温度的时间均为6 h左右,温度下降速率也大致相同。可见两种通气压力下,不同深度的MgO 搅拌土发生碳化反应程度与速率基本一致,较为均匀。

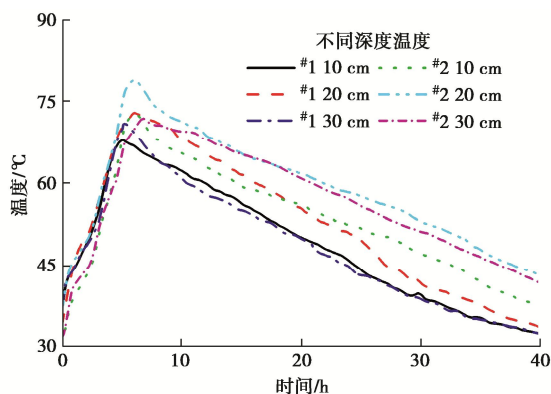


图5 #1、#2 模型试验不同深度碳化过程温度示意图

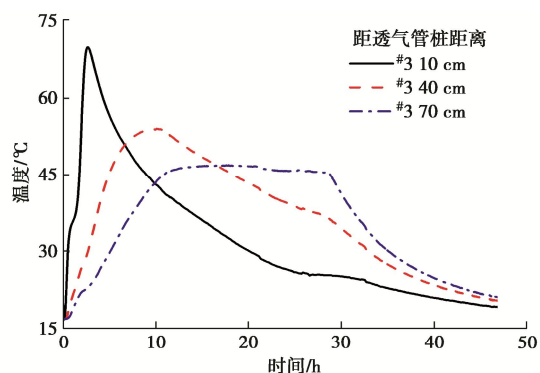
Fig. 5 Temperature change at different depths in model tests No. 1 and No. 2

b) 不同水平距离

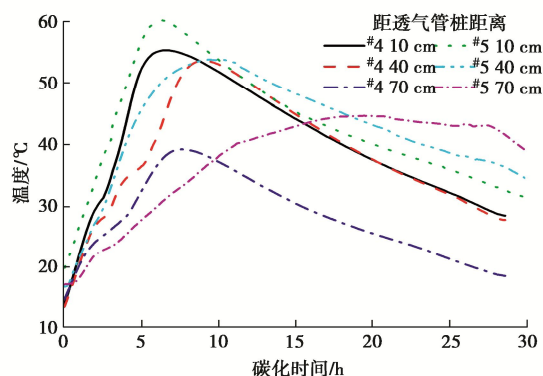
图6所示为5组模型试验中距透气管桩不同水平距离处温度随碳化时间的变化情况。可见,在所有工况下,距透气管桩的水平距离越近,碳化土温度的增幅越大,且升温速率越快,显然碳化反应进行得越剧烈,可见CO₂气体在活性MgO 搅拌土中的运移存在距离限制。

由图6(a)可见,透气管桩外侧10, 40, 70 cm

处的土体温度分别在2.5, 10, 12 h左右达到峰值,且距离越近,碳化土峰值温度越高,最高温度达到70℃左右。图6(b)所示为#4(200 kPa 通气压力)、#5(100 kPa 通气压力)淤泥质土模型试验的温度监测结果。可见,两种通气压力下,10 cm处的温度变化情况基本一致,升幅均为40℃左右,所需时间均为6.5 h左右;40 cm处温度变化规律也基本一致;但70 cm处温度变化曲线差异明显,高通气压力下(#4)呈明确的上升下降阶段,低通气压力下(#5)初期增速较慢,后出现了较长的平衡阶段。对比淤泥质土与粉土模型试验,可见相同通气压力下CO₂气体在淤泥质土中的运移能力略弱于粉土,但并未因高含水率而导致气体难以渗透。



(a) #3粉土模型



(b) #4、#5淤泥质土模型

图6 距透气管桩不同距离处温度变化图

Fig. 6 Temperature change at different distances to ventilation pipe pile

(3) 强度特性

图7为不同深度处碳化固化土的无侧限抗压强度变化示意图。100, 200 kPa 通气压力工况下,不同深度处的桩体强度均值分别能达到734, 674 kPa。可见,不同深度的桩体强度基本一致。结合温度监测和无侧限抗压强度的试验结果,可以发现通过透气管桩碳化法对活性MgO 搅拌土进行碳化时,不同深度的碳化效果较为均匀,桩体性能保持一致。

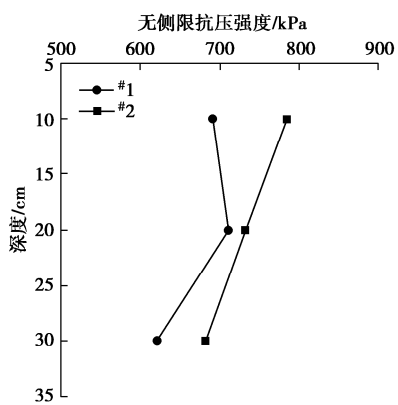


图 7 不同深度固化粉土无侧限抗压强度图

Fig. 7 Unconfined compressive strengths of stabilized silty soil at different depths

图 8 为距透气管桩边缘不同距离处土体的无侧限抗压强度示意图。由图 8 可知, 粉土模型试验中, 较高压实度工况, 100 kPa 通气压力下, 10 cm 区域土体强度可达 700 kPa 以上, 随着水平距离增加, 无侧限抗压强度逐渐减小, 70 cm 处土体强度为 250 kPa 左右。200 kPa 通气压力下, 10 cm 区域土体强度同样可达 700 kPa 以上; 40 cm 区域土体强度相比 100 kPa 通气压力工况时明显增加, 在 700 kPa 左右; 70 cm 处土体强度略增大, 为 300 kPa 左右。未经压实工况 (#3) 中, 不同水平距离处强度均位于 200 kPa 左右。可见透气管桩碳化法能对桩周活性 MgO 搅拌土起到较好的碳化效果。

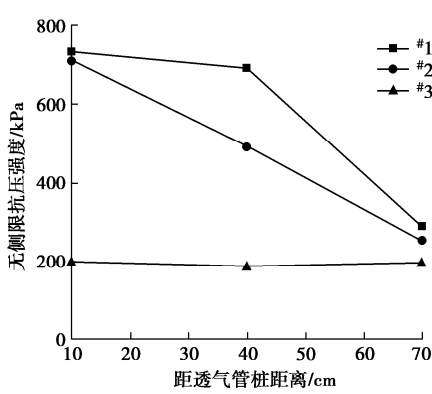


图 8 距透气管桩不同距离固化粉土无侧限抗压强度

Fig. 8 Unconfined compressive strengths of stabilized silty soil at different distances to ventilation pipe pile

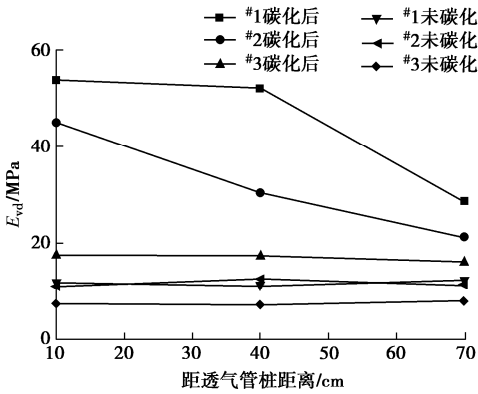
基于上述试验结论可知, CO₂ 气体在搅拌后未经压实的粉土中具有良好的运移能力, 通过透气管桩进行碳化, 有效碳化距离可以达到 70 cm; 粉土压实度较高时, 需要更高的通气压力来促进 CO₂ 气体的运移, 若定义与最内侧土体性能接近的范围为有效碳化距离, 200 kPa 通气压力下, 有效碳化距离可达 40 cm 以上。两种通气压力下 70 cm 处各项数据都较为接近,

若定义 CO₂ 气体的最大运移距离为最大碳化距离, 则最大碳化距离可达 70 cm。

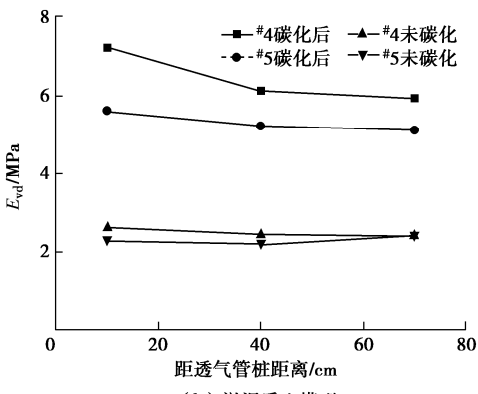
未压实淤泥质土模型中各项指标变化特性与未压实粉土类似, 有效碳化距离可达 70 cm, 但固化后淤泥质土工程性能明显弱于固化粉土。

(4) 碳化土工程特性

图 9, 10 分别为粉土和淤泥质土模型试验中距透气管桩不同距离处碳化固化土的动回弹模量和贯入度示意图。由图 9, 10 可见, 碳化固化土的动回弹模量相对于未碳化土均有明显提高。粉土模型中, 高通气压力下 (#1 模型), 40 cm 区域动回弹模量可达 52 MPa, 贯入度约为 3 mm/击, 与 10 cm 区域基本保持一致, 70 cm 处则产生了明显的衰减。低通气压力下 (#2 模型), 由内而外动回弹模量降低、贯入度增大, 70 cm 处数据与高通气压力接近; 未经压实土体中 (#3 模型), 碳化固化土的动回弹模量和贯入度指标均优于未碳化土体。碳化固化后淤泥质土动回弹模量可达 5 MPa 以上, 不同水平距离的动回弹模量差别不大基本保持一致。图 11 给出了距透气管桩不同距离处的贯入曲线, 可见, 两种土体模型试验的贯入曲线与动回弹模量和贯入度指标基本吻合。



(a) 粉土模型



(b) 淤泥质土模型

图 9 距透气管桩不同距离处动回弹模量

Fig. 9 Dynamic moduli at different distances to ventilation pipe pile

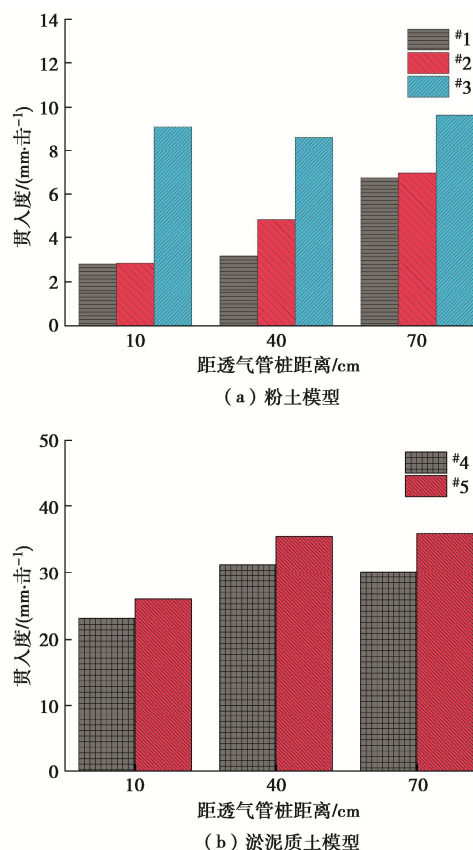


图 10 距透气管桩不同距离贯入度

Fig. 10 Penetrations at different distance to ventilation pipe pile

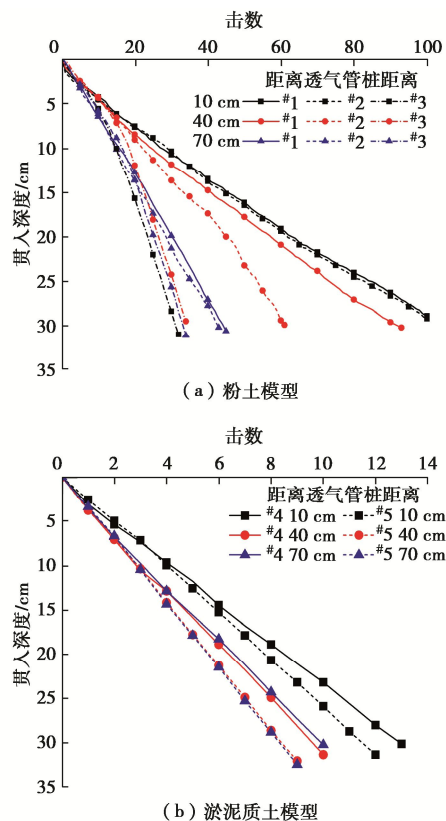


图 11 距透气管桩不同距离处贯入曲线

Fig. 11 Penetration curves at different distances to ventilation pipe pile

(5) 碳化复合桩机理分析

透气管桩碳化法形成碳化复合桩原理可总结为图 12 所示, 碳化进程可以分为 3 个阶段: ①从 CO_2 气罐中输出的高压 CO_2 气体迅速充满透气管桩内部孔洞并向外侧扩散。②模型试验中内侧 10 cm 区域土体温度率先上升, 即内侧土体首先发生碳化。③内侧区域碳化结束后, 外侧区域土体温度开始上升, 由于气体渗透压不断衰减, CO_2 气体仅能将某一距离内的土体完全碳化, 此距离即为有效碳化距离。试验中 200 kPa 通气压力下, 压密粉土中有效碳化距离可达 40 cm。有效碳化距离以外虽然也能接触部分 CO_2 气体, 但碳化效果较差, 将此最大距离定义为最大碳化距离, 本试验参数设置下最大碳化距离大于 70 cm。

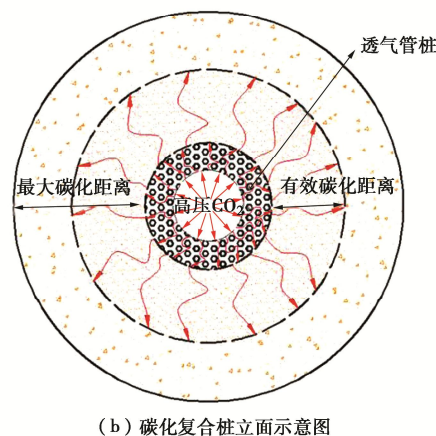
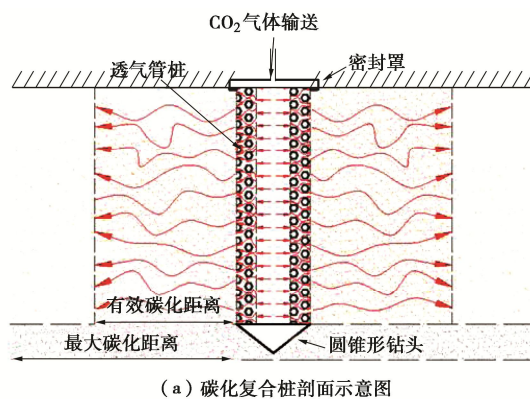


图 12 碳化复合桩示意图

Fig. 12 Schematic diagram of carbonated composite pile

2 现场试验

2.1 试验场地和方法

(1) 场地概况

试验地点位于江苏省盐城市, 属于阜宁—溧阳高速公路的软弱土地基处理工程。场地属于里下河浅洼平原工程地质区, 地层主要为全新统松散层类及上更新统粉质黏性土和粉土, 地层分布及静力触探 (CPT) 结果见图 13。地下水位埋深在 0.6~2 m。

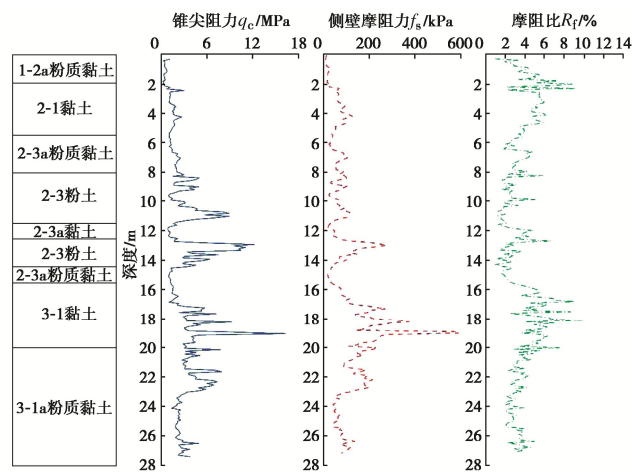


图 13 场地地层剖面及静力触探曲线

Fig. 13 Stratification along depth and results of cone penetration tests

现场试验 MCP 内芯为一根 8.0 m 透气管桩和一根 10.0 m 的普通 PHC 桩（直径均为 0.4 m），外芯为直径为 0.8 m，长度为 8.0 m 的氧化镁搅拌桩，桩型如图 14 所示。氧化镁搅拌桩的 MgO 掺量为 15%。

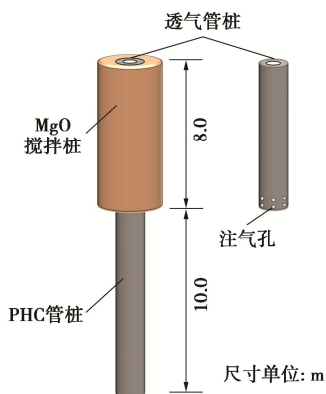


图 14 现场试验中碳化复合桩（MCP）的示意图

Fig. 14 Schematic diagram of MgO-carbonated composite piles in field trials

(2) 现场试验内容

为了直观判断碳化复合桩的成桩效果，进行了两根桩开挖检验，分析其桩身完整性、强度、均匀性。

对 5 根碳化复合桩的氧化镁搅拌桩外芯进行 SPT。SPT 在距离桩中心四分之三的氧化镁搅拌桩半径处（0.3 m）进行，测试的深度间隔为 1.5 m。

开展了 2 组碳化复合桩和 1 组 PHC 管桩的单桩竖向抗压荷载试验。两种加载模式如图 15 所示，分别为对芯桩（透气管桩）（模式 1，加载板直径 0.4 m）和 MCP 桩（模式 2，加载板直径 0.8 m）的桩顶加载，加载板厚度为 30 mm。桩头和加载板之间铺设一层 100 mm 厚的砂垫层，采用慢速维持荷载法，分级荷载为 200~320 kN。

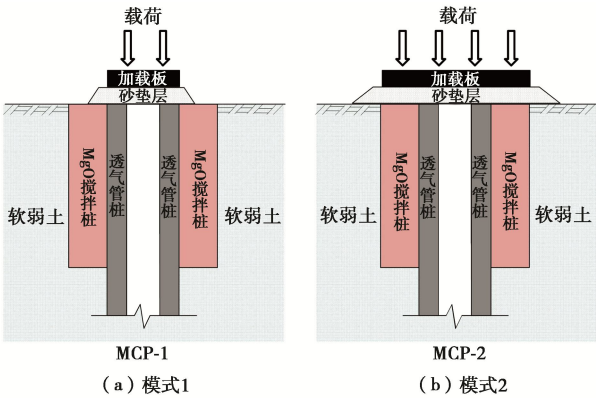


图 15 MCP 单桩竖向荷载试验加载模式

Fig. 15 Two loading patterns used in static load tests on MCP piles

2.2 MCP 施工工艺

(1) MCP 施工设备

MCP 施工设备包括搅拌桩机、打桩机、CO₂ 储存和注气系统、密封系统。搅拌桩机用于氧化镁搅拌桩的施工；CO₂ 储存和注气系统由 CO₂ 储罐和智能注气控制箱构成，如图 16（a），（b）所示；密封系统包括密封气囊和密封盖板，如图 16（c），（d）所示，用于密封透气管桩内腔和桩头。CO₂ 储存和注气系统与密封系统通过高压管线连接，如图 16（e）所示。

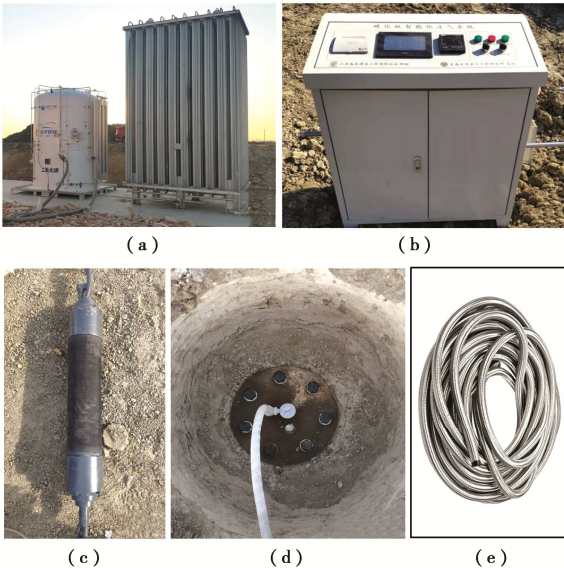


图 16 CO₂ 储存和注气系统、密封系统

Fig. 16 CO₂ storage and injection system and sealing system

(2) MCP 施工工艺

经过现场试桩试验，得到 MCP 的主要施工工艺如图 17 所示，具体步骤为：①施工准备。先进行场地预处理，包括清理和平整，所有设备进场安置并调试。②氧化镁搅拌桩施工。采用双向搅拌粉喷施工方法^[9]，正式施工前，通过试桩获得的搅拌桩机的施工参数，包括搅拌速率和 MgO 注入压力，保证搅拌质量。③透气管桩贯入。氧化镁搅拌桩施工完成后，用打桩机

将透气管桩贯入氧化镁搅拌桩中。④密封气囊和密封盖板。用密封气囊封闭透气管桩的内腔，并通过高压管线与 CO₂ 注气系统连接。⑤注气碳化。注入 CO₂ 进行碳化。注气压力由现场试桩试验获得，注气时间由注入的二氧化碳总量控制。

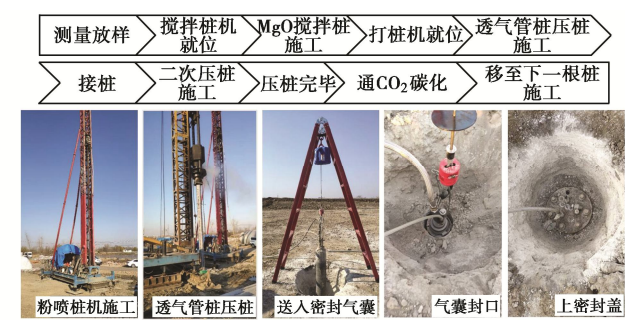


图 17 MCP 施工工艺

Fig. 17 Construction procedures of MCP

2.3 现场试验结果与分析

(1) 开挖检桩

图 18 为碳化复合桩开挖检验结果。可见，桩身完整性良好，氧化镁搅拌桩桩径达到设计要求，且桩体坚硬，与周围土体有明显分界，粉喷桩机的搅拌痕迹清晰可见，成桩效果良好。



图 18 碳化复合桩开挖检验

Fig. 18 MCP inspection by shallow excavation

(2) 标准贯入试验

图 19 为各桩及原状土的标贯击数与沿桩身深度关系。可见，原状土的 $N_{63.5}$ 值在 0~8 m 深度范围内为 2~13，碳化复合桩氧化镁搅拌桩外芯的标贯击数基本在 25~60，均值达到 39，展示出了较高的桩身强度。Liu 等^[20]总结了大量用于地基处理的水泥土搅拌桩的 SPT 数据，其 28 d 龄期的 $N_{63.5}$ 值基本在 10~25，远远低于氧化镁搅拌桩的 $N_{63.5}$ 值。

(3) 单桩竖向抗压载荷试验

表 4 给出了单桩竖向抗压载荷试验的结果。由表 4 可以看出，MCP-1 和 MCP-2 的极限承载力都明显高于 PHC 桩，碳化复合桩具有较高的竖向抗压承载能力。

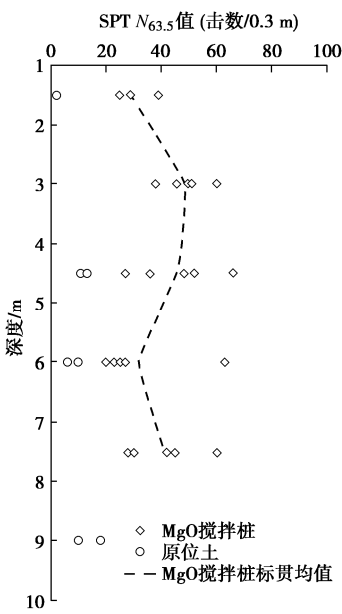


图 19 标准贯入试验结果

Fig. 19 Results of SPT

表 4 单桩竖向抗压载荷试验结果

Table 4 Results of static load tests

桩	极限承载为/kN	桩顶位移/mm
MCP-1	1800	19.04
MCP-2	1920	13.94
PHC	1400	11.97

3 结 论

(1) 活性 MgO 碳化前需要保证一定水化时间，水化时间可以通过温度监测确定，本文试验条件下，MgO 在 20% 含水率的粉土中的水化反应为 18 h 以上。

(2) 不同深度处碳化反应的升温 and 降温曲线大致相同，6 h 左右达到最高碳化温度 (68℃~79℃)；且距透气管桩的水平距离越近，碳化土体的升温速度更快且最高碳化温度越大，碳化反应越剧烈。

(3) 不同深度处碳化土的无侧限抗压强度基本一致，介于 620~784 kPa；且距透气管桩的水平距离越近，碳化土的无侧限抗压强度越高，动回弹模量越大，贯入度越小。

(4) 在未压实粉土模型中，100 kPa 通气压力下有效碳化距离可以达到 70 cm 以上；压实粉土则需要较高的碳化通气压力 (200 kPa)，有效碳化距离可达 40 cm 以上。相同通气压力下 CO₂ 气体在高含水率淤泥质土中的运移能力弱于粉土，但气体仍可以渗透。100 kPa 与 200 kPa 通气压力下有效碳化距离均可达到 70 cm 以上，但 200 kPa 通气压力完成碳化所需时间明显短于 100 kPa。

(5) 通过现场试验，得到了 MCP 的主要施工工艺；开挖检验证明，MCP 的桩身完整性良好，碳化均

匀, 氧化镁搅拌桩桩径达到设计要求碳化后氧化镁搅拌桩的标贯击数较高, 均值达到 39; 碳化复合桩单桩竖向极限承载力为 1920 kN, 比 PHC 桩单桩极限竖向承载力提高 37%。碳化复合桩具有良好的承载性能, 兼具固碳与加固效果, 是一种新型固碳技术, 具有推广应用前景。

参考文献:

- [1] AL-TABBAA A. Reactive Magnesia Cement[M]// Eco-Efficient Concrete. Amsterdam: Elsevier, 2013: 523-543.
- [2] PHAN H Q H, HWANG K Y, AHN J Y, et al. Investigation of the accelerated carbonation of a MgO-based binder used to treat contaminated sediment[J]. Environmental Earth Sciences, 2017, **76**(22): 771.
- [3] OLAJIRE A A. A review of mineral carbonation technology in sequestration of CO₂[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2013, **109**: 364-392.
- [4] PU L, UNLUER C. Investigation of carbonation depth and its influence on the performance and microstructure of MgO cement and PC mixes[J]. Construction and Building Materials, 2016, **120**: 349-363.
- [5] YI Y L, LU K W, LIU S Y, et al. Property changes of reactive magnesia-stabilized soil subjected to forced carbonation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, **53**(2): 314-325.
- [6] LIU S Y, CAI G H, CAO J J, et al. Influence of soil type on strength and microstructure of carbonated reactive magnesia-treated soil[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2020, **24**(2): 248-266.
- [7] CAI G H, LIU S Y. Compaction and mechanical characteristics and stabilization mechanism of carbonated reactive MgO-stabilized silt[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017, **21**(7): 2641-2654.
- [8] HWANG K Y, KIM J Y, PHAN H Q H, et al. Effect of CO₂ concentration on strength development and carbonation of a MgO-based binder for treating fine sediment[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(23): 22552-22560.
- [9] GALAN I, ANDRADE C, CASTELLOTE M. Natural and accelerated CO₂ binding kinetics in cement paste at different relative humidities[J]. Cement and Concrete Research, 2013, **49**: 21-28.
- [10] YI Y L, LISKA M, UNLUER C, et al. Carbonating magnesia for soil stabilization[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, **50**(8): 899-905.
- [11] 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.
- [12] WANG D X, XIAO J, HE F J, et al. Durability evolution and associated micro-mechanisms of carbonated reactive MgO-fly ash solidified sludge from East Lake, China[J]. Construction and Building Materials, 2019, **208**: 1-12.
- [13] CAI G H, LIU S Y, ZHENG X. Effects of drying-wetting cycles on durability of carbonated reactive magnesia-admixed clayey soil[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, **31**(11): 84-93.
- [14] CAI G H, LIU S Y, ZHENG X. Influence of drying-wetting cycles on engineering properties of carbonated silt admixed with reactive MgO[J]. Construction and Building Materials, 2019, **204**: 84-93.
- [15] 郑旭, 刘松玉, 蔡光华, 等. 活性 MgO 碳化固化土的冻融循环特性试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2015, **45**(3): 595-600. (ZHENG Xu, LIU Songyu, CAI Guanghua, et al. Experimental study on freeze-thaw properties of carbonated reactive MgO-stabilized soils[J]. Journal of Southeast University Natural Science Edition, 2015, **45**(3): 595-600. (in Chinese))
- [16] 刘松玉, 蔡光华. 碳化固化软弱土理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2021. (LIU Songyu, CAI Guanghua. Theory and Technology of Carbonation Curing Soft Soil[M]. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese))
- [17] LIU S Y, CAI G H, DU G Y, et al. Field investigation of shallow soft-soil highway subgrade treated by mass carbonation technology[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2021, **58**(1): 97-113.
- [18] 刘松玉, 蔡光华, 王亮, 等. 一种碳化搅拌桩-透气管桩复合地基及其施工方法: CN106869120B[P]. 2018-07-31. (LIU Songyu, CAI Guanghua, WANG Liang, et al. Carbonization Mixing Pile-Ventilating Pipe Pile Composite Foundation and Construction Method Thereof: CN106869120B[P]. 2018-07-31. (in Chinese))
- [19] 刘松玉, 席培胜, 储海岩, 等. 双向水泥土搅拌桩加固软土地基试验研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(3): 560-564. (LIU Songyu, XI Peisheng, CHU Haiyan, et al. Research on practice of bidirectional deep mixing cement-soil columns for reinforcing soft ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(3): 560-564. (in Chinese))
- [20] LIU S Y, HRYCIW R D. Evaluation and quality control of dry-jet-mixed clay soil-cement columns by standard penetration test[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2003, **1849**(1): 47-52.