

DOI: 10.11779/CJGE20240365

# 电化学注浆-碳化联合加固软土地基试验研究

古文博<sup>1,2,3</sup>, 童立元<sup>\*1</sup>, 闫鑫<sup>1</sup>, 刘文源<sup>1</sup>, 刘松玉<sup>1</sup>, 仇涛<sup>1</sup>

(1. 东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 211189; 2. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450099; 3. 水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心, 河南 郑州 450099)

**摘要:** “双碳”背景下的软土地基处理近年来是一个研究热点。介绍了一种电化学注浆联合 CO<sub>2</sub> 碳化加固软土地基的新技术, 即在电化学注浆过程中利用通气设备向土体注入 CO<sub>2</sub> 气体进行碳化固化以达到快速、大幅度提高软土地基强度的目的。通过室内模型试验, 将所提方法与传统电化学注浆法处理后的土体不排水抗剪强度进行对比分析, 并实测了电化学注浆-碳化联合加固过程中土体导电性和土体的 pH 值, 论证了该技术加固软土地基的优越性。通过扫描电镜试验了解了电化学注浆-碳化联合加固软土后土体的微观胶结情况并揭示了其微观加固机理。试验结果显示: 与传统电化学注浆加固效果相比, 使用去极化 CaCl<sub>2</sub> 溶液和 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> 溶液进行电化学注浆-碳化联合加固软土地基会使土体不排水抗剪强度有很大的提升, 其中碳化作用贡献占比超过一半。研究表明该技术兼具固碳与软弱土体固化效果, 对地基处理的低碳化发展具有重要意义。

**关键词:** 软土地基; 电渗; 电化学注浆; 碳化; 联合加固; 室内试验

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)07-1464-10

**作者简介:** 古文博(1995—), 男, 博士, 工程师, 主要从事城市地下空间工程和地基处理方面的研究工作。E-mail: wbgwub@126.com。

## Experimental study on combined stabilization technology of electrochemical grouting-carbonation for soft soil ground

GU Wenbo<sup>1,2,3</sup>, TONG Liyuan<sup>1</sup>, YAN Xin<sup>1</sup>, LIU Wenyuan<sup>1</sup>, LIU Songyu<sup>1</sup>, QIU Tao<sup>1</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450099, China; 3. Research Center on Levee Safety & Disaster Prevention, Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450099, China)

**Abstract:** The stabilization technology for soft soil ground under the carbon peaking and carbon neutrality goals is a hot topic in recent years. A new technology of electrochemical grouting combined with CO<sub>2</sub> carbonation to strengthen soft soil foundation is introduced, that is, in the electrochemical grouting process, the CO<sub>2</sub> gas is injected into the soil by using the aerating equipment for carbonation and solidification to improve the strength of soft soil foundation quickly and greatly. Through the laboratory model tests, the undrained shear strength of the soil treated by the proposed method is compared with that of the soil treated by the electrochemical grouting method, and the soil conductivity and soil pH value in the process of stabilization are measured, which demonstrates the superiority of this technology in strengthening the soft soil ground. The micro-cementation of soft soil after the combined treatment of electrochemical grouting carbonation is investigated through the scanning electron microscope tests, and its micro-reinforcement mechanism is revealed. The test results show that the combined reinforcement of electrochemical grouting and carbonation for the soft soil foundation with depolarized CaCl<sub>2</sub> solution and Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> solution is better than the traditional electrochemical grouting stabilization method, the undrained shear strength of soil increases greatly, and the contribution of carbonation accounts for half of the total growth undrained shear strength. It is shown that the proposed technology has both carbon sequestration and soft soil solidification effects, which is of great significance for the low-carbon development of foundation stabilization.

**Key words:** soft soil ground; electroosmosis; electrochemical grouting; carbonated; combination stabilization; laboratory model test

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52478388, 52178384); 河南省住房和城乡建设科技计划项目(HNJS-2024-K19) This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 52478388, 52178384) and the Henan Provincial Housing and Urban-Rural Construction Science and Technology Plan Project (Grant No. HNJS-2024-K19).

收稿日期(Received): 2024-04-17 修回日期(Revised): 2024-12-19 接受日期(Accepted): 2024-12-24 网络出版日期(Online): 2024-12-25

\*通信作者(E-mail: 101010519@seu.edu.cn)

## 0 引言

电渗固结法由 Casagrande<sup>[1]</sup>在 20 世纪 30 年代首次引入到岩土工程中,电渗可将土中水从阳极吸附到阴极,两个电极之间的土体发生固结,进而达到提高土体强度的效果。后来,Gray 等<sup>[2]</sup>提出了电化学注浆加固黏土的方法,即在通电前或通电过程中向土体内注入化学溶液,提高土体固化效率并增加土体强度。电化学注浆加固不仅可以通过增加土体内离子含量,使土体加速排水固结<sup>[3-6]</sup>。还可以利用离子交换以及化学胶结反应来增加土颗粒之间的黏结力,进而达到固化土体的效果<sup>[7-8]</sup>。Ou 等<sup>[9]</sup>把氯化钙和硅酸钠作为注浆材料,并在阳极和阴极之间加入一个中继管,通过向阳极、阴极和中继管中加入化学溶液,使土体颗粒胶结一起,达到了整体加固土体的目的;Abiodun 等<sup>[10]</sup>在模型试验中分别在阳极和阴极添加  $\text{CaCl}_2$  和  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  溶液,使电化学注浆处理的土体强度整体增加。国内沈扬等<sup>[11]</sup>对管状电动土工合成材料(EKG)电化学注浆法进行了探索,分别在阳极和阴极注入氯化钙( $\text{CaCl}_2$ )和硅酸钠( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )溶液进行加固,并探究了电化学注浆法二次加固效果;任连伟等<sup>[12-13]</sup>采用  $\text{CaCl}_2$  和  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  化学溶液对土体进行电化学注浆加固,改善了处理后土体强度分布不均的问题。除上述研究外,又有很多学者将电化学注浆加固法与真空预压法<sup>[14]</sup>、微生物加固法<sup>[15]</sup>、堆载预压法<sup>[16]</sup>、絮凝-真空法<sup>[17]</sup>及强夯法<sup>[18]</sup>等技术联合使用,对地基加固均取得了较好的效果。

碳化固化技术是近年来提出的一种低碳固化软弱土体的新技术<sup>[19-21]</sup>。该技术先采用碱基材料与土拌合,再利用二氧化碳( $\text{CO}_2$ )气体进行碳化,以达到快速提高土体强度的目的<sup>[22-23]</sup>。目前该技术已在软土地基处理领域进行了探索应用,并取得了一定的进展。蔡光华等<sup>[24-25]</sup>通过开展室内模型试验、现场试验利用活性  $\text{MgO}$  碳化固化了软弱地基土体,取得了很好的效果。碳化固化技术在软弱地基加固中是有效的,但受目前研究条件的限制,仅满足于浅层地基的加固,对于深层地基的固化方式和效果尚未有文献探讨。

本文综合考虑电化学注浆加固技术和碳化地基加固技术的各自优缺点及其适用条件,提出了一种电化学注浆-碳化联合加固技术以达到加固土体均匀、加固强度可靠和加固强度提升快的效果。通过提出一种电化学注浆-碳化联合加固技术试验装置,采用室内模型试验的方法验证了所提技术的可行性,为绿色、低碳地基加固技术提供新的方向。

## 1 试验装置和方法

### 1.1 试验装置

针对本文的试验需求设计了一套新型电化学注浆-碳化联合加固装置。该装置由模型箱、电化学注浆装置和碳化装置组成。试验模型箱由有机玻璃板拼装黏贴而成,用于装载土样,其尺寸为 400 mm(长)×200 mm(宽)×350 mm(高)。电化学注浆装置主要包含电极管、注浆瓶和电源。电极选用成本低且加工方便的不锈钢钢管,电极直径为 20 mm,厚度为 1 mm,总长度为 350 mm。电极只在加固区域与土体接触,其余深度进行绝缘处理。加固区域电极沿表面钻孔使得向电极内部注入化学溶液通过开孔流入土体,开孔直径为 3 mm,孔间距为 20 mm。用土工布包裹电极并密封底部,以防止土体颗粒流入电极内部。加固电极长度与埋置深度可根据加固范围的深度进行改变,当加固范围较深时,加固电极管的埋置深度和开孔位置与加固范围一致,以达到深层地基加固的作用。使用支架和夹子将含有化学溶液的注浆瓶放置在电极上方,并连接到阳极或阴极管以注入化学溶液。使用最大容量为 5 A、60 V 的直流电源。将电源的电压梯度设置为 30 V/m,由于阳极和阴极通电使加固区域产生电势,注入土体中的离子随着电势移动以实现定向加固的效果。碳化装置主要包含碳化管理管和二氧化碳瓶。选取直径为 20 mm、长度为 100 mm 的圆柱形气泡石作为土体碳化管理管埋置在阳极和阴极电极管之间的加固深度范围内,每间距 50 mm 布置一个并用通气管将其连接至高压二氧化碳瓶。模型试验装置图如图 1 所示。

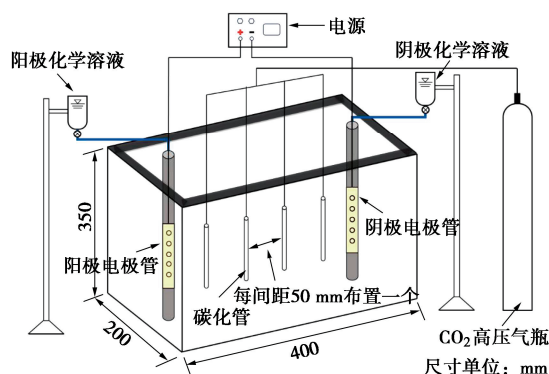


图 1 模型试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of model test devices

### 1.2 试验土样

本次试验用土为南京地区典型淤泥质粉质黏土,取土深度为 6~8 m。原状土的基本物理性质和主要矿物组成见表 1,颗粒级配曲线见图 2。将原状土置于 105℃烘干箱烘干 24 h 并将土磨成粉末,然后通过机械搅拌将其与足够数量的蒸馏去离子水彻底混合,使

表 1 原状土物理性质及主要矿物组成

Table 1 Physical properties and main mineral composition of undisturbed soil

物理性质	天然含水率 $w/\%$	天然重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	干重度 $\gamma_d/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	孔隙比 $e$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	塑性指数 $I_P$	液性指数 $I_L$	$G_s$	原状土 pH
数值	40.5	17.27	12.32	1.178	39.3	24.9	14.7	1.06	2.72	6.5
主要矿物组成	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	CaO	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>
含量/%	62.21	20.23	7.00	2.64	2.47	2.42	1.22	0.96	0.20	0.14

其含水率大于液限的 1.5 倍（试验重塑土含水率为 60%），并分层填入模型箱中。填入后放入振动台上以排出土中的气泡，填土总高度 250 mm，之后将其静置 24 h。

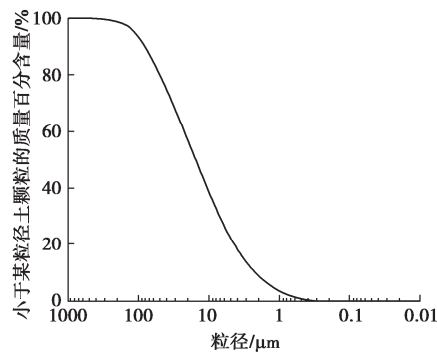


图 2 原状土颗粒级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curve of undisturbed soil

1.3 试验溶液和气体

本试验将选用氯化钙溶液作为试验的阳极溶液，由于氯化钙环保安全，易溶于水，成本较低，常被用作电化学注浆加固溶液。选用水玻璃（Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>）作为试验的阴极溶液，因为其具有无毒、无污染、价格低廉等显著的优点，过去常采用作为堵漏注浆材料，其与钙离子反应生成水化硅酸钙凝胶（C-S-H），也可增强土体的加固效果。由相关研究结果表明，联合注入 CaCl<sub>2</sub>、Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> 试剂时电化学注浆加固法加固软黏土效果相对最好。并选用氢氧化钠（NaOH）溶液作为中和溶液以改善土体中的酸碱度。

本试验选用无水氯化钙（CaCl<sub>2</sub>）来配置氯化钙溶液。选用五水偏硅酸钠（Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>·5H<sub>2</sub>O）来配置硅酸钠溶液。所用的溶剂均由国药集团化学试剂有限公司生产。所用二氧化碳气体购于南京文达特种气体有限公司，该气体采用工业法生产，纯度达 99% 以上。

2 模型试验工况与方案

测量模型箱内土体的酸碱度（pH 值）和电导率（EC 值）后，连接电化学注浆装置和碳化装置。将通电电极管用土工布包裹，以防止黏土颗粒堵孔，碳化装置的导气管需通过连接器与塑料导管连接，外接塑料导管与二氧化碳气罐直接连接，当开始碳化前，

需要对模型箱进行封膜，防止二氧化碳外溢。加固实拍详解图如图 3 所示。

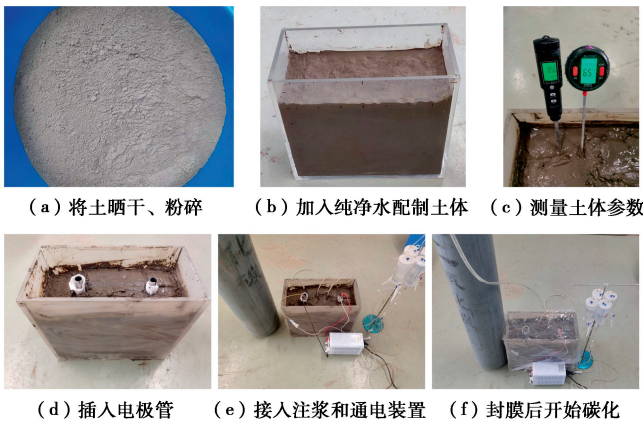


图 3 实拍详解图

Fig. 3 Photos of combined stabilization of electrochemical grouting and carbonation

本试验共设置 7 组试验，见表 2。试验 1 为对照试验，在通电过程中只注入蒸馏水，通电时间为 1 d；试验 2 在通电过程中只向阳极注入浓度为 1 mol/L 的 CaCl<sub>2</sub> 溶液且整个加固过程不引入碳化；试验 3 在通电过程中向阳极注入浓度为 1 mol/L 的 CaCl<sub>2</sub> 溶液，向阴极注入浓度为 1 mol/L 的 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> 溶液且整个加固过程不引入碳化。有研究表明<sup>[26]</sup>，使用阳极去极化方法的电化学注浆加固土体相比传统方法加固效果更好。该方法在阳极提供 OH<sup>-</sup>，以平衡电解反应产生的 H<sup>+</sup>，不仅阻止了土体中酸性环境的发展，而且还促进阴极产生的 OH<sup>-</sup> 向阳极迁移。因此在组 4 中，加入 NaOH 溶液调制 pH 为 11 的去极化 CaCl<sub>2</sub> 溶液与 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> 作为电化学注浆加固溶液。其中所有溶液浓度为 1 mol/L，且整个加固过程不引入碳化；组 5 到组 7 分别为组 2 到组 4 考虑到碳化的试验工况，在通电 12 h 后打开碳化装置，碳化 3 h 后关闭，在通电截止前通电装置保持不变。结合以往研究，通电周期为 1 d，试验过程中的电极间距为 200 mm，本文设置加固深度范围为 50~150 mm 范围内的土体，结合土体总厚度，选用长度为 300 mm 电极并在加固深度范围内开孔，其余部分进行绝缘处理。在通电过程中受电势的影响，离子在运动的同时会拖拽自由水产生迁移，使水从电极处排出，因此在电极附近增设抽水泵，每通



电 2 h 关闭注浆瓶阀门, 打开抽水泵将电极管内及土体表面积水排出。

表 2 试验工况

Table 2 Summary of test conditions

组别	选用溶液	溶液浓度/ (mol·L <sup>-1</sup> )	通电 时间/d	碳化 时间/h
1	蒸馏水	—	1	0
2	C	1	1	0
3	CN	1	1	0
4	CNOH	1	1	0
5	C	1	1	3
6	CN	1	1	3
7	CNOH	1	1	3

注: C 为 CaCl<sub>2</sub> 溶液 (阳极) 的简称; CN 为 CaCl<sub>2</sub> 溶液 (阳极) 和 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> 溶液 (阴极) 组合的简称; CNOH 为去极化 CaCl<sub>2</sub> 溶液 (阳极) 和 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> 溶液 (阴极) 组合的简称。

电化学注浆-碳化联合加固后的土体测试位置如图 4 所示, 加固范围内和加固范围外的均有考虑。在加固范围区域, 以模型箱中线为中心取加固范围内的测点 CM, 左右靠近通电电极 (阴阳两极) 20 mm 处分别取得一个测点, 图中展示的电极间距为 200 mm 的测点布置, 可以看出加固范围内共有 3 个测点 (A、B、CM), 电化学注浆-碳化联合加固后分别测得该范围测点的电导率 (EC)、不排水抗剪强度 (采用微型十字板剪切仪测试, VST) 和 pH 值。在加固范围外选取了 3 个测点, 即加固范围上部 CT 和加固范围下部 CB, 电化学注浆-碳化联合加固后分别测得该范围测点的不排水抗剪强度。

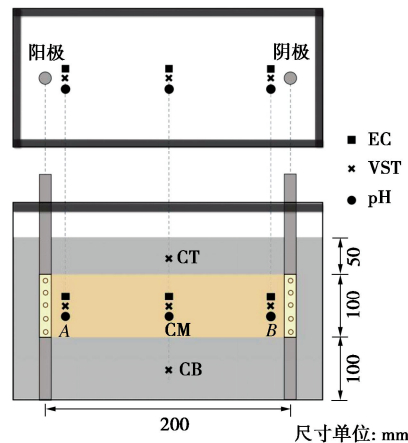


图 4 土体测试位置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of measuring points for reinforced soil

3 模型试验结果与分析

3.1 土体不排水抗剪强度

不同试验工况下, 土体加固后 A、CM、B 三个位置的土体不排水抗剪强度如图 5 所示。在土体加固前, 每个位置的土体不排水抗剪强度均为 2 kPa。不考虑碳

化作用时, 加固土体的最大不排水抗剪强度在阳极附近, 且随着距离阳极越远不排水抗剪强度越低。采用蒸馏水对照试验的最大抗剪强度为 6 kPa, 采用 CaCl<sub>2</sub> 溶液 (阳极) 加固的最大抗剪强度为 21 kPa。前两组对照试验中引起土体不排水抗剪强度增加的原因均为排水固结的作用, 在电势的作用下阳离子从阳极运动到阴极, 自由水在阳离子运动时的拖拽力作用下同样产生迁移, 然后水从阴极排出, 由于在阳极加入了大量 CaCl<sub>2</sub> 溶液导致自由水的运移加快, 这也是采用 CaCl<sub>2</sub> 溶液加固土体强度大于蒸馏水加固的原因。采用 CaCl<sub>2</sub> 溶液 (阳极) 和 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> 溶液 (阴极) 组合以及去极化 CaCl<sub>2</sub> 溶液 (阳极) 和 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> 溶液 (阴极) 组合进行电化学注浆加固均可以显著提高软弱土体的不排水抗剪强度, 加固范围内两电极中点处土体比两电极附近的土体不排水抗剪强度偏大, 这是因为不停的在两电极内注入化学溶液, 两电极附近的土体含水率偏大, 土体强度略小。加固后两电极中点处土体不排水抗剪强度分别为 19, 24 kPa。土体强度增加的原因除排水固结外, 阳极加入 Ca<sup>2+</sup> 和阴极加入 SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 在电势的作用下发生迁移, 离子在运动过程中反应生成 C-S-H 胶凝物质附着土体颗粒表面也进一步增加了土体不排水抗剪强度。

在通电过程中同时考虑碳化作用时, 对照组 5 土体不排水抗剪强度与对照组 2 比只阴极附近略有增加。这是因为当加入 Ca<sup>2+</sup> 后, 在电势的作用下离子从阳极迁移至阴极, 并与电解得到的 OH<sup>-</sup> 反应生成氢氧化钙 (Ca(OH)<sub>2</sub>) 胶体, 当在加固范围内通入二氧化碳后, 由于阳极附近的土体 H<sup>+</sup> 浓度较高土体整体呈酸性, 没有 Ca(OH)<sub>2</sub> 的胶结产生, 因此碳化对该范围没有影响。而阴极附近的土体 OH<sup>-</sup> 浓度含量较高与 CO<sub>2</sub> 反应生成碳酸钙 (CaCO<sub>3</sub>) 胶结物质。对照组 6 和 7 中碳化作用整体提升了土体的不排水抗剪强度, 这是因为电化学注浆生成的 Ca(OH)<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 反应生成 CaCO<sub>3</sub> 胶结物质, 电化学注浆生成的部分 C-S-H 和 CO<sub>2</sub> 反应生成 CaCO<sub>3</sub> 胶结物质进一步增加了土体强度。加固范围内两电极中点处土体比两电极附近的土体不排水抗剪强度偏大。对照组 6 的结果显示, 碳化作用最大能提升土体不排水抗剪强度的 69%。对照组 7 的结果显示, 碳化提升土体不排水抗剪强度的作用显著, 对土体强度提升效果更大主要因为处于弱碱性环境下更利于碳化作用的发挥。采用对照组 7 加固土体不排水抗剪强度最大提升 27.5 倍。

为了探讨电渗、注入化学溶液及碳化对土体不排水抗剪强度的影响程度如图 6 所示, 不排水抗剪强度增量占比计算式为



$$S_{eo} = \frac{c_u^{eo} - c_u^{in}}{c_u^t - c_u^{in}} \times 100\% \quad (1)$$

$$S_{ec} = \frac{c_u^{ec} - c_u^{eo}}{c_u^t - c_u^{in}} \times 100\% \quad (2)$$

$$S_{ca} = \frac{c_u^t - c_u^{ec}}{c_u^t - c_u^{in}} \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $S_{eo}$  为电渗引起的不排水抗剪强度增量占比;  $S_{ec}$  为注入化学溶液引起的不排水抗剪强度增量占比;  $S_{ca}$  为碳化引起的不排水抗剪强度增量占比;  $c_u^{in}$  为未加固前土体的强度;  $c_u^{eo}$  为只注入蒸馏水加固后土体的强度;  $c_u^{ec}$  为注入化学溶液加固后土体的强度;  $c_u^t$  为注入化学溶液并碳化加固后土体的强度 (如未考虑碳化即为注入化学溶液加固后土体的强度)。

当采用  $\text{CaCl}_2$  溶液 (阳极) 加固时如图 6 (a), 在阳极附近处, 电渗作用对土的不排水抗剪强度贡献占总强度增量的 21%, 电化学注浆加固对土的不排水抗剪强度贡献占总强度增量的 79%, 碳化在该位置同样不产生作用。在阴极附近, 电渗作用对土的不排水抗剪强度同样不产生贡献, 电化学注浆加固对土的不排水抗剪强度贡献占总强度增量的 69.2%, 碳化作用的贡献占总强度增量的 30.8%。由于电极中间位置土体呈酸性, 不能生成氢氧化物胶结物质, 碳化对其不产生影响。电渗和电化学注浆加固是该位置土体强度增强的原因, 其中电化学注浆加固占总强度比超过 87.5%。

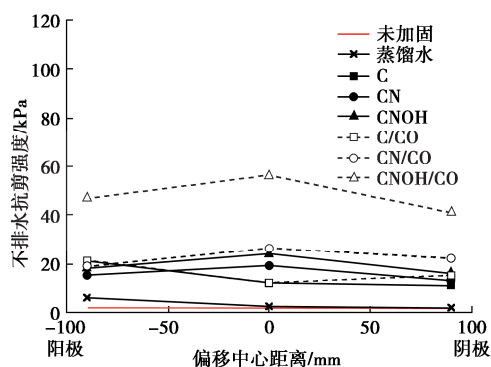
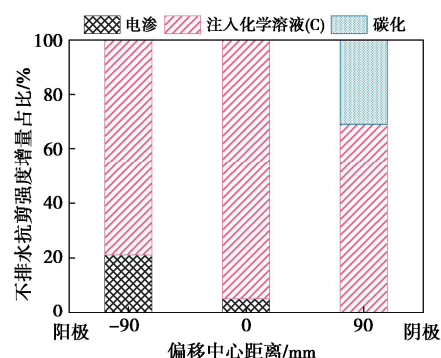


图 5 不同工况下土体的不排水抗剪强度

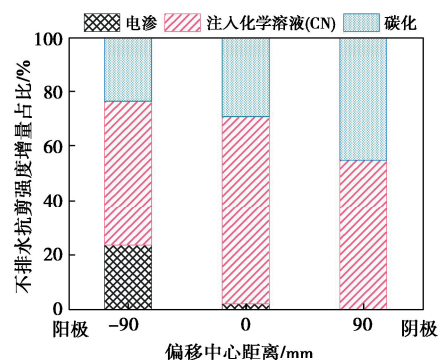
Fig. 5 Undrained shear strengths of soil under different test conditions

当采用  $\text{CaCl}_2$  溶液 (阳极) 和  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  溶液 (阴极) 组合加固时, 如图 6 (b), 在阳极附近处, 电渗作用对土的不排水抗剪强度贡献占总强度增量的 23.5%, 电化学注浆加固作用对土的不排水抗剪强度贡献占总强度增量的 53%, 碳化作用的贡献占总强度增量的 23.5%; 在阴极附近, 电化学注浆加固对土的不排水抗剪强度贡献占总强度增量的 55%, 碳化作用的贡献占总强度增量的 45%。电极中间位置电渗作用

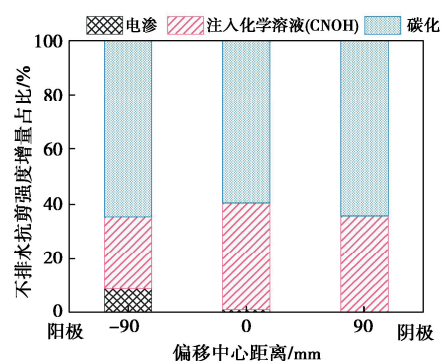
对土的不排水抗剪强度贡献占总强度增量的 2.1%, 电化学注浆加固对土的不排水抗剪强度贡献占总强度增量的 68.8%, 碳化作用的贡献占总强度增量的 29.1%。



(a) C溶液



(b) CN溶液



(c) CNOH溶液

图 6 不同工况下的土体的不排水抗剪强度贡献

Fig. 6 Contribution of undrained shear strength of soil under different test conditions

当采用去极化  $\text{CaCl}_2$  溶液 (阳极) 和  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  溶液 (阴极) 组合加固时, 如图 6 (c), 在阳极附近处, 电渗作用对土的不排水抗剪强度贡献占总强度增量的 8.9%, 注入化学溶液的电化学注浆加固作用对土的不排水抗剪强度贡献占总强度增量的 26.7%, 碳化作用的贡献占总强度增量的 64.4%; 在阴极附近处, 电渗作用对土的不排水抗剪强度没有贡献, 电化学注浆加固对土的不排水抗剪强度贡献占总强度增量的 35.9%, 碳化作用的贡献占总强度增量的 64.1%; 在两

电极中间位置,电渗作用对土的不排水抗剪强度贡献占总强度增量的1%,电化学注浆加固对土的不排水抗剪强度贡献占总强度增量的39.7%,碳化作用的贡献占总强度增量的59.3%。有研究显示<sup>[25]</sup>,土体pH值超过11后,有利于碳化反应的发生,这是对对照组7的碳化作用大于对照组6的碳化作用的主要原因。

不同试验工况下,土体不排水抗剪强度沿深度的变化如图7所示。使用采用 $\text{CaCl}_2$ 溶液(阳极)进行加固后可以看出,位于加固范围内的CM点加固后土体的强度整体大于CT点和CB点。但碳化对该位置的土体不产生效果,碳化前后土体的土体不排水抗剪强度不变。使用CN溶液进行加固后可以看出,位于加固范围内的CM点加固后土体的不排水抗剪强度也整体大于CT点和CB点。碳化对CM点的强度提升略有影响,由于二氧化碳的逸出,碳化也略微提升了CT点的土体强度。使用去极化 $\text{CaCl}_2$ 溶液(阳极)和 $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 溶液(阴极)组合加固时进行加固后可以看出,位于加固范围内的CM点加固后土体的不排水抗剪强度远大于加固范围外的点。碳化对CM点的强度提升略有很大影响,同时CT点由于二氧化碳的溢出,碳化也略微提升了该点土体的不排水抗剪强度。综上可以看出,采用电化学注浆-碳化联合加固对定向提升土体强度具有显著的作用。

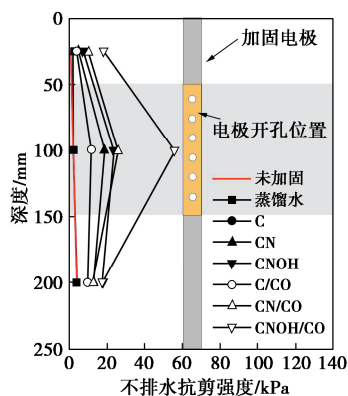


图7 不同试验工况下沿深度的土体不排水抗剪强度分布

Fig. 7 Distribution of undrained shear strength of soil along depth under different test conditions

如图8为采用不同方式加固,土体加固前后效果图。图8(a)可以看出未加固的土体由于含水率高整体呈稀软状态,当挖出一段槽后土体发生流动并坍塌。图8(b)为 $\text{CaCl}_2$ 溶液(阳极)加固后的土体效果,可以看出在电极周围(阳极)的土体加固效果较为明显,但由于加固方式为排水固结,因此加固区域土体偏软。图8(c)为利用去极化 $\text{CaCl}_2$ 溶液(阳极)和 $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 溶液(阴极)组合加固并采用电化学注浆-碳化联合加固后的土体效果,可以看出土体胶结作用

效果明显,加固区域内的土体很坚硬,当挖出一段槽后由于土体强度较高,未发生坍塌。

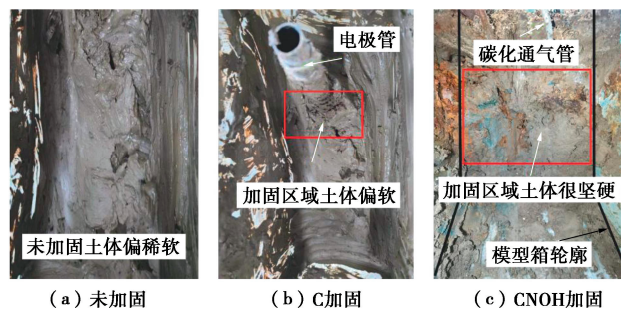


图8 土体加固效果对比

Fig. 8 Comparison of soil reinforcement results

### 3.2 土体电导率

不同试验工况下,土体加固后各测点位置的电导率如图9所示。未加固土体内离子含量较少因此其电导率较低。对于只加入蒸馏水通电的对照组1,由于电解的作用土体产生 $\text{H}^+$ 和 $\text{OH}^-$ 使其电导率略微升高。对照组2中,在阳极添加了溶液,使阳极周围土体电导率最大,且随着与阳极的距离增加电导率急剧减小。对照组1和2的电导率结果结合3.1节可以看出,由于电导率较大的位置土体内部离子含量高,在电势的影响下离子拖拽自由水发生移动,使该位置土体排水固结提升了其不排水抗剪强度。在对照组3,4中,由于在阳极和阴极均注入化学溶液导致阳极和阴极附近土体电导率均有大幅增加,阳极附近的电导率最大达到97 dS/m,结合3.1节可以看出,两电极中间土体中的离子在电势的作用下充分发生了反应生成沉淀,导致中间土体强度提升较大电导率降低。由于在通电的同时通入了 $\text{CO}_2$ ,对照组5,6土体电导率略有增加,而对照组7土体电导率略有减小,对比3.1节发现原因是在对照组7中注入的 $\text{CO}_2$ 参与了较多反应生成大量沉淀物质减少了土体中离子的存在。

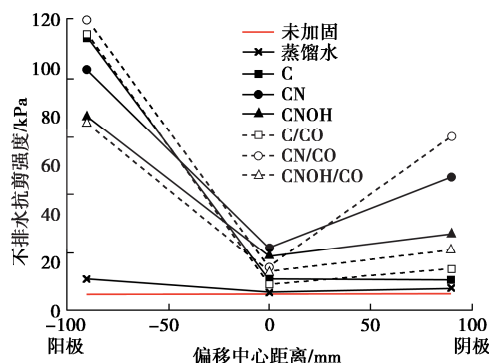


图9 不同试验工况下土体的电导率

Fig. 9 Electrical conductivities of soil under different test conditions

### 3.3 土体酸碱度

不同试验工况下,土体加固后各测点位置的 pH 值如图 10 所示。土体在未加固前的 pH 值接近中性。处理后的对照组 1、对照组 2 和对照组 3 的土体 pH 值变化规律基本一致。靠近阳极位置的土体 pH 值很低,在 3~5 内整体呈酸性,靠近阴极位置的土体 pH 值很高,在 9~12 内整体呈碱性。而中间位置的土体 pH 值在 4~6 内。由于土体在通电过程中内部发生电解,在电势的影响下阳极产生  $H^+$  和阴极产生  $OH^-$  发生移动且  $H^+$  的移动速度大于  $OH^-$ ,这是中间的土体 pH 值较小的原因。对于采用去极化  $CaCl_2$  溶液(阳极)和  $Na_2SiO_3$  溶液(阴极)组合加固土体时,阳极附近土体 pH 值较低,其余位置土体均呈碱性。这是由于最初时阳极附近的土体也提供  $OH^-$ ,以平衡电解反应产生的  $H^+$ ,阻止了土体中酸性环境的发展,并促进了阴极产生的  $OH^-$  向阳极迁移。在通电的同时通入了  $CO_2$ ,由于  $CO_2$  溶于水呈酸性,碳化降低了土体的整体 pH 值。对照组 7 中,在碳化前由于去极化  $CaCl_2$  溶液的存在使除阳极附近外的土体整体处于碱性环境中,随着溶液的加入和电势的影响使土体中生成大量的  $Ca(OH)_2$ ,碳化后由于沉淀的生成和  $CO_2$  的持续通入整体土体 pH 值略有下降。总体可以看出,土体处于碱性环境中更有利于碳化作用生成碳酸盐沉淀。

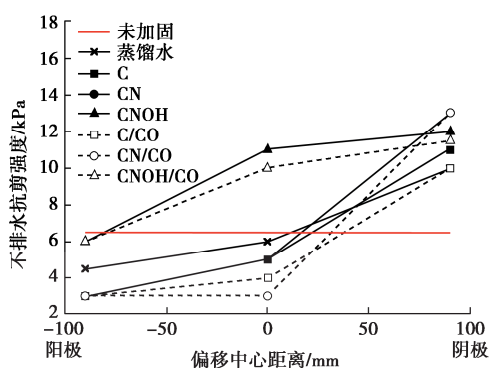


图 10 不同试验工况下土体的 pH 值

Fig. 10 pH values of soil under different test conditions

### 3.4 电流变化分析

图 11 显示了采用蒸馏水、 $CaCl_2$  溶液(阳极)、 $CaCl_2$  溶液(阳极)和  $Na_2SiO_3$  溶液(阴极)组合和去极化  $CaCl_2$  溶液(阳极)和  $Na_2SiO_3$  溶液(阴极)组合进行电化学注浆-碳化联合加固时的电流随时间的变化。如图所示,随着溶液加入土体中,土体内部离子浓度增加,在通电初期电流随时间增加,有利于两电极间离子的交换,此时大量离子结合发生化学反应。当通电时间继续增加时,由于黏土颗粒之间胶结的形成增加了电阻,导致电流稳步下降。通入  $CO_2$  的过程

中导致离子浓度的增加使得电流略有上升。从图 11 中还可看出,  $CaCl_2$  溶液(阳极)加固时的通电电流总体小于  $CaCl_2$  溶液(阳极)和  $Na_2SiO_3$  溶液(阴极)组合加固以及去极化  $CaCl_2$  溶液(阳极)和  $Na_2SiO_3$  溶液(阴极)组合时的电流,这是因为由于后两种加固方法分别在阴阳极注入离子,增加了土体内电荷的流动性。

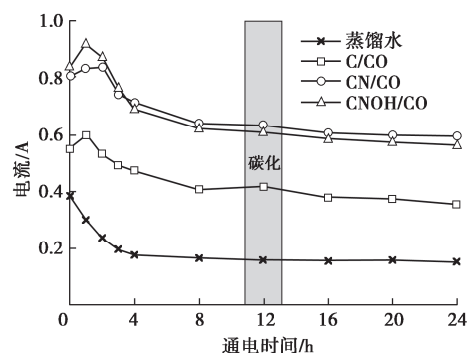
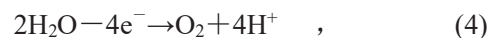


图 11 通电电流随时间的变化

Fig. 11 Variation of current with time during electrification

### 3.5 微观机理分析

通过对组 2 试验后的土样品进行扫描电镜测试,研究了电化学注浆加固淤泥质粉质黏土的水化产物结构形貌变化。从图 12 (a) 可以看出,土颗粒表面光滑,土颗粒表面的胶结物质较少。从高倍扫描电镜照片中可以清晰地观察到(图 12 (b)),电化学注浆加固后土颗粒表面的形貌结构显示为片状胶结物,这种片状胶结物的主要成分为  $Ca(OH)_2$ ,其层间与土颗粒形成较弱的连接。形成胶结物质的主要原因为当加入  $Ca^{2+}$  后,在电势的作用下离子从阳极迁移至阴极,并与电解产生的  $OH^-$  反应生成  $Mg(OH)_2$  或  $Ca(OH)_2$  胶体具体:



但由于  $Ca(OH)_2$  的强度很低,稳定性极差,导致加固后的土体强度提升较低。

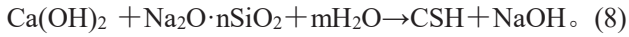
通过对组 3 试验后的土样品进行扫描电镜测试(图 12 (c))可以看出,土颗粒被大量的 C-S-H 胶结物所连接,土颗粒表面也有大量的胶结物覆盖。从高倍扫描电镜照片中(图 12 (d))可以清晰地观察到胶结物的形貌结构显示主要为棒状/棱柱状以及薄片状。棒状/棱柱状结构物为 C-S-H 产物,薄片状结构物为  $Ca(OH)_2$ 。由于 C-S-H 的存在,增加了土颗粒之间的胶结,增大了土体的强度。形成胶结物质的主要原因为阳极加入  $Ca^{2+}$ ,在阴极加入  $SiO_3^{2-}$  后,电势的作用使阳离子从阳极迁移至阴极,阴离子从阴极迁移



至阳极, 阴阳离子在迁移中发生化学反应产生  $\text{CaSiO}_3$  沉淀:



由于土体中的  $\text{OH}^-$  离子浓度较高,  $\text{Ca}^{2+}$  又会与黏土矿物中的可溶性硅酸盐类物质发生火山灰反应, 产生 C-S-H 胶体:



通过对组 6 试验后的土样品进行扫描电镜测试, 研究了电化学注浆-碳化联合加固淤泥质粉质黏土的水化产物结构形貌变化。由图 12 (e) 可以看出, 土颗粒被大量的胶结物所连接, 土颗粒表面也有大量的胶结物覆盖。从高倍扫描电镜照片中 (图 12 (f)) 可以清晰地观察到胶结物的形貌结构显示主要为棒状/棱柱状、薄片状以及块状。棒状/棱柱状结构物为 CSH 产物, 薄片状结构物为  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , 块状产物主要为碳化后产生的  $\text{CaCO}_3$ 。C-S-H 和  $\text{CaCO}_3$  的存在, 增加了土颗粒之间的胶结, 增大了土体的强度。但利用该组试验加固的土体  $\text{CaCO}_3$  的存在较少。形成胶结物质的主要原因除上述外, 电化学注浆加固产生的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  继续与  $\text{CO}_2$  反应生成  $\text{CaCO}_3$  沉淀:



同时电化学注浆加固产生的  $\text{CaSiO}_3$  与  $\text{CO}_2$  反应生成  $\text{CaCO}_3$  沉淀:



通过对组 7 试验后的土样品进行扫描电镜测试, 研究了电化学注浆-碳化联合加固淤泥质粉质黏土的水化产物结构形貌变化。由图 12 (g) 可以看出, 土颗粒被大量的胶结物所连接, 土颗粒表面也有大量的胶结物覆盖。从高倍扫描电镜照片中 (图 12 (h)) 可以清晰地观察到胶结物的形貌结构显示主要为棒状/棱柱状、薄片状以及块状。棒状/棱柱状结构物为 CSH 产物, 薄片状结构物为  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , 块状产物主要为碳化后产生的  $\text{CaCO}_3$ 。C-S-H 和  $\text{CaCO}_3$  的存在, 增加了土颗粒之间的胶结, 增大了土体的强度。利用该组方法加固的土体  $\text{CaCO}_3$  的存在较多, 因此该方法加固的土体强度最大。形成胶结物质的主要原因与上述基本一致, 且由于该方法处理的土体在碱性环境中, 更容易生成大量的胶结物质。

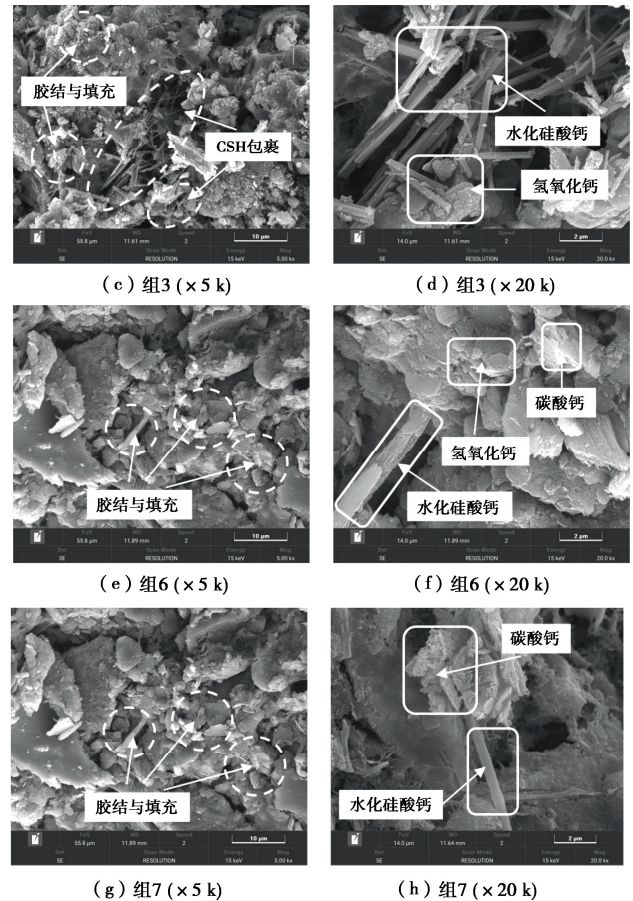
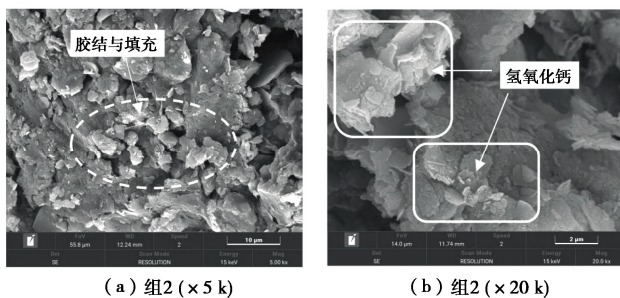


图 12 不同试验工况加固土的 SEM 照片

Fig. 12 SEM pictures of reinforced soil under different test conditions

## 4 结 论

本文首次提出了电化学注浆-碳化联合加固技术处理软土地基, 通过室内模型试验, 探讨了利用该技术处理的土体的物理力学特性, 并揭示了其加固机理, 可得到以下 5 点结论。

(1) 传统的电化学注浆法加固软弱土体时, 去极化  $\text{CaCl}_2$  溶液 (阳极) 和  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  溶液 (阴极) 组合的加固效果大于  $\text{CaCl}_2$  溶液 (阳极) 和  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  溶液 (阳极) 加固效果大于  $\text{CaCl}_2$  溶液 (阳极) 加固效果。

(2) 碳化作用能大幅提高加固效果。电化学注浆-碳化联合加固时土体不排水抗剪强度最大提升 27.5 倍。大量的土体处在碱性环境中使碳化作用贡献占总增长强度的 59.3%。

(3) 所采用的电极只在加固区域与土体接触, 碳化装置埋置在预定加固范围内。结果显示, 位于加固范围内土体的不排水抗剪强度远大于加固范围外的土体, 该方法可以定向深层的加固土体。

(4) 土体处于碱性环境中更有利于碳化作用生成碳酸盐沉淀。在碳化过程中, 注入的  $\text{CO}_2$  参与了较多反应生成大量沉淀物质减少了土体中离子的存在使得

加固后的土体电导率下降。

(5) 通过扫描电镜观察加固后的土体, 分析了其加固机理。研究发现, 强度显著提升的原因因为电化学注浆加固时生成的 C-S-H 和碳化后生成的  $\text{CaCO}_3$ , 土体中大量的  $\text{CaCO}_3$  存在增强了土颗粒之间的胶结作用。

本文通过模型试验验证了电化学注浆-碳化联合加固软土地基的可行性, 如若将其应用到实际工程中, 还需要进一步的开展现场试验。但本文模型试验也可作为工程现场实施提供一些指导: ①工程现场的电极管布置方式、阳极和阴极溶液配比以及通电和通入  $\text{CO}_2$  方式及时间可参考本文。②现场测量加固后的土体强度时建议采用原位测试的方法(深层地基固化测量可选用静力触探技术)。③本文模型试验阐明了所提方法的加固机理, 也可为工程现场的软土地基加固提供参考。

**利益冲突声明/Conflict of Interests:** 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

**作者贡献/Authors' Contributions:** 古文博和童立元参与试验设计; 古文博、闫鑫、刘文源和仇涛完成试验操作; 古文博、童立元和刘松玉参与论文的写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。The study was designed by GU Wenbo and TONG Liyuan. The experimental operation was completed by GU Wenbo, YAN Xin, LIU Wenyuan and QIU Tao. The manuscript was drafted and revised by GU Wenbo, TONG Liyuan and LIU Songyu. All the authors have read the last version of paper and consented for submission.

## 参考文献:

- [1] CASAGRANDE I L. Electro-osmosis in soils[J]. Géotechnique, 1949, **1**(3): 159-177.
- [2] GRAY D H, SCHLOCKER J. Electrochemical alteration of clay soils[J]. Clays and Clay Minerals, 1969, **17**(5): 309-322.
- [3] 刘飞禹, 王逸杰, 王 军. 含易溶盐层状软黏土的电渗固结特性[J]. 中国公路学报, 2016, **29**(5): 19-25, 66. (LIU Feiyu, WANG Yijie, WANG Jun. Electro-osmotic consolidation property of layered soft soil containing soluble salt[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, **29**(5): 19-25, 66. (in Chinese))
- [4] 冯清鹏, 卜凡波, 彭 义, 等. 电极处加入  $\text{CaCl}_2$  溶液对高岭土电渗试验的影响[J]. 长江科学院院报, 2017, **34**(8): 90-95. (FENG Qingpeng, BU Fanbo, PENG Yi, et al. Influences of  $\text{CaCl}_2$  solution added to electrodes on the electro-osmotic test of Kaolin clay[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, **34**(8): 90-95. (in Chinese))
- [5] 孔纲强, 刘大鹏, 傅钧义, 等. 化学电渗法加固软基位移场观测透明土模型试验[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(增刊 1): 149-152. (KONG Gangqiang, LIU Dapeng, FU Junyi, et al. Model test of transparent soil for observation of displacement field of soft foundation strengthened by chemical electroosmosis method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(S1): 149-152. (in Chinese))
- [6] 赵洪星. 电渗联合化学溶液加固淤泥质软土试验研究[J]. 长江科学院院报, 2022, **39**(5): 99-105. (ZHAO Hongxing. Mechanism of using electroosmosis and different chemical solutions to reinforce mucky clay[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, **39**(5): 99-105. (in Chinese))
- [7] OZKAN S, GALE R J, SEALS R K. Electrokinetic stabilization of kaolinite by injection of  $\text{Al}$  and  $\text{PO}_4^{3-}$  ions[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 1999, **3**(4): 135-144.
- [8] OTSUKI N, YODSUDJAI W, NISHIDA T. Feasibility study on soil improvement using electrochemical technique[J]. Construction and Building Materials, 2007, **21**(5): 1046-1051.
- [9] CHIEN S C, OU C Y, LEE Y C. A novel electroosmotic chemical treatment technique for soil improvement[J]. Applied Clay Science, 2010, **50**(4): 481-492.
- [10] ABIODUN A A, NALBANTOGLU Z. Effect of ionic solutions on the performance of electrokinetic treatment of soft soils[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2022, **26**(7): 2704-2721.
- [11] 沈 扬, 邱晨辰, 宋顺翔, 等. 管状 EKG 电化学注浆软基加固室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(增刊 2): 57-61. (SHEN Yang, QIU Chenchen, SONG Shunxiang, et al. Laboratory experimental study on reinforcement of soft foundation by tubular EKG electrochemical grouting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(S2): 57-61. (in Chinese))
- [12] 任连伟, 肖 扬, 孔纲强, 等. 化学电渗法加固软黏土地基对比室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(7): 1247-1256. (REN Lianwei, XIAO Yang, KONG Gangqiang, et al. Laboratory tests on soft ground improvement by chemical electro-osmosis method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(7): 1247-1256. (in Chinese))



- [13] 任连伟, 曹 辉, 孔纲强. 试剂注入配合比对化学电渗法处治软黏土加固效应对比研究[J]. 岩土力学, 2020, **41**(4): 1219-1226. (REN Lianwei, CAO Hui, KONG Gangqiang. Treatment effect of reagent injection mixing ratio on soft clay improved by chemical electroosmosis method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(4): 1219-1226. (in Chinese))
- [14] 覃家琪, 李洪艺, 叶李胜, 等. 真空预压联合电动法加固软土的电学性质变化实验研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2014, **53**(6): 112-117. (QIN Jiaqi, LI Hongyi, YE Lisheng, et al. Electrical properties of consolidation of soft soil by vacuum preloading combined with electrokinetics[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2014, **53**(6): 112-117. (in Chinese))
- [15] 陈嘉辉, 雷学文, 万 勇, 等. 微生物-电渗法加固淤泥质土的室内试验研究[J]. 科学技术与工程, 2021, **21**(11): 4556-4561. (CHEN Jiahui, LEI Xuewen, WAN Yong, et al. Laboratory experimental study on strengthening muddy soil by microbial-electroosmosis method[J]. Science Technology and Engineering, 2021, **21**(11): 4556-4561. (in Chinese))
- [16] 胡平川, 周 建, 温晓贵, 等. 电渗-堆载联合气压劈裂的室内模型试验[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, **49**(8): 1434-1440. (HU Pingchuan, ZHOU Jian, WEN Xiaogui, et al. Laboratory model experiment of electro-osmosis combined with loading and pneumatic fracturing[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, **49**(8): 1434-1440. (in Chinese))
- [17] 张 雷, 吕延栋, 王炳辉, 等. 絮凝-真空-电渗联合加固滩涂软土的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2022, **43**(9): 2383-2390. (ZHANG Lei, LÜ Yandong, WANG Binghui. Laboratory study of consolidation of marine soft soil using flocculation-vacuum preloading-electro-osmosis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, **43**(9): 2383-2390. (in Chinese))
- [18] 符洪涛, 王 军, 蔡袁强, 等. 低能量强夯-电渗法联合加固软黏土地基试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(3): 612-620. (FU Hongtao, WANG Jun, CAI Yuanqiang. Experimental study of combined application of electro osmosis and low-energy dynamic compaction in soft ground reinforcement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(3): 612-620. (in Chinese))
- [19] 蔡光华, 刘松玉, 曹菁菁. 活性氧化镁碳化加固粉土微观机理研究[J]. 土木工程学报, 2017, **50**(5): 105-113, 128. (CAI Guanghua, LIU Songyu, CAO Jingjing. Research on micro-mechanism of carbonated reactive Mg O-stabilized silt[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, **50**(5): 105-113, 128. (in Chinese))
- [20] 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 Songyu, LI Chen. Influence of Mg O activity on stabilization efficiency of carbonated mixing method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(1): 148-155. (in Chinese))
- [21] YI Y L, LISKA M, UNLUER C, et al. Carbonating magnesite for soil stabilization[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, **50**(8): 899-905.
- [22] 王东星, 肖 杰, 李丽华, 等. 基于碳化-固化技术的武汉东湖淤泥耐久性演变微观机制[J]. 岩土力学, 2019, **40**(8): 3045-3053. (WANG Dongxing, XIAO Jie, LI Lihua, et al. Micro-mechanism of durability evolution of sludge dredged from East Lake, Wuhan based on carbonation-solidification technique[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(8): 3045-3053. (in Chinese))
- [23] 闵凡路, 申 政, 李彦澄, 等. 盾构淤泥质废弃黏土氧化镁固化-碳化试验及碳化机制研究[J]. 岩土力学, 2024, **45**(2): 364-374. (MIN Fanlu, SHEN Zheng, LI Yancheng, et al. Solidification and carbonization experimental study on magnesium oxide in shield waste soil and its carbonization mechanism[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, **45**(2): 364-374. (in Chinese))
- [24] 蔡光华, 王 中, 刘松玉, 等. MgO-CO<sub>2</sub> 碳化技术处理河塘淤泥现场试验[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2020, **50**(6): 742-749. (CAI Guanghua, WANG Zhong, LIU Songyu. Field Experiment of Pond Mud Treated by MgO-CO<sub>2</sub> Carbonation Technology[J]. Journal of Henan University (Natural Science), 2020, **50**(6): 742-749. (in Chinese))
- [25] 蔡光华. 活性氧化镁碳化加固软弱土的试验与应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2017. (CAI Guanghua. Test and Application Study on Carbonation of Activated Magnesium Oxide to Strengthen Soft Soil[D]. Nanjing: Southeast University, 2017. (in Chinese))
- [26] ASAVADORNDEJA P, GLAWE U. Electrokinetic strengthening of soft clay using the anode depolarization method[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2005, **64**(3): 237-245.