

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.080



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 阳离子半径对电化学法加固软黏土效果的影响试验研究

吴建奇<sup>1</sup>, 周晨阳<sup>1</sup>, 袁国辉<sup>2</sup>, 符洪涛<sup>2</sup>, 陶建伟<sup>1</sup>

(1. 江西理工大学 土木与测绘工程学院; 江西省环境岩土与工程灾害重点实验室, 江西 赣州 341000; 2. 温州大学 建筑与土木工程学院; 浙江省软弱土地基与海涂围垦工程技术重点实验室, 浙江 温州 325035)

**摘要:**在电化学法加固中, 注浆试剂种类一直是主要研究课题之一。化学试剂的注入对土体电动特性存在一定影响, 主要影响因素为注浆溶液的阳离子种类、离子浓度、离子价位、离子半径等, 土体的电动特性改变对电渗加固效果的影响不可忽视。因此, 为研究注浆试剂中的阳离子半径对电化学法加固软土地基效果的影响, 以同价位不同半径的二价金属离子  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$  为研究对象, 进行电渗固结试验研究。对试验过程中的电流、排水量、电渗透系数变化及试验后的含水率与抗剪强度分布进行分析, 并结合扫描电镜(SEM), 深入探究阳离子半径对电化学加固效果的影响。结果表明: 在电化学法中, 提高注入试剂中阳离子的离子半径, 电渗过程中的电流、排水量、排水速率、电渗透系数及处理后的土体抗剪强度均有明显提升, 其中, 钙离子的离子半径最大, 加固效果最好, 试验后的土体 SEM 微观图像也表明, 钙离子处理后土体密实度更高。

**关键词:** 化学电渗法; 地基处理; 软黏土; 离子半径; 微观结构

中图分类号: TU472.5 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2024)06-0023-08

## Experimental study on the influence of cationic radius on the effect of reinforcement of soft clay by electro-chemical treatment

WU Jianqi<sup>1</sup>, ZHOU Chenyang<sup>1</sup>, YUAN Guohui<sup>2</sup>, FU Hongtao<sup>2</sup>, TAO Jianwei<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Surveying & Mapping Engineering; Jiangxi Provincial Key Lab of Environmental Geotechnical and Engineering Disaster Control, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, P. R. China; 2. College of Civil Engineering and Architecture; Key Laboratory of Engineering and Technology for Soft Soil Foundation and Tideland Reclamation of Zhejiang Province, Wenzhou University, Wenzhou 325035, Zhejiang, P. R. China)

**Abstract:** In the electro-chemical reinforcement method, the type of injecting solutions has been one of the main research issues. The injection of chemical solution has a significant impact on the electrokinetic properties of the soil, and the main influential factors include the types of cation, ion concentration, cation valence, cation radius, etc. of the injecting solutions. The change of the electrokinetic properties of the soil has a non-negligible

收稿日期: 2022-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(52108338, 51768025)

作者简介: 吴建奇(1980-), 男, 副教授, 主要从事土动力学研究, E-mail: wujq1980@jxust.edu.cn.

袁国辉(通信作者), 男, E-mail: yuanguohui2016@163.com.

Received: 2022-05-06

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (Nos.52108338, 51768025)

**Author brief:** WU Jianqi (1980-), associate professor, main research interest: soil dynamics, E-mail: wujq1980@jxust.edu.cn.

YUAN Guohui (corresponding author), E-mail: yuanguohui2016@163.com.

impact on the electro-osmotic reinforcement effect. In order to study the effect of cation radius in injecting chemical solutions on the effect of electro-chemical reinforcement of soft soil foundation, taking the divalent metal ions  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  with different radii of the same valence as research objects, the changes of current, drainage volume, electric permeability coefficient during the test and the distribution of water content and shear strength after test were analyzed, combined with scanning electron microscope(SEM) to explore the effect of different radii of cations on the electro-chemical reinforcement effect. The results show that increasing the ionic radius can significantly improve the current, drainage rate, electric permeability coefficient and shear strength of the soil after treatment. Among them, the cation radius of  $\text{Ca}^{2+}$  is the greatest, and the reinforcement effect of calcium ions is the best. The SEM images also show that soil compactness is higher after calcium ion treatment.

**Keywords:** electro-chemical method; ground treatment; soft clay; cationic radius; microstructure

随着基础设施建设的高速发展,土地资源匮乏问题也日益凸显,尤其是在经济高速发展的东南沿海地区,广泛分布着大量软黏土层,由于其高含水量、高压缩性、低强度及低渗透性等特点,工程特性较差<sup>[1]</sup>,因此,需要对软土地基进行处理才能投入工程使用。

作为目前常用的软土地基处理方法,真空预压法具有成本低,工法简便等优点,但存在深层土体加固效果较差,排水板淤堵<sup>[2]</sup>、处理工期较长等缺点<sup>[3]</sup>。电渗法具有排水速度快、深层土体加固效果好、不受土体水力渗透系数影响等特点<sup>[4]</sup>,比真空预压法更适合低渗透性、细颗粒较多的软土<sup>[5-6]</sup>。电渗法最早由 Casagrande<sup>[7]</sup>应用于工程实践,此后,对于电渗法的研究也越来越广泛。然而,相关研究表明,电渗法仍存在缺陷,如阴极加固效果较差、能耗较高、后期排水效果较差等问题<sup>[8-9]</sup>,因此,在实际工程中的应用受到限制。为改善电渗加固效果,有学者将化学溶液与电渗相结合,发现在电渗过程中向土体中注入盐溶液可以有效提升电渗效率与加固效果<sup>[10]</sup>,此后,电化学法成为电渗法研究热点问题。李瑛等<sup>[11]</sup>发现,电渗过程中存在最佳含盐量,含盐量过高对电渗加固效果存在不利影响。Otsuki 等<sup>[12]</sup>对比分析了当  $\text{Mg}(\text{CH}_3\text{COOH})_2$ 、 $\text{MgSO}_4$ 、 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{ZnSO}_4$ 、 $\text{AgNO}_3$  作为阳极溶液与  $\text{NaOH}$ 、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  作为阴极溶液对高岭土的加固效果,发现当  $\text{Mg}(\text{CH}_3\text{COOH})_2$  与  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  联合注入时,加固效果最好。Liu 等<sup>[13]</sup>研究了不同浓度  $\text{KCl}$ 、 $\text{NaCl}$ 、 $\text{CaCl}_2$  溶液的电化学加固效果,发现  $\text{Ca}^{2+}$  的加固效果优于其他两种离子,且  $\text{Ca}^{2+}$  的最佳含盐量为 1%。任连伟等<sup>[14]</sup>将  $\text{CaCl}_2$  溶液与  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  溶液联合注入土体,相比纯电渗土体,试验后土体抗剪强度提高了 119.8%。Shang 等<sup>[15]</sup>对比了  $\text{CaCl}_2$  与  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  电化学加固后土体的抗剪强度,结果表明,15% 浓度的  $\text{CaCl}_2$  溶液抗剪强度提升幅度更大。Ayodele

等<sup>[16]</sup>以  $\text{CaCl}_2$  为阳极溶液,  $\text{H}_3\text{PO}_4$  为阴极溶液对红黏土进行电化学试验,发现处理后的土体抗剪强度有明显提升,且抗剪强度提升主要是由  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$  产生的胶结作用引起的。上述研究主要集中于单一试剂的阳离子种类、离子价位、离子浓度改变以及不同试剂组合对电渗加固效果影响,对阳离子半径的影响研究较为缺乏。

笔者通过向土体中注入相同浓度的不同半径二价金属阳离子氯盐溶液,对电化学加固过程中的电流、排水量、电渗透系数等参数进行监测,并对比分析试验前后的含水率与抗剪强度分布,结合扫描电镜(SEM)对处理后土体微观结构进行分析,探究相同价位下不同离子半径阳离子对电化学加固效果的影响,以期对电化学法在实际工程应用中的试剂选择提供参考。

## 1 试验方案

### 1.1 试验土样

试验所用土样取自温州洞头区海涂围垦现场。通过室内试验测得的原状土基本参数如表 1 所示。

表 1 试验土样基本物理参数

含水率 $w/\%$	相对密 度 $G_s$	孔隙比 $e$	塑限 $w_p/\%$	液限 $w_L/\%$	pH 值	抗剪强 度/kPa
75	2.75	1.68	25.4	52.1	7.4	0

### 1.2 试验装置

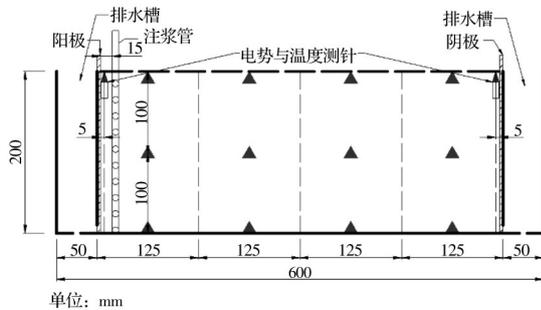
试验采用有机玻璃制成的模型箱,试验装置实物图、示意图如图 1、图 2 所示。模型箱主要由中间的土样槽与两端的排水槽构成,土样槽与试验槽之间由底部开口的有机玻璃板分隔开。土样槽尺寸为  $500\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ ,排水槽尺寸为  $50\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ ,排水槽中央设有半径为 5 mm 的排水口,试验时在靠近阴极一侧的排水口处放置量杯以测定电渗排水量。为防止在试验过程中引入

其他金属离子对试验结果产生干扰,电极板采用尺寸为220 mm×200 mm×4 mm石墨电极板,其中阴极板表面均匀分布直径为10 mm的小孔,以便于排水。在距离阳极15 mm位置插入直径为10 mm的带孔PPR管,以注入化学试剂,PPR管底部封口,以保证化学试剂均匀扩散于不同深度土体。电源采用GWSPD-3606型稳压直流电源。

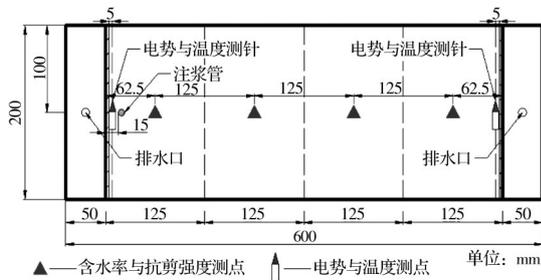


图1 试验装置实物图

Fig.1 Experimental apparatus



(a) 装置剖面图



(b) 装置平面图

图2 实验装置示意图

Fig.2 Schematic of experimental apparatus

1.3 试验方案

为研究阳离子半径对电化学加固效果的影响,试验共设置4个试验组,其中T0为纯电渗对照组,其余3组分别加入CaCl<sub>2</sub>、MgCl<sub>2</sub>、CuCl<sub>2</sub>阳离子化合价相同的盐溶液,T0组中注入等量的去离子水,具体实验方案如表2所示。

试验过程中,控制输出电压为50 V,即土体中的电势梯度为1 V/cm。为测定试验过程中土体有效电势的变化,在距离电极5 mm处安置电势测针,具体试验步骤为:1)在试验箱内均匀涂上一层凡士林,将电极板用去离子水润湿后置于土样槽两端,

表2 试验方案

Table 2 Test programs

试验编号	化学溶液	溶液浓度/ (mol/L)	添加量/ mL	电势梯度/ (V/cm)
T0	无			1
T1	CaCl <sub>2</sub>	0.5	100	1
T2	MgCl <sub>2</sub>	0.5	100	1
T3	CuCl <sub>2</sub>	0.5	100	1

并在靠近排水槽一侧放置土工布防止土样流失。2)分层装入土样,装填过程中对土样进行适当挤压、震荡以消除气泡。3)按照图2布置电势与温度测针,并将量筒置于阴极排水口下方。4)连接电路,并将化学溶液通过带孔PPR管注入土体,待溶液完全扩散进入土体之后,调节输出电压为50 V并开始通电。由于试验前期波动较大,前6 h每1 h记录一次电流、排水量,并用万用表测定有效电势,6~12 h每2 h记录一次,12 h后每4 h记录一次。当各试验组排水速率均小于5 mL/h时,认为电渗停止排水,断开电源,停止试验。试验结束后按图2中的测点位置进行含水率与抗剪强度的测定,并取土进行扫描电镜(SEM)分析。

2 试验结果与分析

2.1 电流

试验过程中土体电流的变化趋势如图3所示。试验开始时,各试验组初始电流分别为0.7、0.89、0.81、0.83 A,初始阶段电流逐渐增大,2 h时各组电流达到最大值,各组峰值电流分别为0.73、0.95、0.83、0.87 A,相比纯电渗组T0,电化学试验组T1~T3初始电流分别提升了27.1%、15.7%、18.6%,峰值电流分别提升了30.1%、13.7%、19.2%,阳离子的注入使土体中导电粒子的数量增加,导致土体导电性提升。此外,在电化学试验组T1~T3中,电流提升幅度依次为T1>T3>T2,这与T1~T3组中注入的阳离子半径大小规律一致,主要原因是金属阳离子在溶液中主要以水合离子的形式存在,离子半径不同会导致水合离子半径产生较大差异,离子半径越小,离子的电荷密度越大,使其对于水分子的作用力也越大,因此,离子的水合离子半径越大,在相同条件下的迁移速率越小,使得导电能力也越差,因此离子半径较大的阳离子对土体导电性的促进作用也越明显,T2组中添加的Mg<sup>2+</sup>与T3组中添加的Cu<sup>2+</sup>离子半径差距较小,故两组试验的电流差距也较小。2 h之后电流开始逐渐降低,随着电渗的进行,各组电流之间的差距逐渐缩小,最终各组电流基本一致。虽然T1组的初

始电流与峰值电流相对 T0 组均有较大提升,但电流降低速率也较大,48 h 时, T1 与 T0 组基本相同。

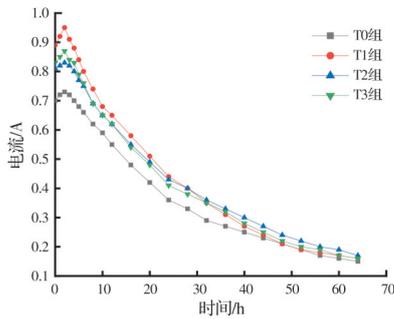


图 3 注入不同半径阳离子条件下电流变化曲线

Fig. 3 Curves of current under injection of cations with different radii

结合图 4 的排水速率变化曲线可以看出,试验过程中的排水速率与电流变化趋势一致。随着电渗的进行,土体中的孔隙水与部分阳离子排出土体,导致土体导电性降低。由于 T1~T3 组前期排水速率较高,在试验初期土体中的孔隙水与阳离子含量迅速下降,土体中可移动的带电粒子减少,导致离子半径提升带来的促进作用被大幅削弱,因此, T1~T3 组的电流降低速率较大,且 T1 组降低速率最大。但由于 T1~T3 组的峰值电流相对 T0 组提升较大,因此,直到电渗中后期各组电流才趋近相同。

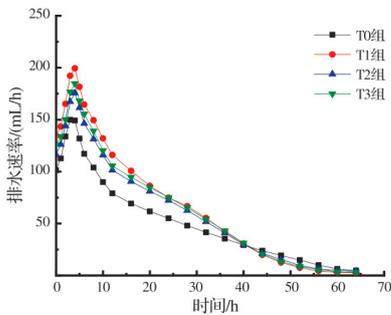


图 4 注入不同半径阳离子条件下排水速率变化曲线

Fig. 4 Curves of drainage rate under injection of cations with different radii

## 2.2 排水量与排水速率

试验过程中的排水量变化趋势如图 5 所示。可以看出,各试验组前期排水量差别较小,直到 10 h 时才表现出较明显的差异。试验结束时, T0~T4 组排水量分别为 3 189.9、4 118.4、3 796.8、3 943 mL, 电化学试验组 T1~T3 的最终排水量相比纯电渗组 T0 分别提升了 29.1%、19%、23.6%。添加化学试剂有效提升了排水量,因为电渗排水主要依赖阳离子携带水分子在电场的作用下向阴极定向移动并从阴极排出,添加化学试剂后,土体中的可自由移动的阳离子数量增加,促进了排水作用。此外,在

电化学试验组 T1~T3 中,最终排水量与注入溶液的阳离子半径正相关,添加了  $\text{Ca}^{2+}$  的 T1 组排水效果最好, T2 组与 T3 组排水量差距较小。

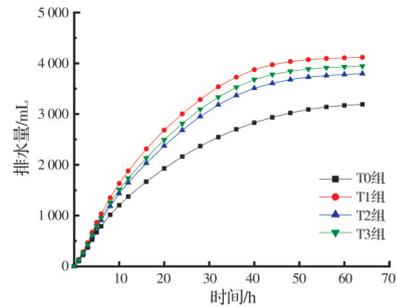


图 5 注入不同半径阳离子条件下排水量变化曲线

Fig. 5 Curves of drainage volume under injection of cations with different radii

根据排水量得到的排水速率变化趋势如图 4 所示。由图 4 可以看出,电渗前期,各组排水速率较大且均呈上升趋势,在通电 5 h 左右各组排水速率达到最大值,各组峰值排水速率大小顺序依次为  $\text{T1} > \text{T3} > \text{T2} > \text{T0}$ 。在电化学组 T1~T3 中,由于注入土体的阳离子半径不同,因此,排水速率也存在较明显区别, T1 中注入土体的  $\text{Ca}^{2+}$  离子半径最大,离子水化半径最小,迁移速度更快,因此,可以获得更高的排水速率。5 h 后各试验组排水速率呈下降趋势,其中,电化学试验组 T1~T3 的排水速率下降较快,在峰值排水速率明显大于纯电渗组 T0 的情况下,在电渗进行到 40 h 后, T1~T3 组排水速率均小于纯电渗组 T0,排水量越大,排水速率下降越明显。 T1~T3 组前中期大量排水导致部分阳离子随孔隙水排出土体,且电化学组在阴极区域土体发生的胶结反应消耗了部分阳离子,土中可自由移动的阳离子数量大幅减少,因此,排水速率大幅降低。

总体来看,在添加的阴离子相同且阳离子价位与浓度相同时,阳离子半径成为影响电化学加固效果的重要指标,离子半径较大的阳离子对电化学法排水速率有更好的促进作用,且电渗前期的促进作用更加明显,电渗后期阳离子浓度大幅降低导致离子半径提升产生的促进作用被弱化,因此,试验后期排水速率基本一致。

## 2.3 温度

试验过程中的土体温度变化如图 6 所示。根据焦耳定律,电渗过程中在土体中产生的电流会伴随着焦耳热,这也是土体温度升高的主要来源。由于各试验组所选用同一批次软黏土,测得的土体温度均为  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,试验在室温  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  的情况下进行。由图 6 可以看出,开始通电后,随着土体中的电流不断增大,各试验组电极附近土体温度均呈上升趋势,并

在11 h左右达到最大值。通电11 h后,各组土体温度逐渐降低并趋于稳定,试验结束时,各组土体温度相对初始温度存在小幅度提升。各试验组阳极峰值温度提升11~15℃,阴极峰值温度提升10~13℃,由于添加阳离子,导致电化学组T1~T3土体电流增大,因此,产生的温度也相对更高。由于土体的电阻率会随着温度的升高而减小<sup>[17]</sup>,使得土体电流随着温度的升高而增大,因此,在电渗前期存在电流与温度的相互促进作用,但电渗的持续排水与阳离子消耗导致土体电阻率增加,当温度升高带来的电阻率降低幅度小于排水与阳离子消耗导致的电阻率增加幅度时,电流开始逐渐降低,随后温度也逐渐降低。此外,温度的提升对离子的迁移与扩散有一定的促进作用,加快了水化阳离子在土体中的运移速率,对排水速率有一定的促进作用,同价位下离子半径较大的离子对电流的促进作用更大,因此土体温度更高,对排水速率的促进作用也更加显著。

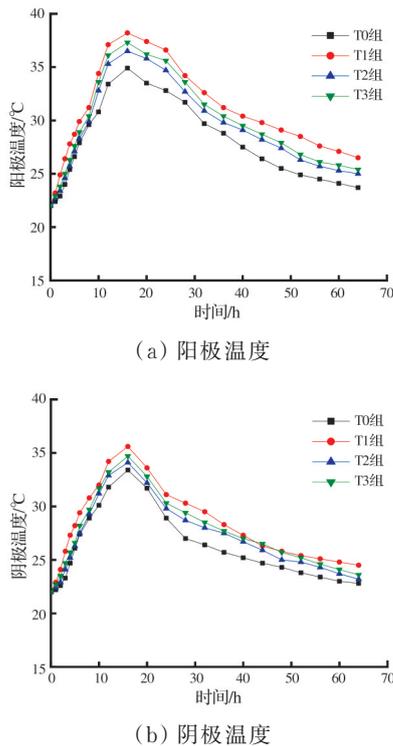


图6 注入不同半径阳离子条件下土体温度变化曲线  
Fig. 6 Curves of temperature under injection of cations with different radii

## 2.4 电渗透系数

电渗透系数 $k_e$ 作为土体基本性质之一,是影响土体电渗排水速率最主要的因素,代表了孔隙水在电场作用下在土体中运移的难易程度<sup>[18]</sup>。根据Esrig<sup>[19]</sup>的理论,电渗透系数可根据式(1)得出。

$$k_e = \frac{v_e \cdot L}{A \cdot \Delta\varphi} \quad (1)$$

式中: $v_e$ 为电渗排水速率,mL/s; $\Delta\varphi$ 为作用在土体两端的电势,V; $L$ 为电极之间的距离,cm; $A$ 为电流或水流通过的横截面积,cm<sup>2</sup>。

试验过程中的土体电渗透系数变化如图7所示。可以看出,电渗透系数的变化趋势与排水速率近似,这与电渗透系数的物理意义相吻合。各组土体电渗透系数均存在明显的峰值,其中,电化学组T1~T3的峰值电渗透系数均大于纯电渗组T0,金属阳离子的注入有效地改善了土体的排水性能,对土体的电渗透系数有较大提升。随着土体中孔隙水的排出与阳离子的损耗,土体的电渗透系数也随之下降,且对于电化学组T1~T3的影响更加显著。

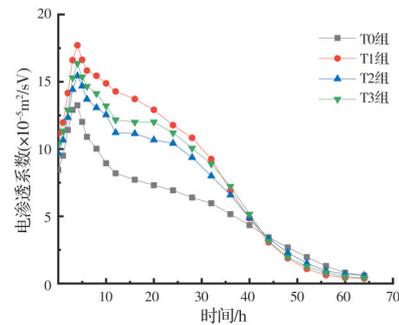


图7 注入不同半径阳离子条件下土体电渗透系数变化曲线

Fig. 7 Curves of electric permeability coefficient under injection of cations with different radii

此外还可以看出,在电化学组T1~T3中,随着注入土体中阳离子半径的增加,土体的电渗透系数也随之增大。根据Helmholtz-Smoluchowski模型<sup>[20]</sup>得出的电渗透系数 $k_e$ 表达式为

$$k_e = \frac{n\epsilon_w}{\mu} \zeta \quad (2)$$

式中: $\zeta$ 为zeta电势,V; $n$ 为土体孔隙率; $\epsilon_w$ 为孔隙水介电常数,F/m; $\mu$ 为孔隙水黏度系数,N·s/m<sup>2</sup>。由于不同土体间介电常数与黏度系数差别较小<sup>[17]</sup>,因此,电渗透系数的主要影响因素为zeta电势 $\zeta$ 与孔隙率 $n$ 。当土体中阳离子浓度增大时,土体中的双电层扩散层(DDL)变薄,导致颗粒间的斥力降低,黏土颗粒之间产生絮凝作用<sup>[21-22]</sup>,孔隙率增大,zeta电位减小。当zeta电位降低幅度小于孔隙率增大幅度时,土体的电渗透系数增加。在阳离子价位与浓度相同的情况下,阳离子的离子半径越大,离子水化半径越小,DDL厚度更小<sup>[23]</sup>,对土体电渗透系数的促进作用更加显著,故T1组土体的峰值电渗透系数明显大于T2、T3组。

## 2.5 沉降量

随着电渗排水的进行,各试验组土体表面均存在不同程度的沉降,试验结束后对土体表面不同位置的沉降进行测量,测量结果如图8所示。可以看出,电渗处理后土体沉降主要呈两端小、中间大的趋势。电化学试验组T1~T3的总体沉降均大于纯电渗组T0,主要原因是土体沉降主要由土体排水引起,T1~T3组的排水量较T0组有明显提升。此外,各试验组阴极附近沉降均小于阳极,结合图9中的含水率分布曲线可以看出,土体排水主要集中于阳极与土体中部,阴极排水较少,且金属阳离子在阴极附近的碱性环境中发生的胶结反应增强了土体的整体性,因此,阴极附近土体沉降较小。试验过程中观察到,电渗初期中部土体几乎不发生沉降,但试验结束后土体中部沉降最大,主要原因是,电渗中后期土体中部形成裂缝,尤其是电化学组T1~T3,致使土体通过中部裂缝快速排水,因此试验中后期土体中部发生较大沉降,随着离子半径的提升,这一效应也更加显著。

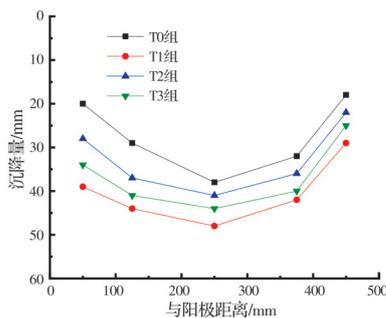


图8 注入不同半径阳离子条件下土体沉降分布曲线  
Fig. 8 Curves of settlement position under injection of cations with different radii

## 2.6 含水率与抗剪强度分布

试验结束后,按照图2所示的测点位置对土体含水率与抗剪强度进行了测定,并利用不同深度处含水率计算了不同位置的平均含水率,含水率分布曲线如图9所示。从图9可以看出,土体阴极附近的含水率明显较高,这是由于电渗排水的本质是阳离子携带水分子在电场作用的情况下向阴极移动,试验结束时仍有较多孔隙水汇集在阴极附近未排出,造成阴极附近含水率偏高。对比发现,电化学试验组T1~T3不同位置的含水率均小于纯电渗组T0,且T1~T3组的含水率随注入的阳离子半径的增加而降低,表明增大注入阳离子半径对电化学加固效果有明显的提升。

试验结束后土体的抗剪强度分布如图10所示。由图10可以看出,土体的抗剪强度分布与含水率分布相关,阴极附近土体由于含水率较高,导致该区域抗剪强度提升较小。对比各组抗剪强度发现,注

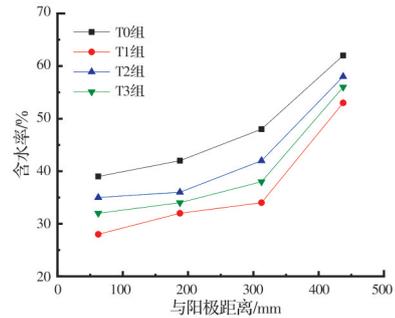


图9 注入不同半径阳离子条件下土体含水率分布曲线  
Fig. 9 Distribution of water content under injection of cations with different radii

入的阳离子半径越大,加固效果越好,其中,相比纯电渗组T0,T1~T3组阳极区域抗剪强度分别提升了69.8%、21%、49%。在土体靠近中部的的位置,电渗过程中在该区域发生的胶结反应增强了土体的连续性,导致该区域抗剪强度表现较好。此外,T3组阳极区域的含水率低于T2组,但抗剪强度较差,主要原因是注入的CuCl<sub>2</sub>溶液存在一定的腐蚀性,导致注浆位置附近土体的性能受到一定程度的影响。

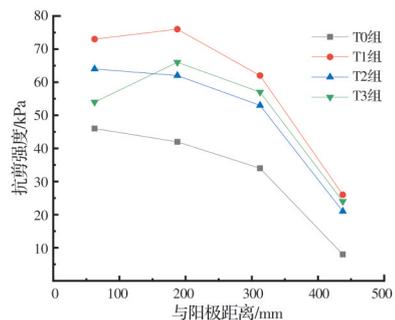


图10 注入不同半径阳离子条件下土体抗剪强度分布曲线  
Fig. 10 Distribution of shear strength under injection of cations with different radii

## 2.7 微观结构分析

各试验组不同位置处的扫描电镜图像如图11、图12所示,主要选取阳极与中部靠近阴极区域土体放大2000倍图像进行分析。图11为试验结束后阳极附近土体微观图像,可以看出,由于排水效果较差,T0组土体内部仍存在较大孔隙,且孔隙之间相互连通,影响了土体的整体结构。由于排水较多,T1、T2组阳极附近土体骨架紧密,小孔隙较少。由于注入CuCl<sub>2</sub>溶液,导致T4组阳极附近土体受到一定程度的腐蚀,结构较松散,导致该区域土体强度受到影响,这一点在2.6节中的抗剪强度曲线中有所体现。图12为中部靠近阴极区域土体微观图像,不同于阳极,中部靠近阴极区域土体存在较多孔隙,土体骨架较松散,这也是阴极附近土体强度较低的主要原因。通过图12(b)、(c)、(d)可以观察到,土颗粒存在明显的团聚现象,且部分孔隙中存在絮状胶结物质,这主要是由于在电场的作用下注

入的 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 部分运移到土体阴极区域,导致阴极区域阳离子浓度增加,DDL厚度降低,土颗粒絮凝成团,且部分阳离子在阴极附近的碱性环境下发生胶结反应,形成的胶结沉淀填补了部分孔隙。

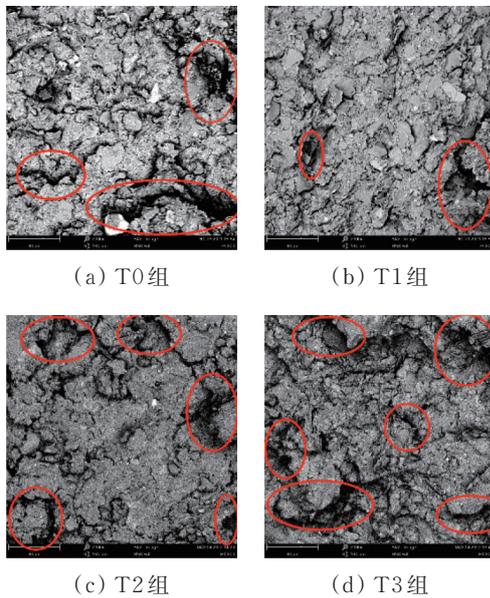


图 11 注入不同半径阳离子条件下阳极区域土体微观图像  
Fig. 11 SEM images of anode area under injection of cations with different radii

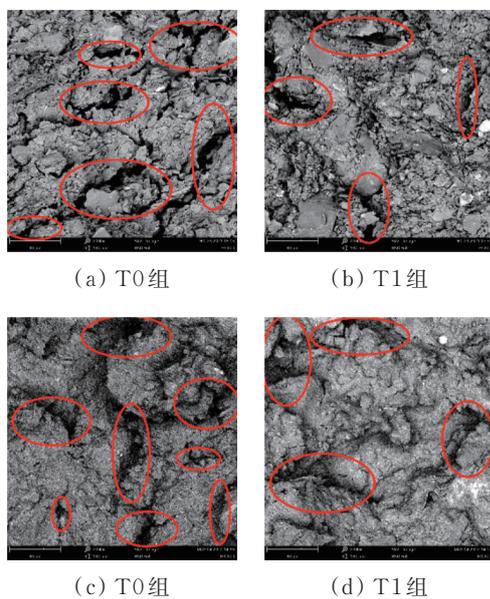


图 12 注入不同半径阳离子条件下中部靠近阴极区域土体微观图像

Fig. 12 SEM images of cathode area under injection of cations with different radii

孔隙的差异主要是由于电渗过程中孔隙水在电场的作用下由阳极运移到阴极并逐渐排出,土体孔隙随着孔隙水的排出逐渐增大,在土颗粒间的相互作用力与重力的共同作用下,土体逐渐被压缩并

产生沉降与侧移,土颗粒之间的孔隙逐渐减小<sup>[24]</sup>,最终导致阳极附近含水率较低的土体孔隙较少且结构密实,而靠近阴极的含水率较高的土体结构松散且孔隙较多,结合图8中的土体沉降曲线可以看出,离子半径增加使得土体沉降量增加,因此,相对T2、T3组,T1组土体更加密实。此外,电化学法中注入的部分阳离子可以在阴极的碱性环境下发生胶结反应,生成的胶结物质能有效填补阴极附近的较大孔隙,增强土体整体性。因此,相对纯电渗法,电化学法处理后的阴极区域土体仍有一定的抗剪强度。

### 3 结论

通过一系列对比试验,研究了注入不同半径阳离子对电化学加固效果的影响,得到如下结论:

1) 在注浆溶液的阴离子种类、阳离子价位与阳离子浓度相同的情况下,注入的阳离子半径越大,对电化学加固效果的促进作用越明显,试验中分别注入了 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 和 $\text{Cu}^{2+}$ 不同半径金属阳离子,其中 $\text{Ca}^{2+}$ 的加固效果最好,由于离子半径较为接近, $\text{Mg}^{2+}$ 与 $\text{Cu}^{2+}$ 加固效果也较为接近,但仍存在差距。

2) 不同半径阳离子电化学加固效果的差距本质上是由于阳离子半径越大,水化离子半径越小,迁移速度越快,导电能力也越强,并且离子水化半径小使得DDL厚度更小,土体电渗透系数增加,改善了土体电渗排水固结效果。

3) 离子半径改变对电化学加固过程的影响主要集中于电渗前期,电渗后期由于离子浓度的大幅降低弱化了阳离子半径产生的影响。

### 参考文献

- [1] 孙召花,余湘娟,高明军,等.真空-电渗联合加固技术的固结试验研究[J].岩土工程学报,2017,39(2):250-258.  
SUN Z H, YU X J, GAO M J, et al. Experimental studies on vacuum preloading incorporated with electro-osmosis consolidation for dredger fill [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(2): 250-258. (in Chinese)
- [2] 刘飞禹,李哲,袁国辉,等.真空预压联合间歇电渗加固疏浚淤泥试验研究[J].土木与环境工程学报(中英文),2021,43(5):1-9.  
LIU F Y, LI Z, YUAN G H, et al. Experimental study on dredged slurry improvement by vacuum preloading combined with intermittent electroosmotic [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(5): 1-9. (in Chinese)
- [3] 刘飞禹,张乐,王军,等.阳极跟进作用下软黏土电渗固结室内试验研究[J].土木建筑与环境工程,2014,36(1):52-58.

- LIU F Y, ZHANG L, WANG J, et al. Experimental analysis of the electro-osmosis consolidation of soft clay under anode follow-up [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2014, 36(1): 52-58. (in Chinese)
- [4] WANG J, GAO Z Y, FU H T, et al. Effect of surcharge loading rate and mobilized load ratio on the performance of vacuum-surcharge preloading with PVDs [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2019, 47(2): 121-127.
- [5] 王军, 张乐, 刘飞禹, 等. 真空预压-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*, 2014, 33(Sup2): 4181-4192.
- WANG J, ZHANG L, LIU F Y, et al. Experimental study of vacuum preloading combined reinforcement with electro-osmosis in soft clay ground [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(Sup2): 4181-4192. (in Chinese)
- [6] LIU F Y, WEI M, ZHANG L, et al. Experimental study of the electro-osmosis consolidation of soft clay under anode follow-up [C]//*Geo-Shanghai 2014*. May 26-28, 2014, Shanghai, China. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2014: 188-197.
- [7] CASAGRANDE L. Electro-osmotic stabilization of soils [J]. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, 1952, 39: 51-83.
- [8] ZHANG D K, XU J, FU H T, et al. Influence of the intermittent vibration ratio on the electro-osmotic consolidation of dredged sludge [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2022: 1-9.
- [9] 刘飞禹, 李玲玉, 王军, 等. 阳极灌浆溶液对电渗加固软土地基的影响[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(3): 44-52.
- LIU F Y, LI L Y, WANG J, et al. Effects of anodic grouting with different solutions during electro-osmosis on a soft foundation treatment [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(3): 44-52. (in Chinese)
- [10] BJERRUM L, MOUM J, EIDE O. Application of electro-osmosis to a foundation problem in a Norwegian quick clay [J]. *Géotechnique*, 1967, 17(3): 214-235.
- [11] 李瑛, 龚晓南. 含盐量对软黏土电渗排水影响的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(8): 1254-1259.
- LI Y, GONG X N. Experimental study on effect of soil salinity on electro-osmotic dewatering in soft clay [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(8): 1254-1259. (in Chinese)
- [12] OTSUKI N, YODSUDJAI W, NISHIDA T. Feasibility study on soil improvement using electrochemical technique [J]. *Construction and Building Materials*, 2007, 21(5): 1046-1051.
- [13] LIU F Y, FU H T, WANG J, et al. Influence of soluble salt on electro-osmotic consolidation of soft clay [J]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2017, 54(1): 49-55.
- [14] 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 L W, XIAO Y, KONG G Q, 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)
- [15] SHANG J Q, MOHAMEDHASSAN E, ISMAIL M. Electrochemical cementation of offshore calcareous soil [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2004, 41(5): 877-893.
- [16] AYODELE A L, AGBEDE O A. Influence of electrochemical treatment on a typical laterite [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 2018, 171(2): 103-111.
- [17] 薛志佳. 电渗加固软土地基影响因素和方法研究[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2017.
- XUE Z J. A study on the influence factors and novel methods of soft soil improvement by electro-osmosis techniques [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [18] 刘亦民. 软土地基电渗加固机理试验和理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- LIU Y M. Experimental and theoretical study on the mechanism of electroosmotic reinforcement for soft clay foundation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. (in Chinese)
- [19] ESRIG M I. Pore pressures, consolidation, and electrokinetics [J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1968, 94(4): 899-921.
- [20] MITCHELL J K, SOGA K. *Fundamentals of soil behavior* [M]. New York: John Wiley & Sons, 2005.
- [21] CHAI J C, SHEN S L, GENG X Y. Effect of initial water content and pore water chemistry on intrinsic compression behavior [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2019, 37(4): 417-423.
- [22] 袁国辉, 胡秀青, 刘飞禹, 等. 絮凝-逐级加压电渗法改良疏浚淤泥试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(Sup1): 2995-3003.
- YUAN G H, HU X Q, LIU F Y, et al. Experimental study on the improvement of dredged slurry by flocculation-step-by-step loading voltage electro-osmosis method [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(Sup1): 2995-3003. (in Chinese)
- [23] YUKSELEN-AKSOY Y, KAYA A. A study of factors affecting on the zeta potential of kaolinite and quartz powder [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 62(4): 697-705.
- [24] 陶燕丽, 龚晓南, 周建, 等. 电渗作用下软土细观孔隙结构[J]. *土木建筑与环境工程*, 2018, 40(3): 110-116.
- TAO Y L, GONG X N, ZHOU J, et al. Mesoscopic pore structure of soft soil during electro-osmosis [J]. *Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering*, 2018, 40(3): 110-116. (in Chinese)