

University of Nebraska - Lincoln

DigitalCommons@University of Nebraska - Lincoln

---

Civil and Environmental Engineering Faculty  
Publications

Civil and Environmental Engineering

---

9-2022

## Laboratory study of consolidation of marine soft soil using flocculation-vacuum preloading-electro-osmosis

Lei Zhang

Yan-dong Lu

Bing-hui Wang

Dan-dan Jin

Ming-xing Zhu

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://digitalcommons.unl.edu/civilengfacpub>



Part of the [Civil and Environmental Engineering Commons](#)

---

This Article is brought to you for free and open access by the Civil and Environmental Engineering at DigitalCommons@University of Nebraska - Lincoln. It has been accepted for inclusion in Civil and Environmental Engineering Faculty Publications by an authorized administrator of DigitalCommons@University of Nebraska - Lincoln.

---

**Authors**

Lei Zhang, Yan-dong Lu, Bing-hui Wang, Dan-dan Jin, Ming-xing Zhu, and Chen Fang

## Laboratory study of consolidation of marine soft soil using flocculation-vacuum preloading-electro-osmosis

ZHANG Lei<sup>1,2</sup>, LÜ Yan-dong<sup>1</sup>, WANG Bing-hui<sup>1,2</sup>, JIN Dan-dan<sup>2,3</sup>, ZHU Ming-xing<sup>1</sup>, FANG Chen<sup>4</sup>

1 Jiansu University

2 Nanjing Tech. University

3 Jiansu University

4 University of Nebraska-Lincoln

Note: Last names given first here (Chinese style)

**Abstract:** To solve the technical issues in vacuum preloading method, including the sediment clogging of drains and the limitation of drainage conditions, this study investigated vacuum preloading combined with flocculation and electro-osmosis consolidation for marine soft soil. A series of column settling tests was conducted to determine the optimal organic flocculant for the combined method. With the selected organic flocculant, laboratory tests were performed on the soil samples using the combined consolidation method, in which the electro-osmosis was added at different time moments. The tests considered three representative cases at different time moments: (i) at 48 h, i.e., the initial stage of vacuum preloading with the consolidation degree of 0; (ii) at 60 h, i.e., the obvious reduction in the dewatering speed with the consolidation degree of 60%; and (iii) at 84 h, i.e., the dewatering speed of 0 with the consolidation degree of 80%. The effectiveness of the combined method was evaluated using the tested results, including water discharge, soil vane shear strength, water content, and pore water pressure, along with the determination of the best time for adding the electro-osmosis. The results indicated that the combined method effectively delayed the decrease of dewatering efficiency and significantly increased dewatering duration. Also, the shear strength and load-bearing capacity of the consolidated soil were clearly improved, with the evenly dissipated pore water pressure. In addition, the cationic polyamide was the optimal flocculant for the combined method, which enhanced the initial dewatering speed and improved the permeability of the soft soil to solve the sediment clogging in the plastic board during the vacuum preloading. This research demonstrated the effectiveness of vacuum preloading combined with flocculation and electroosmosis consolidation for soil improvement.

**Key words:** vacuum preloading, electro-osmosis consolidation, flocculant, cross plate shear strength, pore water pressure

### Citation

ZHANG Lei, LÜ Yan-dong, WANG Bing-hui, JIN Dan-dan, ZHU Ming-xing, FANG Chen, . Laboratory study of consolidation of marine soft soil using flocculation-vacuum preloading-electro-osmosis[J].Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(9): 2383-2390.

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.1890

# 絮凝-真空-电渗联合加固滩涂软土的模型试验研究

张 雷<sup>1,2</sup>, 吕延栋<sup>1</sup>, 王炳辉<sup>1,2</sup>, 金丹丹<sup>2,3</sup>, 竺明星<sup>1</sup>, 方 晨<sup>4</sup>

(1. 江苏科技大学 土木工程与建筑学院, 江苏 镇江 212100; 2. 南京工业大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 211816;  
3. 江苏大学 土木工程与力学学院, 江苏 镇江 212013; 4. 内布拉斯加大学 林肯分校 土木工程系, 美国 林肯 68583)

**摘 要:** 针对真空预压作用下排水板淤堵与排水条件受限等问题, 提出絮凝-真空-电渗联合加固法。首先通过沉降柱试验确定合适的有机絮凝剂, 然后采用该絮凝剂, 分别在 48 h (开始介入真空预压, 固结度为 0)、60 h (排水速率明显下降, 固结度为 60%) 及 84 h (排水速率近乎 0, 固结度为 80%) 时介入电渗, 开展不同电渗介入时间的絮凝-真空-电渗联合加固试验。试验从排水量、十字板剪切强度、含水率与孔压等对比分析联合加固的有效性, 确定其最佳电渗介入时间。试验结果表明: 当固结度为 80% 时介入电渗, 絮凝-真空-电渗联合加固法能够有效地抑制排水速率减小的趋势, 增长有效排水时间。同时, 土体的抗剪强度和承载力亦得到大幅提升, 孔压消散更加均匀。此外, 在阳离子聚丙烯酰胺絮凝剂的作用下, 初始排水速率快, 在一定程度上使土体的渗透性得到提升, 有效地解决了排水板淤堵问题, 说明絮凝-真空-电渗联合加固法具有较强的优越性。

**关 键 词:** 真空预压; 电渗; 絮凝; 十字板剪切强度; 孔隙水压力

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 09-2383-08

## Laboratory study of consolidation of marine soft soil using flocculation-vacuum preloading-electro-osmosis

ZHANG Lei<sup>1,2</sup>, LÜ Yan-dong<sup>1</sup>, WANG Bing-hui<sup>1,2</sup>, JIN Dan-dan<sup>2,3</sup>, ZHU Ming-xing<sup>1</sup>, FANG Chen<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, Jiangsu 212100, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech. University, Nanjing, Jiangsu 211816, China; 3. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 4. Faculty of Civil Engineering, University of Nebraska-Lincoln, Lincoln, USA 68583)

**Abstract:** To solve the technical issues in vacuum preloading method, including the sediment clogging of drains and the limitation of drainage conditions, this study investigated vacuum preloading combined with flocculation and electro-osmosis consolidation for marine soft soil. A series of column settling tests was conducted to determine the optimal organic flocculant for the combined method. With the selected organic flocculant, laboratory tests were performed on the soil samples using the combined consolidation method, in which the electro-osmosis was added at different time moments. The tests considered three representative cases at different time moments: (i) at 48 h, i.e., the initial stage of vacuum preloading with the consolidation degree of 0; (ii) at 60 h, i.e., the obvious reduction in the dewatering speed with the consolidation degree of 60%; and (iii) at 84 h, i.e., the dewatering speed of 0 with the consolidation degree of 80%. The effectiveness of the combined method was evaluated using the tested results, including water discharge, soil vane shear strength, water content, and pore water pressure, along with the determination of the best time for adding the electro-osmosis. The results indicated that the combined method effectively delayed the decrease of dewatering efficiency and significantly increased dewatering duration. Also, the shear strength and load-bearing capacity of the consolidated soil were clearly improved, with the evenly dissipated pore water pressure. In addition, the cationic polyamide was the optimal flocculant for the combined method, which enhanced the initial dewatering speed and improved the permeability of the soft soil to solve the sediment clogging in the plastic board during the vacuum preloading. This research demonstrated the effectiveness of vacuum preloading combined with flocculation and electroosmosis consolidation for soil improvement.

**Keywords:** vacuum preloading; electro-osmosis consolidation; flocculant; cross plate shear strength; pore water pressure

收稿日期: 2021-11-08

修回日期: 2022-04-28

基金项目: 江苏省自然科学基金 (No.BK20200996); 中国博士后基金面上项目 (No.2020M681566); 国家自然科学基金 (No.51978317); 江苏省博士后科研资助计划 (No.2021K493C)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20200996), China Postdoctoral Science Foundation (2020M681566), the National Natural Science Foundation of China (51978317) and Jiangsu Postdoctoral Research Funding Program (2021K493C).

第一作者简介: 张雷, 男, 1989 年生, 博士, 讲师, 主要从事软土地基处理、环境岩土工程方面的研究。E-mail: lei.zhang@just.edu.cn

通讯作者: 王炳辉, 男, 1980 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩土地震工程、软土地基处理方面的研究。E-mail: wbhchina@126.com

## 1 引言

随着我国沿海城市建设发展需求的提高,土地资源短缺成为热点关注问题,沿海地区大量的滩涂软土资源成为有效缓解土地资源短缺问题的方法之一。滩涂软土因其高含水率、高压缩性、低抗剪强度与低渗透性等特点,处理较为复杂,故如何高效、快速地处理滩涂软土,缓解土地资源短缺,是亟待解决的问题。

目前,真空预压法(vacuum preloading method,简称VPM)是软基处理领域较为常用的一种处理方法。VPM于1952年被Kjellman<sup>[1]</sup>提出,后用于美国费城机场的扩建工程,取得较好的加固效果。20世纪50年代末,在我国的基础建设中被广泛应用于软基处理,成为一项研究热点。然而,预制垂直排水板(prefabricated vertical drain, PVD)作为VPM进行排水固结的有效路径<sup>[2]</sup>,常出现堵塞、变形、沿排水通道真空度损失等问题<sup>[3]</sup>,以至于排水能力降低,固结不充分。为了改善土的固结效果,众多研究验证了絮凝-真空联合处理软土地基的有效性。絮凝剂(flocculants,简称FLO)的加入可以引发土体细颗粒的絮凝,使颗粒重新排列,构成絮状网架结构<sup>[4]</sup>,进而增加土的渗透性,缓解淤堵,提高排水固结效果。近年来,针对VPM-FLO的试验研究,诸如VPM结合FeCl<sub>3</sub>对污泥的固结性能<sup>[5]</sup>、煅烧铝盐对软黏土固结的有效性<sup>[6]</sup>以及阴离子聚丙烯酰胺有机絮凝剂相比FeCl<sub>3</sub>等无机试剂对提高土体强度的有效性<sup>[7]</sup>,均表明该方法虽有助于提高排水通道的性能,但不能改善土体加固的均匀性。加之滩涂软土的渗透系数一般在10<sup>-7</sup> m/s左右,VPM-FLO针对低渗透性的软黏土的处理效果较差<sup>[8]</sup>。

Reuss于1807年发现土中的电渗现象,随后电渗法(electro-osmosis consolidation,简称EOC)被提出<sup>[9]</sup>,其作用下的土体渗透性不受土颗粒大小的限制,并且其影响深度大于其他单一的地基处理方法。吴辉等<sup>[10]</sup>针对不同含水率的高岭土进行了电渗试验,发现了电渗处理后的土体含水率分布更加均匀。Liu等<sup>[11]</sup>通过室内试验,得出了VPM-EOC对土体进行加固会使土体强度增加数倍的结论。王宁

伟等<sup>[12]</sup>针对软黏土进行了缩小电极距的试验,认为长时间的电渗效果并不是很突出。根据以上研究可以发现,EOC在一定作用时间内对促进水在低渗透性的细粒中流动有很大的帮助。

本文在已有的研究基础上,将FLO、VPM、EOC相结合,形成絮凝-真空-电渗(FLO-VPM-EOC)联合加固方法。文中首先选择3种有机絮凝剂,阴离子聚丙烯酰胺(anionic polyacrylamide,简称APAM)、阳离子聚丙烯酰胺(cationic polyamide,简称CPAM)及非离子聚丙烯酰胺(nonionic polyacrylamide,简称NPAM)进行沉降柱试验,根据泥水分离面的沉降量确定絮凝效果最佳的有机絮凝剂。然后,针对FLO-VEM-EOC联合方法,分别在48 h(介入真空预压,此时固结度为0)、60 h(排水速率明显下降,固结度为60%)及84 h(排水速率近乎0,固结度为80%)时介入电渗,对不同电渗介入时间开展对比研究。最后,以排水量,土体十字板剪切强度、含水率与孔压作为评价指标,确定电渗最佳介入时间,综合评价该方法的有效性。

## 2 试验用土

室内模型试验所用滩涂软土取自江苏盐城新阳港,取土平均深度为2 m左右。土体呈灰黑色,承载力几乎为0,含水率在35%~80%之间,分布极不均匀。因长时间的运输过程对土体产生扰动,采用重塑土进行室内土工试验。根据土工试验结果,判定该土属于有机质含量较高的粉质黏土,同时X-ray衍射结果表明土体主要矿物含量为石英,其中SiO<sub>2</sub>占比约60.71%,细粒含量高达87.93%(其中黏粒占12.76%,粉粒占75.17%),土体阳离子的交换能力较强。为减小试验误差,试验采用重塑土,将土中的杂质去除,然后进行烘干、搅碎、过筛处理,配成含水率为78%的重塑土,其基本参数如表1所示。土体的压缩系数 $a_{1-2} \geq 0.5 \text{ MPa}^{-1}$ ,初步判断土样为高压缩性土;渗透系数为 $2.76 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ ,可以判断土样为低渗透性土。结合表1可知,土体初始孔隙比 $e_0 = 0.74$ ,土体的固结系数 $C_v = 4.9 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。

本文使用密度计法对试验土样进行沉降分析,得到图1所示的颗粒级配曲线。由图可知,不均匀系数 $C_u = d_{60}/d_{10} = 7.70$ ,曲率系数 $C_c = d_{30}^2 / (d_{10} \times d_{60}) =$

表1 重塑土的物理性质

Table 1 Material properties of remolded soil samples

参数	含水率 $w/\%$	相对密度 $G_s$	渗透系数 $K/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	塑限 $w_p/\%$	液限 $w_L/\%$	初始孔隙比 $e_0$	初始压缩系数 $a_{1-2}/\text{MPa}^{-1}$	固结系数 $C_v/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
值	78	2.713	$2.76 \times 10^{-6}$	13.86	30.77	0.74	9.81	$4.9 \times 10^{-5}$

1.74，其中， $d_{10}$  称为有效粒径，对应小于某粒径的土粒质量占总土质量的 10% 的粒径； $d_{30}$  称为中值粒径，对应小于某粒径的土粒质量占总土质量的 30% 的粒径； $d_{60}$  称为限制粒径，对应小于某粒径的土粒质量占总土质量的 60% 的粒径。依据《软土地区岩土工程勘察规程》(JGJ 83—2011) [13]，当  $C_u \geq 5$ ， $C_c = 1 \sim 3$  时，土的级配良好，为不均匀土。因为该试验土样中，粒径大于 0.075 mm 的颗粒质量不超过总质量的 50%，同时， $10 \leq I_p \leq 17$  ( $I_p$  为塑性指数)， $C_u = 7.70$ ， $C_c = 1.74$ ，故该土为级配良好的不均匀粉质黏土。

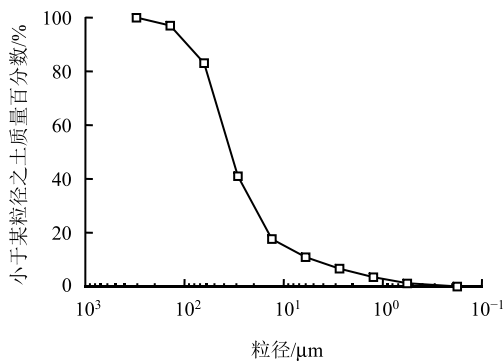


图 1 试验土样的级配曲线  
Fig.1 Gradation curve of soil sample

### 3 沉降柱试验

沉降柱试验是将一定量配置好的絮凝剂溶液加入到装有重塑土的量筒中，进行搅拌使二者充分混合，然后静置让其自然沉淀，以沉降量作为评价指标的试验方法 [14]。试验所用仪器包括：500 mL 量筒、50 mL 烧杯、磁力搅拌器、20 mL 移液管及玻璃棒。本试验目的是将 APAM、CPAM、NPAM 三种絮凝剂分别记为 S1、S2 和 S3，在相同絮凝剂浓度（均采用 0.1% 浓度）与掺量比（掺量比是指絮凝剂质量与土的质量比，本文采用 1.25%）的情况下确定最佳絮凝剂，为絮凝-真空-电渗联合加固试验提供依据。

沉降柱试验如图 2 所示，其具体步骤如下：

- ① 将质量均为 7.5 g 的 3 种絮凝剂采用磁力搅拌器以 200 r/min 的速率搅拌 40 min，配置出 0.1% 浓度的 APAM、CPAM 以及 NPAM 溶液 [15]；
- ② 将 3 种溶液分别与 600 g 重塑土在量筒中搅拌均匀；
- ③ 每组试验静置 6 h，静置过程中，每 5 min 记录一次泥水分离面高度（经测量，量筒变化 1 mL 对应高度变化 0.5 mm），绘制出泥水分离面沉降量随时间的变化

曲线如图 3 所示。由图可知，沉降曲线大致分为两个阶段：快速下降阶段与稳定阶段。快速下降阶段主要以细颗粒絮凝沉降为主，且絮凝成团后近似匀速下沉，沉降速率符合 Stocke 定律，即沉降速率与粒团直径的平方成正比。在快速下降阶段，S1 的沉降速率最快，S2 次之，S3 最小。但在稳定阶段中，因为孔压的消散，土的固体颗粒形成较为稳定的结构，导致沉降量增幅急剧减小。稳定阶段中，S2 的沉降速率较快，沉降量较 S1、S3 分别高出约 7.4%，6.7%，故本试验选取泥水分离面沉降量最大且沉降速率较快的 CPAM 溶液。

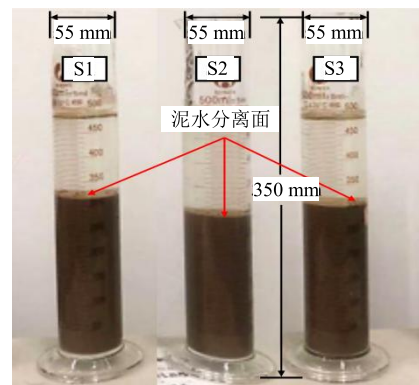


图 2 沉降柱试验  
Fig.2 Column settling tests

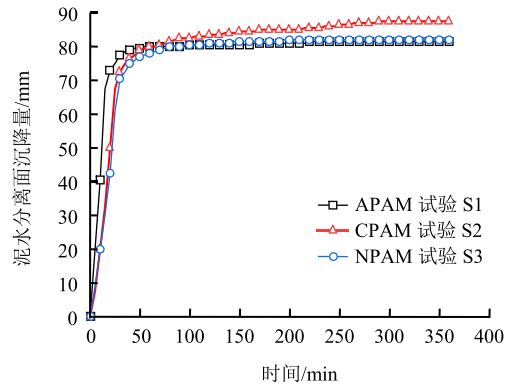


图 3 泥水分离面的沉降量随时间的变化规律  
Fig.3 Variation of settlement of mud-water separation with time

### 4 絮凝-真空-电渗联合加固试验

#### 4.1 仪器与方案

絮凝-真空-电渗联合加固试验装置由模型箱、真空预压系统、电渗排水系统与监测系统 4 部分组成，如图 4 所示。模型箱采用厚度为 20 mm 的有机玻璃制成，直径为 500 mm、高度为 540 mm。真空预压系统包括真空泵（0~98 kPa）、饱和缸、天平（0~100 kg）、真空表、土工布、聚乙烯膜、自制

手工接头、PVD等。其中,饱和缸、天平用来记录并监测土体排水量。聚乙烯膜和土工布用来密封土体。PVD插在土体中心位置,作为排水通道。自制手工接头通过改善与真空管、PVD的连接方式,减小真空压力在传递过程中的损耗。电渗排水系统包括自制阳极、阴极、直流电源、导线。其中,自

制阳极由6根呈梅花形布置的铁棒与3个铁环焊接组成。阴极与PVD绑扎为一体,插在土体中心。试验过程中,通过布设孔压计(-100~100 kPa),实时监测土体的孔压变化。试验结束后,采用微型十字板剪切仪、微型贯入仪等测量试验土体的抗剪强度与承载力。

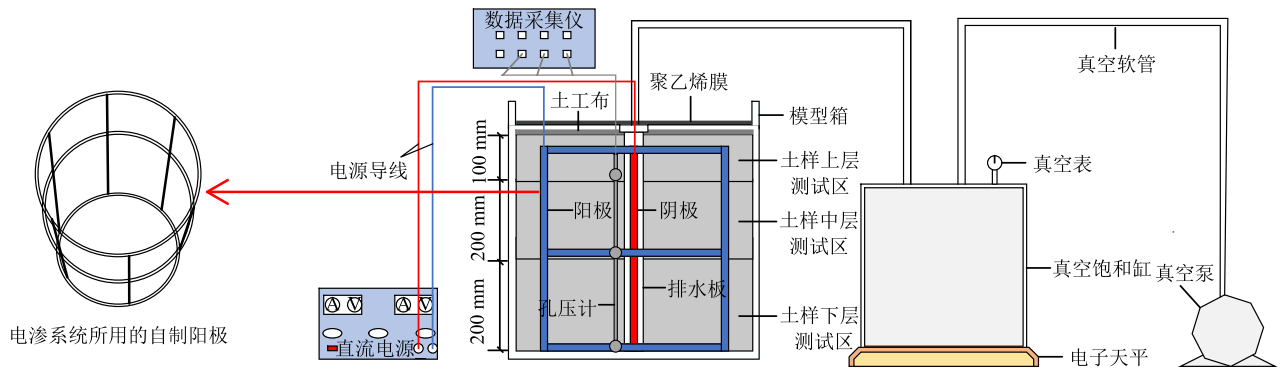


图4 电渗-絮凝-真空预压联合加固试验装置图

Fig.4 Experimental apparatus for flocculation-vacuum preloading-electroosmosis

Wang等<sup>[16]</sup>针对真空-电渗联合加固,研究不同电渗介入时间对疏浚泥浆固结性能的影响。结果表明,电渗介入后,电流呈先增大后减小的变化趋势,过早介入电渗,会导致高电流的产生而后会迅速下降。反之,虽然结束时电流很大,但因PVD严重堵塞致使孔隙水无法正常排出,故合理的电渗介入时间尤为重要。本文依据平均固结度,而不是具体时间点来确定电渗介入时间,是因为后期排水量的监测是区间值,不能准确地确定排水速率明显下降与排水速率近乎0的时刻,会对试验结果产生误差。假设固结度自絮凝静置48 h后起算,选取介入真空预压(固结度为0,记为T1)、排水速率明显下降(固结度为60%,记为T2)及排水速率近乎0(固结度为80%,记为T3)3个时间点介入电渗。在FLO-VEM-EOC联合加固试验前开展絮凝-真空预压试验。预试验中,絮凝时间为48 h,真空预压时间为52 h,且真空度为85 kPa。通过絮凝-真空联合处理的滩涂软土的最终沉降量 $S_{\infty}$ 约为9.80 cm。记 $S_t$ 为瞬时沉降量,依据平均固结度 $U_t = S_t / S_{\infty}$ <sup>[16]</sup>,分别得到固结度为0、60%、80%对应的沉降量分别为0、5.88、7.84 cm,且对应时间为48、60、84 h。根据排水量、十字板剪切强度、含水率以及孔压4个指标对土体的加固效果进行评价,确定合适的电渗介入时间,各组试验的设计方案如表2所示。

针对孔隙水压力监测位置的问题,Peng等<sup>[17]</sup>通过电渗-真空加固软土的室内试验发现,在真空预压初始阶段,PVD附近测点的孔压消散最快,但

真空预压后期,各测点的孔压趋于相近。故本文选取距离PVD所在截面30 mm处埋置孔压计,并在竖直方向分土体上层(距离土表面100 mm)、中层(距离土表面300 mm)、下层(距离土表面500 mm)进行监测,具体布设位置与测点分布如图4与图5所示。同时,试验结束后按上述垂直高度测定十字板剪切强度和含水率,每层的测点位置分布如图5所示。

表2 不同电渗介入时间的室内模型试验方案  
Table 2 Laboratory test schemes of different electroosmosis intervention time

试验编号	0.1%浓度的CPAM掺量比/%	絮凝剂添加后的静置时间/h	真空度/kPa	真空介入时间/h	电渗介入时间(固结度)/%	电势梯度V/cm
T1	1.25	48	85	48	0	1.0
T2	1.25	48	85	48	60	1.0
T3	1.25	48	85	48	80	1.0

## 4.2 试验结果与分析

### 4.2.1 排水量

在絮凝阶段(0~48 h),T1、T2、T3的平均排水速率可达677 mL/h。对于渗透性低、含水率较高的土,絮凝剂能够更好地使土颗粒聚集,加快固体颗粒的聚沉,达到固液分离的目的,从而使土体析出更多的水。CPAM中的亲水基团与土体细颗粒通过水分子吸附絮凝成团,使土颗粒间的距离不断增大,土体的渗透系数增加,具有较好的“主动防淤堵”作用<sup>[18]</sup>。另外,CPAM的加入使阳离子的浓度

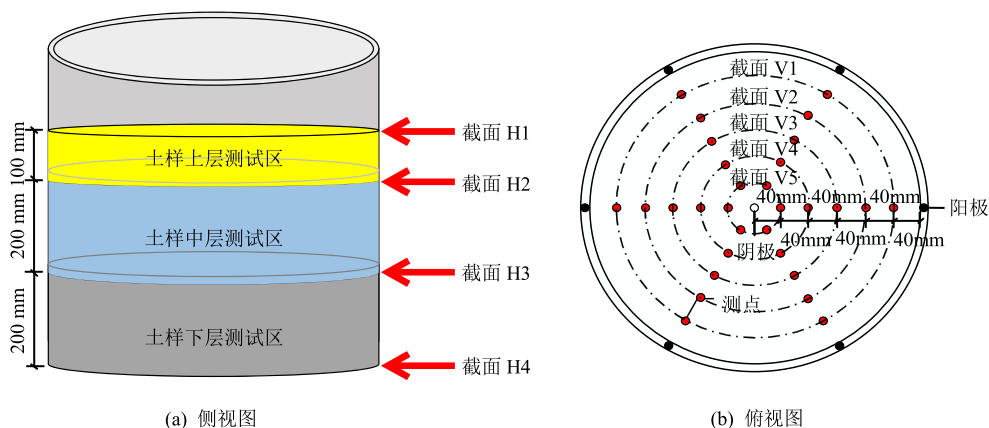


图 5 测点分布图  
Fig.5 Layout of measuring points

显著提升，土颗粒周围的扩散层厚度变薄，增大了土体的透水性，促进试验土体的排水。

在纯真空预压阶段（48~60 h），因真空度损失较小，在真空压力作用下，3 组试验的排水量均表现出急剧上升的趋势。试验过程中，T1 在真空预压初始介入电渗，此时土的含水率较高，土体与电极间的电阻较小，故在电渗-真空预压联合作用下，T1 的排水速率较 T2、T3 略高，且在 60 h 时 T1 的排水量相较 T2、T3 分别高出约 9.7%、9.9%。在 T2、T3 电渗-真空组合作用阶段（60~120 h），排水量因电渗的介入时间不同而呈现出阶梯型上升的趋势。同时，由于先期真空压力的作用，T2、T3 的电极-土体间的接触更好，电渗效率更高，其有效排水时间和排水量均得到有效提升。

3 组试验的排水量随时间的变化曲线如图 6 所示。由图可知，T2、T3 介入电渗后，两者的排水量均出现陡升现象。T3 在固结度为 80%时介入电渗，有利于抑制土体排水速率减小的趋势，促进排水量的提升，相较于 T1、T2，其排水量分别提高 9.2%、3.8%。试验所用模型箱体积约为 106 L，观察图 6 可知，T3 最终排水量可达 53.0 L。试验用土的含水率为 78%，理论上排出的自由水体积约为 46.5 L。最终排水量大于 46.5 L 的原因主要有以下两点：首先，本文采用 FLO-VPM-EOC 联合加固法，电渗法不仅能够排出土中的自由水，还会促使土中部分弱结合水的排出；其次，真空负压较大，造成排水板等排水通道可通过一定粒径的土颗粒，导致部分土颗粒进入集水装置，使排水测量装置的读数偏大。由于饱和缸密闭不可观察内部排水情况，故针对排水量的定量分析仍待进一步探讨。

综上所述，在真空预压初始介入电渗的总排水量最低且有效排水时间最短，而在固结度达 80%时

介入电渗，排水量最多，且有效排水时间最长。根据有效应力原理，T3 的孔压降幅最大，有效应力得到有效提升，故其加固效果在一定程度上优于 T1 与 T2。

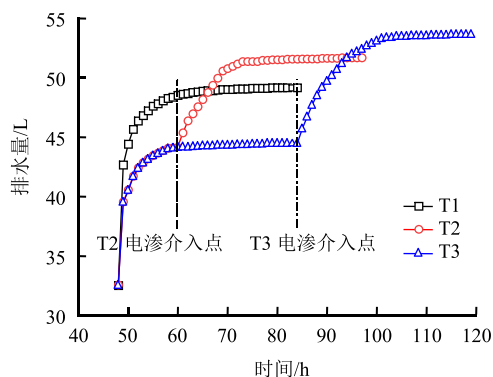


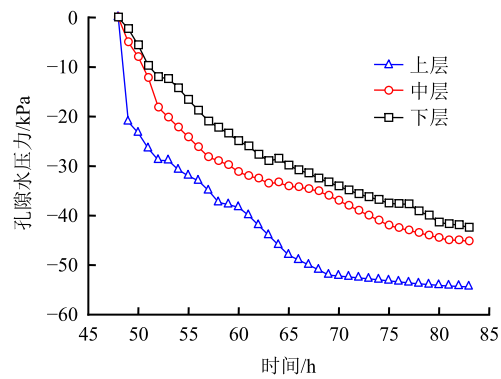
图 6 排水量随时间的变化曲线  
Fig.6 Water discharge-time curves

#### 4.2.2 孔隙水压力

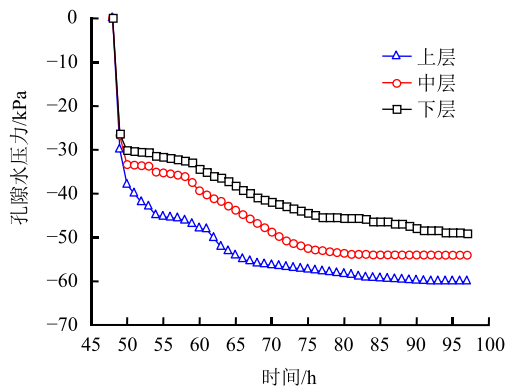
试验过程中，通过在试验土体的不同位置处布设孔压计，用以监测孔压变化，孔压计的布设位置如图 4 所示，3 组试验的孔压随时间的变化曲线如图 7 所示。3 组试验的孔压均呈现出先迅速下降，后趋于稳定的变化趋势。对比 3 组试验的孔压可知，距离土表越近，土体的孔压降幅越快。因为真空荷载的施加，土体与外界产生压力差，土中水在压力差的作用下，通过 PVD 排出土体，故孔压不断减小，形成负超静孔压，土体的有效应力增加。但所施加的真空荷载是从土表传递至土底，在传递过程中会出现一定损耗，且深度越大，荷载值的损失越多，故 3 组试验均表现出土表的孔压消散最快。

根据图 7(a)所示，T1 的孔压消散速率呈逐渐降低的趋势，最终趋于稳定。T1 在真空预压初始介入

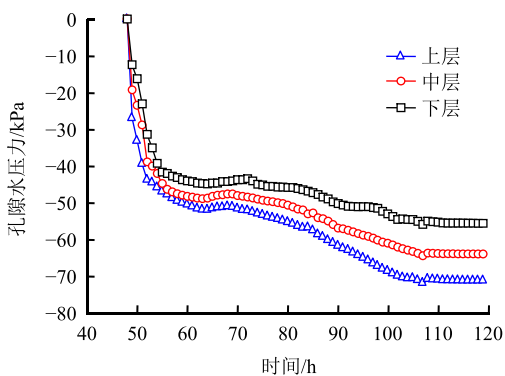




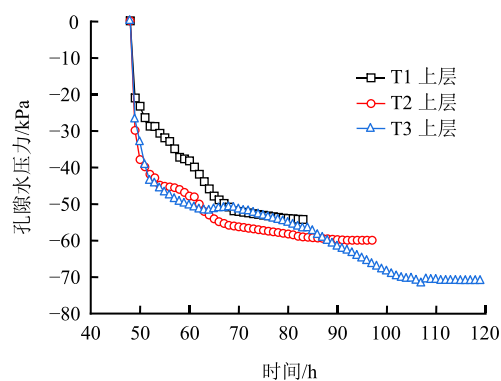
(a) T1 孔压随时间的变化曲线



(b) T2 孔压随时间的变化曲线



(c) T3 孔压随时间的变化曲线



(d) T1、T2、T3 上层孔压随时间的变化曲线

图7 孔压随时间变化曲线

Fig.7 Pore water pressure-time curves

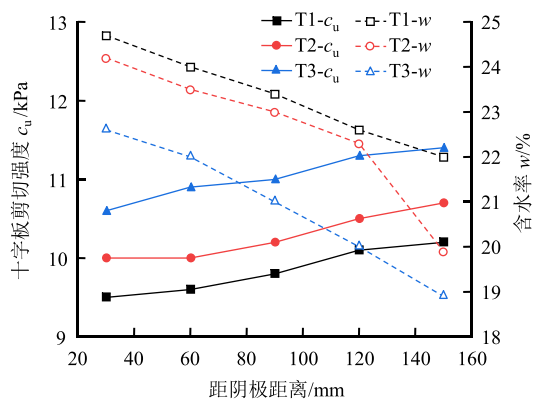
电渗,此时含水率高,电极腐蚀较 T2、T3 严重。过早的介入电渗,易造成电渗排水效率随时间的推移而逐渐降低,加之真空度的逐渐损失,孔压逐渐降低并趋于稳定,且 T1 上层孔压消散速率大于中层与下层。因电渗对土层加固相对均匀,而真空预压对土体的加固效果随着深度的增长逐步降低,故表层土体的孔压消散更快。而图 7(b)、7(c)中, T2 与 T3 上层的孔压消散速率在起始阶段只表现出微小的优势,可见单一的 VPM 相比 EOC-VPM 在排水固结效率方面略低。由图 7(b)、7(c)可知, T2、T3 的孔压在电渗介入后得到进一步消散,土体的有效应力得到进一步提高。T2 与 T3 介入电渗时,结合图 6 可知,土体的排水趋于稳定,表明此时采用单纯的真空预压,排水相对较慢,故此时电渗的介入能够有效地增加土体排水量,进一步降低孔隙水压力。为探讨在同一深度内的孔压变化规律,本文选取较有代表性的土体上层测试区的孔压随时间的变化曲线,如图 7(d)所示。由图可知,在同一深度, T2、T3 相对 T1,孔压消散更加均匀。3 组试验上层的平均孔压分别为-34.1、-46.4、-52.3 kPa, T3 的孔压消散值较 T1、T2 提高约 34.8%、11.3%。

为进一步评价 T1~T3 的固结效果,本文引入  $DOC = (1 - \Delta u_f / P_{vac}) \times 100\%$  计算土体的固结度 (degree of consolidation, 简称 DOC) [19], 同时验证该公式对 FLO-VPM-EOC 联合加固法的适用性, 其中  $\Delta u_f$  为试验结束后的孔隙水压力值,  $P_{vac}$  为土中相应的真空压力。通过计算得到 3 组的固结度分别为 60.0%、70.7%、89.8%。根据试验结果, 3 组试验中, T3 的孔压消散最多, 土体的固结度最高。根据理论计算结果与试验结果, 均表明 T3 的固结效果最好, 也验证了该公式对 FLO-VPM-EOC 联合加固法的适用性。

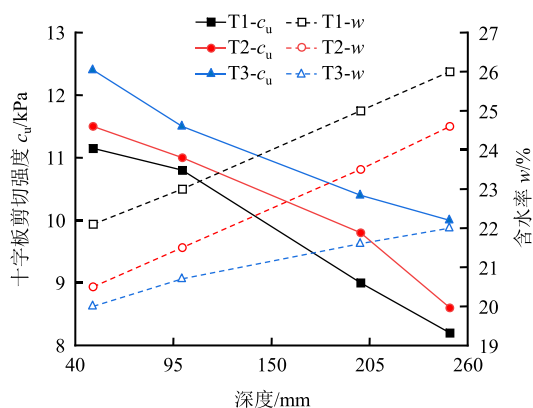
#### 4.2.3 十字板剪切强度 $c_u$ 与含水率 $w$

试验结束后,用微型十字板剪切仪,按图 5 所示测点位置得到土样的十字板剪切强度。将 3 层土样测试区中, V1、V2、V3、V4、V5 共 5 个纵截面测点的抗剪强度与含水率分别取均值,得到抗剪强度与含水率沿水平方向的分布规律如图 8(a)所示。由图可知,阳极附近土体的抗剪强度最大,且呈现出向阴极逐渐减小的趋势。T1、T2、T3 的十字板剪切强度平均值分别为 9.84、10.28、11.04 kPa, T3 相较 T1、T2 分别高出约 12.2%、7.4%。根据电渗作用机制,土中的孔隙水在直流电的作用下,自阳极流向阴极,致使土体的最终含水率分布呈现出从阴极到阳极逐渐减小的分布规律。从图 8(a)可知,

T3 的土体含水率降幅最为明显，相较 T1、T2，其含水率降低约 6.7%、13.4%。



(a) 十字板剪切强度与含水率沿水平方向的变化曲线



(b) 十字板剪切强度与含水率沿深度方向的变化曲线

图 8 试验后土体的十字板剪切强度与含水率变化曲线  
Fig.8 Curves of vane shear strength and water content after tests

试验结束后，将试验土样划分为 3 层，形成 H1、H2、H3、H4 共 4 截面测试区。按图 5 所示测点位置，取横截面 H1、H2、H3、H4 各测点的抗剪强度与含水率平均值，得到抗剪强度与含水率沿深度方向的分布规律如图 8(b)所示。由图可知，十字板剪切强度随深度的增加而逐步降低，含水率随深度的增加逐步提高。电渗过程中，电渗的排水方向为水平方向，且自阳极流至阴极附近的排水板。在真空压力作用下，土体的排水方式为竖向排水，但因真空度随深度的增加而逐渐降低<sup>[20]</sup>，导致土体表面的真空度最大，故表现出土体表面的加固效果最好。3 组试验的抗剪强度平均值分别为 9.79、10.23、11.08 kPa，T3 较 T1 和 T2 分别高出 13.2%与 8.3%。同时，T3 的含水率相较 T1、T2 分别低约 10.5%、7.4%。此外，根据对 3 组试验沿深度方向的十字板剪切强度的统计发现，剪切强度在竖直方向的最大差值分别为 2.95、2.90、2.40 kPa，T3 在加固均匀

性方面，效果较好。

根据十字板剪切强度，土体的承载力  $F_a$  可以利用  $F_a = (\pi+2)c_u$  进行估算<sup>[21]</sup>， $c_u$  为土体的十字板剪切强度。取水平与深度方向上的最小十字板剪切强度代入计算可得，3 组试验的最小土体承载力分别为 50.34、52.60、56.71 kPa，T3 较 T1、T2 分别提高约 12.65%、7.81%。故当土体固结度达 80%时介入电渗，土体固结效果较好，且加固后土体的承载力最高。

### 5 结 论

通过沉降柱试验确定适用于试验所用滩涂软土的有机絮凝剂，针对不同电渗介入时间，采用 CPAM 絮凝剂对滩涂软土进行 FLO-VEM-EOC 联合加固室内试验，根据试验分析结果，最终得出以下结论：

(1) 真空预压的作用使电极与土体之间的接触更加紧密，有效提升了电渗效率。FLO-VEM-EOC 因絮凝剂 CPAM 的主动防淤堵作用，在一定程度上提高了土体的渗透性，并且沉降速率符合 Stocke 定律，说明 FLO-VEM-EOC 具有一定的优越性。

(2) 土体固结度达到 80%时介入电渗，能够有效地抑制排水速率减小的趋势，增长土体的有效排水时间，进一步降低孔压，使孔压消散更加均匀。最终 T3 的排水量相较 T1、T2 分别高出约 9.2%、3.8%，且 T3 的孔压消散较 T1、T2 分别提高约 34.8%、11.3%。

(3) 在 FLO-VEM-EOC 联合加固后，T3 的含水率降幅最高，抗剪强度与承载力提升最大，且加固后的土体均匀性更好。同时，水平方向呈现出含水率自阴极至阳极逐步降低，抗剪强度自阴极至阳极逐步提高的趋势。竖直方向呈现出含水率沿深度方向逐步升高，承载力沿深度方向逐步降低的变化趋势。

### 参 考 文 献

[1] KJELLMAN W. Consolidation of clayey soils by atmospheric pressure[C]//Proceedings Conference on Soil Stabilization. Boston: MIT (Massachusetts Institute of Technology) Press, 1952: 258-263.  
[2] 王东星, 唐弈锴, 伍林峰. 疏浚淤泥化学絮凝-真空预压深度脱水效果评价[J]. 岩土力学, 2020, 41(12): 3929-3938.  
WANG Dong-xing, TANG Yi-kai, WU Lin-feng. Evaluation of deep dewatering effect of dredged sludge by chemical flocculation vacuum preloading[J]. *Rock and Soil Mechanics*,

- 2020, 41(12): 3929-3938.
- [3] ZHANG L, PAN Z J, WANG B H, et al. Experimental investigation on electro-osmotic treatment combined with vacuum preloading for marine clay[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2021, 49(6): 1495-1505.
- [4] WU Y J, KONG G Q, LU Y T, et al. Experimental study on vacuum preloading with flocculation for solid-liquid separation in waste slurry[J]. **Geomechanics and Engineering**, 2017, 13(2): 319-331.
- [5] LIN W, ZHAN X, ZHAN T L, et al. Effect of  $\text{FeCl}_3$ -conditioning on consolidation property of sewage sludge and vacuum preloading test with integrated PVDs at the Changan landfill, China[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2014, 42(3): 181-190.
- [6] ZHEN G, YAN X, ZHOU H, et al. Effects of calcined aluminum salts on the advanced dewatering and solidification/stabilization of sewage sludge[J]. **Journal of Environmental Sciences**, 2011, 23(7): 1225-1232.
- [7] WANG J, ZHAO R, CAI Y, et al. Vacuum preloading and electro-osmosis consolidation of dredged slurry pre-treated with flocculants[J]. **Engineering Geology**, 2018, 246: 123-130.
- [8] 孙宏磊, 陆逸, 潘晓东, 等. 真空预压作用下初始含水率对疏浚淤泥固结影响研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(11): 3029-3040.
- SUN Hong-lei, LU Yi, PAN Xiao-dong, et al. Study on the effect of initial water content on the consolidation of dredged sludge under vacuum preloading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(11): 3029-3040.
- [9] SADEGHI M, SADEGHI A. Electroosmotic flow in hydrophobic microchannels of general cross section[J]. **Journal of Fluids Engineering**, 2015, 138(3): 031104.
- [10] 吴辉, 胡黎明. 真空预压与电渗固结联合加固技术的理论模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(2): 182-185.
- WU Hui, HU Li-ming. Analytical models of the coupling of vacuum preloading and electro-osmosis consolidation for ground stabilization[J]. **Journal of Tsinghua University (Science and Technology)**, 2012, 52(2): 182-185.
- [11] LIU F Y, LI Z, YUAN G H, et al. Improvement of dredger fill by stepped vacuum preloading combined with stepped voltage electro-osmosis[J]. **Marine Georesources & Geotechnology**, 2021, 39(7): 822-831.
- [12] 王宁伟, 矫军, 修彦吉, 等. 电极距对水平电渗排水影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊 1): 177-181.
- WANG Ning-wei, JIAO Jun, XIU Yan-ji, et al. Effect of electrode spacing on standard electro-osmotic dewatering[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(Suppl.1): 177-181.
- [13] 中国建筑科学研究院. JGJ 83—2011 软土地区岩土工程勘察规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- China Academy of Building Research. JGJ 83—2011 Specification for geotechnical investigation in soft clay area[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [14] 蒲诃夫, 潘友富, KHOTEJA Dibangar, 等. 絮凝-水平真空两段式脱水法处理高含水率疏浚淤泥模型试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(5): 1502-1509.
- PU He-fu, PAN You-fu, KHOTEJA Dibangar, et al. Study on two-stage sludge dewatering and flocculation model with high water content[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(5): 1502-1509.
- [15] HU J L, LI X B, ZHANG D K, et al. Experimental study on the effect of additives on drainage consolidation in vacuum preloading combined with electroosmosis[J]. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 2020, 24(9): 2599-2609.
- [16] WANG J, FU H, LIU F, et al. Influence of electro-osmosis activation time on vacuum electro-osmosis consolidation of a dredged slurry[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2018, 55(1): 147-153.
- [17] PENG J, XIONG X, MAHFOUZ A H, et al. Vacuum preloading combined electroosmotic strengthening of ultra-soft soil[J]. **Journal of Central South University**, 2013, 20(11): 3282-3295.
- [18] 武亚军, 陆逸天, 骆嘉成, 等. 药剂真空预压法在工程废浆处理中的防淤堵作用[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(3): 525-533.
- WU Ya-jun, LU Yi-tian, LUO Jia-cheng, et al. Effect of chemical vacuum preloading method on anti-silting of waste pulp treatment[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 39(3): 525-533.
- [19] SKINNER A E. Discussion: vacuum preloading consolidation of Yaoqiang airport runway; soil improvement by the vacuum preloading method for an oil storage station: consolidation of a very soft clay with vertical drains[J]. **Géotechnique**, 2002, 52(2): 148-154.
- [20] BHOSLE S, DESHMUKH V. Experimental studies on soft marine clay under combined vacuum and surcharge preloading with PVD[J]. **International Journal of Geotechnical Engineering**, 2021, 15(4): 461-470.
- [21] YAN S W, CHU J. Soil improvement for a road using the vacuum preloading method[J]. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement**, 2003, 7(4): 165-172.