

真空联合电渗加固超细颗粒疏浚土试验研究

王兵^{1,2}, 胡小波³, 孔楠楠^{1,2}

(1. 安徽省(水利部淮河水利委员会)水利科学研究院, 安徽 合肥 233040;
2. 安徽省水科学与智慧水利重点实验室, 安徽 合肥 233040; 3. 中交上海三航科学研究院, 上海 200032)

摘要: 真空预压作为一种常见的处理高含水率饱和软土的地基加固方式, 在大面积围海造陆工程中应用广泛。但是在许多真空预压加固饱和软土的工程案例中存在加固后地基承载力偏低, 尤其是深层土体强度提高幅度有限的情况。大量研究表明, 真空预压的加固效果受限于两个核心因素: 真空度随深度的衰减效应以及细颗粒在排水板附近的富集对水流路径的阻塞作用。针对上述问题, 依托乐清湾北港区吹填工程, 提出在真空预压加固后期, 采用电渗联合真空预压(electro-osmosis with vacuum preloading, 简称 EVP) 进行短期加固以研究土体强度增长规律。试验通过采用大尺寸模型试验池的方式, 先按正常的真空预压步骤抽气 108 d, 待沉降曲线稳定后, 开启电渗联合真空预压加固。该阶段分为两个小的阶段, 第 1 阶段持续 11 d, 然后对阴阳极进行互换开启第 2 阶段电渗联合真空预压试验, 第 2 阶段持续 6.5 d, 共进行 17.5 d 电渗联合真空预压加固。经电渗联合真空预压加固后, 20、60、100 cm 3 个深度的土体含水率分别降低 4.2%、4.84%、2.34%, 十字板强度分别提高 32%、75%、61.1%。试验结果表明: 真空预压后期通过叠加电渗法, 可在含水率降幅小于 5% 的情况下, 实现十字板强度较大幅度的提升, 特别是对于原先强度较低, 单纯真空预压法加固困难的深层土体, 强度提升了 61%~75%, 具有较好的加固效果。

关键词: 超细颗粒疏浚土; 高含水率; 真空预压; 电渗; 模型试验

中图分类号: TU 472.32

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2025)11-3523-12

Experimental study on vacuum combined with electro-osmosis for reinforcing ultrafine particle dredged soil

WANG Bing^{1,2}, HU Xiao-bo³, KONG Nan-nan^{1,2}

(1. Anhui Provincial (Huaihe River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources) Water Resources Science Research Institute, Hefei, Anhui 233040, China; 2. Anhui Provincial Key Laboratory of Water Science and Intelligent Water Conservancy, Hefei, Anhui 233040, China; 3. CCCC Third Harbor Scientific Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: Vacuum preloading, as a widely adopted ground improvement method for saturated soft soils with high water content, is extensively applied in large-scale coastal reclamation projects. However, post-reinforcement bearing capacity remains insufficient in many engineering cases, particularly with limited strength improvement in deep soil layers. Numerous studies have demonstrated that the consolidation efficiency of vacuum preloading is constrained by two critical factors: depth-dependent attenuation of vacuum pressure and fine particle enrichment-induced clogging of drainage paths near prefabricated vertical drains. To address these challenges, this study integrates electro-osmosis with vacuum preloading (EVP) during the later stage of vacuum preloading in the dredger fill project of Yueqing Bay North Port Area. A large-scale model test pool was employed, where conventional vacuum preloading was conducted for 108 days until settlement stabilization, followed by a two-phase EVP intervention. The first phase lasted 11 days, after which electrode polarity was reversed for the second phase (6.5 days), totaling 17.5 days of EVP reinforcement. Post-EVP results revealed significant improvements: at depths of 20 cm, 60 cm, and 100 cm, soil water content decreased by 4.2%, 4.84%, and 2.34%, respectively, while vane shear strength increased by 32%, 75%, and 61.1%. The test results indicate that superimposing the electro-osmosis method during the later stage of vacuum preloading can achieve a significant improvement in vane shear strength (with a water content reduction of less than 5%). Particularly for deep soil layers with low initial strength that are difficult to reinforce solely by vacuum preloading, the strength increased by 61%–75%, demonstrating effective reinforcement

收稿日期: 2025-01-23

录用日期: 2025-05-08

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2024YFC3212400); 安徽省自然科学基金“水科学”联合基金项目 (No. 208085US0)。

This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2024YFC3212400) and Anhui Provincial Natural Science Foundation Joint Fund Project for Water Science(208085US0).

第一作者简介: 王兵, 男, 1985年生, 硕士, 工程师, 主要从事水利及水运工程质量检测、安全评估与科研工作。E-mail: 532105892@qq.com

通讯作者: 胡小波, 男, 1984年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事近海工程地基处理、海岸稳定性等研究。E-mail: 280810042@qq.com

performance.

Keywords: ultra-fine-grained dredged soil; high water content; vacuum preloading; electro-osmosis; model test

1 引言

真空预压法作为一种常见的疏浚土地基加固方法,具有较高的效费比,然而,由于抽真空过程中细颗粒向塑料排水板不断富集,在抽真空的后期,塑料排水板的淤堵效应越发明显^[1],不仅导致后期出水越来越困难,同时也造成加固效果的下降和抽真空电费的上升。对于超细颗粒疏浚土地基,以往诸多工程案例的检测表明,经真空预压处理后,其深层的含水率仍然较高,十字板强度仍然较低,有时甚至很难达到验收标准,这给地基加固的质量和后续的地基使用带来了困难^[2-3]。本文提出在抽真空的后期,当真空预压的加固效能逐渐降低,沉降基本收敛后,探索采用电渗联合真空预压法以进一步降低其含水率,改善加固效果,通过短期的电渗联合真空预压法,进一步提高地基强度。在电渗加固软土方面,近年来多位学者已开展相关研究和应用^[4-16],高志义等^[6]较早开展室内模型试验研究,发现真空联合电渗法较单独的真空预压加固法可使土体强度提高数倍,加固效果十分明显。王军等^[7-9]采用间歇式真空预压联合电渗的方法,有效解决了持续抽真空后期效果不好且耗能较多的困扰,降低土体流变性、增强稳定性。卢雪清等^[10]研究发现:联合电渗法可以有效提升水平向排水结构和竖向排水结构真空预压法后期排水效率,提高远端土体固结程度,且采用间歇断开式联合电渗法处理工程废浆,可以明显提升土体整体强度和均匀性。张雷^[11]、潘卓杰^[12]等通过添加絮凝剂的方式模拟悬浮状疏浚土的沉淀过程,认为在固结度达到80%时介入电渗可以达到较好的加固效果。然而该研究跟实际的前期抽真空情形还存在着差异,不能完全真实地反映实际工程中抽真空后期塑料排水板淤堵的情形。周凤玺等^[13]研究建立了非饱和土体在电渗-真空作用下电场-孔压场-位移场相互耦合的数学模型,分析总结了排水固结规律,并结合室内模型试验验证应用效果。李水江等^[14]研究发现对于疏浚淤泥地基,真空预压联合逐级动力压实和电渗法的处理加固效果更显著,探究了动力压实的最佳启动时间。孙召花等^[15-16]研究发现:真空预压与电渗异步加固时效果更佳,研究成果应用于温州某围海造地吹填土地基现场。本文依托乐清湾疏浚土加固工程,在项目附近设计了一个试验池,前期进行真空预压试验,真空预压达到卸载标准后进行土体物理和力学指标的检测,

完成检测后,在试验池安装电渗试验用的电极,并分阶段进行电渗-真空预压联合加固试验。相比内陆地区软土地基加固,由于海水中含钠、镁、钙、钾、锶等阳离子,其中钠离子含量约占海水的35%,对于提高电渗性能应该有积极的作用。Burnnotte^[17]、Ou^[18]等学者通过研究发现,在电极或者土体里注入含盐的化学溶液后能明显改善电渗性能。

2 总体试验方案

2.1 试验土样

本次试验所用的吹填土来自乐清湾港区航道处,属海相静水流或缓慢水流环境沉积的淤泥土,具有高孔隙率、高含水率、高灵敏度、高触变性、低抗剪强度及排水固结缓慢等特性,工程性质极差。从工程场地采取土样,进行室内颗粒分析试验,试验采用比重瓶法进行,获得本试验用的疏浚土颗粒分布,如图1所示。

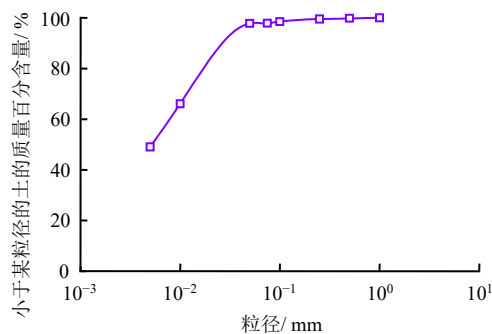


图1 疏浚土颗粒分布图

Fig.1 Particle size distribution of dredged soil

根据图1可知,该疏浚土粒径小于75 μm的细颗粒含量达97.86%,粒径小于5 μm的黏粒含量达49.04%。根据文献资料统计,我国各海域黏粒分布范围如表1所示。

据表1可知,本工程所用的疏浚土黏粒含量明显大于我国四大海域典型的几条航道中疏浚土的黏粒含量。从微观角度看,相对于较粗的颗粒,黏粒具有较大的比表面积,较强的黏聚力,这种特性导致疏浚土在宏观上表现出更低的渗透系数,排水固结的效果较差,土体的力学指标较差。在工程场地选取2份土试样,采用HX041型X射线衍射仪,在温度为25℃、湿度为42%的环境下进行矿物成分检测,分析结果见表2。

据表 2 可知，该疏浚土中亲水性强的矿物主要为蒙脱石，含量在 15%~25%之间，其层间结合力弱，完全可交换阳离子（如 Na^+ 、 Ca^{2+} ），易吸附水分子进入层间并导致膨胀。伊利石属于较强亲水性矿物，其表面水云母表面因含有羟基（-OH）和层间阳离子（如 K^+ 、 Na^+ ），易与水分子结合，表现出较强的亲水性，伊利石含量在 20%~40%之间。这两种矿物累积含量在 35%~65%之间，因此本地区疏浚土具有很强的亲水性。

根据室内土工试验的结果，本工程①层、②层淤泥液限分别为 45.0%、52.1%，塑限为 26.0%、29.1%，对应的塑性指数分别为 19.0、22.9。据表 3 可知，其天然含水率均超过其液限，疏浚前，原状土的液限指数分别为 2.12、1.97，均为流塑状态，其天然孔隙比均大于 1.5，表现出较差的物理和力学特性。

表 1 我国各海域典型航道疏浚土粒径分布对比
Table 1 Comparison of particle size distributions in dredged soils from typical navigation channels across China's sea regions

海域	典型航道	主要粒径类型	黏粒占比范围/%	工程特性
渤海湾	唐山港、天津港	粉砂、淤泥	15~30	低渗透性
黄海	青岛港、连云港港	粉砂、细砂	10~20	中等固结，易受冲刷
东海	上海港、宁波舟山港	粉砂、粗粉砂	5~15	高流动性
南海	广州港、深圳港	砂、粉砂混合	10~25	抗剪强度低，易液化

表 2 矿物组成百分数
Table 2 Mineral composition percentage

试样编号	质量百分比/%				
	石英	蒙脱石	伊利石	绿泥石	方解石
试样 1	10~15	15~25	20~30	30~35	<5
试样 2	10~15	15~25	35~40	25~30	<5

表 3 航道原状土物理力学指标
Table 3 Physical and mechanical properties of undisturbed soil in navigation channel

岩土名称	含水率 / %	天然重度 / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	孔隙比 e_0	土体相对密度	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / ($^\circ$)
①层 淤泥	66.3	16.21	1.824	2.75	6.1	4.7
②层 淤泥	74.0	15.61	2.076	2.76	7.4	3.4

2.2 试验设计

本次室内试验前，在现场大面积吹填区域设置了 4 个 100 m×30 m 的现场试验区，对不同的塑料排水板插设间距、不同的真空梯度加载方式、不同

的塑料排水板型号进行了对比试验。试验采用正交法设计以减少对比组数量。以 A 区为例，其塑料排水板采用了 B 型板，插板深度约为 5.0 m，塑料排水板间距为 80 cm，经过长达 136 d 的真空预压后（中间因台风停泵实际抽真空时间约为 122 d），对其 0.5、1.5、2.5、3.5 m 深度进行取样检测，各深度平均含水率分别为 59.19%、63.89%、65.50%、70.17%，对应的十字板抗剪强度分别为 5.6、4.6、2.7、3.2 kPa。与表 3 对比可知，经过长时间真空预压加固后，其含水率仅略低于航道原状土的天然含水率，明显高于其液限，但因其原有结构被破坏，其抗剪强度甚至低于原状土抗剪强度。因此，本试验设计的主要目的在于解决真空预压后期含水率下降慢、强度增长困难的问题。表 2 表明，甬台温地区悬浮状疏浚土矿物成分以中强亲水性的黏土矿物蒙脱石和中等强度亲水性的伊利石占比较高，蒙脱石主要依靠黏滞性的结合水膜连接，静吸附能力强，颗粒间以润滑摩擦为主。非黏性土矿物如石英，颗粒间直接接触较多而吸附水膜很薄，静吸附力非常微弱，主要靠直接摩擦和机械咬合力抵抗颗粒间的滑动，但缺乏黏聚力。因此，该吹填土具有较高的塑性、较大的压缩性和较低的渗透性。

结合本工程吹填土的工程特性以及前期现场试验的检测结果，本试验设计的主要思路是在真空预压的后期，通过电渗的介入，加强土体中水分的排出，从而达到继续降低含水率，促进土体固结，提高其力学强度的目的。

为了对真空预压及电渗过程进行更加详细准确的监测及检测，本次试验主要采用设置真空预压试验池的方式进行。试验池平面尺寸为 8.15 m×2.90 m，分割成 3 个 2.4 m×2.4 m 的小池，深度为 1.9 m，分别进行不同真空梯度下的真空预压试验。本次真空联合电渗试验在 C 池进行，为了平衡泥浆对试验池的压力，试验池一部分在地面以下，一部分在地面以上，地面以上高为 1.1 m，地面以下深为 0.8 m。现场模型试验池如图 2 所示。

在真空预压前，利用泥浆泵从吹填区抽出泥浆后灌入试验池，泥面高度为 1.8 m，并采用搅拌设备充分搅拌均匀以模拟真实的吹填状态，搅拌均匀后其初始含水率约为 142%，然后静置 15 d 左右以模拟现场自然沉淀的状态。试验总体分为两个阶段，第 1 阶段为正常真空预压阶段，按照 40、80 kPa 两级加载的方式进行抽真空，至沉降稳定后卸载并检测，第 1 阶段共持续 108 d；第 2 阶段为真空预压联合电渗阶段，分两个小阶段进行，第 1 阶段耗时

11 d (先进行 9 d 真空预压联合电渗, 再进行 2 d 纯真空预压), 该阶段完成后, 先对电极正负极进行互换, 然后继续开展第 2 小阶段试验, 第 2 阶段共耗时 6.5 d (先进行 2.5 d 的纯真空预压, 再进行 4 d 的真空预压联合电渗)。

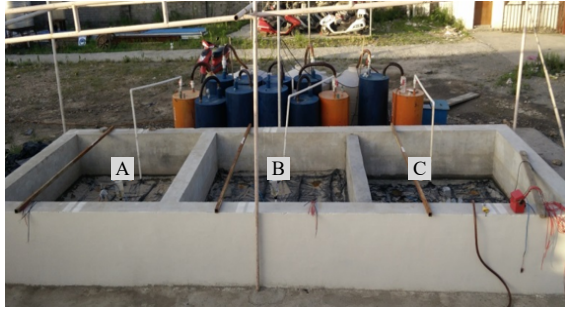
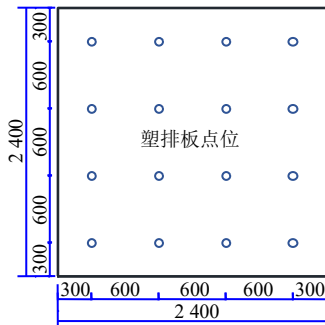


图 2 模型试验池照片
Fig.2 Photo of model test pool

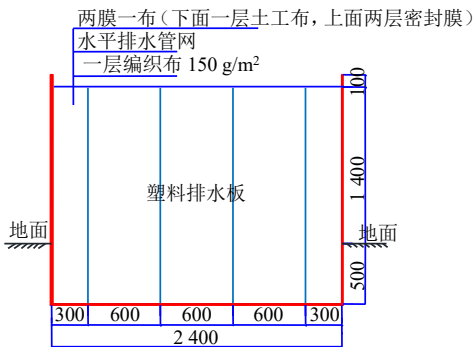
3 试验过程

3.1 试验装置及工序

该试验装置主要包含试验池、水气分离系统、真空稳压系统、真空泵、量测系统、塑料排水板及密封膜等, 塑料排水板间距为 60 cm, 采用 A 型板。其平面、断面布置如图 3 所示。



(a) 塑排板平面点位置



(b) 塑排板断面布置

图 3 塑料排水板平面、剖面布置图 (单位: mm)
Fig.3 Layout plan and section of prefabricated vertical drains (PVD) (unit: mm)

真空预压的主要工序为: 在泥面铺设一层编织土工布、插设塑料排水板、布置水平滤管系统与塑料排水板相连、铺设两层无纺布、铺设两层密封膜并压入压膜沟、布设真空压力表、连接抽真空系统^[19]。具体流程如图 4 所示。

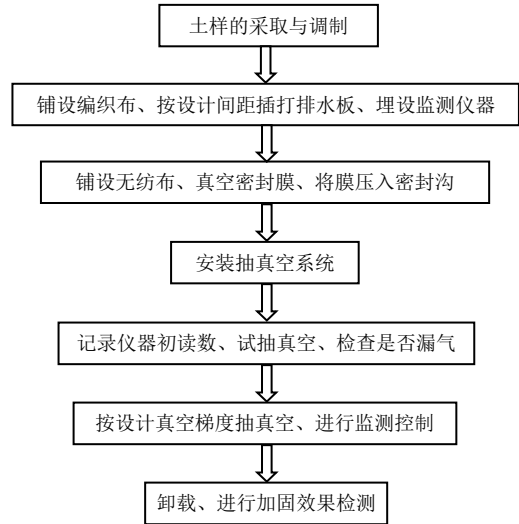


图 4 试验池试验工艺流程图
Fig.4 Process flowchart of experimental pool testing

3.2 试验具体过程

为了更好地对膜下真空度进行控制, 试验池调压系统由电接点真空表和控制电箱组成, 以达到自动控制真空度的目的。主要方法是设定最大阈值和最小阈值 (最大阈值大于所需要的真空梯度压力, 最小阈值为真空度下限), 当真空压力小于最小阈值时自动开启射流泵, 当真空压力大于最大阈值时自动关闭射流泵。真空泵采用 5.5 kW 的射流泵。抽真空过程对其孔压消散情况、表层沉降、每天出水量、真空度等进行详细的记录, 并在第 1 阶段抽真空完成卸载后采用原位十字板试验以及钻孔取样的方式进行加固效果检测。试验系统原理如图 5 所示。

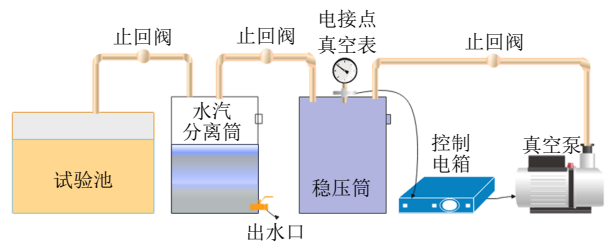


图 5 真空预压试验池试验模型原理图
Fig.5 Principle of test model for vacuum preloading test pool

试验过程中，通过使用水气分离桶和电子秤对真空预压过程中的出水量进行测定，试验池累计出水量和出水速率随时间的变化曲线如图 6 所示。

根据图 6 可知，在真空预压前期，出水速率较快，从 A、B、C 3 个试验池出水量累计曲线看，3 个试验池前 50 d 的日均出水量（daily average water，简称 DAW）的平均值为 57.5 kg/d，此后出水速率明显减缓，从第 50~108 d，3 个试验池日均出水量的平均值约为 7.5 kg/d，前 50 d 的累计出水量占全过程出水量的比例约为 86.8%。据图 6 可知，真空预压卸载前，即抽真空最后一周的日平均出水量约为 3.14 kg/d。根据对试验池表层沉降的全过程监测，其沉降曲线如图 7 所示。

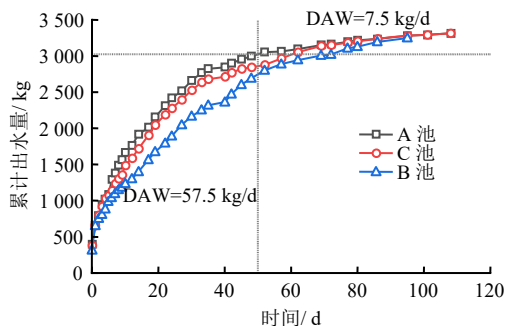


图 6 试验池出水量累计时程曲线
Fig.6 Accumulated time history curves of water output in the experimental pool

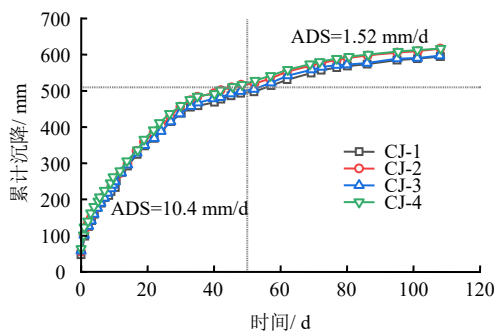


图 7 C 试验池泥面沉降曲线
Fig.7 Sedimentation curves of mud surface in test pool C

据图 7 可知，在真空预压期间，根据表层沉降观测数据，泥面累计沉降平均值为 608 mm，日均沉降量为 5.63 mm，抽真空完成后土体的竖向压缩变形率为 33.8%。从沉降曲线看，抽真空前 50 d 的沉降速度发展较快，日均沉降量（average daily settlement，简称 ADS）为 10.4 mm，前 50 d 累计沉降约占抽真空全过程总沉降量的 86%，这与前 50 d 累计出水量占抽真空全过程的比例高度一致，按照

土体的三相组成理论，可以印证这个关系，说明试验数据测量具有良好的质量。从曲线形态看，后 58 d 的沉降速率明显变缓，日均沉降量为 1.52 mm，上述曲线形态和数据与图 6 的出水量累计曲线高度一致。图 6、7 说明抽真空后期，出水速率减慢，沉降趋于收敛，土体固结发展的速度越来越慢，抽真空后期的效费比越来越低。

抽真空完成后，对试验池 20、60、80 cm 深度处进行十字板原位剪切试验和取样含水率试验，3 个深度的十字板强度分别为 12.65、4.88、4.73 kPa，含水率分别为 52.42%、57.57%、60.60%，其随深度的关系曲线分别如图 8、9 所示。根据试验池的十字板强度换算的 3 处深度的地基极限承载力分别为 69.8、26.9、26.1 kPa，可见其强度随深度衰减得非常快，0.5m 以下的强度仍然非常低。

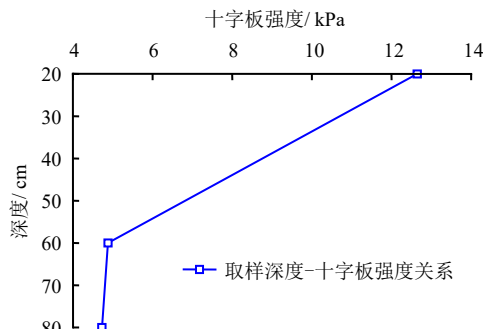


图 8 取样深度-十字板强度关系
Fig.8 Relationship between sampling depth and vane test strength

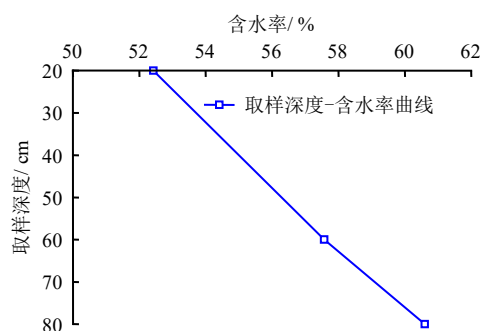


图 9 取样深度-含水率关系
Fig.9 Relationship between sampling depth and moisture content

根据图 8、9 可知，本工程疏浚土含水率在降低至接近 57%以后，土体强度的增长和含水率的降低呈现非线性变化，含水率的小幅度降低可能会引起土体强度较明显的增长。然而，根据对现场大面积吹填区的孔压监测结果表明，埋置于 2.5、5.0 m 深的两个孔压计在抽真空期间总的孔压消散值分别为 23.8、

13.7 kPa, 孔压消散值沿深度的衰减为 2.92 kPa/m, 与同类型的项目相比, 该地区疏浚土的孔压消散衰减速率明显偏高, 上述特性造成了在本地区超细颗粒含量较高的情况下, 真空预压效能的降低, 土体含水率在降低至一定程度后, 很难通过抽真空进一步降低。通过分析图 8、9, 假如通过合适的措施进一步降低土体含水率, 可能在含水率降幅有限的情况下获得土体强度明显的涨幅。

针对上述情况, 设计了第 2 阶段真空预压联合电渗试验, 真空预压联合电渗采用将塑料排水板包裹在电极上的方案, 以促进水分向塑料排水板运动, 其平面布置方案如图 10 所示。

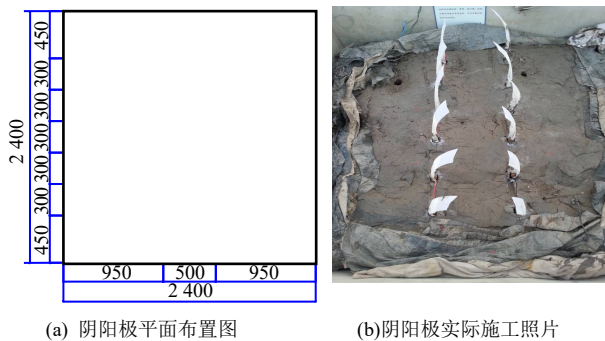


图 10 真空预压联合电渗平面布置图 (单位: mm)

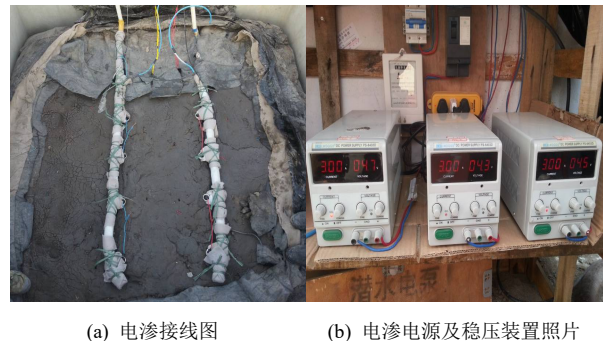
Fig.10 Layout plan of electro-osmotic combined vacuum preloading (unit: mm)

文献[17-18]调研表明, 电渗加固饱和土体的主要机制主要有电渗效应、电泳效应和电化学反应。电渗效应主要作用方式为: 在电场作用下, 孔隙水从阳极向阴极流动, 导致土体排水固结, 孔隙比减小, 强度提高, 电渗效应的主要影响因素有电场强度、土体渗透性和孔隙水性质。电泳效应的主要作用机制为带电颗粒在电场中向相反电极移动, 重新排列, 使土体结构更密实; 影响电泳效应的主要因素有土颗粒表面电荷、电场强度、孔隙水化学性质。电化学反应的主要作用机制为电极处发生氧化还原反应, 改变孔隙水化学性质, 生成胶结物质, 增强土体强度; 其主要影响因素有电流密度、电极材料、孔隙水化学成分。综上所述, 电渗的影响因素都与电场强度、孔隙水化学成分相关, 本试验设计考虑后期推广应用, 因此选用了最常见的钢筋作为电极材料, 另外, 本试验加固的土体为海里的疏浚土, 海水里本身含有一定量的阳离子, 因此未考虑加入化学溶液的方案。电压梯度 E 按下式选用:

$$E = \frac{V}{L} \quad (1)$$

式中: V 为施加电压 (V); L 为电极间距 (m)。

本试验电极间距为 0.5 m, 考虑到采用了联合真空的方案, 选用了 10 V/m 的较低电压梯度, 因此将试验的电压设置为 5 V。最终, 真空联合试验确定的电极材料为直径为 6.5 mm 的钢筋。试验采用三台稳压直流电源, 其最大输出电压和电流分别为 64 V 和 5 A, 如图 11(b)所示。真空电渗试验的真空度保持在 30~40 kPa 之间, 远小于之前真空预压的 70~80 kPa。远小于先期固结压力的低真空排水, 是为了平衡池中水的自重作用, 使得此次试验的目的性更明显, 更易观察真空电渗试验中的电渗作用, 电渗过程如图 11 所示。



(a) 电渗接线图

(b) 电渗电源及稳压装置照片

图 11 电渗试验装置图

Fig.11 Electroosmotic test device diagrams

真空预压联合电渗试验分两个阶段进行, 以第 1 阶段的出水速率作为判断其工作效能的初步控制标准, 当真空联合电渗的出水速率接近单独真空最后一周的出水速率时第 1 阶段结束, 此时将电源的阴阳极互换, 开展第 2 阶段真空预压联合电渗试验。具体的控制标准为, 当真空联合电渗的每小时平均出水量低于上阶段纯真空预压最后一周每小时平均出水量, 即小时出水量低于 0.16 kg 时, 开始第 2 阶段的试验。第 1 阶段试验共进行了 11 d, 其中前面 9 d 为真空联合电渗试验, 后面 2 d 为纯真空预压试验, 在第 1 阶段真空预压联合电渗试验中, 正负电极间电压稳定在 4.5~5.5 V 之间, 电流稳定在 2.98~3.01 A 之间。在出水量接近阈值时结束第 1 阶段试验。第 1 阶段试验结束后, 进行了原位十字板试验和取样检测, 其检测结果如表 4 所示。

将表 4 经过第 1 阶段真空预压联合电渗加固后检测得到的结果进行分类统计, 考虑到电极的极性和取样点对检测结果的影响, 分别统计了阴极附近、阳极附近、阴极和阳极之间 3 个典型位置的含水率和十字板强度, 如表 5 所示。

表 4 第 1 阶段真空联合电渗后检测结果
Table 4 Results of the first stage of vacuum combined with electro-osmotic testing

点位	十字板强度/kPa			含水率/%		
	20 cm 深	60 cm 深	100 cm 深	20 cm 深	60 cm 深	100 cm 深
阴 1	15.3	5.2	4.7	50.13	54.32	59.97
阴 2	13.1	6.3	4.9	49.95	55.37	57.85
阴阳 3	13.5	7.1	6.4	48.87	53.27	57.83
阴阳 4	20.8	9.0	4.9	48.54	53.56	57.62
阴阳 5	20.1	8.7	5.9	48.39	54.12	57.94
阳 6	19.6	8.7	6.8	49.03	54.06	58.05
阳 7	14.7	8.7	7.4	48.52	54.33	58.57

表 5 第 1 阶段真空预压联合电渗加固后土体指标平均值
Table 5 Average soil indicators after the first stage of electro-osmosis combined with vacuum preloading reinforcement

点位	十字板强度/kPa			含水率/%		
	20 cm 深	60 cm 深	100 cm 深	20 cm 深	60 cm 深	100 cm 深
电渗前平均值	12.65	4.88	4.73	52.42	57.57	60.60
阴极附近平均值	14.20	5.75	4.80	50.04	54.85	58.91
阳极附近平均值	17.15	8.70	7.10	48.78	54.20	58.31
阴阳之间平均值	18.13	8.27	5.73	48.60	53.65	57.80

将表 5 统计得到的各深度、各取样点位置的土体物理力学指标与前期纯真空预压结束后的指标进行对比，其对比情况如表 6 所示。

表 6 第 1 阶段真空预压联合电渗加固后土体指标变化率
Table 6 Change rates of soil indicators after first stage electro-osmosis combined with vacuum preloading reinforcement

深度 / %	阴极附近平均变化率/%		阳极附近平均变化率/%		阴阳极之间变化率/%		3 个测点平均值/%	
	十字板强度	含水率	十字板强度	含水率	十字板强度	含水率	十字板强度	含水率
	20	12.30	2.38	35.60	3.64	43.30	3.82	30.40
60	17.80	2.72	78.30	3.37	69.50	3.92	55.20	3.34
100	1.50	1.69	50.10	2.29	21.10	2.80	24.23	2.26

从表 5、6 可以看出，从深度方向看，经真空预压联合电渗加固后，在含水率降幅较小的情况下，各个深度的土体十字板强度均有较明显的增长，增幅最大的为阳极附近在 60 cm 深度处，达到 78.30%，增幅最小的为阴极附近 100 cm 深度的点位，仅为 1.5%，考虑到该深度处阳极附近、阴极与阳极之间的十字板增幅分别为 50.1%和 21.1%，均有较明显的增长，因此该点可以认为检测的离散性造成的。从深度方向具体的增长规律来看，60 cm 深度处的

含水率平均降幅较大，十字板强度增幅最大。从表 6 可知，前期抽真空结束时，土体含水率随深度逐渐增加，因此表层的土体含水率最低，影响了其含水率的进一步降低。但由于真空预压联合电渗时，真空度传递仍然与单纯的真空预压类似，随着深度的增加，负压的衰减越来越明显，因此，100 cm 深度处的含水率降幅与十字板强度增幅小于 60 cm 处的。上述土体物理力学指标的变化规律与单纯的真空预压既有相同之处，也有明显的差异，可以从指标的变化看到其共同作用的结果。

从不同测点位置物理力学指标的变化来分析，20、60、100 cm 3 个深度阳极附近十字板强度的提高幅度均显著大于阴极附近的强度增长，这说明真空预压联合电渗加固饱和软土，除了电渗效应发挥的排水作用外，电泳效应和电化学反应也促进了土体强度的提高。阳极附近土体强度比较高的主要原因为靠近阳极附近的电泳效应和电化学反应更明显，因此阳极附近的土体强度更高。本试验采用的疏浚土主要矿物成分为蒙脱石、伊利石等黏土矿物，这些矿物中的阳离子被其他离子替代，导致晶格中产生负电荷，使得这些黏土矿物容易向阳极附近移动，在阳极附近由于电场强度通常更高，因此电泳效应更为显著。此外，在阳极附近，在强电场的作用下，阳极发生氧化反应，生成氧气和 H⁺，导致阳极附近 pH 显著降低，形成酸性环境，阳极区域富集的 H⁺会中和黏土表面负电荷，导致其 ζ 电位降低，双电层压缩，从而减弱颗粒间的静电排斥力，促进凝聚或絮凝。

对第 1 阶段真空预压联合电渗加固后的土体强度检测结果分析发现，土体强度与离电极的位置和距离具有相关性，因此第 2 阶段对电极的正负进行互换再次进行短期的联合加固以验证极性对加固效果的影响。第 2 阶段共持续了 6.5 d，其中前面 2.5 d 进行纯真空预压以恢复土体中的真空度，后 4 d 进行真空预压联合电渗试验。

二阶段结束后对试验池不同平面位置及不同深度进行了原位十字板剪切试验及钻孔取样试验，其检测点平面布置如图 12 所示。

二阶段各点位及深度的检测结果如表 7 所示。

对上述检测结果进行统计，并与一阶段检测结果进行对比分析，得到表 8。

由表 8 可知，在阴阳极互换后进行短期的真空预压联合电渗加固后，在各个不同深度的加固效果有显著的区别。在 20 cm 深度处，含水率下降了 1.71%，十字板强度变化率为-0.17%，考虑到取样的随机性

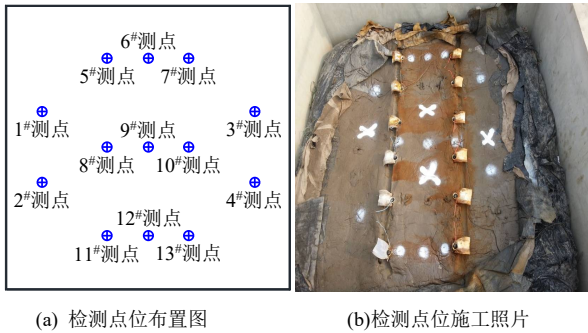


图 12 真空联合电渗第二阶段试验检测点平面布置图
Fig.12 Layout plan of measurement points for the second stage of vacuum combined electro-osmosis test

表 7 真空联合电渗第二阶段检测结果

Table 7 Test results of the second stage of vacuum preloading combined with electro-osmosis

点位	十字板强度/ kPa			含水率/ %		
	20 cm 深	60 cm 深	100 cm 深	20 cm 深	60 cm 深	100 cm 深
1	19.6	7.3	5.4	49.30	54.11	58.43
2	13.8	7.5	6.3	49.15	53.68	58.25
3	20.9	11.7	13.2	48.84	53.45	58.31
4	15.6	10.3	12.9	48.24	52.53	57.49
5	21.5	11.2	6.5	48.19	52.35	57.34
6	12.8	7.4	6.9	47.59	53.15	56.34
7	16.2	8.1	6.1	48.21	51.75	56.25
8	14.6	7.8	7.2	47.63	53.57	57.27
9	15.9	8.0	6.1	47.35	52.85	56.73
10	17.5	9.2	7.3	48.36	52.37	57.34
11	18.7	7.2	7.4	48.23	51.74	56.93
12	13.9	6.8	6.2	47.89	51.36	57.33
13	16.1	8.7	7.6	47.92	52.56	56.50

表 8 真空联合电渗第二阶段试验数据分析

Table 8 Data analysis of the second stage of vacuum preloading combined with electro-osmosis tests

点位	十字板强度/ kPa			含水率/ %		
	20 cm 深	60 cm 深	100 cm 深	20 cm 深	60 cm 深	100 cm 深
1	16.73	7.67	5.86	49.06	54.15	58.26
2	16.70	8.55	7.62	48.22	52.73	57.27

注: 20、60、100 cm 深时十字板强度变化率为-0.17%、11.50%、30.15%，含水率变化率为-1.71%、-2.62%、-1.70%。

和十字板试验过程中的人为误差，可以认为 20 cm 处的十字板强度在加固前后没有明显变化。从该深度的含水率分析，其 1 阶段真空预压联合电渗加固后的含水率为 49.06%，经过 2 阶段加固后的含水率为 48.22%。根据该土的液塑限分析，表层土的液限约为 45% 左右，考虑到疏松土中混合有部分液限为 52% 的②层淤泥，其综合液限应该略大于 45%。据此推测，上述加固方式在接近土体的天然液限时，其含水率的降幅和强度增长的幅度受限，因此采用

真空预压联合电渗加固有一定的经济界限，土体含水率接近液限后其加固效果明显降低。

再分析 60、100cm 两个较深的深度加固效果，60 cm 深度处，十字板强度提高了 11.50%，含水率降低了 2.62%；100 cm 深度处，十字板强度提高了 30.15%，含水率降低了 1.70%。说明真空预压联合电渗加固对于中下部的土体加固效果更明显。

4 试验结果分析

在真空预压联合电渗试验全过程中，对电渗电压、电流、电渗用电量以及抽真空用电量进行全程监测并记录，其电压-时间曲线如图 13 所示。

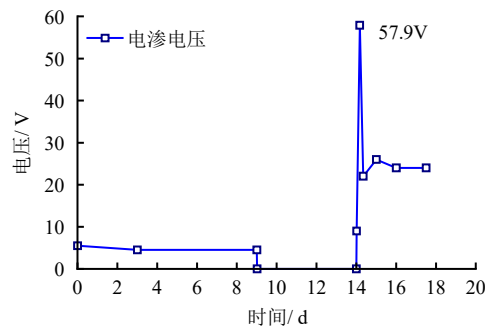


图 13 真空联合电渗试验的电压-时间曲线
Fig.13 Voltage-time curve of vacuum combined electroosmotic test

真空联合电渗加固一二阶段各阶段耗时及用电情况如表 9 所示。

据图 13、表 9 可知，真空预压联合电渗加固第 1 阶段的电流和电压基本维持在较稳定的区间，反映了该过程土体电流阻抗的变化不大。第 2 阶段为了维持电流强度的基本稳定，对电压进行了动态的调整，试验全过程电流强度维持在 2.98~3.01 A 之间，电极互换后刚恢复电渗时的电压强度为 5.0 V，后面迅速上升至 57.9 V，又很快降低至 22~26 V。与第 1 阶段的电渗电压、电流比较发现，在保持电流强度基本不变的情况下，该阶段的电压强度明显大于第 1 阶段，这主要是以下几个方面的原因导致的：①电渗过程中，孔隙水被排出，土体含水率降低，导致电阻增大，为了维持相对恒定的电流，需要提供更高的电压；②长时间的通电会使电极发生极化，增加界面电阻，导致电压上升；③电渗作用使土体颗粒重新排列，孔隙结构改变，增加了电流通过的阻力；④电渗过程中，离子迁移导致局部浓度变化，可能形成浓度梯度，导致电阻增加。

对真空联合电渗加固两阶段的用电量统计显示，第 2 阶段共用电 288.5 kW·h，其中电渗用电 53.1 kW·h 度，真空用电 235.4 kW·h，电渗占该阶段总用电量比例约为 18.4%。真空联合电渗全过程

共用电 586.2 kW·h，其中电渗用电量 112.83 kW·h，抽真空用电量 473.37 kW·h，电流值在 2.98~3.01 A 之间，电渗占该阶段总用电量的比例为 19.2%，总体来说，电渗用电量占联合加固的总用电量的比例较低。

表 9 真空联合电渗用电情况统计表

Table 9 Statistics of electricity consumption for vacuum combined electro-osmosis tests

阶段	工序	持续时间 / d	电渗电压变化	真空用电量 / kW·h	电渗用电量 / kW·h
1 阶段	电渗+真空预压	9.0	前 3 d 由 5.5 V 逐渐减小至 4.5 V，后稳定在 4.5 V	238	59.73
	纯真空预压	2.0	—		
2 阶段	纯真空预压	2.5	—	235	53.1
	电渗+真空预压	4.0	前 4 h，电压升至 57.9 V，后 20 min 迅速降至 24 V，后稳定在 22~26 V		

在真空联合电渗加固的全过程，对试验池的出水进行了收集并每天测定其出水量，出水量的计量主要采取称重的方式进行并平均到每小时，出水率-时间曲线如图 14 所示。

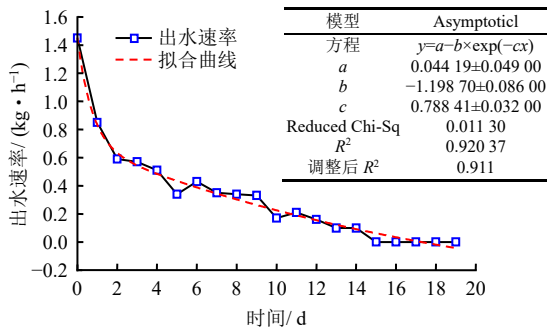


图 14 真空电渗的出水率-时间曲线

Fig.14 Water yield-time curves of vacuum preloading combined with electro-osmosis tests

由图 14 可知，在真空联合电渗开始时，试验池出水速率约为 1.45 kg/h。随着真空联合电渗试验的进行，出水速率呈指数形式减少，出水率快速下降反映了真空联合电渗的效能在快速地下降，至真空联合电渗试验结束，出水速率最终基本稳定在 0.1 kg/h。根据图 6 计算的纯真空预压最后一周的出水速率为 3.14 kg/d，约合 0.13 kg/h。据此计算，采用真空联合电渗初始时刻，其出水效率约为单纯真空预压的 11.2 倍。在第 2 阶段真空联合电渗加固结束后，对土体不同深度的含水率、土体强度进行了检测，并与真空联合电渗加固前的土体物理力学指标进行对比，对比情况如表 10 所示。

由表 10 可知，经过真空联合电渗加固，含水率在各个深度均有所下降，但下降幅度在 60 cm 处最

大 (-4.84%)，其次是 20 cm 深度 (-4.21%)，从十字板强度的变化来看，60 cm 深度的土体十字板强度增幅最大，达到了 75.28%，其次是 100 cm 深度处，增幅达到 61.16%。这说明，与纯真空预压由于真空度衰减引起的真空压差随着深度衰减的特性不同，真空联合电渗加固表现出了兼具两种加固方式的特性，一方面，电渗加固引起的含水率下降和土体强度增高往往与含水率相关，初始含水率越高，电渗加固效果越明显；另外一方面，由于仍然需要借助于真空的压差迫使水从塑料排水板下部沿着塑料排水板向上排，对于深部的土体，仍然受制于真空度的衰减，到了 100 cm 深度处，其含水率的降幅和十字板强度的增幅仍然低于 60 cm 深度处。综上分析，在前期经过真空预压加固后，通过短期的真空预压联合电渗加固，对于中下部的土体强度可取得不错的土体强度增长，经过真空电渗后，深层土体强度较为均匀。

表 10 真空电渗前后的检测结果

Table 10 Detection results before and after vacuum electro-osmosis tests

加固阶段	十字板强度/ kPa			含水率/ %		
	20 cm深	60 cm深	100 cm深	20 cm深	60 cm深	100 cm深
电渗前均值	12.65	4.88	4.73	52.42	57.57	60.60
电渗后均值	16.70	8.55	7.62	48.22	52.73	57.27

注：电渗后 20、60、100 cm 深度的十字板强度变化率为 32.02%、75.28%、61.16%；含水率变化率为 -4.21%、-4.84%、-3.33%。

通过对表 10 的分析可知，经过真空电渗加固，土体的含水率有所降低，与强度提高率不成正比。从十字板强度和含水率的检测结果来看，此次试验结果与工况较为一致。为了发挥真空电渗中的电渗

作用,而非真空作用,真空电渗试验设计的真空度保持在 30~40 kPa 之间,小于之前真空预压的 70~80 kPa。30~40 kPa 之间的真空压力仅仅是为了平衡池中水的自重作用。试验结果中,深层土体强度提高率远大于表层土体强度提高率,深层土体强度较为均匀,都说明了此次真空电渗试验中,电渗在发挥主要作用,且电渗作用能使深层土体强度得到 60%到 75%较大幅度的提高。将各阶段土体含水率、十字板强度绘制成散点图,如图 15 所示。

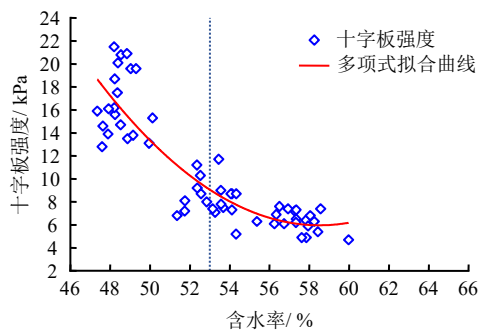


图 15 土体强度与含水率关系散点图

Fig.15 Scatter plots of the relationship between soil strength and moisture content

据图 15 可知,乐清湾超细颗粒悬浮状疏浚土,由于吹填后该土体已经完全丧失原有的结构性,本地区疏浚土力学强度与含水率呈现非线性关系,在含水率低于约 53%之后,其力学强度增长的速度明显加快。由于本地区土颗粒矿物成分中亲水性矿物成分含量较高,渗透系数较低,加上真空预压后期塑料排水板周边的淤堵效应明显,阻止了抽真空后期含水率的进一步降低,即便通过延长抽真空时间,也很难通过单纯的真空预压方式将土体各深度的含水率降低至上述值以下,因此限制了其强度的提高。通过采用真空预压联合电渗的方式,通过较短的时间,使得含水率降低至该界限以下,虽然含水率的降幅并不大,但是强度却得到较大的提升。

据表 10 可知,3 个检测深度在真空预压联合电渗加固后,其含水率下降平均幅度为 4.12%。根据图 6 可知,在单纯抽真空前后一周,日均出水量约为 3.14 kg,假设此后的出水速率基本稳定不变,进行 17.5 d 的纯真空预压对比试验,推算的累计出水量约为 54.95 kg,根据试验池中土体的实际体积与重度推算的土体重量约为 8 680 kg,则可推算得到假如采用纯真空预压进行等长时间的对比试验,土体含水率下降约为 0.6%,明显小于真空联合电渗的幅值。据此可以推算,在抽真空后期,抽真空预压对

土体含水率下降的贡献率约为 0.6%,根据第 4 节对用电量的分析,其占总用电量的比例约为 80.8%,而电渗对含水率的下降贡献率约为 3.52%,其占总用电量的 19.2%。

根据前述的用电量统计,纯真空预压与电渗单位含水率下降的能耗比分别为

$$\eta_1 = \frac{0.6\%}{238 + 235} = 0.127\% / \text{kW} \quad (2)$$

$$\eta_2 = \frac{3.52\%}{59.73 + 53.1} = 3.2\% / \text{kW} \quad (3)$$

式中: η_1 、 η_2 分别为纯真空预压单位耗电量的含水率变化量、电渗单位耗电量含水率的变化量。

据此可以推算电渗与真空预压在后期加固中单位含水率下降的效能比约为 24.6 倍。综上所述,在抽真空稳定后,土体含水率逐渐减小,土体强度趋于稳定时,采用短期真空预压联合电渗,可以进一步降低含水率,提高土体强度,其综合效能较优。

本文主要探索了在超细颗粒无结构土真空预压加固后期,通过真空预压联合电渗提升加固效果的可行性,未对电渗的电极材料、电渗电势差控制、电渗添加溶液的效果等进行具体探讨。

5 结 论

本文针对真空预压处理超软土地基时,真空预压后期塑料排水板周围被细颗粒淤堵、抽真空能力下降的问题,依托乐清湾吹填造陆工程,采用模型试验的方式对真空联合电渗加固在抽真空后期的效果及经济性进行了研究,得到以下结论:

(1) 在真空预压后期,沉降稳定后,叠加电渗可以在土体含水率下降幅度小于 5%的情况下,实现土体强度较大幅度的提升,特别对于较深的土体,实现了土体强度 60%~75%的增长。

(2) 真空预压联合电渗加固兼具真空预压和电渗的特点,电渗加固不像真空预压存在随深度真空度明显衰减的特点,因此其对真空预压难以加固的土体中下部加固效果较好。在前期真空预压加固的基础上进行短期联合加固,可以提高土体在各个深度强度的均匀性。

(3) 真空联合电渗加固在接近土体液限时,其含水率的下降幅度明显减小,因此采用该法加固有其经济合理的区间,适宜于真空预压稳定后短期加固,一味地加长时间并不能持续提升加固效果。

(4) 真空联合电渗加固时,电渗除了发挥其加速水分渗透的作用,还存在电泳、电化作用,因

此阳极附近区域的土体强度比较好, 加固过程对极性互换是有必要的。

(5) 进行阴阳极互换后, 深层土体强度能够得到约 11%~30%的进一步提高, 且越深层处, 土体强度越低处, 土体强度提高率越大, 深层土体强度的均匀性更好。

(6) 在低电压低电流的真空电渗中, 电渗用电量占联合加固的比重较低。

参 考 文 献

- [1] 孙立强, 闫澍旺, 李伟, 等. 超软土真空预压室内模型试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 984-990.
SUN Li-qiang, YAN Shu-wang, LI Wei, et al. Study of super-soft soil vacuum preloading model test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(4): 984-990.
- [2] 胡利文, 刘志军. 真空预压加固土体变形机制分析[J]. 岩土力学, 2021, 42(3): 790-799.
HU Li-wen, LIU Zhi-jun. Analysis on deformation mechanism of soft soil reinforcement by vacuum preloading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(3): 790-799.
- [3] 胡小波. 超细颗粒悬浮状疏浚土真空预压加固特性研究[J]. 水运工程, 2024(6): 204-210.
HU Xiao-bo. Study on the vacuum preloading reinforcement characteristics of ultrafine particle suspended dredged soil[J]. **Port and Waterway Engineering**, 2024(6): 204-210.
- [4] LEI H Y, HU Y. Consolidation behavior of Tianjin dredged clay using two air-booster vacuum preloading methods[J]. **Journal of Zhejiang University Science A: Applied Physics & Engineering**, 2021, 22(2): 147-164.
- [5] 蒋楚生, 司文明, 曾惜, 等. 电渗联合真空预压技术处理高速铁路软土地基[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(6): 28-32.
JIANG Chu-sheng, SI Wen-ming, ZENG Xi, et al. Research on the treatment of soft soil foundation of a high speed railway by electric-osmosis combined with vacuum preloading technology[J]. **Journal of Railway Engineering Society**, 2019, 36(6): 28-32.
- [6] 高志义, 张美燕, 张健. 真空预压联合电渗法室内模型试验研究[J]. 中国港湾建设, 2000(5): 58-61.
GAO Zhi-yi, ZHANG Mei-yan, ZHANG Jian. Laboratory model test of vacuum preloading in combination with electro-osmotic consolidation[J]. **China Harbour Engineering**, 2000(5): 58-61.
- [7] 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(增刊 2): 4181-4192.
WANG Jun, ZHANG Le, LIU Fei-yu, 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(Suppl.2): 4181-4192.
- [8] 王军, 王逸杰, 刘飞禹, 等. 间歇式真空预压联合电渗加固吹填软土试验[J]. 中国公路学报, 2016, 29(10): 37-45.
WANG Jun, WANG Yi-jie, LIU Fei-yu, et al. Test of reinforcement by intermittent vacuum preloading electroosmosis in dredger soft caly[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2016, 29(10): 37-45.
- [9] WANG J, MA J J, LIU F Y, et al. Experimental study on the improvement of marine clay slurry by electroosmosis-vacuum preloading[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2016, 44(4): 615-622.
- [10] 卢雪清, 李航. PHD-PVD 真空预压联合电渗法处理工程废浆试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024(8): 129-135.
LU Xue-qing, LI Hang. Experimental study of waste slurry treated by a PHD-PVD vacuum preloading method combined with electro-osmosis[J]. **Journal of Civil and Environmental Engineering**, 2024(8): 129-135.
- [11] 张雷, 吕延栋. 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 Yan-dong. Laboratory study of consolidation of marine soft soil using flocculation-vacuum preloading-electro-osmosis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(9): 2383-2390.
- [12] 潘卓杰, 张雷. 基于新型电动装置的真空-电渗联合加固滩涂软土地基的试验研究[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(8): 134-141.
PAN Zhuo-jie, ZHANG Lei. Experimental study on reinforcement of marine clay foundation based on new electrokinetic device using combined vacuum preloading and electro-osmosis consolidation[J]. **Journal of Natural Disasters**, 2021, 30(4): 134-141.

- Engineering**, 2015, 37(7): 1300-1306.
- [16] 蒋明镜, 奚邦禄, 申志福, 等. 月壤水平推剪试验的离散元数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(3): 712-718.
JIANG Ming-jing, XI Bang-lu, SHEN Zhi-fu et al. DEM analyses of horizontal pushing test on lunar ground[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2016, 12(3): 712-718.
- [17] AIKINS K A, UCGUL M, BARR J B, et al. Determination of discrete element model parameters for a cohesive soil and validation through narrow point opener performance analysis[J]. **Soil and Tillage Research**, 2021, 213: 105123.
- [18] 郭志军, 张阳, 倪利伟, 等. 仿生推土板工作阻力研究[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(4): 11-13.
GUO Zhi-jun, ZHANG Yang, NI Li-wei, et al. Study on soil resistance of bionic bulldozing plates[J]. **Journal of Chinese Agricultural Mechanization**, 2016, 37(4): 11-13.
- [19] LI M, XU S, YANG Y, et al. A 3D simulation model of corn stubble cutting using finite element method[J]. **Soil and Tillage Research**, 2017, 166: 43-51.
- [20] ZHANG L B, CAI Z X, LIU H F. A novel approach for simulation of soil-tool interaction based on an arbitrary Lagrangian-Eulerian description[J]. **Soil and Tillage Research**, 2018, 178: 41-49.
- [21] HOSEINIAN S H, HEMMAT A, ESEHAGHBEYGI A, et al. Development of a dual sideways-share subsurface tillage implement: part 1. Modeling tool interaction with soil using DEM[J]. **Soil and Tillage Research**, 2022, 215: 105201.
- [22] Dassault Systems. Simulia user assistance 2019[M]. Providence: Dassault Systems Simulia, 2019.
- [23] MCKYES E, DESIR F L. Prediction and field measurements of tillage tool draft forces and efficiency in cohesive soils[J]. **Soil and Tillage Research**, 1984, 4(5): 459-470.
- [24] SALAR M R, ESEHAGHBEYGI A, HEMMAT A. Soil loosening characteristics of a dual bent blade subsurface tillage implement[J]. **Soil and Tillage Research**, 2013, 134: 17-24.

上接第 3533 页

- [13] 周凤玺, 张甲华, 马强, 等. 电渗-真空联合作用下富水黄土的排水固结特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(3): 724-735.
ZHOU Feng-xi, ZHANG Jia-hua, MA Qiang, et al. Analysis of drainage consolidation characteristics of water-rich loess under the combined action of electro-osmosis and vacuum[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2023, 42(3): 724-735.
- [14] 李水江, 汤家郗, 李校兵, 等. 真空预压联合逐级动力压实和电渗法处理疏浚淤泥试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(6): 143-150.
LI Shui-jiang, TANG Jia-xi, LI Xiao-bing, et al. Experimental study on vacuum preloading combined with progressive dynamic compaction and electro-osmosis method for dredged slurry[J]. **Journal of Civil and Environmental Engineering**, 2023, 45(6): 143-150.
- [15] 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 Zhao-hua, YU Xiang-juan, GAO Ming-jun, 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.
- [16] 孙召花, 吴添玥. 真空-电渗异步加固设计方法工程案例分析[J]. 南通大学学报(自然科学版), 2022(12): 77-85.
SUN Zhao-hua, WU Tian-yue. Engineering case analysis of vacuum preloading and electroosmosis applied alternately design method[J]. **Journal of Nantong University (Natural Science Edition)**, 2022(12): 77-85.
- [17] BURNOTTE F, LEFEBVRE G, GRONDIN G. A case record of electroosmotic consolidation of soft clay with improved soil-electrode contact[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2004, 41(6): 1038-1053.
- [18] OU C Y, SHAOCHI C, WANG Y G. On the enhancement of electroosmotic soil improvement by the injection of saline solutions[J]. **Applied Clay Science**, 2009, 44(1/2): 130-136.
- [19] 崔允亮, 潘方然, 高椴园, 等. 真空预压淤堵区渗透系数的计算方法[J]. 岩土力学, 2024, 45(7): 2085-2093.
CUI Yun-liang, PAN Fang-ran, GAO Xuan-yuan, et al. A calculation method of permeability coefficient of clogging zone in vacuum preloading of waste slurry[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2024, 45(7): 2085-2093.