

杨展鹏, 汤家邨, 宋琢, 等. 分层强夯联合电渗法处理疏浚淤泥宏观试验研究[J]. 华南地震, 2022, 42(3): 85–93. [YANG Zhanpeng, TANG Jiaxi, SONG Zhuo. Macro and Micro Experiment on Dredged Slurry Treatment by Layered Dynamic Compaction Combined with Electro-osmosis Method [J]. South China journal of seismology, 2022, 42(3): 85–93]

## 分层强夯联合电渗法处理疏浚淤泥宏观试验研究

杨展鹏<sup>1</sup>, 汤家邨<sup>2</sup>, 宋琢<sup>3</sup>

(1. 广州市广园市政建设有限公司, 广州 510040; 2. 上海大学土木工程系, 上海 200444;  
3. 广州一建建设集团有限公司, 广州 510060)

**摘要:** 为提高强夯联合电渗法处理疏浚淤泥的效果, 提出了分层强夯联合电渗法处理疏浚淤泥的方法。设计了4组室内模型试验, 分别采用纯电渗、分1层、2层及3层强夯联合电渗法对疏浚淤泥进行处理, 研究分层强夯联合电渗法的处理效果, 并通过扫描电镜分析了试验后阴极附近土体的孔隙特征。结果表明: 分层强夯联合电渗法加固效果优于纯电渗法, 且分层数越多、促进效果越好; 分3层强夯的排水量达到6.35 kg、电流强度的衰减得到了较好的抑制效果; 分3层强夯比纯电渗法的排水量增加了37.15%, 十字板剪切强度增加了41.42%; 电镜扫描结果显示, 分3层强夯时阴极附近的土体裂缝明显减少, 均一化程度最高。

**关键词:** 地基处理; 宏观结构; 细观结构; 电渗法; 疏浚淤泥

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2022)03-0085-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2022.03.11

## Macro and Micro Experiment on Dredged Slurry Treatment by Layered Dynamic Compaction Combined with Electro-osmosis Method

YANG Zhanpeng<sup>1</sup>, TANG Jiaxi<sup>2</sup>, SONG Zhuo<sup>3</sup>

(1. Guangyuan Municipal Construction Co., Ltd., Guangzhou 510040, China; 2. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 3. Canton One Construction Group Co., Ltd., Guangzhou 510040, China)

**Abstract:** In order to improve the effect of treating dredged slurry, the method of layered dynamic compaction combined with electro-osmosis was proposed. 4 groups of laboratory model tests were designed, and the dredged slurry was treated by pure electro-osmosis, 1-layer, 2-layer and 3-layer dynamic compaction combined with electro-osmotic method. The paper studied the treatment effect of layered dynamic compaction combined with electro-osmosis, and analyzed the pore characteristics of the soil near the cathode by scanning electron microscope. The results show that the reinforcement effect of layered dynamic compactions combined with electroosmosis is better than that of electro-osmosis alone, and the more layers, the better the promotion effect;

收稿日期: 2022-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878402)

作者简介: 杨展鹏(1975-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事土木工程管理及土木工程施工方面的研究。

E-mail: 869707926@qq.com

the drainage of the 3-layered is 6.35 kg and the attenuation of current is well restrained; the drainage of 3-layered compared with electro-osmosis increased by 37.15% and the vane shear strength increased by 41.42%; the SEM results showed that the soil cracks near the cathode were significantly reduced and the degree of homogenization was the highest during 3-layered dynamic compaction.

**Keywords:** Foundation treatment; Macro structure; Micro structure; Electro-osmosis method; Dredged slurry

0 引言

随着我国沿海地区经济的高速发展，为缓解土地资源紧缺这一状况，海涂围垦这种通过对海底疏浚淤泥进行处理的方法开始广泛地用于吹填造陆。海底疏浚淤泥的含水率高、颗粒细、渗透性差<sup>[1-2]</sup>，可采用电渗法进行处理，提高其抗剪强度。对疏浚淤泥地基处理后，不仅能减少地面堆土面积，还能对其进行二次利用，提高了资源利用率<sup>[3]</sup>。

电渗法在岩土工程中广泛应用，已有几十年历史，尤其在处理疏浚淤泥时有多项优势<sup>[4]</sup>，于1939年首次应用电渗法处理岩土工程问题，此后国内外大量学者陆续对其展开了研究。Kaniraj等<sup>[5]</sup>研究发现，电渗法处理软土地基的效果取决于土颗粒电渗透系数，与颗粒粒径无关；刘飞禹、杨展鹏等<sup>[6]</sup>通过电渗试验发现，电渗法处理软土地基的加固深度较其他处理方法大，处理后的土体也更加均匀。Liu<sup>[7]</sup>研究了可溶性盐对软粘土电渗固结的影响，确定了每种可溶性盐溶液的最佳浓度。

目前已有针对强夯的加固机理、设计参数和现场及室内试验等相关研究。在强夯加固机理方面，Leonands<sup>[8]</sup>认为强夯加固地基过程存在三种机理：加密作用、固结作用和预加变形作用。在饱和软黏土的加固机理方面，Menard和Broise<sup>[9]</sup>提出动力固结主要是由于饱和软黏土压缩性高和土中自由水可以迅速排出。在强夯设计参数研究方面，周健等<sup>[10]</sup>研究了井点降水联合低能量强夯处理软弱土地基，指出关键技术在于控制单击夯能；只有合适的单击夯能，才不会破坏土体结构，才能有效加固软土地基。在土体破坏本构机理研究方面，周林禄等<sup>[11]</sup>针对饱和砂土液化问题，基于开源地震工程数值计算平台OpenSees，对4种砂土本构模型进行数值计算。程超等<sup>[12]</sup>基于室内动三轴试验和静三轴试验，研究动、静态液化对饱和土体本构特征的影响，探讨两种液化机理的差异性。在试验研究方面，李水江等<sup>[13]</sup>将低能量强夯和真空预压及

电渗法进行结合，对温州地区某河道清淤工程的饱和软黏土进行室内模型试验，得到了显著的加固效果。李晓静等<sup>[14]</sup>对以粉土和粉质黏土构成的黄泛区路基场地开展强夯加固，得出了在2000 kN·m夯击能作用下，各遍数夯击时的最佳夯击数和有效加固深度。高有斌等<sup>[15]</sup>列举了几个电渗法联合强夯法加固的工程实例；Burnotte等<sup>[16]</sup>通过现场试验中电渗法电极间距的调整，使电渗法为后续的强夯过程提供充足的作业空间，为电渗联合强夯法提供了实际工程经验。

本文提出分层低能级强夯联合电渗法来处理疏浚淤泥，通过排水量大小确定强夯夯击时间点，研究该工法对各土层因电渗固结产生的裂缝的弥合情况的影响，并从微观角度分析分层强夯对电渗固结的影响机制。

1 试验介绍

1.1 试验土样

本次试验所用土样取自温州地区某一海涂围垦工程。通过实验室测量仪器对海底疏浚淤泥进行测定，获得土样的各项基本物理力学参数，如表1所示。

表 1 疏浚淤泥基本物理力学参数

Table 1 Basic physical and mechanical parameters of dredged slurry

$\omega$	$G_s$	$e$	$\omega_p$	$\omega_L$	$c_u$	pH	$k$
76.0	2.74	2.35	22.8	49.2	≈0	8.2	4.64

1.2 试验装置

1.2.1 电渗固结系统

图1为分层强夯联合电渗法的模型箱及相关试验装置示意图。4个圆桶模型底部开口用于排水，在桶底部倒贴一层反滤膜防止排水孔淤堵。电渗阳极和阴极均用直径7 mm的光圆钢筋制成，电极按轴对称二维平面布置。本次试验电势梯度取0.5 V/cm，直流电源电压取7.5 V。

1.2.2 分层强夯系统与工艺参数

图1(b)所示为本次试验所采用的自主设计的开口环形夯锤，尺寸如图所示。为更好地开展强夯，在每一分层土体表面铺设一层2 mm厚土工布，防止夯击破坏土表。在本试验中，取分层数1、2、3的最小公倍数6作为强夯的遍数，每遍满夯1次。设计本试验夯锤质量为2.5 kg，各组分层强夯的夯击落距为0.2 m。土样监测点分布如图1(c)所示。试验期间每隔3 h监测一次排水量、电

流强度和土表沉降。试验前后分别对土体测量含水量和十字板剪切强度。

1.3 试验方案

试验方案如表2所示。本文选取了沿模型桶深度均分1层(一层360 mm厚)、2层(每层180 mm厚)、3层(每层120 mm厚)的分层强夯土层厚度，总试验时间以T1试验时长为准。

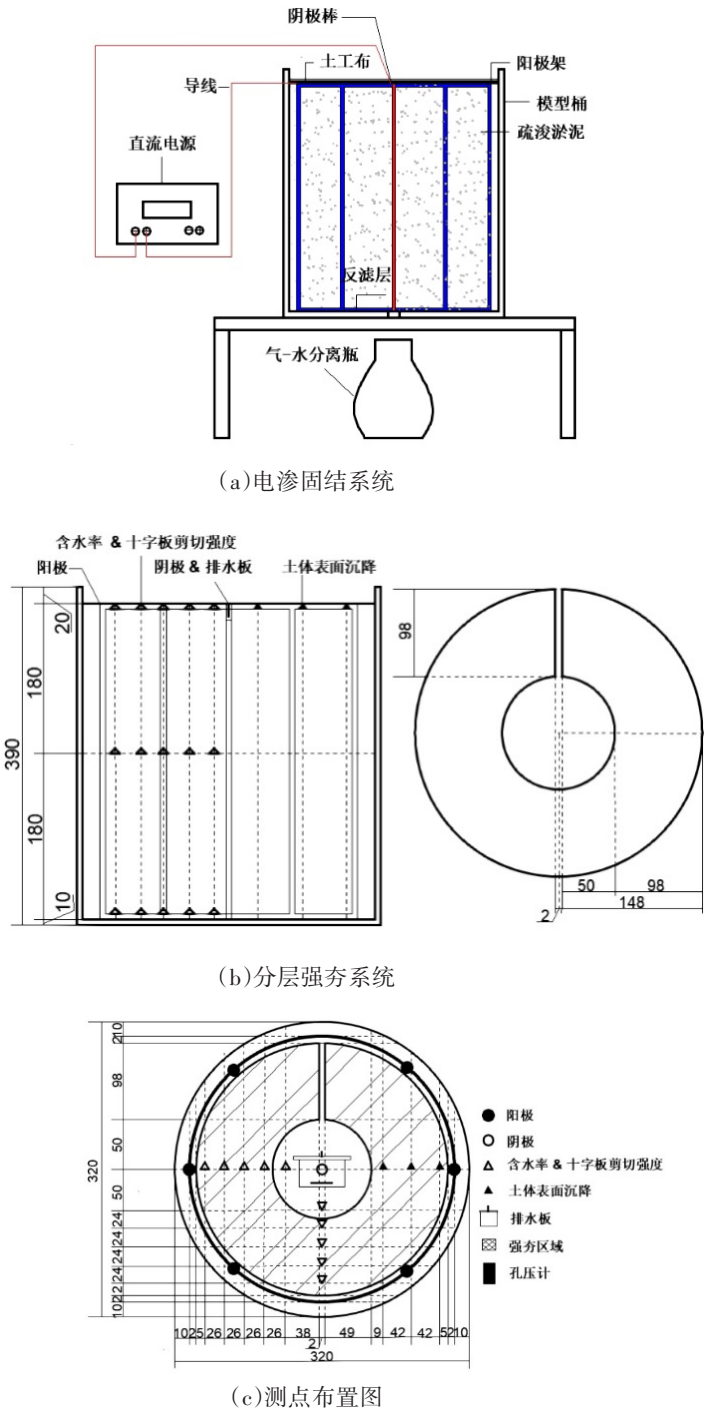


图1 试验装置示意图(单位:mm)

Fig.1 Schematic of test apparatus (unit: mm)

表 2 试验方案  
Table 2 Test schemes

试验组	处理模式	分层数	强夯启动时间	强夯遍数
T1	EO	0	—	—
T2	EO-LDC	1	24 h	6
T3	EO-LDC	2	24~96 h	3 和 3

为确保强夯总夯击能相同，将6遍强夯平均分配到各分层强夯试验组中，T2土层为1整层，在表面夯击6遍；T3分两层，在底层和顶层表面各夯击3遍；T4分3层，在底部、中部和顶部土表各夯击2遍。对于启夯时间，T2在试验开始24 h后，T3分别在24 h和96 h，T4在24 h、72 h和120 h。

1.4 试验步骤

在模型桶内放置阳极架，土样倒入桶后插入阴极棒，静置24 h。用导线连接阴极与阳极并外接电源，在土表铺设一层圆形土工布，避免夯锤直接接触土体。试验结束时取T1~T4阴极附近同一点处土样做电镜扫描分析，获得同一放大倍数的电镜图像。

2 试验结果与数据分析

2.1 排水量

图 2 为 T1~T4 试验组的排水量随时间变化关系

图。首先，由图中曲线可知，各组土体的排水量随时间不断增加，采用分层的强夯方式能使排水量急剧增大，试验结束时T1、T2、T3和T4的排水量分别为4.63 kg、5.0 kg、5.55 kg和6.35 kg。

其次，对比T1和T2~T4发现，强夯与分层强夯能促进排水效果，这是因为强夯的冲击作用使电渗固结产生的土体表面裂缝愈合，减小了土体电阻，使电渗固结效率得到提高。因此，T2、T3、T4电渗阶段的排水量高于T1，比T1分别高出7.99%、19.87%和37.15%。最后，通过比较T2、T3和T4电渗过程的排水量发现，分3层强夯联合电渗法与分2层、1层强夯联合电渗法以及单独电渗法相比，排水量分别增加了14.41%、30.6%和37.15%，这主要是因为分层强夯能对不同深度的土体表面进行夯击，使底部、中部土体因电渗固结而产生的裂缝弥合，比单层强夯更能提高土体的导电性，因而电渗固结的排水量也得到提高。说明分层强夯联合电渗法相比单层强夯联合电渗法获得了更优的排水效果，并且分层数越多，分层强夯对电渗固结排水的促进效果越显著。

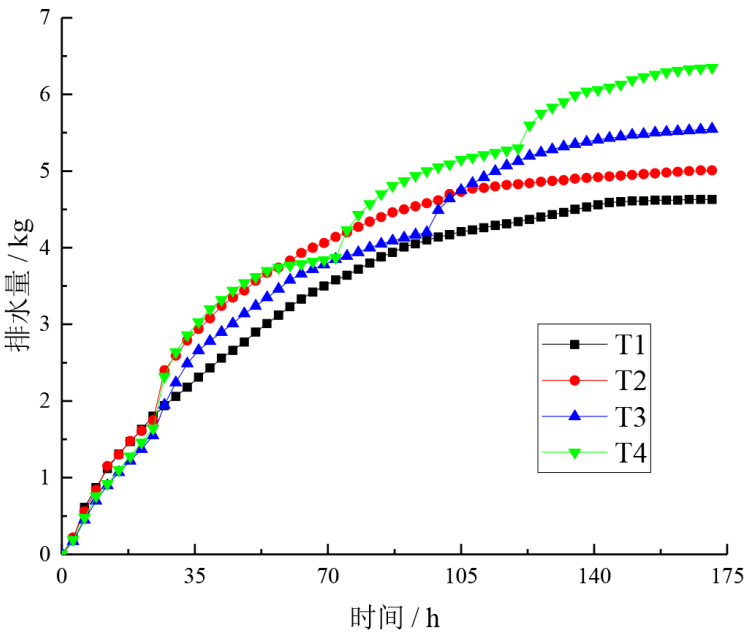


图 2 排水量随时间的变化关系图  
Fig.2 Variations of drainage volume with time

## 2.2 电流强度

图3为各组试验电流强度变化曲线。首先, T1、T2、T3和T4的电流强度大小随时间增加呈现先增大后减小的变化趋势。在电渗初期阶段, 由于土体内部形成排水通道, 土体与电极之间的界面电阻较低<sup>[16]</sup>, 因此电流强度逐渐增大。其次, 随着电渗试验进行, 电流达到峰值, 土体内自由水不断排出, 含水量和盐分含量不断降低, 阳极腐蚀导致界面电阻增大, 随后电流逐渐衰减, 最终趋于稳定, 这是因为失水较多的阳极区形成了硬壳层, 使土体电阻增大; 土体内不同部位失水程度有差异, 影响了土体电流的流通, 使得电流衰减加快<sup>[17]</sup>。

此外, 比较T1、T2、T3和T4电渗初期电流大小, 发现T1、T2比T3和T4电流强度大, 这是因为T1和T2未分层, 土体内自由水含量和离子含量多于T3和T4, 土体导电性更高, 因此初始电流更高。在电渗后期, 采用分层强夯联合电渗的T3和T4, 电流强度高于T1和T2的电流强度, 且最终趋于稳定值后也高于T1与T2, 说明分层强夯联合电渗法可有效增强电渗后期的电流强度。

## 2.3 土体表面沉降

由于电渗过程中土体发生开裂主要在阳极区域, 环形夯锤的夯击区域不含阴极区, 因此, 测点未选择阴极区。本试验设置了三个测点, 将测

量值平均后作为土表沉降值, 结果如图4所示。T1、T2、T3和T4的沉降值随时间逐渐增加, 最后趋于稳定, 分别为4.66 cm、5.09 cm、5.42 cm和5.85 cm。T1和T2在电渗初期沉降基本一致, 在T2启动强夯后, 土表沉降值在夯击时瞬间增大, 因为夯击施加正压力使得土体内部颗粒间形成的孔隙压缩。在电渗初期阶段, T3、T4分层强夯试验组由于土体数量少, 土中自由水和离子数量较低, 电渗固结过程较平缓, 沉降发展速率比T1、T2小。随着分层强夯上部土体的加入, T3、T4的沉降发展速率加快, 后续强夯引起的土表沉降突增使得沉降值大小高于T1、T2, 分层夯击使不同土层电渗固结排水后颗粒间的孔隙更均匀充分地压缩, 土体电阻更小, 导电性更好, 因此电渗固结效率增加、在后期沉降发展更明显。

## 2.4 含水量和十字板剪切强度

在图1(c)所示位置处进行十字板剪切试验并测量含水量, 将两个指标平均后分别绘制在图5和图6中。首先, 对比图5(a)和图6(a)可知, T3和T4的两指标沿深度方向的折线斜率相比T1和T2有明显区别。除T3外, 其余3组试验的表层土含水量低于深层土, 表层土十字板剪切强度高于深层土。采用分层强夯的T3与T4, 能使土体表面裂缝更充分愈合, 电渗效率提高, 因此含水量比T1和T2更低、十字板剪切强度比T1和T2更高。

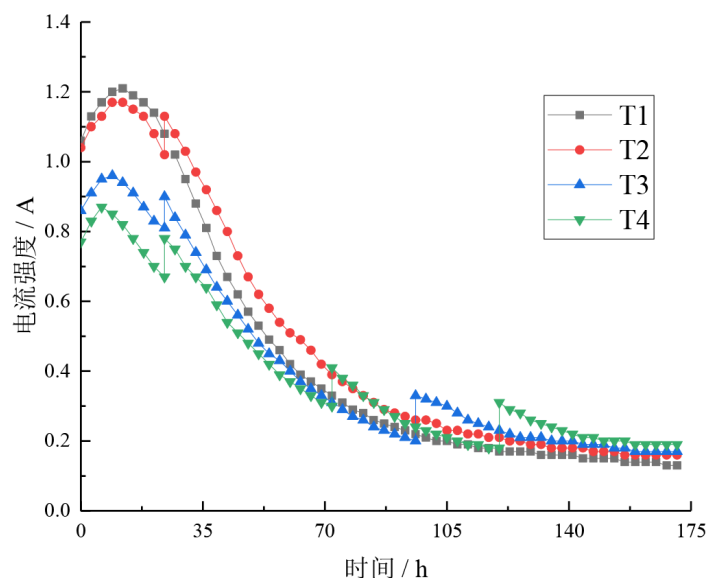


图3 电流强度随时间的变化关系图

Fig.3 Variations of current intensity with time

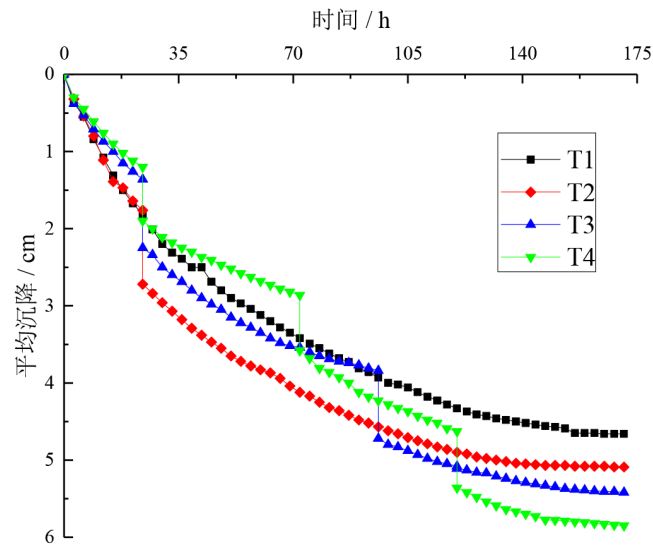
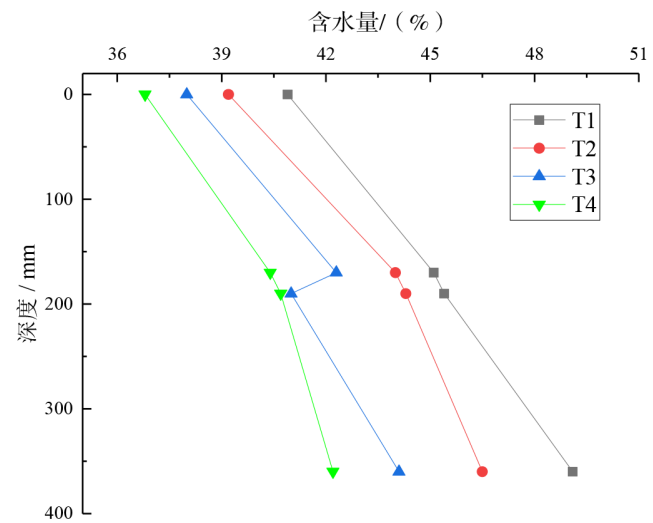
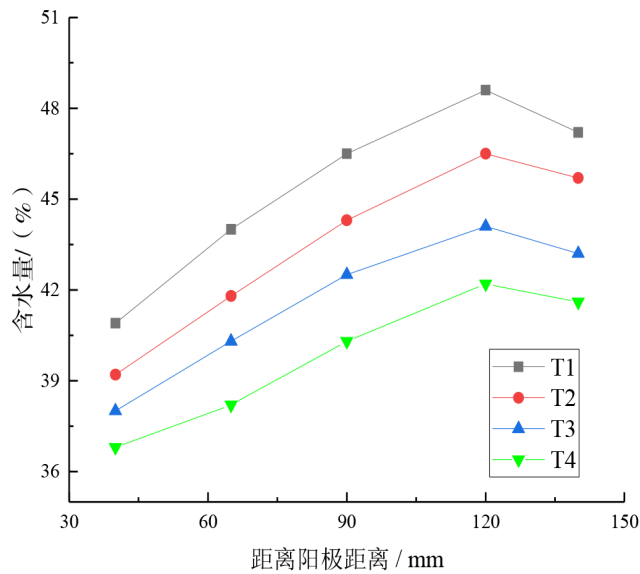


图4 土表沉降随时间的变化关系图

Fig.4 Variations of soil surface settlement with time



(a)



(b)

(a)沿深度方向分布;(b)沿水平方向分布

图5 试验后各组土体含水量

Fig.5 The soil water content of each group after the test

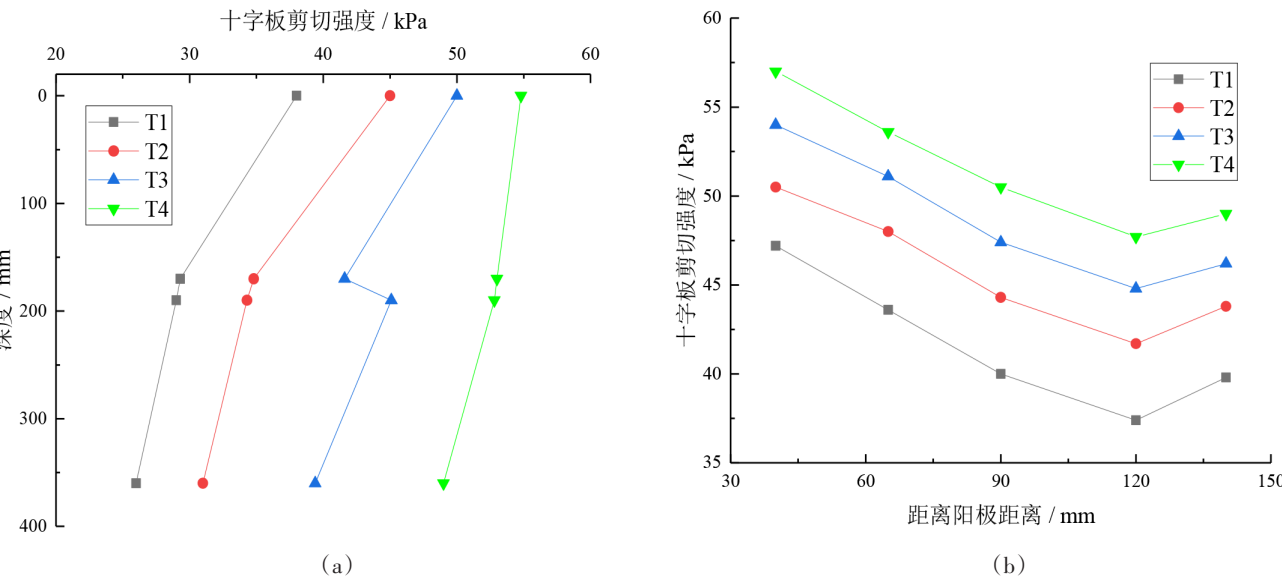
其次, 观察图 5(b)和图 6(b)可知, 离阳极越近, 含水量越低、抗剪强度更高。一方面, 因为电渗使得孔隙中自由水迁移并汇聚在阴极附近; 另一方面, 电化学角度上, 阴极区发生还原反应产生  $H_2$ , 气泡使土表出现凹陷和裂隙, 导致深层土自由水有效传递路径被裂隙阻隔, 造成的后果是阴极区自由水大量囤积。最后, 各组含水量分别为 43.5%、45.3%、41.5% 和 39.91%, 十字板剪切强度分别为 36.7 kPa、41.5 kPa、46.6 kPa 和 51.9 kPa。比较这些数据可知, 分层强夯联合电渗法处理疏浚淤泥的效果更好, 分层数越多, 可获得更低的含水量和更高的十字板剪切强度。

2.5 电镜扫描

采用真空冷冻干燥机和 Phenom Pure 扫描电子显微镜对土体细观结构分析。将各组距离阴极棒 20 mm、深度为 300 mm 处的土体取样后冷冻干燥, 用扫描电子显微镜拍摄土体切面图像, 扫描电镜拍摄图像放大倍数为 5000 倍(图片大小约为  $53.7\mu m \times 54\mu m$ , 19 像素/ $\mu m$ )。通过细观图像分析各试验组土颗粒分布差异, 各组试验各选取 3 张图片进行细观分析。由于图片数量过多, 文中仅展示各组试验中一张细观图像的分析流程、如图 7 所示, 其余图片计算结果如表 3 所示。图 7(a)、(b)、(c)、(d)为 T1~T4 阴极附近同一位置处的细观电镜图, 可以发现, 温州地区海底疏浚淤泥多呈板状或片状颗粒结构, 在电渗时颗粒间多以边-面形式接触, 小颗粒团聚成粗颗粒。T1 的土颗粒间存在

大孔隙, 颗粒分布松散, 这是因为电渗固结会导致土体开裂, 产生许多微裂缝, 降低电渗处理效果。T2 土颗粒间的接触较为紧密, 说明强夯的夯击能有效弥合土体裂缝, 提高土体整体性。T3、T4 处理后土颗粒间的接触更紧密, 效果好于 T2, 说明分层强夯能更有效地弥合内部微裂缝, 且 T4 的土体接触最为紧密, 土颗粒间几乎不存在大孔隙, 在分层强夯作用下土颗粒能相互靠拢形成稳固结构, 因此 T4 固结效果最优, 在宏观上则表现出更高的抗剪强度与承载力。

其次, 采用 Liu 等<sup>[18]</sup>开发的颗粒(孔隙)及裂隙图像识别与分析系统(PCAS)对扫描电镜图像的颗粒与孔隙进行识别和定量分析, 从细观角度分析比较各试验组的处理效果。PCAS 计算电镜扫描图像时以像素为基本单位, 计算结果可以统计出孔隙总面积、孔隙总数目、表观孔隙率、平均孔隙面积、概率熵和分形维数等参数。图 7(e)、(f)、(g)、(h)和(i)、(j)、(k)、(l)分别为 PCAS 处理扫描电镜图像的流程图。图 7(e)~(h)中黑色代表土颗粒, 白色代表孔隙区域。图 7(i)~(l)黑色部分代表土颗粒, 其余部分代表土中孔隙。采用 PCAS 对每张图像计算分析, 分析时选取各组试验 3 次细观分析结果的平均值, 结果如表 3 所示。由表 3 可知, T1、T2、T3 和 T4 的孔隙总面积、孔隙总数目、表观孔隙率和平均孔隙面积逐渐减小, 说明分层强夯联合电渗法比未分层强夯联合电渗的处理效果更好, 且分层数越多, 效果越好。



(a)沿深度方向分布;(b)沿水平方向分布  
图6 试验后各组土体十字板剪切强度  
Fig.6 The vane shear strength of each group of soil after the test

概率熵表示细观结构单元体的有序性，用表示，取值范围在0~1， $H_m$ 越小则孔隙排列越有顺序。T1、T2、T3和T4概率熵逐渐减小，说明T1的孔隙排列混乱，定向性不明显，而T2、T3、T4的孔隙排列逐渐有序，定向性逐渐明显，这是因为在电渗过程中土颗粒在原位相互接触形成牢固土骨架，土颗粒未发生明显移动，土体结构调整困难。T2由于未分层强夯的冲击作用，使土体内部动力固结，土颗粒更易发生转动和移动，逐步形成稳定结构。T4的土体孔隙排列则最有序，定向性最明显，说明分层强夯的使土颗粒发生了明显

的转动与移动，土体孔隙排序得到大范围调整，且使得排列更加有序。

分形维数可反映孔隙结构的复杂程度，分形维数越大，孔隙结构越复杂。由表3可知，T1的分形维数最大，说明在纯电渗处理下土颗粒未有明显运动，细颗粒原地凝聚成大颗粒，大颗粒间孔隙未被较好填充，孔隙大小不一，故孔隙结构复杂程度增加。而T3和T4的土体结构复杂程度降低，孔隙形状变得更加圆滑，细颗粒得以在粗颗粒形成的孔隙中填充，孔隙均一化程度提高，结构复杂程度降低。

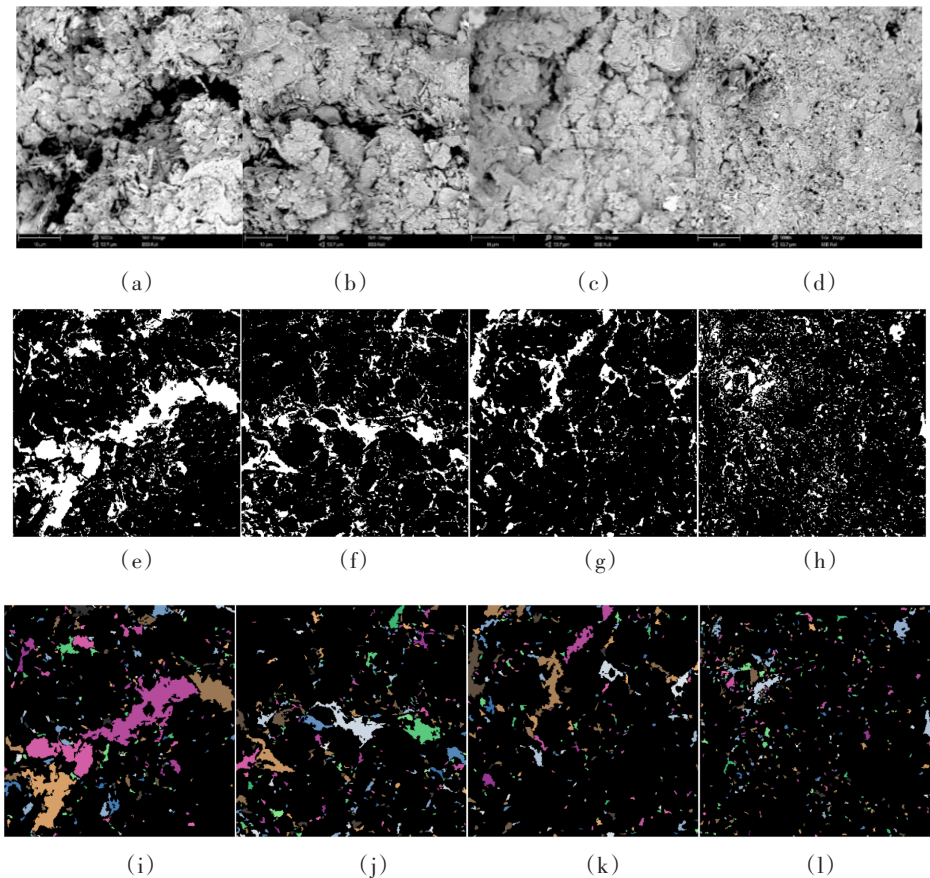


图7 各组土体阴极附近处SEM图像及PCAS处理流程图  
Fig.7 SEM image of soil near cathode and PCAS processing flow chart

表3 土体细观结构统计参数  
Table 3 Statistical parameters of soil mesostructure

样品组别	电镜图像	孔隙总面积/像素	孔隙总数目	表观孔隙率	平均孔隙面积/像素	概率熵	分形维数
T1	平均值	258 380	467	24.22%	590.51	0.9864	1.2837
T2	平均值	147 481	413	14.14%	356.99	0.9796	1.2617
T3	平均值	110 100	364	10.53%	304.21	0.9786	1.249
T4	平均值	72 517	360	6.94%	197.45	0.9759	1.2448

### 3 结论

(1)分层强夯联合电渗法可充分发挥分层强夯法与电渗法的优点,分层强夯对底层和回填后的上层疏浚淤泥均有较好的加固效果。

(2)分层数越多,分层强夯对电渗法固结疏浚淤泥的促进效果越好。

(3)分层强夯联合电渗法处理后的土体孔隙数量和平均孔隙面积小于未分层强夯联合电渗法,说明分层强夯法更好地使土体裂缝愈合,提高了土体整体性。

### 参考文献

- [1] Liu F, Li Z, Yuan G H, et al. Improvement of dredger fill by stepped vacuum preloading combined with stepped voltage electro-osmosis[J]. Marine Georesources and Geotechnology, 2021, 39(7): 822-831.
- [2] Liu J J, Lei H Y, Zheng G, et al. Improved synchronous and alternate vacuum preloading method for newly dredged fills: laboratory model study[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(08): 1-16.
- [3] 刘飞禹, 汤家郁, 袁国辉, 等. 纤维加筋优化电渗法处理疏浚淤泥的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(12): 2545-2552.
- [4] 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(03): 44-52.
- [5] 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.
- [6] Kaniraj S R. Soft soil improvement by electro-osmotic consolidation[J]. International Journal of Integrated Engineering, 2014, 6(02): 42-51.
- [7] 刘飞禹, 陶宇, 王军, 等. 分级真空预压联合电渗和强夯法试验[J]. 中国公路学报, 2020, 33(09): 168-179.
- [8] Leonards G A, Asce W, Holtz R D. Dynamic compaction of granular soils[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1980, 106(01): 35-44.
- [9] Menard L, Broise Y. Theoretical and practical aspect of dynamic consolidation[J]. Geotechnique, 1975, 25(01): 3-18.
- [10] 周健, 姚浩, 贾敏才. 大面积软弱地基浅层处理技术研究[J]. 岩土力学, 2005, 10: 164-167.
- [11] 周林禄, 苏雷, 邱志坚, 等. 基于 OpenSees 的砂土本构模型对比研究[J]. 地震工程学报, 2022, 44(1): 128-135.
- [12] 程超, 钟秀梅, 刘钊钊, 等. 饱和黄土动态液化和静态液化机理的差异性研究[J]. 地震工程学报, 2022, 44(1): 136-144.
- [13] 李水江, 汤家郁, 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/OL]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021: 1-8[2022-10-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20211125.1532.004.html>.
- [14] 李晓静, 李术才, 姚凯, 等. 黄泛区路基强夯时超孔隙水压力变化规律试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(09): 2815-2820.
- [15] 高有斌, 曾国海, 徐步兴, 等. 双控动力固结法加固软粘土地基的应用研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(06): 632-637.
- [16] 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(06): 1038-1053.
- [17] 刘飞禹, 张志鹏, 王军, 等. 分级真空预压联合间歇电渗法加固疏浚淤泥宏观微观分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(09): 1893-1901.
- [18] Liu C, Shi B, Zhou J, et al. Quantification and characterization of microporosity by image processing, geometric measurement and statistical methods: application on SEM images of clay materials[J]. Applied Clay Science, 2011, 54(01): 97-106.