

DOI: 10.11779/CJGE201702008

# 真空-电渗联合加固技术的固结试验研究

孙召花<sup>1,2</sup>, 余湘娟<sup>2</sup>, 高明军<sup>2</sup>, 吴坤<sup>1</sup>

(1. 南通大学建筑工程学院, 江苏 南通 226019; 2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 针对真空预压与电渗联合加固时存在水流方向相互干扰的问题, 在室内试验中开展真空预压与电渗不同联合方式对淤泥脱水效果的研究。试验结果表明: 真空预压与电渗异步加固时能够获得比其他联合方式更好的加固效果, 而真空预压与电渗交替加固的时间对加固效果也有显著的影响。若交替时间太短, 真空预压与电渗将不能充分发挥排水作用, 若交替时间太长, 真空预压与电渗所提供的能量将不能被充分利用。在现场实际应用中, 应根据实测排水量或排水速率的变化不断调整真空预压与电渗交替加固时间。

**关键词:** 真空预压; 电渗; 吹填淤泥; 固结试验

中图分类号: TU447

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)02-0250-09

**作者简介:** 孙召花(1987-), 女, 博士, 讲师, 主要从事软土地基处理等方面的研究。E-mail: huahadeshuijingyu@126.com。

## Experimental studies on vacuum preloading incorporated with electro-osmosis consolidation for dredger fill

SUN Zhao-hua<sup>1,2</sup>, YU Xiang-juan<sup>2</sup>, GAO Ming-jun<sup>2</sup>, WU Kun<sup>1</sup>

(1. School of Architecture Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for

Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The dewatering effect of dredger fill using the vacuum preloading incorporated with electro-osmosis in different ways is evaluated by implementing six laboratory tests. The test results show that the asynchronous consolidation effect of the vacuum preloading incorporated with electro-osmosis is better than that of the other tests. However, the vacuum preloading and electro-osmosis will not be able to give full play to the drainage effect if the alternate time is too short. Alternatively, the energy provided by the vacuum preloading and electro-osmosis will not be able to make full use if the alternate time is too long. There are some advantages when using the vacuum preloading and electro-osmosis asynchronous reinforcement. The alternate time of vacuum preloading and electro-osmosis has to be constantly adjusted according to the water discharge or drainage rate in engineering application.

**Key words:** vacuum preloading; electro-osmosis; dredger fill; consolidation test

## 0 引言

中国土地资源随着国民经济的迅速发展而变得日益紧张, 滨海、湖沼、河滩等土地资源难以利用的地区正通过吹填造地的方式在全国进行大面积的开发利用, 这类工程逐渐成为扩大用地的重要途径。经水力吹填而形成的沉积土, 具有天然含水率高、孔隙比大、压缩性高、渗透性小等特点, 由于土体结构受泥浆泵管径影响遭到不同程度的破坏, 以细小颗粒的形式缓慢沉积, 因而比天然软土具有更大的欠固结特性和可压缩特性<sup>[1]</sup>。真空预压法加固超软土地基不易发生失稳破坏, 因而该技术被广泛应用于大面积吹填淤泥处理工程中。吹填淤泥黏粒及胶粒含量较高, 吸附大量的结合水, 真空预压加载有限无法排出这部分水<sup>[2]</sup>, 并且真空度在吹填淤泥中存在启动时间, 并随土体深

度的增大而衰减<sup>[3]</sup>。吹填淤泥经真空预压加固后往往仅能形成一层硬壳层<sup>[4]</sup>, 硬壳层以下的土体排水固结困难, 不少学者提出施工工艺的改进措施<sup>[5-6]</sup>。龚晓南等<sup>[7]</sup>建议根据工程要求将真空预压法与其他工法相联合, 提高真空预压法的适用性和有效性。

电渗排水固结法成为考虑相联合的方法之一, 许多学者对其加固机理、计算理论、工程应用等方面进行了研究<sup>[8-10]</sup>。由于金属电极存在易腐蚀、耗电量大的缺陷, 限制了电渗法的发展, 电动土工合成材料(EKG)<sup>[11]</sup>的出现使电渗法进入新的发展阶段。导电塑料排水板(EVD)是EKG的一种, 由两面均设有

基金项目: 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室开放基金项目(201502); 江苏省住房和城乡建设厅科技项目(2015ZD79)

收稿日期: 2015-11-23

凹槽的基板、金属丝和滤膜等组成, 基板由导电塑料制成, 金属丝贯穿其中<sup>[12]</sup>。EVD 不易腐蚀, 具有导电、过滤及排水的功能, 因而不仅可以用作电极, 还可以作为排水及传递真空度的通道。

真空预压与电渗联合是一种有效的吹填土地基处理方法, 电渗法可以提高真空预压法的排水速率, 而真空预压法可以加速排出汇聚在电极处气体, 减少裂缝的产生, 使电极与土体紧密接触以降低界面电阻。然而, 在现场实践中真空预压与电渗存在联合方式不明确等问题, 房营光等<sup>[13]</sup>在室内试验中采用两种不同的真空预压与电渗联合方式处理碱渣土。王柳江等<sup>[14]</sup>指出真空预压法处理高含水率软土时浅层地基的加固效果较好, 因此与电渗法联合时将阴极设置于下部土层, 待真空预压将土体含水率降至 85%后, 再联同电渗法进行加固。吴辉等<sup>[15]</sup>建立了真空-电渗轴对称理论固结模型, 研究土体内超静孔压及地表沉降的变化。Peng 等<sup>[16]</sup>设计室内试验时考虑到真空预压与电渗引起水流方向不一致的问题, 但并未做深入分析。EVD 作为电极时阴、阳极均为排水边界, 电渗产生向阴极方向的水流, 当真空度沿排水板传递良好时, 将会干扰电渗水流方向, 降低能量利用率<sup>[17]</sup>。真空预压与电渗联合的目的在于充分结合两者的优点避免其不足, 因此, 应继续研究真空预压与电渗的最佳联合方式, 以获得更好的加固效果。本文针对实际工程中存在的问题, 在室内试验中研究真空预压与电渗的最佳联合方式, 以进一步分析真空-电渗联合加固法的机理。

1 试验设计

1.1 试验装置

试验装置主要由模型箱、电渗系统和真空系统等部分组成, 真空-电渗联合固结的试验装置如图 1 所示。模型箱的尺寸为 230 mm×160 mm×170 mm, 电渗系统由电极、直流电源及万用表等组成, 阳极和阴极均采用 EVD, EVD 通过导线连接直流电源。所用直流电源为兆信 RXN-605D 型 DC 电源, 该电源可以进行稳压或稳流输出, 最大输出电压为 60 V, 最大输出电流为 5 A, 并具有数字显示功能, 可以显示电路中的电流和电压, 必要时在线路中连接万用表用于测量电路中的电流或电压。真空排水系统由砂垫层、密封膜、汽水分离瓶、汽油分离瓶及真空泵等通过 PU

气管连接组成。真空泵采用抽气速率为 7.2 m<sup>3</sup>/L, 功率为 250 W, 极限真空度为 0.1 MPa 的飞越 FY-2C-N 型真空泵, 并通过电力控制箱连接电源。汽水分离瓶表面具有刻度可以测量排出水的体积, 为监测真空系统中的真空度, 在汽水分离瓶上连接有电接点真空表。

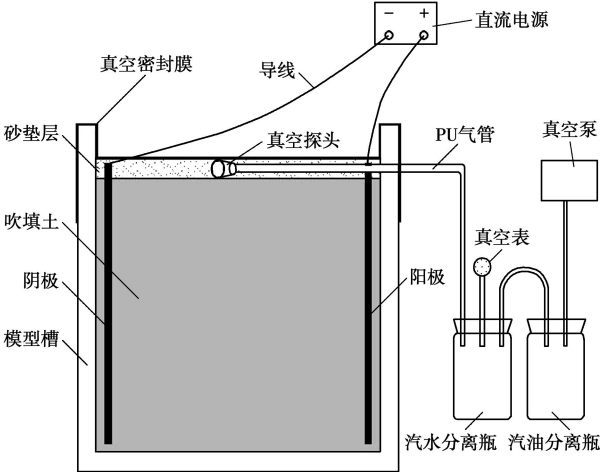


图 1 真空-电渗联合加固试验装置图

Fig. 1 Schematic configuration of experimental cell

土样来自于湖北省鄂州市离岛吹填土地基场地, 原状土的基本物理力学性质指标如表 1 所示。用于试验的土样是由原状土经烘干、碾碎, 配置成目标含水率满足试验要求的重塑土样。

1.2 试验方案

为了探索真空预压与电渗以何种方式联合可以获得更好的加固效果, 设计试验方案如表 2 所示, 对 6 组同等质量的土样分别开展电渗 (TS1)、真空预压 (TS2)、真空-电渗联合固结试验。真空-电渗联合固结试验分为 4 组, 包括 TS3 试验对土样进行真空与电渗同步加固; TS4 试验对土样先真空预压至不排水, 再真空与电渗同步加固; TS5 和 TS6 试验采用真空与电渗交替加固, 交替时间分别为 10, 100 min。为避免土体在真空-电渗联合作用下产生较大的沉降和侧向位移对 EVD 造成弯曲或折断等影响, 本试验设计真空度为 80 kPa。电渗时设置电源输出电压恒定为 50 V, 每组试验固结总时间不等, 以总排水量不再增加作为试验结束条件。试验结束后测定土样的含水率, 并使用 PS-MPT-A 型微型贯入仪测定土体的液性指数, 并粗估土的承载力和压缩系数。

表 1 模型试验土样的基本物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical properties of dredger fill before treatment

比重	渗透系数/(cm·s <sup>-1</sup> )	含水率	液限	塑限	塑性指数	粒组含量/%		
		/%	/%	/%		<0.005	0.05~0.005	0.1~0.05
2.72	4.91×10 <sup>-7</sup>	124	58.2	34.0	24.2	46.5	51.4	2.1

表 2 真空-电渗联合固结试验方案

Table 2 Test schemes of vacuum preloading incorporated with electro-osmosis

试验编号	试验方案	土样质量/g	初始含水率/%	电压/V	真空度/kPa
TS1	电渗	7165.5	69.2	50	0
TS2	真空预压	7165.5	71.9	0	80
TS3	真空与电渗同步加固	7165.5	69.7	50	80
TS4	先真空预压至不排水， 再真空与电渗同步加固	7165.5	72.0	50	80
TS5	真空与电渗交替加固（10 min）	7165.5	71.6	50	80
TS6	真空与电渗交替加固（100 min）	7165.5	70.8	50	80

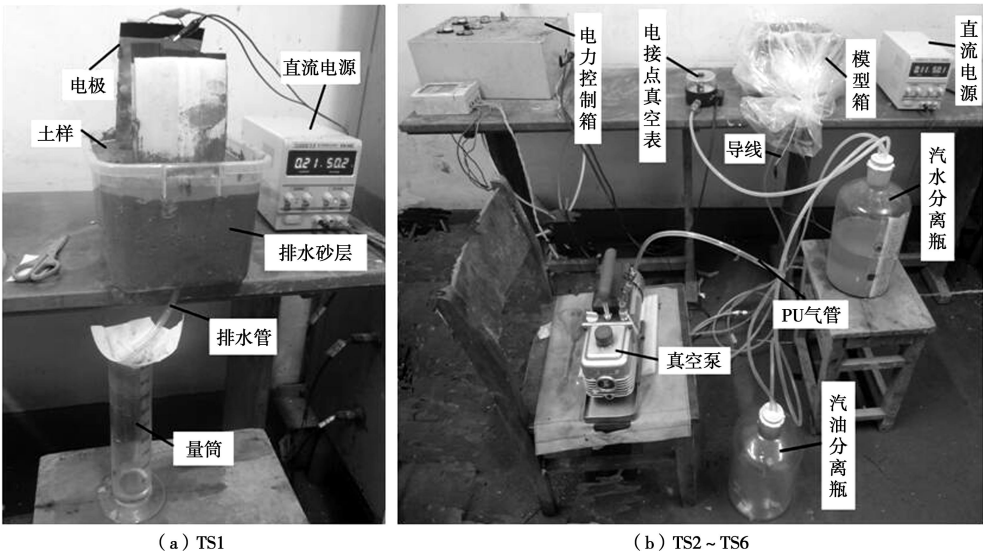


图 2 试验布置全景图

Fig. 2 Test arrangement

1.3 试验步骤

(1) 配置目标含水率为 70%的土样，静置 24 h 后测量其实际含水率，将配置好的土样分层装入模型箱，并挤压密实，每组试验土样质量均为 7165.5 g。由于 TS1 试验为单纯的电渗试验，其排水路径与其他试验不同，需在阴极一侧设置竖向排水砂层，并在砂层下的模型箱底部设置排水孔，土样高为  $H_1=15\text{ cm}$ ，试验全景图如图 2 (a) 所示。其他组试验在模型箱的一侧上部位置预留有一小孔以连接真空排水系统，土样高度均约为 11.8 cm，土样表面覆盖 1 cm 厚的砂垫层，试验布置如图 2 (b) 所示。由于 TS2 试验为单纯的真空预压试验，对于插入土体中的 EVD 不需要通过导线连接直流电源。

(2) TS1~TS6 试验均采用 EVD 作为排水体或电极，EVD 插入土体前底端做封口处理，以防止泥土挤入板槽堵塞排水通道。除 TS2 试验以外的试验，均需用导线将电极与电源连接，电极与导线的连接方法

与现场试验<sup>[17]</sup>中的相同。

(3) TS2~TS6 试验的真空排水系统布置。PU 气管的一端通过模型箱预留的小孔插入模型箱内，通过简单处理后作为真空探头埋设于砂垫层中，真空探头既可传递真空度，又可防止抽真空过程中将砂粒吸入 PU 气管，PU 气管的另一端连接汽水分离瓶。再使用两段 PU 气管分别将汽水分离瓶与汽油分离瓶、汽油分离瓶与真空泵连接，并注意连接位置处的密封问题，防止漏气。真空泵通过电力控制箱连接电源，模型箱通过真空密封膜及塑料薄膜进行密封。

(4) 试验过程中，每隔一定时间记录每组试验的排水量及电路中的电流，待排水量不再增加时停止试验。真空泵和直流电源均停止通电后，拆除真空排水系统及电路。然后，分别测量模型箱内土样表层、中层和底层距阴极不同距离处的土体含水率，并使用 PS-MPT-A 型微型贯入仪测定土体的液性指数并粗估土的承载力和压缩系数，每层土样含水率取样点

(W1~W9)及微型贯入仪测定点(A1~A9)分别如图3所示。

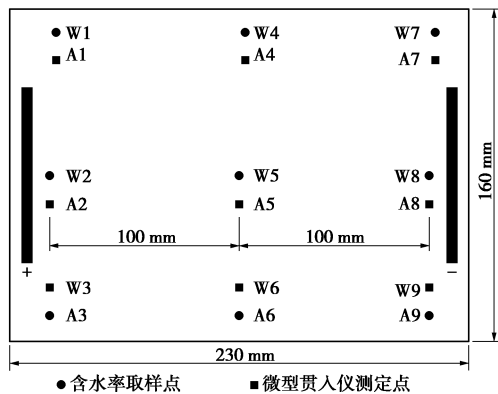


图3 含水率和微型贯入仪测定点平面分布示意图

Fig. 3 Location of measuring points for moisture content and mini-penetrometers

## 2 试验结果与分析

### 2.1 排水量

各组试验的累计排水量曲线如图4所示。TS1的曲线为电渗固结排水曲线, 相比其他组试验排水时间较长, 这是由于在电渗作用下不断聚集到阴极处的水需先渗入到一侧的砂层中再靠重力作用从模型箱底部的小孔排出。单纯电渗法处理软土地基正是存在这样一个难点即不易收集汇聚在阴极处的水。TS2与TS4的前半段曲线较吻合, 均为土样在真空预压作用下的排水曲线。TS4的后半段曲线为真空预压联合电渗一起加固, 然而在原有基础上仅排出74.6 mL的水, 效果并不理想。TS3曲线表明土样在真空预压和电渗同步加固下排水量超过真空预压试验, 试验时间最短, 然而其累计排水量却不是最大的, 预示着真空预压与电渗同步加固可能存在渗流方向相互影响的问题, 从而降低了排水量。TS5和TS6是真空预压与电渗交替加固土体的排水量曲线, 交替时间分别为10 min和100 min, 可见, 由于TS5真空预压与电渗交替时间太短, 使得两种方法或其中的一种方法不能够充分发挥排水作用, 而TS6可以获得更好的排水效果。

### 2.2 含水率分布

试验结束后, 将土体沿深度方向分为表层、中层和底层, 每层如图3所示取9个点测含水率, 并分别对W1~W3、W4~W6及W7~W9测得的含水率求平均值得到图5所示试验后土体含水率分布。经电渗处理后的TS1土样, 阳极附近土体含水率明显降低, 阴极附近土体含水率变化却不大, 整个土体的含水率沿两电极方向近似线性分布, 含水率分布极度不均匀。

TS2土样经过真空预压加固后, EVD附近的土体含水率明显降低, 而中间部位的土体含水率略高, 土体中的含水率分布比较均匀, 但与其他组试验相比, 其土体的平均含水率仍偏高。TS3将真空预压与电渗联合后同步对土体进行加固, 相比TS1, 土体含水率分布更为均匀, 相比TS2, 土体的平均含水率降低约10%。

TS4与TS2的含水率分布表明真空预压至土体不再排水后, 再联同电渗法一起加固仍能使土体继续排水, 从而降低土体的含水率, 这与房营光等<sup>[13]</sup>的结论一致。TS4比TS3的土体平均含水率降低约8%, 进一步表明真空预压与电渗同步加固存在渗流方向相互影响的问题。为了避免这一问题, 对土体进行真空预压与电渗交替加固, 由于TS5交替时间过短, 使得真空预压与电渗不能够充分发挥作用, 其土体平均含水率比TS4的土体平均含水率要高约2%。而当延长交替时间后, TS6的土体平均含水率降到最低约为40%, 而且分布相对比较均匀, 因此可以得出TS6试验的加固效果最好。

TS6试验结束后, 土体的外观如图6所示, 在砂垫层表面可以观察到明显的分界线, 在图中用弧线划分, 阳极区砂垫层呈干燥状态, 而阴极区的砂垫层比较潮湿, 与图5(f)中的含水率反映情况一致。该现象表明, 在阳极区电渗对土体含水率的降低发挥了主要作用, 而阴极区土体含水率的降低情况则完全取决于真空预压在膜内外形成的相对负压的大小。

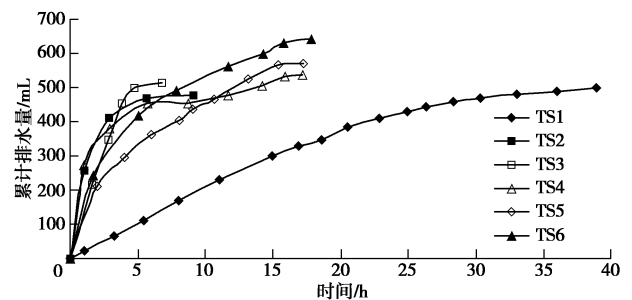
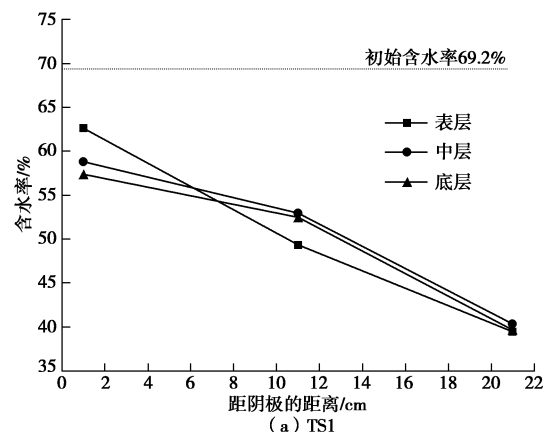


图4 各组试验排水量曲线

Fig. 4 Drainage curves of six tests



(a) TS1

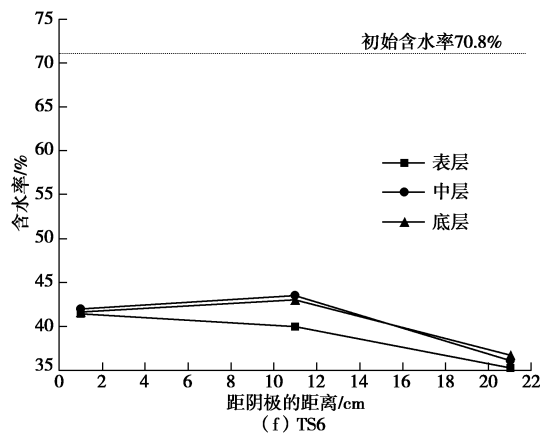
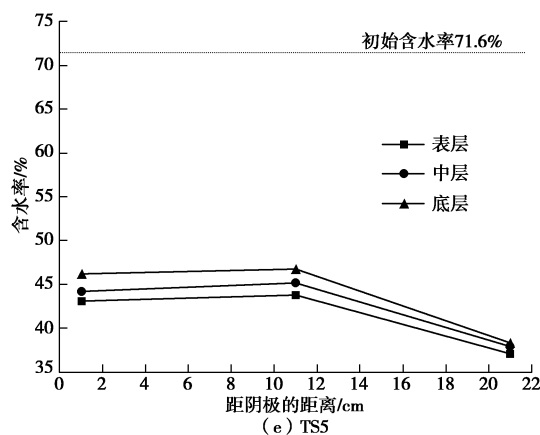
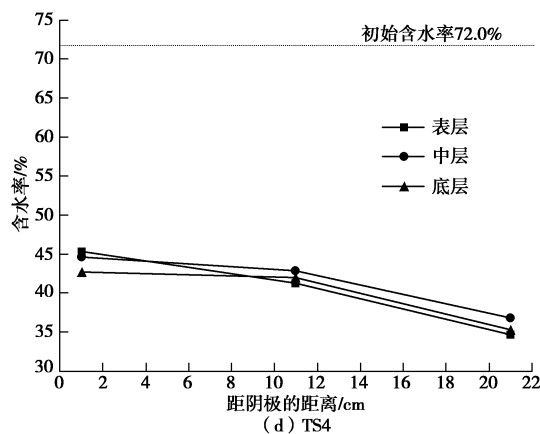
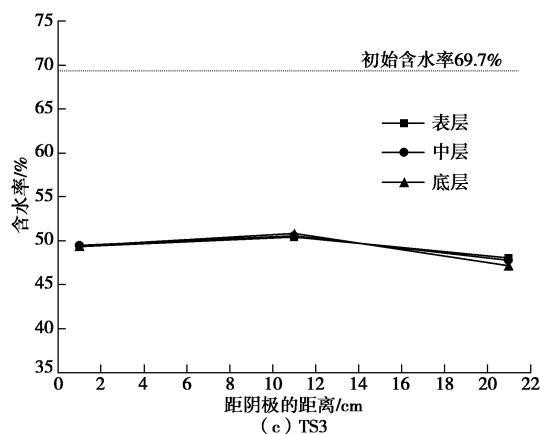
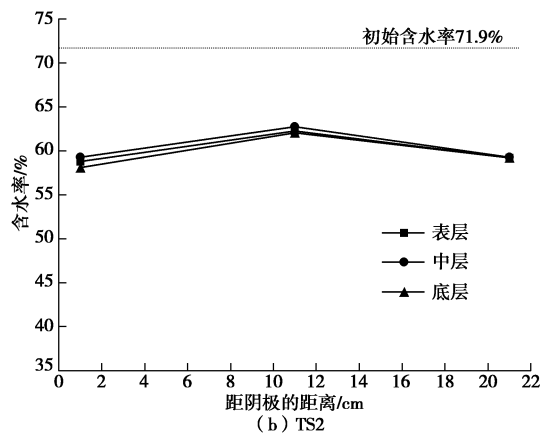


图 5 试验后土体含水率分布

Fig. 5 Distribution of moisture content of soil after treatment

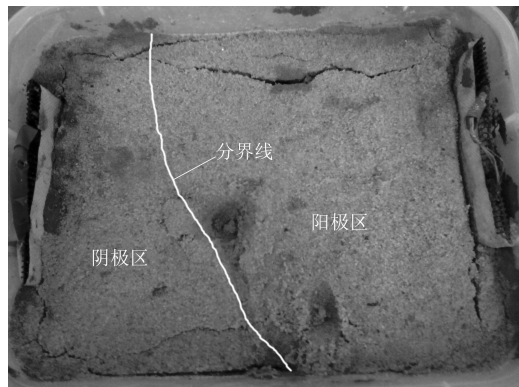
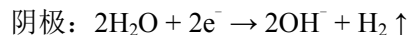
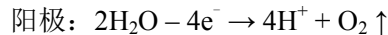


图 6 TS6 试验后土体外观图

Fig. 6 Appearance of soil surface of TS6

由于各组试验的土样质量及初始含水率已知，可以根据各组试验的累计排水量反算试验后土体平均含水率，再与实测土体平均含水率进行对比，列于表 3 中。可见，TS2 试验的反算与实测加固后土体含水率几乎没有差异，表明土体在真空预压作用下含水率的降低基本取决于真空压力下抽出水的量。而 TS1 土样在单独电渗作用下的反算与实测加固后土体含水率相差 7.3%，表明除了排出的水外还有其他因素影响了土体含水率，如在阴、阳极处发生的电解水反应：



同时，对土体通电过程中，由于传导电流将电能转换为热能使土体发热，也会引起土体中部分水分的蒸发。TS4~TS6 的反算与实测加固后土体平均含水率差异相比 TS1 要大得多，这是由于在真空荷载作用下，由电解作用产生的聚集在电极处的氢气和氧气以及在热力作用下形成的水蒸气更容易被排出，从而增加了电极与土体的接触面积，降低了界面电阻，进一步加速了土体中的水以气体的形式排出。因此，土体经过电渗或真空联合电渗处理后的总排水量  $Q$  应按





表 3 试验反算与实测含水率差异

Table 3 Differences of calculated and measured moisture content

试验 编号	土样质 量/g	初始含 水率/%	土中水的 质量/g	土粒的质 量/g	排出水的 质量/g	反算加固后土体 平均含水率/%	实测加固后土体 平均含水率/%	反算与实测含 水率差异/%
TS1	7165.5	69.2	2930.6	4234.9	507.0	57.2	49.9	7.3
TS2	7165.5	71.9	2997.1	4168.4	488.1	60.2	60.0	0.2
TS3	7165.5	69.7	2943	4222.5	514.7	57.5	49.3	8.2
TS4	7165.5	72.0	2999.5	4166.0	542.6	59.0	41.2	17.8
TS5	7165.5	71.6	2989.8	4175.7	532.0	58.8	43.3	15.5
TS6	7165.5	70.8	2970.2	4195.3	642.8	55.5	40.6	14.9

下式计算:

$$Q = \frac{\rho V_0}{1 + w_0} (w_0 - w') \quad , \quad (1)$$

式中,  $V_0$  为土样初始体积 ( $\text{cm}^3$ ),  $\rho$  为土的密度 ( $\text{g/cm}^3$ ),  $w_0$  为土的初始含水率,  $w'$  为实测加固后土体含水率。

2.3 耗电量

各组试验的耗电量与排水量的关系如图 7 所示。从图中可知, 耗电量大体以排水量为 300 mL 时为界限, 当排水量低于 300 mL 时各组试验的耗电量曲线比较吻合, 消耗很少的能量即可排出约为总排水量一半的水, 而当排水量高于 300 mL 以后, 各组试验的耗电量表现出明显的差异。随着土体含水率的不断降低, 排水越来越困难, 消耗的电量也逐渐升高。TS1 土体在电渗 50 V 稳压作用下, 由于土体中的电流始终低于 1 A, 因此该组试验虽然历时最长耗电量却最低为 0.33 kWh。TS2 试验使用功率为 250W 的真空泵进行真空预压, 总耗电量为 2.67 kWh。TS3、TS5 曲线与 TS6 的前段曲线比较吻合, TS6 比 TS3、TS5 后续多消耗的能量能够继续排出更多的水。在 TS3~TS6 试验中, 由于电渗电流较小, 电渗耗电量并不大, 而真空预压的耗电量占总耗电量的比重较大。由于 TS4 真空预压贯穿整个试验过程, 其排水加固时间与 TS5、TS6 相近, 比 TS2、TS3 的加固时间长约 10 h, 如图 4 中所示, 因而 TS4 的耗电量最大, 为 5.5 kWh, 尤其在试验后期耗电速率急速上升, 显然已不经济。

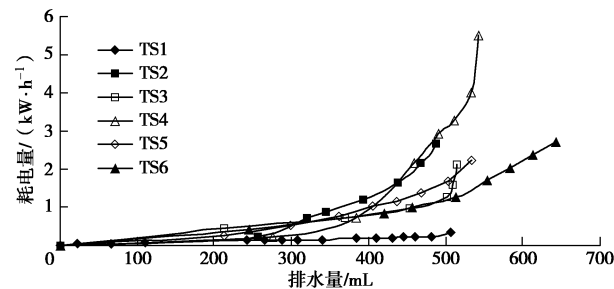


图 7 耗电量与排水量关系图

Fig. 7 Relationship between power consumption and water discharge

2.4 液性指数、承载力与压缩系数分布

PS-MPT-A 微型贯入仪为一种便携式土工试验仪器, 适用于原位或室内测定一般黏性土、软土、夯实土、红黏土及黄土的液性指数并粗估土的承载力, 如图 8 所示。它由 3 只不同力度的测力计和 3 只不同规格的测头组成, 测力计利用弹簧的变形进行压力测量, 试验前在三等标准测力计上进行了标定, 测力计精度优于  $\pm 5\%$ , 力度分别为 20, 40, 60 N; 3 只不同规格的测头分别为小截面圆柱形测头 (A)、大截面圆柱形测头 (B) 以及 300 圆锥形测头 (C), 以满足不同土质的测试要求。本试验采用小截面圆柱形测头 (A), 测头规格为  $0.3 \text{ cm}^2$ , 贯入深度为 6 mm。通过将测头匀速地贯入土内至测头上刻线与土面接触为止, 贯入时侧杆应与被测土表面垂直, 读取贯入阻力  $P_l$  值。每次贯入试验的平行试验不宜少于 3 次, 将平行试验中偏差大的读数剔除, 以其余读数的平均值作为试验结果; 贯入时应避开试样中硬度包含物和含有虫孔裂隙的部位, 贯入点与试样边缘的距离以及同一试样上的平行试验贯入点之间的距离不宜小于 3 倍测头直径, 试样厚度不应小于 3 倍测头直径。根据最终所测得的贯入阻力  $P_l$  值, 得到被测土的液性指数  $I_L$ 、承载力  $T$  及压缩系数  $a_{1-2}$  的分布, 如表 4 所示。

液性指数是判断土的软硬状态, 表示天然含水率与界限含水率相对关系的指标。由表 4 可知, 阳极附近土体的液性指数最低, 越往阴极液性指数越大, 与图 5 中对应试验的含水率分布呈现出类似的变化规律。利用液塑限联合测定仪对微型贯入仪所测得的结果进行验证, 两种方法得到的液性指数比较接近, 因而可以使用微型贯入仪测定土体的液性指数并粗估土的承载力。TS6 试验在各位置处的液性指数满足  $0.5 \leq I_L \leq 1$ , 土体处于软塑状态。而 TS4、TS5 试验在阴极附近的液性指数均大于 1, 土体处于流动状态。

土体的承载力  $T$  分布表明 3 组试验土体的承载力均从阳极到阴极近乎线性递减, 并且 3 组试验在阳极附近土体的承载力相差不大, 越往阴极方向差异越大。TS6 的承载力大于 TS4 和 TS5, 加固效果更好。

表 4 试验后土体液性指数、承载力及压缩系数分布

Table 4 Liquidity indices, bearing capacities and compression coefficients of soil after tests

位置	贯入阻力/MPa			液性指数			承载力/kPa			压缩系数/(MPa <sup>-1</sup> )		
	TS4	TS5	TS6	TS4	TS5	TS6	TS4	TS5	TS6	TS4	TS5	TS6
阳极附近	5.8	5	6.9	0.56	0.60	0.49	175	170	180	0.19	0.2	0.17
阴极附近	1	1	1.3	1.03	1.05	0.93	100	80	120	0.52	0.8	0.4
中间区域	1.6	0.9	2.3	0.97	1.05	0.79	135	120	145	0.33	0.4	0.29



图 8 PS-MPT-A 型微型贯入仪

Fig. 8 PS-MPT-A mini-penetrometer

微型贯入仪生产厂家采用小截面圆柱形测头(A)的贯入仪对不同软黏土样进行了大量贯入试验(图8),并在贯入点取土样测其压缩系数,最终总结出所测得的土体贯入阻力 $P_t$ 值与压缩系数 $a_{1-2}$ 存在如下关系:

$$a_{1-2} = 0.119(P_t)^{-0.638}, \quad (2)$$

式中, $a_{1-2}$ 为土体在 100, 200 kPa 范围的压缩系数(MPa<sup>-1</sup>), $P_t$ 为贯入阻力(MPa)。TS4 试验结束后,分别在阴、阳极附近进行贯入试验,并在贯入点取土样进行压缩试验,发现贯入阻力 $P_t$ 值与压缩系数 $a_{1-2}$ 近似满足上式,因而在本文中采用上述关系式换算出三组试验土体压缩系数的分布,见表 4,土体压缩系数仍然是在阳极处较小,越往阴极越大。TS6 的土体压缩系数满足  $0.1 \text{ MPa}^{-1} < a_{1-2} < 0.5 \text{ MPa}^{-1}$ ,土体属于中压缩性土,而 TS4、TS5 阴极附近土体的压缩系数  $a_{1-2} > 0.5 \text{ MPa}^{-1}$ ,土体仍属于高压压缩性土。三组试验在阳极附近的压缩系数比较接近,而在阴极附近的压缩系数差异较大。

3 工程应用建议

通过以上对比分析发现真空预压与电渗交替加固相比其他联合方式效果更好,由电渗提供水平向的排水动力,将地基中的水向阴极方向运移,真空预压提供竖向的排水动力,将阴极附近土体中的水排出地表。然而,若交替时间较短,真空预压或电渗将不能够充分发挥排水作用;若交替时间太长,则不能够充分利用真空预压与电渗提供的能量,从而消耗过多的电能。大面积现场工程应用中,真空预压与电渗交替加固的

时间应根据排水量或排水速率的变化来确定,并随着加固时间的延长不断调整。

对于某一吹填土地基而言,应首先开启真空泵将地基表面积水排出,这部分水容易排出耗能较低,待排水速率或排水量明显降低后,停止抽真空开始电渗,当电极正方形布置时,经过时间 $t_e$ 可计算出电渗排至阴极附近的水量为

$$Q_e = (2n_1 + 3n_2 + 4n_3 + 6n_4)k_e i_e A t_e, \quad (3)$$

式中, $k_e$ 为电渗透系数(cm<sup>2</sup>/s·V),可近似取  $5.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s} \cdot \text{V}$ <sup>[8]</sup>, $i_e$ 为电势梯度(V/cm), $A$ 为一对电极之间的通电截面积(cm<sup>2</sup>)。笔者<sup>[18]</sup>在现场试验中对具有多组电极的场地进行电渗试验,收集阴极处排水,发现相邻电极之间存在相互影响,按阴极所处的位置共分为四种情况,如图 9 所示,当阴极位于角点时,有两根阳极对其电渗排水有贡献,如图中阴极 i 所示,同样阴极 ii, iii, iv 分别受到三根、四根、六根阳极的影响,因而实际形成的电路回路数为  $2n_1 + 3n_2 + 4n_3 + 6n_4$ ,其中 $n_1$ 为阴极 i 的个数, $n_2$ 为阴极 ii 的个数, $n_3$ 为阴极 iii 的个数, $n_4$ 为阴极 iv 的个数。

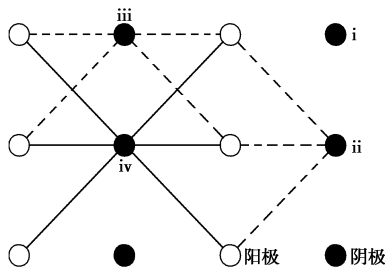


图 9 相邻电极之间的相互影响

Fig. 9 Influences from adjacent electrodes

随后,停止电渗开始抽真空,按照单井理论,可求得经过时间 $t_v$ 收集到真空预压的排水量为

$$Q_v = 2.72n \frac{k_h (H^2 - h_0^2)}{\lg \frac{R}{r_0}} t_v, \quad (4)$$

式中, $k_h$ 为吹填土地基的径向渗透系数(cm/s), $H$ 为原地下水位(m), $h_0$ 为真空预压区内下降后地下水位(m), $R$ 为 EVD 在真空预压作用下的影响半径(m), $R$ 与外加荷载大小、土体物理力学性质及 EVD 排水



特性等因素有关, 应根据现场工况在室内试验中对 EVD 不同布设间距的土体进行真空预压试验以确定;  $r_0$  为 EVD 的等效半径 (m)。令  $Q_e = Q_v$ , 得到  $t_v$  与  $t_e$  之间的关系为

$$t_v = \frac{k_e i_e A}{2.72 k_h (H^2 - h_0^2)} \lg \frac{R}{r_0} t_e \quad (5)$$

可根据电渗过程中通电参数的变化确定电渗通电时间  $t_e$ , 然后根据上式确定真空预压的抽真空时间  $t_v$ 。也可根据真空预压排水量或排水速率的变化来确定  $t_v$ , 进而确定  $t_e$ 。

## 4 结 论

针对基于 EVD 的真空预压与电渗同步加固软基存在的问题, 分别开展了电渗、真空预压与真空-电渗等六组室内模型试验, 详细介绍了试验装置及试验步骤, 并对试验数据进行了系统分析, 得出以下结论:

(1) 真空-电渗联合加固吹填淤泥相比电渗法与真空预压法单独作用, 能够缩短加固时间, 而且可以排出更多的水, 而真空预压与电渗以不同的联合方式加固效果相差很大, 相比而言, 真空预压与电渗交替加固时间为 100 min 时的加固效果与其他组试验相比具有明显的优势。

(2) 真空预压试验反算与实测土体含水率几乎没有差异, 表明真空预压法基本通过排水的方式降低土体含水率; 而电渗试验反算与实测土体含水率的差异达 7.3%, 这是由于电渗法在阴阳极处发生电解水反应, 并且土体发热也会引起水分蒸发; 将电渗法与真空预压法联合后差异达 14.9% 以上, 这是由于真空预压使电渗过程中电解水及水分蒸发产生的气体更容易排出。

(3) 实际工程应用中, 建议采用真空预压与电渗交替加固, 交替加固时间可根据真空预压与电渗产生相同的排水量所需的时间关系来确定, 可视具体工期调整该时间, 若工期要求紧, 可适当提高真空预压与电渗的交替时间。

## 参考文献:

- [1] 彭涛, 武威, 黄少康, 等. 吹填淤泥的工程地质特性研究[J]. 工程勘察, 1999(5): 3 - 7. (PENG Tao, WU Wei, HUANG Shao-kang, et al. Research on engineering geologic properties of blown filled muck[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 1999(5): 3 - 7. (in Chinese))
- [2] 鲍树峰, 娄炎, 董志良, 等. 新近吹填淤泥地基真空固结失效原因分析及对策[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(7): 1350 - 1359. (BAO Shu-feng, LOU Yan, DONG Zhi-liang, et al. Causes and countermeasures for vacuum consolidation failure of newly-dredged mud foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(7): 1350 - 1359. (in Chinese))
- [3] 朱群峰, 高长胜, 杨守华, 等. 超软淤泥地基处理中真空度传递特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1429 - 1433. (ZHU Qun-feng, GAO Chang-sheng, YANG Shou-hua, et al. Transfer properties of vacuum degree in treatment of super-soft muck foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1429 - 1433. (in Chinese))
- [4] 应舒, 高长胜, 黄家青. 新吹填淤泥地基浅层处理试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 32(12): 1956 - 1960. (YING Shu, GAO Chang-sheng, HUANG Jia-qing. Experimental study on surface-layer improvement of soft foundation filled by newly dredged silt[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 32(12): 1956 - 1960. (in Chinese))
- [5] CHAI J, MIURA N, BERGADO D T. Preloading clayey deposit by vacuum pressure with cap-drain: analyses versus performance[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26(3): 220 - 230.
- [6] 金小荣, 俞建霖, 龚晓南, 等. 真空预压部分工艺的改进[J]. 岩土力学, 2007, 28(12): 2711 - 2714. (JIN Xiao-rong, YU Jian-lin, GONG Xiao-nan, et al. Improvement of partial technology for vacuum preloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(12): 2711 - 2714. (in Chinese))
- [7] 龚晓南, 岑仰润, 李昌宁. 真空排水预压加固软土地基的研究现状及展望[C]// 地基处理理论与实践—第七届全国地基处理学术讨论会论文集. 兰州: 中国水利水电出版社, 2002: 3 - 7. (GONG Xiao-nan, CHEN Yang-run, LI Chang-ning. Actuality and expectation in the research of vacuum preloading reinforcement of soft foundation[C]// Theory and Practice of Foundation Treatment—The 7th National Academic Conference on Foundation Treatment. Lanzhou: China Water and Power Press, 2002: 3 - 7. (in Chinese))
- [8] CASAGRANDE L. Electro-Osmosis in soils[J]. Géotechnique, 1949, 1(3): 159 - 177.
- [9] RITTIRONG A, SHANG J Q, MOHAMEDHASSAN E, et al. Effects of electrode configuration on electrokinetic stabilization for caisson anchors in calcareous sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(3): 352 - 365.

- [10] SU J Q, WANG Z. The two-dimensional consolidation theory of electro-osmosis[J]. Géotechnique, 2003, **53**(8): 759 – 763.
- [11] JONES C, FAKHER A, HAMIR R, et al. Geosynthetic materials with improved reinforcement capabilities[C]// Proceedings of the International Symposium on Earth Reinforcement. Fukuoka: CRC Press, 1996, **2**: 865 – 883.
- [12] 庄艳峰, 邹维列, 王 钊, 等. 一种可导电的塑料排水板: 中国, 201210197981.4[P]. 2012-10-10. (ZHUANG Yan-feng, ZOU Wei-lie, WANG Zhao, et al. A conductive plastic drain board: China, 201210197981.4[P]. 2012-10-10. (in Chinese))
- [13] 房营光, 徐 敏, 朱忠伟. 碱渣土的真空-电渗联合排水固结特性试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2006, **34**(11): 70 – 75. (FANG Ying-guang, XU Min, ZHU Zhong-wei. Experimental investigation into draining consolidation behavior of soda residue soil under vacuum preloading-electro-osmosis[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Sciences), 2006, **34**(11): 70 – 75. (in Chinese))
- [14] 王柳江, 刘斯宏, 汪俊波, 等. 真空预压联合电渗法处理高含水率软土模型试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, **39**(6): 671 – 675. (WANG Liu-jiang, LIU Si-hong, WANG Jun-bo, et al. Model test for high-water-content soft soil treatment under vacuum preloading in combination with electroosmosis[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011, **39**(6): 671 – 675. (in Chinese))
- [15] 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. (in Chinese))
- [16] 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.
- [17] SUN Z H, GAO M J, YU X J. Vacuum preloading combined with electro-osmotic dewatering of dredger fill using electric vertical drains[J]. Drying Technology, 2015, **33**(7): 847 – 853.
- [18] 孙召花. 基于 EVD 的真空-电渗联合加固吹填土地基试验与理论研究[D]. 南京: 河海大学, 2015. (SUN Zhao-hua. Experimental and theoretical study of vacuum preloading combined with electro-osmotic consolidation on dredger fill foundation using EVD[D]. Nanjing: Hohai University, 2015. (in Chinese))

## 本期广告索引

- 封 2 北京筑信达工程咨询有限公司  
封 3 北京理正软件股份有限公司  
封 4 上海分元土木工程科技有限公司  
后插 1 西京学院混凝土结构安全与耐久性研究中心  
后插 2 济南普业机电技术有限公司