

# 真空预压联合电动法加固软土的电学性质变化实验研究\*

覃家琪, 李洪艺, 叶李胜, 娄云雷, 张碧龙, 张澄博  
(中山大学地球科学与地质工程学院, 广东 广州 510275)

**摘要:** 真空预压联合电动法对软土的加固具有较好的效果, 对其电学性质变化的研究有助于优化相关参数, 对加固效果进行评估。通过三组对照实验, 比较了真空预压联合电渗法加固软土实验及真空预压联合电动法加固软土实验的区别, 并探讨注入  $\text{CaCl}_2$  溶液的方式及实验时间对实验效果的影响。实验结果表明: 加入  $\text{CaCl}_2$  溶液后能够提高土体中的电流大小, 提高土体的电导率, 降低电极与土体间界面电阻的现象, 增加排水速率, 降低能耗, 从而提高加固效率; 注入溶液方式对实验效果影响较大, 适量提高单次注入溶液的剂量可以加速排水过程; 选择合适的时长及溶液注入方式可以有效的控制能耗及提高效率。

**关键词:** 真空预压; 电动; 软土; 电学性质

**中图分类号:** TU472   **文献标志码:** A   **文章编号:** 0529-6579 (2014) 06-0112-06

## Electrical Properties of Consolidation of Soft Soil by Vacuum Preloading Combined with Electrokinetics

QIN Jiaqi, LI Hongyi, YE Lisheng, LOU Yunlei, ZHANG Bilong, ZHANG Chengbo

(School of Earth Science and Geological Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** Electrokinetics in combination with vacuum preloading has obtained good effect on consolidation of soft soil. Experimental studies on changes in electrical properties are conducive to optimize parameters and evaluate the effects of consolidation. Three control experiments are conducted to compare the effectiveness of vacuum preloading combined electro-osmotic strengthening and vacuum preloading combined electrokinetics strengthening, as well as investigating the effect of  $\text{CaCl}_2$  injection at different time on experimental effects. The experimental results demonstrate that  $\text{CaCl}_2$  injection can increase the current in soil, improve soil conductivity, lower the resistance between electrodes and interface, improve the drainage rate and decrease energy consumption, thereby improving the consolidation effectiveness. The injection way plays a significant role on experimental effect. Appropriately adding a single injection dose can accelerate drainage and choosing the appropriate time period and injection method can effectively control energy consumption and increase efficiency.

**Key words:** vacuum preloading; electrokinetics; soft soil; electrical properties

自电渗法被学者 Casagrande<sup>[1]</sup>首次应用于岩土工程后, 电渗法加固的研究逐渐深入, 工程实践中的应用也逐渐增多。在电渗法的基础上, 向土体中注入盐溶液可以有效地提高处理效果, 称为电动学加固。该方法可增加电导性, 加速排水固结过程,

注入的盐溶液通过离子交换, 能够在一定程度上使土体颗粒排列更为紧密<sup>[2-3]</sup>。学者对电动法加固软土进行过大量的研究, 如探讨注入不同类型及浓度的盐溶液影响、电渗透系数、电渗流、加固效果等, 但仍然存在许多问题有待解决, 如电极腐蚀、

\* 收稿日期: 2014-08-10

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (S2013010012521)

作者简介: 覃家琪 (1991年生), 男; 研究方向: 软基处理; 通讯作者: 张澄博; E-mail: eeszc@ mail. sysu. edu. cn

能耗过大等<sup>[4-5]</sup>。

真空预压法自 W·Kjellman 教授提出后<sup>[6]</sup>，经过大量的研究和工程实践，技术已比较成熟<sup>[7]</sup>。但真空预压法依然遇到如工期较长、较难排出结合水、工后沉降较大等问题<sup>[7-9]</sup>。

多方法联合加固的手段也正不断兴起<sup>[10]</sup>，其中真空预压联合电渗加固软土法融合了两种方法的优点，学者们从机理、理论模型、基本参数、技术工艺等方面做了大量的研究<sup>[11-13]</sup>，而对真空预压联合电动法加固软土的研究才刚刚起步。在电渗法及电动法加固软土过程中，通过研究电渗相关参数可以对设计进行优化，并以此判断通电效果，从而提高通电效率，降低成本。

本次实验设置三组平行实验对真空预压联合电动法加固软土中的电学性质变化进行研究，并与不注入 CaCl<sub>2</sub> 溶液的真空预压联合电渗法进行对比，研究的内容包括加固实验过程中电流的变化，电势分布的特征，土体电导率的变化及单位能耗的变化等，并结合排水量对加固过程中的能耗、效果关系等进行初步研究。

## 1 真空预压联合电动法实验

### 1.1 实验土样

珠江三角洲地区的软土分布较为广泛，对工程建设具有不利影响<sup>[14]</sup>。本次实验取自佛山市南海区西樵镇南海发电一厂。土样呈深灰色 - 灰黑色，具轻微腥臭味，含有机质，夹粉砂薄层，局部混入腐木，淤积成因，呈很湿 ~ 饱和，软塑状态，标贯击数为 1 ~ 4 击，粉砂薄夹层和腐木可使标贯击数偏高。淤泥层厚 0.70 ~ 17.70 m，平均厚度 8.52 m，层顶面高程 - 10.46 ~ 3.68 m。土样经 X 射线衍射实验分析，主要矿物组成为：石英、伊利石、蒙脱石及一些有机物。土样物理参数见表 1。

### 1.2 实验装置

自制试验装置，装置包括：电源及通电设备；真空泵；排水装置；测量装置；试验箱体。实验装置可以单独作为真空预压实验或电渗/电动实验使用。试验装置示意图如图 1 所示。

电源系统：阳极棒和阴极棒采用圆形中空铝棒，长 22 cm，直径 2 cm，电源采用可控硅整流器（型号 PS - 605D，输出电压 0 ~ 60 V，输出电流 0 ~ 6 A）。

真空抽泵：采用循环水真空泵（SHZ-95B 型），功率 370 W，极限真空 0.097 MPa，抽气量 10 L/min。

排水系统：排水管使用圆形铝管，长 13 cm，直径 1 cm，管身布满小孔用于排水，排水铝管上端位于砂垫层内。阳极棒作为注入溶液的通道，其下端 12 cm 的地方每隔 2 cm 设置一个直径 5 mm 小孔作为注入溶液的流出通道。排水铝管及阳极棒均使用 300 目尼龙网包裹，防止黏土颗粒堵塞小孔。

测量系统：在试验箱体的前侧立面打 8 个直径 5 mm 的圆孔，用于检监测实验过程中电势变化。

试验箱体：采用透明玻璃箱，规格为 50 cm × 13 cm × 16 cm，主要成分为 SiO<sub>2</sub>，并设置附属装置。

表 1 土样基本物理性质

Table 1 Parameters of soft soil sample in tests

物理性质	最大值	最小值	平均值	变异系数	统计个数
含水量/%	55.2	39.5	43.13	0.098	11
土样密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	1 840	1 670	1 740	0.031	11
干密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	1 320	1 080	1 180	0.06	11
液限	52.2	34.7	42.8	0.011 4	11
塑限	35.4	22.1	27.3	0.135	11
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.7	2.66	2.68	0.004	11
十字板抗剪强度/kPa	18	10	14	0.007	11
黏聚力 C/kPa	18	9.8	14.2	0.256	9
内摩擦角/(°)	16	9.1	12	0.207	9
pH	7.81	7.51	7.76	/	5
电阻/Ω	801.4	765.8	785.7	/	3

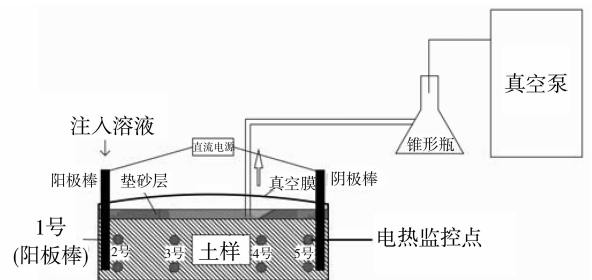


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Diagram of the experimental device

本试验将原状土分层装入试验容器内，压实整平后再放置另外一层，顶层覆盖 1 cm 厚的砂垫层，可用于排水。将阳极棒、阴极棒、排水铝管插入软土中，排水铝管上端位于砂垫层内，并将抽气软管埋于砂垫层中，软管的另一头连接锥形瓶。然后使用白色透明塑料膜将玻璃箱密封。使用软管连接锥形瓶、真空泵抽气孔，通过真空泵将砂垫层中的液

体或气体抽出, 液体在重力作用下留在锥形瓶中, 气体则可排出。接通电源, 并在前侧面的电势监测点插入铁丝, 用于检测试验过程中的电势变化。

### 1.3 实验方案

共进行三组对照实验, 各组实验如下。

实验一: 真空预压联合电渗法加固实验, 实验时间 60 h, 主要探讨未注入溶液情况下实验数值的变化。

实验二: 真空预压联合电动法加固实验, 实验时间 60 h, 每隔 0.5 h 从阳极注入 5 mL 浓度为 1 mol/L 的  $\text{CaCl}_2$  溶液, 探讨在注入溶液情况下实验的变化。

实验三: 真空预压联合电动法加固实验, 实验时间 120 h, 每隔 2.5 h 从阳极注入 25 mL 浓度为 1 mol/L 的  $\text{CaCl}_2$  溶液, 主要探讨实验时间及溶液注入方式对实验效果的影响。

三组对照实验均使用 55 V 的直流电源供电, 采用间歇停电技术, 平均每通电 16 h 停电 5 h, 在停电时将溶液取出, 做排水量等参数的相应测试。

将土样及装置连接好, 静置 24 h 后开始实验。实验结束后对土体进行相应测试。一组实验完毕, 使用超纯水洗净实验装置, 并更换电极棒, 消除上一组实验的影响后进行下一组实验。

## 2 实验结果

### 2.1 电流变化

在实验过程中, 由于液体被排出、土体干裂固结等原因使得电流呈衰减趋势。但对于不同的实验组, 电流变化的规律不尽相同。

其中, 真空预压 - 电渗法加固实验 (60 h), 电流变化见图 2, 前 45 h 电流衰减较快, 表明土体中水分被快速排出, 在最后 15 h, 电流趋于稳定, 且保持在较低的数值, 这表明电渗在此时的作用已经不大, 且采用间歇停电也不能较好地改善。

真空预压 - 电动法加固实验 (60 h), 电流变化如图 3 所示, 电流呈先升高后降低的趋势, 在前 20 h 内, 电流从 0.07 A 急剧升高至 0.13 A, 为实验一中最高电流 (0.06 A) 的 2.1 倍, 之后电流呈直线式下降, 实验时间达到 50 h 后, 电流稳定于 0.04 A。

真空预压 - 电动法加固实验 (120 h), 电流变化可见图 4, 电流亦呈现先升高后降低的规律, 在前 50 h 内, 电流总体呈升高趋势。其中, 前 10 h 内, 由于注入  $\text{CaCl}_2$  溶液, 电流急剧升高, 在 10 ~ 50 h 内, 电流呈波动式升高, 在 50 h 左右达到最

大值 (0.16 A), 为实验一中最高电流的 2.7 倍。在 50 ~ 110 h 内, 由于土体固结干裂等因素影响, 电流波动式下降至 0.04 A, 在此后的 10 h 内, 电流基本稳定于 0.03 A 左右。

由此可见, 注入溶液和延长实验时间都能有效地提高实验电流, 其中溶液注入方式对电流影响较大。使用间歇停电技术可以使电流在短时间内急促上升, 然后迅速下降至原电流曲线以下, 并且以原电流曲线下下降速率继续下降。

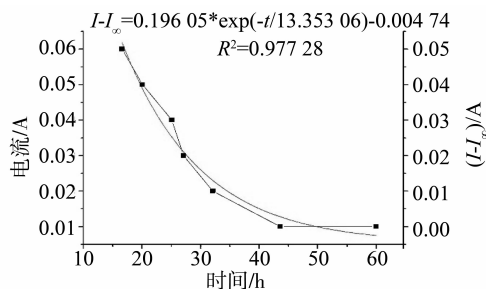


图 2 真空预压 - 电渗法实验电流变化 (60 h)  
Fig. 2 Current value changes of vacuum preloading combined with electro-osmosis (60 h)

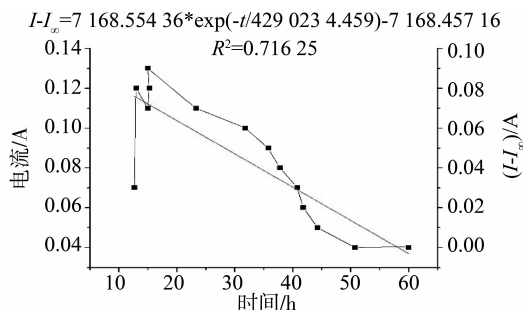


图 3 真空预压 - 电动法加固实验 (60 h)  
Fig. 3 Current value changes of vacuum preloading combined with electrokinetics (60 h)

依据电渗能量理论<sup>[15]</sup>, 电渗过程中的电流呈指数形式衰减, 电流指数衰减的形式如下:

$$I - I_{\infty} = (I_0 - I_{\infty}) e^{-\alpha t} \quad (1)$$

式中,  $I$  为实时电流 (A);  $I_0$  与  $I_{\infty}$  分别为初始电流和最终电流 (A),  $\alpha$  为衰减常数 ( $\text{s}^{-1}$ ),  $t$  为实验时间 (h)。

据此对三组实验的进行曲线拟合, 从图 2 - 4 中的衰减曲线可以看出, 在稳压条件下, 电渗/电动过程中的电流变化基本呈负指数形式衰减, 基本满足式 (1)。从拟合度  $R^2$  可以看出, 三个实验的拟合度分别为 0.98、0.72、0.67, 这说明真空预压 - 电动法加固实验电流的变化呈逐渐偏离指数形

式衰减。

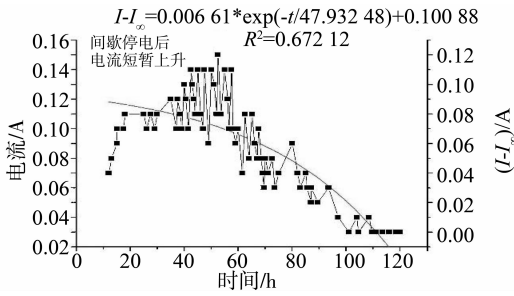


图 4 真空预压 - 电动法加固实验 (120 h)

Fig. 4 Current value changes of vacuum preloading combined with electrokinetics (120 h)

### 2.2 排水量变化

三组对比实验的排水量累计曲线见图 5，排水速率随时间变化示意图见图 6。

从图 6 排水量累积曲线可以看出，真空预压 - 电渗法加固实验 (60 h) 与真空预压 - 电动法加固实验 (60 h) 时间相同，但后者累积排水量比前者多出 1.82 倍，说明注入溶液后能够大幅度地提高排水效率；对比真空预压 - 电动法加固实验 (60 h) 与真空预压 - 电动法加固实验 (120 h)，后者的累积排水量在前 60 h 比前者多出 57.8%，比实验一多出 346%，这说明每隔 2.5 h 注入 25 mL CaCl<sub>2</sub> 溶液与实验二相比能够更有效的提高排水效率，但 60 h 后的排水量仅占总排水量的 5% 左右。

三组实验的排水率均随时间增加而减小，从实验一至实验二，排水速率提高约 2 倍，实验三的排水速率与实验二相比增加约 40% ~ 60%。

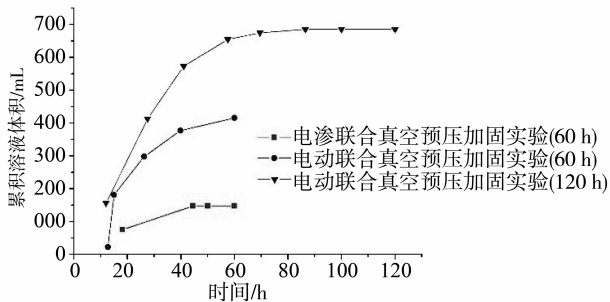


图 5 排水量累积曲线

Fig. 5 Curve of displacement

### 2.3 电势变化

土体的总电阻效应可以用视在电阻来描述，视在电阻由电极电阻、界面电阻、土体电阻组成，本实验中电极电阻可以忽略不计<sup>[16]</sup>。本次实验通过

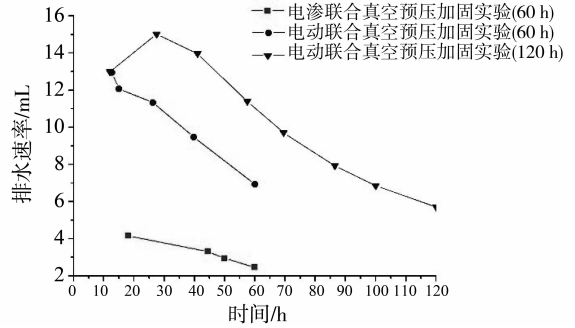


图 6 排水率随时间变化示意图

Fig. 6 Curve of discharge rate

测量电势分布，以对界面电阻、土体电阻进行判断。在实验过程中，在距离阳极 0、2.5、17.5、32.5、47.5 cm 的位置测量电势，对应实验装置示意图图 1 中的 1 - 5 号点。

通过对比发现，对于真空预压 - 电渗法加固实验 (60 h)，电势分布见图 7，土样中间部分的电压降比电极两端的小，其他点的电势呈线性分布，这说明电极两端存在明显的界面电阻现象。在实验开始时，电势分布呈直线下降，随着实验时间的增加，界面电阻变大使得电势分布越来越偏离线性。电压降在实验进行到 55 h 后就达到了 45 V，占了总电压的 90%，消耗了大部分能量，因此到实验后期，由于界面电阻的存在，电渗效率很低<sup>[17]</sup>。

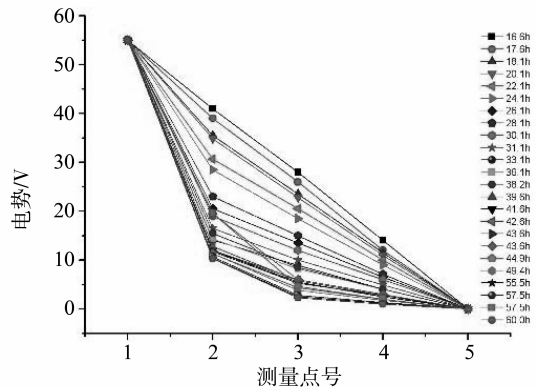


图 7 真空预压 - 电渗法加固实验 (60 h) 电势分布图

Fig. 7 Electric potential distribution of vacuum preloading combined with electro-osmosis (60 h)

对于真空预压 - 电动法加固实验 (60 h) 及真空预压 - 电动法加固实验 (120 h)，电势分布可见图 8、图 9。其中，实验二每个监测点之间的电压降基本一致，而实验三最大的电压降发生在离阳极 17.5 ~ 32.5 cm 之间，两组实验都没有出现明显的界面电阻现象，这说明注入溶液能较好地减少界面

电阻, 提高电动效率。随着时间增加, 电势变化接近线性, 与真空预压 - 电渗法加固实验的电势分布规律相近, 若继续延长实验时间, 界面电阻效应加强, 效率则越来越低。

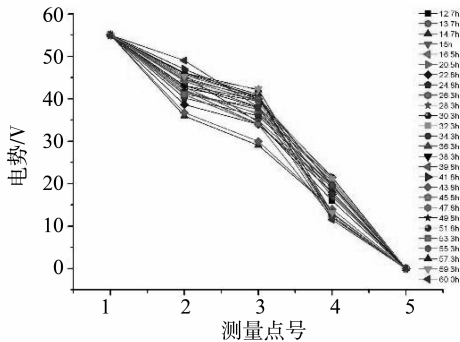


图 8 真空预压 - 电动法加固实验 (60 h) 电势分布  
Fig. 8 Electric potential distribution of vacuum preloading combined with electrokinetics (60 h)

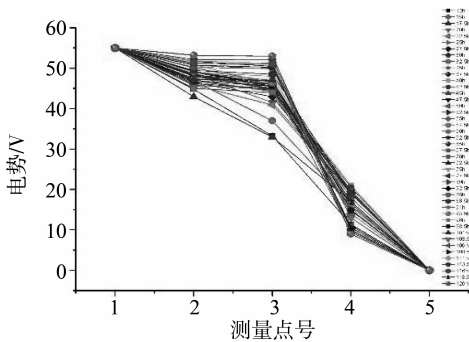


图 9 真空预压 - 电动法加固实验 (120 h) 电势分布  
Fig. 9 Electric potential distribution of vacuum preloading combined with electrokinetics (120 h)

## 2.4 电导率变化

在实验中, 电导率受到土样内部溶液离子类型、浓度、电阻和固结程度等影响而发生变化, 这些变化则会进一步影响电渗水量及土体的固结过程<sup>[18-19]</sup>。电导率是实验过程中研究土样的含水率、电阻等变化的重要参数。

图 10 为实验中土体电导率的变化图, 由实验一至实验二、实验三的电导率逐渐增加, 说明注入溶液能有效提高电导率, 间接加速了排水过程。

其中, 真空预压 - 电渗法加固实验 (60 h) 的电导率变化不大, 基本保持在  $0.03 (\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$  左右; 真空预压 - 电动法加固实验 (60 h) 的电导率呈先上升后减小的趋势, 而加固实验 (120 h) 的电导率却呈现波动上升趋势。这说明不同的溶液注入方式对电导率变化具有较大的影响。

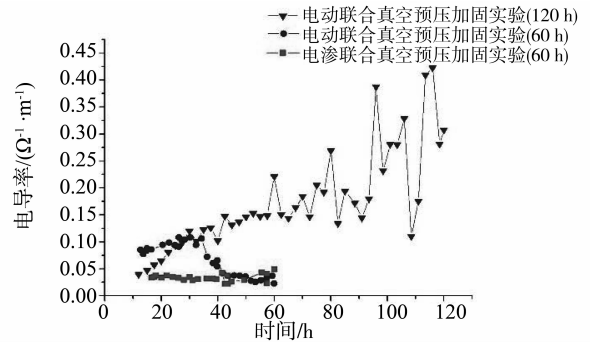


图 10 电导率变化图

Fig. 10 Electrical conductivity changes of experimental

## 2.5 单位能耗变化

在稳压条件下, 实验土体的瞬时电流可以在一定程度上反应土体电阻和能耗的变化。单位能耗系数  $E$ , 为能耗及液体排出量的比值, 公式如下

$$E = UIt/V \quad (2)$$

式中,  $E$  为单位能耗系数 ( $\text{J}/\text{mL}$ ),  $U$  为输入电压 ( $\text{V}$ )。在本次实验中  $U$  为  $55 \text{ V}$ ,  $I$  为开始到测量时间内的平均电流 ( $\text{A}$ ),  $V$  为实验开始到测量时间内排出溶液的累积体积 ( $\text{mL}$ ), 实验过程中单位能耗系数  $E$  如图 11 所示。

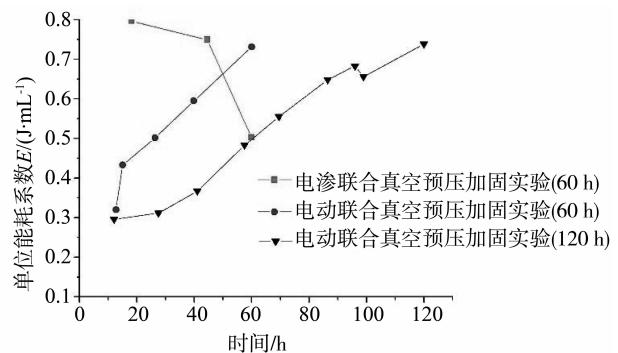


图 11 单位能耗系数变化

Fig. 11 The changes of unit energy consumption coefficients

由图可以看出, 真空预压 - 电渗法加固实验的平均能耗系数随时间的增加而减小, 其原因为随实验时间增加, 土中溶液被排出而没有补充, 电流急剧下降, 平均能耗系数呈下降趋势。但其能耗系数与实验二、实验三相比仍然较大, 这说明注入溶液能够有效地减小能耗, 节约能源。

真空预压 - 电动法加固实验的平均能耗系数随时间的增加而呈线性增加, 即随实验时间增加, 电动效率越低, 电能则更多地被转换成热能, 通过对比实验二与实验三, 溶液注入方式对平均能耗系数

影响较大, 实验二单次注入溶液量比起实验三要小, 其平均能耗系数较实验三要大, 这说明溶液注入方式对电动效率有较为明显的影响, 选择合适的注入方式能够有效地减小能耗, 节省能源。

真空预压 - 电渗法加固实验 (60 h) 平均能耗系数为 0.41 J/mL、真空预压 - 电动法加固实验 (60 h) 平均能耗系数为 0.43 J/mL, 真空预压 - 电动法加固实验 (120 h) 平均能耗系数为 0.71 J/mL, 由此可知, 选择合适的通电时长能够有效地降低平均能耗, 提高电动加固效率。

### 3 讨论

实验结果表明, 注入  $\text{CaCl}_2$  溶液能够有效提高通电效率, 加速软土固结排水, 增大排水量, 且  $\text{CaCl}_2$  溶液注入方式对实验具有较大的影响。本实验设置三组对照试验, 初步探讨了真空预压联合电动法加固软土的电学参数变化及排水量变化规律。

现有的电动加固软土的研究焦点单方面的集中在注入盐溶液的种类、浓度及加固效果等方面, 与真空预压法或其他方法相结合的研究较少<sup>[4]</sup>。本文实验结果表明盐溶液的注入能够提高软土加固效率及效果, 与前人研究结论较为一致。注入盐溶液的真空预压联合电动法在软土加固上, 能有效提高工程施工的效率、减少工后沉降对工程带来的损害。本研究证明, 注入盐溶液的电动法对真空预压法有明显的促进作用。

实验发现, 注入盐溶液后电极腐蚀现象较为明显。本次实验未对电极腐蚀防腐办法做深入探讨。建议在今后的研究中使用新型的电动土工材料或使用其他方法减少电极腐蚀现象。

### 4 结论

1) 注入盐溶液能够提高土体中电流的大小, 且电流的变化呈逐渐偏离负指数的形式衰减, 能够提高电导率, 能有效减少界面电阻现象。

2) 溶液注入方式不同对实验结果影响较大, 适量增加单次注入溶液的剂量可以使电流增大、电导率增大、排水量增大、排水速率加快, 但电动法通电时间过长则会导致电动效率明显降低。

3) 注入盐溶液能降低排出单位液体所需要的能量, 随实验时间增加, 电能将被转换为热能, 且界面电阻逐渐增大, 选择合适的通电时间可以有效控制能耗及效率。

### 参考文献:

- [1] CASAGRANDE L. Electro-osmosis in soils[J]. Geotechnique, 1949, 1(3): 159 - 177.
- [2] OU C Y, CHIEN S C, WANG Y G. On the enhancement of electroosmotic soil improvement by the injection of saline solutions[J]. Applied Clay Science, 2009, 44(1): 130 - 136.
- [3] CHANG HW, KRISHNA PG, CHIEN SC, et al. Electro-osmotic chemical treatments: Effects of  $\text{Ca}^{2+}$  concentration on the mechanical strength and pH of kaolin[J]. Clays and Clay Minerals, 2010, 58(2): 154 - 163.
- [4] 李洪艺, 张澄博, 张永定. 盐溶液注入对电动加固软土影响的研究进展[J]. 工程地质学报, 2011, 19: 288 - 293.
- [5] 胡俞晨, 王钊, 庄艳峰. 电动土工合成材料加固软土地基实验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(5): 582 - 586.
- [6] KJELLMAN W. Consolidation of clay soil by means of atmospheric pressure [C]//Proc of Conference on Soil, Cambridge, 1953.
- [7] 成玉祥. 滨海吹填土结构强度形成机理与真空预压法关键技术研究 [D]. 西安: 长安大学, 2008.
- [8] SAKAI A, SAMANG L, MIURA N. Partially-drained cyclic behavior and its application to the settlement of a low embankment road on silty-clay[J]. Soils and Foundations, 2003, 43(1): 33 - 46.
- [9] 张仪萍, 李剑. 真空预压排水机制室内模型试验研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2014, 48(4): 679 - 685.
- [10] 李瑛, 龚晓南, 卢萌盟, 等. 堆载 - 电渗联合作用下的耦合固结理论[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 77 - 81.
- [11] 李剑, 张仪萍, 严露. 真空 - 电渗联合作用下的软基固结计算研究[J]. 水运工程. 2012(03): 133 - 138.
- [12] 徐伟, 刘斯宏, 王柳江, 等. 真空预压联合电渗法加固软基的固结方程[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2011, 39(2): 169 - 175.
- [13] 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.
- [14] 周翠英, 牟春梅. 珠江三角洲软土分布及其结构类型划分[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2004, 43(6): 81 - 84.
- [15] 庄艳峰, 王钊, 林清. 电渗的能级梯度理论[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(2): 283 - 286.
- [16] 王甦达, 张林洪, 吴华金, 等. 电渗法处理过湿土填料中有关参数设计的探讨[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(2): 211 - 215.
- [17] 矫军. 软黏土电渗排水固结试验与理论研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2013.
- [18] 吴辉, 胡黎明. 考虑电导率变化的电渗固结模型[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 734 - 738.
- [19] 胡黎明, 洪何清, 吴伟令. 高岭土的电渗试验[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2010(9): 1353 - 1356.