

文章编号:1673-9469(2021)04-0028-06

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2021.04.005

## 阳极-中间孔注浆时序对电化学加固影响的试验研究

张恒<sup>1,2</sup>, 王保田<sup>1,2,3\*</sup>, 周炳生<sup>1,2</sup>, 陆正<sup>1,2</sup>, 张福海<sup>1,2</sup>, 张海霞<sup>1,2</sup>

(1. 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; 2. 河海大学 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏 南京 210098; 3. 西藏农牧学院 水利土木工程学院, 西藏 林芝 860000)

**摘要:** 为研究阳极-中间孔联合注浆时, 不同注浆时序注入  $\text{CaCl}_2$  溶液对电化学加固效果的影响, 开展了阳极-中间孔同时注入(S1)、间隔 5 h 注入(S2)和间隔 12.5 h 注入  $\text{CaCl}_2$  溶液(S3)的三组试验。通过监测排水量、电流、土体沉降和处理后土体的贯入阻力等指标, 对三组试验进行对比分析。研究表明: 阳极-中间孔联合注浆可以促进上、下半区域处理效果的均一性, 推迟中间孔注浆的时间有利于提高总排水量; 不同时段在中间孔注浆促进了下半区域的固结沉降, 三组试验中, S2 试验各点最终沉降相较于 S1、S3 试验更均匀。试验结束后, S2 和 S3 组上、下半区域的贯入阻力分布范围明显大于 S1 组, 较早在中间孔注浆, 不利于上、下半区域的加固。

**关键词:** 注浆时序; 电化学加固; 排水量; 贯入阻力

中图分类号: TU472

文献标识码: A

## Experimental Study on the Effect of Anode and Intermediate Holes Grouting Sequence on Electrochemical Reinforcement

ZHANG Heng<sup>1,2</sup>, WANG Baotian<sup>1,2,3\*</sup>, ZHOU Bingsheng<sup>1,2</sup>, LU Zheng<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Fuhai<sup>1,2</sup>, ZHANG Haixia<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Department of Water Conservancy and Civil Engineering, Tibet Agricultural and Animal Husbandry University, Linzhi, Tibet 860000, China)

**Abstract:** In order to study the influence of  $\text{CaCl}_2$  solution injection in different grouting sequence on the electrochemical reinforcement effect during anode and intermediate holes grouting, three groups of experiments were carried out, which were injected at the same time(S1), injected at an interval of 5 h (S2) and injected at an interval of 12.5 h(S3). By monitoring the drainage, current, soil settlement and penetration resistance of treated soil, the three groups of experiments were compared and analyzed. The results show that the combination of anode and intermediate holes grouting can promote the uniformity of treatment effect in the upper and lower half of the area, delaying the grouting time of the intermediate hole is beneficial to increase the total drainage. Grouting in the intermediate hole at different times promotes the consolidation settlement in the lower half of the area. In the three groups of tests, the final settlement at each point of S2 test is more uniform than that of S1 and S3 tests. After the experiment, the distribution range of penetration resistance in the upper and lower halves of the S2 and S3 groups is significantly larger than that of the S1 group, grouting in the intermediate hole earlier is not conducive to the reinforcement of the upper and lower half areas.

**Key words:** grouting sequence; electrochemical reinforcement; water displacement; penetration resistance

收稿日期: 2021-06-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778211); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20171434)

作者简介: 张恒(1997-), 男, 陕西铜川人, 硕士研究生, 主要从事软土地基处理研究。

\* 通讯作者: 王保田(1963-), 男, 湖北浠水人, 博士, 教授, 主要从事软土地基处理方面的研究。

电渗法是通过电能实现软黏土的高效脱水固结<sup>[1-2]</sup>, 1939 年 Casagrande 首次将电渗法应用于铁路路基开挖工程中<sup>[3]</sup>。随着电渗法被应用于实际工程, 诸多学者从各个方面对电渗法进行了相关的理论和试验研究。Xue 等<sup>[4]</sup>对比分析了铜、铝、铁 3 种阳极材料对大连海相淤泥电渗试验的影响, 试验表明: 采用铁作为阳极材料时电渗效果最佳。刘飞禹等<sup>[5]</sup>研究了含易溶盐层状软黏土的电渗固结特性, 研究表明, 含盐土体分布于阳极附近时的电渗效果要比其分布于阴极附近时好。王柳江等<sup>[6]</sup>设计了 1 根阴极对应多根阳极的电渗试验, 并由此发现增加阳极数目能够改善电渗的处理效果。杨克军等<sup>[7]</sup>对比研究了通电方式对电渗排水加固效果的影响, 发现采用电流衰减时增加电压这种通电方式能发挥好的加固效果。

为进一步提高电渗处理效果, 学者们提出了电化学加固方法<sup>[8-9]</sup>。刘飞禹等<sup>[10]</sup>研究了阳极灌浆溶液对电渗加固软土的影响, 结果表明添加化学试剂能明显改善排水效果和土体强度。Chien 等<sup>[11]</sup>在阳极和阴极之间安装中继管注浆, 发现中继管注浆优于通过阳极注浆。任连伟等<sup>[12]</sup>研究了在土样中间部位联合注入  $\text{CaCl}_2$  和  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  溶液, 研究发现联合注入两种溶液能够改善抗剪强度分布不均的问题。付英杰等<sup>[13]</sup>开展了在电渗初始时刻和电渗排水稳定时刻注入  $\text{CaCl}_2$  溶液的两组试验, 发现不同时刻在阳极注入  $\text{CaCl}_2$  溶液对电化学加固有较大影响。

目前关于电化学加固的研究集中在不同注入溶液的类型及各项参数对电渗排水及承载力提高的影响, 阳极-中间部位共同注浆时, 不同注浆时序对电化学加固效果有何影响, 目前相关研究相对较少。本文开展阳极-中间孔联合注浆, 探讨不同

注浆时序注入  $\text{CaCl}_2$  溶液对电化学加固效果的影响, 为电化学加固方法的工程应用提供有益参考。

## 1 试验装置及试验方案

### 1.1 试验用土

试验所用土样为南京江宁地区的普通黏土, 取土深度为 0.5 m, 天然含水率为 38%, 颜色呈黄褐色。对现场取得的黏土烘干、打碎、过筛后加水充分搅拌, 配置到 42% 的含水率, 静置 24 h 使土样充分饱和, 土的基本物理性质经测定见表 1。

表 1 土的基本性质

Tab. 1 Basic properties of soil

含水率 $\omega/\%$	土粒比重 $G_s$	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_P/\%$	塑性指数 $I_p$
42.0	2.67	41.8	23.6	18.2

### 1.2 试验装置

模型试验装置由模型槽、土样、电极、百分表、电源等部分组成, 示意图如图 1(a) 所示, 电极位置、位移测点布置图如图 1(b) 所示。模型槽采用塑料周转箱, 周转箱的外尺寸为 440 mm×330 mm×140 mm, 内尺寸为 400 mm×300 mm×130 mm。模型槽底面在阴极的位置开有直径 16 mm 的孔洞, 以方便排水。阳极为直径 10 mm 的钢筋, 阴极为外径 16 mm、内径 14 mm 的空心铁管, 铁管的侧壁上开有数个直径 3 mm 的小孔, 试验时用湿润的土工布包裹阴极, 防止黏土颗粒堵塞排水通道。电源为稳压直流电源, 电源的输出电压为 0~60 V, 输出电流为 0~5 A。

### 1.3 试验方案

此次阳极-中间孔联合注浆电化学加固软黏土

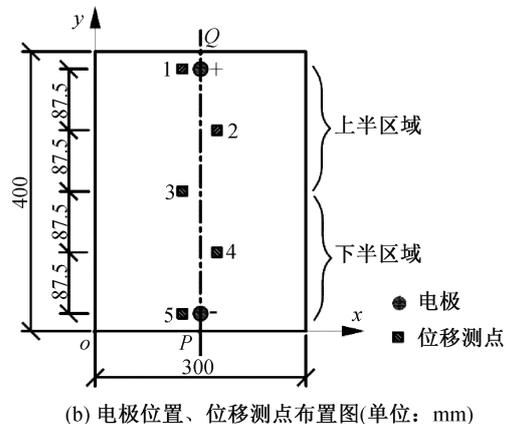
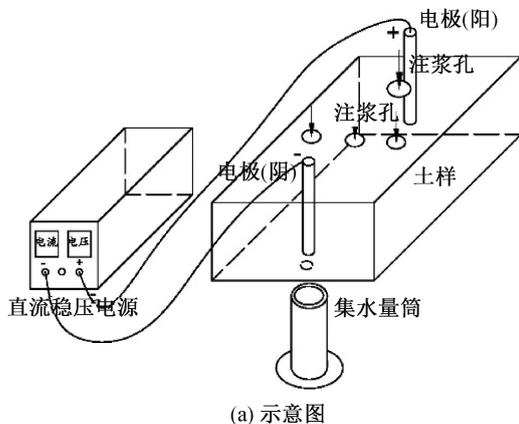


图 1 模型试验装置

Fig. 1 Model test devices

试验共设置3组试验,根据不同试验条件分别命名为S1、S2、S3,讨论不同注浆时序对加固软黏土试验的影响。试验方案为:S1试验在阳极、中间注浆孔一次各注入70 mL浓度为2 mol/L的CaCl<sub>2</sub>溶液,间歇通电2次,每次12.5 h,共25 h;S2试验先在阳极注浆孔中注入70 mL浓度为2 mol/L的CaCl<sub>2</sub>溶液,通电5 h后再在中间注浆孔注入70 mL浓度为2 mol/L的CaCl<sub>2</sub>溶液,继续通电7.5 h,次日通电12.5 h,共25 h;S3试验先在阳极注浆孔中注入70 mL浓度为2 mol/L的CaCl<sub>2</sub>溶液,通电12.5 h后,次日再在中间注浆孔注入70 mL浓度为2 mol/L的CaCl<sub>2</sub>溶液,继续通电12.5 h,共25 h。三组试验通电电压均为30 V,电极间距35 cm,电势梯度0.86 V/cm,两通电时段之间的间歇时长为12 h,室温30 ℃,试验中阳极注浆孔为单孔,孔径2 cm的大孔,中间注浆孔为三个水平向间距7 cm、孔径1 cm的小孔。试验步骤为:首先取样测试土配置后的含水率;然后设置好电极位置,将土样分层装入试验模型槽,并保持土面平整,铺设位移测点的小垫块,根据具体试验要求设置注浆孔,在试样土体表面覆盖塑料薄膜以防止水分自然蒸发影响试验结果;最后按照试验方案接通电源进行通电,通电期间定期观测并记录试验数据,包括阴极排水量、试样电流、各测点处沉降量。通电结束,在试样上划分区块网格,采用PS-MPT微型贯入仪测量贯入阻力。

## 2 试验结果分析

### 2.1 排水量和排水速率

三组试验的排水量变化曲线如图2所示。通电结束后,S1、S2和S3试验的排水总量分别为607、740和1 024.5 mL,显然S3的排水总量>S2的排水总量>S1的排水总量,即适当推迟中间孔注浆的时间有利于提高总排水量。0~7.5 h的通电时段内,三条排水曲线近似重合,7.5 h后,S2的排水总量开始超过S1的排水总量,而在通电12.5 h后S2、S1的排水量趋于稳定,不同于S2、S1试验,通电12.5 h后S3的排水总量仍处于较高的增长速率。

根据不同时段的排水量变化情况,可绘制出三组试验排水速率随通电时长的变化曲线,见图3。S1试验中,一次性分别在阳极和中间注浆孔中注入70 mL CaCl<sub>2</sub>溶液通电后,排水速率在2.25 h达到峰值73.2 mL/h,其后逐渐衰减;而对于S2、S3

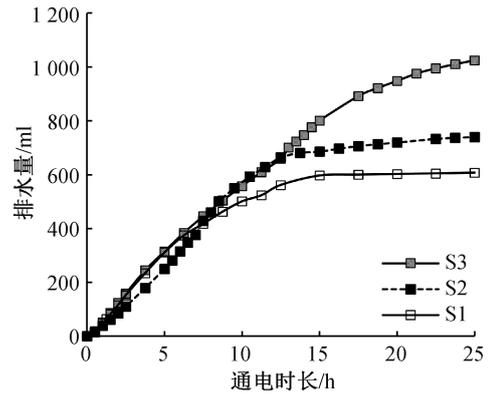


图2 排水量变化曲线

Fig. 2 Curves of drainage

试验,在通电时长2.25 h左右也达到一个峰值,但均小于S1试验在该时刻的排水速率峰值。这是由于在S1试验中,通电初始便在中间注浆孔注入CaCl<sub>2</sub>溶液,试验土样的上半区域和下半区域均发生排水,因此相比S2、S3试验排水速率更高。通电2.25 h后,S2、S3试验的排水速率均呈现降低趋势,而两者的排水速率又分别在5 h、12.5 h后出现剧烈的增长,并分别在7.25 h和12.75 h时刻达到峰值102.8 mL/h和72 mL/h。这是因为S2在通电5 h后向中间注浆孔再次注入CaCl<sub>2</sub>溶液,而S3试验在通电12.5 h后向中间注浆孔再次注入CaCl<sub>2</sub>溶液。当向中间注浆孔中注入新的CaCl<sub>2</sub>溶液时,一方面,土体中离子总量增加,导致中间注浆孔周围区域电阻的降低、电流的增大,另一方面,也出现了新的排水区域,试验土体的下半区域开始进入高速排水阶段。

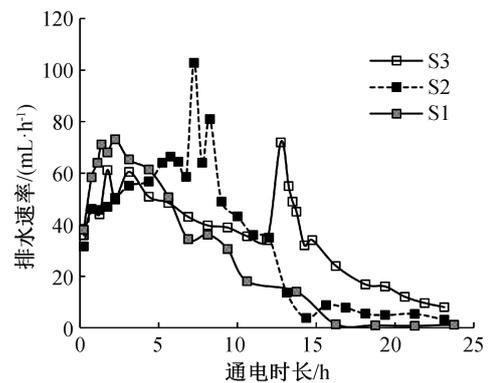


图3 排水速率变化曲线

Fig. 3 Curves of drainage rate

综上所述,可以看出,S1、S2和S3三组试验中,中间注浆孔注入CaCl<sub>2</sub>溶液的先后时间将对排水速率的变化曲线产生直接的影响;通电初始时刻在中间注浆孔注入化学溶液时,排水速率变化曲线表

现为单峰曲线,包括一次迅速增长阶段和一次逐渐衰减阶段;而在通电一段时间后再在中间注浆孔中注入化学溶液时,排水速率变化曲线则表现为双峰曲线,且第二次的峰值高于第一次的峰值,曲线包括了两次迅速增长阶段和两次逐渐衰减阶段。

### 2.2 电流分析

S1、S2 和 S3 试验中,电流的变化见图 4,从图中可以看出,三组试验电流的变化规律与排水速率的变化规律相似。S1 试验中的电流变化曲线为单峰曲线,经历增长阶段后,在通电 3.75 h 后达到峰值 0.54 A,其后逐渐衰减至稳定;S2 和 S3 试验中,电流变化曲线为双峰曲线,包括了两次增长和两次衰减阶段。因为两组试验在 0~5 h 内的试验过程完全一致,即通电初始在阳极注入 70 mL 的同浓度 CaCl<sub>2</sub> 溶液,因此电流的变化曲线也表现一致,两组试验的电流均在通电 2 h 后达到 0.3 A,其后衰减。对于 S2 试验,通电 5 h 后在中间注浆孔注入新的 CaCl<sub>2</sub> 溶液,电流剧烈增长,并在 9.5 h 达到峰值 0.58 A,其后衰减至稳定;而对于 S3 试验,通电 12.5 h 后在中间注浆孔注入新的 CaCl<sub>2</sub> 溶液,电流剧烈增长,并在 14.5 h 达到峰值 0.57 A。因此,三组试验中间注浆孔注入 CaCl<sub>2</sub> 溶液的先后时间不同,电流曲线也表现出不同的变化形式,同时反映出注浆前后带来的土体平均电阻的变化。

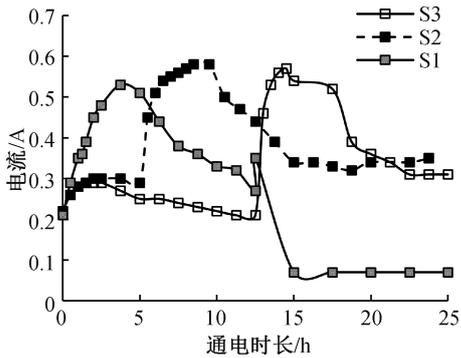


图 4 电流变化曲线  
Fig. 4 Curves of current

### 2.3 沉降分析

试验中各区域测点处土体的沉降变化有助于分析不同区域的排水情况,根据 S1、S2 和 S3 试验中各测点处的沉降量观测值,绘制图 5。可以看出,在 S1 试验中,测点 2 和测点 4 处土体沉降量的增长速率最快,且在通电 2.5 h 后,测点 2 处土体

的沉降增速趋缓,而测点 4 位置处的土体仍保持较高的沉降增速,其次是测点 1 和测点 3,而阴极处的测点 5 增速很慢。测点 2、4 处土体沉降量的快速增长意味着上半区域与下半区域同步排水,这对于解决上、下半区域处理效果不均的问题具有一定的启示作用。

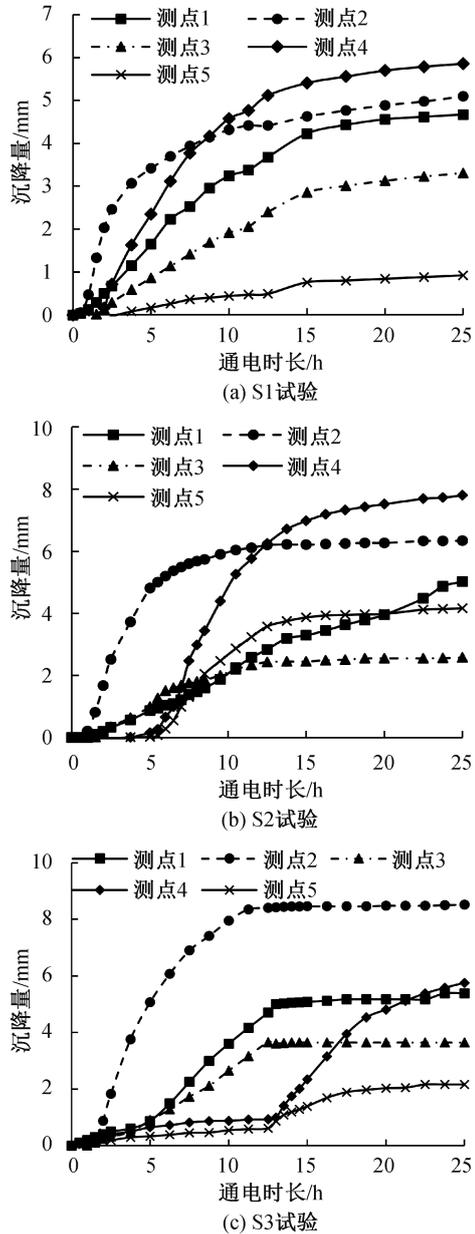


图 5 各测点处土体沉降变化  
Fig. 5 Change of soil settlement at each measuring point

在 S2 试验中,在阳极注入 CaCl<sub>2</sub> 溶液后的 0~5 h 内,测点 2 处沉降增长速率非常快,5 h 后沉降达到 4.8 mm。而此时测点 1、3、4、5 处的土体沉降量依次为 0.87、1.0、0.02、0.02 mm,显然该时段的排水中心集中在测点 1、3 之间的上半区域。通电 5 h 后,当试样的中间孔注入同浓度同体积的

CaCl<sub>2</sub> 溶液后,测点 2 处沉降增速大大减缓,而此时的测点 4 处土体表现出高速的增长速率,并在 12.5 h 后超过测点 2 处土体的沉降量总量,同时可以看出,阴极处(测点 5)在 5 h 后也取得较高的沉降增速。因此可以认为,在 S2 试验中阳极注入 CaCl<sub>2</sub> 溶液后的前 5 h 时段内,试验土体的排水区域几乎全部集中在上半区域,而当在试样中间孔注入 CaCl<sub>2</sub> 溶液后,下半区域则转变成排水的主区域。

在 S3 试验中,阳极注入 CaCl<sub>2</sub> 溶液后的 0~12.5 h 内,测点 2 处土体的沉降量增速最快,其次是测点 1 和测点 3,而测点 4、5 处的则最慢,沉降变化曲线平缓。同 S2 试验中 0~5 h 时段表现的规律相同,在 S3 试验 0~12.5 h 时段内,上半区域为排水的主区域。而当试样的中间孔在 12.5 h 时注入 CaCl<sub>2</sub> 溶液后,测点 4、5 处土体表现出较高的沉降量增长速率,测点 1、2、3 处土体的沉降量变化曲线则十分平缓近似为直线。

综上,通电后的不同时段在中间孔注入 CaCl<sub>2</sub> 溶液能够削弱甚至遏制上半区域的排水过程,同时促进试样的下半区域成为排水主区域,其中 S2 试验各点最终沉降相较于 S1、S3 试验更均匀,因此,选择合理的时段向试样的中间孔注入 CaCl<sub>2</sub> 溶液可以使整个试样区域的沉降更加均一,这也为解决普通电渗、单一阳极注浆电渗处理效果不均匀的问题提供了一种思路。

## 2.4 土体贯入阻力

通电停止后,将 S1、S2 和 S3 试验土体分别划

分为 5×8 共 40 块小区域,利用微型贯入仪测定不同区域的贯入阻力,并绘制贯入阻力分布的等值线图。三组试验贯入阻力等值线分布见图 6。S1 试验中,上半区域的贯入阻力值主要集中在 0~150 kPa,同时也分布着少量区域的较高贯入阻力,这部分较高的贯入阻力的分布区域全部集中在阳极附近,且等值线非常密集,下半区域的贯入阻力值主要集中在 50~300 kPa。

S2 试验中,上半区域的贯入阻力值主要集中在 50~300 kPa,且贯入阻力等值线相比 S1 试验要疏松得多,S1 试验中贯入阻力大于等于 100 kPa 的等值线主要分布在纵坐标 300~375 mm 的区域内,而 S2 试验中等值线则几乎分布在了整个纵向的跨度,反映出 S2 试验在上半区域的处理范围要大于 S1 试验。同时下半区域的贯入阻力值集中在 75~500 kPa,等值线图表现出较大的处理范围,其中大于等于 100 kPa 的等值线几乎覆盖了整个下半区域。

S3 试验中,上半区域的贯入阻力值主要集中在 50~800 kPa,尤其是 300~1 000 kPa 的分布区域要显著大于 S1 和 S2 试验,大于等于 100 kPa 的等值线也覆盖了绝大部分的上半区域,相比 S2 试验的处理范围更大,这是由于 S2 试验在通电 5 h 后,由中间注浆孔注入 CaCl<sub>2</sub> 溶液,注入后抑制了上半区域的排水及加固过程,S3 试验在通电 12.5 h 后由中间孔注入,因此上半区域的排水及加固过程的时间 S3 试验长于 S2。而对于 S1 试验,通电初始上半区域的排水及加固过程便被抑制,因此,

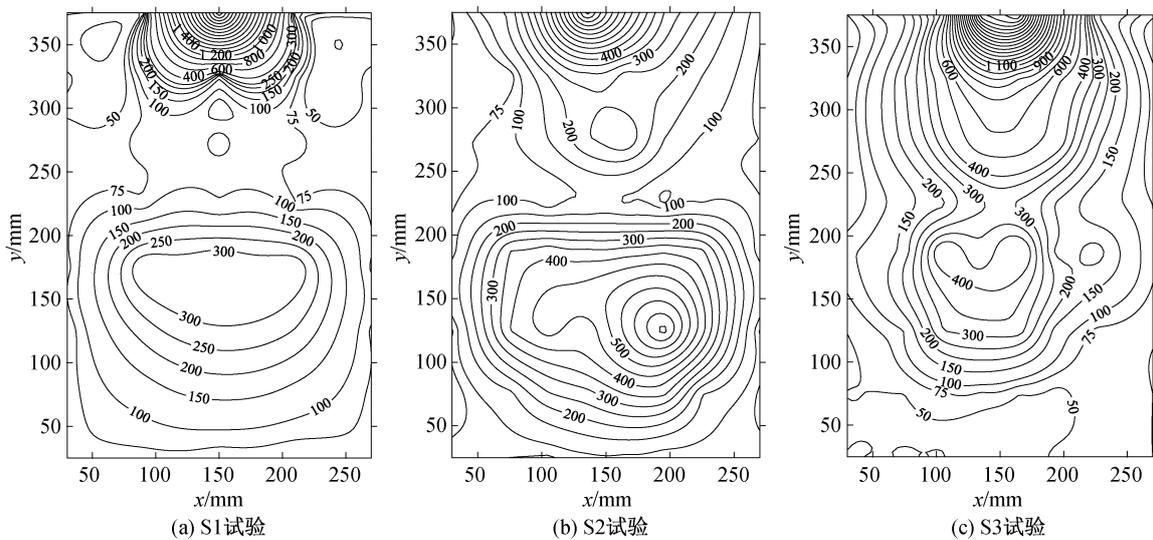


图 6 试样贯入阻力分布

(单位:kPa)

Fig. 6 Distributions of penetration resistance of the sample

上半区域的处理范围在三者试验中最小。S3 下半区域的贯入阻力值主要集中在 0~400 kPa,其中大于等于 100 kPa 的等值线的覆盖范围小于 S2 试验。综上,S2 和 S3 试验的处理效果好于 S1 试验,其中 S2 试验对下半区域的处理效果最佳,S3 试验对上半区域的处理效果最佳,因此通电初始即向中间孔注入  $\text{CaCl}_2$  溶液,下半区域的排水及加固效果反而不佳,同时上半区域的排水过程也较早地受到抑制,选取合适的时间向中间孔注浆,可以使上、下半区域的处理效果均达到最佳。

### 3 结论

1) 阳极-中间孔联合注浆电化学加固处理时,注浆时序的选取对试验土体电流和排水会产生显著影响。通电初始即向阳极、中间孔中注入  $\text{CaCl}_2$  时,排水速率与电流表现为单峰特征,当通电一段时间后再向中间孔中注入  $\text{CaCl}_2$  时,排水速率与电流则表现为双峰特征,适当推迟中间孔注浆的时间有利于提高总排水量。

2) 阳极-中间孔联合注浆的方式促进了下半区域的固结沉降,三组试验中,S2 试验各点最终沉降相较于 S1、S3 试验更均匀,因此选择合理的时段向试样的中间孔注入  $\text{CaCl}_2$  溶液可以使整个试样区域的沉降更加均一。

3) 试验结束后,S2 和 S3 试验加固均匀性和加固范围明显好于 S1 试验,其中 S2 试验对下半区域的处理效果最佳,S3 试验对上半区域的处理效果最佳,因此通电初始即在中间孔注浆,不利于上、下半区域的加固。从排水量、沉降及加固均匀性等因素综合考虑,后期有必要进一步研究合理的注浆时序。

#### 参考文献:

[1] LI X B, ZHAO R, FU H T, et al. Slurry Improvement by Vacuum Preloading and Electro-osmosis[J]. Proceedings

of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering,2018,172(2):1-36.

- [2] 刘松玉,周建,章定文,等. 地基处理技术进展[J]. 土木工程学报,2020,53(4):93-110.
- [3] CASAGRANDE I L. Electro-osmosis in Soils[J]. Geotechnique,1949,1(3):159-177.
- [4] XUE Z, TANG X, YANG Q, et al. Comparison of Electro-osmosis Experiments on Marine Sludge with Different Electrode Materials[J]. Drying Technology,2015,33(8):986-995.
- [5] 刘飞禹,王逸杰,王军. 含易溶盐层状软黏土的电渗固结特性[J]. 中国公路学报,2016,29(5):19-25.
- [6] 王柳江,刘斯宏. 电极布置形式对电渗加固软土效果的影响试验[J]. 河海大学学报:自然科学版,2013,41(1):64-69.
- [7] 杨克军,袁国辉,符洪涛,等. 通电方式对电渗加固软土影响试验研究[J]. 水利水电技术,2020,51(2):170-176.
- [8] 李瑛,龚晓南,郭彪,等. 电渗软黏土电导率特性及其导电机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(Z2):4027-4032.
- [9] OU C Y, CHIEN S C, YANG C C, et al. Mechanism of Soil Cementation by Electroosmotic Chemical Treatment[J]. Applied Clay Science,2015,104:135-142.
- [10] 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(3):44-52.
- [11] CHIEN S C, OU C Y, LEE Y C. A Novel Electroosmotic Chemical Treatment Technique for Soil Improvement[J]. Applied Clay Science,2010,50(4):481-492.
- [12] 任连伟,肖扬,孔纲强,等. 化学电渗法加固软黏土地基对比室内试验研究[J]. 岩土工程学报,2018,40(7):1247-1256.
- [13] 付英杰,王柳江,刘斯宏,等.  $\text{CaCl}_2$  溶液起始注入时间对电化学加固效果影响试验[J]. 水利水电技术,2019,50(11):51-58.

(责任编辑 周雪梅)