

基于透明黏土的电渗法加固软基模型试验

叶 樵¹, 张彦红¹, 刘江涛¹, 周 坤^{2,3}, 丰土根^{2,3}, 孔纲强^{2,3*}

(1. 中铁(上海)投资集团有限公司, 上海 200000; 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;
3. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 电渗法是目前国内外软土地基加固的常用方法之一, 然而, 电渗法加固软基过程中土体内部的位移场等加固机理尚不明确。基于透明黏土材料和 PIV 技术, 开展电渗法加固软基透明土模型试验研究, 可视化观测电渗过程中土体内部的电阻、位移场、以及排水量等的变化规律, 揭示软弱土地基电渗加固机理。研究表明: 利用透明黏土材料和 PIV 技术研究电渗法加固软基的方法是可行且可靠的。本文试验条件下, 电压梯度每增大 0.2 V/cm, 电流峰值平均增大 35%, 排水速率峰值平均增大 30%。

关键词: 软基加固; 电渗法; 透明黏土; 位移场; 模型试验

中图分类号: TU41 文献标识码: A 文章编号: 2096-7195(2020)03-0187-05

Study on soft ground reinforcement by electro-osmotic method based on transparent clay

YE Qiao¹, ZHANG Yan-hong¹, LIU Jiang-tao¹, ZHOU Kun^{2,3}, FENG Tu-gen^{2,3}, KONG Gang-qiang^{2,3*}

(1. China Rail Way (Shanghai) Investment Group Co., Ltd., Shanghai 200000, China;

2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Electro-osmosis method is one of the widely used methods for soft ground treatment in the world. However, the reinforcement mechanism is still unclear, such as the displacement field inside the soil during the process of reinforcing the soft foundation. Using transparent clay materials and PIV technology, the model test of reinforcing the soft foundation by electro-osmosis method was carried out. The internal resistance, displacement field and water discharge of the soil were observed visually, and this revealed the reinforcement mechanism of soft ground treatment using electro-osmosis method. The results showed the feasibility and reliability of electroosmosis method. In the experimental conditions of this paper, the peak value of current increases about 35% and the peak value of drainage rate increases about 30% under every 0.2V/cm increase of the voltage gradient.

Key words: soft ground treatment; electro-osmotic method; transparent clay; displacement field; model test

0 引 言

近年来, 电渗法加固软基逐渐成为国内外相关学者的研究热点问题。电渗法具有加固效率高、加固效果好等优点^[1-2], 但是, 目前也存在耗电量、加固不均匀、电极腐蚀严重等一些问题与不足^[3-5]。近年来, 基于透明土材料和 PIV 图像处理技术的透明土模型试验方法, 在岩土工程相关问题研究中得到一定的应用^[6-7], 为可视化观测电渗法加固软基全

过程及效果评价提供了技术路径与支撑。通过人工合成透明土材料, 可以模拟天然黏土或天然砂土, 根据所模拟的天然土体类型不同, 透明土也可以分为透明黏土和透明砂土两大类。目前制配透明砂土的材料主要有熔融/烘烤石英砂、二氧化硅等^[8-9], 制配透明黏土的材料主要有无定形二氧化硅、Laponite RD、Carbopol Ultrez 10 等材料^[10-12]。孔纲强等^[13]基于熔融石英砂制备成的透明砂土, 开展了常水头渗透试验和电渗法处治砂土地基过程中土体

收稿日期: 2020-05-08

作者简介: 叶樵(1968—), 男, 高级工程师, 主要从事铁路、地铁、市政工程等领域施工技术工作。E-mail: 26038328@qq.com。

*通讯作者: 孔纲强, 男, 河海大学教授、博士生导师, 主要从事能源地下结构、透明土试验技术等方面的教学与科研工作。E-mail: gqkong1@163.com。

内部位移场或渗流场的变化规律,初步验证了基于透明土材料开展电渗法加固土体全过程研究方法的可行性。然而,电渗法主要应用于低渗透系数的黏土地区,因此,有必要基于透明黏土材料开展电渗法加固软土地基,有效揭示黏土内部加固机理。

综上所述,本文基于 Carbopol 材料配制成的透明黏土材料和 PIV 技术,开展电渗法加固软基的透明土试验,可视化观测土体内部的位移场、排水量、以及电阻等变化规律,可为电渗法加固软基设计、计算与应用提供技术支撑。

1 模型试验简介

1.1 透明黏土材料的制配

本文试验制配透明黏土材料,需要丙烯酸聚合物、氢氧化钠溶液、水等材料,制配设备需要搅拌机、加热器、恒温箱、真空泵等仪器。试验所采用一种含有聚烯基聚醚交联的丙烯酸聚合物,英文名 Carbopol。该材料常温下为粉末状(图1),单个的颗粒堆叠组成,粒径范围为 50~100 μm,比重为 1.454 3;肉眼可见为白色,但其实际颗粒为透明,主要是因为光的折射导致。氢氧化钠溶液浓度较低,基本不影响安全操作。配制完成的透明黏土材料的压缩固结特性和渗透特性见文献^[12],由此可知,透明黏土与天然黏土的渗透系数一致,都在 $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{ cm/s}$ 范围,适合模拟天然黏土的渗透特性,以及本文电渗加固软基模型试验研究。



图1 Carbopol 粉末材料照片
Fig. 1 Carbopol

1.2 PIV 技术

本文所采用的图像处理技术为 PIV 技术,试验仪器包括激光光源、高清相机、透明容器等。PIV 图像处理技术原理(即图像坐标与物理坐标相互转化)如图2所示,通过图像灰度值,建立标准关联函数进行图像处理与分析。

1.3 电渗原理与方法

电渗过程是导线、电极和土体等组成的综合电

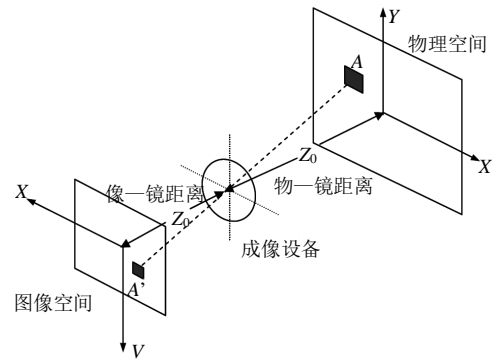


图2 PIV 图像处理技术原理

Fig. 2 Principle of PIV image processing technology

路系统的作用过程,电流通过不同介质时会在接触面上产生一定的能力损耗,即电流通过电极和土体基础面时会产生电压降。真正作用在土体上用于电渗排水的电压定义为有效电势 V_e ,即忽略在导线和电极上损耗的电压。为了进一步研究有效电势的变化特性,Casagrande 提出了效率因子 β ,其值为有效电势和输出电压的比值,表达式如下:

$$\beta = \frac{V_e}{V_0} \times 100\% \quad (1)$$

表现阳极、阴极的电势降的参数还有接触电阻,假设阳极与土接触面的电阻为 R_1 (称作阳极接触电阻),阴极与土接触面的电阻为 R_2 (称作阴极接触电阻)。土体电阻 R 可以直接用有效电势与电流的比值表示。 R_1 、 R_2 可分别表示为:

$$R_1 = V_1 / I_t \quad (2)$$

$$R_2 = V_2 / I_t \quad (3)$$

式中, I_t 表示土体中的瞬时电流。

为了反映土体在电压作用下的渗透特性,提出电渗透系数 K_e ,该参数反映了电场力驱动下的土体中水渗透能力指标。电渗透系数 K_e 与土体矿物成分、电解质溶液浓度等因素有关,而与水力渗透系数、含水率、孔隙比等因素无关。根据 Esrig 提出的电渗理论可以可得下式,单位为 $\text{cm}^2/(\text{s} \cdot \text{V})$:

$$K_e = \frac{\Delta Q}{i_e \cdot A \cdot t} \quad (4)$$

式中, ΔQ 为 t 时间范围内的排水体积, ml; i_e 为有效电势梯度, V/cm ,可由 $i_e = V_e/L$ 求得, L 表示土样长度, cm; A 为电渗排水横截面积, cm^2 ; t 为电渗时间, s。

在电渗排水的后期,土体电阻和接触电阻的不

断增大会导致用来发热的电能占比越来越大, 实际用于电渗排水的能量占总电能的比例不断下降。为了研究电渗效率, 焦丹^[14]提出能耗系数 C (单位为 $V \cdot A \cdot h/mL$), 该参数表示了排出单位体积水消耗的电能, 公式如下:

$$C = \frac{V_0 \bar{I}_{t_1 t_2} (t_2 - t_1)}{Q_2 - Q_1} = \frac{V_0 \bar{I}_{t_1 t_2} (t_2 - t_1)}{\Delta Q} \quad (5)$$

式中, $\bar{I}_{t_1 t_2}$ 为 t_1 时刻到 t_2 时刻的平均电流, A; t_1 、 t_2 为通电时刻, h; Q_1 、 Q_2 为 t_1 、 t_2 时刻的总排水量, mL。

1.4 试验工况设计

本文设计的试验工况见表 1 所示。试验终止条件: 若到达设定时间后其排水速率仍未小于 5 mL/h, 则继续通电直至满足停止试验条件。

表 1 模型试验方案

Tab. 1 Model test scheme

试验编号	电渗时长/h	输出电压/V	电压梯度/(V/cm)
A1	24	10.2	0.6
A2	24	13.6	0.8
A3	24	17.0	1.0

2 试验结果与分析

2.1 电流规律与分析

3 个工况 A1、A2、A3 的电流随时间变化的曲线图如图 3 所示。由图 3 可知, 在前 1~2 h 内, 电流强度无较大变化, 其实在整理数据的时候还发现在前 1~2 h 内甚至出现电流稍微增大的现象。原因是电渗初始阶段, 电场力的作用导致透明黏土内正、负离子分别向阴极、阳极移动, 形成了土体中电荷重新分布。之后电流随时间减小, 其在 2~10 h 下降的最快, 这是因为透明土黏土中的电解离子浓度越来越低、接触电阻不断增大的结果。显然电压越大, 电流也越大, 电压梯度每增大 0.2 V/cm, 电流峰值平均增大 35%; 试验 8 h 后 3 个工况的电流都有大幅度降低, 甚至接近于 0 A。总体来说, 电压梯度只是改变了电流总体大小, 对电流变化趋势没有较大影响。这与天然黏土的相关试验结果相同。

2.2 电势规律与分析

不同位置电势与有效电势分别如图 4 和图 5 所示; 其中, V_a 、 V_b 、 V_c 分别为阳极、试样中间和阴极位置处的电势。由图 4 可知, 电势 V_c 变化较小, 只在试验前期会有所波动; 而电势 V_a 在电渗初始阶段很小, 几乎为 0, 试验后期增大到一定值后保持

稳定; 电势 V_b 大致为 V_a 、 V_c 的平均数, 这说明土体中的有效电阻大值为均匀分布, 即在任意时刻土体电阻随土体长度线性增大。还可以看到在电渗前期的 0~5 h 内的电势有明显先减小再增大的波动, 直至 10 h 以后才保持稳定。电渗开始阶段, 透明黏土中电荷重新分布, 阳极接触电阻短时间内保持较小阻值, 所以测点电势才有 0~2 h 的下降趋势。

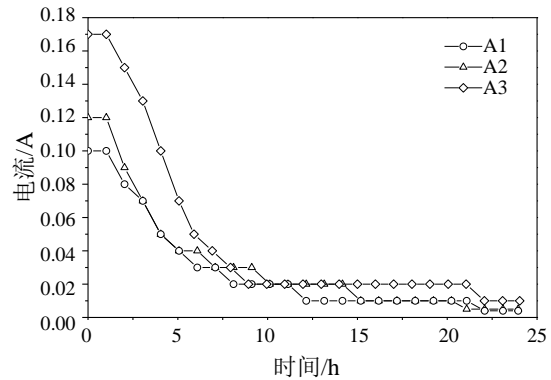


图 3 不同电压梯度下电流随时间变化曲线

Fig. 3 Curves of current versus time under different voltage gradients

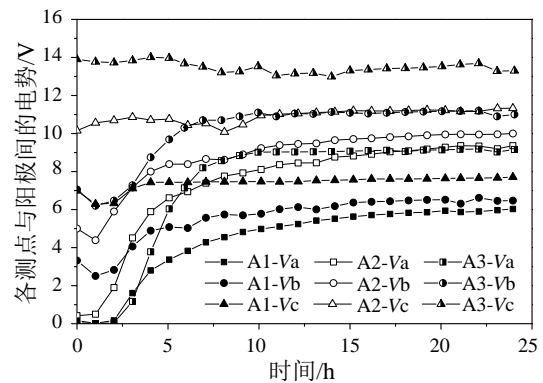


图 4 不同电压梯度下电极间电势随时间变化曲线

Fig. 4 Curves of electrode potential versus time under different voltage gradients

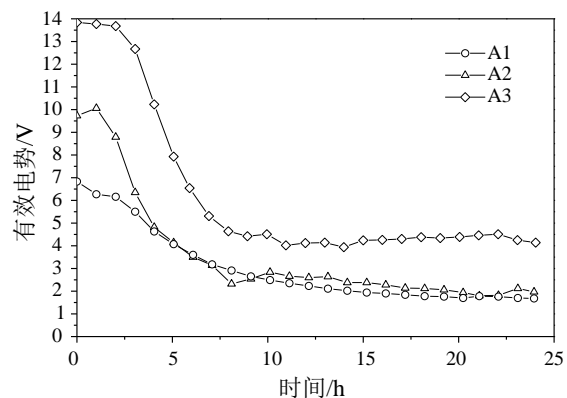


图 5 不同电压梯度下有效电势随时间变化曲线

Fig. 5 Curves of effective potential versus time under different voltage gradients

由图5可知有效电势变化的总体趋势为快速变小然后逐渐趋于稳定值,前2h的有效电势变化较小,在2~10h为快速变小的阶段,这是因为前期电解现象明显,透明土体接触电阻迅速增大,有效电势迅速减小,而之后保持一定值应该与透明黏土内部电阻保持稳定或者与接触电阻保持一定比例有关。电压梯度的不同也只影响了测点电势和有效电势的大小,电压梯度每增大0.2 V/cm,有效电势最大值平均增大30%;整体变化规律跟电压大小无关,土体中各点电势最后都会到达一定值后保持不变,有效电势在减小到一定值后保持不变,这个稳定值也随电压梯度增大而增大。电势结果也与天然黏土电渗试验相一致。

2.3 有效电阻和接触电阻规律与分析

有效电阻即为有效电势与电流的比值,可得出阳极、阴极的接触电阻,具体如图6~图8所示。有效电阻和接触电阻都随着时间不断增大,其中阳极接触电阻在试验开始2h内几乎为0,在第5h后阳极接触电阻迅速增大,最后接触阻值也远远大于有效电阻,而有效电阻即为透明黏土阻值;阴极电阻虽然也随时间增大,但是在试验快结束阶段增长速率减小,这说明了阴极电极和透明黏土接触面快要接近稳定状态,只是因为带电离子浓度减小导致其阻值还是在缓慢增加。总体上看,有效电阻占有所有电阻阻值的比例越来越小,两个电极的接触电阻阻值比例逐渐增大,说明电能大部分都不是用来驱动排水渗透的,做了很多无用功。电压梯度对电阻的影响也是和电流、电势一样,电压梯度越大,电阻也越大,电压梯度每增大0.2 V/cm,有效电阻和接触电阻平均增大23%。说明若使用高电压,其能耗多半浪费在电阻发热上。同样,其结果也与天然黏土类似。

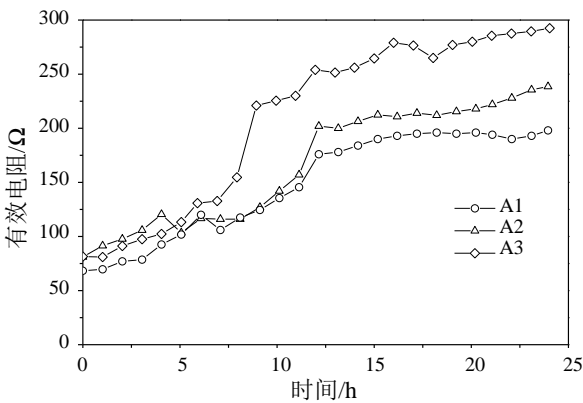


图6 不同电压梯度下有效电阻随时间变化曲线
Fig. 6 Curves of effective resistance versus time under different voltage gradients

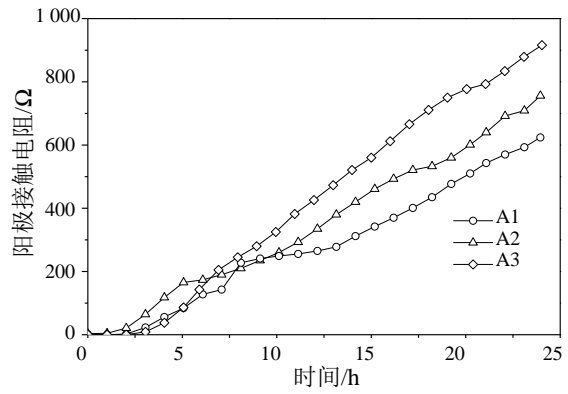


图7 不同电压梯度下阳极接触电阻随时间变化曲线
Fig. 7 Curves of anode contact resistance versus time under different voltage gradients

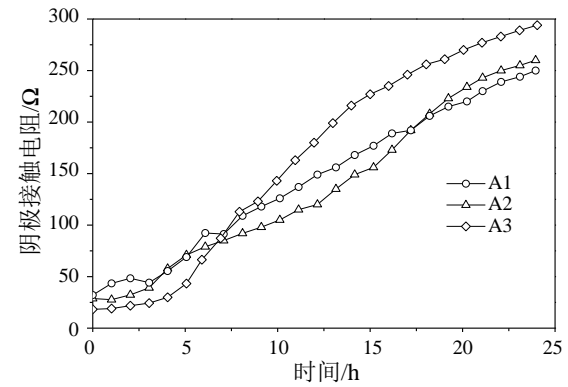


图8 不同电压梯度下阴极接触电阻随时间变化曲线
Fig. 8 Curves of cathodic contact resistance versus time under different voltage gradients

3 结 论

本文基于透明黏土材料和PIV图像处理技术,开展了电渗法加固软基的模型试验,可视化观测了电渗过程中土体内部位移场、有效电阻和排水量,可以得到如下几点结论:

- (1) 本文所采用的透明黏土材料和PIV技术组成的透明土试验技术,适用于研究电渗法加固软基工程相关机理研究。
- (2) 本文试验条件下,排水速率小于5 mL/h可以作为电渗试验终止标准;电压梯度每增大0.2 V/cm,电流峰值平均增大35%、有效电势最大值平均增大30%、有效电阻和接触电阻平均增大23%。
- (3) 本文试验条件下,电压梯度增大会导致能耗的增加,选用0.8 V/cm电压梯度能较充分利用电能,提高能耗效率。

参考文献

- [1] 李一雯, 周建, 龚晓南, 等. 电极布置形式对电渗效果影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 1972-1978.
- [2] 陶燕丽, 周建, 龚晓南, 等. 基于杭州软土的电渗迁移过程试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(2): 448-453.
- [3] 周昌, 胡新丽, 徐楚, 等. 基于电磁驱动的滑坡模型水分迁移理论及试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(9): 1001-1008.
- [4] Xue Z J, Tang X W, Yang Q. Influence of voltage and temperature on electro-osmosis experiments applied on marine clay[J]. Applied Clay Science, 2017, 141: 13-22.
- [5] 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.
- [6] Kong G Q, Cao Z H, Zhou H, et al. Analysis of pile under oblique pullout load using transparent soil models[J]. Geotechnical Testing Journal, 2015, 38(5): 725-738.
- [7] 曹兆虎, 孔纲强, 周航, 等. 基于透明土材料的静压楔形桩沉桩效应模型试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1363-1367.
- [8] Guzman I L, Iskander M. Geotechnical properties of sucrose-saturated fused quartz for use in physical modeling[J]. Geotechnical Testing Journal, 2013, 36(3): 448-454.
- [9] 孔纲强, 刘璐, 刘汉龙, 等. 透明砂土变形特性三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1140-1146.
- [10] Lo H, Tabe K, Iskander M, et al. A transparent water-based polymer for simulating multiphase flow[J]. Geotechnical Testing Journal, 2010, 33(1): 1-13.
- [11] Wallace J F, Rutherford C J. Geotechnical properties of LAPONITE RD®[J]. Geotechnical Testing Journal, 2015, 38(5): 574-587.
- [12] 孔纲强, 周杨, 刘汉龙, 等. 新型透明黏土制配及其物理力学特性研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(12): 2208-2214.
- [13] 孔纲强, 孙学瑾, 刘汉龙, 等. 孔隙液体对透明土渗透特性影响对比试验[J]. 水利学报, 2017, 48(11): 1303-1310.
- [14] 焦丹. 软黏土电渗固结试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.

【简讯】

2020年岩土工程西湖论坛：岩土工程地下水控制理论、技术及工程实践 (2020年10月23—25日, 杭州) (一号通知)

在广泛征求意见的基础上, 岩土工程西湖论坛(2020)的主题定为: 岩土工程地下水控制理论、技术及工程实践, 并拟定于2020年10月24—25日(23日报到)在杭州花家山庄召开。建筑工程中基坑、地下工程中隧道和边坡工程中滑坡等工程事故, 大部分都涉及到地下水, 本次会议拟开展岩土工程地下水控制的新技术、新方法、新设备、新工艺等进行交流, 旨在促进我国岩土工程技术水平不断提升, 更好地为工程建设服务。会前将围绕该主题组织有关专家学者编写专著岩土工程西湖论坛系列丛书第4册《岩土工程地下水控制理论、技术及工程实践》, 并在中国建工出版社出版。

会议主题: 岩土工程地下水控制理论、技术及工程实践

专题研讨会: 岩土工程西湖论坛(2020)

出版专著:

将围绕该主题组织有关专家学者编写专著岩土工程西湖论坛系列丛书第4册《岩土工程地下水控制理论、技术及工程实践》, 并在中国建工出版社出版。

联系人: 宋秀英

电话: 0571-88208775

邮箱: xysong2020@163.com

网址: 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心
<http://www.zjdxyt.com>