

DOI: 10.11779/CJGE2019S1038

# 化学电渗法加固软基位移场观测透明土模型试验

孔纲强, 刘大鹏, 傅钧义, 周 杨, 文 磊

(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:** 化学电渗法是通过电极添加化学溶液以提高电渗效率、增强加固效果的新技术。基于新型透明黏土材料和 PIV 技术, 开展化学电渗法加固软基透明土模型试验, 可视化观测土体内部位移场、排水量等变化规律; 着重分析了电压梯度、电渗时长、以及化学溶液浓度等因素对软基加固效果的影响规律。研究表明: 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%; 加入化学溶液可降低 40% 的有效电阻, 试剂浓度每增大 0.5 mol/L, 排水速率峰值平均增幅为 25%。

**关键词:** 软基处理; 化学电渗法; 透明黏土; 位移场; 模型试验

中图分类号: TU472.5

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2019)S1 - 0149 - 04

**作者简介:** 孔纲强(1982—), 男, 浙江磐安人, 博士, 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研究工作。E-mail: gqkong1@163.com。

## Transparent model tests on displacement field measurement of soft ground reinforcement by electro-osmotic chemical method

KONG Gang-qiang, LIU Da-peng, FU Jun-yi, ZHOU Yang, WEN Lei

(Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Chemical electro-osmosis is one of new technologies to increase the electro-osmotic efficiency and enhance the reinforcing effects by adding chemical solution through the electrode. Based on one new transparent clay material and PIV technology, model tests on the soft ground reinforcement by chemical electro-osmosis method are carried out. The internal displacement field and drainage are measured, and the reinforcement effects influenced by voltage gradient, electro-osmotic duration, chemical solution concentration, and other factors are discussed and analyzed. Under this model test condition, the results show that the current peak value increases by about 35%, and the drainage rate increases by about 30% under every 0.2 V/cm increase of the voltage gradient. The addition of chemical reagent can reduce the effective resistance by 40%. Every 0.5 mol/L increase in the concentration of the reagent, the average increase in the peak rate of the drainage rate is 25%.

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

## 0 引 言

电渗法加固软基具有加固效率高、效果好等优点, 而逐渐成为国内外相关学者的研究热点问题之一<sup>[1, 2]</sup>; 但是, 目前该技术方法仍存在耗电量大、加固效果不均匀、电渗后期电极附近气泡聚集而导致效率降低等一些技术经济性问题<sup>[3]</sup>。化学电渗法, 即通过在电渗过程中掺入化学溶液 (CaCl<sub>2</sub> 或 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> 溶液) 以加速电渗速率、加固土体、协调土体加固效果均匀性等功, 也为电渗法加固软基提供了一种新的思路<sup>[4]</sup>。相关学者针对化学溶液种类、电极反转等影响化学电渗法软基加固效果开展了系列研究, 并取得了一些有益的成果<sup>[5-6]</sup>; 然而, 化学电渗法加固软基过程中土体内部位移场等方面的研究仍相对较少。

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<sup>[7-8]</sup>, 为全过程、可视化观测化学电渗法加固软基效果提供了技术支撑。目前配制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<sup>[9]</sup>。笔者开展了透明砂土中常水头渗透试验和电渗法处治砂土地基中土体位移场或渗流场的变化规律<sup>[10]</sup>, 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, 电渗法加固技术毕竟主要针对软弱土地基, 因此, 寻求基于透明黏土的电渗法加固效果、以及化学溶液对电渗效果的影响研究, 显得尤为必要。

综上所述, 本文基于 Carbopol Ultrez 10 材料配制成的新型透明黏土材料和 PIV 图像处理技术, 开展化

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51478165)

收稿日期: 2019 - 04 - 29

学电渗法加固软基透明土模型试验, 可视化观测土体内部位移场、排水量等变化规律; 着重分析化学溶液浓度、电压梯度、电渗时长等因素对软基加固效果的影响规律; 通过与化学电渗法加固天然黏土试验结果的对比分析, 验证利用透明黏土材料模拟天然黏土的可行性和可靠性; 为化学电渗法加固软基设计、计算与应用提供技术支撑。

## 1 模型试验概况

### 1.1 试验装置

透明黏土材料由 Carbopol Ultrez 10 配制而成, 渗透系数 ( $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{ cm/s}$ ) 与天然海相软黏土相近, 详细物理力学特性见参考文献[9]。透明模型槽上设置两个排水板和排水阀门, 排水板上每平方厘米设置一个直径 5 mm 的排水孔; 具体尺寸如图 1 所示。电极采用热镀锌电焊铁丝网, 网孔为  $9 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$  的方格。电势测针采用直径为 2 mm、长度为 25 cm 的不锈钢棒。直流稳压为  $0 \sim 60 \text{ V}$  (精度为  $0.1 \text{ V}$ ), 可调输出电流为  $0 \sim 5 \text{ A}$  (精度为  $0.01 \text{ A}$ )。在电极和电势测针之间安装数显电压表, 量程为  $0 \sim 33.00 \text{ V}$ , 精度为  $\pm 3\%$ 。阻尼式隔振光学平台、数码相机相关参数见参考文献[7]。

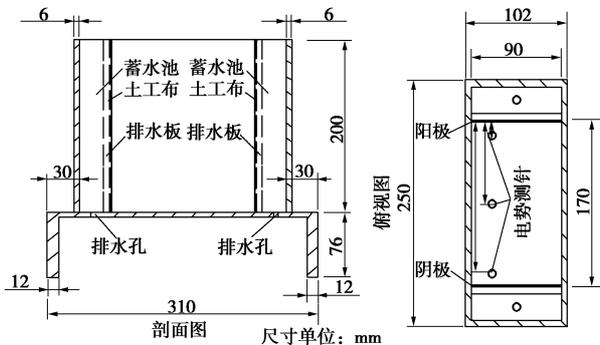


图 1 模型试验布置及尺寸示意图

Fig. 1 Layout and dimensions of model tests

### 1.2 模型试验步骤

(1) 透明土试样制配及电极布置。首先, 将电极、土工布和排水板一同插入模型槽两端卡槽中; 接着, 将透明土分层装入模型槽中; 然后, 将含有试样的模型槽放置在真空桶中进行抽真空, 待真空度保持不变之后关闭气阀, 保持真空 8 h 左右; 最后, 抽真空完成后静置 2~3 h。

(2) 测试仪器连接与检查。连接并检查模型槽、直流电源、数显电压表、CCD 相机等仪器设备的连接状态与工作性能。将试样两端的电极连接到直流电源的正、负极上。插入电势测针, 电势测针上、下端都有卡槽固定, 防止电渗过程的位移过大带动电势测针

移动。

(3) 透明土模型试验。调整 CCD 相机位置并设定每隔 5 min 定时拍摄一次; 打开直流电源开关, 打开阴极排水孔水阀门并用软管接通到量筒中; 将配制好相应浓度的化学溶液按需要体积注入到设计位置。

(4) 试验结束标准。参照设计规范, 当排水速率小于  $5 \text{ mL/h}$  时, 停止试验, 完成试验测试。

(5) 数据及图像处理与分析。采用 PIV 图像处理技术对试验过程中土体位移场的变化规律进行分析; 对试验过程中排水量、排水速率、电渗透系数等电渗特性进行系统分析。

### 1.3 工况设计

为了探讨电压梯度、电渗时长以及化学溶液浓度等因素对化学电渗法加固软基效果的影响, 本文设计的具体试验工况见表 1 所示。

表 1 模型试验工况

Table 1 Model test conditions

编号	输出电压 /V	电压梯度 / $(\text{V} \cdot \text{cm}^{-1})$	试剂及浓度/ $(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$		注液管位置
			CaCl <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	
A1—A2	10.2/13.6/17.0	0.6/0.8/1.0	—	—	—
B1—B2	13.6	0.8	—	—	—
C1—C3	13.6	0.8	0.5/1.0/1.5	—	阳极
D1—D2	13.6	0.8	0.5	0.5	阳极

### 1.4 与化学电渗法加固天然黏土试验结果对比验证

将本文基于透明黏土的化学电渗法加固土体试验与化学电渗法加固天然黏土<sup>[6]</sup>的试验结果进行对比, 排水速率与时间关系对比曲线如图 2 所示。由图 2 可见, 尽管在 7~100 h 期间变化规律存在一定的差异, 但是试验初期 (0~7 h) 和后期 (大于 100 h), 两者的数值与规律均比较相近。考虑到模型试验本身的局限性, 且试验结果主要作为定性分析, 一定程度上说明本文采用透明黏土模拟天然黏土的化学电渗法加固土体试验, 在技术方法上是可行的。

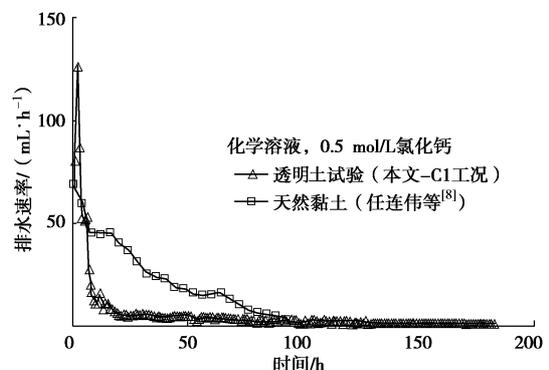


图 2 透明黏土和天然黏土中排水速率与时间关系曲线

Fig. 2 Comparison curves on drainage rate versus time for both transparent clay and natural clay

## 2 试验结果与分析

### 2.1 电压梯度的影响规律分析

不同电压梯度对排水速率以及电渗透系数的影响规律分别如图 3 (a), (b) 所示。由图 3 (a) 可见: 总排水量随时间变化而逐渐增加, 排水速率呈非线性衰减, 并最终趋于一个稳定值, 且在试验初期 (2.5 h) 排水速率达到峰值; 电压梯度每增大 0.2 V/cm, 排水速率峰值平均增大 30%, 这与天然黏土电渗试验规律类似。由此证明, 本文所采用的透明黏土材料用以模拟天然黏土电渗试验是可行的。由图 3 (b) 可见, 在不同的电压梯度下, 电渗透系数在电渗开始时迅速增大, 在 2.5 h 时达到峰值, 之后递减, 可以明显地看出电压梯度并不影响整体的电渗透系数变化规律。但是, 当电渗梯度为 0.8 V/cm 时, 电渗透系数达到最大。电渗过程中电流、有效电势、排水速率峰值及电渗透系数均在电渗初期 (2.5 h) 达到最大值, 说明电流、有效电势及电渗透系数具有一致性。

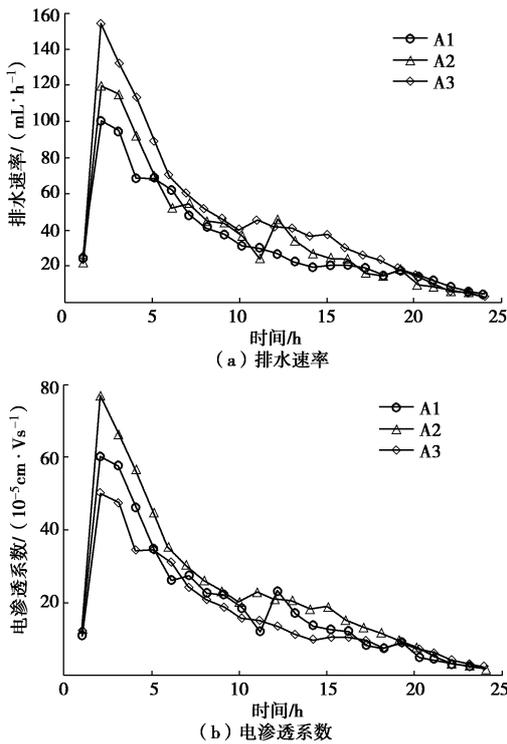


图 3 电压梯度影响规律曲线

Fig. 3 Curves of influence under different voltage gradients

电能损耗是电渗试验的重要参考指标, 图 4 为不同电压梯度的能耗系数随时间变化曲线。由图 4 可见, 电压梯度越大, 能耗系数越大; 电压梯度每增大 0.2 V/cm, 能耗系数平均增大 20%; 即排出相同体积的水, 电压大的情况下消耗的能量更多; 电压过大虽然排水速率加快, 但是能量损耗严重不经济。而从计算所得效率因子来看, 电压梯度为 0.8 V/cm 的效率因子一直

略大于另两组工况, 即该工况电渗排水效率更高。该结果与文献[8]中天然黏土的结果类似。电压梯度的增加, 可以有效地增强电渗效果但是却会对能耗有影响。

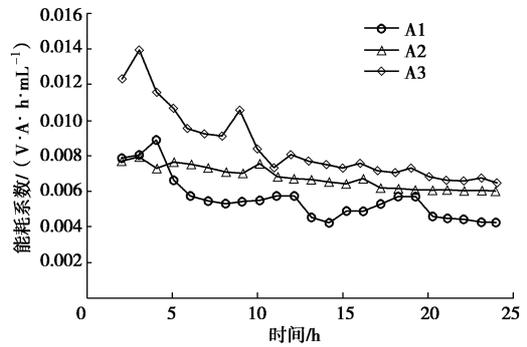


图 4 不同电压梯度的能耗系数随时间变化曲线

Fig. 4 Energy consumption coefficients with time under different voltage gradients

### 2.2 电渗时长的影响规律分析

根据电压梯度对透明黏土电渗试验中能耗系数的变化, 设计 A2、B1、B2 三组工况 (电压梯度为 0.8 V/cm) 分别设置电渗时长为 24, 36, 48 h; 随着电渗时间增长, 各个参数变化规律在 24 h 内基本一致, 不同点在土体电阻和有效电阻在后期增大速率降低, 能耗系数在 25 h 后有增大趋势 (见图 5), 排水能耗基本用于电阻发热, 不经济。因此电渗时间不宜过长, 结束试验时间点, 建议选择排水速率小于 5 mL/h 的时刻。

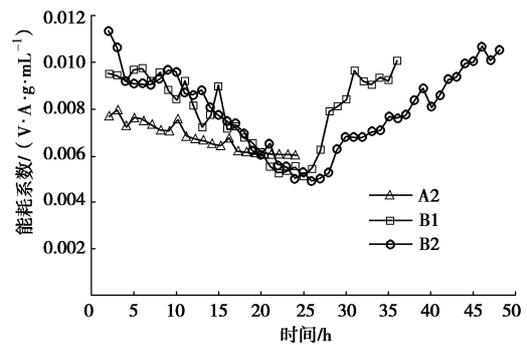


图 5 能耗系数与电渗时长关系曲线

Fig. 5 Curves of energy consumption versus electro-osmotic time

### 2.3 试剂浓度的影响规律分析

不同试剂浓度情况下, 排水速率随时间变化曲线如图 6 所示。由图 6 可知, 试剂浓度每增大 0.5 mol/L, 排水速率峰值平均增幅为 25%, 且在 2.5 h 和 6 h 时分别达到峰值。由此说明, 试剂浓度的增大可提高电渗排水效率, 缩短电渗处理时长。水属于极性分子, 电渗过程中阳离子携带水分子在电场作用下汇集到阴极形成排水, 水化阳离子迁移量代表了电渗作用的强度, 试剂浓度的越高, 土样中的阳离子越多, 电渗作用也

就越强。

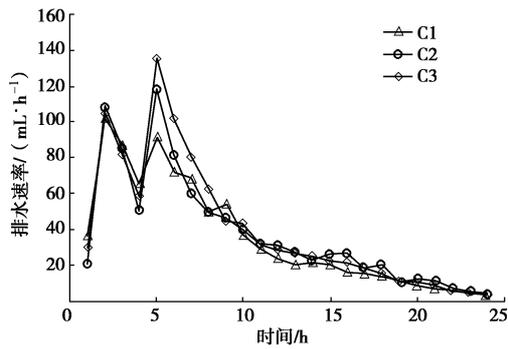


图6 化学溶液浓度对排水速率的影响规律

Fig. 6 Curves of drainage rate versus reagent concentrations

### 3 结 论

本文基于透明黏土材料和PIV技术,开展了化学电渗法加固软基模型试验,可以得到如下几点结论:

(1)透明黏土材料能较好地模拟天然黏土的渗透特性,化学电渗试验结果与天然黏土的相关试验结果规律一致。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,总排水量增大30%、排水速率峰值平均增大30%;电压梯度增大会导致能耗的增加,选用0.8 V/cm电梯度能较充分利用电能,提高能耗效率。

(2)在电渗过程中加入化学溶液,本文试验条件下,试剂浓度每增大0.5 mol/L,排水速率峰值平均增幅为25%;与传统电渗法相比,加入化学溶液能提高总排水量约35%。

(3)本文试验条件下,加入化学溶液会增大40%的竖向位移速率;试验后期土体从阳极到阴极的位移愈发明显。

#### 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. (LI Yi-wen, ZHOU Jian, GONG Xiao-nan, et al. Experimental research on influence of electrode array on electroosmotic effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7): 1972 - 1978. (in Chinese))

[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. (TAO Yan-li, ZHOU Jian, GONG Xiao-nan, et al. Experimental study on transport process of electro-osmosis based on Hangzhou soft soil[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(2): 448 - 453.

(in Chinese))

[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. (ZHOU Chang, HU Xin-li, XU Chu, et al. Theory and experimental study of moisture migration of landslide model test based on electromagnetic drive[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(9): 1001 - 1008. (in Chinese))

[4] OU C Y, CHIEN S C, LEE T Y. Development of a suitable operation procedure for electroosmotic chemical soil improvement[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2012, 139(6): 993 - 1000.

[5] CHIEN S C, TENG F C, OU C Y. Soil improvement of electroosmosis with the chemical treatment using the suitable operation process[J]. Acta Geotechnica, 2015, 10(6): 813 - 820.

[6] 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. (REN Lian-wei, XIAO Yang, KONG Gang-qiang, et al. Laboratory tests on soft ground improvement by chemical electro-osmosis method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(7): 1247 - 1256. (in Chinese))

[7] 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, ASTM, 2015, 38(5): 725 - 738.

[8] 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. (KONG Gang-qiang, LIU Lu, LIU Han-long, et al. Triaxial tests on deformation characteristics of transparent glass sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6): 1140 - 1146. (in Chinese))

[9] 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. (KONG Gang-qiang, ZHOU Yang, LIU Han-long, et al. Study on new transparent clay manufacture and its physical and mechanical properties[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(12): 2208 - 2214. (in Chinese))

[10] 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. (KONG Gang-qiang, SUN Xue-jin, LIU Han-long, et al. Contrast experiments on permeability of transparent soil influenced by pore fluids[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(11): 1303 - 1310. (in Chinese))

(责编: 明经平)