

DOI: 10.11779/CJGE2021S2024

电渗-堆载-化学灌浆联合处理淤泥质软土的试验研究

吕延栋¹, 朱龙祥¹, 王旭², 许帅¹, 王炳辉¹, 张雷^{*1,3}

(1. 江苏科技大学土木工程与建筑学院, 江苏 镇江 212005; 2. 济南市城乡规划编制研究中心, 山东 济南 250000;

3. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 211816)

摘要: 江苏各市均广泛分布着具有高含水率、高压缩性、低渗透性、低抗剪强度、高含盐量及显著的结构性与流变性等特点的软弱土, 传统的地基处理方法无法快速对该类土进行处理。现将电渗与堆载预压和化学灌浆结合, 形成一种“电渗-堆载-化学灌浆”联合加固软土地基的新方法, 并进行室内试验。试验从排水量、通电电流、有效电势、十字板剪切强度、最终含水率等方面与传统地基处理方法进行比较。结果表明, 电渗-堆载-化学灌浆联合法在电渗-化学灌浆联合法的基础上增加堆载作用, 一定程度上可以抑制裂缝的产生, 阻止有效电势的减少, 改善电极与土体的接触性, 实现电渗、化学灌浆和堆载的共同加固。此外, 电渗-堆载-化学灌浆联合法对电渗排水具有促进作用, 在一定程度上能够减缓土体后期排水速率降低的趋势, 使得有效排水时间更长。

关键词: 电渗加固; 堆载; 化学灌浆; 排水速率; 剪切强度

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)S2-0100-04

作者简介: 吕延栋(1999—), 男, 江苏徐州人, 主要从事软土地基处理和环境岩土工程方面的研究工作。E-mail: 182210901420@stu.edu.cn

Experimental investigation on electro-osmosis – surcharge preloading – chemical grouting for silty soft soils

LÜ Yan-dong¹, ZHU Long-xiang¹, WANG Xu², XU Shuai¹, WANG Bing-hui¹, ZHANG Lei^{1,3}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212005, China; 2. Jinan Urban

Planning Exhibition, Jinan 250000, China; 3. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: Soft soils with high water content, high compressibility and salt content, low permeability and shear strength, significant structural and rheological properties are widely distributed in Jiangsu Province. The treatment of these soft soils is complicated, therefore, the traditional methods cannot effectively consolidate the soft soils. To improve the consolidation efficiently, electro-osmosis is combined with preloading and chemical grouting to develop a new approach, electro-osmosis – surcharge preloading – chemical grouting. Laboratory tests are conducted on several soil samples to evaluate the effectiveness of the combined method. The water drainage, effective potential, vane shear strength as well as the ultimate water content are examined. The results indicate that the combined method results in the increase of heap load, which inhibits the generation of cracks and effectively improves the loss of the electric potential. The contact between electrode and soil is also increased to effectively utilize the combined effects of the electro-osmosis, chemical grouting and surcharge preloading. Moreover, the combined method of electro-osmosis – surcharge preloading – chemical grouting can promote the electro-osmotic drainage, and reduce the trend of low drainage rate with an increasing duration for the consolidation process.

Key words: electro-osmosis consolidation; surcharge preloading; chemical grouting; water discharge rate; shear strength

0 引言

江苏各市广泛分布的软弱土, 具有高含水率、高压缩性、低渗透性、低抗剪强度、高含盐量及显著的结构性与流变性等特点, 对其处理较为复杂。针对此类软黏土, 电渗法有较好的处理效果, 但是电渗法存在耗能过高、加固不均匀的问题^[1]。为缓解城市用地紧张, 根据已有研究成果, 提高电渗加固软土性能主

要有两种研究思路: ①通过改变电极材料^[2-3]、电极布置形式^[4-5]和通电方式^[6]等初始条件; ②将电渗与其它方法联合使用, 常见的有电渗-堆载^[7]、电渗-真空预压^[8]、化学电渗^[9]等。本研究在第二种思路的基础上,

基金项目: 江苏省自然科学基金项目 (BK20200996); 中国博士后科学基金面上项目 (2020M681566); 国家自然科学基金项目 (51978317)

收稿日期: 2021-08-13

***通信作者** (E-mail: lei.zhang@just.edu.cn)

将电渗法与堆载预压和化学灌浆结合, 以期使电渗法更加经济可行。为探讨该法的可行性, 本文开展电渗-堆载-化学灌浆联合法 (Electro-Osmosis - Surcharge Preloading - Chemical Grouting, 简称 EO-SC-CG) 和化学电渗 (Electro-Omosis - Chemical Grouting, 简称 EO-CG) 的对比试验, 从排水量、通电电流、有效电势、十字板剪切强度、含水率等方面证实电渗-堆载-化学灌浆联合法的有效性。

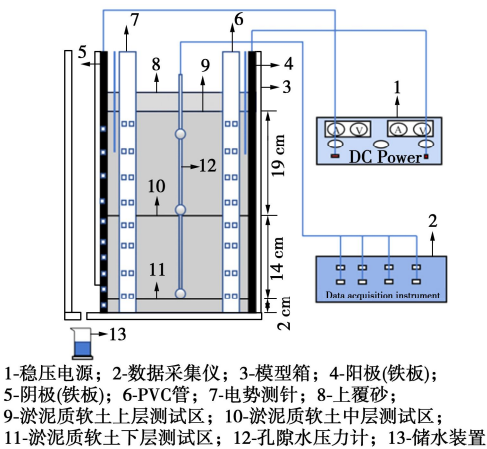
1 试验材料与试验方法

1.1 试验材料

室内模型试验所用土样为取自江苏盐城地区的滩涂软土, 通过室内土工试验对软土的基本物理性质进行测试。试验前, 将原状土烘干后击碎, 然后倒入搅拌桶中充分搅拌均匀后静置 24 h, 再对软土进行重塑, 使试验用滩涂软土的含水率达到 40%, 最终得到重塑土的基本物理性质指标如表 1 所示。

表 1 重塑土的基本指标

Table 1 Basic parameters of remolded soil				
含水率 $w/\%$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	G_s	不排水抗剪强度 c_u/kPa
40	30.8	13.9	2.71	≈ 0



1-稳压电源; 2-数据采集仪; 3-模型箱; 4-阳极(铁板); 5-阴极(铁板); 6-PVC管; 7-电势测针; 8-上覆砂; 9-淤泥质软土上层测试区; 10-淤泥质软土中层测试区; 11-淤泥质软土下层测试区; 12-孔隙水压力计; 13-储水装置

图 1 电渗-堆载-化学灌浆试验装置图

Fig. 1 Schematic configuration of electro-osmotic - surcharge preloading - chemical grouting

1.2 试验装置

室内模型试验 (EO-SC-CG 与 EO-CG) 采用自制试验装置, 主要由土样室和排水室两部分组成, 其中排水室内的排水孔为直径 25 mm 的圆形孔洞, 如图 1 所示。EO-CG 装置模型与前者相同, 区别仅在于 EO-CG 方法没有施加充当均布荷载的上覆砂。模型箱采用亚克力板材制成, 模型箱尺寸为 400 mm×300 mm×200 mm。阳极采用尺寸为 350 mm×150 mm×3 mm 的铁板; 阴极所用电极尺寸与阳极相同, 在电极板上均匀打下 48 个孔径为 4 mm 的小孔。注浆管采用内径 9 mm, 外径 11 mm 的 PVC 管, 管壁均匀设置小

孔, 并将管底封闭, 有利于注入的化学浆液向土体扩散, 同时能够有效控制化学浆液过快的向土体底部沉积。阴极注浆材料选用 Na_2SiO_3 溶液, 阳极注浆材料选用 CaCl_2 溶液^[10]。电导线采用多股铜芯电导线, 导体材质为无氧铜, 绝缘材料为聚氯乙烯。装置图 1 的上覆砂均匀铺在土样层上, 既起到堆载的作用, 又可以消除电渗模型几何边界引起的尺寸效应^[11]。

1.3 试验方案

本文主要研究 EO-SC-CG 与 EO-CG 两种加固方法对盐城地区滩涂软土的加固效果, 试验分为两组, 基本参数如表 2 所示。试验的初始含水率为 40%, 电势梯度选取 1 V/cm^[12], 电源电压均为 23 V。

表 2 试验基本参数

Table 2 Basic parameters of experiments			
组别	试验时间 /h	堆载大小 /kPa	注浆材料与注浆量
EO-SC-CG	48	1.5	CaCl_2 (45mL)+ Na_2SiO_3 (45mL)
EO-CG	48	0	CaCl_2 (45mL)+ Na_2SiO_3 (45mL)

试验开始前, 将阳极电极放置在远离排水室一侧, 阴极电极放置在靠近排水室一侧; 两侧注浆管均放置在距电极 3 cm 处; 分别放置两根测针在电极与注浆管中间。因为 EO-SC-CG 涉及施加堆载时间, 故先开展 EO-CG 试验。两组试验开始通电后实时观测记录通电电流, 电势与排水量。待排水量不再增加时, 关闭电源, 分上、中、下三层按距离阳极 0, 5, 10, 15, 20 cm, 取土样测量十字板剪切强度与含水率, 土样测试点位置如图 2 所示。过程中两组试验注浆时间均定在电流大幅降低且保持稳定的时刻。依据袁国辉^[13]进行的电渗-堆载联合试验, 当电渗固结度达到 40% 时为最佳堆载时间。故 EO-SC-CG 可根据 EO-CG 得到最终沉降量 S_∞ , 利用平均固结度表达式: $U_{\text{avg}}=S_t / S_\infty$, 得到固结度达到 40% 时的沉降量, 施加堆载。

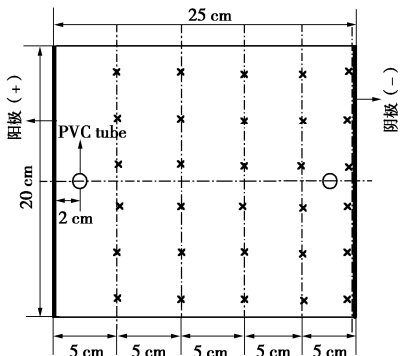


图 2 检测布置图

Fig. 2 Layout of monitoring and measuring instruments

2 试验结果与分析

2.1 排水量与排水速率

排水量与排水速率随时间的变化曲线如图 3 所

示。因为施加堆载的作用, EO-SC-CG 的排水量最终高于 EO-CG。两组试验的排水量分别为 1360, 1170 mL, EO-SC-CG 的排水量相对 EO-CG 增加 16.2%。由图 3 可知, 排水速率随时间呈现出逐渐减小的趋势, 并且在化学注浆后排水速率均会先达到一个峰值点, 之后逐步下降。EO-CG 和 EO-SC-CG 分别在试验进行至 10 h 和 8 h 时注浆, 注浆后排水速率 1 h 内增幅分别约为 28.9% 和 14.3%, 达到峰值时增幅分别约为 34.1% 和 37.5%。因堆载预压的加持作用, EO-SC-CG 的峰值增幅稍大。结合微观观测, 随着电渗的进行, 注入的浆液在直流电作用下生成 CaSiO_3 并填充土体孔隙, 导致土体的渗透性降低, 进而影响土体的排水速率。试验后期, EO-SC-CG 的排水速率高于 EO-CG, 说明 EO-SC-CG 因施加堆载预压, 在一定程度上能够缓解土体后期排水效果较差的趋势。

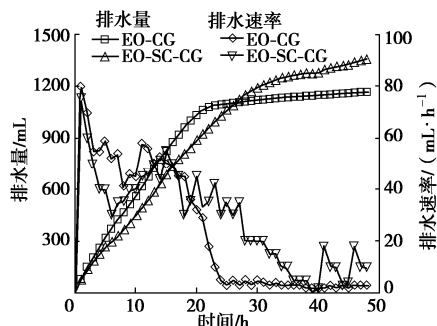


图 3 排水量与排水速率随时间的变化曲线

Fig. 3 Curves of water discharge, water discharge rate and time

2.2 有效电势

有效电势随时间的变化曲线如图 4 所示。由图 4 可知, 两组试验的有效电势均呈现出先增加后减小的趋势, 且其变化速率在注浆后都呈现出加快的趋势, 说明注浆后, 土中可移动的离子浓度增加, 促进了土体内的离子移动速率, 导致电阻减小, 有效电势增加。EO-SC-CG 在 11 h 施加堆载时, 其有效电势较前一时刻没有明显变化, 且达到第一次峰值的时间与 EO-CG 基本一致, 说明施加堆载对有效电势的提升有限。两组试验的有效电势在第一次峰值后均呈现下降趋势, 但是 EO-SC-CG 的下降速率较缓。因为阳极不断发生电化学反应, 生成的胶结物附着在土体表面, 导致电极与土体接触界面上电阻增大, 有效电势减小; 加之阳极附近土中的水不断向阴极移动, 致使阳极区土体失水产生裂缝, 接触电阻增大。而 EO-SC-CG 的有效电势下降速率较缓是因为堆载作用能够有效抑制裂缝的产生, 使得电阻增大缓慢。比较两组试验后期的曲线可知, EO-SC-CG 的有效电势相对较大, 进一步说明堆载作用在一定程度上能够抑制裂缝产生, 减缓有效电势的减少, 使有效电势总体上变化较为均匀。

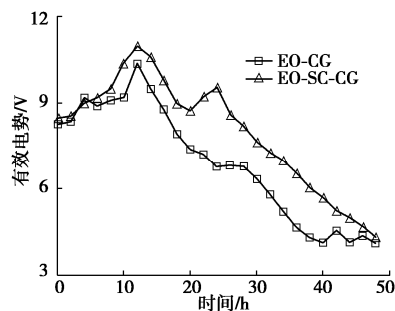


图 4 有效电势随时间的变化曲线

Fig. 4 Curves of effective potential and time

2.3 十字板剪切强度与最终含水率

将所得结果在同一距离不同深度的强度以及含水率取均值, 得到抗剪强度与最终含水率在电极间的分布如图 5 所示。由图 5 可知, 抗剪强度随距阳极的距离增大而减小, 阳极附近土体的抗剪强度最大。土中的水在电渗作用下, 自阳极移动至阴极, 阳极附近因为铁质电极的腐蚀, 生成 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 的氧化物与氢氧化物等, 一定程度上能够胶结土体。同时因为注浆作用, 阳极附近发生化学反应生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、CSH 和 CAH 等填充土体孔隙, 使阳极附近的土体强度得到提升。两组试验中, EO-SC-CG 的平均抗剪强度相对 EO-CG 提高约 14%, 故堆载对土体抗剪强度的提升具有一定作用。因为堆载产生的自重作用对土体进行了压实, 导致土体抗剪强度的提升。由于电渗作用, 孔隙水不断自阳极流向阴极, 含水率的分布呈现出从阳极到阴极逐步增大的规律。相比 EO-CG, EO-SC-CG 处理后

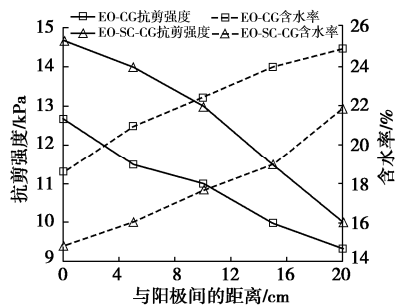


图 5 抗剪强度与最终含水率在电极之间的分布图

Fig. 5 Distribution of shear strength and final moisture content between electrodes

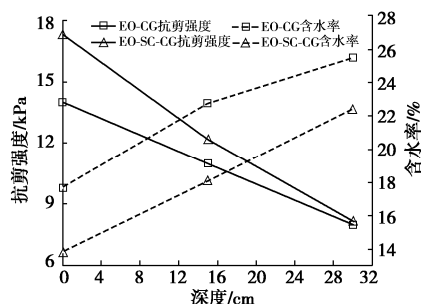


图 6 抗剪强度与最终含水率随深度分布图

Fig. 6 Distribution of shear strength and final moisture content with depth

的土体含水率较低, 减少约 17.8%。将同一深度不同距离的抗剪强度与含水率取均值, 得到抗剪强度与最终含水率随深度分布如图 6 所示。由图 6 可知, 土体的抗剪强度沿深度逐渐降低, 呈现出表层>中层>底层的规律, EO-SC-CG 得到的平均强度相比 EO-CG 提高了 14%。相比 EO-CG, EO-SC-CG 试验处理后同一深度的土体含水率较低, 减少约 17.6%。

3 结 论

通过电渗-堆载-化学灌浆与电渗-化学灌浆两组室内试验, 分析试验过程中排水量、排水速率、有效电势、十字板剪切强度与含水率等, 得以下结论:

(1) 在 EO-CG 的基础上增加堆载对电渗排水有一定的促进作用, 相对 EO-CG, EO-SC-CG 的排水速率增加 25.8%, 平均抗剪强度提高 14%。同时, EO-SC-CG 的有效排水时间更长, 堆载作用在一定程度上能减缓土体后期排水速率降低的趋势。

(2) 堆载一定程度上抑制裂缝产生, 阻止有效电势减少, 进而使有效电势总体上变化较均匀。

(3) EO-SC-CG 不仅能促进土体排出水分, 提高土体的密实度与强度, 同时也能改善电极与土的接触性, 实现电渗、化学灌浆和堆载预压的共同加固。

参考文献:

- [1] 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. (LIU Song-yu, ZHOU Jian, ZHANG Ding-wen, et al. State of the art of the ground improvement technology in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, **53**(4): 93 - 110. (in Chinese))
- [2] KALUMBA D, GLENDINNING S, ROGERS C D F, et al. Dewatering of tunneling slurry waste using electrokinetic geosynthetics[J]. Journal of Environmental Engineering, 2009, **135**(11): 1227 - 1236.
- [3] 陶燕丽, 周 建, 龚晓南, 等. 铁和铜电极对电渗效果影响的对比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(2): 388 - 394. (TAO Yan-li, ZHOU Jian, GONG Xiao-nan, et al. Comparative experiment on influence of ferrum and cuprum electrodes on electroosmotic effects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(2): 388 - 394. (in Chinese))
- [4] 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))
- [5] GLENDINNING S, LAMONT-BLACK J, JONES C J F P. Treatment of sewage sludge using electrokinetic geosynthetics[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **139**(3): 491 - 499.
- [6] 刘飞禹, 张志鹏, 王 军, 等. 分级真空预压联合间歇电渗法加固疏浚淤泥宏微观分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, **39**(9): 1893 - 1901. (LIU Fei-yu, ZHANG Zhi-peng, WANG Jun, et al. Macro and micro analyses of stepped vacuum preloading combined with intermittent electroosmosis for treating dredger slurry[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, **39**(9): 1893 - 1901. (in Chinese))
- [7] LIU H L, CUI Y L, SHEN Y, et al. A new method of combination of electroosmosis, vacuum and surcharge preloading for soft ground improvement[J]. China Ocean Engineering, 2014, **28**(4): 511 - 528.
- [8] ZHANG L, HU L M. Laboratory tests of electro-osmotic consolidation combined with vacuum preloading on kaolinite using electrokinetic geosynthetics[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2019, **47**(2): 166 - 176.
- [9] ZHANG L, WANG N W, JING L P, et al. Electro-osmotic chemical treatment for marine clayey soils: a laboratory experiment and a field study[J]. Geotechnical Testing Journal, 2017, **40**(1): 72 - 83.
- [10] 任连伟, 曹 辉, 孔纲强. 试剂注入配合比对化学电渗法处治软黏土加固效应对比研究[J]. 岩土力学, 2020, **41**(4): 1219 - 1226. (REN Lian-wei, CAO Hui, KONG Gang-qiang. Treatment effect of reagent injection mixing ratio on soft clay improved by chemical electroosmosis method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(4): 1219 - 1226. (in Chinese))
- [11] 温晓贵, 胡平川, 周 建, 等. 裂缝对电渗模型尺寸效应影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(11): 2054 - 2060. (WEN Xiao-gui, HU Ping-chuan, ZHOU Jian, et al. Experimental research on influence of cracks on size effect of electro-osmosis model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(11): 2054 - 2060. (in Chinese))
- [12] 张 雷, 王宁伟, 景立平, 等. 电渗排水固结中电极材料的对比试验[J]. 岩土力学, 2019, **40**(9): 3493 - 3501, 3514. (ZHANG Lei, WANG Ning-wei, JING Li-ping, et al. Comparative experiments of different electrode materials on electro-osmotic consolidation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(9): 3493 - 3501, 3514. (in Chinese))
- [13] 袁国辉. 电渗电化学加固与电渗联合堆载加固软土地基试验研究[D]. 温州: 温州大学, 2017. (YUAN Guo-hui. Experimental Study on Reinforcement of Soft Soil Foundation by Electrochemical Reinforcement and Electroosmosis Combined with Surcharge Preloading[D]. Wenzhou: Wenzhou University, 2017. (in Chinese))

(编校: 明经平)