

DOI: 10.11779/CJGE2017S2015

管状 EKG 电化学注浆软基加固室内试验研究

沈 扬^{1, 2}, 邱晨辰^{1, 2}, 宋顺翔¹, 芮笑曦¹, 施 文¹

(1. 河海大学岩土力学与教育部重点实验室, 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)

摘 要: 为了改善电化学注浆法存在的问题, 寻求适宜的注浆浓度和方式, 利用自主研发的装置前期对管状 EKG 电化学注浆法进行探索, 对比不同注浆浓度电化学注浆效果, 以此为基础重点分析强度和电流两个因素, 探究电化学注浆对真空预压进行二次加固的可行性, 结果表明: ①EKG 管可将真空预压和电化学注浆有机结合, 有效缓解金属电极腐蚀问题; ②电化学注浆效果显著, 必然存在浓度最优值使得注浆效果最好, 电势作为能反映外加电解质溶液后土体内变化的重要指标应该被重点研究; ③真空-电化学注浆法二次加固土样强度提升明显, 注浆浓度选择应根据土样含水率具体确定, 研究尚需完善, 但能够为真空预压的二次处理方式提供新的研究方向。

关键词: 电化学注浆; 真空预压; 注浆浓度; 管状 EKG

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)S2-0057-05

作者简介: 沈 扬(1980-), 男, 浙江杭州人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土体静动力学特性和本构理论研究。E-mail: shenyang1998@163.com。

Experimental study on electro-osmosis chemical grouting reinforcement of marine soft clay using tubular EKG

SHEN Yang^{1, 2}, QIU Chen-chen^{1, 2}, SONG Shun-xiang¹, RUI Xiao-xi¹, SHI Wen¹

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

2. Geotechnical Engineering Research Center of Jiangsu Province, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to improve the problems of the electro-osmosis chemical grouting method, the tests need to be carried out for proper grouting concentration and methods. The electro-osmosis chemical grouting with different grouting concentrations is studied using the tubular EKG in the early period. Furthermore, the density and electricity are studied to verify the feasibility of the second treatment using the vacuum preloading combined with electro-osmosis chemical grouting. It is shown that: (1) The vacuum preloading combined with electro-osmosis can provide a new idea for grouting using the tubular EKG, and the metal corrosion can be avoided effectively. (2) The grouting results are effective. There exists an optimum concentration to make the grouting quality best. Especially, the potential should be studied to express the internal changes of soil after grouting treatment; (3) The strength can be dramatically improved after the treatment using the vacuum preloading combined with electro-osmosis chemical grouting. The grouting concentration should be chosen according to the moisture content. The further studies on the electro-osmosis chemical grouting need to be carried out and a new idea for the second treatment of vacuum preloading is proposed.

Key words: electro-osmosis chemical grouting; vacuum preloading; concentration; tubular EKG

0 引 言

真空预压能大面积快速处理吹填土, 但由于真空度沿深度衰减, 所以施工前需要进行二次处理^[1]; 电化学注浆^[2-3]将电渗排水^[4]和注浆相结合加固土体, 其加固机理通常包括浆液渗透挤压^[5]和生成化学凝胶土体强度。但传统电化学注浆法有金属电极易腐蚀, 注浆不均匀等问题。电动土工合成材料^[6]可以有效缓解在电渗过程中金属电极易腐蚀的问题^[7]。

基于以上分析, 本文在真空预压和传统电化学注

浆的基础上采用武汉谦城环境有限公司的新型管状 EKG 材料作为注浆管, 确定在本次试验方案下最适宜的注浆浓度, 并将电化学注浆用于真空预压二次处理, 重点分析强度和电流, 探究真空-电化学注浆可行性。管状 EKG 能避免试验过程中电极板弯折而影响排水效果。最后针对试验结果为电化学注浆发展以及真空

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2015B17114)

收稿日期: 2017-08-02

预压二次加固方式选择提供参考和进一步研究思路。

1 装置与方法

本试样为典型南京地区黏性土，原状土的基本物理力学性质指标如表 1 所示。

表 1 原状土的基本物理力学指标

Table 1 Basic physical properties of undisturbed soil						
比重	液限 /%	塑限 /%	塑性指数	颗粒组成/%		
				砂粒	粉粒	黏粒
2.75	42.5	24.2	18.3	0	21.4	78.6

管状 EKG 材料实物如图 1 所示，圆管壁厚约 20 mm，内外管壁均匀分布有排水凹槽和直径约为 3 mm 的孔洞；该材料能将排水和注浆较好结合，并可避免试验过程中电极腐蚀。



图 1 管状 EKG
Fig. 1 Tubular EKG

1.1 试验装置

模型槽如图 2 所示，内部尺寸为 200 mm×250 mm×150 mm（长×宽×高），底板阴极侧开有排水孔洞并用橡胶塞密封，如图布置 EKG 管和 PVC 管。

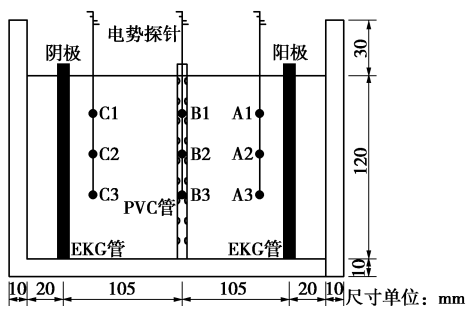


图 2 试验模型示意图
Fig. 2 Diagram of model device

1.2 试验方案

试验方案如表 2 所示。

第一部分（T1~T3）为电化学注浆试验，该部分进行重点分析和研究；第二部分（T4~T6）为真空-电化学注浆试验，主要监测强度和电流；第 7 组试验为单独真空预压试验。所有试验土样含水率均为 40%。

第一部分：管状 EKG 电化学注浆试验。准备试

验模型槽，阴极处 EKG 管放置在孔洞上，阴阳极 EKG 管对称放置；模型槽装样至 120 mm 高度处；如图 2 所示布置 3 组电势探针；试验开始时往阳极 EKG 管里注入 1 mol/L 的 CaCl₂ 溶液 50 mL，当排出的水里含有 CaCl₂ 时往阳极、阴极和中间位置处 PVC 管注入 15, 15, 20 ml 等浓度 NaSiO₃ 溶液，达到试验计划时间后停止试验；按照步骤 4 进行 1.5, 2 mol/L 电化学注浆试验，达到试验计划时间停止试验。

表 2 对比试验参数汇总

Table 2 Summary of contrast test parameters				
试验编号	溶液浓度 / (mol·L ⁻¹)	电压/V	膜下真空度 /kPa	试验时间 /h
T1	1	20	—	40
T2	1.5	20	—	40
T3	2	20	—	40
T4	1	20	60	40
T5	1.5	20	60	40
T6	2	20	60	40
T7	0	0	60	40

第二部分：管状 EKG 真空预压复合电化学注浆试验。

（1）管状 EKG 真空预压：准备模型槽并填充土样；铺设土工膜和砂垫层，最后铺设真空膜，将真空膜压入四周土体，并用软黏土回填压实；将 EKG 管与排水主管连接，排水主管与真空管连接；管状 EKG 真空预压法直接对土体进行处理，达到试验计划时间后停止试验。

（2）管状 EKG 电化学注浆：按照第一部分方法布置装置；参照上述电化学注浆方法，分别进行注浆浓度为 1, 1.5, 2 mol/L 注浆试验，达到试验计划时间后停止试验。

第三部分：单独真空预压试验。按照第二部分管状 EKG 真空预压阶段步骤进行真空预压试验。

2 试验结果与分析

2.1 电渗透系数分析

电渗透系数变化与有效电压关系密切，所以可通过下列关系式求得电渗透系数：

$$v_e = k_e \frac{\varphi_{ef}}{L} A \quad (1)$$

式中 v_e 为电渗排水速率； k_e 为土体电渗透系数； L 为土样长度，即阴阳极之间距离； A 为土体横截面面积； φ_{ef} 为土体中有效电压。

如图 3 所示为电渗透系数随时间变化曲线图，T2 组最大，T3 组最小。土间电流通过粒间孔隙水及土颗粒传递，在一定程度上导电性强弱与盐溶液浓度成正比。电渗透系数可以在一定程度上为合理的选择注浆浓度提供参考。所以为进一步规范和研究电化学注浆

法, 有必要继续深入研究电渗透系数的影响。

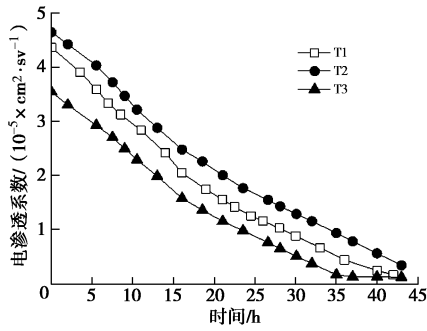


图 3 电渗透系数随时间变化曲线

Fig. 3 Variation of electro-osmotic conductivity with time

2.2 电势分布及变化

电势探针测点布置如图 2 所示。图 4 为表层土体电势变化曲线。

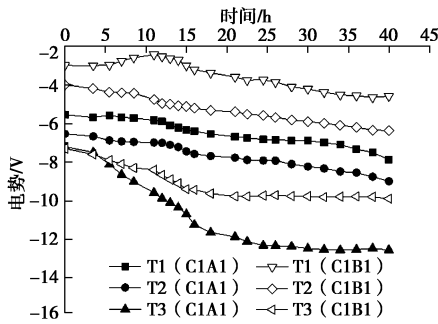


图 4 土样表层电势

Fig. 4 Potential gradients in surface of samples

T3 组溶液注入后电势增大最明显, 分别在加入 CaCl_2 和 NaSiO_3 溶液后有两次明显增大, T3 组 C1A1 段电势增大为 20 V, 而 C1B1 段电势增大不到 3 V, 在 A1B1 段发生凝胶反应, 影响有效电势传递, 不利于注浆均匀。即不宜选择浓度过高的注浆溶液, 容易过早生成沉淀, 影响注浆效果, 导致土体处理不均匀。

图 5 为中部土体电势变化。C2A2 中, T3 组电势增大最明显, 下部排水使得孔隙水和注浆溶液向下渗流, 浆液在土体中部流动频繁, 则有效电势传递在中部会优于表层土体。同理, 由于沉淀生成导致电势传递受阻, 所以 $V_{T3(C2B2)}$ 小于 $V_{T2(C2B2)}$, 即在不同的注浆条件下总存在浆液浓度极大值使得注浆效果最佳。

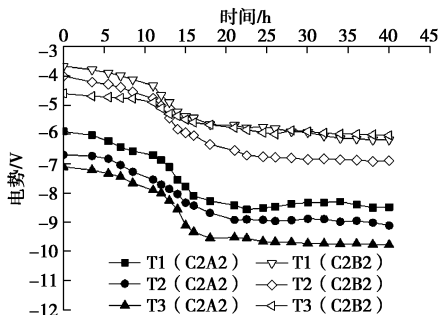


图 5 土样中部电势

Fig. 5 Potential gradients in the middle of the samples

图 6 为下层土体电势变化曲线。所示电势增大原因与前文所述相同。根据拆样发现, EKG 电极管和 PVC 管底部溶液反应生成沉淀堵塞电极管, 造成土体底部电势无法有效传递, 所以 C3A3 所示 3 组试验有效电势在 NaSiO_3 注入后均不同程度减小, 可见采取分区注浆很有必要。C3B3 区域属于试验排水区域, 电势由于沉淀生成而无法从阳极经过 B3A3 区域传递到 C3B3 段, 则所示增大电势是由中部和上部土体电势汇集而来, 即使电势传递受阻, 但 V_{C3B3} 依然增大。

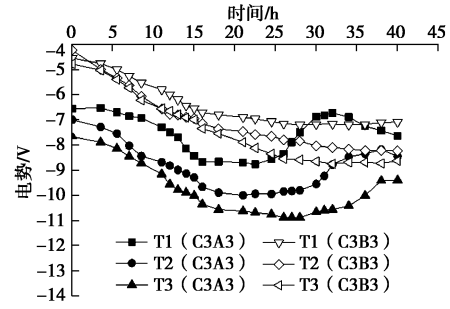


图 6 土样下层电势

Fig. 6 Potential gradients in bottom of samples

综上所述, 电势能反应浆液分布区域情况, 但在研究中很少被重点详细分析。详细分析有利于优化注浆方式, 选择注浆浓度。笔者认为进一步研究电渗及电化学注浆具有非常重要的意义, 有利于在不同的注浆环境中确定出相对最适宜注浆浓度。

2.3 试验土体电阻率分析

考虑外加浆液以及不同注浆浓度对于土体电阻率的影响。土体电阻率可通过欧姆定律计算:

$$\rho = \frac{RS}{L} = \frac{\Delta V S}{I L} \quad (2)$$

式中, S 为电极面积, 即管状 EKG 表面积; L 为电极间距; I 为电流强度; ΔV 为电势探针测得电势差。

以中部土体为研究对象, 可得不同注浆浓度下电阻率变化图 7, CaCl_2 和 NaSiO_3 注入使得电阻率有两次降低。T3 组使得电阻率降低最大, 同时也由于高浓度所致凝胶和沉淀生成使得电阻率始终维持在较大值, 在 30 h 后 T3 组突然增大, 也说明高浓度溶液处理一定含水率的土样效果明显但时间太短, 不宜采用。

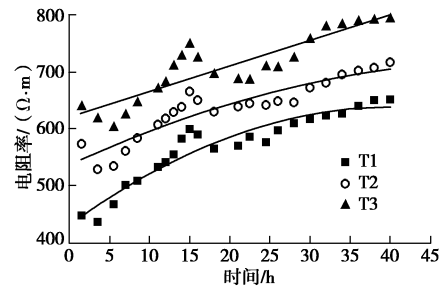


图 7 不同注浆浓度下电阻率随时间变化曲线

Fig. 7 Variation of resistivity with time under different grouting concentrations

适当增大注浆浓度效果更好。高浓度使得离子间反应剧烈,反而影响注浆均匀,并且浓度选择需对不同处理对象。不同含水率、物理性质也需不同注浆选择,所以这是后续研究需要进一步完善的方面,因此继续通过研究建立更为健全的标准显得尤为重要。

2.4 电流随时间变化分析

化学注浆作为土体二次加固的重要方法,其加固后的强度是至关重要的分析因素,为了详细分析电化学注浆对于真空预压的二次加固效果,本文将重点研究真空-电化学注浆处理强度和电流,初步探究电化学注浆对于真空预压二次加固的可行性。

图8为电流随时间变化曲线。外加溶液使得曲线有两次突变,土体内电解质浓度增大,离子间交换反应剧烈使得导电性增强,电流增大。在一定范围内,离子浓度越高,其土体内孔隙水的离子交换能力越强,则电流越大,因此T5与T6组电流值较大,而T4组相比较而言较小。 Ca^{2+} 与 SiO_3^{2-} 离子在扩散的过程中相遇,形成沉淀或者胶状物造成后续电流骤降。

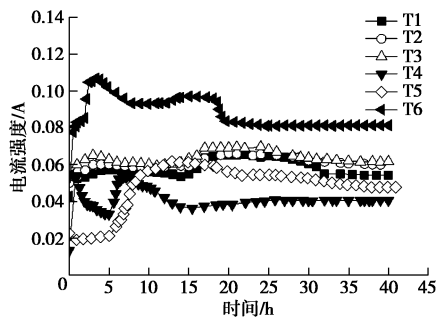


图8 电流随时间变化曲线图

Fig. 8 Variation of current with time

对于电化学注浆法而言,最佳注浆浓度选择需视处理环境而定,浓度一定时如何避免浆液在土体内过早发生反应影响试验效果也是进一步研究的方向。

2.5 土体强度

图9为十字板抗剪强度分布图。

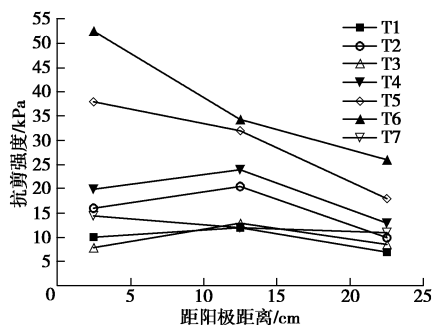


图9 土体强度分布图

Fig. 9 Distribution of vane shear strength after treatment of soil

以T6组为例进行强度分析,土体内阳离子紧密

聚集在土颗粒周围补偿表面负电荷,使得土颗粒间斥力减少,浆液发生反应生成 $n\text{SiO}_2(m-1)\text{H}_2\text{O}$ (硅酸凝胶)胶结土颗粒。而对于T4和T5组试验,较低离子浓度及离子价数使得土颗粒间形成松散的扩散层,阻碍土颗粒间凝结,所以T5组强度次之,T4组最小。所以在考虑经济成本前提下,即控制适当的外加电压和真空度等,将适宜浓度电化学注浆用于真空预压二次处理,其效果非常显著,单独真空预压或者单独电化学注浆都存在不足和缺陷。

3 结 论

对比7组试验结果可得出以下结论:

(1) 管状EKG能缓解金属电极易腐蚀的问题,可将真空预压和电化学注浆有机结合,为注浆法发展提供新思路,分区域注浆法能在一定程度上缓解注浆不均匀和强度提升不均匀的问题。

(2) 电化学注浆存在浓度最优值使得效果最佳。外加高浓度溶液效果显著但持续时间太短,整体试验效果较差,并且土中电势能反映外加电解质溶液后土体内部变化,在研究中很少被详细分析,电势能在一定程度上反应电渗过程及反映注入浆液流动和土体加固情况,有利于优化注浆方式,选择注浆浓度。

(3) 电化学注浆对土体进行二次加固效果显著,在一定范围内浓度越高效果越好,但浓度选择应视具体情况而定,处理土样含水率等都应通过进一步研究确立更为健全和完善的参考,这也是注浆法在使用耐腐蚀电极后在进一步推广使用所需要考虑的方向。

参考文献:

- [1] 龚晓南,岑仰润. 真空预压加固软土地基机理探讨[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002, 35(2): 7 - 10. (GONG Xiao-nan, CEN Yang-run. Mechanism of vacuum preloading[J]. Journal of Harbin University of C E & Architecture, 2002, 35(2): 7 - 10. (in Chinese))
- [2] CHIEN S C, OU C Y. A novel technique of harmonic waves applied electro-osmotic chemical treatment for soil improvement[J]. Applied Clay Science, 2011, 52(3): 235 - 244.
- [3] 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.
- [4] 李 瑛, 龚晓南, 郭 彪, 等. 电渗软黏土电导率特性及其导电机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 2): 4027 - 4032. (LI Ying, GONG Xiao-nan, GUO Biao, et al. Research on conductivity characteristics of soft clay during

- electro-osmosis and its conductive mechanism[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(S2): 4027 - 4032. (in Chinese))
- [5] OU C Y, SHAOCHI C, WANG Y G. On the enhancement of electroosmotic soil improvement by injection of saline solutions[J]. Applied Clay Science, 2009, **44**(3/4): 218 - 224.
- [6] 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. (HU Yu-chen, WANG Zhao, ZHUANG Yan-feng. Experimental studies on electro-osmotic consolidation of soft clay using EKG electrodes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(5): 582 - 586. (in Chinese))
- [7] 李 瑛. 软黏土地基电渗固结试验和理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011. (LI Ying. Experimental and theoretic study on electro-osmotic consolidation of soft clay foundation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese))
- (本文责编 黄贤沙)