

DOI: 10.11779/CJGE2017S1050

# EKG 电极真空-电渗处理软黏土室内试验研究

邱晨辰, 沈 扬\*, 励彦德, 尤延锋, 茹笑曦

(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:** 针对真空-电渗法在软基处理中存在金属电极易腐蚀, 试验后期排水效率低等问题, 利用自主研发的装置试验了EKG电极在电渗法、真空预压法、真空-电渗法、阴极直排式真空-电渗法下的排水效果, 通过监测排水量、电流、pH值、沉降和处理后的强度等指标将上述方法进行比较, 结果表明: ①真空-电渗法处理后排水量最大, 沉降更明显, 土体强度更大; ②阴极直排法在前8 h, 排水量高于双侧排水真空-电渗法, 土体内pH值更稳定, 土体表面更均匀; 阴极直排法能在一定时间内改善传统真空-电渗法在阳极真空预压与电渗相互抑制的情况, 如果将阴极直排法与双侧排水真空-电渗法相结合, 能够为扩大真空-电渗联合法的应用范围提供新的研究思路。

**关键词:** 真空-电渗法; 阴极直排法; EKG电极; 电极转换

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)S1-0251-05

作者简介: 邱晨辰(1992-), 男, 四川宜宾人, 硕士研究生, 主要从事软基处理研究。E-mail: ccqiu92@163.com。

## Laboratory tests on soft clay using electro-osmosis in combination with vacuum preloading

QIU Chen-chen, SHEN Yang, LI Yan-de, YOU Yan-feng, RUI Xiao-xi

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

**Abstract:** Considering the existence of metal electrode corrosion and low efficiency in the late period of the conventional electro-osmosis in combination with the vacuum preloading method, the drainage effects of the electro-osmosis method, vacuum preloading method, vacuum preloading method in combination with electro-osmosis and cathode straight drainage method are investigated by using the self-developed device. By monitoring the drainage amounts, electricities, pH, settlements and strengths, the treatment effects of the above methods are compared. The results between the two kinds of vacuum preloading methods in combination with electro-osmosis are also compared. It is shown that: (1) The drainage amount of soil treatment using the vacuum preloading method in combination with electro-osmosis is the largest, and the strength and settlement are both larger than those of other methods; (2) The drainage amount of the cathode straight drainage method is larger than that of the vacuum preloading method in combination with electro-osmosis in the initial eight hours, the pH value is more stable, and the surface of soil is more uniform. Furthermore, the inhibition between the vacuum preloading and the electro-osmosis can be improved by using the cathode straight drainage method. Therefore, a new research idea is proposed for the enlargement of application range for the electro-osmosis in combination with the vacuum preloading method, that is, the cathode straight drainage method and the electro-osmosis in combination with the vacuum preloading method can be combined for soil treatment.

**Key words:** electro-osmosis-vacuum preloading method; cathode straight drainage method; EKG; electrode conversion

## 0 前 言

目前在水利水电工程中处理吹填土地基比较常用的是真空预压法, 通过利用土体表面形成的真空环境, 将土体中的水分沿着竖向排水体排出土体之外。但是处理后土体表面形成硬壳层, 强度较高, 由于真空度沿土体深度衰减, 其下部排水效果较差、强度不够, 所以施工前往往需要进行二次处理<sup>[1]</sup>, 影响了其工程应用。电渗法<sup>[2]</sup>因为加固速度快, 对低渗透性土有良

好的加固效果等优点被应用于边坡和开挖场地中。但是, 其应用也饱受阳极腐蚀和界面电阻<sup>[3]</sup>过大等问题的困扰。单独电渗作用加固软黏土地基, 存在土体加固不均匀<sup>[4]</sup>且能耗大, 限制了工程应用。后期, 导电塑料排水板<sup>[5]</sup>的出现对电渗法进行软土地基处理具有

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: 2016-11-28

\*通讯作者(E-mail: shenyan1998@163.com)

重要的意义，但其在水利水电工程中的推广应用还有待进一步研究。

鉴于此，将在传统的真空-电渗联合法<sup>[6]</sup>的基础上使用 EKG 电极材料作为电极复合直排式真空预压法进行试验研究，与电渗法和真空预压法进行对比分析；同时利用阴极直排真空-电渗法通过监测 pH 值，土体处理均匀度等参数指标寻求进一步提高双侧排水真空-电渗法在水利水电工程应用中土体处理效率的措施。

## 1 装置与方法

### 1.1 试验土样

本试样购自南京江宁张西黏土加工厂，为典型的南京地区黏性土，原状土的基本物理力学性质指标如表 1 所示。

表 1 原状土的基本物理指标

Table 1 Basic physical properties of undisturbed soil

颗粒相 对密度	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

土体中矿物成分含量：SiO<sub>2</sub> 为 43%，Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 23%，Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 3.5%，其他矿物成分为 30.5%。

### 1.2 试验装置

试验主体采用的是自主研发的适用于 EKG 电极真空-电渗试验的模型槽，见图 1。其内部尺寸为 250 mm×200 mm×500 mm（长×宽×高），真空泵的额定功率为 750 W，抽气速率为 14.4 m<sup>3</sup>/h；直流电源使用 IT6860 高精度电源供应器，其输出电压为 20 V，最大输出功率为 60 W。电渗试验与真空预压试验均使用上述装置，在 EKG 电极材料作为电极和竖向排水板的基础上进行试验。

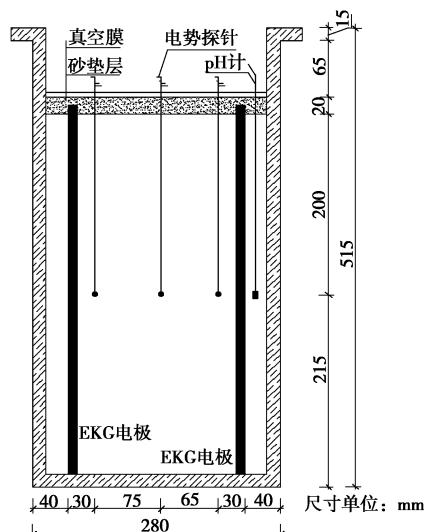


图 1 电渗复合真空预压模型试验示意图

Fig. 1 Diagram of electro-osmosis in combination with vacuum preloading model device

### 1.3 试验方案

试验方案如表 2 所示分为 4 组，鉴于试验所使用的导电塑料排水板理想上具有不易腐蚀可持续通电的特点，电渗和真空预压将持续整个试验过程，并且在试验进行中采取电极转换的技术措施，所有试验用土初始含水率均为 50%。

表 2 对比试验参数汇总

Table 2 Parameters of contrast tests

试验 编号	试验 名称	电压 /V	电极 材料	膜下真空度 /kPa
1	真空预压	0	EKG	60
2	电渗	20	EKG	0
3	真空-电渗	20	EKG	60
4	阴极直排	20	EKG	60

其中第 1 组真空预压试验采用有砂垫层的直排式真空预压法，第 2 组电渗试验采取上部排水的方式，在土体 4 个角设置集水沟，并用洗耳球将水排出；真空-电渗试验分为 3、4 组，第 3 组真空-电渗试验不转换电极，全过程阴阳极同时抽水，每隔 1 h 测一次上文中提到的试验监测变量；第 4 组阴极直排真空-电渗试验转换电极并在阴极单侧排水，其转换电极时间考虑到土体内的水分运动具有滞后性以及随着试验的进行土体的渗透系数降低，所以从试验开始每隔 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 h……的时间转换电极，每次电极转换的同时交换阴阳极，始终保持水分从阴极被排出。两组试验均直到排水量维持稳定的时候停止。

真空-电渗试验：试验前先在模型槽内壁涂上润滑的环氧树脂，将 EKG 电极与板管连接器相连并固定在模型槽底部作为阴阳极，然后将试验用土填至槽内 400 mm 高度，阴阳极板长度均为 420 mm，在阴阳极和中间点附近分别布置一根电势探针，深度均为 200 mm，之后将 pH 计探头插入阳极附近的土体，实时监测阳极附近的 pH 值变化，然后在土体表面铺设砂垫层，再覆上真空膜隔绝空气，板管连接器出膜处用 30% 含水率的软黏土回填压实。最后将导电塑料排水板通过鳄嘴钳与电源连接，排水滤管通过气动接头连接气动管，与真空饱和缸连接，再检查装置密封性，不牢固地方用胶带和密封胶做好密封处理，防止漏气。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 排水量与排水速率

图 2 为 4 组试验的排水量变化曲线，从变化曲线可以看出双侧排水真空-电渗法排水总量为 2760 mL，阴极直排法排水总量为 2460 mL，真空预压法排水总量为 1695 mL，电渗法最小，排水总量为 600 mL，真

空-电渗优势明显。

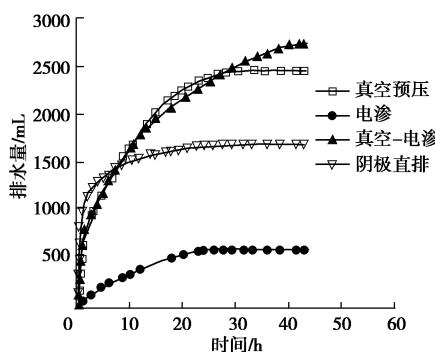


图 2 排水量随时间变化曲线

Fig. 2 Variation of volume of drainage with time

在 30 h 之前真空-电渗与真空预压无论是排水量还是排水速率基本上相近, 30 h 排水量大致为 2488 mL, 真空-电渗法效果不明显, 30 h 之后真空-电渗法的排水量更大, 因为真空-电渗前期主要是真空预压发挥作用, 而后期主要是电渗发挥作用, 所以试验进行到 30 h 以后, 从变化曲线的切线可知, 真空-电渗法排水速率明显是 4 组试验中最大的。另外对比两组真空-电渗试验, 大约试验进行 8 h 之前阴极直排法在相同的时间内无论是在排水量上还是在排水速率上都明显高于真空-电渗法, 在试验初期, 土体内含水率较大, 排水通道较多, 并且单侧排水可以避免真空预压与电渗在阳极相互抑制, 所以在试验初期阴极直排效果更优; 但是试验进入中后期阴极直排效果越来越差, 这与阴极直排中的水分排水路径更长有直接的关系, 如图 3, 4 所示, 排出相等水量时, 阴极直排法在排水路径上比真空-电渗法大一倍, 并且随着土体固结沉降, 水分在土体内运动迟缓, 排水路径长的弊端更加凸显, 所以阴极直排法在排水量和排水速率上与真空-电渗法的差距越来越大。虽然阴极直排法试验后期效果不佳, 但是如果能将阴极直排与双侧排水真空-电渗相结合, 前期使用阴极直排, 等到排水量最高点时换成双侧排水真空-电渗法, 这样可以进一步提高真空-电渗效率。

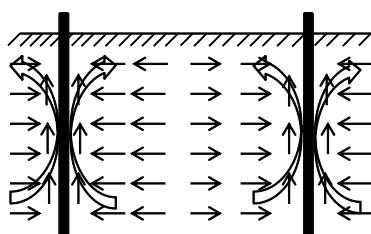


图 3 真空-电渗法排水路径

Fig. 3 Drainage paths of electro-osmosis in combination with vacuum preloading

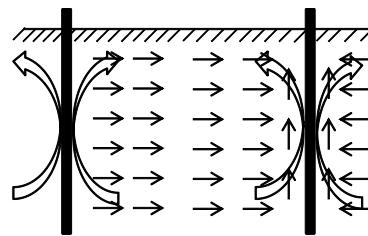


图 4 阴极直排排水路径

Fig. 4 Drainage paths of cathode straight drainage

## 2.2 电流电势变化

如图 5 所示, 试验早期曲线上升与土体内含水率较高, 水是导电性良好的液体有关, 而且本次试验采用的 EKG 电极材料基板导电, 增加了导电面积比, 根据界面电阻<sup>[3]</sup>的研究可知在导电面积比增大的情况下界面电阻反而会减小, 从而电流增大。

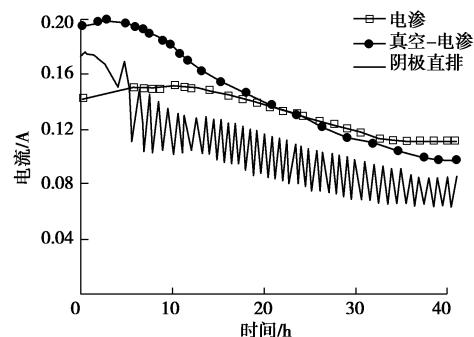


图 5 电流随时间变化曲线

Fig. 5 Variation of current with time

阴极直排法试验前期排水量和速率更大, 但鉴于其排水通道相对较少, 所以虽然双侧排水真空-电渗法在阳极自身内部有抑制作用, 但双侧排水使得土体内水分流动更活跃, 电流更大, 所以如果要将阴极直排法单独应用于地基处理试验中还需要进一步的研究。

图 6~8 为 3 组试验中电势随时间的变化曲线, 对比图 6, 7 可发现电渗试验中由于有沿着电极板横向裂隙的产生, 使得界面电势增大, 土体内有效电势减小明显; 而真空-电渗法中由于土体表面大气压力, 土体

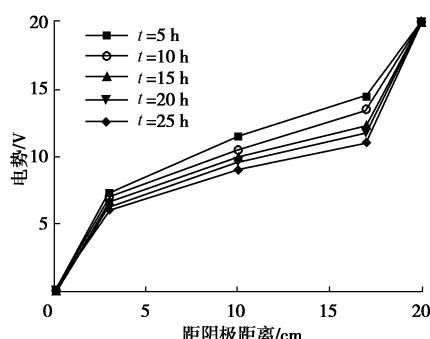


图 6 电渗试验电势变化曲线

Fig. 6 Variation of potential for electro-osmosis

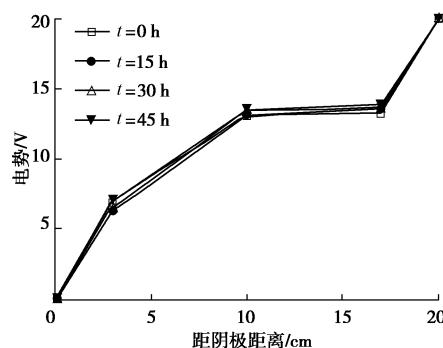


图 7 双侧排水真空-电渗电势变化曲线

Fig. 7 Variation of potential for electro-osmosis in combination with vacuum preloading method

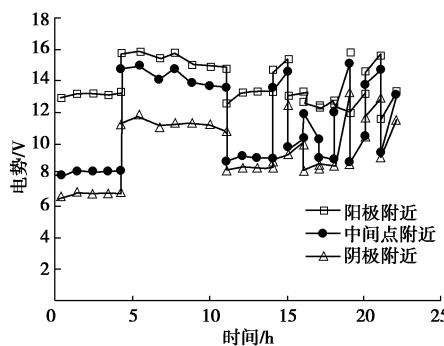


图 8 阴极直排真空-电渗电势变化曲线

Fig. 8 Variation of potential for cathode straight drainage method  
压缩过程中所受的压力分布阻止了裂缝产生,从而电极板与土体接触良好,界面电阻不会急剧增大,有效电势损失较小,所以没有明显电势降。图 8 为阴极直排法中土体电势随时间的变化曲线,土中电势值是阴极板与土体间界面电势以及土体中有效电势之和,每次电极转换后界面电阻增大,则电势突然增加。

### 2.3 土体含水率

试验结束后分别在阳极、阴极和中间点附近取表层土进行含水率测定,其含水率变化及降低百分比见表 3。双侧排水真空-电渗法处理效果最好,3个测点处含水率平均降低 35.13%,单独电渗法最差,3个测点处含水率平均降低 10.8%,定量分析可见真空-电渗法能够显著的提高土体处理效果。双侧抽水真空-电渗法试验中含水率最高点出现在中点附近,其原因可以认为,试验早期真空预压和电渗在阳极处相互抑制,阴阳两极间形成了相反的水力梯度,使部分水滞留在两极中间,所以造成了中间含水率高于两电极。

### 2.4 pH 变化

3 组试验 pH 值变化曲线如图 9 所示。

真空-电渗试验结束时 pH 值最小,试验前期真空

抽吸抑制 H<sup>+</sup>扩散并带走部分 H<sup>+</sup>使得 pH 值稳定,但随着试验进行,真空预压作用减弱,电解生成的 H<sup>+</sup>无法有效消耗而使得 pH 值减小。阴极直排法通过转换电极电解产生 OH<sup>-</sup>中和 H<sup>+</sup>以及真空抽吸带走 H<sup>+</sup>而使得 pH 值在 3 组试验中保持得最稳定,但由于后期真空预压作用下降,阴极直排法无论是排水量还是土体处理效果都弱于双侧排水真空-电渗,所以如果能改善真空预压后期的作用效果或是将阴极直排与双侧排水真空-电渗结合起来,那么对于 pH 值稳定,提高真空-电渗的工作效率将是大有裨益的。

表 3 试验后土体含水率变化

Table 3 Variation of water content (%)

试验名称	阳极		中间		阴极	
	含水率	降低百分比	含水率	降低百分比	含水率	降低百分比
真空预压	33.8	32.4	43.2	13.6	33.3	33.4
电渗	43.6	12.8	45.1	9.8	45.1	9.8
真空-电渗	31.7	36.6	34.7	30.6	30.9	38.2
阴极直排	32.7	34.6	38.7	22.6	35.7	28.6

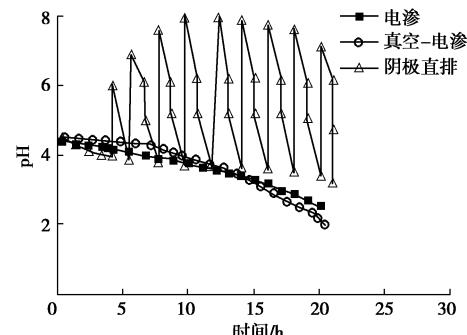


图 9 pH 值随时间变化曲线

Fig. 9 Variation of pH with time

### 2.5 沉降与强度

试验结束后对土体阴阳极及其中间区域的表层土体进行十字板剪切试验测得强度见表 4。试验前土样呈流塑状,抗剪强度几乎为零。

表 4 抗剪强度

Table 4 Vane shear strengths

试验名称	微型十字板剪切强度/kPa		
	阳极	中间	阴极
真空预压	14.3	14.5	14.4
电渗	9.44	2.52	6.25
真空-电渗	26	19.91	17
阴极直排	16.63	15	16.63

真空-电渗阳极处处理后强度为 26 kPa,比真空预压阳极处强度提高比例达到约 81.8%;比电渗阳极处

强度提高比例达到约 175%。

真空-电渗处理后土体强度最高, 尤其在阴极区域强度也最高, EKG 板的使用减轻了淤堵, 提高了效率, 顺利排出了电渗作用堆积在阴极的水分, 阴极直排法处理后土体强度更均匀, 说明转换电极的效果明显。

结合表 4 和图 2 可见, 真空预压排水量明显比阴极直排法大, 但是阴阳极强度却比阴极直排法小, 从排水量图中可以看出阴极直排法前期的排水量和排水速率在 4 组试验中最高, 真空预压和电渗相互促进使得阴极直排法表层土体含水率下降更大, 间接表现为土体强度更大。可见真空预压与电渗相结合后不仅体现在互相促进了排水, 同时也使土体获得了大于两个单独试验叠加效果的强度。

图 10 为最终沉降测点分布图, 真空-电渗中间点沉降值达到 9 cm, 阴极直排法处理后土体均匀程度最好, 其中间点最大为 6.8 cm, 阳极最小为 6.4 cm; 真空预压和真空-电渗处理后的土体沉降均是中间点最大, 分析认为是由于水分长时间向两电极板移动影响了阴阳极的固结沉降。反观排水量和含水率, 进一步证明了如果能提高真空预压试验后期的排水作用对于单侧抽水加电极转换的阴极直排法来说还有很大的研究空间, 所以这个问题应该是优化真空-电渗可以考虑的方法之一。

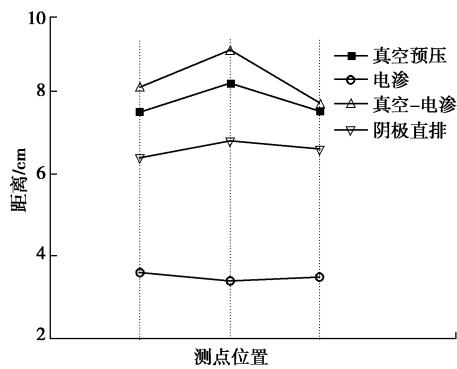


图 10 沉降测点分布图

Fig. 10 Layout of measuring points for settlement

### 3 结 论

(1) EKG 材料可以有效的将真空预压法和电渗法结合起来, 缓解排水板易淤堵的情况。

(2) 真空-电渗法处理软黏土的效果明显优于真空预压法和电渗法, 并且维持了土体内 pH 稳定和电势稳定, 提高了试验效率; 有效抑制了裂缝产生。

(3) 试验前期, EKG 电极阴极直排法在一定程度上能有效缓解双侧排水真空-电渗法在阳极相互抑制的情况, 并且阴极直排法处理后的土体更均匀, 场地更平整, 更好地维持了土体 pH 值稳定, 防止过酸化, 使得真空预压和电渗的联合更有效。

### 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] 焦丹, 龚晓南, 李瑛. 电渗法加固软土地基试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 1): 3028 - 3216. (JIAO Dan, GONG Xiao-nan, LI Ying. Experimental study of consolidation of soft clay using electro-osmosis method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 3028 - 3216. (in Chinese))
- [3] 庄艳峰, 王钊. 电渗固结中的界面电阻问题[J]. 岩土力学, 2004, 25(1): 117 - 120. (ZHUANG Yan-feng, WANG Zhao. Study on interface electric resistance of electro-osmotic consolidation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(1): 117 - 120. (in Chinese))
- [4] 陈卓, 周建, 温晓贵, 等. 电极反转对电渗加固效果的试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(9): 1579 - 1584. (CHEN Zhuo, ZHOU Jian, WEN Xiao-gui, et al. Experimental research on effect of polarity reversal to electro-osmotic[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2013, 47(9): 1579 - 1584. (in Chinese))
- [5] CHEW S H, KARUNARATNE G P, KUMA V M, et al. A field trial for soft clay consolidation using electric vertical drains[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2004, 22(1): 17 - 35.
- [6] 吴辉, 胡黎明. 真空预压与电渗固结联合加固技术的理论模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(2): 182 - 185. (WU Hui, HU Li-ming. Analytical models of the vacuum preloading and electro-osmosis consolidation for ground stabilization[J]. Journal of Tsinghua University (Sci & Tech), 2012, 52(2): 182 - 185. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)