

文章编号:1007-2993(2015)02-0090-05

珠三角软土在真空预压联合电动加固下 微观结构变化研究

张碧龙 李洪艺 张澄博

(中山大学地球科学与地质工程学院, 广东广州 510275)

【摘要】以真空预压联合电渗和真空预压联合电动作用后的珠三角海(河)积软土为研究对象,利用扫描电镜对以上两种粘土的微结构基本单元的孔隙数和孔隙率、基本单元的平均等效孔径和平均孔隙面积、基本单元的丰度和面积概率分布指数、基本单元的概率熵和孔隙等方面进行研究。在此基础上,将真空预压联合电渗和真空预压联合电动试验的结果进行对比。试验结果表明,相对于真空预压联合电渗试验,粘土经过真空预压联合电动试验后,土颗粒发生明显的破坏,小孔隙逐渐被挤压消失或孔隙之间自调整而互相连通形成大孔隙,软土也由蜂窝状-空架状结构逐步转变为骨架结构-团聚絮凝结构,真空预压联合电动的加固效果更加明显。为珠江三角洲地区海相沉积土区的工程建设提供了参考。

【关键词】珠江三角洲;软土;扫描电镜;微观结构

【中图分类号】 TU 411.92

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2015.02.009

Study on Microscopic Characters of Soft Soil in the Pearl River Delta Vacuum Preloading and Electro-Kinetics Experiment

Zhang Bilong Li Hongyi Zhang Chengbo

(School of Earth Science and Geological Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China)

【Abstract】In this paper, vacuum preloading and electro-kinetics(electro-osmosis) role of the Pearl River Delta sea(River) of soft soil as the object of study. We conduct studies using scanning electron microscopy on the microstructure of the above two kinds of clay in the basic unit of the pore number and porosity, the basic unit of the average equivalent pore size and average pore size, the basic unit of the abundance and size distribution index, the basic unit of probability entropy and pore aspects. On this basis, compared the results of vacuum preloading and electro-kinetics(electro-osmosis) experiments. Experimental results show that, compared with the vacuum preloading and electro-osmosis test, clay after electro-kinetics trials, obvious damage of soil particles. The small pores gradually squeezed disappear or the pores of self adjustment and communicated with each other to form large pores. Soft soil by cellular space frame structure gradually into the skeleton structure agglomerate flocculation structure, vacuum preloading and electro-kinetics of the more obvious reinforcement effect. Provide a reference for the construction of marine deposit area of Pearl River Delta region.

【Key words】 Pearl River Delta; soft soil; scanning electron microscopy; microscopic structure

0 引言

珠江三角洲地区包含了两层海相淤泥层,通常称为软粘土,其天然含水量大、压缩性高、孔隙比大、抗剪强度低、承载力低呈流塑-软塑状态^[1]。珠江三角洲的大部分地区,其软土层的厚度一般为几米到几十米不等,最深可以达到 50 m 左右^[2]。随着珠江三角洲地区的经济快速发展,真空预压联合电渗在处理海相淤泥土方面得到了相当程度的应用。前人实践结果表明:真空预压联合电渗法使沉降量增

大 30%,使土体强度增加 2~5 倍,加固效果明显,有发展前途^[3]。本文在前人的基础之上,在电渗实验中注入盐溶液(简称“真空预压联合电动”),研究二者试验过程中发生的微观结构的变化,对比二者试验的固结结果,具有较大的理论意义和工程实践意义。

国内有很多学者都在研究真空预压联合电渗,并且取得了可喜的成就。徐伟(2011)在 Terzaghi 固结理论和 Esrig 电渗固结理论的基础上推导真空

基金项目:广东省自然科学基金(编号 S2013010012521)

作者简介:张碧龙,1989 年生,男,汉族,江苏南通人,硕士研究生,主要从事地质及环境岩土工程研究。E-mail:eeszcb@mail.sysu.edu.cn

预压联合电渗法加固软土的二维固结方程^[4]。吴辉(2012)建立了真空预压-电渗固结问题的轴对称概化模型,研究地基加固过程中地基内超静孔压发展和地表沉降过程^[5]。李剑(2012)结合 Hansbo 砂井地基固结理论和真空-电渗边界条件,建立了轴对称真空-电渗联合作用软土固结方程^[6]。总得来说,国内对真空预压联合电渗试验取得了研究成果,但是研究真空预压联合电渗/电动试验过程中的粘土微结构变化规律并不多见,将二者试验过程中粘土微观结果变化做对比更不多见。

1 土样与实验方法

土样取自佛山市南海县西樵镇西南部南海发电厂,软土的的平均物理力学参数见表 1。采用液氮冷冻真空升华法干燥 SEM 试样,保持土的微结构不变^[7]。统一选用放大 1000 倍的照片,使用南京大学开发的 PCAC 系统分析微结构的定量化参数,计算相关的微结构参数值。

实验一为真空预压联合电渗加固实验,实验时间 60 h,主要探讨在没有注入溶液情况下软土的微结构变化;实验二为真空预压联合电动加固软土,每隔 0.5h 从阳极注入 5 ml 浓度为 1 mol/L CaCl₂ 溶液,实验时间 60 h。实验开始阶段,在阴极、中部、阳极测量电势,实验结束之后,测量离阳极不同距离的沉降量,并在实验箱阴极、阳极和中间位置提取试样。本文主要探讨在真空预压联合电渗/电动下软土的微结构等的变化,并且将二者做一个对比。

表 1 软土基本物理性质

统计	含水量 $w_w/\%$	液限 $w_{L}/\%$	塑限 $w_p/\%$	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
最大值	55.2	52.2	35.4	18	16
最小值	39.5	34.7	22.1	9.8	9.1
平均值	43.13	42.13	27.3	14.2	12
变异系数	0.098	0.114	0.135	0.256	0.207
统计个数	11	11	11	9	9

两组实验都呈现了一个有趣的现象,经过测量电势,两组实验都在实验箱中部发生最大的电压降。

实验完成后,观察软土处理效果最直观的现象便是沉降量。

1) 两组实验都呈现土体中部沉降量最大,阳极附近次之,阴极附近沉降最小的特征,且从实验一到实验二,沉降量逐渐增大;

2) 没有注入溶液情况下(真空预压联合电渗加

固实验),土样在离阳极 9~15 cm 处沉降量最大,为 1.4 cm,沉降率为 9.3 %;

3) 注入 CaCl₂ 溶液并且实验时间同样为 60 h 条件下(真空预压联合电动加固实验),土样在离阳极 15~25 cm 处沉降量最大,最大沉降量为 2.3 cm,沉降率为 15.3 %。

2 土的微观结构特征及变化

土的 SEM 图像中只有颗粒和孔隙两类影像,本文选用孔隙形态特征来表征土的微结构特征。

2.1 孔隙形态特征参数

1) 孔隙率:微观结构图像中,孔隙面积与总面积之比,用其可判别土体结构的疏松程度。

2) 丰度:丰度是指土中孔隙的短轴与长轴之比,丰度反映孔隙的狭长程度,其值介于 0~1 之间,丰度值越小,反映孔隙形状越趋向于长条形;丰度值越大,则微结构形状越趋向于等轴形。

3) 平均孔隙面积:指在软土的微结构图像中的图像中孔隙的总面积与孔隙个数之比。软土内部的孔隙直径与孔隙平均面积呈正比,当孔隙率一定时,孔隙平均面积越大,透水性越好;反之,则透水性越差。

4) 面积概率分布指数:面积概率分布指数的意义在于其能有效描述孔隙面积的分布,当面积概率分布指数增大时,表示细小孔隙数量在增加,相反地大孔隙数量在减小。

5) 概率熵:该参数定义孔隙排列的有序性。概率熵越小,表明所有孔隙的排列方向越一致,显示出孔隙的有序度越高;概率熵越大,说明孔隙排列越混乱、随机性越强、有序性越低。

6) 孔隙分布分维:本文选择孔隙分布分维评价土体的微结构特征。采用不同的测量单元尺寸 ϵ ,对拍摄的微结构图像进行 Sandbox 法计算,得到一系列规则图形的测量单元数 $N(\epsilon)$,最后做 $\ln \epsilon - \ln N(\epsilon)$ 图,采用最小二乘法对图上对应的点进行拟合,得到的斜率值即为孔隙分布分维值。

$$K = -\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\epsilon)}{\ln \epsilon} \quad (1)$$

式中: ϵ 为正方形变成; $N(\epsilon)$ 为图像以边长 ϵ 分割后的研究对象所占格子数; K 为 $\ln \epsilon - \ln N(\epsilon)$ 函数的斜率。

2.2 孔隙微观结构参数变化

将原状土与两组实验软土进行电镜扫描,得到微结构 SEM 图(见图 1、图 2)和孔径分布表(见表 2)。

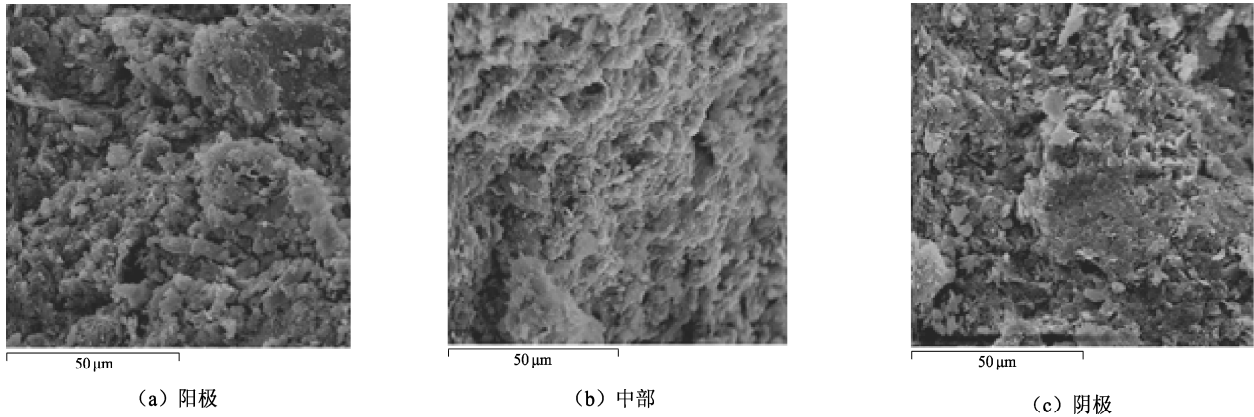


图1 真空预压联合电动加固实验软土微结构 SEM 照片

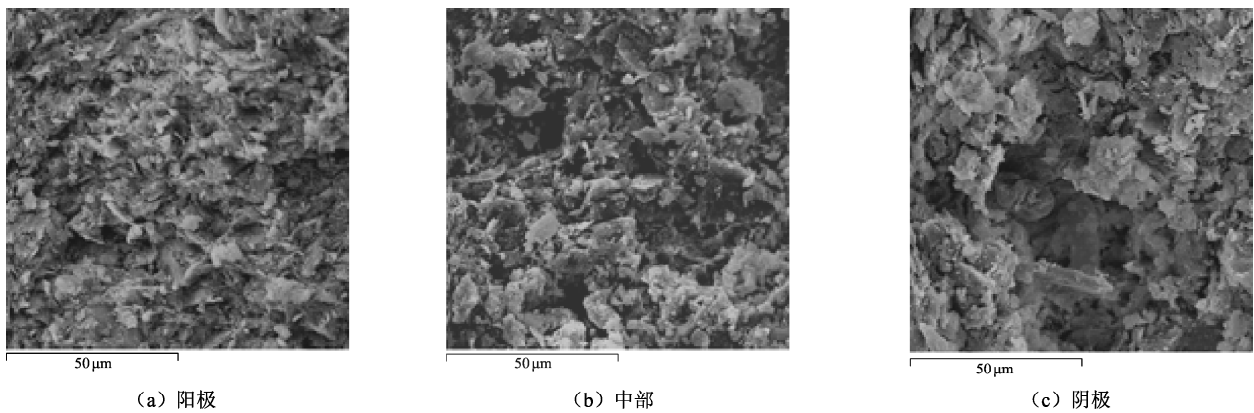


图2 真空预压联合电动加固实验(60h)软土微结构 SEM 照片

表2 原状土与三组实验软土孔径分布

实验	孔径分布/%				
	$<1 \mu\text{m}$	$1\sim 2 \mu\text{m}$	$2\sim 5 \mu\text{m}$	$5\sim 10 \mu\text{m}$	$>10 \mu\text{m}$
原状土	62.19	30.36	6.72	0.58	0.15
真空预压联合电渗加固实验(60 h)	60.44	30.03	8.50	0.91	0.12
真空预压联合电动加固实验(60 h)	60.98	25.84	11.83	1.14	0.21

对于电渗联合真空预压加固实验,中部和阴极部分基本呈蜂窝状-空架状结构,与原状土微结构类似,但是孔隙明显减小;阳极部分软土呈团聚絮凝结构,相对于原状土,孔隙大幅度减小。对于电动联合真空预压加固实验,软土微结构呈骨架结构-团聚絮凝结构。

由表2可知,软土孔径主要分布在 $<1 \mu\text{m}$ 、 $1\sim 2 \mu\text{m}$ 和 $2\sim 5 \mu\text{m}$ 这三个区间内,其数量占到孔隙数98%以上。由实验一至实验二,孔隙变化规律如下:微孔隙($<2 \mu\text{m}$)数量明显减少,其中 $1\sim 2 \mu\text{m}$ 之间孔径数量减少约1.1%~14.9%;中孔隙($2\sim 10 \mu\text{m}$)以及大孔隙($>10 \mu\text{m}$)数量明显增加,尤以中孔隙数量增加最大,为26.5%~76.1%。随着实验的进行,土体内部孔隙逐渐被压缩,较小的孔隙周边由于发生更大应力集中,小孔隙首先被挤压掉

或者小孔隙互相连通形成更大的孔隙,同时伴随着粘土颗粒的破碎、重组与聚合过程,较大颗粒在连接软弱处被折断为小颗粒。而较小粘土颗粒聚集成更大聚集体。

由表2可知,两组实验后软土孔隙基本以微孔隙为主,中孔隙和大孔隙分别次之。微孔隙主要为粒间孔隙、部分粒内孔隙,该类孔隙连通性高,孔隙中结合水和自由水共同主导影响软土的压缩性和渗透性等性质。中孔隙和大孔隙以粒间孔隙、孤立孔隙为主,该类孔隙中水以自由水为主。对于真空预压联合电动加固实验,由于注入的 Ca^{2+} 能通过离子交换以及絮凝作用等使得粘土颗粒排列定向性更好,因而在真空压力和电场力作用下,粘土颗粒集体间孔隙水压力迅速升高,导致集体压缩,从而扩

大渗透通道,因而软土表现出更大的沉降量。在压力持续的影响下,集合体继续压缩,渗透通道进一步扩大。当它压缩到一定程度后,粘土颗粒定向性变得更高,两个粘土颗粒之间结合水膜的抗剪强度提高,集合体的压缩接近极限状态,即使持续施加压力,孔隙大小以及连通性很少发生变化,因而在实验后期,软土的沉降量和排水量几乎接近不变。而真空预压联合电渗加固实验,在压力作用下,流动的水会带动连接松散的颗粒,使其排列更加紧密,孔隙连

通性发生变化,渗透性逐步降低,但由于其粘土颗粒定向性较低,压缩性并不如电动联合真空预压实验那么明显。

2.3 孔隙形态特征指标测试

统一选用1000倍的SEM照片,用PCAC系统处理软件进行颗粒大小与形态等微结构参数的测试计算。微结构参数计算结果见表3。微结构量化参数随真空预压联合电渗/电动试验变化曲线见图3—图7。

表3 软土微结构量化参数

实验	距离/m	孔隙数	丰度	平均孔隙面积/ μm^2	单位面积(100 μm^2)孔隙数	面积概率分布指数	概率熵
原状土		685	0.56	266.72	0.374	2.02	0.9894
真空预压联合电渗加固实验(60h)	10	535	0.58	296.02	0.337	1.92	0.9958
	25	277	0.58	312.96	0.319	1.91	0.9878
	40	549	0.57	310.31	0.322	1.83	0.9823
真空预压联合电动加固实验(60h)	10	531	0.57	287.51	0.347	1.85	0.9853
	25	476	0.59	565.92	0.176	1.63	0.9736
	40	409	0.58	339.72	0.294	1.92	0.9868

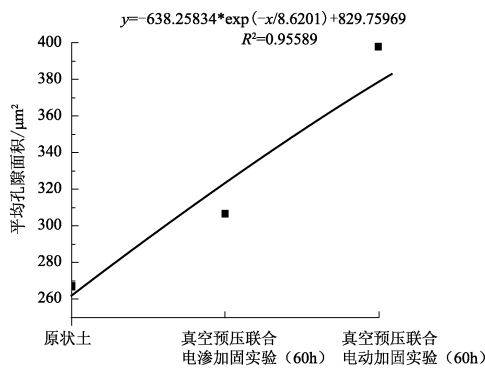


图3 平均孔隙面积变化图

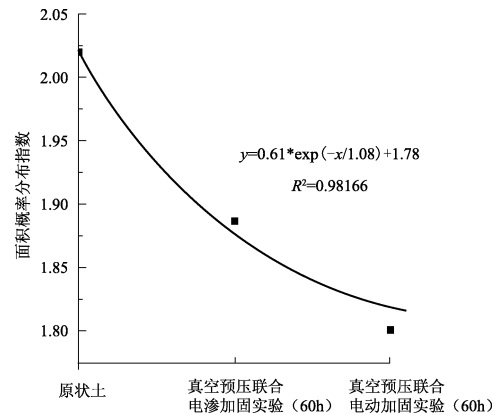


图5 孔隙面积概率指数变化图

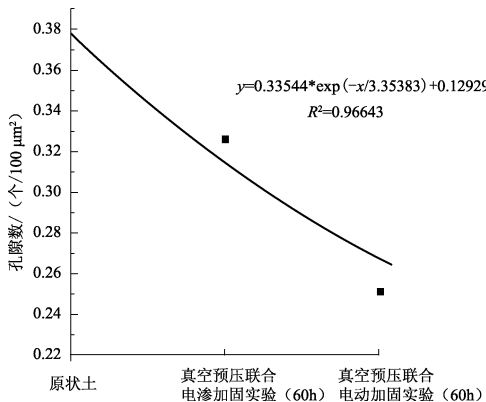


图4 单位面积上(100 μm^2)孔隙数变化图

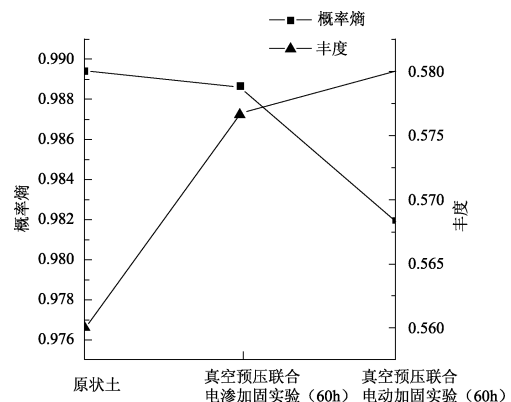


图6 孔隙概率熵与丰度变化图

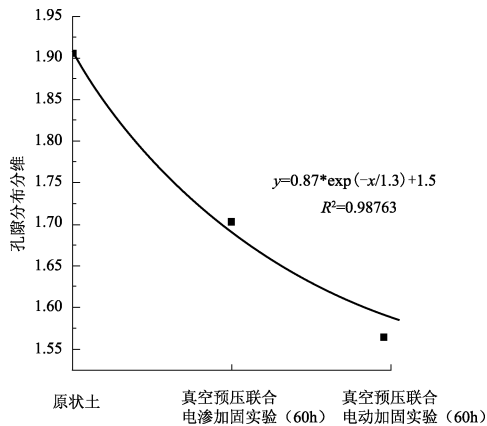


图7 孔隙分布分维变化图

由表3可见,在原状土的基础之上,进行真空预压联合电渗实验,软土微结构定量化参数有所降低,实验二注入 CaCl_2 溶液下,定量化参数相对于实验一又降低。真空预压联合电动加固实验中距离为25 cm的该列数据具有明显改善较大提高,而对于10 cm及40 cm的数据不明显,这可能是因为试验箱中部电压降最大,促使了固结排水,阴极和阳极的电压降相对较小,固结排水也相对较弱,因而这些参数没有中间的变化大。

由表3和图3—图7得出以下认识:

1)平均孔隙面积近似呈线性关系,平均孔隙面积不断增加。真空预压联合电动试验相对真空预压联合电渗试验,平均孔隙面积更要增加,可以推论:随着两组实验的进行,土体内部孔隙逐渐被压缩,较小的孔隙周边由于发生更大应力集中,小孔隙首先被挤压掉或者小孔隙互相连通形成更大的孔隙,同时伴随着粘土颗粒的破碎、重组与聚合过程,较大颗粒在连接软弱处被折断为小颗粒,而较小粘土颗粒聚合成更大聚集体。

2)由实验一到实验二,单位面积上($100 \mu\text{m}^2$)孔隙数不断减少;孔隙面积概率分布指数的值是逐渐减小的,由其定义及意义可知,由真空预压联合电渗实验到真空预压联合电动加固实验,细小孔隙的数量在减小,相反地大孔隙的数量在增加,这与单位面积上($100 \mu\text{m}^2$)孔隙数和平均孔隙面积的变化是一致的。

3)实验一到实验二,孔隙的丰度有轻微的上升,但其值均于0.56~0.59之间变化,增长幅度低,说明原状土与经过实验处理的软土孔隙均呈长条状,实验处理并没有让孔隙形状发生大的改变,这可能是因为电渗或电动并不会对软土施加实际的应力,概率熵曲线显示其呈逐渐下降趋势,但下降幅度不

大,概率熵 H 变小,表明所有孔隙的排列方向倾向一致,显示出孔隙的有序度提高。

4)实验一到实验二,孔隙会发生明显变化,对孔隙分布分维也会产生影响。图7为原状土及两组实验的孔隙分布分维变化图。由原状土到真空预压联合电渗加固实验,孔隙的分布调整较为显著,由真空预压联合电渗加固实验到真空预压联合电动加固实验,孔隙的分布分维呈下降趋势,并逐步趋于稳定。这说明随着三组实验的相继进行,软土中孔隙分布趋于集中,孔隙团聚化程度逐渐增加。

3 结 语

1)孔隙的变化,能反应土体压缩过程的变化。孔隙数、孔隙率、平均等效孔径、丰度、平均孔隙面积、面积概率分布指数、概率熵、孔隙分布分维成为表征土微结构变化特征参数。

2)从试验一到实验二,单位面积上($100 \mu\text{m}^2$)孔隙数、孔隙面积概率指数、孔隙概率熵不断减少;平均孔隙面积、丰度不断增加。说明真空预压联合电动试验下软土固结的效果更明显。

3)实验一到实验二,孔隙分布分维逐渐减小,软土中孔隙分布趋于集中,孔隙团聚化程度逐渐增加。反映真空预压联合电动固土作用逐渐增强。

参 考 文 献

- [1] 周翠英,牟春梅. 珠江三角洲软土分布及其结构类型划分[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2004, 43(6): 81-84.
- [2] 谢晓华,周永章,张澄博,等. 珠三角饱和软土固结过程中微观孔隙结构的演化规律[J]. 桂林理工大学学报, 2010, 30(3): 368-373.
- [3] 高志义,张美燕,张健. 真空预压联合电渗法室内模型试验研究[J]. 中国港湾建设, 2000(5): 58-61.
- [4] 徐伟,刘斯宏,王柳江,等. 真空预压联合电渗法加固软基的固结方程[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011(2): 169-175.
- [5] 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(2): 182-185.
- [6] 李剑,张仪萍,严露. 真空-电渗联合作用下的软基固结计算研究[J]. 水运工程, 2012(3): 133-138.
- [7] 柴寿喜,韩文峰,王沛,等. 用冻干法制备微结构测试用土样的试验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(2): 46-48.

收稿日期:2014-07-16