

真空预压 - 电动条件下珠三角地区 软土力学性质变化过程研究*

娄云雷^{1,2}, 李洪艺¹, 张碧龙¹, 覃家琪¹, 叶李胜¹, 张澄博¹

(1. 中山大学地球科学与地质工程学院, 广东 广州 510275;

2. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要: 软土具有高含水量、高压缩性、高蠕变性、低渗透性、低强度等特点。近年来有学者提出真空预压 - 电渗法对软基进行处理, 并在工程实践中得到了运用。真空预压 - 电渗法只能排出软土中部分弱结合水, 工后沉降仍然较大, 难于满足工程要求。针对该问题, 有学者在真空预压 - 电渗的基础上加入少量盐溶液, 即真空预压 - 电动法对软基进行处理, 取得了较好的实验效果。该文以珠江三角洲地区软土为研究对象, 通过真空预压 - 电渗法与真空预压 - 电动法 (加入 CaCl_2 溶液) 的对比试验, 验证了真空预压 - 电动法在软基处理中的优越性, 为该方法的应用提供一定的科学依据。

关键词: 软土; 真空预压; 电动

中图分类号: TU472 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529 - 6579 (2015) 01 - 0064 - 06

A Study of the Mechanical Properties Changing Process of Soft Soil in the Pearl River Delta Region under the Vacuum Preloading-electrokinetics Condition

LOU Yunlei^{1,2}, LI Hongyi¹, ZHANG Bilong¹, QIN Jiaqi¹, YE Lisheng¹, ZHANG Chengbo¹

(1. School of Earth Science and Geological Engineering, Sun Yat-sen University,
Guangzhou 510275, China;

2. Guangdong Provincial Key Lab of Geological Processes and Mineral Resource Survey,
Guangzhou 510275, China)

Abstract: The soft soil contain high water content, high compressibility, high creep, low permeability and low strength. Recently, some researches have dealt with soft foundation using vacuum preloading-electroosmosis method which can only discharge partial weakly bound water in soft soil, but the amount of post-construction settlement is still too much to meet the requirements of engineering. To solve this problem, a small amount of salt solution was added on the basis of vacuum preloading-electroosmosis method, known as vacuum preloading-electrokinetics method, and achieved a better experiment result. The soft soil in the pearl river delta region was studied. The comparative test was used between vacuum preloading-electroosmosis method and vacuum preloading-electrokinetics method (adding CaCl_2 solution) in soft ground treatment, and it came to a conclusion that vacuum preloading-electrokinetics method is at an advantage when dealing with soft soil, which provided a scientific basis for applications of vacuum preloading-electrokinetics method.

* 收稿日期: 2014 - 06 - 29

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (S2013010012521)

作者简介: 娄云雷 (1986 年生), 男; 研究方向: 岩土工程; 通讯作者: 张澄博; E-mail: eeszc@ mail. sysu. edu. cn

Key words: soft soil; vacuum preloading; electrokinetics

珠江三角洲濒临海岸带，分布着广泛的软土，该地区软土第一个特点是含水率较高，天然含水率 (w) 变化范围为一般为 70% ~ 100%^[1]；第二个特点是渗透系数低，水平方向透水性比垂直方向大。土层垂直方向的渗透系数在 0.01 ~ 24.30 × 10⁻⁶ cm/s 之间，而水平方向的渗透系数一般为 10⁻⁴ ~ 10⁻⁵ cm/s，因此土体在外荷载作用下固结速率较慢；第三个特点为承载力低，地基承载力一般为 20.0 ~ 131.0 kPa，难以满足实际工程的应用^[2-6]。因此，如何快速有效得进行地基处理就显得尤为重要。目前为止，工程上对软土的处理方法主要有堆载预压、真空预压、换填和采用复合地基等方法^[7-8]，真空预压 - 电渗法也逐渐应用于工程实践中^[9-11]。真空预压 - 电动法近年来刚刚由学者提出^[12]，具有较好的应用前景，因而对该方面进一步的研究是很有意义的。

真空预压 - 电渗法是在真空预压的基础上，在土体两端通以直流电，使土体在短时间内完成渗透排水，并逐渐固结的一种地基处理方法。该方法的优点是加固速度快，主要是因为软土的电渗透系数 K_e 比水力传导系数 K_h 大 1 ~ 2 个数量级；其次是该方法可以排出土体的孔隙水和部分弱结合水达到加固软基的目的。但真空预压 - 电渗法对黏土颗粒中的强结合水却无能为力，软土地基工后沉降依旧较大，难以满足工程要求。针对真空预压 - 电渗法的该问题，如果在土体中加入盐溶液即运用真空预压 - 电动法，黏粒与盐溶液相互作用后，吸附在其表面的阳离子或者阴离子可与溶液中的离子进行交换，改变双电层的厚度，使得矿物颗粒之间排列更紧密，从而提高土体强度，达到更好的加固效果^[13-14]。另外盐溶液的加入可以有效降低排水处理过程所需要的电能，大大减少工程造价^[15]。对于珠三角地区软土中含有较多的 Na⁺、K⁺、NH₄⁺ 等离子^[16-17]，这些离子造成黏土颗粒的双电层厚度较大，如果运用真空预压 - 电动法对软土进行处理，将能很好的解决工后沉降的问题。

1 样品和实验方法

1.1 实验样品

实验所用土样取自佛山市南海县西樵镇西南部南海发电一厂，土样呈深灰色 - 灰黑色，略带腥臭味，含有机质，夹粉砂薄层，局部混腐木，淤积成因。呈很湿 ~ 饱和，软塑状态，标贯击数一般 1 ~

4 击，粉砂夹薄层和腐木使标贯击数偏高。层厚度 0.70 ~ 17.70 m，平均厚度 8.52 m，层顶面高程 - 10.46 ~ 3.68 m。土样里最主要的几种矿物分别为：石英、伊利石、蒙脱石、氯化硼以及一些有机物。土样的基本物理性质如表 1 所示。

表 1 软土基本物理性质

Table 1 The basic physical properties of soft soil

物理性质	最大值	最小值	平均值	变异系数	统计个数
含水量/%	55.2	39.5	43.13	0.098	11
土样密度/(kg · m ⁻³)	1 840	1 670	1 740	0.031	11
干密度/(kg · m ⁻³)	1 320	1 080	1 180	0.06	11
液限	52.2	34.7	42.8	0.011 4	11
塑限	35.4	22.1	27.3	0.135	11
比重/(g · cm ⁻³)	2.7	2.66	2.68	0.004	11
十字板抗剪强度/kPa	18	10	14	0.007	11
黏聚力 C /kPa	18	9.8	14.2	0.256	9
内摩擦角/(°)	16	9.1	12	0.207	9
pH	7.81	7.51	7.76	/	5
电阻/ Ω	801.4	765.8	785.7	/	3

1.2 实验装置

本次真空预压 - 电动加固软土实验所用装置为自行设计，主体分为三部分：透明实验玻璃箱部分、电源部分和真空泵部分。本次实验所使用装置如图 1 所示。

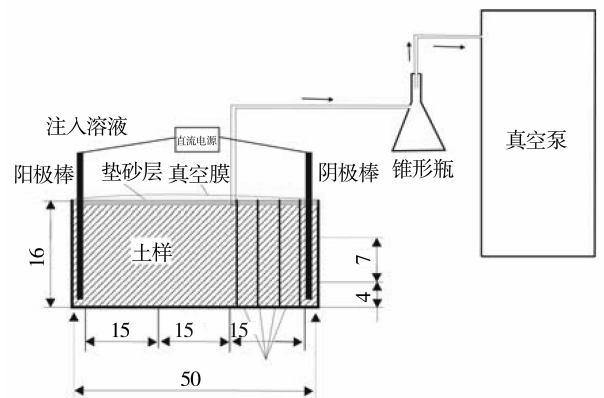


图 1 实验装置简图 (单位: cm)

Fig. 1 Diagram of the experimental device

将土样分为 9 部分 (图 2)，于 T1 - T3、M1 - M3、B1 - B3 部位取样作含水量实验，同时在 T1 - T3、M1 - M3、B1 - B3 部位进行原位十字板剪

切实实验,以测得土样的抗剪强度参数。在土壤中部位置(图2中的画线位置)每隔5 cm取一个土样用于测定实验后pH的纵向变化。此外,为了更真实反映注入溶液后阳极和阴极附近的含水量,在图2所示的A和C位置分别取样测量其含水量。

排水管使用圆形铝管,长13 cm,直径1 cm,管身布满小孔用于排水,排水铝管上端位于砂垫层内。阳极棒既作为电极使用,也作为注入溶液的通道,阳极棒离下端12 cm的地方每隔2 cm钻一个直径5 mm的小孔用于注入溶液的流出通道,排水铝管和阳极棒均使用300目尼龙网包裹防止黏土颗粒堵塞小孔。

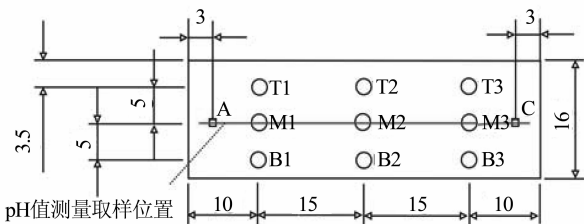


图2 取样测试位置图(单位:cm)

Fig. 2 Locations of sampling tests

1.3 实验方法

共进行三组平行实验。实验一为真空预压-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强度、pH和排水量的变化。根据前人经验,注入的 CaCl_2 溶液浓度多为 1mol/L ^[14,18];实验二为真空预压-电动加固软土,每隔0.5 h从阳极注入5 mL浓度为 1mol/L CaCl_2 溶液,实验时间60 h,主要探讨在注入溶液情况下软土的强度、pH和排水量等的变化,并与实验一做对比;实验三同样为真空预压-电动加固软土实验,每隔2.5 h从阳极注入25 mL浓度为 1mol/L CaCl_2 溶液,但实验时间延长为120 h,主要探讨实验时间及注入溶液方式对实验效果的影响。三个实验所使用的均为直流电压,强度为55 V,并保持稳定不变。三组实验都使用相同的设备,实验土样近似当作均一连续,初始条件基本相同。

2 实验结果与分析

2.1 沉降量

实验完毕后连续测量离阳极不同位置的沉降量,如图3所示,可以得出如下结论:

1) 三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

一到实验三,沉降量逐渐增大;

2) 实验一在没有注入溶液情况下,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) 实验二在注入 CaCl_2 溶液并且实验时间同样为60 h条件下,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%;

4) 实验三将实验时间延长至120 h时,最大沉降量出现在离阳极约25 cm处,最大沉降量为2.8 cm,沉降率为18.7%。

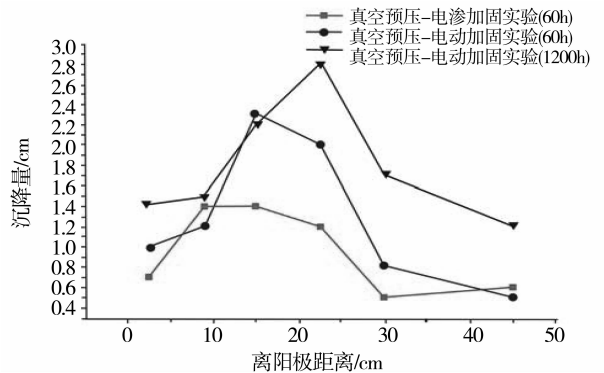


图3 软土沉降量

Fig. 3 Settlement of soft soil

由上可知,通过在真空预压-电动加固实验中注入 CaCl_2 溶液,软土整体沉降量增大,相对于真空预压-电渗加固实验,最大增幅达64%,而延长实验时间后,软土的沉降量进一步增大,最大增幅达120%,这说明了注入的 CaCl_2 溶液能极大的促进软土的沉降,这可能主要有两方面的原因,一方面注入的 CaCl_2 溶液能有效提高软土的导电性,提升电渗排水的效率和进程,因而软土固结沉降更好。同时注入的 Ca^{2+} 能够与黏土颗粒中的其他离子发生交换或者聚合,使得双电层变薄,黏土颗粒排列更紧密,宏观上就表现为沉降量增大。

2.2 含水量及排水量变化

2.2.1 含水量变化 实验过后对土样不同部位含水量进行测量。土样原始含水量为43.13%,可以看到,实验过后,土样的含水量都有不同程度的减小。实验一土样在B1、M1、M2处含水量最小,相对于原始含水量分别减少38.81%、44.77%、54.90%;实验二土样在M2、T2、B2处含水量最小,相对于原始含水量分别减少35.08%、42.41%、42.45%,但在实验二中,阳极棒附近(A)含水量反而增加了3.13%,这主要是因为实

验时间过短，注入的溶液来不及排出去所致；实验三土样在 B1、B2、T2 处含水量最小，相对于原始含水量分别减少 39.67%、41.83%、42.17%。总的来说，整个土样三个实验过后，含水量最大降幅达到 54.90%，平均降幅为 24.53%，这说明实验起到了很好的排水作用。

三组实验沿土样的平均含水量分布如图 4 所示。实验一在没有注入溶液条件下，含水量从阳极到阴极逐渐升高，这一方面显示了真空预压 - 电渗的良好排水作用，也说明了实验时间不够，导致从阳极流向阴极的水没来得及排出去。而在注入 1 mol/L CaCl₂ 溶液后（实验二和实验三），均在土样中部（离阳极 25 cm 处）测得最低含水量，且随着实验时间的延长，土样整体含水量降低更大，说明了注入溶液使得土样孔隙溶液电导率增加，加快了排水过程以及排水量，土样固结更加好。

2.2.2 排水量变化 实验过程中，使用锥形瓶将从软土排出的溶液（水）分离出来用于测量其体积和离子浓度等参数，通过这些参数我们可以分析实验的处理效果。排水量是指实验过程中的累积排水量，其随时间的变化如图 5（a）所示。由图 5 可以得出如下推论：

1) 对比真空预压 - 电动加固实验（60 h）与真空预压 - 电渗加固实验（60 h），两者实验时间相同，但是前者累积排水量却比后者多出 1.82 倍，说明了注入溶液后能大幅提高排水效率；对比真空预压 - 电动加固实验（120 h）与真空预压 - 电动加固实验（60 h），两者所有实验条件均相同，只是溶液注入方式不同，但后者的累积排水量在前 60 h 内竟比前者多出 57.8%，且比真空预压 - 电渗加固实验（60 h）多出 346%，这说明每隔 2.5 h 注入 25 mL 溶液的这种注入方式能更有效提高排水效率。当延长实验时间至 120 h，其排水量仅占总排水量的约 5%，说明实验后期排水效果不佳，效率大幅下降。

2) 分析排水量的变化忽略了真空预压 - 电动实验中注入溶液的影响，为了更科学的分析排水的变化，图 5（b）显示了三组实验排水速率随时间的变化。三组实验排水速率均随时间的增加而减小，从真空预压 - 电渗实验至真空预压 - 电动实验，排水速率越来越高，单次注入 5 mL CaCl₂ 溶液后（实验二），排水速率增加约 2 倍。改变注入方式，即单次注入 25 mL CaCl₂（实验三）后，排水速率比实验二增加约 40% ~ 60%，说明注入 CaCl₂ 溶液对于增加排水量以及排水速率是快速有

效的，这直接加快了软土的固结过程。

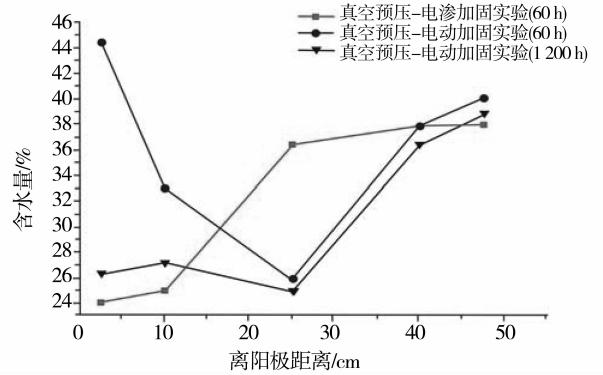
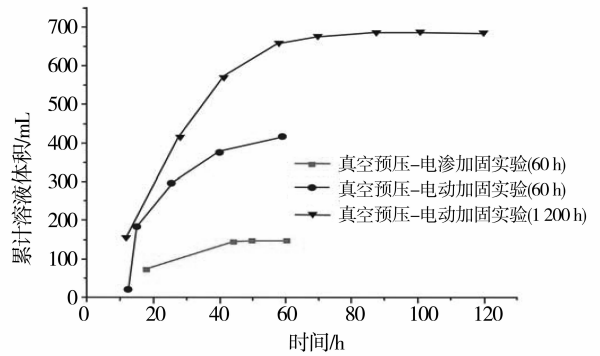
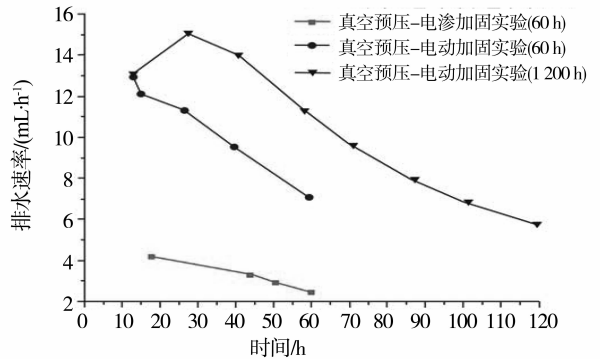


图 4 平均含水量分布图

Fig. 4 Distribution of average water content



(a) 排水量随时间变化图



(b) 排水速率随时间变化图

图 5 排水量及排水速率随时间变化图

Fig. 5 Variation of drained water volume and rate with time

2.3 抗剪强度

土体的抗剪强度是表征土体力学性质的一个重要参数，直接反映了软土的处理效果，本文采用便携式十字板剪仪对实验前后土体不排水抗剪强度的变化进行测试。

三组实验结束后，均使用便携式十字板剪切仪于图 2 所示位置对土样进行原位不排水抗剪强度进行测定。未经任何处理的原状土的平均抗剪强度为

14 kPa。实验一中软土的不排水抗剪强度为 17 kPa (B3) ~ 115 kPa (B1)，增长幅度从 21% ~ 721% 不等，抗剪强度由阳极向阴极逐步降低 (见等值线图)。实验二和实验三后，软土的不排水抗剪强度分别从 14 kPa 增长到最高的 102 kPa (M2) 和 197.6 kPa (M2)，增长幅度从 64% ~ 629% 和 79% ~ 1 311% 不等，两个实验均出现中部强度最

高，阳极次之，阴极最弱的规律 (见等值线图)。三个实验各个部分土样抗剪强度增长百分比及等值线图详见图 6。

经过真空预压 - 电动加固实验 (60 h) 处理后的软土比真空预压 - 电渗加固实验 (60 h) 处理后的土样抗剪强度更大，而且增加真空预压 - 电动加固实验时间能进一步的促进其强度的增大。

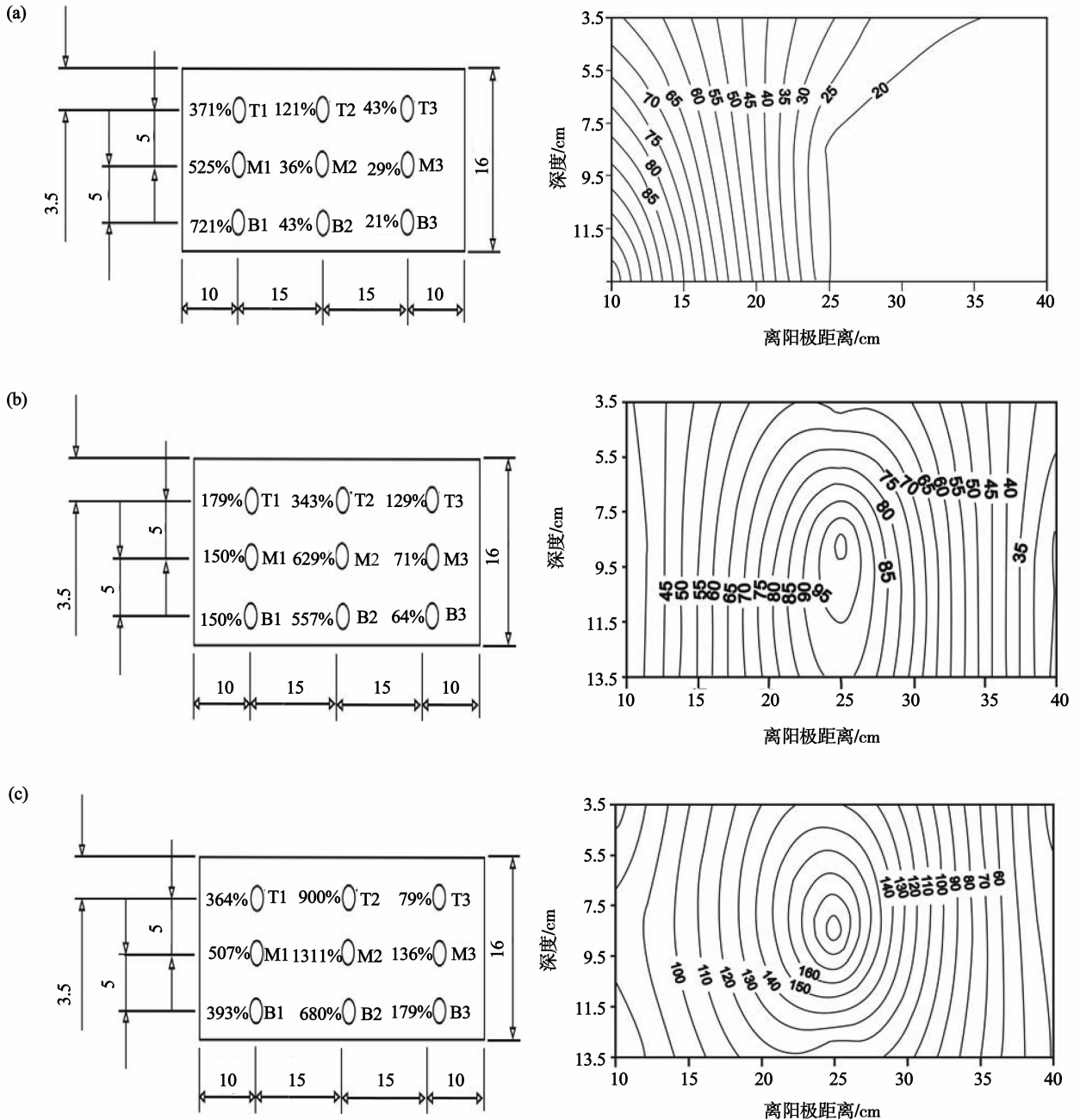


图 6 土样抗剪强度增长百分比和等值线图

(a、b、c 图分别为实验一，实验二和实验三，左侧图数字为强度增长百分比，右侧字母代表取样位置)

Fig. 6 Percent increase and contour of shear strength

(fig. a, b, c separately represent experiment first, second and third, left figures represent percent increase of shear strength , right letters represent sampling locations)

3 结 论

1) 注入的 Ca^{2+} 能够与黏土颗粒双电子层中的阳离子进行交换作用, 使得黏土颗粒双电层厚度减薄, 颗粒间排列更加紧密, 宏观上表现为沉降量增大。

2) 注入溶液使得软土中孔隙溶液电导率增大, 排水量和排水速率增加, 直接加快了软土的固结速率, 同时固结效果更好。

3) 真空预压-电动加固实验各项指标均比真空预压-电渗加固实验要好, 而且当延长真空预压-电动加固实验的时间及改变溶液注入方式, 土样抗剪强度将进一步提高, 处理效果更好。

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] 温耀霖, 潘健, 吴湘兴. 珠江三角洲软土的微观结构与力学特性[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 1995, 23(1): 144-151.
- [3] 王盛源, 关锦荷, 蒋雪琴. 饱和黏土微粒结构及其工程特性研究[J]. 水运工程, 1999, (5): 3-7.
- [4] 陈嘉鸥, 叶斌, 郭素杰, 等. 珠江三角洲软土 SEM 微结构定量研究. [J]. 电子显微学报, 2001, 2: 72-75.
- [5] 陈晓平, 黄国怡, 梁志松. 珠江三角洲软土特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 137-141.
- [6] 夏银飞, 吴代华, 文建华. 珠江三角洲软土物理力学指标统计分析[J]. 公路交通科技, 2008, 25(1): 47-50.
- [7] 龚晓南. 地基处理技术及其发展[J]. 土木工程学报, 1997, 6: 3-11.
- [8] 孙连军, 冯勇. 地基处理方法综述[J]. 山西建筑, 2007, 4: 141-142.
- [9] 陶春. 真空电渗法在中船龙穴造船基地软土地基处理中的应用[J]. 广东土木与建筑. 2008, 7: 17-21.
- [10] 刘凤松, 刘耘东. 真空-电渗降水-低能量强夯联合软弱地基加固技术在软土地基加固中的应用[J]. 中国港湾建设, 2008, 157(5): 43-49.
- [11] 刘志浩, 高明军, 曾国海, 等. 电渗复合真空预压法处理软土地基试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2013(1): 67-72.
- [12] 李洪艺, 张澄博, 张永定, 等. 盐溶液注入对电动加固软土影响的研究进展[J]. 工程地质学报, 2011, 19: 288-293.
- [13] CHANG H, KRISHNA P G, CHIEN S C, et al. Electro-osmotic chemical treatments: Effects of Ca^{2+} concentration on the mechanical strength and pH of kaolin[J]. Clays and Clay Minerals, 2010, 58(2): 153-163.
- [14] OU C, CHIEN S, WANG Y. On the enhancement of electroosmotic soil improvement by the injection of saline solutions[J]. Applied Clay Science, 2009, 44(1): 130-136.
- [15] 覃家琪等. 真空预压联合电动法加固软土的电学性质变化实验研究[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2014(6): 112-117.
- [16] 张英. 珠江三角洲地区地下水环境背景值研究[D]. 北京:中国地质科学院, 2011.
- [17] 王亚, 焦赳赳, 陈建耀. 珠江三角洲第四纪各地层生成与存储天然铵能力的探讨与对比[J]. 生态环境学报, 2013, 12: 1909-1915.
- [18] OU C. Mechanism of soil cementation by electroosmotic chemical treatment[J]. Applied Clay Science, 2015, 104: 135-142.