

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2011.06.015

真空预压联合电渗法处理高含水率软土模型试验

王柳江¹, 刘斯宏¹, 汪俊波², 徐伟³

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710032;
3. 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 针对海相吹填土高含水率、高压缩性、低渗透系数的特点, 提出了采用真空预压联合电渗法的地基加固方法, 并通过室内模型试验对该工法的加固机制进行了初步探索。试验结果表明: 初期采用真空预压排水, 当试验土体达到最佳临界含水率 0.85 后, 联合电渗法可有效地加快地基排水速度; 采用真空预压联合电渗法处理吹填土, 土体通常会产生较大的竖向和侧向变形, 且有效提高阴极和阳极附近土体强度, 因此对于真空预压仅能对表层约为 42.8% 地基深度的土体有效加固的问题, 采用该工法可通过真空预压和电渗法分别加固表层和深层土体, 由此达到深度方向均匀加固地基的目的。

关键词: 真空预压; 电渗; 软基处理; 海相吹填土; 模型试验

中图分类号: TU411.93 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2011)06-0671-05

我国沿海地区人口稠密, 人均耕地面积较少。随着改革开放的不断深化, 沿海地区建设规模迅速扩大, 建设用地资源日趋紧缺, 因此, 近年来人工吹填造陆工程逐渐增多。吹填土一般多为软弱黏土、淤泥或流泥, 具有高含水率、高孔隙比、低渗透性、高黏粒含量、高压缩性等特点。吹填初期的强度几乎为零, 而吹填土在自重下固结又需要很长时间^[1-2], 因此, 对人工吹填的软土地基采用既高效又经济的地基处理方法, 是人工吹填造陆工程能否顺利实施的关键, 也是一项急需解决的技术难题。传统的软弱地基处理方法包括真空预压法、堆载预压法、真空井点降水法以及动力挤密法等^[3-5], 这些方法在处理一般的低渗透性软黏土时的效果尚可, 但在处理渗透系数为 10^{-8} cm/s 甚至接近 10^{-9} cm/s 的土体时就表现出了局限性, 处理时通常排水效果不明显。

电渗法是一种新的地基加固方法, 其主要优点就是通过电渗带动土体中的孔隙水由阳极向阴极流动, 且孔隙水的流动不受土颗粒大小的影响, Casagrande^[6]首次将其应用于岩土工程, 现已逐渐开始应用于港口建设和围垦工程中高黏粒含量、低渗透性吹填土的排水加固。近年来, 电渗法能耗大、工程造价高的缺点在工期较长的工程中逐渐显露出来, 于是有人提出了真空预压联合电渗的地基处理方法^[7-9], 即通过将真空预压与电渗相结合, 改变传统地基处理方式的局限性, 从而达到有效加固的目的。单独的真空预压和电渗机制及理论研究已经取得了初步成果^[10-12], 但真空预压和电渗两种方法联合作用的研究还很少报道。本文通过室内模型试验, 对该工法加固海相吹填土的效果及其作用机制进行初步探讨。

1 真空预压联合电渗法室内模型试验

1.1 试验土样

试验土样取自大连港大窑湾港区三期工程 19~22 号泊位堆场泥塘区, 为开挖港池的吹填海相淤泥土, 以流泥、淤泥为主, 其物理性质指标如下: 液限 50.3%, 塑限 24.3%, 压缩系数为 1.66 MPa^{-1} , 渗透系数为 5.2×10^{-8} cm/s, 含水率(质量分数)为 0.923, 黏粒质量分数为 52.4%。

1.2 试验装置

试验在 $80 \text{ cm} \times 40 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高) 的模型箱内进行, 模型箱由 10 mm 厚钢化玻璃板和钢架制成,

收稿日期: 2010-11-17

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2007AA11Z115); 江苏省自然科学基金(BK2009344); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏政办发[2011]6 号); 中央高校基本科研业务费专项(2010B20114)

作者简介: 王柳江(1985—), 男, 浙江武义人, 博士研究生, 主要从事地基处理及岩土数值分析研究。E-mail: liuj_w@yahoo.cn

其内壁涂有环氧树脂.试验所用真空泵额定功率为 180 W,抽气速度为 10 L/min;气水分离装置采用 ZK-270 型真空饱和缸,将其放置在电子秤上面,通过量重测定出水量;直流电源使用 KDF 可控型电析降水仪,其输出电压为 0~50 V、输出电流为 0~100 A,大小可通过按钮调节.

试验前先在模型箱中紧贴内壁及底部铺设两层 250 cm×250 cm 的土工薄膜,将土样填至 40 cm 高度,然后将排水板和电极插入土体,之后在土体表面铺设两层土工布作为水平向排水及其过滤系统,最后用上述的土工薄膜包裹覆盖土体,并将袋口扎实密封.

土体中埋设了一个阳极和两个阴极,其中排水板和阴极连接在一起.阳极采用直径 25 mm、长 50 cm 的钢筋,阴极由两根直径 10 mm、长 20 cm 的钢筋并联而成.考虑到阳极在土体中容易腐蚀,若将阳极全部插入土体,在阳极与电源导线连接处容易导致电路断开,因此设计阳极顶部伸出土体 10 cm,阳极的顶部和土工膜之间用胶带密封.阴极埋在土体表面以下 20 cm 处,如图 1 所示.这主要考虑到真空预压处理土体渗透系数较小的软土地基时,其在浅层地基中的排水效果较好,而在深层地基中由于井阻效应及其淤泥土对排水板的涂抹作用导致真空预压在深层地基中的排水效果下降,因此,在真空预压和电渗联合使用时,将阴极设置于下部土层,通过电渗弥补真空预压在深层地基中排水加固的不足,同时真空预压联合电渗采用何种组合形式也是工程中要解决的问题,若阴极布置长度和排水板相同,则加固过程中排水板顶部的土工膜极有可能被阴极顶破,从而导致真空预压失效.

1.3 试验过程

试验采用的土样为海相淤泥土,由于海相淤泥土的孔隙水中含盐量极高,因此,在进行电渗时通常会出现两个问题:一是土体的电导率较大而使电渗能耗巨大,二是电化学作用对金属电极腐蚀明显.为尽量降低能耗,减慢阳极腐蚀速率,同时为验证电渗对真空预压的辅助作用,电渗采用了间歇通电的方式.随着试验的进行,土体内部含水率降低,真空预压相对电渗的作用效果逐渐减小而电渗相对真空预压的作用效果逐渐增大,为此将试验分两个阶段,且为反映电渗在试验过程中相对真空预压的作用,电渗一直贯穿于两个阶段.

第一阶段:真空预压一直进行,调节电流密度为 20 A/m²,每隔 24 h 进行 1 h 电渗.在此阶段,真空预压起主要作用,前 80 h 内单位时间的排水量从 995 g/h 递减至 90 g/h,总排水量约为 19.8 kg.在电渗时刻,排水量有明显的增加,但是电渗引起的排水量增量与真空预压产生的出水量相比,其所占单位时间总排水量的比例很小,则可知这一阶段的电渗排水作用不明显.此阶段共持续了 6 d.

第二阶段:每隔 24 h 进行 3 h 电渗,即每一次电渗的时间延长为原来的 3 倍,其他不变.调整电渗时间的原因是,当该土体平均含水率在小于 0.85 之后,真空预压的单位排水量小于 50 g/h,经过电渗,单位时间排水量增加至 100~150 g/h 之间,说明在该阶段电渗引起的排水量增量较单独真空预压的排水量大,且土体电导率随着孔隙水含量的减小而减小,导致土体中电流下降,因此适当增加电渗期的通电时间对地基的排水加固较为有利.此阶段持续的时间同样为 6 d.

2 试验结果及分析

2.1 出水量及出水速率

图 2 和图 3 为整个试验过程中出水量及出水速率的时程变化曲线.整个过程出水量为 25.4 kg,其中第一阶段出水量达到 19.8 kg,当土体中平均含水率降到 0.85 之后,土体出水缓慢.图 3 为两个阶段出水速率随时间变化曲线,其中第一阶段出水速率随着含水率的下降急剧减小,电渗时出水速率略有回升,说明电渗确实能够增加排水的效果.第二阶段出水速率很小,其中在一些时间段由于排水板堵塞甚至不出水,而在通电时出水速率

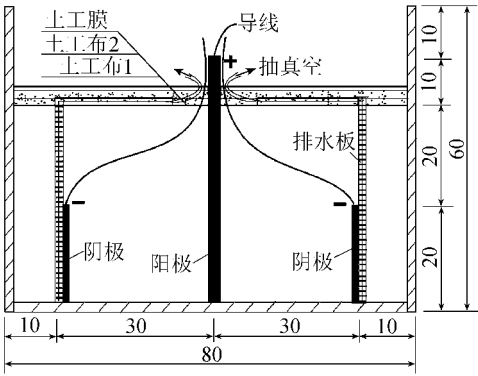


图 1 真空预压联合电渗模型试验示意图(单位:cm)
Fig. 1 Schematic diagram of model test of vacuum preloading in combination with electroosmosis(unit :cm)

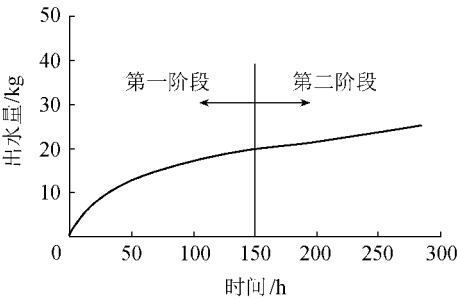


图 2 出水量时程变化
Fig. 2 Time history variation of discharge

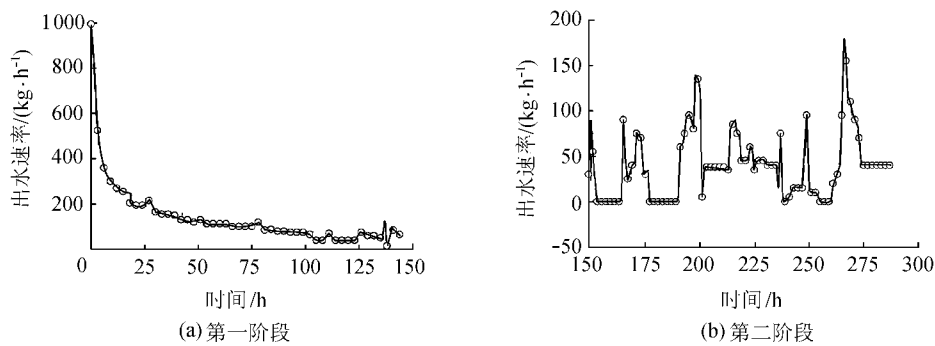


图 3 出水速率的时程变化

Fig. 3 Time history variation of discharge rate

能够提高 2~3 倍. 为反映试验中电渗时段的排水效率, 根据试验结果得到了电渗出水增量百分比与平均含水率的关系, 见图 4, 其中电渗出水增量百分比为通电时电渗引起的出水增量与该时段的总出水量之比. 由图 4 可见, 当土体平均含水率大于 0.85 时, 电渗引起的出水量相对真空预压的要小; 而当土体平均含水率小于 0.85 时, 电渗引起的出水量相对真空预压的大, 说明针对该土体, 真空预压和电渗联合的方法适用于含水率小于 0.85 的情况.

前后两个阶段对比分析说明, 在土体含水率高的情况下, 真空预压起主要排水作用, 在土体含水率降到 0.85 之后, 电渗相对抽真空的排水效果要好, 此时能够体现这两种方法结合使用的优势.

2.2 土体变形特征

试验结束后土体高度 35 cm, 阳极与阴极之间距离 23 cm, 土体发生 5 cm 的竖向位移及 7 cm 的水平向收缩. 排水板和阳极周围土体的强度较高, 阳极附近的土体呈现黄褐色, 其颜色沿径向朝外由深至浅, 扒开表层土体之后, 发现土体相对干燥, 且分布有往阴极方向扩张的环状微裂缝. 裂缝两界面呈褐色, 说明聚集有大量铁离子. 另外, 阳极腐蚀程度沿深度方向变化, 其半径由上到下依次减小, 如图 5 所示.

分析认为, 出现上述现象的主要原因如下 (a) 由于膜下真空度的存在, 大气压近似于外加荷载作用在土体表面, 且真空荷载相当于球应力作用在土体上, 使土体出现竖向与水平向变形 (b) 电渗阳极发生氧化反应, 产生的含铁离子化合物和热量对周围土体有加固和烘干的作用, 从而产生了干缩裂缝 (c) 阴极埋设在土体表面以下 20 cm 的深度处, 因此电渗主要发生在土体底部, 同时真空预压联合电渗的排水方向为由土体顶层沿深度方向朝土体底层, 因此试验一段时间后, 由于表层土体含水率降低导致了土体电阻以及土体和阳极之间的接触电阻增大, 进而减弱了表层土体的电渗作用, 最终减小了阳极上部的腐蚀量.

2.3 土体含水率变化

试验后将土层自上而下分 5 层开挖, 然后在每层中取 4 个不同土样测其含水率, 据此绘制的含水率等值线分布如图 6 所示. 将各测点含水率加权取平均值后知土体平均含水率降低到 0.667, 与初始含水率相比减少了 37.9%. 从图 6 可以看出: 最小含水率为 0.505, 分布在阳极顶部, 最大含水率为 0.82, 分布在深度为 0.25 m 以下的两极中间; 含水率的分布主要分为两种形式, 一是在土体表层 15 cm 范围内, 二是在土体底部 20 cm 范围, 其中表层土体中含水率等值线主要呈水平分布, 底层为竖直分布, 表层含水率由上到下含水率增大, 底层含水率由阳极往中间方向增大, 然后由中间往阴极减小, 呈两头小中间大的分布趋势, 在同一高度上, 阳极附近土体含水率最低, 阴极次之, 中间最高, 两极中间的土体含水率沿深度方向依次递增. 由此可见,

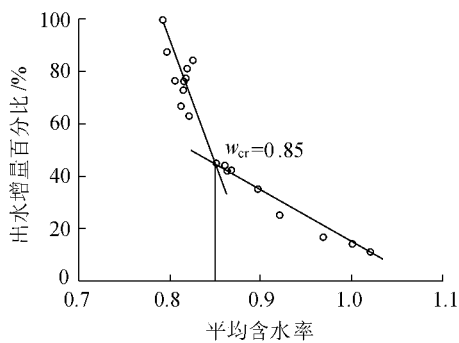


图 4 土体电渗出水增量百分比与平均含水率的关系

Fig. 4 Relationship between percentage of increased discharge by electroosmosis and average water content



图 5 阳极腐蚀

Fig. 5 Anode corrosion

试验中真空预压的作用范围主要集中在土体表层 15 cm 范围内和排水板附近,而 15 cm 以下的土体排水主要受电渗的作用,即在实际工程中相对于实际地基加固厚度而言,地基表层厚度为 42.8% 加固深度的土体受真空预压的影响较明显,而底层土体则通过电渗弥补了真空预压加固的不足;当联合电渗时阳极往阴极方向排水,而阴极附近的水又可以利用排水板上的真空度排出,因此电极埋设在地基深处可以有效加强真空预压对深层地基的加固效果.由于阳极表面既有真空排水又有阳极电渗排水,因此,阳极顶部含水率最小.

2.4 土体强度变化

试验结束后对阴极和阳极的土体进行了直剪试验.通过沿深度方向每隔 15 cm 分层取样,每层紧靠两极周围各取 4 个环刀样,共取了 3 层,其中每 4 个土样作为一组,分别在 50 kPa,100 kPa,150 kPa 和 200 kPa 的竖向应力下进行直剪试验,试验共分 6 组,将其编号为 YN1,YN2,YN3,YG1,YG2,YG3,取样位置如图 7 所示.试验结果见表 1.试验前土样呈流塑状,无法测定其剪切强度.由表 1 可以看出,试验后土体抗剪强度有明显提高,且阴极土体强度高于阳极,底层和表层土体的强度较大,而中间层最小.通常电渗加固应从阳极往阴极发展,而试验测得的阴极附近土体强度大于阳极附近土体强度,笔者分析认为:一是由于阴极设有排水板,能够将表面真空度传递至土体深处,从而在阴极周围土体中形成了负孔隙水压力(即吸力),增大了该位置土体的有效应力,同时,阴极土体又承受了电渗下的排水以及电化学作用,因此,阴极附近土体相当于承受了真空预压与电渗的联合作用,土体相对比较密实;二是因为在电渗作用下,孔隙水从阳极往阴极流动,导致阳极周围土体较干燥而产生了较多的裂缝,且进行直剪试验时采用原状土,因此,土样中众多的裂缝导致阳极土体的强度被严重低估,从而造成了与通常所认为的电渗加固由阳极往阴极发展的观点不一致的现象.试验结束后,土体的干密度明显提高,从阴阳极周围土体的干密度比较可知阳极附近土体的干密度较小,由此说明阳极土体强度被低估,若在试验结束后对阳极周围土体进行强夯压实处理,阳极的强度将明显增加.

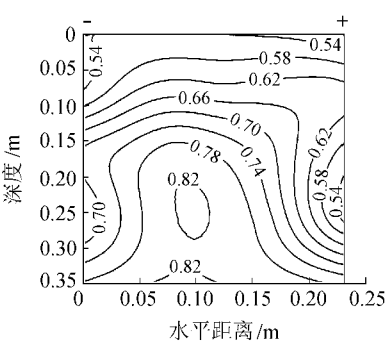


图 6 试验后土体含水率分布等值线

Fig. 6 Contour of distribution of water content of soil after test

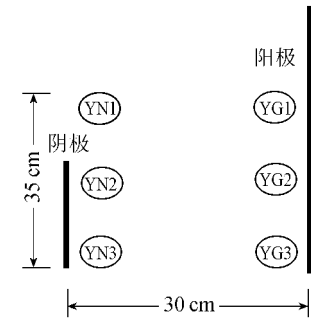


图 7 直剪试验取样位置

Fig. 7 Sampling location in direct shear test

表 1 试验后土样物理力学指标

Table 1 Physical mechanics parameters of soil sample after test						
取样点	$\varphi/(^{\circ})$		c/kPa		$\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	
	阳极	阴极	阳极	阴极	阳极	阴极
表 层	3.72	3.94	12.7	14.87	1.23	1.18
中 间 层	2.13	3.94	4.65	12.55	1.10	1.00
底 层	6.58	8.36	6.51	7.44	1.13	1.01

3 结 论

- a. 真空预压主要是物理作用而电渗主要是电化学作用,两者联合使用的效果十分明显.
- b. 由于海相淤泥土具有含水率以及含盐量高的特点,导致电渗能耗过大且阳极腐蚀速度加快,通过试验得到在加固前期,真空预压的排水作用强于电渗,而当土体平均含水率小于 0.85 之后,电渗相对真空预压的排水效果较明显,因此,建议真空预压联合电渗法加固该类型土体时采用间歇通电方式,且在土体含水率到达相应标准时延长电渗时间.
- c. 通过测定试验后土体的强度可知真空预压与电渗联合使用时可以明显提高阴极土体的强度,且采用真空预压处理上部土层,电渗处理下部土层可以达到工程经济以及处理效果兼顾的目的.

参考文献:

[1] MICIC S, SHANG J Q, LO K Y, et al. Elec-trokinetic strengthening of a marine sediment using intermittent current[J]. Can Geotechnical J., 2001, 38(22): 287-302.

- [2]周镜.软土沉降分析中的某些问题[J].中国铁道科学,1999,20(2):17-31.(ZHOU Jing. Settlement analysis of embankment on soft clay[J]. China Academy of Railway Sciences, 1999, 20(2):17-31.(in Chinese))
- [3]高有斌,沈扬,徐士龙,等.高真空击密法加固后饱和吹填砂性土室内试验[J].河海大学学报:自然科学版,2009,37(1):86-90.(GAO You-bin, SHEN Yang, XU Shi-long, et al. Laboratory tests on saturated hydraulic fill sandy soil by high vacuum densification method[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2009, 37(1):86-90.(in Chinese))
- [4]孙田磊,林涌潮,杨福麟,等.真空预压超软弱土下卧透土层新密封方法探讨[J].水利水电科技进展,2009,29(5):74-77.(SUN Tian-lei, LIN Yong-chao, YANG Fu-lin, et al. Discussion of new sealing method of deep water-permeable stratum under super soft ground in vacuum pre-loading[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(5):74-77.(in Chinese))
- [5]盛维高,李国维,刘汉龙,等.超载预压软土的次压缩沉降估算方法[J].河海大学学报:自然科学版,2009,37(5):596-601.(SHENG Wei-gao, LI Guo-wei, LIU Han-long, et al. Estimation method of secondary compression settlement for soft soil under surcharge preloading[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2009, 37(5):596-601.(in Chinese))
- [6]CASAGRANDE L. Electro-osmotic stabilization of soil[J]. Journal of the Boston Society of Civil Engineers, 1952, 39: 51-83.
- [7]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.(GAO Zhi-yi, ZHANG Mei-yan, ZHANG Jian. Laboratory model test of vacuum preloading in combination with electro-osmotic consolidation[J]. China Harbour Engineering, 2000(5):58-61.(in Chinese))
- [8]房营光,徐敏,朱忠伟.碱渣土的真空-电渗联合排水固结特性试验研究[J].华南理工大学学报:自然科学版,2006,34(11):70-75.(FANG Ying-guang, XU Min, ZHU Zhong-wei. Experimental investigation into draining consolidation behavior of soda residue soil under vacuum preloading-electro-osmosis[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2006, 34(11):70-75.(in Chinese))
- [9]储旭,陈波,周建蟠,等.真空电渗降水及动力挤密脱水加固淤泥技术[J].水利水电科技进展,2008,28(5):78-79.(CHU Xu, CHEN Bo, ZHOU Jian-peng, et al. A novel sediment technique integrating electroosmotic drainage and vibro-densification[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(5):78-79.(in Chinese))
- [10]姜炎.真空排水预压法加固软土技术[M].北京:人民交通出版社,2002.
- [11]曹永华,高志义,刘爱民.地基处理的电渗法及其进展[J].水运工程,2008(4):92-95.(CAO Yong-hua, GAO Zhi-yi, LIU Ai-min. Characteristics and development of electro-osmotic treatment for ground improvement[J]. Port & Waterway Engineering, 2008(4):92-95.(in Chinese))
- [12]汪俊波,刘斯宏,徐伟,等.电渗法处理大连大窑湾超软土室内试验[J].水运工程,2010(1):15-19.(WANG Jun-bo, LIU Si-hong, XU Wei, et al. Laboratory test for electro-osmotic treatment of ultra-soft soil in Dayao Bay, Dalian[J]. Port & Waterway Engineering, 2010(1):15-19.(in Chinese))

Model test for high-water-content soft soil treatment under vacuum preloading in combination with electroosmosis

WANG Liu-jiang¹, LIU Si-hong¹, WANG Jun-bo², XU Wei³

(1. Collage of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;

2. Xi 'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi 'an 710032, China ;

3. East China Investigation and Design Institute under CHECC, Hangzhou 310014, China)

Abstract : Based on the characteristics of dredger fill soil with high water content, high compressibility, and low permeability, this paper proposes a method of vacuum preloading in combination with electroosmosis for the reinforcement of a soft soil foundation. The preliminary investigation was made into the reinforcement mechanism through a laboratory model test. The results show that electroosmosis can effectively accelerate the drainage of the soil foundation when the water content of the soil sample reaches the optimal critical value of 0.85 after the vacuum preloading at the preliminary stage. Obvious vertical and lateral deformation as well as the increase of soil strength near the electrodes can be observed when using this method to treat dredger fill soil. Therefore, for solving the problem that vacuum preloading can only used to effectively reinforce the surface soil with a thickness of about 42.8% of the reinforced depth, the proposed method can be used to reinforce both the surface and deep soils, by vacuum preloading and electroosmosis, respectively, and can thus uniformly reinforce the soil foundation in the depth direction.

Key words : vacuum preloading ; electroosmosis ; soft soil treatment ; dredger fill soil ; model test