

基于电渗法的新近吹填土快速结壳试验

周亚东^{1,2}, 张超¹, 李琳¹, 尚伟¹

(1. 天津城建大学天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要:针对新近吹填土地基承载力低, 无法满足机械进场施工的问题, 基于电渗固结阳极区域土体固结快的特点, 设计了一种新近吹填土快速结壳电渗电极, 采用该电极分别开展了电渗、真空不同联合方式的室内试验, 对比分析了排水量、电渗能耗、最终含水率、抗剪强度及承载力等土性参数指标。结果表明: 采用该电渗电极处理后的吹填土含水率降低 31.0% ~ 61.4%, 土体表层承载力最高可达 192 kPa; 单纯电渗处理后土层抗剪强度沿深度衰减, 电渗-真空联合作用下土层抗剪强度更高且分布均匀; 设计的电渗电极可实现高含水率新近吹填土浅表层快速加固。

关键词: 电渗电极; 电渗; 真空预压; 吹填土; 抗剪强度

中图分类号: TU472 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2021)03-0072-05

Experimental study on rapid crusting of fresh dredger fill based on electroosmosis//ZHOU Yadong^{1,2}, ZHANG Chao¹, LI Lin¹, SHANG Wei¹ (1. *Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Engineering Characteristics and Engineering Environment, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China*; 2. *College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China*)

Abstract: To solve the problem that the low bearing capacity of fresh dredger fill foundation that cannot meet the requirement of mechanical construction, a kind of electroosmosis electrode was developed for rapid crust of freshly dredger fill based on the characteristics of fast consolidation of soil in the anode area in electroosmosis consolidation. Laboratory tests of different combination of electroosmosis and vacuum with the electrode were carried out, and the soil parameter indexes such as soil discharge, electroosmotic energy consumption, final moisture content, shear strength and bearing capacity were comparative analyzed. The results show that the moisture content of the dredger fill is reduced by 31.0% to 61.4% after the treatment of electroosmosis electrode, and the bearing capacity of the surface layer is up to 192 kPa. After electroosmotic treatment, the shear strength of the soil layer decreases along the depth. Under the combined action of electroosmosis and vacuum, the shear strength of soil layer is higher and more uniform. The developed electroosmosis electrode can realize rapid reinforcement of the near-surface layer of fresh shallow dredger fill with high water content.

Key words: electroosmosis electrode; electroosmosis; vacuum preloading; dredger fill; shear strength

吹填造陆是解决沿海城市陆地资源紧缺的有效途径。新近吹填土在自然条件下通常需要经过 2 ~ 3 a 长时间晾晒, 直到土体表面形成硬壳层, 具有一定承载力才能进行砂垫层铺设、机械插板等一系列地基处理施工, 严重影响工期。对此, 闫澍旺等^[1]提出在吹填土上吹填一层粉细砂形成硬壳层, 以提高地基的承载能力。董志良等^[2-4]对真空预压法进行改进并用于超软吹填土浅层加固, 实现了表层结壳的目的。

电渗法在处理高含水率、低渗透性软黏土地基时, 具有处理速度快、扰动小等特点, 近年来受到国内外学者的广泛关注。李瑛等^[5-6]在自制的电渗固结装置上, 开展二维轴对称软黏土电渗固结试验, 结果表明土体含水率降低和抗剪强度提高都较为明

显。Wan 等^[7]提出电极转换以提高电渗效率和改善处理效果。陈卓等^[8]发现电极转换虽有利于土体固结变形均匀, 但平均抗剪强度较常规电渗差。冯清鹏等^[9]研究了在电极区域添加化学试剂对高岭土电渗试验的影响, 发现添加化学试剂可以有效降低界面电阻, 增大排水量。王柳江等^[10-13]对真空预压-电渗联合加固软黏土机理开展了研究, 结果表明两者联合比单一法加固效果更好, 土体固结更均匀。卜凡波等^[14-16]通过现场试验开展了真空预压-电渗不同联合方式处理淤泥及吹填土的试验研究, 获得了理想的处理效果。

目前国内外针对电渗法的研究通常以施加水平电场为主, 研究表明, 电渗固结过程中阳极附近土体

基金项目: 国家自然科学基金 (51608351); 天津市自然科学基金 (18JCYBJC22600, 18JCQNJC77900)
作者简介: 周亚东 (1985—), 男, 副教授, 博士, 主要从事软基处理方面的研究工作。E-mail: zyd476300@126.com

固结速度快、抗剪强度高,而阴极区域土体固结效果较差^[5-6]。鉴于此,本文将传统水平电场转为垂直电场,充分利用阳极区域土体固结特性,使新近吹填土快速结壳。基于此,笔者设计了一种新近吹填土快速结壳电渗电极,将电渗与真空预压相结合开展吹填土浅层加固试验研究,对比分析了不同组合方式下排水量、能耗、抗剪强度、承载力等指标的变化规律,以期实现超软吹填土表层快速结壳,满足插板机等机械作业的要求。

1 试验设计

1.1 电渗电极

为充分利用电渗固结过程中阳极区域土体固结快、强度高的特点,使吹填土表层快速形成具有一定厚度的硬壳层,本文设计的电渗电极是一种立体式垂直电极,阳极和阴极呈上下排布。该电极由薄壁不锈钢管和 PVC 管加工而成,如图 1 所示。其中,电渗阴极和阳极由不锈钢管焊接而成,PVC 管为竖向排水管。阳极细管和阴极细管呈十字交叉形分别焊接在距阴、阳极主管底部 25 mm 位置处,其中阴极细管与主管呈 85°夹角,以便于使水流入主管。将焊接好的阴极和阳极用 PVC 管连接,起到绝缘作用。



图 1 电极实物照片

根据试验需求,可选择阴极单侧排水,即只在阴极细管上打孔或开槽,试验过程中水分只从阴极流入,实现单侧排水;也可选择阴极、阳极双侧排水,即在阴、阳极细管上同时打孔或开槽,试验过程中水分可以通过阴、阳极流入,实现双侧排水。表 1 给出了电极材料参数。

表 1 电极材料参数

电极	长度/mm	(内)直径/mm	壁厚/mm	数量/根
阴极细管	70	8	1	4
阳极细管	70	8	1	4
阴极主管	50	14	1	2
阳极主管	100	14	1	2
PVC 管 (竖向排水管)	160	14	1	1

1.2 试验装置

试验装置主要由模型桶、汽水分离器、真空泵及直流电源组成。其中,模型桶为有机玻璃材料,内径 190 mm、壁厚 10 mm、高度 500 mm。试验所用真空泵为 XD-020 型旋片式真空泵,抽气速率为 20 m³/h,功率为 900 W,极限真空度为 0.1 MPa。直流电源为兆信 KXN-645D 直流稳压电源,最大输出电压为 60 V,最大输出电流为 5 A。

试验时在开槽电极细管上包裹一层土工布,起到反滤作用。为防止电极在超软土体中下沉或倾斜,在距阳极上方 30 mm 处设置厚度 15 mm 的圆形泡沫浮板并固定,然后将电极保持垂直沉入土样中心位置至浮板贴近土样表面。试验装置剖面图如图 2 所示。

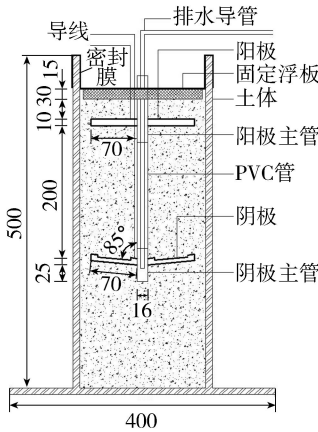


图 2 试验装置剖面示意图(单位:mm)

1.3 试验土样

试验土样取自天津滨海新区临港新城吹填土地,经室内试验测定,得到该原状土样初始含水率为 68%,相对密度为 2.72,塑限为 23.2%,液限为 41.3%,容重为 16.2 kN/m³。

为模拟新近吹填土特性,将土样加水搅拌至 100% 目标含水率。试验前取适量土样倒入搅拌桶内,计算达到目标含水率所需水量并倒入搅拌桶,采用手握式小型搅拌机充分搅拌均匀,然后缓慢倒入试验模型桶。

1.4 试验方案

为研究电极在电渗、真空作用下对高含水率吹填土的加固效果,设计试验方案如表 2 所示。其中,试验 T1 ~ T3 为单侧阴极排水,试验 T4 ~ T6 采取阴、阳极双侧排水。真空-电渗试验采取同步加固的方式,通过一端与真空泵相连、一端伸入电极的导管抽真空,在真空负压和电渗的作用下,土体水分会通过伸入电极的导管进入汽水分离器,进而达到排水的目的;试验 T6 采取电极转换的方式,设定每隔 12 h 为 1 次电极转换周期。

表2 试验条件对照

试验编号	试验方案	真空度/kPa	初始含水率/%	电压/V	试验时间/h
T1	电渗 (单侧排水)	0	104.0	30	84
T2	真空预压 (单侧排水)	-75~-80	98.1	0	140
T3	真空预压联合电渗 (单侧排水)	-75~-80	104.0	30	120
T4	真空预压联合电渗 (双侧排水)	-75~-80	100.9	30	120
T5	真空预压 (双侧排水)	-75~-80	97.9	0	140
T6	真空预压联合电渗 (双侧排水+电极反转)	-75~-80	97.1	30	120

试验过程中,每隔2h记录1次排水量和电流读数。试验结束后,采用PS-VST-P型便携式十字板剪切仪测试土体抗剪强度。该仪器由弹簧扭力计、延长杆及不同尺寸的十字板头(本试验采用C、D两种板头)等组成,其最大测试深度3m,最大测试量程0~260kPa,测试精度优于10%。采用PS-MPT-A型微型贯入仪测定土体的液性指数并粗估土的承载力和压缩系数。微型贯入仪由3只不同力度的测力计和3只不同规格的测头组成,测量精度优于±5%,本文试验采用A测头对试验结束后表层土体进行测量。根据使用要求,正确读取测杆上滑标靠近0点一侧边界所示位置的读数即贯入阻力 P_i 值(单位:100kPa)。每次贯入试验的平行试验不宜少于3次,将平行试验中偏差大的读数剔除,以其余读数平均值作为试验结果。根据最终测得的贯入阻力 P_i 值,分别查阅对照表,得到被测土的液性指数 I_L 和允许承载力 R_{pi} 及压缩系数 α_{1-2} 。同时测定土样表层以下0、10、20cm处土体的含水率,同一平面内土样含水率及抗剪强度取样两个点并取其平均值。

2 试验结果与分析

2.1 排水量

图3为6组试验排水量随通电时间的变化曲线。从图3可以看出,相同时刻真空-电渗联合作用试验(T3、T4)的排水量大于单纯电渗试验(T1)和单纯真空预压试验(T2、T5),且双侧排水效果优于单侧。其中,单纯电渗试验(T1)在80h后排水量趋于稳定,最终排水量低于其他各组试验。试验T6在试验T4的基础上增加了电极反转,从图3可以看出,电极反转后其排水效果不理想,排水量小于常规真空-电渗联合试验T4。陈卓等^[8]的单纯电渗试验在电极反转后也有类似现象,这是因为电极反转前阳极区域土体孔隙水排出快,形成高固结区,电极反转后电渗流逆向,水分需通过高固结区排出,排水困

难,渗流量减小。

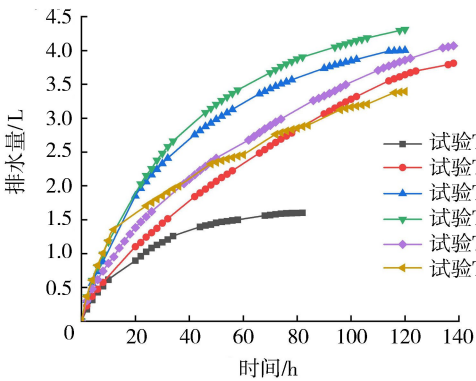


图3 排水量与时间关系曲线

值得注意的是,在比较试验T3与T4、T2与T5的排水量后发现,相同条件下双侧排水的效果较阴极单侧排水并没有显著提高。这是因为阴极排水体位于土体深部,其上下影响区域较大;而阳极排水体位于土体表层,影响区域小。因此,阴极排水体在吹填土浅层加固中起主导作用。

2.2 电流及能耗

图4为试验过程中电渗电流随时间的变化。从图4可以看出,初始时间段电流略有增大,随后迅速减小,这可能与电渗早期土体成分的非均质特性有关^[11]。从电流开始减小至试验结束,电渗试验(T1)的电流总是大于真空预压-电渗试验(T3、T4、T6),这是由于试验T3、T4、T6在真空和电渗的共同作用下孔隙水被快速排出,土体电阻率升高。试验T6电流随时间呈阶梯式变化,每次进行电极转换后,电流先升高随后又迅速下降至大于电极转换之前的电流,这与陈卓等^[8]的试验结果相似。

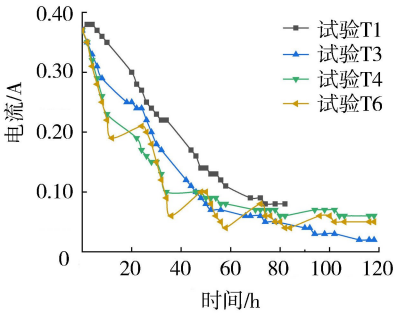


图4 通电电流与通电时间的关系曲线

为了研究电渗的效率,引入能耗系数 C ,它表示在电渗每排出1mL水所要消耗的电能,计算公式^[5]为

$$C = \frac{\int_0^{V_{\text{总}}} UI_t dt - \int_0^t UI_t dt}{V_{\text{总}} - V_t} \tag{1}$$

式中: I_t 、 V_t 分别为 t 时刻土体中的电流和累积排出的水量; U 为电源的输出电压; $V_{\text{总}}$ 为排出的总水量。

图5为能耗系数随时间的变化关系曲线。从

图5可以看出,在整个试验过程中,单纯电渗试验(T1)能耗系数较高,电渗后期能耗系数急剧增大,继续电渗将不经济。真空-电渗联合作用(T3、T4、T6)时能耗系数较低,且变化幅度较小,可见真空预压有利于降低电渗能耗。其中,基于电极反转的真空-电渗联合试验(T6)较试验T3、T4能耗表现更为优异。

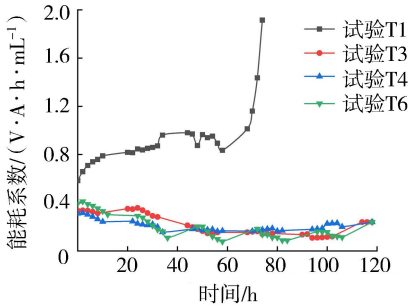


图5 能耗系数与通电时间的关系

2.3 含水率

试验结束后沿土体深度方向进行含水率测试,试验结果如图6所示。从图6可以看出,6组试验结束后土体含水率较初始情况均有不同程度的下降,降低幅度为31.0%~61.4%。其中,单纯电渗试验(T1)土体含水率沿深度升高,阳极附近土体含水率降低至50.7%,表现出良好的表层结壳特性。真空-电渗联合试验(T3、T4)土体含水率降低幅度最大,且沿深度方向分布更均匀。而基于电极反转的真空-电渗联合作用试验(T6),土层含水率差异最大,表现为土层中部含水率最高。试验开始12 h后,电极首次反转,水分由阴极低固结区流经阳极高固结区排出,导致排水速率减缓。待到下一次电极转换时,原阴极低固结区变为高固结区,使得水分积聚在土层中部。电极多次反转后阴阳极区域各形成不同程度的高固结区,导致土层中部孔隙水排出困难,进一步验证了前文根据排水量得出的结论。

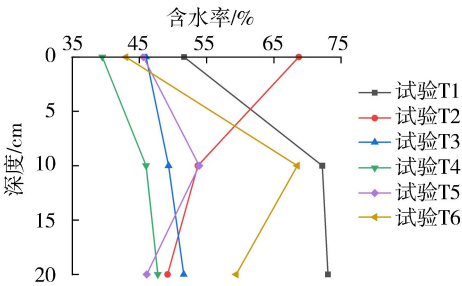


图6 试验后土体含水率变化曲线

2.4 抗剪强度

采用PS-VST-P型便携式十字板剪切仪,对试验后土体抗剪强度进行测试。抗剪强度随深度的变化如图7所示。初始情况下土体含水率较高,抗剪强度几乎为零。试验结束后,各组试验土样抗剪强度

均有不同程度提高。其中,单纯电渗试验(T1)表层土体抗剪强度达到24.5 kPa,明显高于底部土体的抗剪强度7.5 kPa。单纯真空试验(T2)土体抗剪强度沿深度变化规律与单纯电渗相反,底部土体抗剪强度最高,达到27 kPa。真空-电渗联合试验(T3)土体加固后的抗剪强度及均匀性都明显优于前两组,抗剪强度由表层31.3 kPa降低到底部24.8 kPa,加固效果较好。双侧排水条件下,表层土体抗剪强度均大于40 kPa。相同深度土体抗剪强度在真空-电渗联合作用时最高,表层土体抗剪强度最大达到43.3 kPa。电极反转存在时,试验T6土体抗剪强度沿深度差异较大,土体中部仅达到10 kPa。

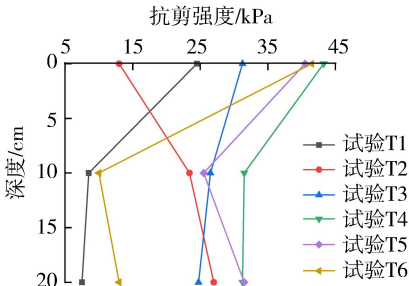


图7 抗剪强度随深度变化

2.5 液性指数、承载力与压缩系数分布

采用PS-MPT-A型便携式微型贯入仪测定试验后土体的液性指数、承载力及压缩系数,结果如表3所示。

表3 试验后土体液性指数、承载力及压缩系数

试验编号	P_L /kPa	I_L	R_{pl} /kPa	α_{1-2} /MPa ⁻¹
T3	220	0.81	139	0.31
T4	670	0.51	192	0.15
T5	290	0.73	153	0.26
T6	450	0.61	170	0.20

从表3可以看出,试验T3表层土体的液性指数满足 $0.75 < I_L \leq 1$,土体处于软塑状态;试验T4~T6表层土体的液性指数满足 $0.25 < I_L \leq 0.75$,土体处于可塑状态。试验T4结束后土体承载力最高,达到192 kPa,加固效果最好;4组试验结束后的土体压缩系数均处于 $0.1 \text{ MPa}^{-1} \leq \alpha_{1-2} < 0.5 \text{ MPa}^{-1}$,土体属于中压缩性土。

2.6 土体性状及电极腐蚀

试验结束后,观察土体表面及电极,发现试验T3结束后土体表层在阳极细管附近出现裂缝(图8(a)),增大了界面电阻。当阳极细管开孔且施加真空负压时,试验T4结束后土体表面平整,未出现明显裂缝(图8(b)),说明阳极区受到真空负压作用,可以有效避免阳极附近土体裂缝的产生。

图9为试验后阳极腐蚀状况图,可见试验T1、T3、T4后阳极管上有不同程度的腐蚀。这3组试验



(a) 试验T3

(b) 试验T4

图8 试验后土样表面裂缝



(a) 试验T1

(b) 试验T3

(c) 试验T4

图9 试验后阳极腐蚀状况

腐蚀程度逐渐减小,并且阳极附近土样的颜色呈红褐色,这是因为阳极发生了氧化和水解反应,不锈钢电极产生的 Fe^{3+} 渗入阳极附近的土体而呈现红褐色,产生的 Fe^{3+} 可以与 OH^- 结合形成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体,使土体变得密实。

3 结 论

a. 设计的电渗电极可以达到高含水率吹填土快速结壳的目的。单纯电渗处理后土层抗剪强度沿深度衰减,电渗-真空联合作用下土层抗剪强度更高且分布均匀。

b. 阴阳极双侧排水条件下,电渗-真空联合作用试验加固效果最好,但排水量及抗剪强度等参数指标较阴极单侧排水提高幅度不大。

c. 电极反转有利于降低电渗能耗,但排水效果差,土体加固效果不如常规真空-电渗联合作用试验均匀。

参考文献:

[1] 闫澍旺,郭炳川,李伟,等.硬壳层在吹填土真空预压中的应用[J].岩石力学与工程学报,2013,32(7):1497-1503. (YAN Shuwang, GUO Bingchuan, LI Wei, et al. Application of crust layer to vacuum preloading dredge fill [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(7): 1497-1503. (in Chinese))

[2] 董志良,张功新,周琦,等.天津滨海新区吹填造陆浅层超软土加固技术研发及应用[J].岩石力学与工程学报,2011,30(5):1073-1080. (DONG Zhiliang, ZHANG Gongxin, ZHOU Qi, et al. Research and application of improvement technology of shallow ultra-soft soil formed by hydraulic reclamation in Tianjin Binhai new area[J].

Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(5): 1073-1080. (in Chinese))

[3] 曹永华,李卫,刘天韵.浅层超软土地基真空预压加固技术[J].岩土工程学报,2011,33(增刊1):241-245. (CAO Yonghua, LI Wei, LIU Tianyun. Surface-layer improvement technology for ultra soft soil by vacuum preloading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(Sup1): 241-245. (in Chinese))

[4] 付冠杰,范明桥,李杰,等.软土地基堆载吹填淤泥并同步真空预压加固技术[J].水利水电科技进展,2014,34(6):82-88. (FU Guanjie, FAN Mingqiao, LI Jie, et al. A synchronous vacuum preloading technique for treating soft ground and its overlying hydraulic surcharge fills [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(6): 82-88. (in Chinese))

[5] 李瑛,龚晓南,焦丹,等.黏土二维电渗固结性状的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(增刊2):4034-4039. (LING Ying, GONG Xiaonan, JIAO Dan, et al. Experimental study on two-dimensional electro-osmotic consolidation of soft clay [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Sup2): 4034-4039. (in Chinese))

[6] 李瑛,龚晓南.等电势梯度下电极间距对电渗影响的试验研究[J].岩土力学,2012,33(1):89-95. (LI Ying, GONG Xiaonan. Experimental research on effect of electrode spacing on electro-osmotic dewatering under same voltage gradient [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1): 89-95. (in Chinese))

[7] WAN T Y, MITCHELL J K. Electro-osmotic consolidation of soils [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1976, 102(5): 473-491.

[8] 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 Xiaogui, 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))

[9] 冯清鹏,卜凡波,彭义,等.电极处加入 CaCl_2 溶液对高岭土电渗试验的影响[J].长江科学院院报,2017,34(8):90-95. (FENG Qingpeng, BU Fanbo, PENG Yi, et al. Influences of CaCl_2 solution added to electrodes on the electro-osmotic test of kaolin clay [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(8): 90-95. (in Chinese))

[10] 王柳江,刘斯宏,汪俊波,等.真空预压联合电渗法处理高含水率软土模型试验[J].河海大学学报(自然科学版),2011,39(6):671-675. (WANG Liujiang, LIU Sihong, WANG Junbo, et al. Model test for high-water-content soft soil treatment under vacuum preloading in combination with electroosmosis [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011, 39(6): 671-675. (in Chinese))

(下转第82页)