

DOI: 10.11779/CJGE202212022

新型导电塑料排水板及其双层水平布置电渗排水效果

王俊杰^{1, 2}, 陈祥彬^{*2, 3}, 杨 洋⁴, 邱珍锋²

(1. 重庆交通大学材料科学与工程学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074; 3. 荣昌区住房与城乡建设委员会, 重庆 402461; 4. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310014)

摘 要: 针对当前电渗排水法存在阳极腐蚀严重, 排水设备安装繁琐等问题, 提出了一种新型导电塑料排水板。新型导电塑料排水板可以快速装配形成单层或多层水平电渗排水系统, 省时省力的同时还解决了电渗过程中的电极腐蚀问题和电渗后期电极与淤泥的脱开问题。以安徽阜阳市骆家沟清淤工程所产生的高含水率疏浚淤泥为研究对象, 采用导电塑料排水板进行双层水平电渗脱水模型试验。试验结果表明: 该导电塑料排水板的电渗排水性能优良, 且双层布置能获得更好的电渗效果。

关键词: 导电塑料排水板; 疏浚淤泥; 电渗排水; 模型试验

中图分类号: TU411 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2022)12-2335-06

作者简介: 王俊杰(1973—), 男, 博士, 教授, 主要从事地质工程、岩土工程方面的研究工作。E-mail: wangjunjie@cqjtu.edu.cn。

New conductive plastic drainage board and its electro-osmosis drainage effect under double-layer horizontal layout

WAN Jun-jie^{1, 2}, CHEN Xiang-bin^{*2, 3}, YANG Yang⁴, QIU Zhen-feng²

(1. School of Materials Science and Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. Committee of Housing and Urban-Rural Development of Rongchang District, Chongqing 402461, China; 4. Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In view of the serious anodic corrosion and cumbersome installation of drainage equipment in the current electro-osmotic drainage method, a new type of conductive plastic drainage plate is proposed. The drainage plate can be quickly assembled into a horizontal electroosmotic drainage system, which saves time and solves the problems of electrode corrosion in the electro-osmotic process and the separation of electrode and sludge in the late electro-osmotic process. Taking the high-moisture content dredged sludge produced by Luojiagou dredging project in Fuyang City of Anhui Province as the research object, the double-layer horizontal electro-osmosis dewatering model tests are carried out by using the conductive plastic drainage plate. The test results show that the electro-osmotic drainage performance of the conductive plastic drainage plate is excellent, and the double-layer arrangement can obtain better electro-osmotic effect.

Key words: conductive plastic drainage board; dredging sludge; drainage by electro-osmosis; model test

0 引 言

电渗脱水法是一种非常有效的降低土体含水率的方法, 诸多学者通过工程实例和室内试验证实了电渗脱水法的有效性和可靠性。目前, 电渗排水法常使用的金属电极在电渗时存在阳极腐蚀、能耗偏大等缺陷, 这严重制约了电渗脱水法的推广^[1-2]。因此, 研究电极材料和电极形式具有重要意义。

Mohamedelhassan 等^[3]通过室内模型试验研究了 6 种不同材料的电极在电渗土体时, 电极与土体之间的接触电阻大小, 试验表明金属材料的接触电阻小于

石墨电极。陶燕丽等^[4]通过室内模型试验研究了铁和铜电极的电渗脱水效果, 试验结果表明铜电极在电渗一段时间后阳极出现电化学钝化现象, 电渗效果低于铁电极。针对金属电极的缺点, 人们提出用电动土工合成材料(EKG)电极来代替金属电极, 而 EKG 电极最常见的形式就是导电塑料排水板(简称 EVD)。

2011 年, Kaniraj 等^[5]使用 EVD 对含有较多有机

基金项目: 重庆市教委科学技术研究重点项目(JDDSTD2018008)

收稿日期: 2021-05-08

*通信作者(E-mail: 1041460283@qq.com)

质的粉质黏土进行电渗脱水试验, 结果表明电渗处理后的粉质黏土含水率降低幅度较大, 且含水率的降低幅度与电势梯度正相关。2017 年, 孙召花等^[6]使用 EVD 和常见的金属电极进行室内水平电渗脱水试验, 通电方式为稳压持续通电, 试验结果表明: 在电渗前期, 金属电极的电渗电流高于 EVD 的电渗电流, 但随着电渗的进行, 金属电极发生氧化其导电能力逐渐降低, 而 EVD 的导电能力变化不大。2019 年, 蒋楚生等^[7]使用真空联合电渗脱水法对高速公路的软弱地基进行脱水处理, 电渗时使用的电极为 EVD, 结果表明软基在脱水处理后抗剪强度和抗压强度得到显著提升。2020 年, 易富等^[8]使用 EKG 电极对非饱和细粒尾矿砂进行电渗脱水处理, 试验结果表明: 采用 EKG 电极对细粒尾矿砂进行电渗脱水处理 180 h 后, 尾矿砂的平均含水率降低了 45%。大多数研究者都将电极竖向插入淤泥来研究疏浚淤泥的电渗脱水法, 主要原因是: 这种电极布置方式与工程实践的电极布置方式类似, 电极布设简便且脱水效果较好。但电极竖直安放存在下列问题: 电渗脱水过程中, 淤泥会发生较大的失水收缩。若是使用圆棒状的金属电极, 淤泥会因失水收缩而与电极脱开阻碍电渗脱水的进行。若是使用 EVD 作为电渗电极, 淤泥会因失水收缩而引起 EVD 板材弯曲使排水通道面积收缩, EVD 的排水效率也随之降低。此外电极的布置需要淤泥表面具有一定强度才能进场施工。

针对竖向电渗脱水法存在的问题, Chiba 等^[9]提出了水平电渗脱水法, 他们提出对疏浚淤泥进行电渗排水时可以将塑料排水板水平放置以避免塑料排水板弯折。王宁伟等^[10]通过室内模型试验, 研究使用水平电渗脱水法处理高含水率黏土时不同电极距对电渗脱水的影响。试验结果表明: 电极距越小, 电渗排水速率越大, 电极与淤泥之间的界面电阻也越小。Shinsha 等^[11]使用 EVD 进行水平电渗排水的现场试验, 试验结果表明: EVD 水平布置可保证淤泥的泵入与排水同时进行, 有效增加了淤泥堆场的处理量。王加勇等^[12]通过室内模型试验对比研究了水平电渗与竖向电渗的排水效果, 试验结果表明: 水平电渗的排水效果比传统竖向电渗高 38%。王柳江等^[13]通过室内模型试验研究了真空预压联合 EVD 水平电渗对软黏土进行脱水的效果, 试验结果表明 EVD 水平布置的脱水效率高于竖直布置。Zhang 等^[14]使用 EVD 进行了面积 800 m² 的电渗固结现场试验, 现场试验表明, EVD 大规模应用是可行的, 其功率要求和能耗均可接受。电渗可以加速固结, 达到较好的固结效果。黄学昕等^[15]仿照 EVD 的形式设计了一种再生纤维电动土工织物对污

染土体进行了电渗排水处理, 试验结果表明电动土工织物导电稳定性、经济性和抗腐蚀性优于传统不锈钢电极。

基于以上研究现状, 本文提出一种新型导电塑料排水板。采用安徽阜阳市骆家沟清淤工程所产生的高含水率疏浚淤泥, 对新型导电塑料排水板进行双层水平电渗脱水模型试验。通过监测淤泥内部的电流、电渗脱水速率、能耗系数、淤泥含水率等参数研究电渗脱水效果。为该种导电塑料排水板在疏浚淤泥电渗脱水中的应用提供一定参考。

1 新型导电塑料排水板设计

图 1 为装配式淤泥电渗脱水系统的示意图, 新型导电塑料排水板的结构剖面图如图 2 所示, 排水板接口如图 3 所示, 装配式好的导电塑料排水板示意图和实物图见图 4, 5。

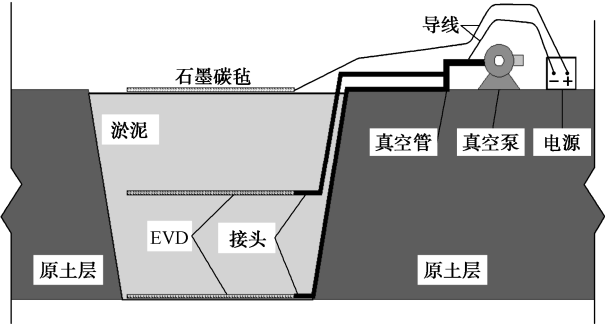


图 1 装配式淤泥电渗脱水系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of assembled electro-osmotic dewatering system for sludge

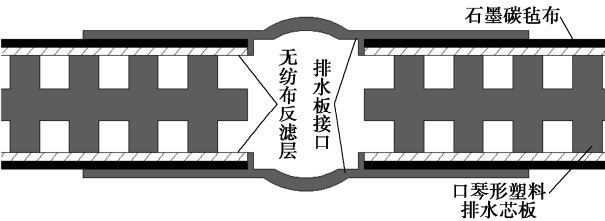


图 2 导电塑料排水板剖面图

Fig. 2 Profile of conductive plastic drainage board

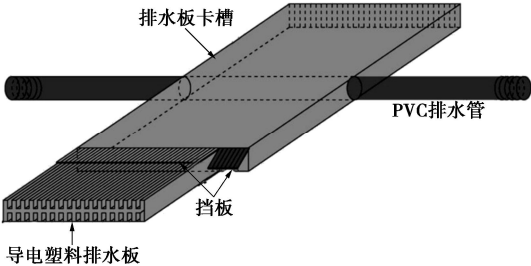


图 3 导电塑料排水板接口示意图

Fig. 3 Interface diagram of conductive plastic drainage board

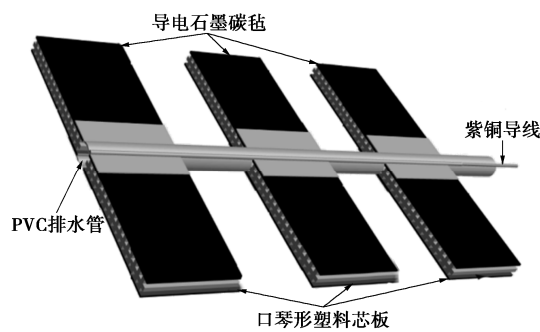


图 4 组装好的导电塑料排水板示意图

Fig. 4 Schematic diagram of assembled conductive plastic drainage board



图 5 组装好的导电塑料排水板实物图

Fig. 5 Photo of conductive plastic drainage board assembled

采用石墨碳毡作为电极材料可以有效地避免电极腐蚀的情况，电极形态采用排水板可以增加电极与淤泥的接触面积，有效避免电渗后期电极与淤泥的脱开问题。导电塑料排水板可以水平布置，避免电渗后期淤泥收缩导致排水板弯折影响排水效果。排水装置本身比较轻薄可以浮在淤泥表面，可在竖直方向自由活动保证水平导电塑料排水板可以随淤泥收缩而向下移动，缩短了排水路径。

疏浚淤泥脱水装置水平布置在淤泥内部，对导电塑料排水板的一端进行密封，另一端通过接头与排水管道和导线进行连接。每层导电塑料排水板的排水管都是单独设置的，保证导电塑料排水板在淤泥失水收缩时可以随淤泥的变形向下移动，不受排水管的约束。电渗排水时，先将淤泥表面上的石墨碳毡和中层的导电塑料排水板分别与直流电源的正极和负极连接。电渗一段时间后，将中层的导电塑料排水板和底层的导电塑料排水板分别与直流电源的正极和负极连接。

2 试验用土及试验方案

2.1 试验用土

室内模型试验的土体采用阜阳市骆家沟清淤工

程中骆家沟河段的疏浚淤泥，通过液塑限联合测定仪测得该河段疏浚淤泥的相对质量密度 $G_s=2.72$ ，液限 $w_L=36.1\%$ ，塑限 $w_p=20.8\%$ ，颗粒级配如表 1 所示。

表 1 水力冲挖淤泥颗粒级配

Table 1 Particle gradation of hydraulic scouring silt				
河道	颗粒成分组成/%			
	0.25~0.075	0.075~0.05	0.05~0.005	<0.005
骆家沟	1.7	15	58.5	24.8

2.2 试验方案

为了探究导电塑料排水板在面对厚度较大的淤泥时，需要多层水平布置导电塑料排水板的电渗效果，在试验槽中布置两层导电塑料排水板进行电渗试验。电渗过程中监测电渗电流、电渗排水速率和累积排水量并测量电渗结束后的淤泥含水率。双层导电塑料排水板具体布置情况见图 6，电渗结束后的含水率取样点分布见图 7。

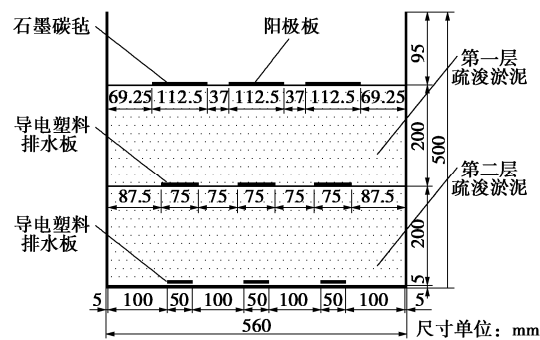


图 6 试验装置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of assembled sludge electroosmotic dewatering system

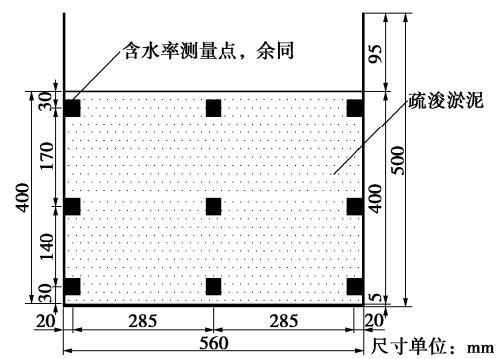


图 7 含水率测量点分布图

Fig. 7 Distribution of measuring points for moisture content

试验时采用逐级通电的方式进行电渗排水试验，先将第一层淤泥中的导电塑料排水板和阳极板分别与直流电源的负极和正极连接，保持直流电源的输出电压为 18 V 不变，持续电渗 15 h 后将直流电源的正极和负极分别与第二层淤泥的上侧和下侧的导电塑料排水板进行连接，保持直流电源的输出电压为 18 V 不变持续电渗 15 h。

3 试验结果

3.1 淤泥裂缝分析

电渗脱水后的裂缝分布呈现一定的规律性(图8),即在3个阳极板的间隔中间出现宽大的 y 轴方向的贯穿性裂缝, x 轴方向的裂缝以阳极板下的淤泥为中心向阳极板两侧扩展。淤泥裂缝呈现上述分布规律的原因:阳极板覆盖下的淤泥内部的电场强度较大,该区域淤泥中的水分受到的电场力较阳极板间隔区域的大,渗流速度也更快。这导致阳极板下的淤泥收缩速度大于阳极板间隔区域的淤泥收缩速度,淤泥收缩速度不一致产生张拉裂。

双层导电塑料板试验组淤泥表面 x 轴方向的裂缝数量(图8(b))明显高于单层导电塑料排水板试验组的淤泥表面裂缝数量(图8(a))。产生这种现象的原因如下:由于双层导电塑料排水板试验组的第一层淤泥的阳极宽度比单层导电塑料试验组的阳极宽度更大,前者的电场分布更为均匀。双层导电塑料排水板试验组的电渗排水总量更高导致淤泥表面含水率低于使用单层导电塑料排水板试验组的淤泥表面含水率。

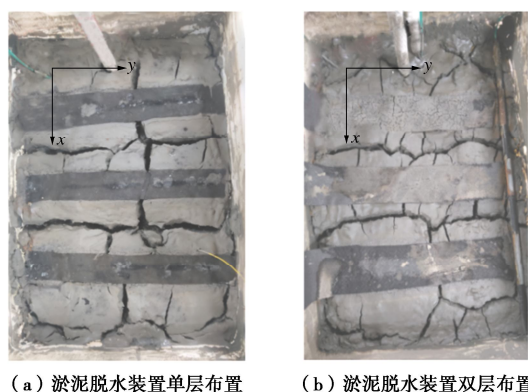


图8 疏浚淤泥表面裂缝开展情况

Fig. 8 Development of surface cracks in dredged sludge

3.2 电渗电流分析

从图9可以看出,使用双层导电塑料排水板试验组在电渗第一层淤泥时(0~15 h),刚开始的电渗电流远高于单层导电塑料排水板试验组,这是因为试验组第一层的电极板宽度略高于单层导电塑料排水板试验组。随着电渗的进行,两个试验组的电渗电流不断降低,但双层导电塑料排水板试验组的电渗电流降低速度明显高于单层导电塑料排水板试验组,这说明该组的排水速率更高导致其电阻增加速度更快。使用双层导电塑料排水板电渗第二层淤泥时(15~30 h)时,刚开始的电渗电流出现较大的跃升,随着电渗的进行电渗电流不断减小。在电渗后期双层导电塑料排水板试验组的电渗电流略低于单层导电塑料排水板试验

组。

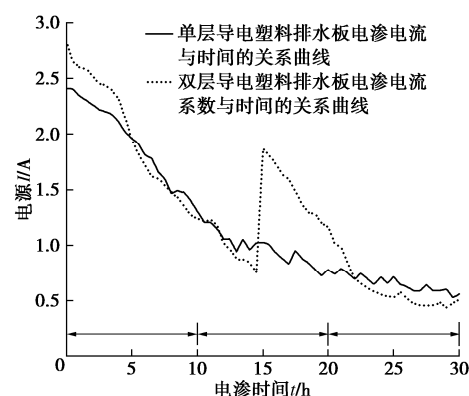


图9 电渗电流随时间变化曲线

Fig. 9 Curves of electro-osmotic current versus time

电渗时,无论是单层还是双层导电塑料排水板试验组都使用恒压18 V的直流电源输出,双层导电塑料排水板试验组的电极间距更短,电势梯度更高,淤泥中的水分在电渗作用下的流失速度更快。这导致双层导电塑料排水板试验组的淤泥电阻上升速度快于单层导电塑料排水板试验组,双层导电塑料排水板试验组的电渗电流随电渗时间增加而下降的速度也就会高于使用单层导电塑料排水板试验组。在15 h时,双层导电塑料排水板试验组的电渗对象由第一层淤泥转换为第二层淤泥,第二层淤泥的含水率较高,电阻较小,电渗电流在15 h处也就出现了跃升。

3.3 电渗排水速率与累积排水量分析

将双层导电塑料排水板试验组和单层导电塑料排水板试验组的累积排水量随电渗时间的变化曲线绘制在图10中。

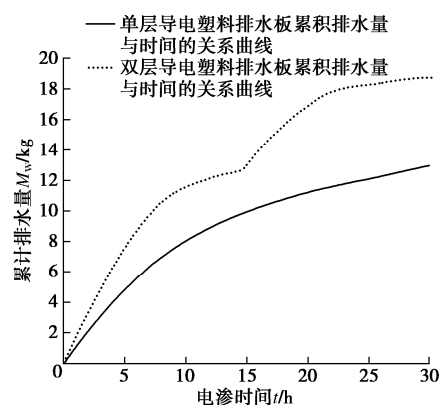


图10 累积排水量随时间变化曲线

Fig. 10 Variation curves of cumulative drainage with time

从图10中可以看出,单层导电塑料排水板试验组的最终排水量为12.96 kg,而单层导电塑料排水板试验组的最终排水量为18.77 kg,是双层导电塑料排水板试验组的69%。在脱水速率方面,双层导电塑料排水板试验组在刚开始时约为单层导电塑料排水板试验

组的 1.5 倍, 随着电渗的进行其排水速率不断降低, 在 22~30 h 这一时间段更是降低到低于单层导电塑料排水板试验组。两个试验的电渗排水速率随时间的变化与 3.2 节中电渗电流变化趋势高度一致。这说明电渗排水速率与电渗电流正相关。

3.4 淤泥含水率分析

淤泥在经过单层导电塑料排水板和双层导电塑料排水板电渗后的平均含水率降低值如图 11 所示。

从图 11 中可以看出淤泥的不同深度处, 双层导电塑料排水板的排水效果都要优于单层导电塑料排水板。同时还发现土体的含水率下降值随土体深度增加而减小, 这是由于电渗时土体水分由土体顶部的阳极流向土体底部的阴极, 水分在阴极汇集后被真空泵抽走。土体底部因为水分汇集, 最终含水率下降值较低, 土体顶部与阳极接触水分流失速度最快导致最终含水率下降值较高。

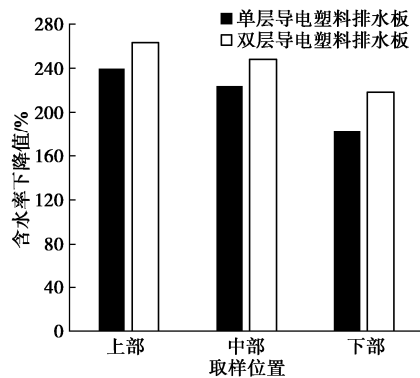


图 11 含水率下降值柱状图

Fig. 11 Cylindrical chart of decline of moisture content

3.5 能耗系数分析

从图 12 可以看出, 使用双层导电塑料排水板试验组在电渗第一层淤泥时 (0~15 h), 前期 (0~5 h) 的能耗系数仅为单层导电塑料排水板试验组的一半, 但中后期 (5~15 h) 的能耗系数迅速上升并超过单层导电塑料排水板试验组。在双层导电塑料排水板试验组电渗第二层淤泥时 (15~30 h), 电渗能耗系数在 15 h 处出现断崖式下降, 这是因为在 15 h 时, 电渗的淤泥由第一层转换为第二层, 第二层淤泥的含水率和导电系数远高于第一层。在电渗第二层淤泥时, 能耗系数也在不断上升并在 24 h 之后超过单层导电塑料排水板试验组。

将双层导电塑料排水板和单层导电塑料排水板的能耗系数对电渗时间 t 积分后除以整个电渗时间 30 h 得到平均能耗系数。双层导电塑料排水板试验组的平均能耗系数为 117.96 W·h/L, 单层导电塑料排水板试验组的平均能耗系数为 111.08 W·h/L。导电塑料排水板单层布置时的平均能耗系数比双层布置时的能耗

系数低 5.83%。这可能是因为双层导电塑料排水板试验组在电渗后期, 淤泥含水率降低, 裂缝增多导致电阻升高幅度较大引起电渗能耗的快速上升。

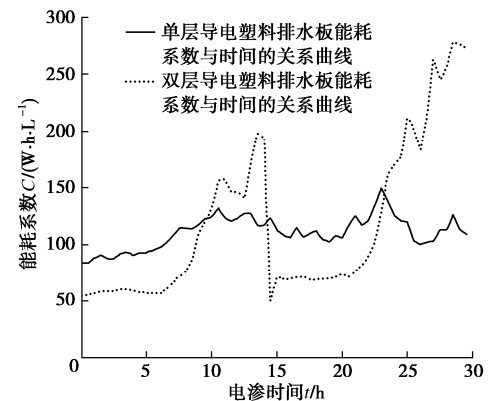


图 12 能耗系数随时间变化曲线

Fig. 12 Variation curves of energy consumption coefficient with time

4 结 论

本文提出了一种可用于疏浚淤泥电渗排水的新型导电塑料排水板, 并通过室内模型试验, 研究了导电塑料排水板在单双层布置下的电渗排水效果, 得到 3 点结论。

(1) 室内模型试验结果显示, 使用石墨毡作为电极材料起到了良好的抗腐蚀效果, 电渗结束后的阳极板表面完整没有出现明显腐蚀现象, 电渗后的淤泥含水量也显著降低。新型导电塑料排水板在室内试验中显示出良好的安装便捷性、抗腐蚀性和良好的排水性能, 具有良好的应用前景。

(2) 室内模型试验结果表明: 新型导电塑料排水板双层布置时可在能耗仅提高 5.83% 的情况下将排水效果提升 1.45 倍。这说明新型导电塑料排水板多层布置时的性能优良, 可以很好的满足电渗深厚土层需要多层布置排水结构的需要。

(3) 受条件所限, 本文所提出的新型导电塑料排水板仅进行了小规模室内模型试验。小尺度的模型试验结果并不能完美反映导电塑料排水板在工程实际中的电渗排水效果, 在实际工程中的应用效果还需要大范围的现场试验进行验证。

参考文献:

- [1] 吴松华. 不同形式电渗加固吹填淤泥现场试验研究[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(5): 108 - 112. (WU Song-hua. Field test study on different forms of electroosmosis reinforcement of dredger-fill silt[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(5): 108 - 112. (in

- Chinese))
- [2] 周亚东, 付继宇, 邓 安, 等. 真空预压-电渗联合作用下软黏土非线性大变形固结模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(8): 1677 - 1685. (ZHOU Ya-dong, FU Ji-yu, DENG An, et al. A nonlinear consolidation model of soft clay under the combination of electroosmosis and vacuum preloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(8): 1677 - 1685. (in Chinese))
- [3] MOHAMEDHASSAN E, SHANG J Q. Effects of electrode materials and current intermittence in electro-osmosis[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Ground Improvement, 2001, **5**(1): 3 - 11.
- [4] 陶燕丽, 周 建, 龚晓南, 等. 铁和铜电极对电渗效果影响的对比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(2): 388 - 394. (TAO Yan-li, ZHOU Jian, GONG Xiao-nan, et al. Comparative experiment on influence of ferrum and cuprum electrodes on electroosmotic effects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(2): 388 - 394. (in Chinese))
- [5] KANIRAJ S R, HUONG H L, YEE J H S. Electro-osmotic consolidation studies on peat and clayey silt using electric vertical drain[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2011, **29**(3): 277 - 295.
- [6] 孙召花, 高明军, 吴 坤, 等. 导电塑料排水板与金属电极电渗对比试验[J]. 科学技术与工程, 2017, **17**(20): 219 - 222. (SUN Zhao-hua, GAO Ming-jun, WU Kun, et al. Comparative experiment of electro-osmosis of electric vertical drain and metal electrode[J]. Science Technology and Engineering, 2017, **17**(20): 219 - 222. (in Chinese))
- [7] 蒋楚生, 司文明, 曾 惜, 等. 电渗联合真空预压技术处理高速铁路软土地基[J]. 铁道工程学报, 2019, **36**(6): 28 - 32, 96. (JIANG Chu-sheng, SI Wen-ming, ZENG Xi, et al. Research on the treatment of soft soil foundation of a high speed railway by electric-osmosis combined with vacuum preloading technology[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, **36**(6): 28 - 32, 96. (in Chinese))
- [8] 易 富, 余忠银, 杜常博. EKG 用于排水加固细粒尾矿的试验研究[J]. 实验力学, 2020, **35**(4): 712 - 718. (YI Fu, YU Zhong-yin, DU Chang-bo. Experimental study on EKG for drainage and reinforcement of fine tailings[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, **35**(4): 712 - 718. (in Chinese))
- [9] CHIBA T, SHINSHA H, TANI Y. Development of A Vacuum Consolidation Method Employing Horizontal Drains[R]. Tokyo: Japan Dredging and Reclamation Engineering Association, 1992.
- [10] 王宁伟, 韩 旭, 张 雷. 室内水平电渗排水试验研究[J]. 岩土工程技术, 2014, **28**(5): 261 - 264. (WANG Ning-wei, HAN Xu, ZHANG Lei. Experimental study of electro-osmotic test[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2014, **28**(5): 261 - 264. (in Chinese))
- [11] SHINSHA H, KUMAGAI T. Bulk compression of dredged soils by vacuum consolidation method using horizontal drains[J]. Geotechnical Engineering, 2014, **45**(3): 78 - 85.
- [12] 王加勇, 陈 庚, 陈永辉, 等. 立体排水-电极联合体处理高含水率废弃土的试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2020, **37**(4): 13 - 19. (WANG Jia-yong, CHEN Geng, CHEN Yong-hui, et al. Experimental study on the treatment of waste soil with high water content by the combination of solid drainage and electrode[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2020, **37**(4): 13 - 19. (in Chinese))
- [13] 王柳江, 陈强强, 刘斯宏, 等. 水平排水板真空预压联合电渗处理软黏土模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, **39**(增刊 2): 3516 - 3525. (WANG Liu-jiang, CHEN Qiang-qiang, LIU Si-hong, et al. Model test on treatment of soft clay under combined vacuum preloading with electro-osmosis using prefabricated horizontal drain[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, **39**(S2): 3516 - 3525. (in Chinese))
- [14] ZHUANG Y F. Large scale soft ground consolidation using electrokinetic geosynthetics[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, **49**(3): 757 - 770.
- [15] 黄学昕, 郑凌透, 谢新宇. 再生纤维电动土工织物修复污染地基室内模型试验研究[J]. 低温建筑技术, 2021, **43**(7): 115 - 118. (HUANG Xue-xin, ZHENG Ling-wei, XIE Xin-yu. Laboratory model test on remediation of contaminated foundation with recycled fiber electric geotextiles[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2021, **43**(7): 115 - 118. (in Chinese))