

大尺寸三维电动-水力渗透协同固结淤泥能耗特性

郑若璇, 孙秀丽, 王 渝, 金 勋, 郁秦杰, 刘文化

Energy consumption in a large-scale 3D electro-osmosis-hydraulic synergism system for sludge consolidation

ZHENG Ruoxuan, SUN Xiuli, WANG Yu, JIN Xun, YU Qinjie, and LIU Wenhua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202112040>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

干湿循环作用下污泥固化土三维力学特性研究

Research on 3D mechanical properties of sludge solidified soil under the action of drying and wetting cycles

徐健, 赵绪, 马锐敏, 杨爱武, 杨少坤 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 110-118

高岭土电渗固结特性及数值模拟研究

A study of the kaolin electro-osmotic consolidation characteristics and their numerical simulation

沈美兰, 周太全, 李吴刚 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 78-85

加热对软土地基真空预压排水固结的影响研究

王天园, 邓岳保, 毛伟, 刘铨

水文地质工程地质. 2020, 47(1): 62-68

超载预压处理软土的次固结特征及沉降计算

Secondary consolidation characteristics and settlement calculation of soft soil treated by overload preloading

陈立国, 吴昊天, 陈晓斌, 贺建清 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 138-145

基于地面三维激光扫描的三峡库区危岩体监测

Monitoring of dangerous rock mass in the Three Gorges Reservoir area based on the terrestrial laser scanning method

褚宏亮, 邢顾莲, 李昆仲, 王国利, 段奇三 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 124-132

基于FEFLOW的三维土壤-地下水耦合铬污染数值模拟研究

Numerical simulation of three-dimensional soil-groundwater coupled chromium contamination based on FEFLOW

刘玲, 陈坚, 牛浩博, 李璐, 殷乐宜, 魏亚强 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 164-174



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202112040

郑若璇, 孙秀丽, 王渝, 等. 大尺寸三维电动-水力渗透协同固结淤泥能耗特性 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(1): 69-77.

ZHENG Ruoxuan, SUN Xiuli, WANG Yu, *et al.* Energy consumption in a large- scale 3D electro-osmosis-hydraulic synergism system for sludge consolidation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(1): 69-77.

大尺寸三维电动-水力渗透协同固结淤泥能耗特性

郑若璇, 孙秀丽, 王 渝, 金 勋, 郁秦杰, 刘文化

(江南大学环境与土木工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 为解决目前电渗应用的高能耗困境及大尺寸模拟困难等问题, 提出针对低渗透性、高含水率土体的电动-水力渗流协同作用的三维固结方法。自行研制了一套阴极-集水-排水协同作用的多功能集排水系统, 采用间歇式抽水代替连续抽水。采用三维电动-水力渗流固结系统对取自贡湖湾湿地和白鹿堆场的 2 种不同太湖底泥进行了电渗试验研究, 同时对白鹿堆场太湖底泥进行了传统一维电渗固结试验, 并对 2 种试验条件下的单位体积排水能耗和单位体积单位排水量能耗等关键指标进行了对比。结果表明: 三维集水井设计可大大降低土体阴极附近电阻, 间断性提高系统电流, 提高排水效率, 降低电渗总能耗; 间歇式抽水可间歇性降低系统内总电流, 利用电动-水力协同作用, 保持系统渗流的连续性; 三维电动-水力渗流固结系统的电流呈周期性减小一增大模式, 并且降低速率较慢, 尤其对于有机质含量较高的土体, 电渗过程电流始终保持在一个较高的水平, 提高了排水固结效率。三维电动-水力渗流固结系统的单位体积排水能耗和单位体积单位排水量能耗分别约为一维电渗系统的 2/3 和 1/30。在高含水量软土固结排水中具有显著的节能效果。三维电动-水力渗流固结系统可以提高排水固结效率、大幅度降低能耗, 为实际工程应用提供了可靠的理论、设计依据和数据支持, 具有很好的推广价值。

关键词: 电动-水力渗透协同作用; 间歇式抽水; 三维固结; 大尺寸电渗试验; 能耗; 软土地基

中图分类号: P642.11; TU411

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)01-0069-09

Energy consumption in a large- scale 3D electro-osmosis-hydraulic synergism system for sludge consolidation

ZHENG Ruoxuan, SUN Xiuli, WANG Yu, JIN Xun, YU Qinjie, LIU Wenhua

(School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: The 3D electro-osmosis-hydraulic synergistic consolidation method is proposed based on the theory of electroosmosis and consolidation to solve the problem of the high energy consumption and large-scale simulation of practice conditions for low permeability and high-water content soils. A set of multi-functional catchment drainage systems combining the synergistic action of the cathode-catchment-intermittent pumping mode is developed. Consolidation of two types of Taihu lake sediments from the Gonghuwan wetland and Baimao Storage site are investigated using this system. Two key indicators of energy consumption per unit volume and displacement per unit volume of the 3D electro-osmosis-hydraulic synergistic consolidation system and the traditional 1D electroosmosis system are analyzed to illustrate the advantage of the 3D system. The results show

收稿日期: 2021-12-20; 修订日期: 2022-01-04

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(51609102; 51709129)

第一作者: 郑若璇(1997-), 女, 硕士研究生, 主要从事电渗固结软土研究。E-mail: 479961260@qq.com

通讯作者: 孙秀丽(1976-), 女, 博士, 副教授, 主要研究环境岩土工程与科研教学工作。E-mail: sunxiuli@jiangnan.edu.cn

that the design of water collecting well can greatly reduce the resistance near the soil cathode, intermittently improve the system current, improve the drainage efficiency and reduce the energy consumption. Intermittent pumping can intermittently reduce the system current, and maintain the continuity of system seepage by using the electric and hydraulic synergistic effect. A decrease-increase periodic decrease mode of the current for the 3D electrohydraulic seepage consolidation system is observed. The decrease rate of the current is slower than that of the 1D electro-osmotic system, especially for the soil with high organic matter content, the current in the electroosmotic process is maintained at a relatively higher level, which improves the drainage consolidation efficiency. The energy consumption per unit volume and displacement per unit volume of the 3D electro-hydraulic seepage consolidation system are about 2/3 and 1/30 that of the 1D electro-osmotic system, respectively. The 3D electro-hydraulic seepage consolidation system has remarkable energy saving effect in consolidation and drainage of soft soil with high water content. The 3D electroosmosis-hydraulic consolidation system can greatly improve the drainage consolidation efficiency, greatly reduce energy consumption and better guide the application of the proposed method to the electro-osmotic consolidation of high-water content sludge and another related field.

Keywords: electroosmosis-hydraulic synergism; intermittent pumping; 3D consolidation; large size electroosmotic test; energy consumption; soft soil foundation

近二十年来,随着经济的高速发展,我国大量建筑拔地而起,尤其在我国的东南沿海及珠江三角洲地区,由于城市建设用地紧缺,填海造陆、滩涂开发、软土地基加固等引起了人们的广泛关注。大型工程建设和可持续发展要求,催生了地基处理新技术的发展,我国在复合地基技术、真空预压技术、强夯技术、岛礁填筑技术等方面已经达到国际领先水平^[1]。电渗固结法作为一种几乎不受水力渗透系数影响只受电渗透系数影响的排水固结方式,排水固结速度快、效果好且能够深入到软土深层,在处理深厚软土地基时具有很大的优势^[2]。

目前对电渗法的研究多与其他地基处理方法联合使用,如堆载预压法^[3-5]、真空预压法^[6-9]、电化学法^[10-11]等,以解决单一方法的局限性^[3-5]。但目前对于电渗固结法的研究多停留在室内研究,在实际工程中未得到广泛的应用,这主要受制于电渗固结法的高耗能及大尺寸模拟困难等问题。

为解决电渗固结法的高耗能问题,许多学者在电渗固结法理论上^[12-14]提出改善电渗固结技术的方法,主要集中在电极材料、电极布置方式、通电方式等方面的改变。选择不同的电极材料如铁、铜、不锈钢等金属材料 and 石墨电极、钛电极等惰性电极材料,均在电渗过程中有着不同的效果,在电渗过程中选择与试验条件合适的电极材料尤为重要^[15-17];除金属电极外,电动土工合成材料电极(EKG 电极)也得到了很多专家学者的关注,EKG 电极将电渗技术和土工

合成材料应用相结合,制成一种能够导电的土工合成材料,可以消除或减弱传统电渗法采用金属电极带来的电蚀问题,同时可以加速孔压消散,加速土体固结等^[18-20]。不同的电极布置形式如梅花形、正六边形、平行布置等对电渗效率有着不同程度的影响,选择合适的电极间距及电势梯度能够降低能耗、节约成本^[21-22]。不同的通电方式如间歇通电、逐级加载、电极反转等,具有各自不同的优势,如间歇通电的优势在于可以节约能耗,逐级加载的优势在于提高最终土体的抗剪强度和固结度,电极反转的优势在于可使电渗后的土体含水更加均匀^[23-25]。

室内小尺寸试验存在尺寸效应,致使大尺寸模拟困难^[26]。研究发现,裂缝发展的巨大差异是导致单纯电渗模型试验与现场情况差别较大的原因,适当进行堆载可消除几何边界引起的尺寸效应^[27]。也有学者进行了电渗现场试验,探究现场试验过程中的最佳施加电压,以及与真空预压联合使用时排水板的最佳排布形式^[28-29]。

为解决目前电渗固结法的高能耗及大尺寸模拟困难等问题,本研究在电渗理论和固结理论的基础上,提出针对低渗透性、高含水量土体的三维电动-水力渗透协同固结思想,自行研制了一套结合阴极、集水、排水的多功能集排水系统,排水方式采用更加节约能耗的间歇式抽水方式。三维电动-水力渗透协同固结系统可以大大降低土体含水率、大幅度降低能耗、提高电渗效率,可为实际工程提供可靠的数据支

持和设计依据。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

为验证三维电动-水力联合电渗系统的节能效果, 采用 2 种不同的太湖底泥进行试验。太湖底泥的采集地点及物理性质见表 1。试验前去除土体内杂质, 烘干、碾碎、过 2 mm 筛, 配置成 55% 含水率的土样, 用于电渗试验。

表 1 试验所用土体采集地点及物理性质
Table 1 Sampling location and physical properties of soil used in the test

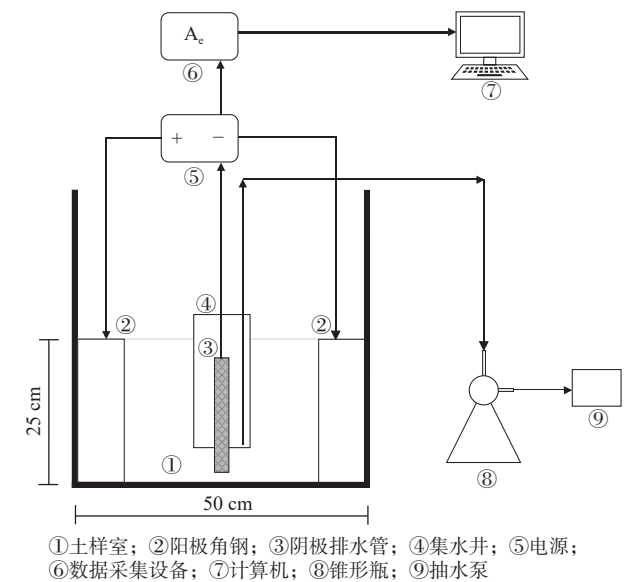
编号	采集地点	液限/%	塑限/%
1号太湖底泥	贡湖湾湿地	51.0	16.5
2号太湖底泥	太湖白旄堆场	44.0	23.0

1.2 试验装置及步骤

1.2.1 三维试验

(1) 试验装置

电动-水力渗透三维固结试验系统由电渗槽、多功能集水井、电源、数据采集装置、抽水泵等部分组成, 见图 1。



①土样室; ②阳极角钢; ③阴极排水管; ④集水井; ⑤电源;
⑥数据采集设备; ⑦计算机; ⑧锥形瓶; ⑨抽水泵

图 1 三维电动-水力渗流固结装置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of 3D electric-hydraulic seepage consolidation device

电渗槽为有机玻璃箱, 内部尺寸为 500 mm×500 mm×500 mm, 厚度为 1 cm, 顶部开口。阳极为宽度 10 cm、高度 25 cm 的角钢, 分布在四角。阴极-集水-排水装置由阴极排水管、集水井、防堵塞装置 3 部分组成。

阴极排水管采用圆柱形镀锌钛管, 外径 3.8 cm, 长 35 cm, 管内填充由土工布包裹的碎石, 防止堵塞, 并可增加抽水液面高度, 增强抽水效果; 集水井采用长玻纤增强聚丙烯薄片, 井壁上均匀分布直径 1 cm 的圆孔, 便于土中水渗流进入集水井内; 在井壁外侧包裹滤纸和废弃钢丝, 用作过滤和防堵塞装置。本试验使用抽水泵进行间歇式抽水, 即周期性关闭电源, 断电后进行抽水, 抽水结束后再继续通电进行电渗, 抽水与电渗不同时进行。

本试验电路为并联电路, 电源正极连接 4 个阳极板, 负极连接阴极管。电渗过程中排出的水分汇集于集水井, 再通过抽水泵定时抽出阴极管中的水, 抽水时间间隔为 8 h。将电流采集模块(8 路热电阻模块, 型号为 JF-8PT100-4-003)和电势采集模块(24 路全隔离直流电压采集模块, 型号为 ZH-44241-14F2)连接计算机采集系统, 采集电渗过程中的电流和电势差。

(2) 试验步骤

三维试验步骤具体如下:

- ①将阳极板安装到四角处;
- ②在装置内部四壁上涂抹凡士林, 减小边界效应对试验结果的影响;
- ③将配置好的土样分层填入装置内, 每层填入后对装置进行振捣以排出气泡, 并将土体高度控制在 25 cm, 与阳极板齐平;
- ④将集水井放置在土样中间, 尽量靠近装置底部, 同时上部高于土体, 防止土体进入集水井;
- ⑤连接电路和电流、电压等数据采集设备, 之后开始试验。

1.2.2 一维试验

(1) 试验装置

一维电渗试验装置由土样室、集水槽、电源、电流和电势采集系统、摄像头等组成, 见图 2。土样室为 20 cm×10 cm×13 cm 的有机玻璃槽; 土样室与尺寸为 3 cm×10 cm×13 cm 的集水槽相连, 并用直径为 1 cm 孔洞的有机玻璃隔板隔开。集水槽侧壁开有小孔, 用橡胶管将水引入量筒, 并采用摄像头, 实时监控排水数据。阴阳极电极板尺寸均为 10 cm×10 cm, 阳极采用镀锌钛高纯钛板, 阴极采用高纯钛网。一维试验的采集设备与三维试验相同。

(2) 试验步骤

一维试验步骤具体如下:

- ①在阴极板外侧、带有孔洞的间隔板上铺设滤纸, 阻止土颗粒进入集水槽, 随后将阴阳极板放入到

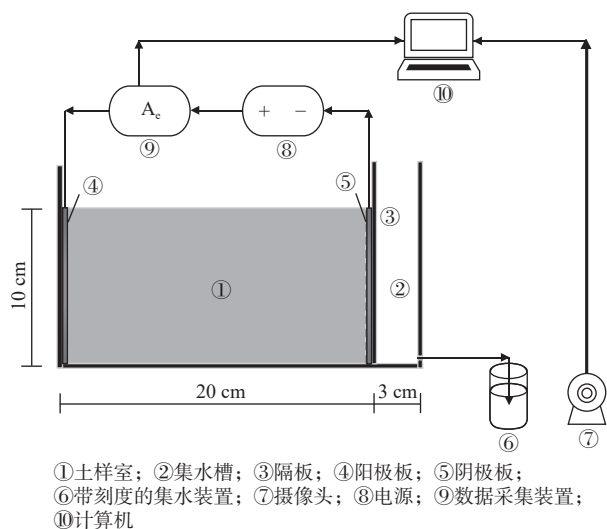


图 2 一维试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of 1D test device

装置中；

②电渗槽内涂抹凡士林，减小边界效应对试验结果的影响；

③将配置好的土样分层填入装置内，每层填入后对装置进行振捣以排出气泡，土样高度控制在 10 cm，与阴阳极板齐平；

④连接电路和电流、电压等数据采集设备，之后开始试验。

1.3 试验方案

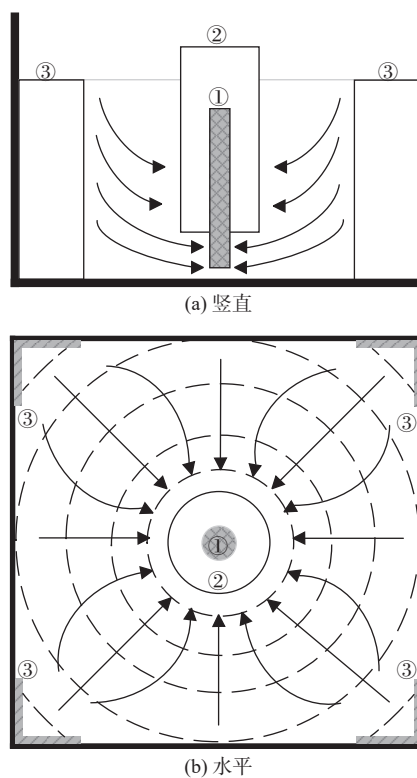
为验证三维电渗装置对不同土体的效用，使用三维电渗装置对 1 号太湖底泥和 2 号太湖底泥进行了电渗试验(S1、C1)，并设置了一维电渗试验作为对比试验(C2)，各组试验条件见表 2。

表 2 试验条件
Table 2 Test conditions

工况	试验土样	试验装置	土样尺寸	试验电压/V	初始含水率/%
S1	1号太湖底泥	三维电渗装置	50 cm×50 cm×25 cm	30	55.0
C1	2号太湖底泥	三维电渗装置	50 cm×50 cm×25 cm	30	55.0
C2	2号太湖底泥	一维电渗装置	20 cm×10 cm×10 cm	30	55.0

2 三维渗流装置原理

三维电动-水力渗流固结装置起到水力渗流及电渗流的协同作用。集水井-阴极管-间歇式抽水组合设计，在抽水后，阳极和阴极区存在水头差，实现三维水力渗流。另外，在电势差的作用下，水流在水平方向流动的同时在竖直方向产生流动，实现三维电动-水力协同渗流作用。渗流过程见图 3。



①阴极排水管；②集水井；③阳极角钢
→ 渗流方向 ——— 渗流断面

图 3 三维渗流示意图

Fig. 3 Seepage diagram of 3D electroosmosis

从理论上，电渗试验过程中的电渗流量可以通过电渗流量公式计算得出：

$$q_e = K_e i_e A \quad (1)$$

$$K_e = -\frac{\zeta \varepsilon n}{\eta} \quad (2)$$

$$i_e = \frac{\Delta V}{L} \quad (3)$$

式中： q_e ——电渗流总流量/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)；

K_e ——电渗透系数/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$)；

i_e ——电势梯度/($\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$)；

A ——渗流的面积/ m^2 ；

ζ ——zeta 电位/ mV ；

ε ——介电常数/($\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$)；

η ——黏滞系数/($\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$)；

n ——土壤孔隙率/%；

ΔV ——电势差/ V ；

L ——电流路径长度/ m 。

在土壤、温度、pH 值等初始条件一致时，三维条件下 ζ 、 ε 、 η 、 n 等参数与传统一维电渗试验相同，电渗流量只与电势梯度 i_e 和渗流面积 A 有关。三维电

渗试验,阴极管位于中间,与同尺寸传统一维电渗试验相比(图4),其渗流路径最大值为 $\sqrt{2}L/2$,为同尺寸传统一维电渗的 $\sqrt{2}$ 倍,三维电渗最大电势梯度是一维电渗电势梯度的 $\sqrt{2}$ 倍。此外,三维电渗试验的渗流断面为圆柱形,最大渗流面积为同尺寸传统一维电渗试验的 $\sqrt{2}\pi$ 倍,因此,三维最大电渗流量是一维电渗流量的 2π 倍。三维电渗试验的最大电势梯度与最大渗流面积均大于同尺寸一维电渗试验,电渗流最大渗流量大于同尺寸传统一维电渗试验。同时,阳极的并联设计使电源输出总电压不变的条件下电流值增大,进一步提高了电渗效率。

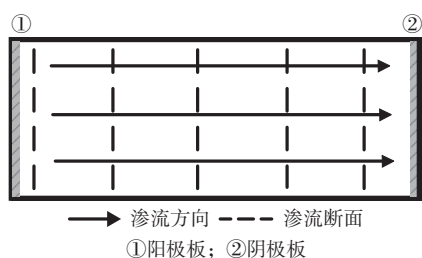


图4 传统一维渗流示意图

Fig. 4 Horizontal seepage diagram of 1D electroosmosis

3 结果与讨论

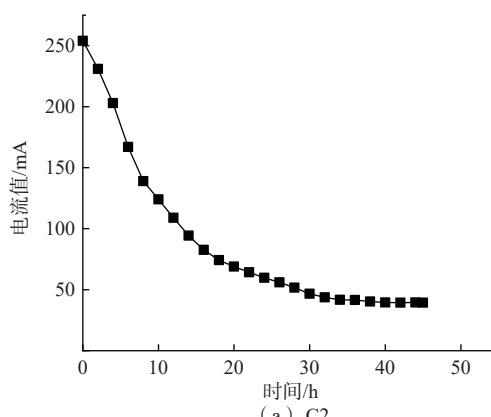
3.1 三维和一维电渗电流

一维电渗在排水终止时结束试验,试验时长45 h。三维电渗试验的体量较大、时间较长,为了便于比较,选择S1与C1排水量大致相同的节点作为试验结束的时间。试验进行至80 h时C1排水基本结束,此时S1与C1排水量基本相同,因此,在80 h终止S1试验。

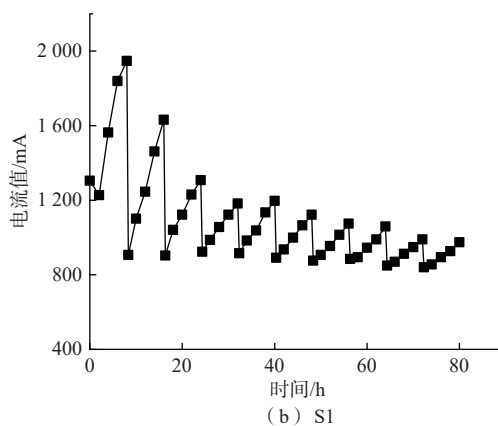
图5为C2、S1和C1试验电流随时间的关系。如图5(a)所示,一维电渗试验C2的电流值随时间逐渐减小,C2的电流最大值为254 mA,最小值为39 mA。这是因为,在试验过程中,水分子和阳离子结合形成水化阳离子,随着试验的进行,水分和水化阳离子随着电流逐渐排出,系统内总电阻值随之逐渐增大。由欧姆定律可知,输入电压保持不变的情况下,由于系统内总电阻增大,电流值减小。

如图5(b)(c)所示,S1和C1的电流在试验过程中由于间歇式抽水,表现出重复减小—增大的现象。S1电流的低值点几乎相等,维持在840 mA左右,高值点逐渐降低,最高值达到1 947 mA;而C1电流的高值点和低值点均逐渐降低,最高值为1 557 mA,最低值为513 mA。

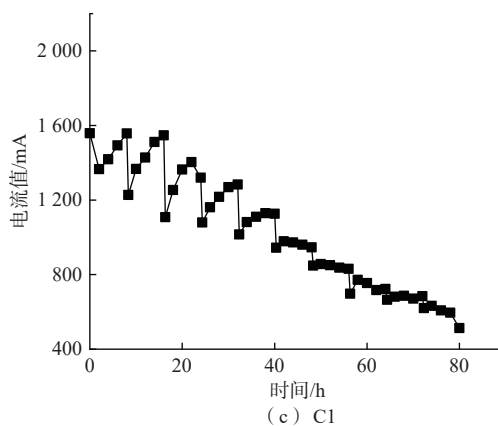
电渗开始后至第1次抽水前,S1、C1电流值均逐



(a) C2



(b) S1



(c) C1

图5 电渗过程中电流值

Fig. 5 Current values during electroosmosis

渐减小,这是由于电渗时间较短,水分和水化阳离子仅在土体内迁移,还未积聚到集水井中,系统内总电阻增大导致电流值减小;由于水是导体,电阻率极小,土体中的水分向阴极迁移并开始是集水井中积聚后,系统中的总电阻逐渐减小,电流值随之逐渐增大。每8 h抽水1次,每次抽水后电阻值增大、电流值骤减,而随着电渗的进行,水再次迁移至阴极集水井中,电流值再次逐渐增大。

每次抽水之后的电流最高值随着排水次数的增加而逐渐减小,这是由于随着土体中水分和水化阳离

子的排出,系统内总电阻逐渐增大,导致其电流值逐渐减小。由于 2 种太湖底泥取自不同地点,S1 中的有机质含量较高,有机质细胞内的水分无法排出,因此,电流最低值几乎保持不变,且电流值高于 C1。

根据 ESRIG^[30] 的理论,电渗排水速率为:

$$v_e = K_e E_t S \quad (4)$$

式中: v_e ——电渗排水速率/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

K_e ——土体的电渗透系数/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$);

E_t ——施加在阴阳极之间的电压/V;

S ——通过水流或电流的土体截面面积/ m^2 。

将式(4)中的电势差用电流强度代替:

$$v_e = K_e \rho_1 I \quad (5)$$

式中: ρ_1 ——土体的电阻率/($\Omega \cdot \text{m}$);

I ——电渗流系统中的总电流/A。

由式(5)可知,系统内电流值越大排水速率越高。三维电渗集水井的设计使土中向阴极迁移的水聚集在集水井中,使得系统内电流保持在较高的范

围,这是本系统固结效率较高的重要原因之一。三维协同电渗系统为并联电路,试验电流值始终远远大于传统一维电渗试验电流,这是该系统电渗效率始终远远高于一维电渗的又一重要原因。

3.2 三维和一维电渗试验排水量

由图 5(a)可知,试验过程中一维电渗试验 C2 的电流值逐渐减小,电渗效率逐渐降低,导致其排水速率逐渐减缓,在 45 h 时排水完全停止,最终排水量为 314 mL。由图 5(b)可知,S1 第 3 次抽水后的电流值维持在一个相对稳定的范围内,因此其 80 h 内排水速率变化幅度较小,排水稳定时间较长。C1 的初始电流值高于 S1,因此前期电渗过程中排水速率较快,但由于后期电流值在每次抽水后逐渐减小,排水速率减缓,排水稳定时间较短,C1 在 80 h 时排水基本停止,且在 80 h 时排出了几乎等量的水。试验 80 h 时 S1 和 C1 的最大排水量分别为 6 483 mL 和 6 433 mL。各试验排水量变化情况见图 6(a)。

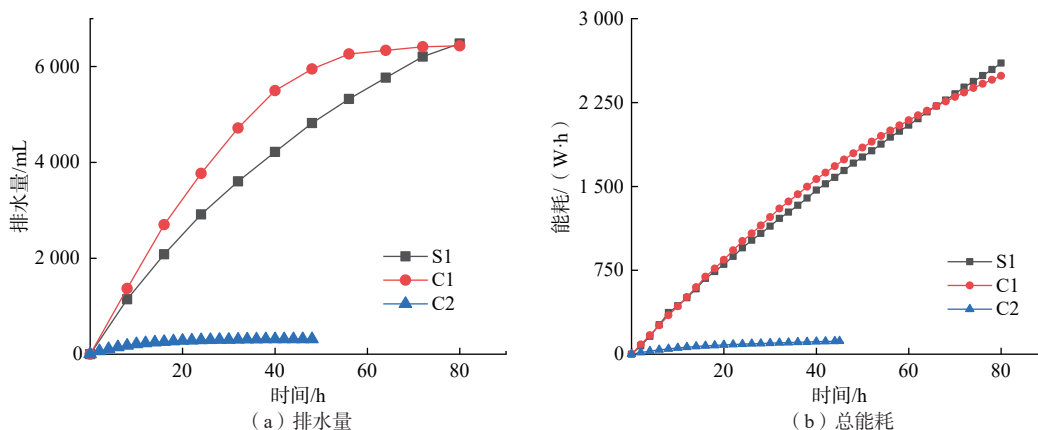


图 6 电渗过程中排水量和总能耗

Fig. 6 Displacement and total energy consumption during electroosmosis

3.3 三维和一维电渗试验能耗

3.3.1 电渗过程中总能耗

电渗过程中的总能耗采用电流和电压对时间的积分进行计算:

$$E = \int U I dt \quad (6)$$

式中: E ——电渗过程中的总能耗/($\text{W} \cdot \text{h}$);

U ——电渗过程中的施加电压/V;

t ——电渗时间/h。

三维试验时使用抽水泵抽水,抽水泵会消耗一定能量:

$$W = P t_p \quad (7)$$

式中: W ——抽水泵所消耗能量/($\text{W} \cdot \text{h}$);

P ——抽水泵的功率/W;

t_p ——抽水泵的使用时间/h。

本试验采用的抽水方式为间歇式抽水,每次时间较短,大约为 3 min,抽水泵功率为 150 W,三维电渗时每组试验共抽水 10 次,抽水消耗总电能为 7.5 $\text{W} \cdot \text{h}$ 。

S1 电渗总能耗为 2 602.82 $\text{W} \cdot \text{h}$,与抽水消耗总电能相加总和为 2 610.32 $\text{W} \cdot \text{h}$;C1 电渗总能耗为 2 488.17 $\text{W} \cdot \text{h}$,与抽水消耗总电能相加总和为 2 495.67 $\text{W} \cdot \text{h}$;C2 总能耗为 117.23 $\text{W} \cdot \text{h}$,三维电渗试验的总能耗均为传统一维电渗试验的 20 倍左右,能耗之间的巨大差异主要由于三维试验与一维试验的体量相差较大。由

图 6(b)可知,3 种试验条件电渗过程中的总能耗均呈现持续上升的趋势。

由于三维电渗系统的间歇式抽水使电流出现周期性减小—增大的现象,因此能耗在抽水前后出现波动,图 7 以 S1 为例示意了这种变化。由式(6)可知,在电源输入总电压不变的情况下,总能耗值只与电流值有关。抽水后至下一次抽水前,能耗的增长速率呈逐渐增大的趋势;抽水后,由于电流值骤然变小,能耗的增长速率骤然降低,其后再次逐渐增大,导致能耗增长速率波动。抽水后能耗增长率骤然降低,说明三维电渗装置中多功能集水井的应用及间歇式抽水设计有利于电渗过程中总能耗的降低,有利于提升电渗效率。

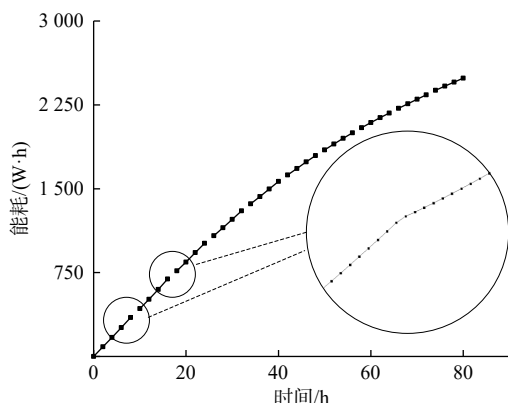


图 7 S1、C1 工况抽水点能耗变化示意图 (以 S1 为例)

Fig. 7 Schematic diagram of energy consumption change at pumping point in S1 and C1 (Take S1 as an example)

3.3.2 平均能耗

三维电渗试验与一维电渗试验的体积和排水量均相差较大,为使能耗的对比更加准确,计算了 2 种试验结束时各组试验的平均能耗:单位体积排水能耗 E_v ,即每单位体积土体(1 m^3)排水所消耗的平均能耗;单位体积单位排水量能耗 E_{dv} ,即每单位体积土体(1 m^3)排出单位排水量的水(1 mL)所消耗的平均能耗。计算方法为:

$$E_v = \frac{E}{V} \quad (8)$$

$$E_{dv} = \frac{E}{Q \cdot V} \quad (9)$$

式中: V ——土样体积/ m^3 ;

Q ——排水量/ mL 。

图 8 为三组试验的 E_v 与 E_{dv} 对比。试验结束时 S1 和 C1 的 E_v 和 E_{dv} 大致相同, C2 的 E_v 与 E_{dv} 分别为三

维电渗试验的 1.5 倍、30 倍左右。因此,本研究采用的三维电渗装置单位能耗更低,电渗效率远大于传统一维电渗试验,且对于不同的土体均具有非常明显的降低能耗的效果。

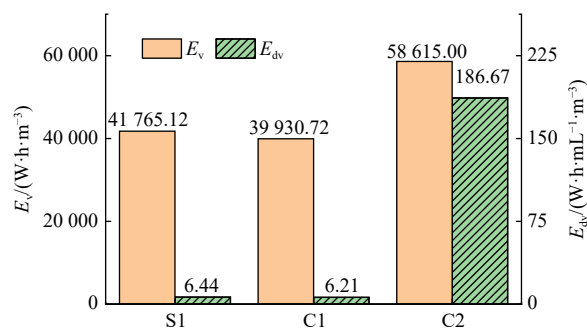


图 8 S1、C1 和 C2 的 E_v 与 E_{dv}

Fig. 8 E_v and E_{dv} of S1, C1 and C2

需要说明的是, C1、C2 试验在试验结束时排水均已停止,计算 E_v 、 E_{dv} 的时间节点均为排水结束时间, S1 选取 80 h,即取 S1、C1 两组试验排水量大致相同的时间节点进行计算。此时 S1 的排水速率仍处于较高的状态,试验继续进行,排水量仍会持续快速增长,并且其能耗上升速率较慢。排水量上升速度快而能耗上升速度慢, S1 的 E_v 与 E_{dv} 仍会处于较低的水平,因此 80 h 时 S1 的计算结果能够代表 S1 的最终结果。

4 结论

(1) 本研究采用的三维电动-水力渗透协同固结系统打破了传统一维和二维的电渗思路,采用环式布置电极,实现并联电路,提高系统电流。采用间歇式抽水方式,抽水后电流降低,减少能耗,结合多功能集水井使井内外形成水头差,并使电流维持在一定范围内,将水力渗流和电渗流相结合,达到二者协同的三维渗流效果,提高了电渗效率、降低了能耗。

(2) 土体种类相同的情况下,三维电渗装置的单位体积排水能耗、单位体积单位排水量能耗分别为传统一维电渗排水装置的 2/3 和 1/30 左右,证明了三维电动-水力渗透协同固结系统拥有降低能耗的作用,并且该三维固结系统对不同种类的土体具有相同的降低能耗的效果。

(3) 大尺寸三维电动-水力渗透协同固结系统可以解决电渗能耗高的关键问题,并且该装置及工艺易于现场操作,本研究成果可为实际工程应用提供可靠的数据支持和设计依据。

参考文献 (References):

- [1] 刘松玉, 周建, 章定文, 等. 地基处理技术进展[J]. 土木工程学报, 2020, 53(4): 93 – 110. [LIU Songyu, ZHOU Jian, ZHANG Dingwen, et al. State of the art of the ground improvement technology in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(4): 93 – 110. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 郑凌透, 谢新宇, 谢康和, 等. 电渗法加固地基试验及应用研究进展[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(6): 1064 – 1073. [ZHENG Lingwei, XIE Xinyu, XIE Kanghe, et al. Test and application research advance on foundation reinforcement by electro-osmosis method[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(6): 1064 – 1073. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 林伟岸, 江文豪, 詹良通. 考虑真空加载过程及堆载随时间变化下砂井地基的普遍固结解析解[J]. 岩土力学, 2021, 42(7): 1828 – 1838. [LIN Weian, JIANG Wenhao, ZHAN Liangtong. General analytical solution for consolidation of sand-drained foundation considering the vacuum loading process and the time-dependent surcharge loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(7): 1828 – 1838. (in Chinese with English abstract)]
- [4] BHOSLE S, DESHMUKH V. Experimental studies on soft marine clay under combined vacuum and surcharge preloading with PVD[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 15(4): 461 – 470.
- [5] NGUYEN T N, BERGADO D T, KIKUMOTO M, et al. A simple solution for prefabricated vertical drain with surcharge preloading combined with vacuum consolidation[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, 49(1): 304 – 322.
- [6] 金志伟, 阎长虹, 李良伟, 等. 低含水率盾构泥浆的真空-电渗联合泥水分离技术试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(1): 103 – 110. [JIN Zhiwei, YAN Changhong, LI Liangwei, et al. An experimental study of vacuum negative pressure incorporated with electro-osmosis in mud-water dehydration for shield slurry with low water content[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(1): 103 – 110. (in Chinese with English abstract)]
- [7] WANG Jun, ZHAO Ran, CAI Yuanqiang, et al. Vacuum preloading and electro-osmosis consolidation of dredged slurry pretreated with flocculants[J]. Engineering Geology, 2018, 246: 123 – 130.
- [8] WU Jun, XUAN Youjin, DENG Yongfeng, et al. Combined vacuum and surcharge preloading method to improve lianyungang soft marine clay for embankment widening project: A case[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, 49(2): 452 – 465.
- [9] XUE Zhijia, XIONG Qi. Electro-osmotic chemical behavior of clayey soil under various boundary conditions[J]. Journal of Central South University, 2021, 28(5): 1493 – 1504.
- [10] ZHANG Heng, ZHOU Guoxiang, WU Junliang, et al. Mechanism for soil reinforcement by electroosmosis in the presence of calcium chloride[J]. Chemical Engineering Communications, 2017, 204(4): 424 – 433.
- [11] 刘飞禹, 吴文清, 海钧, 等. 絮凝剂对电渗处理河道疏浚淤泥的影响[J]. 中国公路学报, 2020, 33(2): 56 – 63. [LIU Feiyu, WU Wenqing, HAI Jun, et al. Effect of flocculants on electro-osmotic treatment of river dredged sludge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(2): 56 – 63. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 沈美兰, 周太全, 李吴刚. 高岭土电渗固结特性及数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(4): 78 – 85. [SHEN Meilan, ZHOU Taiquan, LI Wugang. A study of the Kaolin electro-osmotic consolidation characteristics and their numerical simulation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(4): 78 – 85. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 王耀明, 王柳江, 刘斯宏, 等. 非饱和黏土的一维电渗排水解析理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊2): 3767 – 3774. [WANG Yaoming, WANG Liujian, LIU Sihong, et al. One-dimensional analytical theory of electro-osmotic drainage for unsaturated clayey soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(Sup 2): 3767 – 3774. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 龚明星, 王档良, 詹贵贵. 考虑有效电势变化的软土一维电渗固结理论[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(4): 61 – 66. [GONG Mingxing, WANG Dangliang, ZHAN Guigui. 1-D electro-osmotic consolidation theory considering variation in effective potential in soft soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(4): 61 – 66. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 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 Yanli, ZHOU Jian, GONG Xiaonan, 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 with English abstract)]
- [16] DALHAT MU'AZU N, ESSA M H. Comparative performance evaluation of anodic materials for electrokinetic removal of Lead (II) from contaminated clay soil[J]. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2020, 29(1): 69 – 95.
- [17] XUE Zhijia, TANG Xiaowei, YANG Qing, et al. Influence of salt content on clay electro-dewatering with copper and stainless steel anodes[J]. *Drying Technology*, 2019, 37(15): 2005 – 2019.
- [18] 胡俞晨, 王钊, 庄艳峰. 电动土工合成材料加固软土地基实验研究[J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(5): 582 – 586. [HU Yuchen, WANG Zhao, ZHUANG Yanfeng. Experimental studies on electro-osmotic consolidation of soft clay using EKG electrodes[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(5): 582 – 586. (in Chinese with English abstract)]
- [19] GLENDINNING S, LAMONT-BLACK J, JONES C. Treatment of sewage sludge using electrokinetic geosynthetics[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 139(3): 491 – 499.
- [20] FOURIE A B, JOHNS D G, JONES C J F P. Dewatering of mine tailings using electrokinetic geosynthetics[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, 44(2): 160 – 172.
- [21] 谢新宇, 郑凌透, 谢康和, 等. 电势梯度与电极间距变化的滨海软土电渗模型试验研究[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(1): 108 – 114. [XIE Xinyu, ZHENG Lingwei, XIE Kanghe, et al. Experimental study on electro-osmosis of marine soft soil with varying potential gradient and electrode spacing[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(1): 108 – 114. (in Chinese with English abstract)]
- [22] WEN Liang. Influence of the electric voltage gradient, electrode spacing and electrode radius on slurry dewatering by vertical electro-osmosis[J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2020, 15(11): 11326 – 11339.
- [23] 刘飞禹, 宓炜, 王军, 等. 逐级加载电压对电渗加固吹填土的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(12): 2582 – 2591. [LIU Feiyu, MI Wei, WANG Jun, et al. Influence of applying stepped voltage in electroosmotic reinforcement of dredger fill[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(12): 2582 – 2591. (in Chinese with English abstract)]
- [24] ZHANG Heng, MA Qinguo, SU Wenji, et al. On the dewatering of electroosmotic soil using intermittent current incorporated with calcium chloride[J]. *Environmental Technology*, 2019, 42(3): 468 – 478.
- [25] FU Hongtao, FANG Ziquan, WANG Jun, et al. Experimental comparison of electroosmotic consolidation of Wenzhou dredged clay sediment using intermittent current and polarity reversal[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2018, 36(1): 131 – 138.
- [26] 庄艳峰. 电渗排水固结的设计理论和方法[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(增刊 1): 152 – 155. [ZHUANG Yanfeng. Theory and design method for electro-osmotic consolidation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(Sup 1): 152 – 155. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 温晓贵, 胡平川, 周建, 等. 裂缝对电渗模型尺寸效应影响的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(11): 2054 – 2060. [WEN Xiaogui, HU Pingchuan, ZHOU Jian, et al. Experimental research on influence of cracks on size effect of electro-osmosis model[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(11): 2054 – 2060. (in Chinese with English abstract)]
- [28] LING Jianming, HAN Bingye, XIE Yan, et al. Laboratory and field study of electroosmosis dewatering for pavement subgrade soil[J]. *Journal of Cold Regions Engineering*, 2017, 31(4): 04017010.1 – 04017010.16.
- [29] 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 Liujiang, CHEN Qiangqiang, LIU Sihong, 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(Sup 2): 3516 – 3525. (in Chinese with English abstract)]
- [30] ESRIG M I. Pore pressures, consolidation, and electrokinetics[J]. *ASCE Soil Mechanics and Foundation Division Journal*, 1968, 94(4): 899 – 921.

编辑: 张若琳