

DOI:10.11784/tdxbz202410003

# EKG 辐射式排水板真空预压-电渗法处理污泥地基加固及 重金属 Cu 剔除效果研究

冯双喜<sup>1,2</sup>, 张国庆<sup>1</sup>, 雷华阳<sup>1,2,3</sup>, Doern Deth<sup>1</sup>

- (1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350;  
2. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室(天津大学), 天津 300350;  
3. 广西大学土木建筑工程学院, 南宁 530004)

**摘要:** 为了解决疏浚形成的污泥地基具有加固难且重金属超标等问题, 本文提出了一种电动力土工织物(EKG)辐射式排水板真空预压-电渗法, 该方法可实现污泥地基加固和重金属剔除双重功能。首先, 利用四通接头将竖向排水板和横向排水板进行结合, 制作辐射式排水板, 并以 EKG 材料(碳纤维导电土工布)为外膜, 结合针刺纺织工艺将外膜固定在芯板外围, 形成辐射式 EKG 排水板电极, 实现导电和排水双重功能。其次, 为了验证该方法的有效性, 以中国北方某受重金属 Cu 污染的河道疏浚污泥为研究对象, 开展了传统真空预压、EKG 真空预压-电渗、EKG 辐射式排水板真空预压-电渗共 3 种模型试验, 对比分析了排水量、沉降量、平均固结度、加固含水率、十字板剪切强度、土壤重金属 Cu 含量、微观结构参数、单位排水量能耗等指标的变化规律, 证明了 EKG 辐射式排水板真空预压-电渗法的有效性。与传统真空预压相比, 排水量增大约 3.17 倍, 沉降增大约 1.2 倍, 平均固结度可达 80.6%, 加固含水率降低约 20%, 十字板剪切强度提高约 2.44 倍, 重金属剔除约提高约 7.85%~13.95%, 微观孔隙数量提高约 18.15%。EKG 辐射式排水板真空预压-电渗单位排水量消耗最低, 可达 18.76 (kW·h)/L。本文研究成果可拓宽传统真空预压地基处理方法应用范围, 为软土地基加固设计与施工提供理论参考。

**关键词:** 污泥地基; 真空预压; 辐射式排水板; 电渗法; 电动力土工织物; 重金属剔除; 加固效果  
**中图分类号:** TU43 **文献标志码:** A **文章编号:** 0493-2137(2025)07-0761-13

## Reinforcement and Heavy Metal Cu Removal Effect on Sludge Ground Treated by EKG Prefabricated Radiant Drain Vacuum Preloading-Electroosmotic Method

Feng Shuangxi<sup>1,2</sup>, Zhang Guoqing<sup>1</sup>, Lei Huayang<sup>1,2,3</sup>, Doern Deth<sup>1</sup>

- (1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;  
2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300350, China;  
3. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** The sludge ground formed by dredging poses challenges such as difficulty in reinforcement and excessive heavy metal content. To address these issues, an electrokinetic geosynthetics (EKG) prefabricated radiant drain vacuum preloading-electroosmosis method was proposed in this paper, which can achieve dual functions of sludge ground reinforcement and heavy metal removal. First, prefabricated vertical drain was combined with prefabricated horizontal drain using a four-way connector to create radial drain. The EKG material (carbon fiber conductive geosynthetic cloth) was used as the outer membrane, which was fixed around the core plate through the needle punching textile technology, forming EKG prefabricated radiant drain electrodes that can realize both electrical conductivity

收稿日期: 2024-10-07; 修回日期: 2025-01-08.

作者简介: 冯双喜(1988—), 男, 博士, 副研究员.

通信作者: 雷华阳, leihuayang74@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52108336); 天津市自然科学基金资助项目(22JCQNJC00130).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52108336), the Natural Science Foundation of Tianjin, China (No. 22JCQNJC00130).

and drain. Then, to validate the effectiveness of this method, the dredged sludge contaminated with heavy metal Cu from one river channel in North China was taken as the research object, and three kinds of model tests were conducted, i.e., traditional vacuum preloading, EKG vacuum preloading-electroosmosis and EKG prefabricated radiant drain vacuum preloading-electroosmosis. The changes in indicators such as drainage volume, settlement, average consolidation degree, consolidated water content, vane shear strength, content of heavy metal Cu in soil, microscopic parameters and energy consumption per unit of drainage volume were analyzed and compared. Results demonstrate the effectiveness of the proposed method. Compared with those obtained by the traditional vacuum preloading, the drainage volume approximately increased by 3.17 times, the settlement increased by 1.2 times, the average consolidation degree reached 80.6%, the consolidated water content decreased by 20%, the vane shear strength was improved by 2.44 times, the heavy metal removal increased by 7.85%—13.95%, and the number of micropores increased by 18.15%. Moreover, the energy consumption per unit of drainage volume for EKG prefabricated radiant drain vacuum preloading-electroosmosis was the lowest, and it can reach 18.76 (kW · h)/L. The findings in this paper can extend the application scope of traditional vacuum preloading ground treatment methods and provide theoretical reference for the design and construction of soft soil ground reinforcement.

**Keywords:** sludge ground; vacuum preloading; prefabricated radiant drain; electroosmosis; electrokinetic geosynthetics (EKG); heavy metal removal; reinforcement effect

打造河畅、景美的现代河网水系是助力中国生态经济发展的关键环节。目前,中国高度重视河道治理与修复工作,定期进行河道疏浚清淤工作,开展了大规模的疏浚污泥整治工程。据调研,疏浚污泥总量达到  $1 \times 10^8$  t/a 以上,其中 50% 以上的污泥用于建筑土地<sup>[1]</sup>,但疏浚污泥具有黏粒含量高、渗透性能差、重金属含量超标等特点,土体处于塑性流动状态,工程性质极差。真空预压方法作为一种比较成熟的加固方法广泛应用于软土地基加固,但传统真空脱水固结方法存在工期长、耗电量高、加固效果差等缺点,常常诱发桩基倾斜、路面不均匀沉降等诸多工程事故,地上建筑物存在安全隐患。此外,因真空预压无法考虑污泥地基重金属修复,人体重金属中毒事件屡见不鲜。

针对于污泥地基加固方法,学者们提出了各种改进方法,如真空联合堆载预压<sup>[2-3]</sup>、注气增压真空预压<sup>[4-5]</sup>、药剂真空预压<sup>[6-7]</sup>、横向(水平)排水板(prefabricated horizontal drain, PHD)真空预压<sup>[8-9]</sup>、温度真空预压<sup>[10-11]</sup>等。为了解决地基不均匀沉降和加固效果差等工程难题,近几年雷华阳课题组<sup>[12-14]</sup>在竖向排水板(prefabricated vertical drain, PVD)的基础上增加 PHD,提出辐射式排水板真空预压新技术,增加排水路径和渗流通道,研究发现差异沉降可明显降低 10% ~ 15%,加固效果提升 30% 左右。改进的真空预压方法虽然在某种程度上可提高污泥地基的加固效果,但存在耗电量高、无法考虑重金属修复等问题。

常见的污泥地基重金属修复技术包括:物理修复技术,如热处理技术、客土和换土修复技术和玻璃化

修复技术<sup>[15]</sup>;化学修复技术,如土壤淋洗技术、化学固化技术和电动修复技术<sup>[16]</sup>;生物修复技术,如植物修复技术、微生物修复技术和动物修复技术<sup>[17]</sup>。化学添加剂、微生物和植物修复技术广泛用于污泥地基重金属修复,但传统化学添加剂修复技术存在二次污染的风险,且微生物和植物修复技术存在修复时间长等问题<sup>[18]</sup>。对于软弱污泥地基而言,电动力(电渗)的方法除了能够加固地基土提高土体抗剪强度之外,还可以将重金属络合汇集从而达到修复重金属污泥的目的<sup>[19]</sup>。因此,电渗不仅可以起到加固效果,还可修复重金属。针对电渗真空预压,Liu 等<sup>[20]</sup>和 Wang 等<sup>[21]</sup>利用室内模型试验研究了电渗真空预压处理软弱地基的加固机理,提出电渗能加速海相沉积黏土固结,电渗能耗占真空预压能耗的 8% 左右。此外,Liu 等<sup>[22]</sup>将电渗真空预压与动力夯实相结合,认为动力夯实可以有效节约 10% 左右的电渗能耗,但传统电渗电极往往腐蚀严重,并且对土壤中的重金属存在竞争和干扰,往往会引入新的重金属离子。针对电动力修复,Yang 等<sup>[23]</sup>研究了污染物与电流强度之间的关系,认为铜、砷离子的迁移速度与电流呈非线性关系。He 等<sup>[24]</sup>对镉污染的高岭土进行了电动力修复试验,探究了镉污染物的迁移规律和电动力能量消耗。Zhang 等<sup>[25]</sup>开展了重金属铬污泥修复试验,认为在修复 120 h 内,重金属铬的去除率为 36%。通过分析可知,由于存在学科研究技术壁垒,目前电渗和电动力修复的研究处于分离状态,地基加固过程中缺乏考虑重金属地基的修复,无法实现兼顾绿色与安全的软土地基。

为了实现地基加固与重金属剔除效果,防止传统金属电极因电化学腐蚀对地基引入新的重金属元素,笔者<sup>[26]</sup>已经证明了电渗过程中辐射式排水板电极可明显缩短电渗路径.在此基础上,本文提出了电动力土工织物(electrokinetic geosynthetics, EKG)辐射式排水板真空预压-电渗法,利用四通接头将 PVD 和 PHD 进行结合,制作了辐射式排水板,并以碳纤维导电土工布为外膜,利用针刺纺织工艺将外膜固定在芯板外围,研发了辐射式 EKG 排水板电极.本文开展了传统真空预压、EKG 电渗真空预压和 EKG 辐射式排水板真空预压物理模型试验,分析了排水量、沉降量、平均固结度、加固后含水率、十字板剪切强度、重金属 Cu 含量、加固后土体微观结构参数及单位排水量能耗等指标的变化规律,研究成果可拓宽传统技术应用范围,为污泥地基加固与修复提供了理论参考.

## 1 试验材料及方案

### 1.1 试验材料

#### 1.1.1 试验土样

试验所用的土样均取自中国北方某河道疏浚工程.依据《土工试验方法标准》<sup>[27]</sup>,土样的基本物理力学参数指标如表 1 所示.由表 1 可知,含水率远大于液限,初始状态下土体处于流塑状态,饱和度为 100%,十字板剪切强度为 0 kPa.根据《建筑地基基础设计规范》<sup>[28]</sup>的相关规定,塑性指数  $I_p$  表示土处于可塑状态的含水率变化,  $I_p = 34.8 - 14.5 = 20.3 > 17$ ,且土样的天然含水率(120%)大于液限(34.8%),天然孔隙比(2.82)大于 1.5,试验土样定名为淤泥.采用密度计方法获得淤泥的颗粒级配曲线,如图 1 所示.通过 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)试验得到淤泥的矿物成分统计,如表 2 所示,其中前 7 种成分为成岩矿物成分,后 6 种成分为黏土矿物成分.

土样重金属检测采用 X 射线荧光光谱(X-ray fluorescence, XRF)分析法,该方法是一种用于检测土壤中元素含量的快速、非破坏性分析方法.采用型

表 1 试验土样物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of test soil sample

参数	数值
含水率/%	120
液限/%	34.8
塑限/%	14.5
孔隙比	2.82
土粒相对密度	2.73
密度/(g/cm <sup>3</sup> )	1.57
十字板剪切强度/kPa	0

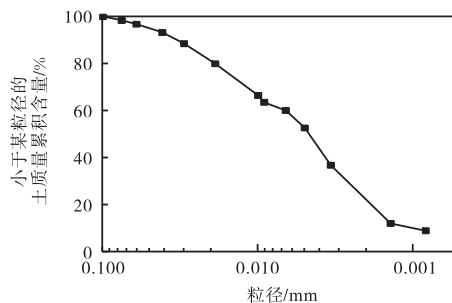


图 1 试验土体的颗粒级配曲线

Fig.1 Grain-size distribution curve of test soil

表 2 试验土样矿物成分统计

Tab.2 Statistics of mineral composition of test soil sample

矿物成分	含量/%	矿物成分	含量/%
石英	19.53	蒙脱石	4.52
钾长石	2.50	伊-蒙混层	21.07
斜长石	7.27	伊利石	17.56
方解石	16.60	高岭石	3.01
白云母	1.30	绿泥石	4.01
黄铁矿	0.70	角闪石	0.30
盐岩	1.63		

号为 S4 PIONEER XRF 的仪器对土样进行测试,获得主要化合物的含量,如表 3 所示.从表 3 中可以发现, CuO 含量为 3.444%,按照摩尔质量换算, Cu 元素含量对应约为 2.748%(274.8 mg/kg),根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》<sup>[29]</sup>, Cu 的最高风险筛选值为 200 mg/kg,试验土样的重金属值高出筛选值 74.8 mg/kg,这是因为河道曾因为工业废水排放导致底泥污染.

表 3 化合物含量统计

Tab.3 Statistics of chemical compound contents

化合物	含量/%
SiO <sub>2</sub>	49.180
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.180
CaO	8.139
Na <sub>2</sub> O	5.711
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.598
MgO	3.947
CuO	3.444
TiO <sub>2</sub>	0.585
其他	6.216

#### 1.1.2 EKG 排水板材料

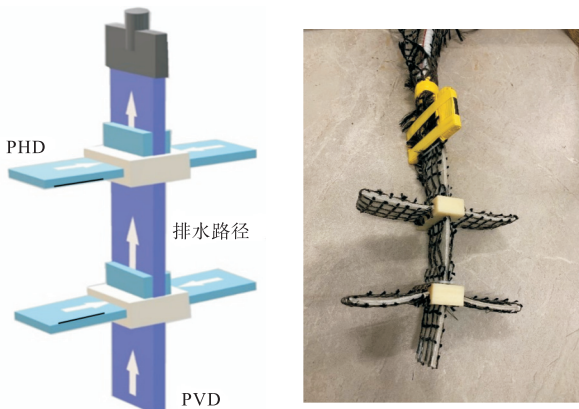
排水板尺寸为 50 mm × 250 mm(宽 × 长),排水板底部用 704 硅橡胶密封,顶部与手形接头连接并通过绑绕胶布固定,将钢丝软管与手形接头连接并用胶布缠绕固定.将导电土工合成材料贴于排水板上并使用扎线带加固,如图 2 所示.



图 2 EKG 排水板

Fig.2 EKG prefabricated drain

通过塑料接头将 PHD 和 PVD 相连,PHD 与 PVD 贴合部分采用轧带固定,实现竖向真空度传递至 PHD. 同时,将导电土工合成材料贴于排水板上并使用扎线带加固,形成 EKG 辐射式排水板,并将 EKG 与电渗装置相连,如图 3 所示.



(a) 辐射式排水示意 (b) EKG 辐射式排水板实物

图 3 EKG 辐射式排水板

Fig.3 EKG prefabricated radiant drain

1.1.3 其他试验材料及设备

为了保障试验顺利进行,试验需要用于密封的真空膜,实现隔泥效果的土工布,用于真空加载的真空泵,水汽分离装置,电渗设备——高压直流电源 JP15020D 及用于沉降监测的红外线激光测距仪 GLM30 等材料及设备,如图 4 所示.

1.2 试验方案及步骤

本文开展了传统真空预压法试验、EKG 真空预压-电渗试验和 EKG 辐射式排水板真空预压-电渗共 3 种类型模型试验,用以对比分析 EKG 辐射式排水板真空预压-电渗法处理污泥地基加固及重金属 Cu 剔除效果,试验方案如表 4 所示. 3 组试验方案差异如图 5 所示. 需要说明的是,模型试样为未固结的淤



(a) 真空膜



(b) 土工布



(c) 真空泵



(d) 水汽分离罐



(e) 高压直流电源 JP15020D



(f) 红外线激光测距仪 GLM30

图 4 试验材料和设备

Fig.4 Test materials and devices

表 4 试验方案

Tab.4 Test schemes

试验方案编号	含水率/%	铜含量/(mg/kg)	排水板形式	真空预压类别
T1	120	344	传统	真空预压
T2	120	344	EKG	电渗+真空预压
T3	120	344	EKG 辐射式	电渗+真空预压

泥土,为了保障 3 组试验土样重金属含量的一致性,根据重金属 Cu 含量,计算获得 Cu 含量为 344 mg/kg. 将五水合硫酸铜调配成溶液加入疏浚淤泥中,配置模型土样,选取配置土样进行检测,铜含量达到 344 mg/kg 左右,基本满足土体初始重金属含量要求.

开展物理模型试验的步骤如下.

(1) 将配置好的土样放入模型箱(长、宽和高分别为 80 cm、60 cm 和 70 cm)中,并用搅拌机搅拌均匀,如图 6 所示.

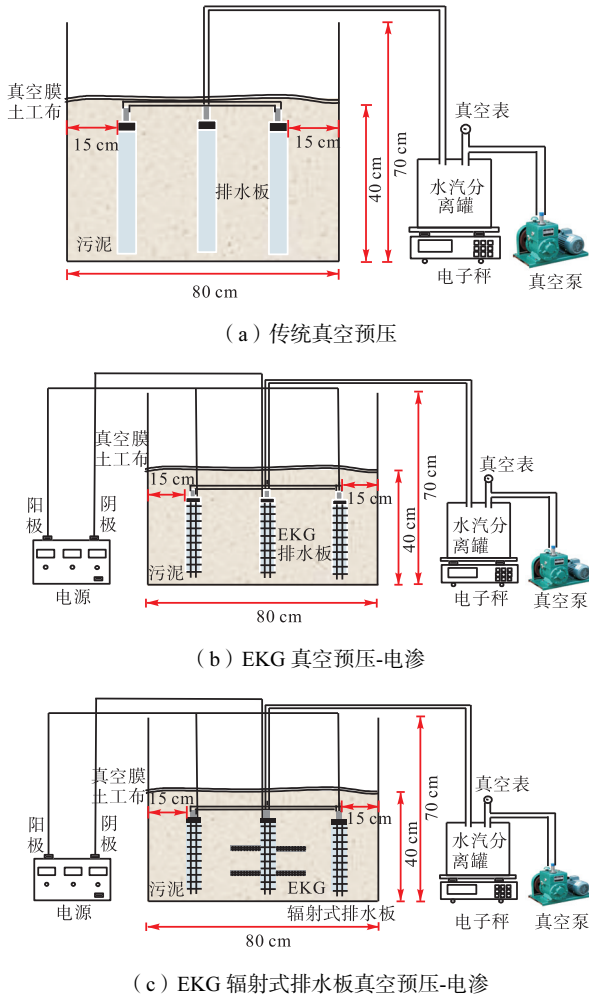


图5 模型试验装置示意  
Fig.5 Schematic of model test equipment



图6 模型试验装置实物图  
Fig.6 Photo of model test equipment

(2) 将排水板和电极穿过真空膜和土工布中预留的孔洞,放入模型箱中预先设置好的位置. 对于传统真空预压法试验,排水板插入深度为 40 cm,排水板间距为 25 cm;对于 EKG 真空预压-电渗试验,排水板插入位置均替换为 EKG 排水板电极;而对于 EKG 辐射式排水板真空预压-电渗试验,中间位置插入 EKG 辐射式排水板,两侧插入 EKG 排水板.

(3) 排水板连接手形接头,通过排水管与水汽分离罐相连,水汽分离罐的另一排水管与真空泵相

连. 对于需要结合电渗的试验组(EKG 真空预压-电渗试验和 EKG 辐射式排水板真空预压-电渗试验),将 EKG 电极与高压直流电源通过电缆连接.

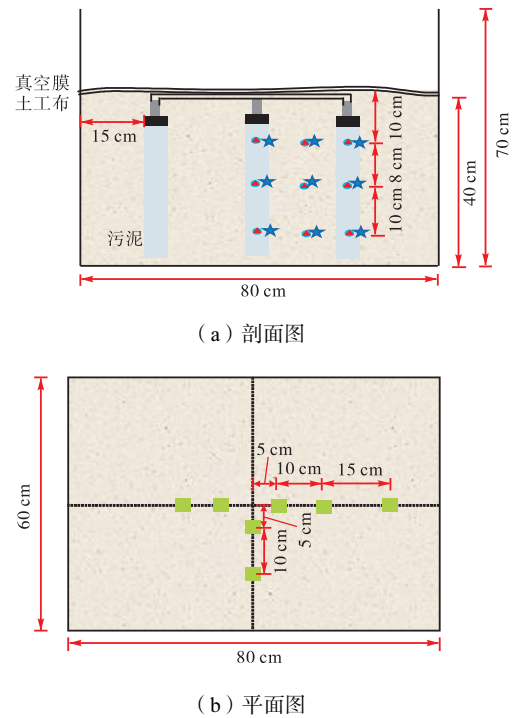
(4) 将真空膜覆盖到土样表面,并把真空膜四周插入模型箱边缘的土体内使得整体密封良好不漏气,将真空膜和土工布上的孔洞使用胶布黏贴紧密,使得孔洞不漏气. 调节高压直流电源的电压为 10 V,启动电源和真空泵即可开始抽真空阶段.

(5) 试验过程中使用激光测距仪监测表面沉降量的变化,通过电子秤称量水汽分离罐的质量,记录排水量的变化情况.

(6) 试验终止标准为抽真空至 180 h 或排水速率低于 0.2 kg/d,达到此标准则可以结束试验.

(7) 试验终止后,测得目标位置处土体的十字板剪切强度,取得监测点位的土体试样并采用烘干法得到含水率,结合 XRF 获得阴、阳极附近及中部重金属含量分布.

在真空膜表面设置沉降标,利用红外线激光测距仪 GLM30 监测真空预压过程中沉降变化规律,并利用电子秤称取真空过程中的排水量. 真空预压结束后,含水率、十字板剪切强度及重金属监测位置分别在中间排水板(阴极位置)、右侧排水板(阳极位置)及排水板中间(阴、阳极中间)且距离表面 10 cm、18 cm、28 cm 位置处,如图 7 所示.



● 含水率 ▲ 十字板剪切强度 ■ 沉降标 ★ 重金属监测

图7 监测点位示意

Fig.7 Schematic of monitoring points

试验结束后,对 3 种试验组进行扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)试验. 在模型中心部位选取微观试验土样,作为每组的代表性试样. 使用 ImageJ 软件对图片进行降噪处理,通过 SEM 图像二值化分析获得颗粒接触与土体结构以及微观孔隙特征,探究 EKG 辐射式排水板真空预压-电渗法处理污泥地基加固机制.

## 2 试验结果与分析

### 2.1 排水量

图 8 为排水量随固结时间变化曲线,从图 8 中可以看出,排水量随着固结时间增加而增加,当固结时间为 180 h 时,传统真空预压最终排水量为 2.63 kg, EKG 真空预压-电渗最终排水量为 7.87 kg,与传统真空预压相比,其增大约 1.99 倍,这表明电渗可明显提升排水量,这是因为黏土颗粒带负电,土中水离子带正电,在电场条件下,土中的自由水和部分结合水受到电场作用而发生定向移动,并在阴极排水,从而增大土体的排水量. EKG 辐射排水板真空预压-电渗的最终排水量为 10.96 kg,与传统真空预压相比,排水量增大约 3.17 倍,与 EKG 真空预压-电渗相比,排水量增大约 39.26%. 显然,辐射式排水板电极更有利于排水,这是因为辐射式排水可以明显减小排水路径,增加了汇水面积,导致排水量增大<sup>[13]</sup>. 此外,结合电渗理论,计算简图如图 9 所示. 电渗计算式可表示为

$$\eta \frac{v}{\delta} = \sigma \frac{\Delta E}{\alpha(\Delta l + \Delta l')} \quad (1)$$

式中: $\eta$  为黏度系数, Pa·s;  $\sigma$  为表面电荷密度, C/m<sup>2</sup>;  $v$  为电渗速度, m/s;  $\Delta l$  与  $\Delta l'$  为阴、阳极之间的距离, m;  $\delta$  为移动电荷与壁面的距离, m;  $\alpha$  为距离等效折减系数;  $\Delta E$  为阴、阳极之间的电势差.

从式(1)中可以看出,随着电渗路径缩减(阴、阳

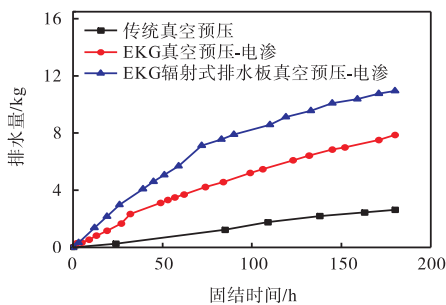


图 8 排水量随固结时间变化曲线

Fig.8 Changing curves of drainage volume with consolidation time

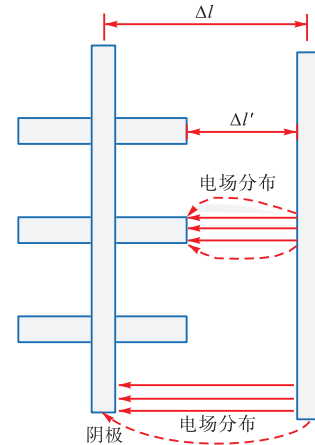


图 9 辐射式排水板电极电渗计算分析简图

Fig.9 Simplified diagram of electrode electroosmotic calculation and analysis for radiant drain

极距离减小), 渗流速度增大, 导致渗流量增大.

### 2.2 沉降量

将不同位置处沉降标的沉降加权平均,并绘制平均沉降曲线,如图 10 所示. 从图 10 中可以看出,沉降随着固结时间的增加而增大,当固结时间为 180 h 时,传统真空预压的最终沉降为 15 mm, EKG 真空预压-电渗的最终沉降量为 31 mm,与传统真空预压相比,沉降增大约 1.1 倍. EKG 辐射式排水板真空预压-电渗的最终沉降量为 33 mm,与传统真空预压相比沉降增大约 1.2 倍,但与 EKG 真空预压-电渗相比沉降增加不明显,约为 6.45%. 通过分析可知,针对于土体沉降,电渗作用大于辐射作用,电渗更有利于排水,辐射排水更有利于缓解地基不均匀性,这与笔者之前的研究成果基本一致<sup>[12]</sup>.

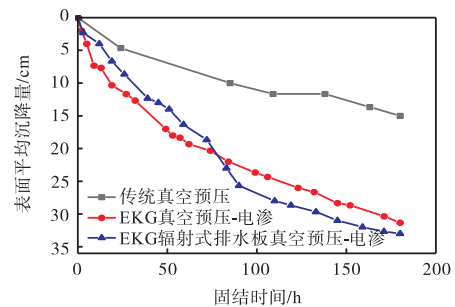


图 10 表面平均沉降量随固结时间变化曲线

Fig.10 Changing curves of average surface settlement with consolidation time

利用 Asaoka 方法<sup>[30]</sup>对 EKG 辐射式排水板真空预压-电渗的最终沉降进行预测,以更好地分析土体的平均固结度的变化规律. 根据 Asaoka 方法,用体积应变表示的一维固结方程可以近似地用级数形式的微分方程表示,即

$$S + a_1 \frac{dS}{dt} + a_2 \frac{d^2S}{dt^2} + \dots + a_n \frac{d^n S}{dt^n} = b \quad (2)$$

式中:  $S$  为总固结沉降量, mm;  $t$  为时间, s;  $a_1, a_2, \dots, a_n$  和  $b$  为常量系数. 在大多数情况下, 使用一阶递推方程即可满足要求, 即

$$S_j = \beta_0 S_{j-1} + \beta_1 \quad (3)$$

式中:  $\beta_0$  和  $\beta_1$  分别为  $S_{j-1}-S_j$  关系图中的截距和斜率;  $S_j$  和  $S_{j-1}$  分别为  $j$  和  $j-1$  时刻对应的沉降值. Asaoka 方法要求将恒定时间间隔所对应的一系列沉降数据, 以  $S_{j-1}$  为横坐标, 以  $S_j$  为纵坐标, 建立平面直角坐标, 通过绘制  $S_{j-1}-S_j$  关系图, 认为绘制曲线与  $45^\circ$  直线的交点为最终固结沉降量. 通过已有的沉降观测数据求出相应的系数  $\beta_0$  和  $\beta_1$  可以预估最终沉降, 即

$$S_\infty = S_j = S_{j-1} = \frac{\beta_0}{1-\beta_1} \quad (4)$$

式中  $S_\infty$  为最终沉降量, mm.

采用多项式插值方法对平均沉降数据进行拟合, 以保障 Asaoka 方法等间距取点的准确性<sup>[31]</sup>. 图 11 为传统真空预压、EKG 真空预压-电渗和 EKG 辐射式排水板真空预压-电渗监测沉降数据拟合曲线, 各曲线对应的拟合公式见式 (5) ~ (7), 其拟合程度均大于 0.95.

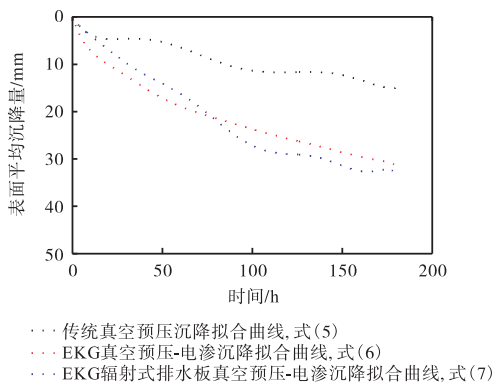


图 11 沉降拟合曲线

Fig.11 Fitting curves of settlement

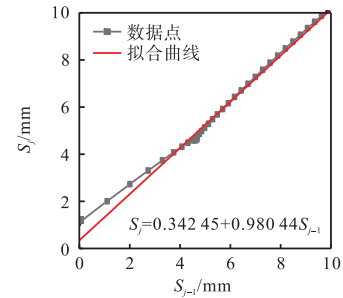
$$S = 0.60798t - 0.2899 \times 10^{-1}t^2 + 0.62 \times 10^{-3}t^3 - 0.615425 \times 10^{-5}t^4 + 0.283 \times 10^{-7}t^5 - 0.49 \times 10^{-10}t^6 \quad (5)$$

$$S = -0.14956 + 1.23109t - 0.07368t^2 + 0.288 \times 10^{-2}t^3 - 0.648942 \times 10^{-4}t^4 + 0.875 \times 10^{-6}t^5 - 0.722417 \times 10^{-8}t^6 + 0.358 \times 10^{-10}t^7 - 0.975 \times 10^{-13}t^8 + 0.113 \times 10^{-15}t^9 \quad (6)$$

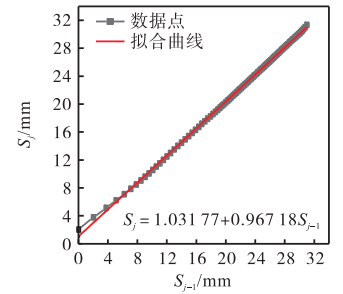
$$S = 0.42556 + 0.42919t - 0.1671 \times 10^{-1}t^2 +$$

$$0.115 \times 10^{-2}t^3 - 0.423 \times 10^{-4}t^4 + 0.826 \times 10^{-6}t^5 - 0.902 \times 10^{-8}t^6 + 0.552 \times 10^{-10}t^7 - 0.177 \times 10^{-12}t^8 + 0.232 \times 10^{-15}t^9 \quad (7)$$

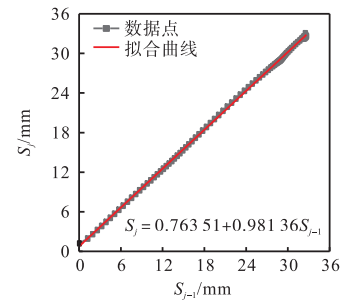
选取时间间隔为 2 h, 建立  $S_{j-1}-S_j$  的坐标系, 确定  $\beta_0$  和  $\beta_1$ , 如图 12 所示. 并根据式 (4) 确定传统真空预压、EKG 真空预压-电渗和 EKG 辐射式排水板真空预压-电渗的最终沉降分别为 17.51 mm、31.44 mm 和 40.96 mm<sup>[32]</sup>.



(a) 传统真空预压



(b) EKG 真空预压-电渗



(c) EKG 辐射式排水板真空预压-电渗

图 12 确定  $\beta_0$  和  $\beta_1$

Fig.12 Determination of  $\beta_0$  and  $\beta_1$

结合固结理论, 土体的平均固结度计算公式为

$$\bar{U} = \frac{S_t}{S_\infty} \quad (8)$$

式中:  $\bar{U}$  为平均固结度, %;  $S_t$  为  $t$  时刻的沉降量, mm. 因此, 可获得平均固结度随时间变化的规律曲线, 如图 13 所示. 从图 13 中可以看出, 平均固结度随着时间增加而增大, 且 EKG 辐射式排水板真空预

压-电渗的加固效果优于传统真空预压和 EKG 真空预压-电渗,加固 180 h 后平均固结度可达 80.6%,这说明了 EKG 辐射式排水板真空预压-电渗方法的加固效率明显得到了提高,可节约加固时间.

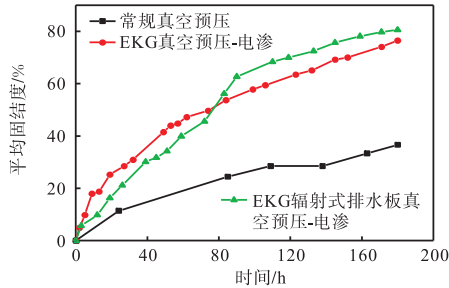
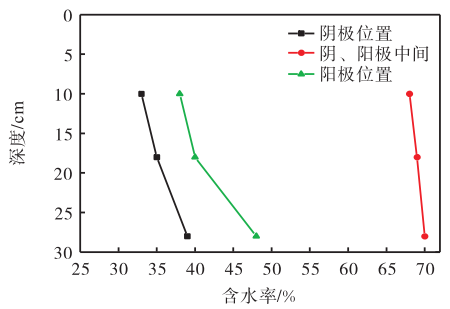


图 13 平均固结度-时间曲线

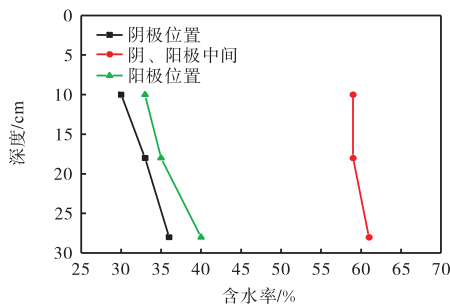
Fig.13 Curves of average consolidation degree vs time

### 2.3 含水率

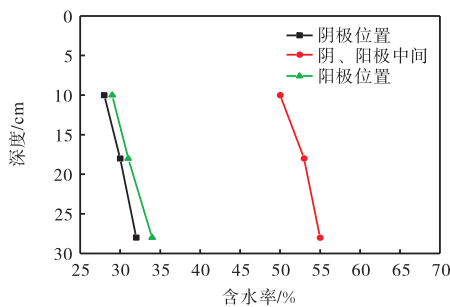
图 14 为含水率随深度变化曲线. 从图 14 中可以发现,含水率随着深度的增加呈现出增大的趋势,这



(a) 传统真空预压



(b) EKG 真空预压-电渗



(c) EKG 辐射式排水板真空预压-电渗

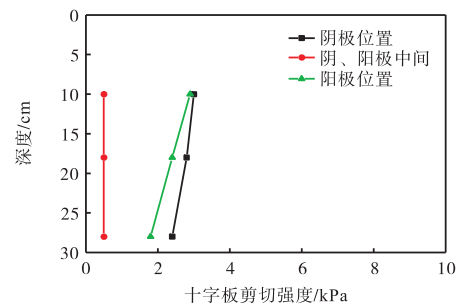
图 14 含水率随深度变化曲线

Fig.14 Curves of water content varying with depth

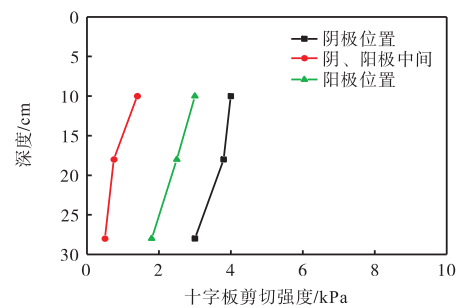
说明表层处理效果较好,例如,传统真空预压的含水率约为 33% ~ 68%,EKG 真空预压-电渗的含水率约为 30% ~ 59%,EKG 辐射式排水板真空预压-电渗的含水率约为 28% ~ 50%. 此外,在阴、阳极(排水板)位置处含水率明显小于其他位置处的含水率,且阴极的处理效果优于阳极位置. 以 EKG 辐射式排水板真空预压-电渗为例,在阴极深度 10 cm、18 cm 和 28 cm 位置处含水率分别为 28%、30%和 32%,而在阳极深度 10 cm、18 cm 和 28 cm 位置处含水率分别为 29%、31%和 34%,约提高了 3.33%~6.25%,这是因为在真空作用下水可以在阴极和阳极排水板排出,在电场耦合作用下阴极的排水量优于阳极,阴极加固效果较好.

### 2.4 十字板剪切强度

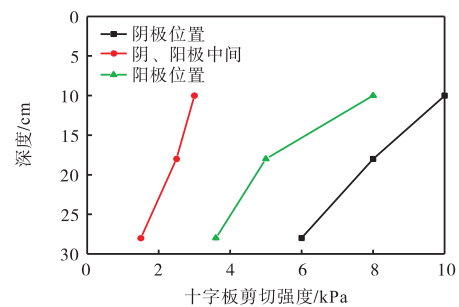
图 15 为十字板剪切强度随深度变化曲线. 从图 15 中可以看出,十字板剪切强度随着深度呈现减小的趋势,与工程实际加固效果一致,这是因为随着深



(a) 传统真空预压



(b) EKG 真空预压-电渗



(c) EKG 辐射式排水板真空预压-电渗

图 15 十字板剪切强度随深度变化曲线

Fig.15 Curves of vane shear strength varying with depth

度增加,真空度减小,导致深部土体处理效果较差.传统真空预压表层强度范围为 0.5 ~ 3.0 kPa, EKG 真空预压-电渗表层强度范围为 1.4 ~ 4.0 kPa,与传统真空预压相比,后者的强度平均提高约 37.7%. EKG 辐射式排水板真空预压-电渗表层强度范围为 3.0 ~ 10.0 kPa,与传统真空预压相比其强度明显提升,提高约 2.44 倍,与 EKG 真空预压-电渗相比其强度提升约 1.5 倍,这说明 EKG 辐射式排水板真空预压-电渗具有一定的优越性,可明显提升土体强度.

## 2.5 重金属 Cu 含量

图 16 为土壤中重金属 Cu(CuO) 含量分布曲线.从图 16 中可以看出,传统真空预压无法起到重金属剔除作用,重金属 Cu 含量约维持在 344 mg/kg.对于 EKG 真空预压-电渗和 EKG 辐射式排水板真空预压-电渗而言,重金属 Cu 含量分布趋势为:随着深度的

增加,重金属 Cu 的含量增大;距离阴极位置越远, Cu 的含量越小.例如,对于 EKG 辐射式排水板真空预压-电渗而言,阳极位置深度 10 cm、18 cm 和 28 cm 处 Cu 含量分别为 260 mg/kg、281 mg/kg 和 296 mg/kg.对于 EKG 真空预压-电渗而言,阳极位置深度 10 cm、18 cm 和 28 cm 处 Cu 含量分别为 272 mg/kg、298 mg/kg 和 300 mg/kg.通过分析可知, EKG 辐射式排水板真空预压-电渗重金属剔除效果优于 EKG 真空预压-电渗方法和传统真空预压法:与传统真空预压相比,重金属剔除提高约 7.85% ~ 13.95%;与 EKG 真空预压-电渗相比,重金属剔除提高约 0.94% ~ 2.92%,但重金属含量仍高于农用地土壤污染风险筛选值,因此在工程实践中需要延长一定时间确保重金属 Cu 的含量低于规定的筛选值.之所以产生上述现象,是因为在电场作用下重金属朝着阴极移动并随着水排出,但 EKG 排水板和 EKG 辐射式排水板容易产生淤堵,导致重金属排出相对较为困难,阴极附近重金属含量高于阳极附近的对应值. EKG 辐射式排水板电极增大了与土体的接触面积,在某种情况下可以缓解排水板淤堵,排出阳离子相对较多.

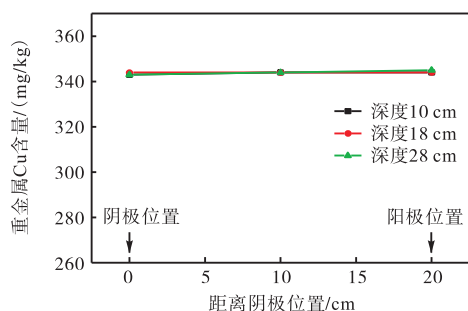
## 2.6 土体微观结构参数

为进一步揭示 EKG 辐射式排水板真空预压-电渗法处理污泥地基加固微观机制,选取 3 种试验方案加固后的土体进行 SEM 试验,如图 17 所示.

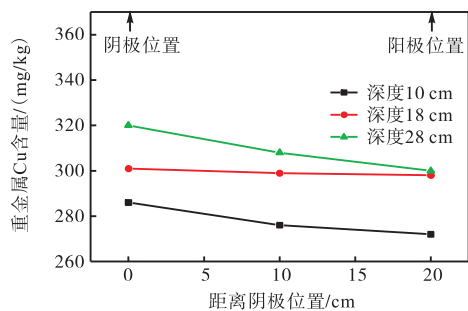
为了减小 SEM 图片的离散性,在模型中心部位选取微观试验土样作为每组的代表性试样.试验过程中确保电子束在样品表面形成最小的束斑,以获得最高的分辨率.光圈的大小根据实际情况选择,以平衡分辨率和图像亮度.通过调节电子束参数、对比度控制器、亮度与对比度的平衡以及光阑来优化图像的对比度,确保在不同处理方式下的图像在对比度上保持一致.对 SEM 图片进行二值化处理,放大倍数选取 5 000 倍,阈值采用 ImageJ 软件中默认形式进行阈值分割,主要分析数据如表 5 所示.

通过分析图 17 和表 5 的数据可知,在电场的作用下, EKG 辐射式排水板真空预压-电渗加固后的土体呈现出凝结块状结构,土体的胶结情况较好,黏粒之间以面-面接触和镶嵌接触为主,导致导电途径发生了变化:在加固初期,导电途径主要为液相导电;随着土体中水分被排出,水中电解质的含量也逐渐减少,黏粒之间以面-面接触和镶嵌接触为主,导电途径主要为固相和液相的交互层.

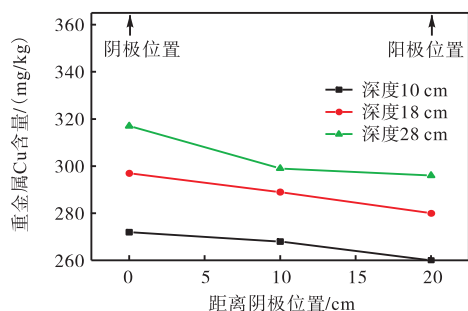
此外, EKG 辐射式排水板真空预压-电渗加固后



(a) 传统真空预压



(b) EKG 真空预压-电渗



(c) EKG 辐射式排水板真空预压-电渗

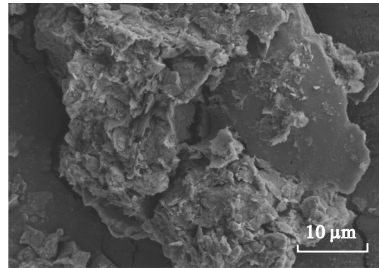
图 16 土壤中重金属 Cu(CuO) 含量分布曲线

Fig.16 Curves of content distribution of heavy metal Cu (CuO) in soil



(a) 传统真空预压

(b) EKG 真空预压-电渗



(c) EKG 辐射式排水板真空预压-电渗

图 17 加固后土体 SEM 图片

Fig.17 SEM images of reinforced soils

表 5 土样微观参数定量分析汇总

Tab.5 Summary of quantitative analysis of microscopic parameters of soil samples

试验方案编号	放大倍数	阈值	孔隙面积/ $\mu\text{m}^2$	孔隙数量	孔隙圆度	表观孔隙率
T1	5 000	116	5 438.5	4 066	0.89	0.133
T2	5 000	110	4 617.2	4 427	0.90	0.125
T3	5 000	120	4 211.4	4 804	0.88	0.121

的土体的孔隙数量增加,这是因为微观结构变化可能导致了部分小孔隙被较大的凝结块填充或压缩,从而使得孔隙数量增加(提高约 18.15%),但孔隙面积和表观孔隙率相对降低.孔隙圆度变化不明显,这说明加固过程中并未显著改变孔隙的原有形态.

### 2.7 能耗分析

能耗分析是衡量工程经济的关键性指标,真空预压-电渗往往需要消耗大量电能,单位排水量能耗是衡量模型试验的经济指标,其计算式为

$$W_e = \frac{W}{Q} \tag{9}$$

式中:  $W_e$  为单位排水量能耗;  $Q$  为排水量, L;  $W$  为总能耗,  $\text{kW} \cdot \text{h}$ .  $W$  的计算式为

$$W = \frac{\int_0^T UI dt}{1000} \tag{10}$$

式中:  $U$  为电源输出电压, V;  $I$  为电路中的电流, A;  $T$  为通电的总时间, h. 需要说明的是,传统真空预压只考虑真空泵消耗能耗,而 EKG 真空预压-电渗和 EKG 辐射式排水板真空预压-电渗需要考虑真空泵能耗和电渗设备的能耗.真空设备电压为 220 V, 电流

为 5.1 A. 电渗设备电压为 10 V, 电流为 2 A. 绘制单位排水量能耗-时间关系曲线,如图 18 所示.从图 18 中可以发现,单位排水量能耗随着时间的增加呈现减小的趋势,传统真空预压的单位排水量能耗最大, EKG 真空预压-电渗和 EKG 辐射式排水板真空预压-电渗的单位排水量能耗基本一致.例如,当时间为 180 h 时,这 3 种方案的单位排水量能耗分别为 76.79 ( $\text{kW} \cdot \text{h}$ )/L、26.12 ( $\text{kW} \cdot \text{h}$ )/L 和 18.76 ( $\text{kW} \cdot \text{h}$ )/L,这说明 EKG 辐射式排水板真空预压-电渗在某种程度上可以降低工程造价.

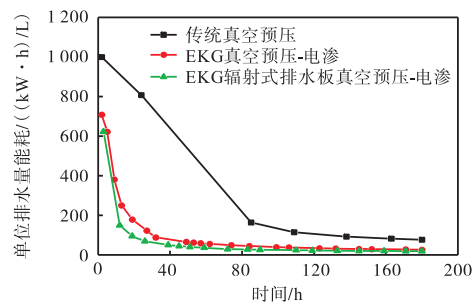


图 18 单位排水量能耗对比

Fig.18 Comparison of energy consumption per unit of drainage volume

### 3 结 论

本文以疏浚污泥地基为研究对象,提出兼顾地基加固和重金属剔除的软土地基加固方法——EKG 辐射式排水板真空预压-电渗法,并通过开展传统真空预压、EKG 真空预压-电渗和 EKG 辐射式排水板真空预压-电渗模型试验,对比分析了排水量、沉降量、平均固结度、加固含水率、十字板剪切强度、土壤重金属 Cu 含量、单位排水量能耗等指标的变化规律,证明了 EKG 辐射式排水板真空预压-电渗法的有效性,得到了如下结论。

(1)EKG 辐射式排水板真空预压-电渗可明显提高地基加固效果.与传统真空预压相比,其排水量增大约 3.17 倍,沉降增大约 1.2 倍,平均固结可达 80.6%,加固后的含水率降低约 20%,十字板剪切强度提高约 2.44 倍。

(2)EKG 辐射式排水板真空预压-电渗可明显剔除重金属 Cu 含量.与传统真空预压相比其重金属剔除提高约 7.85%~13.95%,与 EKG 真空预压-电渗相比其重金属剔除提高约 0.94%~2.92%。

(3)EKG 辐射式排水板真空预压-电渗加固后,黏粒之间以面-面接触和镶嵌接触为主,孔隙数量提高约 18.15%,孔隙面积和表观孔隙率相对降低.孔隙圆度变化不明显,单位排水量消耗最低,可达 18.76 (kW·h)/L。

笔者正在对辐射式排水板施工工艺开展研究,针对高含水率(100%以上)的软土地基,在吹填之前将辐射式排水板按照设计要求布置,或在吹填之后保证吹填土处于流塑状态时采用人工插板的方法将辐射式排水板压入吹填土地基中.在插设辐射式排水板之前,需要组装竖向排水体系与 PHD.然后,在插板机钻杆的头部设计横向插板头,将排水板端部与横向插板头相连,利用液压驱动力将辐射式排水板带入地基中,相关应用已成功在河北沧州黄骅港集疏运体系项目中实现.针对具有硬壳层地表的深厚软土地基,可在插板过程中考虑采用辐射式排水板施工用配套件,施工工艺可参考作者的已授权专利《一种竹节式真空预压排水板及施工方法》<sup>[33]</sup>。

#### 参考文献:

- [1] 杨媛媛, 胡黎明, Ange Nzihou, 等. 疏浚污泥资源化处理试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1323-1327.
- [2] Yang Yuanyuan, Hu Liming, Ange Nzihou, et al. Laboratory tests on valorization technique of dredged sediment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1323-1327 (in Chinese).
- [3] Lu Y T, Chai J C, Ding W Q. Predicting deformation of PVD improved deposit under vacuum and surcharge loads[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2020, 48(1): 32-40.
- [4] Feng S X, Bai W W, Lei H Y, et al. Vacuum preloading combined with surcharge preloading method for consolidation of clay-slurry ground: A case study[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2024, 42(4): 348-361.
- [5] 沈宇鹏, 余江, 刘辉, 等. 增压式真空预压处理站场软基效果试验研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(5): 97-103.
- [6] Shen Yupeng, Yu Jiang, Liu Hui, et al. Experimental study on air-boosted vacuum preloading of soft station foundation[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(5): 97-103 (in Chinese).
- [7] Wang J, Cai Y Q, Ma J J, et al. Improved vacuum preloading method for consolidation of dredged clay-slurry fill[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, 142(11): 06016012.
- [8] Wu Y J, Lin Z X, Kong G Q, et al. Treatment of municipal sludge by Fenton oxidation combined vacuum preloading[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25: 15990-15997.
- [9] Lei H Y, Lou J F, Li X, et al. Stabilization effect of anionic polyacrylamide on marine clay treated with lime[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(6): 04020050.
- [10] Chen H, Chu J, Guo W, et al. Land reclamation using the horizontal drainage enhanced geotextile sheet method[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2023, 51(1): 131-150.
- [11] Wang J, Fu H T, Zhang W K, et al. Effect of pressurization frequency and duration on the consolidation of a dredged soil using air booster vacuum preloading combined with prefabricated horizontal drains[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2023, 51(1): 209-218.
- [12] Feng S X, Lei H Y, Wang L, et al. The reinforcement analysis of soft ground treated by thermal consolidation vacuum preloading[J]. Transportation Geotechnics, 2021, 31: 100672.
- [13] Saowapakpiboon J, Bergado D T, Thann Y M, et al.

- Assessing the performance of prefabricated vertical drain with vacuum and heat preloading[J]. *Geosynthetics International*, 2009, 16(5): 384-392.
- [12] Lei H Y, Li J K, Feng S X, et al. Reinforcement effect and mechanism analysis of dredged sludge treated by alternating prefabricated radiant drain vacuum preloading method[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2023, 51(6): 56-72.
- [13] 冯双喜, 雷华阳, 万勇峰, 等. 新型辐射排水板真空预压加固效果[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(3): 790-805.
- Feng Shuangxi, Lei Huayang, Wan Yongfeng, et al. Ground improvement effect of prefabricated radiant drain vacuum preloading method[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2021, 52(3): 790-805 (in Chinese).
- [14] Lei H Y, Feng S X, Edgard C C, et al. Numerical analysis on ground improvement of vacuum preloading with prefabricated radiant drain[J]. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2020, 8(13): 514-519.
- [15] 张益硕, 周仲魁, 杨顺景, 等. 重金属污染土壤修复原理与技术[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2022(10): 124-134.
- Zhang Yishuo, Zhou Zhongkui, Yang Shunjing, et al. Principles and technologies for remediation of heavy metal contaminated soil[J]. *Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)*, 2022(10): 124-134 (in Chinese).
- [16] 王泓博, 苟文贤, 吴玉清, 等. 重金属污染土壤修复研究进展: 原理与技术[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(8): 2277-2288.
- Wang Hongbo, Gou Wenxian, Wu Yuqing, et al. Progress in remediation technologies of heavy metals contaminated soil: Principles and technologies[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(8): 2277-2288 (in Chinese).
- [17] Ko I, Chang Y Y, Lee C H, et al. Assessment of pilot-scale acid washing of soil contaminated with As, Zn and Ni using the BCR three-step sequential extraction[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, 127(1/2/3): 1-13.
- [18] Lageman R, Pool W, Seffinga G A. In-Situ Boden-sanierung durch elektrokinetischen Schadstofftransport[J]. *Sanierung kontaminierter Standorte*, 1989, 33(11): 255-282.
- Lageman R, Pool W, Seffinga G A. In-situ soil remediation of electric pollutant migration[J]. *Remediation of Contaminated Sites*, 1989, 33(11): 255-282 (in German).
- [19] Sun H L, Weng Z Q, Liu S J, et al. Compression and consolidation behaviors of lime-treated dredging slurry under vacuum pressure[J]. *Engineering Geology*, 2020, 270: 105573.
- [20] Liu F Y, Li H, Wang J, et al. Experimental analysis of a staged vacuum preloading method with PHD-PVD for waste slurry treatment[J]. *Acta Geotechnica*, 2024, 19(5): 2487-2497.
- [21] Wang J, Fu H T, Zhang W K, et al. Effect of pressurization frequency and duration on the consolidation of a dredged soil using air booster vacuum preloading combined with prefabricated horizontal drains[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2023, 51(1): 209-218.
- [22] Liu F Y, Tao Y, Ni J F, et al. Slurry improvement by vacuum pre-loading in combination with electro-osmosis and with dynamic compaction method[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2021, 39(6): 709-718.
- [23] Yang G L, Zha D L, Wang X J, et al. Exploring the nonlinear association between environmental regulation and carbon intensity in China: The mediating effect of green technology[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 114: 106309.
- [24] He C Q, Hu A N, Wang F F, et al. Effective remediation of cadmium and zinc co-contaminated soil by electrokinetic-permeable reactive barrier with a pretreatment of complexing agent and microorganism[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 407: 126923.
- [25] Zhang Y Y, Zang L B, Zhao Y Y, et al. Removal of Pb from contaminated Kaolin by pulsed electrochemical treatment coupled with a permeable reactive barrier: Tuning removal efficiency and energy consumption[J]. *Toxics*, 2023, 11(12): 961.
- [26] Lei H Y, Codjia C E, Feng S X, et al. Reinforcement treatment of dredging sludge using a novel method of electro-osmosis vacuum preloading[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2025, 43(1): 137-153.
- [27] GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- GB/T 50123—2019 Standard for Geotechnical Testing Method[S]. Beijing: China Planning Press, 2019 (in Chinese).
- [28] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

- GB 50007—2011 Code for Design of Building Foundation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011(in Chinese).
- [29] GB 15618—2018 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2018.
- GB 15618—2018 Soil Environment Quality—Risk Control Standard for Soil Contamination of Agricultural Land[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2018(in Chinese).
- [30] 张成良, 刘小泉. 三次样条插值曲线在 Asaoka 法中的应用[J]. 岩土工程技术, 2006, 20(1): 21-24.
- Zhang Chengliang, Liu Xiaoquan. Application of cubic spline interpolation in Asaoka's method[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2006, 20(1): 21-24(in Chinese).
- [31] 王志亮, 黄景忠, 李永池. 沉降预测中的 Asaoka 法应用研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 2025-2028, 2032.
- Wang Zhiliang, Huang Jingzhong, Li Yongchi. Study on application of Asaoka's method to settlement prediction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(11): 2025-2028, 2032(in Chinese).
- [32] 王晓楠, 郭一鹏, 刘江涛, 等. 高原湖相沉积软土地基沉降计算经验系数的推算[J]. 工程地质学报, 2012, 20(6): 1036-1041.
- Wang Xiaonan, Guo Yipeng, Liu Jiangtao, et al. Prediction of empirical settlement coefficient for soft clay ground of plateau lacustrine-deposits[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(6): 1036-1041(in Chinese).
- [33] 冯双喜, 邢道润, 雷华阳, 等. 一种竹节式真空预压排水板及施工方法: 中国专利, 202310030358.8[P]. 2024-10-29.
- Feng Shuangxi, Xing Daorun, Lei Huayang, et al. A Bamboo Type Vacuum Preloaded Drainage Board and Its Construction Method: CN, 202310030358.8[P]. 2024-10-29(in Chinese).

(责任编辑: 武立有)