

# 新型组合真空预压法 在湖泊清淤工程中的应用

周扬, 查晓庭, 刘钦波

(江苏省水利建设工程有限公司, 江苏扬州 225127)

**摘要:**针对河湖淤积及环保绞吸淤泥高含水率、处置难度大的问题,研究采用真空预压技术对绞吸淤泥进行快速脱水与加固处理。通过引入新型防堵排水板、无砂垫层施工工艺,并结合正反向真空预压组合技术,系统验证了该方法在工程中的应用效果。实践结果表明,该技术能够有效控制排泥场沉降和淤泥含水率,显著提高十字板强度,施工工艺简便、效率高、质量稳定可靠。该技术已在新一轮太湖清淤工程中成功应用,可为后续河湖清淤、淤泥固化及资源化利用工程提供参考。

**关键词:**河湖清淤; 防堵排水板; 真空预压; 无砂垫层

**中图分类号:**TV882.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-7839(2026)06-0052-0007

## Application of the novel combined vacuum preloading method in lake dredging engineering

ZHOU Yang, ZHA Xiaoting, LIU Qinbo

(Jiangsu Water Conservancy Construction Engineering Co., Ltd., Yangzhou 225127, China)

**Abstract:** Addressing the siltation issues in rivers and lakes, as well as the challenges posed by the high moisture content and disposal difficulties of environmental cutter suction dredged sediment, research has been conducted on the use of vacuum preloading technology for rapid dewatering and reinforcement treatment of environmental cutter suction dredged sediment. By introducing new anti-clogging drainage boards and sand-free cushion construction techniques, combined with forward and reverse vacuum preloading technologies, the application effectiveness of this method in engineering has been systematically verified. Practical results show that this technology can effectively control the settlement of sediment disposal sites and the moisture content of sediment, significantly improve vane shear strength, and offer a simple construction process, high efficiency, stable and reliable quality. This technology has been successfully applied in the new round of dredging project in Taihu Lake, providing a reference for subsequent river and lake dredging as well as sediment solidification and resource utilization projects.

**Key words:** dredging of rivers and lakes; anti-clogging drainage boards; vacuum preloading; sand-free cushion

### 1 概述

在河湖环保绞吸<sup>[1]</sup>工程中,固化土的处理是关

乎整个工程进度、安全的关键因素。清淤的淤泥质土具有承载力低、压缩性高、稳定性差等特性<sup>[2]</sup>,真空预压是处理此类土质的常用方法<sup>[3]</sup>。相关研究表

收稿日期: 2026-01-04

作者简介: 周扬(1977—),男,高级工程师,本科,主要从事水利施工管理工作。E-mail:2968541703@qq.com

通信作者: 查晓庭(1982—),男,工程师,硕士,主要从事水利施工管理工作。E-mail:zhaxiaoting@126.com

明:与堆载预压相比,真空预压能够节约大量堆载料<sup>[4]</sup>;孙田磊等<sup>[5]</sup>认为真空预压不会产生应力引起的收缩变形而导致地基失稳剪切破坏,对周边围堰无挤淤影响;陈平山等<sup>[6]</sup>认为传统真空预压法也存在一定缺点,如在超软的淤泥土质地区,可能无法堆载砂垫层,且较高的有机质含量也使得排水板容易堵塞,周围形成明显土柱,进而引起淤泥土体表面沉降不均匀而影响处理效果与工程进度;武亚军等<sup>[7]</sup>研究显示真空度随着高程下降逐渐衰减,导致深层土体加固效果差,也是该方法的短板;为进一步研究和解决实践工程中排水板淤堵、真空衰减问题,孙立强等<sup>[8]</sup>提出“两次插板真空预压法”,虽提高了加固效果,但两次插板成本显著增加,使得预压固结显得不经济。

新型组合真空预压法是对固化淤泥处理技术的改进,与传统真空预压法不同,新型真空预压法直接在软土地基上设置排水装置并覆盖真空膜,采用新型防淤堵塑料排水板,运用正反向组合抽真空技术<sup>[9]</sup>实现软基加固。该法相较于传统方法无需添加新设备,仅需增加连接反向排水板的PVC钢丝支管即可<sup>[10]</sup>,能显著提高地基强度,减少沉降量并缩短工期,特别适用于工期紧张、无法使用砂垫层或排水板易堵的粉黏土质地区。

本文结合太湖新一轮治理生态清淤工程,针对湖底淤泥高含水、排水板易堵塞等难题,提出并应用新型真空预压处理工艺,实现了绞吸淤泥的快速脱水与固结,处理后含水率稳定降至50%以下,明显优于传统方法,体现了该工艺在高含水软基处理中的创新性与适用性。研究基于现场实测与试验数据,系统分析了沉降、含水率及强度变化规律,总结了关键施工要点和技术优势。相关研究成果可为类似环保疏浚与软基处理工程提供参考,进一步提升太湖治理中生态清淤工程的技术水平。

## 2 工程概况

### 2.1 建设内容

武进区太湖新一轮生态清淤工程一期施工三标主要建设内容为湖泊底泥环保绞吸施工,清淤区域位于武进区竺山湖湖区水域,面积约7万m<sup>2</sup>,环保绞吸方量为30.98万m<sup>3</sup>。施工采用环保绞吸式挖泥船清淤,清淤底泥通过管线输送至陆上排泥场进行固结处理。

### 2.2 淤泥固化要求

按照设计要求,总抽真空时间不少于90 d,抽真

空达到设计要求恒载满载时间,同时根据实测沉降曲线推算平均应变固结度不低于80%,监测数据复核满足要求后即可停泵卸载<sup>[11]</sup>。固化土验收要求是:含水率不高于55%,十字板强度<sup>[12]</sup>不小于15 kPa。

### 2.3 固化淤泥土质

湖区生态清淤场地内浅部地层以软塑-流塑状淤泥为主,工程地质条件较差。湖区生态清淤场地以含有机质、腐植物淤泥质土,云母与碎屑粉土,含铁锰质氧化物粉质黏土为主,有臭气味。清淤吹填至排泥场的泥浆,含水率在29%~467%范围内变化,表层(0~10 cm)底泥含水率平均值为155%±91%,最高约467%,随着深度的增加,底泥的含水率逐渐降低。环保绞吸前通过检测得出平均含水率约为170.0%,比重约为1.05,淤泥浆含水率过高,粉质有机质严重,不适合直接进行真空预压排水固结,需使用特殊防淤堵排水板、反吹工艺快速排出多余水分。

## 3 施工方案

### 3.1 无砂垫层真空预压法

淤泥质土或者超软土承载力差,无法直接上铺砂垫层或需要先采取自然固化等措施后铺设,如此势必影响工程进度与成本。无砂垫层真空预压法的做法是将防堵塑料排水板与钢丝软透水管绑扎,形成水平排水系统,钢丝软透水管与抽真空系统直接连接。其中透水软管主管网络和支管网络构成水平抽水层,其功能与砂垫层相同<sup>[13]</sup>。无砂垫层采用手形接头与真空主支管直通技术,无需砂垫层作为横向排水结构层,不仅能提升真空传递的效率,有效化解真空度在传输过程中沿程衰减<sup>[14]</sup>的难题,还能降低成本投入、保护生态环境,实现可持续发展。

### 3.2 新型防淤堵塑料排水板

新型防淤堵塑料排水板,滤膜应与板芯经一体式热熔工艺处理,滤布和板体几乎形成一个整体,增加了板体强度且可有效防止塑料排水板折断。塑料排水板的板芯槽齿呈均匀分布,受力分布更加合理,不存在倒伏情况,同时确保了板芯排水通道畅通性,表面纵向凹纹增加了排水比表面积。该设计有效解决了排水过程中的淤堵问题,保障了排水通道的顺畅。防淤堵塑料排水板和普通塑料排水板分别如图1、图2所示。

### 3.3 正反向组合抽真空预压技术

常见的软土或淤泥质地基处理多采用真空预

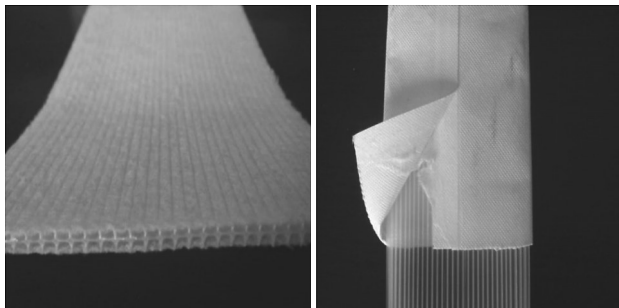


图1 防淤堵塑料排水板 图2 普通塑料排水板

压法,其核心原理是在软土地基里设置竖向排水结构,以大气负压作为正向作用力,施加在被密封膜覆盖的土体上,进而在膜内形成真空负压荷载,促使土体内的水和空气沿排水通道排出,最终使土体得到有效加固。传统真空预压法已经广泛应用于软土地基处理,但是其采用的是在竖直排水板顶部抽真空的方式,而真空压力沿竖直排水板传递过程中会出现逐渐衰减的现象,因此传统真空预压法存在深层土体加固效果不佳的问题。

与正向排水板相比,反向排水板抽真空将密封接头安装在排水板底部,负压源位于底部,真空度由下向上传递,再通过真空管路将排水板连接到真空泵,进行反向抽真空,从而提升对深层土体的有效加固。正反向组合排水板真空预压法结合了2种真空预压法,在土体内实现2种相反的排水路径,确保浅层和深层处理效果。真空预压法原理示意如图3所示。

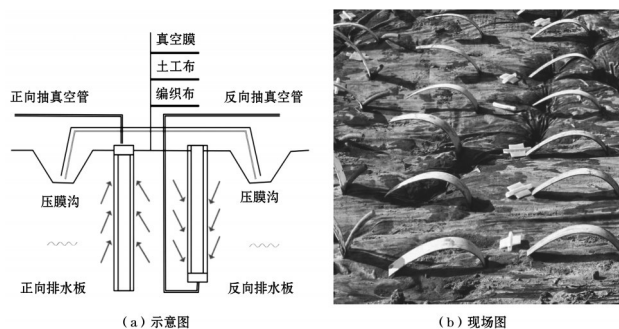


图3 正反组合抽真空示意图与现场图

## 4 组合施工技术

### 4.1 施工工艺

本次处理约7.5万 $m^2$ ,分6个加固区,处理将采用的技术参数为:正向塑料排水板插板深度暂时按4.0~8.5 m控制,间距0.8 m,反向抽真空管插打深度

4 m,间距0.8 m,按每插设2排正向塑料排水板再插设1排反向抽真空管来布置。组合真空预压施工流程见图4。

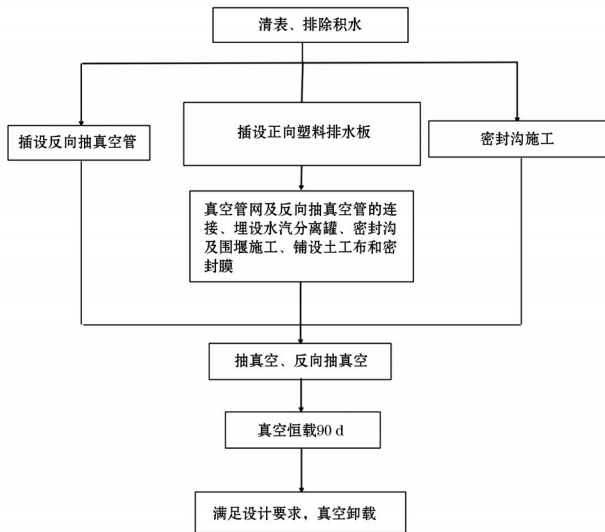


图4 组合真空预压施工流程

(1)防堵型塑料排水板进场与检测。武进区太湖淤泥软土地基采用新型组合式真空预压法进行处理时,所用塑料排水板主要性能指标见表1。

(2)各进场材料进场检测合格后,排除排泥场表面积水,布设一层200 g/ $m^2$ 的编织布和20 cm厚的泡沫板作为工作垫层。

(3)浅层处理采用人工插设塑料排水板,排水板长度约5 m;深层处理采用机械插设塑料排水板<sup>[15]</sup>,排水板长度约7~8 m,反向排水板采取带管一起打设法,将反向真空管专用接头固定在插杆底端,并对准桩位,2人共同用力,将反向真空管插入土体,直至设计深度。

(4)正向排水板板长外露50 cm,反向真空管上端的钢丝软管高出泥面50 cm,均与编织布上真空支管滤管进行绑扎。

(5)连接地面水平排水系统及增压系统,先铺设真空管系统,包含真空主管与真空支管。完成插板作业后,利用手型接头将排水板两两相连,此手型接头再与真空支管接通。其中,真空支管选用直径25 mm的钢丝软管,它再与真空主管相连,真空主管采用的是直径50 mm的钢丝软管。接着,真空主管与水气分离罐连接,水气分离罐则通过直径75 mm的PVC管和水环式真空泵相连。该机组每套配备2台55 kW的水环式真空泵,1台运行,1台备用。

表1 防淤堵塑料排水板的各项指标

	项目	单位	技术指标	备注	
材料	芯板		聚乙烯或聚丙烯	纯新料	
	滤膜		涤纶丙纶无纺布物	板芯滤膜热熔	
板芯	厚度	mm	4.0±0.2		
	宽度	mm	100±3		
	舌形撕裂强度	N	≥30		
	抗弯折性能	mm	无撕裂	180度对折5次	
复合	抗拉强度	kN/10 cm	≥2.0	延伸率10%时	
	纵向通水量	cm <sup>3</sup> /s	≥40	侧压力350 kPa	
滤膜	抗拉强度	纵向干态	N/cm	≥20	验收率10%
		纵向湿态	N/cm	≥20	延伸率15%
	有效孔径	μm	80~130	O <sub>98</sub>	
	气力比降	3 cm	686~1 000 pa	工业酒精98%	

(6)设置密封沟、铺设1层无纺布和2层密封膜。

(7)正式抽真空期间要求膜下真空度大于80 kPa,处理连续抽真空90 d后检测土体指标均合格后卸载真空<sup>[16]</sup>。

#### 4.2 施工重点及难点

太湖淤泥颗粒度很细,黏性较大,渗透系数低,对于真空度的传递以及排水有着较高要求。本工程使用了防淤堵型的整体渗滤排水板,滤膜制作工艺改变了传统的压扎方法,采用新型的拉丝工艺,淤泥中较细颗粒可以通过滤膜随着孔隙水排除,大颗粒在滤膜表面形成骨架结构,达到防淤堵效果。反向真空管改变了细颗粒淤泥中真空传递效果差的问题,使真空度由下部往上传递,与正向排水板同时使用,保证淤泥中真空分布更均匀。

太湖环保绞吸吹填的淤泥含水量非常高,刚吹填的淤泥比重仅为1.1左右,且吹填深度最大约8 m,为保证施工作业中有安全的工作面,必须在淤泥表面创造一个稳定的工作垫层。

施工前期,通过加入絮凝剂,使固体颗粒沉淀,同时排出淤泥池表面浮水。之后铺设一层200 g/m<sup>2</sup>的编织土工布,编织布缝合时必须使用双道缝合线,保证其具有一定的抗拉强度,编织土工布的边缘需使用竹桩牢固的定在坝体边缘。

工人插打排水板、反向增压管以及连接真空管网施工时,使用厚泡沫板做成船体,并且穿戴好救生衣。工作船上放置救生圈及绳索,施工时须2人

一组进行,且配备专人进行安全监督旁站,保证整个施工过程安全有序进行。

## 5 数值监测

### 5.1 地表沉降监测

实测预压加载过程中地面沉降量,严格把控加载荷速率,绘制 $t-s$ 曲线(即时间-沉降关系曲线),以此推算土体固结度<sup>[17]</sup>。

在完成塑料排水板插板且尚未启动抽真空泵时,应设置沉降标。该沉降标由钢板与钢管组合而成,其中钢板尺寸规格为500 mm×500 mm×20 mm;钢管选用直径38 mm、壁厚3.5 mm的无缝钢管,每节长度设定为50 cm,采用丝扣连接方式进行组装,且钢管顶端设有醒目的红色标记。加固区域内,共计布置了20个沉降观测点,采用DSZ2水准仪开展沉降观测工作。采用二等水准测量标准。沉降标布置完即开展首次观测,将此次观测所得数据作为初始基准值,后续观测数据均与此值进行对比分析,进而计算出各阶段沉降值。

沉降观测频率安排如下:自开始抽气作业至填土施工阶段,每日进行1次观测;填土施工完成后,每2日进行1次观测,直至地基沉降达到稳定状态。

### 5.2 十字板剪切强度

阶段地基处理结束后,于每个真空预压分区开展取样测试。每个分区设置5个取样点,首点取样深度设定在插板板深以下2 m处,再进行分层检测。

## 6 加固效果

设计要求:总的抽真空时间不少于90 d,按照设计要求,抽真空达到设计要求恒载满载时间。

固化土验收要求:固结后的淤泥承载力学特征值不小于50 kPa,含水率55%~65%,十字板强度不小于15 kPa。

按施工方案要求,抽真空过程中进行地表沉降、十字板强度以及含水率等监测试验,其中地表沉降数据统计结果见表2。

根据地表沉降观测数据,加固区域平均沉降约为2 167 mm,最大沉降2 364 mm。

### 6.1 固结度推算

固结度是指土壤在所受载荷下发生的初始和终点位置之间的垂直位移量,也就是土壤沉降变形。土壤受载荷作用发生压实和压缩后,沉降造成的变形会引起土体内部孔隙度的变化,导致其固结<sup>[18]</sup>。保持大气压荷载一定的情况下,在沉降数据集中随机抽取10个点,绘制 $t-s$ 曲线(荷时间、沉降曲线)。若相邻2次观测所得的沉降差值为零,则

表2 固化区地表沉降统计数据

区段	检测点	初始高程/m	本次高程/m	累计沉降量/mm	平均高程值/m	平均沉降/m
一区	C1	8.604	6.255	1 916	6.208	2 176.666
	C2	8.621	5.680	2 314		
	C3	8.631	6.688	2 300		
二区	C4	8.626	6.307	1 973	6.430	2 073.000
	C5	8.613	6.331	2 137		
	C6	8.634	6.653	2 109		
三区	C7	8.642	6.476	2 110	6.511	2 364.000
	C8	8.621	6.525	2 057		
	C9	8.622	6.532	2 925		
四区	C10	8.649	6.564	2 514	6.132	2 363.333
	C11	8.656	5.697	2 324		
	C12	8.678	6.135	2 252		
五区	C13	8.688	6.332	2 377	6.414	2 087.500
	C14	8.658	6.426	2 071		
	C15	8.664	6.311	1 659		
	C16	8.701	6.587	2 243		
六区	C17	8.684	7.005	2 030	6.746	1 941.750
	C18	8.691	6.458	1 823		
	C19	8.715	6.654	2 061		
	C20	8.721	6.868	1 853		

意味着土体已停止沉降,此时所对应的沉降数值即为土体的最终沉降量<sup>[19]</sup>。由此来推算加载90 d时淤泥土体固结度,累积沉降曲线见图5。

从图5可以看出,在105 d的时候均出现了相邻2次观测沉降差为零,可以认为固结沉降已经达到终点,依次沉降根据插值法<sup>[20]</sup>推测90 d的10点固结平均值。经计算90 d固结度平均值为99.04%,远远

大于设计要求的平均应变固结度。

### 6.2 固化后含水率

固化后的含水量可以通过试验精确测定,也可以通过沉降量来间接求得。经过测量及计算,目前地表沉降的平均值约为2.16 m,泥浆池初始面积约为7.5万 $m^2$ ,目前泥浆池面积约为5.4万 $m^2$ ,通过代入棱台计算公式<sup>[21]</sup>得出,抽真空期间排水体积约为

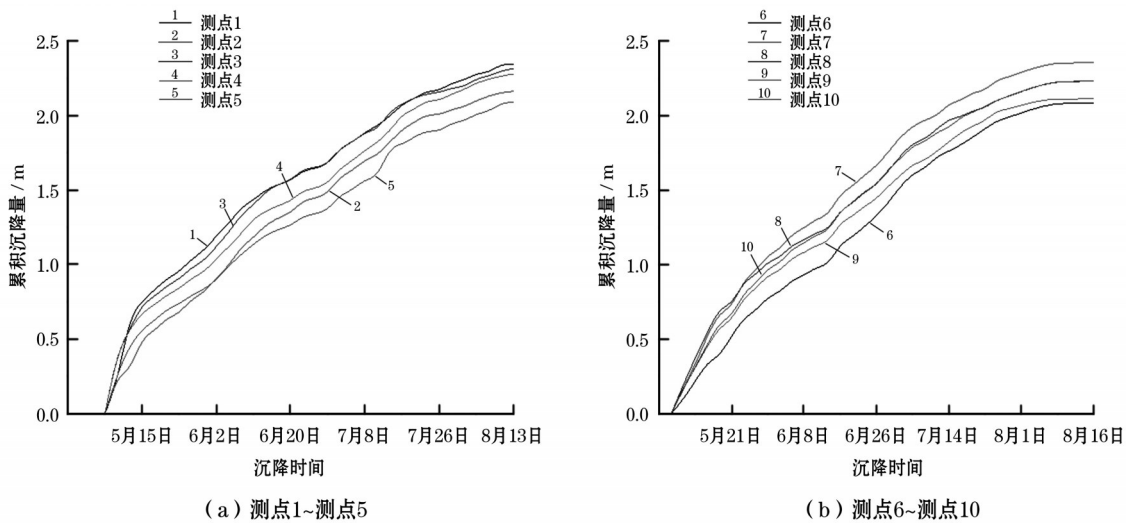


图5 累积沉降曲线

13.87万 $\text{m}^3$ ,按环保绞吸总泥量30.98万 $\text{m}^3$ 计算,固结泥量约为17.11万 $\text{m}^3$ 。

原淤泥含水率为170%,淤泥比重为1.05,根据总土固体重量不变计算出固化泥里含水为35.4%。因此,真空固结以后,含水量完全满足设计要求,满足了高标准农田改造的要求。

### 6.3 十字板强度

为更好地反应土体的十字板剪切强度沿深度的变化情况,分别将距离土体表面2 m、4 m和6 m位置处淤泥质土体的十字板切强度进行检测。河道区吹填土深度(0~2.0 m)内的十字板剪切抗剪强度单孔平均值为25.57 kPa,原状土4 m深度(2.0~4.0 m)内原状土的十字板剪切抗剪强度平均值为21.67 kPa,原状土6 m深度(4.0~6.0 m)内原状土的十字板剪切抗剪强度平均值为20.19 kPa。由此可以看出,真空预压后现场试验的十字板强度随深度变化不大,且均符合设计要求。

## 7 成本分析

根据过往传统真空预压法经验,真空度随着高程下降逐渐衰减导致深层土体加固效果差。以往解决办法是二次插板,在预压开始时先插一半排水板并抽真空,等土体有一定强度后再布置插入新的排水板,继续对土体进行抽真空。

(1)二次插板费用分析:本工程淤泥土质易堵,需采用防堵排水板,本工程先进行一次插板到4 m,进行表层淤泥固化,固化达到设计值后,插入排水板至设计深度8 m。由此产生的材料费用主要来源于表层淤泥固化的厚度,按照固化量一半计算,此

方法需额外增加2 m的排水板长度用于二次插板以及二次插板产生的人工费。

(2)新型组合费用分析:新型组合采取2排正、1排反的施工方法,费用主要来源于反向真空管插入长度,以及多增加的人工费。

人工费抵消后,计算材料的费用,7.5万 $\text{m}^2$ 面积需插板11.72万根,二次插板法需增加23.43 m防堵排水板,新型组合法需增加反向真空管15.63 m,防堵排水板价格约为1.5元/m,真空管价格约为2元/m,新型组合法节约成本为3.885万元。

## 8 结语

工程应用试验结果表明,反向增压式真空预压新型固化工艺能够有效解决高含水淤泥脱水慢、排水易堵及深层固结不足等问题,各项检测指标均优于设计要求,性价比更高。其一,无砂垫层真空预压技术用于承载力差的淤泥质软土固化加固,效果良好,且具有工序简单、无需砂石料等优势,能高效施工并控制成本;其二,新型防堵排水板有效解决淤堵问题,保证排水顺畅;其三,正反向抽真空组合施工,让土体固结更均匀,孔隙水更易排出,提升了深层土体加固效果,使土体强度沿深度分布更均匀。反向抽真空可将真空直接输送至下部淤泥,弥补传统抽真空沿深度真空衰减的缺陷,反向真空管在抽真空前期快速降水使上部淤泥由浮容重变为湿容重<sup>[22]</sup>,对下部淤泥形成载荷作用,提高淤泥的固结速度。同时,其长期性能及复杂工况下的适应性仍需进一步研究,未来可通过多案例对比与长期监测,不断完善理论研究与技术体系,为该工艺的

推广应用提供更加充分的支撑。

#### 参考文献:

- [1] 王睿,吴少华,栗双虎,等. 环保型绞吸船在湖泊清淤中的应用研究[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2024(10):0087-0092.
- [2] 高昊. 软土地基处理技术在市政路桥施工中的应用[J]. 工程技术研究,2025,10(13):86-88.
- [3] 王军,张凯宇,倪俊峰,等. 考虑土体盐碱化影响的注浆絮凝-真空预压法加固疏浚淤泥试验研究[J]. 岩土工程学报,2025,47(4):801-810.
- [4] 谭舟洋. 真空堆载联合预压法在市政道路软基处理中的应用[J]. 黑龙江交通科技,2021,44(11):6-7.
- [5] 孙田磊,杨福麟,陈伟明,等. 新型真空预压黏土密封墙施工设备及其应用[J]. 水利水运工程学报,2009(3):80-85.
- [6] 陈平山,董志良,张功新. 新吹填淤泥浅表层加固中“土桩”形成机理及数值分析[J]. 水运工程,2015(2):88-94.
- [7] 武亚军,陈浩,VU Quoc Vuong,等. 正反向排水板真空预压法在地基处理工程中的应用[J]. 水运工程,2024(7):217-225.
- [8] 孙立强,闫澍旺,李伟,等. 超软土真空预压室内模型试验研究[J]. 岩土力学,2011,32(4):984-990.
- [9] 李坤,徐向明,邱韩,等. 基于不同交替频率下的正反交替式真空预压法加固效果试验研究[J]. 科技和产业,2025,25(19):16-24.
- [10] WU J Q, LIU X, LUO X, et al. Improvement of marine slurry by vacuum preloading and air-booster via a reverse prefabricated vertical drain [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2024, 42(2): 149-160.
- [11] 郭勇,顾长存. 软土地基排水板堆载联合预压数值模拟研究[J]. 粉煤灰综合利用,2020,34(2):53-56.
- [12] 闫澍旺,封晓伟,侯晋芳,等. 用十字板强度推算软黏土抗剪强度指标的方法及应用[J]. 岩土工程学报,2009,31(12):1805-1810.
- [13] 袁保军,贾磊. 无砂垫层真空预压在吹填淤泥场地河道边坡加固中的应用[J]. 港口航道与近海工程,2024,61(6):79-82.
- [14] 刘泉伟,李朝建,周东兴. 水平排水板真空预压法加固疏浚淤泥研究综述[J]. 红水河,2025,44(4):37-42.
- [15] 王武,王江. 水下塑料排水板插设技术与设备发展研究[J]. 浙江水利科技,2024,52(3):91-95.
- [16] 肖策. 真空联合堆载预压法施工中膜下真空度监控分析[J]. 施工技术,2013,42(增刊1):374-376.
- [17] 梅国雄,宰金珉,殷宗泽,等. 沉降-时间曲线呈“S”型的证明及其应用——从土体本构关系[J]. 岩土力学,2005,26(增刊1):21-24.
- [18] 林本义. 按沉降计算固结度取值方法的探讨[J]. 水运工程,1994(4):6-9.
- [19] 刘成民,戚玉红. 沉降曲线图解法在盐田港二期工程中的应用[J]. 港工技术,2006(4):50-51.
- [20] 陈莘莘,胡英,张玮,等. 极限上限分析的区域光滑径向点插值法[J]. 应用数学和力学,2025,46(6):791-799.
- [21] 成如刚. 基坑土石方几种体积计算公式的适用分析[J]. 建材与装饰,2020(7):149-150.
- [22] 何强. 基于正交实验法的坝坡稳定影响因素敏感性分析[J]. 地下水,2025,47(1):179-181.