

# 吹填土处理技术综述

卢一林

华北水利水电大学土木与交通学院, 河南 郑州

收稿日期: 2023年7月23日; 录用日期: 2023年8月13日; 发布日期: 2023年8月23日

## 摘要

新世纪以来, 随着我国沿海城市经济、建筑飞速发展, 陆续开展的围海造陆工程极大地缓解了对土地资源的需求。吹填土地基的力学性能相较于一般地基更差, 大规模的围海造陆工程遇到了多种新问题, 同时也积累了丰富的吹填土处理的理论经验和实践经验, 推动吹填土处理技术的发展。文章简要回顾了我国吹填土处理技术的研究, 重点总结了近年来逐渐发展的有特点和代表性的吹填土处理新技术, 提出了相关技术的适用条件和优缺点, 介绍了相关处理技术规范, 探讨了吹填土处理技术的发展趋势, 并对未来吹填土处理技术的发展方向提出了思考和展望。

## 关键词

吹填土处理, 规范, 真空预压, 联合技术

# Review of Dredger Fill Improvement Technology in China

Yilin Lu

School of Civil Engineering and Communication, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: Jul. 23<sup>rd</sup>, 2023; accepted: Aug. 13<sup>th</sup>, 2023; published: Aug. 23<sup>rd</sup>, 2023

## Abstract

Since the beginning of the new century, with the rapid development of the economy and construction of China's coastal cities, the successive projects of encircling the sea and reclaiming land have greatly alleviated the demand for land resources. The mechanical properties of the blow-filled soil foundation are worse than those of the general foundation, and the large-scale sea-encircling land reclamation project has encountered a variety of new problems, but at the same time, it has accumulated rich theoretical and practical experience in dredger fill treatment to promote the de-

velopment of dredger fill treatment technology. This paper briefly reviews the research of dredger fill treatment technology in China, focuses on summarizing the characteristic and representative new technology of dredger fill treatment that has gradually developed in recent years, puts forward the applicable conditions and advantages and disadvantages of related technologies, introduces the relevant treatment technical specifications, discusses the development trend of dredger fill treatment technology, and puts forward thoughts and prospects for the development direction of blow fill treatment technology in the future.

## Keywords

Dredger Fill Treatment, Specification, Vacuum Preloading, United Technologies

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

新世纪以来,我国沿海城市飞速发展,如:上海、浙江、厦门等城市大力兴建建筑,经济腾飞的同时,对土地资源的需求也与日俱增,因此沿海城市开展了大量的围海造陆工程,大量的吹填土地基处理工程,给我国的土地资源规模带来了新的挑战,同时也是一份新的机遇,能够极大地缓解我国土地资源紧缺地问题,积极促进我国经济发展。

我国围海造陆的历史悠久,从古代的精卫填海到汉代的潮滩匡围、浙东大沽塘到新中国成立以来的围海造地用以开垦农田、养殖鱼虾,再到如今的填海造陆,已经积累了丰富的工程经验和理论。

相较于一般软土地基,吹填土地基的力学性能更差,吹填土含水量高、抗剪强度低、压缩性大,不经处理的吹填土地基承载力不足,沉降大,极易发生液化、地基塌陷,因此亟待研究吹填土的处理技术,提高吹填土地基承载能力,保证国家和人民的生命和财产安全。

## 2. 吹填土处理技术现状

吹填土的处理在地基处理内是一种非常特殊的情况,由于新近吹填的特有的不良工程特性[1],承载力近乎为零,处理吹填土工程的难度大且时间久,是一项长久且耗资巨大的项目。吹填土有一个重要的问题是土体液化[2],土体液化会导致吹填区域的地基不稳定,承载力过低容易发生沉降、塌陷等,对于吹填土工程的安全是一个不利影响[3]。通常,对于吹填土处理现场要进行预先处理,来达到施工机械进场的要求,进而能够进一步加固。对吹填土的处理原始的做法是围堰后进行吹填,用两年的时间进行吹填土自然固结,达到要求后再加固处理,因此这种方法进度非常慢且经济消费巨大。

在沿海地区,砂土分布区域和地震带区域往往会有相当大的重叠,在地震作用下,地基下层砂土由于外荷载的反复作用,土体的孔隙水压力上升,骨架应力逐渐消失使得砂土临近悬浮状态,几乎丧失抗剪能力,发生砂土液化现象。液化会导致土体承载力严重降低,产生喷水冒砂、地基失稳等严重情况。

因此如何能够快速加强吹填土体的抗液化能力,提高土体的承载能力和稳定性,是需要深入研究的问题。处理吹填砂土通常从对土体施压排除土体中水分子、振动土体、使用材料提高土体渗透性等方向施工,实际工程中考虑进度和经济性,对于吹填土地基通常采用静力排水固结法、动力排水固结法、桩基础法、振动排水固结法和复合地基法,如表1所示。

**Table 1. Main dredger fill treatment techniques and classification**  
**表 1. 主要吹填土处理技术及分类**

类别	技术
静力排水固结技术	堆载预压法、真空预压法、降水预压法、排水板法等
动力排水固结技术	强夯法等
桩基础技术	水泥土搅拌桩、预应力管桩、沉桩挤密法等
振动排水法	振杆密实法、激振排水法等

排水固结法通过对地基施加荷载或者其他方式，达到促进土层孔隙中的水排出的目的，常见有堆载预压法、真空预压法[4]、降水预压法、排水板法等，是处理吹填淤泥土地软土地基的常规技术。20世纪50年代 Kjellmen 最早提出真空预压法，通过抽取空气达到真空的负压的效果，能够降低土体的孔隙水压力，实现密实土体。堆载预压[5]主要分为排水部分和加压部分，固结解析逐步考虑了渗透系数、地基应力等。静力排水固结技术能够处理较大范围的吹填土地基，且施工操作简单，施工过程相对可控；缺点是需要较长的处理时间，只宜处理较前的软土地基，厚度较大的地基往往需要数月乃至更长时间。动力排水固结技术是将动力作用和空间排水体系结合，设置水平和垂直通道，使得动力作用下的孔隙水通过事先设置的排水通道，从而加快吹填土体的排水固结，提高密实度，减小工后建筑荷载作用下的后期沉降。桩基础法的施工效果较好，通过排列布桩的方式能够较好加固吹填土地基，如：水泥土搅拌桩的施工机械简单，施工速度快，但是施工中无法较好的控制施工质量。振动排水法利用共振效应，实现能量从振动工具到土的最佳传递，能够提高振动密实效率，并且可以多层土体同时振动，达到排水加固的目的。以上方法各有优劣，适应于不同条件的地基处理工程，如表2所示。

**Table 2. Advantages and disadvantages of main dredge fill treatment technology**  
**表 2. 主要吹填土处理技术优缺点**

类别	优点	缺点
静力排水固结法	处理范围较大，施工操作简单，施工过程相对可控	适用较浅的软土地基，较厚的地基需要数月甚至更久
动力排水固结法	基本适用于各种土壤类型，能够快速施工	对施工设备要求高，不适用于含水量较高的土体，对周围环境影响较大
桩基础法	施工效果较好，多数施工较为简单	经济效益较低，成本较高，不适合大范围推广
振动排水法	施工速度快、处理时间短、适用土壤类型广、经济效益较高、加固范围较大	需要选用合适的激振器或者工具，适用于软弱土壤和砂土

### 3. 吹填土地基的处理规范和标准

河海大学和上海港湾软基处理公司会同相关单位总结了常用吹填土地基处理方法，并以此为基础，增加了多种近年来的新方法、新技术，编制了 GB/T51064-2015《吹填土地基处理技术规范》[6]，规范中的新方法、新技术都是相关工程证明有出色的经济效益和技术效益，如：

1) 详细规定了不同类型吹填土的要求与工程场地形成的过程，提出了不同土质、不同参数吹填土的分类标准，以及如何处理不同种类吹填土的方法；提出了工程中对吹填土标高、排水等方面的要求；提

出了考虑沉降的计算方法，针对吹填工程中吹填土分类的要求与场地的形成进行了详细叙述。

2) 详细描述了勘察吹填土区域所需的情况，如：各种土壤分布情况、吹填土施工使受自然环境特性的因素、吹填土料的适用性以及相关必要的室内试验。此外，添加了在吹填区进行勘察的规定条件，除了提供施工所必需的土体地质资料和吹填土地基处理设计外，还需要给出对吹填土施工区域的处理土体的建议。

3) 提供一种简单易行的方法，该方法常常被其他规范忽视，即翻晒和压实。针对翻晒和压实，提供了翻晒适用的条件和翻晒时间及方法，此外提出了碾压法相关的压实工艺。

4) 提供了许多新型工艺，如：降水强夯法、吹填土固化处理、振动水冲法、电渗法等，分别给出了相关的施工办法和工艺要求，多数工艺已在相关工程中取得良好的效果。

《吹填土地基处理技术规范》的提出解决了国家现有规范无法满足处理含水率高、渗透性差、固结效果不好的吹填土材料的工程需要，解决了我国沿海地区由于土地资源紧张带来的围海造陆、新岛屿建设等问题，并给出了吹填法的要求和规范。规范同样考虑到近年来的新技术，将工程项目中处理效果较好、经济效益较高的新技术纳入规范中，如振动水冲、固化预处理、电渗法等，规范还介绍了新技术的设计工艺、施工流程和计算方法，提出了新技术的优点和发展方向，如：电渗法能够短时间内达到降低土体含水量的目的且基本不扰动土体，研发新型电极材料能够逐渐克服腐蚀问题，降低电极对土体的腐蚀。

#### 4. 吹填土处理技术进展

近年来随着大面积的围海造陆工程开展，对于吹填土地基的处理不再满足于地表、以及浅层次的地基，大规模的工程需要处理效果好、固结时间快、经济效益高且对环境友好的新型吹填土处理技术。吹填土地基表层的承载力过低，在工程中有时无法进行处理，因此吹填土处理技术近年来逐步向表面预处理、多技术联合、改进排水体方向发展。在工程实践中由于对吹填土地基处理和深厚吹填土地基处理的技术需要，取得了多方面处理技术的进展。

工程实践技术发展的同时，计算机有限元分析软件的进步也带来了数值模拟技术的进步，使用 ANSYS、ABAQUS、FLAC 等软件结合工程建立相关数值模型，能够研究一些不易实践的流程，对于现场施工有一定程度上的指导意义，还可以提供研究方向。

吹填土处理技术发展有如下六个特征：

- 1) 由单方面处理技术向复合处理技术发展；
- 2) 静力处理技术和动力处理技术相结合；
- 3) 机械技术处理和化学剂结合；
- 4) 复合处理技术和单方面处理技术结合；
- 5) 处理技术和有限元模拟结合；
- 6) 物联网智慧检测技术发展。

其中，随着围海造陆工程需求逐步提高，真空预压技术方面取得了突破性进展，真空预压技术利用的原理是负压加固，技术工艺相对成熟，施工流程相对简单，能够很好地联合其他技术共同处理土体，因此真空预压联合技术的发展迅速，真空预压联合电渗、真空-堆载联合预压、真空联合强夯等都取得了较大的进展。而堆载预压法采用的原理是通过增大吹填土间的孔隙水压力来加固土体，电渗法利用电场的达到吹填土地基加速排水达到固结的目的。

##### 4.1. 真空预压联合技术

真空预压技术联合其他技术得到了广泛的应用，包括真空联合堆载预压法、化学药剂真空法、电渗

联合真空法、强夯 - 真空联合加固等；并取得了丰富的成果，如表 3 所示。吴松华[7]等分别开展了真空预压联合水袋堆载、电渗法、增压式工艺，并评价了三种联合工艺的效果。

**Table 3.** Combined technology of vacuum preloading

**表 3.** 真空预压联合技术

类别	特点	缺点
真空预压联合堆载	在预压阶段提高预压荷载，使得孔隙水的排除速度大大提高	适用较浅的软土地基，较厚的地基需要数月甚至更久
电渗联合真空预压	地基中插入阴、阳电极并通以直流电的方法，以此降低地基土的含水率，能够提高地基土强度	对施工设备要求高，不适用于含水量较高的土体，对周围环境影响较大
真空联合强夯	施工效果较好，多数施工步骤较简单，施工要求较高，可以考虑再联合堆载	经济效益较低，成本较高，不适合大范围推广
化学改性真空预压	施工速度快、处理时间短、适用土壤类型广、经济效益较高、加固范围较大	需要选用合适的激振器或者工具，适用于软弱土壤和砂土

#### 4.1.1. 真空 - 堆载联合预压技术

传统真空预压法由于技术限制，处理土体后的承载力不高，无法满足需要较高承载力的建筑物要求，因此提出了真空联合堆载的方法。真空堆载联合预压法能够在预压阶段提高预压荷载，使得孔隙水的排除速度大大提高，还加入了有限元模拟软件对比实测数据，为真空 - 堆载联合技术提供理论基础。试验[8]应用一种真空 - 堆载 - 电渗联合技术，工期能够缩短 20%，相较于真空 - 堆载、真空 - 电渗还需要具体比较加固效果和经济效益。

沙玲[9]等开展了结合塑料排水板的真空 - 堆载联合预压试验，试验结果表明联合处理相较于真空预压能够减少土体含水率和孔隙，并加入了 ABAQUS 有限元软件模拟试验，把塑料排水板转换成砂墙，模拟结果对比某实测数据，证明了该模拟理论能够较好地模拟现场试验，且一致性较好。

张力[10]等采用 ABAQUS 软件开展了吹填土在真空 - 堆载联合作用下的数值模拟，对比了数值解和现场实测值不同工况的最大沉降、分层沉降的特点，证明了该模拟方法的有效性。

#### 4.1.2. 电渗联合真空预压技术

电渗法采用在地基中插入阴、阳电极并通以直流电的方法，地基土中的自由水及部分弱结合水在电场作用下产生电渗流从阳极流向阴极，并经阴极排出地面，以此降低地基土的含水率，能够提高地基土强度，该方法能够有效快速处理渗透系数小的粘土，但是由于土体自身不均匀导致土体处理后的效果不均匀，电极耗能较高且会带来较重的土体腐蚀。

电渗联合真空预压技术能够达到优势互补的效果，刘飞禹[11]等开展了真空预压联合间歇电渗加固疏浚淤泥的试验，采用逐级预压、间歇通电、间歇逐级加压电渗的试验步骤，试验证明了在一定的通电间歇时间内，通电间歇时间和吹填土加固效果成正相关，逐级加压电渗、间歇电渗的方法也是比真空预压联合电渗法加固吹填土效果更好，分级真空预压联合逐级加压电渗相较于分级真空预压提高了 33.96% 的承载力，且水平方向上仅有 0.75% 的含水率最大差异，表明加固后土体均匀性得到了极大的改善。试验结果[12]发现明显提高了土体承载力，120 d 后达到 110 kpa，而且最后阶段[13]可能更适合电渗处理，48 h 至 96 h 中电极周围附近土体含水率下降了 15%~20%，超过 48 h 内的 5%。

李哲[14]提出了分级真空预压联合逐级加压电渗的新方法,分别采用多等级真空压力、多种电压对吹填土试样进行试验,试验证明了 24 h 的通电间歇内间歇加压比恒电加压效果更好,且能耗也更低。研究发现电渗法可能不需要全程高电压进行,间歇电渗、逐级电渗处理后的含水率更低,承载力更高,间歇处理对环境也更友好,能够提高阳极附近 PH,有效降低碱性对环境的腐蚀。

#### 4.1.3. 真空联合强夯预压技术

强夯法的原理是通过冲击能可使土体超孔隙水压力快速增长且改变其渗透性,真空预压法则是能够快速排水,因此提出一种联合两种技术的方法的联合,联合技术能够发挥两种方法的优势,使得联合预压法更加合理高效,在高含水率吹填土地基等加固工程得到应用。

陈继忠[15]采用真空预压联合强夯的技术对吹填土处理,结果证明上部的吹填土在处理后可以形成较硬的人工硬壳层,该硬壳层满足了工程地基承载力要求,处理后的不排水强度提高了 200%,含水量最低降低 5%,并且能够有效降低工程沉降,软弱土层降低约为 18 mm,证明了真空联合强夯技术能够有效加固吹填土地基。真空联合强夯的工期较长,对施工的要求较高,因此可以考虑真空、堆载、强夯等多种技术联合。

#### 4.1.4. 化学药剂真空预压技术

药剂-真空预压法是通过在拟处理的高含水率淤泥、泥浆、污泥中加入合适的化学药剂,增大土颗粒粒径、构建土颗粒空间骨架、提高土体的渗透系数,并采用防淤堵排水滤膜,然后施加真空荷载,在短时间内达到降低含水率、提高强度的一种地基处理新工艺。

化学药剂真空预压法前期设备投入较大,成本较高,但其施工简便快捷,且由于具有快硬性,故适用于大面积处理淤泥、淤泥质土等吹填土地基,具体施工时需要考虑化学药剂[16]对土体、环境可能产生的影响,并需要进一步考虑如何施工使药剂均匀分布。淤泥中添加 SS330 [17]使得预压后抗剪强度提高至少 4 倍,添加氯化铁[18]在预压后固结效果能够提高至少 4 倍,在吹填土中添加 2% 石灰能够提高 30% 表层抗剪强度,增加了 54% 的沉降,在淤泥[19]中添加脱水剂和絮凝剂降低其 6.9% 含水率,相较于单独真空预压[20]可节约一半以上用电,还能大幅度[21]提高抗剪强度。

雷华阳[22]等开展了真空预压加入 NAOH 后的吹填土处理试验,并通过结果证明化学改性联合真空预压能够显著提高吹填土的加固效果,相较于真空预压降低土体 15.4% 的含水率,随着深度增加,加入 NAOH 的土体剪切强度衰减幅度也降低,加入 4% 的 NAOH 相较于真空预压少降低了 20.3%。加入 5% 的 NAOH 能增大 3 倍土体的渗透系数,使得颗粒聚集,土体结构更为紧实,为联合改进真空预压法提供理论基础。

## 4.2. 振杆密实技术

2007 年东南大学[23] [24] [25]首先研制出了具有自主知识产权的十字振动翼,在荷载作用下,强迫砂土颗粒发生振动,并使土和振杆产生共振效应,提高砂土的振动幅度,使得从振杆到土的能量传递效率最高,能够切实提高土体的相对密实度,提高土体的承载力和抗液化能力。该技术施工方便且不需要添加填料,通过振动作用能够实现对较深的土体加固,对周边环境影响较小。该技术已经应用推广应用到多个建筑工程、高速公路、滨海地基处理工程中。

2014 年东南大学[26]采用十字形振动翼对可液化地基进行处理,结果表明该设备能够有效提高土体抗液化能力,并且操作十分简单,施工快速,能够有效提高施工效率,并在试验后根据结果和碎石桩法、强夯法等比较,表明共振密实法能够有效消除液化[27],施工速度快且经济效益更好,对环境影响更小,有着更好的前景。

2019年程远等利用振动密实法有效加固粉土地基高速公路[28],并能根据CPTU较好地预测土体沉降[29],发展了新的液化评估能量方法。刘松玉[30]依据CPTU将土分为中砂细砂、粉砂和粉土,提出振杆密实法的适用范围,并以多种复杂地基的施工案例证明了振杆密实法的处理优势,之后并进行了湿陷性黄土[31][32][33]、杂填土地基[34][35]试验,加固后明显提高了黄土的物理力学指标,杂填土地基强度提高至少1.6倍,验证了振杆密实法的适用性和应用前景。

### 4.3. 激振排水固结技术

激振排水固结技术整合动力和静力方法的优势,激振排水能够实现土体均匀化加固,但是需要得到土体中的固有频率,并将其分为合适的区域,保证不同区域的激振效果。张艳军[36]等通过检测装置对待加固地基进行检测,得到带加固地基中不同深度的固有频率值,并由所得频率值将土体划分为多种区域、多种深度的加固区域,在加固前由部分待液化地基试验出激振装置加固不同深度、不同区域地基的竖向影响半径与水平向影响半径,并依据试验结果在处理区域内合理安放激振器,通过安排不同区域激振器的不同作用时间完成整体地基的加固。

孙延长、苗永红[37]等自主发了LD-8型动态固结渗透仪对漫滩相软土进行振动排水固结试验。通过自主研发的试验装置对试验软土试验得到了土体的振动频率,在室内试验中分析加载不同的振动荷载、振动频率、设置不同的排水条件对土体固结效果的影响,并通过仪器得到试样在试验前后的含水量、排水量和强度变化值。并设置静力排水固结法进行对比分析,得到振动排水固结法能够更加有效地提高软土的固结效率和抗剪强度。

李瑞兵、苗永红[38]等利用自主研发的动态固结渗透仪对软土模拟振动排水固结技术进行排水试验,并研究了软土振动特性,试验表明振动荷载下的软土排水地基加固效果更好,相较于单一的静力、动力排水法,有着更高的排水速率,并通过机理分析围压、软土自身特性:含水率、扰动性等都对排水结果有着不同的影响。

### 4.4. 交替式真空预压技术

雷华阳[39][40][41]等提出一种新型交替式真空预压技术,并对滨海新区内新近吹填淤泥进行室内模型试验和数值模拟研究。试验表明交替式真空预压能够有效解决排水板淤泥堵塞问题,并在试验中设置真空压力大小、交替时机等对照组,得到加固效果最好的真空压力值。模拟研究为交替式真空预压提供了理论依据,探究了交替式预压机理和影响因素,并提出新型沉降预测模型,该模型的拟合度和计算精度都高于传统的分层综合法。

### 4.5. 化学电渗技术

化学电渗技术综合电渗法和化学试剂法,在电极附近加入化学试剂,如 $\text{Ca}(\text{Cl})_2$ 和 $\text{NaOH}$ 溶液,欧章煜[42]等研究了浓度、土类别对土体加固效果的室内试验等,国内尚在起步阶段。

### 4.6. 物联网智慧管控技术

叶青[43]依据填海型厦门翔安新机场的项目提出了机场智慧安全检测平台,该平台融合了GNSS、InSAR等多源传感器,能够通过遥感技术动态检测不同施工区域的沉降差异和场地变形,并将数据整合以此判断是否满足施工条件;能够全天不间断检测重要设施和潜在隐患,并通过平台提高数据的使用效率,实现真实、及时的智能检测和施工阶段的安全智慧评估,做到全过程智慧监测和施工预警。

吴彦[44]等介绍了2种监测手段相结合的自动化监测方法,能够监测到深层的水平位移和不同层的沉降位移,并以连云港工程案例为例,表明了自动化智慧监测相较于人工监测能够提高监测效率和精度,

从而保证吹填期间围堰的安全性。

物联网智慧管控系统是技术发展新风向,通过监测平台监控施工中的重要参数,并实现“一键施工”智慧管控,能够极大提高施工效率、降低安全风险。该技术需要在处理技术成熟的基础上结合计算机,可以说是一种提高工程安全性、施工效率的工具,是今后软硬件结合、智慧施工的新趋势。

## 5. 结语

本文总结了近年来吹填土处理技术在国内的发展,介绍了多种新技术的发展和各自特点,讲解了吹填土处理相关标准,相比较而言真空预压联合技术飞速发展,提高地基承载力、降低土体沉降、改善土体渗透性等方面都有提高,真空-堆叠、真空-电渗、真空-化学改性等适合多种不同的土体,且技术逐步向环境友好型技术发展。振动密实法技术趋向成熟,适应性较为广泛;激振排水法多为室内试验,工程实践中需要确定土体振动频率,需要更多工程案例证明其效果,物联网智慧监控平台起步不久,需要结合工程实践和计算机操作,逐渐实现智能化施工,提高施工安全性和施工效率。主要结论如下:

1) 真空预压联合技术能够整合多种技术优势,如电渗联合真空,在提高土体承载力的基础上能够有效降低电渗法对环境的腐蚀性,还能提高土体均匀性,结合间歇加压可以考虑加强推广。

2) 真空预压联合改性技术从微观上提高土渗透性,聚合土体颗粒,提高对深层地基的加固效果,能够有效减少地基沉降。

3) 当加固吹填土地基时,需要根据承载力目标较高、深层地基加固需求较高等目标合理选择真空预压联合技术、振动排水技术、交替真空预压技术等,在环境友好的基础上得到更好的加固效果和经济效益。

4) 振杆密实技术较为成熟,已有适用范围的最新研究,其有着适用性广、应用前景好的优点,但需要进行多种类型土体试验,验证其适用性和效果。

5) 国内化学电渗法刚刚起步,化学电渗不同于真空预压,能够节省较多电力资源等,结合逐级加压等技术有着较好的研究施工前景。

6) 激振排水技术在工程实践中较少,但是其加固效果较好,施工工艺逐渐成熟后能够应加强推广。

7) 因此,对于实际工程中的吹填土处理依然需要从土体含水量、孔隙水压力、地基沉降等因素综合研判工程可行性,严格把控工程进度。在设计和施工的努力下,吹填土处理技术一定会更加成熟。

## 6. 展望

为了进一步改善吹填土处理技术,建议开展以下工作:

1) 编制联合技术相关设计方法和规范,能够有效指导施工中应用技术。

2) 寻找适用于不同吹填土的化学改剂以及最适合的添加量,寻找更耐腐蚀、对环境友好的电极等,扩大技术的适用范围,降低施工成本,形成相关的规范,降低对环境的影响。

3) 加强研究交替式施工技术,考虑在交替式真空预压的基础上加强研究交替使用多种联合技术,探究交替式技术的加固机理和影响因素。

4) 加强对时效性研究,如加压法、电渗法,多层次加压、逐级加压是近年来的研究方向,不仅能够提高加固效果,还能够减少资源消耗,降低对环境的影响。

5) 研究多种技术联合,如:预压-堆叠-电渗、预压-强夯-堆叠等技术,但需考虑技术的加固效果是否有显著提高,是否浪费资源,对于环境是否的影响是否加重。

6) 重视数值模拟,数值模拟的准确结果能够在一定程度上对技术起指导作用,并为相关技术及其影响因素提供理论基础。

7) 加强物联网智慧监测平台研究, 检测平台能够实时监测, 并通过物联网技术实现智慧施工, 提高施工效率, 降低安全风险。

## 参考文献

- [1] 郑刚, 龚晓南, 谢永利, 李广信. 地基处理技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(2): 127-146.
- [2] 龚晓南. 地基处理技术及发展展望[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [3] 刘汉龙, 赵明华. 地基处理研究进展[J]. 土木工程学报, 2016, 49(1): 96-115.
- [4] 张友. 真空预压法在吹填土加固中的试验特性分析[J]. 珠江水运, 2018(12): 99-100.
- [5] Lu, M.M., Xie, K.H. and Wang, S.Y. (2011) Consolidation of Vertical Drain with Depth-Varying Stress Induced by Multi-Stage Loading. *Computers and Geotechnics*, **38**, 1096-1101. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2011.06.007>
- [6] 河海大学. GB/T 51064-2015 吹填土地基处理技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [7] 吴松华, 刘宇飞. 真空预压联合不同工艺加固吹填土现场试验研究[J]. 城市道桥与防洪, 2023(4): 220-222.
- [8] Liu, H., Cui, Y., Shen, Y. and Ding, X.M. (2014) A New Method of Combination of Electroosmosis, Vacuum and Surcharge Preloading for Soft Ground Improvement. *China Ocean Engineering*, **28**, 511-528. <https://doi.org/10.1007/s13344-014-0042-3>
- [9] 沙玲, 刘鸿, 王国才. 真空-堆载联合预压法处理吹填土地基的大变形有限元分析[J]. 浙江工业大学学报, 2021, 49(2): 140-146.
- [10] 张力, 王琛, 梁发云, 等. 真空-堆载联合预压吹填土路基沉降特性数值模拟[J]. 四川建筑科学研究, 2019, 45(6): 36-42.
- [11] 刘飞禹, 李哲, 袁国辉, 等. 真空预压联合间歇电渗加固疏浚淤泥试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(5): 1-9.
- [12] Zhou, F.Z. (2014) Research and Application of Electroosmosis Composite Soft Vacuum Preloading Method. 2014 *Building Technology and Management Academic Exchange Conference Proceedings*, Beijing, December 2014, 45-47.
- [13] Wang, J., Ma, J.J., Liu, F.Y., et al. (2016) Experimental Study on the Improvement of Marine Clay Slurry by Electroosmosis-Vacuum Preloading. *Geotextiles and Geomembranes*, **44**, 615-622. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2016.03.004>
- [14] 李哲. 分级真空预压与逐级加压电渗法处理吹填土试验研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海大学, 2020.
- [15] 陈继忠. 真空预压联合强夯法处理吹填场区软土研究[J]. 山西建筑, 2022, 48(14): 86-89.
- [16] Wu, D.Q., Xu, W.Y. and Tjuar, R. (2015) Improvements of Marine Clay Slurries Using Chemical—Physical Combined Method (CPCM). *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **7**, 220-225. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.02.001>
- [17] Lin, W.A., Zhan, X.J., Chen, Y.M., et al. (2014) Effect of Fe Cl<sub>3</sub>-Conditioning on Consolidation Property of Sewage Sludge and Vacuum Preloading Test with Integrated PVDs at the Changan Landfill, China. *Geotextiles and Geomembranes*, **42**, 181-190. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2013.12.008>
- [18] Wang, J., Ni, J.F., Cai, Y.Q., et al. (2017) Combination of Vacuum Preloading and Lime Treatment for Improvement of Dredged Fill. *Engineering Geology*, **227**, 149-158. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.02.013>
- [19] 张骞. 真空预压联合化学作用加固吹填疏浚土室内模型试验研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
- [20] 刘禹杨, 吴燕, 胡保安, 等. 疏浚底泥掺外加剂真空预压脱水技术研究[J]. 水利水运工程学报, 2013(3): 78-82. <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640x.2013.03.012>
- [21] 赵森. 絮凝——真空预压加固吹填淤泥土地基试验研究[D]: [硕士学位论文]. 赣州: 江西理工大学, 2016.
- [22] 雷华阳, 王磊, 刘景锦, 等. 化学改性联合真空预压法加固吹填土试验分析[J]. 岩土力学, 2022, 43(4): 891-900.
- [23] 刘松玉, 杜广印, 苗永红. 十字形振动翼[P]. 中国专利. CN101024952. 2007-08-29.
- [24] 刘松玉, 程远. 共振法加固公路可液化地基试验[J]. 中国公路学报, 2012, 25(6): 24-29.
- [25] 杜广印, 刘松玉, 任蓓蓓, 等. 十字形振动翼共振法在处理可液化地基中的应用[C]//中国地质学会工程地质专委会, 中国地质环境监测院(国土资源部地质灾害应急技术指导中心), 山西省国土资源厅. 2014年全国工程地质学术大会论文集. 北京: 科学出版社, 2014: 475-478.
- [26] 程远, 刘松玉. 共振密实法加固可液化地基的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2013(S2): 83-87.

- [27] 程远, 刘松玉, 朱合华, 杜广印, 刘学增, 王莎. 振杆密实法加固液化地基施工扰动与影响因素试验[J]. 中国公路学报, 2016, 29(9): 38-44, 52.
- [28] 程远, 韩杰, 朱合华, 刘松玉. 振杆密实法加固粉土地基效果试验[J]. 中国公路学报, 2019, 32(3): 63-70.
- [29] 程远, 付宇鹏, 郜新军. 基于能量耗散原理的振杆密实可液化地基范围研究[J]. 中国公路学报, 2021, 34(5): 55-62.
- [30] 高常辉, 杜广印, 刘松玉, 等. 基于 CPTU 土分类的振杆密实法适用范围与评估方法研究[J]. 土木工程学报, 2022, 55(2): 82-91, 119.
- [31] 刘松玉, 杜广印, 毛忠良, 等. 振杆密实法处理湿陷性黄土地基试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(8): 1377-1383.
- [32] 高常辉, 杜广印, 刘松玉, 等. 深层振动密实对湿陷性黄土层水平应力变化的影响[J]. 岩土力学, 2022, 43(2): 519-527. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2021.0662>
- [33] 曾彪, 章定文, 刘松玉, 等. 振杆密实法处理湿陷性黄土施工参数确定现场试验[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S2): 229-232.
- [34] 程远, 杨晔, 时刚. 振杆密实法处理杂填土地基试验[J]. 中国公路学报, 2023, 36(5): 99-108.
- [35] 闫建飞. 振杆密实法处理杂填土地基的现场试验与应用研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2022.
- [36] 张艳军, 于沉香, 杜永峰, 等. 一种激振排水固结处理饱和土地基的方法[P]. 中国专利. CN105133569A. 2015-12-09.
- [37] 孙延长, 苗永红, 张新. 振动排水固结法加固漫滩相软土可行性试验研究[J]. 中国水运(上半月), 2017, 38(7): 53-56.
- [38] 苗永红, 李瑞兵, 陈邦. 软土的振动排水固结特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(7): 1301-1306.
- [39] 雷华阳, 李宸元, 刘景锦, 等. 交替式真空预压法加固吹填超软土试验及数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(10): 2112-2125.
- [40] 李宸元. 交替式真空预压法加固吹填超软土地基机理与效果研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2020.
- [41] 雷华阳, 刘安仪, 刘景锦, 等. 超软土地基交替式真空预压法加固效果影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(2): 377-388.
- [42] Ou, C.Y., Chien, S.C. and Lee, T.Y. (2012) Development of a Suitable Operation Procedure for Electroosmotic Chemical Soil Improvement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **139**, 993-1000. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000819](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000819)
- [43] 叶青. 填海型机场智慧安全监测平台建设与管理实践[J]. 重庆建筑, 2022, 21(8): 17-19.
- [44] 吴彦, 焦永强, 刘昆. 自动化变形监测在围堰施工中的应用[J]. 港口科技, 2021(5): 41-44+48.