

引用本文:汪中卫.吹填区软土真空预压加固效果对比测试分析[J].建筑科学与工程学报,2021,38(6):18-24.

WANG Zhong-wei. Comparative Test Analysis of Vacuum Preloading Reinforcement Effect on Soft Ground in Hydraulic Reclamation Area [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(6): 18-24.

DOI:10.19815/j.jace.2021.08045

# 吹填区软土真空预压加固效果对比测试分析

汪中卫

(上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司 上海 200092)

**摘要:**为研究真空预压加固在温州沿海吹填区软土地基的适用性与加固效果,结合温州沿海某吹填区道路工程软土地基真空预压处理实例,通过室内土工试验和现场原位测试对加固前后吹填区软土物理与力学指标进行了对比分析。结果表明:真空预压能有效加固温州吹填区软土地基,预压加固后在地表 15 m 深度范围内土体物理力学指标有明显提高,但加固效果沿深度基本呈线性衰减;加固后室内土工试验指标有一定改善,含水量和孔隙比降低约 10%,压缩模量提高约 10%;同时现场原位测试指标提高更为明显,现场十字板剪切强度和静力触探侧阻平均增幅分别约为 45%和 40%,但加固前后土体灵敏度指标变化并不大,即真空预压加固对土体的灵敏度改善不明显;采用传统真空预压法加固温州沿海吹填区软土地基在技术可行,经济上合理,其有效处理深度可达 15 m;受温州海相软土低渗透性和高黏性的影响,在竖向排水体周围出现明显的“土柱效应”,从而使真空预压加固效果在平面上呈现一定的不均匀性。

**关键词:**吹填区;真空预压;有效加固深度;原位测试;土工试验

**中图分类号:** TU447

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-2049(2021)06-0018-07

## Comparative Test Analysis of Vacuum Preloading Reinforcement Effect on Soft Ground in Hydraulic Reclamation Area

WANG Zhong-wei

(Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to study the applicability and reinforcement effect of vacuum preloading on soft soil foundation in coastal hydraulic reclamation area of Wenzhou, combined with the example of vacuum preloading treatment of soft soil foundation of a road project in Wenzhou coastal hydraulic reclamation area, the physical and mechanical indexes of soft soil in hydraulic reclamation area before and after reinforcement were compared and analyzed through indoor geotechnical test and in-situ test. The results show that vacuum preloading can effectively strengthen the soft soil in Wenzhou hydraulic reclamation area, the physical and mechanical indexes of soil within 15 m of the surface were significantly improved after preloading reinforcement, but the reinforcement effect decreases linearly along the depth. After reinforcement, the indoor geotechnical test indexes are improved to some extent, the water content and void ratio are reduced by about 10%, and the compression modulus is increased by about 10%. The field in-situ test index is improved

收稿日期:2021-08-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0800200)

作者简介:汪中卫(1972-),男,安徽桐城人,高级工程师,工学博士,E-mail:wangzhongwei@smedi.com。

more obviously. The average increase of field vane shear strength and static lateral resistance are about 45% and 40% respectively. The sensitivity index of soil changes little before and after reinforcement, that is, the sensitivity of vacuum preloading reinforcement to soil is not significantly improved. It is technically feasible and economically reasonable to use the traditional vacuum preloading method to strengthen the soil foundation in Wenzhou coastal hydraulic reclamation area, and its effective treatment depth can reach 15 m. Meanwhile, there is an obvious “soil column effect” around the vertical drainage body affected by the low permeability and high viscosity of Wenzhou marine soft soil, so the reinforcement effect of vacuum preloading is uneven in the plane.

**Key words:** hydraulic reclamation area; vacuum preloading; effective reinforcement depth; in-situ test; geotechnical test

## 0 引言

近年中国沿海经济发达地区由于土地资源短缺,大面积吹填用地项目越来越多,由于此类项目地层条件多为淤泥等超软地基,大多采用真空预压进行大面积地基加固,以降低工程成本。

自提出真空预压法以来,国内外学者和岩土工程界对真空预压机理、加固效果以及分析计算进行了大量研究与工程应用。在室内试验与原位测试方面,大量对比试验表明真空预压加固效果比较明显。沈杰<sup>[1]</sup>通过室内试验认为真空预压效果与土体初始含水率呈负相关,娄晨晖<sup>[2]</sup>通过模型试验发现淤泥含水量越高越易引起塑料排水板(PVD)淤堵。孙立强等<sup>[3-4]</sup>通过室内模型试验发现,将抽真空分成两阶段,减缓初始负压下降速度和增加后期二次插板的方式有利于稳定土体结构和减小土颗粒移动,从而大幅缓解淤堵效应。周波等<sup>[5]</sup>对南沙深厚软基公路真空预压试验段进行了变形、孔压观测和土体抗剪强度指标对比,发现加固后地基土的力学性能有较大提高;关云飞等<sup>[6]</sup>通过对膜下真空度、地表沉降、孔压以及十字板剪切强度等进行测试,认为真空预压对吹填层加固效果明显,满足工程承载力要求;曾国海等<sup>[7]</sup>通过对温州吹填软土真空预压现场监测和检测结果分析后认为加固效果良好,同时水平管道加密和滤管内嵌PVC圆管可有效改善真空度传递,加快软土固结;楼晓明等<sup>[8]</sup>根据现场静力触探与十字板等原位测试数据推算,认为加固后地基强度增长幅度明显,并提出强度增幅、超固结比、真空固结应力随深度变化规律;梁志荣等<sup>[9]</sup>对上海迪斯尼场地真空预压项目的地表沉降、分层沉降和孔压等进行分析,认为真空预压适用于上海软土地基处理,但压缩量主要集中在10 m以上地层;刘贺等<sup>[10]</sup>通

过对“浅层处理+深层真空预压”加固温州吹填软土现场地表沉降、孔压和荷载板试验分析,认为改进工艺能达到浅层55 kPa和深层80 kPa的预期承载力目标,并在现场观察到明显的土柱效应。鲍树峰等<sup>[11-12]</sup>通过对珠海某新近吹填淤泥地基真空预压现场监测和分析,发现高黏粒含量、竖向排水体反滤层孔径过小和真空加载速度过快是竖向排水体严重淤堵的主要因素,整个排水系统负压损失最高可达57%,同时认为水平排水垫层和竖向排水体中的负压可分别考虑为随时间变化的线性衰减模式和非线性衰减模式。

在有效加固深度方面,闫澍旺等<sup>[13]</sup>通过设置弹簧装置的室内试验装置模拟真空预压作用机理,结果表明有效加固深度与真空度传递有关,而与真空度大小没有关系,并通过工程实例得到真空预压的有效加固深度可以超过10 m(极限提水高度);李就好<sup>[14]</sup>基于现场试验和理论分析认为加固深度可达到竖向排水体下2~3 m;严蕴等<sup>[15]</sup>通过室内试验认为加固深度在18 m范围内;Chu等<sup>[16-17]</sup>通过研究认为在排水板深度范围内均能有效加固,同时通过工程实例发现20 m长排水板以下土层仍有加固效果;刘志中等<sup>[18]</sup>基于真空度沿深度衰减特性和分层总和法改进了沉降计算方法并进行了实例验证,认为当真空度按 $3.5\sim 4.5\text{ kPa}\cdot\text{m}^{-1}$ 衰减计算时,与实测值比较接近,相对误差在-18%~10%之间。

在土柱效应方面,Harvey<sup>[19]</sup>研究发现,靠近砂井土体最先固结形成低渗透性的圆柱状隔离带(土柱效应),从而影响距砂井较远处土体固结;唐彤芝等<sup>[20]</sup>分析了某滨海地区新近吹填淤泥土的颗粒组成和物理力学性质,认为吹填淤泥土高流动性、高含水率、细颗粒、低结构强度是“土柱效应”形成的主要因素。蔡袁强<sup>[21]</sup>对真空预压在吹填淤泥地基中处

理效果差的几个关键问题进行了分析与总结,其中对预压过程中变形发展规律和土柱形成机理进行了重点分析,吹填淤泥种类对土柱厚度有明显影响,细颗粒含量多的淤泥土柱增长速率较低,但孔压消散更慢,并通过室内和现场试验提出了系列改进改良措施。

本文依托温州沿海某吹填区软土地基真空预压处理道路工程实例,结合场地特征及施工工艺,通过室内土工试验和现场原位测试分析判断真空预压对典型温州吹填淤泥的加固有效性,在此基础上,通过室内试验指标和现场原位测试量化分析加固效果和竖向排水体周边的“土柱效应”,探讨真空预压的有效影响深度和均匀性等问题,为温州类似工程的真空预压加固设计与施工提供参考。

1 工程概况

1.1 工程地质条件

工程位于温州市某沿海吹填区,现状为浅滩吹填场地,其新吹填土及其下卧淤泥层均表现为典型的海相沉积软土,具有典型的“三高两低”软土特征。根据勘察资料,场地埋深 35 m 以内的地基岩土主要划分为 3 个层次,自上而下依次为:①<sub>1</sub> 层吹填土流塑~软塑状,高压缩性;②<sub>1</sub> 层为淤泥,流塑,无层理,局部含少量贝壳碎屑,全区分布;②<sub>2</sub> 层为含砂淤泥,流塑,无层理,局部分布。实测地下水稳定水位埋深在 0.30~1.20 m 之间。土层地质剖面如图 1 所示。

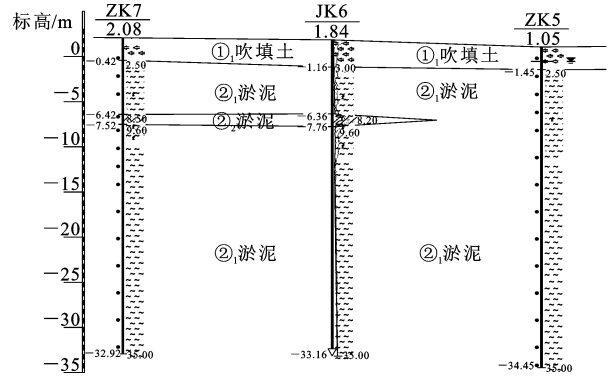


图 1 地质剖面(单位:m)

Fig. 1 Geological Profile (Unit:m)

1.2 真空预压地基加固

首先对场地吹填土层进行浅层真空预处理,使其满足基本施工进场条件,然后对道路区在填筑施工前采用真空预压法(塑料排水板+砂垫层+真空膜)进行地基加固,加固范围为道路红线外再扩 5 m,以提高地基土承载力和控制道路工后沉降。施

工流水为:土工布铺设 500 mm 厚砂垫层→打塑料排水板→水平真空管网铺设→密封沟及真空膜铺设→抽真空。膜下真空度不小于 80 kPa,真空预压期为 260 d。真空预压地基加固处理剖面如图 2 所示,其中  $L$  为塑料排水板长度, $m$  为无纺布的密度。

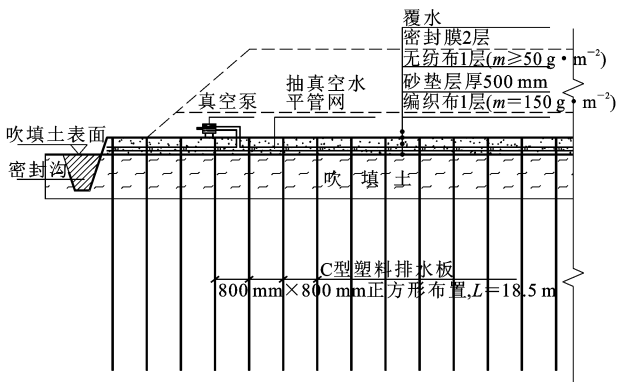


图 2 真空预压加固设计剖面

Fig. 2 Design Profile of Vacuum Preloading Reinforcement

1.3 加固前后对比分析勘察孔位布置

为分析吹填区真空预压处理加固效果,在道路区与一般区域分别布置勘察孔与原位测试孔,其中勘察孔取土进行室内土工试验,原位测试孔进行十字板剪切试验和静力触探试验。孔位布置如图 3 所示。

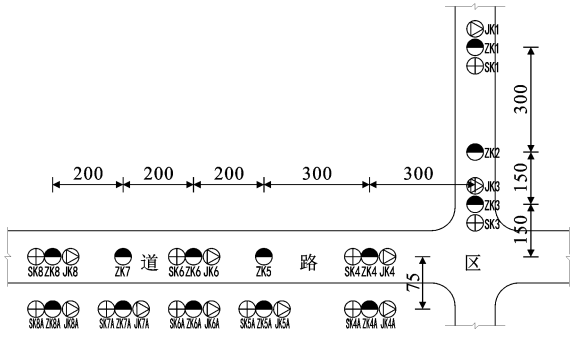


图 3 勘察孔位布置(单位:cm)

Fig. 3 Layout of Survey Holes (Unit:cm)

2 室内试验结果分析

图 4 为真空预压加固区域的含水量、孔隙比和压缩模量的室内试验结果。从图 4(a)~(c)可以看出,真空预压能够降低深度 15 m 以内土体的含水量和孔隙比,同时提高土体压缩模量。从勘察孔 ZK5,ZK5A 的数据来看,加固效果似乎更为明显,与真空预压加固存在不均匀性有一定的相关性。图 4(d)为 15 m 深度范围内加固前后各指标平均值的比值,从对比数据来看,在 15 m 深度范围内,真空预压能够降低约 10% 的含水量和孔隙比,压缩模量

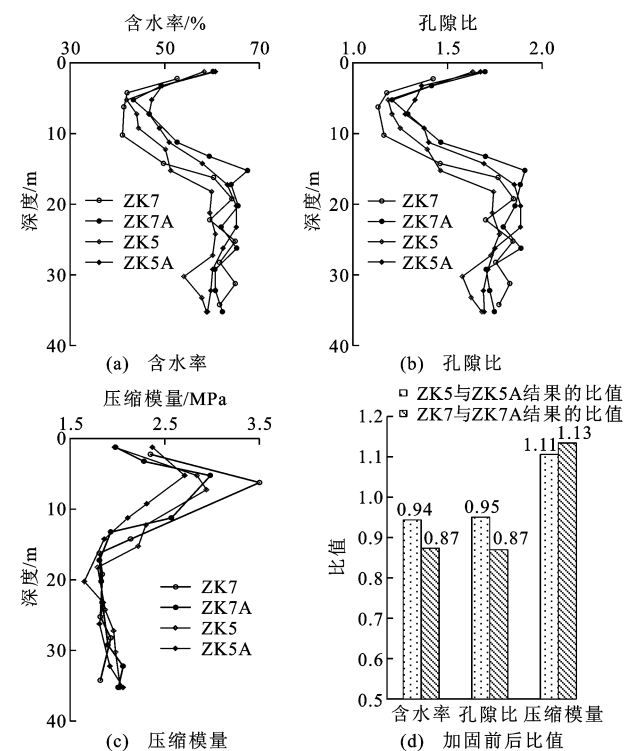


图4 真空预压前后物理力学指标变化

Fig. 4 Changes of Physical and Mechanical Indexes Before and After Vacuum Preloading

约提高10%。

### 3 原位测试结果分析

#### 3.1 十字板剪切试验

图5为真空预压前后十字板剪切强度变化。由图5可知,作为对比组的未加固区域各测试孔(SK4A~SK8A)十字板剪切强度沿深度分布规律基本一致,而且其数值基本接近,表明本吹填场地各层土性分布均匀,与图1土层地质剖面相对应,由于在8~10 m左右深度位置局部存在含砂淤泥,部分测试孔在相应深度位置测试结果出现明显离散与突变。

由图5(a),(b)可知,加固后区域各测试孔(SK1,SK4,SK6,SK8)十字板剪切强度在0~15 m深度以内其值明显高于未加固区域相应值,而深度15 m以下则基本上无明显变化,同时在0~15 m深度范围内加固区十字板强度提高幅度有明显不同,沿深度增幅在5%~90%之间不等,平均增幅约45%。同时由图5(c)可知,强度提高幅度在0~15 m深度范围内沿深度逐渐衰减,基本呈线性下降,超过15 m深度后其比值基本稳定在1.0左右。十字板剪切对比试验结果表明本场地加固有效深度约为15 m。

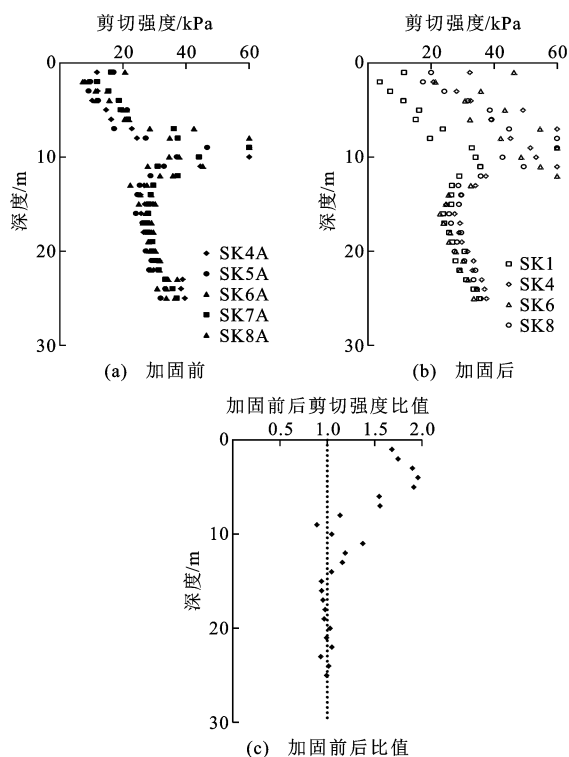


图5 真空预压前后十字板剪切强度变化

Fig. 5 Changes of Vane Shear Strength Before and After by Vacuum Preloading

海相沉积软土普遍具有高灵敏度,受扰动后强度大幅下降。现场测试中对部分测试孔8 m以内深度进行了扰动后土体的十字板强度测试,以分析土体的灵敏度。

图6为加固前后土体的灵敏度变化情况,可以发现加固前土体的平均灵敏度在5~7左右,加固后土体的平均灵敏度在4~5左右。如果剔除测试孔SK8A的数据,可以发现加固前后土体的灵敏度变化并不大,即真空加固对土体的灵敏度改善不明显。这也从另外一个角度说明,经真空预压加固后,其原状土强度与扰动后强度均有明显提高。

#### 3.2 静力触探试验

由图7可知,作为对比组的未加固区域各测试孔(JK4A~JK8A)静力触探(CPT)侧阻与端阻值沿深度分布规律基本一致,而且其数值基本接近,从另一个角度表明本吹填场地在平面上土性分布较均匀,同时受8~10 m深度处含砂淤泥的影响,静力触探曲线沿深度分布规律也与十字板剪切试验类似,在含砂淤泥深度位置测试结果亦出现明显离散与突变。

通过静力触探试验结果对比分析可知,真空预压加固对0~15 m深度范围内的静力触探阻力有

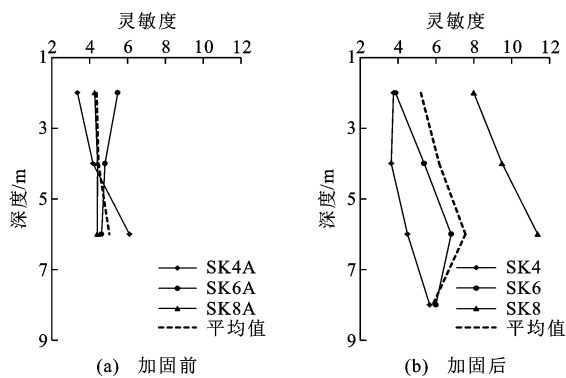


图 6 真空预压前后土体灵敏度变化

Fig. 6 Changes of Soil Sensitivity Before and After Vacuum Preloading

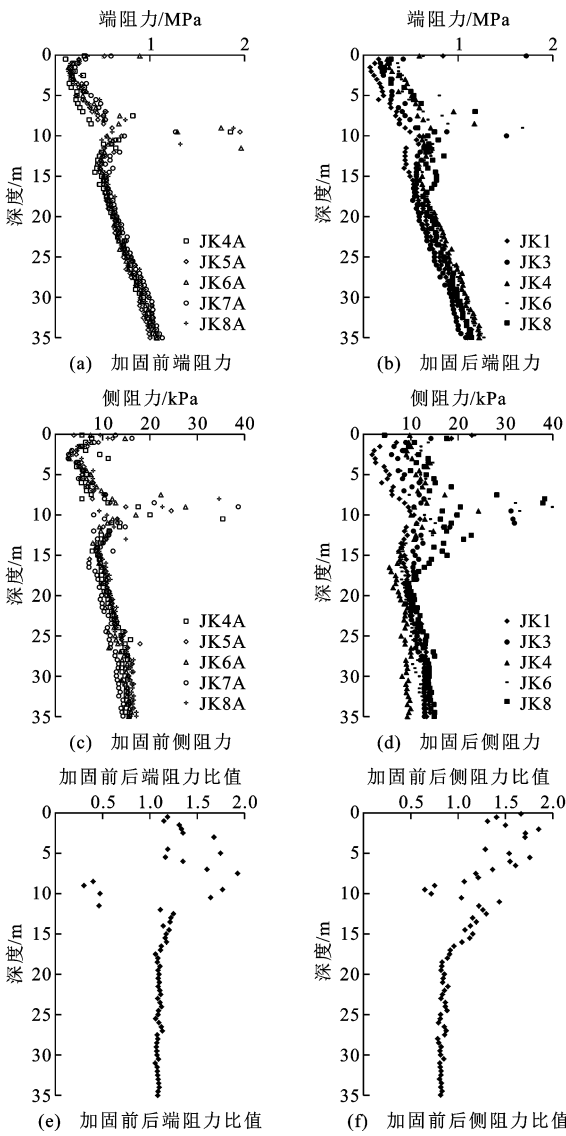


图 7 真空预压前后静力触探阻力变化

Fig. 7 Changes of CPT Resistance Before and After Vacuum Preloading

体提高更为明显,剔除含砂淤泥处异常离散数据,在 0~15 m 深度范围内提高幅度在 11%~130%,平均增幅约 90%。从侧阻曲线上来看,总体增幅沿深度近似线性衰减,剔除含砂淤泥处异常离散数据,在 0~15 m 深度范围内提高幅度在 4%~134%,平均增幅约 40%。当超过 15 m 深度后,端阻力与侧阻力比值均稳定在 1.0 左右,表明在 15 m 深度范围内能够有效加固。

将静力触探对比测试结果与十字板剪切试验结果对比,两者表现出的土层加固效果规律基本一致,都表现为土体强度增加幅度随深度逐渐线性衰减,尤其是侧阻力与十字板剪切强度沿深度分布规律表现较强的一致性。

从图 5 和图 7 可以看出,静力触探侧阻力与十字板剪切强度在 0~15 m 深度范围内平均增幅基本接近。

4 加固效果探讨

由于温州海相软土渗透性低,其渗透系数数量级在  $1 \times 10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  左右,黏性极大,由于打设塑料排水板易引起涂抹效应,很容易引起塑料排水板的排水排气通道封闭,同时预压过程中极易形成“土柱效应”,从而造成排水排气淤堵,导致真空度无法向深层和径向传导,易导致加固失效。本节对真空预压加固效果进行探讨。

4.1 加固均匀性

从机理上分析,在平面范围内,塑料排水板真空度与相应位置砂垫层和水平管道通气和抽气能力直接相关;从真空度沿塑料排水板径向传递特征来看,真空度离开排水板逐渐衰减;由于土柱效应问题,导致土柱影响区域内与影响区域外固结度差别显著。以上因素客观上影响着真空预压加固效果的均匀性问题。

从本工程的现场十字板和静力触探试验结果来看,加固后场地现场测试值相对于加固前有明显的离散性,说明真空预压加固后的场地存在一定的不均匀性,不同测试孔加固后提高幅度明显不同,如 SK4,SK6 和 SK8 原位测试孔相对于 SK4A,SK6A 和 SK8A 孔在 0~15 m 深度范围内十字板剪切强度平均增幅在 32%~57%之间,JK4,JK6 和 JK8 原位测试孔相对于 JK4A,JK6A 和 JK8A 孔在 0~15 m 深度范围内侧阻力平均增幅在 45%~78%之间,在平面范围内体现出较大的不均匀性,这与蔡袁强<sup>[21]</sup>通过室内试验证明温州吹填软土存在明显的

明显提高。从端阻力曲线来看,在 0~10 m 深度土

“土柱效应”相一致。

## 4.2 有效加固深度

真空预压不同于真空提水,其固结是由抽真空所产生的负孔压引起,真空度传递深度直接影响加固深度,其与竖向排水体的排水能力、井阻以及土柱效应等因素有关,真空预压有效加固深度机理至今未在学术上形成一致观点。刘志中等<sup>[18]</sup>根据收集的相关文献资料,认为真空度沿深度衰减速率在 $2.5\sim 6.3\text{ kPa}\cdot\text{m}^{-1}$ 之间,但主要集中在 $4.7\sim 6.3\text{ kPa}\cdot\text{m}^{-1}$ 。基于本文的实测结果,按有效加固影响深度15 m和真空度按线性衰减考虑,本项目中真空度沿深度衰减值约为 $5.3\text{ kPa}\cdot\text{m}^{-1}$ ,与刘志中等<sup>[18]</sup>所统计的大部分案例接近,说明真空预压加固对本工程场地适应性和有效性较好。

## 4.3 预压期间沉降量

根据加固前初始孔隙比 $e_0$ (近似按1.5考虑)和加固后的孔隙比变化量 $\Delta e$ (按10%变化量考虑),可以大致推算加固期间的地表沉降量。加固深度 $H$ 按15 m计,可近似估算预压期间的总沉降量 $s=\Delta eH/(1+e_0)\approx 900\text{ mm}$ ,与本项目实测平均值<sup>[22]</sup>接近,较温州类似项目( $500\sim 800\text{ mm}$ )<sup>[6-7]</sup>偏大,这主要与预压工期有较大相关性,一般真空预压工期为120 d,固结度在70%~80%,而本项目预压工期为260 d,按正常推算,固结度应该在95%以上,故其总沉降量偏大。

因此,从真空预压加固效果评判主要指标(如物理指标、强度指标和有效加固深度)来看,真空预压对温州海相软土有较好的加固效果,可以作为一种低成本的大面积加固手段。

## 5 结 语

(1)采用传统真空预压法加固温州沿海吹填区软土地基在技术上可行,经济合理。

(2)真空预压加固能够改善和提高物理力学指标,有效加固深度在15 m左右。

(3)在有效加固深度范围内,加固后土体的含水量和孔隙比平均降低约10%,压缩模量能够提高约10%。

(4)十字板剪切强度在有效加固深度范围内平均增幅约45%,静力触探侧阻力平均增幅约40%。

(5)在有效加固深度范围内加固效果基本呈线性衰减;受“土柱效应”等因素影响,在平面上加固效果呈现一定的不均匀性。

## 参考文献:

## References:

- [1] 沈杰. 高含水率疏浚泥真空预压室内模型试验研究[D]. 南京:东南大学,2015.  
SHEN Jie. Laboratory Model Test of Vacuum Preloading on Dredged Clays at High Initial Water Contents[D]. Nanjing:Southeast University,2015.
- [2] 娄晨晖. 排水板与初始含水率对真空预压加固吹淤泥效果及影响范围试验研究[D]. 温州:温州大学,2018.  
LOU Chen-hui. Experimental on the Effect of PVDs and Initial Water Content on Vacuum Preloading Reinforcement and Range of Drainage Dredger Fill[D]. Wenzhou:Wenzhou University,2018.
- [3] 孙立强,同澍旺,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.  
SUN Li-qiang, YAN Shu-wang, LI Wei, et al. Study of Super-soft Soil Vacuum Preloading Model Test[J]. Rock and Soil Mechanics,2011,32(4):984-990.
- [4] WANG J, CAI Y Q, FU H T, et al. Experimental Study on the Dredged Fill Ground Improved by a Two-staged Vacuum Preloading Method[J]. Soils and Foundations,2018,58(3):766-775.
- [5] 周波,张可能,杨庆光,等. 南沙深厚软土真空预压法的现场试验与应用研究[J]. 湖南科技大学学报:自然科学版,2008,23(1):60-65.  
ZHOU Bo, ZHANG Ke-neng, YANG Qing-guang, et al. Test In-situ and Application of Vacuum Preloading in Deep Soft-soil of Nansha[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology: Natural Science Edition,2008,23(1):60-65.
- [6] 关云飞,唐彤芝,陈海军,等. 超软地基真空预压浅层加固现场试验研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(增1):97-101.  
GUAN Yun-fei, TANG Tong-zhi, CHEN Hai-jun, et al. Field Tests on Shallow Treatment of Super-soft Ground by Vacuum Preloading Method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S1): 97-101.
- [7] 曾国海,包闻禄,崔允亮,等. 吹填软土地基改性真空预压法现场试验研究[J]. 水运工程,2012(3):124-128.  
ZENG Guo-hai, BAO Wen-lu, CUI Yun-liang, et al. Field Test of Modified Vacuum Preloading on Dredged Fill Soft Ground[J]. Port & Waterway Engineering,2012(3):124-128.
- [8] 楼晓明,范成杰,朱亚娟,等. 利用原位测试结果评价真空预压的加固效果[J]. 岩土工程学报,2013,

- 35(增 2):511-514.
- LOU Xiao-ming, FAN Cheng-jie, ZHU Ya-juan, et al. Improvement Effect of Vacuum Preloading Evaluated by In-situ Tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2):511-514.
- [9] 梁志荣, 李忠诚, 魏 祥. 真空预压试验在上海迪斯尼工程场地形成中的应用及测试分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增 2):702-706.
- LIANG Zhi-rong, LI Zhong-cheng, WEI Xiang. Application and Analysis of Vacuum Preloading Tests on Engineering Site Formation of Shanghai Disneyland Park[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2):702-706.
- [10] 刘 贺, 杨 坡, 高明军, 等. 先浅后深两次真空预压处理沿海超软土的应用[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(17):285-290.
- LIU He, YANG Po, GAO Ming-jun, et al. Application of Deep and Shallow Combined with Two Times Vacuum Preloading for Ultra Soft Clay[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(17):285-290.
- [11] 鲍树峰, 娄 炎, 董志良, 等. 新近吹填淤泥地基真空固结失效原因分析及对策[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(7):1350-1359.
- BAO Shu-feng, LOU Yan, DONG Zhi-liang, et al. Causes and Countermeasures for Vacuum Consolidation Failure of Newly-dredged Mud Foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(7):1350-1359.
- [12] 鲍树峰, 莫海鸿, 董志良, 等. 新近吹填淤泥地基负压传递特性及分布模式研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(12):3569-3576.
- BAO Shu-feng, MO Hai-hong, DONG Zhi-liang, et al. Research on Transfer Properties and Distribution Model of Negative Pressure in Fresh Hydraulic Reclamation Muck Foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(12):3569-3576.
- [13] 闫涛旺, 侯晋芳, 程栋栋. 真空预压有效加固深度的探讨[J]. 水利学报, 2007, 38(7):774-778.
- YAN Shu-wang, HOU Jin-fang, CHENG Dong-dong. Effective Depth of Vacuum Preloading for Reinforcing Soft Soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(7):774-778.
- [14] 李就好. 真空-堆载联合预压法在软基加固中的应用[J]. 岩土力学, 1999, 20(4):58-62.
- LI Jiu-hao. The Application of Vacuum-heaped Load Combining Precompression in the Consolidation of Soft Clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(4):58-62.
- [15] 严 蕴, 房 震, 花剑岚. 真空堆载预压处理软基效果的室内试验研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2002, 30(5):118-121.
- YAN Yun, FANG Zhen, HUA Jian-lan. Experimental Study on Effect of Treatment of Soft Foundation with Vacuum-surge Preloading[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2002, 30(5):118-121.
- [16] CHU J, YAN S W. Estimation of Degree of Consolidation for Vacuum Preloading Projects[J]. International Journal of Geomechanics, 2005, 5(2):158-165.
- [17] 彭 劼. 真空-堆载联合预压法现场试验研究及机理探索[J]. 江苏科技大学学报: 自然科学版, 2006, 20(1):20-26.
- PENG Jie. Field Experiment and Improvement Principle of Vacuum Combined Surge Preloading Method[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2006, 20(1):20-26.
- [18] 刘志中, 丁建文, 王 刚, 等. 考虑真空度衰减的真空预压沉降计算方法[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2016, 46(1):191-195.
- LIU Zhi-zhong, DING Jian-wen, WANG Gang, et al. Calculation Method for Vacuum Preloading Induced Settlement Considering Vacuum Degree Attenuation[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2016, 46(1):191-195.
- [19] HARVEY J A F. Vacuum Drainage to Accelerate Submarine Consolidation at Chek Lap Kok, Hong Kong[J]. Ground Engineering, 1997, 30(6):34-36.
- [20] 唐彤芝, 黄家青, 关云飞, 等. 真空预压加固吹填淤泥土现场试验研究[J]. 水运工程, 2010(4):115-122.
- TANG Tong-zhi, HUANG Jia-qing, GUAN Yun-fei, et al. Experimental Study on Dredged Fill Sludge Improved by Vacuum Preloading[J]. Port & Waterway Engineering, 2010(4):115-122.
- [21] 蔡袁强. 吹填淤泥真空预压固结机理与排水体防淤堵处理技术[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(2):201-225.
- CAI Yuan-qiang. Consolidation Mechanism of Vacuum Preloading for Dredged Slurry and Anti-clogging Method for Drains[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(2):201-225.
- [22] 梁发云, 秦承瑞, 汪中卫, 等. 沿海吹填土地基真空预压加固效果现场监测分析[J]. 结构工程师, 2017, 33(6):155-161.
- LIANG Fa-yun, QIN Cheng-rui, WANG Zhong-wei, et al. Field Monitoring and Analysis on the Effect of Vacuum Preloading in Coastal Dredger Fill Foundation[J]. Structural Engineers, 2017, 33(6):155-161.