

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2025.01.002

真空预压-PVD排水板加固吹填土地基试验及数值模拟研究

齐琛娜¹, 陈秋南², 黄小城¹, 龙坤¹, 吴启梅¹, 许笑翟¹

(1. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 岩土工程稳定控制与健康监测湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 对虎门港地区某施工现场典型吹填土开展了室内土工试验、真空预压-PVD排水板加固吹填土的室内单井模型试验, 通过试验测量模型筒内的孔隙水压力、土体沉降量、排水板不同位置的真空度大小和试验排水量, 并在模型试验结束后取模型筒内不同位置的土样进行直剪试验和含水率测定, 对真空预压-PVD排水板加固土体效果和排水板淤堵问题进行了分析, 并用Abaqus软件建立了相应的二维有限元模型, 分析改变膜下真空度和改变排水板插入深度等因素对地基固结效果的影响。研究发现, 土体的抗剪强度随着深度的增加而逐渐降低, 土样的顶部沉降量最大, 逐渐减少至中部以下土样的沉降仅有轻微差异, 受淤堵层的影响, 排水表现出在排水开始时排水量迅速增加, 达最大值后逐渐减小, 最后趋于稳定的现象; 而随着膜下真空度的增大和排水板打设深度的增加, 地基固结效果越好。

关键词: 吹填土地基; 真空预压; 塑料排水板; 沉降监测

中图分类号: TU447

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2025)01-0009-10

引文格式: 齐琛娜, 陈秋南, 黄小城, 等. 真空预压-PVD排水板加固吹填土地基试验及数值模拟研究[J]. 湖南工业大学学报, 2025, 39(1): 9-18.

An Experimental and Numerical Simulation Study on Vacuum Preloading PVD Drainage Plate Reinforcement of Backfill Soil Foundation

QI Chenna¹, CHEN Qiunan², HUANG Xiaocheng¹, LONG Kun¹, WU Qimei¹, XU Xiaozhai¹

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China;

2. Hunan Province Key Laboratory of Geotechnical Engineering Stability Control and Health Monitoring, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China)

Abstract: In order to reinforce the backfill soil with vacuum preloading PVD drainage plates, indoor geotechnical tests and indoor single well model tests are conducted on a typical construction site in Humen Port area. Through the pore water pressure, soil settlement, vacuum degree at different positions of the drainage plate, and test drainage amount in the model cylinder during the tests, soil samples at different positions in the model cylinder are taken for direct shear tests and moisture content determination. Based on an analysis of the soil reinforcement effect of vacuum preloading PVD drainage plates and the problem of drainage plate blockage, a corresponding two-dimensional finite element model is established by using Abaqus software to analyze the influence of factors such as changing the vacuum degree under

收稿日期: 2023-11-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52078211); 湖南省交通运输厅科技进步与创新基金资助项目(202308)

作者简介: 齐琛娜, 女, 湖南科技大学硕士生, 主要研究方向为岩土工程, E-mail: 923066132@qq.com

通信作者: 陈秋南, 男, 湖南科技大学教授, 博士, 主要研究方向为岩土与隧道工程, E-mail: cqndoc@163.com

the membrane and changing the insertion depth of the drainage plate on the consolidation effect of the foundation. It is found that the shear strength of the soil gradually decreases with the increase of depth, with the settlement at the top of the soil sample being the largest, gradually decreasing to only a slight difference below the middle of the soil sample. Due to the influence of the siltation layer, the drainage experiences an initial rapid increase in drainage volume, gradually decreasing after reaching the maximum value, and finally stabilizing. With an increase of the vacuum degree under the membrane and the depth of drainage board installation, the consolidation effect of the foundation becomes better.

Keywords: backfill soil foundation; vacuum pre-loading; plastic drainage plate; settlement monitoring

0 引言

填海造陆是指通过吹填土方的方式将淤积泥沙等材料堆积在原有海洋区域的底部，逐步沉积形成土体，从而将原本的海洋区域填平、固定泥沙伸出陆地的一种工程技术。目前，真空预压技术是新区吹填场地地基处理的主要方法，该技术发展较为成熟，许多学者对其基本机理进行了深入研究，包括试验研究^[1-4]、数值模拟研究^[5-8]、理论研究^[9-10]等。杰尔曼教授（W. Kjellman）于1952年在麻省理工学院举办的一次加固土体会议上首次提出了真空预压法^[11]。相关论文发表后，引起了国内外学术领域和工程领域的广泛关注。何杰等^[12]通过模型试验研究了循环荷载作用下土工格栅、土工格室及纯碎石垫层在软土地基上的承载特性。庄妍等^[13]通过调整膜下真空度、排水板通水能力、排水板间距以及设置深度等因素，发现改变排水板的打设深度对真空预压法加固软土地基效果有显著的影响。武亚军等^[14]提出在实际工程中采用分级加载方式施加真空荷载以提高软土地基的加固效果。闫澍旺等^[15]证明了真空预压法的有效加固深度与真空度大小无关，而与真空度的传递有关。张中琼等^[16]通过室内模拟试验，发现土体强度增长表现出分带性，且与排水体距离、加固时间、外部荷载、渗透路径和附加应力等密切相关。孙宏磊等^[17]对不同初始含水率疏浚淤泥的压缩性和渗透性展开了研究，推导出考虑“土柱”效应及初始含水

率对土体初始有效应力影响的真空预压固结解析解，并通过试验进行了验证。刘勇等^[18]用Abaqus建立了考虑涂抹、变井阻效应的、以天津港某围海造陆工程为例的，三维有限元分析模型。

本文的依托工程位于东莞虎门港，其具有吹填造陆的优越条件，为满足经济开发与城市建设的需要，必须对该场地进行处理。为此，本文进行了室内土工试验、真空预压-PVD（physical vapor deposition）排水板加固吹填土的室内单井模型试验，在模型试验结束后取模型筒内不同位置的土样进行直剪试验和含水率测定。并且用Abaqus软件建立了相应的二维有限元模型，分析改变膜下真空度和改变排水板插入深度等因素对地基固结效果的影响。期望本研究成果能为解决这类工程问题提供新的思路和方法，为分析真空预压排水板加固吹填土问题，以及滨海地区填海造陆工程的建设提供工程价值和有益的参考。

1 试验方案

1.1 试验土体

试验吹填土取自虎门港某工程。按照《岩土工程勘察规范》对土样进行目力鉴别，发现土样中存在些许贝壳碎片，有腐殖质气味，其土体呈灰黑褐色，饱和，土质较均匀，黏性较强，风干后土样呈淡棕灰褐色。通过参考检测报告和室内试验，得到表1所示土样基本物理性质指标。

表 1 吹填土基本物理指标

Table 1 Basic physical indicators of the backfill soil

土样	含水率 $W/\%$	湿密度 $\rho_0/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	孔隙比 e	干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	比重 ρ_s	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_p/\%$	塑限指数 I_p	液限指数 I_L
吹填土	78.16	1.84	1.52	1.34	2.71	57.75	29.87	27.8	1.21

1.2 试验装置及方案

本研究结合已有不同研究者针对真空预压的设计方法^[19-21]，考虑模型筒尺寸对塑料排水板真空预

压处理吹填土的影响，并且考虑后续监测取样等工作需求，试验采用一种上下底面外径为40 cm，高度为100 cm，壁厚为5 mm的高强度有机玻璃（亚

克力)材料模型筒,试验筒内铺设砂垫层和土工织物,以便固定排水板并方便排水。为了使其有效排水直径 d_e 与模型筒的内径相适应,将塑料排水板等效为砂井,《建筑地基处理技术规范》中指出,一般普通砂井的间距可以按照 $n=6\sim 8$ (n 为井径比)选用,塑料排水带或袋装砂井的间距可以按照 $n=15\sim 22$ 选用。本文选用 $n=18$,有效排水直径取模型筒内径 $d_e=390$ mm,塑料排水带可取 $d_p=d_w$,排水板厚度为5 mm,即试验排水板设计规格为宽度30 mm,厚度为5 mm,长度为85 cm。模型筒的密封膜采用透明高黏聚乙烯(polyethylen, PE)密封膜,以防止空气和水分进入。单井模型试验示意图如图1所示。

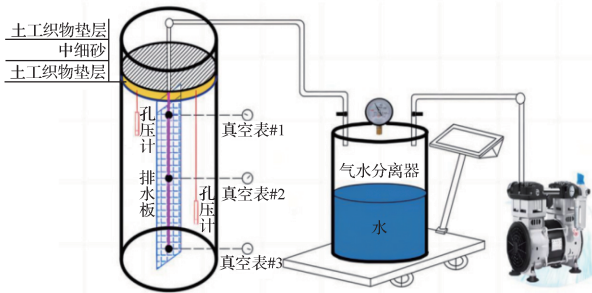


图1 单井模型试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a single well model test

本单井模型试验中的主要测量数据包括:土体内孔隙水压力值、模型筒内的土体沉降量、不同位置处的真空度大小,以及试验排水量。在模型筒内分别设置了深度为15 cm和65 cm的2个孔隙水压力计,其位置分别距离模型筒中心轴线两侧各10 cm,用于测量土体孔隙水压力值;分别在排水板上、中、下3个位置处设置了3个真空探头,用于测量不同位置的真空度大小;在模型筒外部土层表面布置了4个观测点,并且每隔12 h进行一次高度测量,记录观测点与模型筒顶部的高度差;试验排水量则是通过设置在气水分离器下的电子秤读数来记录,真空度的测量直接通过真空压力表上的数据读取。试验过程中实时监测试验数据,直至排水量连续20 h内变化很小时停止试验。

为了模拟现场饱和吹填土,首先需要将含水率一定的吹填土淤泥均匀搅拌,并在过渡筒中静置24 h,然后抽出淤泥中析出的积水。将搅拌均匀的吹填土倒入模型筒中,土样高度为85 cm,并在相应位置处埋设测试仪器。为了模拟现场施工工况和涂抹效应,在装填完土样后再插设排水板。在土样顶部铺设一层由两层织物包裹的5 cm厚的中细砂垫层,作为真空荷载传递和排水的中间部分,并将排水板端头和抽真空管埋于砂垫层内。最后,安装好试验井密封上盖,

并覆盖多层PE密封膜。在所有测试仪器安装就绪后,连接排水板和抽水管,将气水分离器与真空泵相连接。在试验过程中,保持真空压力值在-85 kPa,以获得准确的实验数据。

1.3 试验结果与分析

1.3.1 试验结果

图2为单井模型试验所得土样不同埋深处的孔隙水压力变化曲线。

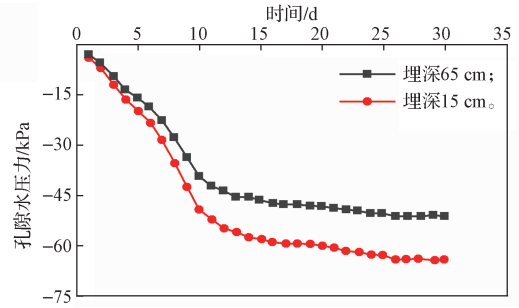


图2 不同埋深处孔隙水压力变化曲线

Fig. 2 Pore water pressure variation curves at different burial depths

由图2可以得知,在试验初期,随着土样被施加真空预压力后,孔隙水压力开始快速增加。但是到第12 d后,这种增速开始减缓,随后孔隙水压力保持在一个较为稳定的减缓状态。第30 d时,浅层土与深层土的孔隙水压力差异较大。在埋深15 cm处,孔隙水压力为-64.45 kPa,而在埋深65 cm处,孔隙水压力为-51.44 kPa。值得注意的是,土样的孔隙水压力并没有随着真空度的下降而出现明显变化。同时,浅层土的孔隙水压力变化相对较大,而深层土的孔隙水压力变化则相对较小。当试验达到稳定状态后,65 cm埋深处的孔隙水压力约为15 cm处的孔隙水压力的80%。

试验所得不同排水板位置处土样的真空度变化曲线如图3所示。

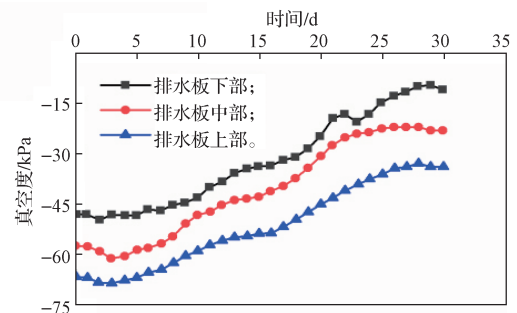


图3 土样真空度变化曲线

Fig. 3 Soil vacuum degree variation curves

如图3所示,排水板在短时间内迅速达到了最高

真空度值。排水板的上、中、下 3 个位置处的真空度值在试验的前 4 d 内均达到了最高值,之后逐渐降低,并在 25 d 时趋于稳定。图 3 所示试验数据表明,排水板下部的真空度值明显低于排水板中部和上部的对应值,第 30 d 排水板下部的真空度值为 -10.93 kPa,约为排水板中部真空度值的 83%,约为排水板上部真空度值的 72%。

试验过程中,取 4 个观察点的平均值来进行土体沉降量的监测,其沉降曲线如图 4 所示。

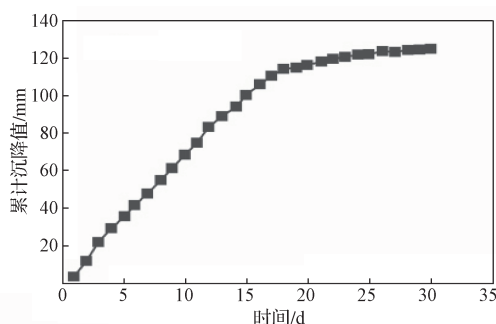


图 4 土体沉降变化曲线

Fig. 4 Soil settlement variation curve

观察图 4 所示土体沉降曲线,可以发现在试验初期的 17 d 内,模型筒内的土体发生了较快的沉降,这是因为土体内部的孔隙随着排水板引入的真空度增大,土体颗粒之间的接触面积增大,土体内部的颗粒结构得到重新排列所导致的。在 20 d 之后,土体的累计沉降值增加缓慢,这是因为土体的压缩已经到达了一定程度,接下来的时间里土体的沉降速度逐渐减缓。至 25 d 左右,土体的累计沉降值已经不再出现明显的变化,这说明土体内部的排水已经比较充分。在试验进行到 30 d 时,土体压缩过程基本结束,最终的土体沉降量为 124 mm。

图 5 为试验所得土样的排水量变化曲线。

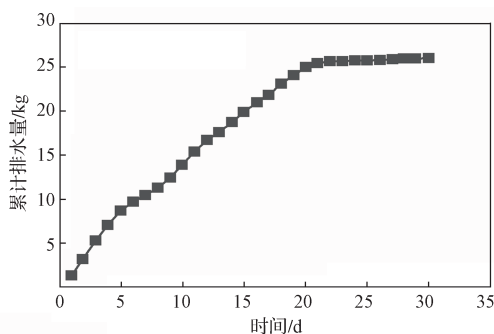


图 5 土体排水量变化曲线

Fig. 5 Soil water discharge variation curve

由图 5 可知,在施加真空负压初期,由于真空压力的作用,土样中赋存的大量重力水通过排水板被快

速排出,排水速率很快。随着试验进行,排水速率逐渐降低。约 20 d 后,排水量的变化趋于稳定,最终的排水量为 24.97 kg。

1.3.2 土体固结效果分析

试验结束后,对不同深度处的土体进行取样,用烘干法测定土样含水率,并对土样进行直剪试验,测定土样的抗剪强度指标,所得结果见表 2。

表 2 土样试验后的力学性能

Table 2 Mechanical properties of soil samples after testing

土样 编号	埋深 / cm	与排水板 水平距离 / cm	黏聚力 C/ kPa	内摩擦角 $\varphi/ (^{\circ})$	含水率 W/%
1	0	5	10.5	6.4	40.32
2	30	5	7.4	4.5	44.47
3	60	5	4.7	1.8	50.75
4	0	15	8.8	5.5	43.51
5	30	15	6.8	3.7	46.26
6	60	15	4.1	1.6	53.71

根据表 2 中数据可知,土体的黏聚力及内摩擦角随着深度的增加而逐渐降低,与深度的变化规律相符。在紧邻排水板和表面土体的处理区域,土体的含水率都降至液限含水率以下,表明土样中的自由水已经基本排出。此外,土样的沉降变化曲线与含水率变化曲线的规律基本相同,即土样的顶部沉降量最大,然后逐渐减少,中部以下土样的沉降仅有轻微差异。这表明真空预压法结合 PVD 排水板加固吹填土地基能够取得一定的效果,使土体的含水率降低,进一步提高土体的抗剪强度。

1.3.3 排水板淤堵问题分析

如图 2 所示,排水结束后,在距离排水板 10 cm 处不同深度的土层中测量孔隙水压力,发现埋深为 15 cm 处的最小值为 -64.45 kPa,而埋深为 65 cm 处的值接近于 -51.44 kPa。这说明负压在竖直方向上逐渐减小,与真空度观测结果一致。另外,从表 2 中可以看出,在远离排水板处的土层中,不同埋深土样黏聚力、内摩擦角参数都比靠近排水板处的小,说明孔隙水压力差主要集中在距离排水板 10 cm 以内的范围。因此推断,在这个范围内由于颗粒运移而形成了淤堵层,阻碍了孔隙水继续流动。

对不同阶段的排水速率进行了分析,并计算了相邻时段之间的平均排水速率,绘制了排水速率随时间变化的曲线,如图 6 所示。从图 6 中可以清晰地看出排水速率随时间的变化规律:在排水开始时,排水速率迅速增加,达到最大值后逐渐减小,最后趋于稳定。这一曲线反映了排水过程中淤堵层的形成和发展过程。淤堵层是由于颗粒向排水板方向运动而产生的一

种阻碍渗流的层状结构,在排水板^[22]附近形成“土柱”。淤堵层的存在影响了颗粒和真空渗流场的分布,进而导致土体性质在不同位置处发生变化。

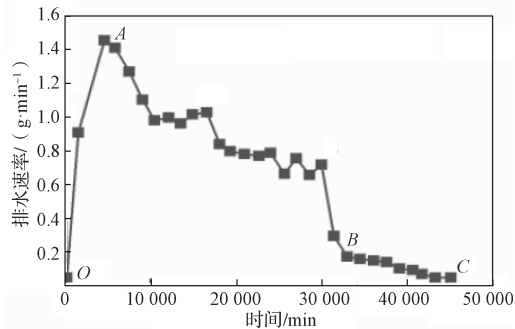


图6 土体排水速率变化曲线

Fig. 6 Soil drainage rate variation curve

颗粒运移和淤堵层形成是一个相互作用的过程,它们共同影响着真空渗流场的分布和土体性质的变化,这些变化在表2中有所反映。淤堵层形成规律和排水速率变化规律之间存在着密切的联系。为了更好地分析淤堵层的形成机理,将图6中的排水阶段按照排水速率的变化特点划分为3个子阶段:OA段(启动阶段)、AB段(减速阶段)和BC段(平缓阶段)。在启动阶段OA中,由于土样中的细颗粒被真空吸力带走,土体内部孔隙增大,使得渗流通道畅通无阻,从而排水速率快速上升并达到峰值。在减速阶段AB中,由于颗粒不断向上运动并聚集在排水板处,形成了初步的淤堵层。这样就使得渗流通道受到限制,导致排水速率快速下降,并逐步趋于稳定。在平缓阶段BC中,由于淤堵层已经完全覆盖了排水板表面,并且达到一定厚度和密度,因此渗流通道基本被封闭,导致排水速率缓慢下降并接近0 g/min。

2 数值模拟

2.1 建模基本假定

针对虎门港地区吹填土地基进行建模的基本假定及说明如下:

1) 土体由四层弹塑性的土骨架组成,每一层的

土骨架都可以根据土层的分布情况进行设置。在不同土层间,接触面上的竖向位移是完全耦合的。同时,每层土骨架都具有相同的渗透系数,表明水在同一水平面不同方向上渗流的速度是一致的。

2) 孔隙水按照达西定律进行流动,水的渗流速度与水力坡降成正比。这样就形成了一个流固耦合问题,即孔隙水对土体产生作用力,而土体又影响孔隙水的分布和流动。

3) 假设土体是完全饱和的,即所有的孔隙都充满了水,并且忽略抽真空过程中地下水位可能发生变化对问题的影响。

4) 将塑料排水板简化为平面应变问题,即认为排水板相当于在地基中打入了一道砂墙。这样可减少计算量,并保证排水板能有效地引导孔隙水流出。

2.2 有限元计算模型

虎门港地区真空预压加固吹填土地基试验段采用塑料排水板进行加固。该试验段宽40 m,塑料排水板厚0.5 cm,宽10 cm,打设深度为15 m。为了分析砂井地基固结问题,采用二维平面应变 Biot 固结理论。为考虑对称性,以试验加固区中心线为对称轴,取试验区的一半建立模型,如图7所示。

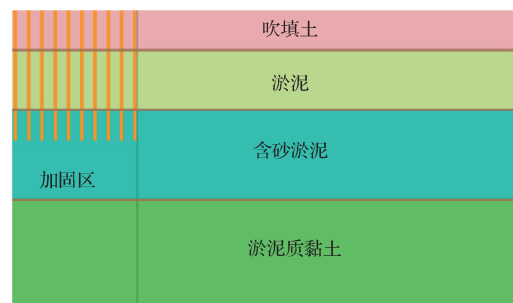


图7 有限元计算模型示意图

Fig. 7 Finite element calculation model schematic diagram

地基的计算宽度为80 m,包括20 m的PVD排水板加固区和60 m的影响区。计算时,考虑现场真空预压的影响深度和现场土质条件,取40 m作为建模深度,土层计算参数见表3。

表3 土体计算参数

Table 3 Soil mass calculation parameters

编号	土层	厚度 h / m	饱和重度 $\gamma_{sat}/(kN \cdot m^{-3})$	泊松比 ν	黏聚力 C / kPa	摩擦角 ϕ / ($^{\circ}$)	初始 孔隙比 e_0	变形模量 E_s /MPa	水平渗透 系数 $k_h/(m \cdot s^{-1})$	竖向渗透 系数 $k_v/(m \cdot s^{-1})$
1	吹填土	4.6	18.4	0.33	15.40	23.98	1.510	2.53	1.82×10^{-6}	4.12×10^{-6}
2	淤泥	6.8	17.8	0.40	12.32	15.61	1.220	1.95	1.41×10^{-5}	3.28×10^{-6}
3	含砂淤泥	10.3	19.3	0.35	14.56	12.34	1.712	3.04	2.76×10^{-5}	1.04×10^{-7}
4	淤泥质黏土	12.5	18.7	0.38	11.28	9.34	1.775	2.15	9.64×10^{-7}	2.12×10^{-7}

塑料排水板常被用于增加软弱地基^[23]的渗透性。由于其截面尺寸及长度相比周围土体的都非常小，因此其力学性能对其功能的影响较小。故在建立塑料排水板加固有限元模型时，可以根据排水板的工作状况构建相应的有限元单元，这种单元无需考虑其自身重力、受剪和受扭性能，只需要考虑排水板的轴向力和渗透性能。

塑料板的长期通水能力在 100 m³/a 的情况下^[24]，井阻作用可以忽略不计。结合塑料排水板规格，并且考虑其井阻和涂抹效应，排水板计算参数的选取如表 4 所示。

表 4 排水板计算参数

Table 4 Calculation parameters for drainage plates

材料	深度 /m	泊松比 ν	水平渗透系数 $k_h/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	竖直渗透系数 $k_v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
排水板	15	0.31	2.0×10^{-3}	2.0×10^{-3}

根据《水运工程塑料排水板应用技术规程》^[25]（JTS 206-1—2009）的建议和赵维炳^[26]的研究，对土层的渗透系数进行了调整，调整后的土层渗透系数见表 5。

表 5 调整后的土层渗透系数

Table 5 Adjusted soil permeability coefficients

土层	水平渗透系数 $k_h/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	竖直渗透系数 $k_v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
填土	2.11×10^{-6}	3.75×10^{-6}
淤泥	1.64×10^{-5}	2.98×10^{-6}
含砂淤泥	3.20×10^{-5}	0.95×10^{-7}
淤泥质黏土	11.18×10^{-7}	1.93×10^{-7}

可以将试验段加载过程分为真空预压阶段、真空荷载正式施加阶段和真空荷载卸载阶段 3 部分。根据现场实际情况，首先施加 -80 kPa 的真空压力，时间设置为 24 h，然后持续加压真空荷载到 -90 kPa，持续 100 d 后结束真空预压。

针对吹填土地基进行加固时的边界条件设置，通常会将左右两侧的水平方向设置为固定约束，这意味着土体在水平方向上无法发生移动或变形；竖直方向则被设置为自由，允许土体在该方向上发生变形。在这种情况下，不排水边界条件被采用，这意味着土体内的孔隙水压不会发生变化。在加固区域内，地表被设置为完全自由面，没有施加位移约束条件。由于采用真空预压加固的方式，地表孔隙水压力为 0 kPa，因此为不排水边界。在加固区域外，地表则与大气相连，孔隙水压力为 0 kPa，因此被设置为自由排水边界。最后，地基地面被设置为完全约束，并且也不允许排水。吹填土地基的模型网格划分如图 8

所示。

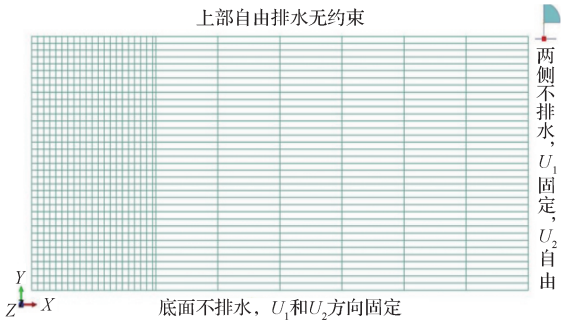


图 8 吹填土地基模型网格划分

Fig. 8 Model meshing of the backfill soil foundation

2.3 计算结果与分析

2.3.1 位移沉降曲线

图 9 为加固区中心沉降位移云图。

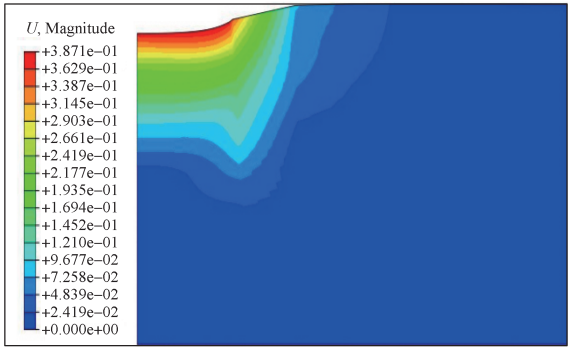


图 9 加固区中心沉降位移云图

Fig. 9 Settlement displacement cloud map in the center of reinforced area

由图 9 可知，真空预压加固区域的沉降较为显著，土体整体向着加固区中心发生位移，加固区中心表面最终沉降约为 38.7 cm 左右，与预期效果相符。随着距离加固区域的增加，土体位移逐渐减小，表明真空预压加固的影响范围存在一定的限制性。因此，实际工程中，需根据具体情况进行合理设计和施工，以确保达到预期的加固效果。

计算的加固区中心表面沉降曲线如图 10 所示，侧向位移如图 11 所示。

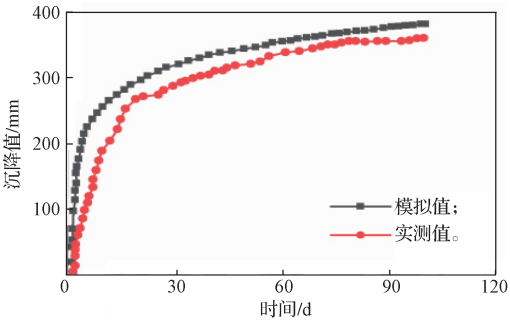


图 10 加固区中心表面沉降图

Fig. 10 Surface settlement map at the centre of the reinforced area

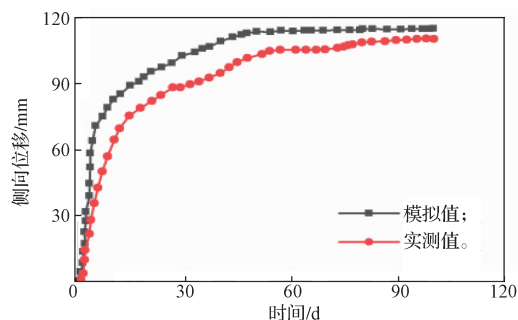


图 11 距离加固中心 10 m 处侧向位移

Fig. 11 Lateral displacement at a distance of 10 meters from the reinforced center

根据图 10 和图 11 所示的分析结果可以发现, 采用弹塑性模型(摩尔库伦塑性模型)进行试验数值模拟的计算结果与现场实测值的差距较小, 呈现出一致的变化规律, 表明该模型能够较准确地模拟现场真空预压处理吹填土地基的加固效果。

2.3.2 孔隙水压力计算结果

图 12 为孔隙水压力计算云图。由图可知, 真空预压加固区域的孔隙水压力变化较大, 随着土体深度的增加, 孔隙水压力逐步增加。

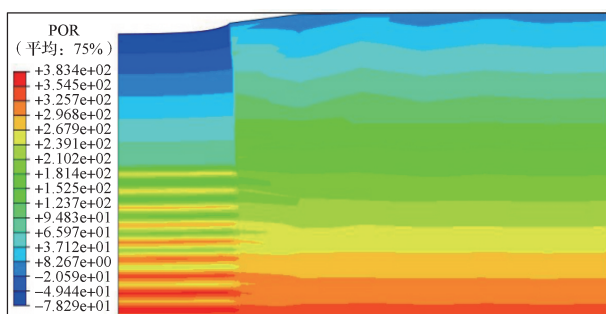


图 12 孔隙水压力计算云图

Fig. 12 Pore water pressure calculation cloud diagram

图 13 给出了加固区中心的孔隙水压力的计算值变化情况。

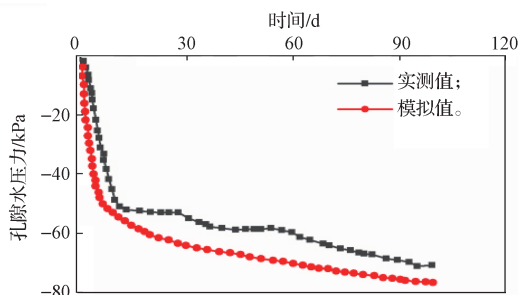


图 13 加固区中心孔隙水压力变化曲线

Fig. 13 Pore water pressure variation curves in the centre of the reinforced zone

观察图 13 所示加固区中心的孔隙水压力的计算

值变化情况, 可知其模拟值与实测值有着一定差距, 但是总体变化趋势一致。图 13 所示结果表明, 排水板能够将负压有效地传递到深层土体中, 使孔隙水压力在抽真空开始时迅速下降, 然而随着抽真空时间的增加, 下降速度逐渐减缓。

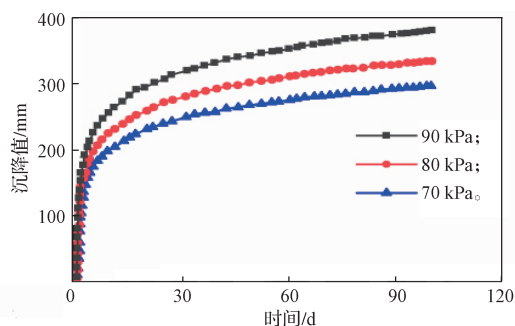
对侧向位移和孔隙水压力的模拟值与实测值进行对比, 可以得知所设立的边界条件并未对主体造成影响。

2.4 真空预压法加固效果影响条件分析

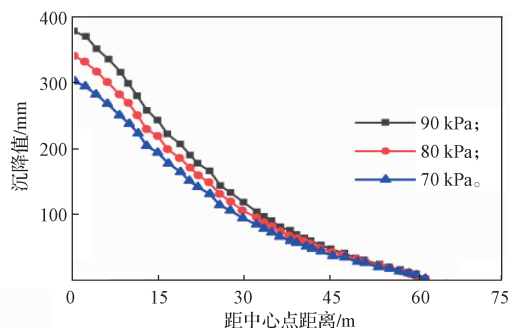
通过对比现场监测数据和数值模拟计算结果可以发现, 真空预压法结合 PVD 排水可以有效加固吹填土地基, 在固结过程中还会产生垂直沉降和侧向位移, 对周边环境造成一定影响。针对这一问题采用了数值模拟方法, 进一步研究真空度和排水板插入深度等因素对加固效果的影响。

2.4.1 改变膜下真空度

在原有限元模型的基础上, 保持其他条件不变, 分别计算真空度从 70 kPa 到 80 kPa 再到 90 kPa 变化时, 加固区中心点和地表的沉降变化情况。图 14 为不同真空度下加固区中心点和地表的沉降曲线, 其显示出中心点和地表的沉降在膜下真空度近似线性变化的情况下逐渐增加。



a) 加固区中心沉降曲线



b) 地表沉降曲线

图 14 不同真空度下的地基位移曲线

Fig. 14 Foundation displacement curves under different vacuum degrees

2.4.2 改变排水板插入深度

在原有限元模型的基础上, 保持其他条件不

变, 仅改变塑料排水板打设深度, 以研究不同深度下土体沉降和水平位移的变化情况。图 15 所示为塑料排水板打设深度从 10 m 变化到 20 m 时, 路面中心点和塑料排水板底部的对称点的土体深度变化曲线。

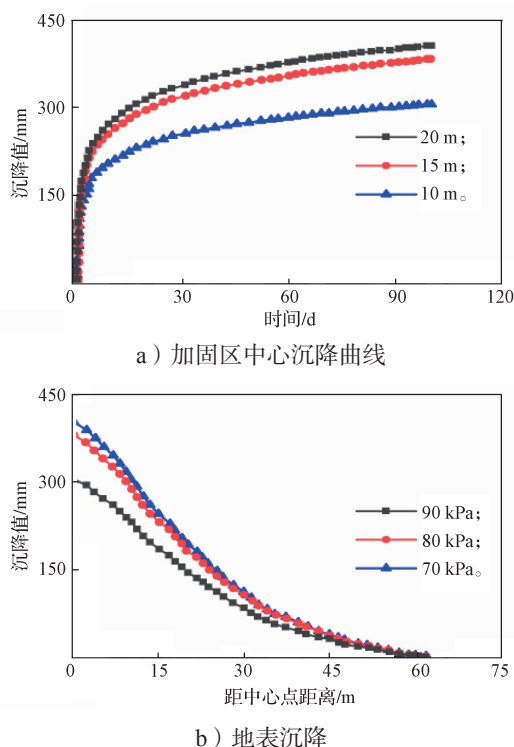


图 15 改变排水板插入深度的地基位移曲线

Fig. 15 Foundation displacement curves for changing the insertion depths of drainage plates

从图 15 中可以看出, 在打设深度为 10~15 m 范围内, 随着排水板打设深度增加, 路面中心点的沉降梯度和水平位移明显增加。然而在 15~20 m 范围内, 这种趋势逐渐变弱。因此, 需要综合考虑其他因素并合理设计预压方案, 仅仅增加排水板的打设深度并不能保证达到预期的加固效果, 也需要仔细选择适当的深度, 以确保加固效果和成本的效益最大化。

3 结论

本研究以虎门港吹填土为研究对象, 进行了室内土工试验、真空预压-PVD 排水板加固吹填土的室内单井模型试验, 构建了相应的真空联合排水板预压加固吹填土地基的二维有限元模型, 得到的主要结论如下:

1) 试验土颗粒较细, 在排水板内会出现淤堵现象。淤堵行为主要发生在排水板的芯板与滤膜之间。由于土颗粒与芯板之间存在黏滞阻力, 真空度会沿着排水板长度方向逐渐降低。

2) 当土体内孔隙压力趋于稳定时, 就会形成淤堵层, 并导致远离排水板的地方土体内压差变小, 渗流也会停滞不前。此外, 淤堵层的形成还会导致土体性质的差异, 这些差异将直接影响土体的渗流作用。淤堵现象不仅会对排水板附近的土体产生影响, 也会对整个土体内的水流和渗透性能产生影响。

3) 排水速率呈现出迅速上升、逐渐下降再到缓慢达到平衡的 3 个变化过程, 这些变化规律可以用来判定淤堵层的形成时间。当排水速率开始下降时, 说明土颗粒已经开始运移聚集, 开始形成淤堵层。当排水速率趋于平稳时, 说明淤堵层完全形成。此时, 土颗粒的运移已被有效限制, 排水速率也趋于稳定。淤堵层的形成不仅会影响排水速率, 还会对土体的抗剪强度和沉降变形等性质产生影响。

4) 通过膜下真空度从 70~90 kPa 的计算, 发现加固区中心点的沉降和地表沉降随着膜下真空度近似呈线性变化。因此, 提高膜下真空度值, 且保持预压过程中的膜下真空度值基本不变, 是有效提高预压效果的关键。

5) 在 10~15 m 范围内, 随着排水板打设深度增加, 路面中心点的沉降梯度和水平位移明显增加。然而在 15~20 m 范围内, 这种增加趋势逐渐变弱。因此, 需要综合考虑其他因素并合理设计预压方案, 仅仅增加排水板的打设深度并不能保证达到预期的加固效果。

参考文献:

- [1] 李 坤, 曾芳金, 胡秀青, 等. 不同固结度真空预压联合堆载加固吹填土室内试验研究 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16(27): 260-264, 282.
LI Kun, ZENG Fangjin, HU Xiuqing, et al. Experimental Study of Vacuum Combine Surcharge Preloading at Different Consolidation Degree [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(27): 260-264, 282.
- [2] 孙召花, 余湘娟, 高明军, 等. 真空-电渗联合加固技术的固结试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39(2): 250-258.
SUN Zhaohua, YU Xiangjuan, GAO Mingjun, et al. Experimental Studies on Vacuum Preloading Incorporated with Electro-Osmosis Consolidation for Dredger Fill [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(2): 250-258.
- [3] 胡建斌, 潘 曼, 李维安, 等. 增压式真空预压法加固海相吹填土的现场试验研究 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18(9): 124-129.

- HU Jianbin, PAN Man, LI Weian, et al. Field Tests on Marine Dredger Fill Foundation by Air-Boosted Vacuum Preloading[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(9): 124-129.
- [4] 王 艳. 真空预压法处理地基的加固特性及数值模拟[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- WANG Yan. Strengthening Characteristics of Vacuum Preloading and Numerical Simulation[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [5] 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.
- SHA Ling, LIU Hong, WANG Guocai. Finite Element Analysis on Large Deformations of Dredger Fill Improved by Combined Vacuum and Surcharge Preloading[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2021, 49(2): 140-146.
- [6] 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.
- LEI Huayang, LI Chenyuan, LIU Jingjin, et al. Experimental Study and Numerical Simulation of an Alternating Vacuum Preloading Method for Strengthening Hydraulic Fill Super Soft Soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(10): 2112-2125.
- [7] 问建学, 丁 强, 陈 松. FLAC3D 模拟真空联合堆载预压处理软土路基变形的研究[J]. 公路, 2018, 63(5): 65-68.
- WEN Jianxue, DING Qiang, CHEN Song. Study on FLAC3D Simulation of Vacuum Combined with Surcharge Preloading for Soft Soil Subgrade Deformation Treatment[J]. Highway, 2018, 63(5): 65-68.
- [8] CLOUGH R W, CHOPRA A K. Earthquake Stress Analysis in Earth Dams[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1966, 92(2): 197-211.
- [9] 雷 鸣, 徐汉勇, 匡希龙, 等. 真空作用下软土固结机制及实例分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(6): 1433-1439.
- LEI Ming, XU Hanyong, KUANG Xilong, et al. Analysis of Consolidation Mechanism and Example of Treating Soft Foundation in Vacuum Preloading[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(6): 1433-1439.
- [10] 胡亚元. 半透水边界砂井真空联合堆载预压 Hansbo 固结解[J]. 工程科学学报, 2018, 40(7): 783-792.
- HU Yayuan. A Hansbo's Consolidation Solution of Sand-Drained Ground with Impeded Boundaries Under Vacuum and Surcharge Preloading[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(7): 783-792.
- [11] KJELLMAN K. Consolidation of Clay Soil by Means of Atmospheric Pressure[J]. Procconfon Soil Stabilization, 1952, 44(302): 451-454.
- [12] 何 杰, 高建喜, 孟森松, 等. 软土地基上循环荷载作用下加筋碎石垫层工作特性分析[J]. 湖南工业大学学报, 2017, 31(1): 35-40.
- HE Jie, GAO Jianxi, MENG Sensong, et al. Analysis of the Operation Performance of Reinforced Grave Cushion Under Cyclic Loading on Soft Soil Foundations[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2017, 31(1): 35-40.
- [13] 庄 妍, 张 飞, 李之隆, 等. 真空预压加固软土地基数值模拟分析[J]. 低温建筑技术, 2015, 37(11): 99-101.
- ZHUANG Yan, ZHANG Fei, LI Zhilong, et al. Numerical Simulation Analysis of Vacuum Preloading for Strengthening Soft Soil Foundation[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2015, 37(11): 99-101.
- [14] 武亚军, 覃 萍, 邹道敏, 等. 不同加载方式下真空加固吹填软土的现场试验与数值模拟[J]. 水运工程, 2013(8): 165-172.
- WU Yajun, QIN Ping, ZOU Daomin, et al. In-Situ Tests and Numerical Simulation of Soft Soil Consolidation Using Vacuum Preloading Method Under Various Loading[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(8): 165-172.
- [15] 闫澍旺, 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 Shuwang, HOU Jinfang, CHENG Dongdong. Effective Depth of Vacuum Preloading for Reinforcing Soft Soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(7): 774-778.
- [16] 张中琼, 王 清, 秦 炎, 等. 快速加固吹填土的室内模拟试验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40(3): 645-650.
- ZHANG Zhongqiong, WANG Qing, QIN Yan, et al. Indoor Simulation Test of Quick Consolidation for Dredger Fill[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2010, 40(3): 645-650.
- [17] 孙宏磊, 陆 逸, 潘晓东, 等. 真空预压作用下初始含水率对疏浚淤泥固结影响研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(11): 3029-3040.
- SUN Honglei, LU Yi, PAN Xiaodong, et al. The Effect of Initial Water Content on the Consolidation of Dredged Slurry Under Vacuum Preloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(11): 3029-3040.
- [18] 刘 勇, 戚 蓝, 李少明, 等. 考虑变井阻和涂抹效应的真空预压三维有限元分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(5): 1517-1523.
- LIU Yong, QI Lan, LI Shaoming, et al. 3D Finite

- Element Analysis of Vacuum Preloading Considering Inconstant Well Resistance and Smearing Effects[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(5): 1517–1523.
- [19] 李水江, 汤家郗, 李校兵, 等. 真空预压联合逐级动力压实和电渗法处理疏浚淤泥试验研究 [J]. 土木与环境工程学报 (中英文), 2023, 45(6): 143–150.
LI Shuijiang, TANG Jiayi, LI Xiaobing, et al. Experimental Study on Vacuum Preloading Combined with Progressive Dynamic Compaction and Electro-Osmosis Method for Dredged Slurry[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(6): 143–150.
- [20] 李长辉, 武 航, 程国勇, 等. 不同排水板真空预压软土加固对比试验研究 [J]. 岩土力学, 2022, 43(10): 2819–2827.
LI Changhui, WU Hang, CHENG Guoyong, et al. Comparative Experimental Study on Soft Soil Reinforcement by Vacuum Preloading with Different Band Drains[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(10): 2819–2827.
- [21] 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.
LEI Huayang, WANG Lei, LIU Jingjin, et al. Experimental Analysis of Chemical Modification Combined with Vacuum Preloading Method for Reinforcing Dredger Fill[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(4): 891–900.
- [22] 张 振, 米占宽, 朱群峰, 等. 考虑排水板土柱效应的软土地基固结特性研究 [J]. 水利水运工程学报, 2023(2): 70–79.
ZHANG Zhen, MI Zhankuan, ZHU Qunfeng, et al. Study on Consolidation Characteristics of Soft Soil Foundation Considering Soil Column Effect of PVDS[J]. Hydro-Science and Engineering, 2023(2): 70–79.
- [23] 袁静静, 邱红胜, 石 澍, 等. 基于 ABAQUS 的真空-堆载联合预压法的仿真研究 [J]. 西北地震学报, 2011, 33(增刊 1): 266–269.
YUAN Jingjing, QIU Hongsheng, SHI Shu, et al. Simulation Study on Vacuum-Surcharge Preloading Method Based on ABAQUS[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2011, 33(S1), 266–269.
- [24] CHAI J C, MIURA N. Investigation of Factors Affecting Vertical Drain Behavior[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(3): 216–226.
- [25] 中华人民共和国交通运输部. 水运工程塑料排水板应用技术规程: JTS 206-1—2009[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009: 1–5.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical Specification for Application of Plastic Drainboard for Port and Waterway Engineering: JTS 206-1—2009[S]. Beijing: China Communications Press, 2009: 1–5.
- [26] 赵维炳, 陈永辉, 龚友平. 平面应变有限元分析中砂井的处理方法 [J]. 水利学报, 1998, 29(6): 54–58.
ZHAO Weibing, CHEN Yonghui, GONG Youping. Treatment Method of Sand Drain in Plane Strain Finite Element Analysis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 29(6): 54–58.

(责任编辑: 廖友媛)