

真空预压中排水板参数对处理效果的影响

武亚军¹, 吴明灿¹, 陆逸天², 吴锦津¹

(1. 上海大学 力学与工程科学学院, 上海 200072; 2. 东华大学 环境科学与工程学院, 上海 201620)

摘要:为进一步优化预制排水板(PVD)布置方式,探讨PVD参数对真空固结效果的影响,在传统PVD理论的基础上,提出小宽度、小间距PVD-真空预压法。在保证PVD材料用量相同的同时,适当调整PVD的宽度与间距以提高真空固结效率。定义时间影响因子 T_h 与真空预压中叠加影响因素 F 的比值(T_h/F)作为表征参数进行固结分析。比较不同参数的PVD,真空固结过程排水量、表层沉降等指标变化。结果表明,当 T_h/F 越大时,土体的固结效率越高。采用宽度和间距分别为25和17 mm的PVD可以有效地提高真空固结效率,相比传统布置方式总排水量提高了约6.9%。采用小宽度、小间距的PVD可以有效缓解抗剪强度沿深度和径向的衰减。由此,可得出在耗材一定的情况下,采用小宽度、小间距PVD结合真空预压法有一定的实践意义。

关键词:软土地基处理;真空预压法;预制排水板参数;真空固结效率;颗粒迁移

中图分类号: TU44 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)03-0138-07

Influence of Drainage Plate Parameters on Treatment Effect in Vacuum Preloading

WU Ya-jun¹, WU Ming-can¹, LU Yi-tian², WU Jin-jin¹

(1. School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200072, China; 2. College of Environment Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China. Corresponding author: WU Ya-jun, E-mail: wujldz@shu.edu.cn)

Abstract: In order to further optimize the layout of prefabricated vertical drains (PVD) and explore the influence of PVD parameters on the vacuum consolidation effect, based on the traditional PVD theory, a small-width, small-spacing PVD-vacuum preloading method was proposed. This method adjusted the width and spacing of the PVDs appropriately to improve the vacuum consolidation efficiency, while ensuring that the amount of PVD material remained the same value. The ratio of the time impact factor (T_h) and superimposed influencing factor (F) in vacuum preloading was defined as the characterization parameter for consolidation analysis. The changes in drainage volume, surface settlement, and other indicators during the vacuum consolidation process under different PVD parameters were compared. The results show that the consolidation efficiency of the soil increases as the T_h/F increases. Using PVDs with a width of 25 mm and a spacing of 17 mm can effectively improve the consolidation efficiency, increasing the total drainage volume by approximately 6.9% compared to the traditional layout. In addition, the use of small-width, small-spacing PVDs can effectively alleviate the attenuation of shear strength along depth and radial direction. Therefore, it can conclude that with a fixed material consumption, the use of small-width, small-spacing PVDs combined with vacuum preloading method has certain practical significance.

Key words: soft soil foundation treatment; vacuum preloading method; prefabricated vertical drains(PVD) parameters; vacuum consolidation efficiency; particle migration

吹填淤泥具有含水率高、承载力低、压缩性高等特点,是典型的超软土。超软土常见的处理

方法主要包括固化法、真空预压法等。真空预压法具有施工简单、工期短、成本低、加固效果好等特点,使其在超软土处理领域得到广泛使用^[1]。

真空预压法自诞生至今,国内外学者针对真空预压理论以及模型试验等,进行了大量的研究^[2-3]。主要内容涵盖了荷载传递、排水功能、排水板传递性能、加固机制理论计算等,并在这些研究的基础上不断完善现有的真空预压理论,得出了一些规律性的结论:①在真空度的传递方面,高会强^[4]发现真空度的传递在土体中比排水板边有明显的滞后性,并指出真空度在板边沿深度方向呈现出近似线性衰减、在土体中呈现指数衰减的特征;②在排水板的有效影响范围方面,Gao等^[5]指出塑料排水板的影响范围是从圆锥体发展为圆台体的过程,当井阻因子过大时,固结时间的增加并不能明显改善排水板有效影响范围;③针对土体淤堵方面,姜海波等^[6]基于粒子图像测速法(PIV)指出,土颗粒在渗透力作用下朝排水板方向迁移并集聚在排水板附近是造成“土桩”出现的重要因素。

目前在真空预压处理新近吹填淤泥过程中仍存在的问题仍是不均匀固结及插板时的涂抹作用,导致排水板附近土体渗透性能降低,进而出现淤堵现象,减缓真空固结速率。针对上述问题,学者们从排水板类型、布置形式、间距等参数方面进行了以下研究:①在排水板类型方面,蔡袁强^[7]研发了一种新型的整体式排水板,这种排水板的排水通量以及抗弯折性能相比于传统的排水板均有提高;Wu等^[8]在芬顿-真空预压处理污泥时改变PVD滤膜孔径,发现小孔径滤膜会降低真空固结效果。②在排水板布置方面,有学者提出了水平排水板(PHD),Shinsha等^[9]在现场试验中采用PHD-真空预压法进行地基处理,发现PHD处理浅层淤泥的效果远优于PVD;Chai等^[10]提出一种半经验的固结分析方法,该法通过经验公式将PHD固结单元转化为轴对称模型。③在PVD宽度方面,龚永康等^[11]在4根宽排水板的形心位置增加一根窄排水板,使“土桩”搭接区扩大,增大浅部土层强度,并指出虽然窄板孔压消散较慢,但是宽、窄板最终沉降相差较小。④排水板间距也是影响真空预压处理效果的重要因素^[12],Wu等^[13]通过真空预压透明土模型试验探究相邻排水系统的相互作用机制,并指出排水板间距的不同会影响土体位移场。

从上述国内外学者的研究可以看出,针对

PVD的参数尤其是PVD的宽度与间距,往往只研究了单个参数对真空固结效率的影响,而在二者共同作用下,对真空预压处理效果影响的研究较少。本文针对上海地区典型软土层,在PVD耗材一定的情况下,采用小宽度、小间距的排水板进行真空预压模型试验,探究排水板间距和宽度对真空预压固结变形速率的影响,并结合Hansbo固结理论与颗粒迁移规律研究排水板间距、宽度对真空预压处理效果的影响机理,给出排水板参数的设计建议。

1 排水板宽度和间距影响的理论分析

1.1 Hansbo 固结理论

Hansbo固结理论^[14]可以考虑水平向固结及PVD插板施工引起涂抹效应的影响,因此常被用作真空预压法固结变形计算的理论依据,固结度 U_t 的计算见式(1)。

$$U_t = 1 - e^{-\frac{C_h t}{d_c^2}} \quad (1)$$

式中: T_n 为时间影响因子, $T_n = \frac{C_h t}{d_c^2}$, C_h 为水平固结系数; t 为加载后的时长, d_c 为有效排水直径(本文中取排水板间距); F 为排水板间距、涂抹效应和井阻因素的叠加影响系数, $F = F_n + F_r + F_s$, F_n 为排水板间距影响因子, F_r 为井阻影响因子, F_s 为涂抹区影响因子, $F_n = \ln\left(\frac{d_c}{d_w}\right) - \frac{3}{4}$, $F_s = \left(\frac{k_h}{k_s} - 1\right) \ln\left(\frac{d_s}{d_w}\right)$, $F_r = \pi z(L-z) \frac{k_h}{q_w}$, d_w 为排水板等效直径, $d_w = 2(a+b)/\pi$,其中 a 和 b 分别为排水板的宽度和厚度; k_h 为未扰动区的水平渗透系数, k_s 为涂抹区的水平渗透系数, d_s 为涂抹区直径, L 为排水板插板深度, z 为排水板上某一点距排水板底部的距离, q_w 为排水板排水通量。

通过Hansbo固结理论可以发现,排水板参数 d_w 和 d_c 是影响固结速率的重要因素,而 d_w 与 d_c 的影响可以通过 T_n/F 作为表征参数应用到固结效率的理论分析中。

1.2 小宽度、小间距PVD-真空预压法的设计理论分析

本节将通过算例对小宽度、小间距PVD-真空预压法的设计理论进行分析。案例选自温州某工地真空预压加固淤泥地基现场。土样具体参数取值如下: $k_h = 2k_s = 6.48 \times 10^{-4}$ m/d, $d_s = 2.5d_w$, $C_h = 1.829 \times 10^{-2}$ m²/d, $q_w = 150$ m³/a。通过塑料排水板

参数的不同划分为 2 种工况. 工况 1: PVD 间距 $d_{e1}=1\text{ m}$, 等效直径 $d_{w1}=0.07\text{ m}$, 插板深度 $L_1=20\text{ m}$; 工况 2: PVD 间距 $d_{e2}=0.7\text{ m}$, 等效直径 $d_{w2}=0.035\text{ m}$, 插板深度 $L_2=20\text{ m}$. 比较 2 种工况下, 真空固结速率的快慢.

将土样参数与排水板参数分别代入 F_n 与 F_r 的表达式, 可以得出工况 1 和工况 2 的各影响系数 F_1 和 F_2 , $F_1=F_{n1}+F_{r1}+F_{s1}$, $F_2=F_{n2}+F_{r2}+F_{s2}$. $F_{n1}=1.909$, $F_{s1}=0.916$, $F_{r1}=1.321$ 和 $F_{n2}=2.246$, $F_{s2}=0.916$, $F_{r2}=1.321$; 因此 $F_1=4.147$, $F_2=4.448$. 由 T_h 表达式可以分别得出 $T_{h1}=1.83 \times 10^{-2}\text{ t}$, $T_{h2}=3.73 \times 10^{-2}\text{ t}$, $T_{h1}/F_1=4.41 \times 10^{-3}\text{ t}$; $T_{h2}/F_2=8.38 \times 10^{-3}\text{ t}$. 据此可计算得 2 种工况达到 80% 固结度所需时间分别为 $t_1=46\text{ d}$; $t_2=24\text{ d}$.

通过上述算例可以发现, 在处理面积相同的情况下, 工况 2 ($d_{w2}=0.035\text{ m}$) 虽然材料用量更

少, 但由于同时减小其宽度与间距, 使得 T_h/F 更大, 固结速率更快.

2 真空预压模型试验

为验证 PVD-真空预压法能够通过适当调整排水板的宽度与间距来实现提高固结效率的目的, 本文采用室内模型试验对上海软土进行真空预压试验.

2.1 试验土样基本特性

室内模型试验所用的土样取自上海市浦东新区某工地, 土样的物理指标见表 1. 试验土样的颗粒粒径分布曲线如图 1 所示, 土样中有大量的细颗粒, 其中粒径小于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒占 29.12%, 小于 $75\text{ }\mu\text{m}$ 的粉黏土颗粒占 99.02%, 这符合实际软土地基中软土含量高、渗透性差等特点.

表 1 土样的基本物理指标
Table 1 Basic physics indicators of the soil samples

初始含水率/%	密度 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	相对密度	饱和度	孔隙比	液限/%	塑限/%	垂直渗透系数 $\times 10^{-7}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	垂直固结系数 $\times 10^{-8}/(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$
40.85	1.60	2.7	0.801	1.377	42.4	23.6	2.23	2.31

注: 垂直渗透系数和垂直固结系数均由固结试验所得, 其中固结压力为 50~100 kPa.

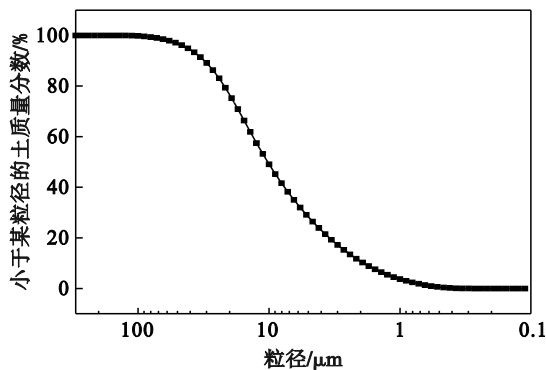


图 1 土样颗粒粒径分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of the soil sample

2.2 试验装置与试验方案

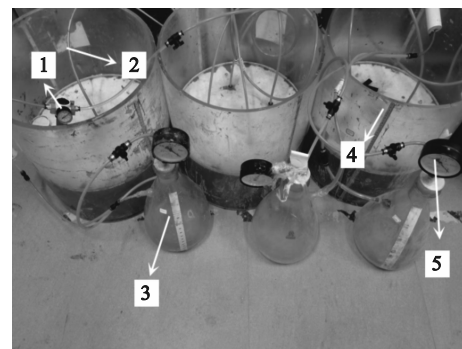
试验器材主要包括模型箱、真空泵、排水装置、水气分离装置、8 mm 透明的塑料软管(PU管)等, 本次试验共设置 3 个模型箱, 模型箱为开口的有机玻璃圆桶, 其尺寸(直径×高度)为 $50\text{ cm}\times 50\text{ cm}$. 整体式排水板厚度为 4 mm, 宽度分别为 25, 50, 100 mm, 具体排水板参数试验方案见表 2. 试验利用重塑土进行, 在试验前通过加水并搅拌均匀来配置重塑土, 重塑土样的含水率为 117%. 真空预压模型试验装置实物图与示意图分别见图 2

和图 3.

表 2 真空预压模型试验方案
Table 2 Vacuum preloading model test scheme

试验组号	PVD 宽度 a/mm	PVD 间距 d_e/cm	$T_h/F \times 10^{-8}/\text{t}$
V0	100	50	6.88
V1	50	25	28.0
V2	25	17	54.6

注: 本文 T_h/F 的计算参数具体取值如下: $q_w=150\text{ m}^3/\text{y}$; $k_h=2k_s$ 和 $d_s=2.5d_w^{[15]}$, $C_h=1.63C_v^{[16]}$, C_v 为固结系数.



1—调压阀; 2—PU管(排水管道); 3—抽滤瓶(水气分离装置); 4—模型箱; 5—真空表.

图 2 模型试验装置实物图

Fig. 2 Physical photo of the model test device

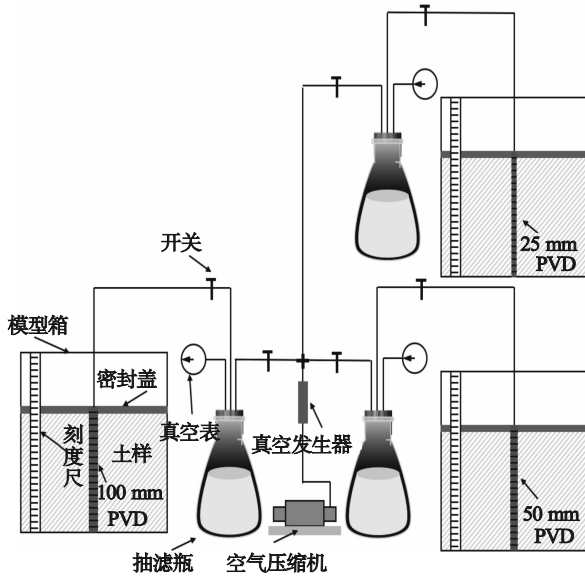
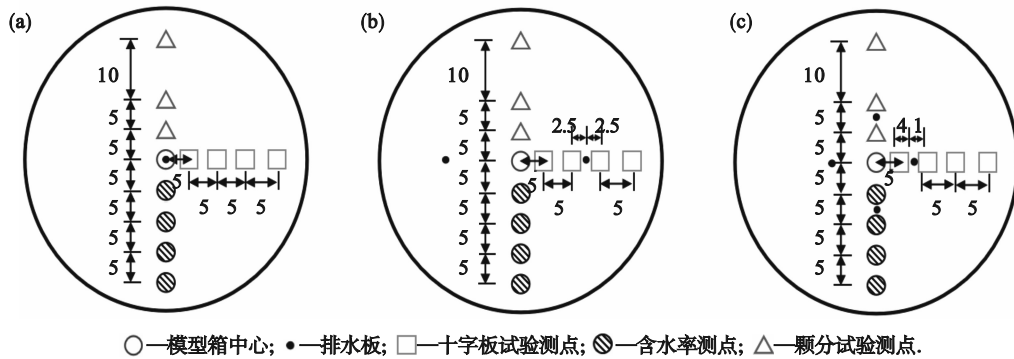


图3 模型试验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the model test device

具体试验步骤如下:①将不同宽度的整体式塑料排水板分别固定在各模型箱底部;②向模型箱内装填搅拌均匀的重塑土(含水率117%),土样装填高度为20 cm;③在土表面放置1层无纺土工布,将PU管从土工布穿出;④加密封盖,在加盖过程中PU管通过密封盖预留孔洞穿出,与模型箱、水气分离装置及真空泵连接,并检查气密性;⑤打开真空泵进行真空预压试验,试验过程中采集出水量、沉降量等数据;⑥待3个试验组(组号分别为V0,V1,V2)的排水量均<100 mL/d,同时结束试验.

试验结束后测量不同深度处(0,4,8 cm)的十字板抗剪强度和含水率,并取样进行颗粒分析试验,具体试验测点分布如图4所示.



○—模型箱中心; ●—排水板; □—十字板试验测点; ⊗—含水率测点; △—颗粒试验测点.

图4 试验测点分布(单位:cm)

Fig. 4 Test points distribution(unit:cm)

(a)—V0组; (b)—V1组; (c)—V2组.

2.3 试验现象分析

2.3.1 排水量与表层沉降

在真空预压加固过程中土体排水量随时间变化曲线如图5所示,整个真空预压过程中,V2组的排水速率最快,远大于其他两组.此外,比较3组试验的总排水量和加固时间,可以发现V2组和V1组总排水量分别比V0组多6.9%和2.6%,达到基本稳定所用时间分别少64 h和32 h.这是因为单位时间内,V2组的 T_v/F 值最大,故其固结速率增长最快;在试验的前期(前50 h内),V0组的排水量较大,这可能是因为PVD的宽度在试验前期对固结效率的影响较大,而V0组的PVD宽度在3组中最大,故固结效率在试验前期较高.

图6是反映 T_v/F 与总排水量关系的曲线,可以发现 T_v/F 值与总排水量呈正相关,随着 T_v/F 值的增大,土体的总排水量增大,表明 T_v/F 是影响

真空固结效率的重要指标.

土体的表层沉降量随时间的变化曲线如图7所示,沉降量曲线表现出与排水曲线相似的规律,V2组的总沉降量最大,分别比V1组和V0组多4.54%和8.23%.这是因为真空预压是排水固结的过程,排水量越大,土体的固结效率越高.图8是反映 T_v/F 的大小与土体总沉降量关系的曲线,同样表现出和排水量相近的规律,即 T_v/F 越大,土体的总沉降量越大.

通过上述试验现象可以发现,虽然在真空预压初期排水板宽度减小会使固结速率减缓,但采用小宽度、小间距的PVD,可有效增大 T_v/F 值,从而有效提高真空固结效率,即在耗材一定的情况下,小宽度、小间距PVD-真空预压处理更具有优势.

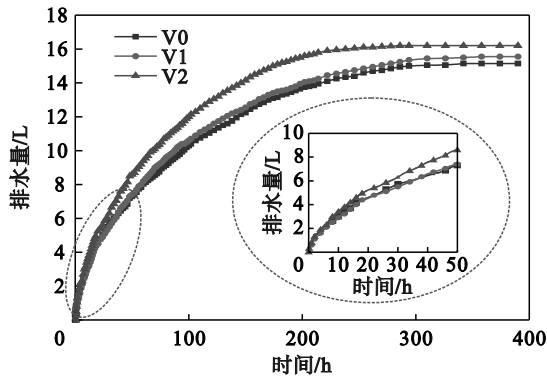


图5 排水量随时间变化曲线

Fig. 5 Drainage versus time curves

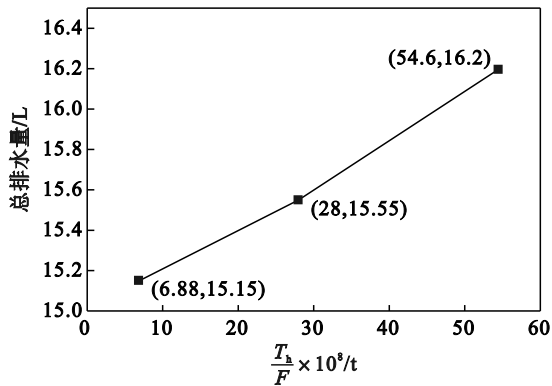


图6 T_v/F 与总排水量关系曲线

Fig. 6 T_v/F versus total drainage curve

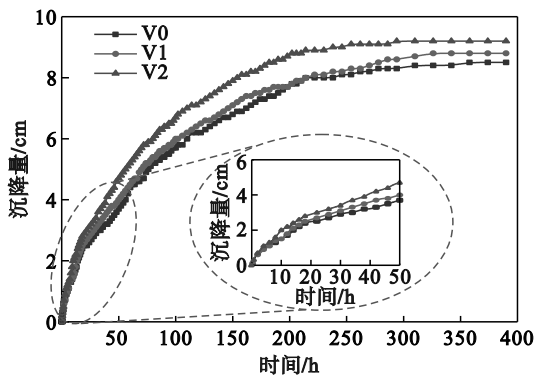


图7 沉降量随时间变化曲线

Fig. 7 Settlement versus time curves

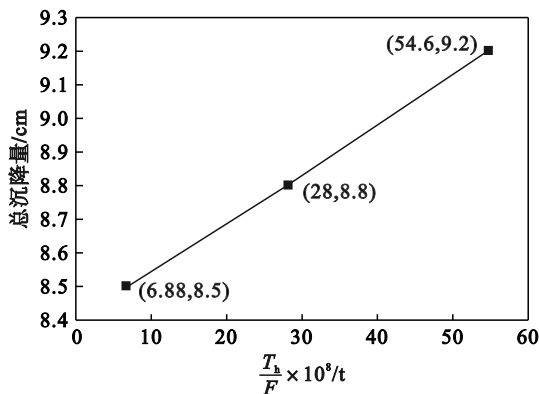


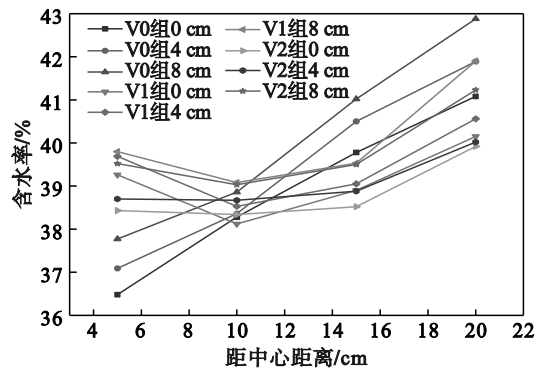
图8 T_v/F 与总沉降量关系曲线

Fig. 8 T_v/F versus total settlement curves

2.3.2 土体含水率

土体真空预压处理后各组土样含水率见图9.由图9可发现以下现象:①在V0组的表层(深度为0 cm,距模型箱中心5 cm处),土样含水率在所有测点中最小,仅36.48%;②V2组含水率沿空间方向分布更均匀,在同一深度处,不同径向位置的测点含水率差值最大仅2.6%,而整个土体中含水率最大差值仅3.89%,比V0组分别减小2.2%和1.71%.这是因为两个PVD之间形成更大范围的真空渗流场,有效增强了真空预压处理效果,提高了真空渗流场中渗滤-固结的效果.

在真空预压时,流体迁移受到的土颗粒阻力作用强,固结效果逐渐降低.由图9可以得出以下规律:①由于真空度传递随深度增加有着较为显著的衰减,导致深度越大土体含水率越大,即深度越大真空预压的处理效果越不显著.在耗材一定的情况下,采用小宽度、小间距PVD可以一定程度上减小含水率随深度变化的幅度.以V2组为例,V2组沿深度方向含水率最大变化仅为1.31%,变化幅度分别比V0组和V1组小25.14%和27.22%.②沿着径向方向,V0组含水率随着与中心距离的增大而增大,V1组和V2组的含水率是先减小后增大,这一现象出现的主要原因和PVD布置的位置有关,V0组PVD在模型箱正中心,V1组和V2组PVD分别距中心12.5 cm和9 cm.



注:V0组0 cm表示的是V0组深度为0 cm的位置,其余标识同.

图9 不同位置处含水率曲线

Fig. 9 Water content curves at different positions

出现这一系列现象的原因主要包括:①真空预压时真空度是以PVD为中心,沿着径向和竖向方向传递至周围土体,真空度传递过程中会出现较大衰减^[17].②在真空排水过程中土颗粒间的自由水会携带着土中细小颗粒一起向PVD迁移,所以距离PVD越远,排水路径被细小颗粒堵塞的概率越大,因此距离PVD越近排水效果越好,含水

率越低,而距离PVD中心越远的泥浆由于真空度衰减以及排水路径过长,导致水分无法有效排出.③ T_v/F 值越大,土体的真空固结效率和排水量越大,故V2组的整体含水率更低.

2.3.3 十字板抗剪强度

图 10 显示的是土体进行真空预压处理后各测点的十字板抗剪强度.从图中可以发现,在PVD附近,PVD的宽度对十字板抗剪强度影响较大,宽度越大,土体抗剪强度越大,以表层土(深度为 0 cm)为例,V0组最大抗剪强度为 20.83 kPa,比V1组和V2组分别提升了约 26.06%和 20.93%.但V2组和V1组土体的抗剪强度分布更均匀,V2组沿径向和深度方向最大的抗剪强度差值分别是 3.2 kPa和 1.31 kPa,比V0组分别减小 56.16%和 35%.同时结合图 9 可知,真空预压处理后土体的抗剪强度随空间分布与含水率变化呈相似规律,这是因为土体的含水率是影响土体抗剪强度的重要因素,含水率越大,抗剪强度往往越低.

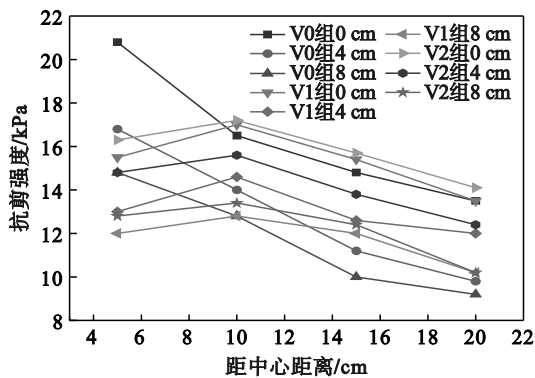


图 10 不同位置处十字板抗剪强度

Fig. 10 Vane shear strength at various positions

此外,随着处理深度的增大,真空预压处理效果明显减弱,土体的十字板抗剪强度明显减小,但V2组和V1组比V0组都有一定的改善.随着距离排水板径向间距增大,十字板抗剪强度同

样出现显著降低的现象,而V2组和V1组同样能缓解这一衰减.原因同上文所述一样,真空度会以PVD为中心,沿深度和径向方向出现衰减,减小PVD间距可以有效缩短排水路径,在一定程度上减少淤堵的出现.

V1组和V2组在距中心 5 cm 处的抗剪强度也有小幅度的提升,以表层土为例,距中心 5 cm 处抗剪强度分别比 15 cm 处提高了 2%和 4%,因为该区域位于两根排水板的影响范围之间,排水板间存在复合作用,从而提高真空固结的效果.

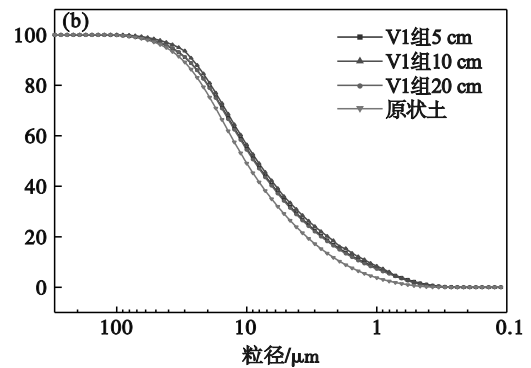
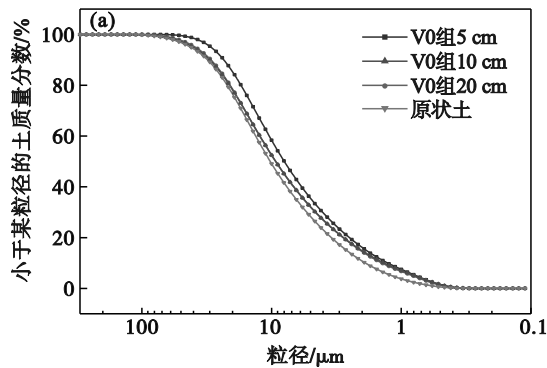
2.3.4 颗粒分析结果

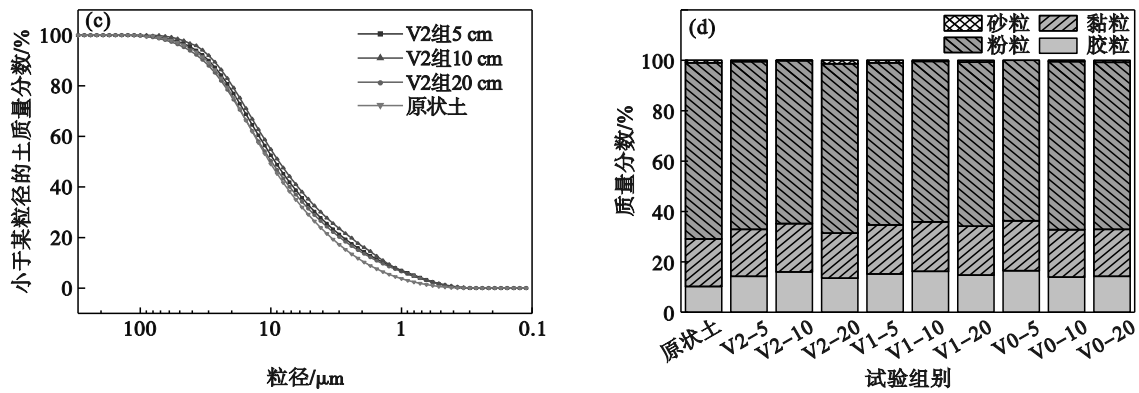
图 11a~图 11c 分别为真空预压处理后 V0, V1, V2 3 组以及原状土与中心径向距离分别是 5, 10, 20 cm 的颗粒粒径分布曲线,图 11d 给出了各组不同位置处的粒组划分图.

土颗粒的大小在一定程度上能反应土样的渗透性变化.当土颗粒较大的时候,土样的渗透性较好;反之,土样的渗透性较差.原状土样中大部分颗粒为粉粒(5~75 μm),土质量分数约 69.9%,经过真空预压处理后减少 3%~6%.同一试验组中,排水板附近的粉粒占比减少最大,这是因为真空预压中粉粒组更易在真空压力作用下向排水板迁移,并有部分通过排水板与水一起被排出.

V0, V1, V2 组的胶粒组(<2 μm)的土质量分数,相比于原状土,都有不同程度的增大,这是因为其他粒组的土颗粒在真空负压作用下,往排水板方向迁移并通过排水板排出,而胶粒由于排水板滤膜孔径等因素限制无法被有效排出,致使其占比增大.因此排水板附近胶粒占比增大最为明显.

通过比较 3 组颗粒粒径变化可知,V0组粒径大小变化最明显,在排水板附近的粉粒组占比较少量比V2组多 2.94%,黏粒组和胶粒组占比较V2组增加 0.7%和 0.47%,这与V0组排水板附近抗剪强度最大以及强度分布更不均匀相符合.





注:其中V2-5表示V2组距模型箱中心5 cm,其他相同.

图 11 颗粒分析曲线以及粒组划分

Fig. 11 Particle size distribution and particle group classification.

(a)—V0组颗粒分析曲线; (b)—V1组颗粒分析曲线; (c)—V2组颗粒分析曲线; (d)—各粒组划分图.

3 结 论

1) T_v/F 作为表征PVD宽度与间距优化效果的参数,随着 T_v/F 越大,真空预压过程中排水量和表层沉降越大,排水速率和沉降速率也越大,对真空预压法的改善效果越好.

2) 在耗材一定前提下,采用小宽度、小间距的PVD联合真空预压处理后,土体的加固效果得到改善.总排水量约增大6.9%;加固后土体的含水率与十字板抗剪强度更加均匀;“小宽度、小间距”能显著缓解土体抗剪强度沿深度方向和水平方向的衰减现象.

3) 经过真空预压处理后,土颗粒粒径在空间中存在不同的分布,粒径为5~75 μm 颗粒减少,采用“小宽度、小间距”排水板处理后颗粒粒径变化幅度更小.

参考文献:

- [1] Lei H Y, Xu Y G, Li X, et al. Effect of polyacrylamide on improvement of dredger fill with vacuum preloading method [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019, 31(9): 04019193.
- [2] Rujikiatkamjorn C, Indraratna B. Analytical solutions and design curves for vacuum-assisted consolidation with both vertical and horizontal drainage[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, 44(2): 188-200.
- [3] Ali H M, Liu H L, Zhao Z H, et al. Laboratory study for effects of vacuum preloading on physical and mechanical properties of soft clayey soils [J]. *Journal of Southeast University(English Edition)*, 2005, 21(1): 82-87.
- [4] 高会强. 真空预压下塑料排水板有效影响范围的研究分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2017. (Gao Hui-qiang. Study on the effective range of plastic vertical drain under vacuum preloading [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.)
- [5] Gao H Q, Mo H H. Effective range of the plastic vertical drain under vacuum preloading [J]. *Electronic Journal of Geotechnical Engineer*, 2016, 21(2): 607-614.
- [6] 姜海波, 武亚军, 孔纲强, 等. 超软土真空预压透明土模

型试验及土桩形成机理[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(2): 33-40.

(Jiang Hai-bo, Wu Ya-jun, Kong Gang-qiang, et al. Transparent soil model test of vacuum preloading method on ultra-soft soil and foundation mechanism of “soil pile” [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52(2): 33-40.)

- [7] 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.)
- [8] Wu Y J, Jiang H B, Lu Y T, et al. Experimental study on treatment of waste slurry by vacuum preloading with different conditioning agents [J]. *Geomechanics and Engineering*, 2019, 17(6): 543-551.
- [9] Shinsha H, Kumagai T. Bulk compression of dredged soils by vacuum consolidation method using horizontal drains [J]. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 2014, 45(3): 78-85.
- [10] Chai J C, Horpibulsuk S, Shen S L, et al. Consolidation analysis of clayey deposits under vacuum pressure with horizontal drains [J]. *Geotextiles and geomembranes*, 2014, 42: 437-444.
- [11] 龚永康, 肖望. 宽、窄排水板相结合在真空预压中的应用 [J]. *水运工程*, 2019, 564: 145-149, 179. (Gong Yong-kang, Xiao Wang. Application of combination of wide and narrow drainage plates in vacuum preloading [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2019, 564: 145-149, 179.)
- [12] Sun L Q, Meng L X, Guo W, et al. Pilot tests on methods to form working platform on soft clay [J]. *Geotechnical Engineering*, 2017, 170(5): 445-454.
- [13] Wu Y J, Li J P, Lu Y T, et al. The influence of drainage spacing on the deformation characteristics of transparent ultrasoft soil [J]. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2021, 7(4): 99.
- [14] Hansbo S. Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains [C]//International Conference on Soil Mechanism and Foundation Engineering. Stockholm, 1980: 677-682.
- [15] Hansbo S, Jamiolkowski M, Kok L. Consolidation by vertical drains [J]. *Geotechnique*, 1981, 31(1): 45-66.
- [16] Nguyen B P, Do T H, Kim Y T. Large-strain analysis of vertical drain-improved soft deposit consolidation considering smear zone, well resistance, and creep effects [J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, 123: 103602.
- [17] Chai J C, Carter J P, Hayashi. Ground deformation induced by vacuum consolidation [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2004, 41(6): 1098-1110.