

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.010



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



水平联合竖直排水板真空预压处理工程废浆 试验研究

刘飞禹¹, 李航¹, 王军², 符洪涛², 李校兵², 蔡璞²

(1. 上海大学 力学与工程科学学院, 上海 200444; 2. 温州大学 建筑工程学院, 浙江 温州 325035)

摘要:传统真空预压法(VP)在加固工程废浆时存在预制竖向排水板(PVD)易淤堵、周围土体形成土柱以及真空度随深度衰减等问题,考虑到预制水平排水板(PHD)在真空预压法处理软土地基中的特点,提出一种水平联合竖直排水板真空预压(PHD-PVD-VP)处理工程废浆的方法。通过4组大型室内模型试验,对工程废浆加固过程中的排水、沉降以及孔隙水压力进行监测,并借助扫描电镜得到的排水板滤膜微观图片,分析不同初始PHD真空压力下PHD-PVD-VP对工程废浆的加固效果。试验结果表明,PHD-PVD-VP处理工程废浆时减少了土颗粒径向移动速率,延缓“土柱”的形成及缓解土颗粒嵌入排水板滤膜的淤堵效应,提升了土体整体固结效果;40 kPa的初始PHD真空压力使PHD-PVD-VP对工程废浆的排水固结效果最佳,处理后土体的平均含水率和十字板剪切强度分别为40.9%和25.5 kPa,有效地缓解了PHD和PVD的淤堵并改善了土体固结的均匀性。通过微观结构分析发现,PHD初始真空压力的大小同时影响着PHD与PVD滤膜的淤堵情况,从而影响其排水性能,40 kPa的初始PHD真空压力使得两种排水板的排水性能都得到充分发挥。

关键词:真空预压;水平排水板;工程废浆;防淤堵;固结度

中图分类号:TU447;TU472.1 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2024)03-0024-09

Experimental study of waste slurry treated by a vacuum preloading method combined vertical drains with horizontal drains

LIU Feiyu¹, LI Hang¹, WANG Jun², FU Hongtao², LI Jiaobing², CAI Ying²

(1. School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, P. R. China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Wenzhou University, Wenzhou 325035, Zhejiang, P. R. China)

Abstract: When the vacuum preloading (VP) is used to consolidate the engineering waste slurry, there are several problems, such as the clogging of prefabricated vertical drain (PVD), formation of the soil columns and the attenuation of vacuum degree with depth, resulting in non-uniform consolidation. Considering the characteristics of prefabricated horizontal drain (PHD) in the treatment of soft soil foundation by VP method, a

收稿日期:2021-12-18

基金项目:国家自然科学基金(51878402、5217080907、52178350);浙江省自然科学基金(LY20E080029);温州市科技项目(S20210004)

作者简介:刘飞禹(1976-),男,教授,博士生导师,主要从事土加筋土及土动力学研究,E-mail: lfyjzu@shu.edu.cn。

符洪涛(通信作者),男,博士,教授,E-mail: fuhongtao2012@163.com。

Received: 2021-12-18

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 51878402, 5217080907, 52178350); Natural Science Foundation of Zhejiang Province (No. LY20E080029); Science and Technology Project of Wenzhou (No. S20210004)

Author brief: LIU Feiyu (1976-), professor, doctoral supervisor, main research interests: reinforced earth and soil dynamics, E-mail: lfyjzu@shu.edu.cn.

FU Hongtao (corresponding author), PhD, professor, E-mail: fuhongtao2012@163.com.

vacuum preloading method combined PHD with PVD (PHD-PVD-VP) is proposed to treat the slurry. Through four groups of large-scale indoor model tests, the drainage, settlement and pore water pressure during consolidation of engineering waste slurry were monitored, combined with the micro pictures of drainage board filter membrane obtained by scanning electron microscope, the consolidation effect of PHD-PVD-VP on engineering waste slurry under different initial PHD vacuum pressures was analyzed. The test results show that the PHD-PVD-VP reduces the radial movement rate of soil particles, delays the formation of "soil column", alleviates the silting effect of soil particles embedded in the filter membrane of drainage plate, and improves the overall consolidation effect of soil; initial PHD vacuum pressure of 40 kPa makes the drainage and consolidation effect of PHD-PVD-VP on engineering waste slurry the best, the average water content and vane shear strength of the treated soil were 40.9% and 25.5 kPa respectively. It not only effectively avoids the clogging of PHD and PVD, but also improves the uniformity of soil. Combined with the microstructure analysis, it is found that the initial PHD vacuum pressure affects the clogging of PHD and PVD filter membranes simultaneously, so as to affect their drainage performance. The initial PHD vacuum pressure of 40 kPa gives full play to the drainage performance of the two drainage boards.

Keywords: vacuum preloading; horizontal drain; engineering waste slurry; anti-clogging; degree of consolidation

地下基础施工时泥浆受到广泛的应用,但在工程结束时会产生大量的废弃泥浆,如果工程废浆处置不当会对环境造成严重污染。近年来,垃圾资源化利用的理念逐渐成为主流,工程废浆也被当作建筑回填料进行二次利用。然而,工程废浆的含水率高,工程特性较差,需要对其进行处理之后才能满足机械进场和后续施工要求。由于土工材料的兴起,真空预压法^[1-4]逐渐代替效率低下的自然风干、机械压滤等方法用于工程废浆脱水加固处理。然而,传统真空预压方法处治工程废浆还存在一定的技术难题。首先,工程废浆多由细颗粒组成,绝大多数颗粒粒径小于100 μm ,在真空吸力作用下细颗粒会逐渐进入预制竖向排水板(PVD)滤膜造成淤堵,随后排水板周围形成致密的“土柱”,而使后期排水效率降低^[5-7];其次,PVD内的真空度随着深度逐渐降低^[8],导致下部土体仍具有较高含水率,土体固结不均匀。

Shinsha等^[9]首次提出了水平排水板(PHD)真空预压法,将预制排水板改为水平铺设,对深度5.5 m的吹填淤泥场地进行了加固处理。周洋等^[10]、蒲河夫等^[11]将PVD真空预压法与PHD真空预压法进行试验对比分析,发现在真空预压过程中PHD间距不断缩小,排水路径(从土壤到PHD的距离)缩短^[12],加固效果更好,并且不像传统真空预压法存在真空度衰减严重的问题,使得土体的沉降更为均匀。已有研究认为,水平排水板真空预压法中土体的固结是由上部土体自重以及真空压力的共同影响造成的,这也是PHD真空预压法对深部土体加固效果更好的原因。也正是因为这一特性,PHD比PVD更容

易发生淤堵,此外,水平排水板真空预压法的加固效果与排水路径的长短有关,意味着距离PHD较远的表层土体加固效果较差。

显然,PVD与PHD在真空预压法中都有各自的局限与不足。针对排水板淤堵的问题,王军等^[13]对排水板和真空系统进行改进,采用新型防淤堵排水板使真空预压的土体加固效果更佳,防淤堵效果显著。其他学者^[14-16]开展了分级加载真空预压室内模型试验,发现分级真空压力的加载方式有利于减缓排水板周围土体的淤堵^[17],改善土体整体加固效果。Lei等^[18]通过研究分级真空预压和传统真空预压的淤堵形成时间,发现分级真空预压能延缓淤堵层的形成时间,验证了分级真空预压法对防淤堵的有效性。基于延缓淤堵这一思想,Wang等^[19]提出了两阶段真空预压法处治疏浚淤泥,这种方法先对一部分PVD施加真空压力处理淤泥,使得土体初具一定的强度和结构,减少土颗粒径向移动速率,延缓淤堵形成时间,再对所有的PVD施加真空压力处理淤泥,加快土体固结速率,提高土体整体强度,达到比传统真空预压法更好的加固效果。

为克服传统真空预压法存在的缺陷,学者们开展了很多研究。但结合PHD与PVD的真空预压法处治工程废浆却鲜有研究。笔者将综合考虑真空预压法中PVD和PHD各自的排水特性,提出一种PHD-PVD的阶段式真空预压法(PHD-PVD-VP)来处理工程废浆。通过设置不同的初始PHD真空压力,进行4组大型室内模型试验,研究初始PHD真空压力的大小对PHD-PVD-VP处治工程废浆的影响,其间监测各组试验的排水、沉降和孔隙水压

力随时间的变化量,试验结束后,在不同点处采集土样测量含水量和十字板剪切强度,并通过扫描电子显微镜(SEM)对排水板的滤膜进行拍摄。根据试验结果评估最优的初始PHD真空荷载,为在实际工程中的应用提供依据。

1 试验方法

1.1 试验材料

工程废浆取自温州龙湾二期围涂区,该区域大量回填工程废浆,用作建筑地基,首先对其进行基本物理性质的测试,表1列出了该土样的各项指标。由表1可知,土样的含水率极高,几乎无抗剪强度。图1是使用英国生产的Marvin系列激光粒度仪所得到的淤泥的粒度分布曲线,其中粒径小于0.075 mm的颗粒含量占到了98.46%,黏粒含量为38.13%,说明该土样主要由细颗粒黏土组成。试验所用排水板为整体式排水板,详细性能列

于表2。

表1 试验土体的基本物理性质指标

Table 1 Basic physical properties of test soil

含水率 $\omega/\%$	塑限 $w_p/\%$	液限 $w_L/\%$	比重 G_s	孔隙比 e	抗剪强度 C_u
96.8	25.1	52.3	2.61	2.42	≈ 0

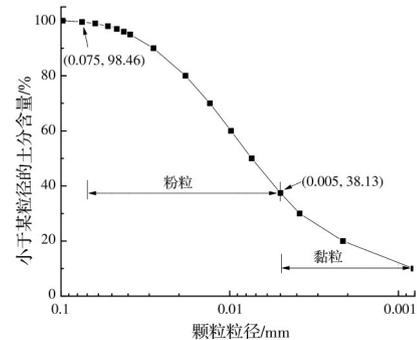


图1 试验土体颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain distribution curve of the original test soil

表2 整体式排水板特性

Table 2 Characteristics of the integrated PVD & PHD

性能指标	参数	单位	范围	说明
整合体	厚度	mm	4.0±0.2	
	宽度	mm	100±3	
	失效抗拉强度	kN/(10 cm)	≥3.5	延伸率10%
	通水量	m ³ /a	1 577	测压350 kPa
滤膜	干抗拉强度	N/cm	≥25	延伸率10%
	湿抗拉强度	N/cm	≥35	延伸率15%,水浸24 h
	渗透系数	cm/s	≥0.01	水浸24 h
	等效孔径	μm	120	据O ₉₅ ,可调
材料	滤膜			无纺布聚酯化学品,亲水材料
	板芯			聚丙(乙)烯

1.2 试验装置

试验装置由模型箱、真空加载系统和监测系统组成,示意图如图2所示。其中,模型箱由长1 200 mm、宽和高均为600 mm的有机玻璃组成。

真空预压系统由PVD、PHD、手形接头、三通接头、气密管、水汽分离瓶和真空泵组成。PVD和PHD均采用整体式排水板^[13],真空预压系统采用了三通气密接头将PVD及PHD连接并通过水汽分离瓶连接至真空泵,最大限度地减少真空压力的损失。PVD和PHD都由高真空微调阀控制,用来调节真空压力的大小,以便PHD上的真空压力能逐级施加于土体。该试验所用的真空泵功率为3.88 kW,能提供不小于80 kPa的真空压力。

为评估不同工法对真空预压处理工程废浆的效果,在试验过程中记录不同时刻下不同位置处的土表面沉降和排水量,试验结束后对不同深度处(0、200、400 mm)的含水率及十字板剪切强度进行

测量,具体测点位置及排水板的设计和布置如图2所示。为了更好地模拟实际工程,实验前对PHD的宽度进行修正,相关研究表明^[20],排水板的宽度和间距之间的关系由等效排水板直径(d_w)和有效影响直径(d_e)决定,它们之间的关系表达式为

$$d_w = \frac{b+t}{2} \quad (1)$$

$$n = \frac{d_e}{d_w} \quad (2)$$

式中: b 和 t 分别为带状排水板的宽度和厚度,厚度为4 mm; n 的参考值为15~22^[21],试验取15; d_e 为排水板的有效影响直径; d_w 为等效的排水板直径。根据4根PHD和两根PVD的布置,可得PHD和PVD的有效影响直径 d_e 分别为300、600 mm,计算得到PHD和PVD的宽度分别为36、76 mm。

1.3 试验方案及步骤

为了探究PHD-PVD-VP对工程废浆的改良效

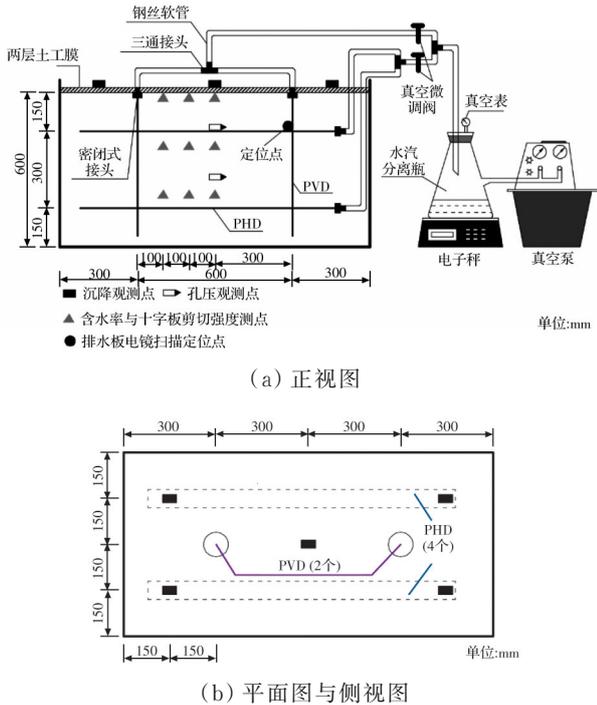


图2 试验装置图与监测点布置

Fig. 2 Experimental apparatus and monitoring points

果,试验方案设计如表3所示,3组试验均在如图2所示的模型箱中采用相同的土样进行。T1组先对PHD施加20 kPa的真空压力,随后对PVD施加80 kPa的真空压力,T2~T4组则对PHD采用不同的初始真空压力,分别为40、60、80 kPa。通过PHD联合真空预压法的预先处理,加固深处土体的同时,亦可使土体具有一定的强度与结构性,再结合PVD处理时则不会因出现较大的横向变形导致PVD的弯折,亦可使得离PHD排水路径远处的土体得到较好的加固,从而使土体整体处理效果更好。当排水速率小于0.2 kg/d、平均沉降速率小于2 mm/d时转换到PVD排水阶段,当PVD阶段真空预压排水困难时(与上相同)停止试验^[22]。试验结束后,在如图2所示的位置处延深度取样,测量含水率与十字板抗剪强度。

表3 试验方案

Table 2 Experimental program

试验组别	加载方式
T1	PHD(20 kPa)→PVD(80 kPa)
T2	PHD(40 kPa)→PVD(80 kPa)
T3	PHD(60 kPa)→PVD(80 kPa)
T4	PHD(80 kPa)→PVD(80 kPa)

试验按如下步骤进行:

1)将工程废浆搅拌均匀分层装入模型箱中,装填到一定高度后,按如图2(a)所示位置放入PHD(共4个)和PVD(共2个),并用定制的铁架固定住

排水板的位置,在距土表面150、300 mm深度处安装孔隙水压力传感器,装填完毕后的泥面高度约为500 mm。

2)在土样上铺设两层土工膜,并在土工膜和模型箱周围散布一些泥饼,完成对土工膜的密封。将PVD和PHD通过手形接头与气密管相连,并通过三通接头完成到水汽分离瓶的所有连接。

3)在连接PHD的真空软管上安装可微调的真空阀门控制试验过程中的真空压力,随后用软管连接水汽分离瓶与真空泵。

4)按照试验分组,各组先对PHD施加不同的真空压力对工程废浆进行处理。待排水与沉降逐渐达到稳定后,再启动各组的PVD以80 kPa的真空压力对工程废浆进行加固。

2 试验结果与分析

2.1 排水量

排水量随时间的变化情况如图3所示。从图中可以看到,T1~T4组在PHD真空预压阶段排水达到稳定的时间点分别为132、180、276、372 h,这是因为PHD上真空压力越小,较难出水,排水达到稳定的时间越早,试验T1~T4组最终的排水量分别为51.35、60.56、53.81、48.8 kg。图3体现了一定的规律,即PHD真空预压阶段结束后,进入PVD真空预压阶段时排水量都出现了一定的突跃。这是因为先使用PHD抽真空时使得深层土体排水固结,同时上层土体也具有一定的结构性和强度^[19],在PHD抽真空阶段排水量基本稳定后,再启动PVD真空预压时土颗粒径向移动速率减小,延缓了土柱的形成,并且避免土颗粒进入排水板的滤膜,削弱了排水板的淤堵效应,从而提高了真空压力的径向传递效率和排水板的通水能力,使得排水量得以提升。T3组和T4组的初始真空压力较高,故早期排水速率较快,但PHD附近土颗粒聚积较快,造成PHD附近土体的淤堵,使得后续PVD真空预压时打开的排水通道数目较少,致使T4组最终排水量最少;反之,T1组和T2组最初PHD真空压力较小,排水速率较低,但也缓解了PHD周围土体的淤堵状况,在施加下一步真空荷载时排出了更多的水。T1组最终排水量较少,可能原因是前后真空梯度较大,PHD的初始真空压力过小,排水在较早时刻便达到稳定,但土体内部并未产生稳定的结构,导致了PVD真空预压时周围土体及排水板滤膜的快速淤堵。T2组的最终排水量比T1、T3、T4组分别多了17.9%、12.5%和24.1%,结果表明,初始PHD真空压力的大小影响PHD-PVD阶段真空预压法的加

固效果,40 kPa的PHD初始真空压力同时避免了PHD和PVD的淤堵,获得了最好的排水效果。

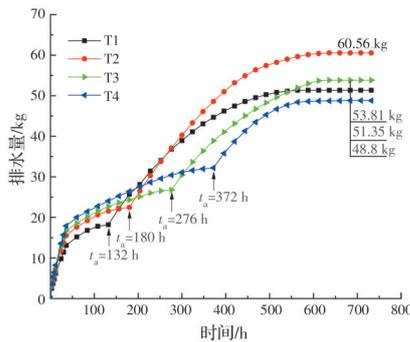


图3 排水量随时间变化曲线

Fig. 3 Variation in water discharge versus time

2.2 土体表面沉降

图4显示了各组试验的土体表面沉降随时间变化的情况,土体表面沉降值为图2(b)中5个监测点的沉降平均值,图中可以看到,土体表面沉降值与排水量呈正相关关系。PHD真空预压阶段达到稳定时,T1~T4组的土表沉降分别为21.5、34.0、62.1、69.0 mm,试验结束时T1~T4组的土表沉降为82.1、94.9、99.4、112.1 mm。可以看到初始PHD不同真空压力下的真空预压排水固结导致的沉降差异较为明显,尤其是高真空压力下的T3组和T4组,PHD真空预压阶段的沉降分别占了最终沉降的59.5%和78.8%。由于初始PHD的高真空压力,PHD周围土体淤堵严重,土体结构性已较强,导致后续PVD真空预压时对土体的径向固结作用减弱,后续沉降较小。与T3组和T4组相反的是,T1组和T2组初始的PHD真空压力较小,土表经排水固结后的沉降幅度不大,分别占了最终沉降的25.6%和35.6%,在随后PVD真空预压时沉降效果更为明显。

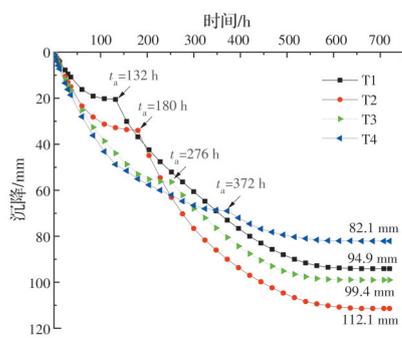


图4 土体表面沉降随时间变化曲线

Fig. 4 Variation in surface settlement versus time

计算固结度是衡量土体固结程度的常用指标之一,Cai等^[22]、Liu等^[23]、Wang等^[24]提出的三点法是计算该固结度的有效方法之一,计算过程为

$$S_t = \frac{S_3(S_2 - S_1) - S_2(S_3 - S_2)}{(S_2 - S_1) - (S_3 - S_2)} \quad (3)$$

$$U_t = \frac{S_t}{S_f} \quad (4)$$

式中: U_t 为 t 时刻所求的计算固结度; S_t 为 t 时刻的土表沉降; S_f 为最终的土表沉降; S_1 、 S_2 、 S_3 分别为任意3个时间点的沉降值。

S_1 、 S_2 、 S_3 的值已在表4中列出,根据等式(3)、式(4)计算得到的T1~T4组的 S_f 分别为11.8、12.5、11.9、11.0 cm,由此计算得到的最终的计算固结度T1~T4组分别为80.5%、89.6%、83.2%和74.5%。由计算固结度的结果可以得知,在初始PHD真空荷载为40 kPa时,PHD-PVD阶段式真空预压法的土体固结程度最高,更好地促进了土体的沉降。

表4 各组的 S_1 、 S_2 、 S_3 沉降值

Table 3 Settlement values for S_1 , S_2 and S_3

沉降变量	沉降/cm			
	T1	T2	T3	T4
$S_1(t=156 \text{ h})$	3.0	3.2	4.7	5.0
$S_2(t=372 \text{ h})$	7.3	9.0	8.1	6.9
$S_3(t=720 \text{ h})$	9.5	11.2	9.9	8.2

2.3 孔隙水压力

由于真空预压过程中水的不断排出,孔隙水压力也随之逐渐消散。图5为4组试验中孔隙水压力消散情况,孔隙水压力消散值为深度150、300 mm处的孔隙水压力消散平均值。各组试验在PHD真空预压排水稳定时的孔压消散值分别为7.1、12.8、20.3、25.7 kPa,启动PVD后,土体中出现了新的排水通道,加速了排水固结进程,因此孔压消散曲线上出现了转折点。最终孔压消散大小顺序为 $T2 > T3 > T1 > T4$,分别消散了38.2、34.7、33.0、31.3 kPa。此外,图中可以发现T1、T2组孔隙水压力消散曲线中的转折点突变更为明显,这也反映出该时刻土体固结程度不高。T1组由于初始PHD真空压力较小,导致土体未形成稳定的结构去抵抗真空吸力,随后在PVD的高真空压力影响下,PVD附近土体发生淤堵,导致在600 h左右孔压基本达到稳定;T3、T4组与T1组相反,在开启PVD真空预压时,孔压消散值已占了58.5%和82.1%,土体已完成较大程度的固结,因此也在较早的时刻达到最终孔压的稳定。而T2组中40 kPa的初始PHD真空压力使后续PVD真空预压发挥了较好的排水固结效果,两阶段的孔压消散分别占了33.5%和66.5%,延缓了PHD和PVD的淤堵形成时间,使得PHD-PVD-VP在试验后期也取得了较好的排水速率,促进孔压的持续消散。

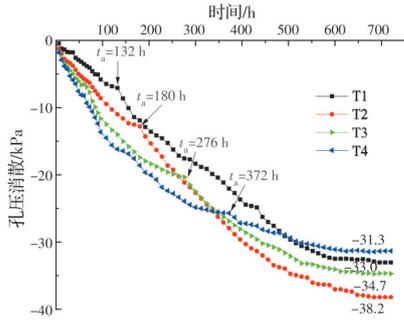


图 5 土中平均孔压消散随时间变化曲线

Fig. 5 Variation in average pore-water pressure dissipation of soil versus time

2.4 含水率与十字板剪切强度

试验结束后,按图 2(a)所示位置从不同深度和到 PVD 不同径向距离取出土样测量加固处理后的含水率和十字板剪切强度,图 6、图 7 为试验后含水率和十字板剪切强度沿两个方向的分布情况。从图 6 可以看出,所有试验组的含水率都显示出相似分布规律,即在同一深度上,含水率随着到 PVD 距离的增大而增大。在深度方向上,T3 组及 T4 组在 200 mm 深度处的含水率比表层含水率高,T1、T2 组的含水率则基本沿深度逐渐增大,其中 T1 变化的幅度更大。这主要是因为:1)PHD 内初始真空压力越高,上层 PHD 附近土体排水固结速率越快,这样在 PVD 真空预压进行前,土体已具有一定的强度和结构性,因而土颗粒的径向固结速率被减缓,一定程度上阻碍了土柱的形成和排水板弯折引起的真空度衰减^[22];2)200 mm 位置处土体除了受到 PVD 真空预压的作用,距 PHD 的排水路径也较短,促进了该处土体的排水固结,出现比表层含水率更低的情况;3)T1 组与 T2 组由于初始 PHD 真空压力较小,导致后续的 PVD 真空预压占据主导作用,因此 PVD 上真空度随深度衰减较多,使得深处土体含水率始终更高。

在整体处理效果上,试验 T1~T4 组的平均含

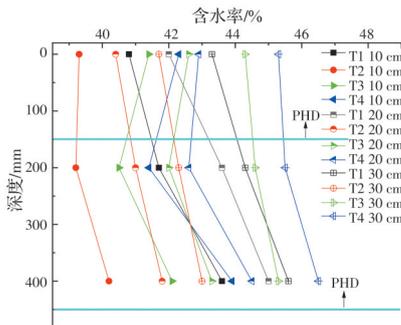


图 6 含水率随深度和 PVD 距离变化曲线

Fig. 6 Variation in water content versus depth and distance to PVD

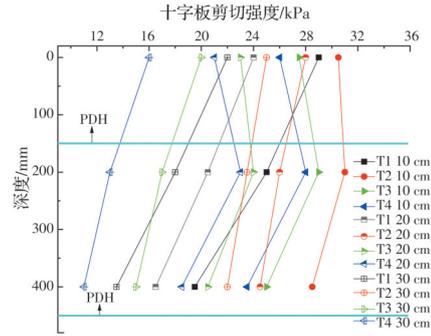


图 7 十字板剪切强度随深度和 PVD 距离变化曲线

Fig. 7 Variation in vane shear strength versus depth and distance to PVD

水率分别为 43.3%、40.9%、42.9%、44.2%;在处理均匀性方面,试验 T1~T4 组不同位置处含水率的最大差值分别为 4.5%、3.5%、4.2%、5.2%。此外,图 7 中的十字板剪切强度的分布和含水率的分布表现出相似的规律性,试验 T1~T4 组的平均十字板剪切强度分别为 20.9、25.5、22.3、20.0 kPa,不同位置处十字板剪切强度的最大差值分别为 13.5、9.0、12.0、15.5 kPa。从这些数据可以看到,初始 PHD 真空荷载为 40 kPa 的 T3 能够更好地降低土体的含水率,提升土体的强度,并且处理后的土体均匀性更好。太高或是太低的真空荷载都不能完全发挥 PHD 和 PVD 的性能,导致废浆脱水加固效果欠佳。

2.5 排水板微观结构分析

试验结束后,取各组的 PHD 与 PVD 的滤膜进行电镜图像拍摄以了解其淤堵情况。图 8(a)~(d)所示为 T1~T4 组的 PHD 滤膜的电镜图像,可以观察到由于 T1 组的初始真空压力较小,PHD 滤膜内虽然积累了一定的土颗粒,但并未充满滤膜,还留有较多的排水通道;反之,T3、T4 组随着 PHD 真空压力的增大,土颗粒嵌入排水板滤膜内逐渐聚集并导致了与滤膜之间的粘连,大大减少了排水通道数目,导致排水板内的淤堵。图 8(e)~(h)所示为 T1~T4 组的 PVD 滤膜的电镜图像,观察到的现象则大致与 PHD 相反,由于 T1~T4 组的 PVD 统一真空压力为 80 kPa,可以得知 PHD 的初始真空压力不仅会影响自身的排水性能,还会影响后续 PVD 的滤膜的淤堵情况。综合 PHD 和 PVD 的淤堵情况以及宏观试验的情况,T2 组中 40 kPa 的 PHD 初始真空压力,避免了大量土颗粒嵌入 PHD 滤膜,削弱了排水板的淤堵效应,随后 80 kPa 的 PVD 真空预压在保持良好排水性能的情况下则提高了废浆的固结速率,提高了土体强度。

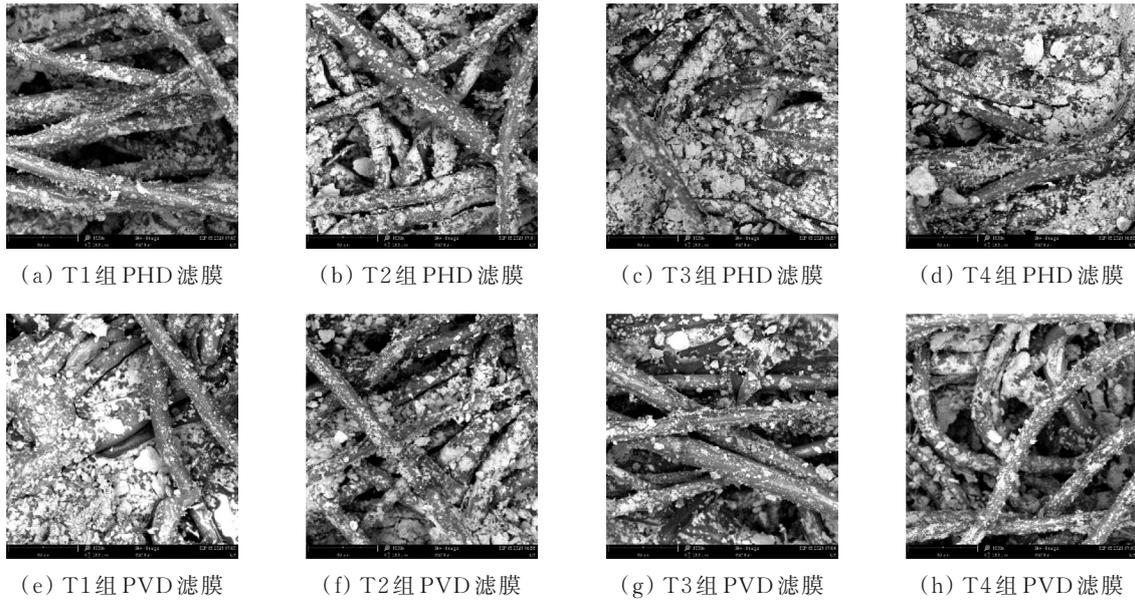


图 8 PHD & PVD 的滤膜电镜拍摄图像

Fig. 8 Images of PHD & PVD filter membrane taken by electron microscope

2.6 土体及排水板剖面

试验结束并完成取样后,将土挖开查看剖面形状,图9为T1~T4组在试验之后土体及排水板的相对位置示意图。可以看到:1)试验后T2组的土表沉降明显大于T1、T3、T4组的土表沉降,并且T2~T4组的土表沉降更为均匀;2)试验后PHD基本没有发生变形,并随着土体向下移动,PHD之间的间距逐渐减小,排水路径缩短;3)试验后PVD均出现了一定的弯曲变形,T2组中PVD的变形程度小于T1组,T3组和T4组中PVD的变形程度最小。从土中应力角度出发,PHD真空预压阶段时,土体受到PHD真空压力与自重应力的双重作用,土体竖

向应力较大,产生竖向沉降的同时,土体也受到一定的水平应力,两个方向上土体都得到了一定的固结;在PVD真空预压阶段,真空压力主要沿径向传递,使土体在一定固结基础上发生横向变形,产生部分不均匀沉降的现象。T1组中初始PHD真空荷载较小,导致PHD真空预压阶段的土表沉降不大,并且在20 kPa真空压力下上部土体固结效果较差,因此后续80 kPa的PVD真空预压导致了“土柱”的形成,且PVD产生较大的弯折变形。T2组则说明了初始PHD真空压力在40 kPa以上时,PHD对土体的加固效果占据了主导地位,土体在经过PHD真空预压后具备了稳定的结构,使土颗粒的径向固结

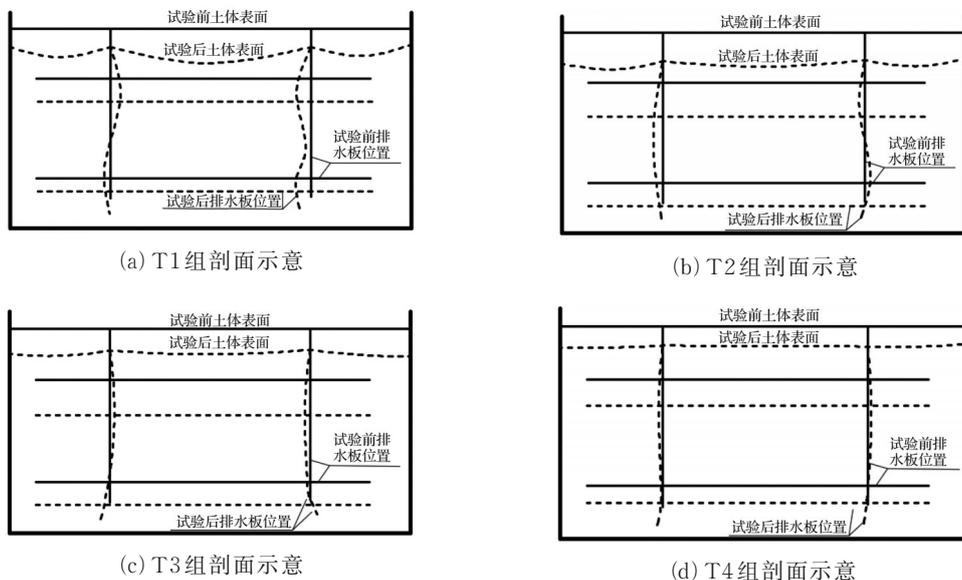


图 9 试验后土体及排水板位置

Fig. 9 Position of soil mass and drain plate after test

速率减小,因而PVD对废浆的径向固结效果减弱,使得沉降更加均匀并且PVD的弯折变形情况也有好转。T3组和T4组土体表面沉降均匀情况和排水板位置如同T2组,然而T3组和T4组初始PHD真空荷载较高,加固过程中PHD周围土体渗透性降低,形成致密土层,导致PVD开启时,上层土体在真空压力下发生些微沉降,而深部土体沉降不明显,使得平均土表沉降不如T2组显著,并没有将PHD和PVD的性能发挥完全。

3 结论

进行了水平联合垂直排水板真空预压加固工程废浆的室内试验。根据试验结果和测量结果分析,得出以下结论:

1)初始PHD真空压力为40 kPa时,水平联合垂直排水板真空预压法对工程废浆的排水量及固结程度最佳,最终排水量比初始PHD真空压力为20、60、80 kPa时分别增加了17.9%、12.5%、24.1%,根据沉降计算得到的计算固结度达到了89.6%。

2)在合适的真空压力下,PHD联合PVD真空预压法不仅能有效克服传统真空预压中PVD过快淤堵以及深处土体固结效果不佳的问题,而且使PHD真空预压法对排水路径远处的土体加固效果不佳的问题得到解决。

3)初始PHD真空压力过低或者过高都不能完全发挥排水板的性能。初始PHD真空压力过低时,PVD真空预压会起主导作用,并会在PVD周围造成淤堵,形成不均匀沉降;初始PHD真空压力过高时,则距离PHD排水路径短的土体固结程度较高,不均匀沉降减少,但PVD作用时的固结效果减弱。

4)微观试验的结果直观地体现了试验后PHD和PVD的滤膜淤堵情况,并说明了PHD的真空压力大小同时影响PHD和PVD的排水性能,从而影响工程废浆的加固效果。笔者只针对了不同的PHD初始真空压力,后续还可以研究其他加载方式对水平排水板联合垂直排水板真空预压法加固工程废浆的优化效果。

参考文献

[1] CHU J, YAN S W, YANG H. Soil improvement by the vacuum preloading method for an oil storage station [J]. *Geotechnique*, 2000, 50(6): 625-632.

[2] WANG J, FANG Z Q, CAI Y Q, et al. Preloading using fill surcharge and prefabricated vertical drains for an airport [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2018, 46(5): 575-585.

[3] 刘飞禹, 张志鹏, 王军, 等. 分级真空预压联合间歇电

渗法加固疏浚淤泥宏观分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(9): 1893-1901.

LIU F Y, ZHANG Z P, WANG J, et al. Macro and micro analyses of stepped vacuum preloading combined with intermittent electroosmosis for treating dredger slurry [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(9): 1893-1901. (in Chinese)

[4] 徐志豪, 章荣军, 郑俊杰, 等. 絮凝固化联合真空预压处理高含水率淤泥(浆)试验研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2021, 43(5): 10-18.

XU Z H, ZHANG R J, ZHENG J J, et al. Experimental study on flocculation-solidification combined with vacuum preloading treatment of dredged mud with high moisture content [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(5): 10-18. (in Chinese)

[5] 董志良, 张功新, 周琦, 等. 天津滨海新区吹填造陆浅层超软土加固技术研发及应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(5): 1073-1080.

DONG Z L, ZHANG G X, ZHOU Q, et al. Research and application of improvement technology of shallow ultra-soft soil formed by hydraulic reclamation in Tianjin Binhai new area [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(5): 1073-1080. (in Chinese)

[6] ZHOU Y, CHAI J C. Equivalent 'smear' effect due to non-uniform consolidation surrounding a PVD [J]. *Geotechnique*, 2017, 67(5): 410-419.

[7] 刘飞禹, 陶宇, 王军, 等. 分级真空预压联合电渗和强夯法试验[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(9): 168-179.

LIU F Y, TAO Y, WANG J, et al. Experiment on hierarchical vacuum preloading combined with electroosmosis and dynamic compaction [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(9): 168-179. (in Chinese)

[8] 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.

LIU F Y, LI Z, YUAN G H, et al. Experimental study on dredged slurry improvement by vacuum preloading combined with intermittent electroosmotic [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(5): 1-9. (in Chinese)

[9] SHINSHA H, KUMAGAI T, MIYAMOTO K, et al. Execution for the volume reduction of dredged soil using the vacuum consolidation method with horizontal prefabricated drains [J]. *Japanese Geotechnical Journal*, 2013, 8(1): 97-108.

[10] 周洋, 蒲诃夫, 李展毅, 等. 水平排水板-真空预压联合处理高含水率疏浚淤泥模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(Sup1): 3246-3251.

ZHOU Y, PU H F, LI Z Y, et al. Experimental

- investigations on treatment of dredged slurry by vacuum-assisted prefabricated horizontal drains [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38 (Sup1): 3246-3251. (in Chinese)
- [11] 蒲诃夫, 潘友富, KHOTEJA Dibangar, 等. 絮凝-水平真空两段式脱水法处理高含水率疏浚淤泥模型试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(5): 1502-1509.
PU H F, PAN Y F, KHOTEJA D, et al. Model test on dewatering of high-water-content dredged slurry by flocculation-horizontal vacuum two-staged method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(5): 1502-1509. (in Chinese)
- [12] 王柳江, 陈强强, 刘斯宏, 等. 水平排水板真空预压联合电渗处理软黏土模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(Sup2): 3516-3525.
WANG L J, CHEN Q Q, LIU S H, et al. Model test on treatment of soft clay under combined vacuum preloading with electro-osmosis using prefabricated horizontal drain [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(Sup2): 3516-3525. (in Chinese)
- [13] 王军, 蔡袁强, 符洪涛, 等. 新型防淤堵真空预压室内与现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33 (6): 1257-1268.
WANG J, CAI Y Q, FU H T, et al. Indoor and field experiment on vacuum preloading with new anti-clogging measures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(6): 1257-1268. (in Chinese)
- [14] YUAN X Q, WANG Q, LU W X, et al. Indoor simulation test of step vacuum preloading for high-clay content dredger fill [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2018, 36(1): 83-90.
- [15] 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 Y Q. 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. (in Chinese)
- [16] 张文彬, 杨建贵, 彭劼, 等. 分级加载真空预压加固吹填流泥试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(6): 541-547.
ZHANG W B, YANG J G, PENG J, et al. Field experimental study on dredger fill flow mud improved by graded loading vacuum preloading method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(6): 541-547. (in Chinese)
- [17] WANG J, CAI Y Q, LIU F Y, et al. Effect of a vacuum gradient on the consolidation of dredged slurry by vacuum preloading [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2021, 58(7): 1036-1044.
- [18] LEI H Y, LU H B, LIU J J, et al. Experimental study of the clogging of dredger fills under vacuum preloading [J]. International Journal of Geomechanics, 2017, 17 (12): 04017117.
- [19] WANG J, CAI Y Q, FU H T, et al. Experimental study on a dredged fill ground improved by a two-stage vacuum preloading method [J]. Soils and Foundations, 2018, 58(3): 766-775.
- [20] LEI H Y, HU Y, ZHENG G, et al. Improved air-booster vacuum preloading method for newly dredged fills: laboratory model study [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2020, 38(4): 493-510.
- [21] CAI Y Q, XIE Z W, WANG J, et al. New approach of vacuum preloading with booster prefabricated vertical drains (PVDs) to improve deep marine clay strata [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, 55(10): 1359-1371.
- [22] CAI Y Q, QIAO H H, WANG J, et al. Experimental tests on effect of deformed prefabricated vertical drains in dredged soil on consolidation via vacuum preloading [J]. Engineering Geology, 2017, 222: 10-19.
- [23] LIU F Y, WU W Q, FU H T, et al. Application of flocculation combined with vacuum preloading to reduce river-dredged sludge [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2020, 38(2): 164-173.
- [24] WANG J, FU H T, LIU F Y, et al. Influence of electro-osmosis activation time on vacuum electro-osmosis consolidation of a dredged slurry [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, 55(1): 147-153.

(编辑 胡英奎)