

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.105



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



PHD-PVD 真空预压联合电渗法处理工程废浆 试验研究

卢雪清¹, 李航², 刘飞禹²

(1. 重庆市勘测院, 重庆 401121; 2. 上海大学土木工程系, 上海 200444)

摘要: 为了改进传统真空预压法的缺陷, 提出一种 PHD-PVD 真空预压联合电渗法处理工程废浆的方法。通过 6 组大型室内模型试验, 对工程废浆固结过程中的排水量、电流强度、沉降值等进行监测, 通过测量土体含水率及十字板抗剪强度并结合压汞试验宏观微观分析土体的加固效果, 研究真空泵和电源的间歇断开处理对 PHD-PVD 真空预压联合电渗法加固工程废浆效果的影响。试验结果表明, 联合电渗法有效提升了 PHD-PVD 真空预压法后期的排水效率, 远端土体固结程度得到提高, 强度显著提升; 对真空泵和电源的间歇断开式处理使土中产生新的排水通道, 一定程度上缓解了排水板附近的淤堵, 使得试验后期也保持了较快的排水速率, 排水总量得到提升。压汞试验结果表明, 采用间歇断开式的 PHD-PVD 真空预压联合电渗法处理的工程废浆, 其峰值孔径更小, 土体微观结构更加致密。

关键词: 真空预压; 电渗; 排水板; 工程废浆; 防淤堵

中图分类号: TU447 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)04-0129-07

Experimental study of waste slurry treated by a PHD-PVD vacuum preloading method combined with electro-osmosis

LU Xueqing¹, LI Hang², LIU Feiyu²

(1. Chongqing Survey Institute, Chongqing 401121, P. R. China; 2. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, P. R. China)

Abstract: In order to amend the defects of vacuum preloading method, PHD-PVD vacuum preloading combined with electroosmosis to treat engineering waste slurry was proposed. Through six groups of large-scale model tests, the drainage, current intensity and settlement value during consolidation process of engineering waste slurry are monitored. After the test, the soil water content and vane shear strength were measured and combined with mercury intrusion test (MIT) to analyze the soil consolidation effect. The effect of intermittent disconnection of vacuum pump and power supply on the proposed method to strengthen the waste slurry of the project was studied. The test results show that the combination of electroosmosis method can effectively improve the drainage efficiency of PHD-PVD vacuum preloading method in the following stage, and the far end

收稿日期: 2022-06-30

基金项目: 国家自然科学基金(51878402)

作者简介: 卢雪清(1985-), 女, 高级工程师, 主要从事岩土工程研究, E-mail: 314136685@qq.com。

刘飞禹(通信作者), 男, 教授, E-mail: lfyju@shu.edu.cn。

Received: 2022-06-30

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51878402)

Author brief: LU Xueqing (1985-), senior engineer, main research interest: geotechnical engineering, E-mail: 314136685@qq.com.

LIU Feiyu (corresponding author), professor, E-mail: lfyju@shu.edu.cn.

soil has a high degree of consolidation; Intermittent disconnection treatment of vacuum pump and power supply creates new drainage channels in the soil, which to some extent alleviates the siltation near the drainage board, maintains a fast drainage rate in the late test period, and improves the total drainage. MIT results show that the engineering waste slurry treated by intermittent PHD-PVD vacuum preloading combined with electroosmosis method has smaller peak pore diameter and denser soil microstructure.

Keywords: vacuum preloading; electroosmosis; drain board; engineering waste slurry; anti-clogging

真空预压法^[1]是处理软土地基的有效方法之一,故经常将其运用于工程废浆的排水加固中。然而,传统真空预压处治工程废浆时存在细颗粒进入排水板导致淤堵、固结不均匀^[2-3]等问题,使工程废浆的加固效果并不理想,在工程中的应用也受到了一定的限制。

针对真空预压法加固软土地基时存在的缺陷,已有学者提出使用水平排水板真空预压法^[4-5],这种方法将排水板水平向分层布置,排水板上的真空度衰减较少,土体固结过程中的沉降也更加均匀。目前,已有很多关于PHD真空预压法加固软土地基的研究。Hu等^[6]将PHD运用于增压式真空预压法中,探究了最佳的增压时机,发现在增压式真空预压法中使用PHD能更好地缓解排水板淤堵的问题。Pu等^[7]在PHD真空预压的基础上结合了固化剂和稳定剂,提出了一种新的疏浚淤泥处理方法,使得淤泥的处治效率大大提升。但在现有的研究中发现,水平排水板真空预压处理疏浚淤泥时,排水板远处的土体含水率较高,处理效果不佳,并且由于在上部土体自重及真空压力的双重作用下,PHD更易淤堵^[8]。刘飞禹等^[9]提出水平联合垂直排水板真空预压法来处治工程废浆,发现这种方法能克服两者的缺陷,使真空预压效率大幅提高。

电渗法中电渗排水效率与水力渗透系数相关,与土颗粒粒径无关,能改善真空预压法易淤堵的缺点,但由于能耗大、电极腐蚀严重以及界面电阻等缺点^[10-11],电渗法的工程运用受到限制,与真空预压法联合使用能较好地提升排水效率。试验研究方面,刘飞禹等^[12]提出间歇式真空预压联合电渗法加固吹填软土,研究结果表明:间歇通电缓解电渗后期的电流衰减,提升后期排水效率。王柳江等^[13]通过改变排水板的布置形式,采用水平排水板真空预压联合电渗法处理软黏土,该方法在加固效率与经济性方面具有显著优势。

然而,真空预压联合电渗法的研究中只对电源间歇通电方式的影响进行了研究,未见有学者同时对真空泵与电源的间歇处理进行相关的试验研究。笔者在PHD-PVD真空预压法的基础上,提出断开

式真空预压联合电渗法处理工程废浆,并进行了室内模型试验,对试验过程中的排水量、土体表面沉降、电流强度等随时间变化情况进行监测。试验结束后测量土体的含水率与十字板剪切强度,结合微观压汞试验的结果,以评估断开式真空预压联合电渗法加固工程废浆的效果。

1 试验方法

1.1 试验材料

工程废浆取自温州龙湾二期围垦区,通过基本物理性质的测试可知废浆的含水率极高,几乎无抗剪强度,各项指标参数见表1。

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 $w/\%$	塑限 $w_p/\%$	液限 $w_L/\%$	比重 G_s	孔隙比 e	抗剪强度 C_u
93.6	26.0	52.7	2.67	2.35	≈ 0

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1(a)所示。其中,模型箱由长为1 200 mm、宽和高均为600 mm的有机玻璃组成。

真空预压系统由竖向排水板PVD、水平排水板PHD、手型接头、三接头、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,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。试验所用真空泵功率为3.88 kW,能提供不小于80 kPa的真空压力。

电渗系统由直流电源、阳极板和阴极板组成。所用直流电源为GW SPD-3606稳压电源,最大输出电压为60 V,最大输出电流为12 A。试验通过在模型箱中预插电极来进行电渗,为防止预插阴极板切断土体排水通道,需对预插的阴极板进行打孔处理,阴极与阳极采用板厚为2 mm的铁板。

根据Cai等^[14]的研究,试验前对PHD的宽度进行修正,以更好地模拟实际工程。由图中PHD的布置情况计算可得PHD的有效影响直径为300 mm,得到修正后的PHD宽度为40 mm。

1.3 试验方案及步骤

刘飞禹等^[15]的研究表明,最佳的电势梯度范围为 0.5~1.5 V,故电势梯度范围取 0.5~1.0 V。设计试验方案如表 2 所示,表中 VP、VP-EO 分别代表真空预压法和真空预压联合电渗法。A 组模型试验作为 PHD-PVD 真空预压法对照组,加载方式为先对 PHD 施加 80 kPa 的真空压力,排水稳定后对 PVD 施加 80 kPa 的真空压力。B 组的 3 个试验均为 PHD-PVD 真空预压联合电渗法,真空加载方式和对照组相同,在 PVD 真空预压开启的同时开启电渗,3 组试验采取不同的电源电压,以获取该研究最佳的电势梯度。C 组有两个试验,其中真空加载方式也和对照组相同,C1 为断开式真空预压法,在 PVD 真空预压开启之后,对真空泵采用开 5 h 闭 1 h 的加载方式,C2 为断开式真空预压联合电渗法,电势梯度由 B 组试验确定得到最优值,在对真空泵断开的同时,也以同样的时间间隔切断电源。当排水速率小于 200 mL/d 时,就可转换真空预压阶段或停止试验,随后取样进行土工试验。

表 2 试验方案

Table 2 Experimental program

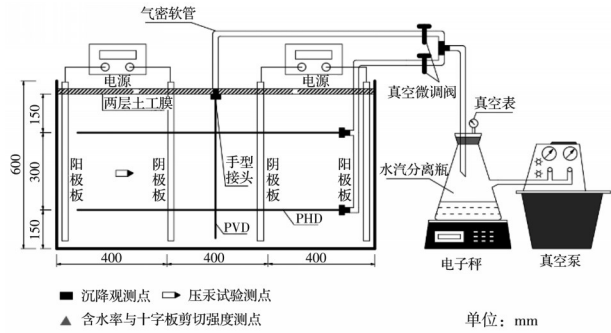
试验组别	电势梯度	试验方式
A	无	VP
B1	0.5 V/cm	VP-EO
B2	0.75 V/cm	VP-EO
B3	1 V/cm	VP-EO
C1	无	VP(开 5 h 闭 1 h)
C2	待定	VP-EO(开 5 h 闭 1 h)

试验过程中记录不同时刻的土表沉降、排水量和电流强度,间隔时间 6 h,试验结束后对土体含水率与十字板剪切强度进行测量,具体监测点的布置与取土位置如图 1 所示。试验按如下步骤进行:

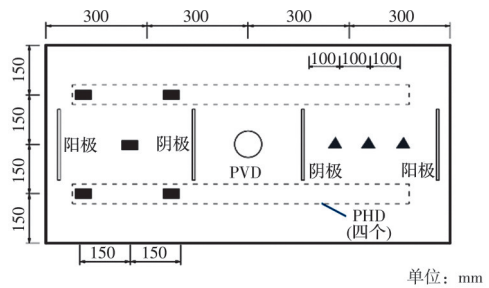
1)首先,在模型箱内分层倒入搅拌均匀的工程废浆,并分层铺设 PHD,废浆倒入完毕后,泥面高度约为 500 mm。

2)在模型箱中央位置处插入 PVD 至一定深度处,用密封帽将 PVD 与真空软管直接相连以减少真空压力的沿程损失。在模型箱边缘处插入阳极板,靠近 PVD 20 cm 处插入打孔后的阴极板,使阳极板与阴极板之间的距离为 40 cm,并用导线将阳极与阴极分别连接至电源。

3)随后,在泥浆顶部铺设两层土工膜,并将其填充到模型箱底部。然后在土工膜和模型箱周围铺开一些泥饼,以确保土工膜的密封。然后使用密封管连接水汽分离瓶和真空泵。



(a) 正视图



(b) 平面图与侧视图

图 1 试验装置图与监测点布置

Fig. 1 Experimental apparatus and monitoring points

2 试验结果与分析

2.1 最优电势梯度选择

A (VP) 和 B1~B3 (VP-EO) 模型试验中的排水量及真空荷载随时间变化曲线如图 2 所示。试验初期, A 和 B1~B3 的排水速率均处于较高水平, 在 360 h 左右 PHD 内部形成淤堵, 排水停滞, 随后开启电渗。但从图中发现 A 组的 PHD 阶段排水略高于 B 组, 这是由于 B1~B3 中预插了电极板, 从而微弱地影响了 PHD 阶段的排水量。A 组中 PHD 阶段排出了 49.9 kg 的水, 最终排水量为 65.7 kg。而 B 组在 PHD 排水阶段的排水量基本维持在 48.4 kg, 但结合电渗后的 PVD 排水阶段的排水量相较于 A 有

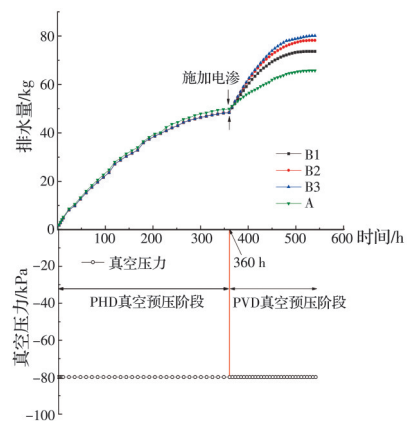


图 2 排水量随时间变化曲线

Fig. 2 Variation in water discharge versus time

明显的增长,这主要是因为电渗排水不受颗粒粒径(淤堵)的影响,可以将箱壁处土体中的水分运移至阴极处,原本PVD真空预压的排水路径缩短,提高了PVD的排水效率。

B1~B3分别在电渗阶段排出25.3、29.8、31.7 kg,真空预压联合电渗过程中,采用更高的电势梯度能够显著提升排水量。在开启PVD真空预压后,4组试验的排水量均得到了一定的突跃,这是由于PHD真空预压排水阶段使深部土体得到固结,浅层土体需用PVD充分排水固结。随后,排水效率逐渐下降并在500 h左右进入停滞阶段,一方面是因为土颗粒不断嵌入PVD滤膜内使其发生淤堵^[9],另一方面是因为电渗后期阳极区土体干燥收缩以及阳极腐蚀导致界面电阻增加,电渗效率降低。最终A和B1~B3的排水量分别为65.7、73.7、78.2、80.1 kg, B1~B3比A分别多排了12.2%、19.0%和21.9%的水,说明PHD-PVD式真空预压联合电渗法能有效提升PHD-PVD-VP后期的排水速率。

此外,对试验B1~B3的电流强度进行监测,图3反映了各组试验中电流强度随时间的变化情况。首先,可从图3观察到B1~B3的电流强度在电渗初期都有一个略微上升的过程,这可能是因为电渗初期未被PHD加固到的部分土体排水通道逐渐形成,这部分土体含水率较高,与电极的接触也较为紧密,此时的界面电阻较小,电流强度出现上升的过程。B1的电势梯度最低,整体电流强度也最低,电流强度与电势梯度成正比的规律与先前的研究规律一致。电流上升到最高点之后开始下降,这是由于电渗后期阳极区土体干燥收缩和电极腐蚀导致界面电阻增大。460 h以后,电流强度大幅度降低影响了后期的电渗排水效率。

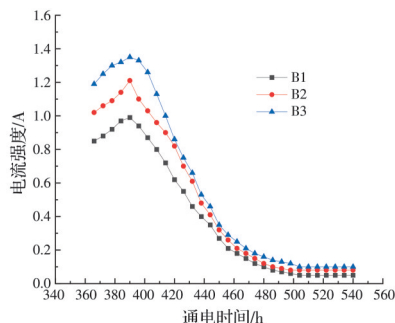


图3 电流强度随时间变化曲线

Fig. 3 Variation in current intensity versus time

显而易见,高电势梯度下的电渗法会提高排水效果,但缺点在于电渗过程中电流强度大,能耗增加。根据李水江等^[16]的研究,采用平均能耗系数比较各组能耗情况。计算后得到B1~B3的平均能耗系数分别为6.98、6.32、6.82 (kW·h)/kg,说明B2

中0.75 V/cm的电势梯度在本试验中最佳,既能提高电渗排水效率,又能减少能耗,后续试验中的最佳电势梯度选用0.75 V/cm。

2.2 排水量

确定了最佳的电势梯度B2后,进行断开式真空预压法和断开式真空预压联合电渗法的模型试验(C1、C2),并与A、B2的排水量进行对比。图4为A、B2、C1、C2组试验过程中排水量及真空荷载随时间的变化曲线。PHD真空预压排水阶段,4组试验的排水情况基本相同,皆在360 h左右陷入停滞。A和C1由于没有预插电极板,减少了对真空预压排水的影响,PHD阶段真空预压排水量略高于B2和C2。对PVD施加真空荷载并开启电源,可发现C1、C2与对照组相比,排水量都有一定的增加,其中C2的排水量增长更为明显。最终A、B2、C1、C2组排水量分别为65.7、78.2、69.8、84.0 kg,分别比对照组多排了19.0%、6.2%和27.8%的水。可以从数据中看到,断开式真空预压处理工程废浆(C1)最终排水效果的改善,与对照组(A)的PHD-PVD-VP相比并不显著,但是与电渗联合后的断开式真空预压法(C2)排水量相比有大幅的增长。

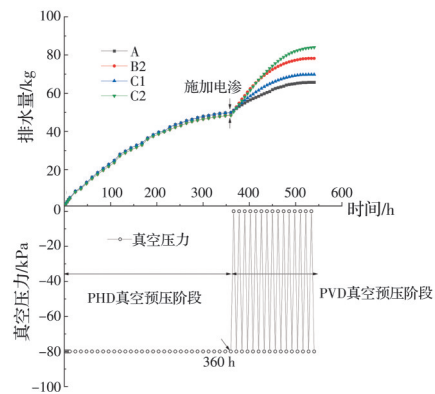


图4 试验排水量随时间变化曲线

Fig. 4 Variation in water discharge versus time

为了揭示断开式真空预压法的排水特性,对开启PVD后24 h内的排水量变化进行监测,如图5所示。对比试验组A和C1可以发现,C1中的真空泵每开启5 h关闭1 h,导致C1的排水量在6 h时刻低于A,分别为1.01 kg和1.21 kg,但在重新开启真空泵的5 h内,C1的排水量相较之前有较快的提升,12 h时C1和A的排水量分别为2.40、2.10 kg,之后的每个6 h周期都呈现了一样的规律,即C1在关闭真空泵1 h后再开启运行5 h,其排水增量都较A更多。究其原因,可能是真空泵断开后土体中的真空度较高,并且需要一段时间完全消散,导致原有的水流方向反转,不仅缓解了真空预压时部分土体向PVD聚集导致的淤堵,也在回流过程中创造出新的排水通道,真空泵再度开启时,这部分回流的水连

同土体中的水被一同排出,使得排水量得到较为显著的提升。

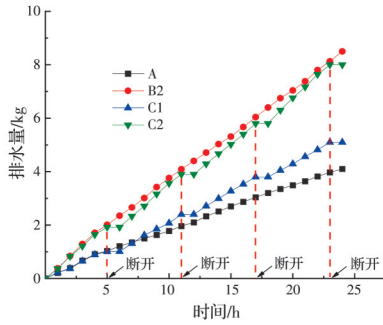


图 5 开启电渗 24 h 内排水量变化曲线

Fig. 5 Variation in water discharge with time within 24 hours after electroosmosis started

对比 B2 和 C2 发现,断开式真空预压联合电渗处理工程废浆的前 24 h 内,排水量并没有明显的差异。真空预压联合电渗后,能将 PVD 很难作用到的阳极处土体中的水分运移到阴极附近,再由 PVD 上的真空吸力将水排出,因此,在这个过程中真空预压联合电渗的作用主导着土体中的排水,而非断开式处理。从图 5 中则可以看出,在电渗后期电渗效率下降时,C2 的排水量逐渐超过 B2,一方面是因为断开式处理切断了电源,降低了电能消耗,缓解了电极腐蚀,提高了后期的电渗排水效率;另一方面则是不断往复的水流缓解了排水板附近的淤堵,提高了后期 PVD 的排水效率。从排水量的结果来看,断开式真空预压联合电渗法能有效地提升真空预压联合电渗法的处理效率,促进土体排水。

2.3 土表沉降

图 6 显示了 4 组试验的土表沉降随时间变化曲线,该沉降为图 1(b)中 5 个测点的平均沉降。可以看到,在 PHD 真空预压排水阶段结束时(约 360 h),试验组 A~C2 的平均土表沉降 72.1、66.4、71.9、66.2 mm,初始预埋的电极一定程度影响了 PHD 真空预压阶段的排水,从而影响了沉降的发展。电渗和 PVD 真空预压阶段开启后,由于土体开始进一步排水固结,故 C1 和 C2 随着电渗和 PVD 真空预压的

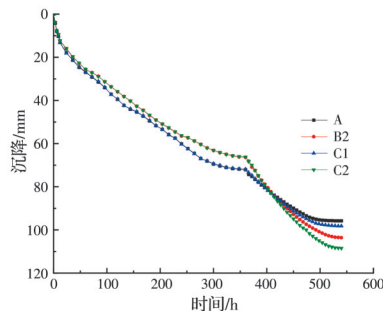


图 6 土表沉降随时间变化曲线

Fig. 6 Variation in surface settlement versus time

进行沉降逐渐提升,沉降发展趋势逐渐超过 A 和 B2。在试验结束时(约 540 h),平均土表沉降分别为 95.8、103.6、98.2、108.5 mm,C2 的平均沉降最大,其分别比 A、B2 和 C1 大 13.2%、4.7% 和 10.5%。

2.4 含水率与十字板剪切强度

为了对比不同组别处理后工程废浆的土体固结程度,在图 1(b)所示的位置取土进行含水率与十字板剪切强度测试。深度方向上,上部土层的含水率更低,十字板剪切强度更高,这主要是由于真空度在排水板上随着深度存在损失,深层土体一般比表层土体的固结度低。因此,在深度方向上取含水率与十字板剪切强度的平均值,研究水平方向上两者随着距阳极距离(亦与 PVD 距离)土体固结情况。图 7 与图 8 分别为试验结束后不同位置处土体的含水率与十字板剪切强度分布情况。因为阳极、阴极之间距离为 40 cm,故取距阳极 10、20、30 cm 为测点,分别代表阳极区域、中部区域、阴极区域。

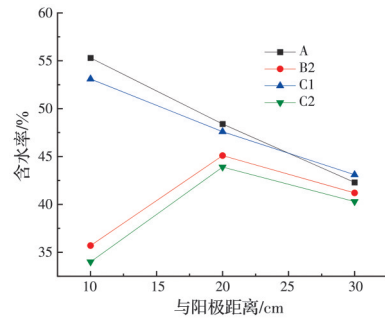


图 7 含水率随与阳极距离变化曲线

Fig. 7 Variation in water content versus distance to anode

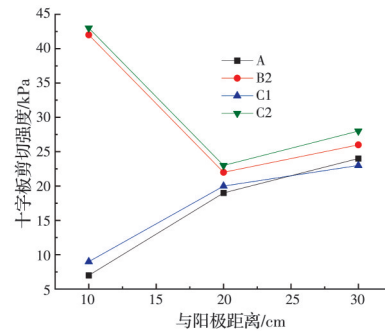


图 8 十字板剪切强度随与阳极距离变化曲线

Fig. 8 Variation in water content versus depth & distance to PVD

对比 A 和 B2 可以发现,真空预压联合电渗之后,土体整体的含水率更低,其中阳极区域土体含水率最低,土体固结程度最高,质地坚硬。B2 的中部和阴极区域含水率较高,这可能是因为预插阴极板导致土体部分水被拦截,无法顺利被 PVD 抽出。对比试验组 A 和 C1 可以发现,断开式真空预压的处理方式对含水率的降低较为有限,但对比试验组 B2 和 C2 可看到,断开式处理能让真空预压联合电

渗法进一步使土体固结。各组不同区域含水率的平均值分别为48.7%、40.7%、47.9%和39.4%，可以看出虽然电渗法处理过后土体加固均匀性改善较小，但是废浆整体的排水固结程度更高，仅仅对真空泵的断开处理对废浆加固提升效果有限，但断开式处理对真空预压联合电渗法的提升较为明显。

土体的十字板剪切强度与含水率的关系较为密切，一般来说，含水率越低则十字板剪切强度越高，图8显示的十字板剪切强度分布规律与含水率分布规律呈负相关关系。A、B2、C1、C2的平均十字板剪切强

度则分别为17.7、32.2、18.3、34.1 kPa，C2的土体平均强度最高，B2和C2在阳极区域的加固效果最好。

2.5 微观孔隙结构分析

试验结束后，按图1(a)所示位置取土进行压汞试验，以分析土体微观结构。图9显示了A、B2、C1、C2组试验(PHD-PVD真空预压、PHD-PVD真空预压联合电渗、断开式PHD-PVD真空预压、断开式PHD-PVD真空预压联合电渗)工程废浆加固后土体的孔径分布。其中横轴代表孔径尺寸，纵轴为孔径分布密度，为每克土所压入汞的体积。

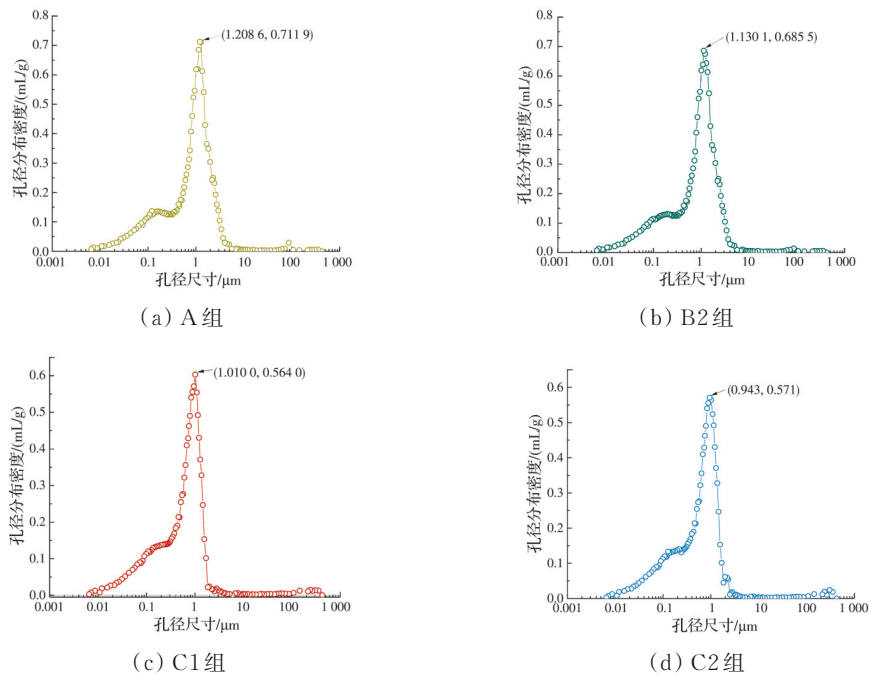


图9 孔径分布密度曲线

Fig. 9 Aperture distribution density curves

从图9中可以看出，处理过后的工程废浆土内部的孔隙分布为单峰分布，曲线呈类似正态分布。A、B2、C1、C2组测试中的曲线形状相似，但测得的峰值孔径不同，分别为1.21、1.13、1.01、0.94 μm ，可以看到，A组PHD-PVD真空预压法处理过后土体中的孔径较大，而B2、C1、C2的峰值孔径均向左偏移，表明小孔隙的数量更多，土体微观结构更加致密，峰值孔径的差异解释了为何A组的含水率最高，十字板剪切强度最低。此外可以发现，C1与A的峰值孔径相差不大，说明断开式处理对真空预压的效果比较有限，而C2的峰值孔径小了很多，则说明了电渗能够促进远端土体的排水，提高排水板效率，并且联合断开式处理后效果提升较大。

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)相比PHD-PVD真空预压法，电渗法的联合可有效地加固排水板远端土体，提高了PVD排水效率；断开式处理缓解了排水板附近的淤堵，创造出新的排水通道，使排水效果有一定程度提升。

2)联合电渗后的断开式处理对PHD-PVD真空预压法的改进效果更为明显，土表沉降增加了13.2%，土体加固后的整体强度和均匀性都有较为明显的提升。

3)压汞试验得到的土体微观孔隙结构表明，处理过后的工程废浆土内部的孔隙分布为单峰分布，呈类似正态分布曲线。断开式PHD-PVD真空预压联合电渗法加固工程废浆后土体峰值孔径更小，表明小孔隙数量更多，土体微观结构更加致密。

参考文献

[1] 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.
- LEI H Y, LIU A Y, LIU J J, et al. Analysis of influence factors on reinforcement effect of alternate vacuum preloading method for ultra soft soil foundations [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(2): 377-388. (in Chinese)
- [2] 章荣军, 蒋达飞, 郑俊杰. 絮凝调理对淤泥(浆)固结特性的影响[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(7): 1-6.
- ZHANG R J, JIANG D F, ZHENG J J. Effect of flocculation conditioning on consolidation characteristics of mud(slurry) [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(7): 1-6. (in Chinese)
- [3] LIU S J, SUN H L, PAN X D, et al. Analytical solutions and simplified design method for large-strain radial consolidation [J]. Computers and Geotechnics, 2021, 134: 103987.
- [4] 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.
- [5] FENG S X, LEI H Y, LIU A Y, et al. Application and design method of dredging sludge ground treated via prefabricated radiant drain vacuum preloading [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2022: 1-15.
- [6] HU X Q, ZHANG W K, FU H T, et al. Clogging effect of prefabricated horizontal drains in dredged soil by air booster vacuum consolidation [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, 49(6): 1529-1538.
- [7] PU H F, MASTOI A K, CHEN X L, et al. An integrated method for the rapid dewatering and solidification/stabilization of dredged contaminated sediment with a high water content [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2020, 15(4): 1-12.
- [8] LEI H Y, FANG Q F, LIU J J, et al. Ultra-soft ground improvement using air-booster vacuum preloading method: Laboratory model test study [J]. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 2021, 7(4): 1-12.
- [9] 刘飞禹, 李航, 王军, 等. 水平联合垂直排水板真空预压处理工程废浆试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(3):24-32.
- LIU F Y, LI H, WANG J, et al. Experimental study of waste slurry treated by a vacuum preloading method combined vertical drains with horizontal drains [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(3):24-32. (in Chinese)
- [10] 刘飞禹, 汤家郗, 袁国辉, 等. 纤维加筋优化电渗法处理疏浚淤泥的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(12): 2545-2552.
- LIU F Y, TANG J X, YUAN G H, et al. Experimental study on treatment of dredged slurry by electro-osmosis with fiber reinforcement [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(12): 2545-2552. (in Chinese)
- [11] 王军, 王逸杰, 刘飞禹, 等. 间歇式真空预压联合电渗加固吹填软土试验[J]. 中国公路学报, 2016, 29(10): 37-45.
- WANG J, WANG Y J, LIU F Y, et al. Test of reinforcement by intermittent vacuum preloading-electroosmosis in dredger soft clay [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(10): 37-45. (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] 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)
- [14] 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.
- [15] 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微观分析[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)
- [16] 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 S J, TANG J X, LI X B, et al. Experimental study on the 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. (in Chinese)