

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.108



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



真空热固结联合强夯处理工程废浆试验研究

吴建奇¹, 陶建伟¹, 符洪涛², 李校兵², 周晨阳¹, 陈腾¹

(1. 江西理工大学土木与测绘工程学院; 江西省环境岩土与工程灾害控制重点实验室, 江西赣州 341000;
2. 温州大学建筑工程学院; 浙江省软弱土地基与海涂围垦工程技术重点实验室, 浙江温州 325035)

摘要:为解决真空热固结过程中热量与真空负压在土体中衰减而导致土体加固效果不均匀的问题,利用强夯法能改善土体密实度的特性,将真空热固结法与强夯法联合应用于工程废浆的加固处理,通过 4 组室内模型试验研究不同夯击时机对土体加固效果的影响。结果表明:沉降速率为每 3 d 沉降 4 cm 时为最佳夯击时机,土体表面沉降比其他试验组提高 26.55%、11.72% 和 3.74%,对工程废泥浆的处理效果最佳,能有效解决真空热固结下深层土体加固效果差的问题,并提高土体的均匀性。通过微观结构分析发现,合适的夯击时机下,由于土颗粒之间的孔隙重分布,导致土体密实程度更高,十字板剪切强度随之增大。此外,内部孔隙重分布产生微裂缝形成的排水通道对排水有一定的促进作用,进一步提升了固结效果,在合适的夯击时机下,对土体的十字板剪切强度与固结度均有促进作用。

关键词:真空热固结;夯击时机;微观结构;工程废浆;固结度

中图分类号: TU447; TU472.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2025)01-0018-09

Experimental study of engineering waste slurry treatment by vacuum thermal consolidation combined with dynamic compaction

WU Jianqi¹, TAO Jianwei¹, FU Hongtao², LI Xiaobing², ZHOU Chenyang¹, CHEN Teng¹

(1. School of Civil Engineering and Surveying and Mapping Engineering; Jiangxi Provincial Key Lab of Environmental Geotechnical and Engineering Disaster Control, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, P. R. China; 2. Collage of Civil Engineering and Architecture; Key Laboratory of Engineering and Technology for Soft Soil Foundation and Tideland Reclamation of Zhejiang Province, Wenzhou University, Wenzhou 325035, Zhejiang, P. R. China)

Abstract: To address the issue of decreased heat and vacuum negative pressure in soil, which leads to uneven reinforcement effect during vacuum thermal consolidation, the vacuum thermal consolidation combined with dynamic compaction method is applied for engineering waste slurry treatment, and the characteristics of soil compactness can be improved by dynamic compaction method. The influence of different tamping times on the reinforcement effect of soil was studied through four groups of model tests. Results show that when the settlement rate is 4 cm/(3 d), the tamping time is the best, the settlement of soil surface is 26.55%, 11.72% and 3.74% higher than that of other tests correspondingly, and the treatment effect of engineering waste slurry

收稿日期: 2022-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(51878512、52178348)

作者简介: 吴建奇(1980-),男,博士,副教授,主要从事土动力学研究, E-mail: wujq1980@jxust.edu.cn。

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

Received: 2022-07-21

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 51878512, 52178348)

Author brief: WU Jianqi (1980-), PhD, associate professor, main research interest: soil dynamics, E-mail: wujq1980@jxust.edu.cn.

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

is the best, effectively solving the unsatisfactory reinforcement effect of deep soil under vacuum thermal consolidation and improve the uniformity of soil. Combined with the results of microstructure analysis, it can be found that due to the redistribution of pores between soil particles, the soil density is higher, and the shear strength of the cross plate increases accordingly under the appropriate tamping time. In addition, the drainage channels formed by the micro-cracks generated by the redistribution of internal pores can promote drainage and further improve the consolidation effect. Therefore, the shear strength of the cross plate and degree of consolidation of the soil can be enhanced under the appropriate tamping time.

Keywords: vacuum thermal consolidation; tamping time; microstructure; engineering waste slurry; degree of consolidation

近年来,随着对地下空间结构的不断开发,工程施工项目中产生了大量高含水率的工程废浆,采用常规外运弃置的方法会造成过多土地资源的浪费,并导致环境污染。因此,需对高含水率的工程废浆进行脱水固结,之后当作建筑回填料进行二次利用。随着土工材料的兴起,真空预压法^[1-3]应运而生,成为一种行之有效的脱水固结办法,但如果采用常规真空预压法进行处理,存在以下技术难题:首先,由于工程废浆主要由细颗粒组成,这些细颗粒在预制竖向排水板(PVD)周围形成致密层,最终会造成淤堵;其次,常规真空预压法处理周期长、成本高、效果差、工后沉降大,会出现不均匀固结^[4-9]现象;而且真空预压下真空度会随着深度而降低,进一步影响底部土体的加固效果。

真空预压法联合热固结排水是近年来提出并获得广泛关注的一种处理方法,在传统竖井基础上,通过真空预压系统与加热系统对土体进行脱水固化,从而改善周围土体的固结性状。所谓热固结,即通过温度与外荷载的共同作用,孔隙水加速排出,土体体积收缩的固结过程。王天园等^[10]认为真空预压联合加热能加快固结速率,减少工后沉降,有效提高承载能力。Du等^[11]发现循环温度法可以加大温度梯度对土样的影响,增强土样的固结效果,确定了温度传递的衰减与温度循环路径有较大关联,并得出最佳的温度循环路径。林伟岸等^[12]设计了一种真空预压热排水井,即利用U形管中的循环热水对地基土进行加热并辅以真空预压,但并未解释其热固结机理研究。邓岳保等^[13]结合室内试验研究了真空预压下热固结效应的机理,为工程实际提供了依据。然而,随着热传递能量在径向的减小,土体内部孔隙直径增大,使得加固效果整体上变差。

真空强夯排水固结法是将强夯固结法和真空预压法结合起来的一种新型复合式排水固结法^[14-15]。通过动静结合的强夯法引入真空预压,适用于软土地基的固结,该方法可以有效缓解土柱的

形成及真空预压过程中的堵塞效应,并提高后期的排水效果^[16-17]。Li等^[18]认为采用高夯击能夯实模型桶周围土体,随后用低夯击能对PVD周围土体夯击,能获得更有效的加固效果。然而,超软土地基几乎没有承载能力,若夯击能过大,容易导致土体出现埋锤或周围隆起现象,孔隙水不能及时排出,冲击能全部被孔隙水吸收,因此,纯夯击固结法不适用于超软土地基处理。然而,真空动力强夯的试验方法只考虑了夯实间隔时间对堵塞发展的影响^[19],并没有提出一种从合理的强夯时机出发对土体固结效果进行综合评估的机制。

笔者充分考虑真空热固结法与强夯法的各自优势,将两种方法联合用于工程废浆的加固处理中,进行4组室内模型试验,监测不同时刻土体表面沉降、温度、排水量、孔隙水压力变化量;在不同位置处测定其含水率与十字板剪切强度,并取土样进行扫描电镜试验(SEM),得出最佳夯击时机。

1 试验方案

1.1 试验土体

试验所用土体取自温州龙湾围涂区,该区可回填大量工程废浆,用于建筑地基。对试验土体的基本物理性质进行测定,土体的各项性能指标如表1所示。图1为土体的颗粒级配曲线,其中粒径小于0.075 mm的颗粒含量为97.34%,黏粒(粒径大于0.005 mm)含量占比28.1%,说明土体主要由细颗粒黏土组成。

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 $w_L/\%$
105.7	25.12	43.81
比重 G_s	孔隙比 e	抗剪强度 C_u
2.67	2.85	≈ 0

1.2 试验装置

试验装置由模型桶、真空预压系统、加热系统、强夯系统和数据检测系统组成,试验装置图如图

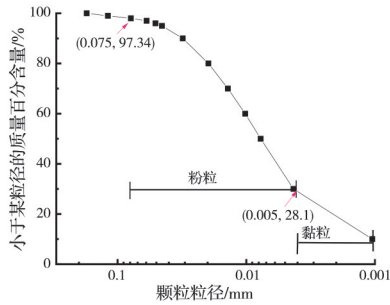


图 1 试验土体颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain distribution of the original test soil

2(a)所示。其中,模型桶为外径 600 mm、内径 560 mm、高度 900 mm 的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)圆柱形桶。

真空预压系统由 PVD、手形接头、三接头与四接头、真空软管、汽水分离瓶和真空泵组成。PVD 采用排水效果更好的新型整体排水板。将所有的 PVD 通过四通接头联通到一起并连接真空泵,以减少真空压力的损失。试验所用的真空泵功率为 3.88 kW,能提供不小于 80 kPa 的稳定真空压力。

加热系统包括直径为 15 mm、长度为 500 mm 的加热棒,热电偶,温度控制仪($\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$)和温度计。加热棒和热电偶均与温度控制仪连接,温度控

制仪用以控制热源周围土体温度,并保持设定温度。热电偶位于离热源 2 mm 处,用于测量温度并向温控仪传递温度信号。温度计用以监测试验过程中不同位置处土体温度的变化情况。

强夯系统采用半径为 200 mm、重量为 10 kg 的圆形夯锤,夯击能量由夯锤的重量与夯击高度确定,为保证强夯的均匀性,按照图 2(c)所示顺序确定夯击方式。根据式(1)计算出本次试验单次夯击能量为 50 J。

$$E = mgh \quad (1)$$

式中: E 为单次夯击能量; m 为夯锤质量; g 为重力加速度,通常取 10 m/s^2 ; h 为夯锤落距,试验夯锤落距设定为 500 mm。

为评估不同工况处理工程废浆的效果,试验前对 PVD 宽度进行修正,相关研究^[20]表明,排水板宽度及其之间的距离由等效排水板半径 r_w 和有效影响半径 r_e 决定,二者关系如式(2)、式(3)所示。

$$r_w = \frac{b+t}{4} \quad (2)$$

$$r_e = (15 \sim 22)r_w \quad (3)$$

式中: b 和 t 分别为新型整体式排水板的宽度和厚度; r_e 为排水板的有效影响半径; r_w 为排水板等效半径。试验所用的排水板厚度均为 3 mm,根据试验 PVD 布置方案,得到 PVD 的有效影响半径 r_e 为 125 mm,计算得到 PVD 的宽度为 30 mm。

由于动力排水固结试验条件难以控制,且原型试验工程量庞大。为了更好地模拟工程实际,采用相似理论对其进行定量分析,表 2 给出了试验的相似比。

表 2 原型机与模型的强夯固结参数比较

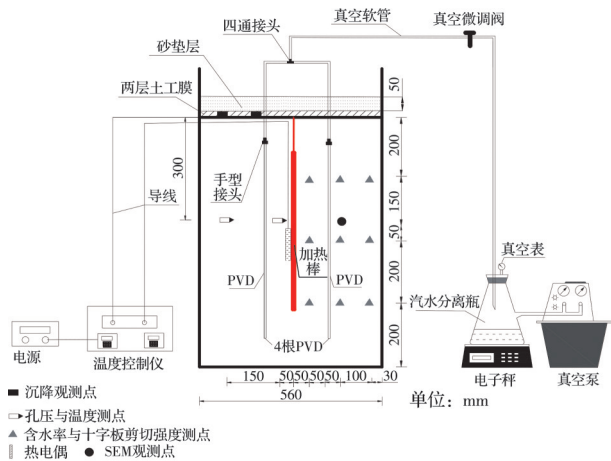
Table 2 Comparison of dynamic consolidation parameters between prototype and model

C_m	C_D	C_h	C_E	C_w
1/1 000	1/20	1/20	1/10 000	1/1

注:参数 m 表示锤重; D 表示锤底直径; h 表示跌落高度; E 表示夯击能量; w 表示含水率。

1.3 试验方案及步骤

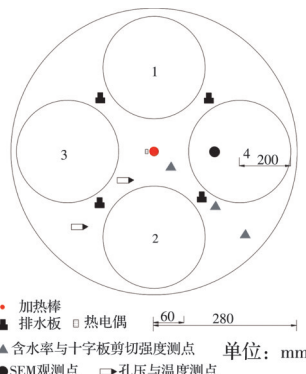
为了探究真空预压下热固结联合强夯处理工程废浆的改良效果,试验方案如表 3 所示。试验前期,在真空热固结作用下,土体沉降速率下降。当沉降速率开始衰减时,表明 PVD 周围已形成淤堵区,此时,通过 3 d 实时沉降速率的观测,确定试验的强夯时机。4 组试验均采用相同土样在如图 2(b)所示的模型桶中进行,T1 为真空预压联合加热对照组,试验组 T2~T4 第 1 阶段采用真空预压联合加热,第 2 阶段采用真空热固结联合不同的强夯时机



(a) 试验装置正视图



(b) 试验装置实物图



(c) 夯锤大小与测点(俯视图)

图 2 试验装置示意图

Fig.2 Diagram of experimental apparatus

表 3 试验方案
Table 3 Test programs

试验序号	阶段 1	强夯时机	阶段 2	强夯间隔
T1	VP+CT(75 °C)		VP+CT	
T2	VP+CT(75 °C)	沉降速率 = 2 cm/(3 d) (240 h)	VP+CT+DC	24 h(3 击)
T3	VP+CT(75 °C)	沉降速率 = 4 cm/(3 d) (204 h)	VP+CT+DC	24 h(3 击)
T4	VP+CT(75 °C)	沉降速率 = 6 cm/(3 d) (144 h)	VP+CT+DC	24 h(3 击)

注:VP为真空预压系统;CT为加热系统;DC为强夯系统。

进行处理,强夯顺序如图 2(c)所示,整个试验中真空压力保持恒定的 80 kPa,加热温度均设定为 75 °C^[21],主要原因是在 75 °C恒温条件下真空联合热效应处理后的土体抗剪强度高、能耗低、固结效果最佳。通过真空预压与热效应对工程废浆进行初步处理后,内部土体具备了一定的强度。由于温度造成土体渗透性增加,导致内部结构较为松散,内部孔隙增大。强夯之后,通过挤密作用,土体密实度增加,形成新的微裂缝,可使深层土体获得更好的加固效果,从而使土体整体处理效果更好。

试验步骤如下:

1)将工程废浆拌和均匀,分层装入模型桶,土样的装填高度为 800 mm,土样装填完毕后,按照图 2 所示位置安装 PVD(共 4 根)、加热棒与热电偶,在距热源 50、200 mm 处安装孔隙水压力传感器和温度计,用以监测试验过程中的孔隙水压力与温度变化。

2)在土样上铺设两层土工膜,以确保试验中的气密性良好,所有 PVD 之间通过手型接头与气密管相连,并通过四通接头与汽水分离瓶相连,采用真空软管连接汽水分离瓶与真空泵。

3)按照试验方案,各组先采用真空预压结合加热对工程废浆进行处理。待各组试验达到相应的强夯条件后,在土工膜上放置 50 mm 砂垫层作为缓冲层,随后启动各自强夯装置。

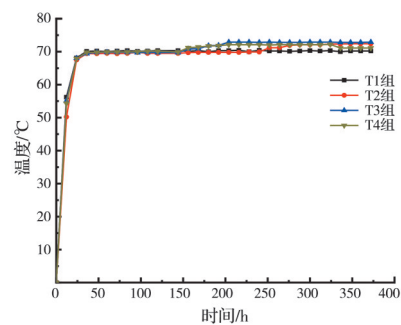
4)当排水量小于 0.2 kg/d、平均沉降速率小于 2 mm/d 时,判定排水停止,关闭真空泵,停止试验。试验结束后,在如图 2(a)、(c)所示的位置处进行取样,测量含水率与十字板剪切强度。

2 实验结果与分析

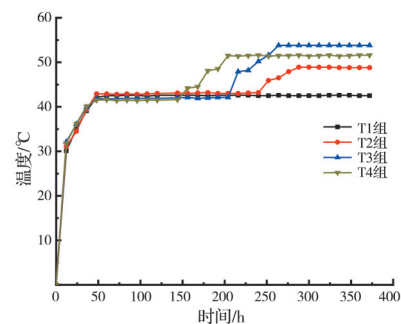
2.1 温度

图 3 显示了在与热源位置径向距离 50、200 mm 处土体温度的变化情况,在试验初期,土体温度迅速上升,达到设定温度后不再增长并保持稳定。随着测点与热源的径向距离增加,热量在传递过程中

发生衰减,因此,在与热源径向距离 50 mm 处土体最高温度与热源温度差距较小,但在与热源径向距离 200 mm 处土体温度往往达不到与热源相当的温度且差距较大。当各试验组启动强夯后,温度均存在一定程度的变化,变化幅度随强夯时机的不同而存在差异。试验初始阶段,热量主要通过孔隙水传递,强夯之后,土体内部孔隙水大幅减少,密实度大幅增加,热量传递途径由孔隙水传递变为土颗粒传递,热传递效率大幅增加。因此,在与热源径向距离 200 mm 处,强夯后各组土体温度变化幅度更加明显,T2~T4 组土体达到的最高温度均大于 T1 组,且 T3 组温度最高。表明不同的强夯时机对热传递存在不同程度的促进作用,在 T3 组的强夯时机下,强夯对热传递的促进作用最显著。



(a) 距离热源位置 50 mm



(b) 距离热源位置 200 mm

图 3 不同位置下温度随时间的变化

Fig. 3 Temperature change over time at different locations

2.2 排水量

图 4 为试验排水量随时间的变化情况。在初期的真空预压联合热固结阶段,由于土体在早期具有较高的含水率和渗透性,细粒土颗粒处于流动和悬浮状态。当高真空压力与温度逐渐上升时,孔隙水黏滞性降低,水流速增大,土体渗透性增加,进而导致前期排水量迅速增加^[22]。而且试验土体工况相同,故前期排水量无明显差异。当达到各自的强夯时机时,各组排水速率均有较大幅度增长,在强夯作用下,土体表面受到反复撞击,导致土体中的孔隙被压实,大量土颗粒聚集,使得结合水转化为自由水。在不断的挤压下,自由水向着挤压应力较低处移动,并在真空压力下随 PVD 排出^[19]。试验结束后, T3 组的最终排水量最大为 58.99 kg, T3 组最终排水量分别比 T1、T2 和 T4 组提高了 29.64%、14.64%、9.05%。这是由于在真空联合热固结阶段土体内部结构尚未形成,在早期进行夯击时,能量无法有效传递到土体内部,孔隙水较难排出,对排水量的促进作用较小。然而,在试验 T2 组时,动力夯击启动时间最晚,土体中大部分孔隙水随真空联合热固结效应排出,自由水较少,且土体内部孔隙相对较小,动力压实部分排出水最少。因此,动力夯击启动时间过早或过晚,都无法达到最佳排水效果,表明在真空热固结联合强夯法中,存在最佳强夯时机。

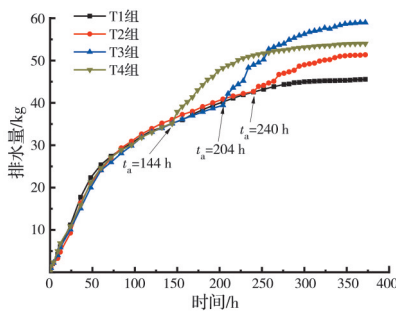


图 4 排水量随时间变化曲线

Fig. 4 Variation in water discharge versus time

2.3 表面沉降

图 5 显示了各组试验土体表面沉降随时间变化的情况,4 种工况下 VP+CT 阶段的表面沉降趋势基本相同,试验开始时土体表面快速下降,随着试验的进行逐渐趋于稳定。结合图 4 的排水量曲线可以看出,排水量与沉降的变化趋势呈正相关,土孔隙水的排出使得土体沉降逐渐增大。在真空压力、重力以及温度效应的共同作用下,土体中的孔隙重新分布并逐渐减小,导致土体表面随排水产生沉降。当各试验组开始强夯后,沉降速率急剧增加,

在孔隙水消散过程中,沉降值会发生不同程度的突变。试验结束后, T1~T4 组的土表沉降分别为 24.1、27.3、30.5、29.4 cm, T3 组的沉降量最大,分别比 T1、T2 和 T4 组提高了 26.55%、11.72% 和 3.74%。这是因为夯击过程中的沉降主要由孔隙水的排出引起,过晚夯击对排水效果促进作用较小,且土体孔隙较小,夯击后效果并不明显。在真空联合热固结作用下, T3 组孔隙水压力逐渐消散,土体骨架逐渐形成,在夯击荷载作用下,内部发生剪切变形,形成一定的排水通道,加速土体的排水,产生的孔隙在强夯作用下逐渐被压实,土体沉降进一步增大。

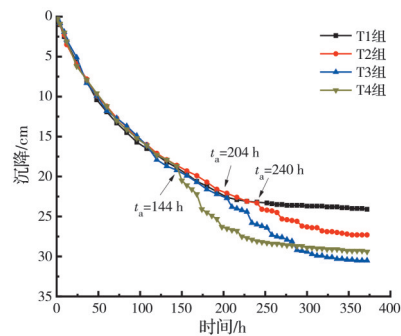


图 5 土体表面沉降随时间变化曲线

Fig. 5 Variation in surface settlement versus time

固结度是衡量土体固结效果常用指标之一,可根据 Asaoka 法^[23]计算。

$$U_f = \frac{\delta_f}{\delta_{ult}} \quad (4)$$

式中: δ_f 为试验结束时的表层沉降; δ_{ult} 为最终沉降,可用式(5)计算。

$$\delta_{ult} = \frac{\beta_0}{1 - \beta_1} \quad (5)$$

式中: β_0 和 β_1 分别为连续沉降 δ_n 与 δ_{n-1} 之间近似一次关系的截距和斜率。

$$\delta_n = \beta_0 + \beta_1 \delta_{n-1} \quad (6)$$

如图 6 所示,以 T3 组的平均沉降曲线计算出的 δ_{ult} 为 34.51 cm 为例,同理可得 T1、T2、T4 组的 δ_{ult}

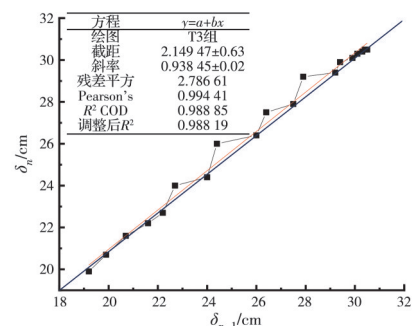


图 6 T3 平均沉降 δ_n 和 δ_{n-1} 拟合与曲线

Fig. 6 Fitting and curve of T3 mean settlement δ_n and δ_{n-1}

分别为 33.1、33.9、34.2 cm。将试验各组的 δ_i 代入式(4)中,可分别得到 T1、T2、T3 和 T4 组的 U_i 为 72.8%、80.5%、88.38% 和 85.9%。由固结度结果可知,T3组最终土体的固结程度最高,表明 T3组的强夯时机最佳。

2.4 孔隙水压力

图 7 显示了 4 组试验中孔隙水压力的消散情况,取与热源位置径向距离 50、200 mm 处的孔隙水压力平均值,在真空预压联合加热阶段,各试验组孔隙水压力消散呈现一定的波动,产生波动的原因因为土体发生热渗效应,土体内产生了正孔压值。抽真空后孔压下降明显,并逐渐产生负孔压,随着时间的增加,孔压负值增大,两者相互作用,波动幅度逐渐减小。当各组启动强夯后,孔隙水压力消散均有一定变化,即超孔隙水压力在急剧增加后被 PVD 所排除,会形成更大的波动范围,然而强夯作用会对较大孔隙进行压实,形成新的裂缝,即新的排水通道产生,可以加速土体的固结,孔压消散较快。试验结束后,最终孔压消散大小顺序为 T3>T4>T2>T1,分别消散了 35.2、39.5、44.6、41.6 kPa。由于过早强夯,孔隙水压力的消散主要由真空预压联合热固结效应产生,而且土体表面较软,导致只有少部分夯击能作用到深层土体上,深层土体内部部分孔隙水压力不易排除。而对于试验组 T3,土体内部结构已经形成,夯击能更好地传递到深层土体,减轻了深层土体的堵塞效应。过晚强夯时,土体基本已固结完全,土体中的水分更少,只有极少量甚至没有水可以通过更紧密的土柱流向 PVD,夯击作用展现为微弱。所以,不同时刻进行强夯对土体孔隙水压力的消散和上升影响不同,沉降速率为 4 cm/3 d 时对孔隙水压力的作用最显著。

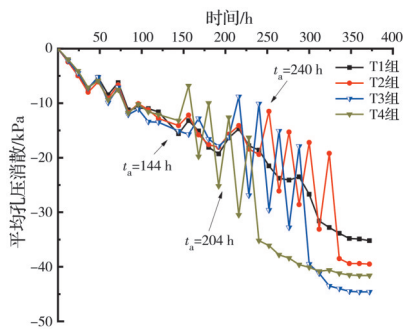


图 7 土中孔压消散随时间变化曲线

Fig. 7 Variation in pore-water pressure dissipation of soil versus time

2.5 含水率与十字板剪切强度

试验结束后按照图 2(c)所示位置取土样测定含水率,图 8 显示了含水率的分布情况。从图 8 可

以看出,各试验组含水率分布规律一致,与热源的距离越大,含水率越高,而且随着深度的增加而增大。试验组 T3 含水率低于 T2 和 T4 组,说明试验组 T3 排水固结效果最佳。夯击时间过早,导致土体表面形成的薄硬壳层被破坏,夯击能量在纵向传递时发生损失,孔隙水缓慢通过 PVD 排出,导致含水率较大。此外,在整体处理效果上,在与热源径向距离 15 cm 处,试验组 T1~T4 表层土体和最深层土体的含水率差值分别为 16.01%、13.12%、9.9%、12.89%,说明强夯可以提高土体的固结效果。在处理均匀性方面,各试验组在距离加热棒近端与远端处含水率最大差值分别 23.72%、13.01%、6.98%、10.09%,说明夯击排水板附近的土柱可以促进孔隙水排出,促进土体排水固结,提高土体均匀性。

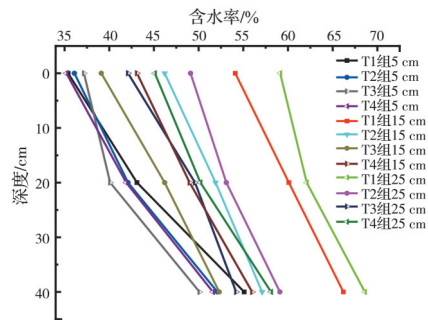


图 8 含水率随深度&加热棒距离变化曲线

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

图 9 为土体的十字板剪切强度分布曲线,结合图 8 的含水率分布曲线可以看出,土体的十字板剪切强度与含水率呈负相关。试验组 T1~T4 的平均十字板剪切强度分别为 23.28、26.73、29.18、27.95 kPa,与热源距离较小处土体与距离较大处最大差值分别为 15.7、12.0、7.2、9.7 kPa,表明强夯作用增强了真空预压联合热固结处理后土体的均匀性,且强夯时机为每 3 天沉降 4 cm 时十字板剪切强度更高,强夯时机过早或过晚时,对土体强度提升均较小。此外,可根据十字板剪切强度估算其承载力^[24]。

$$q_u = (\pi + 2)C_u \tag{7}$$

式中: C_u 为土体的平均十字板剪切强度; q_u 为估算得出的土体承载力。根据式(7)可得到 T1~T4 组的承载力分别为 119.65、137.39、149.98、143.66 kPa,进一步说明强夯对土体的加固作用更显著,且夯击时间不宜过早。

2.6 微观结构分析

试验结束后,取各组未受扰动的土体切面作为

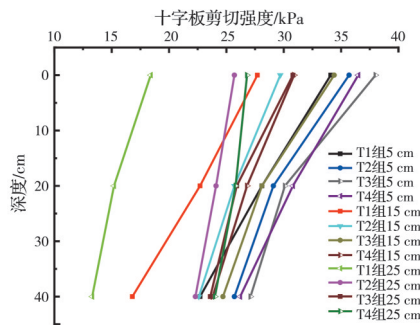


图 9 十字板剪切强度随深度&加热棒距离变化曲线

Fig. 9 Variation in shear strength of cross plate versus depth & distance to heating hot

电镜扫描的观察面,对其进行微观结构分析,图 10 显示了放大 1 000 倍的 SEM 图像。从图 10 可以看出,采用真空预压与加热结合时,土体展现为粒间孔隙直径较为显著,靠团聚体骨架之间的接触构成更加松散的大孔隙松散结构。经过强夯处理之后,土体间的孔隙直径明显减小,孔隙数量也减少,密实程度增加,土体之间的连接性更强,土体强度提高。进一步说明真空预压下加热联合强固结效果更好,土体更密实。图 10(a)、(b)显示出很少的孔隙,粒间主要接触方式变化为面与面的接触,各颗粒间相互面接触存在一定孔隙,但相对于 T1 组, T2 组颗粒间接触更紧密。图 10(c)显示出最小的土体孔隙和最均匀的土体颗粒,所以该方法观察到的微观结构比相同位置、不同夯击时机的其他试验组更加致密,进一步可以证明其十字板剪切强度比其他试验组更高。

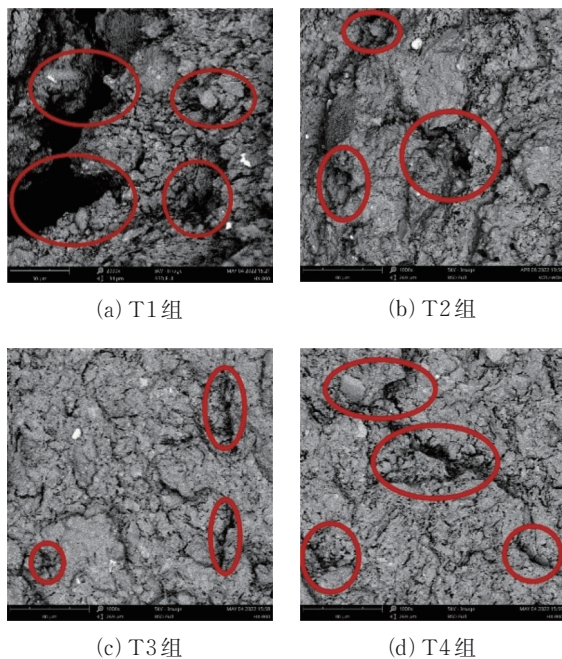


图 10 不同试验组电镜拍摄图像

Fig. 10 SEM images of different experimental groups

3 结论

结合真空热固结与强夯法试验研究,根据室内模型试验,提出最佳夯击时机,重点分析真空热固结后通过强夯带来的影响,得到以下结论:

1)与真空热固结法相比,真空热固结联合强夯法能有效提升排水量、沉降量,且处理后的土体十字板剪切强度更高,含水率分布更均匀,真空热固结联合强夯法具有更显著的加固效果。

2)在合适的温度下,强夯作用能有效提高土体的密实度,弥补纯真空联合热固结效应下热量衰减而导致土体不均匀固结的问题。

3)微观试验结果直观展现了试验后土体内部孔隙的变化,说明真空热固结联合强夯法中存在最佳强夯时机,强夯时机过早或过晚对土体的加固均有影响,从而影响工程废浆的固结程度。

4)试验中,最佳强夯时机为沉降速率 4 cm/(3 d) 时,试验结束后,土体固结度达 88.38%,最终排水量达 58.99 kg,土体表面沉降增大 26.5%,且深层土体具有更好的加固效果。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 王军, 蔡袁强, 符洪涛, 等. 新型防淤堵真空预压法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)
- [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] 周洋, 蒲河夫, 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)

- [5] 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)
- [6] 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)
- [7] 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)
- [8] 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, DIBANGAR K, 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)
- [9] 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]. 淮海大学学报(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)
- [10] 王天园, 邓岳保, 毛伟赞, 等. 加热对软土地基真空预压排水固结的影响研究[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(1): 62-68.
WANG T Y, DENG Y B, MAO W Y, et al. A study of the effect of heating on vacuum preloading for soft ground [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(1): 62-68. (in Chinese)
- [11] DU C Z, HU X Q, FU H T, et al. Effects of temperature circulation on dredged sludge improved by vacuum preloading [J]. Soils and Foundations, 2021, 61(5): 1343-1353.
- [12] 林伟岸, 李卓峰, 詹良通, 等. 一种超软土加固的具有加热型排水板的热真空预压装置: CN204570664U[P]. 2015-08-19.
LIN W A, LI Z F, ZHAN L T, et al. Device for reinforced (rfd) thermal vacuum pre-compaction that has with fever type drain bar of ultra-soft soil: CN204570664 U[P]. 2015-08-19. (in Chinese).
- [13] 邓岳保, 王天园, 毛伟赞, 等. 真空预压联合加热技术模型试验及作用机理研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(1): 206-217.
DENG Y B, WANG T Y, MAO W Y, et al. Model test and mechanism study on the ground improvement method of vacuum preloading with heating [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(1): 206-217. (in Chinese)
- [14] 孙铁, 李晓茹, 康景文, 等. 大面积软基强夯与强夯+真空降水处理效果对比试验分析[J]. 建筑科学, 2012, 28(Sup1): 148-152, 171.
SUN T, LI X R, KANG J W, et al. Effect comparison and analysis of dynamic compaction and dynamic Compaction+Vacuum dewatering treatment in a large area of software-based [J]. Building Science, 2012, 28 (Sup1): 148-152, 171. (in Chinese)
- [15] 唐彤芝, 刘建, 刘培贵, 等. 多通道负压排水动力夯实技术试验[J]. 淮海大学学报(自然科学版), 2017, 45(4): 324-331.
TANG T Z, LIU J, LIU P G, et al. Experimental study of new technology of multi-channel vacuum drainage dynamic compaction [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(4): 324-331. (in Chinese)
- [16] CHANG D, LOU X, XU S F, et al. Innovative soft soil stabilization using simultaneous high-vacuum dewatering and dynamic compaction [J]. Transportation Research Record, 2010, 2186: 138-146.
- [17] TANG Y Q, ZHOU J, HE X J, et al. Theoretical and experimental study of consolidation settlement characteristics of hydraulic fill soil in Shanghai [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 67: 1397-1405.
- [18] LI X B, LI J, YUAN G H, et al. The influence of the tamping mode on the clogging effect of the vacuum-dynamic drainage consolidation method [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2022, 15(2): 1-13.
- [19] ZHOU Y, CAI Y Q, YUAN G H, et al. Effect of tamping interval on consolidation of dredged slurry using vacuum preloading combined with dynamic consolidation [J]. Acta Geotechnica, 2021, 16(3): 859-871.
- [20] 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.
- [21] WANG J, CAI Y Q, YUAN G H, et al. Temperature effects on dredged slurry performance under vacuum preloading [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2020, 57 (12): 1970-1981.
- [22] 孙文涛. 吹填淤泥在真空预压和加热条件下力学特性的试验研究[D]. 浙江温州: 温州大学, 2020.
SUN W T. Experimental study on mechanical properties of dredged sludge under vacuum preloading and heating [D]. Wenzhou, Zhejiang: Wenzhou University, 2020. (in Chinese)
- [23] ASAOKA A. Observational procedure of settlement prediction [J]. Soils and Foundations, 1978, 18(4): 87-101.
- [24] YAN S W, CHU J. Soil improvement for a road using the vacuum preloading method [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement, 2003, 7(4): 165-172.

(编辑 王秀玲)