

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.237



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



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

李水江¹, 汤家郗², 李校兵^{3a}, 王军^{3a,3b,3c}, 符洪涛^{3a,3b,3c}, 刘飞禹²

(1. 广州环保投资有限公司, 广州 510830; 2. 上海大学土木工程系, 上海 200444; 3. 温州大学 a. 建筑工程学院; b. 浙江省软弱土地基与海涂围垦工程技术重点实验室; c. 浙江省海涂围垦及其生态保护协同创新中心, 浙江温州 325035)

摘要:真空预压联合电渗法常用于疏浚淤泥地基处理,但存在排水板淤堵及电极腐蚀严重、能耗大等问题,导致该方法在实际应用中受限。提出利用真空预压-逐级加能动力压实联合电渗法,克服传统联合法的缺陷,通过5组室内模型对比试验,采用孔压消散比PPDR确定动力压实启动时间,研究最优动力压实启动时间点。试验过程中监测土体的孔隙水压力、排水量、土表沉降和电流强度,在试验前后测量土体含水率、十字板剪切强度及阳极腐蚀量。结果表明:与真空预压联合电渗法相比,在真空预压阶段启动动力压实可使淤堵土柱开裂,有效提高真空预压的排水效率;动力压实后土体表面裂缝减少,更加平整,电渗固结过程产生的阳极腐蚀量和能耗降低;在PPDR为70%时启动动力压实,土体的排水量最大,土表沉降增幅最大,处理后的十字板剪切强度达到65 kPa,获得了更好的处理效果。

关键词:真空预压联合电渗法;动力压实法;最优启动时间点;疏浚淤泥;排水板淤堵

中图分类号: TU447 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2023)06-0143-08

Experimental study on vacuum preloading combined with progressive dynamic compaction and electro-osmosis method for dredged slurry

LI Shuijiang¹, TANG Jiayi², LI Xiaobing^{3a}, WANG Jun^{3a,3b,3c}, FU Hongtao^{3a,3b,3c},
LIU Feiyu²

(1. GZEPI Huacheng Environmental Protection Energy Co., Ltd., Guangzhou 510830, P. R. China; 2. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, P. R. China; 3a. School of Architecture and Civil Engineering; 3b. Key Laboratory of Engineering and Technology for Soft Soil Foundation and Tideland Reclamation of Zhejiang Province; 3c. Innovation Center of Tideland Reclamation and Ecological Protection, Wenzhou University, Wenzhou 325035, Zhejiang, P. R. China)

Abstract: Vacuum preloading combined with electro-osmosis is one of the most commonly used method to treat

收稿日期: 2021-07-05

基金项目: 国家自然科学基金(51878402); 浙江省自然科学基金(LY20E080029)

作者简介: 李水江(1970-), 男, 高级工程师, 主要从事环保工程研究, E-mail: lishuijiang@gzepi.com.cn。

李校兵(通信作者), 男, 博士, 副教授, E-mail: lixb311@163.com。

Received: 2021-07-05

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51878402); Natural Science Foundation of Zhejiang Province (No. LY20E080029)

Author brief: LI Shuijiang (1970-), senior engineer, main research interest: environmental protection engineering, E-mail: lishuijiang@gzepi.com.cn.

LI Xiaobing (corresponding author), PhD, associate professor, E-mail: lixb311@163.com.

dredged slurry, but there are problems such as blockage of drainage boards, serious electrode corrosion and high energy consumption which results in its limited use in engineering practice. In order to overcome the shortcomings of vacuum preloading combined with electro-osmosis method, this paper proposes a vacuum preloading- step-by-step energy dynamic compaction combined with electro-osmosis. Through five groups of laboratory model contrast tests, the pore pressure dissipation ratio (PPDR) was used to determine the dynamic compaction start-up time, and the optimal value was studied. During the tests, the pore water pressure, drainage volume, surface settlement and in situ strength of soil were monitored. The water content, vane shear strength and anodic corrosion were measured before and after the test. The test results showed that: compared with the test group of vacuum preloading combined with electro-osmosis method, the dynamic compaction in the vacuum preloading stage can crack the soil column caused by silting and effectively improve the drainage efficiency. After dynamic compaction, the cracks on the soil surface were reduced and the soil sample was more flat. The amount of anodic corrosion and energy consumption in the process of electro-osmosis consolidation were decreased. The drainage increased the most and the increase of settlement was the greatest and the shear strength after treatment reached 65 kPa when PPDR was 70%, under which a better treatment effect was obtained.

Keywords: vacuum preloading combined with electro-osmosis; dynamic compaction method; optimal starting time; dredged slurry; drain board clogging

经济快速发展,人口快速增长,导致中国东部沿海地区土地资源稀缺,现有土地难以满足城市拓展需求。近几十年来,沿海城市陆续开展海涂围垦工程,以增加陆地面积,但其主要以含水率高、压缩性高、抗剪强度和渗透性低的海底疏浚淤泥细颗粒作为填料^[1]。疏浚淤泥地基工程性质极差,施工前必须进行处理^[2]。

经过几十年的发展,真空预压法已成为最常用的疏浚淤泥地基处理方法之一^[3]。但该方法处理疏浚淤泥时会因其渗透性低导致深层土固结不足^[4];且在恒定真空吸力作用下细颗粒会随水迁移至排水板周围,聚集形成土柱^[5-6],造成排水板淤堵、土体固结不均匀^[7]。电渗法的优点有:固结过程仅取决于土体电渗透系数,与颗粒粒径无关^[8];电渗法加固深度大^[9],因此,在处理疏浚淤泥时可以有效克服真空预压存在的技术性缺陷,但存在能耗大和处理后土体不均匀等问题。由于真空预压法与电渗法能互相弥补技术性不足,因此,有研究者提出真空预压联合电渗法处理疏浚淤泥^[10]。通过在电渗阴极布置排水板,使土体中自由水在真空压力作用下通过排水板排出,通电后阳极区土体水分在直流电场作用下向阴极迁移排出,从而达到加固土体的效果。与两种单独工法相比,联合工法在一定程度上促进了土体真空预压排水且改善了电渗法处理后土体的不均匀性^[11]。孙召花等^[12]提出,联合工法处理疏浚淤泥时,细颗粒仍会迁移至排水板附近,聚合形成致密土柱,影响排水效果,且电渗后期的能耗仍然过大,电极腐蚀较为严重。

强夯法应用于饱和软黏土处理时称为动力固结,可产生强大的冲击波,使内部土体开裂,产生裂缝,增加排水通道,且能使土体表面的微裂缝弥合,增加土体整体性。笔者在真空预压阶段引入低能量逐级加能动力压实法,联合电渗法处理疏浚淤泥^[13],利用动力压实法对土体表面反复施加高强度的冲击作用,不仅可以在土中一定深度范围内产生附加应力,加速土中孔隙水压力消散,还可以通过动力压实的冲击作用产生的冲击波,使土体内部产生动应力,动应力使排水板周围土体的超孔隙水压力增大,进而产生新的裂隙,使原本致密的淤堵土柱开裂^[14]。由于动力压实的间隔时间主要取决于超孔隙水压力消散情况^[15],因此,采用孔压消散比的概念来确定动力压实的启动时间^[16],研究在不同孔压消散比下启动动力压实对孔隙水压力、排水量、土表沉降和电流强度等指标随时间的变化规律及对疏浚淤泥加固效果的影响,以期获得最优的动力压实启动时间。

1 试验

1.1 试验材料

试验所用土样取自温州地区某一河道清淤工程。取土样搅拌均匀后,根据《土工试验标准方法》(GB/T 50123—2019),通过实验室相关仪器对疏浚土样的含水率、土粒比重、孔隙比、液塑限、土重度、电导率和渗透系数等相关物理力学参数进行测定,获得疏浚淤泥的各项基本物理力学参数,如表 1 所示。

表 1 疏浚淤泥基本物理力学参数

Table 1 Basic physical and mechanical parameters of dredged slurry

含水率 $w/\%$	土粒比重 G_s	孔隙比 e	塑限 $w_p/\%$
78	2.75	2.46	20.8
液限 $w_l/\%$	土重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	电导率 $\sigma/(\text{ms}/\text{cm})$	渗透系数 $k/(\text{cm}/\text{s})$
50.4	16.8	4.87	1.56×10^{-6}

1.2 试验装置及试验方案

1.2.1 试验装置

真空预压联合电渗系统如图 1(a)所示,主要包括模型桶、真空泵(输出功率 3.88 kW,最大可施加真空压力为 98 kPa)、气-水分离瓶、密封膜、整体式排水板、直流电源、孔压计、阴极和阳极。有机玻璃自制模型桶壁厚为 10 mm、内径为 320 mm、高度为 390 mm,共 5 个。孔压计固定在预制立管上,将预制立管准确插入土中,将孔压计布置在垂直深度 180 mm、距阴极水平方向 60 mm 处,通过电子孔压读数仪采集试验过程中孔隙水压力。电渗阴极采用高为 360 mm、直径为 7 mm 的光圆钢筋;阳极采用 6 根长度为 360 mm、直径为 7 mm 的光圆钢筋与内径为 280 mm 的环形钢筋焊接而成,电极按图 1(b)轴对称二维模型排布,使土中电场接近中心对称分布,以便更好地模拟实际情况。

模型箱侧视图及动力压实系统夯锤如图 1(b)所示,试验采用自主设计的开口环形夯锤,可避免排水板弯折影响排水效果,更好地开展动力压实。在土表密封土工膜上加设一层土工布并铺设 1 cm 厚细砂垫层,防止夯击破坏密封膜。根据相似原理设计动力压实的工艺参数,提高模型试验结果可靠性。采用低能量逐级加能的夯击方式,可避免出现橡皮土,有效抑制孔压的大幅升高,防止宏观结构破坏。试验中各组动力压实分别进行 3 次满夯。参照熊巨华等^[17]对动力压实模型参数的研究,试验所用夯锤质量为 2.5 kg,每次夯击落距分别为 0.12、0.16、0.2 m,单次夯击能根据式(1)计算,分别为 3、4、5 J^[18]。

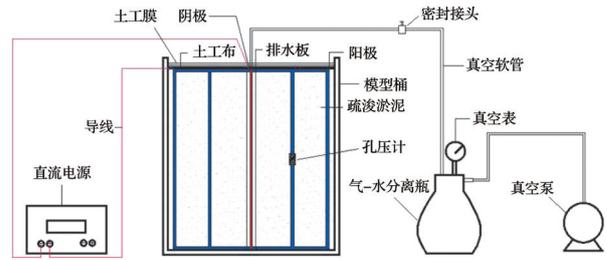
$$E = Q \times g \times h \quad (1)$$

式中: E 为单次夯击的能量,J; Q 为夯锤的质量,kg; g 为重力加速度,取 $10 \text{ m}/\text{s}^2$; h 为夯锤落距,m。

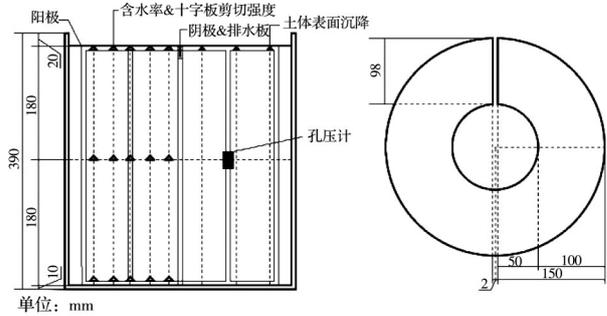
试验监测点分布如图 1(c)所示。试验前后分别对含水率、十字板剪切强度以及阳极质量进行测量。试验期间,每隔 3 h 监测一次土表沉降、排水量及电流强度。

1.2.2 试验方案

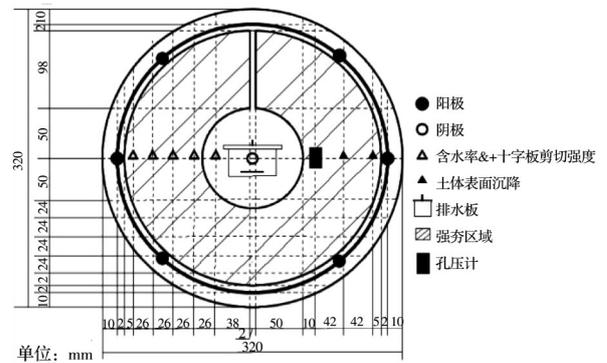
孔压消散比 PPDR (Pore Pressure Dissipation



(a) 真空预压联合电渗系统



(b) 模型箱侧视图及动力压实系统夯锤



(c) 测点布置图

图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test device

Ratio)定义为:实时孔压消散值与真空预压联合电渗法试验组(PT 试验组)的最大孔压消散值之比,用于确定各组真空预压阶段动力压实的启动时间,表示为

$$PPDR = P_i / P_{\max} \quad (2)$$

式中: P_i 为 VP-DC 阶段实时孔压消散值,为前一测得孔压值减去后一测得孔压值,kPa; P_{\max} 为 PT 组 VP 阶段最大孔压消散值,kPa。

4 组对比试验(T1~T4)如表 2 所示。其中,VP-EO 表示真空预压-电渗试验;VP-DC-EO 表示真空预压-动力压实-电渗试验。图 2 为 PT 组试验 VP 阶段孔隙水压力时程曲线,VP 阶段孔压消散值最大为 14.3 kPa。T1~T4 组 VP 阶段的动力压实启动时间均以表 2 为依据;各组试验 VP 阶段土体排水均困难时同时启动电渗,EO 阶段土体排水量低于 0.01 kg/h 时停止试验。

表 2 试验方案
Table 2 Test schemes

试验组	处理模式	压实启动时间
PT	VP-EO	
T1	VP-DC-EO	PPDR=50%
T2	VP-DC-EO	PPDR=60%
T3	VP-DC-EO	PPDR=70%
T4	VP-DC-EO	PPDR=80%

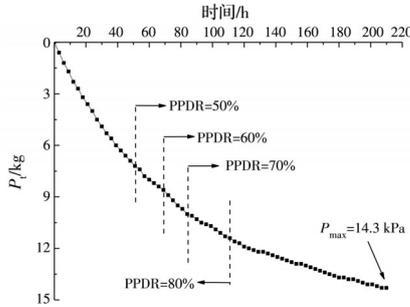


图 2 PT 组 VP 阶段孔压消散值随时间的变化关系

Fig. 2 Variations in the dissipation value of pore water pressure with time in VP stage of PT group

表 2 中,以 PT 组 VP 阶段孔压消散最大值 14.3 kPa 为基准,根据 PPDR 大小来控制压实频率和间隔时间。以 T1 为例,首次动力压实时刻为孔压消散初始值 0 与 14.3 kPa 差值的 50%;下一次夯击时刻对应于上一次夯前孔压消散值增加到与 14.3 kPa 差值的 50%,以此类推,其余试验组同理。

试验步骤为:1)将电渗阳极架和固定好孔压计的铁架放置于模型桶中,将疏浚淤泥土样倒入模型桶静置 24 h,完成初固结;2)将阴极整体式排水板插入模型桶土样中心,使阳极和阴极二维同轴布置;3)连接管线,排水板通过密封接头与真空软管连接,外接气-水分离瓶和真空泵,孔压计连接孔压读数仪,采集数据,记录孔隙水压力的变化,将阴极与阳极通过导线相互连接并用导线外接电源;4)将土工膜和土工布铺设在土样上,用玻璃胶密封潜在漏气位置,并在土工布上铺设 1 cm 厚细砂垫层。

2 试验结果与讨论

2.1 孔隙水压力消散值

根据采集到的孔隙水压力值,计算孔隙水压力(孔压)消散值,绘出图 3 曲线。从图中可以看出,各组试验的孔压消散值均随时间不断增大;初期变化基本一致,但随着 T1~T4 分别启动动力压实,孔压消散值区别明显。

真空预压阶段结束时,PT、T1、T2、T3 和 T4 组孔压消散值大小分别为 14.3、14.8、16、16.4、15.4 kPa,大小排序为 T3>T2>T4>T1>PT。动

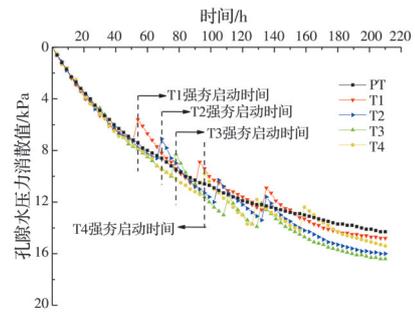


图 3 孔隙水压力消散值随时间的变化关系图

Fig. 3 Variations in the dissipation value of pore water pressure with time

力压实对土体表面的冲击作用会使土体内部产生裂缝,排水通道数量增加^[19];同时,由于冲击作用,排水板附近聚集形成的致密土柱开裂,有利于土中自由水排出,加速孔隙水压力消散^[20],缓解淤堵效应,因此,T1~T4 的孔压消散值均高于 PT。由于 T1~T4 的动力压实启动时间点不同,使得产生超孔隙水压力的时间不同,故孔压消散过程也有差异。由图 3 可知,夯击时刻产生的超孔隙水压力使孔压消散值突变减小,新增排水路径形成后,孔压得以更快消散。因靠近阴极的土体排水路径较短,孔压消散最快,故排水板周围土体固结更快。

对于 T1 组,动力压实虽使土体产生裂缝,但该时段真空预压排水较容易,因此促进效果不明显;另一方面,动力压实启动过早会使土体孔隙封闭,产生“锁水”现象,导致孔隙内自由水不能及时排出;对于 T4 组,由于启动时间位于真空预压阶段后期,土中自由水含量过少,故动力压实产生的超孔隙水压力较小,达不到理想促进效果。对于 T2 组,动力压实产生的超孔隙水压力最大,孔压消散速率大于 T1 组,但小于 T3 组,T2 组的孔压消散值在第一次夯击后被 T3 组反超。这是由于 T2 组与 T3 组启动动力压实的 PPDR 不同,使得土柱开裂产生的排水通道数量不同,T3 在 PPDR 为 70% 时夯击,动力压实产生的排水路径比 T2 更多,孔压消散更快,因此,改善效果更显著。综上所述,T3 的动力压实启动时间最优。

2.2 排水量

将土中排出的水收集在气-水分离瓶中,图 4 绘制了各组试验排水量随时间变化的关系曲线。由图 4 可知,试验初期各组排水量变化基本相同。启动动力压实后,T1~T4 排水质量明显增加;动力压实启动时间不同,使排水量出现显著差异。真空预压阶段结束时,各组排水量分别为 4.57、4.82、5.34、5.67、5.08 kg。整个试验结束后,排水量分别达到 7.17、7.35、7.75、8.03、7.55 kg。

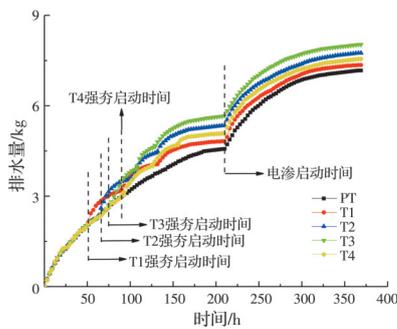


图4 排水量随时间的变化关系图

Fig. 4 Variations in the change of discharge with time

对比上述试验数据发现, T1~T4的排水量均高于PT, 真空预压使土体趋于密实, 动力压实使土体内部开裂, 产生新的排水通道, 有效提高了排水效率。对于T1~T4, 夯击使得排水量急剧增大, T2~T4的排水量高于T1, 且T3的排水量最高。T1启动动力压实的时间较早, 土中自由水较多, 夯击使土体孔隙产生了“锁水”现象, 排水效果较弱, 因此, T1排水量小于T2~T4。T4动力压实启动时间最晚, 由于真空预压使得土中自由水大量排出, 夯击时土中自由水最少, 真空度大量损失, 动力压实后的排水效率及排水量高于T1但低于T2与T3, 因此, 动力压实启动时间过早或过晚, 都不能达到理想效果。对比T2和T3的排水量可知, T3排水量更大, 故动力压实产生的排水路径更多, 启动时间更优。最后, 各组试验排水困难时同时启动电渗, 进一步对土体固结。电渗阶段PT~T4的排水量逐渐增大, 最终趋于稳定值。综上, 当PPDR为70%时启动动力压实, 可获得最佳排水效果。

2.3 土表沉降

为准确直观地反映土表沉降随时间的变化关系, 试验中设置了3个测点, 每一次夯击后采用沉降标尺测量土表沉降并计算平均值, 将平均值作为土表沉降值。图5为试验过程中各组试验土体表面沉降随时间的变化曲线。T1~T4分别启动动力压实后, 土表沉降瞬间增大, 瞬时沉降幅值随动力压实

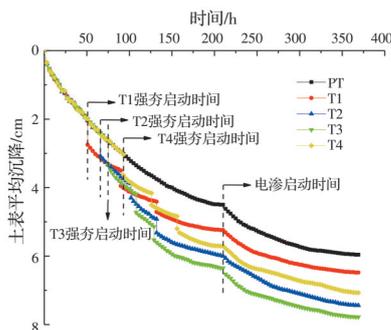


图5 土表平均沉降随时间的变化关系图

Fig. 5 Variations in the surface average settlement with time

次数增加而逐渐减小。土表沉降瞬间增大的主要原因是, 动力压实对土表施加正压力后, 疏浚淤泥细颗粒挤入真空预压排水后形成的孔隙中; 土表瞬时沉降值随夯击次数逐渐减小是由于土颗粒在固结过程中不断趋于密实, 土中孔隙体积逐渐减小。

真空预压阶段结束时, 各组土表平均沉降值排序为 $T3 > T2 > T4 > T1 > PT$ 。可以发现, T1~T4的土体表面沉降发展快于PT, 且沉降平均值比PT高, 说明动力压实有效促进了土体固结, 大幅增加土表沉降值, 土体强度得到提高。对比T1~T4的沉降发展曲线及沉降平均值发现, 动力压实的间隔时间因PPDR不同也存在差异, T3获得了最大土表沉降值6.35 cm, 分别较PT、T1、T2和T4高41.1%、21.2%、5.8%、11.2%, 说明不同的动力压实启动时间对于沉降值的影响存在差异。研究中PPDR为70%时启动动力压实可以获得最好的压实效果, 使土体达到最大的强度。

各组试验进行到210 h时真空预压排水困难、启动电渗进一步使土体排水。PT、T1、T2、T3及T4电渗阶段结束的最终土表平均沉降量为5.96、6.48、7.44、7.78、7.07 cm。综上所述, 在真空预压阶段引入动力压实法并联合电渗法能有效促进土体的固结沉降。

2.4 含水率和十字板剪切强度

试验结束后, 用微型十字板剪切仪在相应测点进行十字板剪切试验, 并测量相应点位的含水率, 水平方向5个测点数据取平均值作为深度方向的数据, 垂直深度0、180、360 mm处的含水率和十字板剪切强度平均值如图6所示。由图6可知, 在土体不同深度的垂直方向上, 各组合含水率和十字板剪切强度的变化趋势呈负相关关系; 表层土体的含水率均低于深层土体, 表层土体的十字板剪切强度均高于深层土体, 这是因为真空度会沿着竖向排水板逐渐衰减, 表层土的真空压力高于深层土, 因此, 固结效果更好; 距离表层越近, 十字板剪切强度差异越明显, 主要体现在PT与T1~T4间的差异。由于T1~T4引入动力压实, 处理后土体的十字板剪切强度较高, 并且, 随着土体深度的增加, 动力压实的冲击应力会减弱, 因此, 深度大的测点十字板剪切强度差异较小。

将测点处含水率和十字板剪切强度取平均值分析, 得到PT、T1、T2、T3、T4的含水率平均值分别为43.8%、42.3%、40.2%、39.3%、41.1%, 十字板剪切强度分别为25.3、42.7、56.7、65、47.7 kPa。比较这些数据可以发现, 含水率平均值的排序为 $PT > T1 > T4 > T2 > T3$; 十字板剪切强度平均值为

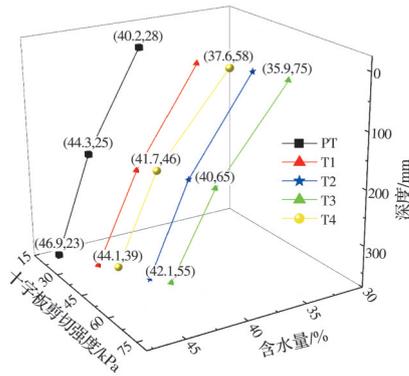


图 6 试验后土体沿深度方向的含水率与十字板剪切强度平均值的分布

Fig. 6 Distribution of the water content and the vane shear strength average value along the depth direction after the test

PT<T1<T4<T2<T3。因此,动力压实有效地改善了真空预压的处理效果,经 T3 组处理后的土体强度最高。

2.5 电流强度

图 7 绘制了电渗阶段各组试验电流强度随时间的变化关系。由图 7 可知,由于形成排水通道的土体与电极之间界面电阻较低,电渗阶段初期电流强度逐渐增大;在电渗启动后 240、210、150、120、180 h, PT、T1、T2、T3 和 T4 分别达到电流强度峰值;随着电渗试验的进行,土中自由水和盐含量降低,阳极腐蚀导致导电通道的界面电阻逐渐增大,电流强度逐渐减小。

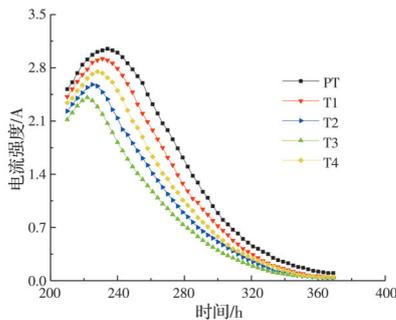


图 7 电流强度随时间的变化关系图

Fig. 7 Variations in the change of current intensity with time

由图 7 还可以看出, T1~T4 组的电流强度均比 PT 低。这是由于动力压实作用使得 T1~T4 组真空预压阶段排水量高于 PT, 因此启动电渗时的初始含水率较低, 导电性较差, 故电流强度和峰值电流强度均低于 PT, 且峰值衰减时刻也早于 PT。动力压实的启动时间不同, 影响真空预压排水效果和土体含水率, 还间接影响电渗阶段土体导电性能, 导致 T1~T4 组达到的电流强度峰值不同; 含水率越低, 电渗产生的电流强度越小, 并且达到峰值的

时间点越早。由于 PT 真空预压阶段未引入动力压实, 自由水和离子含量最高, 因此电流强度最大; T1~T4 组的动力压实启动时间越优, 真空预压排水及土中排水通道数量的增加越显著, 电流越小。在 PPDR 为 70% 时启动动力压实, T3 所产生的电流强度最小, 能耗最小。

各组电流强度衰减速率排序为 PT>T1>T4>T2>T3, PT 的初始含水率更高, 电渗过程中, 电流强度衰减速率最快, 动力压实可以缓解电流强度的衰减, 从而提高电渗排水效率。试验结果表明, 动力压实的启动时间越优, 缓解电流强度衰减的效果越好, 电渗效率越高。因此, T3 电渗固结效果最优。

2.6 电极腐蚀与平均能耗系数

各组试验结束后的阳极腐蚀量如图 8 所示。从图中可以看出, PT、T1、T2、T3 和 T4 的阳极腐蚀量分别为 444、398、374、370、386 g; 通过对比发现, 在电渗阶段结束后, T1~T4 组的阳极腐蚀量分别比 PT 少 11.56%、18.72%、20%、15.03%。这是因为, 动力压实后土体的排水路径更多, 真空预压排水量更大, 使得电渗启动时 T1~T4 组土体的含水率较低、电渗反应较弱。另外, T1~T4 组的阳极腐蚀量排序为 T1>T4>T2>T3, T3 的阳极腐蚀量最小。这一结果与电流强度分析结果一致: 由于 T3 的真空预压阶段排水最多, 因此电渗阶段的电化学反应产生的阳极腐蚀量最少。

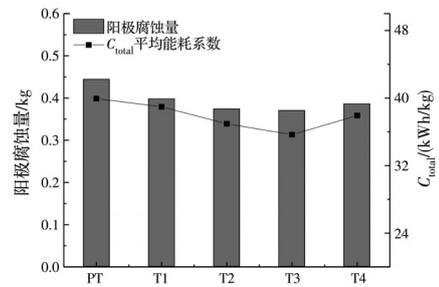


图 8 阳极腐蚀量与平均能耗系数

Fig. 8 The mass and the average energy consumption coefficient of corroded anode

引入平均能耗系数 $C_{total}^{[21]}$ 计算整个试验过程中排出单位质量水所需的能量。

$$C_{total} = \left(Pt/5 + \sum_{t_1}^{t_2} U_t I_t \right) / Q \quad (3)$$

式中: P 为真空泵的功率, kW; t 为试验总时长, h; U_t 为任意时刻的电压值, V; I_t 为任意时刻的电流值, A; Q 为总排水量, kg。

经计算, PT~T4 组的平均能耗系数分别为 39.94、38.96、36.95、35.66、37.93 kWh/kg。通过比较发现, T1~T4 组的平均能耗系数低于 PT, 且

T3的平均能耗系数最低。说明真空预压联合动力压实和电渗法比传统真空预压-电渗法能耗更低,且处理后T3产生的能耗最小。

3 结论

1)与真空预压联合电渗法相比,真空预压联合逐级动力压实和电渗法可使排水板附近淤堵土柱开裂,有效提高排水效率,改善疏浚淤泥的工程性质。孔压消散值、排水量、土表沉降等指标均比传统真空预压联合电渗法更优。因此,对于疏浚淤泥地基,真空预压联合逐级动力压实和电渗法的处理加固效果更显著。

2)该工法将动力压实加入到传统真空预压联合电渗法中,土体固结效果与动力压实的启动时间密切相关。在试验中,当PPRD为70%时启动压实,试验后土体的排水量增大11.99%,土表沉降增大41.11%,在各组试验中效果最好。

3)真空预压联合逐级动力压实和电渗法处理后的阳极腐蚀量较传统工法更少、能耗更低,说明真空预压阶段引入动力压实可以有效缓解阳极腐蚀,减小土体界面电阻,降低能耗。

参考文献

- [1] LI X B, ZHAO R, FU H T, et al. Slurry improvement by vacuum preloading and electro-osmosis [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering, 2019, 172(2): 145-154.
- [2] WANG J, HUANG G, FU H T, et al. Vacuum preloading combined with multiple-flocculant treatment for dredged fill improvement [J]. Engineering Geology, 2019, 259: 105194.
- [3] WANG J, NI J F, CAI Y Q, et al. Combination of vacuum preloading and lime treatment for improvement of dredged fill [J]. Engineering Geology, 2017, 227: 149-158.
- [4] CUI Y L, GAO M J, LIU Z H. Application of a modified vacuum preloading method on a dredged fill soft foundation [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 170-173: 3130-3134.
- [5] TASHIRO M, NGUYEN S H. Evaluation of the improvement effects by vertical drains/vacuum consolidation on peaty ground under embankment loading [J]. Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2016, 2(72): 2478-2483.
- [6] WANG P, HAN Y B, ZHOU Y, et al. Apparent clogging effect in vacuum-induced consolidation of dredged soil with prefabricated vertical drains [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2020, 48(4): 524-531.
- [7] WANG P, HAN Y B, WANG J, et al. Deformation characteristics of soil between prefabricated vertical drains under vacuum preloading [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2019, 47(6): 798-802.
- [8] ASAVADORNDEJA P, GLAWE U. Electrokinetic strengthening of soft clay using the anode depolarization method [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2005, 64(3): 237-245.
- [9] LIU F Y, WEI M, ZHANG L, et al. Experimental study of the electro-osmosis consolidation of soft clay under anode follow-up [C]//Ground Improvement and Geosynthetics. Shanghai, China. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2014.
- [10] 王军, 张乐, 刘飞禹, 等. 真空预压-电渗法联合加固软黏土地基试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(Sup2): 4181-4192.
WANG J, ZHANG L, LIU F Y, et al. Experimental study of vacuum preloading combined reinforcement with electro-osmosis in soft clay ground [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Sup2): 4181-4192. (in Chinese)
- [11] 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.
- [12] 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 Z H, YU X J, GAO M J, 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. (in Chinese)
- [13] 余成华, 李菊凤. 基于袋装砂井排水固结法处理软基的沉降过程流固耦合模拟[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 939-943.
YU C H, LI J F. Fluid-solid coupling simulation of settlement process in soft ground based on drainage consolidation method with sand well [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 939-943. (in Chinese)
- [14] 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 electro-osmosis and dynamic compaction [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(9): 168-179. (in Chinese)
- [15] 周红波, 卢剑华, 蒋建军. 动力排水固结法加固浦东机

- 场促淤地基试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1779-1784.
- ZHOU H B, LU J H, JIANG J J. Test study on reclaimed land of Pudong Airport improved with dynamic and drain consolidation method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(11): 1779-1784. (in Chinese)
- [16] 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.
- [17] 熊巨华, 胡斌, 冯世进, 等. 强夯法加固粉土地基室内模型试验研究[J]. 世界地震工程, 2010, 26(Sup1): 241-246.
- XIONG J H, HU B, FENG S J, et al. Model test study on silt foundation improvement by dynamic compaction [J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(Sup1): 241-246. (in Chinese)
- [18] 王珊珊, 李丽慧, 胡瑞林, 等. 动力排水固结法加固吹填黏性土的模型试验研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(6): 906-912.
- WANG S S, LI L H, HU R L, et al. Research on indoor experimental model for dynamic consolidation of dredged clay [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(6): 906-912. (in Chinese)
- [19] 薛茹, 李广慧. 动力排水固结法加固软土路基的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3242-3248.
- XUE R, LI G H. Study of model tests of soft soil foundation by dynamic drainage consolidation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3242-3248. (in Chinese)
- [20] LIU J Y, FU H T, WANG J, et al. Estimation of influence scope of lateral displacement of soft ground under vacuum pressure with PVD [J]. Advances in Civil Engineering, 2018, 2018: 1-11.
- [21] ESRIG M I. Pore pressures, consolidation, and electrokinetics [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1968, 94(4): 899-921.

(编辑 王秀玲)