

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.06.009

分级加载真空预压加固吹填流泥试验研究

张文彬¹,杨建贵²,彭 劼³,雷秋生¹,刘凌云⁴

- (1.江苏省纺织工业设计研究院有限公司苏州勘察分公司,江苏 苏州 215000;
- 2.南京市水务工程建设管理中心,江苏 南京 210017;
- 3.河海大学土木与交通学院,江苏 南京 210098;
- 4.中交上海三航科学研究院有限公司,上海 200030)

摘要:在分析高黏粒含量吹填土地基经常规真空预压处理后加固效果差、土体强度增长有限原因的基础上,进行分级加载真空预压和常规真空预压现场大型模型试验,探讨分级加载真空预压对流泥固结、变形的影响及其优势。结果表明:吹填流泥处于泥水混合物状态,具有明显的流动性;分级加载真空预压采用初始较小真空荷载且持续较长时间,有利于减缓排水板周围土体过早积聚、固结,给距离排水板较远处土体充分的排水固结时间,有利于改善整个土体的加固效果,且耗电量仅为常规真空预压的60.8%,具有较高的实际应用价值及经济效益。

关键词:真空预压;流泥;初始真空荷载;加载方式;加固效果;耗电量;分级加载;高黏粒含量
中图分类号:TU472.3⁺3 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2019)06-0541-07

Field experimental study on dredger fill flow mud improved by graded loading vacuum preloading method

ZHANG Wenbin¹, YANG Jiangui², PENG Jie³, LEI Qiusheng¹, LIU Lingyun⁴

- (1. Jiangsu Textile Industry Design & Research Institute Co., Ltd. Suzhou Survey Branch, Suzhou 21500, China;
2. Nanjing Water Affairs Engineering Construction Management Center, Nanjing 210017, China;
3. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
4. Shanghai Third Harbor Engineering Science & Technology Research Institute, Shanghai 200030, China)

Abstract: Based on the analysis of reasons for the poor reinforcement effect and the limited strength growth of dredged soil foundation with a high viscosity content after the conventional vacuum preloading, large scale model tests of graded loading vacuum preloading and conventional vacuum preloading are carried out, and the influence and advantage of graded vacuum preloading in the consolidation and deformation of convective clay are discussed. The results show that; the dredged fill mud is in a muddy mixture state with obvious fluidity, and the staged loading vacuum preloading adopts the initial small vacuum load and lasts for a long time. It is beneficial to slow down the prematurely accumulation and consolidation of soil around the drainage plate, and can give the full drainage and consolidation time to soil far from the drainage plate, which is beneficial to the improvement of the whole soil. The power consumption is only 60.8% of the conventional vacuum preloading, thus it has high practical applicability and economic benefits.

Key words: vacuum preloading; flow mud; initial vacuum load; loading mode; reinforcement effect; power consumption; graded load; high content of clay particles

基金项目: 国家自然科学基金(51578214)

作者简介: 张文彬(1987—),男,硕士研究生,主要从事软基处理设计和研究工作。E-mail:wbzhang@163.com

引用本文: 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 Wenbin, YANG Jiangui, PENG Jie, 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.

近年来,随着我国经济和城市建设事业的迅猛发展,现有的陆地资源不断减少,利用港口、航道疏浚淤泥作为吹填材料的吹填造陆工程日益增多,吹填造陆已成为沿海城市开发土地的重要手段。真空预压法由于处理效果好、技术简便、造价低廉,因此在围海造陆工程中应用越来越广泛^[1-4]。然而,目前工程实践表明:吹填土处于泥水混合物状态,具有明显的流动性,真空度一次性设定为 80 kPa,过大的真空吸力在将重力水排出土体的同时,大量黏粒随水迁移至排水板周围,致使部分黏粒被堵塞在滤膜中或被阻塞在滤膜外侧而形成一层泥皮,无法随水流顺利穿透滤膜进入芯体并排出地表,且不断地聚集在排水板周围,造成土体排水不畅,固结速度减慢,过早地出现了严重的“土柱”现象^[5-6];导致该类吹填土地基经真空预压处理后,加固效果差,土体强度增长有限^[7-8]。

基于上述原因,许多学者进行了各种探索性研究,沈宇鹏等^[9]认为增压式真空预压能加速软基排水过程并改良排水板的淤堵;刘松玉等^[10]证明劈裂真空法可提高深部软土的固结效果,加速地基固结,缩短地基处理工期;孙立强等^[11]进行了超软土的真空预压室内模型试验,认为二次插板可以改善土体的加固效果;武亚军等^[12]选择有机高分子絮凝剂 APAM 作为药剂,进行室内药剂真空预压处理废浆的模型试验,探讨处理过程中药剂真空预压法的防淤堵机理;付冠杰等^[13]提出了堆载吹填淤泥并同步真空预压加固技术,将吹填淤泥加固及软土地基加固两阶段施工整合到一个真空预压周期内完成,大幅度缩短了造陆工期;武亚军等^[14]、徐锴等^[15]、闫欢^[16]考虑加载方式的影响开展室内模型试验,建议在流泥淤泥的真空固结过程中采用低初始荷载方式进行加载,但上述室内模型试验装置尺寸均较小,且加载时间较短。本文依托温州某吹填造陆工程,通过现场大型模型试验对比分级加载真空预压和常规真空预压 2 种工艺加固吹填流泥的沉降变形、出水量、孔隙水压力、含水率、十字板抗剪强度及耗电量的变化规律,从机制上探讨了初始真空荷载对流泥固结和变形的影响,并分析了分级加载真空预压的优势。

1 现场模型试验

1.1 试样的制备

试验中所采用的土样取自温州某吹填造陆工程,利用泥浆泵从吹填区抽出泥浆后直接灌入试验池中。从表 1 可知,吹填土黏粒的含量达 50%,粉粒的含量达 47%,表现出高黏粒含量特征。

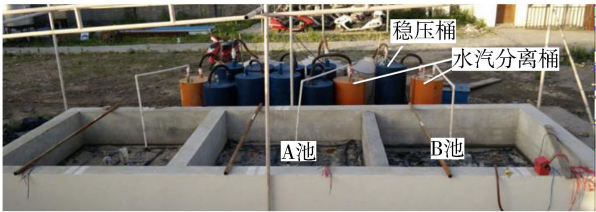
1.2 模型试验装置

模型试验装置如图 1 所示,主要装置包括试验池、排水系统、调压系统和量测系统。试验池由 A 池和 B 池组成;断面尺寸均为 2.4 m×2.4 m,池深 1.9 m,加固吹填流泥初始厚度为 1.8 m;人工插设 A 型排水板,排

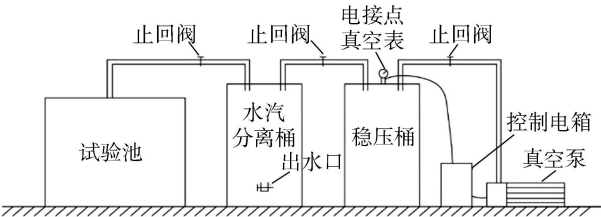
表 1 试样主要物理性质指标

Table 1 Physical properties of the sample

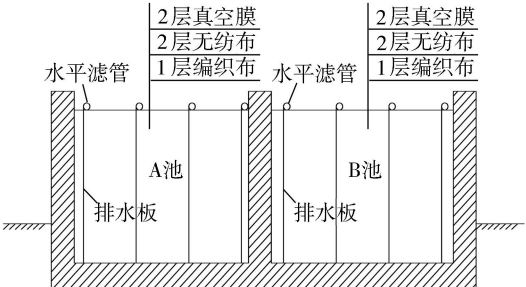
试验池	含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数	颗粒质量分数/%		
					黏粒	粉粒	砂粒
A	175.7	46	25	21	50	47	3
B	176.3	46	25	21	50	47	3



(a) 试验装置



(b) 试验装置示意图



(c) 剖面图

图 1 模型试验装置

Fig.1 Experimental equipment

水板间距 60 cm,正方形布置,插设深度 1.8 m。调压系统由电接点真空表和控制电箱组成,通过设置电接点真空表的上、下阈值(图 2),自动控制真空泵(即当实际真空度达到下限阈值时,泵自动开启;达到上限阈值时,泵自动关闭;本次试验 20 kPa 真空荷载设定的上、下阈值为 25 kPa、15 kPa;40 kPa 真空荷载设定的上、下阈值为 45 kPa、35 kPa),以达到稳定真空度,形成真空梯度的目的。量测系统包括刻度尺、真空表、孔隙水压力计和电子秤,刻度尺用来测量泥面沉降,真空表用来测量膜下真空度,孔隙水压力计用来测量土体内孔隙水压力,电子秤用来测量抽真空过程中的出水量。

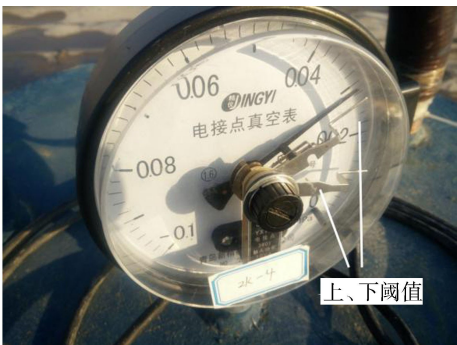


图 2 电接点真空表

Fig. 2 Electric contact vacuum gauge

2 试验成果及分析

2.1 真空度

试验过程中,A 池采用常规真空预压加载方式,在低真空荷载(40 kPa)4 d 后加载至 80 kPa,直到试验结束。B 池采用分级加载(20 kPa—40 kPa—80 kPa)真空预压加载方式,以实测泥面沉降速率连续 5 d 平均沉降量小于或等于 2 mm/d 为下一级真空荷载的加载标准^[17]。

膜下真空度时程曲线及各级真空荷载持续时间分别见图 3 和表 2。根据 JGJ79—2012《建筑地基处理技术规范》^[17]第 5.2.28 条规定:真空预压的膜下真空度应符合设计要求,且预压时间不宜低于 90 d;即常规真空预压需满足满载至少 90 d 的要求。由试验结果可知:A 池、B 池均 108 d 卸载;A 池满载时间 104 d;B 池实际满载时间 32 d,仅为规范要求满载时间的 1/3。

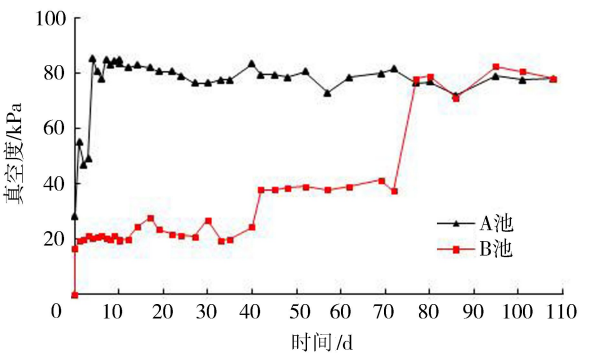


图 3 膜下真空度时程曲线

Fig. 3 Variation of vacuum degree with respect to time

2.2 出水量

试验过程中,通过使用水汽分离桶和电子秤对真空预压过程中的出水量进行测定,A 池、B 池累计出水量和出水速率时程曲线如图 4 所示。由试验结果可知:(a)抽真空初期,尤其是前几天,日均出水量高达 100 L 以上;随着抽真空的进行,出水量迅速衰减,第 50 天后日均出水量降至 20 L 以下。(b)B 池前期真空荷载仅为 20 kPa,其出水量明显小于 A 池;随着真空荷载的提升,其日均出水量明显回升;到了抽真空后期,A 池、B 池的累计出水量逐渐拉近,待 108 d 卸载时,B 池的累计出水量高于 A 池。

表 2 各级真空荷载持续时间

试验池	真空荷载持续时间/d		
	20 kPa	40 kPa	80 kPa
A 池		4	104
B 池	43	33	32

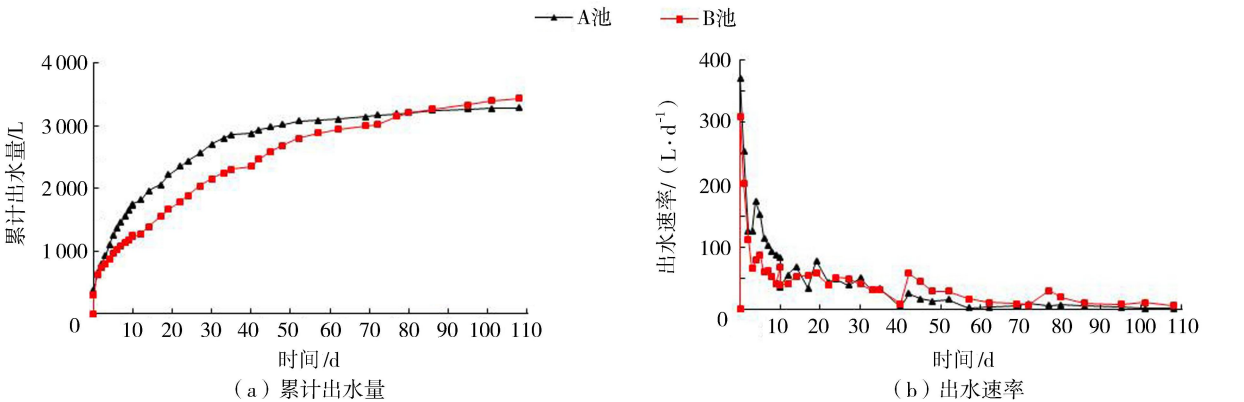


图 4 累计出水量和出水速率时程曲线

Fig. 4 Water drainage amount and water drainage rate with respect to time

2.3 泥面沉降量

试验池沉降测点布置如图 5 所示,泥面沉降时程曲线如图 6 所示。试验结果表明:(a)抽真空初期,各池沉降几乎呈线性变化,前 50 d 累计沉降量占总沉降的 86%,说明土体自由水排出明显。之后沉降发展明显变缓,说明由于“土柱”现象,抽真空后期真空预压对于土体的加固效果已不明显。这一现象与出水量变化规律相一致,并可以相互印证。(b)A 池初始真空度最大,前期泥面沉降明显大于 B 池;到了抽真空中后期,随着 B 池真空荷载的提升,A 池、B 池的泥面沉降逐渐拉近,待 108 d 卸载时, B 池的泥面沉降反而比 A 池多出 12 mm。(c)A 池泥面沉降差异性较大,各测点沉降最大差值达 10 cm;而 B 池各测点沉降时程曲线几乎重合,差异性很小。同时,从试验现场也可以明显看出,A 池一半试验土体明显隆起(CJA-1、CJA-2 处),且土柱部位明显隆起而土柱间土体明显凹陷;而 B 池泥面较平整,且“土柱”现象较之 A 池明显减弱。

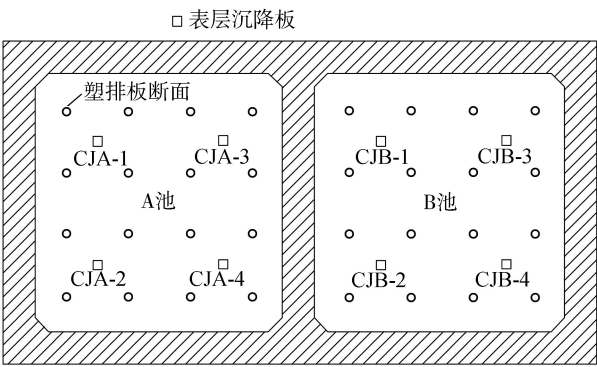


图 5 沉降测点布置
Fig.5 Site plan of settlement points

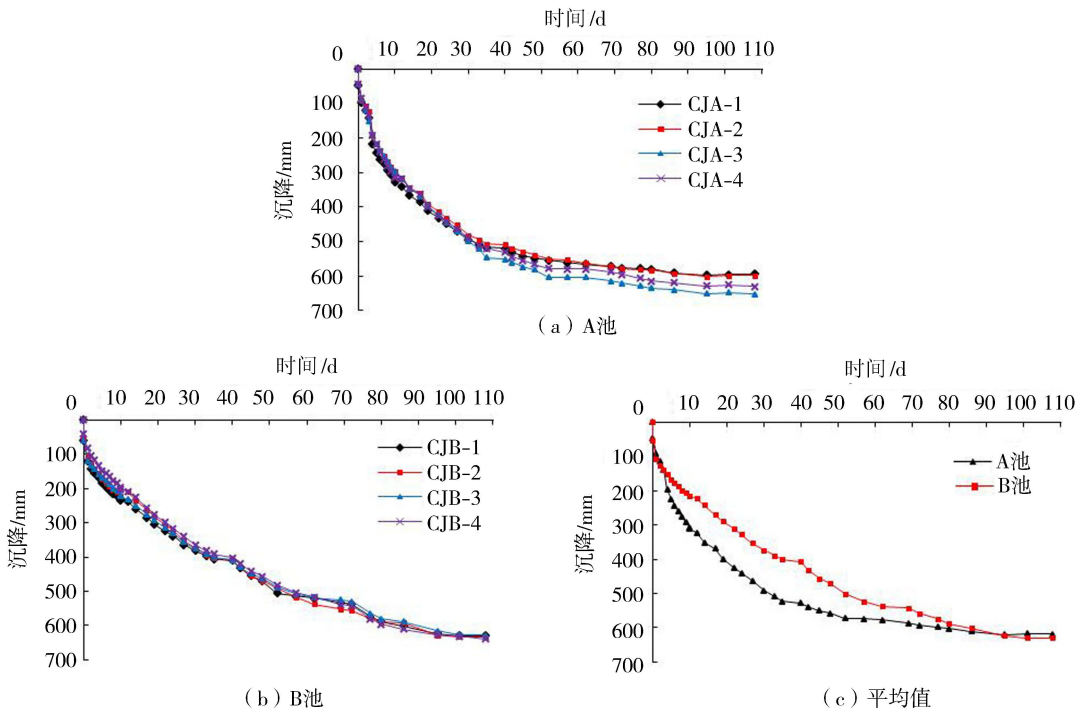


图 6 泥面沉降时程曲线
Fig.6 Variation of surface settlements with respect to time

值得说明的是,各池仅有 4 个测点且放置于 4 根排水板间凹陷处,不能准确代表整个泥面的沉降特点。

2.4 孔隙水压力

采用压入法在吹填流泥中埋设振弦式孔压计,埋设位置均在 4 根排水板间中心位置(即离排水板最远处),深度为泥面下 40 cm 及 100 cm,抽真空期间超静孔隙水压力曲线如图 7 所示。根据有效应力原理,超静孔隙水压力的变化大致能反应土体有效应力的变化情况,即超静孔压变化越大,反映出土体排水固结效果也越好。由试验结果可知:(a)A 池各点超静孔隙水压力差异性较大;而 B 池各点超静孔隙水压力变化几乎重合,差异性较小。表明:由于吹填流泥处于泥水混合物状态,具有明显的流动性,当初始真空荷载较大时,容易造成加固土体的不均匀、不规则变形;且这种不均匀性不仅仅局限于流泥表面(差异沉降),更会引起整个加固区内土体固结的不均匀。这一现象与泥面沉降的变化规律相一致,并可以相互印证。(b)B 池超静孔隙水压力绝对值比 A 池高出 7 kPa,表明采用分级加载真空预压的加固效果要优于常规真空预压。

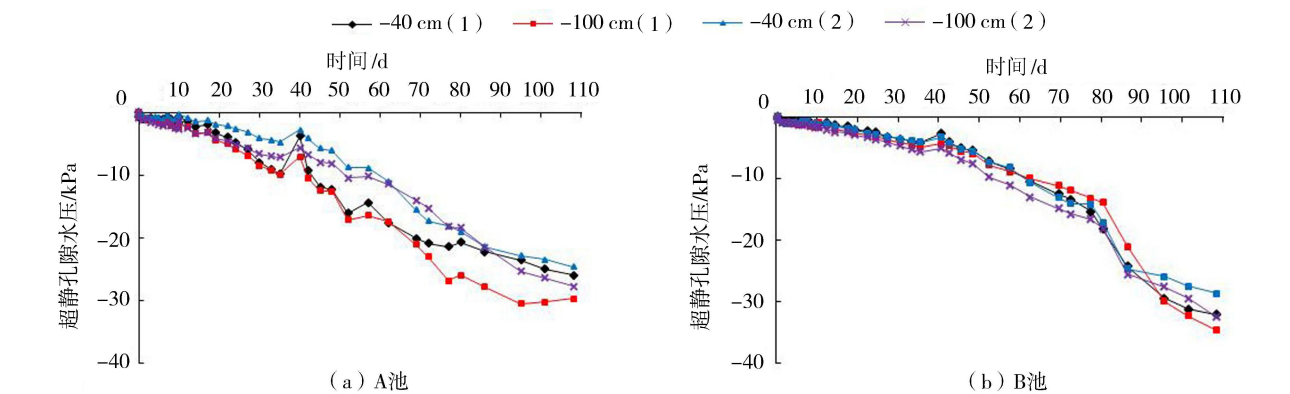


图 7 土体内超静孔压时程曲线

Fig. 7 Variation of excess pore water pressure with respect to time

2.5 含水率

试验结束后试验池土层厚度约为 1.1 m,测试试验池不同位置、不同深度处土体的含水率,取土位置均在 4 根排水板间中心位置,取平均值绘制了含水率沿深度的变化关系曲线见图 8。由试验结果可知:(a) A 池、B 池含水率均呈随深度增加而增大的趋势。(b) B 池含水率低于 A 池,且随着深度的增加,A 池、B 池含水率差值越大。表明:采用分级加载真空预压的加固效果要优于常规真空预压;且深度越大,加固效果越明显。

2.6 十字板抗剪强度

十字板抗剪强度试验检测点均在 4 根排水板间中心位置及 2 根排水板的中点位置,取平均值绘制了十字板抗剪强度沿深度的变化关系曲线如图 9 所示。由试验结果可知:(a) A 池、B 池十字板抗剪强度均呈随深度增加而减小的趋势。(b) B 池 20 cm、50 cm、80 cm 深度处的十字板抗剪强度比 A 池分别高出 22.3%、56.7%、41.4%,表明:采用分级加载真空预压的加固效果要优于常规真空预压;且深度越大,加固效果越明显。

3 分级加载真空预压优势分析

从沉降变形、出水量、孔隙水压力、含水率、十字板抗剪强度数据分析表明:分级加载真空预压加固效果要优于常规真空预压,尤其对于深部土体。为研究产生上述结果的原因,笔者通过直接挖土的方式,测定了泥面下 50 cm 深度处距离排水板不同水平距离的土体含水率(由于真空预压过程中土体的侧向收缩,离排水板最远处的水平距离为 35 cm),如图 10 所示。试验结果表明:(a)在最靠近排水板处,土体含水率仅为 42%;距排水板 15 cm 内的土体含水率增长较快,通过对该段土体进行变水头渗透试验,其渗透系数仅为 $10^{-8} \sim 10^{-7}$ cm/s,排水板相当于被一密封层包裹,形成“土柱”现象;而距排水板 15 ~ 35 cm 范围内,土体含水率变化相对较小,最大含水率为 66.2%。(b)A 池、B 池在距排水板 0 ~ 3 cm 范围内含水率差别不大,表明分级加载真空预压依旧无法避免土柱的形成。在距排水板 3 ~ 35 cm 范围内,A 池含水率均明显高于 B 池,最大差值达 5.3%。这是由于:吹填流泥处于泥水混合物状态,具有明显的流动性,在抽真空过程中,过大的初始真空荷载容易使排水板周围土体过早积聚、固结,形成“土柱”现象,过早阻碍排水板较远处(4 根排水板间中心位置)土体的排水固结,影响土体加固效果;而较低的真空荷载且持续较长时间,减缓了排水板周围土体过早积聚、固结,给距离排水板较远处土体充分的排水固结时间,有利于改善整个土体的加固效果。

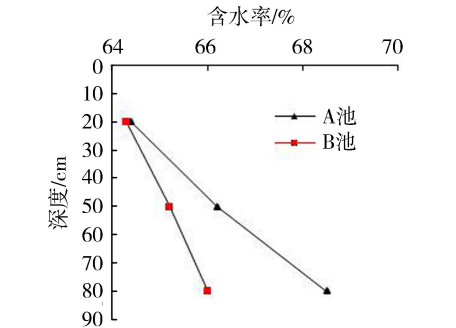


图 8 不同深度的土体含水率

Fig. 8 Water content distribution under different depths

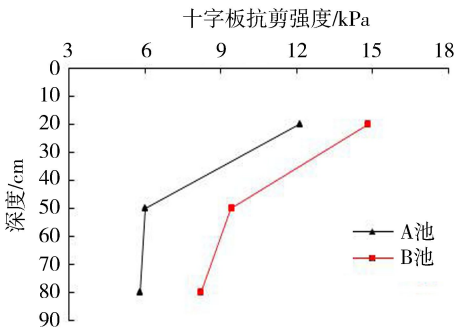


图 9 不同深度的土体十字板抗剪强度

Fig. 9 Vane shear strength distribution under different depths

试验过程中,通过电表对真空预压过程中的耗电量进行测定,A池、B池累计耗电量和日均耗电量时程曲线如图11所示。由试验结果可知:A池在满载80 kPa真空荷载下的日均耗电量为 $47.3\text{ kW}\cdot\text{h}$;B池在20 kPa、40 kPa、80 kPa真空荷载下的日均耗电量分别为 $7.2\text{ kW}\cdot\text{h}$ 、 $18.9\text{ kW}\cdot\text{h}$ 、 $46.1\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。表明:通过电接点真空表控制真空梯度的方式,在20 kPa、40 kPa低真空荷载下,由于达到设计真空度时将自动停泵且停泵时间较长,其耗电量仅为满载时耗电量的15.6%、41.0%。因此,本次试验采用分级加载真空预压的总耗电量仅为常规真空预压的60.8%,具有极高的经济效益。

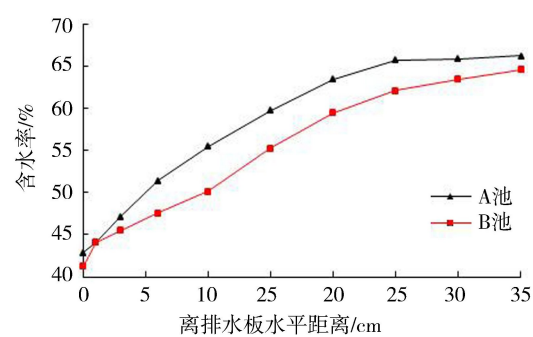
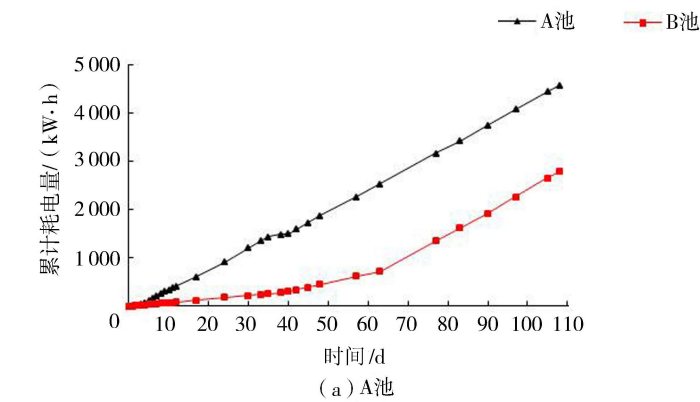


Fig. 10 Soil water content with respect to the horizontal distance from the drain plate

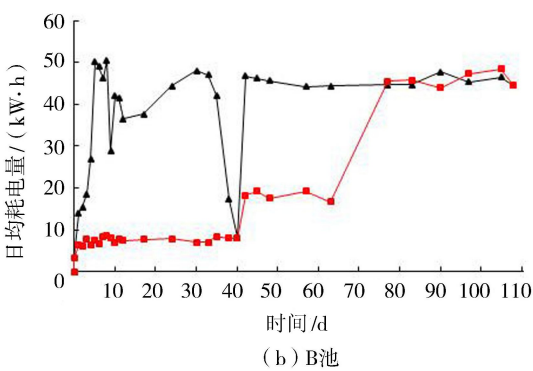


图11 累积耗电量和日均耗电量时程曲线

Fig. 11 Power consumption amount and daily average consumption with respect to time

综上所述,分级加载真空预压初始采用较小真空荷载且持续较长时间,有利于减缓“土柱”现象,改善土体加固效果,尤其对于深部土体,具有较高的实际应用价值。同时,其满载天数仅为规范要求满载天数的1/3,耗电量仅为常规真空预压的60.8%,具有极高的经济效益。

4 结 论

- a. 吹填流泥处于泥水混合物状态,具有明显的流动性;常规真空预压过大的初始真空荷载容易使排水板周围土体过早积聚、固结,形成“土柱”现象,过早阻碍排水板较远处(4根排水板间中心位置)土体的排水固结,影响土体加固效果;而分级加载真空预压初始采用较小真空荷载且持续较长时间,有利于减缓排水板周围土体过早积聚、固结,给距离排水板较远处土体充分的排水固结时间,有利于改善整个土体的加固效果,尤其对于深部土体,具有较高的实际应用价值。
- b. 分级加载真空预压满载天数32 d,仅为规范要求满载天数的1/3,耗电量仅为常规真空预压的60.8%,具有较高的经济效益。

参考文献:

[1] 唐彤芝,董江平,黄家青,等.薄砂层长短板结合真空预压法处理吹填淤泥土试验研究[J].岩土工程学报,2012,34(5):899-905. (TANG Tongzhi,DONG Jiangping,HUANG Jiaqing,et al. Experimental research on hydraulic filled mud consolidated by vacuum preloading method combining long and short boards with thin sand cushions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2012,34(5):899-905. (in Chinese))

[2] 王海建,杨建贵,彭劼,等.无砂垫层真空预压联合水袋堆载法加固超软地基应用研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2018,37(1):66-71. (WANG Haijian,YANG Jianguai,PENG Jie,et al. Improvement of ultra soft soil by vacuum preloading combined with water bag method of sand free cushion[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science),2018,37(1):66-71. (in Chinese))

- [3] 娄炎,何宁.地基处理监测技术[M].北京:中国建筑出版社,2015.
- [4] 吴跃东,吴鸿昇,罗如平,等.考虑真空度衰减及涂抹区渗透系数变化的真空预压固结解析解[J].河海大学学报(自然科学版),2016,44(2):122-128. (WU Yuedong, WU Hongsheng, LUO Ruping, et al. Analytical solutions for vacuum preloading consolidation considering vacuum degree attenuation and change of permeability coefficient in smear zones[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciencess), 2016, 44(2):122-128. (in Chinese))
- [5] 鲍树峰,董志良,娄炎,等.高黏粒含量新近吹填淤泥加固新技术室内研发Ⅱ[J].浙江大学学报(工学版),2015,49(9):1707-1715. (BAO Shufeng, DONG Zhiliang, LOU Yan, et al. Laboratory research on new improvement technology of newly hydraulic reclamation mud with high clay content Ⅱ[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(9):1707-1715. (in Chinese))
- [6] 鲍树峰,娄炎,董志良,等.新近吹填淤泥地基真空固结失效原因分析及对策[J].岩土工程学报,2014,36(7):1350-1359. (BAO Shufeng, LOU Yan, DONG Zhiliang, et al. Causes and countermeasures for vacuum consolidation failure of newly-dredged mud foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(7):1350-1359. (in Chinese))
- [7] 叶国良,郭述军,朱耀庭.超软土的工程性质分析[J].中国港湾建设,2010(5):1-9. (YE Guoliang, GUO Shujun, ZHU Yaoting. Analysis on engineering property of ultra soft soil[J]. China Harbour Engineering, 2010(5):1-9. (in Chinese))
- [8] 董志良,张功新,周琦,等.天津滨海新区吹填造陆超软土浅层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 Zhiliang, ZHANG Gongxin, ZHOU Qi, et al. Research and application of improvement technology of shallow ultra-soft soil formed by dredged in tianjin binhai new area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(5):1073-1080. (in Chinese))
- [9] 沈宇鹏,冯瑞玲,余江,等.增压式真空预压处理软基的加固机理[J].吉林大学学报(地球科学版),2012,42(3):792-797. (SHEN Yupeng, FENG Ruiling, YU Jiang, et al. Reinforcement of vacuum preloading with air pressure boosted for soft ground treatment[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(3):792-797. (in Chinese))
- [10] 刘松玉,韩文君,章定文,等.劈裂真空法加固软土地基试验研究[J].岩土工程学报,2012,34(4):591-599. (LIU Songyu, HAN Wenjun, ZHANG Dingwen, et al. Field pilot tests on combined method of vacuum preloading and pneumatic fracturing for soft ground improvement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(4):591-599. (in Chinese))
- [11] 孙立强,闫澍旺,李伟,等.超软土真空预压室内模型试验研究[J].岩土力学,2011,32(4):984-990. (SUN Liqiang, YAN Shuwang, LI Wei, et al. Study of super-soft soil vacuum preloading model test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4):984-990. (in Chinese))
- [12] 武亚军,牛坤,陆逸天,等.工程废浆处理过程中药剂真空预压法的防淤堵机理[J].土木工程学报,2017,50(6):95-103. (WU Yajun, NIU Kun, LU Yitian, et al. Anti-clogging mechanism of vacuum preloading with flocculation in treating construction waste slurry[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(6):95-103. (in Chinese))
- [13] 付冠杰,范明桥,李杰,等.软土地基堆载吹填淤泥并同步真空预压加固技术[J].水利水电科技进展,2014,34(6):82-88. (FU Guanjie, FAN Mingqiao, LI Jie, et al. A synchronous vacuum preloading technique for treating soft ground and its overlying hydraulic surcharge fills[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(6):82-88. (in Chinese))
- [14] 武亚军,杨建波,张孟喜.真空加载方式对吹填流泥加固效果及土颗粒移动的影响研究[J].岩土力学,2013,34(8):2129-2135. (WU Yajun, YANG Jianbo, ZHANG Mengxi. Study of impact of vacuum loading mode on dredger fill flow mud consolidation effect and soil particles moving[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8):2129-2135. (in Chinese))
- [15] 徐锴,林生法,耿之周,等.真空加载方式对排水板滤膜淤堵影响试验研究[J].岩土工程学报,2016,38(增刊2):123-129. (XU Kai, LIN Shengfa, GENG Zhizhou, et al. Experimental study on effects of vacuum loading modes on clogging of drainage board filtration membranes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(Sup2):123-129. (in Chinese))
- [16] 闫欢.分级真空预压法加固吹填土物质、结构变化时效特性及沉降预测分析[D].长春:吉林大学,2015.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑地基处理技术规范:JGJ 79—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.

(收稿日期:2018-07-15 编辑:张志琴)