

网状排水体负压下处理围堰袋装淤泥试验研究

吴跃东^{1,2}, 顾建玲^{1,2}, 郭旺旺^{1,2}, 许伟³

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098; 3. 中铁二十四局集团上海铁建工程有限公司, 上海 200070)

摘要: 针对软土处理过程中竖向排水板弯折严重等问题, 提出将絮凝剂技术与水平网状排水体联合真空预压处理袋装淤泥相结合的方法。测试了直排式排水体和新型水平网状式排水体处理后的淤泥的含水率、无侧限抗压强度和抗剪强度, 并对絮凝剂的添加量对固结效果的影响进行了对比研究。试验结果表明: 新型水平网状式排水体相比直排式排水体, 可更有效提高土体的渗透性; 添加0.3%的絮凝剂是提高固结效果的最佳配比; 最终验证了新型水平网状排水体联合真空预压处理袋装淤泥围堰施工工艺的可行性和有效性。

关键词: 水平网状排水体; 真空预压; 膜袋围堰; 絮凝剂

中图分类号: TV92

文献标识码: A

Experimental Study on Treatment of Cofferdam Bagged Silt with Reticulated Drainage under Vacuum Preloading Condition

WU Yuedong^{1,2}, GU Jianling^{1,2}, GUO Wangwang^{1,2}, XU Wei³

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China, 3. Shanghai Railway Construction Engineering Co., Ltd. of China Railway 24th Bureau Group, Shanghai, 200070)

Abstract: Considering the serious bending of the vertical drainage plate in the soft soil treatment process, a method of combining flocculant technique with horizontal mesh drainage combination with vacuum pre-pressure treatment of bagged sludge was proposed. The water content, unconfined compressive strength and shear strength of the sludge treated by the straight drainage body and the new horizontal mesh drainage body were tested, and the influence of the added amount of flocculant on the consolidation effect was compared. The test results show that the new horizontal mesh drainage can effectively improve the permeability of the soil compared to the straight drainage. The addition of 0.3% flocculant is the best ratio to improve the consolidation effect. The feasibility and effectiveness were verified of the cofferdam construction technology of the new horizontal mesh drainage combination with vacuum pre-pressure treatment of bagged sludge.

Key words: horizontal mesh drainage; vacuum preloading; bag cofferdam; flocculant

随着围海造陆技术的发展^[1], 我国基建对土地资源的需求日益增加。目前广泛运用的围堰工程技术——膜袋砂围堰^[2]采用土工编织袋作为包裹体, 充填料为渗透性较大的砂土, 能较好地增强地基围堰整体的整体性和安全系数^[3]。但是随着砂土资源紧张、价格上涨, 必须尽快寻找出代替砂土的充填料。另一方面, 城市海湖清淤等工程产生

大量的疏浚淤泥, 当前处理的方法十分不经济、不环保。若将淤泥灌入膜袋再利用为围堰膜袋充填料, 这样既可以缓解砂土资源紧缺的问题, 又可以实现淤泥“变废为宝”。本文采用最常用的直排式排水体, 同时考虑到竖向排水板弯折严重问题, 提出一种新型水平网状式排水体联合真空预压处理膜袋淤泥的施工工艺, 通过室内试验分析两种排

收稿日期: 2020-12-06

基金项目: 国家青年科学基金资助项目(51608152)

作者简介: 吴跃东(1969-), 男, 福建云霄人, 博士, 教授, 主要从事软土地基处理和基础工程研究。

水体的处理效果。考虑到淤泥具有黏性高、渗透性差等工程性质,将絮凝技术^[4-5]引入此工艺中,分析絮凝剂的添加对两种排水体联合真空预压处理膜袋淤泥的固结效果,最终证明了该工艺的可行性和有效性。

1 试验材料及方案

1.1 排水体的构造及工作机理

目前处理软土地基最常用的是直排式真空预压法^[6],它是将排水板与滤管进行绑扎连接形成水平排水通道,继而将滤管与集水管连接,集水管再与真空泵连接,如图 1(a)所示。本文对照试验的另一种方法是改进真空预压法^[7],它是通过密封接头将排水板直接与排气排水管连接,排气排水管再与真空泵连接,如图 1(b)所示。将这两种方法引入处理膜袋淤泥中,随着固结的进行,膜袋最终会趋于扁平,横截面类似于扁平的长方形,并考虑到水平排水板相较于竖向排水板在处理软土时能有效改善板材出现弯折的问题^[8],于是在膜袋中将排水板布置为平行于横截面。

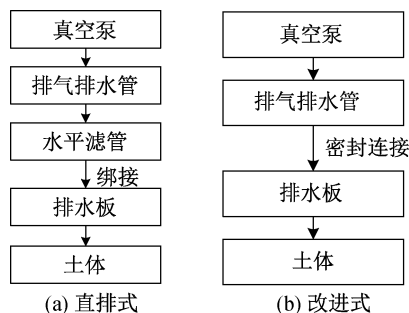
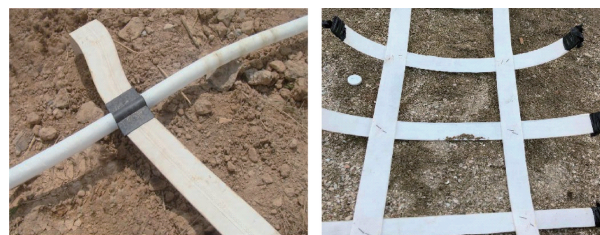


图 1 真空预压法

Fig. 1 Vacuum preloading method

本文将真空预压处理膜袋淤泥中排水体分成两种:第一种(以下简称普通直排式)基于直排式真空预压法,试验布置如图 2(a)所示;第二种(以下简称新型网状式)基于改进真空预压法,考虑到随着固结的进行,排水板存在错位、弯折等现象,因此为了更好地固定排水板位置、保持原有形状,将其预制为纵横交错的网状型,试验布置如图 2(b)所示。

在普通直排式排水体中,排水板材料选用传统的 SPB-B 普通型排水板,其具有凹凸结构,凹面不透水,凸面透水,芯板和滤膜分开;在新型网状式排水体中,排水板材料选用 SPB-B 新型整体式排水板,滤膜采用亲水性材料,容易降解,避免地基污染,且无凹凸结构,可根据试验效果调节孔



(a) 普通直排式

(b) 新型网状式

图 2 试验布置

Fig. 2 Test arrangement

径,大大提高了透水性能,可有效防止淤堵,其滤膜与芯材轧在一起,提高排水板强度,防止滤膜破损,有利于提高真空度传递能力,降低了真空荷载的沿程损失,进而增加了土体有效应力,对土体起到固结作用。

1.2 吹填淤泥土基本性质

本文试验吹填淤泥土取自福建莆田石门澳真空预压处理软基现场。在泵入膜袋内之前,在淤泥搅拌池经搅拌装置将其均匀搅拌,通过室内相关试验最终测定结果如表 1 所示。

表 1 福建莆田吹填淤泥土基本物理性质指标

Tab. 1 Basic physical properties of dredging silt in Putian, Fujian

指标名称	指标值
含水率 $\omega/\%$	181
密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.3
土粒比重 G_s	2.61
压缩模量 E_s/MPa	3
饱和度 $S_r/\%$	99.2
液限 $\omega_L/\%$	46.5
塑限 $\omega_p/\%$	25

1.3 絮凝剂

本试验选用产自河南巩义市的絮凝剂聚合氯化铝 PAC。絮凝剂是一种高分子聚合物,被广泛应用于水处理工程中^[7],絮凝剂主要有两个作用:第一,使悬浮的微小粒径颗粒抱团形成絮团;第二,增大大粒径颗粒絮团间的孔隙,渗透系数也得以提升,改善了排水板及滤管周围存在的絮团问题。目前阳离子无机高分子絮凝剂聚合氯化铝^[9](PAC)是最常用的净水剂,它的优点在于易溶于水,有很强的吸附能力,并有很大的比表面积,在水解过程中伴随发生电化学、凝聚、吸附和沉淀等一系列物理化学反应,因此能将水中的许多负电荷颗粒从水中沉淀出来,从而起到净化作用,具有一定的环保效益。PAC 处理后水的 pH 值变小,铝

与盐分残留量小,利于回用;并且其原材料生产成本低,絮凝速度快,比传统低分子絮凝剂用量少。

2 施工工艺设计及试验方案

2.1 水平网状排水体围堰工艺流程

本文设计了一种新型水平网状排水体联合真空预压处理袋装淤泥围堰工艺,具体包括以下步骤:

(1)根据放样,在地基表面铺设若干数量的防渗土工膜袋,中间采用复合密封膜,土工膜袋上部需要至少2个袖口,袖口直径不小于15 cm。

(2)将塑料排水板横纵交叉预制成网状型,排水板数量及尺寸均可根据膜袋尺寸、施工工期等要求具体而定,网状塑料排水板可用连接绳使其悬置于膜袋中间高度,使膜袋内各处淤泥固结均匀。

(3)通过混合器设备将吹填淤泥和絮凝剂溶液同时泵入膜袋内,可从多个袖口沿不同方向同时泵入,在进行抽真空前,应絮凝若干小时待淤泥黏性降低,这样不易产生淤堵。

(4)待网状排水板与无孔真空滤管通过密封连接装置连接、所有袖口均绑扎密封后,开启真空泵逐渐将膜袋内淤泥水分排出,膜袋内淤泥固结完成80%左右,便可进行第二次复充,若没有达到相应的固结度,则继续真空排水。

(5)经若干次复充、排水固结后,量测袋内固化土是否满足充填厚度要求,若不满足,则继续复充、排水固结,若满足膜袋内充填土厚度要求,则进行下一个土工膜袋的充填、固结。

(6)各土工膜袋充填料满足固结度和充填厚度要求后,在填筑时将上层膜袋填筑在下层的缝隙中间,袋与袋之间错峰排列并相互嵌固,直到膜袋高度达到围堰设计标高,形成膜袋围堰主体结构。

2.2 室内试验方案

本次试验所研究的变量为排水体类别和絮凝剂PAC的掺量(以试验用的吹填淤泥的量为百分比进行掺加)。如表2所示,共开展7组对比试验,其中包括3组普通直排式和4组新型网状式(其中1组不加絮凝剂作为空白对照组)。上述7组对比试验中所用的淤泥,是上述现场取样的静置2 d后的吹填淤泥土,其静置后的含水率为70%,体积均为1 000 L,同时填充的膜袋规格均相同:长为20 dm、宽为10 dm、高为5 dm,真空排水

固结时间均为7 d。

表2 真空预压处理袋装淤泥试验方案

Tab. 2 Experimental scheme for vacuum preloading treatment of bagged silt

编号	吹填淤泥量/L	排水体	絮凝剂掺量	排水固结时间/d
1	1 000	普通直排式	0.1%	7
2	1 000	普通直排式	0.2%	7
3	1 000	普通直排式	0.3%	7
4	1 000	新型网状式	0.0%	7
5	1 000	新型网状式	0.1%	7
6	1 000	新型网状式	0.2%	7
7	1 000	新型网状式	0.3%	7

3 试验结果及分析

基于上述试验方案,通过两种排水体和不同絮凝剂PAC掺量联合真空预压处理袋装淤泥后,其含水率、抗压强度和抗剪强度均会有不同程度的变化。本文通过含水率试验、无侧限抗压强度试验、直接剪切试验来反映两种排水体和不同絮凝剂PAC掺量对真空预压处理袋内淤泥的加固效果。

3.1 含水率试验

在利用真空预压处理袋装淤泥时,淤泥的固结本质上是随着吹填淤泥的孔隙水排出,超孔隙水压力消散,从而有效应力增加,淤泥强度便随之提高,达到了加固的目的。因此对于同一初始含水率的淤泥试样,通过测定真空预压处理后的淤泥含水率可反映固结过程中排出的水量,从而反映出淤泥加固的效果。

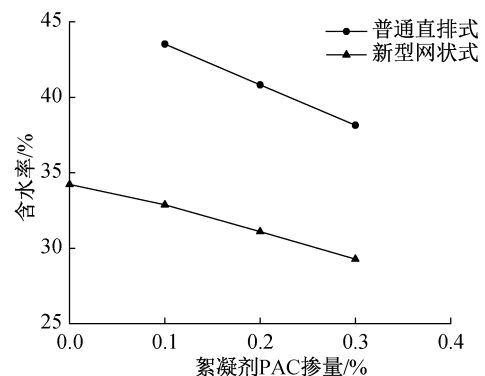


图3 淤泥固结后含水率与PAC掺量的关系

Fig. 3 Relationship between water content and PAC content of silt after consolidation

由图3可知:两种排水体固结后的淤泥含水率

随着絮凝剂的添加都下降了 15% 左右(下降比例基准值是最少掺量,普通直排式为 0.1%,新型网状式为 0.0%,下同)。原因是絮凝剂的添加增大了大粒径颗粒絮团间的孔隙,降低了淤泥的黏性使渗透系数得以提升,促使土体孔隙水压力的消散,在一定时间内孔隙水排出量更多,使得真空预压处理袋内淤泥效果更佳。

比较相同絮凝剂添加量情况下的淤泥固结后的含水率,新型网状式相比于普通直排式淤泥固结后含水率均减少了 24% 左右,即新型网状式加固膜袋淤泥的效果要优于普通直排式排水体。原因是新型整体式排水板相比普通型排水板渗透系数更大,防淤堵效果好,能更好克服渗流阻力和排水困难。

3.2 无侧限抗压强度试验

淤泥经过固结处理后,通常剪切破坏发生时土体变形极小,因此试验中通常采用无侧限抗压强度作为评定淤泥固结效果的指标^[10],因此通过测定真空预压处理后的淤泥的无侧限抗压强度可反映加固的效果。

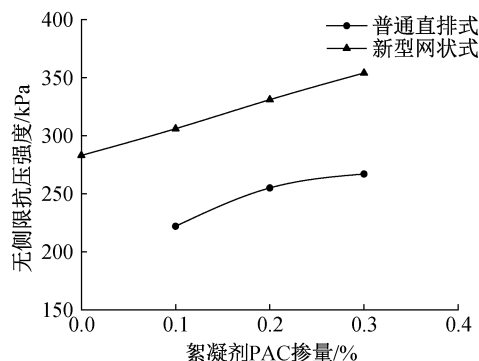


图4 淤泥固结后抗压强度与 PAC 掺量的关系

Fig. 4 Relationship between compressive strength and PAC content of silt after consolidation

由图4可知:两种排水体固结后的淤泥无侧限抗压强度随着絮凝剂的添加都有不同程度的提高:普通直排式约为 20%,新型网状式约为 25%。这说明淤泥中掺絮凝剂有利于真空预压过程中孔隙水的排出,并在一定范围内随着絮凝剂的掺量增加效果更佳。原因是絮凝剂的加入使其内部的极性基团能与淤泥胶质微粒发生化学反应,凝聚形成大颗粒絮团^[11],改善土体的渗透性,使得滤管和排水板的淤堵状况大大改善,真空度在土体与排水体的传递效率提高,膜袋土体得到了有效加固。

比较相同絮凝剂添加量情况下的淤泥固结后的无侧限抗压强度,新型网状式比普通直排式固

结后的强度提高了约 32%。原因是新型网状式缩短了真空传递路径,有效改善真空度在路径传递中的损失,普通直排式真空能量大部分集中在滤管中,而新型网状式真空能量可直接传递至排水板中,且能有效改善普通直排式中排水板与滤管发生的淤堵问题,使得膜袋土体加固效果更佳。

3.3 直接剪切试验

由库仑定律可知,土的抗剪强度公式为 $\tau = c + \sigma \tan \varphi$,土的抗剪强度指标黏聚力 c 和内摩擦角 φ 对工程活动具有重要意义。絮凝材料能与土体发生一系列物理化学作用,改变土颗粒表面电化性质等方式,继而影响其颗粒级配及渗透性,从而影响抗剪强度指标。本文通过直接剪切试验来绘制出抗剪强度线如图5和图6所示,直线的倾角即为所求土的内摩擦角 φ ,直线与坐标纵轴的截距即为土的黏聚力 c 。

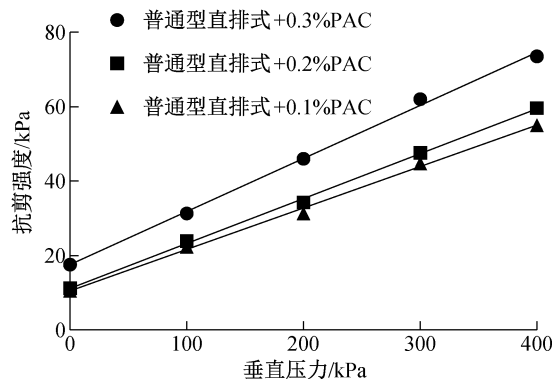


图5 固结淤泥抗剪强度与 PAC 掺量关系(普通直排式)

Fig. 5 Relationship between shear strength and PAC content of consolidated silt (straight-line)

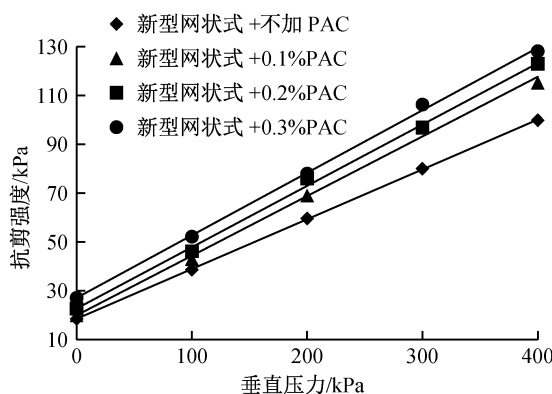


图6 固结淤泥抗剪强度与 PAC 掺量关系(新型网状式)

Fig. 6 Relationship between shear strength and PAC content of consolidated silt (new mesh-type)

由表3可知:两种排水体固结后的淤泥抗剪强度随着絮凝剂的添加而不断上升:普通直排式中

表 3 淤泥固结后抗剪强度指标 c 、 φ 值

Tab. 3 Shear strength index c and φ of silt after consolidation

编号	1	2	3	4	5	6	7
絮凝剂掺量	0.1%	0.2%	0.3%	0.0%	0.1%	0.2%	0.3%
内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	6.36	6.88	8.12	11.54	13.74	14.11	14.38
增加比例/%	—	8.2	27.7	—	19.1	22.3	24.6
黏聚力 c/kPa	10.5	11.18	17.55	18.49	19.9	22.69	27.08
增加比例/%	—	6.5	67.1	—	7.6	22.7	46.5

注:编号 1—3 号为普通直排式,4—7 为新型网状式。

内摩擦角增加了 27.7%、黏聚力增加了 67.1%;新型网状式中内摩擦角增加了 24.6%、黏聚力增加了 46.5%。这说明淤泥中掺入絮凝剂主要提高了土颗粒间的静电力、胶结作用等,而对土颗粒间的摩擦作用影响较小。原因是加入高分子类絮凝剂,其内部的极性基团能与淤泥胶质微粒发生化学反应,中和微粒表面的电荷,提高了土颗粒间的静电力与胶结作用。

比较 0.3% 絮凝剂掺量条件下,新型网状式相比于普通直排式淤泥固结后抗剪强度峰值黏聚力增长了 54.30%,内摩擦角相差不大,说明在真空预压处理膜袋内淤泥工艺中,新型网状式排水体能更有效地改善排水板和滤管的淤堵问题,使真空能量在传递过程中得到有效保证,使得膜袋土体孔隙水快速排出,土体得到了有效加固。

4 结论

1) 基于直排式真空预压法(普通直排式),和基于改进真空预压法(新型网状式)两种排水体联合真空预压处理膜袋淤泥对比试验可知,新型网状式相比于普通直排式排水体处理效果更佳,原因是新型网状式能更有效地改善排水的淤堵问题,减少真空度在传递过程的损失,加快土体孔隙水的排出。

2) 絮凝剂的添加可有效降低淤泥的黏性,提升淤泥的渗透性,使得真空预压处理袋装淤泥效果更佳。在 0.0%~0.3% 的添加范围内,随着絮凝剂 PAC 掺量的增加而效果更佳,不仅含水率明显下降,且无侧限抗压强度和直剪强度均得到了提高。

3) 经分析得到本次试验最佳组合为:合理密度的预制网状新型整体式水平排水板直接与排气排水管连接(新型网状式排水体)和淤泥固体颗粒含量 0.3% 的絮凝剂 PAC 掺量。

参考文献:

[1] 董志良,刘嘉,朱幸科,等. 大面积围海造陆围堰工程关键技术研究及应用[J]. 水运工程,2013(05):168-175.

[2] 吴广亮,李健. 浅谈膜袋砂围堰的施工[J]. 广东水利水电,2019(04):68-71+75.

[3] 蔡丛海. 膜袋砂围堰施工技术在沿海淤泥地质中的应用[J]. 陕西水利,2020(06):191-193.

[4] 赵森,曾芳金,王军,等. 絮凝-真空预压加固吹填淤泥试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(06):1291-1296.

[5] 武亚军,陆逸天,牛坤,等. 药剂真空预压法处理工程废浆试验[J]. 岩土工程学报,2016,38(08):1365-1373.

[6] 夏玉斌,陈允进. 直排式真空预压法加固软土地基的试验与研究[J]. 工程地质学报,2010,18(03):376-384.

[7] 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(06):1257-1268.

[8] ZHOU Yuhao, ZHENG Huaili, WANG Yili, et al. Enhanced Municipal Sludge Dewaterability Using an Amphiphilic Microblocked Cationic Polyacrylamide Synthesized through ULTRASONIC-INITIATION: Copolymerization and Flocculation Mechanisms[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects,2020,594.

[9] 武林香. 聚合氯化铝的絮凝作用在污水处理中的应用[J]. 山西化工,2019,39(03):218-219+222.

[10] 王臻华,吴雪婷,项伟,等. 高铁酸钾预处理对水泥固化淤泥强度的影响[J]. 长江科学院院报,2019,36(08):131-135.

[11] NASSER M S, JAMES A E. The Effect of Polyacrylamide Charge Density and Molecular Weight on the Flocculation and Sedimentation Behavior of Kaolinite Suspensions[J]. Separation & Purification Technology, 2006,52(2):241-25.

(责任编辑 王利君)