

· 地基与基础 ·

基于泥沙流变学原理的脉动真空预压技术



祝文龙, 喻国良

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: 在疏浚吹填施工中, 如何快速降低吹填土的含水率是吹填区软基处理的一项关键工作。为进一步提高排水效率, 开展了基于泥沙流变学原理的脉动真空预压排水技术研究。通过大量室内小尺度单板排水模型试验, 阐释了脉动作用对促进淤泥质软基脱水的作用机理, 分析了脉动真空预压法的排水效果, 提出了淤泥质软基处理新方法。试验结果表明此方法优于现行常用的真空预压排水法, 有效提高了排水效率, 可减轻排水板通道的淤积堵塞问题。

关键词: 软基处理; 泥沙流变; 脉动真空预压; 排水效率; 含水率变化

中图分类号: TV 223.5; U 616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)08-0139-06

Pulsating vacuum preloading technology based on the principle of silt rheology

ZHU Wen-long, YU Guo-liang

(School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: During the construction of dredging and hydraulic reclamation, how to reduce the water content of reclaimed soil rapidly is the key point when dealing with the soft foundation in reclaimed area. In order to further improve the drainage efficiency, the study on pulsating vacuum preloading drainage technology was carried out based on the silt rheology theory. By conducting a large number of small-scale single plate water draining model tests inside the room, this paper analyzed the drainage effect with the pulsating vacuum preloading method, and proposed a new method for soft foundation treatment. Experimental results show that this method is superior to the present vacuum preloading drainage method which is commonly used, and it improves the drainage efficiency and reduces the silting and blocking problems in drainage channel.

Keywords: soft foundation treatment; silt rheology; pulsating vacuum preloading; drainage efficiency; change of water content

近年来我国开展了许多将疏浚泥用于吹填造陆或路基回填的工程实践, 在疏浚吹填施工中疏浚泥初始含水率很高, 如何快速降低吹填淤泥的含水率是吹填区地基处理的一项关键工作。传统的淤泥干化是底泥在堆场完全依赖自然条件的被动干化(即自然干化法), 疏浚泥浆通过泥浆泵被送入底泥堆场, 在自然状态下的泥水分离, 主要是通过日照蒸发、风干、自然下渗等途径。由于淤泥含水率高, 在自然条件下难以快速脱水^[1-2], 被动干化过程效率低、历时长(需要5~10 a甚至更长时间), 如遇降水等天气因素影响, 尤其是对

于细颗粒为主要成份的粉质黏土, 将会大大延长其干化周期, 不利于土地的及时开发使用及后续的处理和资源化利用, 因此寻求高效的淤泥脱水干化方法成为一种必然。

国内外的一些学者研究了诸多淤泥脱水方法, 例如添加絮凝剂、固化剂等化学方法^[3-4], 带式压滤、离心脱水、分级压榨等机械方法^[5-6], 干化脱水、电渗、超声波等工程物理方法^[7-8], 都有所收获。目前工程中主要采用真空预压直排水技术^[9-12], 近几年在温州、台州、深圳和天津等地都开展了大规模的无砂垫层真空直排预压加固地基

收稿日期: 2016-03-14

作者简介: 祝文龙(1991—), 男, 硕士, 从事填海造陆及疏浚泥处理中的泥水分离技术研究。

的工程实践,发现了一些问题,如:真空传递效果时有不佳、排水板易堵塞等,这势必导致排水效率的降低。诸多学者都把研究重点转向了排水通道淤堵机理及解决办法以便进一步提高泥水分离效率,以及新型排水工艺创新等方面^[13-16]。

1 基本原理

1.1 真空度传递及排水过程分析

真空泵抽真空形成真空度,在膜下通过垂直排水通道逐渐向下延伸,同时真空度又由垂直排水通道向其四周的土体传递与扩散,引起土中孔隙水压力降低,形成负的超静孔隙水压力,从而使土体孔隙中的气和水由土体向垂直排水通道发生渗流,最后经垂直排水通道被泵抽出^[17-18]。因此,排水初期以自由水排出为主,土体排水量大、排水速率快、沉降量小,且较高的自由水含量及较大的孔隙水压力使得真空度的传递损失较大;随着水、气的抽出及时间的持续,土体骨架开始承受真空压力并逐渐达到最大,此后进入渗流排水阶段,此阶段排水固定通道逐渐形成并稳定,在真空荷载一定的情况下渗流脱水速率会相对稳定且其值相对较小,随着抽气时间的增加,由于排水板周边局部土壤发生固结,排水通道产生淤堵现象,土体中的阻力增大,真空度的传递能力有所下降,真空能量损失也有所增加,排水速率缓慢,不利于排水过程的持续进行^[13-14]。根据以上过程分析,许多学者将真空预压排水过程大体上分为3个阶段:快速排水阶段、稳定排水阶段、缓慢排水阶段^[19]。

1.2 排水通道淤堵原因分析

目前学术及工程界对于排水通道的淤堵原因尚没有统一明确的结论,但讨论较多的原因之一为絮凝作用的影响。高含水率疏浚泥的真空预压排水过程中,抽真空作用下较细泥沙颗粒会随着水体迁移到排水板附近,并不断与其他颗粒发生碰撞粘结,形成絮团,而絮团中间有很大的孔隙,包围密封了大量水分难以排出;随着絮团的进一步发展,各絮团之间链团成网最终发展成为蜂窝

状结构的絮网结构,包裹在排水板表面;絮网层数增多变密,最终导致排水通道堵塞,甚至在排水板周围 20 cm 范围形成土柱^[20]。

1.3 脉动剪切原理

由于淤泥具有流变特性,泥体在受到震动、搅动、紊动等引起的剪切应力作用下会发生流变变稀,使得淤泥中的水在表面析出汇聚,同时土颗粒发生位移沉降,加强泥体密实度。故设想在真空预压排水系统中接入一个高频脉动源,排水过程中令其保持工作,使真空管路系统产生高频脉动剪切,其有两方面作用:一方面高频脉动增强了真空管内气体的剪切作用,由于真空排水后期孔隙水压力的减小,剪切沿着排水管道快速传递到末端土体使其发生流变,更易于脱水,同时高频脉动加强了管道内气体的剪切摩擦推动力,促进水体更高效地输运;另一方面,脉动能量也通过水体以动力冲击波的形式在真空管道内传递,使末端土体颗粒获得较大冲量,附着于过水通道的土体颗粒、絮团或絮网被破碎脱落,其内部包围的水体得以释放,通道的淤塞问题能够得到良好改善,有利于真空排水过程持续高效进行。

2 试验介绍

2.1 泥样制备及其物理特性

试验所用泥样取自浙江温州乐清湾港区一处吹填施工现场,原状土基本物理特性为:土粒比重 2.73,中值粒径 $13.08\ \mu\text{m}$,干密度 $1.19\ \text{g/cm}^3$,湿密度 $2.21\ \text{g/cm}^3$,含水率 117%,液限 54%,塑限 35%。经分析其塑性指数 $I_p = 19$,表明样本中含黏粒相对较多,液性指数 $I_L > 1$,淤泥样本呈流塑性状态,流变特性显著。

2.2 试验设备

自制室内单板排水试验系统采用无砂垫层真空预压直排技术,共包括3个主要部分:真空抽气排水系统、动态监测系统、脉动发生装置。

其中真空抽气排水系统包括真空泵、真空排水管路、真空表、真空饱和缸、模型箱。试验所用模型方箱尺寸为 $30\ \text{cm} \times 30\ \text{cm} \times 25\ \text{cm}$;真空泵作

为真空度源, 可提供真空度为 80~100 kPa 的相对稳定负压; 真空管路采用 PU 圆管, 末端连接国产 B 型排水板。试验中采用高精度电子秤、串口线、计算机、调试软件组成的动态监测采集系统自动记录汇集到真空饱和缸中的淤泥出流量。脉动发生装置包括高频电磁阀和控制启闭频率的频率控制器, 电磁阀的高频启闭可使真空排水管路中的水体或气体产生高频脉动剪切, 进而脉动剪切作用于管路末端排水板周围淤泥, 促使其发生剪切流变。排水支路接于脉动发生装置两端以保证主管路由于阀门关闭不通时水流可以从支路排出, 从而保证排水过程的连续性。

各部分间用直通或三通接头连接, 整套试验系统安装布置见图 1。

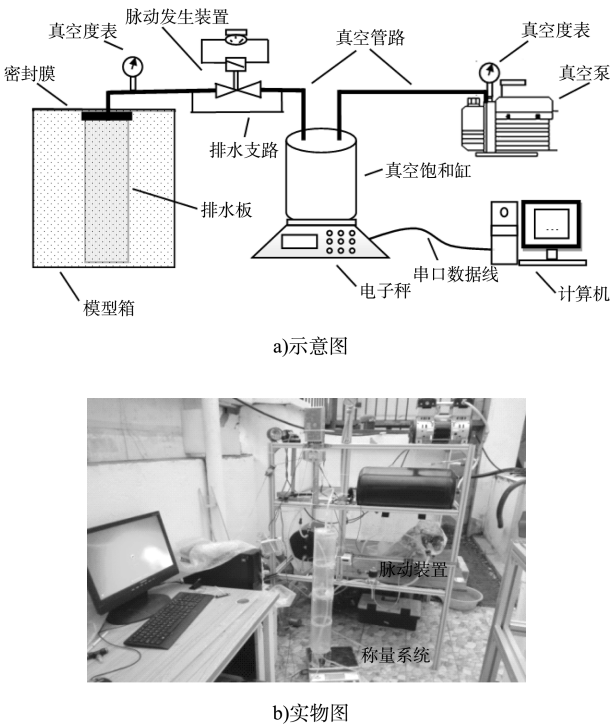


图 1 试验系统安装布置

2.3 试验方案设计

试验分为对比组和试验组, 按以下几个步骤进行:

1) 试验前将泥体烘干、粉碎、除杂并加水搅拌, 配置淤泥样本。为尽量保持和现场的一致性, 用一搅拌机反复搅拌性重塑, 与吹填淤泥被高度粉碎的状况相当, 然后取样测定初始含水率、流

变特性、泥土抗剪强度。

2) 以一系列不同初始含水率下的常规真空预压直排水试验作为对比组, 每隔固定时间记录一次电子秤读数 (即泥体出流量), 以供分析排水过程中出流量随时间的变化情况。试验结束后测量淤泥剩余含水率、流变特性, 对比试验前后的变化。

3) 进行脉动真空预压排水试验, 每隔相同时间记录一次电子秤读数。试验结束后测量淤泥剩余含水率、流变特性等, 并与对比组结果进行对比。

3 试验结果分析

首先在一次真空预压排水过程中间歇启用脉动发生器, 设置脉动频率 1 s/次 (指 2 次脉动发生间隔 1 s, 其他同理), 测量整个排水过程的累计排水量, 并将结果与常规真空预压排水试验作对比, 探究脉动对整个真空预压排水过程的影响情况。

由图 2 可以看出, 脉动的作用使得真空预压排水过程产生了变化: 起初常规阶段 2 组试验累计排水量值基本相当, 而后混合组进入脉动排水阶段, 累计排水量迅速提升, 开始出现较大差异; 随后混合组又进入常规排水阶段, 累计排水量变化趋势同常规试验组情况相当; 当混合组再次进入脉动阶段时, 累计排水量并没有进一步快速增长, 反而出现了负增长趋势, 最后回到了与常规法试验组基本平行的排水过程, 且累计排水量增长均较为缓慢, 这说明粗细颗粒基本完成了分选过程, 排水板周边淤泥板结, 部分细颗粒堵塞了排水通道, 导致排水率较低。这说明脉动剪切作用对真空预压排水过程确有影响, 对提高最终的累计排水量有积极作用, 但同时也表明脉动剪切作用不能随意关停, 否则不利于进一步提高排水效率。

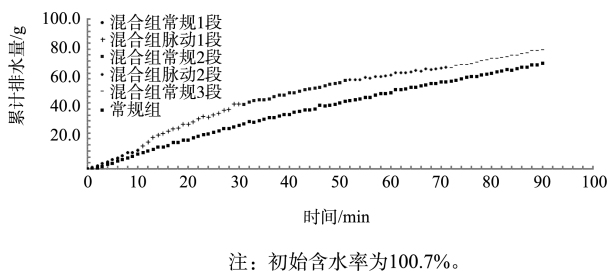


图 2 混合过程累计排水量变化

随后做了更为详细的脉动真空预压排水试验来探究脉动真空预压排水法的有效性。试验重点研究了初始含水率 120% 的相对高含水率排水过程。

3.1 累计排水量及含水率变化情况对比

模型试验中任意时刻淤泥的平均含水率可根据电子秤所测得的泥体出流量换算得出，表达式为：

$$W_t = W_0 - \frac{(1 + w_0)m_{抽}}{M} \tag{1}$$

式中： W_0 为初始时刻淤泥的含水率； W_t 为淤泥任意时刻的含水率； $m_{抽}$ 为任意时刻 t 饱和缸抽水质量； M 为淤泥的初始总质量。

在初始含水率 120% 的相对高含水率下采用两种不同的脉动频率进行排水过程试验，通过图 3 可看出，相同时间内脉动真空预压法的最终累计排水量及含水率的降低值均大于常规真空预压法，说明脉动真空预压排水法的排水效果确实优于常规真空预压法。

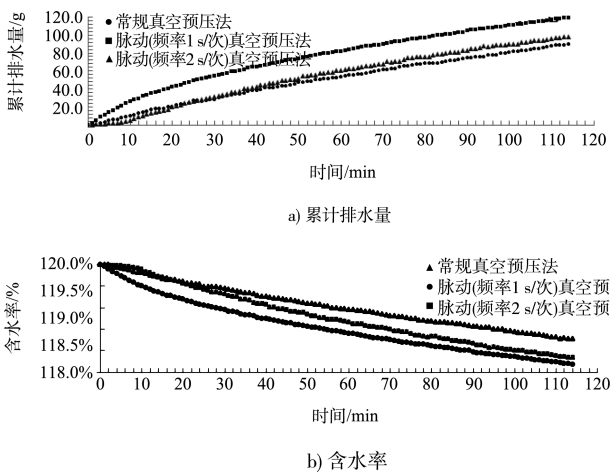


图 3 初始含水率 120% 的累计排水量及含水率变化曲线

为了确定脉动频率对排水效果是否存在影响，又开展了一组不同脉动频率下真空预压排水效果定性试验，试验仅对试验前后的结果进行了对比(表 1)。

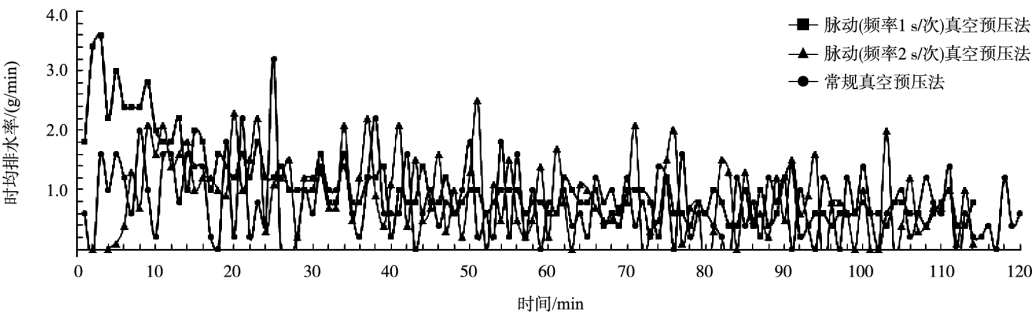


图 4 初始含水率为 120% 时不同脉动频率的时均排水率

表 1 不同脉动频率的排水效果

脉动频率	初始含水率/%	初始孔隙比 e_1	最终含水率/%	最终孔隙比 e_2	含水率降低值/%	平均排水速率/(g/min)
0(常规)	75.9	1.17	70.1	1.10	5.8	1.01
0(常规)	77.0	1.19	70.4	1.10	6.6	1.13
间隔 60 s/次	75.9	1.17	69.2	1.09	6.7	1.11
间隔 40 s/次	75.9	1.17	68.4	1.08	7.5	1.21
间隔 40 s/次	77.0	1.19	70.7	1.11	6.3	1.36
间隔 2 s/次	77.0	1.19	69.8	1.10	7.2	1.42
间隔 1 s/次	77.0	1.19	68.1	1.08	8.9	1.57
间隔 1 s/次	80.0	1.22	59.5	0.97	10.5	1.69

对比表 1 可以发现，脉动频率越高，含水率降低值也就相对越大，对应的平均排水速率值也越大，因此脉动频率对脉动真空预压排水过程有重要影响；同时对比试验前后的孔隙比可以看出，在同一初始含水率下，脉动频率越高，试验后的孔隙比越小，表明适当的脉动频率对于促进泥体密实度具有积极作用。但从絮凝角度考虑，正如其他学者研究的那样^[21]，紊动对絮凝有双向作用，所以一定存在一个最优频率值，使得脉动真空预压法排水效率最高，此次试验并没有重点探究。

3.2 时均排水速率对比

这里定义时均排水速率为

$$\varepsilon = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} \tag{2}$$

式中： ε 为时均排水速率(g/min)； m_2 为 t_2 时刻淤泥出流量； m_1 为 t_1 时刻淤泥出流量。

对排水过程作细微分析，计算每分钟的时均排水率(图 4)，可看出排水速率剧烈波动，且脉动真空预压排水法时均排水率波动程度大于常规真空预压法。

为进一步分析脉动真空预压排水法的效果, 对时均排水率做无量纲归一化处理, 定义无量纲数相对排水率 η :

常规法相对排水率 $\eta_{\text{常}}$ = 常规真空预压法时均排水率 / 常规真空预压法时均排水率 (3)

脉动法相对排水率 $\eta_{\text{脉}}$ = 脉动真空预压法时均排水率 / 常规真空预压法时均排水率 (4)

由于脉动剪切作用, 排水通道内的水体会在通道内做往复振荡运动, 所以测得的时均排水率会时高时低。为便于比较衡量, 这里将常规真空预压法的相对排水率作为基数 1, 引入脉动法相对排水率 η 来表示同一初始含水率下脉动真空预压法相对于常规真空预压法的波动程度, $\eta > 1$ 说明脉动法的时均排水率大于常规排水法, 且波动幅度值越大脉动法的时均排水率变化程度越大, 也

说明排水通道内紊动作用越有效, 对真空预压排水过程的影响也越大。

从图 5 可以发现, 在初始含水率为 120% 的情况下, 两种脉动频率对应的脉动真空预压法相对于常规真空预压法具有较大的波动幅度, 且 60% 以上的点 η 值均大于 1, 考虑到脉动真空预压法所测得的排水过程累积排水量、含水率下降值均比常规排水法有较大提升, 这说明脉动的加入有利于真空预压排水过程的顺利进行, 从而印证了脉动剪切作用的有效性。

采用脉动法和常规法真空预压排水后的排水板及泥体情况见图 6, 发现脉动真空预压法试验组排水板土工布表面的黏性颗粒较少, 内部排水通道干净通畅, 而常规法所用排水板土工布表面附着有一层淤泥层, 甚至粘结有黏性泥块, 这也说明脉动法对于缓解排水通道的淤堵具有积极作用。

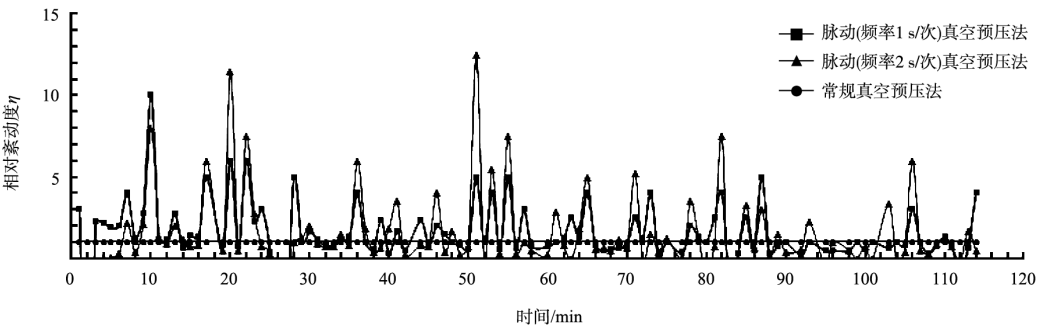


图 5 初始含水率 120% 不同脉动频率的相对排水率曲线

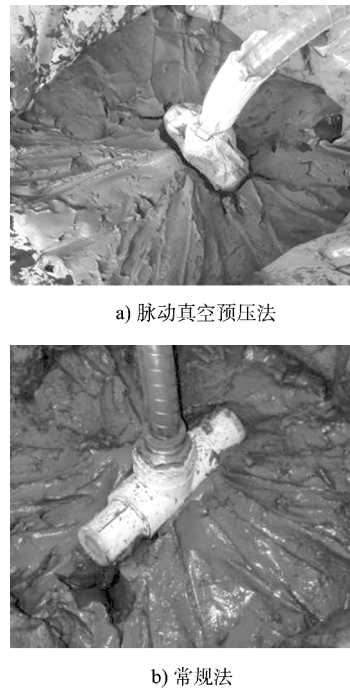


图 6 试验结束后排水板状态对比

3.3 流变特性变化对比

淤泥的流变特性变化也是排水效果的一种直接体现, 流变特性曲线峰值代表不排水抗剪强度。真空预压排水效果越好, 排水过程结束后淤泥的剪切应力越大, 对应的抗剪强度值也越大。试验前后分别测试了淤泥样本在同一恒定剪切速率下 (剪切速率 0.1 °/s) 的流变特性变化 (图 7)。

从图 7 及表 2 可以看出, 两种含水率下使用脉动 (频率 1 s/次) 真空预压法和常规真空预压法处理后的淤泥剪切应力峰值 (即不排水抗剪强度) 均远大于原状淤泥的剪切应力 (分别为 54% 和 87%), 且脉动法处理后的淤泥剪切应力大于常规法, 说明脉动法的排水加固效果优于常规真空预压法。

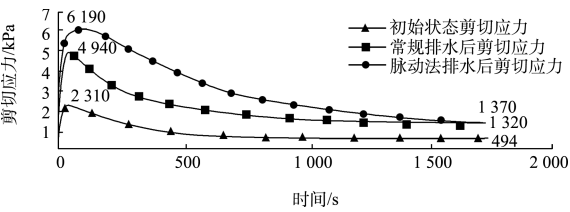


图 7 不同排水过程后的淤泥流变特性变化

表 2 不同排水过程的淤泥流变特性对比

初始 含水率/ %	初始状态 剪切应力 峰值/Pa	常规法 剪切应力 峰值/Pa	应力提高 百分比/ %	脉动法 剪切应力 峰值/Pa	应力提高 百分比/ %
80	2 310	4 940	214	6 190	268
120	1 570	2 330	148	3 690	235

4 结 语

1) 室内脉动真空预压单板排水模型试验结果表明,脉动真空预压法对于改善真空预压排水过程中的排水通道淤堵问题具有积极作用,其排水效果优于常规真空预压排水法。

2) 试验时间内脉动真空预压排水法比相同条件下常规真空预压排水法的时均排水率高出 10% 以上,且初始含水率越高时均排水率越大,这得益于脉动剪切作用缓解了排水通道的淤堵状况,体现在脉动真空预压排水法相对于常规法的相对排水率具有较大波动幅值。

3) 脉动真空预压法处理后的淤泥抗剪强度相比常规法增加了 33%,且采用适当的脉动频率可以减小泥体的孔隙比,增强其密实度,加固后的淤泥结构稳定性更好。

4) 脉动真空预压法存在一个理论最优的脉动频率值,在此脉动频率下排水效果最佳。

参考文献:

[1] 余元洪,余朝伟,杨娜,等.淤泥快速脱水技术的研究[J].港口科技,2012(8):19-21.

[2] 许平增.城市清淤设备淤泥脱水技术的探讨[J].建设机械技术与管理,2004(3):64-66.

[3] 刘双林,杨国录,王党伟.絮凝剂比例以及淤泥浓度对淤泥脱水速率的影响[J].南水北调与水利科技,2009,7(4):57-59.

[4] 张跃军,黄娟凤,周莉,等.不同离子性质絮凝剂在淤泥脱水中的脱水作用特征[J].精细化工,2004,24(9):903-909.

[5] 邵玉芳,何超,楼庆庆.西湖疏浚淤泥的固化试验[J].江苏大学学报:自然科学版,2007,28(5):442-445.

[6] 汤海涛.污泥脱水设备选型及运行控制研究分析[J].科技创新与应用,2012(21):16-17.

[7] 李一雯.电渗布置形式对电渗效果的试验研究[D].杭州:浙江大学,2013.

[8] 万勇.大连海相淤泥电渗固结试验研究[D].大连:大连理工大学,2014.

[9] Mesri G, Khan A Q. Ground improvement using vacuum loading together with vertical drains [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138: 680-689.

[10] Bamunawita C. Soft clay foundation improvement via prefabricated vertical drains and vacuum preloading[D]. Australia: University of Wollongong, 2004.

[11] 徐宏,邓学均,齐永正,等.真空预压排水固结软土强度增长规律性研究[J].岩土工程学报,2010,32(2):285-290.

[12] Saowapakpiboon J, Bergado D T, Artidteang S. Comparison on the performance of prefabricated vertical drain (PVD) preloading combined with and without vacuum and heat[J]. Lowland Technology International, 2011, 13(1):2-9.

[13] 许佳扬,汤梗.浅谈影响真空排水预压加固效果的因素[J].江苏建筑,2012(3):85-87.

[14] 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].岩土力学与工程学报,2014,33(6):1 257-1 268.

[15] 周源,刘传俊,吉锋,等.透气真空快速泥水分离技术室内模型试验研究[J].真空科学与技术学报,2010,30(2):215-219.

[16] 周源,高玉峰.透气真空排水法对疏浚淤泥表面水的促排作用[J].河海大学学报:自然科学版,2010,38(2):165-169.

[17] 胡康虎,唐一波,毛建全,等.对真空预压法中真空度的一些认识[M].南京:东南大学出版社,2008:529-531.

[18] 杨国强.真空预压法机理探讨[J].水运工程,1991(6):34-38.

[19] 陆志浩,周源,张莹.初始含水率对白马湖疏浚淤泥透气真空排水效果的影响[J].河海大学学报:自然科学版,2014,42(1):57-61.

[20] 钱宁,万兆惠.泥沙运动力学[M].北京:科学出版社,2003.

[21] 杨美卿,钱宁.紊动对细泥沙浆液絮凝结构的影响[J].水利学报,1987(8):21-29.