

DOI: 10.11779/CJGE2016S2020

# 真空加载方式对排水板滤膜淤堵影响试验研究

徐 锐<sup>1</sup>, 林生法<sup>\*1, 2</sup>, 耿之周<sup>1</sup>, 韩冉冉<sup>3</sup>

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 福建省建筑设计研究院, 福建 福州 350000;  
3. 交通运输部天津水运工程科学研究院, 天津 300456)

**摘要:** 塑料排水板滤膜的淤堵直接影响到真空预压排水固结法加固新近吹填淤泥的效果, 而真空荷载加载方式是引起排水板滤膜淤堵的主要原因之一。通过室内模型试验, 采用5种不同等效直径的排水板滤膜并通过控制不同的真空加载方式加固新近吹填淤泥。试验过程中对泥面沉降、排水板和土中不同深度的真空度进行监测, 试验结束后测试排水板滤膜的渗透系数。试验结果表明: 真空荷载不分级或者分级梯度太大, 对真空预压排水固结法加固新近淤泥效果较差, 排水板滤膜容易产生淤堵; 排水板滤膜的等效孔径越小其淤堵情况越严重。排水板滤膜发生淤堵后其渗透系数将降低, 对土体的排水固结产生不利的影响。作者建议: 在真空预压处理新近吹填淤泥的工程实践中, 宜选用较大的排水板滤膜等效孔, 真空荷载宜采用分级加载方式, 且每级真空梯度不宜过大。

**关键词:** 新近吹填淤泥; 真空加载方式; 分级加载; 滤膜; 淤堵

中图分类号: TU447 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)S2-0123-07

作者简介: 徐 锐(1982-), 男, 博士, 主要从事软土地基处理、淤泥固化以及环境土工等方面的研究, E-mail: kxu@nhri.cn。

## Experimental study on effects of vacuum loading modes on clogging of drainage board filtration membranes

XU Kai<sup>1</sup>, LIN Sheng-fa<sup>1,2</sup>, GENG Zhi-zhou<sup>1</sup>, HAN Ran-ran<sup>3</sup>

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Fujian Provincial Institute of Architectural Design and Research, Fuzhou 350000, China; 3. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

**Abstract:** The clogging of drainage board filtration membranes directly affects the effects of newly-dredged mud reinforced by the vacuum preloading drainage consolidation method, and the vacuum loading mode is one of the main reasons that cause clogging of drainage board filtration membranes. The drainage board filtration membranes with 5 kinds of different equivalent diameters are used to reinforce newly-dredged mud by controlling vacuum loading modes in laboratory. The surface settlement and vacuum degree at different depths of drainage board and soil are monitored during the tests, and the permeability of drainage board filtration membranes are tested after tests. The results show that for the vacuum load without gradient or with large gradient, the effects of vacuum preloading drainage consolidation method to reinforce newly-dredged mud are poor, and drainage board filtration membranes are easily clogged. The smaller the equivalent diameter of drainage board filtration membrane the more severe the clogging. The permeability of drainage board filtration membranes decreases after clogging that causes unfavorable effects on soil drainage consolidation. It is suggested that the equivalent diameter of drainage board filtration membranes should be larger, the vacuum load should be graded, and each vacuum load gradient shouldn't be too large in engineering practice by using the vacuum preloading method to treat newly-dredged mud.

**Key words:** newly-dredged mud; vacuum loading mode; graded load; filter membrane; clogging

## 0 引言

由于新近吹填淤泥含水率高、颗粒细、几乎无结构、承载力极低等原因, 大面积及较大深度吹填软土的化学固化处理存在明显的技术难度, 使得化学固化方法难以在大面积吹填软土加固处理中推广应用。真

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目(201401006); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201501043); 国家自然科学基金项目(51408381)

收稿日期: 2016-05-19

\*通讯作者 (E-mail: sf\_lin@126.com)

空预压经过几十年的发展,施工工艺已较成熟、积累较多的工程经验、经济性等各方面的优势,现已广泛成功应用于加固一般的软土及新近吹填超淤泥。而塑料排水板作为一种经济适用的竖向排水体在软基处理工程中得到广泛的应用。虽然真空预压技术已较成熟,但是也有加固效果不理想的案例<sup>[1]</sup>,除了材料质量、施工工艺不过关外,究其原因,有很大一部分是由于真空加载方式不合理造成排水板滤膜淤堵<sup>[2]</sup>,导致后期加固效果差,土体强度增长有限。

国内外学者针对滤膜的工作机理及改进防淤堵材料与工艺开展了一些理论和试验研究。Palmeira 等<sup>[3]</sup>研发了新仪器在施加竖向应力下对土-土工织物系统渗滤试验规律进行探索,试验在土与土工织物特性极端组合下,采用几种不同的无纺土工织物和土特性之间用来评价无纺土工织物潜在的淤堵与保土能力。Faure 等<sup>[4]</sup>通过土工织物淤堵试验采用 Le Coq 模型进行参数拟合并给出拟合参数物理意义,研究成果可以用来估算土工织物淤堵前容许最大侵入土颗粒数量。Wu 等<sup>[5]</sup>对与排水材料接触的土-无纺土工布渗滤规律进行研究。Haegeman 等<sup>[6]</sup>对真空固结排水的土工布过滤性能进行测试。易华强<sup>[7]</sup>提出了极限保土状态的概念,并对土工织物反滤系统结构稳定性进行了试验研究。童朝霞<sup>[8]</sup>对土工织物-非连续级配土反滤系统的淤堵特性进行了研究。魏取福<sup>[9]</sup>对非织造土工布反滤性能进行了相关研究。王钊等<sup>[10]</sup>对土工织物滤层淤堵标准进行了探讨。

由于塑料排水板滤膜渗透系数对土的加固效果有较大影响,而滤膜的淤堵会造成整个排水板渗透性降低,这将对土的固结速度产生较大的影响。本文针对 5 种不同等效孔径滤膜的排水板,通过控制不同真空加载方式处理吹填淤泥,以期获得不同加载方式对不同孔径滤膜渗透性的影响,解决因压差瞬时过大产生的黏土颗粒迁移而致使滤膜淤堵的问题,从而提高固结速度。研究成果为真空预压处理新近吹填淤泥负压控制技术的设计和施工方案提供了参考。

## 1 试验方案

### 1.1 试验土样

试验土样取自浙江某吹填场地典型区域,分别用 10 个直径 60 cm,高 100 cm 的塑料桶装运回室内实验室。对随机取自 10 个桶中的吹填淤泥做物理特性指标分析与颗粒分析,经统计分析试验淤泥物理指标如表 1,颗粒分析如图 1。

从表 1 中试验淤泥物理指标可知,吹填淤泥含水率远大于 100%、孔隙比极高,液塑限都较高,土体

处于完全流动状态。从图 1 中 4 组试样土的颗粒级配累积曲线统计分析可知,从颗粒粒径含量指标来看,粉粒占优。本吹填淤泥颗粒粒径  $\geq 0.075$  mm 的土颗粒约占 8%,粒径介于 0.005 mm 至 0.075 mm 之间的土颗粒约占 72%,粒径小于 0.005 mm 的土颗粒约占 20%。

表 1 试验淤泥的物理指标

Table 1 Physical indices of dredged mud

含水率/%	干密度 / $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	土粒比重	孔隙比	饱和度/%	液限 /%	塑限 /%	塑性指数	液性指数
116	1.42	2.69	3.1	100	42.7	22.1	20.6	4.62

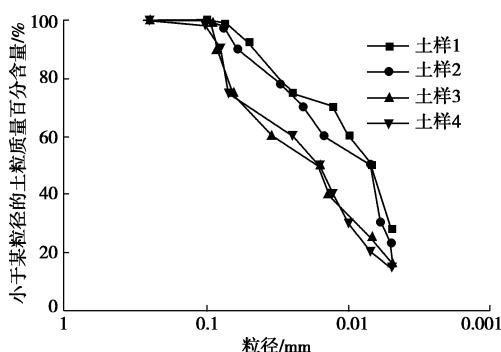


图 1 吹填淤泥颗粒分析

Fig. 1 Particle analysis of dredged mud

### 1.2 试验排水板滤膜规格

塑料排水板作为一种有效的排水体,应当避免排水板滤膜被淤堵。如果土颗粒移动并陷入纤维结构中,则滤膜就被堵塞,这将造成滤膜的渗透性降低。如果在滤膜的表面形成反滤薄层,此时滤膜的渗透性也大大降低。通常情况下,滤膜的水力学性能主要指的是透水能力及防止细小颗粒流失的能力。对于软基处理来说,透水能力是主要方面,一般从孔径大小及渗透特性两方面来衡量。

根据现行《水运工程塑料排水板应用技术规程》(JTS206—1—2009)选取 5 种不同孔径滤膜的 SPB-B 型塑料排水板,其主要参数如表 2。

表 2 排水板滤膜试验参数

Table 2 Test parameters of drainage board filter membranes

滤膜试样	纵向干态抗拉强度 / $(\text{kN} \cdot (10\text{cm})^{-1})$	横向湿态抗拉强度 / $(\text{kN} \cdot (10\text{cm})^{-1})$	单位面积质量 / $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2})$	渗透系数 $10^4(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	等效孔径 /mm
试样 1	$\geq 25$	$\geq 20$	120	$\geq 5$	0.025
试样 2	$\geq 25$	$\geq 20$	100	$\geq 5$	0.035
试样 3	$\geq 25$	$\geq 20$	80	$\geq 5$	0.055
试样 4	$\geq 25$	$\geq 20$	60	$\geq 5$	0.065
试样 5	$\geq 25$	$\geq 20$	60	$\geq 5$	0.080

### 1.3 试验步骤与方法

根据试验要求, 排水板滤膜淤堵试验主要仪器有改进的小型潜水泵、排水系统、土样桶及测试设备。试验步骤与方法如下:

(1) 吹填淤泥现场取样, 置入直径 60 cm, 高 100 cm 的塑料桶, 搅拌均匀, 高度 0.8~0.9 m, 插排水板, 安装排水板帽、接头、气管、板中和泥中真空表 (0.2、0.6 m), 与真空泵相连, 真空度由 0 kPa 逐渐向 90 kPa 过渡, 期间测试淤泥表面沉降、板中和泥中真空度 (0.2、0.6 m)。

(2) 停泵, 取出排水板, 剪下下部 20 cm 滤膜, 送试验室进行滤膜渗透试验。

(3) 排水板余留部分重复上述步骤 1~2 进行下一个模型箱试验。(注: 重复试验是为了研究真空荷载分级及分级梯度对排水板滤膜淤堵的影响规律。)

## 2 试验过程监测结果

滤膜过滤形式主要有以下 5 种: 桥型、拱型、碎石型、淤堵和阻挡形式。影响土工滤膜过滤性能的因素主要包括三大部分: 第一部分为被保护土特性, 主要由土颗粒的不均匀系数, 细粒含量的多少, 土的密实度、土颗粒的化学特性、形状、尺寸分布等决定。第二部分为被保护土与土工织物的系统特性, 主要由渗透系数、土粒径与土工织物孔径的关系所决定。第三部分为外部因素, 主要由荷载、水力坡度、气体决定。为了研究真空分级加载梯度对不同等效孔径的排水板滤膜的淤堵影响情况, 各排水板滤膜对应的真空加载分级梯度情况与沉降监测结果如表 3。真空梯度的加载主要根据沉降速率来控制, 试验以沉降速率小于 0.5 mm/h 来加载下一级真空度。真试验的结束, 以满载真空度大于 80 kPa, 下沉降速率小于 0.3 mm/h 为卸载控制标准。

表 3 真空加载情况与沉降监测结果

Table 3 Vacuum loading conditions and results of monitored

settlement

试验组别	等效孔径/mm	分级数量	真空梯度/kPa	总时间/h	总沉降量/mm
试验1	0.025	1	90	48	15
重复试验1	0.025	3	30	48	23
试验2	0.035	2	45	43	13
重复试验2	0.035	3	30	65	29
试验3	0.055	3	30	72	32
重复试验3	0.055	3	30	72	26
试验4	0.065	3	30	72	24
重复试验4	0.065	3	30	72	19
试验5	0.080	3	30	72	29
重复试验5	0.080	3	30	72	22

在试验过程中, 对沉降、真空总表真空度、排水板中 (0.2 m, 0.6 m) 真空度、土中 (0.2 m, 0.6 m) 真空度进行监测, 监测结果见如图 2~21。

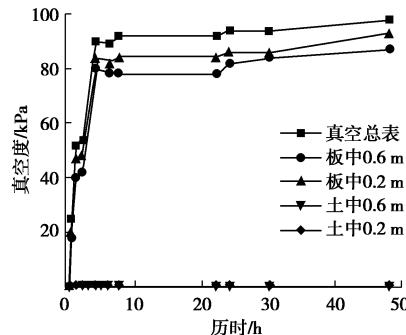


图 2 试验 1 真空度变化曲线

Fig. 2 Variation of vacuum degree of test 1

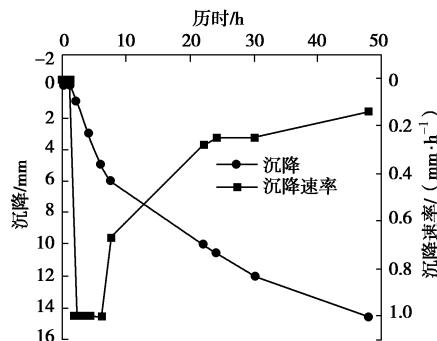


图 3 试验 1 沉降/沉降速率变化曲线

Fig. 3 Variation of settlement/settlement rate of test 1

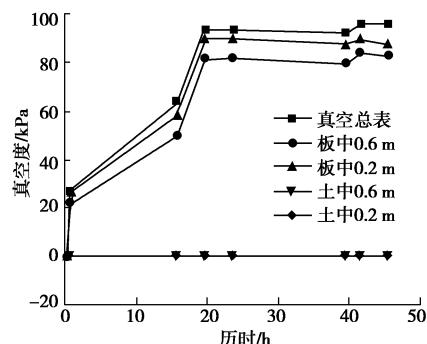


图 4 重复试验 1 真空度变化曲线

Fig. 4 Variation of vacuum degree of repeated test 1

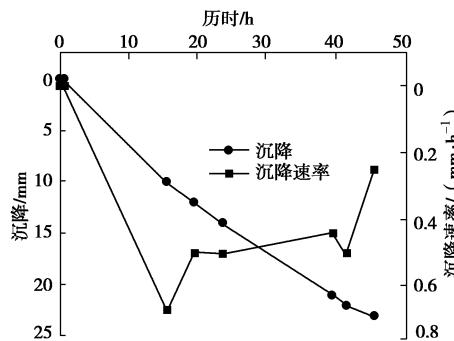


图 5 重复试验 1 沉降/沉降速率曲线

Fig. 5 Variation of settlement/settlement rate of repeated test 1

根据图 3 试验 1 与图 5 重复试验 1 沉降/沉降速率

曲线对比可知,试验1前期沉降速率快,沉降量大,后期沉降速率陡降,沉降量很小,比重复试验1沉降量小,总沉降量也相应较小。结合图2试验1与图4重复试验1真空间度变化曲线可知,重复试验1有进行分级加载的加固效果明显好于试验1一次性加载。试验1排水板周围形成明显的“土柱”,周围土体渗透系数急剧下降。这说明试验1真空压力加载过快,真空排水加固效果较重复试验1差,对土体的排水固结产生较为不利的影响。

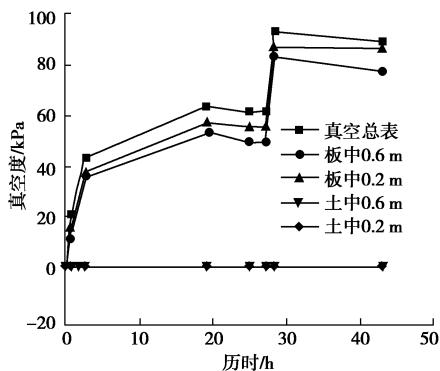


图6 试验2真空间度变化曲线

Fig. 6 Variation of vacuum degree of test 2

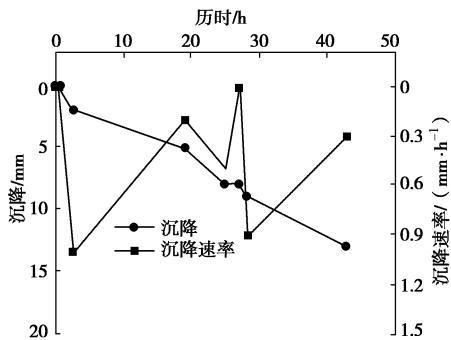


图7 试验2沉降/沉降速率曲线

Fig. 7 Variation of settlement/settlement rate of test 2

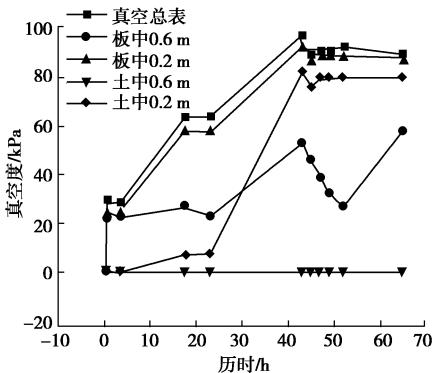


图8 重复试验2真空间度变化曲线

Fig. 8 Variation of vacuum degree of repeated test 2

除了图8土中0.2 m处监测到真空间度,其余试验过程中未能监测到真空间度,分析其可能原因是由于吹填淤泥含水率极高,试验时间较短,沉降量也较小,

在整个试验过程中,吹填淤泥中的水位基本与泥面持平,而且吹填淤泥基本处于无结构性,土体无法传递真空间度。而图8土中0.2 m可能由于测真空间度的气管探头紧挨着排水板,所以特别是试验40 h后基本接近排水板中0.2 m处的真空间度。沉降速率曲线形状大致接近于“锯齿形”,沉降速率随着真空间度的增加,真空间度变大,一段时间后变小,然后再随着真空间度的增加而增加,直到试验结束。

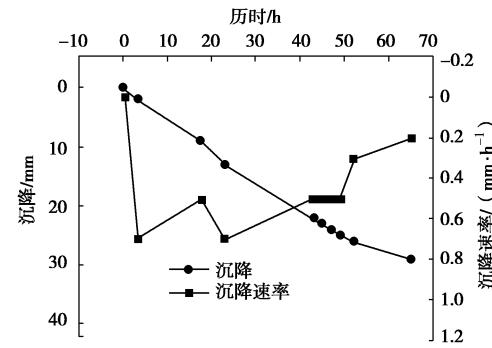


图9 重复试验2沉降/沉降速率曲线

Fig. 9 Variation of settlement/settlement rate of repeated test 2

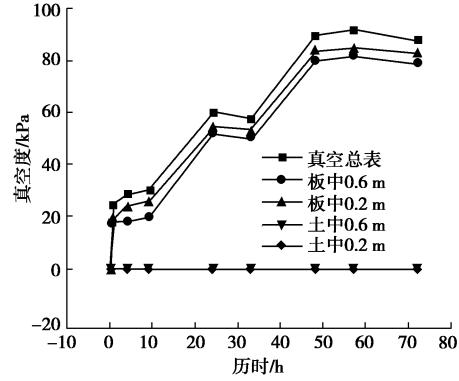


图10 试验3真空间度变化曲线

Fig. 10 Variation of vacuum degree of test 3

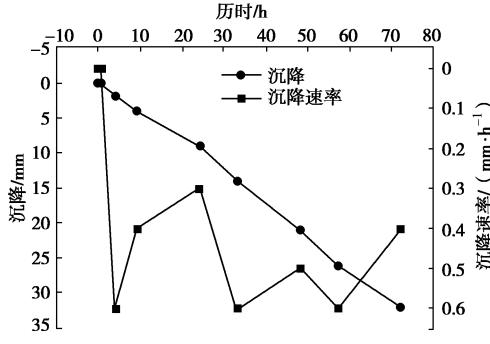


图11 试验3沉降/沉降速率曲线

Fig. 11 Variation of settlement/settlement rate of test 3

根据图7试验2与图9重复试验2沉降/沉降速率曲线对比可知,试验2沉降速率变化幅度大于重复试验2,总沉降量小于重复试验2。结合图6试验2与图8重复试验2真空间度变化曲线的对比可知,重复试验2的加固排水效果好于试验2,这说明每级的真空间度不宜过高,过高的一级真空间度同样会降低排水加固

效果。

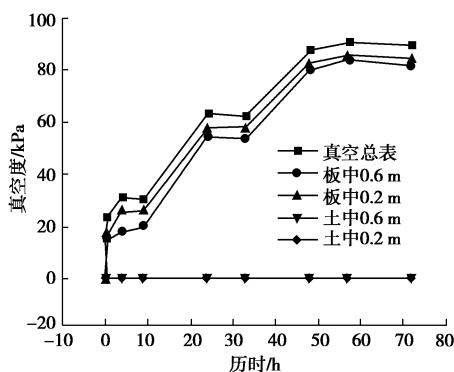


图 12 重复试验 3 真空度变化曲线

Fig. 12 Variation of vacuum degree of repeated test 3

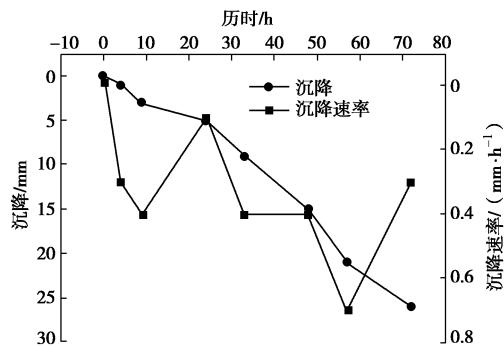


图 13 重复试验 3 沉降/沉降速率曲线

Fig. 13 Variation of settlement/settlement rate of repeated test 3

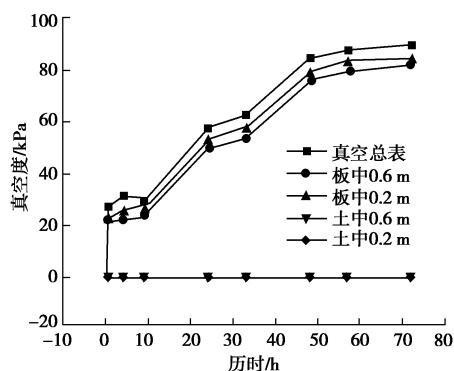


图 14 试验 4 真空度变化曲线

Fig. 14 Variation of vacuum degree of test 4

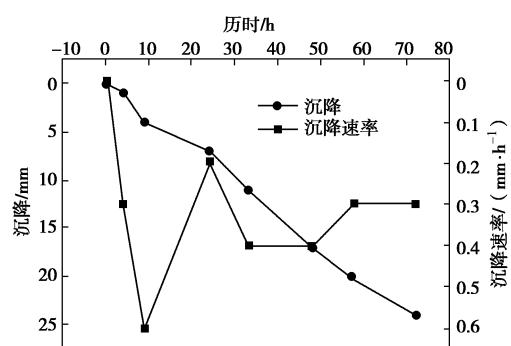


图 15 试验 4 沉降/沉降速率曲线

Fig. 15 Variation of settlement/settlement rate of test 4

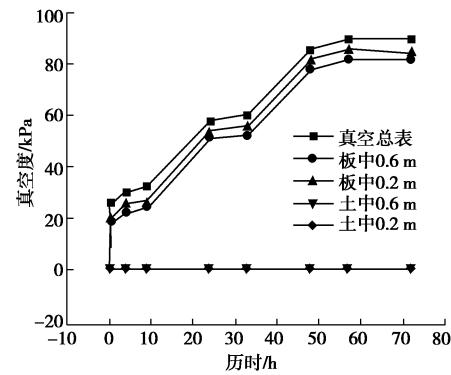


图 16 重复试验 4 真空度变化曲线

Fig. 16 Variation of vacuum degree of repeated test 4

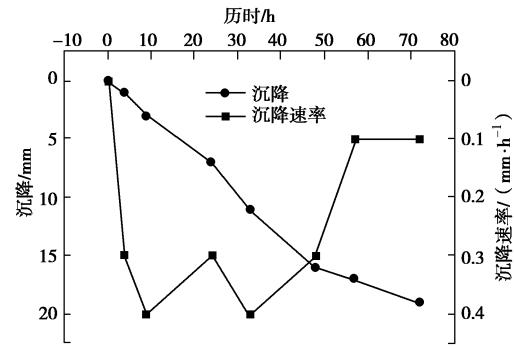


图 17 重复试验 4 沉降/沉降速率过程曲线

Fig. 17 Variation of settlement/settlement rate of repeated test 4

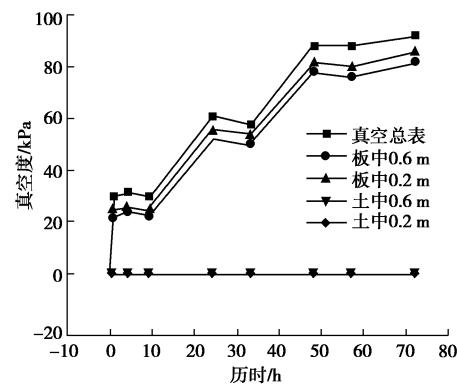


图 18 试验 5 真空度变化曲线

Fig. 18 Variation of vacuum degree of test 5

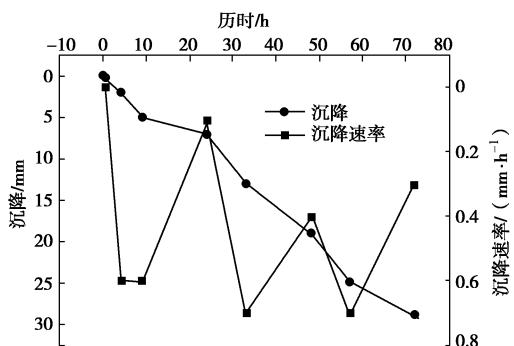


图 19 试验 5 沉降/沉降速率曲线

Fig. 19 Variation of settlement/settlement rate of test 5

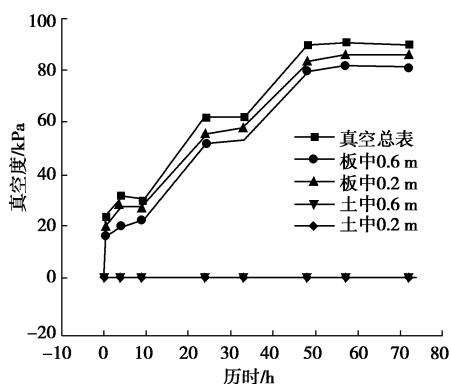


图 20 重复试验 5 真空度变化曲线

Fig. 20 Variation of vacuum degree of repeated test 5

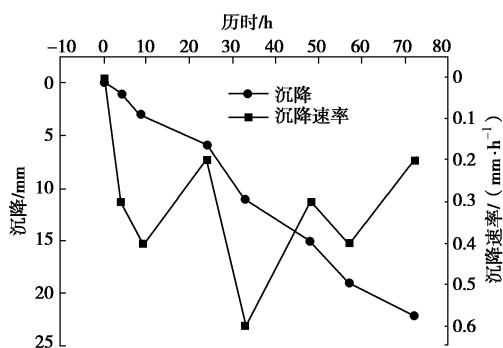


图 21 重复试验 5 沉降/沉降速率曲线

Fig. 21 Variation of settlement/settlement rate of repeated test 5

由图 2~21 可知, 真空总表真空度最大, 其次为板中 0.2 m 真空度, 最小为板中 0.6 m 真空度, 但三者相差不大。而且随着每次真空总表真空度的增加, 排水板中 0.2 m 和 0.6 m 处的真空度就同步增加, 这是由于此次试验排水板较短, 总长度约为 0.8 m 左右, 排水板真空度在整个试验排水板范围内传递比较均匀。图 10~21 分别是滤膜等效直径为 0.055, 0.065, 0.080 mm 三种不同的排水板试验过程中的真空度、沉降的监测结果。三种滤膜等效孔径不同的排水板试验及其重复试验的真空度都是分三级, 每级真空度为 30 kPa, 每级持续时间约为 20 h, 整个试验过程时间约为 72 h。从真空度变化曲线可知, 在总真空表分级相同的情况下, 排水板中真空度传递规律基本保持一致。在经历相同的试验时间下, 3 种不同等效孔径的滤膜试验及其对应的重复试验沉降量相差不大, 但是相同等效孔径的滤膜试验第一次试验比第二次重复试验沉降量要大。

### 3 试验滤膜渗透性试验

滤膜渗透试验的原理是在恒定水头作用下, 测定水流垂直通过土工织物及相关产品的流速。本次试验仪器采用 FY020 型测定仪。仪器主体分上下两个圆筒,

将试样在水中浸泡 12 h 后取出并夹持在圆筒中间, 通水面积内径 50 mm。在 50 mm 水头差作用下, 水流稳定后开始收集水量。试验结果如表 4。由表 4 可以看出, 5 种滤膜试样在进行淤堵试验后渗透系数均出现了明显的降低, 由试验前的  $10^{-2} \sim 10^{-3}$  cm/s 量级减小到试验 1 后的  $10^{-3} \sim 10^{-4}$  cm/s 量级。排水板滤膜的等效孔径越小其淤堵情况越严重。从每个试样的试验与其重复试验来看, 渗透系数都有所降低, 但是降低幅度不大。由于试验 1 真空荷载没有采取分级加载, 试样 1 试验前后可以看出滤膜渗透系数变化幅度最大, 滤膜淤堵情况最严重。由表 4 可以看出试样 2 试验 1 后排水板滤膜渗透系数降低幅度较大, 而重复试验 2 排水板滤膜渗透系数降低量较小。试样 3~试样 5 真空加载方式采用分三级加载, 试验后排水板滤膜渗透系数有所降低, 但是降低幅度比没分级与只分两级的降低幅度小。因此, 处理吹填淤泥的真空荷载宜采用分级真空荷载加载方式, 而且每级真空梯度不宜太大, 可以减小排水板滤膜的淤堵, 有利于排水固结加固效果。

表 4 滤膜渗透系数试验前后对比

Table 4 Comparison of permeability parameters of filter membranes between before and after tests

滤膜 试样	试验前渗 透系数 $(10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1})$	试验后渗 透系数 $(10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1})$	重复试验 后渗透 系数 $(10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1})$	试验前 后渗透 系数比	重复试 验前后 渗透系 数比
试样 1	5.68	1.02	0.73	0.018	0.716
试样 2	6.16	3.49	2.1	0.057	0.602
试样 3	9.12	6.82	4.5	0.075	0.660
试样 4	19.52	10.3	8.9	0.053	0.864
试样 5	26.77	29.2	25.3	0.109	0.866

### 4 结论与展望

(1) 对于新近吹填淤泥, 由于其天然含水率远高于土体液限, 处于流动状态, 细颗粒容易在较大负压作用下集中于排水通道外侧, 形成相对不透水层而造成排水通道堵塞, 引起加固效率的急剧降低, 因此真空预压法处理新近吹填淤泥真空荷载宜采用分级加载, 且每级真空荷载梯度不宜太大。

(2) 处理高含水率的新近吹填淤泥, 宜选用等效孔径较大的排水板滤膜。真空荷载加载方式宜采用分级且分级梯度不太大, 否则排水板滤膜容易发生淤堵, 致使其渗透系数降低显著, 不利于土体排水加固效果。

(3) 本文暂未考虑分级加载对滤膜渗透系数时间效应的影响, 该问题有待进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 董志良, 张功新, 周琦, 等. 天津滨海新区吹填造陆浅层超软土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 Zhi-liang, ZHANG Gong-xin, 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))
- [2] 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 Shu-feng, LOU Yan, DONG Zhi-liang, 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))
- [3] PALMEIRA E M, FANNIN R J, VAID Y P. A study on the behaviour of soil geotextile systems in filtration tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, **33**(6): 899 - 912.
- [4] FAURE Y H, BAUDOIN A, PIERSON P, et al. A contribution for predicting geotextile clogging during filtration of suspended solids[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2006, **24**(1): 11 - 20.
- [5] WU Cho-sen. Soil-nonwoven geotextile filtration behavior under contact with drainage materials[C]// Geotextiles and Geomembranes 24. 2006: 1 - 10.
- [6] Haegeman, Wim, William Van Impe. Filtration performance testing of geotextiles for vacuum consolidation drains[J]. Geosynthetics International, 1999, **6**(1): 41 - 51.
- [7] 易华强. 土工织物反滤系统土体结构稳定性试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2005. (YI Hua-qiang. Experimental study on the structure stability in soil-geotextile filtration[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005. (in Chinese))
- [8] 童朝霞. 土工织物-非连续级配土反滤系统的淤堵特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2002. (TONG Zhao-xia. Study on clogging properties of geotextile-discontinuous graded soil filtration system[D]. Beijing: Tsinghua University, 2002. (in Chinese))
- [9] 魏取福. 非织造土工布反滤性能的研究[J]. 安徽机电学院学报, 2002(3): 52 - 54. (WEI Qu-fu. Study on filtration properties of nonwoven geotextile[J]. Journal of Anhui Institute of Mechanical and Electrical Engineering, 2002(3): 52 - 54. (in Chinese))
- [10] 王钊, 陆士强. 土工织物滤层淤堵标准的探讨[J]. 水力发电学报, 1991(3): 55 - 63. (WANG Zhao, LU Shi-qiang. Discussion on clogging standard of geotextile filtration[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1991(3): 55 - 63. (in Chinese))

(责任编辑 明经平)