

· 地基与基础 ·



# 异步真空预压法处理超软土的 室内试验及机理\*

陈庚<sup>1,2</sup>, 陈永辉<sup>1,2</sup>, 彭中浩<sup>1</sup>, 陈龙<sup>1,2</sup>, 王波<sup>1</sup>

(1. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏南京 210098;

2. 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)

**摘要:** 针对真空预压处理超软地基过程中出现的排水板滤膜外土颗粒聚集现象, 提出并通过室内试验研究一种新型真空预压方式——异步真空预压法。该法对相邻的竖向排水体在同一时间下施加不同的真空度, 实现对超软土的异步真空吸水预压, 缓解因土颗粒单向迁移造成排水体滤膜及膜外土体的淤堵。通过室内试验发现, 真空度调节对真空预压的处理效果具有明显影响, 同时, 异步吸水真空预压排水量是常规真空预压的 1.1 倍, 效果优于常规真空预压; 通过对异步真空预压法的机理分析, 认为异步真空预压法可保持零速面移动范围内的细颗粒含量, 防止细颗粒的过量迁移, 有助于缓解超软土的固结排水中的淤堵问题。

**关键词:** 吹填淤泥; 超软土; 异步真空预压; 室内试验

中图分类号: U 655.64<sup>+</sup>4.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)03-0130-07

## Model test and mechanism of reciprocating water absorption vacuum preloading treated ultra-soft soil

CHEN Geng<sup>1,2</sup>, CHEN Yong-hui<sup>1,2</sup>, PENG Zhong-hao<sup>1</sup>, CHEN Long<sup>1,2</sup>, WANG Bo<sup>1</sup>

(1. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** To counter the phenomenon of particle aggregation in the process of vacuum preloading treatment in the process of ultra-soft soil, a new type of water absorption, reciprocating water absorption, is put forward to be applied in vacuum preloading reinforcing the ultra-soft soil. With different vacuum degrees of the adjacent vertical drainages (PVD) at the same time, we realize the asynchronous vacuum water absorption of the ultra-soft soil. It is found through the model experiment that the drainage capacity of reciprocating water absorption is 1.1 times of that of regular water absorption. The analysis of mechanism of reciprocating water absorption vacuum reloading method reveals that this method can prevent fine particles from excessive migration and contribute to the consolidation of ultra-soft soil drainage.

**Keywords:** dredged silt; ultra-soft soil; reciprocating water absorption vacuum preloading; model test

我国大规模围垦工程量日益增多, 然而, 大规模围垦多以吹填泥浆为主, 吹填泥浆首先在重力作用下发生泥水分离及自重固结, 形成高含水

率、高孔隙比、强度低的超软土。因超软土自身强度低, 其承载力几乎为零, 致使施工作业人员及施工机械不能直接进场, 亟需进行超软地基的

收稿日期: 2015-09-22

\*基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目(201401006); 浙江省交通运输厅科技计划项目(2012H01, 2011H21, 2013H05)

作者简介: 陈庚(1987—), 男, 博士, 从事软土地基处理研究。

浅层预处理。

真空预压法是处理此类超软地基的常用方法<sup>[1]</sup>, 但采用真空预压法处理浅层超软土时, 实际加固效果常常与理论有一定差距, 其原因在于真空预压加固一段时间后, 处理区域土体中的黏土细颗粒会向排水体聚集, 造成排水体滤膜及膜外土体的淤堵, 使其附近土体渗透系数变小, 阻碍真空度的传递及孔隙水的排出, 造成加固效果不均匀, 比较直观的就是“土桩”现象。程万钊<sup>[2]</sup>通过现场试验发现, 抽真空前期土桩半径为10~20 cm, 且随真空预压的进行, 范围进一步扩大; 陈平山<sup>[3]</sup>通过现场试验发现, 真空预压过程中形成的“土桩”呈倒锥形, 深度不大于1.6 m, 并认为造成此现象的原因在于吹填土中的细颗粒在渗透力作用下向排水板聚集; 唐彤芝<sup>[4]</sup>认为造成土桩区与非土桩区强度分布及不均匀的原因, 是由于新近吹填淤泥自身特性, 在抽真空过程中在真空负压吸力作用下细颗粒的迁移吸附所引起的。由此可见, 造成此现象的根本原因是排水通道及其周边土体的颗粒聚集。为缓解此类问题, 诸多学者分析了排水通道及其周边土体淤堵的影响因素, 并提出改善方法。Haegeman<sup>[5]</sup>对短期淤泥膜外淤堵与滤膜规格关系进行试验, 得出膜外淤泥渗透系数变化与滤膜规格的关系; 冯军等<sup>[6]</sup>通过室内模型试验研究, 认为饱和和软土中黏粒含量高, 对孔隙水的吸附作用大, 是导致真空预压加固流泥效果较差的原因之一; 颜永国等<sup>[7]</sup>采用改进的真空预压试验模型研究了颗粒级配对吹填土加固效果的影响, 表明颗粒级配对吹填土的加固效果影响很大; 宋晶<sup>[8]</sup>、苑晓青<sup>[9]</sup>针对高黏性吹填土, 提出了控制真空度对分级真空预压法进行改进, 采用直排式真空预压形式, 真空预压荷载采取逐级增大真空度的方式来施加, 分析了不同真空压力下的吹填土微观特性。

本文针对真空预压处理超软地基过程中出现的排水板滤膜外土颗粒聚集现象, 提出并通过室内试验研究一种新型真空预压方式——异步真空预压法<sup>[10]</sup>, 分析该法与常规方法的差

异, 并对其进行了机理分析, 揭示该法除具备分级式真空预压的优点外, 还可防止细颗粒的过量迁移, 有助于缓解超软土的固结排水中的淤堵问题。

## 1 异步真空预压法

异步真空预压法, 是指通过表层排水通道的间隔连接, 对相邻的竖向排水体在同一时间下施加不同的真空度, 实现对超软土的异步真空吸水预压, 并间隔变化相邻排水体内的真空度大小, 从而改变真空预压过程中的定向排水, 缓解因土颗粒单向迁移造成排水体滤膜及膜外土体的淤堵(图1)。

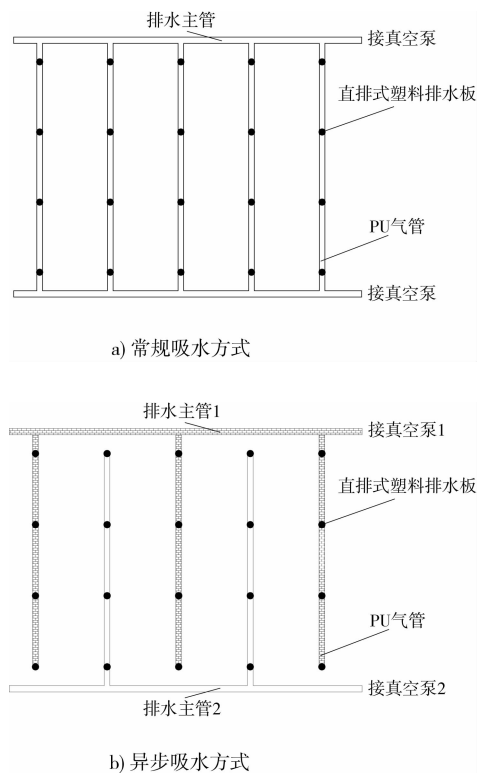


图1 常规吸水与异步吸水的表层排水通道布置方式

为实现对相连排水体真空度的差异控制, 采用直排式真空预压的塑料排水板连接方式(图1a)), 排水通道采用无滤孔的PU气管连接, 不同于常规吸水方式的排水通道连接方式, 异步真空预压法首先需设定不同真空度的排水主管, 如排水主管1和排水主管2, 并将竖向排水板隔排与排水主管相连(图1b)), 排水主管分别连接真空泵, 通过控

制真空泵 1 和真空泵 2，实现对排水系统内竖向排水体真空度的调节。由此可在同一时刻下，对相邻塑料排水板施加不同的真空压力。

## 2 异步真空预压法室内模型试验

### 2.1 试验用土

试验用土采用浙江某河道疏浚淤泥，褐色，呈流塑状，对土进行颗粒分析试验(图 2)和液塑限试验，疏浚淤泥土塑限为 18%，液限为 35%，塑性指数为 17，通过塑性判断图(图 3)，属低液限黏土。

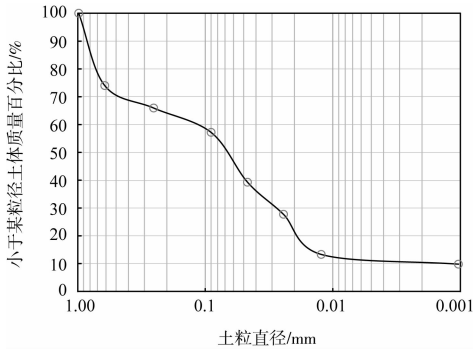


图 2 疏浚淤泥颗粒分析

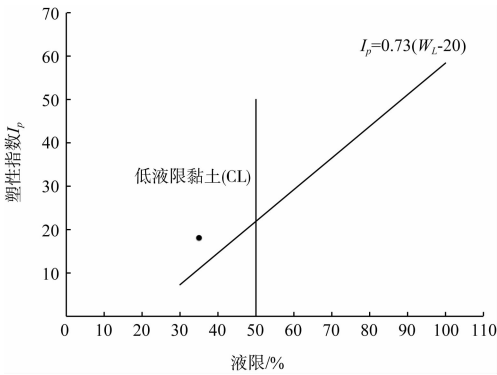


图 3 塑性分析

本次试验所用堆场模型槽采用高强度 PP 材质的塑料箱，箱体尺寸为 50 cm × 35 cm × 30 cm (长 × 宽 × 高)。采用配制高含水率泥浆方式，配制高含水率的吹填土(初始含水率 75.0%)，放置 1 周后，土体的平均含水率为 65.3%。

### 2.2 试验设计及实施

为模拟堆场超软土地基处理及排水板打设情况，排水体采用模拟竖向排水板(图 4)，将普通

塑料排水芯板沿通水通道方向裁剪成条状，长度为 20 cm，外包滤布为  $O_{95}$  小于 0.075 cm，其横截面为方形，等面积圆型截面的平均直径为 1.0 cm，塑料排水板上部通过三通接头与水平排水通道连接。

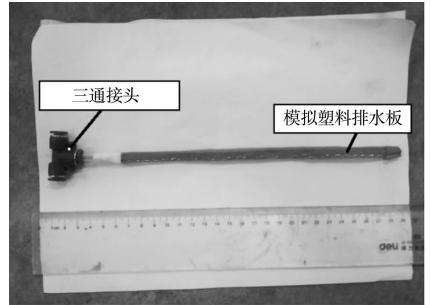


图 4 模拟塑料排水板

排水板打设成正方形布置，间距为 10 cm，打设深度为 20 cm，通过 PU 气管和三通接头将塑料排水板间隔连接，形成 A、B 两套排水系统，通过调节阀门，可控制 A、B 系统内的真空度(图 5)。

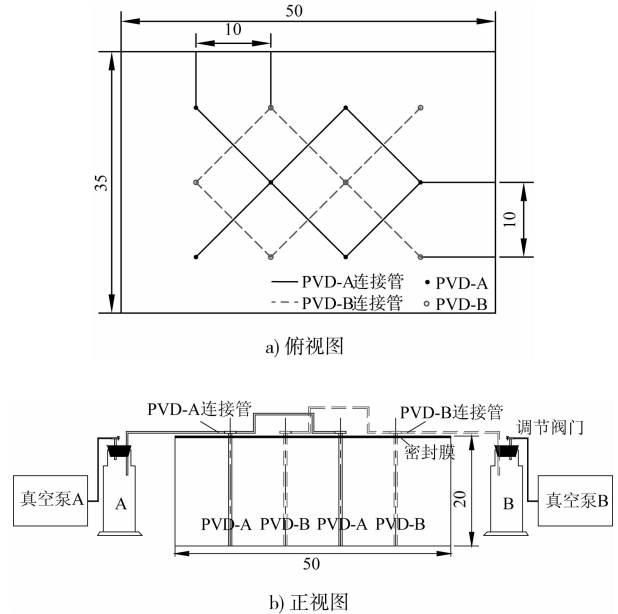


图 5 排水板堆场设计(单位: cm)

首先，采用一层密封膜对模型槽内的土体进行表层铺设，模拟编制布的铺设。密封膜在模型槽四周深入超软土 10 cm (密封膜厚度为 0.15 mm，抗拉强度大于 18 MPa，断裂延长率大于 220%)，若后期因土体收缩变形致使抽真空过程中漏气，可采用黏性土对收缩变形区域进行再次密封，直

至试验结束。待完成表层铺设后, 在密封膜上开口, 按照设计间距将模拟的塑料排水板垂直缓缓插入土中(图 6)。在已打设的塑料排水板上连接三通接头, 再铺设一层密封膜。将塑料排水板相隔相连, 在其上架设百分表(精度 0.01 mm)以检测土体的竖向沉降, 待百分表沉降稳定后(0.01 mm/d), 开启真空泵进行试验(图 7)。

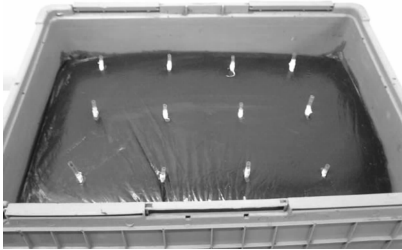


图 6 室内模拟堆场打插塑料排水板

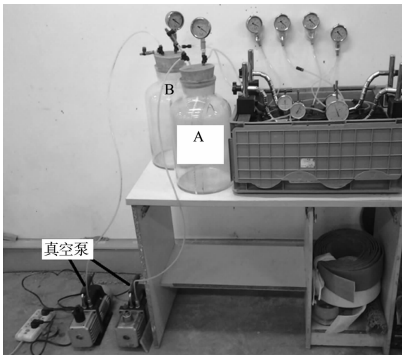


图 7 差异真空预压室内试验

### 3 试验结果

#### 3.1 分级式真空预压与恒定真空预压

首先进行恒定真空预压与分级式真空预压的真空预压试验, 其真空度控制见表 1。

表 1 不同排水系统的真空度控制

方案	时间/min	真空压力/kPa	
		A	B
恒定真空预压(A 系统)	0 ~ 100	20	50
分级真空预压(B 系统)	100 ~ 200	40	50
	100 ~ 4 320	50	50

开启 A 系统和 B 系统的真空泵, A 瓶的真空控制阀部分关闭, 直至到达预计真空度进行调节; B 瓶的真空控制阀完全关闭, 使真空度达到最大(50 kPa)。排水量随时间变化情况见图 8。

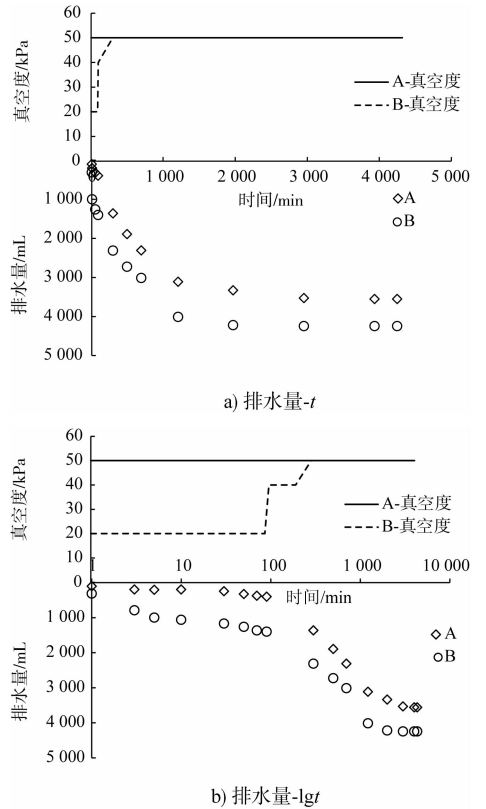
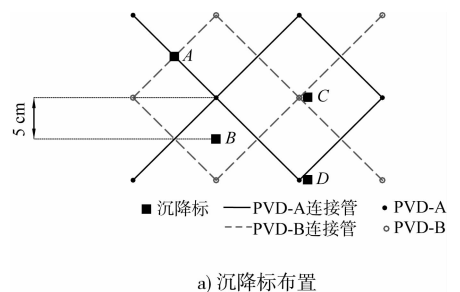


图 8 恒定真空与分级真空排水量随时间的变化

分级式真空预压的排水量小于恒定真空度的真空预压的排水量, 这是因为在试验仪器安置完毕后, 间隔 12 h, 此段间隔是沉降标的沉降稳定需要, 以求获取准确的初始沉降值。同时, 因竖向排水通道的打设, 以及仪器布置对土体的扰动, 使其静止一段时间后密封膜外有一定量的覆水, 试验开始阶段即为抽覆水的阶段。图 8b) 中前 5 min 恒定真空的排水量远大于分级式真空(20 kPa), 但从第 100 min 真空度的调节开始, 分级式真空预压的排水量增加量大于恒定真空度的真空预压。

为监测土体表面的差异沉降, 分别在距离塑料排水板不同位置处设置竖向沉降标, 布置如图 9a) 所示, 其沉降随时间变化规律如图 9b) 所示。



a) 沉降标布置

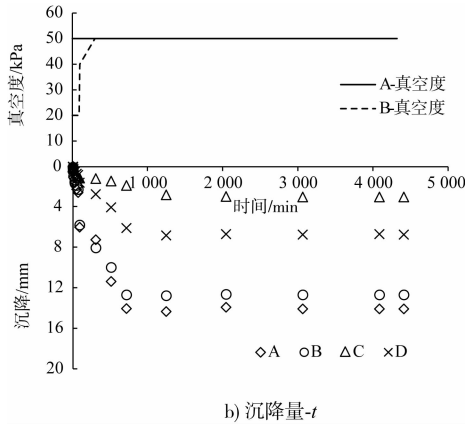


图9 距排水体不同距离处沉降时间变化

图9中，在距离排水通道不同位置处出现差异沉降。排水板中心对称点A点的最终沉降值为14.3 mm，较排水板连线中点B点(13.4 mm)、排水板附近的点C点(6.8 mm)、D点(5.3 mm)均大。表明真空预压处理超软土过程中，土体颗粒在孔隙水排出过程中存在迁移现象，出现明显的“土桩现象”：排水板附件土体沉降值小于排水板打设中心位置处的土体沉降值。

同时可以发现，PVD-B排水板附近测点(C点)的沉降量要大于PVD-A的沉降量(D点)，若以排水板中心对称点处的沉降平均值为参考面，考虑土体颗粒在孔隙水排出过程中的迁移，C点土柱隆起高度为7.0 cm，而D点土柱隆起高度为8.5 cm，C点隆起高度为D点的82.4%，说明PVD-B的颗粒迁移量要大于PVD-A的颗粒迁移量。因此，在相同的试验条件下，仅通过对比控制真空度的方法，分级式真空预压相比恒定真空度的真空预压，其缓解“土桩”现象有较明显的效果。

### 3.2 异步真空预压

在进行分级式真空预压与恒定真空预压试验时，因沉降标安装后至稳定需要的时间较长，此时会产生较多的膜下覆水，为消除膜下覆水对排水量的影响，异步吸水真空预压试验不对表层沉降进行监测，其真空度控制过程见表2。

开启A系统和B系统的真空泵，其中A瓶和B瓶的真空控制阀部分关闭，控制真空度在表2的设计值附近。

表2 异步吸水过程中真空度控制

时间/min	真空压力/kPa	
	A	B
0 ~ 100	10	20
100 ~ 200	30	20
200 ~ 300	30	40
300 ~ 400	45	40
400 ~ 4 320	45	45

图10是排水量随时间变化，在相同时间下采用不同的真空度：A系统排水量为3 840 mL，B系统为4 804 mL，大于A系统，主要是因为B系统在前100 min内真空度大于A系统。将异步真空预压中A系统和B系统排水量相加，作为总排水量，同样对分级式真空预压的排水量做相同处理，得到分级式真空预压与异步真空预压的排水量变化图(图11)。前1 000 min两者排水量相近，后期尽管两者真空度相近，但异步真空预压排水量大于分级式真空预压，这是因为前期的异步真空预压有助于形成超软土排水结构，避免细颗粒的过量迁移造成排水体及附近土体的淤堵。至本试验结束时，异步真空预压排水量是分级式真空预压的1.1倍，表明在相同试验条件下，采用异步真空预压处理超软土时，其处理效果优于分级式真空预压。

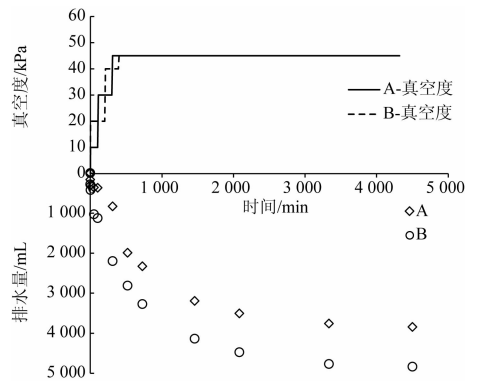


图10 异步真空预压排水量变化

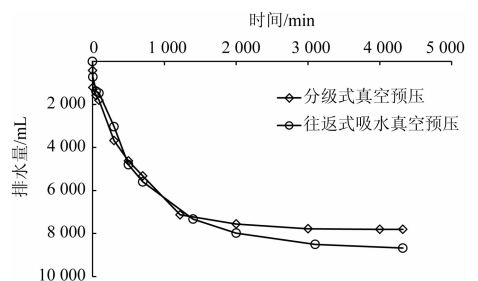


图11 不同吸水方式下的真空预压排水量变化

### 4 异步真空预压法的机理

超软土在真空预压初期, 因其含水率过高, 细颗粒含量多, 此时直接施加较大真空度时, 会造成排水体的淤堵现象。对此, 已有学者提出采用分级式真空预压<sup>[8-9]</sup>来缓解排水体的淤堵, 其主要出发点在于放缓细颗粒迁移速度, 从而阻止细颗粒的快速聚集, 堵塞排水通道。若细颗粒的动力来源于孔隙水排出时对其产生的渗流力:

$$j = \rho_w g i \quad (1)$$

式中:  $j$  为渗流力;  $\rho_w$  为水的密度;  $i$  为水力梯度。

首先分析常规吸水方式下细颗粒的迁移。如图 12 所示, 竖向排水体以塑料排水板为例, 左侧为塑料排水板 A, 右侧为塑料排水板 B。若在恒定真空度作用下, 塑料排水板 A 和塑料排水板 B 的水力梯度分别为  $i_{1A-max}$  和  $i_{1B-max}$ , 假定水力梯度在超软土中随距离呈线性减少, 则在传统真空预压下, 水力梯度最小点位于两塑料排水板中心位置处, 计为  $i_{1-min}$ , 该处孔隙水的渗流速度应为 0, 可称为零速面。此时, 保持恒定的高真空度, 超软土中的孔隙水会在真空负压造成的水力梯度下, 向排水通道排出, 并对细颗粒产生拖拽力, 促使细颗粒向排水通道聚集, 且水力梯度越大, 其聚集越明显, 土体渗透系数越低, 最终出现淤堵现象。

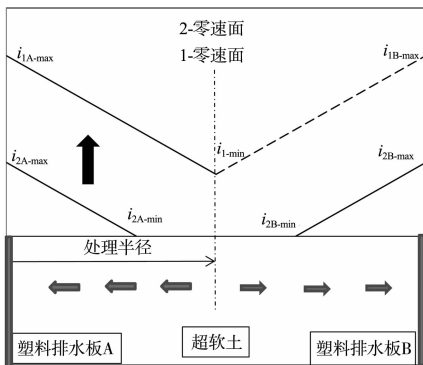


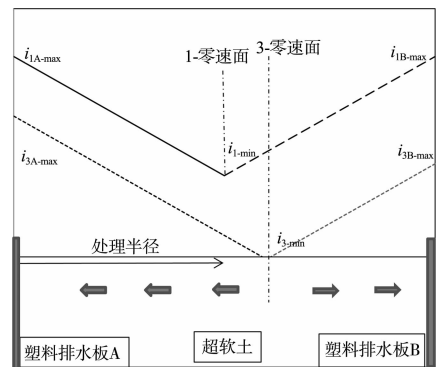
图 12 常规吸水方式的细颗粒迁移原理

若采用分级式加载真空预压, 记塑料排水板 A 和塑料排水板 B 的水力梯度分别为  $i_{2A-max}$  和  $i_{2B-max}$ , 逐渐提高塑料排水板中的真空度,  $i_{2A-max}$  和  $i_{2B-max}$  逐渐变大直至最大值, 此过程中通过对  $i_{2A-max}$

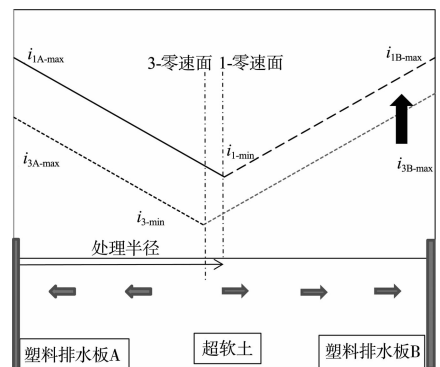
和  $i_{2B-max}$  的控制, 实现细颗粒的缓慢流失, 促使稳定拱架结构的形成, 同时减缓细颗粒向排水体的聚集速度。与恒定真空相比, 分级式加载方式通过渐调排水体的真空度, 控制细颗粒流失与聚集速度, 从而缓解真空预压处理超软土造成的排水体淤堵现象。需要说明的是, 常规吸水方式中, 零速面始终保持在塑料排水板的处理半径附近。

为了方便与传统真空预压对比, 保留传统真空预压最大水力梯度为  $i_{1A-max}$  和  $i_{1B-max}$ , 最小水力梯度为  $i_{1-min}$ ; 异步真空预压中塑料排水板 A 和塑料排水板 B 的水力梯度分别为  $i_{3A-max}$  和  $i_{3B-max}$ , 最小水力梯度为  $i_{3-min}$ 。

如图 13a), 异步真空预压在初始  $t_1$  时刻, 此时  $i_{3B-max}$  小于  $i_{3A-max}$ , 土中水力梯度分布形式不同于常规吸水方式, 其零速面靠近真空度较小的 B 板, 此后, 孔隙水及细颗粒主要向 A 板聚集; 经过一段时间至  $t_2$  时刻, 如图 13b), 此时提高 B 板真空度, 零速面向 A 板移动, 孔隙水及细颗粒主要向 B 板聚集, 此时零速面靠近 A 板。



a)  $t_1$ 时刻: A板真空度 > B板真空度



b)  $t_2$ 时刻: A板真空度 < B板真空度

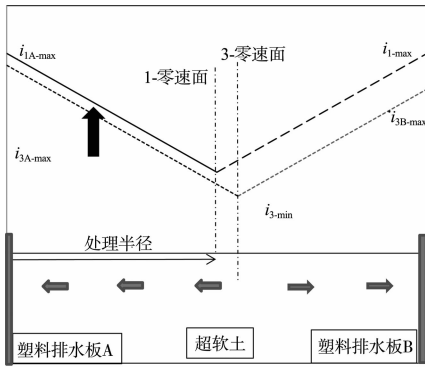
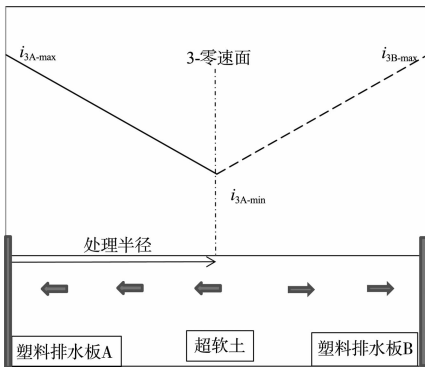
c)  $t_3$ 时刻: A板真空度>B板真空度d)  $t_4$ 时刻: A板真空度=B板真空度

图 13 异步真空加载原理

重复上述调解过程,因细颗粒迁移速度远小于孔隙水的流出速度,因此可通过调节A板和B板的真空度,使超软土中的细颗粒随着孔隙水的主要排出方向的改变,而放缓聚集速度,进而避免土桩的形成。同时也可保持零速面移动范围内的细颗粒含量,防止因细颗粒的流失形成孔隙比较大的土骨架,使其在上部真空预压作用下排出孔隙水,提高土体强度。

## 5 结论

1) 提出一种可应用于真空预压处理超软土过程中的异步真空预压法,其工作原理是对相邻的竖向排水体在同一时间下施加不同的真空度,实现对超软土的异步真空吸水预压。

2) 通过室内模拟堆场,模拟现场异步真空预压的布置及真空调节,结果发现,分级式真空预压相比恒定真空度的真空预压,其土柱隆起高度为恒定真空度条件下土柱高度的82.4%,其缓解“土桩”现象有较明显的效果,同时,异步吸水真空预压排水量是分级式真空预压的1.1倍,排水效果优于分级式真空预压。

3) 通过对异步真空预压法的机理分析,认为异步真空预压法可保持零速面移动范围内的细颗粒含量,使超软土中的细颗粒随着孔隙水的主要排出方向的改变,而放缓聚集速度,进而延缓或避免土桩的形成。

## 参考文献:

- [1] 胡继业,王波,刘宏伟,等.惠州荃湾吹填淤泥地基浅表层真空预压处理[J].水运工程,2015(9):152-157.
- [2] 万钊,关云飞,唐彤芝.某围海造陆地基处理技术探讨[J].土工基础,2010,24(5):1-3.
- [3] 陈平山,董志良,张功新.新吹填淤泥浅表层加固中“土桩”形成机理及数值分析[J].水运工程,2012(1):158-163.
- [4] 唐彤芝,黄家青,关云飞,等.真空预压加固吹填淤泥土现场试验研究[J].水运工程,2010(4):115-122.
- [5] Haegeman W, VanImpe W F. Filtration performance testing of geotextiles for vacuum consolidation drains[J]. Geosynthetics International, 1999(1):41-51.
- [6] 冯军,刘爱民,高志义.真空预压加固流泥效果分析[J].中国港湾建设,2011(2):35-38.
- [7] 颜永国,董志良,杨昌斌,等.颗粒级配对真空预压法处理吹填土效果影响试验研究[J].岩土工程学报,2011(11):1775-1779.
- [8] 宋晶.分级真空预压法加固高黏性吹填土的模拟试验与三维颗粒流数值分析[D].长春:吉林大学,2011.
- [9] 苑晓青.新型真空预压法室内模拟试验与沉降的预测研究[D].长春:吉林大学,2012.
- [10] 陈庚,陈永辉,陈龙,等.超软土异步真空吸水预压法:中国,201310096244.X[P].2014-11-19.

(本文编辑 郭雪珍)