

# 滤管踩入式真空排水加固超软土技术及现场试验研究

梁爱华<sup>1, 2, 3</sup>, 刘建军<sup>4</sup>, 李明英<sup>1, 2, 3</sup>, 李卫<sup>1, 2, 3</sup>

(1. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222; 2. 港口岩土工程技术交通行业重点实验室, 天津 300222;  
3. 天津市港口岩土工程技术重点实验室, 天津 300222; 4. 海洋石油工程股份有限公司, 天津 300461)

**摘要:** 通过现场试验验证了滤管踩入式真空排水加固超软土新技术, 并通过和同等条件下常规超软土浅层真空预压加固工艺、加固效果以及工程造价进行对比, 认为滤管踩入式真空排水加固超软土新技术施工工艺简单、造价低廉, 加固效果和常规真空预压加固效果相当, 是一种具有大面积推广意义的新技术。在新近吹填土地基中采用较小的排水板间距(0.4~0.6 m), 可有效提高吹填土地基加固强度, 缩短加固时间。成功解决了超软土地基加固后沉降量显著而强度增加数值较小的问题。

**关键词:** 真空排水加固; 超软土; 现场试验; 排水板; 间距

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)S2-0712-05

作者简介: 梁爱华(1975-), 女, 天津人, 硕士, 高级工程师, 主要从事沿海软土地基处理。E-mail:liangah75@sina.com。

## Vacuum preloading technology for ultra soft soils with footed-in filter tubes and its field tests

LIANG Ai-hua<sup>1, 2, 3</sup>, LIU Jian-jun<sup>4</sup>, LI Ming-ying<sup>1, 2, 3</sup>, LI Wei<sup>1, 2, 3</sup>

(1. CCCC Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 2. Key Laboratory of Port Geotechnical Engineering of the Ministry of Communication, Tianjin 300222, China; 3. Key Laboratory of Port Geotechnical Engineering of Tianjin, Tianjin 300222, China;  
4. Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China)

**Abstract:** A new vacuum preloading technology for ultra soft soils with footed-in filter tubes is verified through field tests. Compared with the construction technology reinforcement effect and engineering cost of the conventional vacuum preloading technology for surface-layer of ultra soft soils, the new technology is characterized by simple construction technology, low cost and good reinforcement effect. The technology is worthy of being widely spread. Smaller distance of drainage plates (0.4~0.6 m) in newly reclaimed ground can effectively improve the reinforcement effect and reduce consolidation time. The technology has successfully solved the problem that ultra soft foundation has large settlement but low strength increase after reinforcement.

**Key words:** vacuum preloading technology; ultra soft soil; field test; drainage plate; distance

## 0 引言

中国每年完成的吹填造陆面积超过  $1.0 \times 10^8 \text{ m}^2$ 。受吹填土源情况的影响, 吹填形成的陆域多为疏浚软黏土或超软黏土, 采用传统真空预压法进行处理时, 存在如下问题: ①砂源紧张: 疏浚软黏土强度低, 需要铺设 60~90 cm 的粉细砂来形成上施工机械的工作面; 传统真空预压工艺需要铺设 40 cm 的中粗砂作为水平排水垫层。 $1.0 \times 10^8 \text{ m}^2$  的加固区需要  $4 \times 10^7 \text{ m}^3$  的中粗砂,  $(6\sim9) \times 10^7 \text{ m}^3$  的粉细砂, 目前砂源紧张且价格昂贵, 开采巨量自然资源, 严重破坏生态环境; ②工期长: 由于粉细砂来源渐缺, 难以采用硬壳层的方法来形成工作面, 插板施工机械短期难以进入吹填区; ③加固后地基强度低: 采用排水固结方法加固新

吹填的流泥、浮泥, 经过 5~7 个月的满载预压加固, 地基沉降量显著, 但加固后强度增加数值较小<sup>[1]</sup>, 不能满足地基的使用要求。

本文针对疏浚吹填土地基加固存在的问题, 开发了滤管踩入式真空排水加固超软土技术。

## 1 滤管踩入式真空排水加固超软土技术工艺及原理

### 1.1 主要工艺

进行吹填土地基加固设计, 根据加固深度及加固面积裁截一定长度、一定数量的排水板, 把排水板绑扎在滤管上, 间距 40~60 cm; 利用人工插板装置把

塑料排水板插入预定深度, 随着排水板插入的同时把滤管水平压入泥下一定深度; 滤管通过出泥装置和抽真空设备连接; 进行真空预压加固, 时间 20~60 d。

### 1.2 加固机理

该技术加固机理和普通真空预压加固机理相同<sup>[2]</sup>, 不同的是以表层原位淤泥作为密封层, 以滤管作为排水通道, 真空负压通过滤管、排水板直接向地基土传递, 完成地基加固。

### 1.3 适用范围及特点

该技术适用于新近吹填的超软土地基或流塑状态的待加固地基。该技术不使用砂石料、荆(竹)笆等自然资源, 环保; 加固后地基承载力可达到 5~8 t; 加固工期短; 该工艺取消了用作施工垫层的土工布、水平排水砂垫层和密封膜, 工艺简单, 便于施工, 经济。

## 2 现场试验

### 2.1 试验目的及研究内容

任何一种工艺的应用推广都要经过反复验证, 滤管踩入式真空排水加固超软土技术在室内模型试验中是可行的, 需现场进一步验证。试验内容如下: ①选择试验场地, 对其地质情况进行勘察。②进行常规真空预压工艺和滤管踩入式真空排水新工艺试验设计。③通过试验监测及检测, 分析两种工艺在抽真空过程中沉降、孔压变化, 比较加固前后土性指标的变化, 对新工艺的加固效果进行评价。④从加固效果、经济、环保等方面对两种工艺进行对比, 分析新工艺的应用前景。

### 2.2 试验区土质

试验区位于临港产业区, 加固面积 1200 m<sup>2</sup>。该区域为新近吹填土, 表层土基本为流泥, 吹填土深度为 4 m 左右。方案设计前对试验区进行加固前原位取土和室内土工试验。采用薄壁取土器取土, 取土样本为 80 个, 取土深度最深为 3.5 m, 室内土样分析结果见表 1。

表 1 加固前试验区取土室内试验结果

Table 1 Indoor experiment results of soils before reinforcement

名称	含水率 w/%	湿密度 $\rho$ /( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	黏粒含量 (<0.005 mm) %	孔隙比 e	液限 $w_L$ /%	塑性指数 $I_p$	液性指数 $I_L$	十字板强度度 /kPa
最大值	104.0	1.69	60	2.9	50.4	27.2	3.5	3.0
最小值	73.2	1.45	52	1.5	40.5	20.1	1.5	0.7
平均值	86.9	1.53	56	2.3	45.0	23.4	2.7	2.0

加固区初始含水率均值大于 85%, 十字板强度均值 2.0 kPa; 黏粒含量均值为 56%, 属于典型的超软黏

土<sup>[3]</sup>。

### 2.3 现场试验设计

试验加固区分为 4 个区, 分别为 B1 区、B3 区、E1 区、E2 区。

#### (1) 常规真空预压区试验方案

B1 区、B3 区采用常规真空预压方案, 工艺断面见图 1。加固面积分别为 300 m<sup>2</sup>; B1 区排水板间距 60 cm, B3 排水板间距 40 cm, 打设深度 3.5 m, 正方形布置; 每两排排水板之间铺设一根滤管, 排水板直接绑扎在滤管上, 铺设 30 cm 黄砂垫层; 一次性铺设两层密封膜, 两区共用一台射流泵。真空预压加固处理地基要求板内真重度保持 80 kPa 以上, 抽真空 60 d。

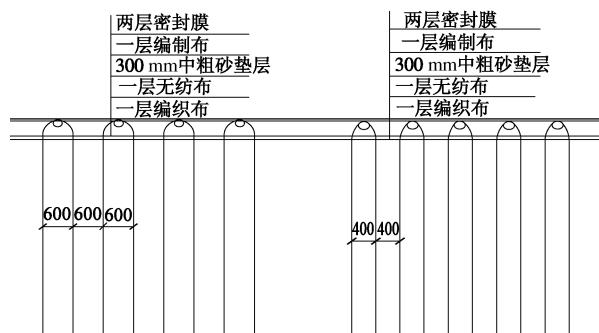


图 1 常规真空预压工艺断面

Fig. 1 Section of conventional vacuum preloading

#### (2) 滤管踩入式真空排水加固工艺试验方案

E1 区、E2 区采用滤管踩入式真空排水加固工艺试验方案, 工艺断面见图 2, 加固面积均为 300 cm<sup>2</sup>。E1 区排水板间距 60 cm, E2 区排水板间距 40 cm, 正方形布置, 两区排水板打入泥下深度为 2.5 m。先将排水板绑扎在滤管上, 随着排水板的打入, 滤管踩入泥下, 踩入深度为 30~50 cm。加固区内所有滤管和中间主滤管相连通, 主滤管通过出泥装置和射流泵相连, 两个区共用一台射流泵。真空预压加固处理地基要求板内真重度稳定地保持 80 kPa 以上, 抽真空时间为 60 d。

### 2.4 试验实施

#### (1) 常规真空预压工艺实施

##### a) 铺设施工通道

试验区表层强度很低, 不能直接上人, 为确保施工人员行走和材料运输安全, 需要在加固区表面铺设施工通道和工作界面。试验区施工通道采用建筑用竹胶板, 在竹胶板的两端打眼, 用绳子连接。

##### b) 铺设土工布

在加固区超软土表面铺设一层 200 g/m<sup>2</sup> 的编织布和一层 250 g/m<sup>2</sup> 的无纺布。土工布形成一个工作界面, 可以保证施工人员安全, 同时有效阻止土颗粒进入排

水砂垫层中。

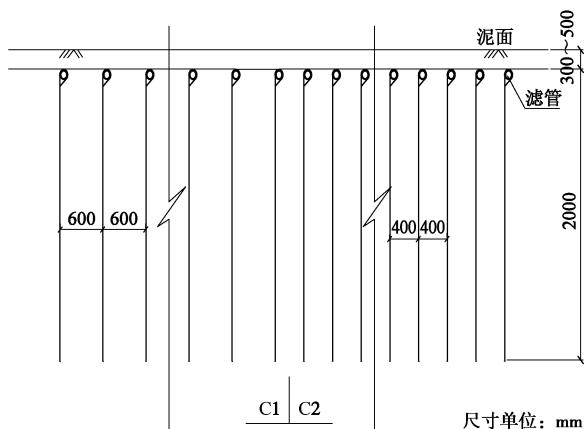


图 2 滤管踩入式真空排水加固工艺断面图

Fig. 2 Section of vacuum preloading with footed-in filter tubes

### c) 塑料排水板打设

塑料排水板打设施工前，先在打设区域预打板，判断打设深度，根据打设深度和外露尺寸，将排水板剪成满足打设深度和外露长度要求的短板，并将端头用胶带包裹好，防止负压抽气过程中土颗粒从排水板端头吸入板芯造成排水板堵塞。排水板打设见图 3。



图 3 排水板端头包裹及打设

Fig. 3 Installation and end packaging of drainage plate

### d) 排水板和滤管绑扎

塑料排水板外露长度不小于 0.5 m，打设完毕后在每两排排水板之间布设一根滤管，把排水板头直接绑扎到滤管上，该措施可减少真空间隙在砂垫层中的损失。

### e) 铺设砂垫层

为了保证真空负压在膜下均匀分布，在加固区铺设 30 cm 厚的黄砂垫层，采用人工方式铺设。

### f) 铺设密封膜、加载抽气

为防止黄砂刺破密封膜，在黄砂表面铺一层编织布 ( $200 \text{ g/m}^2$ )。一次性铺两层密封膜，在边界处把密封膜踩入泥下 0.5 m 以上，铺膜后用黏土回填密封沟。安放抽真空装置，加载、抽气。

## (2) 滤管踩入式真空排水加固工艺实施

### a) 排水板和滤管连接

排水板裁截。试验中排水板的打设深度为 2.5 m，滤管压入泥面下 50 cm，排水板环绕滤管的弯折长度为 15 cm，排水板打入端的弯折长度为 10 cm，经计算排水板的裁截长度为 2.3 m/根。裁截数量根据加固区面积和排水板打设间距确定。

排水板两端用胶带密封，防止在加固过程中，土颗粒进入排水板，堵塞排水通道。排水板向下弯折 15 cm，环绕滤管，用自拉锁固定，施工图片见图 4。



图 4 排水板和滤管连接

Fig. 4 Connection between drainage plate and filter tube

### b) 排水板的打设和滤管踩入

夏季高温，试验区表面形成了大概 10 cm 厚的硬壳，影响滤管的踩入，排水板打设前将表层硬壳划开（如果地表没有硬壳可直接插板）。施工人员根据排水板打设间距，按排水板滤管连接顺序，把排水板端头弯折，用镀锌打设管插入弯折部位，垂直压入泥下；在压入的同时，把滤管踩入泥下预定位置；在踩入过程中，排水板要拉紧，不发生弯折，滤管压入要平直，不允许扭曲、弯折、破损。图 5 为施工照片。



图 5 排水板打设和滤管踩入

Fig. 5 Installation of drainage plates and footed-in filter tubes

### c) 抽气加载

E1 区和 E2 区共用一台射流泵，区内滤管全部踩入泥下，主滤管通过出泥装置和真空泵相连。抽真空设备安装完成后，加固区覆水（防止地表开裂），试抽气。由于所有滤管埋于泥下，密封性非常好，真空压力很快上升到 85 kPa 以上，并稳定保持。

## 4 试验区监测、检测及加固效果分析

### 4.1 孔压观测

孔压仪均埋设在 4 根排水板中心位置。加固区孔压消散统计及根据孔压消散计算的应力固结度见表 2。

表 2 加固区孔压消散统计及应力固结度计算值

Table 2 Statistics of pore water pressure dissipation and calculated values of stress consolidation degree in reinforced area

加固区	B1	B3	E1	E2
孔压消散值/kPa	35.7	73.7	18.7	68.7
应力固结度/%	52.6	91.3	21.1	85.3

排水板间距为 60 cm 的区孔压消散值偏小。常规真空预压区孔压消散值大于滤管踩入式真空排水区。

### 4.2 表层沉降及固结度计算

表层沉降及固结度推算值(双曲线法<sup>[4]</sup>)见表 3。

表 3 试验区表层沉降统计及固结度推算值

Table 3 Surface settlement and consolidation degree of test area

加固区	打板深度/mm	插板沉降/mm	预压沉降/mm	总沉降/mm	最终沉降/mm	每延米压缩量/mm	固结度/%
B1	3500	134.0	589.6	723.6	1066.2	206.6	67.8
B3	3500	312.0	698.3	1010.3	1023.8	288.7	98.7
E1	2500	73.5	450.0	523.5	755.8	209.4	69.3
E2	2500	132.0	535.0	667.0	773.9	266.8	86.2

经过 60 d 的加固, 60 cm 排水板间距的 B1 区、E1 区推算固结度值小于 40 cm 间距的 B3 区、E2 区。

滤管踩入区(E1、E2 区)加固深度 2.5 m, 常规区 3.5 m, 其最终沉降量小于常规真空预压区(B1、B3 区), 但每延米软土的压缩量很接近, 说明滤管踩入式真空排水加固超软土工艺和常规真空预压工艺的加固效果是大致相当的。

### 4.3 土质变化

加固前卸载后含水率、湿密度变化均值见表 4。

表 4 试验区加固前后含水率、湿密度对比

Table 4 Comparison of moisture contents and wet densities before and after reinforcement

加固区	含水率/%			湿密度/(g·cm <sup>-3</sup> )		
	固前	固后	变化/%	固前	固后	变化/%
B1	82.97	46.15	-44.38	1.53	1.76	15.07
B3	85.01	43.43	-48.91	1.52	1.78	16.93
E1	82.90	48.05	-42.04	1.51	1.74	15.49
E2	81.97	43.73	-46.66	1.53	1.78	16.56

两种工艺相同排水板间距的加固区加固前后含水率、湿密度变化幅度相差不大, 常规真空预压工艺 60 cm 排水板间距加固效果略好于滤管踩入式真空排水加固区, 40 cm 排水板间距加固区两者大致相当。

### 4.4 十字板检测

在加固前后及加固 20, 40 d 分别进行原位十字板检测, 统计值见表 5。

表 5 加固过程及加固后各区十字板强度平均值统计

Table 5 Average values of cross plate strength of each region during and after reinforcement

时间 /d	B1 区 /kPa	B3 区 /kPa	E1 区 /kPa	E2 区 /kPa
加固前	2.3	2.5	1.1	0.7
20	4.8	13.8	2.9	10.1
40	7.1	21.4	6.5	19.5
60	13.0	26.4	11.0	23.6

相同排水板间距的加固区加固前后十字板强度变化幅度相差不大, 常规真空预压工艺 60 cm 排水板间距加固效果略好于滤管踩入式真空排水工艺加固区, 40 cm 排水板间距十字板强度大致相当。

### 4.5 排水板间距对加固效果的影响

试验区采用两种排水板间距 40, 60 cm, 虽然加固工艺不同, 但表现出的规律大体相同。从加固后土质变化、土体强度增长、固结度变化等方面看, 排水板间距 40 cm 的加固区加固效果远好于排水板间距 60 cm 的加固区。

排水板间距 40, 60 cm 远低于传统真空预压法中推荐的排水板间距(0.7~1.3 m)<sup>[4]</sup>, 一般认为排水板打设过程中会造成涂抹效应<sup>[5]</sup>, 排水板过密因涂抹作用存在使加固效果变差, 并且不经济。新近吹填的超软土属于扰动土, 没有形成明显的土骨架, 排水板打设产生涂抹效应对加固效果的影响不明显。

40 cm 排水板间距加固区加固 60 d 后十字板强度大于 20 kPa, 成功解决了超软土地基加固后沉降量显著, 强度增加数值较小的问题。

## 5 两种工艺对比及应用前景分析

### 5.1 工艺对比

两种方案均需要搭设浮板作为工作界面和施工通道, 均采用人工打板装置进行排水板打设, 排水板打设前均根据排水板打设深度等进行排水板裁截, 排水板打设端封闭和弯折。区别在于滤管踩入式真空排水加固超软土方案, 取消了砂垫层和密封膜, 将排水板直接绑扎在滤管上, 踩入泥下, 施工简洁。常规真空预压方案施工速度慢于滤管踩入式真空排水加固超软土加固方案。

### 5.2 真空度保持

常规真空预压方案由于铺设了密封膜, 真空压力在加压初期提升较快。满载计时后, 真空度保持稳定, 只需维护电机和真空泵正常运行即可。

滤管踩入式真空排水加固超软土方案, 滤管全部踩入泥下, 密封较好, 在加压初期, 真空压力提升较

快。满载计时后，有工人检查真空泵直接在（没有铺设浮板）加固区内走动，因加固初期，泥面强度不足，工人踩踏在泥下滤管旁形成陷坑，造成一次真空压力掉落，修复后，真空度一直保持稳定，直到卸载。

从真空度保持方面看，滤管踩入式真空排水加固区和铺了密封膜的常规真空预压区效果是相同的。加固初期，在滤管踩入式真空排水区内走动需要搭设浮板。

### 5.3 加固效果对比

根据试验数据统计，排水板间距相同的情况下，常规真空预压 B 区和滤管踩入式真空排水 E 区加固效果（考虑土质均匀性、实验误差及计算误差）相当。

### 5.4 经济对比

通过在同等条件下，以排水板间距 40 cm、正方形布置，打设深度为 3 m，加固面积 300 m<sup>2</sup>为例做两种方案同等条件下经济对比，见表 6、7。

表 6 滤管踩入式真空排水加固超软土方案的工程造价

Table 6 Project cost of vacuum preloading for ultra soft soils with footed-in filter tubes

项目名称	单位	工程数量	单价 /元	合计 /元
人工打设塑料排水板	m	5370	2.5	13425
真空预压加固 60 d	m <sup>2</sup>	300	50	15000
合计				28425
每平米单价				94.8

表 7 常规真空预压加固方案的工程造价

Table 7 Project cost of conventional vacuum preloading

序号	项目名称	单位	工程数量	单价 /元	合计 /元
1	铺编织布/(150g·m <sup>-2</sup> )	m <sup>2</sup>	300	2.6	780
2	铺无纺布/(200g·m <sup>-2</sup> )	m <sup>2</sup>	300	3.5	1050
3	人工打设塑料排水板	m	7160	1.8	12888
4	黄砂	m <sup>3</sup>	90	80.0	7200
6	真空预压 60 d	m <sup>2</sup>	300	40.0	12000
合计				33918	
每平米单价				113.1	

滤管踩入式真空排水方案单价为 94.8 元/m<sup>2</sup>，常规真空预压方案单价为 113.1 元/m<sup>2</sup>，新方案地基标高比常规真空预压低 30 cm（黄砂垫层），考虑采用吹填淤泥的方式补齐标高，吹填淤泥 10 元/m<sup>3</sup> 计，落淤 50%，补齐标高费用为  $10 \times 0.6 = 6$  元/m<sup>2</sup>。滤管踩入式真空排水方案比常规真空预压方案减少费用 12.3 元 /m<sup>2</sup>，综合成本节约率为 10.9%。

### 5.5 应用前景分析

滤管踩入式真空排水加固超软土技术适用于流塑状态的吹填土地基加固，既可以单独采用，也可以作为超软土地基的预处理。对于临时路、绿化带等对承

载力和沉降要求不是特别高的地基，可以单独采用，既降低了工程造价，又具有明显的时间效益。对于一些后期使用要求不明确的吹填造陆工程，常常只需要对地基浅层进行初步处理，在浅层形成具有一定的承载力工作垫层，满足后期人员和机械进场的要求、达到卖地或工程初步需要。

## 6 结 论

本文通过现场试验，对两种试验方案进行了细致研究，得到以下 2 点结论。

(1) 本文提出并验证了一种新技术——滤管踩入式真空排水加固超软土技术。该技术适合新近吹填的高含水率疏浚土，和常规的浅层真空预压方案相比，取消了用作施工垫层的土工布、水平排水砂垫层（土工合成材料排水垫层）和密封膜。施工工艺更为简洁、迅速，经济。加固效果和常规浅层真空预压加固方案相当。具有良好的应用前景。

(2) 在新近吹填土地基中采用较小的排水板间距(0.4~0.6 m)，可有效提高吹填土地基加固强度，缩短加固时间。试验区加固前强度不足 3 kPa，采用排水间距 0.4 m，加固 60 d 后十字板强度大于 20 kPa，成功解决了吹填超软土真空预压加固后强度低的问题。

### 参 考 文 献:

- [1] 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 Guo-liang, GUO Shu-jun, ZHU Yao-ting. Analysis on engineering property of ultra soft soil[J]. China Harbour Engineering, 2010(5): 1~9. (in Chinese))
- [2] 高志义. 真空预压法的机理分析[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(4): 11~23. (GAO Zhi-yi. Analysis on mechanics of vacuum preloading method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(4): 11~23. (in Chinese))
- [3] JTS 147—1—2010 港口工程地基规范[S]. 2010. (JTS 147—1—2010 Code for soil foundations of port engineering[S]. 2010. (in Chinese))
- [4] JTS 147—2—2009 真空预压加固软土地基技术规程[S]. 2009. (JTS 147—2—2009 Technical specification for vacuum pereloding technique to improve soft soils[S]. 2009. (in Chinese))
- [5] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. (GONG Xiao-nan. Foundation treatment manul[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)