

DOI: 10.11779/CJGE2016S1032

# 土工织物复合垫层法在新吹填软土地基加固中的应用与效果分析

陈运涛<sup>1, 2</sup>, 王贵君<sup>1</sup>, 孟凡强<sup>3</sup>, 许 岩<sup>3</sup>

(1. 河北工业大学, 天津 300401; 2. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 港口岩土工程技术交通行业重点实验室, 天津市港口岩土工程技术重点实验室, 天津 300222; 3. 天津泰达海洋开发有限公司, 天津 300480)

**摘要:** 使用真空预压工艺加固软土地基时通常使用中粗砂作为水平排水通道。针对铺设土工织物复合垫层的新吹填软土地基加固试验区为研究背景, 解决了水平排水系统、人造表层硬壳层和轻型插板设备等关键施工技术。通过加固过程中对孔隙水压力和地表沉降的监测, 掌握了该工艺地基土体变形规律; 加固前后取土和地基承载力检测数据表明加固后吹填土层含水率、孔隙比明显减小, 地基承载力达到 80 kPa。试验数据证明采用土工织物复合垫层可有效替代传统中粗砂垫层, 为后续大面积地基处理工程提供了参考。

**关键词:** 土工织物; 复合垫层; 新吹填土; 地基加固; 工程实例

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)S1-0169-04

作者简介: 陈运涛(1980-), 男, 高级工程师, 主要从事软土地基处理方面的科研工作。E-mail: chenyuntao@163.com。

## Application and analysis of the geotextile composite cushion in the ground improvement of the new dredger fill

CHEN Yun-tao<sup>1, 2</sup>, WANG Gui-jun<sup>1</sup>, MENG Fan-qiang<sup>3</sup>, XU Yan<sup>3</sup>

(1. Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. CCCC Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd., Key Laboratory of Port Geotechnical Engineering of the Ministry of Communication, Key Laboratory of Port Geotechnical Engineering of Tianjin, Tianjin 300222, China; 3. Tianjin Teda Ocean Development Co., Ltd., Tianjin 300480, China)

**Abstract:** The vacuum preloading technology for reinforcing soft soil foundation often uses the coarse sand as the horizontal drainage channel. For laying geotextile composite cushion in the new dredger fill soft soil ground, key construction techniques such as horizontal drainage systems, artificial surface crust layer and light board equipment are achieved. By monitoring pore water pressure and surface subsidence, during improvement, the deformation law of foundation soil is grasped. The test data of bearing capacities of foundation and soil before and after improvement show that the water content, void ratio of reclaimed soil decrease obviously after improvement, and the bearing capacity of foundation is up to 80 kPa. The test data indicate that the geotextiles in composite cushion can effectively replace traditional coarse sand cushion. It may provide reference for soft ground improvement of subsequent large-area foundation.

**Key words:** geotextile; composite cushion; new dredger fill; foundation reinforcement; engineering example

## 0 引言

一般采用真空预压法加固新吹填软土地基时, 需要采用中粗砂垫层作为水平排水通道<sup>[1-3]</sup>, 随工程建设规模的不断扩大中粗砂资源越来越紧缺, 不少工程所用中粗砂都依靠外运, 推高了施工成本和工程建设难度。如果能在无砂源的条件下完成新吹填超软土地基加固, 将对工程建设的快速发展有重大意义<sup>[4]</sup>。本文针对某新吹填工程地基加固的特点, 采用复合土工织物垫层代替中粗砂垫层的施工工艺进行试验分析, 为新吹填土上快速经济取得土地提供一种新的方法。

渤海湾中部某工程, 地基处理面积约 40 万 m<sup>2</sup>, 原始泥面标高 1.5~2.0 m, 吹填后场地标高约 6.0 m。选取 50 m×50 m 作为土工织物复合垫层法的试验区, 通过孔隙水压力、沉降等现场监测和静载荷等检测试验, 对加固效果进行评价, 以期指导后续大面积施工。

## 1 试验区工程概况

### 1.1 地质条件

基金项目: 河北省应用基础研究计划重点基础研究项目(14965409D)

收稿日期: 2015-11-30

本工程的地基土为 Q4 后期沉积土和近期人工吹填土, 根据加固前的勘察资料, 地基土层由上到下依次为:

(1) 吹填土: 以灰色为主, 遍布整个场地。成分以淤泥、粉土及粉砂为主。厚度为 3.5~4.0 m, 尚未完全固结, 呈松散状, 强度极低, 无法上人。场地内局部分布淤泥包, 淤泥包含水率很大。

(2) 淤泥质黏土: 海相沉积土层, 灰褐色, 高压缩性, 软塑, 场区普遍分布, 厚度为 1.8~2.0 m。

(3) 粉质黏土: 海相沉积土层, 灰褐色, 中压缩性, 可一软塑, 场区普遍分布, 厚度为 3.5~4.2 m, 标贯击数 4~6 击。

根据以上叙述可知, 吹填土层及下卧淤泥质黏土层物理力学性质较差, 为本工程地基处理的主要加固土层。

## 1.2 施工工艺流程

试验区关键施工工艺如下:

(1) 排除场地表层积水后铺设一层编织布 (150 g/m<sup>2</sup>), 一层荆芭, 一层土工织物 (300 g/m<sup>2</sup>)。

(2) 采用轻型打板机进行排水板打设, 间距 0.8 m, 深度 7 m。

(3) 铺设滤管, 间距 0.8 m, 将排水板与滤管搭接后在滤管上铺设一层土工织物 (300 g/m<sup>2</sup>), 形成水平排水垫层。

(4) 铺设密封膜, 安装真空射流泵, 布置监测仪器, 正式抽气, 满载 85 kPa 计时。

(5) 满足固结度 85% 的卸荷标准后停泵卸载, 加固后效果检测。

## 1.3 关键技术研究

针对新吹填软土的特点, 采用土工织物复合垫层法要解决以下 3 个问题: 表层硬壳层选择、轻型插板设备选型和水平排水系统的设置。

### (1) 表层硬壳层选择

吹填土在吹填过程中破坏了原有土的结构, 形成高含水率、高灵敏度、承载力低的欠固结土。表层硬壳替代层铺设在吹填土表层后, 必须能够提高吹填土的承载能力, 满足轻型机械和人工施工要求。同时其还必须具有较好的渗透性、可以隔离下伏泥浆和费用低廉的特点。根据以上现场的实际需求和类似工程经验选择了土工织物作为硬壳层的替代材料。权衡土工织物承受上部荷载能力、堵塞效应、成本、施工便利程度等因素, 仅靠以土工织物作为表层硬壳层替代层不能满足施工要求。因此在原泥面先铺设一层 150 g/m<sup>2</sup> 的编织布 (编织布既可以增加人造硬壳层的承载力, 同时又可以阻止荆芭陷入泥中), 1 层 1 m×2 m 大小荆芭, 然后再铺设 300 g/m<sup>2</sup> 的土工织物。编织布、

荆芭和土工织物三者组成一个整体, 可以承受 8~12 kPa 的荷载, 人和轻型设备可以在上面作业。土工织物的具体指标见表 1。

表 1 土工织物指标

Table 1 Indices of geotextiles

项目	指标值
厚度/mm	≥2.4
断裂强力/(kN·m <sup>-1</sup> )	≥9.5
断裂伸长率/%	25~100
CBR 顶破能力/kN	≥1.5
垂直渗透系数/(cm·s <sup>-1</sup> )	10 <sup>-1</sup> ~10 <sup>-3</sup>
撕破强力/kN	≥0.24
原材料及物理特性	100%聚脂长丝无纺针刺

### (2) 轻型插板设备选型

普通打板设备由于机身重, 接地压力大, 新吹填超软基地表不经加固处理根本满足不了他的使用要求。针对新吹填软土的特点打板机要解决的关键问题是: 新机型的接地压力小, 附着性能好。

试验区排水板打设的过程中对门架式(轨道行走)打板机进行了改造, 减少了打设立柱的长度, 降低了整机重心及重量。普通打设 20 m 深排水板的打设机从立柱顶端到履带底面的高度应在 25 m 左右, 而立柱的长度应在 23 m 左右。针对试验区现场情况将打板机立柱的长度减少为 10 m, 则打板机从立柱顶端到轨道底面的高度变为 12 m, 这样只要打设排水板深度不超过 10 m 一次即可完成, 大大降低了设备重量和重心, 提高了设备的稳定性。

### (3) 水平排水系统的设置

与传统真空预压相比改进的水平排水系统滤管直接接受表层硬壳替代层的土工织物的压力。这时垂直方向所受压力接近于抽真空所引起的压力, 数值上与膜下真空度相同, 在这种受力条件下, 常规的滤管很容易被压扁, 从而失去传递真空度和自由水的目的, 试验时滤管的环刚度需满足施工要求。同时, 在试验过程中, 对滤管采取了在原有 3 层滤布的基础上进行了复裹措施, 既满足了滤布的抗拉强度要求, 又达到了试验所必需的渗透系数。滤管的性能指标见表 2。

表 2 软式滤管性能指标

Table 2 Performance indices of soft filter tubes

项目	标准	备注
管径/mm	40±2	管体
重量/(g·m <sup>-1</sup> )	≥120	
管体 环刚度/(kN·m <sup>-2</sup> )	≥15	
透水面积/(mm <sup>2</sup> ·m <sup>-1</sup> )	≥1600	
扁平试验	压至管径 1/2 不破裂	
单位面积质量/(g·m <sup>-2</sup> )	≥25	滤布包 5 层
滤布 渗透系数 $K_{20}$ /(cm·s <sup>-1</sup> )	≥0.1	
等效孔径 $O_{95}$ /mm	0.07~0.2	

## 2 现场监测结果与分析

### 2.1 地表沉降

在真空荷载的施加过程中, 地基中欠固结土的超净孔隙水压力逐渐消散, 孔隙水逐渐排除, 地表随之产生沉降<sup>[5]</sup>。

由图 1,2 可以看出, 各加固区前期沉降曲线较陡, 沉降速率较大, 前 3 d 各区最大沉降速率超过 50 mm/d, 说明试验区地基土含水率高, 欠固结程度高, 各区前 10 d 地表平均沉降速率均大于 20 mm/d;

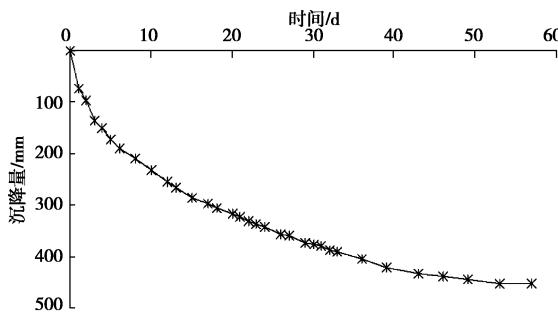


图 1 地表沉降时程曲线

Fig. 1 Time-history curves of surface settlement

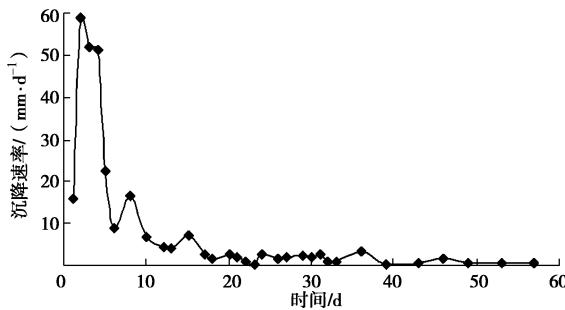


图 2 地表沉降速率时程曲线

Fig. 2 Time-history curves of surface settlement velocity

表明加固区内吹填土固结速度较快, 沉降主要发生在预压前期, 后期曲线较缓。随着固结时间的推移, 后期沉降曲线呈收敛的态势, 沉降曲线趋于平滑, 此时沉降盘的沉降速率明显变小, 沉降速率只有 1~2 mm/d 左右, 地基沉降已基本稳定。根据沉降曲线推算得到的卸载时固结度为 86.1%。

### 2.2 孔隙水压力

按照设计要求, 在打设塑料排水板后, 分别在 4 根排水板所围区域的中心位置不同深度处理设孔隙水压力测头, 用以监测预压施工期间土体内部孔隙水压力消散情况。测得的孔隙水压力曲线如图 3 所示。

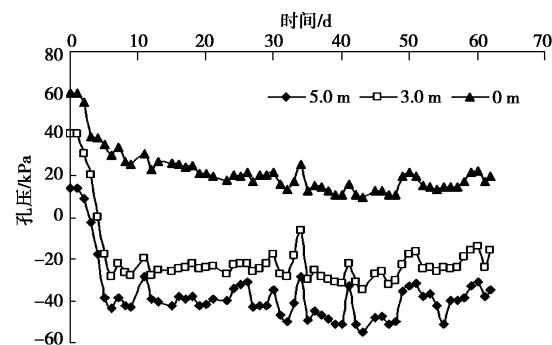


图 3 孔隙水压力变化时程曲线

Fig. 3 Time-history curves of pore water pressure

预压前地基内孔隙水压力明显大于测头位置的静水压力, 地基内存在一定程度的超静水压力, 地基土处于欠固结状态, 这一情况与地基土的应力历史基本吻合。卸载前孔压逐渐向上反弹是由于区内覆水逐渐排出, 荷载减小, 同时真空度逐渐下降的原因。

### 2.3 加固前后土性指标对比

为了了解加固的效果, 加固前、后在加固区中心进行原状取土, 进行室内土工试验。加固前、后各主要土层物理力学性质变化见表 3。

表 3 加固前后土的物理力学性质指标对比表

Table 3 Physical mechanical parameters of the soil before and after reinforcement

土层名称	前后增减	含水率 w/%	湿密度 $\rho$ / $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	孔隙比 $e_0$	塑性指数 $I_p$	液性指数 $I_L$	压缩系数 $a_{v1-2}$ / $\text{MPa}^{-1}$	压缩模量 $E_{s1-2}$ / $\text{MPa}$	试验方法	凝聚力 c/kPa	摩擦角 $\varphi$ / $(^\circ)$
吹填土(粉土及粉质黏土)	加固前	34.8	1.9	1.0	9.7	2.0	0.30	6.84			
	加固后	24.3	2.0	0.7	9.4	0.9	0.24	7.81	q	10.0	17.4
	增减/%	-30.1	5.1	-25.0	-3.9	-55.9	-19.5	14.2			
淤泥质黏土	加固前	43.4	1.7	1.3	19.0	1.2	0.97	2.33	q	8.3	3.0
	加固后	37.4	1.8	1.0	18.0	1.00	0.72	2.83	q	12.1	4.2
	增减/%	-13.8	5.7	-17.4	-5.3	-19.4	-25.8	21.5		45.8	40.0
粉质黏土	加固前	31.3	1.9	0.9	12.9	1.1	0.48	4.00	q	11.5	9.6
	加固后	28.9	1.9	0.8	12.4	1.0	0.38	4.99	q	14.4	13.7
	增减/%	-7.7	0.8	-5.9	-4.3	-11.4	-21.1	24.6		25.2	42.7

由表 3 可以看出, 加固后地基各土层土体含水率、孔隙比、压缩系数均有不同程度的变化, 其中吹填土层的含水率降低 30.1%, 孔隙比降低 25.0%, 压缩系数降低 19.5%; 淤泥质黏土层含水率降低 13.8%, 孔隙比降低 17.4%, 压缩系数降低 25.8%; 粉质黏土层含水率降低 7.7%, 孔隙比降低 5.9%, 压缩系数降低 21.1%。说明作为主要加固土层的吹填土层土体物理力学性质得到显著提高, 加固效果明显; 自然沉积的淤泥质黏土和粉质黏土层土体性质也有一定的改善, 达到了预期加固效果。

#### 2.4 静载荷试验

地基处理完成后, 采用静载荷法<sup>[6]</sup>进行了表层土地基承载力检测, 承压板尺寸 1 m×1 m。

由典型静载荷试验曲线图 4 可知, 地基处理后表层土地基承载力极限值为 160 kPa, 地基承载力特征值为 80 kPa。

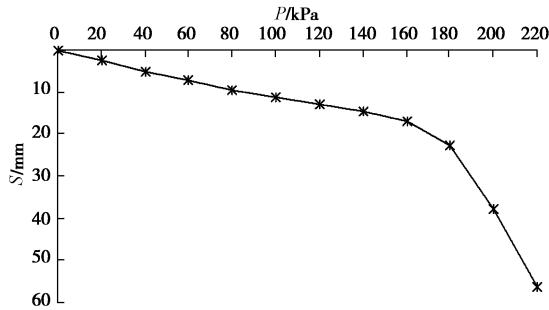


图 4 加固后静载荷试验  $P$ - $S$  曲线

Fig. 4  $P$ - $S$  curve under static load after reinforcement

### 3 结 论

(1) 现场试验证明, 土工织物复合垫层技术可行, 可以应用于新吹填土软土地基加固, 缓解中粗砂资源短缺问题, 降低工程造价。

(2) 以编织布、荆笆和土工织物组合体作为表层硬壳替代层是可行的, 组合体铺设完成后既可以上人

和轻型机械; 同时防止泥浆上冒, 污染水平排水系统。

(3) 用两层土工织物中间加滤管构成的复合垫层可以代替传统真空预压的砂垫层作为水平排水系统使用, 但在施工的过程中滤管的环刚度、塑料排水板打设定位、板头预留长度以及排水板板头和滤管搭接质量一定要严格控制, 否则将影响加固质量。

#### 参 考 文 献:

- [1] 娄 炎. 真空排水预压法加固软土技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002. (YAN Lou. The vacuum preloading method for soft soil improvement[M]. Beijing: China Communication Press, 2002. (in Chinese))
- [2] KJELLMAN W. Consolidation of clay soil by means of atmospheric pressure[C]// Proc Conference on Soil Stabilization MIT. Boston, 1952: 258 - 263.
- [3] ZHOU Jian, SU Yan, JIA Min-cai, LIU Yang. In-situ tests on vacuum dynamic consolidation to improve a hydraulic fill ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(9): 1091 - 1096.
- [4] CAO Yong-hua, CHEN Yun-tao. Recent advance of horizontal drainage cushion in vacuum preloading method[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013(353/354/355/356): 7 - 10.
- [5] 雷华阳, 张文振, 韩 鹏, 等. 吹填超软土浅层真空预压加固处理前后的固结特性[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(12): 2328 - 2333. (LEI Hua-yang, ZHANG Wen-zhen, HAN Peng, et al. Consolidation property of ultra soft soils before and after treatment of surface-layer improvement by vacuum preloading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(12): 2328 - 2333. (in Chinese)).
- [6] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (GB 50007—2011 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)