

· 地基与基础 ·



新近吹填淤泥地基真空预压加固效果
主要影响因素分析*

林军华，鲍树峰，张波云，阮 涛，谢荣星，张建喜，郑 广，陈启洲
(中交四航工程研究院有限公司，中交交通基础工程环保与安全重点实验室，广东 广州 510230)

摘要：新近吹填淤泥地基经浅表层快速加固技术（属于无砂垫层真空预压技术）处理后效果不理想，因此，从客观因素和主观因素两方面进行了深入研究。研究结果表明：1) 新近吹填淤泥的物理性质及其渗透系数是客观影响因素，致使真空固结排水难度大，真空预压过程中各排水板（满足现行规范规定的相关排水性能指标）周围出现严重的“壁垒”现象，进而导致地基加固效果不理想。2) 竖向排水系统和水平排水系统的排水性能是主观影响因素。现行规范中规定的塑料排水板滤膜的等效孔径过小（ $O_{95} < 0.075\text{ mm}$ ），排水板弯曲变形较大，水平排水系统中负压损失程度大，也导致地基加固效果不理想。3) 直排式水平排水系统埋入素土/细/中细/中粗砂水平排水垫层中，可以提高其三维透水效果。

关键词：新近吹填淤泥地基；浅表层快速加固技术；加固效果；主要影响因素；客观影响因素

中图分类号：TU 43 **文献标志码：**A **文章编号：**1002-4972(2015)12-0138-06

Major impact factors of vacuum preloading technology
for improving newly-reclaimed mud foundation

LIN Jun-hua, BAO Shu-feng, ZHANG Bo-yun, RUAN Tao, XIE Rong-xing, ZHANG Jian-xi, ZHENG Guang, CHEN Qi-zhou
(CCCC Key Lab of Environmental Protection & Safety in Foundation Engineering of Transportation,
CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: The no-sand vacuum preloading technique is proved unsatisfactory for improving the newly-reclaimed mud foundation, so we analyze the reasons from both objective factors and subjective factors. The result reveals that : 1) The physical characteristics and permeability coefficient of newly-reclaimed mud are the objective factors, which lead to the difficulty of vacuum drainage consolidation and serious barriers with low permeability around the PVDs during vacuum preloading, and thus result in unsatisfactory improving effect. 2) The performances of PVDs and horizontal drainage system are the objective factors. The characteristic opening size of filter stipulated in de current code is too small ($O_{95} < 0.075\text{ mm}$), and the curvature of vertical drains and transfer resistance in horizontal drains are too large, these also results in the poor improving effect. 3) The winding-connecting part of horizontal drainage system should be buried in filling/ fine/ medium fine/ medium coarse horizontal drainage to improve its three-dimensional permeable effect.

Keywords: newly-reclaimed mud; rapid consolidating technique for shallow surface layer; reinforcement effect; main influential factor; subjective factor

收稿日期：2015-05-21
*基金项目：中交交通基础工程环保与安全重点实验室科研资助项目（院科 Y2013D27）
作者简介：林军华（1979—），男，硕士，高级工程师，从事地基处理方面的管理和研究。

疏浚淤泥经水力吹填至指定区域后所形成的、表层未形成硬壳层的陆域即为新近吹填淤泥地基。目前, 大面积新近吹填淤泥地基一般先采用浅表层快速加固技术 (属于无砂垫层真空预压技术) 进行浅层预处理, 待地表形成一定强度的硬壳层后, 再采用真空预压技术或真空联合堆载预压技术进行深层处理, 从而实现新近吹填淤泥地基自上而下的整体加固。

工程实践表明^[1-12], 采用上述二次处理方法的主要原因是: 新近吹填淤泥地基浅层快速加固后, 地基土体强度增长有限; 有效加固深度非常小, 所形成的硬壳层厚度还不足 50 cm, 其下方仍为呈流动状的淤泥。

本文拟从主观因素和客观因素两大方面来全面分析其对新近吹填淤泥地基真空预压加固效果的影响。

1 客观因素的影响

客观因素主要指新近吹填淤泥固有的物理性质, 主要包括物质组成和基本物理指标两方面。

1.1 土体的物理性质

1.1.1 物质组成

1) 中国大陆部分地区新近吹填淤泥的颗粒组成主要以粉粒、黏粒及胶粒等细土颗粒为主, 含量超过 80%, 因此自重沉积过程长^[2-3]。真空预压过程中, 细土颗粒会因过大的真空吸力而吸附在排水板滤膜 (满足现行规范规定的相关性能指标) 上及其外侧, 致使竖向排水板周围形成较为致密、渗透性极低的“壁垒”。这层“壁垒”极大地削弱了真空压力向排水板周围传递的功效。随着抽真空时间的延长, 各排水板周围的“壁垒”达到一定厚度后, 真空压力就无法穿透“壁垒”传递到各排水板之间的淤泥中, 从而导致各排水板之间的淤泥不能得到有效的加固, 最终致使地基土体的强度十分不均匀。

2) 中国大陆部分地区新近吹填淤泥的矿物成分中的黏土矿物成分含量较高, 如高岭石、伊利石和蒙脱石等, 且在黏土矿物成分中, 以亲水

性较强的矿物如蒙脱石和伊利石为主^[2-3]。强亲水矿物含量越高, 土体所吸附的结合水就越多, 真空固结排水越难, 从而会致使排水效率显著降低。

1.1.2 基本物理指标

中国大陆部分地区新近吹填淤泥含水量普遍在 100% 以上, 普遍大于 2 倍的液限; 孔隙比均大于 2.5; 塑性指数基本大于 20, 液性指数大于 2.0^[2-3]。因此, 新近吹填淤泥的灵敏度非常高, 施工过程中极易对其造成扰动, 因此竖向排水板施工过程中所形成的涂抹效应也远强于一般软黏土。

1.2 土体的渗透系数

基于太沙基一维固结理论可知, 土体的固结系数是影响其固结度的主要因素, 而土体的渗透系数又是决定其固结系数的最重要指标。因此, 下面基于 ADINA 有限元软件通过数值模拟的方法来研究真空预压加固时均质土体的渗透系数对真空预压加固效果的影响。相关计算参数为: 1) 均质土体厚度为 30 m、宽度为 60 m, 单井的插设深度为 20 m; 2) 单井的孔隙水压力瞬时下降 80.0 kPa, 并维持恒定; 3) 计算时取孔隙率 $S_n=0.75$, 流体弹性模量 $E=210\text{ MPa}$ 。数值计算时, 取二维土层剖面, 按 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 网格划分, 采用 4 节点单元进行计算, 将底面设为 z 向固定面, 网格划分和单井中的负压分布如图 1 所示。不同渗透系数 (K) 的土体、不同时刻 (t), 单井周围土体中孔隙压力分布及其影响范围 (R) 计算结果见表 1, 其中极低渗透系数下的数值计算云图如图 2 所示。

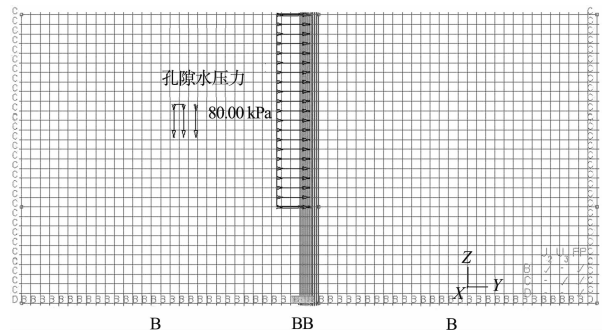


图 1 网格划分和单井负压分布

表 1 单井影响范围数值分析结果

土的渗透系数 $K/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	时间/d	R/m
1×10^{-4}	1.0	8.5
	2.0	12.5
	3.0	17.0
	4.0	21.0
	5.0	26.0
1×10^{-5}	1.0	2.5
	10.0	8.5
	25.0	14.5
	55.0	30.0
	85.0	
1×10^{-6}	1.0	0.8
	10.0	2.5
	25.0	4.0
	55.0	6.0
	85.0	8.0
1×10^{-7}	1.0	0.25
	10.0	0.8
	25.0	1.5
	55.0	2.0
	85.0	2.5
1×10^{-8}	1.0	0.075
	10.0	0.25
	25.0	0.4
	55.0	0.6
	85.0	0.8

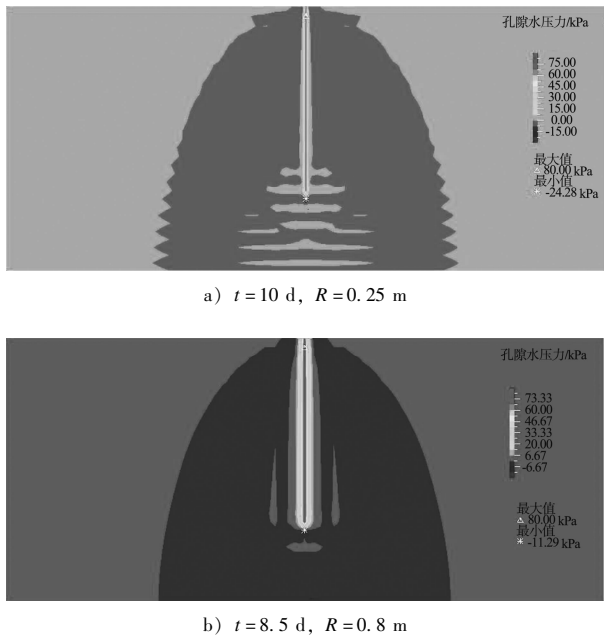


图 2 极低渗透系数下

单井周围土体中孔隙压力云图 ($K=1\times 10^{-8}\text{ cm/s}$)

由表 1 和图 2 可知：

- 1) 真空压力在均质土体中的传递范围与均质土体的渗透性密切相关。对于渗透系数为 10^{-4} cm/s 的土体，当抽真空 10 d 后，单井的影响范围就超过 30 m；对于渗透系数为 10^{-8} cm/s 的土体，当抽真空 10 d 时，单井的影响范围仅为 0.25 m。
- 2) 均质土体中的孔压消散程度与均质土体的渗透性关系密切，也直接影响到土体的加固效果。

2 主观因素的影响

主观因素主要是指真空预压设计时竖向排水体的排水性能、水平排水系统的排水性能、竖向排水体的插设间距、真空预压加固时间等方面。由于竖向排水体的插设间距和真空预压加固时间为常规影响因素，已有大量研究成果报导，因此本文不再深入分析。

2.1 竖向排水体的排水性能

竖向排水体的排水性能直接取决于滤膜的等效孔径及其渗透系数、芯体的纵向通水量。

2.1.1 滤膜的等效孔径及其渗透系数

浅表层快速（也即无砂垫层真空预压）加固过程中，从排水板中传递出来的真空压力（至少 80 kPa）几乎全部由大量处于悬浮状态的细土颗粒（ $d\leq 0.075\text{ mm}$ ）和自由水体承担，于是，细土颗粒在过大的真空压力作用下快速地向排水板周围聚集。然而，由于现行规范规定的塑料排水板滤膜的等效孔径过小（ $O_{95}<0.075\text{ mm}$ ），致使部分细土颗粒被堵塞在滤膜中或被阻塞在滤膜外侧而形成一层泥皮（即前述的“壁垒”，也即机械淤堵，见图 3），无法随水流顺利穿透滤膜进入芯体并排出地表，且不断地聚集在排水板周围，从而过早地出现了严重的“土柱”现象（图 4）。其突出的特点是“柱体”内土体颗粒极小、渗透性极低、结构致密、土体强度高，而相邻“土柱”之间土体颗粒相对较粗、结构疏松、土体强度低，这最终致使地基的强度和固结沉降变形呈现明显的不均匀性。

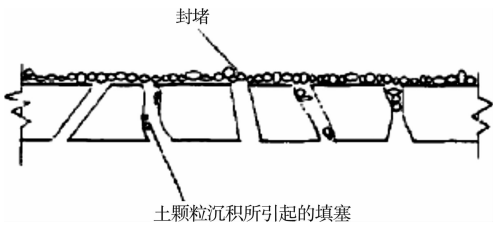


图 3 反滤层的机械淤堵



图 4 严重的土柱现象

2.1.2 竖向排水体弯曲对其纵向通水量的影响

新近吹填淤泥地基真空预压排水固结过程中往往产生较大的压缩变形，最终致使其中的竖向排水体随之发生严重的弯曲变形（图 5）。

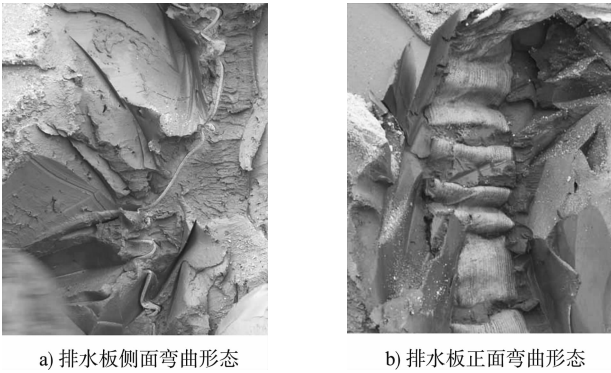


图 5 工后排水板的弯曲形态

Kremer（1983）认为当压缩性最大土层相对压缩量超过 15% 时，就必须提出排水板抗弯折性能的质量要求。排水板弯曲对地表沉降的影响程度如图 6 所示。由图 6 可知：真空预压加固 88 d 后，考虑排水板弯曲的沉降计算曲线开始变得平缓并渐趋于实测曲线，而不考虑排水板弯曲变化（即认为其纵向通水量始终保持一个常数）的沉降计算曲线斜率变化较小，总沉降量计算值比实测值大约 18%^[13]。

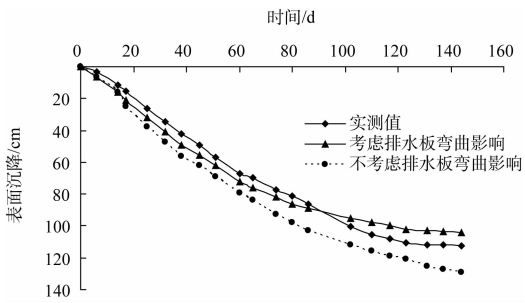


图 6 排水板弯曲对地表沉降的影响

2.2 水平排水系统的排水性能

真空预压水平排水系统主要包括 3 种：传统水平排水系统、直排式水平排水系统以及改进型直排式水平排水系统。其中，传统水平排水系统由中粗砂水平排水垫层和排水滤管组成，排水滤管按现行规范规定（横向间距宜为 6 ~ 7 m，纵向间距宜为 30 ~ 40 m）埋入中粗砂水平排水垫层中；直排式水平排水系统是将排水板板头与排水滤管缠绕连接形成的，主要有单管单排、单管双排 2 种常用形式（图 7）；改进型直排式水平排水系统主要由素土/细/中细/中粗砂水平垫层和直排式水平排水系统组成（图 8）。需要说明的是，此处的直排式水平排水系统是通过定制接头将排水板板头与排水滤管连接形成的，且埋入素土/细/中细/中粗砂水平垫层中。



图 7 直排式水平排水系统

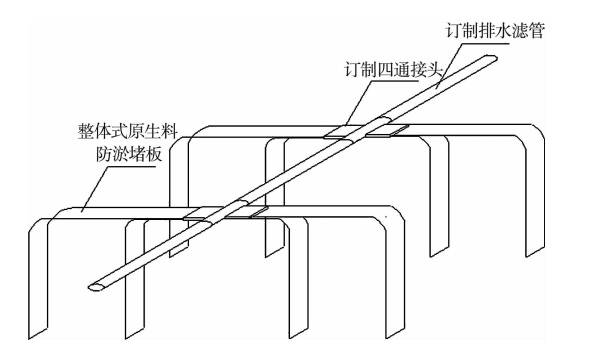


图 8 单管四排直排式真空预压排水系统

已有研究结果表明^[2,8]：浅表层快速加固技术中的直排式水平排水系统（图 7）的负压损失程度较严重，至少为 16%。鉴于此，依托广州港南沙港区三期工程疏浚吹填及软基处理工程Ⅱ区工程，开展了方案 1“改进型直排式水平排水系统 1（单管四排）”和方案 2“改进型直排式水平排水系统 2（单管四排）”现场试验。具体设计方案如图 8 和表 4 所示。

表 4 真空预压水平排水系统对比方案

方案	水平排水系统		防淤堵型排水板
	水平排水垫层	水平排水管路	
1	素土垫层 + 平铺的排水板（间距 1 m）	主管 + 滤管；	反滤层： O_{95} 为 0.106 ~ 0.118 mm
2	中细砂排水垫层 + 平铺的排水板（间距 1 m）	滤管间距 4 m	芯体：原生料 插设深度：25 m 插设间距：1 m

注：方案 1 和方案 2 均布设了 9 台真空泵。

表 5 为试验区两方案卸载前水平排水系统中的真空压力测试结果。

表 5 水平排水系统中的真空压力测试结果 kPa

方案	排水滤管中的真空压力平均值	板头中的真空压力平均值
1	-84.0	-79.0
2	-84.5	-83.0

由表 5 可知，方案 1 和方案 2 直排式水平排水系统的负压损失程度分别为 6% 和 2%，因此，改进型直排式水平排水系统的排水性能明显优于浅表层快速加固技术中的直排式水平排水系统。

表 6 为试验区两方案排水板施工前和抽真空前场地高程的测试结果。

表 6 排水板施工前和抽真空前场地的平均高程 m

方案	排水板施工前场地平均高程	抽真空前场地平均高程
1	8.29	6.85
2	8.19	6.59

根据表 6 可知，方案 1 和方案 2 抽真空前的地基固结沉降分别为 1.44 m 和 1.60 m。

图 9 为试验区两方案真空预压期间的地基固结沉降测试曲线。

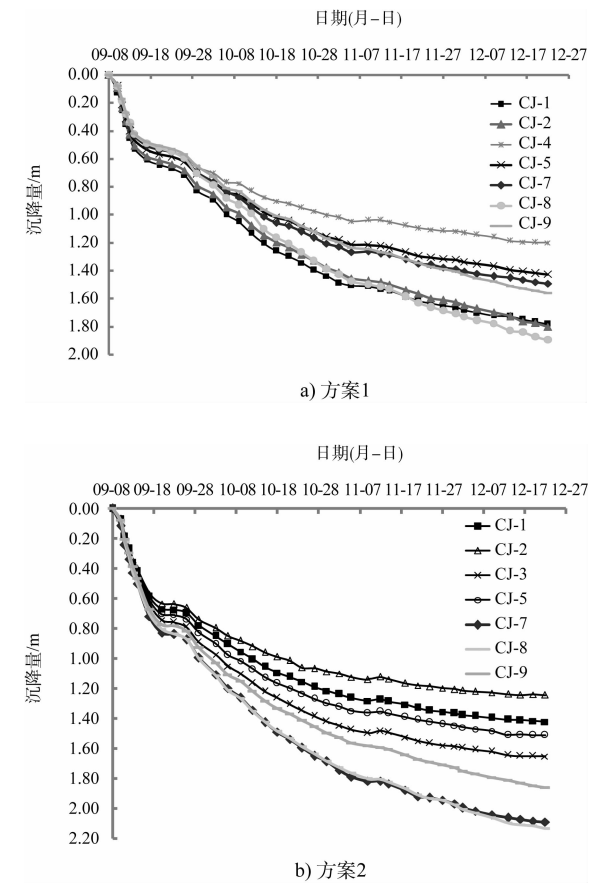


图 9 试验区两方案地基固结沉降测试曲线

由图 9 可知：1) 方案 1 和方案 2 真空预压期间的地基固结沉降平均值分别为 1.595 m 和 1.706 m，平均固结总沉降分别为 3.035 m 和 3.306 m；2) 方案 1 和方案 2 的平均应变固结度计算值分别为 92.9% 和 94.9%。

因此，方案 1 和方案 2 的地基固结变形效果均较佳，但方案 2 的排水效率稍优于方案 1。这间接证明了浅表层快速加固技术中的直排式水平排水系统可以按方案 1 和方案 2 进行优化，从而提高其三维透水效果。

3 结论

1) 新近吹填淤泥中强亲水矿物含量高，所吸附的结合水多，真空固结排水难度大；而且处于流动状或悬浮状的细土颗粒含量超过 80%，真空预压过程中往往会聚集在各排水板（满足现行规范规定的相关排水性能指标）周围的形成一定厚度的、较为致密且渗透性极低的“壁垒”，从而严重削弱真空压力传递效果和土体中的孔压消散程度，最终导致地基加固效果不理想。

2) 浅表层快速（也即无砂垫层真空预压）加固过程中，由于现行规范规定的塑料排水板滤膜的等效孔径过小（ $O_{95} < 0.075\text{ mm}$ ），排水板弯曲变形较大，水平排水系统中负压损失程度大，导致地基加固效果不理想。

3) 改进型直排式水平排水系统可以提高真空预压水平排水系统的三维排水效果。

参考文献：

[1] 鲍树峰,董志良,莫海鸿,等.高黏粒含量新吹填淤泥加固新技术室内研发[J].岩土力学,2015(1):61-67.

[2] 鲍树峰,董志良,莫海鸿,等.新近吹填淤泥地基真空固结排水系统现场研发[J].岩石力学与工程学报,2014(S2):4 218-4 226.

[3] 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(7):1 350-1 359.

[4] 耿宏业,鲍树峰,陈伟东,等.超软土浅层加固技术中不同土工合成材料组合应用对比研究[J].中国港湾建设,2013(1):35-40.

[5] 耿宏业,鲍树峰,陈伟东,等.超软土浅层加固技术中排水板间距现场试验研究[J].水运工程,2013(2):147-151.

[6] 鲍树峰,莫海鸿,董志良,等.考虑地下水位影响的砂井地基强度增长计算[J].岩石力学与工程学报,2014(6):1 269-1 277.

[7] 陈伟东,鲍树峰.新近吹填超软土地基浅层加固技术卸载标准探讨[J].水运工程,2014(8):144-148.

[8] 鲍树峰,莫海鸿,董志良,等.新近吹填淤泥地基负压传递特性及分布模式研究[J].岩土力学,2014(12):3 569-3 576.

[9] 杨顺安,张瑛玲,刘虎中,等.深圳地区吹填淤泥的工程特征[J].地质科技情报,1997(1):87-91.

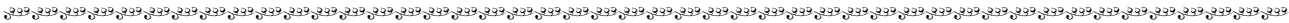
[10] 彭涛,葛少亭,武威,等.吹填淤泥填海造陆技术在深圳地区的应用[J].水文地质工程地质,2001(1):68-70.

[11] 姬凤玲,吕擎峰,马殿光.沿海地区废弃疏浚淤泥的资源化利用技术[J].安徽农业科学,2007(15):4 593-4 595.

[12] 彭涛,武威,黄少康,等.吹填淤泥的工程地质特性研究[J].工程勘察,1999(5):1-5.

[13] 应舒,陈平山.真空预压法中塑料排水板弯曲对固结的影响[J].岩石力学与工程学报,2011(S2):3 633-3 640.

(本文编辑 郭雪珍)



编辑部声明

近期不断发现有人冒用《水运工程》编辑部名义进行非法活动，他们建立伪网站，利用代理投稿和承诺上刊等手段进行诈骗活动。《水运工程》编辑部郑重声明，从未委托第三方为本编辑部约稿、投稿和审稿。《水运工程》编辑部唯一投稿网址：www.sygc.com.cn，敬请广大读者和作者周知并相互转告。