



真空预压法处理新近吹填淤泥非饱和带研究

龚永康, 郑丽华, 蔡建

(中交上海航道勘察设计院有限公司, 上海 200120)

摘要: 真空预压法处理新近吹填淤泥已经在围海造地工程中得到广泛应用, 但是处理效果有待进一步提高。结合连云港新近吹填淤泥工程, 提出浅层 3~5 m 范围为真空预压处理的重点部位, 流动状淤泥抽真空 3 个月后进入临界状态, 继续抽真空效果不显著; 进而提出从土体非饱和带角度出发, 采用注气法将此时的流塑或软塑淤泥处理成为浅层具备非饱和带的淤泥质黏土。与普通软基处理方法对比后, 发现采用注气法的土体物理力学性质指标明显改善。

关键词: 真空预压法; 注气法; 新近吹填淤泥; 非饱和带

中图分类号: U 655.54⁺4.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2017)02-0155-05

Treatment of newly blown muck unsaturated zone by vacuum preloading

GONG Yong-kang, ZHENG Li-hua, CAI Jian

(Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: The vacuum preloading method has been applied widely to the compaction of the newly-blown muck in the land reclamation engineering, but the compaction effect shall be improved. Based on Lianyungang newly-blown muck engineering, we propose that the shallow course within 3 to 5 meters range is the key part to be compacted by the vacuum preloading method, the flow silt approaches the critical state after 3 months' vacuum preloading, and the effect of continuous vacuum preloading operation is not obvious. We then propose to adopt the gas injection method from the view of unsaturated zone to turn the plastic or soft soil into mucky clay with shallow unsaturated zone. Comparing with ordinary soft foundation treatment, the physical and mechanical indexes of soil are improved obviously.

Keywords: vacuum preloading method; gas injection treatment; recently blown filled muck; unsaturated zone

真空预压法加固新近吹填淤泥在围海造地工程中的应用越来越广泛, 真空预压法的主要加固效果是在表层形成了硬壳层和土柱, 可作为承受荷载的持力层^[1-4]。但是, 工程实际中发现真空预压法形成的硬壳层较薄, 一般为 0.5~1.5 m, 再往下新近吹填淤泥的处理效果较差, 土体基本呈流塑状态, 含水率尚在 60%左右, 如果在此表面直接堆载易引发土体隆鼓现象。既然表层硬壳层是主要承受荷载的持力层, 那么如何将该处理层增厚, 使表层硬壳层处理厚度达 3~5 m, 则在

不铺填回填料的情况下, 在此表面可直接堆载而不会引发土体隆鼓现象。基于此目的, 本文提出土体非饱和带的处理思路来进一步提高处理效果。

1 工程概况及问题的提出

连云港某新近吹填淤泥工程, 加固前土体基本为流泥, 含水率基本在 85%以上。采用常规真空预压法进行浅层抽真空处理。处理 6 个月后进行相关检测, 土工试验成果对比统计如表 1 所示。

表1 真空预压法处理前后吹填淤泥的物理指标

工况	含水率/%		湿密度/(g/cm ³)		饱和度/%		土名	
	0~3 m	3~5 m	0~3 m	3~5 m	0~3 m	3~5 m	0~3 m	3~5 m
加固前	91.3	86.9	1.47	1.49	97	97.0	流泥	流泥
浅层真空预压加固后	54.4	55.4	1.67	1.67	97	97.0	淤泥质黏土	淤泥
真空联合堆载预压加固后	57.2	52.0	1.65	1.69	97	97.5	淤泥	淤泥质黏土

注：取土深度起算位置为泥面。

加固前 0~3 m 及 3~5 m 处的物理指标接近，土质均为流泥。浅层真空预压加固后，0~3 m 改善为淤泥质黏土，含水率仍然达到 54.4%，而 3~5 m 处仍然为淤泥状态。饱和度在加固前后没有发生明显变化，均为 97%。

有人提出，真空预压法处理新近吹填淤泥的效果只能如此，若要进一步提高处理效果，可以采用真空联合堆载预压法。为此，我们进行了工程对比。如表 1 所示，真空联合堆载预压法加固后，0~3 m 仍然为淤泥，含水率达 57.2%，而 3~5 m 处改善为淤泥质黏土。这说明真空联合堆载预压法处理后 3~5 m 处土体加固效果较好，而砂垫层和淤泥层的交接处存在软弱层面。且真空联合堆载预压法须设置砂垫层，后期需要堆载，费用高，且排水系统易被压坏，堆载过程中容易出现险情，不值得推广。

同时，对浅层真空预压加固前后进行了十字板剪切强度试验，如图 1 所示。土体表层 0~1.5 m 范围内的十字板剪切强度改善较为明显，1.5 m 往下改善较小。因此，如何扩大土体改善的深度是工程界面临的又一个难题。本文结合非饱和土理论的真空预压结合注气法以解决上述问题。

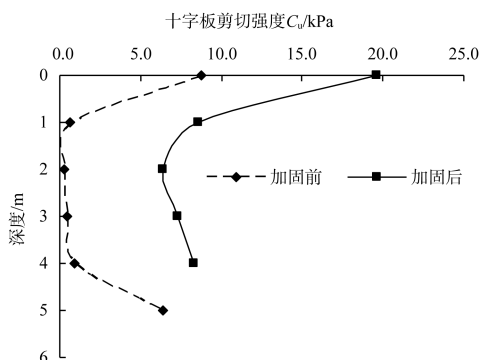


图1 真空预压法加固前后十字板剪切试验对比

2 真空预压非饱和带理论研究

根据 Delwyn G. Fredlund 等^[5]的研究，在非饱和土中，收缩膜承受大于水压力 u_w 的空气压力 u_a ，压力差 $(u_w - u_a)$ 称为基质吸力。基质吸力 $(u_w - u_a)$ 、收缩膜表面张力 T_s 、曲率半径 R_s 之间的关系为：

$$(u_w - u_a) = 2T_s/R_s \quad (1)$$

基质吸力增加，曲率半径减小，水占有孔隙的体积减小，气水界面越来越靠近土颗粒，如图 2 所示。

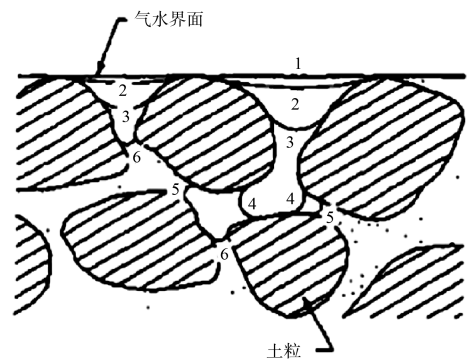


图2 在不同基质吸力或饱和度下非饱和土中气水界面移动的发展情况 (分 1~5 个阶段)

众所周知，空气进入土体，必然引起土体饱和度或含水率的变化。饱和度或含水率的变化引起基质吸力的变化，要比净法向应力引起的变化大得多。饱和度通常被表述为基质吸力的函数，其相互关系称为基质吸力与饱和度关系曲线 (图 3)。

由图 3 可以看出，基质吸力增加，饱和度下降。同时，根据江耀等^[6]的研究，基质吸力 ψ 与体积含水率 θ_w 的关系 Fredlund & Xing 方程为：

$$\theta_w = C(\psi) \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (2)$$

式中: $C(\psi)$ 为修正函数, θ_s 为饱和体积含水率, a 、 m 、 n 为曲线拟合参数。

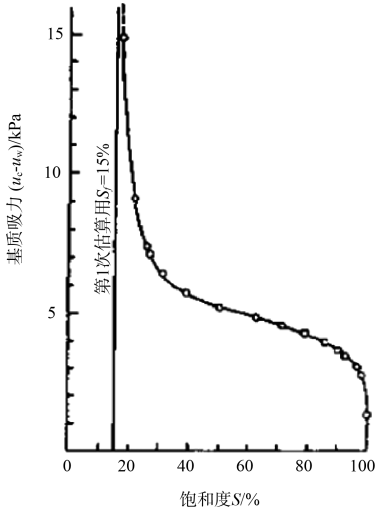


图 3 基质吸力与饱和度关系曲线 (细砂)

由式(2)可知, 基质吸力增大, 体积含水率减小。同时, 根据雷志栋^[7]的研究, 土中水分处于饱和状态时, 含水率为饱和含水率, 吸力 s 或基质势为零, 若对土壤施加微小的吸力, 土壤中尚无水排出, 含水率仍维持饱和值。当吸力增加至某一临界值后, 由于土壤中最大孔隙不能抗拒所施加的吸力而继续保持水分, 于是土壤开始排水, 相应地含水率开始减小。吸力 s 与含水率 θ 的关系式为:

$$s = A (\theta_s - \theta)^n / \theta^m \quad (3)$$

式中: A 、 m 、 n 为经验常数。

由式(3)可知, 基质吸力增大, 含水率减小。

因此, 真空预压过程中, 抽真空到一定阶段, 土体中大孔隙中的重力流动水大部分被抽出, 但土体仍然处于饱和状态。此时对饱和土体中注入空气, 空气压力 u_a 增大, 水压力 u_w 不变, 基质吸力 $(u_w - u_a)$ 增大, 收缩膜曲率半径减小, 气水界面逐渐靠近土颗粒, 水占有孔隙的体积减小, 从而导致土体饱和度、含水率均下降。这促进了土体中的次大孔隙、小孔隙、微小孔隙依次不断排水, 从而土体得到加固。

关于真空预压法加固软基中的非饱和带研究, 邱青长^[8]提出真空预压非饱和带, 如图 4 所示。

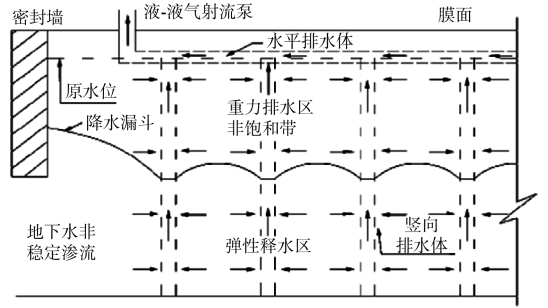


图 4 真空预压法非饱和带

吴跃东^[9]根据现场实测数据和水分运移模型计算的孔隙水压力在饱和区域的变化趋势大致相同, 存在 4 m 左右的非饱和区域。刘汉龙^[10]通过实测发现真空预压时地下水位是下降的, 因此地下水位以上可以理解为非饱和区。

3 工程现场试验研究

3.1 工程概况

在连云港徐圩港区某工程进行了真空预压法处理新近吹填淤泥非饱和带试验研究。该工程土层主要分 2 层: 表面吹填淤泥层厚度约 8 m, 晾晒约 1.5 a, 表层板结发硬, 其厚度约 0.5 m, 含水率为 75.6%~116.6%, 平均含水率为 101.5%。随着深度增加, 含水率有所降低, 平均含水率仍达 73.5%。下部为天然淤泥层, 厚度约 10 m, 含水率为 58.2%~63.7%。这两层土均具有含水率高、压缩性强等特点, 须进行软基处理。

施工过程: 采用真空预压法联合注气法进行软基处理。首先浅层人工插 5 m 板抽真空 1 个月形成工作面, 采用新型排水板, 规格同 C 型排水板, 板芯与滤膜热熔处理, 排水板间距 0.7 m, 深度打穿天然淤泥层, 进入粉质黏土层 0.5 m。设计要求膜下真空度要求不低于 85 kPa, 真空预压 4 个月后的总沉降量大于 2.5 m, 平均固结度大于 85%, 残余沉降量小于 0.3 m。

3.2 注气施工过程

注气法工艺实施过程如图 5 所示。正常打设排水板, 然后在土体中预埋注气管, 注气管布置在排水板形心处。注气管的管底深度约 5 m, 长度约 3 m, 管顶距离地表 1.5~2.0 m。注气管为

PEC 空心圆管，管径 30 mm，管壁钻有气孔，管外侧包裹无纺布防止淤泥进入(图 5a))。注气管的连接管为真空表气管，所有气管连接到总管后出膜，连接到注气机(图 5b))。抽真空开始时，注气机关闭。抽真空 2~3 个月后，打开注气机，进行注气，一般注气时间每天 1 次每次 1 h，连续进行，如图 6 所示。注气管周围基质吸力逐渐增大，土体饱和度和含水率逐步降低，土体中的次大孔隙、小孔隙、微小孔隙中的水通过排水板排出地表。

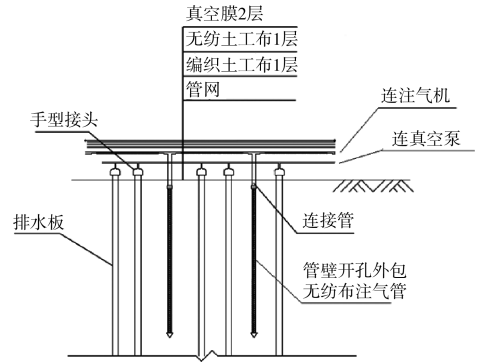


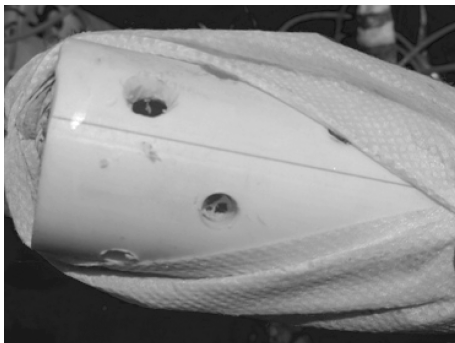
图 6 真空预压注气

注气施工后，水被侧向排开，被排水板吸走。土层趋于非饱和。关于该方法，相关学者如沈宇鹏^[11]认为设置了注气增压管后，增加了排水板与膜下土体的水头大小，挤迫土中自由水进入塑料排水板；谢立全^[12]认为注入气体推动水向四周流动，可加快水的排出。

3.3 试验结果

由表 2 可知，加固前 0~3 m 和 3~6 m 处淤泥的含水率均值分别为 72.4% 和 67.1%，经过真空预压法联合注气法地基处理，0~3 m 和 3~6 m 处土体的含水率分别下降到 43.9% 和 49.7%，土质由淤泥改善为淤泥质黏土，饱和度也有所下降。

与表 1 中的普通浅层真空预压的主要区别在于 3~5 m 处的加固效果不同，普通浅层真空预压处理后仍然为淤泥，而真空预压联合注气法加固后改善为淤泥质黏土。与表 1 中的真空联合堆载预压的区别主要在于，0~3 m 处的加固效果不同，真空联合堆载预压处理后仍然为淤泥，砂垫层下存在软弱夹层，而真空预压联合注气法加固后改善为淤泥质黏土。



a) 注气管



b) 连接管

图 5 真空预压注气管和连接管

表 2 真空预压法联合注气法处理前后吹填淤泥的物理指标

工况	含水率/%		湿密度/(g/cm ³)		饱和度/%		土名	
	0~3 m	3~6 m	0~3 m	3~6 m	0~3 m	3~6 m	0~3 m	3~6 m
加固前	72.4	67.1	1.49	1.52	98	97	淤泥	淤泥
加固后	43.9	49.7	1.73	1.72	94	96	淤泥质黏土	淤泥质黏土

同时，进行加固前后十字板剪切强度试验检测。如图 1 和表 3 对比所示，普通浅层真空预压处理后只有表层 1.5 m 范围内十字板剪切强度增长较快，而真空预压联合注气法加固后的十字板

剪切强度不仅在 0~2 m 范围内强度增长较大，且在 2~5 m 范围内同样有较大的增长，这是普通浅层真空预压法不容易做到的，说明在此深度处注气加快了非饱和带的生成，土体强度增长。

表 3 真空预压法联合注气法加固前后十字板剪切强度

工况	十字板剪切强度/kPa				
	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m
加固前	2.1	4.4	9.7	7.2	7.8
加固后	29.3	24.1	27.6	29.9	38.4

根据 JTS 147-1—2010《港口工程地基规范》7.3.1 条及 7.3.2 条, 由实测沉降曲线按经验双曲线法进行最终沉降量及平均固结度的推算, 结果如表 4 所示。该方法加固后地基土的平均固结度为 86.7%, 残余沉降量约 25 cm, 满足试验设计要求。

表 4 真空预压法联合注气法加固后平均固结度及残余沉降量

抽真空前沉降量/mm	抽真空期间沉降量/mm	双曲线法预测工后沉降/mm	平均固结度/%	残余沉降量/mm
850	1 739	396	86.7	246.8

4 结论

1) 普通真空预压法加固吹填淤泥, 只有表层 1.5 m 硬壳层范围内承载力较高; 真空联合堆载预压法加固吹填淤泥, 砂垫层下部 1.0 m 范围内存在软弱夹层, 且不经济不安全。针对此类问题, 本文展开真空预压结合注气法的非饱和带试验研究, 结果表明, 真空结合注气法加固后不存在软弱夹层, 0~5 m 范围内土体的加固效果均较好。

2) 真空预压非饱和带研究的实质就是通过通过对饱和土体中注入空气, 空气压力 u_a 增大, 水压力 u_w 不变, 基质吸力 $(u_w - u_a)$ 增大, 根据非饱和土相关理论, 基质吸力增大势必导致土体饱和度和含水率均下降, 最终达到加固土体的目的。

3) 真空预压联合注气法的工艺技术较为简单, 工程中容易操作, 且工程试验结果表明效果较好, 值得应用和推广。

参考文献:

- [1] 姜炎.真空排水预压法加固软土技术[M].北京:人民交通出版社,2002.
- [2] 陈环.真空预压法机理研究十年[J].港口工程,1991(4):17-25.
- [3] 高志义.真空预压法的机理分析[J].岩土工程学报,1989,11(4):45-56.
- [4] 龚晓南,岑仰润.真空预压法加固软土地基机理探讨[J].哈尔滨建筑大学学报,2002,35(2):7-10.
- [5] FREDLUND D G, RAHARDJO H.非饱和土土力学[M].北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [6] 雷志栋.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1988.
- [7] 江耀,谌文武,孙冠平,等.FX 和 MK 模型在细粒土土-水特征曲线中的应用[J].煤炭学报,2012,37(S2):319-324.
- [8] 邱青长,莫海鸿,董志良,等.真空预压地基非饱和带探讨[J].岩石力学与工程学报,2006,25(S2):3 539-3 544.
- [9] 吴跃东,石晓燕,刘坚,等.真空预压加固区硬壳层的水分运移解析[J].岩土力学,2013,34(S2):110-114.
- [10] 刘汉龙,周琦,顾长存.空预压条件下地下水位测试新方法及其应用[J].岩土工程学报,2009,31(1):48-51.
- [11] 沈宇鹏,冯瑞玲,余江,等.增压式真空预压处理软基的加固机理[J].吉林大学学报:地球科学版,2012,42(3):792-797.
- [12] 谢立全,牛永昌,刘芳,等.真空联合注气降水机理的数值分析[J].地下空间与工程学报,2009(5):1 590-1 593.

(本文编辑 郭雪珍)

· 消 息 ·

上海航道局投资建造两艘自航耙吸船

近日,上海航道局与中交机电局、荷兰 Royal IHC 公司签订总承包和设计合同,投资建造两艘 6 500 m³ 自航耙吸挖泥船。

两艘船长 108.7 m、型宽 24.5 m、型深 7.6 m,是带有双机双桨、双导管、单甲板,设有艏楼甲板、球鼻艏的自航耙吸挖泥船,适用于深海取砂、建设沿海港口、深水航道疏浚和吹填工程,并兼做海洋维护工程,可在无限航区航行。两船计划分别于 2018 年 9 月、11 月交付使用。

http://en.ccccltd.cn/cccltd/news/jcxw/jx/201701/t20170119_87364.html(2017-01-19)