

分级真空排水预压法室内试验与分析

马联华, 董志良, 鲍树峰

(1. 重庆交通大学, 重庆 400074; 2. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 根据有效应力原理, 从应力路径的角度对比分析一次性加荷真空排水预压法和分级加荷真空排水预压法, 找到一次性加荷真空排水预压法和分级加荷真空排水预压法的适用范围; 结合室内模型试验观察分级真空预压对高黏性新近吹填土的加固效果, 并选择了合适的垂直排水通道。

关键词: 真空预压; 分级加载; 一次性加载; 应力路径; 模型试验

中图分类号: U 655.54 4.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)09-0146-04

The analysis and laboratory tests of graded loading vacuum preloading method

MA Lian-hua, DONG Zhi-liang, BAO Shu-feng

(1. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: According to the principle of effective stress, from the view of the stress path, we analyze the disposable loading vacuum drainage pre-pressure method and the graded loading one to find the applicable range of the two methods. Combining with the laboratory model experiments, we observe the reinforcement effect of the graded vacuum preloading on the recently dredged highly viscous fill, and select the appropriate vertical drainage channel.

Keywords: vacuum preloading; grading load; disposable loading; stress paths; model test

真空预压的加压系统通常是一次性设定为 80 kPa, 苑小青^[1]等提出了分级真空预压, 并进行了室内模型试验。鉴于此, 笔者以广州南沙三期疏浚吹填及软基处理工程吹填区内土进行室内模型试验, 针对性地对比研究分级真空预压条件下袋装砂井和塑料排水板对高黏性新近吹填淤泥固结效果影响, 从而选择合适的垂直排水通道, 并分析分级真空预压对高黏性新近吹填淤泥的加固效果。

1 应力路径分析

理论上, 真空排水预压法加固土体是在等向固结过程中实现的, 但是在实际工程中却不然, 考虑到真空度沿着深度方向上的损失, 真空排水预压法加固土体就不会是等向固结了; 而土体渗透系数对真空度传递的效率起着重要作用。董志

良^[2]等认为: 在实际真空预压工程中(一次性加载 80 kPa), 渗透系数是随着时间的增加而减小的, 在现场监测中发现到了加固中、后期, 出水量很小, 说明固结变形排除的孔隙水减少了, 其中一方面的原因就是土体渗透系数的降低而使土体的真空度损失严重, 很难抽出水来。排水条件是真空预压法加固地基的必要条件, 土体的渗透系数随着压力的增大而减小。李宁^[3]等通过室内试验得出如下结论: 真空压力在土体竖向传递过程中存在明显的传递损失, 损失程度与土体的渗透系数密切相关, 渗透系数越大真空度传递越有效, 损失真空度就越小。下面在考虑渗透系数大小的情况下, 讨论真空排水预压法和分级真空排水预压法的应力路径。王旭民等根据有效应力, 从应力路径的角度分析了真空预压加固软土地基

收稿日期: 2014-02-11

作者简介: 马联华(1988—), 男, 硕士研究生, 专业为港口、海岸及近海工程。

的机理, 得出的结论是真空预压时土体的应力状态介于 p 轴与 K_0 线之间, 与堆载预压完全不同。

对于真空排水预压法, 一次性加荷和分级加荷的 $\Delta\sigma$ 一样大, 由于真空度随着深度的增加而减小, 相应的土体的小主应力 $\Delta\sigma_3 < \Delta\sigma_1$, 即应力圆的半径会增大。当土体渗透系数较大时, 较大真空度的传递更加有效。那么同一深度一次性加荷达到的真空度比分级加荷的真空度要大。其应力路径见图 1。

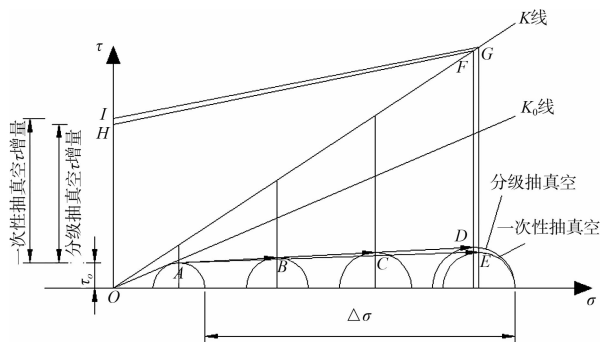


图 1 当土体渗透系数较大时一次性加载与分级加载的应力路径

当土体渗透系数较小时, 压力越大, 土体的渗透系数就越小; 较小真空度的传递更加有效。那么同一深度分级加荷的真空度比一次性加荷达到的真空度要大。其应力路径见图 2。

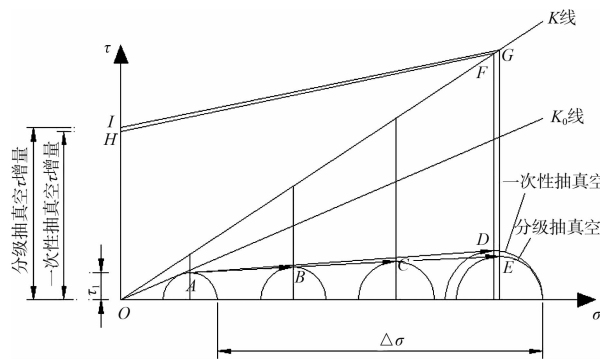


图 2 当渗透系数较小时一次性加荷和分级加荷的应力路径

从图 1 中可以看出, 当渗透系数较大时, 采用一次性加荷方式加固后的土体的抗剪强度比较大。从图 2 中可以看出, 当渗透系数较小时, 采用分级加荷方式加固后的土体抗剪强度比较大。换言之, 从加固后土体的抗剪强度看, 一次性加荷方式的真空排水预压法适用于渗透系数较大

的土体, 而分级加荷的真空排水预压法对渗透系数较小的土体 (如黏土) 更加有效。

2 分级式真空排水预压法室内模型试验

2.1 试验装置

试验采用直径为 33 cm, 高为 100 cm 的自制模型桶 (图 3)。加压系统采用广州力洋水环真空泵 (型号为 2BV2061), 其极限真空为 0.097 MPa, 极限抽速为 52 m³/h。

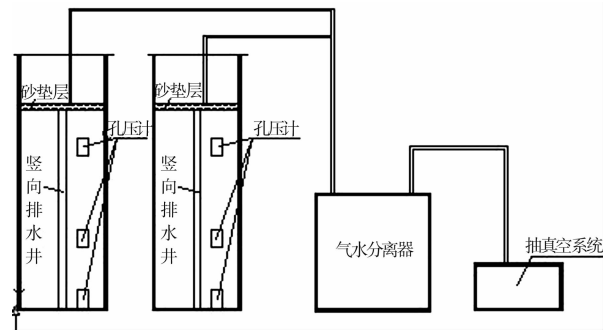


图 3 真空预压装置

2.2 试验土体参数

试验土样取自广州南沙三期疏浚吹填及软基处理工程吹填区内。土样的基本参数为: 含水率 $\omega = 140\%$, 土样的液限 $W_L = 41.63\%$, 土样的塑限 $W_p = 24.6\%$, 土样的塑性指数 $I_p = 17$, 土样的液性指数 $I_L = 24.6$, 土粒比重 $G_s = 2.652$ 。可见, 该土样属于高液限黏土。

2.3 试验方法

将试验取土调配成含水率为 140% 的混合土样, 搅拌均匀, 以保证土样的各向同性。装入模型桶中, 试验土样高度为 80 cm, 监测工具 (真空探头和孔压计) 随后置于土样中, 并用密封膜进行密封。试验中采用 2 组模型进行对比, 采用不同的竖向排水材料进行试验, 具体试验方案见表 1。

表 1 单井模型试验条件

试验条件	加荷载的方式	土样初始含水率/%
袋装砂井-排水板滤膜 $O_{95} \leq 0.075$	20 kPa-3 d	140
	40 kPa-6 d	
	80 kPa-6 d	
普通排水板滤膜 $O_{95} \leq 0.075$	20 kPa-3 d	140
	40 kPa-6 d	
	80 kPa-6 d	

在试验过程中，跟踪监测膜下真空度以及竖向排水通道内不同深度处的真空度、监测不同深度处的孔隙水压力、监测膜面的沉降量。试验结束后，对加固土体取样进行无侧限抗压强度测试，以判断加固效果。

3 数据分析

在试验过程中，每隔2 h对监控孔隙水压力、真空度、表面沉降以及出水量进行一次测试，以便及时发现异常小状况，并及时处理（如漏气现象）。

3.1 真空度

对于真空度，试验采用真空探头连接真空表进行测试。在试验过程中，跟踪测试不同深度位置的真空度。真空探头的位置分别距土体顶层0.08、0.2、0.6、0.8 m，真空探头采集的数据如图4和图5所示。

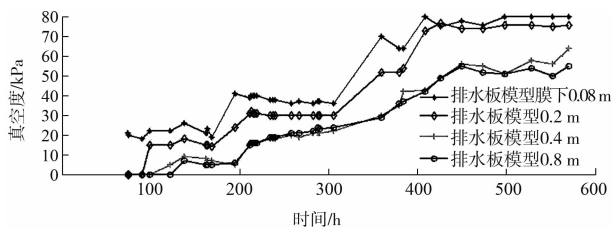


图4 排水板模型真空度随时间的变化曲线

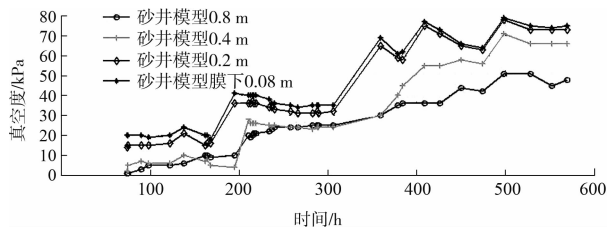


图5 砂井模型真空度随时间的变化关系

从图4、5中可明显看出真空度的变化规律以及真空度沿着深度方向的传递规律。由于在试验过程中出现一些漏气问题时需要停泵维修处理，所以真空度会时大时小。根据真空度随时间的变化规律，可以大致看出分级加载的过程，分别对应20、40、80 kPa。随着深度增加，真空度不断衰减；塑料排水板模型距模型桶顶1.0 m处的真空度读数达到52 kPa，而砂井模型在同一深度的真

空度读数为49 kPa；同样，在0.2 m和0.6 m处的真空度值都相差不大。那么塑料排水板的真空度传递效率和砂井模型传递真空度的效率差别不是很大。原因在于：1) 该模型的尺寸太小，不能很好地反映大范围沿深度方向真空度的变化；2) 在进行试验时，真空探头的位置随着土体的固结位置发生了变化，实际上测得的数据不能很好地反映理想深度的真空度值。

3.2 孔隙水压力消散

在试验过程中，随时跟踪监测孔隙水压力的变化（图6、7）。根据有效应力原理，真空预压的加固其实就是抽走了土体中的气水，使得土体中的孔隙水压力变小了，从而增大了土体的有效应力。那么孔隙水压力的消散程度在一定程度上能反应土体的加固效果。孔隙水压力消散得越大，土体的加固效果越好。根据实测的孔隙水压力消散数据，塑料排水板孔隙水压力消散最大能达到66.8 kPa，而袋装砂井只能达到39 kPa，并且塑料排水板模型的孔隙水压力消散更加迅速，因此可以得出这样的结论：在分级真空预压中，在相同的试验条件下，塑料排水板的加固效果比袋装砂井的加固效果更好。

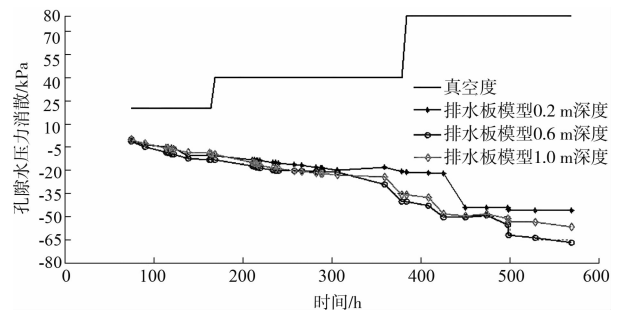


图6 排水板模型孔隙水压力随时间的变化曲线

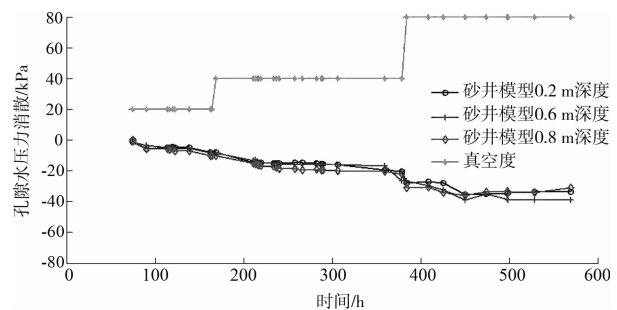


图7 孔隙水压力与时间的变化曲线

3.3 泥面沉降

在实验过程中,随时跟踪监控泥面沉降量,其沉降量随时间的关系曲线如图8、9所示。

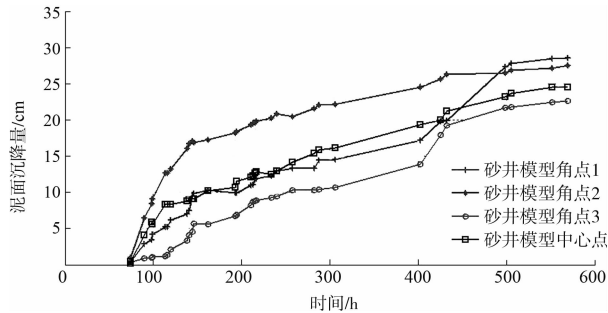


图8 砂井模型泥面沉降随时间的变化关系曲线

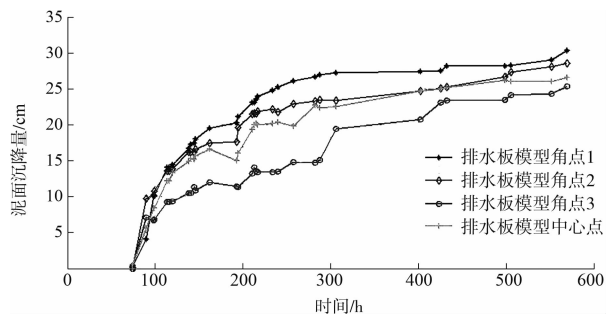


图9 排水板模型泥面沉降随时间的变化关系曲线

从图8、9可以看出:泥面沉降量随着时间的延长逐渐增大,但是泥面沉降量的变化速度却在逐渐减小,最终慢慢地趋于稳定的沉降量。从沉降量的大小可以看出,塑料排水板的最大沉降量达到31 cm,而砂井模型的最大沉降量只有28 cm。从最终沉降量大小的角度可知:对于分级真空排水预压法,在相同的试验条件下,塑料排水板的加固效果比砂井的加固效果要好。

3.4 加固后无侧限抗压强度

试验结束后,从模型桶中取样进行无侧限抗压强度测试和含水率测试,测试值如表2所示。由于土体取样过程中人工对土体的扰动,使得土样的强度降低,进行无侧限抗压强度试验的测试值偏低,结合加固后土体的含水率和无侧限抗压强度测试值进行综合分析,从而对土体的加固效果进行评估。依照工程实践,土体的含水率达到50%左右,无侧限抗压强度达到26.7 kPa,地基土的承载能力能达到50 kPa,分级真空预压处理后的软土就能够正常

的进行施工作业。所以,用分级真空预压法处理此种软土地基,能够在一定程度上满足施工条件的要求,所以分级真空预压对高黏性淤泥具有很好的加固效果。根据加固后土体的含水率以及无侧限抗压强度值可以看出采用不同排水体的分级真空排水预压法的加固效果,无论从含水率还是从无侧限抗压强度测试值都能很直观的看出,采用塑料排水板作为竖向排水体的加固效果更佳。

表2 模型试验无侧限抗压强度测试值

取土位置	塑料排水板		袋装砂井	
	含水率/ %	无侧限抗压 强度/kPa	含水率/ %	无侧限抗压 强度/kPa
距排水体 距离/m				
0.08	53	26.7	56	21.1
0.10	55	25.3	57	20.8

4 结语

1) 从有效应力和应力路径分析,分级真空预压法和一次性加载的普通真空预压法都有可取之处,但是其适用的条件不同——分级真空预压法适合渗透系数比较小的黏土,而普通的一次性加载的真空排水预压法适合加固渗透系数比较大的软土。

2) 根据分级真空预压室内单井模型试验数据分析可知,对于高塑性新近吹填土,采用分级真空排水预压法,选择塑料排水板作为竖向排水体较为适宜;对于真空排水预压法,采用塑料排水板作为竖向排水体,加固后土体能够达到满足条件的地基承载能力,故采用分级真空预压法对高塑性新近吹填土进行加固能够起到很好的加固效果。

参考文献:

- [1] 苑小青. 新型真空预压法室内模拟试验与沉降的预测研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2012.
- [2] 董志良, 陈平山. 真空预压软土渗透系数对固结的影响[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1452-1456.
- [3] 李宁. 真空压力传递规律与渗透系数关系的试验研究[J]. 路基工程, 2011(4): 101-103.
- [4] 王绪民, 刘富勤. 真空预压加固软土地基的应力路径分析[J]. 建筑技术, 2010, 41(3): 246-248.
- [5] 娄炎. 真空排水预压法加固软土技术[M]. 2版. 北京: 人民交通出版社, 2013.

(本文编辑 郭雪珍)