

文章编号: 1000-7598(2014)增刊 2-0600-07

软基真空预压加固的注气增效机制与数值分析

屠红珍¹, 徐衍徽², 谢立全²

(1. 温州市港航管理局, 浙江 温州 325088; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘 要: 无砂垫层真空预压技术已成功应用于软土地基加固工程, 但软土的低透水性致使其工期很长。为此提出联合间歇性注气以改进真空预压技术, 提高其排水速率、缩短工期。建立联合注气的真空预压法有限元分析模型, 通过注气位置与注气压力的改变, 对比分析注气前后土体中渗流速度、排水速率、渗透比降等的变化规律。结果表明, 注气能显著提高真空预压法的排水速率, 增强真空预压法的加固效果; 由于气体的轻质特性, 在排水板下方注气更有利于排水效果; 在不冲破土层的情况下, 注气压力越大, 促进加固的效果越好。联合注气能有效增强真空预压加固软土地基的排水效率, 有着较好的工程应用前景。

关 键 词: 真空预压; 工期; 间歇性注气; 软基处理

中图分类号: TU 755.6+2

文献标识码: A

Mechanism and numerical analysis of effect of air injection on vacuum preloading for weak foundation improvement

TU Hong-zhen¹, XU Yan-hui², XIE Li-quan²

(1. Port and Shipping Management Bureau of Wenzhou, Wenzhou, Zhejiang 325088, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Vacuum preloading technique without sand cushion layer has been successfully applied to the weak foundation reinforcement; but it is difficult to shorten construction period due to the low permeability of weak soil. Intermittent air injection is proposed to increase the drainage rate for vacuum drainage. The combined method of vacuum preloading and air injection is investigated for different conditions of the injecting positions and air pressures based on finite element simulation. Seepage velocity, drainage rate and seepage gradient are compared and analyzed before and after air injection. The simulation results show that the air injection can improve the efficiency of vacuum drainage, so as to enhance the foundation reinforcement and reduce preloading time of the vacuum loading. The efficiency of injecting air below the drain boards is better than that above the bottom ends of boards. And in the case of not breaking through the foundation in the air injection, the greater the air pressure is set, the better effect of reinforcement will be. The combined method of vacuum preloading and air injection could be widely used in the improvement practice of weak ground.

Key words: vacuum preloading; construction period; intermittent air injection; weak foundation improvement

1 引 言

20 世纪 80 年代至今, 真空预压软土加固技术在我国已有很大的发展, 在中小型土质堤坝和港口、高速公路软土地基的加固处理上颇具优势; 其中由于吹填软土强度低, 地基承载力基本为 0, 常规地基处理方法通常很难实施, 真空预压法往往被作为这类地基加固的首选方案^[1]。但软基的真空预压处理仍然存在预压时间长、真空度沿深度衰减严重等

相关问题, 如何改进真空预压法, 提高加固效率成为现在国内外学者关注的焦点。前人已在真空预压加固软土地基的施工工艺和设计方法等方面做了不少工作。如武亚军等人^[2]提出慢速加载方式比瞬时加载方式更有利于土体的加固, 建议在实际工程中采用分级加载方式施加真空荷载。单一的真空预压法也逐步发展到真空联合堆载^[3]、真空联合电渗^[4]、真空联合碎石桩加固软土地基^[5]等一系列各种工法。

收稿日期: 2014-05-15

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 11172213); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (基础研究人才培养计划 20123106)。

第一作者简介: 屠红珍, 女, 1973 年生, 高级工程师, 硕士, 主要从事港口、海岸工程研究。E-mail: mzh2672@126.com

通讯作者: 谢立全, 男, 1972 年生, 副教授, 博士生导师, 主要从事近海、海洋岩土工程及深水建筑物安全防护研究。E-mail: xie_liquan@tongji.edu.cn

2 真空联合注气技术

真空联合注气技术即在真空预压过程中向深层土体注入压力气体，增强驱水压力梯度，提高降水速率，扩展真空降水技术的适用范围^[6]。早在 20 世纪 80 年代，环境工程中就已采用气压劈裂技术在岩土体中形成裂隙，增加流体的流动通道，提高低渗透性土体的渗透性能^[7]。油田的注气开发技术也已有一百年的发展历史。注气开发是国内外低渗透油藏开发最为有效的开采方法之一。我国的江汉油田于 1999 年开始注 N_2 先导试验取得一定效果，平均单井日产油从 4 t/d 上升到 6 t/d，含水从 84% 下降到 71%。

在地基处理领域，注气技术的开发应用起步较晚，近些年才有一些相关研究。Hen 等^[8]报道了深层搅拌桩施工时桩周土中会产生较大的超静孔隙水压力，在土体中形成裂隙，超过 50% 的超静孔压通过裂隙迅速消散。朱平等^[9]进行了可控通气真空预压室内试验，证明了可控通气真空预压可以加速排水并更利于孔压消散，且加固后期的沉降明显大于常规真空预压。章定文等^[10]、刘松玉等^[11]开展了气压劈裂室内模型试验和理论分析及气压劈裂真空预压法加固软基的现场工程应用，论证了气压劈裂产生的裂隙能提供排水导气（水）通道，加大土体的固结速率，并初步建立了土体气压劈裂准则；现场试验表明气压劈裂真空预压法可提高真空荷载向深层土体的传递效率，提高深部软土的加固效果；同时还可以加速地基固结，缩短地基处理工期。黄峰等^[12]进行了真空-注气降水一维模型试验，提出注气口距离降水井不能太近，防止注入气体占据渗流路径。谢立全等^[6]通过对不同注气压力工况的渗流计算分析，证实了压力气体作用下注气可显著提高真空降水效果，降水区域的渗流水力梯度大幅增加，且真空抽气附近的非饱和土范围明显缩减，利于周围水体快速转移。而对于注气位置及压力大小对软基真空预压加固效果的影响，目前仍未见到这方面的相关报道。为此，本文采用数值模拟手段对不同注气位置及注气压力下吹填土预压排水速率、孔隙水运动机制等进行了初步研究。

3 计算模型

本文计算模型为软土地基的无砂垫层真空预压加固，并联合注气进行加固增效。数值分析采用商业软件 ABAQUS 进行计算分析，计算工况如表 1，工况 1~工况 6.6，分别对应不同注气位置和注气压

力。为真实模拟吹填土特性及研究注气位置的影响机制，加固区土体采用文献[10]中工程土体参数，只设置单层土层，考虑土体弹塑性及大变形。根据平面应变等效原则，先将排水板转换为沙井，再将轴对称沙井地基转化为二维沙墙地基进行计算，图 1 为计算模型示意图。由于本文模拟的排水板板长度不大于 20 m，因此，可忽略井阻作用。土体采用摩尔-库仑本构模型，转化后土体各参数见表 2。塑料排水板本构模型采用线弹性模型，间距 $d=1.0$ m，插板深度 5.0 m，弹性模量 $E=3\ 000$ kPa，等效直径 $d_w=60$ mm，泊松比 $\mu=0.25$ ，渗透系数 $k=6.49 \times 10^{-6}$ m/s。

表 1 各工况注气参数设置

Table 1 Parameters of air injection for different cases

工况	注气点位置（坐标）	注气压力/kPa
工况 1	不注气	/
工况 2	注气点 1(0.50, 6.00)	70
工况 3	注气点 2(0.50, 5.50)	70
工况 4	注气点 3(0.50, 5.00)	70
工况 5	注气点 4(0.50, 4.50)	70
工况 6.1	注气点 5(0.50, 4.00)	50
工况 6.2	注气点 5(0.50, 4.00)	60
工况 6.3	注气点 5(0.50, 4.00)	70
工况 6.4	注气点 5(0.50, 4.00)	80
工况 6.5	注气点 5(0.50, 4.00)	90
工况 6.6	注气点 5(0.50, 4.00)	100

每种工况设 5 个监测点，分别为测点 1（0.25，6.00），测点 2（0.25，5.50），测点 3（0.25，5.00），测点 4（0.25，4.50），测点 5（0.25，4.00），见图 1。

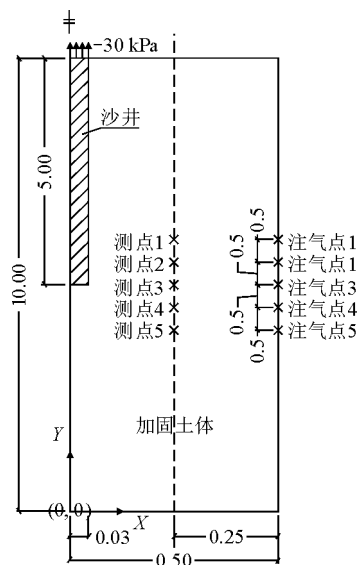


图 1 计算简化模型与测点位置（单位：m）

Fig.1 Schematic diagram of model and location of measuring points (unit: m)

表 2 加固区土体参数
Table 2 Parameters of soil in reinforced area

渗透系数 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	泊松比 μ	压缩模量 E/kPa	黏聚力 C/kPa	摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
2.87×10^{-8}	0.32	2 600	28	12	17.2

设定模型土体底部为固定边界, 表面为自由变形, 侧边界仅允许竖向位移。网格采用平面应变孔压单元类型 (CPE8RP), 8 结点二次缩减积分四边形网格, 结构化渐变网格划分, 共 19 620 个单元。为保证排水板底部始终位于水面下, 设初始水面与地面齐平, 无砂垫层真空预压的负孔压边界条件为 -30 kPa , 仅作用在沙井表面。注气压力大于注气点静水压力。由于气体黏度很小, 注气一段时间后, 会使土体产生裂缝, 长时间注气容易造成气窜, 因此采用间歇性注气, 注气阶段每天仅注气 2 h。注入气体过程中, 土中流体 (水或者气体) 压力会大幅上升, 以增大软基排水的效率。当停止气体注入, 注气时所形成的土体裂隙会进一步提高真空度向远处传递的速率。模型时间步见表 3, 第 1 天施加地应力分析荷载步。

表 3 模型的时间步
Table 3 Time steps in the model

第 1 天	第 2~5 d (加载真空)	第 6~35 d (抽真空)	第 36~55 d (抽真空+注气)	第 56~85 d (抽真空)
	线性减小至 -30 kPa	-30 kPa	-30 kPa	-30 kPa
	无	无	每天注气 2 h	无

4 结果与分析

4.1 表面沉降与抽水量的关系

以工况 1 为例进行分析, 采用传统无砂垫层真空预压法, 无注气。图 2 为该工况在抽真空固结阶段 (除去线性加载段) 的沉降量-总排水量关系曲线, 总排水量的负号表示水量的排出, 沉降量的负号表示竖直向下。从图 2 可以看出二者大致呈正相关关系, 表明饱和土体孔隙几乎全部被水填充, 孔隙中的水被排出的过程, 即土体产生压缩的过程。由此可知, 排出的水量越多, 沉降量就越大。

4.2 注气位置的影响

工况 1 为无注气情况; 工况 2 和工况 3 的注气点在沙井底部上端, 与沙井底部横向距离为 $0.5d$ (0.5 m), 竖向距离分别为 d (1 m) 和 $0.5d$ (0.5 m); 工况 4 的注气点与沙井底部同高, 水平间距 $0.5d$; 工况 5 和工况 6.3 的注气点在沙井下端, 与沙井底

部的竖向距离分别为 $0.5d$ 与 $1d$ (具体见图 1)。注气压力均为 $+70\text{ kPa}$ 。经过不同工况的数值模拟, 可以获得不同注气位置作用下的各个测点的流速大小及 x 、 y 方向的流速。表 4 为工况 1~5 及工况 6.3 在第一次注气 2 h 后 (第 36 d) 各测点的流速。

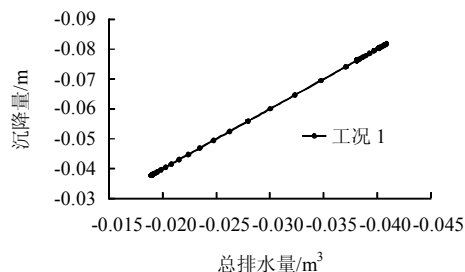


图 2 表面沉降与总排水量之间的关系 (工况 1)
Fig.2 Relationship between ground settlement and total volume of extracted water

工况 2~6.3 计算所得各测点的最大流速约为 10^{-6} 量级, 乘以 2 h, 可知注入的空气在 2 h 时间内最大移动距离约为 $7.2\times 10^{-3}\text{ m}$, 未到达沙井, 由此可近似认为各测点的流速即为渗流流速, 沙井表面计算所得的流体排出量全部为水, 不包含注入的空气。

图 3 为工况 1~5 及 6.3 的沙井表面总排水量与排水速率。从图中可以看出, 无论注气点位置在沙井底部的上或下, 注气时排水速率都有明显增加; 注气结束时, 排水速率逐渐减小至与未注气情况相同。总排水量在注气段有明显增幅。可知, 在真空预压时进行注气有利于提高排水速率、软土固结。

根据表 4 的数据和图 4 可知, 注气后, 渗透比降最大值可达到未注气情况的 50 倍左右, 驱动力极大。当注气点在沙井底部上端时, 注气对方水流起促进作用, 对排水板底部附近的水流造成一定阻碍, 对方及下方较远处的水流影响不大; 注气点在沙井底部附近时, 同样对下方方向上的水流造成阻碍; 注气点在沙井底部下端时, 沙井附近的水流流速全部向上, 偏向沙井, 对抽水起有利作用; 比较工况 5 和工况 6.3 可知, 当注气点距离排水板较远时, 促进作用会相对减弱。因此可知, 设置注气点在沙井下方, 距离沙井底部 $0.5d\sim 1d$ 的范围内比较合适。

4.3 注气压力

从图 5 可以看出, 工况 6.1~6.6 为同一注气点, 注气点位置在沙井底部下方, 改变注气压力大小, 从 50 kPa 变化至 100 kPa , 在不冲破上方土层的情况下, 注气压力越大, 沙井的排水量越大, 排水速率越快。

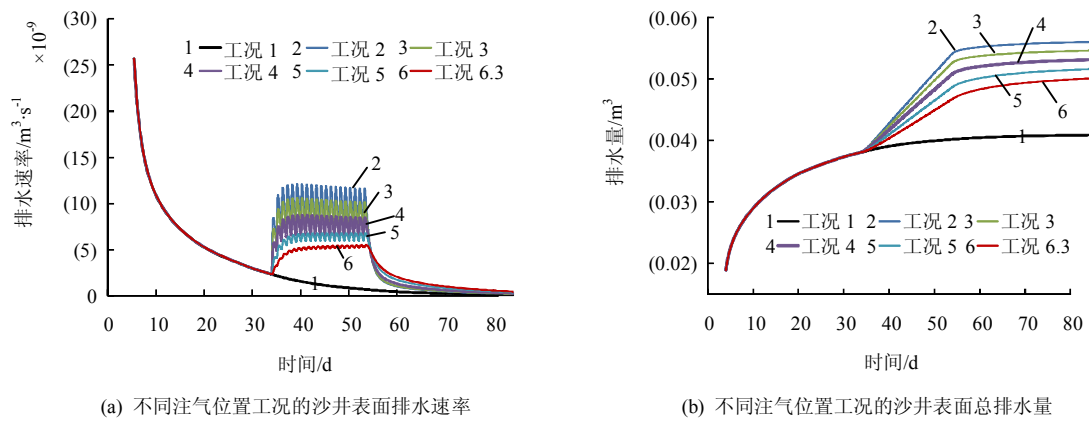


图 3 不同注气位置工况的沙井表面总排水量与排水速率

Fig.3 Relationships between drainage volume and drainage rate for different cases of injecting locations

表 4 注气 2 h 后各工况不同测点的渗流速度计算值

Table 4 Velocities for the measuring points after air injecting time of 2 h(m/s)

工况	流速	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5
工况 1	magnitude	4.116×10^{-10}	9.422×10^{-10}	3.584×10^{-9}	4.224×10^{-9}	3.988×10^{-9}
	X 方向	-1.205×10^{-10}	-5.368×10^{-10}	-1.541×10^{-9}	-1.114×10^{-10}	-2.986×10^{-12}
	Y 方向	3.936×10^{-10}	7.742×10^{-10}	3.235×10^{-9}	4.223×10^{-9}	3.988×10^{-9}
工况 2	magnitude	$1.063 \times 10^{-7} \uparrow$	$1.703 \times 10^{-8} \uparrow$	$1.834 \times 10^{-9} \downarrow$	$3.750 \times 10^{-9} \downarrow$	3.974×10^{-9}
	X 方向	-1.061×10^{-7}	-6.977×10^{-9}	1.826×10^{-9}	-1.354×10^{-12}	-2.199×10^{-12}
	Y 方向	-5.238×10^{-9}	-1.553×10^{-8}	1.550×10^{-10}	3.750×10^{-9}	3.974×10^{-9}
工况 3	magnitude	$1.783 \times 10^{-8} \uparrow$	$9.873 \times 10^{-8} \uparrow$	$1.588 \times 10^{-8} \uparrow$	$2.384 \times 10^{-9} \downarrow$	3.915×10^{-9}
	X 方向	-7.011×10^{-9}	-9.869×10^{-8}	-7.739×10^{-9}	-2.325×10^{-10}	-4.442×10^{-12}
	Y 方向	1.639×10^{-8}	1.051×10^{-9}	-1.387×10^{-8}	2.373×10^{-9}	3.915×10^{-9}
工况 4	magnitude	$2.752 \times 10^{-9} \uparrow$	$1.702 \times 10^{-8} \uparrow$	$8.452 \times 10^{-8} \uparrow$	$1.371 \times 10^{-8} \uparrow$	$2.838 \times 10^{-9} \downarrow$
	X 方向	2.014×10^{-9}	-7.178×10^{-9}	-8.433×10^{-8}	-6.319×10^{-9}	-8.219×10^{-11}
	Y 方向	1.874×10^{-9}	1.543×10^{-8}	5.263×10^{-9}	-1.216×10^{-8}	2.837×10^{-9}
工况 5	magnitude	$6.057 \times 10^{-10} \uparrow$	$1.900 \times 10^{-9} \uparrow$	$2.070 \times 10^{-8} \uparrow$	$6.835 \times 10^{-8} \uparrow$	$1.034 \times 10^{-8} \uparrow$
	X 方向	3.071×10^{-10}	-3.722×10^{-10}	-8.773×10^{-9}	-6.817×10^{-8}	-3.085×10^{-9}
	Y 方向	5.218×10^{-10}	1.863×10^{-9}	1.875×10^{-8}	4.397×10^{-9}	-9.866×10^{-9}
工况 6.3	magnitude	4.113×10^{-10}	9.739×10^{-10}	$4.804 \times 10^{-9} \uparrow$	$1.798 \times 10^{-8} \uparrow$	$9.879 \times 10^{-8} \uparrow$
	X 方向	-9.260×10^{-11}	-5.133×10^{-10}	-1.784×10^{-9}	-4.572×10^{-9}	-9.465×10^{-8}
	Y 方向	4.008×10^{-10}	8.275×10^{-10}	4.460×10^{-9}	1.739×10^{-8}	-2.797×10^{-8}

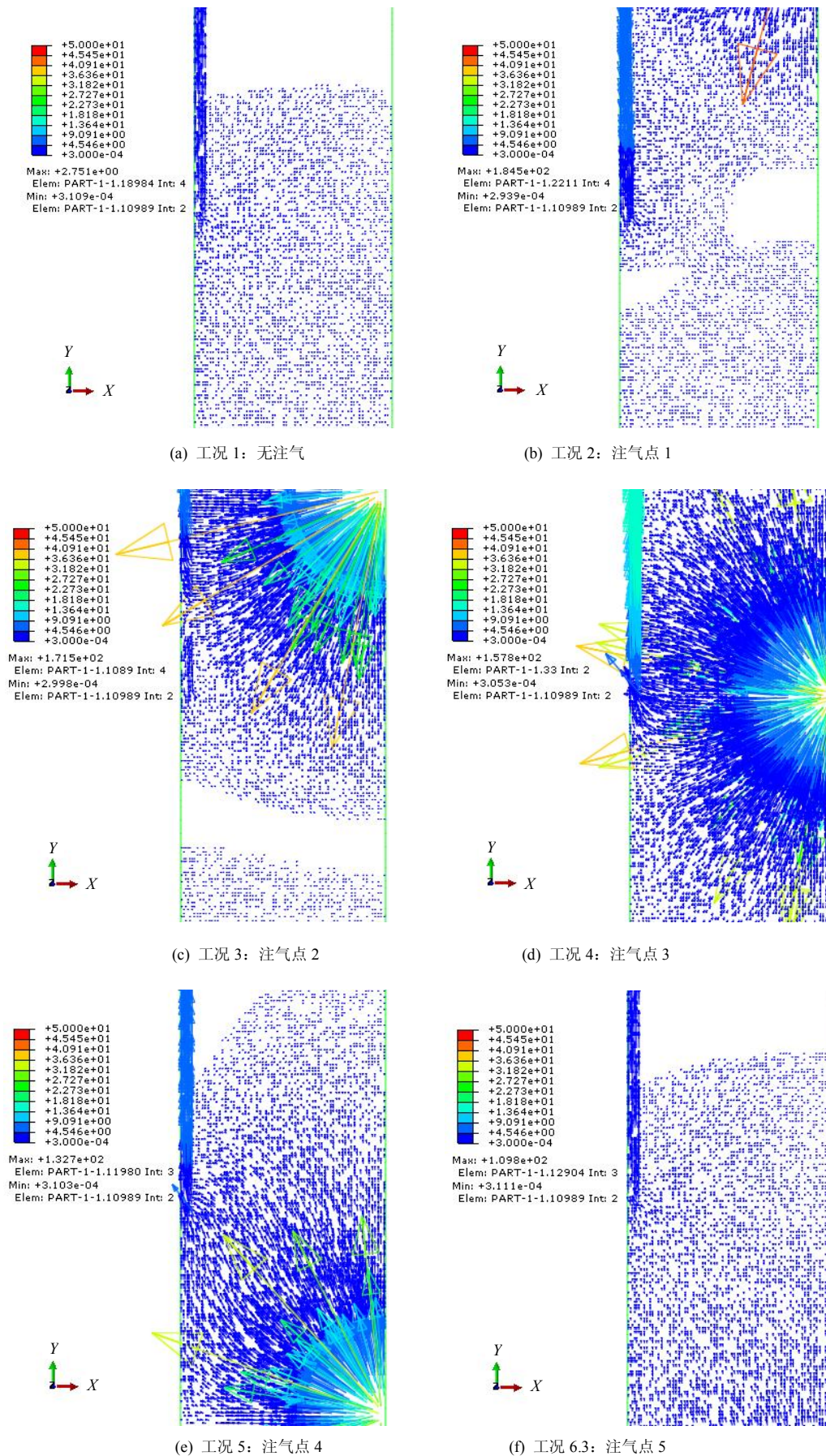
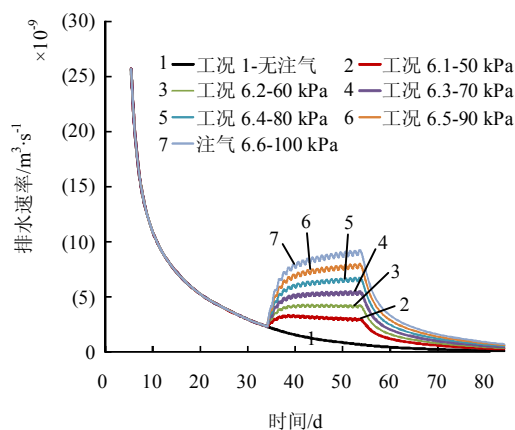
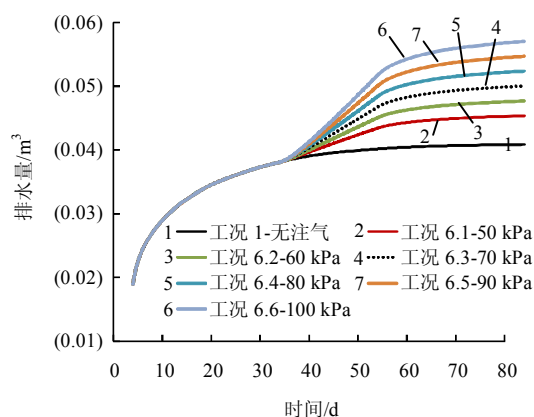


图 4 注气 2 h 后沙井底部附近的渗透比降分布图

Fig.4 Vector diagrams of seepage gradient around the bottom of sand well after injecting time of 2 h



(a) 不同注气压力工况的沙井表面排水速率



(b) 不同注气压力工况的沙井表面总排水量

图5 不同注气压力工况的沙井表面总排水量与排水速率
Fig.5 Relationship between drainage volume and drainage rate for different cases of injecting pressure

5 总结及建议

本文在无砂垫层真空降水法的基础上, 引入间歇性注气技术, 以改善传统方法的工期问题。气体具有易于流动的特性, 又有体积膨胀、扩散、降低界面张力的作用, 且质量轻, 可以同真空负压一样作为排水的驱动力。而且, 气体还会使土体产生微裂缝, 形成排水通道, 加快排水。综合分析数值模拟结果, 可得如下结论:

(1) 注气可显著提高渗流水力梯度场, 加速土中水的定向转移;

(2) 由于气体的轻质特性, 在排水板底部下方注气优于上方注气, 但距离不能太远, 否则效果较微;

(3) 在相同位置注气, 则注气压力越大, 排水速率也越大; 但应注意气窜问题, 不能击穿上部土体, 解决方法可以是控制注气大小、间歇性注气等;

(4) 控制注气点与排水板的距离, 防止注入的

气体连续进入排水板, 挤占排水通道。

该新型软土地基排水加固技术, 若结合系统的室内试验或现场验证试验, 可望进一步验证其排水增效机制, 并在率定其施工关键参数基础上, 为软土加固工程技术的推广应用提供有力的理论支持。

参考文献

- [1] 曹永琅, 丛建, 吴晓峰. 高速公路超软土地基的真空预压加固研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 771-775.
CAO Yong-lang, CONG Jian, WU Xiao-feng. Study on consolidation of supersoft ground of expressway with vacuum preloading method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(5): 771-775.
- [2] 武亚军, 覃萍, 邹道敏, 等. 不同加载方式下真空加固吹填软土的现场试验与数值模拟[J]. 水运工程, 2013, 8: 165-172.
WU Ya-jun, QIN Ping, ZOU Dao-min, et al. In-situ tests and numerical simulation of soft soil consolidation using vacuum preloading method under various loading[J]. **Port & Waterway Engineering**, 2013, 8: 165-172.
- [3] 吴跃东, 殷宗泽, 郭纪中. 真空联合堆载预压法加固水工建筑物软基效果检验[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 738-742.
WU Yue-dong, YIN Zong-ze, GUO Ji-zhong. Assessment of effect of ground improvement for hydraulic structure using combined vacuum and surcharge preloading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(4): 738-742.
- [4] 徐伟, 刘斯宏, 王柳江, 等. 真空预压联合电渗法加固软基的固结方程[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(2): 169-175.
XU Wei, LIU Si-hong, WANG Liu-jiang, et al. Analytical theory of soft ground consolidation under vacuum preloading combined with electro-osmosis[J]. **Journal of Hohai University(Natural Sciences)**, 2011, 39(2): 169-175.
- [5] 丛建, 曹永琅, 杨成军. 真空预压联合碎石桩加固港口吹填堆场地基的试验研究[J]. 海岸工程, 2007, 26(1): 41-47.
CONG Jian, CAO Yong-lang, YANG Cheng-jun. Experimental study on consolidation of port reclamation stack yard foundation by means of vacuum preloading and broken stone pile[J]. **Coastal Engineering**, 2007, 26(1): 41-47.
- [6] 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(增刊 2):

- 1590–1593, 1623.
- XIE Li-quan, NIU Yong-chang, LIU Fang, et al. Numerical analysis of vacuum drainage with air injection[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2009, 5(Supp.2): 1590–1593, 1623.
- [7] SANKAR N VENKATRAMAN, JOHN R S, THOMAS M B. Application of pneumatic fracturing to enhance in situ bioremediation[J]. **Journal of Soil Contamination**, 1998, 7(2): 143–162.
- [8] HEN S L, MIURA N, KOGA H. Interaction mechanism between deep mixing column and surrounding clay during installation[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2003, 40(2): 293–307.
- [9] 朱平, 孙立强, 闫澍旺, 等. 可控通气真空预压室内模型试验及其机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 1): 3141–3148.
- ZHU Ping, SUN Li-qiang, YAN Shu-wang, et al. Model test of vacuum preloading with controlled ventilation and its mechanism analysis. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(Supp.1): 3141–3148.
- [10] 章定文, 刘松玉, 顾沉颖, 等. 土体气压劈裂的室内模型试验[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(12): 1925–1929.
- ZHANG Ding-wen, LIU Song-yu, GU Chen-ying, et al. Model tests on pneumatic fracturing in soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(12): 1925–1929.
- [11] 刘松玉, 韩文君, 章定文, 等. 劈裂真空法加固软土地基试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 591–599.
- LIU Song-yu, HAN Wen-jun, ZHANG Ding-wen, et al. Field pilot tests on combined method of vacuum preloading and pneumatic fracturing for soft ground improvement[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(4): 591–599.
- [12] 黄峰, 王贵和, 杨宇友, 等. 真空-注气降水一维模型试验研究[J]. 施工技术, 2012, 41(24): 79–82.
- HUANG Feng, WANG Gui-he, YANG Yu-you, et al. Experimental study of one-dimensional vacuum-air injection dewatering model[J]. **Construction Technology**, 2012, 41(24): 79–82.