

注气增压作用下的软土排水增效机理试验研究

梁泽龙¹, 谢立全¹, 顾宽海², 江 波³

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032;

3. 上海地产北部投资发展有限公司, 上海 201907)

摘要: 通过重塑土的一维物理试验研究了软土注气增压排水效果的内在机理。试验系统包括增压装置、软土压密(劈裂)观测装置、排水量测量装置等。随后观测了软土沉降、排水过程及裂隙发育特征。结果表明: 压力气体通过孔隙水的驱替与孔隙的弹性扩张实现土体排水压密与劈裂, 同时结合表层土体的明显薄弱特征(或裂隙)、平整密实程度, 可将注气增压作用下的软土排水增效机理分为排水且劈裂、排水并压密与排水且贯通 3 种排水增效机制。

关键词: 真空预压法; 注气增压; 软土; 排水; 劈裂; 沉降

中图分类号: TU447

文献标志码: A

Experimental Study on Drainage Efficiency Enhancement Mechanism of Soft Soil Under Air-injection Pressurization

LIANG Zelong¹, XIE Liquan¹, GU Kuanhai², JIANG Bo³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China; 3. Shanghai Real Estate North Investment Development Co., Ltd., Shanghai 201907, China)

Abstract: In this paper, we investigate the inherent mechanism of the drainage effect of soft soil under air-injection pressurization through one-dimensional physical tests on the remolded soil. The experimental system includes pressurization devices, soft soil compaction (fracture) observation devices, drainage measurement devices, etc. Then, we observe the settlement of the soft soil, the drainage process, and the crack development characteristics. The results show that the pressure gas achieves the drainage compaction and fracturing of the soil by displacing the pore water and elastically expanding the pores. Combined with the obvious weak characteristics (or cracks) and the degree of surface soil

compaction, the drainage enhancement mechanisms of soft soil under air injection pressurization can be divided into three types: drainage with fracturing, drainage with compaction, and drainage with permeability.

Key words: vacuum preloading; air-injection pressurization; soft soil; drainage; pneumatic fracturing; settlement

港口、码头、海上机场等大型工程往往需要耗费大量的疏浚泥土以形成地基, 这些土的最大特点是含水量高、抗剪强度低、渗透性差。因此, 对吹填所形成的软土地基进行加固改造, 使其达到相应承载力要求, 将是首要任务。

依靠软土地基自重和堆载预压实现土体加固的效率是很有限的, 因此促进土体固结的快速方法如真空预压法^[1-4]、电渗法^[5]等应运而生。在地基处理技术中, 真空预压法因其成本低、对环境友好、施工周期短等优点而被广泛使用^[2]。传统的真空预压系统包括预制的竖向排水体(PVDs)、射流泵和嵌有水平管道的砂垫层, 该方法的原理是在排水板之间形成真空渗流场, 促使土体中的水不断地排出。然而, 随着土体固结, 真空形成的压力差使土体中的细颗粒聚集在竖向排水板周围, 从而产生了明显的淤堵效应, 致使土体中的孔隙水较难排出^[6]。土层越深, 常规真空预压法加固难度越大。为了克服这些问题, 一些学者提出将压缩空气注入竖向排水体中以辅助基于真空预压法的土体加固^[7-11], 即真空预压联合注气(APVP)法。

目前对真空预压联合注气法的研究主要集中在工程应用和试验验证上。在工程应用方面, Shen 等^[8]在某高铁站基础的地基处理中引入了真空预压

收稿日期: 2022-02-22

基金项目: 国家自然科学基金(51479137)

第一作者: 梁泽龙(1992—), 男, 博士生, 主要研究方向为软土地基处理与加固。E-mail: 1710194@tongji.edu.cn

通信作者: 谢立全(1972—), 男, 研究员, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为近海、海洋岩土工程及深水建筑物安全防护。E-mail: xie_liquan@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

联合注气方式,证实了真空预压联合注气法能有效降低工后沉降、缩短工期。龚永康等^[12]在处理新近吹填土时也验证了真空预压联合注气法可以有效改善土体的物理力学特性。在试验研究中,Liu等^[9]提出了真空预压与气动压裂相结合的方法,发现可以使真空处理的深度增加。近几年,Lei等^[13-14]进行了一系列的试验来验证真空预压联合注气法的增效作用,并基于压力气体在土体中的运移规律,对其在辅助真空预压时的加固机理进行了研究。

不同学者对真空预压联合注气法中压力气体辅助真空预压时的加固机理有不同看法。由雷华阳等^[14]的试验可知,压力气体辅助真空预压时的土体固结经历了3个阶段:①土体固结初期,土体含水量高,此时压力气体的作用是搅拌土体而使其更均匀;②土体固结中期,压力气体虽然不断使土体产生细小裂缝并不断扩展,但被“困”在某个区域内,此时压力气体可视为均布荷载,增大注气点与竖向排水体之间的压差,从而增加排水速率;③土体固结后期,压力气体劈裂土体,使注气点与竖向排水体之间形成渗流通道,在缓解排水体周围淤堵问题的同时也失去了增压作用。金亚伟等^[7]、Shen等^[8]、谢立全等^[10-11]更期望压力气体的持续增压,并且时间越长越好;而Liu等^[9]则更倾向于有压气体所产生的劈裂

效果。

针对压力气体辅助真空预压时的加固效果,通过重塑土的一维物理试验,模拟了注气增压作用下气驱排水3个阶段全过程,并结合各阶段的土体沉降与排水数据对3个阶段进行了科学划分,研究了多工况下的排水增效表现。通过储水管内的水位变化进行水压力动态测试,得到了排水量变化的全过程。通过排水数据,分析了提升气体压力、土体初始裂隙所能带来的排水增效表现,研究了土体表面覆水逐渐减少直至气体进入土体内部的过程、土体沉降特征与排水量的关联度,以及土体表面孔、空腔或裂缝的形成机制。注气增压作用下的软土排水增效机制很复杂,探究了压力气体对土体的劈裂作用及排水增效表现,有利于更深层次地认识与利用真空预压联合注气的地基处理方法。

1 试验概况

1.1 试验仪器和材料

试验在同济大学水利港口综合实验室进行,试验用土(灰色淤泥质黏土)取自上海某河道整治工程,取样深度约为10 m,基本土性参数如表1所示。

表1 土性参数

Tab.1 Parameters of soil property

含水率/%	天然重度/(kN·m ⁻³)	孔隙比	渗透系数/(cm·s ⁻¹)		固结快剪参数	
			k_h	k_v	c /kPa	φ /°
49.9	16.8	1.402	1.22×10^{-7}	9.24×10^{-8}	11	11.5

注: k_h 为水平渗流系数; k_v 为竖向渗流系数; c 为黏聚力; φ 为内摩擦角。

为保证试验的科学性与可重复性,室内模型试验采用重塑土,取原状土后,根据常规的烘干、粉碎、筛分等过程制备重塑土样以备试验之用。试验装置采用自主研发的试验设备(见图1),盛放土样的模型桶为透明高强度有机玻璃桶,内径10 cm、高30 cm,壁厚5 mm;上下2块方形盖板对模型桶进行密封,盖板边长15.6 cm,厚度2 cm,上盖板与增压系统连接,下盖板中心挖孔,孔径为9 cm,比模型桶内径略小,以便透水石可以放置在该模型桶内(作为透水面与承压面)。

1.2 试验方案与步骤

土体固结过程中压力气体可起到搅拌作用、增压作用与劈裂作用,而在实际应用中主要利用压力气体的增压作用与劈裂作用。试验方案的设计需充分兼顾以下3点:①为了体现压力气体的增压作用

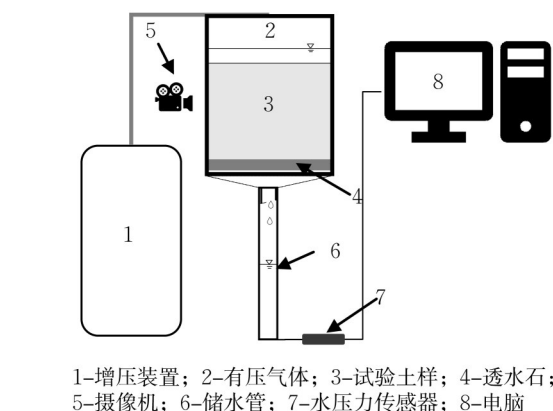


图1 试验装置

Fig.1 Experimental device

与劈裂作用,设置不同气压值;②为了模拟土体表面的气-水界面变化过程,在已制好的土样表面滴上一

定质量的水进行覆盖;③考虑到土体表面往往具有初始缺陷,故设置了一个土样表面存在微裂缝的试验组。共设置 7 组试验,气压为 15~35 kPa,按 5 kPa 递增,具体试验方案如表 2 所示。

表 2 试验方案		
Tab.2 Experimental scheme		
试验组别	气体压力/kPa	是否存在微裂缝
1	0	否
2	15	否
3	20	否
4	25	否
5	25	是
6	30	否
7	35	否

试验主要包括以下步骤:

(1)试验所用的原状土烘干、碾碎、过筛。为了使土样充分烘干,烘干时间在 24 h 以上,每隔 12 h 取样进行称量,直至相隔 2 次土的质量之差在 0.01 g 以内。之后,碾碎烘干的土样,并过 0.5 mm 的筛,目的是将其中的粗颗粒、草根等去除。

(2)采用泥浆制样法^[15]制备试验土样。称 1 kg 的干土粉,在干土粉中直接加入大于液限含水量的水(0.6 kg 水),利用搅拌器充分搅拌,静置 48 h。在制样前,称量主体圆桶、底板与透水石的总质量;经过 48 h 的密封自重沉降后,由于底板上嵌有透水石,因此重新称量装置总质量(含土、水质量),2 次质量之差作为开始试验的土样质量。对 7 组试验的土样质量与土样高度进行统计,质量为 1.387 kg(±7.85 g),高度为 10.2 cm(±0.1 cm),均在误差允许范围内。根据表 1 中的含水率、天然重度、孔隙比,再结合土的质量与体积,计算出试验土样的饱和度 $S_r=90.37\%$,因此试验用土可视为饱和土^[16]。

(3)在制备好土样后,用滴管吸取 31.4 g 水慢慢滴入土样,使每个土样表面覆水(高度大约 4 mm 左右),目的是模拟土体表面的气-水界面变化过程中压力气体对软土排水驱动力的转变过程。

(4)利用空压机对气囊充气以形成增压,使之达到试验所需压力,同时将集水监测系统中的储水管清空、水压力传感器清零,然后开始试验,直至气体冲破土体便停止试验。

在试验进行过程中,监测储水管中的水压力变化,并以固定间隔时间拍照(间隔时间根据注气压力大小适当调整),便于后期分析。

2 试验结果分析

根据储水管中的水压力变化与定时定点照片,分析压力气体驱使土体排水(简称为气驱排水)而产生的沉降过程,然后根据排水量与土体沉降定量分析压力气体的作用。结合土体破坏形态,讨论压力气体作用下的气驱排水增效机理。

2.1 排水沉降过程

无论土体表面是否存在微裂缝,气驱排水沉降过程都基本相同,以 35 kPa 气压下的土体排水沉降过程为例,土体排水沉降过程如图 2 所示。

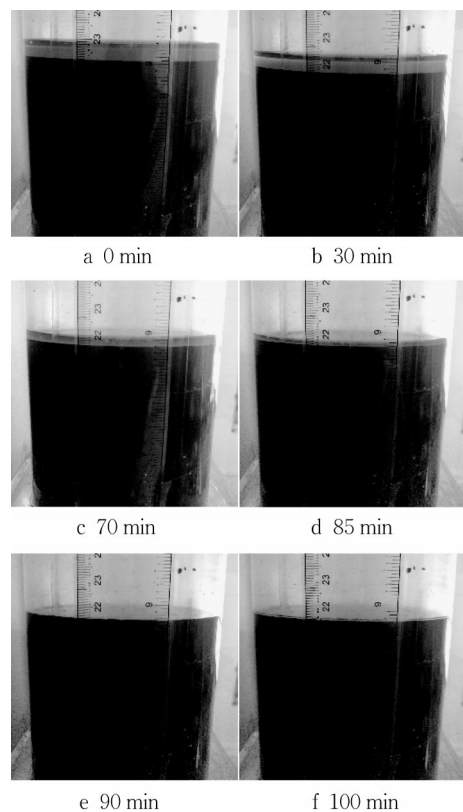


图 2 35 kPa 下土体排水沉降过程
Fig.2 Drainage and settlement process of the soil at 35 kPa

土体表面一旦覆水,则其排水沉降过程必将经历实际工程中土体表面的气-水界面变化过程。气驱排水所经历的过程为:阶段一(图 2a→图 2b),压力气体与土面覆水的增压作用驱使土体中的自由水排出而引起土体的明显沉降,同时土体饱和度增加,但土面覆水的水量并未见明显减少;阶段二(图 2c→图 2d),土面覆水不断地驱替土体中被挤出的水,此时土体中排水的速率并未降低,又因孔隙水的流动与土面覆水的补充水是连续的,造成土体轻微沉降,

但土面覆水在不断地降低;阶段三(图 2e→图 2f),压力气体直接作用于土体表面,驱替的是压力气体,压力气体通过孔隙水驱替与孔隙弹塑性扩张作用^[17],使土体形成裂缝、空洞等不可逆的塑形变形,就如韩文君等^[18]所提及的压力气体劈裂形成裂缝后再卸压的“自撑性裂缝”。当土面覆水不存在时,压力气体只经历阶段三,压力气体直接驱替土体中的孔隙水(自由水),并致使土体中的孔隙产生弹塑性变形,最后形成裂缝或空洞等。

2.2 排水

2.2.1 排水量

依据储水管规格,将试验中所测得的水压力变化过程转换成累积排水量过程,该排水量包含土面覆水的 31.4 g 水。由于试验停止是以压力气体击穿土体为准,因此 0 kPa 下的自重排水沉降所用时间最长,为 890 min。为了整体图形的整齐性与可比性,在绘制图形时,将其他气体压力下的时间延长至 890 min,如 15 kPa 的试验时间为 386 min,在第 386 min 的排水量为 65.598 1 g,而后从 387 min 至 890 min 的排水量保持不变,为 65.598 1 g。不同压力下气驱排水沉降的总排水量如图 3 所示,去除 31.4 g 土面覆水后的排水量及气驱排水增量如表 3 所示。这里的气驱排水增量是指相对于气体压力提升 5 kPa 后的排水量增加值。

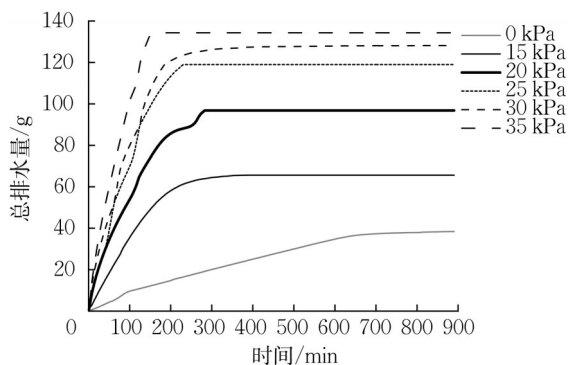


图 3 不同气体压力下总排水量

Fig.3 Total water discharge at different values of boosted air

由图 3 和表 3 发现,随着气体压力的增加,气驱排水量增加,但排水增量先增后减。对于某状态下土体而言,若存在土面覆水,则对应于实际工程中土体表面气-水界面变化过程,气体压力越大气驱排水量越大;从排水增量来看,存在可以最大限度发挥压力气体作用的气压值,为 30 kPa 左右。造成上述现象的主要原因是,气体压力越大时,虽然压力气体与

表 3 总排水量与排水增量

Tab.3 Total water discharge and water discharge increment

试验组别	气体压力/kPa	总排水量/g	气驱排水增量/g
1	0	7.00	
2	15	32.20	25.20
3	20	65.40	33.20
4	25	87.55	22.15
5	25	60.66	
6	30	96.74	9.19
7	35	102.95	6.21

土面覆水共同作用的类“均布荷载”作用可以更多地 将土中水排出,但是整体作用时间更短且气体更易 突破土体^[19]。气体压力过小时,限于某个应力作用 下的土体孔隙比(对饱和土而言,孔隙比与其含水率 可以一一对应)为定值,导致排水量过小,不利于土 体达到更高的固结沉降。

2.2.2 排水效率

为进一步描述不同气压下气驱排水效果,定义 排水效率(R_i)为相邻两时间点 $[t_i, t_{i+1}]$ 的排水量 $[w_i, w_{i+1}]$ 之差与其时间之差的比值,即:

$$R_i = \frac{w_{i+1} - w_i}{t_{i+1} - t_i} \quad (1)$$

取时间间隔为 1 min,即 $t_{i+1} - t_i = 1$ min,以 20 kPa 下第 200 min 的排水效率为例,将 $w_{201} = 85.830 3$ g, $w_{200} = 85.704 3$ g 代入式(1),可知 $R_{200} = 0.126$ g·min⁻¹。由此计算出各气体压力下气驱排水 效率 R_i ,如图 4 所示。

由图 4 可知,每个压力值下(>0 kPa)气驱排水 效率总体呈现下降趋势,但均比 0 kPa 下的排水效率 高。这说明压力气体确实可以加快土体排水,排水 过程中土体变得更密实,导致排水效率随时间的推 移不断减小。气驱作用转变时间点指的是气体与土 面覆水共同作用转变为仅气体作用的时间点。图 4 中的 80 min、95 min 分别为试验组别 6、4 所对应的转 变时间点,对比该时段(80~95 min)内不同压力下气 驱排水效率可知,气体压力越大,气驱排水效率越 高。

2.2.3 气驱作用转变排水量

以气体压力 25 kPa、25 kPa(存在微裂缝)、30 kPa、35 kPa 下的气驱排水量为例,根据定时定位照 片确定压力气体直接作用于土体表面的时间点,以 该时间点确定阶段一、二和阶段三的持续时长,其中 排水量包含土面覆水的质量(31.4 g),具体如表 4 所示。

由表 4 可知,对比试验组别 4、6 与 7,当气体压力

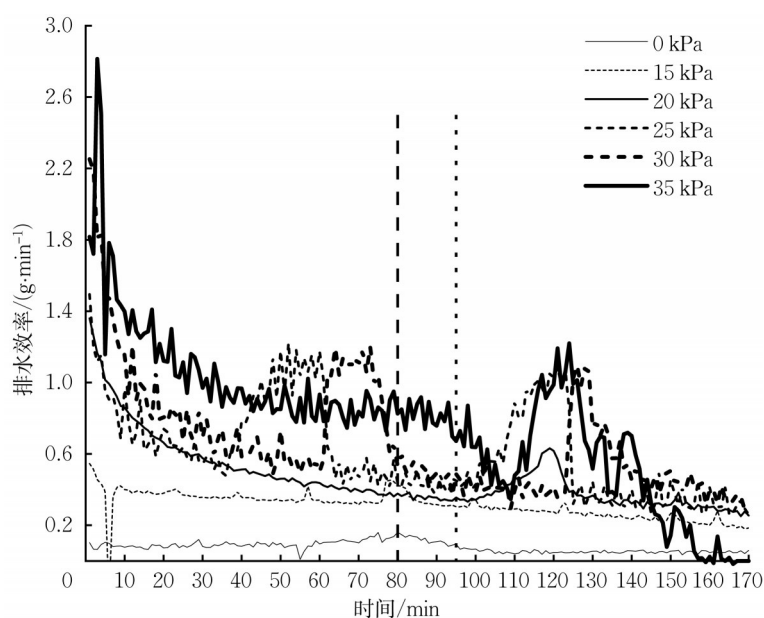


图4 不同气体压力下排水效率

Fig.4 Drainage efficiency at different values of boosted air

表4 气驱作用转变排水量

Tab.4 Water discharge by different effects of boosted air

试验组别	阶段一、二		阶段三	
	持续时长/ min	排水量/g	持续时长/ min	排水量/g
4	95	67.57	135	51.38
5	105	64.32	65	27.24
6	80	70.34	714	57.80
7	90	93.63	77	40.70

不同时,随着压力的增加,对于阶段一、二(土面覆水),土体中的孔隙水排出量也增加;当气体直接与土体接触后,气体压力越大,驱使土体中孔隙水的排出量减小,击穿土体的时间也减小。将试验组别6单独列出说明,结合如图3所示的总排水量,试验组别6(30 kPa)的排水量主要集中在前200 min,排水量约为115 g。若以此为总排水量,则在仅有压力气体作用时的排水量为45 g左右,符合前述描述的规律。试验组别6体现出的差异性主要与土体薄弱位置的随机性有关。进一步说明该现象,对比试验组别4与5,将土体薄弱位置人为扩大,即土体表面人造微裂缝,微裂缝的存在使气驱排水的总量减小,主要体现在压力气体直接作用于土体表面后(阶段三)的排水量差异。如表4所示,无微裂缝组的阶段三排水量为51.38 g,是存在微裂缝组(27.24 g)的1.89倍左右。

由表4的气驱作用转变时间点与图4结果可知,土体表面覆水与否,对该气压下的排水效率影

响不大。如图5所示,竖向划线为试验组别4的气驱作用转变时间点,点线为试验组别5的气驱作用转变时间点。由图5可知,排水效率与土体是否存在微裂缝关系不大,只与气体压力有关,但当压力气体与土体直接接触时,对于存在微裂缝的土体,压力气体较难将土体中的孔隙水排出,但利于土体形成劈裂裂缝。

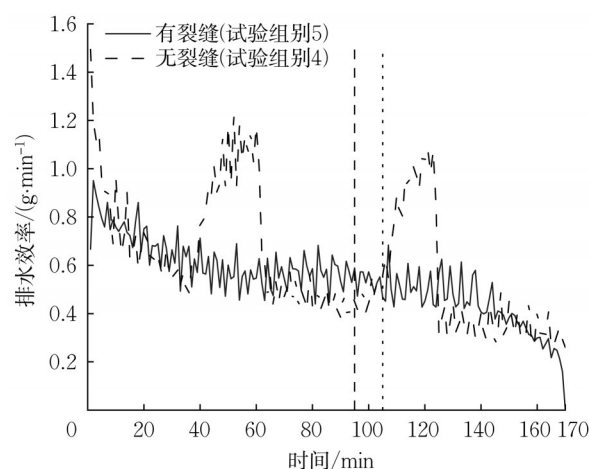


图5 25 kPa下土体表面有无微裂缝的排水效率

Fig.5 Drainage efficiency of the soil surface with or without microcrack under 25 kPa

2.3 土样沉降及破坏

为定量对比分析,通过排水量与照片分别估算试验组别4、5、6与7的土体总沉降,如表5所示。

由照片换算的土体沉降为7.0~7.5 mm,相差

表5 土体沉降
Tab.5 Soil settlement

试验组别	排水量换算/mm	照片换算/mm
4	11.08	7.5
5	7.72	7.0
6	12.02	7.0
7	12.80	7.5

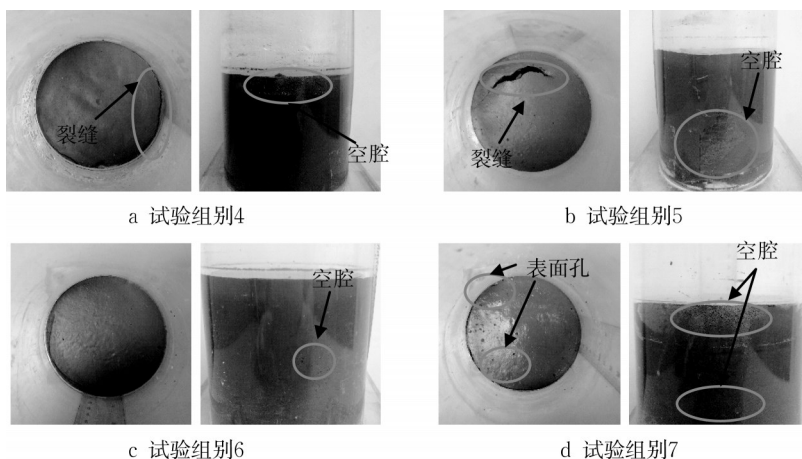


图6 不同气体压力下土体破坏(左为俯视图,右为侧视图)

Fig.6 Soil damage at different air pressures(top view on the left and side view on the right)

观察图6中的土样表面与侧面,4组试验侧边均发现空腔且贴壁(土体与管壁为薄弱处),说明压力气体在排水过程中均压密土体,使压力气体主要通过土体与管壁之间贯穿土体。根据压力气体所造成的土体破坏情况,可将排水增效分成3种情况:①排水且劈裂,即土体最终破坏形式为裂缝+空腔组合(试验组别4、5),有压气体在排水的同时劈裂贯通土体,使土体形成排水优势通道;②排水并压密,即土体最终破坏形式为表面平整+空腔组合(试验组别6),有压气体在排水的同时压密土体;③排水且贯通,即土体最终破坏形式为表面孔+空腔组合(试验组别7),有压气体在排水的同时形成不易观察的“排水通道”。第一种主要对应的是注气增压口处土体存在明显薄弱的情况,第二种则是注气增压口处土体较为密实且均匀的情况,第三种介于第一种与第二种之间。

3 讨论

以具体的新近吹填土增压式真空预压现场工程^[20]进一步说明试验设计的合理性。由图7可知,真空管之间土体浸没于水中(土体含水率高且饱和),增压管通过人工打设,分别对应于土面覆水的设计与土体表面人为制造的微裂缝。虽然该装置可

不大,由排水量换算的沉降都大于照片所体现的宏观沉降。结合图2和图6,压力气体直接作用于土体时,不利于实现整体性的土体沉降,却可贯穿土体,使其形成表面孔、空腔或裂缝,并在此过程中实现排水增效。

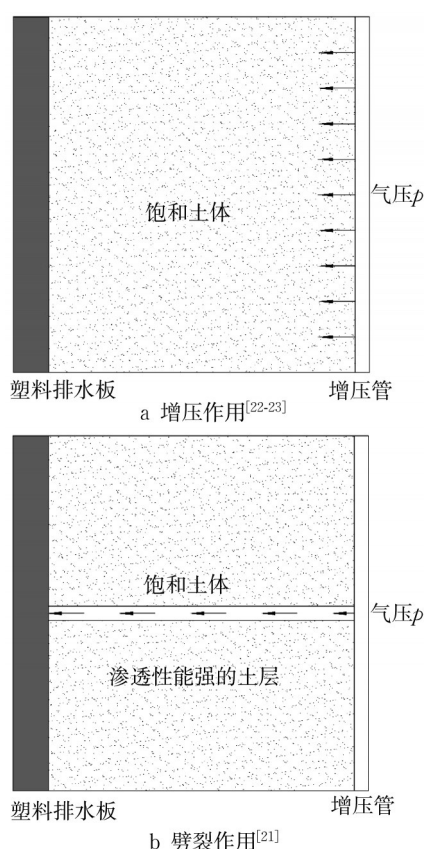
以可视化土体在压力气体下的排水沉降过程,但是仅适用于低应力土体的注气增压试验,需要进一步考虑如何通过一套设备,既可实现不同应力状态下的土样制备,又可实现可视化。



图7 增压管打设^[20]

Fig.7 Installation of boosted pipes^[20]

上述提及的3种气驱排水模式,可以为真空预压联合注气法的砂井固结理论推导中的假设合理性提供试验支持,具体如图8所示。一种是韩文君^[21]提出的多层砂井固结理论(将压力气体劈裂而成的裂缝作为优势排水通道,对应情况①);另一种是沈宇鹏等^[22-23]提出的类“围压”边界,即在侧向气体增压时,可将压力气体作为围压(对应情况②),且可忽略由压力气体造成的侧向变形。现阶段缺乏对应情况③的理论分析,需进一步研究。

图8 压力气体作用^[24]Fig.8 Effect of boosted air^[24]

除此之外,在真空预压联合注气排水的实际应用中,应注意可能残留在土体中的气体,应及时设法处理,如雷华阳等^[14]模型试验中的处理方式:在增压完全结束后,继续抽真空直至位移稳定,避免气体赋存于土体中而造成的工后沉降,或在注气处将注入的空气重新抽出。

4 结论

(1)压力气体可以驱使土体中的孔隙水更快排出,实现形式主要包括孔隙水的驱替与孔隙的弹塑性扩张,但最终排水量与土体状态(土体密实情况、孔隙分布、接触面薄弱位置分布等)息息相关,排水效率主要决定于所施加的气体压力大小。

(2)压力气体直接作用于土体时,不利于实现整体性的土体沉降,易贯穿破坏土体,主要分为3种情况:①裂缝+空腔组合。排水的同时贯穿土体而形成排水优势通道,即排水且劈裂;②土表面平整+空腔组合。排水的同时压密土体,即排水并压密土体;③土表面孔+空腔组合。排水的同时形成“不易观察到”的排水通道(连续),即排水且贯通土体。该气

驱排水机制可为基于砂井固结理论求解真空预压联合注气法的固结提供试验支撑。

(3)对于气体增压联合真空排水的地基处理技术,其工程应用需要特别注意可能残留在土体中的气体,应及早处理。如:在注气处将注入的空气重新抽出来;在增压完全结束后,继续抽真空直至位移稳定,避免气体赋存于土体中而造成的工后沉降。

作者贡献声明:

梁泽龙:论文初稿撰写,试验设计与实施,数据处理。

谢立全:试验设计与指导,论文修改及润色。

顾宽海:论文修改与润色及试验指导。

江 波:试验支持与指导。

参考文献:

- [1] KJELLMAN W. Consolidation of clay soil by means of atmospheric pressure [C]//Proceedings of Conference on Soil Stabilization. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 1952: 258-263.
- [2] CHU J, YAN S W, YANG H. Soil improvement by the vacuum preloading method for an oil storage station [J]. Geotechnique, 2000, 50(6): 625.
- [3] CHAI J C, CARTER J P, HAYASHI S. Vacuum consolidation and its combination with embankment loading [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43(10): 985.
- [4] 王炳龙, 杨龙才, 宫全美, 等. 真空联合堆载预压法加固软土地基的试验研究 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(4): 499.
WANG Binglong, YANG Longcai, GONG Quanmei, et al. Experimental study on soft soil reinforced by vacuum combined with fill preloading [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2006, 34(4): 499.
- [5] FU Hongtao, CAI Yuanqiang, WANG Jun, et al. Experimental study on the combined application of vacuum preloading: variable-spacing electro-osmosis to soft ground improvement [J]. Geosynthetics International, 2017, 24(1): 72.
- [6] CAI Yuanqiang, XIE Zhiwei, WANG Jun, et al. New approach of vacuum preloading with booster prefabricated vertical drains (PVDs) to improve deep marine clay strata [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, 55(10): 1359.
- [7] 金亚伟, 金亚君, 蒋君南, 等. 增压真空预压固结处理软土地基/尾矿渣/湖泊淤泥的方法: 中国, CN101418566[P]. 2009-07-15
JIN Yawei, JIN Yajun, JIANG Junnan, et al. Pressurized vacuum preloading consolidation method for soft soil foundation/tailing slag/lake mud: China, CN101418566 [P]. 2009-07-15.
- [8] SHEN Yupeng, WANG Huihuang, TIAN Yahu, et al. A new approach to improve soft ground in a railway station

- applying air-boosted vacuum preloading [J]. Geotechnical Testing Journal, 2015, 38(4): 20140106.
- [9] LIU Songyu, ZHANG Dingwen, DU Guangyin, *et al.* A new combined vacuum preloading with pneumatic fracturing method for soft ground improvement [J]. Procedia Engineering, 2016, 143: 454.
- [10] 谢立全. 注气式真空降水方法: 中国, CN101215833 [P]. 2008-07-09.
- XIE Liquan. Method of vacuum drainage combined with air injection: China, CN101215833 [P]. 2008-07-09.
- [11] 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(S2): 1590.
- XIE Liquan, NIU Yongchang, LIU Fang, *et al.* Numerical analysis of vacuum drainage with air injection [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(S2): 1590.
- [12] 龚永康, 郑丽华, 蔡建. 真空预压法处理新近吹填淤泥非饱和带研究[J]. 水运工程, 2017(2): 155.
- GONG Yongkang, ZHENG Lihua, CAI Jian. Treatment of newly blown muck unsaturated zone by vacuum preloading [J]. Port & Waterway Engineering, 2017(2): 155.
- [13] LEI Huayang, QI Ziyang, ZHANG Zipeng, *et al.* New vacuum-preloading technique for ultrasoft-soil foundations using model tests [J]. International Journal of Geomechanics, 2017, 17(9): 04017049.
- [14] 雷华阳, 王鹏, 刘旭, 等. 基于气体运移规律的增压式真空预压法加固机制分析[J]. 岩土力学, 2021, 42(4): 943.
- LEI Huayang, WANG Peng, LIU Xu, *et al.* Influence of gas migration patterns on reinforcement of dredged slurry by air-booster vacuum preloading method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(4): 943.
- [15] 胡琦, 张海, 许四法, 等. 重塑饱和杭州黏土压缩特性试验研究[J]. 浙江工业大学学报, 2014, 42(2): 190.
- HU Qi, ZHANG Hai, XU Sifa, *et al.* Study on the compressibility of Hangzhou remolded saturated clay [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2014, 42(2): 190.
- [16] 吴健. 土力学与地基基础[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2020.
- WU Jian. Soil mechanics and foundation [M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2020.
- [17] BOUDREAU B P. The physics of bubbles in surficial, soft, cohesive sediments [J]. Marine & Petroleum Geology, 2012, 38(1): 1.
- [18] 韩文君, 刘松玉, 章定文. 土体气压劈裂裂隙扩展特性及影响因素分析[J]. 土木工程学报, 2011, 44(9): 87.
- HAN Wenjun, LIU Songyu, ZHANG Dingwen. Characteristics and influencing factors analysis of propagation of pneumatic fracturing in soils [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(9): 87.
- [19] ZHANG Yiping, CHEN Yongjin, LV Huabin, *et al.* Gas injection test of remolded saturated soil with consolidation [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2021, 39(9): 1115.
- [20] 吴松华. 增压式真空预压法加固新近吹填土现场试验研究[J]. 水运工程, 2018(9): 181.
- WU Songhua. Field test on newly blown fill soil reinforced by pressurized vacuum pre-compacting [J]. Port & Waterway Engineering, 2018(9): 181.
- [21] 韩文君. 劈裂真空法加固软土地基理论与工程应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2012.
- HAN Wenjun. Theory study and engineering application on combined method of vacuum preloading and pneumatic fracturing for soft ground [D]. Nanjing: Southeast University, 2012.
- [22] 沈宇鹏, 王云超, 董淑海, 等. 增压式真空预压处理单层均质土固结理论研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(4): 118.
- SHEN Yupeng, WANG Yunchao, DONG Shuhai, *et al.* Study on consolidation theory of single-layer homogeneous soil treated by air-boosted vacuum preloading [J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(4): 118.
- [23] SHEN Yupeng, LIU Yue, GENG Shuang, *et al.* Consolidation theory of homogeneous multilayer treatment by air-boosted vacuum preloading [J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2021, 26(12): 5634.
- [24] XIE Liquan, LIANG Zelong, FENG Guangrui, *et al.* Improved analytical solution for air-boosted vacuum consolidation of saturated soil using eigenfunction expansion method [J]. Symmetry, 2022, 14(9): 1757.