

DOI:10.11918/201809039

超软土真空预压透明土模型试验及土桩形成机理

姜海波¹, 武亚军¹, 孔纲强², 李俊鹏¹

(1. 上海大学 土木工程系, 上海 200444; 2. 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室(河海大学), 南京 210098)

摘要: 吹填超软土真空预压加固地基过程中, 塑料排水板周围易形成“土桩”, “土桩”的存在降低了其周围土体的固结效率, 严重时甚至会导致地基处理失效; 然而, 对“土桩”形成机理的认识仍相对不足. 为此, 基于透明土材料和粒子图像测速法(PIV), 开展超软土真空预压透明土模型试验, 非嵌入式地可视化测量真空预压过程中排水板周围土体位移场. 结果表明: 排水板周围的土体变形与排水速率存在联系, 在排水高峰期和排水平稳期, 排水板周围土体产生明显的水平位移, 且产生水平位移的范围随抽真空时间的增长逐渐扩大. 而在排水缓慢期, 排水板周围的土体几乎仅有竖向位移; 土颗粒在渗流力的作用下向着排水板方向移动并聚积在排水板周边, 是造成“土桩”和“软弱带”现象的主要原因; 浅层土体的颗粒较细、上覆土重较低, 在渗流力作用下更容易发生向着排水板方向的位移, 形成的“土桩”由浅至深半径逐渐减小, “土桩”的最大半径可达11 cm; “土桩”范围内的土体密度较“软弱带”土体的密度更高, 在自重和“真空荷载”作用下的压缩量更小, 在土体表面形成“桩头”.

关键词: 地基处理; “土桩”形成机理; 透明土模型试验; 吹填超软土; 真空预压; PIV 技术

中图分类号: TU447 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2020)02-0033-08

Transparent soil model test of vacuum preloading method on ultra-soft soil and formation mechanism of "soil pile"

JIANG Haibo¹, WU Yajun¹, KONG Gangqiang², LI Junpeng¹

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering (Hohai University), Ministry of Education, Nanjing 210098, China)

Abstract: During the vacuum preloading of hydraulic fill ultra-soft soil, "soil pile" is often formed around drainage plate, which hinders the consolidation of the surrounding soil and even leads to the failure of the foundation treatment, but the forming mechanism of "soil pile" is still unclear. To this end, a model test was carried out to implement non-intrusive measurement of the surrounding soil deformation during vacuum preloading using the transparent soil experimental technique and the PIV (particle image velocimetry) technique. The research showed that the surrounding soil deformation of drainage plate was related to drainage rate. During the quick and steady drainage period, the surrounding soil of the drainage plate had obvious horizontal displacement, and the range of the horizontal displacement expanded gradually with the increase of the vacuuming time. During the slow drainage period, the vertical displacement was obvious in the surrounding soil of the drainage plate, and there was almost no horizontal displacement. The formations of "soil pile" and "soft zone" were mainly due to the transportation and gathering of the soil particles around the drainage plate. Compared with the deep soil layer, the shallow soil layer had finer particle size and lower self-weight, which was easier to transport under the seepage force, thus leading to the decrease of the radius of the "soil pile" along the depth, and the maximum radius of the "soil pile" could reach 11 cm. The density of the "soil pile" was higher than that of the "soft zones", and the compression of the "soil pile" was smaller under self-weight and "vacuum load", resulting in the formation of the "pile head" on the foundation surface.

Keywords: foundation treatment; "soil pile" formation mechanism; transparent soil model test; hydraulic fill ultra-soft soil; vacuum preloading; PIV technique

在中国东南部沿海地区有大量的吹填造地项

目, 以前吹填土方来源以砂为主, 但是目前由于砂料不足, 许多地区采用近海或河流底部的淤泥、淤泥质土为吹填材料, 经水力吹填到场地内的这种超软土的物理力学性质很差, 具有含水率高、黏粒含量高、压缩性高、承载力低等显著特点^[1-3].

为了加快这类超软土地基的固结, 国内常使用

收稿日期: 2018-09-07

基金项目: 国家自然科学基金(41772303)

作者简介: 姜海波(1993—), 男, 硕士研究生;

武亚军(1973—), 男, 副教授, 博士生导师

通信作者: 武亚军, wyjddz@163.com

无砂真空预压法^[4-5],该方法具有施工方便、成本低廉、工期短等特点.真空预压法需要在超软土中设置竖向排水体,目前由芯板和包裹芯板起过滤作用的过滤膜组成的塑料排水板最为常用.大量超软土真空预压的工程实践表明,在预压过程中紧靠塑料排水板的周围会出现渗透性极低的“土桩”^[6-9],这些“土桩”本身比周围的超软土具有更高的强度和密度,它的存在阻隔了“土桩”外围土体中水的流入,影响了这些区域土体的固结,有时甚至无法再继续固结而导致地基处理失败.针对这一“土桩”问题,近年来,一些学者进行了相应的研究:唐彤芝等^[7]通过现场试验认为吹填淤泥土颗粒细、结构性强度低、含水率高、流动性大是形成淤泥抱团(即“土桩”)的主要原因.陈平山等^[9]通过现场试验和数值分析,认为“土桩”是排水板周围土体细颗粒在渗透力作用下向排水板聚积的结果,其形状为倒锥形.武亚军等^[10]通过真空预压室内模型试验研究认为“土桩”是土颗粒在排水板处聚积所致.沈杰等^[11]通过室内模型试验,探讨真空荷载沿径向上的传递规律并分析造成排水板周围“土桩”现象的成因.以上关于“土桩”的研究,通常是采用常规测试技术获得真空预压前后排水板周围土体的颗粒分布、压缩及渗透性指标,并对这些指标的时空分布特点进行分析来推测“土桩”的大致形状及形成原因.但常规测试技术目前还存在一定的不足:常规测试技术在取样过程中会对土样产生扰动;取样点是离散的,获取的数据不连续;取样过程是不可逆的,导致每次取样所获得的并不是同一土样,这些不足会使试验结果产生一定的误差,因此,寻求一种更加直观的、非侵入式的研究手段尤为重要.

采用物理力学性质与天然土体相近的透明材料来模拟天然土,开展土体内部变形可视化物理模型试验研究逐渐成为一种趋势^[12]. Iskander、Liu 等^[13-14]采用无定形二氧化硅和与其折射率相匹配的孔隙液体配制出透明土,并对其进行了室内土工试验,发现其岩土工程性质与黏土相似. White 等^[15]将 PIV 技术运用在岩土工程中,并通过试验对透明土体的变形进行了研究,表明 PIV 技术可以非常精确地观测土体内部变形.孔纲强等^[16]基于透明土材料和 PIV 技术,对扩底楔形桩、楔形桩和等截面桩的水平向受荷过程进行了模型试验研究,获得了其周围土体位移场的变化规律.宫全美等^[17]通过常规固结试验、直剪固快强度试验以及室内压板载荷试验验证了无定形硅粉类透明土在模型试验中模拟黏性土的可行性.夏元友等^[18]采用透明土材料和粒子图像测速法,通过物理模型试验研究了锚杆拔出机

理. Wang 等^[19]采用透明土进行模型试验,研究了基坑降水中防渗墙和抽油井的耦合效应.目前尚未见有学者采用透明土模拟超软土,实际上超软土的固结特性与黏土基本一致^[20],因此,超软土在一定程度上可以理解为是含水率更高、黏粒含量更高、压缩性更高且强度更低的黏性土.

综上,将透明土试验技术应用于超软土真空预压模型试验,通过高清数码相机对真空预压全过程进行连续拍摄,得到真空预压过程中排水板周围土体变形的位移场,从而初步探讨“土桩”的形成机理.

1 真空预压模型试验

1.1 透明超软土制配及基本性质

本文所用透明超软土,采用无定形二氧化硅模拟“土”颗粒,采用与无定形二氧化硅折射率一致的混合矿物油模拟孔隙“水”.混合矿物油由正十二烷与二号白矿物油按照 1:11 的质量比调配而成,其折射率为 1.447 6.“土”颗粒的比重为 2.11,粒径分布曲线如图 1 所示.为了方便对比,图 1 还给出了天津和温州超软土^[21-22]的粒径分布曲线.可以看出,透明超软土的粒径分布曲线大致位于两地超软土的粒径分布曲线之间,说明透明超软土的粒径分布在天然超软土粒径分布的变化范围内.以“土”颗粒、孔隙“水”按质量比 1:7 的比例配制透明超软土,得到孔隙比 e 为 2.47 的试样(由无定形二氧化硅材料配制成的透明土的孔隙比计算方法,可查阅相关研究成果^[13-14,17]).借鉴 Iskander 等^[13]透明土制配方法,本文透明超软土试样的制配步骤为:1) 将质量比为 1:7 的“土”颗粒与孔隙“水”混合并置于密封桶中,使用固定转速的搅拌器搅拌 5 ~ 10 min,至均匀黏稠状;2) 采用真空饱和装置,去除试样中由于搅动等因素产生的气泡,这一过程需要 20 ~ 24 h;3) 对饱和后的试样,用手动搅拌器搅拌 20 ~ 30 min,

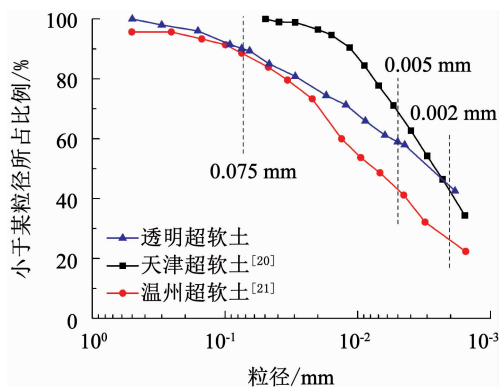


图 1 土体粒径分布曲线

Fig. 1 Soil particle-size distribution

手动搅拌的优点是在保证试样整体均匀性的同时较大程度地避免在试样中引入气泡. 固结后的透明超软土试样如图 2 所示, 透过 4 cm 厚的土样可以清晰地看到其下方的多孔板.

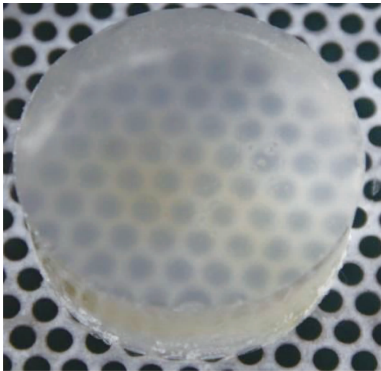


图 2 固结之后的透明超软土

Fig. 2 Consolidated transparent ultra-soft soil

由无定形二氧化硅材料制配成的透明土的物性指标, 可查阅相关文献研究成果^[13-14, 17-18]; 本文试验所用透明超软土的主要物性指标见表 1. 为了方便对比, 表 1 还列出了温州和天津超软土的物性指标^[23-24]. 可以看出, 透明超软土的初始孔隙比、压缩系数和压缩模量均在温州超软土对应指标的变化范围内; 透明超软土与天津超软土相比, 其初始孔隙比较天津超软土的初始孔隙比最小值低 0.01; 压缩系数在天津超软土的变化范围内; 压缩模量比天津超软土的压缩模量最大值高 0.11 MPa.

表 1 物理力学指标

Tab. 1 Physical and mechanical parameters

土样	初始孔隙比	压缩系数/ MPa ⁻¹	压缩模量/ MPa
透明超软土	2.47	1.48	1.88
温州超软土 ^[23]	2.38~4.61	1.30~1.71	1.68~2.01
天津超软土 ^[24]	2.48~3.39	1.30~1.49	1.69~1.77

图 3 为透明超软土的固结系数随荷载变化曲线, 可以看出, 透明超软土的固结系数随荷载的增大持续增大, 这与张明等^[25]通过吹填超软土室内固结试验得到的规律基本一致. 从数值上看, 透明超软土的固结系数比吹填超软土的固结系数大, 这与透明超软土本身较高的渗透性有关. 图 4 为透明超软土渗透系数 k 与孔隙比 e 的半对数关系曲线, 曲线近似直线, 这与 Taylor 等^[26]建立的反映黏性土渗透性的 $e\text{-}\log k$ 渗透模型一致. 随着孔隙比的变化, 透明超软土的渗透系数在 $3.3 \times 10^{-7} \sim 1.79 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 变化, 数值上约比相同孔隙比下吹填超软土的渗透系数高 1~2 个数量级^[27].

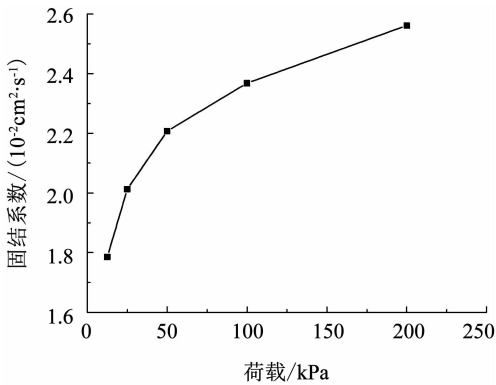


图 3 固结系数随荷载变化曲线

Fig. 3 Curve of consolidation coefficient varying with load

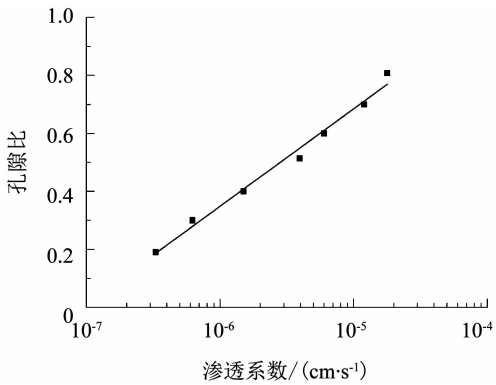


图 4 渗透系数随孔隙比变化曲线

Fig. 4 Curve of permeability coefficient varying with void ratio

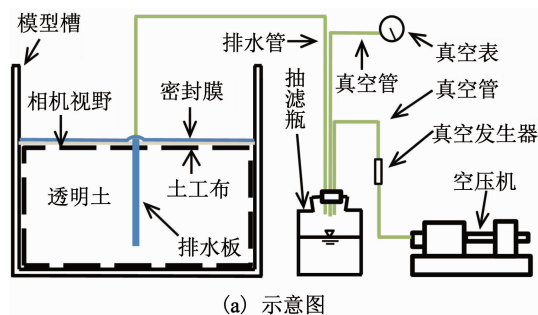
由上述可知, 透明超软土的固结系数和渗透系数比天然超软土的高 1~2 个数量级, 即透明土的排“水”固结速度较天然超软土更快, 在荷载下完成变形的时间更短; 但是, 透明超软土的初始孔隙比和压缩性指标均处于天然超软土对应指标的变化范围内, 在相同外荷载作用下, 透明超软土的压缩变形规律与天然超软土是相近的, 因此, 认为尽管透明土的诸多性质与天然超软土存在较大差异, 利用透明超软土与天然超软土相似的压缩变形规律, 从定性的层面上进行真空预压的“土桩”形成机理研究是可行的.

1.2 试验器材及步骤

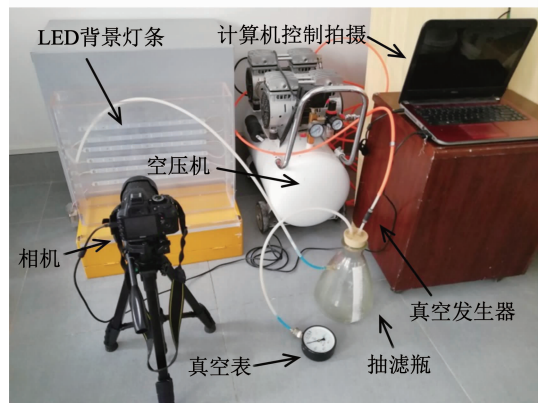
模型试验器材包括模型箱 (长 50 cm × 高 40 cm × 宽 10 cm)、排水板 (长 15 cm × 宽 1 cm)、土工布及密封膜、抽滤瓶、空压机、真空发生器、高清数码相机及计算机等, 具体如图 5 所示.

将制配好的透明超软土置于模型箱中, 静置 48 h 后排出上清液. 为了利用 PIV 技术获取土体内部的位移场, 在透明超软土中放入示踪颗粒 (直径 3 mm 的塑料珠, 可悬浮在透明超软土中), 使所有的示踪颗粒间隔均匀地布于同一个平面内 (间隔 2 cm), 该平面垂直于模型箱的宽度方向, 与模型箱正面的距离为 5 cm, 称为示踪颗粒面. 之后将排水

板放置在示踪颗粒面的中间位置并垂直于示踪颗粒面,排水板上端露出透明超软土表面,再在其上铺设土工布和密封膜并在周边密封,之后连接排水板与真空系统开始抽真空.抽真空过程中对真空度、排“水”量进行监测,由于模型箱厚度较小,通过调压装置将真空度控制在 60 kPa.以排“水”速率低于 30 mL/h 为卸载标准,该排水速率下模型箱内土体的表面沉降速率为 1.44 mm/d,满足《港口工程地基规范》(JTS 147-1—2010)的卸载标准,抽真空 13 h 后卸载.土体的变形过程用佳能 D60 数码相机记录,相机固定在三脚架上,通过电脑控制相机拍摄可得到真空预压过程中的一系列图像.通过 PIV 技术和数据可视化软件 Tecplot 对得到的图片进行处理,可获得真空预压过程中排水板周边土体的位移矢量图与位移等值线图.



(a) 示意图



(b) 实物图

图 5 模型试验装置

Fig. 5 Devices of model test

2 试验结果与分析

2.1 排“水”速率

图 6 为真空预压过程中的排“水”速率曲线.排“水”速率随着抽真空时间逐渐减小,大致可分为 3 个阶段,分别为高峰期(1 000 mL/h 以上)、平稳期(1 000 ~ 400 mL/h)和缓慢期(400 mL/h 以下),3 个阶段的持续时间分别为 1, 4 和 8 h.上述透明超软土排水过程分为 3 个阶段的试验现象与文献[22, 28]中基本一致,说明透明超软土的真空固结

排水过程与天然超软土具有一定相似性.

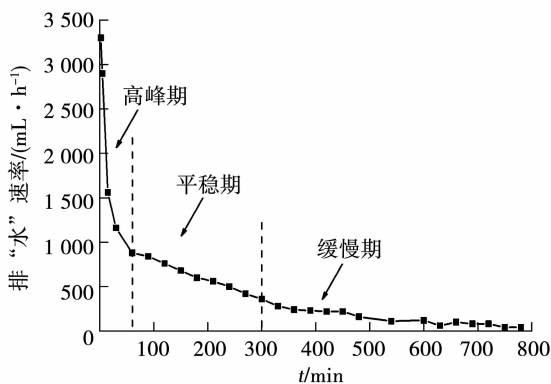


图 6 排“水”速率随时间变化曲线

Fig. 6 Relation between "dewatering" rate and preloading time

2.2 排水板周围土体位移矢量图

对拍摄得到的一系列图片进行处理分析(为了方便分析,所有图片仅取右半部分),发现排水板周围的土体位移在排“水”高峰期、平稳期和缓慢期呈现出不同的阶段性特征,将上述 3 个阶段内的土体位移用箭头矢量图来表示,列于图 7(a)、(b)和(c),竖向排水板与土工布以黑色线表示,密封膜以黑色实线表示.由图 7 可知,在排“水”高峰期,排水板周围约 18 cm 范围内的土体向着排水板斜向下位移,位移区域大致呈漏斗状,使得排水板周边土体的表面沉降在真空预压的初期高于稍远处.在排“水”平稳期,距排水板大约 3 cm 以内的土体位移以竖向向下为主,距排水板约 3 cm 以外的土体存在明显的斜向下位移,且位移的竖向分量随离开排水板距离的增加逐渐增大,使得土体表面产生沿着水平向上的不均匀沉降.在排“水”缓慢期,排水板周围 24 cm 范围内的土体均竖向向下位移,位移大小随着离开排水板水平距离的增大逐渐增大,导致距离排水板较远区域的土表面沉降比近处更明显.

2.3 排水板周围土体位移等值线图

为了更直观地表示排水板周围土体位移场,将结果绘制成等值线图,如图 8 所示.考虑到边界效应,取距离排水板、密封膜最低点及模型箱边界各 2 cm 的方形区域作为观察区域.

图 8(a)和(d)分别为排“水”高峰期土体的水平和竖向位移等值线图,可以看出,土体的最大水平位移位于离开排水板约 6 cm 的浅层土体中,土体的竖向位移大致随离开排水板距离的增加逐渐减小.分析认为,透明超软土的初始含“水”率很高,抽真空开始后,大量自由“水”在压力差的作用下向排水板渗流排出,使得土体的浮容重变为有效容重后产生竖向压缩,靠近排水板位置土体的自由“水”含量降低得最多,因此,产生比排水板远端土体更大的竖

向沉降;孔隙“水”在渗流过程中,对“土”颗粒产生渗流力,使“土”颗粒沿着渗流方向移动,随着离开排水板距离的增加,渗流力逐渐衰减,“土”颗粒移动趋势也随之减弱,因此,排水板近端产生比远端更

大的水平位移;土颗粒会在自重下沉积,相互接触形成土骨架,浅层土体由于较低的上覆土重,形成的土骨架更松散,因此,在渗流力作用下产生较深层土体更加明显的渗流压密现象。

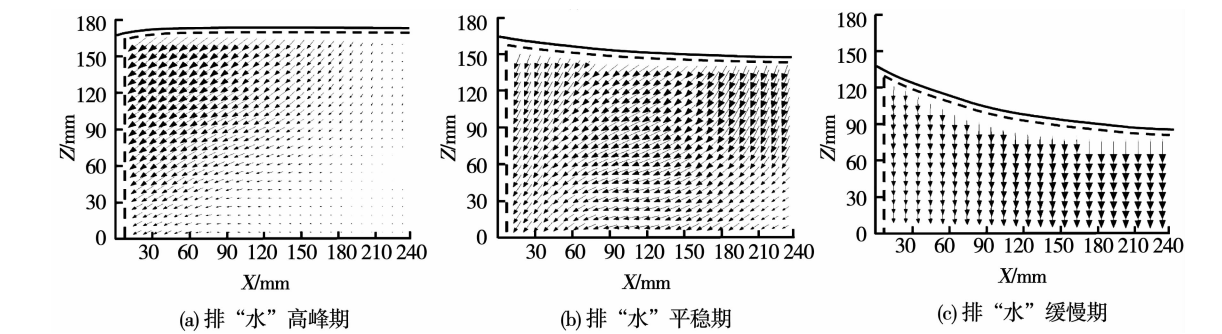


图7 真空预压各阶段排水板周围土体位移矢量图

Fig. 7 Displacement vectors of surrounding soil of draining plate during each stage of vacuum preloading

图8(b)和(e)分别为排“水”平稳期土体的水平和竖向位移等值线图,土体的水平位移最大值位于距排水板约10 cm的中层土体中,土体的竖向位移随着离开排水板距离的增大逐渐增大.分析认为,随着抽真空过程的推进,排水板周边一定范围内的土体中已经形成了结构较为稳定的“土”骨架,渗流力得以向排水板远端的土体中传递,因此,较远处的土体产生渗流压密现象;随着土中自由“水”含量的降低,膜上的“真空荷载”由初始的孔隙“水”承担转换为由“土”骨架承担,土体在自重和“真空荷载”的作用下产生竖向压缩,排水板远端的土体在渗流力

的作用下趋于松散,因此,其竖向压缩量较排水板近端土体的竖向压缩量更大。

图8(c)和(f)分别为排“水”缓慢期土体的水平和竖向位移等值线图,可以看出,土体的竖向位移随着离开排水板距离的增大逐渐增大,水平位移很小且无明显规律,可能是由土体竖向压缩过程中的水平向变形引起的.分析认为,在抽真空的后期,土体中的大部分孔隙“水”已经被排出,渗流力已不足以使土颗粒产生位移;排水板远端土体较排水板近端土体仍然更为松散,因此,产生的竖向压缩量更大。

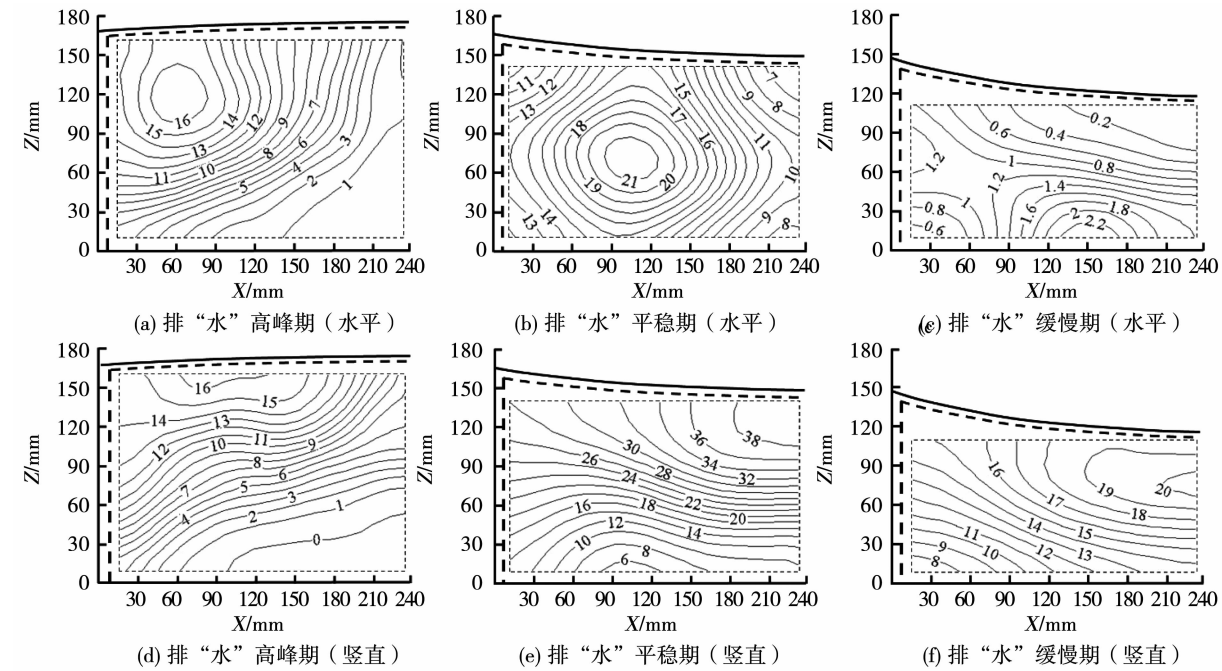


图8 真空预压各阶段排水板周围土体位移等值线图

Fig. 8 Displacement contours of surrounding soil of draining plate during each stage of vacuum preloading

3 “土桩”形状及形成机理

3.1 “土桩”形状确定方法

PIV 技术是将土体变形前后摄取的灰度图像分割成许多网格,每一网格称之为 Interrogation 块.将变形前任一 Interrogation 块与变形后灰度图像进行全场匹配或相关计算,根据峰值相关系数确定该 Interrogation 块在变形前后的位置,由此可以得到该块的平均位移,对变形前所有 Interrogation 块进行类似运算,就可得到整个位移场^[29].图像匹配的标准关联函数为

$$C(\Delta x, \Delta y) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m, n) g(m + \Delta x, n + \Delta y).$$

式中: M, N 为图像块的长、宽, f 为 t_1 时刻图像中某图像块中心点坐标 (m, n) 处的灰度值分布函数, g 为 t_2 时刻图像中该图像块中心点坐标 $(m + \Delta x, n + \Delta y)$ 处的灰度值分布函数, $\Delta x, \Delta y$ 分别为 x, y 方向的位移增量.基于上述 PIV 技术的原理,可以求得“土桩”外包线,具体为:在某一深度下,对各相邻土体单元作 Δx 的差值,总能获得一个点,该点两侧单元的 Δx 差值为零,为方便讨论,将此类点称为位移差值零点,位移差值零点在深度方向的连线则称为位移差值零线.在位移差值零线以左的区域内,土体的 Δx 随着离开排水板距离的增大逐渐增大,即该区域的土体产生水平向的压缩,形成渗流压密区.在位移差值零线以右的区域内,土体的 Δx 随着离开排水板距离的增大逐渐减小,即该区域的土体在水平方向趋于松散,形成松散区.位移差值零线与排水板之间的土体实际上就是“土桩”,位移差值零线即为“土桩”的外包线.如图 9 所示,“土桩”的半径由浅至深逐渐变小,最大半径约为 11 cm,本文关于“土桩”形状的发现与陈平等^[9]的研究结论相似.陈雷等^[30]通过真空预压室内模型试验,发现排水板周围土体的压缩系数较小,存在半径约为 10 cm 的密实区,这与本文关于“土桩”半径的发现接近.总体来说,透明土模型试验能较好地模拟真空预压过程中的“土桩”现象.

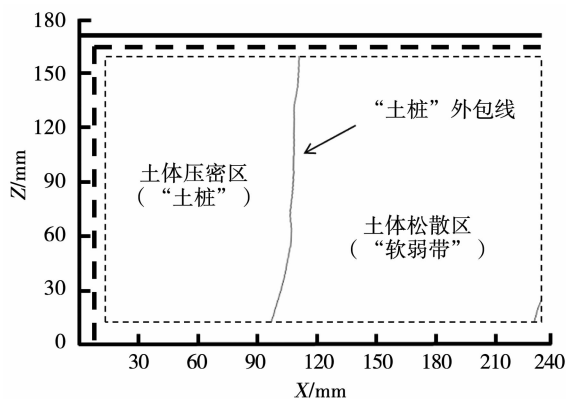


图 9 “土桩”

Fig. 9 "Soil pile"

3.2 “土桩”形成机理解释

本文中的模型试验,笔者采用同样的试验设备和试验方法,在相同的环境下短期内进行过多次.每次试验结果均会出现“土桩”现象;每次试验中排水“水”速率随时间的变化规律、“土桩”形状随深度的变化规律都是一致的,因此,该模型试验的重复性和可靠性可以保证.

为了更好地解释“土桩”的形成机理,绘制一定深度处孔隙水的渗流示意图,如图 10 所示.真空预压开始后,由于密封膜的存在,真空度向排水板中传递,引起排水板内部孔隙水压力的消散.密封膜使加固土体与大气隔绝,因此,排水板内的孔隙水压力 p_1 最大可降低至绝对压力零点^[30],这使得土体内与排水体之间产生孔隙水压力差 Δp_1 ,孔隙水在 Δp_1 的作用下向排水板方向渗流,降低渗流路径上的孔隙水压力,逐渐形成 p_2, p_3 和 p_4 . p_2, p_3 和 p_4 的存在又形成了 Δp_2 和 Δp_3 ,上述过程不断循环,在土体中逐渐形成一个相互连通的渗流网络,该渗流网络持续工作,降低整个土体内的孔隙水压力,达到土体固结的目的.在渗流过程中,孔隙水会对土颗粒施加渗流力,使土颗粒产生沿着渗流方向的位移,吹填超软土(尤其指新吹填超软土)中有大量细小颗粒处于悬浮状态,颗粒间结构强度尚未完全形成,在渗流力作用下很容易产生沿着渗流方向的位移.因此,大量的土颗粒聚积在排水板周边,并随着 Δp 由近至远向远处扩散,越来越多的土颗粒聚积在排水板周边.聚积在排水板周边的这部分土体,经过水平的渗流压密和竖向的固结压缩,逐渐形成“土桩”.随着离开排水板距离的增加, Δp 逐渐衰减,土颗粒的移动趋势随之减弱,土体在水平方向上趋于松散,由此形成“土桩”范围以外的“软弱带”.由上所述,“土桩”范围内土体是经过聚积和渗流压密的,因此,其密度较“软弱带”范围内土体的更高,压缩性较“软弱带”范围内土体的更低.两块区域内的土体在自重和“真空荷载”作用下产生的压缩量不同,在土体表面形成“桩头”和“弧形凹槽”.图 11 为真空预压试验过程中拍摄所得图片,图中的“桩头”和“弧形凹槽”现象明显.

试验结果表明,“土桩”半径随深度的增加有减小趋势,产生这种现象的原因主要有两个:其一,浅层土体比深层土体的细颗粒含量更高,且颗粒间结构强度尚未完全形成,在 Δp 作用下会产生比深层土体更加明显的沿着渗流方向的位移和渗流压密.其二,随着土层深度的增加,排水板内部的真空度存在衰减^[4,11],排水板内部的孔隙水压力消散程度也随之下降,即图 10 中 p_1 的值随着深度增加有所提

高,因此,孔隙水压力差 Δp_1 , Δp_2 和 Δp_3 随深度增加有所下降.土颗粒的径向位移以孔隙水施加的渗流力为动力,真空度沿深度方向的损失导致了排水板径向上孔隙水压力差的减小,进一步导致了渗流力的衰减,因此,土颗粒的水平位移趋势随深度增加逐渐减弱,“土桩”的半径及土体的径向固结度也随之下降.实际工程中,深度每增加一米,排水板内的真空度衰减就可达10 kPa^[4,11],因此,真空度随深度的衰减,是“土桩”半径及土体径向固结度随深度发生变化的重要因素.

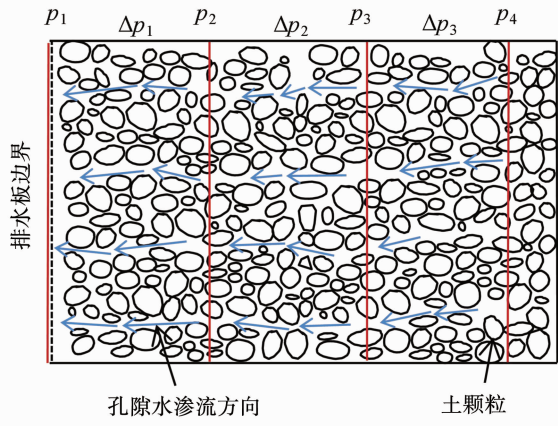


图 10 一定深度下孔隙水流动示意

Fig. 10 Flow diagram of pore water flow at a certain depth

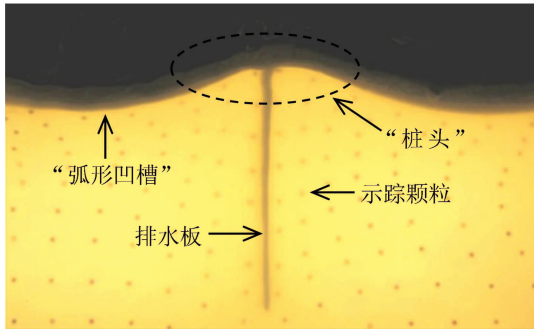


图 11 模型试验过程中的土体变形

Fig. 11 Soil deformation during model test

4 结 论

1) 基于透明土试验技术和 PIV 技术,实现了真空预压过程土体内部位移的非侵入研究,相对常规测试技术,对土样不存在扰动且可以获得连续的位移场,具有经济合理、简便有效等优点.

2) 真空预压的影响范围随着抽真空时间逐渐扩大,模型箱内土体位移在真空预压过程中不同阶段呈现出不同的阶段性特征,导致土体表面沉降存在阶段性特征;在排“水”高峰期,土体产生朝着排水板方向的斜向下位移;在排“水”平稳期,土体的位移特征在离开排水板不同距离有较大差异;在排“水”缓慢期,土体几乎仅有竖向位移,且位移随着

离开排水板水平距离的增大逐渐增大.

3) 排水板内真空度的存在,使得周围土体内部形成一个相互连通的渗流网络,土颗粒在渗流力作用下不断向排水板处聚积;土颗粒向排水板处聚积,并经过水平向渗流压密和竖向固结压缩,是形成“土桩”而外围土体强度过低的主要原因.

4) “土桩”侧面形状显示,“土桩”半径从上到下有减小的趋势,但本试验中模型箱底边界的存在,限制了底部土体的侧向位移,为了进一步研究“土桩”沿竖向的变化特征,需要在下一步研究中加大模型箱尺寸.

此外,透明土本身的性质限制了试验容器的大小,由此产生边界效应对试验结果的影响,需要进一步研究.

参考文献

[1] BO M W, CHOA V, WONG K S, et al. Laboratory validation of ultra-soft soil deformation model[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2011, 29(1): 65. DOI: 10.1007/s10706-010-9351-3

[2] 鲍树峰, 姜炎, 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, 36(7): 1350

BAO Shufeng, LOU Yan, DONG Zhiliang, et al. Causes and counter measures for vacuum consolidation failure of newly-dredged mud foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(7): 1350. DOI: 10.11779/CJGE201407020

[3] 王军, 王逸杰, 刘飞禹, 等. 间歇式真空预压联合电渗加固吹填软土试验[J]. 中国公路学报, 2016, 29(10): 37

WANG Jun, WANG Yijie, LIU Feiyu, et al. Test of reinforcement by intermittent vacuum preloading-electroosmosis in dredger soft clay[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(10): 37. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2016.10.005

[4] 鲍树峰, 姜海波, 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, 35(12): 3569

BAO Shufeng, MO Haihong, DONG Zhiliang, et al. Research on transfer properties and distribution model of negative pressure in fresh hydraulic reclamation muck foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(12): 3569. DOI: 10.16285/j.rsm.2014.12.034

[5] 屠红珍, 徐衍徽, 谢立全. 软基真空预压加固的注气增效机制与数值分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊2): 600

TU Hongzhen, XU Yanhui, XIE Liquan. Mechanism and numerical analysis of effect of air injection on vacuum preloading for weak foundation improvement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(S2): 600. DOI: 10.16285/j.rsm.2014.s2.096

[6] 唐彤芝, 黄家青, 关云飞, 等. 真空预压加固吹填淤泥土现场试验研究[J]. 水运工程, 2010(4): 115

TANG Tongzhi, HUANG Jiaqing, GUAN Yunfei, et al. Experimental study on dredger fill sludge improved by vacuum preloading[J]. Port and Water Engineering, 2010(4): 115. DOI: 10.16233/j.cnki.issn1002-4972.2010.04.027

[7] 唐彤芝, 董江平, 黄家青, 等. 薄砂层长短板结合真空预压法处理吹填淤泥土试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(5): 899

TANG Tongzhi, DONG Jiangping, HUANG Jiaqing, et al. Experimental research on hydraulic filled mud consolidated by vacuum preloading method combining long and short boards with thin sand cushions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(5): 899

[8] 颜水国, 董志良, 杨昌斌, 等. 颗粒级配真空预压法处理吹填

- 土效果影响试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(11): 1775
- YAN Yongguo, DONG Zhiliang, YANG Changbin, et al. Experimental study on effect of grain size distribution on improvement of dredger fill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(11): 1775. DOI: 10.1097/RLU.0b013e3181f49ac7
- [9] 陈平山, 董志良, 张功新. 新吹填淤泥浅表层加固中“土桩”形成机理及数值分析[J]. 水运工程, 2012(1): 88
- CHEN Pingshan, DONG Zhiliang, ZHANG Gongxin. Mechanism and numerical simulation of the “soil piles” in the fresh hydraulic mud fill treated by surface-layer improvement technique[J]. Port and Waterway Engineering, 2012(1): 88. DOI: 10.16233/j.cnki.issn1002-4972.2012.01.029
- [10] 武亚军, 杨建波, 张孟喜. 真空加载方式对吹填流泥加固效果及土颗粒移动的影响研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(8): 2129
- WU Yajun, YANG Jianbo, ZHANG Mengxi, et al. Study of impact of vacuum loading mode on dredger fill flow mud consolidation effect and soil particles moving[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8): 2129. DOI: 10.16285/j.rsm.2013.08.002
- [11] 沈杰, 邓东升, 丁建文, 等. 高含水率疏浚淤泥的真空固结模型试验研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2015, 37(2): 39
- SHEN Jie, DENG Dongsheng, DING Jianwen, et al. Vacuum preloading model test on dredged muds with high water contents[J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences, 2015, 37(2): 39. DOI: 10.13393/j.cnki.issn.1672-948X.2015.02.009
- [12] 隋旺华, 高岳, LIU J. 透明土实验技术现状与展望[J]. 煤炭学报, 2011, 36(4): 577
- SUI Wanguo, GAO Yue, LIU J. Status and prospect of transparent soil experimental technique[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(4): 577. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2011.04.019
- [13] ISKANDER M, LIU J, SADEKS S. Transparent amorphous silica to model clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(3): 262. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:3(262)
- [14] ISKANDER M, LIU J. Consolidation and permeability of transparent amorphous silica[J]. Geotechnical Testing Journal, 2003, 26(4): 390. DOI: 10.1520/GTJ11257J
- [15] WHITE D J, TAKE W A, BOLTON M D. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry[J]. Géotechnique, 2003, 53(7): 619. DOI: 10.1680/geot.53.7.619.37383
- [16] 孔纲强, 曹兆虎, 周航, 等. 水平荷载下扩底楔形桩承载力特性透明土模型试验[J]. 土木工程学报, 2015, 48(5): 83
- KONG Gangqiang, CAO Zhaozhu, ZHOU Hang, et al. Experimental study on lateral bearing capacity of enlarged wedge-shaped pile using transparent soil[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(5): 83. DOI: 10.15951/j.tmgxb.2015.05.010
- [17] 宫全美, 周俊宏, 周顺华, 等. 透明土强度特性及模拟黏性土的可行性试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(6): 853
- GONG Quanmei, ZHOU Junhong, ZHOU Shunhua, et al. Strength property and feasibility test of transparent soil to model clayey soil[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2016, 44(6): 853. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2016.06.006
- [18] 夏元友, 陈晨, NI Qing. 基于透明土的4种锚杆拔出对比模型试验[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(3): 399
- XIA Yuanyou, CHEN Chen, NI Qing. Comparative modelling of pull-out process of four different anchorages by using transparent soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(3): 399. DOI: 10.11779/CJGE201703002
- [19] WANG Jianxiu, LIU Xiaotian, LIU Shaoli, et al. Physical model test of transparent soil on coupling effect of cut-off wall and pumping wells during foundation pit dewatering[J]. Acta Geotechnica, 2019, 14(1): 141. DOI: 10.1007/s11440-018-0649-2
- [20] 朱耀庭, 郑爱荣, 李卫. 吹填超软土固结特性的试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2008, 35(11): 120
- ZHU Yaoting, ZHENG Airong, LI Wei. Laboratory tests for the consolidation property of dredger fill in the Shenzhen area[J]. Chinese Journal of Hunan University: Natural Science, 2008, 35(11): 120
- [21] 雷华阳, 王铁英, 张志鹏, 等. 高黏性新近吹填淤泥真空预压试验颗粒流宏观分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2017, 47(6): 1784
- LEI Huayang, WANG Tieying, ZHANG Zhipeng, et al. Macro-and meso-analysis of newly formed highly viscous dredger fill under vacuum preloading using particle flow theory[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2017, 47(6): 1784. DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.201706201
- [22] 武亚军, 顾赛帅, 强小兵, 等. 基于骨架构建药剂真空预压法加固超软土试验[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(4): 735
- WU Yajun, GU Saishuai, QIANG Xiaobing, et al. Experimental study on ultra-soft soil reinforced by vacuum preloading with flocculation based on skeleton construction[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, 52(4): 735. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2018.04.01
- [23] 关云飞, 唐彤芝, 陈海军, 等. 超软地基真空预压浅层加固现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊1): 104
- GUAN Yunfei, TANG Tongzhi, CHEN Haijun, et al. Field tests on shallow treatment of super-soft ground by vacuum preloading method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S1): 104
- [24] 雷华阳, 张文振, 韩鹏, 等. 吹填超软土浅层真空预压加固处理前后的固结特性[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(12): 2328
- LEI Huayang, ZHANG Wenzhen, HAN Peng, et al. Consolidation property of ultra-soft soils before and after treatment of surface-layer improvement by vacuum preloading[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(12): 2328
- [25] 张明, 赵有明, 龚镭, 等. 深圳湾新吹填超软土固结系数的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊1): 3157
- ZHANG Ming, ZHAO Youming, GONG Lei, et al. Test study of coefficient of consolidation of fresh hydraulic fill ultra-soft soil in Shenzhen Bay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 3157
- [26] TAYLOR D W, DONALD W. Fundamentals of soil mechanics[M]. New York: Soil Science, 1948: 114
- [27] 张明, 蒋敏敏, 赵有明. 基于GDS固结仪的吹填淤泥非线性渗透性及参数测定[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(3): 625
- ZHANG Ming, JIANG Minmin, ZHAO Youming. Nonlinear permeability and parameter determination for dredged fill based on GDS consolidation apparatus[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(3): 625
- [28] WU Yajun, KONG Gangqiang, LU Yitian, et al. Experimental study on vacuum preloading with flocculation for solid-liquid separation in waste slurry[J]. Geomechanics and Engineering, 2017(13): 319. DOI: 10.12989/gae.2017.13.2.319
- [29] 余跃心. 基于透明介质和颗粒图像技术的土体变形测量研究进展[J]. 勘察科学技术, 2005(6): 7
- SHE Yuexin. Research progress in soil deformation measurement using transparent media and particle image velocimetry[J]. Chinese Journal of Site Investigation Science and Technology, 2005(6): 7. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3946.2005.06.002
- [30] 陈雷, 张富海, 李治朋, 等. 排水板周围土体径向固结室内模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增刊1): 163
- CHEN Lei, ZHANG Fuhai, LI Zhipeng, et al. Experimental study on radial consolidation of soil around drainage plate[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(S1): 163. DOI: 10.11779/CJGE2016S1031
- [31] 高志义. 真空预压法的机理分析[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(4): 45
- GAO Zhiyi. Analysis of mechanism of vacuum preloading technique[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(4): 45