



真空荷载下超软土固结试验及土颗粒 移动数值模拟研究*

武亚军, 覃萍, 杨建波

(上海大学土木工程系, 上海 200072)

摘要: 新近吹填超软土经真空预压浅层加固后, 普遍会在排水板周围形成土体强度相对较高的小范围区域, 该区域范围内的土体较密实, 抗剪强度较高, 而沉降较小, 即所谓的“土桩”, “土桩”范围外的土体固结效果较差, 造成大面积吹填淤泥现场加固不均匀现象。针对以上现象, 首先进行了吹填土无砂真空预压室内模型试验, 并研究土体在加固过程中颗粒组成、沉降、孔压水头高度和含水量的变化情况; 其次采用颗粒流数值软件PFC^{2D}从微观角度进行模拟, 探究土颗粒的移动情况。室内模型试验结果: 真空预压加固后, 土体产生不均匀沉降, 排水板处产生半径为20~25 cm明显的隆起, 排水板附近土体细颗粒含量和密实度明显升高, 渗透系数下降, 形成一个相对密实和弱透水性的“土桩”现象。数值模拟分析表明: 土颗粒在土体表面负压影响下向下移动是土体固结下沉的原因, 排水板附近的土颗粒在排水板负压影响下向排水板方向移动, 是形成“土桩”的根本原因。

关键词: 吹填超软土; 颗粒移动; 重分布; “土桩”; 数值分析; PFC^{2D}

中图分类号: U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)09-0116-07

Consolidation test and numerical simulation of particles movement to ultra-soft soil bearing vacuum load

WU Ya-jun, QIN Ping, YANG Jian-bo

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: After consolidated by vacuum preloading, recently superficial hydraulic filled mud soil commonly forms a small region, which has a higher strength around the drainage plate. This zone with a higher density, greater shear strength and small settlement, is so-called the “soil pile”. The poor consolidation result of the region outside the “soil pile” causes uneven reinforcement phenomenon in a large blow filled silt field. To analysis this phenomenon, we firstly conduct an indoor model test of superficial hydraulic filled mud soil under vacuum preloading to research the particle composition, settlement, pore pressure head height and water content. Secondly, we adopt numerical analysis software PFC^{2D} to explore particle’s forming mechanism from the micro sight. The indoor model test shows that uneven settlement is formed in soil after vacuum preloading. Obvious uplift is developed around the drainage plate with the radius of 20 cm to 25 cm. The content and density of fine particle gains highly, and its permeability coefficient decreases around the drainage plate, forming a relatively dense and weak permeability “pile” phenomenon. The numerical simulation indicates that under the influence of negative pressure, particles moving down results soil’s consolidation. With the effect of negative pressure in drainage plate, soil particles nearby drainage plate move to drain board direction which result in the “soil pile”.

收稿日期: 2013-01-02

*基金项目: 上海高校选拔培养优秀青年教师科研专项基金 (B.37-0118-07-001)

作者简介: 武亚军(1973—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程中软地基处理、基坑边坡支护、地下建筑结构工程等方面的教学与科研工作。

Key words: superficial hydraulic filled mud soil; particles movement; redistribution; soil pile; numerical simulation; PFC^{2D}

近年来,为缓解陆地资源的紧缺态势,在我国东南部沿海地区大量采用围海造陆方式形成陆域。而且随着工程建设发展需求的不断提高,建设方为加快工程建设进度,通常在很多刚吹填完毕的流态地基上就立即开展地基加固工作^[1-2]。由于砂源的不足,许多地区只能采用海、河、湖底的淤泥为吹填料,完成吹填后这些淤泥地基表层基本上都为泥浆,具有高含水量、高黏粒含量、低强度的特点,属于超软土地基^[3]。由于施工工艺的限制,对于这种超软弱地基,很难采用堆载预压、复合地基和动力排水固结等方法处理,目前工程中较多采用改进的真空预压法进行加固^[4-7],虽然在一些地区得到了一定的应用,但处理效果尚不尽如人意,大部分地基在经过这样的处理后仍不能满足最终使用要求,还需要进行二次表层或深层加固。

近年来,本课题一直在对流态淤泥的排水板真空固结进行研究,发现在对流态淤泥施加真空荷载进行真空固结的过程中地基内部土体性质极其不均匀^[8-9]。关于这一宏观现象有学者也曾发现:董志良^[10]在真空预压的现场试验中指出排水板周围出现“土桩”现象;唐彤芝^[11]通过吹填淤泥真空预压加固的现场试验发现在排水板周围会形成“淤泥抱团区”;关云飞^[12]对比分析了吹填淤泥和海相软土在真空预压下的固结特性。排水板处出现的“土桩”现象如图1所示。



图1 竖向排水道附近的“土桩”

尽管学者们在上述研究文献中都指出了“土桩”、“淤泥抱团区”等现象,也进行了相应的分析,但是多侧重于宏观方面,没有从根本上解释这种不均匀现象的形成机理。笔者认为这种现象的形成与淤泥在真空荷载下出现土颗粒的移动与重分布有关:一部分土颗粒在负压差作用下会随着水的流动而移动,在阻力较大的位置停下并聚积形成所谓的“土桩”,“土桩”的存在一定程度上阻止了土体的进一步固结,并导致土体宏观物理力学性质的差异。

本文首先进行吹填土无砂真空预压室内模型试验,研究单根排水板周围土体在真空负压加载过程中颗粒组成、沉降、含水量等各项指标的分布和变化,对吹填淤泥质土在真空负压作用下易出现沉降和强度分布不均匀现象进行了合理解释。然后采用颗粒流数值软件PFC^{2D}从微观角度模拟负压条件下土颗粒的移动情况。模拟结果表明,土颗粒在土体表面负压影响下向下移动是土体固结下沉的原因,排水板附近的土颗粒在排水板负压的影响下向排水板方向移动,是形成“土桩”现象的根本原因。

1 模型试验

1.1 试验土样

试验土样取自上海地区第4层土,通过室内试验得到其物理力学指标如表1所示。

表1 吹填土物理力学性质参数

指标	含水率/%	液限/%	塑限/%	孔隙比	塑性指数
数值	89.1	42.3	20.4	2.42	21.9

1.2 试验装置及过程

试验的模型装置如图2所示,装置主要由模型箱、排水系统和量测系统组成。模型箱由钢化玻璃制成,尺寸为100 cm × 80 cm × 80 cm (长 × 宽 × 高),排水系统由塑料排水板、排水管、抽滤瓶和真空泵等组成,量测系统由百分表、厘米刻度

尺、孔压传感器和真空表组成。

调制好后的土样装入模型箱内，高度为70 cm，模型中心位置插设一根排水板，排水板上端出露并高出土样表面约10 cm，再在其上依次铺设土工布和土工膜并在周边密封，然后对排水板顶部施加真空荷载-80 kPa，真空荷载同时作用在土样表面和排水板处，在加载的过程中对土样表面沉降和出水量随时间的变化进行监测。模型试验装置如图3所示。

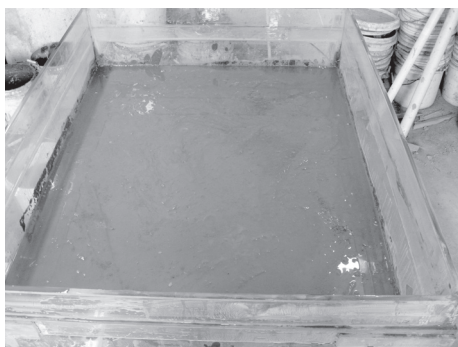


图2 模型箱内的土样

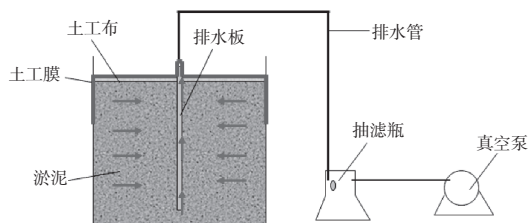


图3 模型试验示意图

1.3 试验结果及分析

加载过程中土体表面沉降随时间的变化如图4所示，由图可知，在加载的前5 000 min之内，土体沉降发展较快，基本呈线性增长趋势，随着时间的增长，土体沉降速度逐渐减缓；当真空加载到26 740 min时，排水板中心点处的最终沉降量为9.9 cm，在距离排水板15 cm和30 cm处土体表面的最终沉降量分别为13.3 cm和14.8 cm，最大高差约达5 cm。在整个加载过程中，排水板中心处相对周围土体沉降量最小。

真空荷载施加结束后土体表面沉降情况如图5和图6所示。从图中可以看出，土体表面有明显的均匀沉降现象，排水板处的沉降量相对较小，

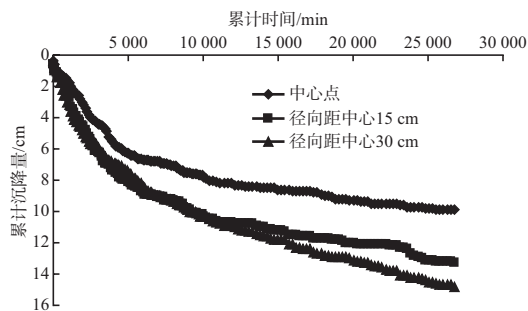


图4 表面沉降随时间变化曲线



图5 真空加载后土体表面沉降

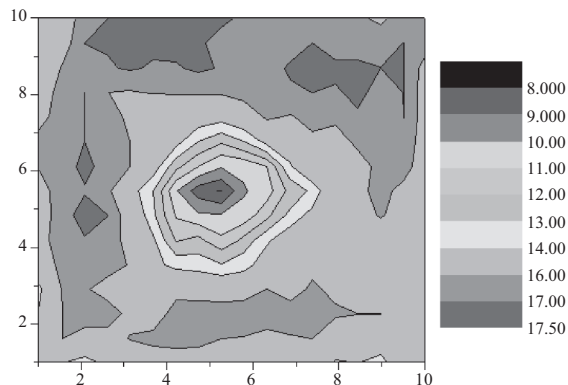


图6 真空加载后土体表面沉降等值线

周围土体的沉降量相对较大，表现在地表就是形成以排水板为中心的隆起现象，即所谓的“土桩”，该“土桩”的半径大约为20~25 cm。

真空预压加固后地表沉降等值线如图6所示，从图中可以清晰的看出模型中的土体表现为中间高、四周低的现象。

原状土的强度与土体的含水率密切相关，为了了解原状土在真空预压加固过程中土体含水率的变化，加固过程中对原状土进行了含水率试验，试验结果如图7，8所示。其中，图7为离排水板不同距离土体含水率分布图，图8为土体不同深

度含水率分布图。从图7可以看出, 真空预压加固后, 土体含水率范围在29%~55%, 与加固前的含水率89.1%相比明显下降了。此外, 从图7中还可以看出, 真空预压加固后, 在同一土层深度处, 离排水板越近, 土体的含水率越小。从图8可以看出, 真空预压加固后, 在距离排水板相同位置处, 上部土体的含水率比下部土体的含水率小。这一变化规律说明在径向方向, 靠近排水板处的

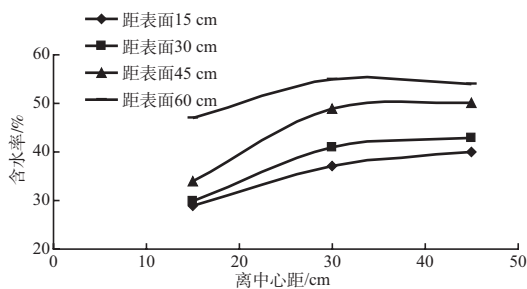


图7 离排水板不同距离土体含水率分布

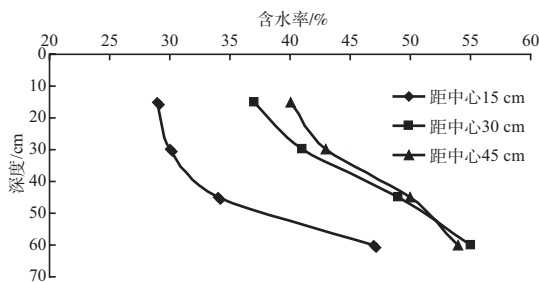


图8 土体不同深度含水率分布

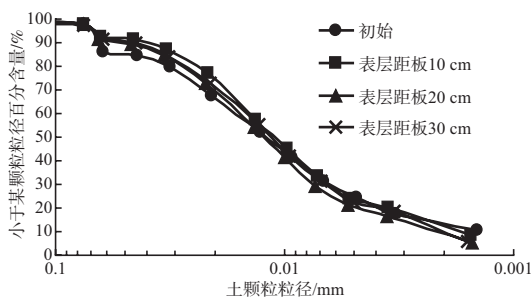


图9 粒径累计曲线

土体强度比远离排水板的大; 在竖直方向上, 上方的土体强度比下方的大。

真空加载试验结束后, 土样的粒径累计曲线在深度方向的分布情况如图9所示。该土样粒径小于0.1 mm的成分达到97%以上, 基本由极细粉粒和黏粒组成。且土样的粒径分布随深度变化不大, 土颗粒分布基本均匀。

2 PFC^{2D}数值模拟

为了研究土颗粒在真空负压作用下的响应特征, 本文采用颗粒流数值分析软件PFC^{2D}^[13]从微观角度对土颗粒的移动规律进行定性分析。

2.1 生成模型

受到PFC^{2D}软件本身的限制, 如果按实际的模型尺寸进行模拟, 由于土颗粒的尺寸很难取得到黏粒的量级, 本文数值模拟的侧重点在于对土颗粒在负压作用下移动规律进行研究, 故在尽可能不影响规律研究的基础上, 将尺寸缩小20倍建立模型。模型长度方向取土样左边界至排水板中心的距离, 即原室内模型土样长度100 cm的一半; 高度方向与原室内模型土样高度70 cm相同。按等比例缩小后, 模型尺寸为: 2.5 mm × 3.5 mm。土颗粒同时受到土体表面和排水板处的真空压力作用, 并考虑土颗粒在水平方向和竖直方向的移动。

模型是由球和墙组成的, 球代表土颗粒, 墙代表土颗粒边界。土颗粒的生成方式是先在模型空间内随机生成小颗粒, 然后通过半径扩大法来达到目标孔隙率。根据室内模型试验, 生成的土颗粒的最小半径取0.075 mm, 最大半径取0.2 mm。土体孔隙率由孔隙比2.42换算为0.7。颗粒的个数由孔隙率来确定。材料特性如表2所示。生成的土颗粒模型如图10所示。

表2 材料特性

材料	半径/ mm	密度/ (kg·m ⁻³)	法向刚度 N/m	切向刚度 N/m	摩擦 系数	黏滞系数/ (Pa·s)
球	0.075~0.2	2 650	1.0 × 10 ⁶	1.0 × 10 ⁶	0.3	
墙			1.0 × 10 ⁶	1.0 × 10 ⁶	0.5	
水		1 000				1.0 × 10 ³

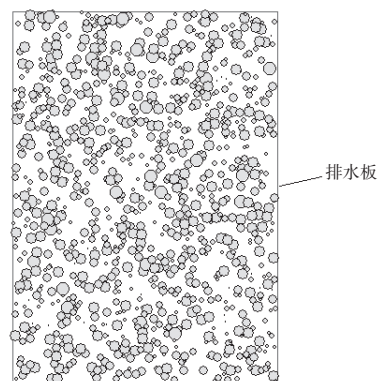


图10 PFC^{2D}数值计算模型

2.2 设置点墙

根据实际情况，土颗粒在土体表面和排水板位置同时受到真空负压的影响，并且排水板处土颗粒受到的负压力沿深度方向是逐渐衰减的。因此，在模拟中将模型的左右两边和上边边界设置成点墙，用以设置并传递真空负压，同时将原来的墙删掉，将底部边界设置为整墙，视为不透水边界。由此，整个土颗粒模型由下边整墙和左、右、上边点墙围成(图11)。

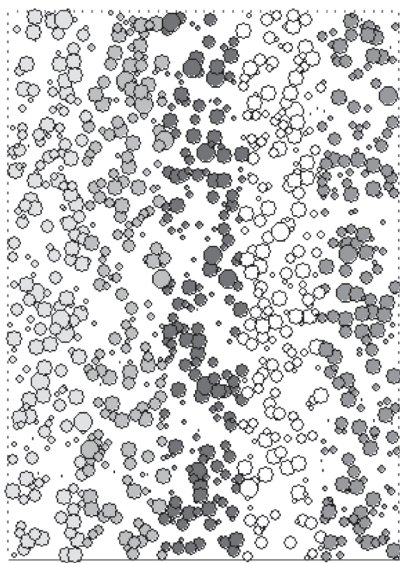


图11 设置点墙及标记区域

2.3 施加边界条件

右边界：根据室内模型试验可知，试验开始时在排水板位置进行抽真空，真空度为-80 kPa，其结果使土体中的流体产生超孔隙水压力，因此，在模拟过程中，忽略真空度在排水板处沿深度方向的传递过程中的损失，根据等价原则，应将排水板位置处的流体孔隙水压力设置为-80 kPa。但根据比例关系，数值模型的土样尺寸是室内模型土样尺寸缩小20倍后得到的，土样受到的孔隙压力也应按比例缩小20倍，缩小后的孔压值为-4 kPa，因此，在模型的右边界排水板位置处沿土体深度方向设置负孔压-4 kPa。

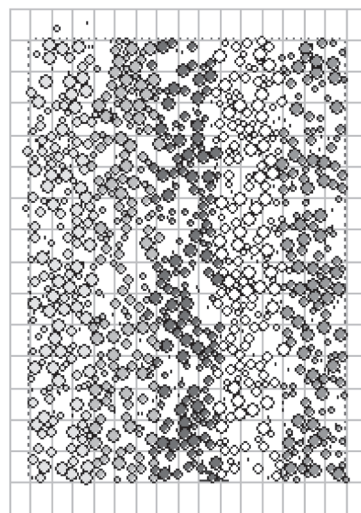
上边界：根据室内试验，在土样表面铺设土工布和土工膜后，由于密封性原因在土样表面也产生真空度，并假设模型密封性非常好，抽真空过程中没有损失，在模型上边界对土样施加等价

的真空压力，按模型比例缩小后设置孔隙水压力为-4 kPa。

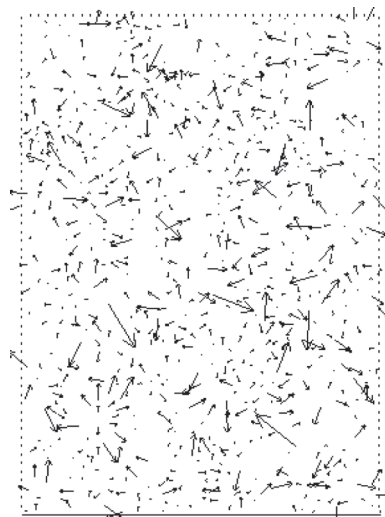
2.4 颗粒移动情况

土颗粒移动情况如图12~15所示。其中，图12~15 a) 是土颗粒移动分布图。图中矩形小方格代表流体细胞，模拟过程中设置土样模型全部处于流体当中，土体处于饱和状态；黑色线条代表颗粒间的接触力，线条的粗细代表接触力的大小。b) 是土颗粒移动的速度方向图。

在边界条件的影响下，土颗粒首先由聚集在一起的小颗粒团震动散开成一个个颗粒单元(图12)，造成原始土体结构破坏，然后土颗粒开始移动和重新分布。

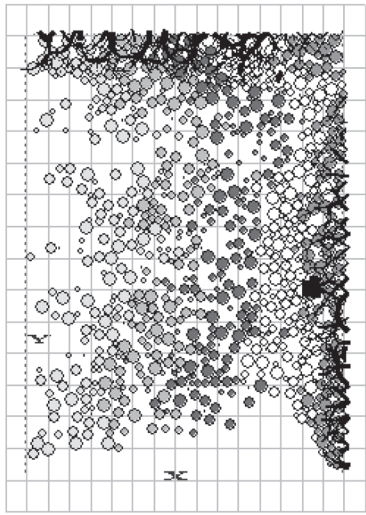


a) 第1 000步土颗粒移动分布

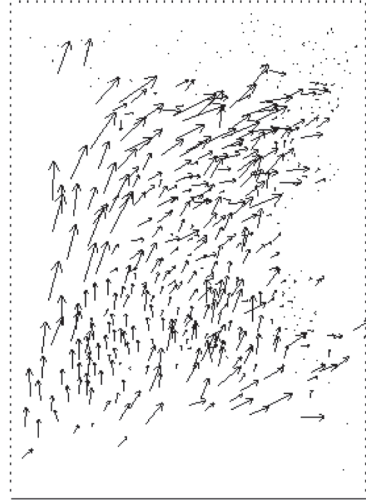


b) 第1 000步土颗粒移动速度方向

图12 第1 000步土颗粒移动分布和速度方向

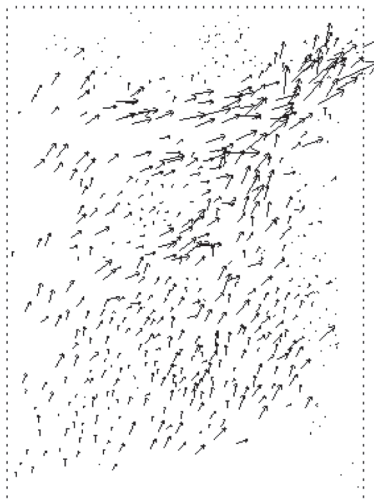


a) 第400 000步土颗粒移动分布



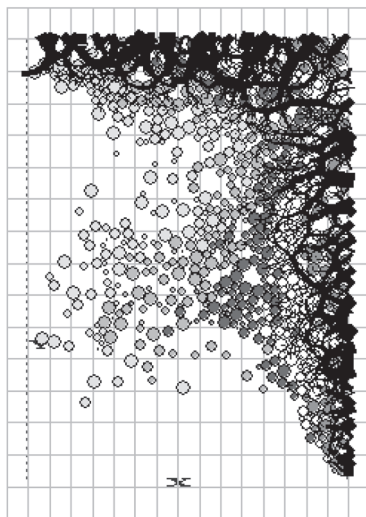
b) 第800 000步土颗粒移动速度方向

图14 第800 000步土颗粒移动分布和速度方向

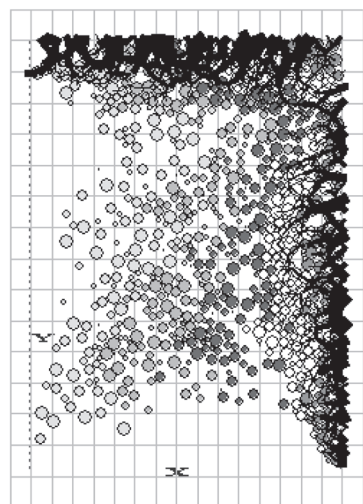


b) 第400 000步土颗粒移动分布

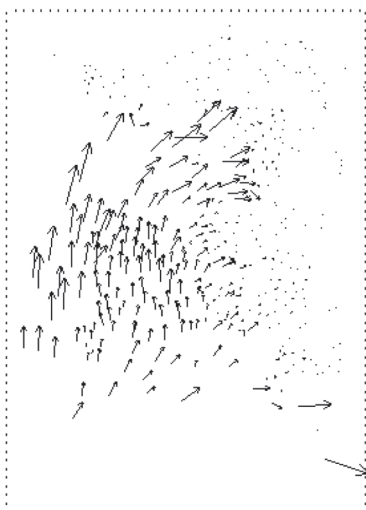
图13 第400 000步土颗粒移动分布和速度方向



a) 第1 800 000步土颗粒移动分布



a) 第800 000步土颗粒移动分布



b) 第1 800 000步土颗粒移动速度方向

图15 第1 800 000步土颗粒移分布和动速度方向

在图13~15中可以看出,由于受到排水板处和土体上表面负压的影响,土颗粒整体表现出向右上方移动的趋势。在竖直方向上,离排水板较远的土颗粒受到土体上表面负压的影响大于排水板负压的影响,主要表现为向上移动;在水平方向上,靠近排水板位置的土颗粒受到排水板处负压力的影响大于土体表面负压的影响,主要表现为向右边排水板方向聚集。另外,在排水板底部的土颗粒受到排水板负压的影响远远大于土体表面负压的影响,土颗粒基本上没有发生向上移动。最后,土颗粒聚集在右上方。这一运动现象造成模型左下角的孔隙率明显增大,土颗粒将在重力作用下下沉,致使模型的左边土体沉降大,右边土体的沉降小,左右两边土体出现明显的沉降差,最终出现“土桩”。根据土颗粒的移动方向可知,土颗粒在土体表面负压影响下向上移动是造成土体下部孔隙率增大,致使土颗粒在重力作用下固结下沉的原因;排水板附近的土颗粒在排水板负压影响下向排水板方向移动,是形成“土桩”的根本原因。

3 结论

1) 吹填土无砂真空预压模型试验施加真空压力后,土体产生不均匀沉降,靠近排水板附近的土颗粒的密实度相对周围土体的高,含水量相对周围土体的低,模型表面产生了半径为20~25 cm明显隆起,隆起高度约为5 cm。

2) 通过使用颗粒流软件PFC^{2D}模拟可知,在真空荷载作用下土颗粒发生移动和重分部。土颗粒在上表面压力作用下向上移动,是造成土体在重力作用下固结下沉的根本原因;土颗粒在排水板负压下向排水板方向聚集是造成“土桩”现象的根本原因。

3) 采用PFC^{2D}模拟所得出“土颗粒发生了移动”的结论,说明室内模型试验中“土桩”的形成确与此有关。

4) 数值模拟的土样尺寸取为室内模型尺寸的

1/20,考虑到尺寸效应的影响,本次模拟的土颗粒移动结果以及土体产生的沉降差仅作为定性分析,还无法达到定量计算。

参考文献:

- [1] 张功新. 真空预压加固大面积超软弱吹填淤泥土试验研究及工程应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2006.
- [2] 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): 120-123.
- [3] 孙立强, 闫澍旺, 李伟, 等. 超软土真空预压室内模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 32(4): 984-990.
- [4] 董志良, 张功新, 周琦, 等. 天津滨海新区吹填造陆浅层超软土加固技术研发及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 1 073-1 080.
- [5] 董志良, 张功新, 莫海鸿, 等. 超软弱土浅表层快速加固方法及成套技术: 中国, 200810026168.4[P]. 2008-07-23.
- [6] 张中捷, 董志良. 浅层处理与真空预压联合处理法在超软地基加固工程中的应用[G]//全国超软土地基排水固结与加固技术研讨会论文集, 2010.
- [7] 董志良, 陈平山, 莫海鸿, 等. 真空预压下软土渗透系数对固结的影响[J]. 岩土力学, 2010, 35(5): 1 452-1 456.
- [8] 武亚军, 邹道敏, 唐军武, 等. 吹填软土植物垫层真空预压现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S2): 3 574-3 583.
- [9] 杨建波. 负压条件下超软土固结机理研究[D]. 上海: 上海大学, 2012.
- [10] 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): 158-163.
- [11] 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): 115-122.
- [12] 关云飞, 黄家青, 汤勇军, 等. 吹填淤泥与海相软土在真空预压作用下的固结特性对比分析[G]//第八届全国工程排水与加固技术研讨会论文集. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
- [13] 习志雄. 真空预压法处理吹填淤泥质软土地基的颗粒流数值模拟[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.

(本文编辑 郭雪珍)