

DOI: 10.11779/CJGE2016S1031

排水板周围土体径向固结室内模型试验研究

陈雷¹, 张福海^{2,3}, 李治朋¹, 安彦勇¹, 李玉龙⁴

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456; 2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098; 4. 天津市勘察院, 天津 300191)

摘要: 考虑真空负压沿排水板的衰减分布对排水板周围土体固结特性的影响, 开展室内模型试验模拟某一深度处预压地基排水体中真空负压对其周围土体径向固结的过程。通过分析排水板周边土体基本物理力学性质、渗透性、压缩性及土颗粒的时空分布特点, 研究不同真空负压强度对排水板周围土体径向固结的影响。试验结果表明随着真空度沿着排水体的衰减, 排水板对周围土体的影响范围逐渐缩小, 在软基深部有大面积的交叉影响区, 对软基浅部优于深部; 细微颗粒在真空负压差作用下发生向着排水板方向运移并, 使得在排水板周围细颗粒含量增大, 远端细微颗粒减少; 基于真空渗流场理论, 结合颗粒试验结果, 分析了真空预压过程中细颗粒运移成因, 进一步解释了“土桩”形成机理。
关键词: 真空预压; 真空负压源; 吹填土; 固结沉降; 模型试验

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)S1-0163-06

作者简介: 陈雷(1988-), 男, 河南省南阳人, 助理工程师, 主要从事软土地基处理和岩土工程测试方面的研究。

E-mail: tkschenlei@126.com.

Experimental study on radial consolidation of soil around drainage plate

CHEN Lei¹, ZHANG Fu-hai^{2,3}, LI Zhi-peng¹, AN Yan-yong¹, LI Yu-long⁴

(1. Tianjin Research Institute of Water Transport Engineering, M.O.T. Tianjin, 300456, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geo-mechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Tianjin Institute of Geotechnical Investigation & Surveying, Tianjin 300191, China)

Abstract: Considering the influence of attenuation distribution pattern of negative pressure along a PVD, model tests are carried out to simulate the process of radial consolidation of soil around the PVD at a depth of foundation with vacuum negative pressure. By analyzing the characteristics of the physico-mechanical properties of soil, permeability, compressibility and particle distribution along the radius, the influence of different vacuum negative pressure on the radial consolidation of soil around the PVD is studied. The experimental results show that with the decrease of the vacuum degree along the PVD, the influence of drainage plate on the surrounding soil is gradually reduced and the depth of the soft foundation is better than that of the deeper part. Under the vacuum negative pressure difference, the fine particles move toward to the PVD, making fine particles content increase around the PVD. Based on the vacuum seepage field theory, combined with the test results, the cause of migration of fine particles in the vacuum preloading process is analyzed, and the formation mechanism of the soil pile is further explained.

Key words: vacuum preloading; vacuum resource; dredger fill; consolidation settlement; model test

0 引言

随着城市发展建设土地需求量日益增加, 吹填造陆已成为滨海、河、湖地区城市发展, 改变土地紧缺现状的必由之路。目前吹填软土地基处理多采用真空预压法^[1-2]。

国内外对于真空预压法加固吹填土开展大量的室内试验研究其加固机理。陈环等^[3]通过室内模型试验对负压条件下土体固结过程中有效应力变化规律进行研究。高志义等^[4]通过室内离心模型试验, 探索其加

固机理和软基加固新方法。孙立强等^[5]采用超软土进行室内模型试验研究软基加固过程中的固结沉降行为。Sridhar^[6]、Indraratna 等^[7-8]通过模型试验对真空预压后软基强度和压缩性进行研究, 进而得到了吹填土的沉降固结机理。

真空预压法加固软土地基时, 土体的固结过程中

基金项目: 中央高校科研业务费项目 (B15020060)

收稿日期: 2015-11-30

不仅产生垂直固结，在侧向也会产生向着排水体的径向固结。诸多学者利用室内模型试验对吹填土竖向沉降固结机理进行研究，但对于排水体周围土体径向固结研究甚少。

真空度的形成与分布对该法加固效果和加固深度起着至关重要的作用，大量实践表明真空度沿排水体的衰减分布^[9-11]，由此导致加固土体的固结沉降特性在竖向存在不均匀性，预压加固后的土体浅层加固效果优于深层，由于在排水板在不同深度处的真空负压强度不同，进而排水体周围土体径向加固效果也存在很大的差异性。

为研究不同真空负压值对排水板周围土体径向固结特性的影响，考虑真空负压沿排水板的衰减分布，开展模型槽试验模拟某一深度处预压地基排水体中真空负压对其周围土体径向固结过程，通过分析不同真空负压值作用前后径向土体的基本物理力学性质、渗透系数、压缩系数等，研究不同真空负压强度对排水板周围土体径向固结的影响，并对其径向固结机理进行探讨。

1 模型试验

1.1 试验土样及制备

试验土样为南京秦淮河底淤泥质黏土，其基本的物理性质指标见表 1。

表 1 试样的基本物理力学性质

Table 1 Basic physico-mechanical properties of sludge

土样	含水率 /%	密度 /(g·cm ⁻³)	G _s	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数	e ₀
淤泥	86	1.48	2.71	56.4	33.5	22.9	3.08

1.2 试验内容

分别在 3 个模型槽内对性质相同的土样采用 3 种不同的真空负压加载方式：①工况 1，-90 kPa；②工况 2，-60 kPa；③工况 3，-30 kPa 进行径向固结模型试验。通过分析试验过程中孔压的变化，并分析不同真空负压作用下颗粒分布、含水率、渗透系数、压缩系数等的分布变化。

1.3 试验装置和过程

模型试验装置主要包括模型槽、排水系统、压力控制系统、气水分离系统和孔压测试系统组成。模型槽尺寸为长（80 cm）×宽（20 cm）×高（30 cm），排水系统由长（20 cm）×宽（10 cm）塑料排水板，不设置砂垫层，使用土工膜密封，将抽水管直接与排水体相连。压力系统由真空泵和电接点真空表组成，利用电接点真空表控制抽真空强度。在模型槽壁上距离排水板 10 cm 和 20 cm 处分别设置两个孔压计，如

图 1，对试验过程中距离排水板不同位置处孔压值进行监测。

土样调制好后放入模型槽中，然后将排水板插入土体中，排水体距离模型槽右端 10 cm（未在中央），排水体上端露出土样，再在其上铺设土工布和土工膜并在周边密封，分别对排水板顶端抽真空。在试验结束后对模型槽内径向不同位置处土体进行渗透试验、压缩试验等。

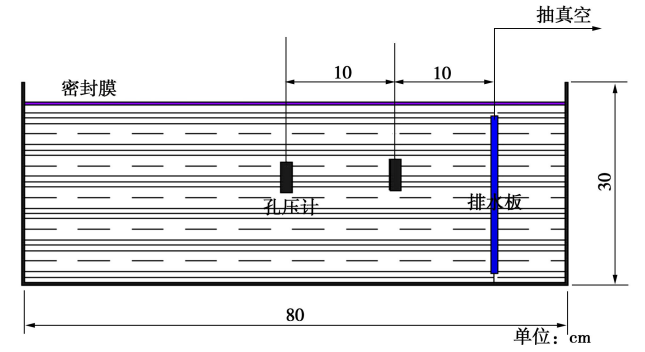


图 1 模型装置内仪器布置示意图

Fig. 1 Model slot and test arrangement

2 试验结果及分析

2.1 排水板周围土体径向固结特性变化

(1) 含水率

在不同抽真空负压强度持续 100 h 后，打开密封膜，分别对模型中距离排水板 0，5，10，20，30，40，50 cm 处取土，取土深度距离表面 15 cm，位于模型中央层，分别进行含水率试验。-90，-60，-30 kPa 抽真空负压强度作用下模型槽内土体含水率随距排水板径向距离的变化曲线如图 2 所示。

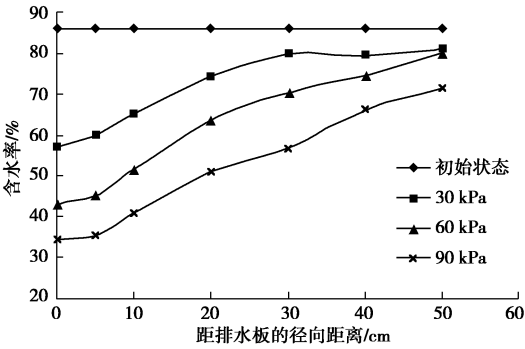


图 2 不同工况下距排水板不同位置处土体含水率的变化曲线

Fig. 2 Water contents along radius under different cases

由图 2 可看出，模型槽内土体在真空预压处理后，在径向含水率表现出明显的差异性，真空负压强度越大，排水板近端含水率变化越大。具体表现为距离排水板周围 10 cm 内含水率很低但变化不大，20~30 cm 内土体含水率急剧下降，30 cm 以外土体含水率变化

较小, 差异相对不显著。在排水板附近土体的含水率下降幅度最大, 在距离排水板 0~10 cm 内, -90, -60, -30 kPa 抽真空强度作用下模型槽中土体含水率分别下降 51.5%, 42.6%, 28.6%, 在距离排水板 30 cm 处土体含水率分别下降 29.0%, 15.6%, 5.9%, 试验表明排水板周围土体的处理效果优于远端, 且真空负压强度越大预压处理效果越好。

从各真空负压强度的作用范围来分析, 各工况分别抽真空 120 h 后, -30 kPa 真空负压作用的影响范围最小, 仅对排水板周边 20 cm 范围内的土体具有一定的加固作用, 超过 20 cm 范围, 对土体的含水率影响很小; -60 kPa 真空负压强度作用下, 可以看到 30 cm 外土体的含水率变化较小, 在 30 cm 范围内的含水率下降显著; 对于 -90 kPa 真空负压强度作用下, 对 50 cm 范围内的土体的含水率均有影响。

(2) 固结参数

不同抽真空强度作用下, 模型槽内不同位置处土体排水距离和水力梯度的不同, 导致土体径向固结的差异性, 也必然导致土体在径向上渗透性和压缩性的差异。试验结束后, 对各抽真空强度下径向距排水板 5, 10, 15, 20 cm, 取土深度为 15 cm 的土体的水平向渗透系数和压缩系数进行测试, 试验结果如图 3, 4 所示。

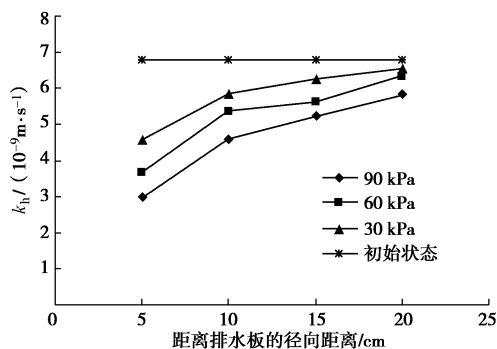


图 3 不同工况下水平渗透系数 k_h 随径向距离的变化曲线

Fig. 3 Permeability coefficient along radius

由图 3 可以看出, 各真空负压强度下土体的渗透系数随离开排水板距离的增大而递增, 排水板周围土体渗透系数明显比远处小; 真空负压强度作用越小时, 其周围土体的渗透系数越大; 真空荷载越大, 渗透系数越小, 而对于外侧土体来说, 变化规律正好相反。由此可以看出, 渗透系数的变化也与真空强度有关, 结合上面关于颗粒曲线的分析认为在真空荷载作用下, 排水板周围土体会因细小颗粒的聚积而渗透系数变小, 外侧土则会因细小颗粒的运移离开而渗透系数变大, 真空负压作用越大时这种趋势越明显。

图 4 为不同工况下距离排水板不同位置处的压缩

系数的变化曲线, 由图可以看出, 排水板周围 10 cm 土体的压缩系数较小, 10 cm 范围以外的土体压缩系数变化较小。主要是排水板周围土体在真空负压作用下发生向着排水板的径向压缩变形和水平位移, 同时土颗粒在渗流力的作用下向着排水板发生运移, 在某种程度上增大排水板周围土体的密实度, 使其周围土体的压缩系数变小。同时也可以看出随着真空负压强度的增大, 这种压缩变形趋势不断增大, 排水板周围土体的密实度增大, 含水率降低。这和前面的含水率试验结果是保持一致的。

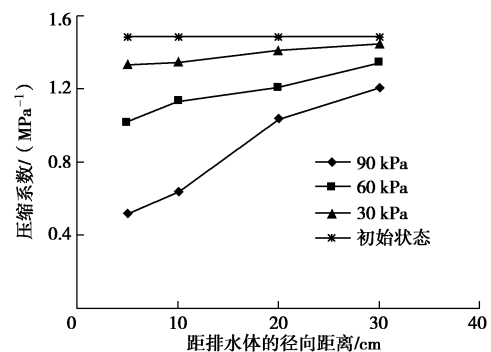


图 4 压缩系数随径向距离的变化曲线

Fig. 4 Compression coefficient along radius

综上分析可得在真空预压法加固软基过程中, 由于真空负压沿排水板的衰减, 不同深度处的排水板内的真空负压强度不同, 导致不同深度处排水板周围土体的渗透系数和压缩系数随时间的变化规律不同, 排水板周围土体由于发生径向固结其变化显著, 沿径向逐渐减弱, 且伴随着真空度沿排水板的衰减逐渐减弱。

(3) 单井的有效影响范围

在真空预压过程中, 真空负压由排水板向土体中发生径向的传递, 由于存在传递的阻力, 所以在土体的径向存在负压差, 在该负压差的作用下形成负压梯度, 土体中的孔隙水发生径向渗流的。径向的水力梯度为 i_r , u 为超静孔隙水压力则

$$i_r = \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial r}, \quad (1)$$

式中, 当 $r=0$ 时, i_r 最大, 当 $r=r_c$ 时, $\partial u / \partial r = 0$, $i_r=0$ 。

根据有效应力原理 $u = \sigma - \sigma'$, 可得

$$i_r = \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{1}{\gamma_w} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial r} - \frac{\partial \sigma'}{\partial r} \right) = -\frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial \sigma'}{\partial r}. \quad (2)$$

由式 (2) 可知, 径向的水力梯度 i_r 越大, 排水板周围土体土体固结越快, 有效应力增长越快。而水力梯度 i_r 和土体与排水板中真空负压有关。真空负压作用越强, 水力梯度 i_r 越大, 其影响范围越大。

朱建才等^[10-11]现场试验研究表明真空预压法真空负压沿排水板衰减, 排水体内不同深度处的真空负压

强度不同,所以排水板周边土体中的 i_r 自上而下也是不同,径向有效应力的增长和有效影响范围的半径 r_e 也不同。由此也可以推断处真空预压法单井有效影响半径 r_e 的变化规律,自上而下减小,见图5。

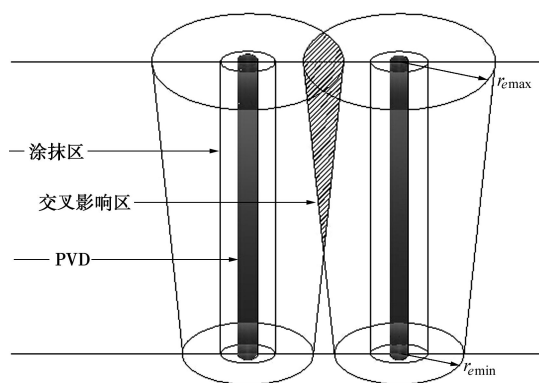


图5 单井影响区域对比示意图

Fig. 5 Influence areas of single well

土体在径向上的差异主要由于距排水面径向距离和水力梯度的差异,在排水板近端排水路径较短,水力梯度较大更易于渗流排出,所以排水板周围土体发生径向固结显著,含水率降低,渗透系数、压缩系数减小。随真空负压强度沿着排水板衰减,排水板周围土体中水力梯度逐渐减小,对排水板周边的影响范围减小,所以单井影响范围沿着排水板呈现出倒锥形逐渐缩小的分布趋势。

由图5可以看出,真空预压法在软基浅部交叉影响区较多,在软基深部交叉影响区较少,由此也可以解释真空预压法对软基层加固效果显著,出现硬壳层,深部处理效果较差,处理不均匀。

2.2 颗粒分布及土桩形成机理

(1) 土体径向上的颗粒分布分析

试验前土样均经过搅拌机充分搅拌均匀,以确保试验土样初始状态的一致。试验结束后分别在距离排水板0, 5, 10, 15 cm处,距离表面15 cm处取土,利用激光粒度分析仪进行颗分试验。图6(a)~(c)为不同真空负压强度作用下距离排水板不同位置处土颗粒分布曲线。

由图6(a)可以看出,在排水板不同位置处细颗粒含量为:5 cm处高于10 cm和15 cm处,细颗粒含量差异不明显,粗颗粒含量为0 cm处低于5, 10, 15 cm处,后三者粗颗粒含量差异不明显。由图6(b)、

(c)可以看出在距离排水板5, 10, 15 cm差异很小。在试验初期各土样初始状态均匀一致,在抽真空100 h后土样颗分在径向表现出明显的差异,这说明在抽真空作用过程中细颗粒向着排水板方向的运移,排水板中真空负压强度越大,细颗粒向排水板周围运移量增

多,主要是真空负压强度越大,负压产生的渗流强度越大,细颗粒运移越明显。

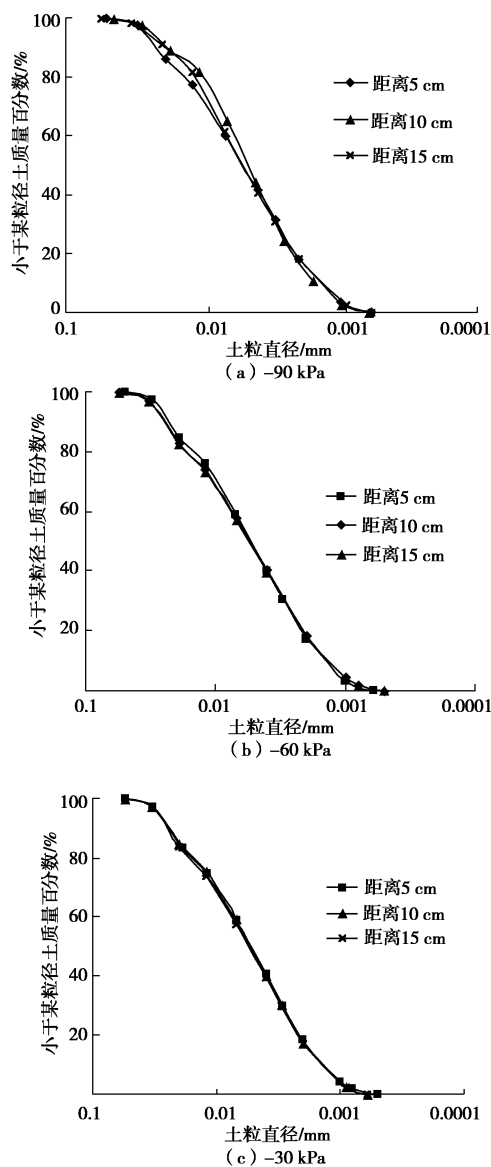


图6 不同工况下距离排水板不同位置处土颗粒分布曲线

Fig. 6 Particle distribution along radius under different cases

(2) 土颗粒运移成因分析

龚晓南等^[12]在多孔介质理论上阐述真空预压加固软土地基机理,认为抽真空先在土体较大孔道中形成真空渗流,土体中较小孔道中的孔隙水与较大孔道中流动的真空流体由于压差作用而排出,产生固结现象。某一深度处孔隙水在径向由土体向排水板中渗流示意图如图7所示,当渗流水在土体孔隙中流动过程中,会产生渗流力施加于土体内的土颗粒上,在真空预压初期土体孔隙比较大,一些细颗粒会在较大粒径土颗粒之间大孔隙内由于渗流力的作用下,沿着多孔介质之间的真空渗流通道向着排水面运移,从而导致排水板周围细颗粒及极细颗粒的聚集。

根据文献[12],真空负压在排水板向周围土体传

递过程中存在损失, 在径向某单位距离之间产生负压差 Δp_1 和 Δp_2 。排水板中真空负压强度越大下, 负压差 Δp_1 和 Δp_2 越大, 细土颗粒在该压差力的作用下向着排水板运移, 如图 7。所以 -90 kPa 作用下细土颗粒运移强度要大于 -60 kPa 和 -30 kPa , 排水板周围细颗粒含量要高于后两者。

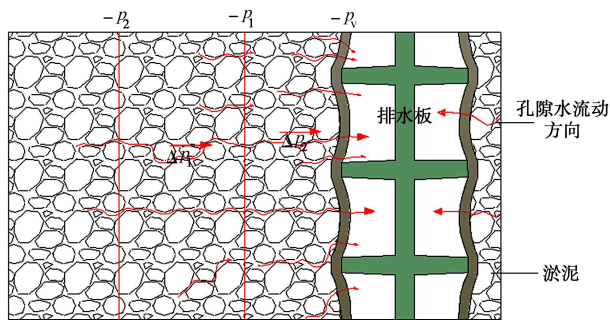


图 7 某深度横剖面孔隙水流动示意图

Fig. 7 Flow diagram of pore water flow at a depth

在真空预压初期土体孔隙比很大, 在排水板周围发生大强度的径向渗流, 发生土颗粒的径向运移, 抽真空强度越大这种运移量越大, 排水板周边细颗粒聚集越多, 并进一步使排水板周边土体孔隙比减小和渗透性降低, 加剧孔隙水径向渗流通道的淤堵, 严重影响预压后期土体的固结。而在真空预压初期使用低抽真空强度时, 排水板周围径向渗流强度较弱, 土颗粒发生径向运移的趋势相对较低, 对排水板周围渗透系数和孔隙比影响较小。由此建议在软基预压处理初期采用低初始抽真空强度。

(3) 土桩形成机理分析

对于大面积超软土地基预压处理后, 在加固场地普遍出现“土桩”, 如图 8 所示, 在排水板附近形成“土桩”阻碍吹填土排水固结, 降低固结效率并且对土体的处理效果极其不均匀^[13-14]。

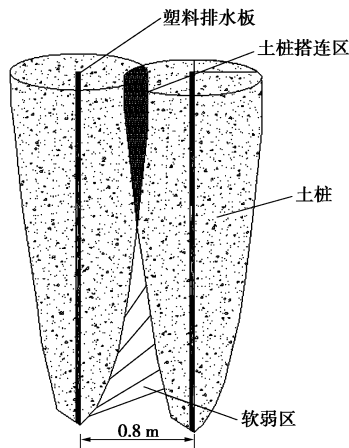


图 8 “土桩”立面^[13]

Fig. 8 Soil pile^[13]

研究认为, 真空预压过程中, 真空度不断向地基中深处土体传递, 并在以排水板为中心的径向形成真空负压梯度, 该真空负压直接作用于土体中的水和气, 而非作用于土体颗粒骨架, 在该真空负压梯度作用下形成真空渗流场^[15]。排水板周围土体首先发生渗流排水, 孔隙水在负压差的作用下径向排出, 并伴随细微颗粒的运移填充, 导致排水板周围土体渗透系数的降低和密实, 排水板周围土体的首先发生径向固结, 土体发生压缩, 强度得以提高。排水板周边细颗粒的聚集严重影响渗透性, 影响预压后期距离排水板较远处土体的固结, 进而形成以排水板为中心的土桩结构。

当抽真空强度很大时, 真空渗流场发展较快, 在排水板周围真空负压梯度越大, 排水板周围土体细颗粒运移量增多, 随着抽真空时间的增长, 影响范围逐渐增大, “土桩”直径也在慢慢增大, 土体径向固结特性的差异越大。当抽真空强度弱时, 真空渗流场发展慢, 土体细微颗粒运移量和排水板周围聚集量少, 对土体远端的固结影响小, “土桩”的影响半径小, 土体在径向固结特性的差异性就较小。

在真空预压法加固软基时, 真空负压沿排水板线性衰减, 所以在地基不同深度处真空强度不同, 在浅层真空强度较大, 由于细颗粒聚集产生的阻碍区的有效影响范围较大, 形成的“土桩”半径较大; 在软基深层时, 真空强度较小, 这一影响范围较小, “土桩”半径较小; 从而形成这种倒锥形“土桩”结构。

3 结论与建议

本文基于室内真空预压径向固结模式试验, 对不同真空负压强度下软基预压处理后土体基本物理性质及固结性质的影响进行研究, 主要得出以下两点结论。

(1) 排水板周围土体在径向上的差异主要由于距排水面径向距离和水力梯度的差异。随真空负压强度沿着排水板的衰减, 单井影响范围沿着排水板呈现出倒锥形逐渐缩小的分布趋势。

(2) 细微颗粒在真空负压差作用下发生向着排水板方向运移, 在排水板近端细颗粒含量增多, 细颗粒聚集产生的阻碍区的有效影响范围较大, 形成的“土桩”半径较大; 在软基深层时, 真空强度衰减到较小, 影响范围及其“土桩”半径较小; 从而形成这种倒锥形“土桩”结构。

参考文献:

[1] 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): 1073 - 1080. (DONG Zhi-liang, ZHANG Gong-xin, ZHOU Qi, et al. Research and application of improvement technology of shallow ultra-soft soil formed by hydraulic reclamation in Tian jin Binhai new area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(5): 1073 - 1080. (in Chinese))
- [2] 娄炎. 真空排水预压法加固软土技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001. (LOU Yan. Technique of vacuum drainage preloading[M]. Beijing: China Communications Press, 2002. (in Chinese))
- [3] 陈环, 鲍秀清. 负压条件下土的固结有效应力[J]. 岩土工程学报, 1984, **6**(5): 39 - 47. (CHEN Huan, BAO Xiu-qing. Effective stress of soil under negative pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1984, **6**(5): 39 - 47. (in Chinese))
- [4] 高志义. 真空预压法的机理分析[J]. 岩土工程学报, 1989, **11**(4): 45 - 55. (GAO Zhi-yi. Mechanism analysis of vacuum preloading method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, **11**(4): 45 - 55. (in Chinese))
- [5] 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, 2011, **32**(4): 984 - 990. (SUN Li-qiang, YAN Shu-wang, LI Wei, et al. Study of super-soft soil vacuum preloading model test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(4): 984 - 990. (in Chinese))
- [6] SRIDHAR G, GU H D. Improvement of mechanical Properties of ferrum lime stabilized soil with the addition of aluminum sludge[J]. Journal of the Society of Materials Science, Japan, 2001, **50**(3): 47 - 53.
- [7] INDRARATNA B, RUJIKITKAMJORN C, AMERATUNGA J, et al. Performance and prediction of vacuum combined surcharge consolidation at port of brisbane[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2011, **137**(11): 1009 - 1018.
- [8] INDRARATNA B, REDANA I W. Plane-strain modeling of smear effects associated with vertical drains[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, **123**(5): 474 - 478.
- [9] 周琦, 张功新, 王友元, 等. 真空预压条件下的砂井地基 Hansbo 固结解[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(增刊 2): 3994 - 3998. (ZHOU Qi, ZHANG Gong-xin, WANG You-yuan, et al. Hansbo consolidation solution for and-drained ground under vacuum preloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(S2): 3994 - 3998. (in Chinese))
- [10] 朱建才, 温晓贵, 龚晓南, 等. 真空排水预压法中真空度分布的影响因素分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, **11**(35): 1399 - 1408. (ZHU Jian-cai, WEN Xiao-gui, GONG Xiao-nan, et al. Analysis of factors having effect on distribution of vacuum degrees during soft ground by vacuum drainage preloading[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, **11**(35): 1399 - 1408. (in Chinese))
- [11] 朱建才, 温晓贵, 龚晓南. 真空排水预压加固软基中的孔隙水压力消散规律[J]. 水利学报, 2004(8): 123 - 128. (ZHU Jian-cai, WEN Xiao-gui, GONG Xiao-nan. Dissipation of pore water pressure in soft foundation reinforced by vacuum drainage preloading[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(8): 123 - 128. (in Chinese))
- [12] 龚晓南, 岑仰润. 真空预压加固软土地基机理探讨[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002, **35**(2): 7 - 10. (GONG Xiao-nan, CEN Yang-run. Mechanism of vacuum preloading[J]. Journal of Haibin University of C.E. & Architecture, 2002, **35**(2): 7 - 10. (in Chinese))
- [13] 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. (CHEN Ping-shan, DONG Zhi-liang, ZHANG Gong-xin. Mechanism and numerical simulation of the “soil piles” in the fresh hydraulic mud fill treated by surface-layer improvement technique[J]. Port & Waterway Engineering, 2012(1): 158 - 163. (in Chinese))
- [14] 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 - 2135. (WU Ya-jun, YANG Jian-bo, ZHANG Meng-xi. 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 - 2135. (in Chinese))
- [15] 颜永国. 真空荷载下不同颗粒级配软土真空度传递规律试验研究[J]. 水运工程, 2010(10): 109 - 112. (YAN Yong-guo. Experimental study on vacuum degree transfer law of soft clay of different grain size grading under vacuum preloading[J]. Port & Waterway Engineering, 2010(10): 109 - 112. (in Chinese))