

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.02.006

真空负压源深度对吹填土地基固结沉降的影响

陈雷¹, 张福海^{2,3}, 李治朋¹, 李玉龙⁴, 黄思杰¹

(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: 为研究真空负压源深度对吹填土预压处理效果的影响, 开展真空负压源分别位于深部的下位抽真空和位于表层的上位抽真空预压加固室内试验。根据固结过程中土体分层沉降量、排水量、不同深度处真空度监测结果, 对不同真空负压源深度的固结土层真空度传递效率、固结沉降特点等进行分析。结果表明: 当负压源位于加固土体深部时, 可有效提高真空度传递效率, 缩短下层土体排水路径并改变中层土体渗流方向, 同时上层固结土体可保持较高真空负压; 深部土体可得到有效加固且土层固结沉降将更为均匀, 真空预压加固方法的有效加固深度得到较大幅度的增加并可一定程度上控制加固土体的工后沉降。

关键词: 真空预压法; 真空负压源深度; 吹填土; 固结沉降; 模型试验; 真空度传递效率

中图分类号: TU411.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2016)02-0129-06

Effects of vacuum source location on consolidation settlement of dredger fill foundation

CHEN Lei¹, ZHANG Fuhai^{2,3}, LI Zhipeng¹, LI Yulong⁴, HUANG Sijie¹

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

Abstract: The location of vacuum sources with negative pressures was considered in analysis of the effects of dredger fill foundation reinforcement under vacuum preloading. Model tests were performed to simulate dredger fill foundation reinforcement using the vacuum preloading method, with vacuum sources located at the top and bottom. Over the course of foundation consolidation, the amounts of water drainage and settlement for different soil layers and the vacuum degree at different depths were monitored, and the transmission efficiency of the vacuum degree and consolidation settlement properties for soil layers with vacuum sources located at different depths were studied. Results show that the vacuum preloading method, with vacuum sources located at the bottom of the dredger fill foundation, can enhance the transmission efficiency of the vacuum degree, shorten the drainage path in deep soil layers, change the seepage direction in middle soil layers, and maintain a high vacuum degree in upper soil layers. Meanwhile, deep soil layers can be reinforced effectively, and the consolidation settlement tends to be more uniform. Moreover, this method can increase the effective reinforcement depth to a great extent and reduce the post-construction settlement to a certain degree.

Key words: vacuum preloading; depth of vacuum resource with negative pressure; dredger fill; consolidation settlement; model test; transmission efficiency of vacuum degree

我国围海造陆工程实践中多将海、河、湖底的淤泥作为吹填料, 吹填完成后淤泥地表基本处于泥浆状态,

收稿日期: 2015-04-17

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(B15020060)

作者简介: 陈雷(1988—), 男, 河南南阳人, 助理工程师, 硕士, 主要从事软土地基处理和岩土工程测试研究。E-mail: tkschenlei@126.com

承载力极低,属于高含水率超软地基,施工作业困难。吹填土具有有机质含量高、黏粒含量高、含水率大、压缩性高、强度低等特殊性质^[1]。目前吹填土地基多采用真空预压法加固,实践表明该法处理后部分地基仍不能满足最终使用要求,还需二次处理或深层加固,因此对传统的真空预压法进行改进以提高其加固效果很有必要^[2]。

目前,国内外学者对改进真空预压法在工程实践上的应用进行了许多探索和研究。为实现更为经济的真空预压工艺,根据真空预压加固软基的基本原理,朱平等^[3]提出可控通气真空预压法,李丽慧等^[4]提出了全封闭立体式真空降水法,孙立强等^[5]采用二次插板使吹填土产生了较好的加固效果,金小荣等^[6]对真空预压部分工艺进行了改进。这些改进均基于真空负压源位于表层,未有对真空负压源深度的研究。冯伟骞^[7]对低位真空预压加固法进行研究,张诚厚等^[8]、张力霆等^[9]研究将负压源由地表移入吹填土深层的加固方法,Sandiford等^[10]对底部负压源抽真空预压处理大面积淤泥工程的可行性进行研究,胡珩等^[11]、武孟琼等^[12]研究了真空作用面位置对真空预压效果的影响,研究表明底部负压源抽真空优于上部抽真空的加固效果。

虽然真空负压源设置于底部能够取得良好加固效果且已通过室内试验证实,但其加固机理尚不够完善。在软基处理实践中需要分析真空荷载作用下吹填土地基固结沉降过程,以控制施工质量和预压效果。为研究真空负压源深度对吹填土地基固结沉降的影响,笔者将通过室内模型试验模拟真空负压源位于深部的下位抽真空和作用面位于表层的上位抽真空预压法,对固结过程中土体的分层沉降值、排水量、不同深度处的真空度进行监测,分析不同真空负压源位置下的软基固结沉降特点、真空传递效率等,并在此基础上分析真空负压源深部设置时真空预压的加固机理。

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,液、塑限分别为 56.4%、33.5%,孔隙比为 3.08。为消除其他因素对 2 组模型试验(上位抽真空(VAT)、下位抽真空(VAB))结果的影响,应保证模型土样的起始状态相近。土样取回后经风干、碾压、过筛,按含水率 $\omega=90\%$ 加入适量水,然后用搅拌机器搅拌均匀,并静置一昼夜。

制样时首先将排水板置于模型筒中心位置,并将真空量测系统安装完后分 3 层填筑至规定高度,埋设沉降标,各层高度均为 65 cm,试样填筑完毕后静置一昼夜,并充分排气。排水板长度为 195 cm,宽度为 5 cm。此外,上位抽真空时在试样顶部铺设 5 cm 厚的砂垫层,下位抽真空时在淤泥土底部铺设 5 cm 厚的砂垫层,并保证与塑料排水板有良好的接触,最后在试样顶部利用土工布和土工膜进行密封。采用 1 个真空泵同时对 2 个模型筒抽真空。

1.2 试验装置及过程

模型试验装置如图 1 所示,真空作用面位置分别位于试样的顶部和底部,对 2 个模型筒内性质相同的淤泥进行室内模型试验。

模型试验装置主要包括模型筒、压力控制系统、气水分离系统和量测系统。模型筒高度为 2 m,直径为 0.2 m,共分 2 节,中间用套箍相连。真空压力主要由真空泵与电接点真空表相连来控制,试验过程中设置抽真空强度为 90 kPa,当集气瓶中压强高于 90 kPa 时真空泵自动关闭,当低于 70 kPa 时真空泵自动开启,以此来保证整个抽真空系统内的压强维持在一个高压范围。量测系统主要由真空表、沉降标、气水分离器组成,用真空表对砂垫层、排水板的 1 m 处和 2 m 处真空度进行测量,用游标卡尺量测试样表层、1.3 m 处、0.65 m 处的沉降值,用电子秤测量各个模型的排水量。

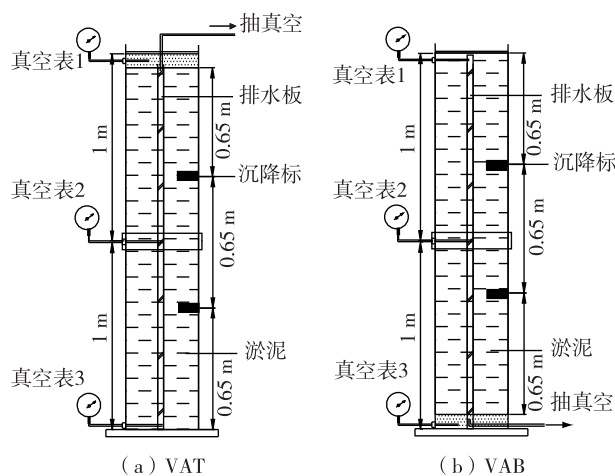


图1 模型装置示意图

Fig. 1 Test model and measure device

2 试验结果及分析

2.1 真空度传递规律

试验过程中,砂垫层和排水板不同深度处的真空负压随时间的变化曲线如图2所示。从图2可以看出,开始抽真空后砂垫层和排水板中的真空负压迅速增加,经过1 h后砂垫层中真空负压均可达到90 kPa,且排水板中各深度处的真空负压也保持稳定。

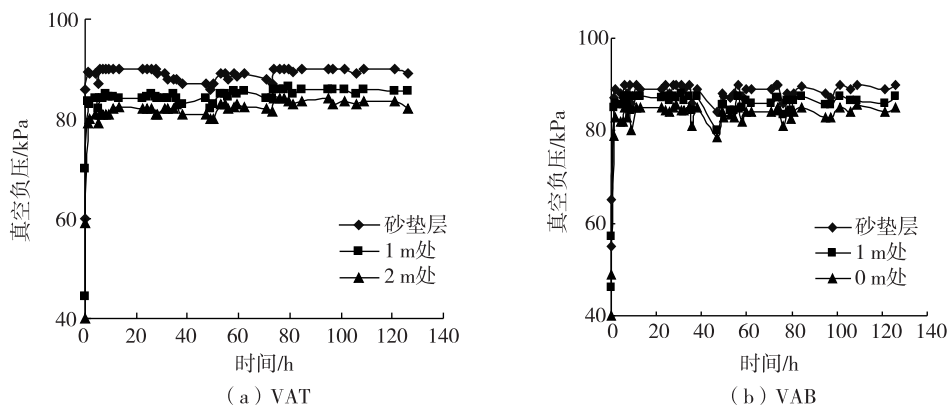


图2 排水体和砂垫层中的真空负压

Fig. 2 Vacuum negative pressure in drainage body and sand mat

当真空负压源位于土体上位时,真空负压传递方向是由负压源传递到砂垫层然后沿排水体向土体深部传递。从图2(a)可以看出真空负压在从砂垫层向排水板传递过程中存在一定损失,在工程实践中也得到过证实。抽真空初期真空负压沿着排水板从上向下传递过程中衰减效率较后期略大,主要是由于在抽真空初期土体中含水量较高,土体中水分在压差作用下渗入到竖向排水体的水分较多,占据排水体中排水通道导水面积较大。在抽真空初期土体孔隙较大,在孔隙水渗入排水体的过程中,真空负压与孔隙水发生双向对流,向土体中传递阻力较小,真空负压在径向传递损失很大,所以初期沿排水板传递效率低,沿程损失较大。在抽真空后期,土体发生竖向固结压缩,使得孔隙减小,同时土体中小颗粒在真空渗流场的作用下沿着大颗粒间的孔隙向排水板发生径向移动,导致排水板周围孔隙缩小,孔隙水与真空负压的对流阻力增大,真空负压的径向传递损失较小。真空负压传递效率在排水板周围“土桩”形成稳定后达到稳定,保持一个稳定的衰减值。

真空负压源位于加固土体下位时,由于真空负压源头位于土体深部,真空负压沿排水板自下而上传递。高含水率超软淤泥在静置24 h后孔隙水在重力作用下首先渗流到底部的砂垫层中,在抽真空初期,高含量的水分积存并覆盖于底部真空表探头部,因此最初时刻测量不到真空负压。当砂垫层和排水体中的水分排走,各真空表探头暴露后,才开始出现读数。真空负压源处的真空负压沿着排水体向上传递,由图2(b)可以看出,初期真空负压由砂垫层向排水体中传递损失很小,或者基本不损失,主要是由于负压源在底部,淤泥在静置一昼夜后周围土体均处于饱和状态,封闭性很好,气体不会逃逸和泄漏。在真空负压自下而上传递过程中,前期损失较大,当土体中的封闭气体被完全抽出后传递效率达到稳定。

比较图2(a)和(b),真空负压从真空负压源到排水体远端传递过程中,均存在一个传递损失。当真空负压源处于上位时,真空负压的损失包括两部分:从砂垫层到排水板传递过程的损失和沿排水板传递过程的沿程损失^[13]。真空负压在砂垫层的损失主要受到密封性和土体性质等因素的影响^[14],真空负压沿排水板的衰减与排水板型号、土体颗粒组成、侧压力等因素有关^[15-16]。由此可见下位抽真空时真空负压沿程损失要小于上位抽真空。

由图3可得VAT真空负压的传递损失为2.5~3.5 kPa/m,VAB为2~2.5 kPa/m,VAB的沿程损失略小于VAT,主要是因为VAT的损失还包含一部分砂垫层的传递损失。由此可见真空负压源的改变,在影响真空负压传递方向的同时,也影响到真空负压的传递效率。砂垫层与排水体远端负压差前期较大,抽真空30 h后趋于稳定,此时真空负压向土体径向对流传递基本稳定。由图4可以看出在30 h后,排水速率明显降低并

保持稳定,说明此时排水板周边渗流速度趋于平缓,“土桩”已经形成并对土体中孔隙水的径向渗流产生很大影响,同时也“阻止”真空负压的径向传递,真空负压的沿程损失也达到一种稳定状态。

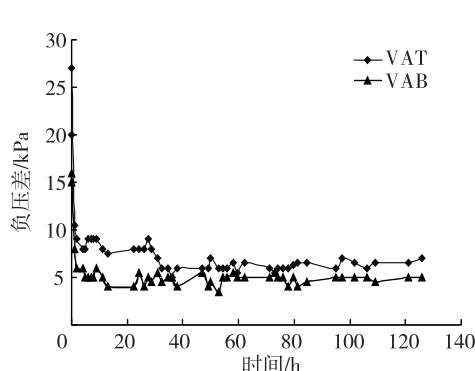


图3 砂垫层内与排水体远端的负压差

Fig. 3 Difference between negative pressures in sand mat and at far end of drainage body

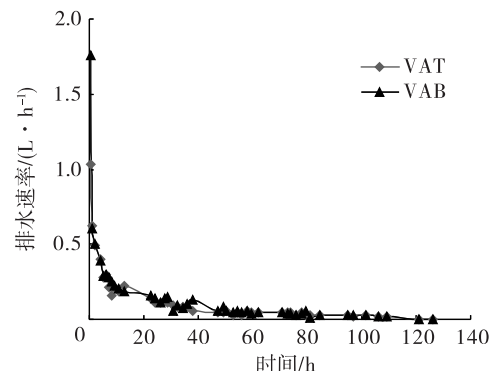


图4 排水速率随时间的变化曲线

Fig. 4 Curves of water drainage rate varying with time

2.2 分层沉降

试样首先静置 24 h,待自重沉降稳定后,在 90 kPa 真空强度下连续抽真空 126 h,沉降基本稳定,结束抽真空。在试验过程中分别记录表层沉降(上层)、中间沉降标(中层)和下部沉降标(下层)的下沉位移,各位置处的沉降历时曲线如图 5 所示。

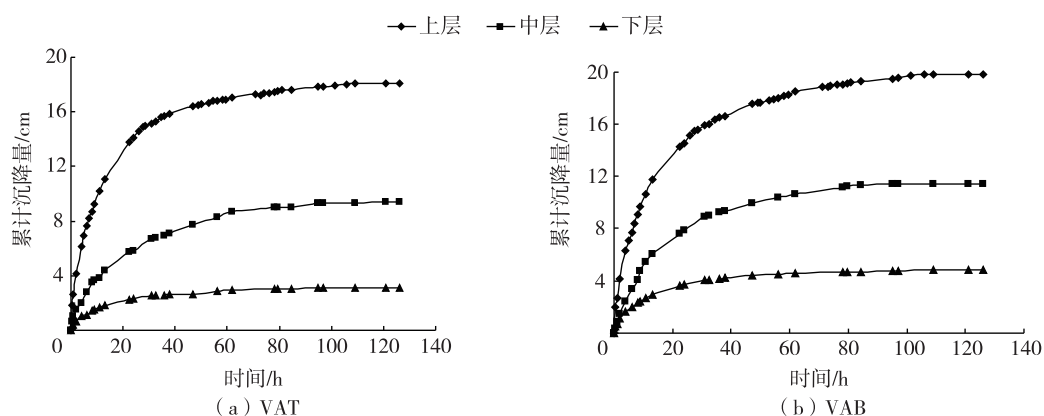


图5 土体不同位置处的沉降历时曲线

Fig. 5 Settlement-time curves at different locations

从图 5 可以看出,真空负压源位于下位时的沉降量较上位时有所提高。在加载初期,沉降下沉较快,因为在固结初期土体孔隙比较大,土体渗透系数和固结系数均较大。随着固结的逐步发展,土体不断被压缩,孔隙比减小,孔隙水不断排出。30 h 后 VAT、VAB 的沉降速率逐步放缓,孔隙水的排出速度减慢,图 4 中可看出排水速率的这一变化,但 VAT 土体的沉降速度放缓尤为明显。

VAT、VAB 土体的上层沉降较大,随着深度的增加,土层的沉降量减小,真空负压源位于上位和下位时土体在竖向均发生不均匀沉降。前 30 h,各层沉降均发展较快,下层土体沉降位移在前 30 h 内基本形成,随着加载的进行,沉降量的增长与上层和中层土体相比非常缓慢。60 h 后,中层土体沉降固结稳定,上层土体依然在真空荷载下继续发生缓慢固结沉降。上层土体在 100 h 后固结完成,沉降稳定。由此可见土体的竖向固结具有一定时间性,深层土体优先于表层土体达到沉降稳定。

各层土体的累计沉降量见表 1,VAB 总沉降量大于 VAT,沉降量增长 9.3%。与 VAT 相比,VAB 下层沉降量增加显著,增长 53.2%,主要是因为真空负压源作用位于下位,距离排水面较近,促进孔隙水的排出,利于土体固结。中层沉降量,VAB 比 VAT 增长 4.8%,主要是因为真空负压源的位置改变了土体中孔隙水流的方向,重力与渗流力方向一致,促进孔隙水排出。而 VAB 上层土体的沉降量略小于 VAT,增长幅度为 -3.3%,主要是因为真空度沿排水板自下向上传递过程中的损失,使表层负压略小于 VAT 的表层砂垫层中

的真空负压。综合各层沉降量对比分析,VAB 累计沉降量的增值主要为下层土体的压缩增量,其各层沉降量与 VAT 相比较为均匀。

从各层沉降量占总沉降量的百分比分析(表 1),上层土体依然是主要的加固土层,其压缩量占整个地表沉降的大部分。但当真空负压源位于下位时缩短了下层土体排水路径,改变了中层土体的渗流方向,上层土体也保持了较高的真空负压,使软基浅部、深部均保持高真空度,同时深部土体得到加固,土层沉降均匀,增大了真空预压法的有效加固深度,从而减小了土体的工后沉降,避免了二次处理或深层加固,降低了加固费用。

2.3 固结度

根据各层沉降量差值,可得到各层沉降量的历时曲线,然后通过室内试验测得的土体压缩系数可计算得到最终沉降量,从而计算出各层土体的固结度发展曲线,如图 6 所示。由图 6 可以看出,VAT 上层土体相较于下层土体固结速率明显加快,土体达到固结稳定时,各层土体固结度差异显著,说明土体竖向固结沉降不均匀,导致真空预压加固软基过程中表层形成“硬壳层”。这主要是因为砂垫层与上层土间水力梯度较大,且上层土体具有表层砂垫层和排水体 2 个排水边界条件,上层孔隙水的渗透路径比较短,在真空负压的作用下发生三维固结,真空抽吸效果明显,土体中的含水率大幅度减小,固结强度增长比较快;而深部土体只在排水体这一边界条件下发生二维轴对称固结,固结速度较慢,强度增长慢。另外,真空负压竖向传递的衰减也是土体“硬壳层”这种不均匀沉降产生的原因。

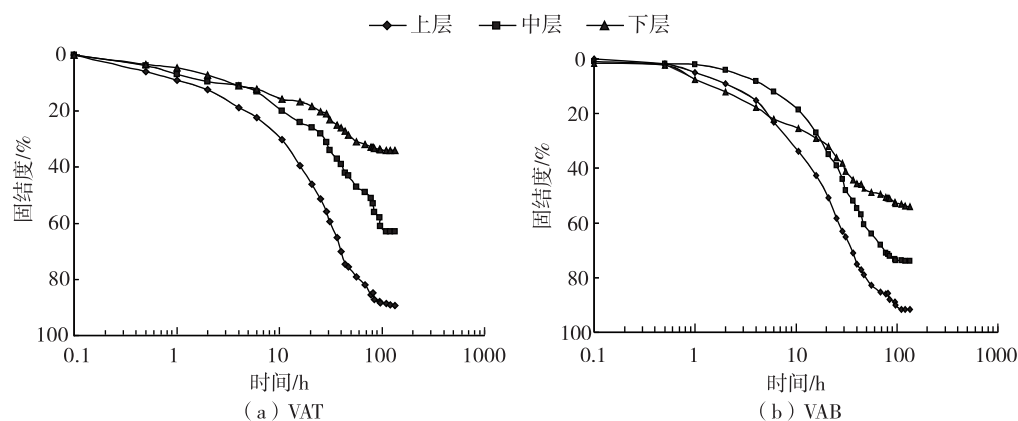


图 6 各层土体固结度变化曲线

Fig. 6 Consolidation degree curves for different soil layers

VAT 处理填土地基过程中由于土层径向固结度的不同步变化,使得上层固结度明显高于下层固结度,导致表层固结强度高,从而导致这种不均匀沉降的“硬壳层”现象。VAB 加固吹填土地基由于真空负压源移至土层深部,提高了深部土层的固结度,使土层固结沉降较为均匀。由图 6(b)可以看出在抽真空初期,下层土体的固结速率比上层和中层土体都快,主要是由于真空排水面下置,下层土样在静置 24 h 后在高抽真空强度和短的排水路径等便利条件下促进该区孔隙水排出,固结发展较快。在真空加载后期,各土层固结速率均减缓,比 VAT 固结均匀。由此可见,真空负压源位置移于深层后,可减缓真空负压源上位时产生的不均匀固结沉降,提高深层土体的固结度和强度,减少不同深度土层土体强度的差异性。

3 结 论

a. 真空负压源位于土层深部时,真空度沿排水体发生自下向上传递,沿程损失相对较小,传递效率提高。

b. 上位抽真空和下位抽真空的主要压缩土层为上层主体,上层压缩量占整个地表沉降的绝大部分,其中 VAB 总累计沉降量的增加值主要为下层土体的压缩增量。

c. 真空负压源位于上位时,上层土体与中层土体固结速率明显加快,土体达到固结稳定时,各层土体固结度差异显著,土体竖向固结沉降很不均匀。

d. 真空负压源位于下位时,可有效缩短下层土体排水路径,改变中层土体孔隙水渗流方向,上层土体也保持较高真空负压,土层深部土体将得到有效加固,上下层土体沉降更为均匀,增大真空预压法有效加固深度,进而减小土体工后沉降,避免二次处理或深层加固,将更具有针对性和实用性。

参考文献:

- [1] 姜炎. 真空排水预压法加固软土技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [2] 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 Zhiliang, ZHANG Gongxin, ZHOU Qi, et al. Research and application of improvement technology of shallow ultra-soft soil formed by hydraulic reclamation in Tianjin Binhai New Area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(5): 1073-1080. (in Chinese))
- [3] 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 Liqiang, YAN Shuwang, et al. Model test of vacuum preloading with controlled ventilation and its mechanism analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Sup1): 3141-3148. (in Chinese))
- [4] 李丽慧, 王清, 王年香, 等. 立体式真空降水法分层加固吹填土的可行性研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(4): 522-524. (LI Lihui, WANG Qing, WANG Nianxiang, et al. Research on the feasibility of consolidating hydraulic fill in layers by the method of spatial vacuum drainage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(4): 522-524. (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 Liqiang, YAN Shuwang, 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] 金小荣, 俞建霖, 龚晓南, 等. 真空预压部分工艺的改进[J]. 岩土力学, 2007, 28(12): 2711-2714. (JIN Xiaorong, YU Jianlin, GONG Xiaonan, et al. Improvement of partial technology for vacuum preloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(12): 2711-2714. (in Chinese))
- [7] 冯伟骞. 低位真空预压加固技术应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [8] 张诚厚, 王伯衍, 曹永琅. 真空作用面位置及排水板间距对加固效果的影响[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(1): 45-52. (ZHANG Chenghou, WANG Boyan, CAO Yonglang. The influence of vacuum location and the spacing of drain well on the effect of preloading improvement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(1): 45-52. (in Chinese))
- [9] 张力霆, 卢勇正, 李树国. 改善真空预压加固效果的试验研究[J]. 河北工程技术高等专科学校学报, 1999(1): 12-18. (ZHANG Liting, LU Yongzheng, LI Shuguo. Experimental study on improving the effect of vacuum preloading[J]. Journal of Hebei Engineering and Technical College, 1999(1): 12-18. (in Chinese))
- [10] SONG Y S, KIM T H. Improvement of estuarine marine clays for coastal reclamation using vacuum-applied consolidation method[J]. Ocean Engineering, 2004, 31: 1999-2010.
- [11] 胡珩, 王保田. 真空作用面位置对加固效果影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1287-1290. (HU Heng, WANG Baotian. Experimental study of effect of vacuum location on improvement of subsoil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1287-1290. (in Chinese))
- [12] 武孟琼, 王保田. 底部抽真空法在围垦工程中优越性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊1): 2916-2926. (WU Mengqiong, WANG Baotian. Advantages study of vacuum preloading at bottom of soil layer for reclamation projects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup1): 2916-2926. (in Chinese))
- [13] TRAN T A, MITACHI T. Equivalent plane strain modeling of vertical drains in soft ground under embankment combined with vacuum preloading[J]. Computers and Geotechnics, 2008, 35(5): 655-672.
- [14] INDRARATNA B, RUJIKIATKAMJORN C, SATHANANTHAN I. Analytical and numerical solutions for a single vertical drain including the effects of vacuum preloading[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(4): 994-1014.
- [15] 余湘娟, 吴跃东, 赵维炳. 真空预压法对加固区边界影响的研究[J]. 水利学报, 2002, 33(9): 123-128. (YU Xiangjuan, WU Yuedong, ZHAO Weibing. Effect of vacuum preloading method on boundary of consolidated soft foundation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(9): 123-128. (in Chinese))
- [16] 颜永国, 董志良, 杨昌斌, 等. 颗粒级配对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): 1775-1779. (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): 1775-1779. (in Chinese))