

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.02.004

负压条件下土体渗流固结特性研究综述

李平^{1,2}, 金奕潼¹, 赖建英¹, 刘伟¹

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对真空负压加固过程中引起的工程破坏、地下水位变化规律、土体渗流特性、渗流固结机理等问题进行了分析,发现这种方法虽已得到广泛的应用,但其理论研究远落后于工程实践,并存在很多争议。指出今后需要研究的关键工作,如负压状态下地下水位测试新技术、土体渗流固结作用机理、真空度有效传递范围、“0”压面变化规律等。

关键词: 综述;真空预压;负压;渗流固结;地下水位;机理分析

中图分类号: TU411.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2016)02-0115-07

Review of research on characteristics of seepage-induced consolidation of soil under negative-pressure reinforcement conditions

LI Ping^{1,2}, JIN Yitong¹, LAI Jianying¹, LIU Wei¹

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering safety, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: This paper presents a review of literature related to project failures, variations of groundwater level, seepage characteristics of soil bodies, and mechanisms of seepage-induced consolidation during the reinforcement process under vacuum negative pressures. Although the seepage-induced vacuum consolidation method has been widely applied, theoretical study of the method lags far behind its practical application and still involves some disputes. Some key issues for future research regarding the method are presented, including new technology for measurement of groundwater levels under negative pressures, mechanisms of seepage-induced consolidation of soil, the effective transmission range of the vacuum degree, and the variation regularity of the zero-pressure surface.

Key words: review; vacuum preloading; negative pressure; seepage-induced consolidation; groundwater level; mechanism analysis

我国滨海及内陆河湖地区软土分布广泛,这种土的特点是含水率高、压缩性大、强度低、透水性差^[1]。由于软土的特殊工程性质,在软土地基上进行工程建设时,如不恰当处理必将会产生较大的沉降和差异沉降,且地基承载力和稳定性往往不能满足工程要求^[2]。大量工程实践证明真空预压法作为一种负压排水固结法,是处理软黏土地基的有效方法之一。自1952年提出至今,真空预压法在高速铁路、高速公路、房屋建设、机场、港口等地基处理工程中得到了广泛应用;在应用地域范围方面,从东南沿海地区不断向内地延伸;在技术处理方法方面,衍生出一系列的新方法如复式负压固结技术、气压劈裂真空预压法、真空预压联合电渗法、真空预压联合降水法等^[3-8]。真空预压法从工程应用角度而言已相对较为成熟,但其理论研究却远落后于工程实践,许多理论问题仍存在着较大争议。笔者通过对真空负压加固过程中工程破坏特点、地下水位变化规律、土体渗流特性及渗流固结加固机理等进行分析,指出了负压条件下土体渗流固结特性研究中存在

收稿日期: 2015-06-02

基金项目: 国家自然科学基金(51408187);江苏省自然科学基金(BK20140850)

作者简介: 李平(1982—),男,江苏徐州人,讲师,博士,主要从事地基处理及岩土工程测试研究。E-mail: lipings0110@163.com

的不足,并对今后有待于开展的工作做了进一步探讨。

1 真空预压技术发展动态

真空预压法自瑞典皇家地质学院 Kjellman 教授提出以后^[9],于 1958 年最早在美国费城国际机场跑道扩建工程中得到应用^[10],随后日本、荷兰、法国、前苏联等国家都在不断地探索。我国于 20 世纪 50 年代末开始展开对真空预压法加固软土地基的研究,但当时受抽真空设备、气水分离技术、密封材料、垂直排水通道等关键技术的制约,真空预压法加固软基的相关试验和应用并未达到预期效果,在一段时期内限制了该技术的应用,发展相当缓慢。20 世纪 70 年代以后,随着上述关键技术难题的突破,真空预压法开始被广泛应用于软基加固工程^[1]。对于真空预压的特点,很多学者进行了总结,Yan 等^[11]通过试验得出真空预压法相对于堆载预压加固法能够节约 30% 经济价值;Indraratna 等^[12]指出,真空预压法加固地基产生的 CO_2 排量是等效桩基加固所产生 CO_2 排量的 1/30;Griffin 等^[13]研究表明真空预压法几乎是所有地基处理加固中噪声最小的。目前,真空预压加固软土地基技术已成为我国自主创新的成套技术^[14]。

伴随着真空预压技术的发展和广泛应用,众多学者在该领域开展了深入的试验研究和理论探索,普遍认为真空预压法的基本原理是:在总应力不变的情况下,利用抽真空直接降低砂垫层和竖向排水体边界上的孔隙水压力,使其与周围土体产生孔压差,从而促使土体中的孔隙水和空气向竖向排水体渗流汇集并被抽出。随着孔隙水的排出,土体中的孔隙水压力逐渐降低并形成负值,降低的孔隙水压力转化为有效应力,使土体产生固结^[1,15]。

2 真空预压的工程破坏特点

真空预压法属于物理加固法,造价低、效果好、工期短、对环境无污染,虽然已经得到了广泛的工程应用,但其设计计算方面仍多借用堆载预压理论,与现场实际结果误差较大^[2]。真空负压加固过程中,对土颗粒而言,施加的是一种向加固区中心吸附的球应力,常会引起周边房屋和道路拉裂,如图 1 所示。因此要严格控制加固区有效影响范围,一般是 30 m 左右。



图 1 真空预压引起周边道路破坏

Fig. 1 Damage to peripheral roads caused by vacuum preloading

在施工过程中还要时时检查密封效果以保持真空负压的持续作用,否则会引起后续使用加载过程中的土体变形严重,甚至垮塌事故。随着研究的深入,同堆载预压一样,真空预压也有 2 个基本问题需要解决:一是渗流水位变化问题,二是变形稳定问题。这 2 个问题的研究都离不开负压条件下的土体渗流固结特性分析。

3 负压条件下土体渗流固结特性研究现状

真空负压加固中土体渗流固结特性直接决定着地基处理效果,目前对这一课题的研究已经进行了一些有益的探索。

3.1 负压条件下地下水位渗流变化规律研究

真空预压法地基加固过程中地下水位的变化是负压条件下渗流场变化规律的最直接反映,也是分析负压条件土体渗流加固机理的直接内容和重要依据,由于当前常规测试方法存在测试过程中与大气相通的不足,有关真空预压过程中地下水位的变化问题一直以来都存在较大的争议。

目前,有关真空预压过程中地下水位变化的研究中,地下水位上升、下降和不变这3种观点均有。胡珩^[16]在室内试验基础上,指出真空预压过程中地下水位基本不变。明经平等^[17]从真空预压加固机理出发,通过流体分析给出了地下水位不变或上升的结论,至于如何变化与加固区的土体渗透特性及渗流边界条件有关。这2种观点是在完全密封的理想条件下给出的负压加固地下水位变化特性,而现场实际工程中不可能完全密封,如大量工程实践表现出的真空预压期间射流泵出水量很大,且抽水体积远大于地基沉降变形量^[18],就与该观点相矛盾,因为无法解释出水来源,所以至今没有发现工程实际中地下水位不变或上升的实例。另一方面,大多数学者认为真空负压条件下地下水位是下降的,且会形成降水漏斗^[19-22]。由此可见,对真空负压条件下地下水位变化特性的认识目前尚存在分歧,即便是在认为地下水位是下降的前提下,对地下水位具体的下降深度也有不同看法。根据周琦^[2]的统计,若干真空预压现场实测地下水位下降1.33~5.5 m不等,并认为下降极限深度为6 m,若考虑渗流过程中阻力引起的水头损失,常规水位管实测地下水位下降最大深度一般为3~4.5 m^[23]。而有的学者则认为地下水位下降不会超过1.8 m^[24],更有甚者把负压条件下的地下水位下降深度与真空井点降水过程中的提水高度相混淆,错误地认为真空预压与真空井点降水在降水机理方面是相同的,极限理论高度不大于10.33 m。实际上真空预压过程中地下水位上作用的是负压,而真空井点降水后地下水位以上仍为大气压力,所以2种情况下地下水位的运动规律是不同的,地下水位降低机理也应有所区别。正是这种定性和定量上的较大差异,使得有关真空预压过程中地下水位变化规律的观点难以取得令人信服的一致结论。

笔者认为产生上述不同观点的原因主要有两方面:一是没有一个恰当的负压条件下测试地下水位的技术。目前,工程上常用的地下水位测试法在测试过程中需要打开密封管口,这样势必会导致水位管内部与大气连通,管内气体压强会从一个低压状态(负压)迅速增至一个正常大气压,进而引起水位管周围土体中孔隙水压力的显著变化。因此,用该法测出的水位只能代表正常大气压下的相应值,并不是负压状态下地下水位真实值^[25]。此外,也有学者提出在土体中沿深度每隔一定距离埋设一个电极进行电测^[26]或用孔压计和真空表读数计算得到地下水位变化值等^[21],但难以保证测试精度,且工艺复杂、缺乏直观性;周琦^[2]则通过采用PVC内外管和磁环浮标相结合的方法对地下水位测试进行了改进,但难以保证水位管内外真空度的一致性。因此,亟待研发一种操作工艺简单、直观明了的负压条件下地下水位的测试新技术。另一方面原因是负压状态下“0”压面的概念不够清晰。常规状态下的“0”压面是相对于正常大气压力状态而言的,在真空负压作用下,地下水表面的孔隙水压力为负压,同时地下水位以下土体中的孔隙水压力也因地下水位下降和真空度扩散两方面作用而相应降低,此时孔隙水压力的变化就不能代表地下水位的变化^[27]。

3.2 负压条件下土体渗流特性计算理论研究

现有负压条件下土体渗流计算的相关理论大多是从砂井排水固结和地下饱和水流体力学角度出发解析得到的^[28]。Wu等^[29]根据砂井排水固结理论推导了超孔隙水压力公式,进而分析了固结度的解析解,并采用数值模拟对公式进行了验证,但其假设土体及排水体中超孔隙水压力均沿深度按线性关系衰减变化有待商榷。Indraratna等^[30]和Chu等^[31]通过对真空联合堆载预压地基处理现场实测数据分析,给出了通过孔隙水压力估算土体的平均固结度方法,并通过与施工期沉降估算土体的最终固结度进行比较,发现用监测沉降量估算的工后沉降值偏大。董志良^[32]、刘家豪等^[33]根据已有负压砂井地基固结解析理论,建立了真空预压加固范围内地下水位及理想测管水位高度的理论计算公式,但解析解形式较为复杂,且该方法也未考虑真空度沿竖向排水体的衰减变化。Geng等^[34]结合某真空联合堆载预压地基处理工程实际,考虑真空荷载随时间及堆载历程的变化,分析了沉降量和超孔隙水压力的计算方法,并指出真空堆载联合预压中排水板深度减少加固土层厚度的10%左右对加固效果影响不大,当加固土体下方存在强透水层时,真空预压加固效果将显著降低。鲍树峰等^[35]以新近吹填淤泥地基为研究对象开展负压传递特性和分布模式的现场试验,得出了随时间的变化,在水平排水垫层中负压为线性衰减,而竖向排水体中的负压为非线性衰减模式。Voottipruex等^[36]利用PVD对曼谷谷黏土进行了改良,并通过数值模拟对在有真空荷载时的沉降量进行反演分析,得

到了加固效果影响参数的一些建议值。Wand 等^[37]指出,在有限元数值分析中将土体中竖向排水界面作为负压界面比高渗透性的排水介质更符合实际。韩文君等^[38]则考虑真空荷载实际边界条件,并引入对土体压缩曲线线性化的双对数坐标,建立了真空预压砂井地基非线性固结近似解答。罗戌^[39]将砂井看作完整抽水井,利用经典的 Theis 理论和 Dupuit 理论分别计算了真空预压初期非稳定渗流和真空预压稳定期稳定渗流的地下水位降深,但真空预压不是一般的降水井,前者由于加固区表面的密封作用,可将地下水位以上土体中的气压降到零点以下,2 种情况下地下水的运动规律不同。此外,Theis 公式是针对承压完整井提出的,且假设定流量抽水,而 Dupuit 公式的研究对象则是地下水的无压流动^[40],由此可见其提出的负压条件下的土体渗流特性计算不满足上述假设。

3.3 负压条件下土体渗流固结加固机理研究

真空预压的加固机理分析一般是从太沙基的有效应力原理上探讨,认为在整个加固过程中总应力不变,通过降低的孔隙水压力等于增加的有效应力来固结土体。虽取得了一些共识,但对负压条件下土体中的渗流规律以及渗流与固结关系的认识却存在诸多不同见解。如负压固结等效理论^[41-42]认为可以将膜下真空度作为等效荷载作用于地表,可以采用与堆载预压相同的思路和方法进行分析。室内外试验观测到的堆载预压下地下水位基本不变,而真空预压下地下水位则是下降的,且真空预压的出水量远远大于堆载预压现象,应用该理论来解释便难以自圆其说^[43]。龚晓南等^[44]从多孔介质渗流角度出发,提出真空渗流场理论来解释真空预压加固机理。该理论认为抽真空使“真空流体”(水气混合物)首先在土体较大孔道中发生真空渗流,形成连通的网络,而后在压差作用下将更为细小孔道中的孔隙水吸出而产生固结,该固结现象只发生在地下水位以上土体。另一方面,由于抽真空造成地下水位下降,增加上覆土层自重应力而导致地下水位以下土体排水固结。在此基础上,李青松等^[45-46]详细探讨了真空渗流场的形成机理,认为真空渗流场即为由无数“动态完整井”形成的降落漏斗,而真空预压则是真空渗流场作用下的渗流固结。上述加固机理认为真空负压的传递深度仅局限于地下水位以上,而娄炎^[1]却认为真空负压沿竖向排水体近似线性衰减,可传递到竖向排水体底部。此外,岑仰润等^[47]提出了一种利用真空预压现场孔压实测资料推算出负压渗流场分布模式的方法,高志义^[48]则结合离心模型试验提出了负孔隙水压力不平衡理论。

4 有待于进一步研究的问题

分析可见,对负压条件下土体渗流固结特性的研究已经取得了一定的进展,然而不难看出仍有许多问题尚没有形成完善、一致的理论,还需要进一步的探讨。

a. 负压条件下的地下水位测试目前仍多采用常规测试技术,如何借用遥感、成像或激光技术等研发一套克服常规测试水位管与大气相通的水位测试新装置,值得探索。

b. 真空度有效传递深度及水平向影响范围目前还存在争议,进一步开展不同土质条件下现场测试,分析真空度传递规律意义重大。

c. 负压条件下渗流场形成机理和影响因素如排水体及土体渗透性、真空度及密封效果、土层分布及富水性等响应,目前只有少量的定性说明,尚没有形成一套完整的理论来进行定量分析。

d. 负压条件下地下水位和“0”压面的定义,特别是“0”压面上下两部分土体渗流固结变化异同以及作用机理还不够清晰。

e. 考虑负压条件、负压沿排水体衰减规律及井阻作用,建立竖向排水体特性与超孔隙水压力和渗流固结加固时间三者关系的土体渗流固结理论计算模型,是今后工作开展的重点。

f. 在负压条件下土体渗流固结特性的数值计算中,多采用等效渗透系数或砂墙的形式来代替竖向排水体,如何建立考虑排水体实际空间尺寸效应,并与理论分析和现场测试相结合进行系统化分析,还有待于广大岩土工作者的共同努力。

5 结 语

真空预压法从工程应用角度而言已相对较为成熟,但其理论研究却远滞后于工程实践,许多理论问题仍存在较大分歧。笔者对真空负压加固过程中工程破坏特点、地下水位变化规律、土体渗流特性及渗流固结机理等做了分析探讨,指出了负压条件下土体渗流固结问题研究中存在的不足以及今后有待于进一步开展的

内容。对今后有待于进一步开展的工作如负压状态下地下水位测试新技术、土体渗流固结作用机理、真空度有效传递范围、“0”压面变化规律等做了展望,以期丰富并创新真空负压加固土体渗流固结理论。

参考文献:

- [1] 娄炎. 真空排水预压法加固软土技术[M]. 2版. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- [2] 周琦. 真空预压条件下土体固结特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.
- [3] 曾国海, 叶凝雯, 叶吉, 等. 大面积软土地基“复式负压固结”处理方法: 浙江, CN101748721A [P]. 2010-06-23.
- [4] 刘松玉, 韩文君, 章定文. 气压劈裂真空预压法室内模型试验装置及试验方法: 中国: 201210175213.9 [P]. 2012-05-31.
- [5] 刘汉龙, 李平, 徐春荣, 等. 吹填超软土地基处理改性真空预压施工工法[R]. 南京: 江苏兴厦建筑安装有限公司, 2012.
- [6] SHEN Yang, TAO Migan, LIU Hanlong, et al. The performance of super soft foundation under modified vacuum preloading method. forensic engineering[J], ASCE, 2013, 18(1): 708-715.
- [7] PENG Jie, XIONG Xiong, MAHFOUZ A H, et al. Vacuum preloading combined electroosmotic strengthening of ultra-soft soil [J]. Journal of Central South University, 2013, 20(11): 3282-3295.
- [8] LIU H, CUI Y, SHEN Y, et al. A new method of combination of electroosmosis, vacuum and surcharge preloading for soft ground improvement[J]. China Ocean Engineering, 2014, 28: 511-528.
- [9] KJELLMAN W. Consolidation of clay by means of atmosphere pressure [C]//MIT. Proceedings of a Conference on Soil Stabilization. Boston: MIT, 1952: 258-263.
- [10] 龚晓南. 地基处理技术及发展展望: 纪念中国土木工程学会岩土工程分会地基处理学术委员会成立三十周年(1984—2014)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [11] YAN Shuwang, CHU Jian. Soil improvement for a road using the vacuum preloading method[J]. Proceedings of the ICE-Ground Improvement, 2003, 7(4): 165-172.
- [12] INDRARATNA B, RUJIKIATKAMJORN C, KELLY R, et al. Sustainable soil improvement via vacuum preloading [J]. Proceedings of the ICE-Ground Improvement, 2010, 163(1): 31-42.
- [13] GRIFFIN H, O'KELLY B C. Sustainability of combined vacuum and surcharge preloading[C]//MURAD A F, XIONG Yu, LAUREANO R H. Proceedings of the 2014 Geo-Congress: Geo-Characterization and Modeling for Sustainability. Atlanta: American Society of Civil Engineers, 2014: 3826-3835.
- [14] 中交天津港湾工程研究院有限公司. JTS 147-2—2009 真空预压加固软土地基技术规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [15] 席宁中, 于海成. 对大面积软弱地基处理技术的辩证思考[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(2): 584-587. (XI Ningzhong, YU Haicheng. Dialectical thinking on the treatment technology of large area soft foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(2): 584-587. (in Chinese))
- [16] 胡珩. 真空预压法加固机理和加固效果试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [17] 明经平, 赵维炳. 真空预压地下水位变化的研究[J]. 水运工程, 2005(1): 1-6. (MING Jingping, ZHAO Weibing. Study on the change of water level in vacuum preloading[J]. Port & Waterway Engineering, 2005(1): 1-6. (in Chinese))
- [18] 邱青长, 莫海鸿, 董志良, 等. 真空预压地基非饱和带探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊2): 3539-3544. (QIU Qingchang, MO Haihong, DONG Zhiliang, et al. Discussion on non saturated zone of vacuum preloading Foundation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Sup2): 3539-3544. (in Chinese))
- [19] 朱建才. 真空联合堆载预压加固软基机理及工艺研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [20] 温晓贵, 朱建才, 龚晓南. 真空堆载联合预压加固软基机理的试验研究[J]. 工业建筑, 2004, 34(5): 40-43. (WEN Xiaogui, ZHU Jiancai, GONG Xiaonan. Experimental study on the mechanism of vacuum preloading and surcharge preloading [J]. Industrial Construction, 2004, 34(5): 40-43. (in Chinese))
- [21] 张功新, 董志良, 莫海鸿, 等. 真空预压中地下水位测试技术探讨与改进[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1899-1903. (ZHANG Gongxin, DONG Zhiliang, MO Haihong, et al. Discussion and improvement of underground water level measurement technology in vacuum preloading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1899-1903. (in Chinese))
- [22] 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, 9(9): 123-128. (YU Xiangjuan, WU Yuedong, ZHAO Weibing, et al. Study on the influence of vacuum preloading method on the boundary of reinforcement zone [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 9(9): 123-128. (in Chinese))
- [23] 朱建才, 李文兵, 龚晓南. 真空联合堆载预压加固软基中的地下水位监测成果分析[J]. 工程勘察, 2004(5): 27-30. (ZHU Jiancai, LI Wenbing, GONG Xiaonan. Analysis of underground water level monitoring results of vacuum combined with

- Surcharge Preloading [J]. Journal of Geotechnical Investigation & Surveying, 2004(5): 27-30. (in Chinese))
- [24] 彭勃. 真空-堆载联合预压法加固机理与计算理论研究[D]. 南京: 河海大学, 2003.
- [25] 朱燕, 余湘娟. 真空预压地下水位测试方法分析[J]. 水运工程, 2010(9): 113-116. (ZHU Yan, YU Xiangjuan. Test method analysis of vacuum preloading method [J]. Port & Waterway Engineering, 2010(9): 113-116. (in Chinese))
- [26] 方俊, 华姜旭. 真空预压过程中地下水位变化状况、原因及建议[J]. 地基处理, 2006, 17(2): 22-26. (FANG Jun, HUA Jiangxu. Changes of groundwater level in vacuum preloading process, reasons and suggestions [J]. Ground Improvement, 2006, 17(2): 22-26. (in Chinese))
- [27] 周琦, 刘汉龙, 顾长存. 真空预压条件下地下水位下降的影响分析[J]. 深圳大学学报, 2012, 11(6): 553-558. (ZHOU Qi, LIU Hanlong, GU Changcun. Analysis of the influence of the underground water table falling under the condition of vacuum preloading [J]. Journal of Shenzhen University, 2012, 11(6): 553-558. (in Chinese))
- [28] 李平, 骆亚生, 胡仲有. 饱和土渗流的能量守恒原理[J]. 路基工程, 2007(5): 3-4. (LI Ping, LUO Yasheng, HU Zhongyou. The principle of energy conservation in saturated soil [J]. Subgrade Engineering, 2007(5): 3-4. (in Chinese))
- [29] WU Hui, HU Liming. Analytical and numerical solutions for vacuum preloading considering a radius related strain distribution [J]. Mechanics Research Communications, 2012, 44: 9-14.
- [30] INDRARATNA B, RUJIKIATKAMJORN C, AMERATUNGA J, et al. Performance and prediction of vacuum combined surcharge consolidation at Port of Brisbane[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137(11): 1009-1018.
- [31] CHU J, YAN S W. Estimation of degree of consolidation for vacuum preloading projects [J]. International Journal of Geomechanics, ASCE, 2005, 5: 158-165.
- [32] 董志良. 堆载及真空预压法加固地基地下水位及测管水位高度的分析与计算[J]. 水运工程, 2001(8): 15-19. (DONG Zhiliang. Analysis and calculation of the height of the ground water level and the water level of the foundation by vacuum preloading method [J]. Port & Waterway Engineering, 2001(8): 15-19. (in Chinese))
- [33] 刘家豪, 董志良. 塑料排水板真空预压法加固软基固结理论解析讨论[C]//刘家豪. 塑料板排水固结法加固软基技术研讨会论文集. 南京: 河海大学出版社, 1990: 285-294.
- [34] GENG X, INDRARATNA B, RUJIKIATKAMJORN C. Effectiveness of partially penetrating vertical drains under a combined surcharge and vacuum preloading[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48(6): 970-983.
- [35] 鲍树峰, 莫海鸿, 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): 3569-3576. (BAO Shufeng, MO Haihong, DONG Zhiliang, et al. Study on the characteristics and distribution patterns of negative pressure transfer characteristics of the newly filled silt foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(12): 3569-3576. (in Chinese))
- [36] VOOTIPRUEX P, BERGADO D T, LAM L G, et al. Back-analyses of flow parameters of PVD improved soft Bangkok clay with and without vacuum preloading from settlement data and numerical simulations[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2014, 42(5): 457-467.
- [37] WAND Z Y, LEI M, WANG X. Some advice on vertical draining channels in settlement calculation of soft-soil roadbed with finite element method (vacuum preloading)[C]//HU Jianping, MA Jianlin, MENESES J, et al. IACGE 2013: Challenges and Recent Advances in Geotechnical and Seismic Research and Practices. Cheng Du: ASCE, 2013: 1-10.
- [38] 韩文君, 刘松玉, 章定文, 等. 基于双对数压缩模型的真空预压非线性固结解[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(5): 967-972. (HAN Wenjun, LIU Songyu, ZHANG Dingwen, et al. Nonlinear consolidation solution of vacuum preloading based on double logarithmic compression model [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2013, 43(5): 967-972. (in Chinese))
- [39] 罗戌. 真空联合堆载预压法加固特性及地下水位变化研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [40] 薛禹群. 地下水动力学[M]. 2版. 北京: 地质出版社, 1997.
- [41] 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 Xiuqing. Consolidation effective stresses in soil under the negative pressure condition [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1984, 6(5): 39-47. (in Chinese))
- [42] 龚晓南, 岑仰润. 真空预压加固地基若干问题[J]. 地基处理, 2002, 13(4): 7-11. (GONG Xiaonan, CEN Yangrun. Some problems of vacuum preloading Foundation [J]. Ground Improvement, 2002, 13(4): 7-11. (in Chinese))
- [43] 吴桂芬, 高玉峰, 魏代现, 等. 真空和堆载两种预压法的室内试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊1): 95-98. (WU Guifen, GAO Yufeng, WEI Daixian, et al. Experimental study on two kinds of preloading method in vacuum and reactor [J].

- Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(Sup1): 95-98. (in Chinese))
- [44] 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 Xiaonan, CEN Yangrun. Mechanism of vacuum preloading [J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 2002, 35(2): 7-10. (in Chinese))
- [45] 李青松, 吴爱祥, 姚振玢, 等. 真空渗流场的形成机理探讨[J]. 矿业研究与开发, 2004, 24(6): 17-20. (LI Qingsong, WU Aixiang, YAO Zhengong, et al. Research on the forming mechanism of vacuum seepage field [J]. Mining Research and Development, 2004, 24(6): 17-20. (in Chinese))
- [46] 李青松, 吴爱祥, 黄继先, 等. 真空渗流场作用下的渗透固结[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2005, 36(4): 689-693. (LI Qingsong, WU Aixiang, HUANG Jixian, et al. Infiltrating-concretion in vacuum seepage field [J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2005, 36(4): 689-693. (in Chinese))
- [47] 岑仰润, 俞建霖, 龚晓南. 真空排水预压工程中真空度的现场测试与分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 603-605. (CEN Yangrun, YU Jianlin, GONG Xiaonan, et al. Field test and analysis of vacuum degree in vacuum drainage preloading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(4): 603-605. (in Chinese))
- [48] 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 Zhiyi. Analysis on mechanics of vacuum preloading method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(4): 45-55. (in Chinese))

· 简讯 ·

河海大学发明专利授权量创新高

2016年2月18日中华人民共和国教育部科技发展中心公布了2015年高校获发明专利授权量前50名和至2015年底高校有效发明专利量前50名名单,河海大学排名均进入全国50强,创历史最好成绩。

2015年河海大学发明专利授权575件,居全国高校第18位,较2014年的第29位上升了11位,连续4年进入前50强;至2015年底河海大学有效发明专利拥有量1384件,居全国高校第30位,首次进入全国高校前50名。

近年来,河海大学采取了系列性举措,从管理体系健全、管理流程完善及管理制度建设等方面着手,加大对知识产权工作的支持力度,极大鼓舞了科研人员知识产权创造运用的积极性。学校发明专利申请量及授权量、PCT国际申请、专利奖等方面取得了多项突破,并顺利通过了江苏省高校知识产权管理标准化试点工作的验收,为学校科技创新力和综合办学实力提升提供了有力支持。

(本刊编辑部供稿)