DOI：10.11779/CJGE201606015

真空预压地基卸荷变形特性试验研究

明经平，孙振远
（南京水利科学研究院岩土工程研究所，江苏 南京 210024）

摘 要：为认识真空预压地基在真空压力卸载中的变形特性，对原状软黏土土样进行了常规三轴仪等向压缩与膨胀试验以及CKC三轴仪压缩膨胀试验，以模拟真空预压地基中各种应力状态下的土体单元在卸除真空压力这种球形压力后的变形特征。研究结果表明，真空压力卸载过程中地基土体既产生弹性的体积膨胀，因偏应力的存在，土体还产生剪切变形，在真空联合堆载预压中，堆载产生的较大偏应力将导致真空压力卸载时地基回弹很小，甚至地基继续沉降。真空压力卸载时，地基的沉降效果是土体膨胀变形和土体的剪切变形的叠加。

关键词：真空预压；卸荷；回弹；球形应力；偏应力水平
中图分类号：TU447 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2016)－06－1081－06

作者简介：明经平（1970－ ），男，工学博士，高级工程师，从事软土地基处理方面的研究和岩土工程学术期刊出版方面的工作。E-mail: jpming@nhri.cn。

Experimental study on deformation of soil under vacuum unloading

MING Jing-ping, SUN Zhen-yuan
(Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: In order to study the deformation characteristics of soil under vacuum preloading when unloading vacuum pressure, compression-redound tests on undisturbed soft clay samples are performed to simulate different vacuum unloading case by normal using the triaxial apparatus and CKC triaxial apparatus. The test results indicate that the deformation caused by vacuum unloading includes elastic volumetric swelling and considerable shear deformation under high deviatoric stress level, and the vacuum unloading can induce the shear failure of ground when the deviatoric stress is high enough, especially in vacuum-surcharge preloading. So, both the volumetric swelling and the shear deformation should be considered in settlement analyzsis of vacuum preloading ground.

Key words: vacuum preloading; unloading; rebound; spheric stress; deviatoric stress level

0 引 言

由于真空预压法具有不存在稳定问题、工期短和经济性好等巨大优势，真空预压法已广泛地应用于软黏土地基的加固处理中。为了获得更好的地基加固效果，或因工程填筑高程的需要，在软黏土地基处理中，真空预压联合堆载预压法也经常使用。不管是单独的真空预压法还是真空预压联合堆载预压法，在地基加固完成后，都存在真空压力卸载的过程。自1952年瑞典皇家地质学院杰尔曼教授首先提出真空预压法加固地基的思想以来，真空预压法的加固机理研究、设计方法、施工工艺和工程应用均得到了长足的发展。以往人们主要关注真空压力加载过程的有关问题，因为加载过程是地基压缩密实和地基沉降发生的主要过程，也是地基处理耗时的主要过程。随着对真空预压应用和研究的深入，发现真空压力卸载过程不可忽视，真空压力卸载不仅影响地基的沉降，甚至还可能影响地基的稳定。

真空预压法加固地基的基本原理是通过抽真空产生的负孔隙压力转化为土体的有效应力，从而压密加固地基。可见，与堆载预压或地基受表面荷载情况不同，真空预压中土体的固结压力为球形应力。因此真空压力卸载过程中，土体卸除的有效应力也是球形应力。根据弹性力学理论，球形应力卸载产生体积膨胀，那么真空压力卸载地基应该随即产生相应的回弹。在一些真空预压地基实例中也观测到了真空压力卸载导致的地基回弹[1]，但是在另一些地基处理工程中，特别是真空预压联合堆载预压的实例中，在沉降稳定后卸除真空压力时并没有观测到明显的地基回弹，这与按弹性理论计算的地基回弹量有很大的差距[2-3]。在有

收稿日期：2015－03－16

表 1 试验土样的基本物理性质平均指标

Table 1 Basic physical properties of test soil samples

参数	w/%	ρ /(g·cm^{-3})	ρ_d /(g·cm^{-3})	e	S_r/%	G_s	w_P/%	w_L/%	I_P	I_L
数值	45.6	1.73	1.19	1.292	95.5	2.71	19.9	31.8	11.9	1.7

些真空预压工程中，现场工程师甚至感到真空压力卸载还导致了地基继续沉降。要准确计算真空预压地基的沉降或工后沉降，研究和认识清楚真空压力卸载导致地基变形的机理和规律特征就显得很有必要。

土体在偏应力卸载—再加载条件下的变形特性，已开展了一系列的试验研究，并取得了许多有工程应用价值的认识[4-6]。随着真空预压法被广泛应用于软土地基处理，土体在真空压力卸载条件下的力学特性也逐渐引起人们的关注[7-8]。梅国雄等[8]从土体在应力各向异性条件下的变形特性出发，试图解释真空预压法这一特定应力路径地基的变形，对真空压力卸载导致地基变形得方面也获得一些理论性的基本认识。为了更直观、深入地探讨真空压力卸载地基的变形特点和力学机理，本文采用室内土样试验方法[7]，模拟真空预压法中单元体的应力路径和不同应力状态下卸除 80 kPa 真空压力的情况，研究真空压力卸载后地基的沉降特性，并试图进行合理的理论解释。

1 试验基本情况

（1）试验土样

为了能更好模拟地基土的情况，试验采用原状土样。试验土样取自淮盐高速公路工程桩号 K20+750 段的边孔，取土深度为 5.3～7.0 m，属于低液限黏土，土样的基本物理性质平均指标列于表 1。

（2）试验仪器

常规的单向压缩试验仪可以模拟 K_0 固结，但难于模拟球应力卸载，常规三轴压缩试验仪可以模拟球应力卸载，但难于控制试样球应力卸载前的固结应力路径和试样不同的应力状态。为了能模拟真空预压地基单元的应力路径和应力状态，试验采用南京水利科学研究院岩土工程研究所引进的 CKC 三轴仪进行，该三轴仪除具备常规三轴仪的功能外，还配备了一套自动加载控制系统和试验数据自动采集系统。因此该仪器的特点是可以比较方便地控制试验的应力路径，并具备自动测试各项试验数据的功能。图 1 为本文进行试验的照片图。

（3）试验方案与方法

试验模拟不同深度受自重作用的土体单元，先作用 80 kPa 围压模拟真空压力固结，然后，针对单独真空预压工况的试验，直接卸除 80 kPa 围压，针对真空预压联合堆载预压工况的试验，再加轴向压力以模拟

图 1 CKC 三轴仪试验照片图

Fig. 1 Photo of tests using CKC triaxial apparatus

堆载对土体单元产生的应力，最后卸除 80 kPa 围压，并加轴压至试样破坏。进行了 3 组单独真空预压模拟试验，模拟深度分别约为 6.0，9.0，12.0 m 的土体单元。进行了 5 组真空联合堆载预压模拟土样试验，模拟深度均为 6 m。其中 3 组试验在施加轴向压力过程中破坏，因此这 3 组试验不完整，无卸载曲线，3 组不完整试验测得土样破坏时的大主应力分别为 240.0，234.9，242.0 kPa，这样就大体确定了土样在这样的应力路径下的破坏强度，并指导了随后两组试验轴向压力加载幅值。2 组成功完成的真空联合堆载预压模拟试验，模拟堆载填土高度分别约为 1.5，3.0 m。具体的试验方案列于表 2。

真空预压法中地基加固的原理仍然是太沙基有效应力原理，其转化为有效应力的固结压力为负的孔隙压力，具有球形压力性质，三轴试验中的围压也具有球形压力性质，因此试验中用围压的增减来模拟真空压力的加卸载，从力学效果来讲具有一致性。

天然地基是经过漫长的年代逐渐形成的，因此天然地基处于一种 K_0 的应力状态，土体取样后，应力释放，体积膨胀，结构也会发生某种程度的改变，试验室可以通过模拟地基形成过程的应力状态，最大限度地恢复和模拟地基土的性质。本文试验中采用等 k 固结的应力路径，并取 k 为 0.5，近似模拟天然土体的自重应力状态。

堆载预压中，在导致土体单元偏应力增大的同时，土体单元的球形固结压力也有一定程度的增加。为简化起见，本文试验中没有考虑堆载预压产生的固结作用，采用轴向压力增加近似模拟堆载的作用。

试验通过事先设定围压的加荷速率和轴向荷载的加荷速率来达到各试验方案需要的应力路径。试验过

表 2 试验方案

Table 2 Test schemes

试验类别	固结前应力（σ_1，σ_2，σ_3）/kPa	加球形固结压力 $\Delta\sigma_3$/kPa	加轴向压力 $\Delta\sigma_1$/kPa	卸载前（σ_1/σ_3），（q/p），（σ_1，σ_2，σ_3）/kPa
单独真空预压模拟试验	(100,50,50)	80	0	(1.385)，(0.161)，(180,130,130)
	(150,75,75)	80	0	(1.484)，(0.194)，(230,155,155)
	(200,100,100)	80	0	(1.556)，(0.217)，(280,180,180)
真空联合堆载预压模拟试验	(100,50,50)	80	20	(1.538)，(0.212)，(200,130,130)
	(100,50,50)	80	50	(1.769)，(0.278)，(230,130,130)

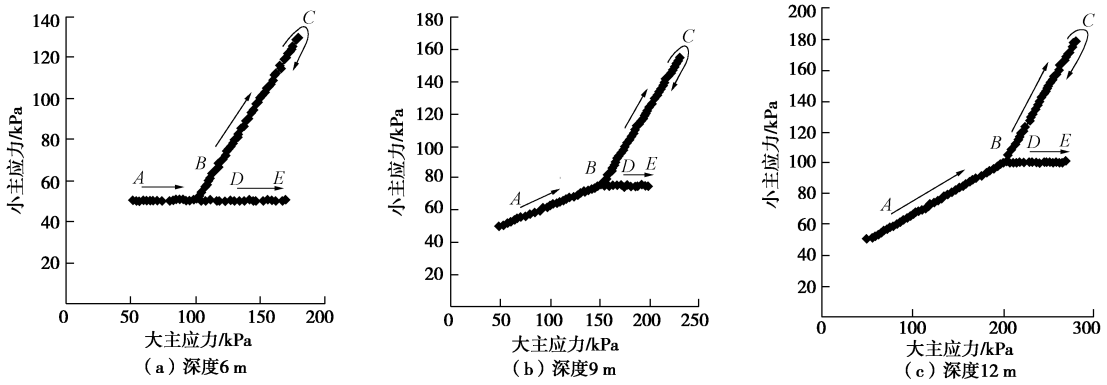

图 2 真空预压模拟试验的应力路径

Fig. 2 Stress paths for tests under vacuum preloading

程中记录加荷历时、荷载大小，并通过传感器自动测定轴向变形和体积变形。试验选定的加荷速率为 1 kPa/min，尽管试验时采用双面排水，但对这次试验的土样而言，试验过程中仍可能存在少量超静孔隙水压力，这在后面的试验结果曲线也可以看到超静孔压的影响。

2　试验结果与分析

（1）单独真空预压模拟试验

将模拟 6，9，12 m 深度土体单元的 3 组试验的应力路径表示成大主应力和小主应力的关系曲线，如图 2 所示。图 2 中，*B* 点表示自重应力状态，*BC* 表示 80 kPa 真空压力加载，*CD* 表示 80 kPa 真空压力卸载。将 3 组试验的轴向应变和体积应变的变化关系曲线示于图 3，其中体积应变正值表示体积压缩，那么正值减小就意味土体体积膨胀。图 3 中点 1，2，3，4，5 的应变大致与图 2 中的点 *A*，*B*，*C*，*D*，*E* 的应力状态对应，点 *C*（点 3）卸载之前，轴向应变和体积应变都是逐步增加的，这符合我们一般的认识。从图 3 中点 3 到点 4 的变化，可以看到，在真空压力卸载（*CD*）的过程中，土体产生了明显的体积膨胀，但轴向应变却几乎没有变化。这一试验现象与有些真空预压工程中真空压力卸载导致的地基回弹量不明显的现象比较一致，与按弹性理论来计算的真空压力卸除导致的地面回弹量大于实际的回弹量也较一致。由此表明，单独的真空预压工程中真空压力卸载可能不产生明显的回弹量，即看不到明显的沉降变化，但这并不是因为真空压力卸载土体没有膨胀，在真空压力卸除的同时土体依然产生了相应膨胀。可以推测真空预压地基中真空压力卸载导致了地基某种程度的向下的形状变形（即沉降），这种沉降与真空压力卸载导致土体膨胀的向上回弹量一定程度地抵消。

为了更清楚比较真空压力卸载土体产生的轴向变形与体积变形之间的关系，分别绘制三组试验在卸载过程中的平均正应力与 1/3 体积应变改变量的关系曲线和平均正应力与轴向应变改变量的关系曲线，见图 4。从图 4 可以看到，可能由于加载过程仍存在一定的超静孔压未及时消散，在刚刚卸载时，1/3 体应变和轴向应变均继续增加，达到 $A(A')$点后才随着平均正应力的减小而逐渐减小。从图 4 可以看到，超静孔压对 1/3 体积应变的影响小于对轴向应变的影响，但对 1/3 体积应变和轴向应变的影响几乎是同步的。加载过程中未及时消散的残余超静孔压对卸载阶段变形的影响比较复杂，为分析简化起见，近似认为卸载时，1/3 体积应改变量和轴向应变改变量的增大段主要是残余超静孔压作用的反应，而之后的减小段主要是围

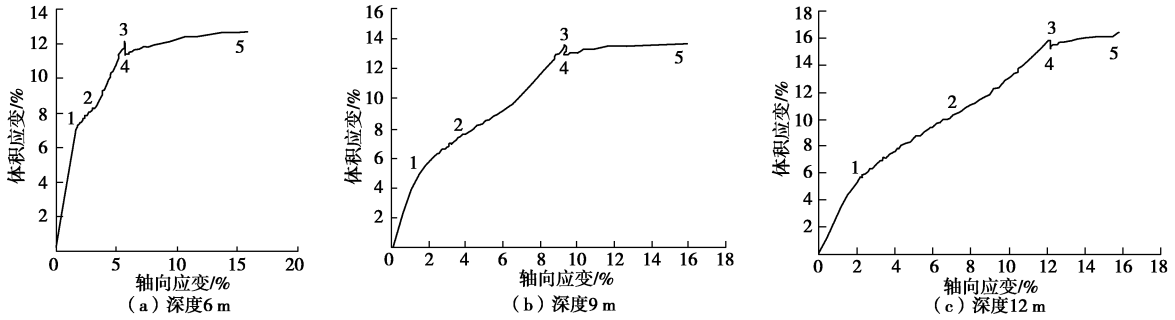

图 3 真空预压模拟试验轴向应变与体积应变的关系曲线

Fig. 3 Relationship curves between axial strain and volumetric strain of tests under vacuum preloading

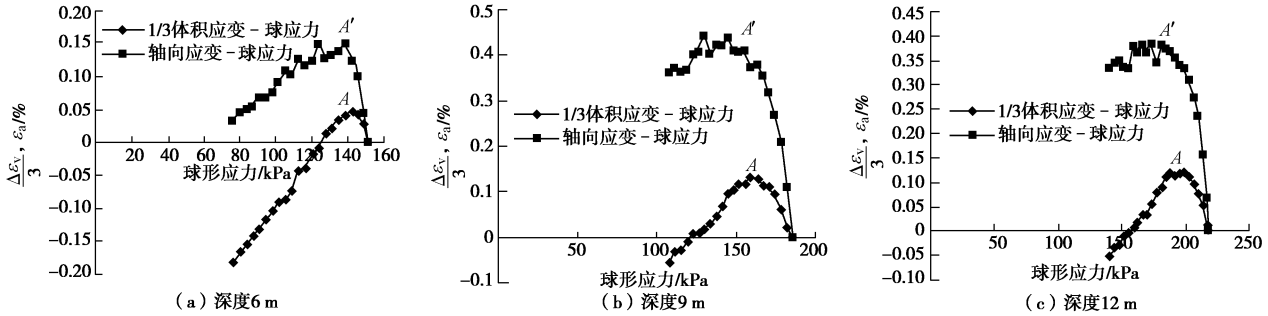

图 4 真空预压模拟试验 1/3 体积应变的改变量和轴向应变的改变量与平均正应力关系曲线

Fig. 4 Relationship curves between variation in one third volumetric strain and axial strain and average normal stress of tests under vacuum preloading

压减小作用的反应。通过比较可以看到，在卸除 80 kPa 围压后，1/3 体积应变的减小量明显大于轴向应变的减小量，也就是说轴向应变改变量中除包含体积应变的改变量外，还包含有围压卸载导致的土体形状变形的改变量。

（2）真空联合堆载预压模拟试验

本项试验模拟了深为 6 m 的土体单元在 80 kPa 真空压力固结完成后，分别施加相当于 1.5 m 和 3.0 m 堆载的轴向压力的作用过程。与单独真空预压模拟试验相对应，分别绘制 2 组真空联合堆载预压模拟试验的应力路径、轴向应变与体积应变关系及平均正应力与 1/3 体积应变改变量的关系曲线和平均正应力与轴向应变改变量的关系曲线，见图 5～7。图 6 中的点 1，2，3 的应变大致与图 5 中的点 A，D，E 的应力状态相对应，点 2 到点 3 的变形对应着减小 80 kPa 围压的过程。从图 6（b）中点 2、点 3 的变化可以看到，在卸围压时，轴向应变不但没有减小，而且还继续增大；图 7（b）中，轴向应变的改变量曲线在到达与 1/3 体积应变改变量曲线的顶点 A 对应点 A' 后，不但没有下降，反而继续上升。这表明卸载 80 kPa 围压，土样是发生了膨胀，但轴向不但没有发生向上的变形，反而继续发生向下的变形。这一试验现象证明，真空预压地基中，特别是真空联合堆载预压中，因堆载等原因当地基的大小主应力差较大，即地基的偏应力水平较高时，80 kPa 真空压力卸载可能导致地面继续沉降，甚至导致地基失稳。因此，在真空联合堆载预压地基中，分析地基的沉降或工后沉降时，应充分考虑地基的偏应力水平，认识到真空压力卸载导致的回弹量小于土体膨胀量，在高偏应力水平时，地基甚至继续下沉。因此在一次性堆载较大的情况下，应保证抽真空系统连续稳定运转，以免造成真空压力卸载导致可能的地基失稳。

3 关于真空压力卸载地基变形的讨论

（1）土体偏应力水平的影响

从上述试验结果分析和表 2 中卸载前各试样的大小主应力比可见，真空压力卸载时，土体的大小主应力比越大，即土体的偏应力水平越高，地基的膨胀量与地面的竖向回弹量差距越大。为验证土体在没有应力各向异性影响下球形应力卸载产生的体积膨胀和轴向变形具有一致性，对相同土样在普通三轴压缩仪上进行等向压缩与膨胀试验。围压先从 5 kPa 加到 100 kPa，然后再减到 5 kPa，加载和卸载压力依次为 5，30，60，100，60，30，5 kPa，每级荷载的稳定控制标准为孔压为 0，2 小时体积改变量为 0。试验中测定每级荷载作用下稳定时的排水量，同时也测定试样的轴向变形量。试验卸载过程中 1/3 体积应变和轴向应变与平均正应力的典型关系曲线示于图 8。从图 8 可见，在等向压缩后的膨胀过程中，1/3 体积应变和轴向应变的变化曲线可以定性地认为一致。这个试验的

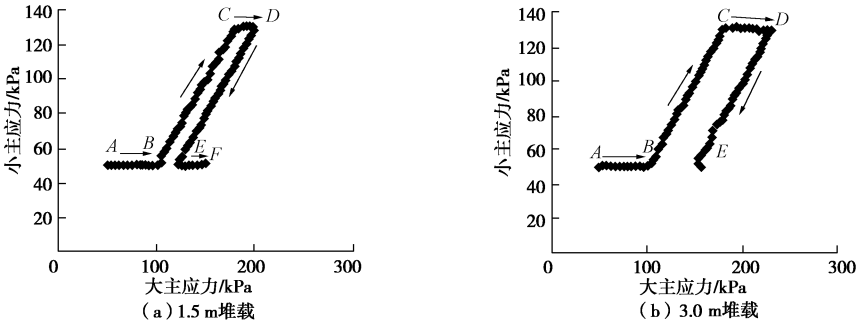

图 5 真空联合堆载预压模拟试验的应力路径

Fig. 5 Stress paths for tests under vacuum-surcharge preloading

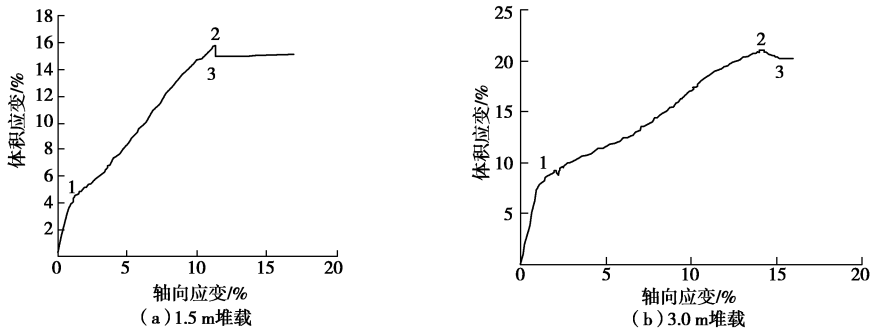

图 6 真空联合堆载预压模拟试验轴向应变与体积应变的关系曲线

Fig. 6 Relationship curves between axial strain and volumetric strain of tests under vacuum-surcharge preloading

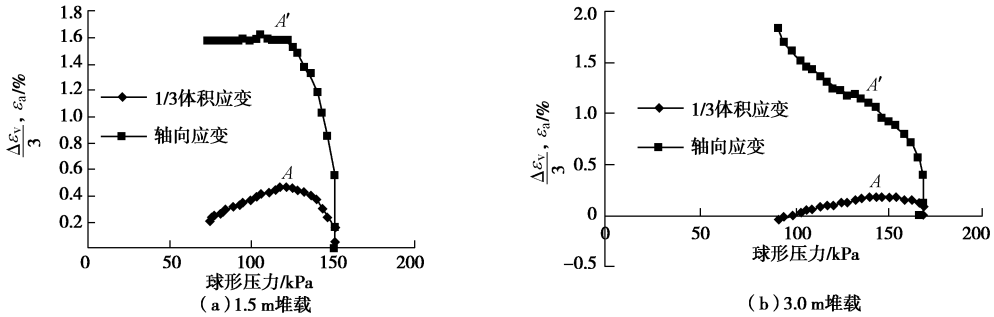

图 7 真空联合堆载预压模拟试验 1/3 体积应变的改变量和轴向应变改变量与平均正应力关系曲线

Fig. 7 Relationship curves between variation in one third volumetric strain and axial strain and average normal stress of tests under vacuum-surcharge preloading

结果表明，在偏应力为 0 的情况下，真空压力卸载，地基的膨胀量与地面的竖向回弹量会表现一致。因此，土体的偏应力水平是决定真空压力卸载时地基回弹量小甚至地基继续沉降的主要因素。

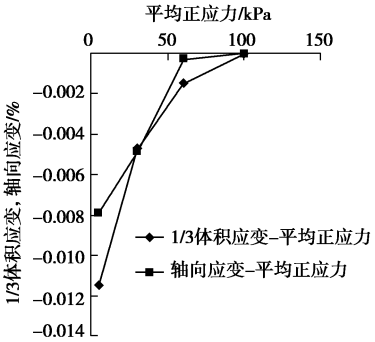

图 8 1/3 体积应变和轴向应变与平均正应力的关系曲线

Fig. 8 Relationship curves between variation in one third volumetric strain and axial strain and mean normal stress

（2）土体压硬性的影响

本文试验结果和文献[8]研究均已表明，真空压力卸载导致的地基变形特征与土体应力各向异性密切相关，并能够利用应力诱导的各向异性土体变形理论对部分现象进行一定程度上的合理解释，但土体各向异性变形理论对本文观察到的卸除围压时土体膨胀轴向继续压缩的试验现象和卸除真空压力后地面继续下沉的工程现象还难于解释。

土体的压硬性指土体在受压后，强度和剪切模量增加的性质。沈珠江早年就指出[9-10]，土体的压硬性还表现在压应力的变化也会引起剪切变形，特别是退压软化会引起剪应变的显著增加甚至使土体破坏。从土体的压硬性出发，能够合理解释真空压力卸载的地基变形，真空压力卸载土体发生软化，土体的剪切模量减小，这时偏应力的大小尽管没有发生变化，但土体的剪切应变增大，而且剪切变形增量的方向与大主应力方向一致，减压导致的剪切变形和膨胀变形的叠

加结果就呈现为工程中地面沉降变化，或回弹，或不变，或继续下沉。计算真空压力卸载地基的沉降应结合土体的弹性理论和土体压硬性的有关理论进行深入的研究。

4 结 论

通过上述的研究，可以得到如下 4 点结论。

（1）真空预压地基中，真空压力卸载可能导致地基回弹，也可能导致地基沉降不变，在真空联合堆载预压地基中，甚至还可能导致地基继续下沉。

（2）地基的偏应力水平是决定真空压力卸载时地基沉降特征的重要因素，地基的偏应力水平越高，真空压力卸载时，地基的回弹就越小，当偏应力水平达到一定程度时，地基甚至继续下沉或失稳。

（3）真空压力卸载时，地基土依然发生膨胀，同时由于减压软化的作用，土体的剪切变形增加，地基的沉降效果是上述两种变形的叠加。

（4）真空联合堆载预压地基中，一次性较大堆载施加后，应保证抽真空系统连续稳定工作，以免发生地基失稳。

参考文献：

[1] 闫伟峰. 真空预压卸载后地基回弹变形的试验研究[J]. 平顶山工学院学报, 2009, **18**(1): 72－74, 79. (YUAN Wei-feng. Test study on rebound deformation of foundation after unloading by vacuum preloading[J]. Journal of Pingdingshan Institute of Technology, 2009,**18**(1): 72－74, 79. (in Chinese))

[2] 李 豪, 高玉峰,刘汉龙,等. 真空—堆载联合预压加固软基简化计算方法[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(1): 58－62. (LI Hao, GAO Yu-feng, LIU Han-long， et al. Simplified method for subsoil improved by vacuum combined with surcharge preloading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(1): 58－62. (in Chinese))

[3] 徐立新, 陈云敏, 吕庆雷, 等. 真空预压法加固高速公路软基有限元分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, **32**(5): 587－591. (XU Li-xin, CHEN Yun-min, LÜ Qing-lei, et al. Three-dimentional Biot consolidation finite element analysis of soft foundation of expressways improved with vacuum preloading method[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2004, **32**(5): 587－591. (in Chinese)

[4] 陈永福, 曹名葆. 上海地区软黏土的卸荷—再加荷变形特性[J]. 岩土工程学报, 1990, **12**(2): 9－18. (CHEN Yong-fu, CAO Ming-bao. The deformation characteristics of soft clay under unloading and reloading in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, **12**(2): 9－18. (in Chinese))

[5] 刘国彬, 侯学渊. 软土的卸荷模量[J]. 岩土工程学报, 1996, **18**(6): 18－23. (LIU Guo-bin, HOU Xue-yuan. Unloading modulus of the Shanghai soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **18**(6): 18－23. (in Chinese))

[6] 屈智炯, 刘开明, 肖晓军. 粗粒土卸载—再加载变形特性的研究[J]. 水电站设计, 1994, **10**(3): 24－31. (QU Zhi-jiong, LIU Kai-ming, XIAO Xiao-jun. The study of deformation characteristics of coarse grain soil under unloading and reloading[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 1994, **10**(3): 24－31. (in Chinese))

[7] 明经平. 真空预压加固机理及加卸荷变形特性研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2009. (MING Jing-ping. Study on mechanism of vacuum preloading and deformation of soil under vacuum loading and unloading[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2009. (in Chinese))

[8] 梅国雄, 徐 锴,宰金珉,等. 真空预压加固软土地基变形机理的探讨[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(9): 1168－1172. (MEI Guo-xiong, XU Kai, ZAI Jin-min, et al. Deformation mechanism of soft foundation under vacuum preloading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(9): 1168－1172 (in Chinese))

[9] 沈珠江. 关于理论土力学发展的可能途径[M]// 沈珠江土力学论文选集. 北京: 清华大学出版社, 2005: 41－44. (SHEN Zhu-jiang. On possible development path of theoretical soil mechanics[M]// Selected Works on Soil Mechanics of SHEN Zhu-jiang. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 41－44. (in Chinese))

[10] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000: 20. (SHEN Zhu-jiang. Theoretical soil mechanics[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2000: 20. (in Chinese))