

# 真空预压下土体有效应力增量的计算与应用

张庆华<sup>1,2</sup>, 汤连生<sup>2</sup>, 廖化荣<sup>1,2</sup>, 王占华<sup>2</sup>

(1. 中山大学 应用力学与工程系, 广东 广州 510275; 2. 中山大学 地球科学系, 广东 广州 510275)

**摘要:** 通过降低孔隙水压力, 真空预压可增加土体中的有效应力, 从而使地基发生排水固结以达到最终被加固体目的。根据有效应力原理, 通过对真空度转化为土中有效应力增量的过程和机制分析, 考虑地下水的影响, 推导土中不同深度上有效应力增量的计算方法, 并根据建立的理论公式分析真空预压的有效加固深度与加固体效果。研究表明, 膜下真空度越大, 地下水位埋深越浅, 真空混合流体密度越小, 则抽真空预压在土体中形成的有效应力增量越大, 地基被加固的效果也越明显。最后, 结合澳门国际机场软基加固工程实例进行分析, 理论分析得到的结论符合实际观测结果。

**关键词:** 土力学; 真空预压; 有效应力增量; 有效加固深度; 固结度

**中图分类号:** TU 471.8; U 416.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2006)增 2 - 3565 - 07

## CALCULATION OF INCREMENTAL EFFECTIVE STRESS BY VACUUM PRELOADING AND ITS APPLICATION TO ENGINEERING

ZHANG Qinghua<sup>1,2</sup>, TANG Liansheng<sup>2</sup>, NIAO Huarong<sup>1,2</sup>, WANG Zhanhua<sup>2</sup>

(1. Department of Applied Mechanics and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China;

2. Department of Earth Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China)

**Abstract:** During the process of vacuum preloading, soil is consolidated when pore water pressure in the soil reduces and effective stress increases. According to the principle of effective stress, the mechanism of soft soil consolidation by preloading is studied. A series of new formulas are proposed to calculate incremental effective stress in different depths of the soft ground by vacuum preloading. These formulas can also provide a new way to estimate the effective consolidation depth of the soft ground by vacuum preloading. Based on the investigation of vacuum preloading project of Macao International Airport, relation between incremental effective stress and depth of the soil is presented; and the theoretical analysis is validated by in-situ results.

**Key words:** soil mechanics; vacuum preloading; incremental effective stress; effective consolidation depth; consolidation degree

## 1 引言

真空预压法最早由瑞典皇家地质学院的 W.

Kjellman 于 1952 年提出, 早期由于工艺问题一直未能在工程中应用<sup>[1]</sup>。20 世纪 80 年代, 交通部第一航航务工程局、天津大学和南京水利科学院等单位对这项技术进行室内和现场试验研究, 并成功地将这

**收稿日期:** 2006 - 05 - 18; **修回日期:** 2006 - 07 - 07

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50279056); 广东省自然科学基金资助项目(031601); 广东省科技计划资助项目(2003C33301, 2004B32801002)

**作者简介:** 张庆华(1977 - ), 男, 1999 年毕业于中国地质大学数学物理系物理师范专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土力学与工程方面的研究工作。E-mail: zhangqh7733@163.com

项技术应用于天津新港软基加固工程中<sup>[2~4]</sup>。通过 20 a 的推广和应用，真空预压法已经成为一种成熟的软土地基加固方法。自 20 世纪 80 年代开始，对真空预压机制的研究广泛兴起，从多层次、多侧面上产生许多研究成果<sup>[5]</sup>。

一些学者根据极限抽水高度理论，认为真空预压的加固深度不超过 10.3 m<sup>[6]</sup>，在此深度以下的软基不能得到有效加固。也有学者认为真空预压的加固效果可达到塑料排水板底部附近<sup>[7]</sup>。实际上在不少工程中与真空预压联合使用的塑料排水板都约达 20 m，目前最深已达到 26 m<sup>[8]</sup>。宫晓南等<sup>[9, 10]</sup>提出真空渗流场理论，用来描述真空预压法加固软土地基的整个过程，认为真空预压将导致地下水位降低，从而起到加固软土地基的效果。更多的学者是通过有效应力增量<sup>[5, 8, 11~13]</sup>加以分析。目前已经取得的共识是：在真空预压过程中，土体的总应力不变，只是降低孔隙水压力，土体逐渐固结，加固中降低的孔隙水压力，等于增加的有效应力。明经平和赵维炳<sup>[11]</sup>经过分析研究后认为，真空预压后地下水位不会下降，真空预压的效果只是真空度转化为有效应力的加固效果，不存在真空和降低地下水位双重效果。

从总体上讲，国内学术界对真空预压的加固机制还缺乏统一的认识。研究在不同程度上带有堆载预压的思维方式<sup>[14]</sup>，难以解释目前的工程实践中遇到的一些实际问题。比如，在利用真空预压法加固软土地基时，土中不同深度上有效应力增量大小的计算、真空预压的有效加固深度及地下水位对真空预压加固效果的影响等。本文将结合有效应力原理，通过对真空度转化为土中有效应力增量的机制和过程的分析，详细推导土中不同深度上有效应力增量的计算方法，探讨真空预压法在加固软土地基中的几个关键性问题，并结合澳门国际机场扩建工程实例进行论述。

## 2 有效应力增量的计算

### 2.1 加固机制与有效应力增量的表达

真空预压加固软土地基是通过密封墙和密封膜将需要加固的软土地基密封起来，然后利用射流泵抽气形成真空，使密封体内外形成压力差，一般称之为真空度。真空度通过竖向排水体(袋装砂井或塑料排水板)逐渐向下延伸，在竖向排水体内形成负的

超静孔隙水压力，使竖向排水体内的孔隙水压力小于四周土体原静孔隙水压力，导致地基土中的孔隙水逐渐向竖向排水体流动；真空度向四周的土体扩展，同时土中孔隙水压力降低。

根据太沙基有效应力原理，在总应力不变的情况下，降低土中孔隙水压力，就可提高地基的有效应力，土体就是在有效应力增加的过程中发生排水固结，以达到地基最终被加固的目的。对地基进行抽真空处理时，土中有效应力增量可表示为

$$\Delta\sigma' = \Delta P \tag{1}$$

式中： $\Delta\sigma'$  为有效应力增量， $\Delta P$  为孔隙水压力的降低值。

### 2.2 有效应力增量的计算方法

在地基加固过程中，不同深度地基的加固效果是不同的。随着深度的增加，真空度逐渐损耗，表面抽成真空在土体不同深度上引起的有效应力增量也是不同的。下面将考虑地下水的影响，推导土中有效应力增量的计算方法。

图 1 为真空预压法加固软基的工作示意图。在地下水位线 1-1 以上，竖向排水体孔道与土孔隙中主要为重力水和空气的混合物，在地下水位以下，竖向排水体孔道与土孔隙中则全部充满水。天然状态下竖向排水通道和土体中的水气压力处于平衡状态，不存在流动状态，地下水位不发生改变。

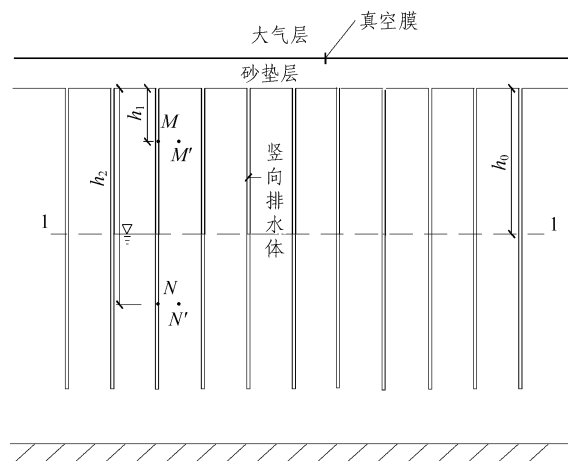


图 1 真空预压法加固软基工作示意图

Fig.1 Schematic diagram of vacuum preloading for soft ground treatment

如图 1 所示，假设大气压力为  $P_0$ ，在抽真空之前，点  $M$  与  $M'$  处的水气处于平衡状态。由于该深

度位于地下水位以上, 土体处于非饱和状态, 孔隙中充满水和气, 并与大气连通, 因此有

$$P_M = P_{M'} = P_0 \quad (2)$$

式中:  $P_M$  为抽真空前点  $M$  处孔隙水压力,  $P_{M'}$  为抽真空前点  $M'$  处孔隙水压力。

同时, 点  $N$  与  $N'$  处应力也处于平衡状态, 竖向排水体与土中孔隙水压力相等, 该深度位于地下水位以下, 排水通道和土体中的孔道均处于饱和状态, 因此有

$$P_N = P_{N'} = P_0 + \gamma_w (h_2 - h_0) \quad (3)$$

式中:  $P_N$  为抽真空前点  $N$  孔隙水压力,  $P_{N'}$  为抽真空前点  $N'$  孔隙水压力,  $\gamma_w$  为水的容重,  $h_2$  为点  $N$  或点  $N'$  深度,  $h_0$  为地下水位深度。

开始抽真空后, 砂垫层中的气体首先被抽走, 形成一定的真空度, 并通过管道传向竖向排水体, 点  $M$  与  $N$  水气压力值随之发生改变, 形成负的超静孔隙水压力。土体中的水和气向竖向排水体流动, 竖向排水体中的水和气则向上流动排向砂垫层。

点  $M$  位于地下水位线以上, 竖向排水通道中抽出的应为水和空气的混合流体, 假设其混合容重为  $\gamma_M$ , 膜下真空度为  $P_V$ , 如果不考虑竖向排水体井阻的影响, 则点  $M$  处的压力可表示为

$$P'_M = P_0 - P_V + \gamma_M h_1 \quad (4)$$

式中:  $P'_M$  为抽真空后点  $M$  水气混合流体压力,  $h_1$  为点  $M$  或  $M'$  深度。

在竖向排水体点  $M$  真空度扩展到土中点  $M'$  之前, 点  $M'$  压力不变。根据式(2), (4)可知, 地下水位以上某个深度上, 土中由于抽真空形成的竖向排水体与土体中的水气混合流体最大压力差为

$$\Delta P_{h_1} = P_V - \gamma_M h_1 \quad (5)$$

点  $N$  位于地下水位线以下, 则竖向排水通道在地下水位线以上部分为水气混合流体, 以下部分则应该全部为水, 如果不考虑竖向排水体的井阻作用, 则点  $N$  处的压力可表示为

$$P'_N = P_0 - P_V + \gamma_M h_0 + \gamma_w (h_2 - h_0) \quad (6)$$

式中:  $P'_N$  为抽真空后点  $N$  孔隙水压力。

同样, 在点  $N$  真空度扩展到  $N'$  之前, 点  $N'$  压力不变。根据式(3), (6)可知, 在地下水位以下某个深度上, 土中由于抽真空形成的竖向排水体与土体中孔隙水的最大压力差为

$$\Delta P_{h_2} = P_V - \gamma_M h_0 \quad (7)$$

对比式(5), (7)可知, 抽真空时, 地下水位以上土体与地下水位以下的土体中形成有效应力增量的计算方法并不一致, 说明土中有效应力增量的形成机制有差别。

由于抽真空作用形成的竖向排水体中的负压将最终扩散到所要加固的地基土中, 因此, 在真空度稳定后, 与竖向排水体中的孔隙水压力应趋于平衡。土体中孔隙水压力减小, 有效应力增加。在总应力不增加的情况下, 根据有效应力原理, 土中有效应力的增加量等于孔隙水压力的减小量。根据式(1), (5), (7)可知, 在地下水位以上的某个深度, 抽真空作用形成的土中有效应力增量为

$$\Delta \sigma'_h = P_V - \gamma_M h \quad (8)$$

在地下水位以下的某个深度上, 抽真空作用形成的土中有效应力增量为

$$\Delta \sigma'_h = P_V - \gamma_M h_0 \quad (9)$$

上述结果说明在地下水位以下, 真空预压的加固效果与地下水位  $h_0$  有关。但同时也必须指出一点, 上述公式在推导过程中均没有考虑竖向排水体自身井阻作用, 而是将竖向排水体看成理想的排水通道, 因此土中实际有效应力增量可能略小于公式计算结果, 其误差取决于竖向排水体自身井阻的大小和抽真空度。

### 3 有效加固深度

真空预压加固软土地基方法在国内大面积应用已近 20 a, 许多学者对其有效加固深度一直有不同的结论: (1) 有研究者认为真空预压效果只限于浅层; (2) 有人认为可达到 20 m 深度; (3) 也有研究者认为可达到塑料排水板底部附近<sup>[7]</sup>, 之所以没有形成一致的看法, 原因在于理论上对真空预压方法还缺乏深入的认识。

要确定真空预压方法加固软土地基的有效处理深度, 实质上是要确定在地基表面抽真空以后, 真空度能够通过竖向排水体传递到多大的深度, 即能够在土体多大的深度上产生有效应力增量。真空预压法对地基的有效加固深度主要取决于下面几个因素: 膜下真空度  $P_V$ , 加固区地下水位  $h_0$ , 竖向排水体的设置深度。除此之外, 还应当考虑竖向排水通道的井阻问题, 真空度在排水通道传递时, 井阻的存在会消耗一部分真空度。因此, 真空预压有效加

固深度的确定,需根据上面 4 个因素进行综合评价。

首先,根据式(7),要保证抽真空作用在地下水水位以下土体中形成有效应力增量,必须满足  $\Delta P_{h_2} > 0$  (即地下水位  $h_0 < P_v / \gamma_M$ ),真空预压才能对地下水以下的土体起到加固作用。反之,如果  $\Delta P_{h_2} < 0$  (即地下水位  $h_0 \geq P_v / \gamma_M$ ),则说明真空预压的加固作用不能达到地下水水位以下,不能形成有效应力增量,土体不能在抽真空作用下发生排水固结。下面分别对这 2 种情况下真空预压的有效加固深度进行讨论。

#### (1) 地下水位埋深较大 ( $h_0 \geq P_v / \gamma_M$ )

此时真空预压只能对地下水水位以上的部分土体进行加固。根据式(5),如果不考虑竖向排水体井阻的影响,要保证抽真空作用在土中形成有效应力增量,则必须满足  $\Delta P_{h_1} > 0$  ( $h_1 \leq P_v / \gamma_M$ ),说明真空预压的最大理论加固深度为  $P_v / \gamma_M$ 。与极限抽水高度理论不同,这里的  $\gamma_M$  为竖向排水体中水气混合流体的容重,而非水的容重,需要根据加固土体的孔隙度及含水量综合分析确定。

#### (2) 地下水位埋深较浅 ( $h_0 < P_v / \gamma_M$ )

此时真空预压可对地下水水位以下的土体进行加固。根据式(7),如果不考虑竖向排水体自身井阻问题,有  $\Delta P_{h_2} > 0$ 。理论上,真空预压的最大有效加固深度可达到竖向排水体的设置深度,但是考虑到竖向排水体并非理想的排水通道,由于井阻的存在,抽真空深度越大,则真空度在竖向排水体中的损耗也越大,抽真空作用在土中形成的有效应力增量也越小。因此,真空预压的有效加固深度除取决于地下水位的埋深外,还主要取决于竖向排水体自身井阻的大小。

有研究资料表明,当竖向排水通道采用袋装砂井时,在地面以下 10 m 处,真空度沿砂井的损失为 10%~30%。而对于 30 m 长的塑料排水板,在相当于 8 m 水头的真空压力的作用下排水阻力为:梯形板 7.0%,十字形板 6.0%<sup>[7]</sup>。因此,采用不同的竖向排水通道,加固的深度是有差别的,特别是对于深层软土,为取得比较大的加固深度,应该使用井阻较小的塑料排水板。

## 4 加固效果分析

### 4.1 有效应力增量

抽真空作用能够使土中形成有效应力增量,其大小直接影响到真空预压的加固效果,根据式(5),(7)可知,影响土中有效应力增量的因素主要有膜下真空度、地下水位、加固深度和真空混合流体容重等。除此之外,还应当与竖向排水体的井阻有关。

当膜下真空度比较大 (>80 kPa)、地下水位埋深浅、真空混合流体密度比较小及竖向排水体井阻很小的情况下,抽真空作用便可在不同深度土体中形成较大的有效应力增量,从而使地基能够得到有效加固。即使是对于埋藏深、厚度大的软土层,抽真空作用也能在较大的深度范围形成稳定的有效应力增量,因此地基加固效果也更加明显。

### 4.2 竖向排水体间距与预压时间

目前工程中使用比较多的主要有砂井和塑料排水板 2 种。根据太沙基有效应力原理,砂井径向固结的时间因素  $T_h$  与径向固结度  $c_h$ 、固结时间及砂井有效直径  $d_e$  存在如下关系:

$$T_h = c_h t / d_e^2 \quad (10)$$

对于式(10),有效直径  $d_e$  可以取为

$$d_e = \begin{cases} 1.128a & (\text{正方形布置}) \\ 1.050a & (\text{等边三角形布置}) \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $a$  为最大塑料排水板间距。

因此,固结预压时间与砂井间距的平方成正比,需根据式(10)确定。塑料排水板的间距,应根据加固区土层的固结系数、要求达到的固结度(或按要求的允许残余沉降量换算出的固结度),按地基平均固结度计算公式得到可采用的最大排水板间距  $a$ 。如果排水板间距大于  $a$ ,则不能满足工期要求;反之,则可缩短预压时间。

除此之外,密封墙和真空膜的密封性能,软土本身性质也会对真空预压的加固效果产生影响,本文不再详细讨论。

## 5 工程实例

下面以澳门国际机场南停机坪扩建二期工程为例进行分析,本文跟踪真空预压加固软基的全过程,所有数据均来自实测资料。

### 5.1 工程地质条件

工作区濒临南海,原为海水覆盖,后经填海成

为陆地，人工填土层厚度 8~12 m，填土时间超过 10 a，地质条件比较复杂。软土层经过先期填海砂石预压已发生早期固结变形，但总体强度较低、压缩性较大，承载力和变形都不能满足机场建设要求，是典型软弱层，需进行加固处理。地质勘察揭露主要地层情况如表 1。

表 1 土层分类与特性

Table 1 Sorts and characters of soil layers

| 土层编号 | 名称    | 土质描述       | 承载力特征值 /kPa | 层厚 /m    |
|------|-------|------------|-------------|----------|
| 1    | 吹填砂土  | 黄褐色、稍密、湿   | 55          | 2.5~3.5  |
| 2    | 卵石、砾石 | 灰色、离散、饱和~湿 | -           | 0.5~17.5 |
| 3    | 细砂    | 褐黄色、中密、饱和  | 60          | 0.2~10.5 |
| 4    | 淤泥    | 灰黑色、流塑、饱和  | 40          | 5.0      |
| 5    | 中砂    | 灰黄色、中密、饱和  | 75          | 0.2~8.5  |
| 6    | 淤泥质土  | 灰黑色、流塑、饱和  | 55          | 2.8~15.2 |

### 5.2 工程施工基本情况

由于本工程需要加固软土层范围较大，因此将工作区分为 VP1，VP2，VP3 三个区进行抽真空处理，面积分别为 15 995，25 110，21 606 m<sup>2</sup>。

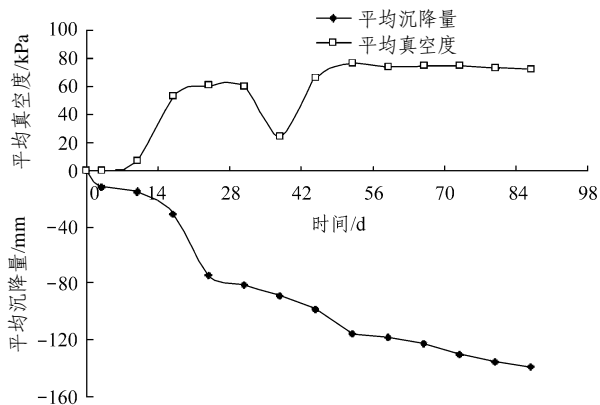
根据工程地质特点，密封墙采用双排泥浆搅拌桩，桩长穿越透气层进入纯正淤泥层不少于 0.5 m。表面砂垫层厚度 0.5 m，采用“C 型”塑料排水板作为竖向排水通道，打入深度约为 25.0 m，正方形设置，间距为 1.0 m。铺密封膜后进行抽真空，1 周后膜下真空度基本保持在 80 kPa 左右，同时定期观测每个区地基沉降量，结果如图 2 所示。

### 5.3 有效应力增量随深度的变化

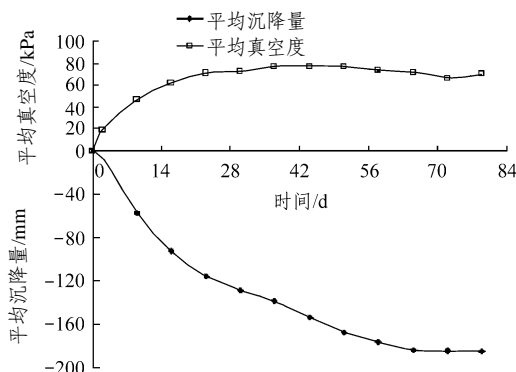
根据本文推导的有效应力增量的计算方法，计算抽真空作用下土体中不同深度的应力变化情况。具体参数的取值和说明如表 2 所示。

根据式(8)，(9)，计算得到土中有效应力增量随深度变化关系如图 3 所示。

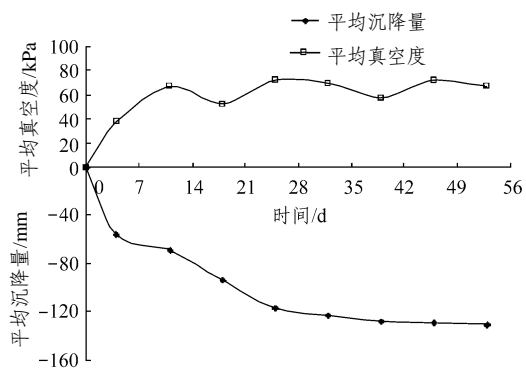
从图 3 可看出，在地下水位以上，抽真空作用在土中有效应力增量随深度衰减较快，这里因为抽真空作用要克服竖向排水体中混合流体形成的流体压力，同时还要克服井阻作用；而在地下水位以下，土中有效应力增量随深度衰减比较缓慢，这是因为竖向排水体中的流体压力在深度方向上的增加值在数值上等于土体孔隙水压力的增加值，两者可互相



(a) VP1



(b) VP2



(c) VP3

图 2 平均真空度和平均沉降量随时间变化曲线

Fig.2 Time-dependent curves of average vacuity and average settlement

表 2 参数的选取与说明

Table 2 Selection and definition of parameters

| 膜下真空度 /kPa  | 混合流体容重 /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 地下水位 /m |
|-------------|---|---------|
| 80          | 9.8   | 2.5     |
| (真空度稳定后平均值) | (取水容重)                                      | (实测结果)  |
| 拟加固土层深度 /m  | 井阻损失的真空度                                    |         |
| 30          | 7.0%/(30 m)                                 |         |
| (塑料排水板打入深度) | (塑料排水板，参考赵培生 <sup>[7]</sup> 的研究)            |         |

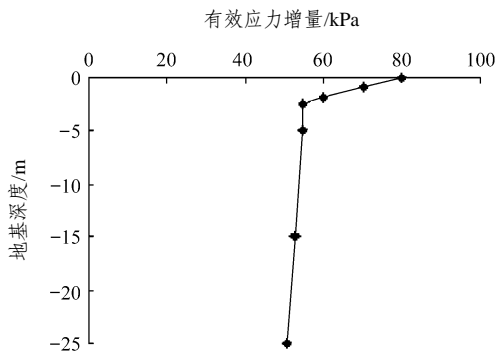


图3 土中有效应力增量随深度变化关系

Fig.3 Relation between incremental effective stress and depth of soil

抵消，抽真空作用只需克服井阻作用。这也说明，真空预压加固浅层地基土的效果比较好，随着深度的增加，加固效果逐渐减弱。

如果根据极限抽水理论，抽真空作用在 10.33 m 以下是不能形成负压的，因此不能对地基进行有效加固，但根据本文推导的理论，即使在 25 m 处，抽真空作用仍能在地基土中形成 50.8 kPa 的有效应力增量，因此在理论上可对该深度上的软土层进行加固。

### 5.4 原位观测结果分析

#### 5.4.1 真空度与沉降速率

根据真空表与沉降板读数，实际观测得到的 3 个区膜下真空度及平均沉降量随时间变化关系如图 2 所示，从图中可看出：

(1) 在抽真空前期，沉降平均值变化曲线和膜下真空度平均值变化曲线比较近似，沉降速率随着膜下真空度的增高而增快，各区抽真空的真空度上升的过程，也是各区沉降量平均值变化最大的过程，说明地基正在发生排水固结。

(2) 在抽真空后期，虽然膜下真空度继续稳定在 80 kPa 左右，但沉降曲线逐渐变得平缓，沉降速率逐渐减小，说明地基排水固结基本完成。

#### 5.4.2 固结度分析

土体固结度是评价地基加固效果的重要指标，利用指数回归曲线拟合法分析各分区的最终沉降量，选取等时刻( $t_3 - t_2 = t_2 - t_1$ )3 个观测沉降数据，确定最终沉降量，即

$$s_{\infty} = \frac{s_3(s_2 - s_1) - s_2(s_3 - s_2)}{(s_2 - s_1) - (s_3 - s_2)} \quad (12)$$

式中： $s_{\infty}$  为最终沉降量； $s_1, s_2, s_3$  分别为  $t_1, t_2,$

$t_3$  时刻的沉降量。

然后，根据实测地基在真空预压加固过程中已经发生的沉降量，求得地基的残余沉降量，并最终得到地基土体的固结度，结果如表 3 所示。研究表明，采用真空预压方法对澳门国际机场南停机坪软土地基进行处理，施工完毕后软土固结度达到 90% 以上，说明真空预压法的加固效果较好，理论分析符合实测结果。

表 3 不同时期的沉降量与固结度

Table 3 Settlement and the degree of consolidation

| 工作分区 | $s_1/cm$            | $s_2/cm$            | $s_3/cm$            | $s_{\infty}/cm$ | 残余沉降量/cm | 固结度/% |
|------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------|----------|-------|
| VP1  | 14.78<br>(20051125) | 15.35<br>(20051202) | 15.70<br>(20051209) | 16.27           | 0.57     | 96.5  |
| VP2  | 21.79<br>(20051216) | 21.96<br>(20051223) | 22.04<br>(20051230) | 23.52           | 1.48     | 93.7  |
| VP3  | 16.08<br>(20051216) | 16.22<br>(20051223) | 16.35<br>(20051230) | 18.04           | 1.69     | 90.6  |

注：括号内的数值为实测日期。

## 6 结 语

(1) 根据有效应力原理，考虑地下水位的影响，在理论上推导抽真空时土中不同深度上有效应力增量的计算公式。

(2) 软基地下水位埋深较大时，则真空预压的有效加固深度为  $P_v / \gamma_M$  (不考虑竖向排水体井阻作用)，地下水位埋深较浅时，则真空预压的有效加固深度主要取决于竖向排水体的井阻作用。

(3) 影响土中有效应力增量的因素主要有膜下真空度、地下水位、土体深度以及真空混合流体容重。当膜下真空度比较大 ( $> 80$  kPa)，地下水位埋深浅，真空混合流体密度比较小，竖向排水体井阻很小的情况下，抽真空作用便可在不同深度土体形成较大的有效应力增量，从而使地基能够得到有效加固。

(4) 真空预压加固浅层地基土的效果比较好，随着深度的增加，加固效果逐渐减弱。

### 参考文献(References):

[1] Kjellman W. Consolidation of clay soil by means of atmospheric pressure[A]. In: Proc. of the Conference on Soil Stabilization[C]. Boston, USA: Massachusetts Institute of Technology Press, 1952. 258 - 263.

[2] 叶柏荣. 真空预压法加固法的发展及工程实录[J]. 地基处理,

- 1995, (3): 49 - 57.(Ye Borong. Development of vacuum preloading and its application to engineering practice[J]. Foundation Treatment, 1995, (3): 49 - 57.(in Chinese))
- [3] 叶柏荣. 综述真空预压法在我国的发展[J]. 地基处理, 2000, (3): 1 - 10.(Ye Borong. Development of vacuum preloading method in China[J]. Foundation Treatment, 2000, (3): 1 - 10.(in Chinese))
- [4] 从瑞江. 真空预压加固超大面积软土地基[J]. 地基处理, 1996, (2): 30 - 37.(Cong Ruijiang. Vacuum preloading method in consolidating large soft soil foundation[J]. Foundation Treatment, 1996, (2): 30 - 37.(in Chinese))
- [5] 张延军, 张延诘. 国内真空预压法加固软土地基的现状与趋势[J]. 世界地质, 2002, 19(4): 375 - 378.(Zhang Yanjun, Zhang Yanjie. Current situation and tendency of improving soft foundation by vacuum preloading[J]. World Geology, 2002, 19(4): 375 - 378.(in Chinese))
- [6] 叶国良, 张敬, 郭述军. 真空预压法加固软土地基的几点新认识[J]. 水运工程, 2004, (10): 97 - 100.(Ye Guoliang, Zhang Jing, Guo Shujun. Some new understandings of vacuum preloading method for consolidation of soft soil foundation[J]. Port and Waterway Engineering, 2004, (10): 97 - 100.(in Chinese))
- [7] 赵培生. 塑料排水板在天津港工程建设中的应用[J]. 水道港口, 2003, 24(2): 88 - 93.(Zhao Peisheng. Application of prefabricated drains in construction of Tianjin port[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2003, 24(2): 88 - 93.(in Chinese))
- [8] 黄生文, 贾存兴, 陈智杰. 真空预压的加固机制与加固深度探讨[J]. 中外公路, 2005, 25(4): 47 - 49.(Huang Shengwen, Jia Cunxing, Chen Zhijie. Study on mechanism and consolidation depth of vacuum preloading[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2005, 25(4): 47 - 49.(in Chinese))
- [9] 宫晓南, 岑仰润. 真空预压加固软土地基机制探讨[J]. 哈尔滨建筑工业大学学报, 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))
- [10] 高海江, 宫晓南, 金小荣. 真空预压降低地下水位机制探讨[J]. 低温建筑技术, 2005, (6): 97 - 99.(Gao Haijiang, Gong Xiaonan, Jin Xiaorong. Mechanism of groundwater declining in vacuum preloading[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2005, (6): 97 - 99.(in Chinese))
- [11] 明经平, 赵维炳. 真空预压中地下水位变化的研究[J]. 水运工程, 2005, (1): 1 - 6.(Ming Jingping, Zhao Weibing. Study on groundwater level in vacuum preloading[J]. Port and Waterway Engineering, 2005, (1): 1 - 6.(in Chinese))
- [12] 赵明华, 向臻锋, 曾广洗. 真空预压下土体强度增长机制及其计算方法研究[J]. 勘察科学技术, 2006, (1): 3 - 6.(Zhao Minghua, Xiang Zhenfeng, Zeng Guangxian. Study on mechanism and calculation of shear strength of soil body consolidated by vacuum preloading[J]. Site Investigation Science and Technology, 2006, (1): 3 - 6.(in Chinese))
- [13] 黄荣粤, 贾存兴, 李凯. 真空预压法加固机制浅析与应用[J]. 西部探矿工程, 2005, (8): 35 - 37.(Huang Rongyue, Jia Cunxing, Li Kai. Mechanism of vacuum preloading and its application to engineering[J]. West-China Exploration Engineering, 2005, (8): 35 - 37.(in Chinese))
- [14] 陈小丹, 赵维炳, 周智勇. 真空预压法加固软基的特性和机制探讨[J]. 路基工程, 2005, (3): 1 - 4.(Chen Xiaodan, Zhao Weibing, Zhou Zhiyong. Characteristics and mechanism of vacuum preloading in consolidating soft ground[J]. Subgrade Engineering, 2005, (3): 1 - 4.(in Chinese))