

负压条件下土的固结有效应力

陈环 鲍秀清

(天津大学)

提 要

本文提出了一种真空条件下的固结模型,从而得到一维固结的两种计算图式,这两种图式求解的结果是相同的,这一概念可推广到求解二维、三维和轴对称问题。

本文通过电算得到了负压作用下不同边界条件固结过程中的有效应力变化规律,对负压条件下固结过程中有效应力变化的规律从理论上进行了解释。并得到室内模型试验和现场原位试验的初步验证。本文对真空预压在各种土中的效果也进行了论证,并提出了改善这一效果的建议。

一、前 言

抽真空,在土中造成一个局部的负压源,将土孔隙中部分水分抽出,使土产生固结而加固。此法称为真空预压加固法。

真空预压法与堆载预压法比较有如下优点:①不需预压堆载材料,可节省建筑材料、运输能力和能源;②不需分期加载,可缩短预压工期;③基本无噪声,可文明施工;④可适用于狭小的施工场地。

此法自1952年杰尔曼(kjellman)^[1]提出后,长期以来在实际中未获广泛应用,其重要原因之一是不了解负压作用下有效应力如何变化,从而无法预估预压效果。

二、负压作用下土的固结模型

通常,在地下水面和地下水面以上的土孔隙中作用着大气压力 p_a 。 p_a 是流体压力,传至土孔隙中即为孔隙压力。抽真空时土中产生负压,用 p_n 表示。此负压也是通过流体传向土孔隙,所以也是孔隙压力。

为了说明负压如何转化为有效应力,从而使土固结,我们提出了负压作用下的三种固结模型。

第一种情况为刚性容器中土样真空固结模型,如图1。

图1(a)为装满土样的厚壁刚性密封容器,在土样底部抽真空,负压通过小孔作用于土样底面。图1(b)为受力模型。图1(c)为受力图,负压与大气压力的压差为容器所承担,土中各处的孔隙水压力皆为 p_n ,孔隙水不会发生流动,模拟土骨架的弹簧不会发生压缩。说明土不固结,负压不能转化为有效应力, $\Delta\sigma' = 0$ 。

第二种情况是活塞容器中土样真空固结模型,如图2。

图2(a)为一个具有不透水活塞的厚壁容器。当土样底部形成负压后, p_a 通过活塞作

用于土面，土样上下形成压差 $\Delta p = p_a - p_n$ ，图 2 (b) 为受力模型， p_a 由上面活塞直接传递给土样， p_n 由下面通过透水层传递给土样。其固结模型如图 2 (b)，其受力图如图 2 (c)，由图 2 (b)，(c) 可以得到如表 1 的受力变化。

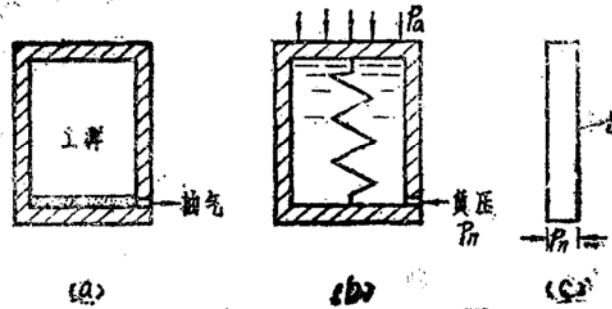


图 1 刚性容器中土样真空固结模型

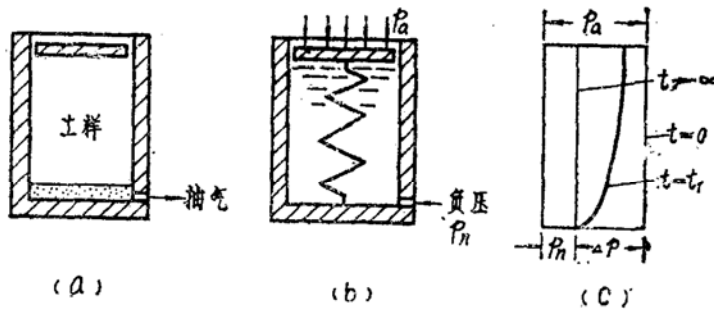


图 2 活塞容器中土样真空固结模型

表 1

位 置	$t = 0$		$t = t_1$		$t \rightarrow \infty$	
	u	σ'	u	σ'	u	σ'
土 样 顶 面	p_a	0	$< p_a$	> 0	p_n	Δp
土 样 底 面	p_a	0	p_n	> 0	p_n	Δp

可见，表 1 中的受力变化情况与正压 Δp 作用下的固结过程完全相同。在 $t = 0$ 时，压差 Δp 通过活塞和容器底传递到孔隙水上，因而发生渗流，最终此压差转移到弹簧上。

第三种情况是土样表面覆水的真空固结模型，如图 3。图 3 (a) 为表面开口容器，土样表面覆盖以水。 p_a 通过土面以上的水传到土孔隙水中。当土样底面形成负压后，土样上下表面存在着孔隙水压力差 Δp ，因而发生自上而下的渗流。图 3 (b) 为相应的模型。带孔隔板和弹簧表示土骨架。在渗流作用下通过隔板及小孔向土骨架传递渗流应力，土面下深度 z 处渗流应力为

$$\sigma_i = \Delta p \frac{z}{H} + \gamma_w h_0 \frac{z}{H}$$

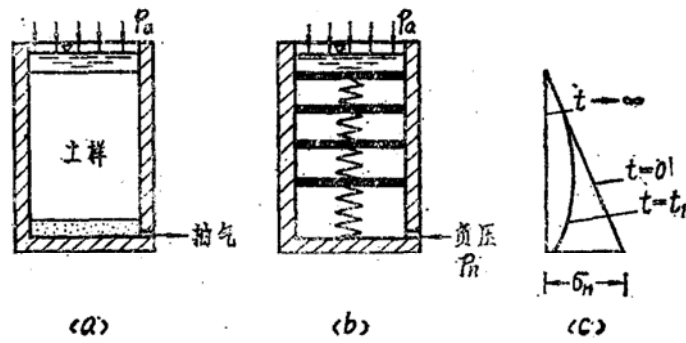


图3 土样表面覆水的真空固结模型

土样底面处

$$\sigma_H = \Delta p + \gamma_w h_0$$

式中 h_0 ——土面上的水深；

γ_w ——水的容重；

H ——土样总厚度。

可见，渗流应力分布为三角形，如图3(c)。此时，渗流应力就是使土产生固结的应力，它在土骨架与孔隙水上的传递情况如表2。

表2

深 度	$t = 0$		$t = t_1$		$t \rightarrow \infty$	
	u	σ'	u	σ'	u	σ'
z	σ_i	0	$< \sigma_i$	> 0	0	σ_i
H	σ_H	0	$< \sigma_H$	> 0	0	σ_H

三、固结方程及其求解

从上述模型的分析可知，负压作用下的固结过程与正压作用下的固结过程基本相同，只不过边界条件不同而已。因而可用一般固结方程，但采取不同的边界条件求解^①。

(一) 一维问题

如图3的一维问题可取图4(b),(c)两种初始和边界条件求解。图4(a)为受力示意图,图4(b)以渗流应力作为初始孔隙水压力,而图4(c)则以总的孔隙水压力作为初始值。

求解的初始与边界条件:

对于图4(b)

$$u \Big|_{t=0} = \Delta p \frac{z}{H} \quad u \Big|_{z=0, t>0} = 0 \quad u \Big|_{z=H, t>0} = 0$$

① 鲍秀清, 室内真空固结试验总结, 天津大学水利系, 1981.

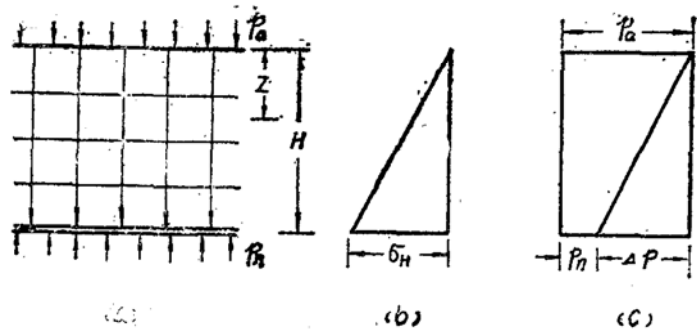


图4 一维问题的求解

求解结果为

$$u_t = -\frac{2\Delta p}{\pi} \sum_{n=1}^{n \rightarrow \infty} \frac{(-1)^n}{n} \exp\left[-\left(\frac{n\pi}{H}\right)^2 c_v t\right] \sin \frac{n\pi}{H} z \quad (1)$$

对于图 4(c)

$$u|_{t=0} = p_a \quad u|_{z=0, t>0} = p_a \quad u|_{z=H, t>0} = p_n$$

求解结果为

$$u_t = p_a - \Delta p \frac{z}{H} - \frac{2\Delta p}{\pi} \sum_{n=1}^{n \rightarrow \infty} \frac{(-1)^n}{n} \exp\left[-\left(\frac{n\pi}{H}\right)^2 c_v t\right] \sin \frac{n\pi}{H} z \quad (2)$$

现在分析两种解的结果。第一种情况是按一般正压的固结概念求解的,把渗流应力作为附加应力。所以当力刚施加时附加应力全部为水所承担,初始条件 $t=0$, $u = \Delta p \frac{z}{H}$ 。同时,把负压抽水的边界作为排水边界,所以下面边界条件 $z=H$, $u=0$ 。这种情况的固结过程就是三角形分布的渗流应力从孔隙水压力转化为有效应力的过程。第二种情况是直接根据孔隙水压力变化求解的。根据太沙基方程 $\sigma = \sigma' + u$,若 σ 为常量,则 $d\sigma = d\sigma' + du = 0$,从而 $d\sigma' = -du$,说明孔隙水压力的减少量就等于有效应力的增加量。根据这个概念,只要解出孔隙水压力的变化过程就等于解出了有效应力的变化过程。求解时静水压力未计入,只计入大气压力因抽气而引起的变化,所以 $t=0$ 时,土孔隙水中各处都作用着大气压力, $u = p_a$ 。在抽气过程中地面大气压力始终未发生变化,故有边界条件 $z=0$, $t \geq 0$, $u = p_a$;下面的透水层抽气后由大气压力 p_a 降低为 p_n ,并保持不变,所以 $z=H$, $t > 0$ 时 $u = p_n$,即此处孔隙压力减少了一个 $\Delta p = p_a - p_n$,此减少的孔隙水压力值需要通过一定的渗流过程向上传递,最终变为一个如图 4(c) 的梯形,减少的部分为下大上小的三角形。

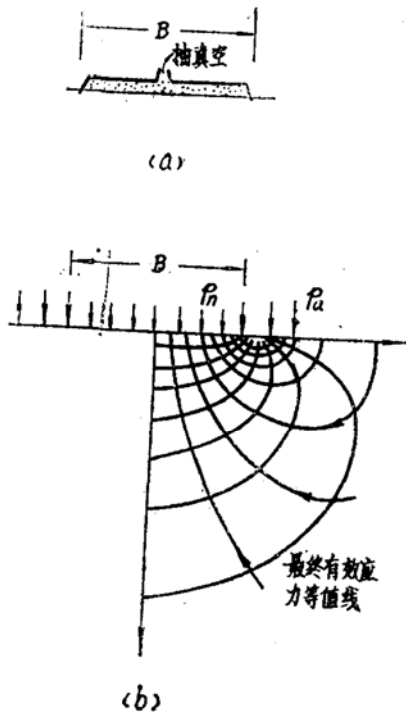
现在具体比较两种情况。第一种情况,孔隙水压力是从初始的三角形逐渐消散至零,整个三角形转化为有效应力;第二种情况是孔隙水压力从初始的矩形最终变化为梯形,也是减少了一个三角形。式(2)的第一、二两项是不随时间而变化的常量,表示的是梯形分布的孔隙压力图形;而第三项是描述三角形分布的孔隙水压力随时间逐渐减少的方程,与式(1)相同。式(1)也是描述三角形分布的孔隙水压力随时间逐渐减少的方程。二者初始条件相同,随时间变化的过程相同。所以可以得出结论,两种边界条件的解的结果是相同的。此概念也可推广到解二维与三维问题。

从解的结果我们还可以看到,渗流流网即为最终有效应力场。对于图 4 的情况,渗流流

线是垂直向下的，与流线垂直的等压线是水平的。当土为均质时，最终等压线是均匀分布的，即相等压差的等压线间的距离是相等的。而最终增加的有效应力，在同一水平面上也是相等的，所以水平线也是增加的有效应力等值线，因有效应力分布是直线变化的，所以等值线也是均匀分布，在分布规律上与流网的等压线相同，但是在数值上有所不同，增加的有效应力最大值等于渗流流网的压差 Δp ，位于渗流流网最小等压线的位置，渗流流网最大等压线处增加的有效应力等于零。

(二)二维问题

图5(a)为地面在一定范围内形成负压的试验筒图，图5(b)左侧为地面孔隙压力受力筒图，右侧为固结終了时的有效应力场。和一维问题相似，最终有效应力场与渗流流网重合。其理由如下。当地面B范围内抽真空时，此范围内孔隙水压力由 p_a 降低为 p_n ，此范围以外地面处仍为 p_a ，形成压差 Δp ，另外，向下和左、右方向无限远处也保持大气压力 p_a 不变，



这就形成如图5(b)右侧的渗流。根据渗流规律，流网的每条等压线都与流线正交，每条等压线上减少的孔隙水压力是相等的，根据 $d\sigma' = -du$ ，每条流网等压线上增加的有效应力也是相等的，所以流网等压线就是真空预压有效应力增加的等值线。增加的最大有效应力的数值也等于压差 Δp ，位于渗流流网压力的最小处，即抽气的地表面处，此处就是流网的最低的一条等压线，地面以下流网的各等压线相应增加的有效应力等于 $\Delta p(L - \Delta L)/L$ 。L为流线总长度； ΔL 为计算处流网等压线距最低等压线的距离。

固结过程的有效应力变化尚需求解。求解的初始条件如表3。

二维问题尚无法求得解析解。本文是采用差分法求解的，求解结果见实例部分。

图5 二维问题的最终有效应力场

(三)轴对称问题

为了解决轴对称问题，先分析两个平行的负压源的受力情况。土样表面为一不透水活塞，在土样上下两端抽气形成负压，如图6(a)。同样，根据 $d\sigma' = -du$ ，最终有效应力必为上下均匀分布的 Δp ，如图6(b)。

通过砂井抽气向地基中传递负压，两砂井间的受力情况与图6相似。

图7为打设5排砂井时地基中的最终有效应力场。固结过程中的有效应力变化见实例部分。

表3

t	z	x	u
≥ 0	0	$\leq \pm B/2$	p_n
	0	$> \pm B/2$	p_a
	∞	∞	p_a
$= 0$	> 0	$\leq \pm B/2$	p_a
	≥ 0	$> \pm B/2$	p_a

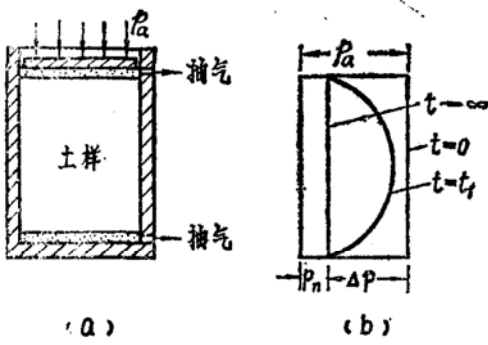


图6 两平行负压源模型

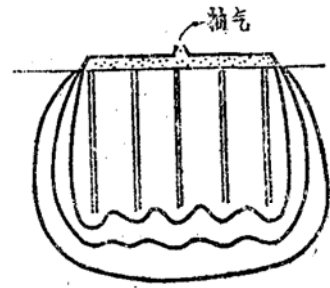


图7 打砂井时的有效应力等值线

四、实例分析

(一)室内一维真空预压试验

在 $120 \times 150\text{cm}$ 的试验槽中填入厚 56.5cm 的软土， $w = 68\%$ 。土表面不封闭，覆盖以 15cm 深的水，土的下面铺以反滤透水材料，试验时抽真空使负压通过反滤层作用于土底面。其真空度保持 0.5kg/cm^2 ，经10昼夜连续试验，由实测沉降换算的固结度与由前述方法计算的固结度二者基本上是一致的，如图8^②。不同时刻计算的孔隙水压力分布如图9。

(二)二维与轴对称问题

计算了无砂井和有砂井的两种情况。有砂井的情况又分别对 $D = 1.3\text{m}$ 和 $D = 3.1\text{m}$ 两种间距作了计算。对于 $c_v = 1.1 \times 10^{-3}\text{cm}^2/\text{s}$ 的土算得无砂井历时900天和砂井间距 3.1m 历时250天的增加有效应力等值线图如图(10)。按无砂井、砂井间距 $D = 3.1\text{m}$ 、 $D = 1.3\text{m}$ 三种情况计算的砂井范围内固结度随时间的变化曲线见图11。显然，不设砂井，加固效果很小，

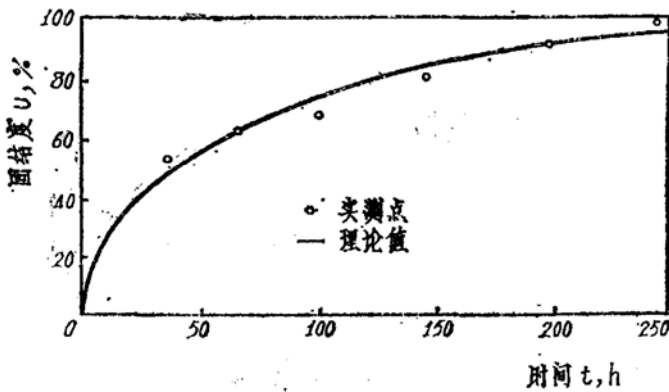


图8 室内模型试验与理论计算固结度的比较

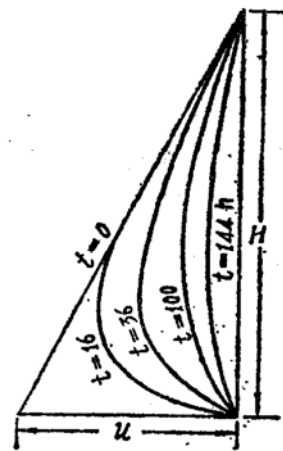


图9 不同时间计算的孔隙水压力分布

②陈环，负压作用下的固结应力分析，1980年地基处理学术会议论文选集，中国建筑学会地基基础学术委员会，1981年，第48~59页。

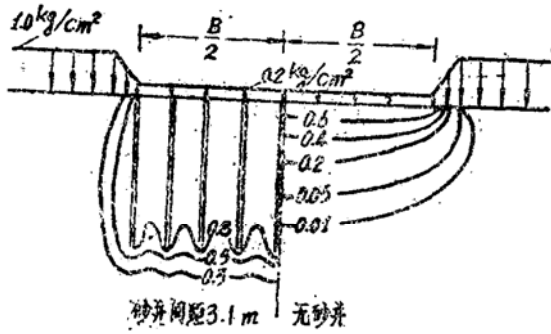


图10 两种情况计算的有效应力等值线图

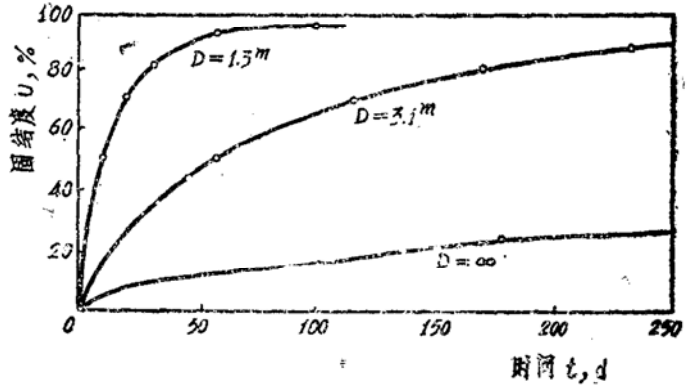


图11 不同砂井间距时固结度随时间的变化

不能满足工程要求。只有当砂井间距足够小时，才能得到满足工程要求的加固效果。例如，就本次试验土质而言，若砂井间距 $D = 1.3m$ ，经50天其固结度即可达90%以上。交通部第一航务工程局科学研究所作了无砂井和砂井间距为1.3m两种情况的现场试验，验证了上述计算结果。无砂井，60天实测沉降4cm，相应固结度 $U = 8.2\%$ ，如图12曲线①，砂井间距为1.3m时固结度随时间的变化如图12的曲线②。由图12可以看出，理论计算值和实测值基本上是一致的²。

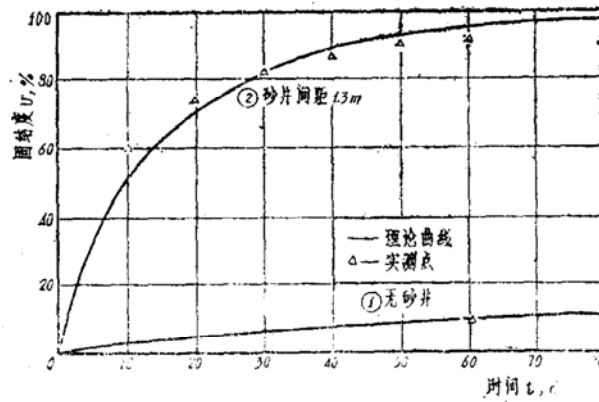


图12 现场试验结果与理论计算的比较

(三)真空井点预压

通过井点在一定深度的土层范围内形成真空，也可使地基中有效应力增加，表4是通过两排井点形成两个线负压源的计算结果。

两个不同间距的线负压源经不同时间产生的有效应力增量的分布如图13，土的 $c_v = 1.1 \times 10^{-8} cm^2/s$

交通部第一航务工程局科学研究所作了现场试验^③。试验场地 $20 \times 20m$ ，打设了25个井点，间距5m，井点在地面下1~10m形成负压。井点间自地面打设了与大气连通的砂井，长5m，间距1m，沉降观测表明，土的压缩主要发生在砂井以下的4m范围内，打砂井的表层5m压缩量很小。计算与观测结果比较见表5。

表 4

土的渗透系数 k (cm/s)	影响范围 R (m)	
	基坑疏干*	地基加固**
10^{-7}	1.2	1.1
10^{-6}	4.4	3.6
10^{-5}	14.0	12.0
10^{-4}	37.5	36.0

* 经一个月，两个负压源的中部有效应力增加 0.1kg/cm^2 。

** 经两个月，两个负压源的中部有效应力增加 0.4kg/cm^2 。

表中 Δt 为差分计算的时间间隔。 $\Delta t = \alpha \Delta z^2 / c_v$, Δz 为计算网点间距，采用 25cm ， c_v 为固结系数，试验区 $c_v = 1.1 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$ ，计算中取 $\alpha = 1/4$ ，故 $\Delta t = 1.64$ 天。 $50\Delta t$ 等于82天， $200\Delta t = 328$ 天。

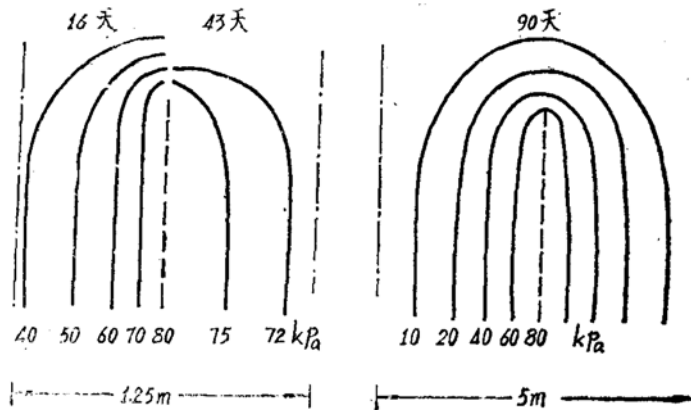


图13 井点负压源产生的有效应力等值线图

表 5

项 目	总 沉 降 (cm)	各层压缩量所占百分数 (%)		
		5 m 以上	5 ~ 9 m	9 m 以下
77天实测值	18.7	12.0	61.3	26.7
$50\Delta t$ 计算值	13.5	16.5	71.4	12.1
$200\Delta t$ 计算值	19.1	11.2	66.3	22.4

从表5实测与计算结果可以看出：①土的压缩主要发生在地面下 $5 \sim 9\text{m}$ 这一层，即抽真空范围内打设砂井以下的部位。这说明打设与地面连通的砂井不但不能加速固结，而且降

②陈环，真空井点预压的固结应力分析，天津大学水利系，1981。

低了加固效果；② $200 \Delta t$ 计算的总沉降量和各层压缩量所占百分数与77天实测结果符合；③实测固结速率较计算值快得多，这是需要进一步研究的问题。

五、结 论

1. 本文提出的方法可计算各种真空预压加固条件下有效应力随时间的增长，从而可以采取的措施使真空预压法适用于不同土质的地基。
2. 计算结果与室内外实测结果进行的比较，说明提出的计算理论是基本合理的。
3. 对于渗透系数较低的土，必须采用较密的砂井，才能使真空预压法取得实用的加固效果。

本文承交通部第一航务工程局科研所钱征同志提供真空井点的实测资料；叶柏荣同志提供其它有关资料，表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] Kjellman, W, Consolidation of Clay Soil by Means of Atmospheric Pressure, Proc. Conference on Soil Stabilization, MIT, 1952.
- [2] 叶柏荣等，袋装砂井真空预压加固软土地基，水运工程，1983年第4期，第25~32页。

Consolidation Effective Stresses in Soil under the Negative Pressure Condition

Chen Huan and Bao Xiu-qing

(Tian Jin University)

Abstract

A consolidation model under the vacuum condition is presented. Two different computing schemes of one dimensional consolidation may be developed according to this model. It is shown that these two schemes come to the same results. The above-mentioned concept can be extended to two- or three-dimensional and axisymmetric problems.

The variation of effective stresses in a consolidating soil under negative pressure then can be obtained and theoretically explained by a computer analysis for different boundary conditions. These theoretical findings are confirmed by laboratory and field test. Furthermore, the effects of vacuum preconsolidation for different kinds of soil are demonstrated, and measures of how to improve it are suggested.