

真空预压法中渗流体力学和压差面力联合作用机理浅析

何良德¹, 刘全¹, 洪波², 姚顺雨²

(1. 河海大学交通与海洋工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 上海勘测设计研究院, 上海 200434)

摘要:从渗流问题的基本方程出发, 导出了真空预压的固结解析解, 认为在地基中存在负压边界引起的瞬时稳定渗流与固结渗流 2 种不同特性的渗流。瞬时稳定渗流体力使膜下地基竖向拉伸、侧向受压, 接近纯剪切应力状态, 体积压缩变形较小, 难以有效地加固地基。柔性膜上压差面力产生的偏应力与渗流体力偏应力的方向相反, 大致可以互相抵消, 使地基处于接近球应力状态。因此, 膜上压差是加固地基的主要荷载, 对地基的固结特性和最终加固效果起着控制作用。

关键词:真空预压; 瞬时稳定渗流; 固结渗流; 压差面力; 渗流体力

中图分类号: TU472.3+3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2004)02-0193-04

陈环等^[1,2]提出的负压下固结理论认为, 真空预压法是利用密封膜下边界与膜外边界之间气压差的作用, 使孔隙水产生渗流, 地基有效应力得到增加, 从而使地基得到固结的。高志义等^[3,4]认为真空预压加固效果与密封膜上下气压差无关, 而龚晓南等^[5]则认为真空预压加固效果与膜上下气压差作用有密切关系。本文试从分析膜上下压差的作用、压差面力和渗流体力的不同固结规律、稳定渗流和固结渗流的差别等来认识和探讨真空预压法的加固机理。

1 刚性膜与柔性膜的区别

1.1 一维渗流固结基本方程

在通常情况下, 一维渗流问题连续微分方程中 $h = z + u/(\rho_w g)$, h 为测压管总水头, 即重力水头与压力水头之和。真空预压法是通过局部改变边界的气压力而产生渗流的, 因此水压力应用绝对压力来表示。重力水头、静水头之和在渗流区域内是常量, 因此在可以明确区分静水压力的问题中, 可用绝对水压力减静水压力的超静水压力表示一维渗流连续方程。

可以求出一维无体力平衡微分方程的通解, 并利用通解将线弹性材料问题的连续微分方程分解为 2 个单变量微分方程。因此, 一维渗流无体力问题的基本方程可归结为

$$\alpha(t) = \sigma'(z, t) + u(z, t) \quad \frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial \sigma}{\partial t} \quad \frac{\partial \sigma'}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 \sigma'}{\partial z^2} \quad (1)$$

式中 C_v 为固结系数。式(1)说明, 一维不计体力问题的总应力仅为时间的函数, 可以看出, 太沙基固结理论中关于总应力等于附加应力的假设是不能满足平衡条件的。

1.2 刚性膜一维固结模型

设有侧向不透水底部透水的圆柱形开口刚性容器, 假设其间填充的试验土样可粘结于透水底板, 并与侧壁无摩擦作用。为了模拟刚性膜, 在容器上口外套可接真空发生装置的顶盖, 顶盖上下的气压差完全由容器侧壁承受。使土样顶部微淹没在水中, 即可进行一维刚性膜真空预压试验。

取土样顶面为 z 坐标 O 点, 向下为正。为简化表达式, 令大气压力 $p_a = 0$, 设顶面边界孔压初期线性变化, 后期恒定为 $-u_a = -(p_a - p_v)/p_v$ 为膜下绝对压力, 则刚性膜的孔压和总应力的边值条件为

$$u(z, 0) = 0 \quad u(0, t < t_0) = -u_a t/t_0 \quad u(0, t \geq t_0) = -u_a \quad u(H, t) = 0 \quad (2)$$

$$\alpha(t < t_0) = -u_a t/t_0 \quad \alpha(t \geq t_0) = -u_a \quad (3)$$

满足式(2)(3)边值条件的解为

$$\begin{cases} u = -u_a \frac{t_k}{t_0} \left(1 - \frac{z}{H}\right) - u'_g & \sigma' = -u_a \frac{t_k z}{t_0 H} + u'_g \\ u'_g = \frac{2u_a}{\pi^3 T_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n^3} \sin \frac{n\pi z}{H} [1 - \exp(-\pi^2 n^2 T_k)] \exp[-\pi^2 n^2 (T_v - T_k)] \\ T_0 = C_v t_0 / H^2 \quad T_v = C_v t / H^2 \quad T_k = C_v t_k / H^2 \end{cases} \quad (4)$$

式中: u'_g ——刚性膜下固结孔压; T_0, T_v, T_k ——时间因数,无因次.当 $t < t_0$ 时,取 $t_k = t, T_k = T_v$;当 $t \geq t_0$ 时,取 $t_k = t_0, T_k = T_0$.

在式(4)中取 $t_0 = 0$,可得刚性膜下边界孔压瞬时达到 $-u_a$ 时的解为

$$u = -u_a \left(1 - \frac{z}{H}\right) - \frac{2u_a}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} \sin \frac{n\pi z}{H} \exp(-\pi^2 n^2 T_v) \quad \sigma' = -u_a - u \quad (5)$$

式(4)(5)表明,刚性膜预压开始后土样的总应力减小了 $-u_a t_k / t_0$,饱和土体始终承受着与负压相等的拉应力,在非常态固结(负固结)过程中孔压逐渐上升,土骨架拉应力不断增加,因此,刚性膜预压反而会使土体强度降低.

1.3 柔性膜一维固结模型

在土样顶铺设砂垫层,将活塞式顶盖内嵌搁置在砂垫层上,确保顶盖上下压力差全部让土样承受.柔性膜问题的孔压边值条件与刚性膜的相同(即式(2)),考虑膜上下压差 $q = u_a$ 后总应力边值条件是

$$\sigma(z, 0) = 0 \quad \sigma(z, t) = 0 \quad (6)$$

满足式(2)(6)边值条件的解为

$$\begin{cases} u = -u_a \frac{t_k}{t_0} \left(1 - \frac{z}{H}\right) + u'_r & \sigma' = u_a \frac{t_k}{t_0} \left(1 - \frac{z}{H}\right) - u'_r \\ u'_r = \frac{2u_a}{\pi^3 T_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3} \sin \frac{n\pi z}{H} [1 - \exp(-\pi^2 n^2 T_k)] \exp[-\pi^2 n^2 (T_v - T_k)] \end{cases} \quad (7)$$

式中 u'_r 为柔性膜下固结孔压.在式(7)中,取 $t_0 = 0$,可得柔性膜下孔压瞬时达到 $-u_a$ 的解为

$$u = -u_a \left(1 - \frac{z}{H}\right) + \frac{2u_a}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi z}{H} \exp(-\pi^2 n^2 T_v) \quad \sigma' = -u \quad (8)$$

式(7)(8)表明,在柔性膜的上下气压差 $u_a t_k / t_0$ 的作用下,总应力在预压前后以及预压过程中保持不变,在正常固结过程中孔压逐渐减小,土骨架压应力逐渐增大,并在任意时刻正好等于土样中的真空度.这充分说明,柔性膜的上下气压差是真空预压产生加固效果的必要条件.

2 一维真空预压固结机理

2.1 渗流体力学的固结规律

对有力平衡微分方程求积,并利用 $\sigma'(0, t) = 0, u(0, t) = 0$ 的边界条件可得

$$\sigma(z, t) = \sigma'(z, t) + u(z, t) = - \int_0^z f(\bar{z}, t) d\bar{z} \quad (9)$$

说明有力问题的总应力是位置的函数.根据式(9)可得2个单变量渗流连续方程

$$\frac{\partial \sigma'}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 \sigma'}{\partial z^2} + C_v \frac{\partial f}{\partial z} \quad \frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \int_0^z \frac{\partial f}{\partial t} d\bar{z} \quad (10)$$

设体力沿深度均布随时间线性变化,后期恒定为 f_0 ,则可得双面排水问题的解为

$$u = -\frac{2f_0 H}{\pi^3 T_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n^3} \sin \frac{n\pi z}{H} [1 - \exp(-\pi^2 n^2 T_k)] \exp[-\pi^2 n^2 (T_v - T_k)] \quad (11)$$

在式(11)中取 $t_0 = 0$,可得瞬时体力 $f(z)$ 的解为

$$u = -\frac{2f_0 H}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} \sin \frac{n\pi z}{H} \exp(-\pi^2 n^2 T_v) \quad \sigma = -f_0 z + u \quad (12)$$

2.2 2种不同特性的渗流

式(4)(7)中的非级数项表达了一种仅随边界压力变化而不受固结变形影响的瞬时稳定渗流场 u_0 ,它满足的基本方程及边值条件是

$$\begin{cases} C_v \frac{\partial^2 u_0}{\partial z^2} = 0 & u_0(z, 0) = 0 \\ u_0(0, t < t_0) = -u_a t/t_0 & u_0(0, t \geq t_0) = -u_a & u_0(H, t) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

式(13)的 u_0 对土体产生的渗流体力 $f(z, t) = \partial u_0 / \partial z$, 其后期恒定为 $f_0 = u_a / H$, 代入式(11)可得其产生的孔隙水压力 and 有效应力为 u_f, σ'_f . 设 $u_g = u_0 + u_f, \sigma'_g = \sigma'_f$, 则可以验证 u_g 和 σ'_g 是刚性膜问题的真实解. 设膜上下气压差 $q = u_a$, 由其产生的孔隙水压力 and 有效应力为 u_q 和 σ'_q , 同理可证 $u_r = u_0 + u_f + u_q$ 和 $\sigma'_r = \sigma'_f + \sigma'_q$ 是柔性膜问题的解.

通过以上分析可以看出,在真空预压法中土体受到了柔性膜上下气压差(面力)以及瞬时稳定渗流体力的联合作用. 土体的孔压力可分为瞬时稳定渗流压力、渗流体力以及面力所引起的固结渗流压力 3 个部分. 瞬时稳定渗流压力梯度对土体产生变荷载作用,其自身的变化是边界压差变化引起的,与土体变形无关,不随土体固结进程而消散. 固结渗流是由于土体产生变形而被动产生的渗流,对土体而言,起到了分担荷载或承载的作用,其消散过程决定了土体的固结进程,固结渗流压力最终可完全消散.

3 二维真空预压固结机理探讨

假设在地表铺设宽 $2a$ 的密封膜,取密封膜中点为 z 坐标 O 点,向下为正,水平向左为正 x 轴向,膜下地表边界为 S_1 ,膜外地表边界为 S_2 ,地基无限深、无限远处边界为 S_3 ,地基为饱和和各向同性线弹性体且渗透各向同性.用应力法求解时,基本方程为(用张量表示, $i, j = 1$ 为 x 向, 2 为 z 向)

$$\sigma'_{ij,j} + u_{,i} = 0 \quad \sigma'_{ii,jj} + \frac{1}{1-\nu} u_{,jj} = 0 \quad C_v u_{,ii} + \sigma'_{ii,i} = 0 \quad (14)$$

设膜下边界 S_1 孔压瞬时达到 $-u_a = -(p_a - p_v)$, 则瞬时稳定渗流 u_0 及其产生的最终有效应力为

$$\begin{cases} u_0 = -\frac{u_a}{\pi}(\theta_2 - \theta_1) & \theta_1 = \arctan \frac{x-a}{z} & \theta_2 = \arctan \frac{x+a}{z} \\ \sigma'_{fx} = \frac{u_a}{2\pi}(\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1) & \sigma'_{fz} = -\sigma'_{fx} & \tau_{fxz} = -\frac{u_a}{2\pi}(\cos 2\theta_1 - \cos 2\theta_2) \end{cases} \quad (15)$$

分析式(15)可得 $\sigma'_{fx} + \sigma'_{fz} = 0$, 表明负压边界使渗透各向同性的饱和地基出现纯剪切应力状态. 在密封膜宽度 $2a$ 范围内,侧向正应力 σ'_{fx} 均为压应力,它为土体提供了侧向约束的作用,而竖向正应力 σ'_{fz} 均为拉应力,说明负压边界作用只能使得地基竖向拉伸,地表产生负沉降.

难以求出膜上压差 $q = u_a$ 单独作用下固结孔压的解析解,但可以证明最终有效应力场为

$$\sigma'_{qx} = \frac{u_a}{\pi}(\theta_2 - \theta_1) - \sigma'_{fx} \quad \sigma'_{qz} = \frac{u_a}{\pi}(\theta_2 - \theta_1) - \sigma'_{fz} \quad \tau_{qxz} = -\tau_{fxz} \quad (16)$$

式(16)与负压边界解叠加后可得柔性膜下最终渗流场和有效应力为

$$u_0 = -\frac{u_a}{\pi}(\theta_2 - \theta_1) \quad \sigma'_x = \frac{u_a}{\pi}(\theta_2 - \theta_1) \quad \sigma'_z = \sigma'_x \quad \tau_{xz} = 0 \quad (17)$$

4 结 论

- a. 负压边界引起瞬时稳定渗流场,对土体产生渗流体力荷载,它与压差面力联合作用,使土体产生变形. 瞬时稳定渗流与固结渗流不同,其孔压变化与土体变形无关,本身不会产生消散,仅随负压边界的变化而瞬时变化.
- b. 瞬时稳定渗流体力使膜下地基竖向拉伸、侧向受压,接近纯剪切应力状态,体积压缩变形较小,难以有效加固地基. 柔性膜上压差面力产生的偏应力与渗流体力的偏应力方向相反,大致可以互相抵消,使地基处于近似的球应力状态. 因此,膜上压差是加固地基的主要荷载,对地基的固结特性和最终加固效果起着控制作用.
- c. 真空预压与当量气压差的堆载预压相比,两者的体积变形大致相同,最终加固效果相当. 由于真空预压消除了偏应力,一方面最终的地表沉降要小于当量堆载预压,另一方面可以提高加载(气压差)速率,在相同时间内可获得好于堆载预压的加固效果.
- d. 二维渗透各向同性地基,固结过程中总应力不可能为零,土体有效应力不可能等于真空度,只有最终

有效应力才等于真空度.而在渗透各向异性地基中,即使最终有效应力也不可能等于真空度.这些现象,负压固结理论是无法解释的.

e. 表面真空度影响膜上气压差的大小,它是影响最终加固效果的主要因素;而地基内瞬时稳定流的真空度分布规律及其消除气压差偏应力的能力主要受渗透不均匀性(包括竖向、横向和径向)的影响,它是影响最终加固效果的次要因素.竖向排水体设置除会对瞬时稳定真空度分布产生影响外,还会对固结孔压的消散产生影响.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 阎彭旺, 陈环. 用真空加固软土地基的机制与计算方法[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(2): 35—44.
- [3] 高志义, 张美燕. 真空预压加固的离心模型试验研究[J]. 港口工程, 1988(1): 18—24.
- [4] 高志义. 真空预压法的机理分析[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(4): 45—56.
- [5] 龚晓南, 岑仰润. 真空预压加固地基若干问题[J]. 地基处理, 2002(4): 7—11.

Mechanism of combined action of seepage force and surface pressure difference in vacuum-preloading method

HE Liang-de¹, LIU Quan¹, HONG Bo², YAO Shun-yu²

(1. College of Traffic and Ocean Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;

2. Shanghai Investigation, Design, and Research Institute, Shanghai 200434, China)

Abstract: According to the basic equation of seepage, consolidation analytical solution of the vacuum-preloading method is deduced. It is considered that there are two kinds of seepage in foundations, i. e. the consolidation seepage and instantaneous steady seepage due to the negative boundary pressure. The force of instantaneous steady seepage results in the vertical stretching of the foundation under geomembrane and the lateral compression, which make the foundation in the state of pure shear stress with small volumetric compressive deformation, thus, the foundation cannot be reinforced effectively. The deviatoric stress caused by surface pressure difference is in the opposite direction to that caused by the seepage force, and the counteraction of the stresses makes the foundation under the flexible membrane in the state of spherical stress. Therefore the surface pressure difference is the main load for reinforcement of foundations and the key factor that determines the consolidation character and final consolidation effect of foundations.

Key words: vacuum-preloading; instantaneous steady seepage; consolidation seepage; surface pressure difference; seepage force