

# 真空堆载联合预压法的渗流分析

徐泽中<sup>1</sup>, 刘世同<sup>2</sup>, 柴玉卿<sup>1</sup>

(1. 河海大学交通与海洋工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省高速公路建设指挥部, 江苏 南京 210004)

**摘要:** 从巴隆的等垂直应变方程组出发, 结合真空堆载联合预压法的特点, 建立了真空堆载联合预压的渗流模型, 给出了渗流的基本方程及其解析解. 同时, 结合公路路基分级施工的特点, 推导出分级加荷条件下的渗流量计算公式, 应用该公式可以核算真空泵配置的台数, 推求地下水位下降量和渗透水压力随深度的变化. 为进一步降低抽真空用电量提供了依据. 并以一工程实例加以验证, 算例表明计算值与实测值较为吻合.

**关键词:** 真空预压; 渗流量; 地基处理

中图分类号: TU433      文献标识码: A      文章编号: 1000-1980(2002)03-0085-04

真空堆载联合排水预压法是近年来迅速发展起来的处理软土路基的一种重要方法, 它主要包括排水系统和加压系统. 排水系统是由竖向和水平向两部分组成, 竖向排水系统是由塑料排水板(或砂井、袋装砂井)组成, 水平排水系统是由砂垫层及埋入其中的 PVC 管组成. 加压系统是借助覆盖在砂垫层上的不透气薄膜用真空泵来形成的负压、膜上堆载及地下水位降低使土体由饱和容重变为湿容重而增加的外荷. 地下水在上述荷载作用下发生由地基向排水板的径向渗流, 汇集到砂垫层中并由真空排水系统携走, 使土体有效应力增加的同时发生固结. 由于真空堆载联合预压法不同于单纯的堆载预压法, 渗流量的多少往往关系到加固效果及抽真空时间的长短, 因而对其渗流研究就显得尤为重要.

## 1 渗流模型的建立

塑料排水板地基属三维固结问题, 人们通常将整个地基固结转化为单井固结<sup>[1]</sup>. 图 1 为正负压塑料排水板地基单井计算简图. 其中:  $H$  为塑料排水板计算长度;  $k_r, k_h$  为地基竖向及水平向渗透系数;  $k_s$  为涂抹区水平向渗透系数;  $r_s$  为涂抹区半径;  $k_w$  为塑板纵向渗透系数;  $r_e$  为塑板影响区半径;  $-p_0$  及  $p_1$  为排水垫层中负压值及正压值;  $r, z$  为径向及竖向坐标.

为建立真空堆载联合预压加固地基渗流模型的数学表达式, 特作假定: (a) 符合巴隆的等垂直应变条件. (b) 正压时砂垫层中超孔隙水压力为零, 负压时为  $-p_0$ ; 正负压条件下渗流符合达西定律. (c) 塑料排水板中超孔隙水压力在同一深度可认为相同, 任一深度  $z$  处的水沿井周汇入塑料排水板的流量等于塑料排水板内向上流量的增量. (d)  $H$  深度以下为不透水地基, 径向  $r_e$  以远为不透水区域. (e) 土体完全饱和, 加荷开始时全部竖向荷载均由孔隙水压力承担.

考虑井阻影响, 巴隆的等垂直应变固结微分方程组为

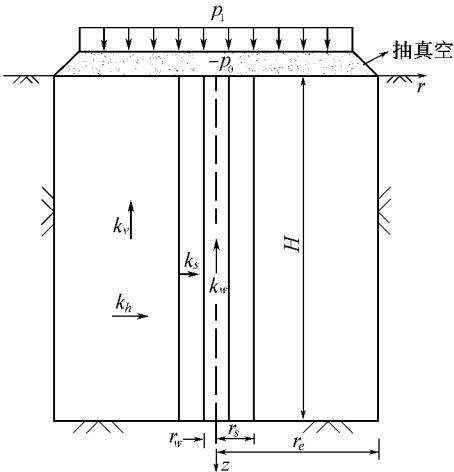


图 1 渗流模型

Fig.1 Seepage model

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}_r}{\partial t} &= \frac{2c_{vr}}{r_e^2 \mu} (u_w - \bar{u}) & \frac{\partial^2 u_w}{\partial z^2} &= \beta^2 (u_w - \bar{u}_r) \\ \mu &= \frac{n^2}{n^2 - s^2} \ln \frac{n}{s} - \frac{3n^2 - s^2}{4n^2} + \frac{k_r}{k_s} \frac{n^2 - s^2}{n^2} \ln s \\ \beta^2 &= \frac{2(n^2 - s^2)k_r}{\mu r_e^2 k_w} & s &= r_s/r_w & n &= r_e/r_w \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $u_r$ ——加固区内任一点径向超孔隙水压力,  $u_r = u_r(r, z, t)$ ;  $\bar{u}_r$ ——平均超孔隙水压力,  $\bar{u}_r = \bar{u}_r(r, z, t)$ ;  $u_w$ ——塑料排水板中任一深度的超孔隙水压力,  $u_w = u_w(z, t)$ ;  $t$ ——加压历时;  $s$ ——涂抹比;  $n$ ——井径比。

式(1)为砂井地基径向固结基本方程。根据基本假定和图1,正负压条件下方程的初始及边界条件:

$$\begin{aligned} u_w|_{z=0} &= -p_0 & u_r|_{z=0} &= -p_0 \\ \frac{\partial u_r}{\partial z}|_{z=H} &= 0 & \frac{\partial u_w}{\partial z}|_{z=H} &= 0 & \bar{u}_r|_{t=0} &= p_1 \end{aligned}$$

## 2 模型的求解

根据边界条件和初始条件,解偏微分方程组(1)可得正负压作用下排水板中超孔隙水压力:

$$\begin{aligned} u_w &= (p_0 + p_1) \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M} \frac{\lambda - B_r}{\lambda} e^{-B_r t} \sin\left(\frac{M}{H} z\right) - p_0 \\ M &= \frac{2m+1}{2} \pi & m &= 0, 1, 2, \dots \\ \lambda &= 8C_h(d_e^2 F) & d_e &= 2r_e \\ B_r &= \frac{8C_h}{(F + J + D)d_e^2} & F &= \ln n - \frac{3}{4} & J &= \ln s \left(\frac{K_h}{K_s} - 1\right) \\ D &= \frac{8G(n^2 - 1)}{M^2 n^2} & G &= (K_h/K_w)(H/d_w)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $C_h$ ——水平向固结系数;  $F$ ——井径比因子;  $J$ ——涂抹因子;  $G$ ——井阻因子。

## 3 渗流量计算

### 3.1 排水板渗流量

每根排水板出流量都是由排水板中单位深度  $dz$  的流量增量在  $[0, H]$  深度范围内积分得出。排水板出流量也可由  $[0, H]$  深度内板周的地下水汇入排水板的总和来计算。利用式(2)可得排水板中超孔隙水压力沿深度分布的梯度

$$T_{\text{板}} = -\partial u_w / \partial z$$

即

$$T_{\text{板}} = (p_0 + p_1) \sum_{m=0}^{\infty} \frac{-2}{H} \frac{\lambda - B_r}{\lambda} e^{-B_r t} \cos\left(\frac{M}{H} z\right)$$

地基某深度  $z$  处排水板中的流速为  $(K_w/\gamma_w)T_{\text{板}}$ ,  $\gamma_w$  为水的容重,则单位深度  $dz$  的流量为

$$dQ = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{K_w}{\gamma_w} T_{\text{板}} \right) A dz$$

单位流量在  $[0, H]$  积分:

$$Q_{\text{单板}} = (p_0 + p_1) \frac{\pi r_w^2 K_w}{\gamma_w H} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\lambda - B_r}{\lambda} e^{-B_r t} \quad (3)$$

若加固区内有  $N$  根排水板,则加固区排水板排水总量为

$$Q_{\text{总板}} = N Q_{\text{单板}} \quad (4)$$

### 3.2 对式(3)及(4)的修正

若令  $p_0 = 0$ , 则式(3)及(4)为正压排水板、地基渗流量的计算公式;若令  $p_1 = 0$ , 则式(3)及(4)为负压排水板及地基渗流量计算公式。因而式(3)及(4)可以解决正、负压及正负压共同作用下三种情况的排水板、地基渗流量。

但在排水板渗流量和加固区渗流量计算中,正压  $p_1$  是假设瞬时施加的,但根据公路施工特点,路堤填筑是分级进行,因此就要对式(3)(4)进行修正,才能适用于路堤等一般真空堆载情况下的渗流计算.对分级加荷的情况作如下假定 (a)每一级荷载增量  $\Delta p_i$  所引起的渗流量与上一级荷载增量所引起的渗流量是可以叠加的 (b)每一时刻的渗流量与此刻的荷载总量有关,与加荷起止时间无关.

由此可得

$$p_1 = \begin{cases} \sum_1^n \frac{\Delta p_n}{T_n - T_{n-1}}(t - T_{n-1}) & T_{n-1} < t \leq T_n \\ \sum_1^n \Delta p_n & T_n < t \end{cases} \tag{5}$$

式中  $T_{n-1}, T_n$  为第  $n$  级加荷的起止时间.将式(5)代入式(3)(4),即可以解决适应于公路等分级加荷情况下的真空堆载联合预压的渗流计算.

3.3 加固区内外渗流量

在真空堆载联合预压加固软土地基的过程中,由于地下水持续不断地被抽出,因而其地下水位将持续下降直至稳定,对这部分出水量进行计算是必要的.由于真空预压区域的长宽比为 1.75,因此加固区内外渗流计算采用大井法<sup>[3]</sup>.将矩形加固区换算成半径为  $r_0$  的圆形大井,

$$r_0 = \eta \frac{a + b}{4}$$

式中: $\eta$ ——系数,取 1.18; $a$ ——加固区长度; $b$ ——加固区宽度.加固区外渗流量

$$Q_{周} = 1.36 \frac{K(H^2 - h^2)}{\lg(R/r_0)}$$

式中: $k$ ——地基渗透系数; $R$ ——抽水影响半径,根据经验取值.

3.4 加固区渗流总量

加固区渗流总量是由加固区内固结渗流  $Q_{总板}$  及加固区外渗流量  $Q_{周}$  组成,即

$$Q_{总} = Q_{总板} + Q_{周} \tag{6}$$

4 应用实例

宁靖盐高速公路真空预压试验段 A 位于姜堰市北,根据现场地质及排水板的使用情况,选用参数如下:  
 $r_e = 57.75\text{ cm}$ ;  $r_w = 3.30\text{ cm}$ ;  $r_s = 6.60\text{ cm}$ ;  $C_h = 2.22 \times 10^{-3}\text{ cm}^2/\text{s}$ ;  $k_h = 6.26 \times 10^{-7}\text{ cm/s}$ ;  $k_v = 6.26 \times 10^{-7}\text{ cm/s}$ ;  $k_w = 0.25\text{ cm/s}$ ;  $k_s = 4.10 \times 10^{-7}\text{ cm/s}$ ;  $H = 1.0 \times 10^3\text{ cm}$ ;  $p_0 = 85.0\text{ kPa/m}^2$ ;  $r_0 = 41.3\text{ cm}$ ;  $R = 150.0\text{ m}$ ;  $h = 700\text{ cm}$ .  
运用公式(6),对加固区渗流量进行计算,结果绘于图 2.

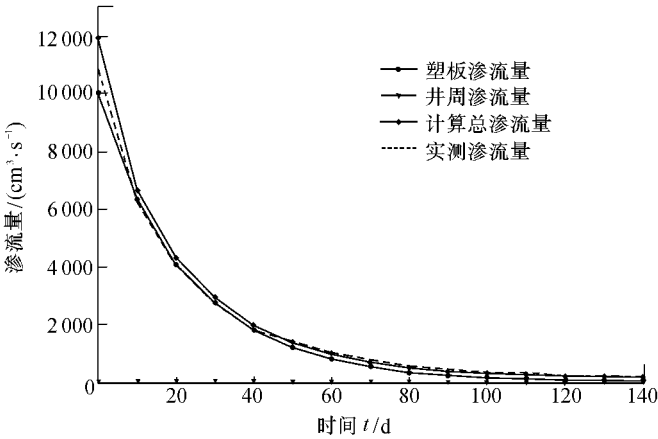


图 2 流量-时间关系曲线  
Fig.2 Flow rate vs. time

## 5 结 语

由图2可以看出计算流量-时间关系曲线与实测流量-时间关系曲线吻合较好,说明所建的正负压作用下的固结渗流模型是比较合理的.这对于今后进行真空堆载联合预压设计时,合理配置真空泵的台数,推求地下水位下降量和渗透水压力随深度的变化,也为进一步降低抽真空用电量提供了可能.

参考文献:

- [1] 地基处理手册编写委员会.地基处理手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2000.55~82.
- [2] 董志良.堆载及真空预压砂井地基固结解析理论[J].水运工程,1992(1):1~7.
- [3] 黄生根,张希浩.地基处理与基坑支护工程[M].武汉:中国地质大学出版社,1997.233~261.
- [4] 柴玉卿.真空堆载联合预压法的固结与渗流研究[D].南京:河海大学,2001.

## Seepage Analysis for Vacuum-Surcharge Preloading Method

XU Ze-zhong<sup>1</sup>, LIU Shi-tong<sup>2</sup>, CAI Yu-qing<sup>1</sup>

(1. College of Traffic and Ocean Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;  
2. Headquarters of Expressway Construction of Jiangsu Province, Nanjing 210004, China)

**Abstract:** Based on Barron's co-vertical formulas, a seepage model for the vacuum-surcharge preloading method is developed, and a seepage equation and its analytical solution are given. In combination with the characteristics of subgrade construction in stages, a formula is deduced for calculation of seepage under the condition of loading in stages. With the formula, the number of vacuum pumps needed is checked, and the decrease of groundwater table and variation of seepage water pressure with depth are calculated, providing a basis for further decrease of electric power consumption in vacuum pumping. An example shows that the calculated result is in good agreement with the measured result.

**Key words:** vacuum preloading method; seepage quantity; foundation treatment

·简讯·

## 全国混凝土结构教学研讨会在河海大学召开

中国土木工程学会教育工作委员会主办的第七届全国混凝土结构教学研讨会于2002年5月18~20日在南京河海大学召开,来自全国100余所学校及有关出版社的共236位代表出席了会议.会议的主要议题有:①吕志涛院士、陈肇元院士作关于“21世纪的混凝土结构”和“混凝土结构的安全性和耐久性”报告;②周氏教授介绍新颁布的《混凝土结构设计规范》修改要点;③叶列平、蒋永生、沈蒲生、刘西拉作关于土木工程专业人才培养和钢筋混凝土结构教学改革方面的专题报告.

会议收到论文90余篇,其中82篇刊载在《河海大学学报(哲学社会科学版)》(土木工程专业教学研究专辑)上.会议论文涵盖了混凝土结构教学领域的各个方面:土木工程人才培养模式及教学计划,钢筋混凝土教材建设、教学改革和教学法研究,混凝土结构现代化教学手段和方法,毕业设计和实践性环节教学,复合型人才和创新思维能力培养等.会议论文内容广泛,学术水平高,充分展示了我国近年来混凝土结构教学领域的最新成果.

吴胜兴 供稿