

砂井地基固结分析半解析方法的改进

赵维炳

(河海大学农水系, 南京)

提 要

本文改进了真空预压砂井地基固结分析半解析方法, 使它也适用于堆载预压和成层地基情况。其计算简便, 对加固面积和砂井根数无限制, 可考虑土的粘弹性、固结三向性、砂井群共同作用、井阻和涂抹的影响。改进后侧向位移计算结果的精度比原方法有很大提高。

一、引 言

真空预压、堆载预压、真空联合堆载预压结合砂井排水加固饱和软粘土地基技术已得到广泛应用。砂井地基固结分析方法目前主要有两种。其一为以巴隆公式为基础的解析方法, 它只能求加固区中点地面沉降。其二为边界元或有限元联立解位移和孔隙压力的数值方法, 常需假定为平面应变固结且不计土的粘弹性和井固涂抹的影响。钱家欢教授和笔者提出的砂井地基固结分析的半解析方法中, 孔隙压力按解析解计算, 位移数值求解, 克服了前两种方法的缺陷^[1]。但是, 它只适用于半无限大均质地基, 所求侧向位移约比实测值大一倍, 本文对此作了改进。

二、孔隙压力的计算

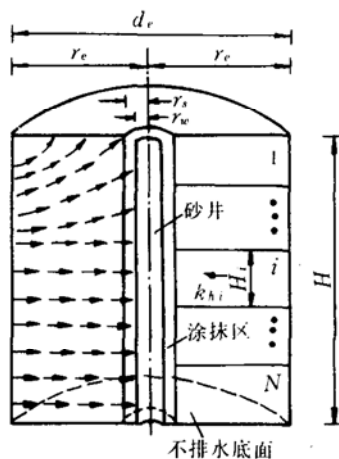


图1 单井排水情况

从工程实用上看, 计算砂井地基内孔隙压力时, 可不计总应力随时间变化的影响^[2], 从而可按解析解计算。

饱和均质粘弹性地基轴对称固结普遍理论解已由笔者导出^[3], 其中可考虑井阻和涂抹的影响及径向和竖向渗流的共同作用。若不计竖向渗流作用, 它可近似用于图1所示成层地基情况, i 土层内深度为 z 处孔隙水压力按下式计算

$$u = u_0 - (u_0 + u_v) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{4}{(2m-1)\pi} \times \sin \frac{(2m-1)\pi z}{2H} T_{mi}(t) \quad (1)$$

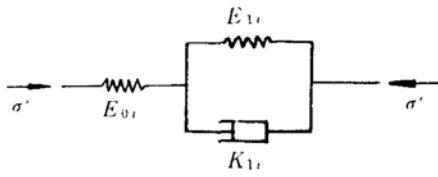


图2 Merchant模型

其中

$$\frac{\lambda_{1i}}{\lambda_{2i}} = -\frac{1}{2} [k_{mi} + \eta_{1i} + a_{1i}\eta_{1i} \pm \sqrt{(k_{mi} + \eta_{1i} + a_{1i}\eta_{1i})^2 - 4k_{mi}\eta_{1i}}]$$

$$k_{mi} = \frac{(2m-1)^2 n^2 f(n)}{(2m-1)^2 n^2 f(n) + (n^2 - s^2)G} \times \frac{2k_{hi}}{3(1-2\mu_i)a_{0i}f(n)r_e^2 \gamma_w}$$

$$a_{0i} = 1/E_{0i}, \quad a_{1i} = E_{0i}/E_{1i}, \quad \eta_{1i} = E_{1i}/K_{1i}$$

$$G = \frac{8H^2 \bar{k}_h}{\pi^2 r_w^2 k_w} \text{ 为井阻因子;}$$

$$\bar{k}_h = \frac{\sum_{i=1}^N k_{hi} H_i^2}{\sum_{i=1}^N H_i^2}$$

$$n = r_e/r_w, \quad s = r_s/r_w$$

$$f(n) = \frac{n^2}{n^2 - s^2} \ln \frac{n}{s} - \frac{3n^2 - s^2}{4n^2} + \frac{k_h}{k_s} \frac{n^2 - s^2}{n^2} \ln s$$

γ_w 为水容重, k_w 为砂井中渗透系数, 其余符号见图1, 2。

式中 u_0 为堆载引起的初始孔隙压力, u_v 为抽真空压力, H 为砂井长度。为简化计算, 假设加固区以下、砂井深度以内真空压力均匀分布, 终值($t \rightarrow \infty$)等于膜下真空压力。土骨架用图2所示Merchant模型模拟, 时间函数 $T_{mi}(t)$ 为

$$T_{mi}(t) = 1 - \frac{k_{mi} + \lambda_{2i}}{\lambda_{2i} - \lambda_{1i}} e^{\lambda_{1i}t} + \frac{k_{mi} + \lambda_{1i}}{\lambda_{2i} - \lambda_{1i}} e^{\lambda_{2i}t} \quad (2)$$

三、位移积分公式及数值离散

图3所示层状地基内一点 P , 沿 $k=x, y, z$ 方向位移 w_k 的积分公式为

$$\begin{aligned} w_k(P) = & \int_{\Gamma_1} [p + a_{11}\eta_{11} \int_0^t p(\tau) e^{-\eta_{11}(t-\tau)} d\tau] w_z^k d\Gamma \\ & - \sum_{i=2}^{N-1} \int_{\Gamma_i} [\int_0^t \sigma_{jz}(\tau) [a_{1i-1}\eta_{1i-1} e^{-\eta_{1i-1}(t-\tau)} \\ & - a_{1i}\eta_{1i} e^{-\eta_{1i}(t-\tau)}] d\tau] w_j^k d\Gamma \\ & - \sum_{i=1}^N \int_{\Omega_i} [u + a_{1i}\eta_{1i} \int_0^t u(\tau) e^{-\eta_{1i}(t-\tau)} d\tau] \\ & \times \epsilon_0^k d\Omega \end{aligned} \quad (3)$$

式中三项分别反映地面堆载 p , 层间界面效应及地基内孔隙水压力 u 的影响, $\sigma_{jz}(j=x, y, z)$ 为总应力分量, 粘弹性参数 $a_{0i}, a_{1i}, \eta_{1i}$ 同前, 基本解 w_j^k 和 ϵ_0^k 分别为层状弹性地基(弹模 $E_i = E_{0i}$)内源点 P 沿 k 方向作用单位集中力时, 积分点 j 方

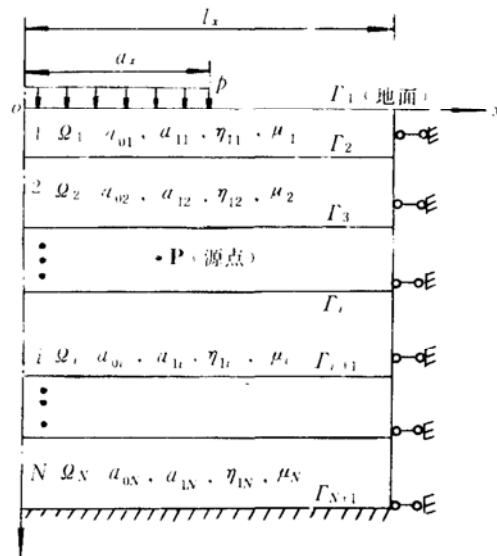


图3 成层地基边界条件

向的位移分量和体积应变(见下节)。

为简化计算, 设 σ_{jz} 不随时间变化。记

$$f_i^k = \int_{\Gamma_i} \sigma_{jz} w_j^k d\tau, \quad g_{ii}^k = \int_{\Omega_i} u_o \varepsilon_v^k d\Omega, \quad g_{vi}^k = \int_{\Omega_i} u_v \varepsilon_v^k d\Omega \quad (4)$$

它们经数值积分得到。因此, 式(3)可写成

$$w_k(P) = f_i^k [1 + a_{11}(1 - e^{-\eta_{11}t})] - \sum_{i=2}^{N-1} f_i^k [a_{1i-1}(1 - e^{-\eta_{1i-1}t}) - a_{1i}(1 - e^{-\eta_{1i}t})] - \sum_{i=1}^N [g_{ii}^k(1 + a_{1i}(1 - e^{-\eta_{1i}t})) - (g_{ii}^k + g_{vi}^k) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{4}{(2m-1)\pi} \sin \frac{(2m-1)\pi z_i^*}{2H} T_{mi}^*(t)] \quad (5)$$

式中 z_i^* 为 i 土层平均深度,

$$T_{mi}^* = (1 + a_{1i}) - \frac{k_{mi} + (1 + a_{1i})\lambda_{2i}}{\lambda_{2i} - \lambda_{1i}} e^{\lambda_{1i}t} + \frac{k_{mi} + (1 + a_{1i})\lambda_{1i}}{\lambda_{2i} - \lambda_{1i}} e^{\lambda_{2i}t}$$

这样, 求 t 时刻位移时, 不必存贮 t 时刻以前的孔隙压力和总应力, 大大减少了存贮量。

四、层状弹性地基基本解

不计重力作用时, 三维弹性力学问题位移表示的基本方程为^[4]

$$w_{j,kk} + \frac{1}{1-2\mu_i} w_{k,kj} = 0 \quad (6)$$

法向应力以压力为正, 弹性方程为

$$\sigma_{jk} = -G_i (w_{j,k} + w_{k,j} + \frac{2\mu_i}{1-2\mu_i} w_{l,l} \delta_{jk}) \quad (7)$$

式中 $j, k, l = x, y, z$; i 为土层号, $G_i = \frac{1}{2(1+\mu_i)a_{0i}}$

只考虑关于 x 和 y 轴双向对称情况。令

$$\left. \begin{aligned} w_x &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} A_{mn}^x \sin \lambda_1 x \cos \lambda_2 y \\ w_y &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} A_{mn}^y \cos \lambda_1 x \sin \lambda_2 y \\ w_z &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} A_{mn}^z \cos \lambda_1 x \cos \lambda_2 y \\ \tau_{xz} &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} B_{mn}^x \sin \lambda_1 x \cos \lambda_2 y \\ \tau_{yz} &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} B_{mn}^y \cos \lambda_1 x \sin \lambda_2 y \\ \sigma_z &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} B_{mn}^z \cos \lambda_1 x \cos \lambda_2 y \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中 $A_{mn}^x, A_{mn}^y, A_{mn}^z, B_{mn}^x, B_{mn}^y, B_{mn}^z$ 为 z 的待定函数, $\lambda_1 = \frac{m\pi}{l_x}, \lambda_2 = \frac{n\pi}{l_y}$, l_x 和 l_y 分别为计算区域的长度和宽度, 参见图3。

m 和 n 同时为零时, 对应于二维压缩情况, 其应力和位移公式众所周知, 此处不再赘述。以下只考虑 m 和 n 不同时为零的情况。式(8)代入式(6)后按 Laplace 变换方法求解, 并将结

果代入式(7), 得

$$\begin{Bmatrix} A(z) \\ B(z) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_i''(h) & \phi_i'''(h) \\ \phi_i''(h) & \phi_i'''(h) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A(z_i) \\ B(z_i) \end{Bmatrix} \quad (9)$$

式中 $\{A(z)\} = [A_{mn}^x(z), A_{mn}^y(z), A_{mn}^z(z)]^T$, $\{B(z)\} = [B_{mn}^x(z), B_{mn}^y(z), B_{mn}^z(z)]^T$,

$$h = z - z_i, \quad z_i \leq z \leq z_{i+1}$$

$$\begin{aligned} [\phi''(h)] &= \begin{bmatrix} \text{ch}\xi h + \frac{\lambda_1^2 h}{2(1-\mu_i)\xi} \text{sh}\xi h & \frac{\lambda_1 \lambda_2 h}{2(1-\mu_i)\xi} \text{sh}\xi h & \frac{\lambda_1}{2(1-\mu_i)\xi} ((1-2\mu_i)\text{sh}\xi h + \xi h \text{ch}\xi h) \\ \frac{\lambda_1 \lambda_2 h}{2(1-\mu_i)\xi} \text{sh}\xi h & \text{ch}\xi h + \frac{\lambda_2^2 h}{2(1-\mu_i)\xi} \text{sh}\xi h & \frac{\lambda_2}{2(1-\mu_i)\xi} ((1-2\mu_i)\text{sh}\xi h + \xi h \text{ch}\xi h) \\ \frac{\lambda_1}{2(1-2\mu_i)\xi} ((1-2\mu_i)\text{sh}\xi h - \xi h \text{ch}\xi h) & \frac{\lambda_2}{2(1-\mu_i)} ((1-2\mu_i)\text{sh}\xi h - \xi h \text{ch}\xi h) & \text{ch}\xi h - \frac{\xi h}{2(1-\mu_i)} \text{sh}\xi h \end{bmatrix} \\ [\phi'''(h)] &= \frac{-1}{4(1-\mu_i)\xi G_i} \begin{bmatrix} 4(1-\mu_i)\text{sh}\xi h - \frac{\lambda_1^2}{\xi^2}(\text{sh}\xi h - \xi h \text{ch}\xi h) & -\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\xi^2}(\text{sh}\xi h - \xi h \text{ch}\xi h) & \frac{\lambda_1}{\xi} \xi h \text{ch}\xi h \\ -\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\xi^2}(\text{sh}\xi h - \xi h \text{ch}\xi h) & 4(1-\mu_i)\text{sh}\xi h - \frac{\lambda_2^2}{\xi^2}(\text{sh}\xi h - \xi h \text{ch}\xi h) & \frac{\lambda_2}{\xi} \xi h \text{sh}\xi h \\ -\frac{\lambda_1}{\xi} \xi h \text{sh}\xi h & -\frac{\lambda_2}{\xi} \xi h \text{sh}\xi h & (3-4\mu_i)\text{sh}\xi h - \xi h \text{ch}\xi h \end{bmatrix} \\ [\phi^{(iv)}(h)] &= -G_i \begin{bmatrix} \xi \text{sh}\xi h + \frac{\lambda_1^2}{(1-\mu_i)\xi} (\mu_i \text{sh}\xi h + \xi h \text{ch}\xi h) & \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(1-\mu_i)\xi} (\mu_i \text{sh}\xi h + \xi h \text{ch}\xi h) & \frac{\lambda_1}{1-\mu_i} \xi h \text{sh}\xi h \\ \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(1-\mu_i)\xi} (\mu_i \text{sh}\xi h + \xi h \text{ch}\xi h) & \xi \text{sh}\xi h + \frac{\lambda_2^2}{(1-\mu_i)\xi} (\mu_i \text{sh}\xi h + \xi h \text{ch}\xi h) & \frac{\lambda_2}{1-\mu_i} \xi h \text{sh}\xi h \\ -\frac{\lambda_1}{1-\mu_i} \xi h \text{sh}\xi h & -\frac{\lambda_2}{1-\mu_i} \xi h \text{sh}\xi h & \frac{\xi}{1-\mu_i} (\text{sh}\xi h - \xi h \text{ch}\xi h) \end{bmatrix} \\ [\phi^{(v)}(h)] &= \begin{bmatrix} \text{ch}\xi h + \frac{\lambda_1^2}{2(1-\mu_i)\xi} h \text{sh}\xi h & \frac{\lambda_1 \lambda_2 h}{2(1-\mu_i)\xi} \text{sh}\xi h & \frac{-\lambda_1}{2(1-\mu_i)\xi} ((1-2\mu_i)\text{sh}\xi h - \xi h \text{ch}\xi h) \\ \frac{\lambda_1 \lambda_2 h}{2(1-\mu_i)\xi} \text{sh}\xi h & \text{ch}\xi h + \frac{\lambda_2^2 h}{2(1-\mu_i)\xi} \text{sh}\xi h & \frac{-\lambda_2}{2(1-\mu_i)\xi} ((1-2\mu_i)\text{sh}\xi h - \xi h \text{ch}\xi h) \\ \frac{-\lambda_1}{2(1-\mu_i)\xi} ((1-2\mu_i)\text{sh}\xi h + \xi h \text{ch}\xi h) & \frac{-\lambda_2}{2(1-\mu_i)\xi} ((1-2\mu_i)\text{sh}\xi h + \xi h \text{ch}\xi h) & \text{ch}\xi h - \frac{\xi h}{2(1-\mu_i)} \text{sh}\xi h \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\xi = \sqrt{\lambda_1^2 + \lambda_2^2}$$

设源点P位于第j土层内, 有

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} A^-(z_p) \\ B^-(z_p) \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} \phi_j''(z_p - z_j) & \phi_j'''(z_p - z_j) \\ \phi_j''(z_p - z_j) & \phi_j'''(z_p - z_j) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{j-1}''(z_j - z_{j-1}) & \phi_{j-1}'''(z_j - z_{j-1}) \\ \phi_{j-1}''(z_j - z_{j-1}) & \phi_{j-1}'''(z_j - z_{j-1}) \end{bmatrix} \dots \\ &\dots \begin{bmatrix} \phi_1''(z_2 - z_1) & \phi_1'''(z_2 - z_1) \\ \phi_1''(z_2 - z_1) & \phi_1'''(z_2 - z_1) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A(z_1) \\ B(z_1) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{j-1}'' & \phi_{j-1}''' \\ \phi_{j-1}'' & \phi_{j-1}''' \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A(z_1) \\ B(z_1) \end{Bmatrix} \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} A(Z_{N+1}) \\ B(Z_{N+1}) \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} \phi_N''(Z_{N+1} - Z_N) & \phi_N'''(Z_{N+1} - Z_N) \\ \phi_N''(Z_{N+1} - Z_N) & \phi_N'''(Z_{N+1} - Z_N) \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} \phi_{j+1}''(Z_{j+2} - Z_{j+1}) & \phi_{j+1}'''(Z_{j+2} - Z_{j+1}) \\ \phi_{j+1}''(Z_{j+2} - Z_{j+1}) & \phi_{j+1}'''(Z_{j+2} - Z_{j+1}) \end{bmatrix} \\ &\begin{bmatrix} \phi_j''(Z_{j+1} - Z_p) & \phi_j'''(Z_{j+1} - Z_p) \\ \phi_j''(Z_{j+1} - Z_p) & \phi_j'''(Z_{j+1} - Z_p) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A^+(Z_p) \\ B^+(Z_p) \end{Bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \phi_{j-1}'' & \phi_{j-1}''' \\ \phi_{j-1}'' & \phi_{j-1}''' \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A^+(z_p) \\ B^+(z_p) \end{Bmatrix} \quad (11) \end{aligned}$$

在 $Z = Z_p$ 面上, 有 $\{A^+(Z_p)\} = \{A^-(Z_p)\}$, $\{B^+(Z_p)\} = \{B^-(Z_p)\} + \{B^*\}$, 其中

$$\{B^*\} = \frac{4}{l_x l_y} [\delta_{xk} \sin \lambda_1 x_p \cos \lambda_2 y_p, \delta_{yk} \cos \lambda_1 x_p \sin \lambda_2 y_p, \delta_{zk} \cos \lambda_1 x_p \cos \lambda_2 y_p]^T,$$

$$\delta_{lk} = \begin{cases} 0 & l \neq k \\ 1 & l = k \end{cases}$$

设 Γ_{N+1} 为固定边界, Γ_1 为自由边界, 有 $\{A(Z_{N+1})\} = \{0\}$, $\{B(Z_1)\} = \{0\}$ 。

因此, 由式(10), (11)解得

$$\{A(Z_1)\} = - \left([\phi''_{\Gamma} \phi'''_{\Gamma}] \begin{bmatrix} \phi''_{\Gamma} \\ \phi'''_{\Gamma} \end{bmatrix} \right)^{-1} [\phi'''_{\Gamma}] \{B^*\} \quad (12)$$

再由式(9)求出任意深度处 $\{A(Z)\}$, $\{B(Z)\}$ 。

由式(8)可得

$$\varepsilon_v = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} A_{mn}^v \cos \lambda_1 x \cos \lambda_2 y \quad (13)$$

式中 $A_{mn}^v = -\frac{1-2\mu_i}{1-\mu_i} [\lambda_1 \operatorname{ch} \xi h \lambda_2 \operatorname{ch} \xi h \xi \operatorname{sh} \xi h] \{A(Z_i)\} + \frac{1-2\mu_i}{2(1-\mu_i)G_i \xi} [\lambda_1 \operatorname{sh} \xi h \lambda_2 \operatorname{sh} \xi h \xi \operatorname{ch} \xi h] \{B(Z_i)\}$ 。

五、初始孔隙压力和总应力的计算

堆载预压时, 必须计算初始孔隙压力和总应力。若分级堆载, 移动时间坐标 t 的零点逐级计算后叠加即可, 故只需考虑一次瞬时加载情况。

加载瞬时, 孔隙水来不及排出, 土体体积应变等于零, 总应力指标 $\mu_i = 0.5$ 。因在地面堆载, 令 $z_p = 0$, 由式(12)得

$$\{A(z_1)\} = -[\phi''_{\Gamma}]^{-1} [\phi'''_{\Gamma}] \{B(z_1)\} \quad (14)$$

式中 $\{B(z_1)\} = [0, 0, \frac{4}{l_x l_y} \int_0^{a_x} \int_0^{a_y} p \cos \lambda_1 x_p \cos \lambda_2 y_p dy_p dx_p]^T$, p 为地面堆载。

由式(9)求出各点 $\{A(z)\}$ 和 $\{B(z)\}$, 代入式(8)叠加求出总应力 τ_{xz} , τ_{yz} 和 σ_z , 再由式(7), (8)及 $\{A(z)\}$ 叠加求出 τ_{xy} , σ_x , σ_y 。

初始孔隙压力按以下Henkel公式估算

$$u_0 = \frac{1}{3} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) + \frac{\alpha}{3} [(\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_y)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)]^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

式中 α 称为Henkel孔隙压力系数。

六、真空预压计算实例

某真空预压加固软基现场试验区长 $2a_x = 80\text{m}$, 宽 $2a_y = 50\text{m}$, 真空压力 $u_v = -80\text{kPa}$ 。砂井梅花形布置, 间距 1.2m , 单井有效排水区半径 $r_e = 63\text{cm}$, 砂井半径 $r_w = 3.5\text{cm}$, 渗透系数 $k_w = 0.01\text{cm/s}$, 井长 10m 。地面以下 10m 厚土层为均质滨海相沉积淤泥, 具有显著的流变性质, Merchant模型参数为 $a_0 = 1.089(\text{MPa})^{-1}$, $a_1 = 0.14951$, $\eta_1 = 3.29 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}$, 渗透系数 $k_h = 4.5 \times 10^{-6}\text{cm/s}$, 泊松比 $\mu = 0.42$ 。涂抹参数取 $s = 1.2$, $k_h/k_s = 7.0$ 。详细情况见文献[1]。计算区域长 $l_x = 20a_x$, 宽 $l_y = 20a_y$, 厚度 $H = 10\text{m}$, 级数取前30项。

加固区地面中心点沉降时程线, 中心点以下沉降和加固区边缘外5m侧向位移沿深度分布分别见图4—6。图5中砂井下部深度内沉降沿深度变化率较小, 反映了井阻影响。图6中侧向位移为负值说明土体发生侧向收缩变形, 这有利于增强加固效果。从图4—6可知, 改进后计算结果与工地量测资料相当吻合, 尤其是侧向位移计算结果的精度比改进前大大提高。

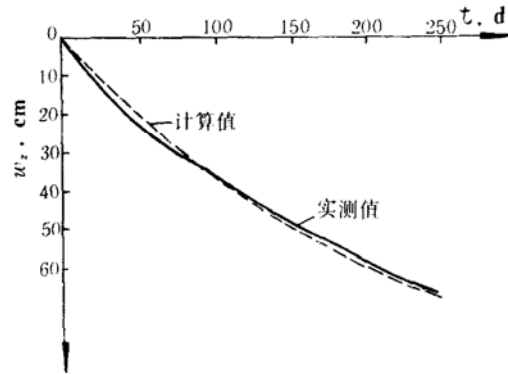


图4 加固区中心点地面沉降时程线

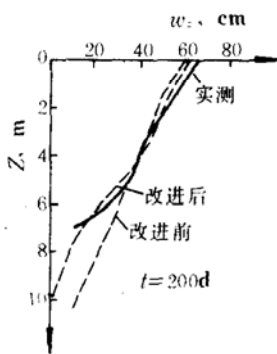


图5 加固区中心点以下沉降沿深度分布

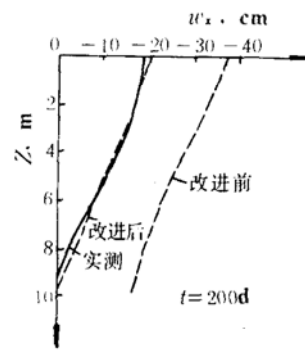


图6 加固区外5m侧向位移沿深度分布

七、堆载预压计算实例

表1

层序	土质名称	厚度(cm)	$k_{hi}(\text{cm/s})$	μ_i	$a_{oi}(\text{MPa})^{-1}$	a_{it}	$\eta_{it}(\text{s}^{-1})$
1	山皮土	70	1.00×10^{-4}	0.37	0.3537	0	0
2	新吹填土	205	2.09×10^{-7}	0.37	2.8988	0.54395	1.02×10^{-4}
3	吹填土	225	2.09×10^{-7}	0.31	1.4790	0.54395	1.02×10^{-4}
4	淤泥	296	2.15×10^{-7}	0.31	1.7174	0.42014	1.04×10^{-4}
5	粘土	379	8.00×10^{-8}	0.25	0.6816	1.10526	2.50×10^{-4}
6	淤泥质粘土	150	2.59×10^{-7}	0.25	0.7656	0.71248	7.90×10^{-5}
7	淤泥	225	2.59×10^{-7}	0.25	0.5784	0.71248	7.90×10^{-5}
8	淤泥质粘土	375	9.94×10^{-8}	0.25	0.3396	0.89130	6.40×10^{-5}
9	亚粘土	96	7.00×10^{-8}	0.25	0.4248	0.50537	1.18×10^{-4}

某地有48万 m^2 超软基分别用真空预压、堆载预压及真空联合堆载预压三种方法加固。大面积施工前,进行了三种不同方法的现场对比试验。其中堆载预压试验区长 $2a_x=80m$,宽 $2a_y=80m$,四周斜坡宽15m,堆载压力97.4kPa,分级加载,如图7所示。采用塑料板排水,板长20.21m,间距1.30m,正方形布置,单井有效排水区半径 $r_e=73.3cm$,排水板等效井径 $d_w=2r_w=4.96cm$,渗透系数 $k_w=0.04cm/s$ 。涂抹参数取 $s=1.2$, $k_h/k_s=7.0$ 。排水板深度以上地基分九层,土的有关参数见表1, Henkel孔隙压力参数 $\alpha=2.0$ 。计算区域长 $l_x=120m$,宽 $l_y=120m$,总厚度 $H=20.21m$,级数取前18项计算

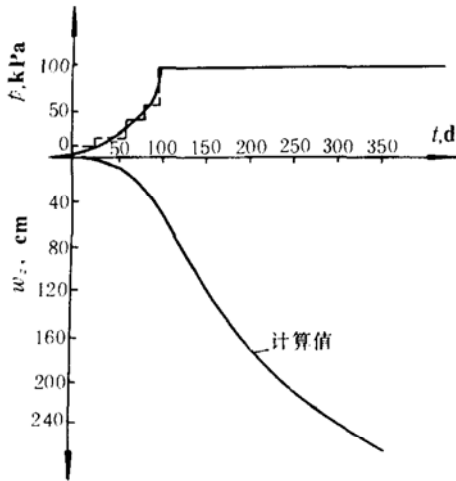


图7 堆载和地面最大沉降时程线

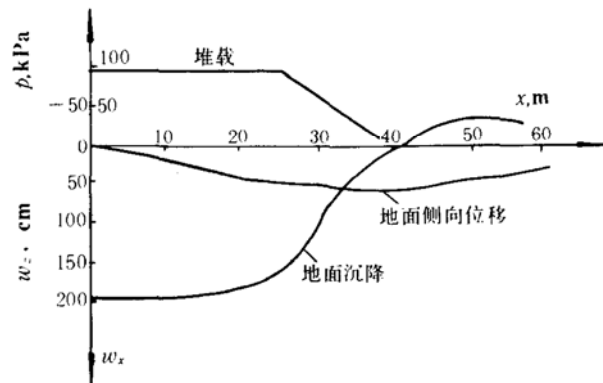


图8 地面沉降和侧向位移水平向分布(t=236d计算值)

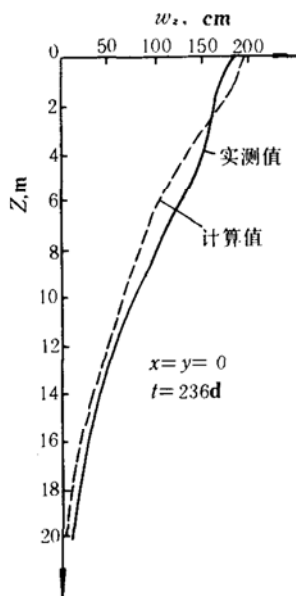


图9 沉降沿深度分布(t=236d)

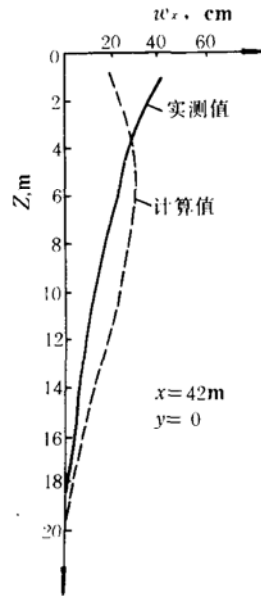


图10 侧向位移沿深度分布

部分计算结果如图7—10所示。图8和图9中侧向位移大于零,说明堆载预压时发生侧向膨胀挤出变形,与真空预压时相反。受此影响,堆载预压时加固区外地面隆起,真空预压时则略有沉降。由图9和图10知,计算结果与工地量测资料基本吻合,侧向位移计算值上部偏小而下部偏大与计算中山皮土的弹模取值偏大和没有考虑固结过程中孔隙压力由加固区内向外扩散的影响等有关。应指出,表1中 k_{hi} 和 μ_i 是根据有关资料经验估算的, α_{oi} , α_{1i} 和 η_{1i} 由短历时压缩试验资料确定,可见所用参数是欠准确的,它无疑影响到计算结果的精度。

八、结 语

半解析方法分析砂井地基固结变形,可考虑固结的三向性、土的粘弹性、砂井阻力和涂抹以及砂井群共同作用的影响,具有计算简便、占用计算机容量小、时间短、费用省等优点。经改进和推广,该方法可适用于成层地基真空预压、堆载预压或真空联合堆载预压加固效果的计算,所获沉降和侧向位移计算结果均与工地量测资料吻合,计算结果精度比原方法有较大提高。这些充分说明改进后的砂井地基固结分析半解析方法,具有较广泛的适用性,其结果是正确的、合理的。

南京水科院土工所和一航局科研所提供工地量测资料

参 考 文 献

- [1] 钱家欢、赵维炳,真空预压砂井地基固结分析的半解析方法,中国科学, A辑, No.4, 1988, pp.439—448
- [2] 赵维炳、钱家欢,砂井固结理论应用中的几个问题,港口工程, No.2, 1988, pp.21—28。
- [3] 赵维炳,广义Voigt模型模拟的饱和土体轴对称固结理论解,河海大学学报, Vol.16, No.5, 1988, pp.47—56。
- [4] 徐芝纶,弹性力学,上册,人民教育出版社,北京,1979年第一版, pp.265—266。

Improvement of Semi-analytic Method for Consolidation of Foundation with Sand Drains

Zhao Wei bing

(Hohai University, Nanjing)

Abstract

The Semi-analytic method for vacuum preloading of a foundation with sand drains is improved in this paper, so that it can be also applicable to the case of surcharge preloading and multiple layered foundation. The Computation is simple and the area of improvement and the number of sand drains are not confined. This method takes into account the effect of clay viscoelasticity, 3-D consolidation, sand drain group, well resistance and smear. The calculated results of lateral movement of the improved method are checked more fairly well with field measurements than those of the unimproved ones.