

文章编号: 1000-7598 (2011) 10-2944-07

考虑影响区真实形状的竖向排水井地基固结解

谢康和, 余 坤, 童 磊, 王 坤

(浙江大学 岩土工程研究所, 杭州 310058)

摘 要: 针对现有竖向排水井地基固结解析理论对影响区一律采用圆形等效假定的缺陷, 研究了影响区真实形状为正六边形的按梅花形布置的竖向排水井地基的固结问题。通过建立新固结方程和引入新的边界条件, 并考虑土体水平渗透系数变化, 得到了相应的解析解。对于土体水平渗透系数的 3 种变化模式, 分别给出了各种模式下的特殊解。在此基础上, 分析了 3 种模式下 3 个主要的无量纲参数对地基固结性状的影响, 并比较了计算结果和现有理论结果。分析结果表明, 影响区和涂抹扰动区范围越大, 固结越慢; 土体的最大与最小水平渗透系数之比越小, 固结越快; 在相同条件下, 考虑扰动区渗透系数线性变化的模式 2 固结最快, 而假定扰动区渗透系数不变的模式 1 的解与现有理论解相当接近, 验证了现有竖向排水井地基固结解析理论中对影响区采用圆形等效假定的合理性。

关 键 词: 竖向排水井; 固结; 正六边形影响区; 水平渗透系数

中图分类号: TU 431

文献标识码: A

Analytical solution for consolidation by vertical drains considering actual shape of influence zone

XIE Kang-he, YU Kun, TONG Lei, WANG Kun

(Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: In view of the shortcomings that the influence zone of vertical drain is always assumed to be a circle in the existing analytical consolidation theories for vertical drains; the consolidation by vertical drains installed in a regular triangle pattern with a regular hexagon shape of influence zone was studied. By establishing new consolidation equation and introducing new boundary conditions, the general analytical solutions accounting for variation of soil horizontal permeability coefficient were derived. Then, according to three types of variation patterns of the horizontal permeability, the corresponding solutions were obtained. Furthermore, the influences of three main dimensionless parameters on the consolidation behavior were analyzed, and the obtained solutions were compared with the existing ones. The results show that the greater the size of influence zone or disturbed smear zone is, the slower the consolidation is; the less the ratio of the maximum to the minimum horizontal permeability coefficient of soil is, the faster the consolidation is; under the same conditions, the consolidation of pattern two considering a linearly changed permeability coefficient within the disturbed zone is the fastest and the solutions of pattern one considering a constant permeability coefficient within the disturbed zone are very close to the existing analytical ones, which indicated that the assumption that the influence zone of vertical drain is a circle adopted in the existing theories is reasonable.

Key words: vertical drains; consolidation; influence zone of regular hexagon; horizontal permeability coefficient

1 引 言

设置竖向排水井(包括砂井、袋装砂井、塑料排水带等, 以下统称砂井)是软土地基处理的一种重要方法。等应变条件下的砂井地基固结解析理论, 由于其简便实用, 仍然是目前指导砂井地基设计的

主要理论基础。然而, 现有的解析理论如 Hansbo^[1], 谢康和^[2-3]、ZENG^[4]、WANG^[5]、TANG^[6-8]等都建立在将砂井原真实拥有的多边形影响区简化为等面积圆形的基础上, 并且认为扰动涂抹区土体的水平渗透系数为一常数, 而其余土体未扰动。但在实际工程中, 整个影响区的土体都受到施工扰动的影响,

收稿日期: 2011-02-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50679074)。

第一作者简介: 谢康和, 男, 1956 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 从事岩土工程的教学和科研。E-mail: zdkhxie@zju.edu.cn

通讯作者: 余坤, 男, 1986 年生, 硕士研究生, 主要从事软土地基处理方法研究。E-mail: kun_yu@yahoo.cn

其渗透性呈现连续变化，同时现有理论并未研究过对影响区进行简化所引起的误差。鉴于此，本文以梅花形（即正三角形）布置的砂井地基为例，研究考虑影响区真实形状和土体水平渗透系数变化的砂井地基固结问题，并与现有理论作对比分析。

2 固结方程推导

图 1 为考虑影响区土体水平渗透系数连续变化的梅花形布置砂井地基简化模型，图中 H 为地基软土层厚度； r_w 、 r_s 分别为砂井和强涂抹区半径； k_w 为井料的渗透系数； k_v 为地基原状土竖向渗透系数； $k_h(r)$ 为影响区内土体的水平向渗透系数； p_0 为均布荷载； z 为竖向坐标；地基顶面排水。

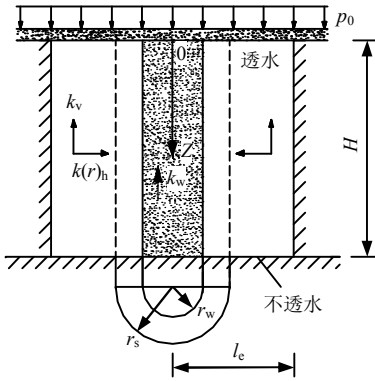


图 1 砂井地基简化模型

Fig.1 Simplified model of a soil-drain system

2.1 基本假定

本文作如下主要假定：①等应变条件成立；②土中水的渗流服从 Darcy 定律；③砂井打穿软黏土层，砂井内孔隙水压力沿径向不变，任一深度处流入砂井的水量等于从砂井中流出水的增量；④荷载一次瞬时施加，在地基中引起的初始孔压沿深度均匀分布；⑤根据受施工扰动程度不同，将砂井影响区划分为强涂抹区和弱涂抹区，其土体水平向渗透系数连续变化。

2.2 固结基本方程推导

由于砂井按梅花形布置（设间距为 S ），故砂井的真实影响区是边长为 $S/2$ 的正六边形，其内切圆直径为 $2l_e$ ，如图 2 所示。将砂井和强涂抹区的横截面等效为正六边形，建立坐标系，根据面积等效原则，有

$$l_w = \sqrt{\frac{\pi}{2\sqrt{3}}} r_w = \frac{r_w}{1.05}; l_s = \frac{r_s}{1.05} \quad (1)$$

式中： l_w 、 l_s 分别为等效后的砂井和强涂抹区的内

切圆半径。

图 3 为砂井影响区内（包括强涂抹区 $l_w \leq y \leq l_s$ 和弱涂抹区 $l_s \leq y \leq l_e$ ）土体的水平向渗透系数 $k_h(y)$ 沿 y 轴的变化模型。假定其具有如下形式：

$$k_h(y) = k_s f(y) \quad (2)$$

式中： k_s 为强涂抹区内边缘处（ $y = l_w$ ）土体的水平渗透系数； k_h 为弱涂抹区外边缘处（ $y = l_e$ ）土体的水平渗透系数； $f(y)$ 为描述 $k_h(y)$ 随 y 轴连续变化的函数，其值随着离砂井中心距离的增大从 1 增大到 k_h/k_s 。

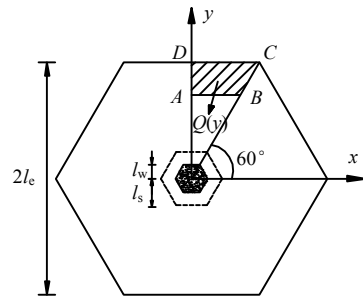


图 2 砂井横截面计算简图

Fig.2 Cross-section of a soil-drain system

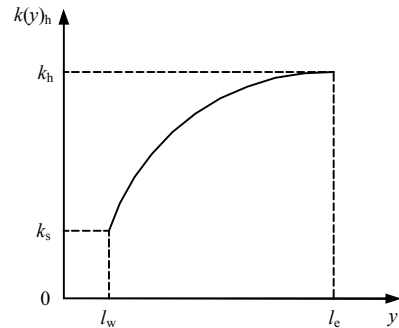


图 3 土体水平渗透系数变化模型

Fig.3 Representation of variation of horizontal permeability coefficient in the soil

取图 2 中填充部分为研究对象，则横截面为 $ABCD$ 、厚度为 dz 的土体单元（根据对称性可知， AD 、 DC 、 CB 面均为不透水面）在 dt 时间内流出的水量 $dQ(y)$ 为

$$dQ(y) = \left(\frac{k_s f(y)}{\gamma_w} \int_0^{\frac{y}{\sqrt{3}}} \frac{\partial u}{\partial y} dx - \frac{k_v}{\gamma_w} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \frac{l_e^2 - y^2}{2\sqrt{3}} \right) dz dt \quad (3)$$

式中： $u = u(x, y)$ 为地基土体的超静孔压（以下简称孔压）； $\bar{u}$ 为土中任一深度的平均孔压； γ_w 为水的重度。

该土体单元的体积变化 dV 为

$$dV = \frac{l_e^2 - y^2}{2\sqrt{3}} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} dz dt \quad (4)$$

根据 $dQ = dV$ 和等应变假定, 有

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = -\frac{1}{E_s} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \quad (5)$$

$$\frac{k_s f(y)}{\gamma_w} \int_0^{\frac{y}{\sqrt{3}}} \frac{\partial u}{\partial y} dx = \frac{l_e^2 - y^2}{2\sqrt{3}} \left(\frac{k_v}{\gamma_w} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} + \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \right) \quad (6)$$

式中: ε_v 为土体任一深度的体积应变。

井周土体与砂井之间的流量连续方程为

$$12dz \frac{k_s f(y)}{\gamma_w} \int_0^{\frac{y}{\sqrt{3}}} \frac{\partial u}{\partial y} dx \Big|_{y=l_w} = -2\sqrt{3} l_w^2 dz \frac{k_w}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_w}{\partial z^2} \quad (7)$$

$$\text{即} \quad \frac{\partial^2 u_w}{\partial z^2} = -\frac{2\sqrt{3}}{l_w^2} \frac{k_s f(y)}{k_w} \int_0^{\frac{y}{\sqrt{3}}} \frac{\partial u}{\partial y} dx \Big|_{y=l_w} \quad (8)$$

式中: u_w 为砂井内任一深度的孔压。

将式 (6) 代入式 (8), 可得

$$\frac{\partial^2 u_w}{\partial z^2} = -\frac{\gamma_w}{k_w} (n^2 - 1) \left(\frac{k_v}{\gamma_w} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} + \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \right) \quad (9)$$

式中: $n = l_e / l_w = 1.05 l_e / r_w$ 。

式 (5)~(9) 即为考虑影响区真实形状和土体水平渗透系数变化的砂井地基固结基本方程。与其相应的新的边界条件和初始条件如下:

$$\left. \begin{aligned} & \text{①} \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=l_e} = 0 \\ & \text{②} z=0 \text{ 时, } u_w = 0; \bar{u} = 0 \\ & \text{③} z=H \text{ 时, } \frac{\partial u_w}{\partial z} = 0; \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = 0 \\ & \text{④} y=l_w \text{ 时, } u = u_w \\ & \text{⑤} t=0 \text{ 时, } \bar{u} = u_0 = p_0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

3 方程求解

3.1 控制方程推导

令 $x = yv$, 并引入 $q = \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \frac{k_v}{\gamma_w} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2}$ (可见 q 与 y 无关), 则式 (6) 转化为

$$\frac{k_s f(y)}{\gamma_w} \int_0^{\frac{y}{\sqrt{3}}} \frac{\partial u(yv, y)}{\partial y} d(yv) = \frac{l_e^2 - y^2}{2\sqrt{3}} q \quad (11)$$

即

$$yf(y) \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_0^{\frac{\sqrt{3}}{3}} u(yv, y) dv \right) = \frac{\gamma_w}{k_s} \frac{l_e^2 - y^2}{2\sqrt{3}} q \quad (12)$$

又令 $\int_0^{\frac{\sqrt{3}}{3}} u(yv, y) dv = g(y)$, 则

$$\frac{\partial g(y)}{\partial y} = \frac{\gamma_w q}{2\sqrt{3} k_s f(y)} \left(\frac{l_e^2}{y} - y \right) \quad (13)$$

由求解条件④, 有

$$g(l_w) = \int_0^{\frac{\sqrt{3}}{3}} u(yv, y) dv \Big|_{y=l_w} = \frac{\sqrt{3}}{3} u_w \quad (14)$$

对式 (13) 两边关于 y 积分, 可得

$$g(y) = \frac{q \gamma_w}{2\sqrt{3} k_s} [A_0(y) l_e^2 - B_0(y)] + \frac{\sqrt{3}}{3} u_w \quad (15)$$

式中:

$$A_0(y) = \int_{l_w}^y \frac{1}{\varepsilon f(\varepsilon)} d\varepsilon; B_0(y) = \int_{l_w}^y \frac{\varepsilon}{f(\varepsilon)} d\varepsilon \quad (16)$$

则平均孔压 $\bar{u}$ 可表示为

$$\begin{aligned} \bar{u} &= \frac{2\sqrt{3}}{l_e^2 - l_w^2} \int_{l_w}^{l_e} \int_0^{\frac{y}{\sqrt{3}}} u(x, y) dx dy = \\ &= \frac{2\sqrt{3}}{l_e^2 - l_w^2} \int_{l_w}^{l_e} yg(y) dy = \\ &= \frac{q \gamma_w}{k_s (l_e^2 - l_w^2)} [A_1 l_e^2 - B_1] + u_w \end{aligned} \quad (17)$$

式中:

$$A_1 = \int_{l_w}^{l_e} y A_0(y) dy; B_1 = \int_{l_w}^{l_e} y B_0(y) dy \quad (18)$$

根据式 (17) 可得 q 的表达式:

$$q = \frac{k_s (\bar{u} - u_w) (l_e^2 - l_w^2)}{\gamma_w (A_1 l_e^2 - B_1)} \quad (19)$$

将式 (19) 分别联立式 (5) 和式 (9), 可得

$$\frac{k_s (l_e^2 - l_w^2)}{\gamma_w (A_1 l_e^2 - B_1)} (\bar{u} - u_w) + \frac{1}{E_s} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = \frac{k_v}{\gamma_w} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \quad (20)$$

$$\frac{k_s (l_e^2 - l_w^2)^2}{\gamma_w (A_1 l_e^2 - B_1)} (\bar{u} - u_w) + \frac{k_w l_w^2}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_w}{\partial z^2} = 0 \quad (21)$$

联立式 (20) 和式 (21), 可得到关于砂井孔压 u_w 的控制方程:

$$C_v \frac{\partial^4 u_w}{\partial z^4} - \frac{\partial^3 u_w}{\partial z^2 \partial t} - A \frac{\partial^2 u_w}{\partial z^2} + B \frac{\partial u_w}{\partial t} = 0 \quad (22)$$

式中:

$$A = \frac{2C_h}{l_e^2 F} \left[1 + \frac{k_v}{k_w} (n^2 - 1) \right]; B = \frac{2k_h(n^2 - 1)}{k_w F l_e^2} \quad (23)$$

令 F 的表达式为

$$F = \frac{2k_h(A l_e^2 - B l_e)}{k_s l_w^4 n^2 (n^2 - 1)} \quad (24)$$

根据式 (21) 和边界条件②、③, 可得边界条件:

$$\left. \begin{aligned} z=0 \text{ 时, } \frac{\partial^2 u_w}{\partial z^2} &= 0 \\ z=H \text{ 时, } \frac{\partial^3 u_w}{\partial z^3} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

3.2 求解方程

采用分离变量法^[9-11]求解式 (22), 假定:

$$u_w(z, t) = Z(z)T(t) \quad (26)$$

将式 (26) 代入式 (22), 可得

$$\frac{C_v Z^{(4)} - AZ''}{-Z'' + BZ} = -\frac{T'}{T} = \beta \quad (27)$$

式中: $\beta > 0$, 且 β 有无穷多个值 (记为 β_m , $m=1, 2, \dots$), 因此, Z 、 T 也有无穷多个值 (记为 Z_m , T_m)。进一步整理后可得常微分方程:

$$\left. \begin{aligned} C_v Z_m^{(4)} - (A - \beta_m) Z_m'' - B \beta_m Z_m &= 0 \\ T_m' + \beta_m T_m &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

作以下代换:

$$\lambda = -(A - \beta_m)/C_v; \rho = -B\beta_m/C_v \quad (29)$$

明显可见, $\rho < 0$, 则式 (28) 第 1 式的特征方程为

$$x^4 + \lambda x^2 + \rho = 0 \quad (30)$$

方程 (30) 的解可以表示为

$$\left. \begin{aligned} x_1^2 &= \frac{-\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 4\rho}}{2} > 0 \\ x_2^2 &= \frac{-\lambda - \sqrt{\lambda^2 - 4\rho}}{2} < 0 \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

式 (31) 说明常微分方程 (28) 第 1 式有 4 个特征根, 分别为两个相反的实根和两个共轭复数根, 即 $x = \pm x_1$, $x = \pm ix_2$, 其中 x_1 、 $x_2 > 0$, 且 $x_1 \neq x_2$ 。所以该方程的通解为

$$Z_m(z) = a_m \sin(x_2 z) + b_m \cos(x_2 z) + c_m \sinh(x_1 z) + d_m \cosh(x_1 z) \quad (32)$$

同时, 由式 (28) 第 2 式可得

$$T_m(t) = a_m' e^{-\beta_m t} \quad (33)$$

将式 (32)、(33) 代入式 (26), 得

$$u_w = \sum_{m=1}^{\infty} a_m' [a_m \sin(x_2 z) + b_m \cos(x_2 z) + c_m \sinh(x_1 z) + d_m \cosh(x_1 z)] e^{-\beta_m t} \quad (34)$$

利用边界条件式 (25) 可得

$$b_m = c_m = d_m = 0; x_2 = \frac{M}{H} \quad (35)$$

$$\text{式中: } M = \frac{2m-1}{2} \pi, \quad m=1, 2, \dots$$

故有

$$Z_m(z) = a_m \sin\left(\frac{Mz}{H}\right) \quad (36)$$

将其代入式 (27), 可得

$$\beta_m = C_v \frac{M^2}{H^2} + \frac{2C_h/l_e^2}{F+D} \quad (37)$$

式中:

$$D = \frac{8}{M^2} \frac{n^2 - 1}{n^2} G; G = \frac{k_h}{k_w} \left(\frac{H}{2l_w} \right)^2 \quad (38)$$

故式 (34) 可转变为

$$u_w = \sum_{m=1}^{\infty} A_{wm} \sin\left(\frac{Mz}{H}\right) e^{-\beta_m t} \quad (39)$$

将式 (39) 代入式 (21), 可得

$$\bar{u} = \sum_{m=1}^{\infty} A_m \sin\left(\frac{Mz}{H}\right) e^{-\beta_m t} \quad (40)$$

式中:

$$A_m = A_{wm} \left[1 + \frac{F}{D} \right] \quad (41)$$

根据三角函数的正交性和初始条件⑤: $t=0$ 时, $\bar{u} = u_0 = p_0$, 可得: $A_m = 2u_0/M$ 。

因此, 满足控制方程及其求解条件的解为

$$\left. \begin{aligned} u_w &= u_0 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{D}{F+D} \frac{2}{M} \sin\left(\frac{Mz}{H}\right) e^{-\beta_m t} \\ \bar{u} &= u_0 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{M} \sin\left(\frac{Mz}{H}\right) e^{-\beta_m t} \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

砂井地基中任一深度 z 处的固结度 U 和地基平均总固结度 $\bar{U}$ 分别为

$$\left. \begin{aligned} U &= 1 - \frac{\bar{u}}{u_0} = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M} \sin\left(\frac{Mz}{H}\right) e^{-\beta_m t} \\ \bar{U} &= \frac{1}{H} \int_0^H U dz = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \left(\frac{2}{M^2} \right) e^{-\beta_m t} \end{aligned} \right\} \quad (43)$$

4 F 的求解

图 4 为影响区土体水平渗透系数的 3 种特殊变化模式。模式 1 即是现有砂井地基固结理论最常用的假设, 认为强涂抹区土体水平渗透系数为定值 k_s , 弱涂抹区为定值 k_h (现有理论认为其未受扰动)。模式 2 认为, 强涂抹区土体水平渗透系数随 y 的增大而线性增大, 而弱涂抹区保持不变, 此时比较符合一般工程实际情况。模式 3 认为, 整个影响区土体的水平渗透系数均随 y 的增大而线性增大, 此时对应于实际施工时土体扰动较大的情况。3 种模式固结解的差别主要是通过式 (24) 所表示的 F 来体现的。

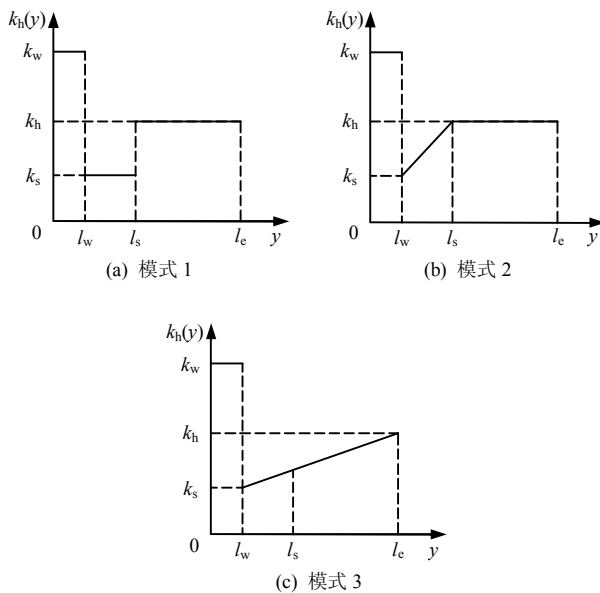


图 4 影响区土体水平渗透系数的 3 种特殊变化模式
Fig.4 Three specific variation patterns of horizontal permeability coefficient in influence zone

4.1 模式 1 的解

如图 4(a)所示, 此时 $f(y)$ 的表达式为

$$f(y) = \begin{cases} 1, & (l_w \leq y \leq l_s) \\ \alpha, & (l_s < y \leq l_e) \end{cases} \quad (44)$$

式中: $\alpha = k_h / k_s$ 。

逐步积分, 可求得 F 的解为

$$F = \left(\ln \frac{n}{s} + \alpha \ln s - \frac{3}{4} \right) \frac{n^2}{n^2 - 1} + \frac{s^2}{n^2 - 1} (1 - \alpha) \cdot \left(1 - \frac{s^2}{4n^2} \right) + \frac{\alpha}{n^2 - 1} \left(1 - \frac{1}{4n^2} \right) \quad (45)$$

式中: $s = l_s / l_w = r_s / r_w$ 。

4.2 模式 2 的解

如图 4(b)所示, 此时 $f(y)$ 的表达式为

$$f(y) = \begin{cases} \frac{s - \alpha}{s - 1} + \frac{\alpha - 1}{s - 1} \frac{y}{l_w}, & (l_w \leq y \leq l_s) \\ \alpha, & (l_s < y \leq l_e) \end{cases} \quad (46)$$

同理, 可得

$$F = \frac{\alpha}{n^2 - 1} \left\{ \frac{n^2 (s - 1)}{(s - \alpha)} \ln \left(\frac{s}{\alpha} \right) + \frac{n^2}{\alpha} \ln \left(\frac{n}{s} \right) - \frac{(s - 1)(6n^2 s - 6n^2 + 1 - s^3)}{3n^2 (\alpha - 1)} + \frac{(s - 1)(s - \alpha)}{(\alpha - 1)^2} \right. \\ \left. \left[2 \ln \alpha - \frac{s^2 - 1}{2n^2} + \frac{(s - \alpha)(s - 1)}{(\alpha - 1)n^2} - \frac{(s - \alpha)^2}{(\alpha - 1)^2 n^2} \ln \alpha \right] - \frac{3n^4 - 4n^2 s^2 + s^4}{4n^2 \alpha} \right\} \quad (47)$$

4.3 模式 3 的解

如图 4(c)所示, 此时 $f(y)$ 的表达式为

$$f(y) = \frac{n - \alpha}{n - 1} + \frac{\alpha - 1}{n - 1} \frac{y}{l_w}, \quad (l_w \leq y \leq l_e) \quad (48)$$

同时, 模式 3 是模式 2 当 $l_s = l_e$ 时的特例, 故而也可以在 $s = n$ 时对式 (47) 求解, 得到

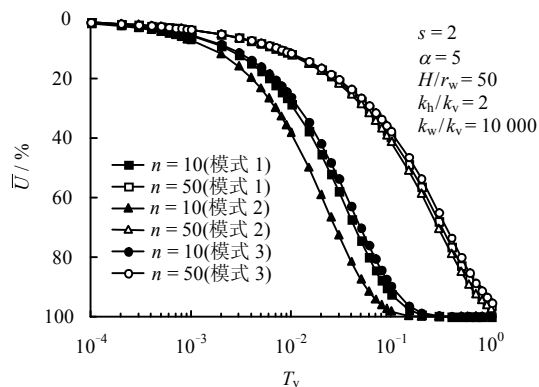
$$F = \frac{\alpha}{n^2 - 1} \left\{ \frac{n^2 (n - 1)}{(n - \alpha)} \ln \left(\frac{n}{\alpha} \right) - \frac{(n - 1)}{(\alpha - 1)} \cdot \left(\frac{1}{3n^2} + \frac{5}{3}n - 2 \right) + \frac{(n - 1)(n - \alpha)}{(\alpha - 1)^2} \right. \\ \left. \left[2 \ln \alpha - \frac{n^2 - 1}{2n^2} + \frac{(n - 1)(n - \alpha)}{(\alpha - 1)n^2} - \frac{(n - \alpha)^2}{(\alpha - 1)^2 n^2} \ln \alpha \right] \right\} \quad (49)$$

可见, F 的表达式与 s 无关, 说明此时涂抹比的大小对地基固结速率没有影响。

5 固结性状分析

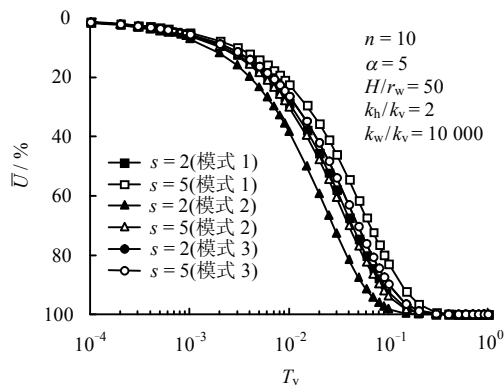
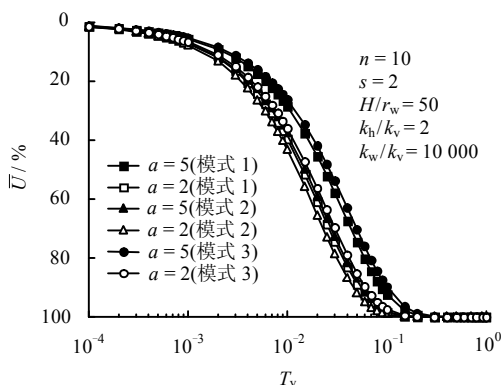
由本文求解结果可见, 影响区土体水平渗透系数变化模式不同时, 考虑影响区真实形状的砂井地基固结解答的差别在于 F 的不同, 而 F 的表达式仅仅与无量纲参数 n 、 s 、 α 等有关。本节即研究这 3 个参数对砂井地基固结性状的影响 (图 5~7, 图中横坐标 T_v 为竖向时间因子)。

图 5 为 r_w 不变而 n 分别取 10、50 时 3 种模式的地基平均总固结度 $\bar{U}$ 随时间的变化曲线。由图可以看出, n 越小 (即影响区范围越小或砂井间距越小), 地基固结越快, 但 3 种模式间固结速率的差异越大。固结速率排序是: 模式 2 > 模式 1 > 模式 3。

图 5 n 对总固结度的影响Fig.5 Influence of n on overall consolidation degree

s 反映了强涂抹区的范围, 从图 6 可以看出, s 越大, 模式 1 和模式 2 的地基固结都越慢, 但模式 3 不受影响。当 $s=2$ 时, 各模式的地基固结速率大小排序为: 模式 2 > 模式 1 > 模式 3; 当 $s=5$ 时, 其变为: 模式 2 > 模式 3 > 模式 1。

$\alpha = k_h / k_s$ 反映了土体受扰动的程度, 由图 7 可以看出, α 越小, 即扰动越小, 地基固结越快, 且 3 种模式间固结速率的差异越小, 其排序为: 模式 2 > 模式 1 > 模式 3。

图 6 s 对总固结度的影响Fig.6 Influence of s on overall consolidation degree图 7 α 对总固结度的影响Fig.7 Influence of α on overall consolidation degree

为研究本文解与现有理论的差别, 本节还对几种不同方法的结果进行了对比分析, 如图 8 所示。由图可以看出, 文献[4]的解介乎本文模式 1 和模式 3 的解之间, 且三者相当接近, 误差皆在实际工程允许的范围之内。由于文献[4]和模式 1 采用相同的土体渗透性假定, 两者的误差即反映了影响区真实形状这一因素对固结的影响, 这表明对梅花形布置的砂井地基, 现有固结解析理论^[1-8]中将砂井正六边形影响区等效为圆形的假定是可取的。从图 8 还可以看出, 在相同条件下, 本文模式 2 的地基固结最快, 即认为扰动区土体水平渗透系数连续变化比不考虑这一点的地基固结快, 而模式 3 最慢, 即一般当整个影响区土体都受到扰动时地基固结最慢。

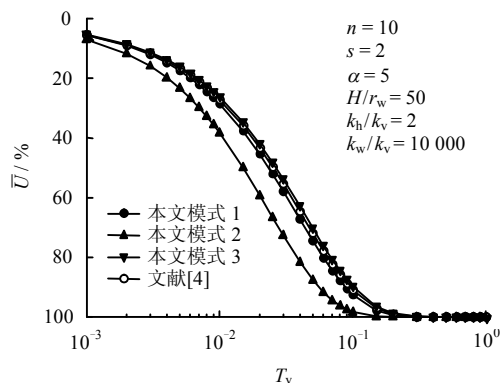


图 8 不同方法的固结度的比较

Fig.8 Comparison of consolidation degrees obtained from different methods

6 结 论

(1) 针对现有竖向排水井地基固结理论对影响区采用圆形等效假定的缺陷, 本文以正三角形布置的砂井地基为例, 研究了考虑影响区真实形状和土体水平渗透系数变化的砂井地基固结问题, 得到了满足初始和边界条件的普遍解析解。

(2) 根据实际工程中可能出现的 3 种影响区土体水平渗透系数变化模式, 分别得到各模式下的解, 其差别在于 F 的表达式不同, 而 F 仅与无量纲参数 n 、 s 、 α 等有关。

(3) 分析结果表明, 参数 n 、 s 、 α 越大, 各模式下地基固结都越慢, 模式间固结速率的差异随着 α 的减小而减小, 随着 n 和 s 的减小而增大。

(4) 在相同条件下, 本文模式 2 的地基固结最快; 现有理论解和模式 1 的解相当接近, 误差在实际工程允许的范围之内, 验证了现有砂井地基固结解析理论中对影响区采用圆形等效假定的合理性。

参考文献

- [1] HANSBO S. Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains[C]//Proceedings of the 10th ICSMFE. Stockholm, Sweden: [s. n.], 1981: 677—682.
- [2] 谢康和. 砂井地基: 固结理论、数值分析与优化设计[D]. 杭州: 浙江大学, 1987.
- [3] 谢康和, 曾国熙. 等应变条件下的砂井地基固结解析理论[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(2): 3—17.
XIE Kang-he, ZENG Guo-xi. Consolidation theories for drain wells under equal strain condition[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1989, 11(2): 3—17.
- [4] ZENG G X, XIE K H. New development of the vertical drain theories[C]//Proceedings of the 12th ICSMFE. Brazil: [s. n.], 1989: 1435—1438.
- [5] WANG X S, JIU J J. Analysis of soil consolidation by vertical drains with double porosity model[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2004, 28(14): 1385—1400.
- [6] TANG X W. A study for consolidation of ground with vertical drain system[D]. Japan: Saga University, 1998.
- [7] TANG X W, ONITSUKA K. Consolidation of ground with partially penetrated vertical drains[J]. **Geotechnical Engineering Journal**, 1998, 29(2): 209—231.
- [8] 龚晓南. 土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [9] 徐妍. 考虑涂抹区渗透系数变化的砂井地基固结理论研究[硕士论文 D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [10] 卢萌盟, 谢康和, 张玉国, 等. 考虑土体水平渗透系数变化的复合地基固结解[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(11): 1996—2001.
LU Meng-meng, XIE Kang-he, ZHANG Yu-guo, et al. Analytical solution for consolidation of composite foundation accounting for variation of soil horizontal permeability coefficient[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2008, 42(11): 1996—2001.
- [11] 卢萌盟, 谢康和, 王坤, 等. 考虑桩体内径向渗流的复合地基固结解[J]. 固体力学学报, 2009, 30(2): 155—161.
LU Meng-meng, XIE Kang-he, WANG Kun, et al. Analytical solutions for the consolidation of a compound foundation with consideration on the radial flow within the column[J]. **Chinese Journal of Solid Mechanics**, 2009, 30(2): 155—161.
- [9] 陆新征, 宋二祥, 吉林, 等. 某特深基坑考虑支护结构与土体共同作用的三维有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(4): 488—491.
LU Xin-zheng, SONG Er-xiang, JI Lin, et al. 3 dimensional FEA for the interaction between supporting structure of excavation and soil in a very deep pit[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(4): 488—491.
- [10] 范巍, 王建华, 陈锦剑. 连续墙与土体接触特性对深基坑变形分析的影响[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(12): 2118—2121.
FAN Wei, WANG Jian-hua, CHEN Jin-jian. The evaluation of deformation induced by excavation considering the properties of diaphragm-soil interface[J]. **Journal of Shanghai Jiaotong University**, 2006, 40(12): 2118—2121.
- [11] ABAQUS. Analysis user's manual[M]. USA: Abaqus Company, 2003.
- [12] 王金昌, 陈页开. ABAQUS 在土木工程中的应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.
- [13] RANDOLPH WORTH C P. Application of the failure state in undrained simple shear to the shaft capacity of driven piles[J]. **Geotechnique**, 1981, 31(1): 143—157.

上接第 2943 页

- XIAO Xiao-chun, YUAN Jin-rong, ZHU Yan-fei. Causation analysis of collapse on Singapore MRT circle line lot C824 (part 1) ——Project background and process of collapse[J]. **Modern Tunneling Technology**, 2009, 46(5): 66—72.
- [5] Hashash M A, ASCE A M. Ground movement prediction for deep excavations in soft clay[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 122(6): 474—486.
- [6] OU C Y, CHIOU D C. Three dimensional finite element analysis of deep excavations[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 122(5): 337—345.
- [7] 裴颖杰, 郑刚, 刘建起. 两侧铰接地下连续墙的试验研究及数值模拟[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 279—284.
PEI Ying-jie, ZHENG Gang, LIU Jian-qi. Model test and numerical analysis of diaphragm wall with hinged joints on both sides[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 279—284.
- [8] 姜忻良, 徐炳伟. 狭长基坑中地下连续墙的简化计算模型[J]. 工程力学, 2009, 26(增刊 1): 33—36.
JIANG Xin-liang, XU Bing-wei. Simplified analysis model of diaphragm wall in long foundation pit[J]. **Engineering Mechanics**, 2009, 26(Supp.1): 33—36.