

文章编号: 1000-7598-(2005)11-1737-06

# 未打穿砂井地基下卧层固结研究分析

张玉国<sup>1,2</sup>, 谢康和<sup>2</sup>, 王哲<sup>3</sup>, 庄迎春<sup>4</sup>

(1. 中原工学院 土木建筑系, 郑州 450007; 2. 浙江大学 岩土工程研究所, 杭州 310027;  
3. 浙江工业大学 建筑工程学院, 杭州 310020; 4. 华东勘测设计研究院, 杭州 310014)

**摘要:** 利用平均固结度普遍解, 将未打穿砂井地基转化为等效双层地基, 给出了下卧层一维固结解析解, 进而求出下卧层的平均固结度。根据该解和现有解, 编制计算机程序, 给出了几幅考虑  $c$  值和土性参数对固结的影响曲线图, 评估各解的适用性。研究表明, 该解满足工程要求, 特别是在 PTPB 排水条件下能够较好地反映  $U_z-T_v$  曲线的真实变化。

**关键词:** 未打穿砂井地基; 等效双层地基; 下卧层; 平均固结度; 解析解

中图分类号: TU 433

文献标识码: A

## Analysis of consolidation of underlying soft layer of ground by partially penetrated sand drain

ZHANG Yu-guo<sup>1,2</sup>, XIE Kang-he<sup>2</sup>, WANG Zhe<sup>3</sup>, ZHUANG Ying-chun<sup>4</sup>

(1. Department of Civil Engineering and Architecture, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310020, China; 4. East China Investigation and Design Institute, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** The ground by partially penetrated sand drain is turned into a equivalent-double-layered ground with the general solution of the average degree of consolidation; and the analytical solution of 1-D consolidation for the underlying soft layer is given; and furthermore the average degree of consolidation is obtained. Based on this solution and the present existed solutions, these relevant programs are programmed. The influence of  $c$  and soil property parameters on the consolidation process is investigated; and the relevant results are prepared in graph forms; and the applicabilities of all these solutions are evaluated. It is shown that the solution in this paper fulfills the requirements of project. Especially in the case of PTPB, the curves of  $U_z-T_v$  are more actual which drawn by this solution in comparison with the others.

**Key words:** ground by partially penetrated sand drain; equivalent-double-layered ground; the underlying soft layer; average degree of consolidation; analytical solution

## 1 前言

有关软粘土层中未打穿砂井地基固结问题的研究国内外学者已作了大量工作<sup>[1~8]</sup>, 其中部分内容涉及到下卧层固结度的计算, 例如 Hart 法、中国法、谢康和改进法、Tang xiaowu 解析解和有限单元法 (FEM) 等。在现有解中主要存在两个问题: (1) 计算结果差异较大, 在实际工程中具体选用何种解进行计算尚存在一定的争议; (2) 有的解其形式虽然比较简单, 却无法反映井阻和涂抹作用的影响, 有的解能够反映各种因素对固结的影响, 但其表达式过于复杂, 不适于工程应用。FEM 法虽然是一种好方法, 但其程序的编制非常困难, 使用者也需要专

门培训。因此有必要对下卧层固结度计算方法进行选择和改进。

本文首先对现有求解下卧层平均固结度的方法予以说明, 然后参照文[6]利用平均固结度求解未打穿非理想砂井下卧层固结问题的解析解, 最后通过算例计算对本文解与现有解进行比较分析, 确定本文解的合理性及适用范围, 并对其他解进行评估。

## 2 既有未打穿砂井地基下卧层固结度计算

关于既有未打穿砂井地基下卧层平均固结度的计算, 具体说明如下:

(1) Hart 法 1958 年 Hart 等<sup>[1]</sup>提出了迄今仍广泛采用的未打穿砂井地基平均固结度近似计算方法, 其下卧层平均固结度的计算式为

$$U_z = 1 - \alpha e^{-\beta_z t} \quad (1)$$

式中  $\alpha = \frac{8}{\pi^2}$ ;  $\beta_z = \frac{\pi^2 C_v}{4H^2}$ ;  $H$  为竖向排水距离, 在单面排水 (地基顶部透水、底部不透水, 即 PTIB) 条件下,  $H$  取整个软土层的厚度; 在双面排水 (即 PTPB) 条件下,  $H$  取整个软土层的厚度的 1/2。

(2) 中国法 对于未打穿砂井地基下卧层平均固结度的计算理论, 中国法<sup>[2, 3, 7]</sup>与 Hart 法相同, 即仍采用式 (1) 进行计算, 不同之处在于排水距离。在 PTIB 条件下  $H$  取下卧层的厚度, 在 PTPB 条件下  $H$  取下卧层的厚度的 1/2。

(3) 谢康和改进法 该法<sup>[2, 3, 7]</sup>中对于下卧层平均固结度的计算还是采用式 (1), 区别在于计算  $U_z$  时其竖向排水距离为

$$H' = (1 - a'P_w)H \quad (2)$$

式中  $a' = 1 - \sqrt{1/(1+b')}$ ;  $b' \approx \frac{\pi T_h}{(F + \pi G)T_v}$ ;  $P_w$  为贯入比,  $P_w = L/H_s$ ,  $L$  为砂井长度,  $H_s$  为整个地基的厚度。在 PTIB 条件下  $H$  取整个软土层的厚度, 在 PTPB 情况下,  $H$  取整个软土层的厚度的 1/2。

(4) Tang Xiaowu 解析解 该法提出了未打穿砂井地基固结问题的解析解<sup>[4, 5]</sup>, 其下卧层的平均固结度为

$$U_z = 1 - \frac{1}{u_0} \frac{1}{h_2} \sum_{m=1}^{\infty} A_m W_{m2} e^{-\beta_m t} \quad (3)$$

式中  $A_m$ ,  $W_{m2}$  在 PTIB (或 PTPB) 条件下取值是不同的, 具体见文<sup>[4, 5]</sup>。

(5) FEM 法 本文利用有限元软件 PDSS<sup>[2, 8]</sup>, 对未打穿砂井地基下卧层进行计算分析, 此处不再赘述。

采用 Hart 法、中国法和谢康和改进法计算下卧层平均固结度时, Hart 法偏于保守, 中国法则明显地夸大了砂井的作用, 谢康和改进法所求结果介于前二者之间, 同时, 改进法能够考虑井阻、涂抹作用对下卧层固结的影响。Tang Xiaowu 解析解和 FEM 法所求结果较为接近。

鉴于现有未打穿砂井地基下卧层平均固结度计算方法中存在的问题, 因此下面以实际工程中的非

理想井下卧层为研究对象, 展开计算分析。

### 3 未打穿砂井地基下卧层固结计算

#### 3.1 计算模型

多年来, 经各国学者的努力已经出现很多简便实用的砂井地基平均固结度的近似计算方法, 其中曾国熙等归纳各种不同条件下地基平均固结度理论解<sup>[7, 9]</sup>, 提出一个近似计算平均固结度的普遍式, 即

$$\bar{U} = 1 - \alpha e^{-\beta t} \quad (4)$$

式中  $\alpha$ ,  $\beta$  为相应条件下理论解的系数和参数。

根据式 (4), 利用平均固结度将未打穿非理想砂井地基转化为等效双层地基, 转化前后任一时刻, 地基平均固结度均保持不变, 从而将三维固结问题转化为一维固结问题, 见图 1。砂井处理范围内地基的固结度参照文<sup>[2, 10]</sup>计算, 与之相应的等效地基的固结度参照文<sup>[9]</sup>计算, 因此参照文<sup>[6]</sup>可求得等效地基的竖向固结系数。

砂井处理范围内地基的平均固结度:

$$\bar{U}_{rz} = 1 - \bar{\alpha} e^{-\beta_{rz} t} \quad (5)$$

式中  $\beta_{rz} = \frac{\pi^2 C_{v1}}{4h_1^2} + \frac{8C_{h1}}{d_e^2(F + \pi G)}$ , 竖向固结系数  $C_{v1} = \frac{k_{v1}E_{s1}}{\gamma_w}$ , 水平向固结系数  $C_{h1} = \frac{k_{h1}E_{s1}}{\gamma_w}$ ;  $F = \ln \frac{n}{s} + \frac{k_{h1}}{k_{s1}}$ ;  $\ln s - \frac{3}{4}$ ; 井阻因子  $G = \frac{k_{h1}}{k_w} \frac{h_1^2}{d_w^2}$ ,  $\frac{h_1}{d_w}$  为砂井长细比。

等效地基的平均固结度:

$$\bar{U}_z = 1 - \alpha e^{-\beta_z t} \quad (6)$$

式中  $\beta'_z = \frac{\pi^2 C'_{v1}}{4h_1^2}$ ;  $C'_{v1}$  为竖向固结系数。

考虑到任一时刻  $t$ , 式 (5) 与式 (6) 总是相等的, 利用  $t=0$  时, 可求得:

$$\bar{\alpha} = \alpha \quad (7)$$

然后, 由式 (5)~(7) 得:

$$\beta_{rz} = \beta'_z \quad (8)$$

即  $\frac{\pi^2 C'_{v1}}{4h_1^2} = \frac{\pi^2 C_{v1}}{4h_1^2} + \frac{8C_{h1}}{d_e^2(F + \pi G)}$

整理可得:

$$C'_{v1} = C_{v1} + \frac{32C_{h1}}{\pi^2(F + \pi G)} \frac{h_1^2}{d_e^2} \quad (9)$$

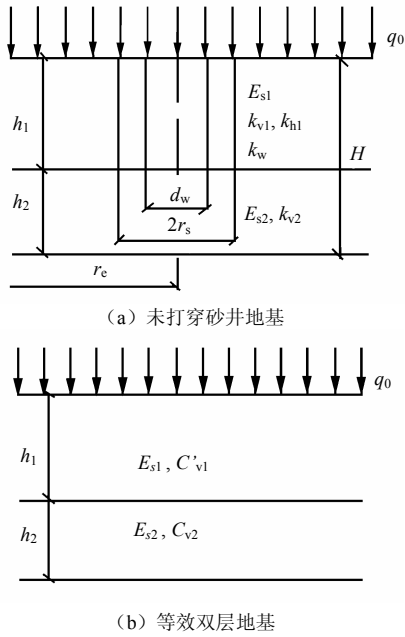


图 1 计算模型

Fig.1 The calculating model

图 1 中,  $h_i$ ,  $k_{vi}$ ,  $k_{hi}$ ,  $m_{vi}$ ,  $E_{si}$  和  $C_{vi}$  分别为土层  $i$  ( $i=1, 2$ ) 的厚度、竖向渗透系数、砂井范围内土层水平渗透系数、体积压缩系数、压缩模量及固结系数;  $r_w$ ,  $d_w$ ,  $r_e$ ,  $d_e$  和  $r_s$  分别为砂井半径及直径、砂井影响区半径及直径和涂抹区半径;  $n = r_e/r_w$ ,  $s = r_s/r_w$ ;  $H = h_1 + h_2$ , 为双层地基总厚度;  $q_0$  为均布荷载, 一次瞬时加载。

### 3.2 基本假定

(1) 除渗透系数外, 砂井范围内处理区地基中井料及涂抹区的其他性质同天然地基;

(2) 其他条件与太沙基一维固结理论假设相同。

### 3.3 固结方程及求解条件

在图 1(b)中, 等效双层地基的固结微分方程为

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = C_{vi} \frac{\partial^2 u_i}{\partial z^2}, \quad z_{i-1} \leq z \leq z_i, i=1, 2 \quad (10)$$

其求解条件为

$$\left. \begin{aligned} z_1 = 0, u_1 = 0; \quad z_1 = h_1, u_1 = u_2; \\ z_1 = h_1, \quad k'_{v1} \frac{\partial u_1}{\partial z} = k_{v2} \frac{\partial u_2}{\partial z}; \\ z_2 = H, \quad \frac{\partial u_2}{\partial z} = 0 \text{ (PTIB)}; \\ z_2 = H, \quad u_2 = 0 \text{ (PTIB)}, \\ t = 0, \quad u_1 = u_2 = u_0 = q_0 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中  $u_1, u_2$  分别为等效双层地基土层 1, 2 中任一深度、任一时刻的孔压;  $z_0=0$ ,  $z_1=h_1$ ,  $z_2=H$ 。

### 3.4 方程求解

参照文[10], 采用分离变量法, 令

$$u_i = u_i(z, t) = Z_i(z)T_i(t) \quad (12)$$

将式 (12) 代入式 (10), 并利用求解条件式 (11), 确定不同排水条件下的一般解。

#### (1) 单面排水 (PTIB)

单面排水条件下, 砂井处理范围内和下卧层中孔隙水压力的一般解为

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= \sum_{m=1}^{\infty} A_m \sin\left(\lambda_m \frac{z}{h_1}\right) e^{-\beta_m t}; \\ u_2 &= \sum_{m=1}^{\infty} A_m \frac{\sin(\lambda_m)}{\cos(\mu \lambda_m C)} \cos\left[\mu \lambda_m \left(\frac{H-z}{h_1}\right)\right] e^{-\beta_m t} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\text{式中} \quad \beta_m = C'_{v1} \lambda_m^2 = C'_{v1} \lambda_m^2 / h_1^2 \quad (14)$$

$$\tan(\lambda_m) = \frac{k'_{v1}}{k_{v2} \mu} \cot(\mu \lambda_m C) \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} C &= h_2 / h_1; \quad k'_{v1} = C'_{v1} \gamma_w / E_{s1}; \\ k_{v2} &= C_{v2} \gamma_w / E_{s2}; \quad C_{v2} = \gamma_w k_{v2} / E_{s2}; \\ \frac{k'_{v1}}{k_{v2}} &= \frac{E_{s2}}{E_{s1}} \frac{C'_{v1}}{C_{v2}} = \frac{E_{s2}}{E_{s1}} \frac{C_{v1} + \frac{32C_{h1}}{\pi^2(F + \pi G)}}{C_{v2}} \\ \mu &= \sqrt{C'_{v1} / C_{v2}} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

根据特征方程式 (15) 确定  $\lambda_m$ , 其中  $m=1, 2, \dots$ 。

最后, 利用三角函数正交性和式 (11) 中的初始条件, 参考文[11]可得:

$$A_m = \frac{4(1 - \cos \lambda_m + A_{m1})}{2\lambda_m - \sin(2\lambda_m) + A_{m2} + A_{m3}} \quad (17)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} b &= \frac{E_{s1}}{E_{s2}}; \quad A_{m1} = \frac{b}{\mu} \sin \lambda_m \tan(\mu \lambda_m C); \\ A_{m2} &= 2b C \lambda_m \frac{\sin^2(\lambda_m)}{\cos^2(\mu \lambda_m C)}; \quad A_{m3} = \frac{2b}{\mu} \sin^2(\lambda_m) \tan(\mu \lambda_m C) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

#### (2) 双面排水 (PTPB)

在双面排水条件下, 下卧层中孔隙水压力的一般解为

$$u_2 = \sum_{m=1}^{\infty} A_m \frac{\sin \lambda_m}{\sin(\mu \lambda_m C)} \sin\left[\mu \lambda_m \left(\frac{H-z}{h_1}\right)\right] e^{-\beta_m t} \quad (19)$$

式中  $\mu$ ,  $\beta_m$  同单面排水情况下的含义一样,

$$\left. \begin{aligned} A_m &= u_0 \frac{4(1 - \cos \lambda_m + A_{m1} - A_{m2})}{2\lambda_m - \sin(2\lambda_m) + A_{m3} - A_{m4}}; \\ A_{m1} &= \frac{b}{\mu} \sin(\lambda_m) \frac{1}{\sin(\mu \lambda_m C)}; A_{m2} = \frac{b}{\mu} \sin(\lambda_m) \cot(\mu \lambda_m C); \\ A_{m3} &= 2bC \lambda_m \frac{\sin^2 \lambda_m}{\sin^2(\mu \lambda_m C)}; A_{m4} = \frac{2b}{\mu} \sin^2(\lambda_m) \cot(\mu \lambda_m C) \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

$\lambda_m$  则由以下特征方程确定, 即

$$\tan(\lambda_m) = -\frac{k'_{v1}}{k_{v2}} \frac{1}{\mu} \tan(\mu \lambda_m C) \quad (21)$$

### 3.5 下卧层固结度

任一深度处的固结度 (PTIB/PTPB) 为

$$U_z(z, t) = 1 - \frac{u_z}{u_0} \quad (22)$$

下卧层的平均固结度:

$$U_z = 1 - \frac{1}{h_2} \int_{h_1}^H u_z dz = \quad (23)$$

$$1 - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{A_m}{u_0} \frac{1}{\mu \lambda_m C} \sin(\lambda_m) \tan(\mu \lambda_m C) e^{-\beta_m t} \quad (\text{PTIB})$$

$$U_z = 1 - \frac{1}{h_2} \int_{h_1}^H u_z dz = \quad (24)$$

$$1 - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{A_m}{u_0} \frac{1}{\mu \lambda_m C} \frac{\sin \lambda_m}{\sin(\mu \lambda_m C)} [1 - \cos(\mu \lambda_m C)] e^{-\beta_m t} \quad (\text{PTPB})$$

为了方便计算分析和绘图, 令上面各式中  $\beta_m t =$

$\Gamma_m T_v$ ,  $T_v = \frac{C_{v1} t}{H^2}$ , 则利用式 (9)、式 (14) 和式 (16)

可得:

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_m &= \left[ 1 + \frac{32}{\pi^2 (F + \pi G)} \frac{C_{h1}}{C_{v1}} \frac{h_1^2}{d_e^2} \right] \lambda_m^2 \frac{H^2}{h_1^2}; \\ \frac{C_{h1}}{C_{v1}} &= \frac{k_{h1} E_{s1}}{\gamma_w} \frac{\gamma_w}{k_{v1} E_{s1}} = \frac{k_{h1}}{k_{v1}}; a = \frac{k_{v2}}{k_{v1}}; \\ \mu &= \sqrt{\frac{C_{v1}}{C_{v2}} + \frac{32}{\pi^2 (F + \pi G)} \frac{k_{h1}}{k_{v2}} \frac{E_{s1}}{E_{s2}} \frac{h_1^2}{d_e^2}} = \\ &\quad \sqrt{\frac{b}{a} + \frac{32b}{\pi^2 (F + \pi G)} \frac{k_{h1}}{k_{v2}} \frac{h_1^2}{d_e^2}} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

## 4 算 例

为了更好地说明本文未打穿砂井地基下卧层固结度的解析解以及将本文解与现有解进行对比分析, 下面对 2 个工程算例进行研究。据本文解可

知, 下卧层平均固结度主要受以下无量纲参数影响:  $n, s, a, b, C, k_{h1}/k_{s1}, k_{h1}/k_{v2}, k_{h1}/k_w, h_1/d_e$  和  $h_1/H$ 。因此, 这里依据本文解和现有解, 编制计算机程序, 并利用 PDSS 软件, 对各解进行比较分析。

鉴于  $C$  值与贯入比的关系, 即  $C$  值越大, 贯入比越小, 反之  $C$  值越小贯入比则越大。本文将考察  $C$  值对下卧层平均固结度的影响, 分析各解的特点及适用范围, 同时分析土性参数 (如土的压缩模量、渗透系数) 对固结过程的影响。

算例 1. 无量纲参数  $n=15, s=1.3, a=1, b=1, k_{h1}/k_{s1}=2, k_{h1}/k_{v2}=1, k_{h1}/k_w=1/100$  和  $h_1/d_e=20/3$ ,  $C$  值取值为 0.1, 0.2, 0.5 和 5.0, 根据这些参数绘出图 2~9。图 2~5 表明, 在 PTIB 排水条件下, 本文解和 TANG Xiao-wu 解所求平均固结度基本一致, 与 FEM 法存在较小差异, 但与其他 3 种方法存在较大差异, 本文解、Tang Xiaowu 解和 FEM 法偏于保守, 更甚于 Hart 解; 中国法明显夸大了砂井的作用, 其关于下卧层固结度的计算结果大大高于其他解的计算结果, 且  $C$  值越小, 该情况表现越突出; 谢康和改进法所求固结度介于中国法和其他解之间, 当  $C \geq 5$  时谢康和法与中国法非常接近。综上所述可知: 谢康和改进法既能考虑井阻和涂抹作用, 又能较好地反映下卧层固结的真实情况, 比较适于 PTIB 排水条件下下卧层固结度的计算。

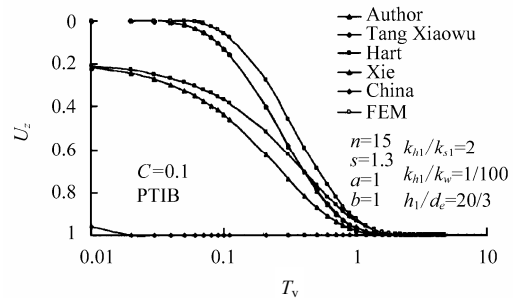


图 2  $C$  对固结过程的影响曲线  
Fig.2 The influence of  $C$  ( $C=0.1$ , PTIB) on consolidation process

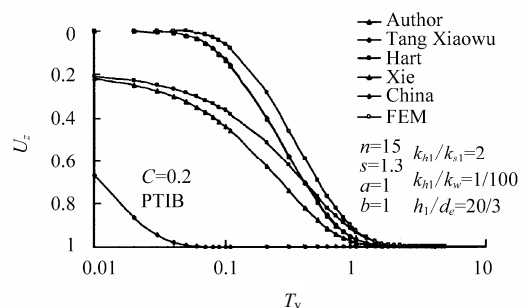


图 3  $C$  对固结过程的影响曲线  
Fig.3 The influence of  $C$  ( $C=0.2$ , PTIB) on consolidation process

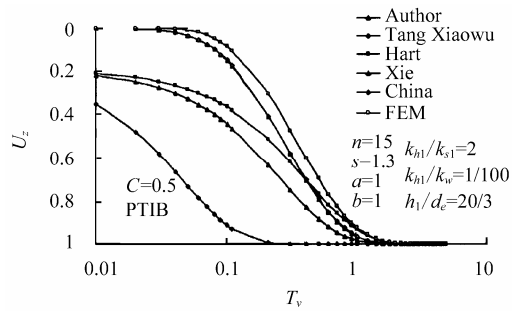


图 4  $C$  对固结过程的影响曲线  
Fig.4 The influence of  $C$  ( $C=0.5$ , PTIB) on consolidation process

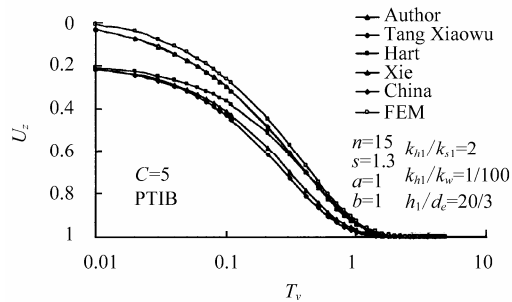


图 5  $C$  对固结过程的影响曲线  
Fig.5 The influence of  $C$  ( $C=5$ , PTIB) on consolidation process

图 6~9 反映了 PTPB 排水条件下  $C$  值对固结过程的影响。由图可知: 随着  $C$  值的改变, 本文解和 Tang Xiaowu 解所求平均固结度基本一致, 与 FEM 法略有差距, 但工程上可以忽略不计; 特别是当固结度大于 60 % 时三者所求固结度几乎完全一致, 能够较好地反映下卧层平均固结度的变化。当  $C < 5$  时, 本文解、Tang Xiaowu 解和 FEM 法所求固结度介于中国法和 Hart 法之间; 当  $C \geq 5$  时, 本文解、Tang Xiaowu 解和 FEM 法偏于保守, 但与 Hart 法所求值非常接近, 在工程上仍然是可以接受的。可见, 本文解比较适于 PTPB 条件下下卧层平均固结度的计算。

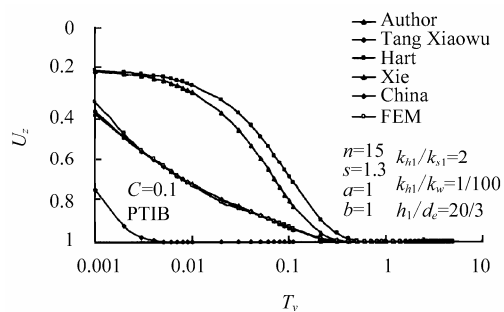


图 6  $C$  对固结过程的影响曲线  
Fig.6 The influence of  $C$  ( $C=0.1$ , PTPB) on consolidation process

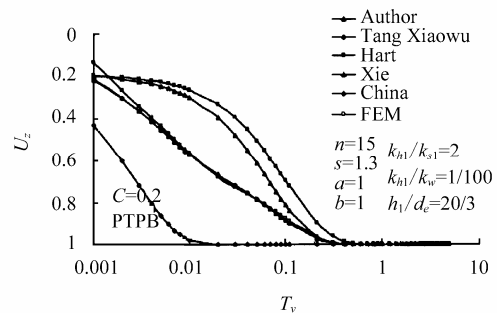


图 7  $C$  对固结过程的影响曲线  
Fig.7 The influence of  $C$  ( $C=0.2$ , PTPB) on consolidation process

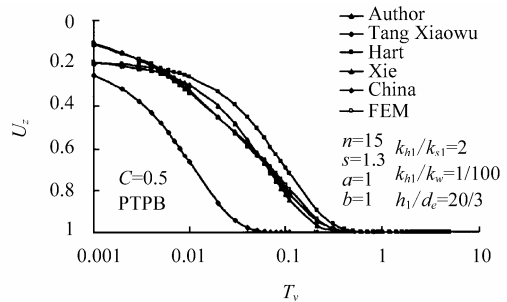


图 8  $C$  对固结过程的影响曲线  
Fig.8 The influence of  $C$  ( $C=0.5$ , PTPB) on consolidation process

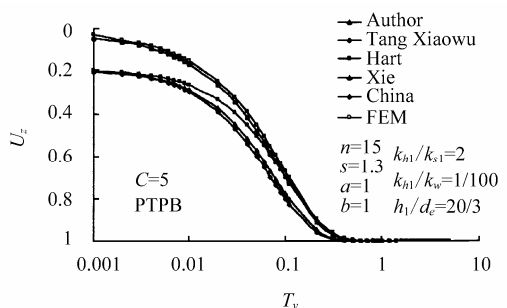
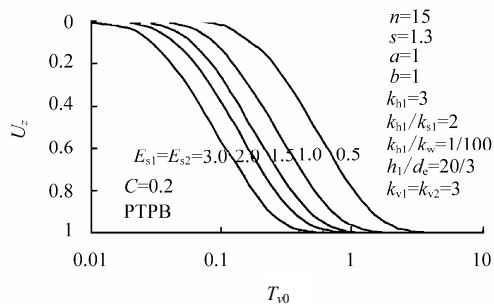
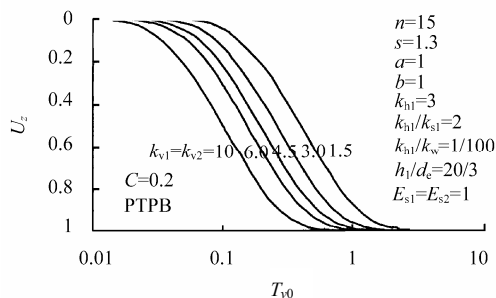


图 9  $C$  对固结过程的影响曲线  
Fig.9 The influence of  $C$  ( $C=0.5$ , PTPB) on consolidation process

算例 2. 具体参数见图 10、图 11。为了分析土性参数不同时对下卧层平均固结度计算的影响, 取  $T_v = \frac{E_{s1}}{E_{s0}} \frac{k_{v1}}{k_{v0}} T_{v0}$ ,  $T_{v0} = \frac{t}{H^2} \frac{k_{v0} E_{s0}}{\gamma_w}$ , 同时取  $E_{s0} = 1.0$ ,  $k_{v0} = 3.0$ 。当  $E_{s1} = E_{s2} = E_{s0}$ ,  $k_{v1} = k_{v2} = k_{v0}$  时, 可知  $T_v = T_{v0}$ , 而且也可以由图 10 和图 11 中分别得到当  $E_{s1} = E_{s2} = 1.0$  和  $k_{v1} = k_{v2} = 3.0$  时相应的两条  $U_z - T_{v0}$  曲线。通过分析图可知, 对于均质未打穿砂井地基, 其下卧层固结度受压缩模量和渗透系数的影响较为明显, 二者值越大, 即整个均质地基越硬或者渗透性越好, 其固结速度就越快。

图 10  $E_{s1}$  和  $E_{s2}$  对固结过程的影响曲线Fig.10 The influence of  $E_{s1}$  and  $E_{s2}$  ( $C=0.2$ , PTPB) on consolidation process图 11  $k_{v1}$  和  $k_{v2}$  对固结过程的影响曲线Fig.11 The influence of  $k_{v1}$  and  $k_{v2}$  ( $C=0.2$ , PTPB) on consolidation process

## 5 结 论

(1) 本文利用平均固结度普遍解, 将未打穿砂井转化为等效双层地基, 求出单双面排水条件下未打穿砂井下卧层固结解析解; 根据本文解和现有解, 编制计算机程序, 分析  $C$  值变化和土性参数不同时对固结过程的影响。

(2) 研究表明, 在 PTPB 排水条件下本文解与 Tang Xiaowu 解所求平均固结度基本一致, 与 FEM 法存在较小差异, 与其他三种方法存在较大差异; 本文解、Tang Xiaowu 解和 FEM 法偏保守, 且更甚于 Hart 法; 中国解明显夸大了砂井的作用,  $C$  值越小, 该情况表现越突出; 谢康和改进法则介于中国法和其他解之间, 且能够考虑井阻和涂抹作用对下卧层固结的影响。

(3) 在 PTPB 排水条件下, 本文解、Tang Xiaowu 解和 FEM 法所求平均固结度基本一致, 能较好地反映下卧层固结度的变化; 当  $C < 5$  时, 三者所求固结度介于中国法和 Hart 法之间; 当  $C \geq 5$  时, 三者所求固结度偏于保守, 但与 Hart 法非常接近, 在工程上仍是接受的。

(4) 在计算下卧层平均固结度时, 本文解和谢康和改进解都是较好的选择, 前者较适于 PTPB 排水情况, 后者较适于 PTIB 排水情况; 对于未打穿

砂井地基, 其压缩模量和渗透系数越大, 则下卧层固结也就越快。

## 参 考 文 献

- [1] Hart E G, Kondner R L, Boyer WC. (1958). Analysis for partially penetrating sand drains[J]. **Journal of Soil Mechanics Foundation Division, ASCE**, 84 (SM 4): 1 812-1-1 812-15.
- [2] 谢康和. 砂井地基固结理论、数值分析与优化设计[博士论文 D]. 浙江: 浙江大学, 1987.
- [3] ZENG Guo-xi, XIE Kang-he. New development of the vertical drain theories[J]. **Proceedings 12th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering**[C]. [s. l.]: [s. n.], 1989. 1 435-1 438.
- [4] Tang Xiaowu, Onitsuka K. Consolidation of ground with partially penetrated vertical drains[J]. **Geotechnical Engineer Journal**, 1998, 29(2): 209-231.
- [5] Tang Xiaowu. A study for consolidation of ground with vertical drain system[D]. Japan: Saga University, 1998.
- [6] 陈根媛. 多层地基的一维固结计算方法与砂井地基计算的改进建议[J]. 水利水运科学研究, 1984, (2): 1-3.  
CHEN Gen-yuan. One-dimensional consolidation of layered systems and a suggestion for improving calculation of sand-drained subsoil[J]. **Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute**, 1984, (2): 1-3.
- [7] 曾国熙, 谢康和. 砂井地基固结理论的新发展[A]. 第五届土力学及基础工程学术会议论文选集[C]. 中国土木工程学会北京: 中国建筑工业出版社. 471-478.
- [8] 谢康和, 周健. 岩土工程有限元分析理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [9] 龚晓南. 高度土力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1998.
- [10] 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.
- [11] 谢康和. 双层地基一维固结理论与应用[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(5): 24-35.  
XIE Kang-he. Theory of one dimensional consolidation double-layered ground and its applications[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1994, 16(5): 24-35.