

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2013.06.028

# 考虑径竖向渗流的刚性桩复合地基固结解析解

袁展强<sup>1</sup>, 许波<sup>2</sup>, 方鹏<sup>3</sup>, 李坦<sup>2</sup>

- (1. 核工业西南勘察设计研究院有限公司杭州分院, 浙江 杭州 310030;  
2. 深圳华森建筑设计工程顾问有限公司杭州分公司, 浙江 杭州 310012;  
3. 有色金属华东地质勘查局, 江苏 南京 210007)

**摘要:** 为评估桩土压缩模量比和置换率对刚性桩复合地基固结的影响,以砂井轴对称固结模型为基础,采用 Fourier 正弦级数和分离变量法,并且考虑扰动区压缩和附加应力沿深度任意分布,推导了径竖向同时固结条件下复合地基孔压和固结度完整表达式,分析了桩土压缩模量比和置换率对地基固结的影响,计算结果表明,固结速率随着桩土压缩模量比和置换率增大而加快,当桩体强度较高时,其对固结影响并不明显;复合地基固结以竖向为主。

**关键词:** 刚性桩; 涂抹; 置换率; 复合地基; 固结度

中图分类号: TU472.3<sup>+</sup>3

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2013)06-0134-05

## Analytical Solutions for Rigid-pile Composite Foundation in Consideration of Radial and Vertical

YUAN Zhan-qiang<sup>1</sup>, XU Bo<sup>2</sup>, FANG Peng<sup>3</sup>, LI Tan<sup>2</sup>

- (1. Hangzhou Branch of Southwest Investigation and Design Institute of China Nuclear Industry, Hangzhou, Zhejiang 310030, China;  
2. Hangzhou Branch of Huasen Architecture Design and Engineering Consultant Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310012, China;  
3. East China Geological Exploration Bureau of Nonferrous Metal, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

**Abstract:** In order to assess the effects of pile-soil compression modulus ratio and transfer ratio on the consolidation of rigid-pile composite ground, and based on the model of axisymmetric consolidation of sand-drains, the Fourier sine series method and separated variation method are adopted to deduce the explicit expressions of excess pore water pressure and consolidation degree for composite ground, and analyze the influences of pile-soil compression modulusratio and transfer ratio on ground consolidation. The calculation results show that the ground consolidation gets faster with the increase of pile-soil compression modulus ratio and transfer ratio, but it has less influence on the consolidation when the pile strength gets larger; Meanwhile, the composite ground consolidation is predominated by vertical consolidation.

**Keywords:** rigid-pile; smear; transfer ratio; composite ground, degree of consolidation

## 0 引言

在刚性桩复合地基设计中必须解决两大问题:一是承载力问题,二是沉降问题,由于刚性桩复合地基较其他复合地基形式在承载力和工后沉降有其自身的优越性,所以在建筑、交通等行业被广泛采用。现有关于刚性桩复合地基的研究成果颇为丰硕<sup>[1-5]</sup>,其成果主要以固结为主,而复合地基的固结理论是在砂井地基固结理论发展而来。笔者通过研

究发现,现有的刚性桩复合地基固结理论研究中,尚未发现现有理论能够同时考虑径向和竖向同时固结,虽然其固结微分方程是径竖向的,但本质上仍是通过 Carrilo 定理组合得到, Carrilo 方法的径竖向固结解答对于附加应力沿深度均匀分布的瞬时加载工况是适用的<sup>[6]</sup>,而对于附加应力沿深度变化这一情况,以及对于粘弹性土体,固结微分方程是非齐次的, Carrilo 方法在理论上却并不适用<sup>[7-8]</sup>。

本文以砂井地基轴对称固结模型为基础,如图

1 所示,假定刚性桩桩体为不排水桩且桩 - 土接触面不排水。基于该模型,在 Leo<sup>[9]</sup>和雷国辉<sup>[10]</sup>以及卢萌萌<sup>[5]</sup>研究基础上,本文针对瞬时加载工况下刚性桩复合地基径竖向同时固结这一情况进行理论推导和分析。

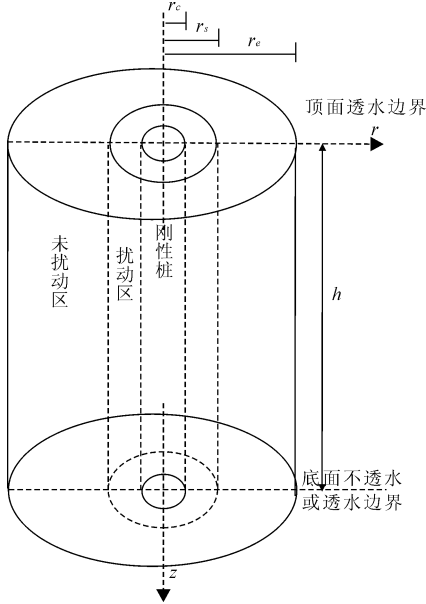


图 1 轴对称固结问题示意图

图中:  $r$  和  $z$  分别表示径向和竖向坐标;  $r_c$ 、 $r_e$  和  $r_s$  分别表示刚性桩半径(井径)和其有效影响半径以及扰动区半径。

## 1 解答的推导过程

### 1.1 本文推导假定

① 土体是均质完全饱和弹性体,土体参数不随固结过程而发生变化;② 土中孔隙水的流动服从 Darcy 定律;③ 等竖向应变条件成立;未扰动区、涂抹区同一深度处土体竖向应变相等;④ 土颗粒和水都不可压缩;⑤ 桩体与涂抹区交界面处不透水;初始孔压沿深度变化,即  $u_0 = u_0(z)$ 。

### 1.2 超孔隙水压力表达式推导

#### 1.2.1 未扰动区固结微分方程

采用等竖向假设,未扰动区土体的径竖向固结微分方程为<sup>[5]</sup>:

$$\pi(r_e^2 - r_c^2)\bar{\sigma}_s + \pi r_c^2\bar{\sigma}_c = \pi r^2\sigma \quad (1)$$

$$\frac{\bar{\sigma}_s - \bar{u}_s}{E_s} = \frac{\bar{\sigma}_c}{E_c} = \epsilon_v(z, t) = \epsilon_z(z, t) \quad (2)$$

式中: $\bar{\sigma}_s$  和  $\bar{\sigma}_c$  分别为土体与桩体中的平均总应力, $\sigma$  为加载荷载, $\epsilon_v(z, t)$  和  $\epsilon_z(z, t)$  分别表示土体的体积应变和竖向应变, $E_s$  和  $E_c$  分别表示土体和桩体的压缩模量, $\bar{u}_s$  为未扰动区土体的平均孔压。

由式(1)可得:

$$(n^2 - 1)\bar{\sigma}_s + \bar{\sigma}_c = n^2\sigma \quad (3)$$

由式(2)可得:

$$\bar{\sigma}_c = \frac{E_c}{E_s}(\bar{\sigma}_s - \bar{u}_s) \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)可得:

$$\bar{\sigma}_s = \frac{n^2\sigma + Y\bar{u}_s}{n^2 - 1 + Y} \quad (5)$$

式中: $n = \frac{r_e}{r_c}$ ,可定义为桩径比。

将式(5)代入式(2)得:

$$\epsilon_z(z, t) = \frac{\bar{\sigma}_s - \bar{u}_s}{E_s} = \frac{n^2\sigma - (n^2 - 1)\bar{u}_s}{E_s(n^2 - 1 + Y)} \quad (6)$$

考虑瞬时加载,因此上式对时间  $t$  进行求导可变换为:

$$\frac{\partial \epsilon_z(z, t)}{\partial t} = - \frac{(n^2 - 1)}{E_s(n^2 - 1 + Y)} \frac{\partial \bar{u}_s(z, t)}{\partial t} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \frac{k_h}{\gamma_w} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial u(r, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 u(r, z, t)}{\partial r^2} \right] + \frac{k_v}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u(r, z, t)}{\partial z^2} \\ & = \frac{\partial \epsilon_z(z, t)}{\partial t}, \quad r_s \leq r \leq r_e \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $u$  为任意位置和任意时刻未扰动区超静孔隙水压力; $k_h$  和  $k_v$  分别为未扰动区土体水平和竖向渗透系数, $r$  为竖向排水体中轴的径向距离, $z$  为距地面的距离, $t$  为消散时间, $\epsilon_z$  为未扰动区内土体竖向应变, $\gamma_w$  为水的重度。

为得到式(8)的解答,并满足顶面透水,底部不透水条件,采用 Fourier 正弦级数表示:

$$u(r, z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} u_n(r, t) \sin \omega_n z \quad (9)$$

$$\frac{\partial \epsilon_z(z, t)}{\partial t} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\partial \epsilon_{zn}(t)}{\partial t} \sin \omega_n z \quad (10)$$

式中: $u_n(r, t)$ 、 $\epsilon_{zn}(t)$  为对应的 Fourier 系数。

为了求解  $u_n(r, t)$ , 采用分离变量法,令  $u_n(r, t) = A_n(r)B_n(t)$ ,代入式(9)和式(10)得:

$$\begin{aligned} & \frac{k_h}{\gamma_w} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial A_n(r)}{\partial r} + \frac{\partial^2 A_n(r)}{\partial r^2} \right] + \frac{k_v}{\gamma_w} (-\omega_n^2) A_n(r) = \\ & - \frac{1}{B_n(t)} \frac{\partial \epsilon_{zn}(t)}{\partial t} = -\lambda_n \end{aligned} \quad (11)$$

上式等号左边是关于  $r$  的偏微分,右边关于  $t$  的偏微分,则  $\lambda_n$  必为一常数,即:

$$\frac{k_h}{\gamma_w} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial A_n(r)}{\partial r} + \frac{\partial^2 A_n(r)}{\partial r^2} \right] + \frac{k_v}{\gamma_w} (-\omega_n^2) A_n(r) = -\lambda_n \quad (11a)$$

$$\frac{1}{B_n(t)} \frac{\partial \epsilon_{zn}(t)}{\partial t} = \lambda_n \quad (11b)$$

式(11)的解答为:

$$u_n(r, t) = \lambda_n \phi_n [c_{1n} I_0(\mu_n r) + c_{2n} K_0(\mu_n r) + 1] B_n(t) \quad (12)$$

式中:  $I_0$  和  $K_0$  分别为零阶第一类和第二类虚宗量贝塞尔函数;  $\mu_n^2 = (k_v/k_h)\omega_n^2$ ;  $\phi_n = \gamma_w/(k_v\omega_n^2)$ ;  $\lambda_n$  为一常数,  $c_{1n}$  和  $c_{2n}$  为待定常数。

### 1.2.2 扰动区固结微分方程

$$\frac{k_{sh}}{\gamma_w} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial u_s(r, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_s(r, z, t)}{\partial r^2} \right] + \frac{k_{sv}}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_s(r, z, t)}{\partial z^2} = \frac{\partial \varepsilon_z(z, t)}{\partial t}, \quad r_c \leq r \leq r_s \quad (13)$$

式中:  $u_s$  为任意位置和任意时刻涂抹区超静孔隙水压力;  $k_{sh}$  和  $k_{sv}$  分别表示为涂抹区水平和竖向渗透系数。

为了得到式(13)的解答,同时满足顶面透水,底面不透水,仍采用 Fourier 正弦级数表示:

$$u_s(r, z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} u_{sn}(r, t) \sin \omega_n z \quad (14)$$

式中:  $u_{sn}(r, t)$  为对应的 Fourier 系数。

将式(14)代入式(13),并进一步分离变量,令

$u_{sn}(r, t) = A_{sn}(r) B_n(t)$  得:

$$\frac{k_{sh}}{\gamma_w} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial A_{sn}(r)}{\partial r} + \frac{\partial^2 A_{sn}(r)}{\partial r^2} \right] + \frac{k_{sv}}{\gamma_w} (-\omega_n^2) A_n(r) = -\frac{1}{B_n(t)} \frac{\partial \varepsilon_{zn}(t)}{\partial t} = -\lambda_n \quad (15)$$

上式的解答为:

$$u_{sn}(r, t) = \lambda_n \phi_n \left[ c_{3n} I_0(\mu_{sn} r) + c_{4n} K_0(\mu_{sn} r) + \frac{\phi_{sn}}{\phi_n} \right] B_n(t) \quad (16)$$

式中:  $\mu_{sn}^2 = (k_{sv}/k_{sh})\omega_n^2$ ,  $\phi_{sn} = \gamma_w/(k_{sv}\omega_n^2)$ ,  $c_{3n}$  和  $c_{4n}$  为待定常数。

根据未扰动区和涂抹区交界面处孔压相等,即  $u_s(r_s, r, t) = u(r_s, r, t)$  得:

$$\begin{aligned} & [c_{1n} I_0(\mu_n r_s) + c_{2n} K_0(\mu_n r_s) + 1] \\ & = c_{3n} I_0(\mu_{sn} r_s) + c_{4n} K_0(\mu_{sn} r_s) + \frac{\phi_{sn}}{\phi_n} \end{aligned} \quad (17)$$

根据未扰动区和涂抹区交界面处流量连续条件,即:

$$\begin{aligned} \frac{k_{sh}}{\gamma_w} \frac{\partial u_s(r_s, z, t)}{\partial r} & = \frac{k_h}{\gamma_w} \frac{\partial u(r_s, z, t)}{\partial r}, \\ [c_{1n} I_1(\mu_n r_s) - c_{2n} K_1(\mu_n r_s)] & = \sqrt{\frac{k_{sv} k_{sh}}{k_h k_h}} [c_{3n} I_1(\mu_{sn} r_s) - c_{4n} K_1(\mu_{sn} r_s)] \end{aligned} \quad (18)$$

根据刚性桩与涂抹区交界面处不透水条件可得:

$$\left. \frac{\partial u_s(r_c, z, t)}{\partial r} \right|_{r=r_c} = 0 \quad (19)$$

将式(16)代入式(19)得:

$$c_{3n} = \frac{K_1(\mu_{sn} r_c)}{I_1(\mu_{sn} r_c)} c_{4n} \quad (20)$$

令  $\Delta_2 = \frac{K_1(\mu_{sn} r_c)}{I_1(\mu_{sn} r_c)}$ , 并联立式(17)、式(18)和式(19)得:

$$c_{1n} \alpha_n + c_{2n} \beta_n + 1 = 0 \quad (21)$$

式中:

$$\begin{aligned} \alpha_n & = I_0(\mu_n r_s) - \sqrt{\frac{k_h k_v}{k_{sh} k_{sv}}} \frac{I_1(\mu_n r_s) [\Delta_2 I_0(\mu_{sn} r_s) + K_0(\mu_{sn} r_s)]}{\Delta_2 I_1(\mu_{sn} r_s) - K_1(\mu_{sn} r_s)} \\ \beta_n & = K_0(\mu_n r_s) + \sqrt{\frac{k_h k_v}{k_{sh} k_{sv}}} \frac{K_1(\mu_n r_s) [\Delta_2 I_0(\mu_{sn} r_s) + K_0(\mu_{sn} r_s)]}{\Delta_2 I_1(\mu_{sn} r_s) - K_1(\mu_{sn} r_s)} \end{aligned}$$

根据单桩影响区域外边界不透水条件:

$$\left. \frac{\partial u(r, z, t)}{\partial r} \right|_{r=r_c} = 0 \quad (22)$$

联立式(12)得:

$$c_{1n} I_1(\mu_n r_e) - c_{2n} K_1(\mu_n r_e) = 0 \quad (23)$$

$$\begin{cases} c_{1n} = \frac{K_1(\mu_n r_e)}{\Delta_n} \\ c_{2n} = \frac{I_1(\mu_n r_e)}{\Delta_n} \end{cases} \quad (24)$$

式中:  $\Delta_n = -\alpha_n K_1(\mu_n r_e) - \beta_n I_1(\mu_n r_e)$

将式(20)、式(23)和式(24)代入式(17),化简后可得:

$$c_{4n} = \sqrt{\frac{k_{sv} k_h}{k_v k_{sh}}} \frac{c_{1n} I_1(\mu_n r_s) - c_{2n} K_1(\mu_n r_s)}{\Delta_2 I_1(\mu_{sn} r_s) - K_1(\mu_{sn} r_s)} \quad (25)$$

### 1.3 地基整体平均固结度表达式推导

设任意深度的初始平均孔压为  $p_0$

$$\begin{aligned} \bar{u}(z, t = 0) & = \frac{\left[ \int_{r_s}^{r_e} u(r, z, t = 0) 2\pi r dr + \int_{r_c}^{r_s} u_s(r, z, t = 0) 2\pi r dr \right]}{\pi(r_e^2 - r_c^2)} \\ & = p_0 \end{aligned} \quad (26)$$

令  $\bar{u}_s(z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \bar{u}_n(t) \sin \omega_n z$ , 联立式(9)后代入式(11)可得:

$$\bar{u}_n(t) = \lambda_n \phi_n (\Omega_n + \Omega_{sn}) B_n(t) \quad (27)$$

联立式(7)和式(11b)可得:

$$-\frac{(n^2 - 1)}{E_s(n^2 - 1 + Y)} \frac{\partial \bar{u}_n(z, t)}{\partial t} = \lambda_n B_n(t) \quad (28)$$

将式(27)代入式(28)可得:

$$\frac{\partial B_n(t)}{\partial t} = -\frac{E_s(n^2 - 1 + Y)}{(n^2 - 1)\phi_n \Omega_n} B_n(t) \quad (29)$$

式中:

$$\Omega_n = 1 + \{2c_{1n}[\mu_n r_e I_1(\mu_n r_e) - \mu_n r_s I_1(\mu_n r_s)] - 2c_{2n}[\mu_n r_e K_1(\mu_n r_e) - \mu_n r_s K_1(\mu_n r_s)]\} / [(\mu_n r_e)^2 - (\mu_n r_s)^2]$$

$$\Omega_{sn} = 1 + \{2c_{3n}[\mu_{sn} r_s I_1(\mu_{sn} r_s) - \mu_{sn} r_c I_1(\mu_{sn} r_c)] - 2c_{4n}[\mu_{sn} r_s K_1(\mu_{sn} r_s) - \mu_{sn} r_c K_1(\mu_{sn} r_c)]\} / [(\mu_{sn} r_e)^2 - (\mu_{sn} r_c)^2]$$

上式为一阶线性常微分方程,其通解为:

$$B_n(t) = \frac{a_n}{\lambda_n \phi_n} e^{-\beta_n t} \quad (30)$$

$$\text{式中: } B_n = \frac{E_s(n^2 - 1 + Y)}{(n^2 - 1)\phi_n(\Omega_n + \Omega_{sn})}$$

初始平均孔压可表示为:

$$u_0(z) = \bar{u}(z, t)|_{t=0} = \int_{r_s}^{r_e} [c_{1n} I_0(\mu_n r) + c_{2n} K_0(\mu_n r) + 1] 2\pi r dr$$

$$= \sum_{n=1}^{\infty} a_n \frac{\int_{r_s}^{r_e} [c_{3n} I_0(\mu_{sn} r) + c_{4n} K_0(\mu_{sn} r) + \frac{\phi_{sn}}{\phi_n}] 2\pi r dr}{\pi(r_e^2 - r_s^2)} \sin \omega_n z$$

$$= \sum_{n=1}^{\infty} a_n (\Omega_n + \Omega_{sn}) \sin \omega_n z \quad (31)$$

假定在初始时刻、荷载瞬时施加,单桩影响区域内上部荷载全部由超孔隙水压力承担,并且由基本假定可知  $u_0 = p(z)$ ,将此式展开 Fourier 正弦级数形式可得:

$$u_0 = p(z) = \sum_{n=1}^{\infty} P_n \sin \omega_n z \quad (32)$$

$$\text{其中: } P_n = \frac{2}{h} \int_0^h p(z) \sin \omega_n z dz$$

联立式(31)和式(32)可知:

$$a_n = \frac{P_n}{\Omega_n + \Omega_{sn}} \quad (33)$$

联立式(9)、式(12)和式(14)、式(16)、式(33)可得任意时刻任意位置处未扰动区的超静孔隙水压力表达式:

$$u(r, z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{P_n}{\Omega_n + \Omega_{sn}} e^{-\beta_n t} [c_{1n} I_0(\mu_n r) + c_{2n} K_0(\mu_n r) + 1] \sin \omega_n z \quad (34)$$

$$u_s(r, z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{P_n}{\Omega_n + \Omega_{sn}} e^{-\beta_n t} [c_3 I_0(\mu_{sn} r) + c_{4n} K_0(\mu_{sn} r) + \frac{\phi_{sn}}{\phi_n}] \sin \omega_n z \quad (35)$$

#### 1.4 地基整体平均固结度

地基的整体平均固结度可以定义为<sup>[10]</sup>

$$U(T_h) = 1 - \frac{\bar{u}_g(T_h)}{\frac{1}{h} \int_0^h p(z, t) dz} \quad (36)$$

将式(14)和式(16)对径向和竖向积分并除以体积,可以得到单桩影响区域内地基的整体平均超静孔隙水压力为:

$$\bar{u}_g(T_h) = \frac{\int_0^h \left[ \int_{r_s}^{r_e} u(r, z, t) 2\pi r dr + \int_{r_w}^{r_s} u_s(r, z, t) 2\pi r dr \right] dz}{\pi(r_e^2 - r_w^2) h} \quad (37)$$

考虑地基附加球应力沿深度任意分布,将地基附加球应力表示为如下的一般形式:

$$p(z, t) = (p_a z^2 + p_b z + p_c) \quad (38)$$

则式(36)中

$$\frac{1}{h} \int_0^h p(z, t) dz = \frac{p_a}{3} h^2 + \frac{p_b}{2} h + p_c \quad (39)$$

式中:  $p_a$ 、 $p_b$  和  $p_c$  为描述地基附加球应力分布的系数。

由式(32)可得:

$$P_n = \frac{2}{h} \int_0^h (p_a z^2 + p_b z + p_c) \sin \omega_n z dz$$

双面排水即  $D = 1$  时,

$$P_n = \frac{2}{\omega_n^3 h} [-4p_a + p_a \omega_n^2 h^2 + p_b \omega_n^2 h + 2p_c \omega_n^2] \quad (40)$$

单面排水即  $D = 2$  时,

$$P_n = \frac{2}{\omega_n^3 h} [-2p_a + 2p_a \omega_n h (-1)^{n-1} + p_b \omega_n (-1)^{n-1} + p_c \omega_n^2] \quad (41)$$

将式(39)代入式(36),将式(40)或式(41)依次代入式(36)和式(37),则可以得到线性加载工况任意分布的地基附加球应力下地基的整体平均固结度。

## 2 解答的验证

本文参数的选取,  $k_h = 4 \times 10^{-9}$  m/s,  $k_h/k_v = 2.0$ ,  $k_{sh} = k_h/5$ ,  $s = 0$ ,  $n = 4$ ,  $E_s = 1\ 000$ ,  $Y = 100$ ,  $r_s = s \times r_w$ ,  $p_0 = 100$  kPa,  $h = 15$  m,  $D = 2$ 。

为验证本文所提出解答的准确性,本文选取文献[5]进行对比,该文作者考虑了扰动区水平渗透系数变化,因此将文献[5]考虑扰动区水平渗透系数退化或不变化情况,其余因素完全一样,仅考虑瞬时加载工况。

由于文献[5]在推导瞬时加载工况下假定涂抹比  $s = 0$  以及地基内附加应力沿深度不变,得到的解答能够退化成 Terzaghi 一维固结的经典解答。而本文为了对比,也令  $s = 0$  以及  $p_a = p_b = 0$  已使本文

考虑因素、加载工况以及计算参数与文献[5]完全一致。由图 2 中可以看出,本文解答与卢萌盟解答相差很小,说明本文解答推导的正确性。

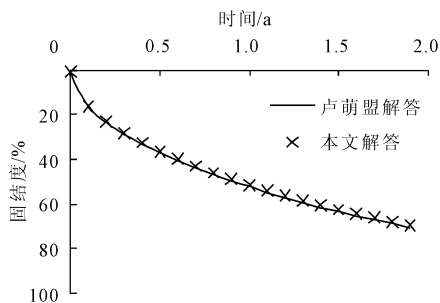


图 2 本文解答与卢萌盟解答<sup>[5]</sup>对比

### 3 计算结果分析

利用所提出的解答,本文对地基固结的一些影响因素进行了计算分析,基本计算参数为: $h = 10$  m,  $D = 2$ ,  $r_c = 0.5$  m,  $s = 1$ ,  $n = 4$ ,  $p_c = 100$  kPa,  $p_b = -p_c/(2h)$ ,  $k_h = 4 \times 10^{-9}$  m/s,  $k_h/k_v = 2$ ,  $k_v/k_{sv} = 2$ ,  $k_h/k_{sh} = 5.0$ ,  $E_s = 1\ 000$  kPa,  $Y = 100$ 。

图 3 表示附加应力沿深度梯形分布,不同的桩土压缩模量比对地基固结速率的影响曲线,从图 3 中可以看出,桩土压缩模量比  $Y$  越大,地基固结速率越快,即,桩体刚度越大,复合地基固结速率越快。

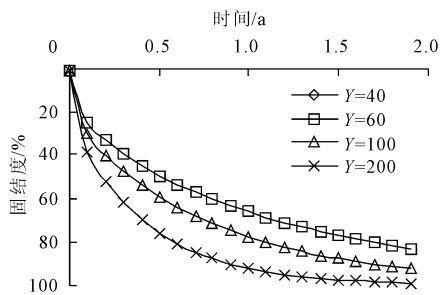


图 3 桩土压缩模量比对地基固结影响

图 4~图 5 表示附加应力沿深度梯形分布,不同的置换率对复合地基固结影响曲线,定义置换率  $m = r_c/r_e$ ,其中  $m = 0$  为天然地基,即地基中不设置增强体。从图 4~图 5 中可以看出,随着置换率  $m$  增大,单个桩体处理天然地基的范围变大,复合地基的固结速率越慢,说明当桩体布置越密集,复合地基固结速率越快,但桩体强度越大,增大面积置换率对地基固结的影响并不明显。

图 6 表示未扰动区水平渗透系数  $k_h$  对地基固结的影响曲线,为了研究未扰动区水平渗透系数对地基整体平均固结度的影响,这里令未扰动区竖向渗透系数  $k_v$  不变,从图 6 中可以看出,未扰动区水

平渗透系数  $k_h$  对地基整体平均固结度无影响,这是由于刚性桩、影响区域外表面以及顶部不透水,地基内部渗流以竖向渗流为主,复合地基内部以竖向固结为主。

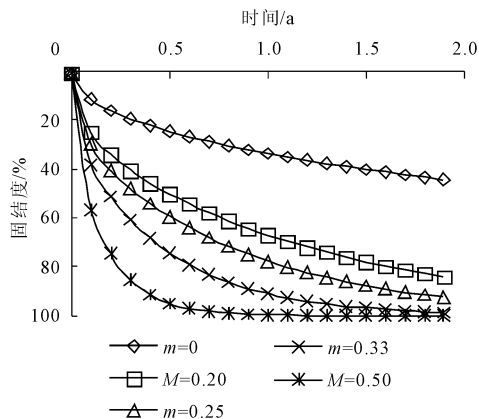


图 4 不同置换率对固结影响 ( $Y = 100$ )

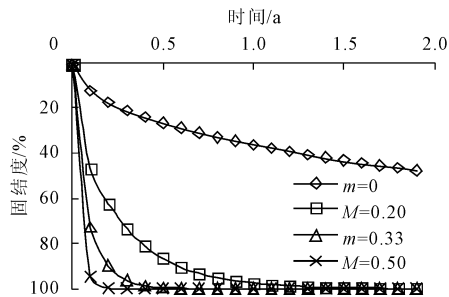


图 5 不同置换率对固结影响 ( $Y = 500$ )

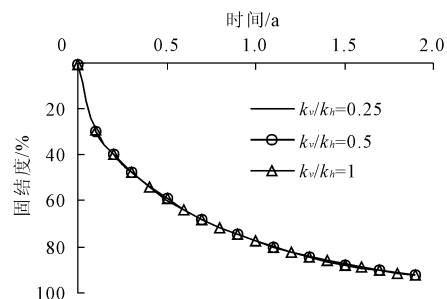


图 6 未扰动区水平渗透系数对固结的影响

### 4 结 语

本文推求了刚性桩复合地基径竖向同时固结,考虑涂抹区土体压缩、附加应力沿深度任意分布的瞬时加载条件下的固结显示解,通过计算分析得到对实际工程中刚性桩复合地基工程设计参数提出以下建议:

(1) 桩土压缩模量比越大,复合地基固结速率越快,实际工程中,宜根据预压期所要求达到的固结度以及土的压缩模量反推桩的压缩模量,来选用桩型达到节约成本的目的。(下转第 161 页)